

วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต

KASEM BUNDIT Engineering Journal

ISSN 3027-6519 (Print) ISSN 3027-6527 (Online)



คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต

ปีที่ 15 ฉบับที่ 2 พฤษภาคม-สิงหาคม 2568

Vol.15 No.2 May-August 2025

วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต

Kasem Bundit Engineering Journal (KBEJ)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต

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

วัตถุประสงค์

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

บทความที่สามารถตีพิมพ์ลงในวิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต

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

- เป็นบทความวิจัยหรือบทความทางวิชาการ ในลักษณะที่จะนำไปสู่ความก้าวหน้าทางวิชาการและวิชาชีพ
- เป็นบทความที่ไม่เคยได้รับการตีพิมพ์มาก่อนทั้งภายในประเทศหรือต่างประเทศ
- เป็นบทความที่ไม่ได้อยู่ในระหว่างพิจารณาของสื่อสิ่งพิมพ์อื่น ๆ
- เป็นบทความที่ไม่ละเมิดลิขสิทธิ์ของผู้อื่น เนื้อหาในบทความไม่ได้ลอกเลียนหรือคัดลอกมาจากผลงานวิจัยของผู้อื่นหรือจากบทความอื่นโดยไม่ได้รับอนุญาต 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 และกันยายน-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.วิญญู แสงวสินกสิกิจ	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
---------------------------	--

รองบรรณาธิการ:

ผศ.อนุชิต เจริญ	รองคณบดีฝ่ายวิจัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
-----------------	---

กองบรรณาธิการ:

ศ.ดร.โกสินทร์ จำนงไทย	ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศ.ดร.โจเซฟ เคดาร์	สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีและ นวัตกรรม มหาวิทยาลัยกรุงเทพธนบุรี
ศ.ดร.ต่อกุล กาญจนาลัย	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ศ.ดร.ปราโมทย์ เตชะอำไพ	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Prof. Dr.Belkacem Zeghamati	Laboratoire de Mathematiques et Physique des Systeme- Groupe de Mecanique Energetique, Universite de Perpignan, France
รศ.ดร.จิรนุช เสี่ยงมศักดิ์	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รศ.ดร.บุญเลิศ สือเจย	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
รศ.ดร.พิภพ สุนทรสมัย	ที่ปรึกษาคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
รศ.ดร.มนตรี คำเงิน	ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีพระจอม เกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.มนตรี ศิริปรัชญานันท์	ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ

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

ผู้ช่วยกองบรรณาธิการ:

ผศ.วรารกร เกิดทรัพย์	อ.ดร.ศักดิ์ชาย รักการ
อ.ธีรยุทธ จันทรแจ่ม	ผศ.ดร.หนึ่งฤทัย ทิมย้ายงาม
อ.อุบลรัตน์ วาริวัฒน์นะ	

ฝ่ายเลขานุการ:

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

บทบรรณาธิการ

ในยุคแห่งการเปลี่ยนแปลงทางเทคโนโลยีอย่างรวดเร็ว งานวิจัยทางวิศวกรรมยังคงเป็นรากฐานสำคัญในการขับเคลื่อนความก้าวหน้าอย่างยั่งยืน ท่ามกลางความท้าทายจากภาวะโลกร้อน เศรษฐกิจที่ผันผวน และการเปลี่ยนผ่านสู่สังคมดิจิทัล งานวิจัยมุ่งเน้นการพัฒนาาระบบอัจฉริยะ การใช้พลังงานสะอาดและมีประสิทธิภาพ ตลอดจนการสร้างสภาพแวดล้อมที่ปลอดภัย แนวโน้มสำคัญในปัจจุบัน ได้แก่ การประยุกต์ใช้ AI ในอุตสาหกรรม การพัฒนาพลังงานไฮบริดและพลังงานหมุนเวียน การสื่อสารระหว่างเครื่องจักร และการพัฒนาหุ่นยนต์เฉพาะด้าน ซึ่งสะท้อนถึงความจำเป็นของความร่วมมือทั้งในระดับสหวิทยาการและนานาชาติ

ในบริบทนี้ วารสารวิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต ยังคงทำหน้าที่เป็นเวทีเผยแพร่ผลงานวิจัยคุณภาพสูงที่ผ่านการกลั่นกรองอย่างเข้มงวด เพื่อให้ผลงานมีทั้งคุณค่าทางวิชาการและศักยภาพในการนำไปใช้ได้จริง กองบรรณาธิการมุ่งยกระดับมาตรฐานวารสารสู่ระดับชาติและนานาชาติ เป็นพื้นที่สำหรับนักวิจัยรุ่นใหม่ และเป็นกลไกสำคัญในการสนับสนุนงานวิจัยของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต ในนามกองบรรณาธิการ ขอขอบคุณผู้เขียนบทความ ผู้ทรงคุณวุฒิ และผู้อ่านทุกท่านที่มีส่วนร่วมทำให้วารสารฉบับนี้คงคุณค่าและเป็นประโยชน์ต่อสังคมวิชาชีพอย่างต่อเนื่อง

รองศาสตราจารย์ วิญญู แสงวงสินกลกิจ
บรรณาธิการวิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต

บทความวิจัย (Research Article)

การลดจำนวนแบตเตอรี่รถจักรยานยนต์ที่ไม่เป็นไปตามข้อกำหนดด้วยการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง

DEFECT REDUCTION OF MOTORCYCLE BATTERY USING DESIGN AND ANALYSIS OF EXPERIMENTS

1

รชฏ ยิ้มแย้ม และ นิธิเดช กูหาทองสัมฤทธิ์

การหาพารามิเตอร์ของระบบระดับความเสรีขั้นเดียวไม่เชิงเส้นที่ถูกเหนี่ยวนำให้เกิดการสั่นสะเทือนด้วยกระแสหมุนวนของกระแสลม

DETERMINATION OF THE PARAMETERS OF A NONLINEAR SINGLE DEGREE OF FREEDOM SYSTEM INDUCED BY VORTEX-INDUCED VIBRATIONS

17

ปริญญญา บุญมาเลิศ ธนุ จุณญา ทิพวัลย์ เพชรรัก วันชนะ ณรงค์ฤทธิเดช และ นันทิชนก หาญตะคุ

TRAVELING SALESMAN PROBLEM FOR OPTIMAL TOURIST ROUTE IN AYUTTHAYA

33

Tantikorn Pichpibul and Nareerat Prechatavanitchakul

AXIAL COMPRESSION BEHAVIOR IN BRICK MASONRY WALLS: A COMBINED EXPERIMENTAL AND ANALYTICAL STUDY

53

Muhammad Zohaib Asim, Adnan Nawaz, Tahir Mehmood, Ali Siddique, Sajid Rasheed and Asim Sultan

การประเมินการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์และประสิทธิภาพพลังงานจากกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากใบสับประดาศรีราชา

EVALUATION OF CO₂ EMISSIONS AND ENERGY EFFICIENCY FROM FUEL BRIQUETTES PRODUCTION PROCESS USING SRI RACHA PINEAPPLE LEAVES

81

ณรงค์ ชัยสงเคราะห์ ศรีกุลณัฐ นิลโนรี และ ศศิธร สรรพอคำ

บทความวิจัย (Research Article) (ต่อ)

การศึกษาการผลิตถ่านอัดแท่งจากวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการแปรรูปมะขามเปรี้ยว
ยักษ์

A STUDY ON THE PRODUCTION OF CHARCOAL BRIQUETTES FROM THE 108
WASTE MATERIALS OF GIANT TAMARIND PROCESSING

สรวิศ สอนสารี และ จูติพร เจาะจง

MIXED-INTEGER LINEAR PROGRAMMING MODEL FOR PRODUCTION 126
PLANNING AND LABOR ALLOCATION IN THE MELON FARM

Aekachai Pantong and Sirikarn Chansombut

การลดจำนวนแบตเตอรี่จักรยานยนต์ที่ไม่เป็นไปตามข้อกำหนด
ด้วยการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง

DEFECT REDUCTION OF MOTORCYCLE BATTERY USING DESIGN
AND ANALYSIS OF EXPERIMENTS

รชฎ ยิ้มแย้ม¹ และ นิติเดช กูหาทองสัมฤทธิ์²

¹นักศึกษาปริญญาโท, สาขาวิชาการจัดการวิศวกรรมและเทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยรามคำแหง, 282 ถนนรามคำแหง แขวงหัวหมาก เขตบางกะปิ กรุงเทพมหานคร
10240, 6614940009@rumail.ru.ac.th

²อาจารย์, ภาควิชาสถิติ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง,
282 ถนนรามคำแหง แขวงหัวหมาก เขตบางกะปิ กรุงเทพมหานคร 10240,
nitidetch.k@rumail.ru.ac.th

Rachata Yimyam¹ and Nitidetch Koothongsumrit²

¹Graduate Student, Engineering Management and Technology Faculty of Engineering,
Ramkhamhaeng University, 282 Ramkhamhaeng Road, Hua Mak, Bangkapi, Bangkok
10240, Thailand, 6614940009@rumail.ru.ac.th

²Lecturer, Department of Statistics, Faculty of Science, Ramkhamhaeng University,
282 Ramkhamhaeng Road, Hua Mak, Bangkapi, Bangkok 10240, Thailand,
nitidetch.k@rumail.ru.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดปริมาณแบตเตอรี่ที่ไม่เป็นไปตามข้อกำหนดในกระบวนการผลิตแบตเตอรี่จักรยานยนต์รุ่น A7 โดยกระบวนการผลิตมีปัญหาค่าความต้านทานภายในแบตเตอรี่เกินมาตรฐานที่กำหนด ซึ่งเกิดจากการตั้งแรงดันกดยึดเซลล์ ระยะหยุด และมุมขอบตัวรับชุดเซลล์ที่ไม่เหมาะสม เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวงานวิจัยนี้ได้ใช้การออกแบบการทดลองแฟกทอเรียล 2^k เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการผลิต ผลการวิจัยพบว่าปัจจัยทั้งหมดมีอิทธิพลหลักและอิทธิร่วมซึ่งส่งผลต่อค่าความต้านทานภายใน โดยควรกำหนดแรงดันกดยึดเซลล์เท่ากับ 5 เมกะปาสคาล ระยะหยุดเท่ากับ 24.25 มิลลิเมตร และมุมขอบตัวรับชุดเซลล์เท่ากับ 14 องศา เมื่อนำผลการวิจัยไปทดลองใช้จริงพบว่าสภาวะการผลิตที่เหมาะสมทำให้ค่าความต้านทานภายในเฉลี่ยไม่เกิน 1.15 มิลลิโอห์ม อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ จากการนำผลลัพธ์การวิจัยไปใช้กับกระบวนการ

ผลิตแบตเตอรี่รุ่น A7 ผลลัพธ์จากการวิจัยนี้ทำให้มูลค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นจากข้อบกพร่องแบตเตอรี่ที่ไม่ตามที่กำหนดเฉลี่ยเหลือเพียง 10,784 บาทต่อเดือน คิดเป็นการลดลงร้อยละ 64.14 เมื่อเทียบกับมูลค่าความสูญเสียก่อนการปรับปรุง

คำสำคัญ: การออกแบบการทดลอง, แบตเตอรี่, แบตเตอรี่ตะกั่วกรด, การลดจำนวนผลิตภัณฑ์ที่ไม่เป็นไปตามข้อกำหนด

ABSTRACT

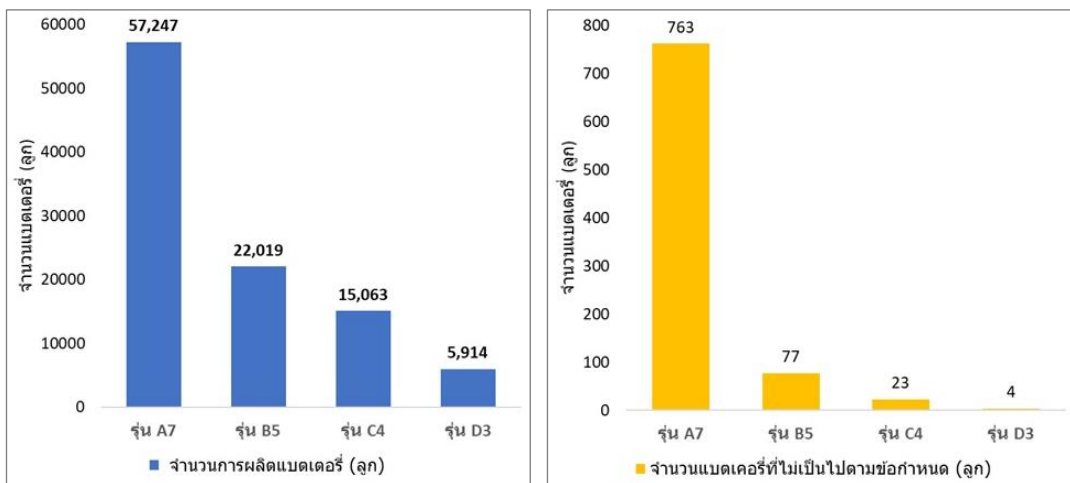
This study aims to reduce the quantity of non-compliant battery in the production process of the A7 motorcycle battery. The production process faces the issue of improper internal resistance of battery, which exceeds the standards. This problem is caused by inappropriate settings in the pressure, stopper distance, and degree of the cell holder. To solve the problem, the 2^k factorial experiment design was employed to determine the optimal production conditions. The results showed that all factors, both main and interaction effects, significantly influenced the internal resistance of the battery. The optimal conditions were found to be pressure of 5 megapascals, stopper distance of 24.25 millimeters, and cell holder angle of 14 degrees. When these optimized conditions were implemented, the average internal resistance of the battery was significantly not more than 1.15 milliohms. The implementation of the findings led to a significant reduction in the cost of defectives, with the monthly loss dropping to 10,784 Baht, a 64.14% reduction compared to the pre-improvement losses.

KEYWORDS: Experiment Design, Battery, Lead-acid Battery, Defect Reduction

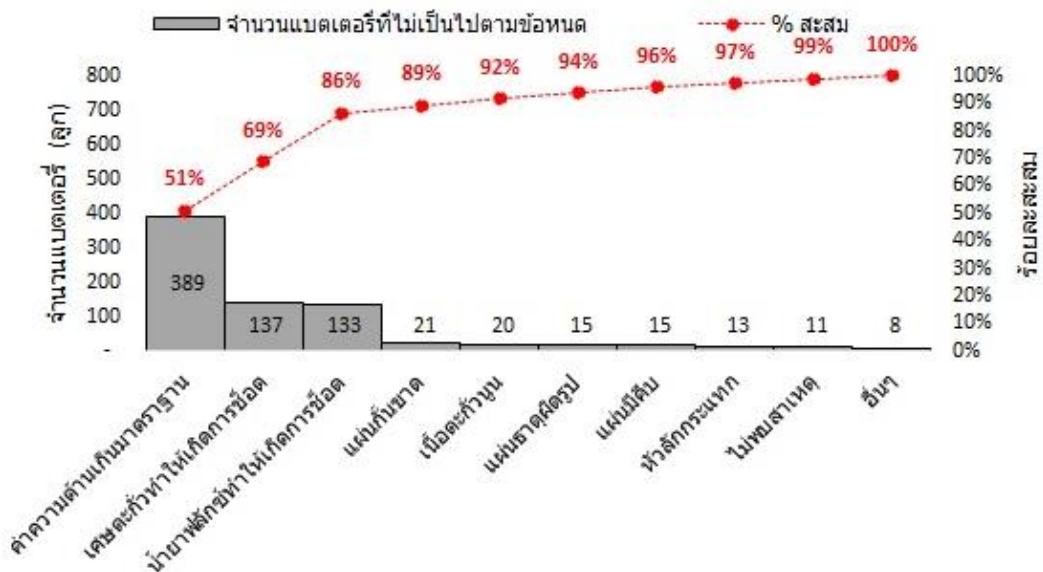
1. บทนำ

แบตเตอรี่เป็นสิ่งที่จำเป็นต่อการดำรงชีวิตเนื่องจากเป็นแหล่งกำเนิดพลังงาน ให้แสงสว่างในครัวเรือน หรือใช้เป็นประกอบจำเป็นในยานพาหนะ [1] โดยสามารถแบ่งประเภทแบตเตอรี่ได้ 2 ประเภท ได้แก่ แบตเตอรี่ประเภทที่ประจุไฟใหม่ได้และไม่ได้ โดยแบตเตอรี่ตะกั่วกรด (Lead-Acid Battery) เป็นประเภทที่สามารถประจุไฟใหม่ได้ แบตเตอรี่ประเภทนี้มีเหมาะสำหรับนำไปใช้งานกับเครื่องยนต์ สอดคล้องกับการขยายตัวอย่างต่อเนื่องของแบตเตอรี่ตะกั่วกรด ซึ่งคาดการณ์มูลค่าทางตลาดจะประมาณ 1.795 ล้านล้านบาทในปี พ.ศ. 2572 จาก 1.390 ล้านล้านบาทในปี 2567 คิดเป็นอัตราการเติบโตต่อปีแบบทบต้นอยู่ที่ร้อยละ 5.44 [2]

บริษัทกรณีศึกษาดำเนินธุรกิจเกี่ยวกับการผลิตและจำหน่ายแบตเตอรี่จักรยานยนต์ทั้งหมด 4 รุ่น ได้แก่ แบตเตอรี่รุ่น A7 B5 C4 และ D3 จากข้อมูลการผลิตในช่วงระยะเวลา 6 เดือน (เดือนมิถุนายน 2567 ถึงเดือนพฤศจิกายน 2567) พบว่าแบตเตอรี่รุ่น A7 มีปริมาณการผลิตสูงสุดจำนวนทั้งหมด 57,247 ลูก โดยมีจำนวนแบตเตอรี่ที่ไม่เป็นไปตามข้อกำหนดจำนวน 763 ลูก เฉลี่ย 127 ลูกต่อเดือน คิดเป็นร้อยละ 1.33 เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณการผลิตแบตเตอรี่รุ่น A7 และคิดเป็นมูลค่าความเสียหาย 180,300 บาท แสดงดังรูปที่ 1 นอกจากนี้เมื่อนำแบตเตอรี่รุ่น A7 ที่ไม่เป็นไปตามข้อกำหนดมาวิเคราะห์เพื่อตรวจสอบลักษณะข้อบกพร่อง พบว่ามีลักษณะข้อบกพร่องทั้งหมด 10 ลักษณะ โดยลักษณะข้อบกพร่องที่พบมากที่สุดคือแบตเตอรี่มีค่าความต้านทานภายในเกินกว่ามาตรฐานที่กำหนด จำนวน 389 ลูก คิดเป็นร้อยละสะสมเท่ากับ 51 แสดงดังรูปที่ 2 ทั้งนี้ตามมาตรฐานการออกแบบค่าความต้านทานของแบตเตอรี่รุ่น A7 ต้องมีค่าไม่เกิน 1.15 มิลลิโอห์ม



รูปที่ 1 จำนวนการผลิตแบตเตอรี่และแบตเตอรี่ที่ไม่เป็นไปตามข้อกำหนด



รูปที่ 2 ปัญหาของเบดเตอร์ที่ไม่เป็นไปตามข้อกำหนด

จากรูปที่ 2 และการใช้กฎพาเรโต 80:20 พบว่าร้อยละ 80 มาจาก 3 ปัญหาแรกที่ทำให้เกิดเบดเตอร์ที่ไม่เป็นไปตามข้อกำหนดมากที่สุด แต่จากการระดมสมองของทีมผู้บริหารของบริษัทกรณีศึกษา มีความเห็นว่าควรเลือกสาเหตุที่มีร้อยละสะสมของเบดเตอร์ที่ไม่เป็นไปตามข้อกำหนดมากที่สุดมาแก้ไขปัญหาก่อน ได้แก่ ปัญหาค่าความต้านทานภายในเกินมาตรฐานที่กำหนด ซึ่งปัญหาดังกล่าวเกิดจากการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ของเครื่องจักรที่ไม่เหมาะสม ปัจจุบันบริษัทกรณีศึกษาตั้งค่าพารามิเตอร์เครื่องจักรตามประสบการณ์และการลองผิดลองถูกของพนักงานควบคุมเครื่องจักรเท่านั้น โดยค่าความต้านทานภายในเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถของเบดเตอร์ในการรับกระแสไฟฟ้า หากค่าความต้านทานภายในต่ำ เบดเตอร์จะสามารถรับกระแสไฟฟ้าได้มาก แต่หากเบดเตอร์ที่มีค่าความต้านทานภายในสูงจะจ่ายกระแสไฟได้น้อยลง [3] ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงต้องการลดจำนวนเบดเตอร์จากรายงานยนต์ที่มีค่าความต้านทานภายในไม่เป็นไปตามข้อกำหนด

มีงานวิจัยจำนวนมากที่แก้ปัญหาลดจำนวนผลิตภัณฑ์ที่ไม่เป็นไปตามข้อกำหนดโดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ของเครื่องจักรที่เหมาะสม เช่น งานวิจัยของ Jantana and Racttanawai [4] ศึกษาการปรับตั้งค่าเครื่องขึ้นใบตะไคร้ด้วยการออกแบบการทดลองแฟกทอเรียลแบบ 2^k งานวิจัยของ Sae-sio and Sokul [5] ศึกษาการลดผลิตภัณฑ์ที่ไม่เป็นไปตามข้อกำหนดในขั้นตอนกระบวนการบรรจุโดยการประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองกรณีศึกษาบริษัทผลิตขนมขบเคี้ยว โดยใช้การออกแบบการทดลองแฟกทอเรียลแบบ 2^k งานวิจัยของ Homsri and Kongthana [6] ศึกษาการลดผลิตภัณฑ์ที่ไม่เป็นไปตามข้อกำหนดในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนฉีดพลาสติกสำหรับชิ้นส่วน

ยานยนต์โดยใช้หลักการออกแบบการทดลองแฟกทอเรียลแบบ 2^k งานวิจัยของ Visedmanee and Khadwilard [7] ศึกษาการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณน้ำมันตะไคร้หอมจากเครื่องกลั่นด้วยการออกแบบการทดลองแฟกทอเรียลแบบ 2^k งานวิจัยของ Khamteera and Teerawatthanasukul [8] ศึกษาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดเพื่อใช้ปรับตั้งเครื่องปักผ้าโดยเทคนิคการออกแบบการทดลองงานวิจัยของ Pacheco and Librelato [9] ประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรมเพื่อลดจำนวนข้อบกพร่องในกระบวนการผลิตอะไหล่เครื่องเสียงรถยนต์ จากการทบทวนวรรณกรรมในช่วงต้นพบว่าวิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลสามารถแก้ปัญหาการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของเครื่องจักรเพื่อลดจำนวนผลิตภัณฑ์ที่ไม่เป็นไปตามข้อกำหนดได้

จากความสำคัญของปัญหาในช่วงต้น การศึกษาวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดจำนวนแบตเตอรี่ที่มีค่าความต้านทานภายในไม่เป็นไปตามข้อกำหนดในกระบวนการผลิตแบตเตอรี่รุ่น A7 โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบ 2^k เพื่อหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมของการตั้งค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แก่ แรงดันกดชุดเซลล์ ระยะหยุด และ มุมขอบตัวรับชุดเซลล์ ทั้งนี้เพื่อเป็นการลดต้นทุนรวมของการดำเนินธุรกิจและเป็นการรักษาคุณภาพแบตเตอรี่ไว้ให้เป็นไปตามข้อกำหนด

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการวิจัย

2.1 การออกแบบการทดลองแฟกทอเรียล 2^k

การออกแบบการทดลองต้องทำการวางแผนและมีการควบคุมวิธีการดำเนินการอย่างเป็นระบบ ซึ่งผลที่ได้จะนำมาทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีการสถิติ โดยมีวัตถุประสงค์ในการควบคุมการเปลี่ยนแปลงตัวแปรอิสระที่เรียกว่า ปัจจัย (Factors) ของกระบวนการ จากนั้นจะพิจารณาผลลัพธ์ที่ได้ซึ่งเป็นตัวแปรตอบสนอง (Response) ในกระบวนการนั้น ๆ โดยพิจารณาจากปัจจัยที่ใส่เข้าไปในกระบวนการผลิต หรือมีอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย ซึ่งมีความสัมพันธ์ที่ได้จากกระบวนการ (Output) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติหรือไม่

การทดลองจำนวนมากจะเกี่ยวข้องกับการศึกษาผลกระทบของสองปัจจัยขึ้นไปจะต้องใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล ซึ่งเป็นการทดลองที่มีประสิทธิภาพสูง เพราะการทดลองแต่ละครั้งมีความสมบูรณ์ในตัวเอง ซึ่งการทดลองเกิดจากการรวมตัวกันของระดับปัจจัยทั้งหมดที่เป็นไปได้ในการทดลองนั้นๆ และมีประโยชน์หลายประการได้แก่ ทำให้สามารถประมาณผลของปัจจัยที่ระดับต่าง ๆ ของปัจจัยอื่นได้ รวมทั้งทำให้เราสามารถหาข้อสรุปที่สมเหตุสมผลตลอดเงื่อนไขของการทดลองได้ ส่วนผลกระทบที่เกิดขึ้นสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ผลกระทบหลัก (Main Effect) และผลกระทบอันตรกิริยา (Interaction Effect) ผลของการออกแบบแฟกทอเรียล 2 ปัจจัยที่กล่าวมาข้างต้นนั้นจะสามารถขยายไปสู่กรณีที่มีปัจจัย A มีจำนวนระดับเท่ากับ a ปัจจัย B มีจำนวนระดับเท่ากับ b ปัจจัย C มีจำนวนระดับเท่ากับ c ต่อไป เรียกว่า แฟกทอเรียล ซึ่งมีจำนวนข้อมูล

ได้ทั้งหมดในการทดลองเท่ากับ $abc...n$ และจะต้องมีการทำซ้ำอย่างน้อย 2 ครั้ง เพื่อสามารถหาค่าผลรวมของกำลังสองที่เกิดจากความผิดพลาดได้ [10]

2.2 การทดสอบสมมติฐานทางสถิติ

การทดสอบสมมติฐานทางสถิติเป็นสถิติเชิงอนุมานด้วยการศึกษาข้อมูลจากตัวอย่าง เพื่อหาข้อสรุปให้กับค่าพารามิเตอร์ของประชากร โดยพิจารณาจากค่าสถิติทดสอบว่ามีค่าเกินค่าวิกฤตหรือไม่ ถ้าค่าสถิติทดสอบมีค่าเกินค่าวิกฤตจะปฏิเสธ H_0 เช่นกรณีการทดสอบสมมติฐานทางขวา ถ้าค่าสถิติทดสอบมีค่ามากเกินค่าวิกฤตแสดงว่า ค่าสถิติทดสอบมีค่ามากพอที่จะปฏิเสธ H_0 กรณีการทดสอบสมมติฐานทางซ้ายมากกว่าค่าสถิติทดสอบมีค่าน้อยเกินค่าวิกฤตแสดงว่าค่าสถิติทดสอบมีค่าน้อยพอที่จะปฏิเสธ H_0 กรณีการทดสอบสมมติฐาน 2 ทาง ถ้าค่าสถิติทดสอบมีค่ามากหรือน้อยเกินค่าวิกฤต จะปฏิเสธ H_0 แต่ถ้าค่าสถิติทดสอบมีค่าอยู่ในบริเวณยอมรับ H_0 จะยอมรับสมมติฐาน H_0 [11] การศึกษาวิจัยนี้ใช้การทดสอบสมมติฐานทางสถิติด้วยสถิติทดสอบ Z (Z -test) การทดสอบค่าเฉลี่ยประชากร กรณีประชากร 1 กลุ่ม เมื่อไม่ทราบค่าความแปรปรวนของประชากร

3. วิธีการดำเนินงาน

3.1 ศึกษาสภาพปัจจุบันของกระบวนการ

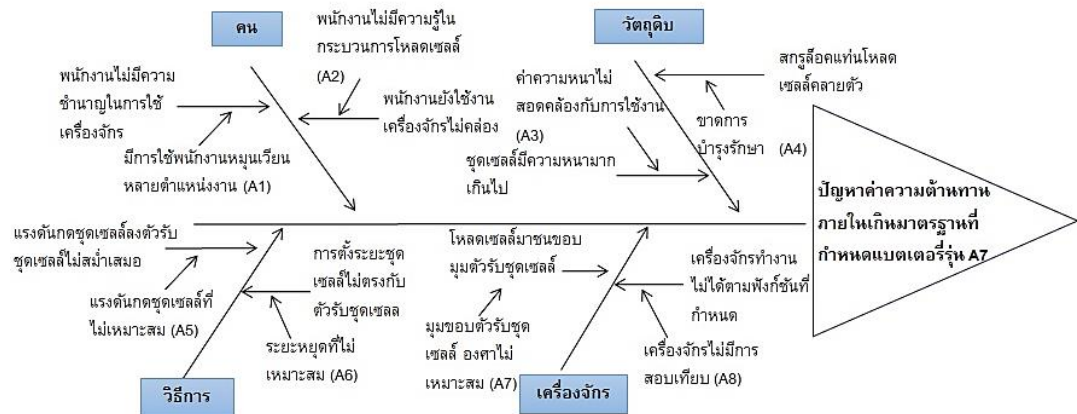
จากข้อมูลเบตเตอรีรุ่น A7 พบเบตเตอรีที่ไม่เป็นไปตามข้อกำหนดจำนวน 763 ลูก จากการผลิตจำนวนทั้งหมด 57,247 ลูก โดยสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดเบตเตอรีที่ไม่เป็นไปตามข้อกำหนดคือปัญหาค่าความต้านทานภายในเกินมาตรฐานที่กำหนด เมื่อค่ามาตรฐานความต้านทานภายในเบตเตอรีรุ่น A7 ต้องมีค่าไม่เกิน 1.15 มิลลิโอห์ม โดยค่าความต้านทานภายในเบตเตอรี เป็นตัวเลขที่อธิบายความสามารถของเบตเตอรีในการรับกระแสไฟฟ้าเมื่อค่าความต้านทานภายในต่ำเบตเตอรีจะสามารถรับกระแสไฟฟ้าได้มาก ในทางกลับกันเบตเตอรีที่มีความต้านทานภายในสูงจะจ่ายกระแสไฟได้น้อยลง ค่าความต้านทานภายในของเบตเตอรีจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการใช้งาน [12] โดยปัจจุบันบริษัทกรณีศึกษา กำลังประสบปัญหาที่มีจำนวนเบตเตอรีที่มีค่าความต้านทานภายในเกินกว่ามาตรฐานที่กำหนด ซึ่งส่งผลกระทบต่อต้นทุนรวมของการผลิต

3.2 การวิเคราะห์ปัญหา

3.2.1 การวิเคราะห์ปัญหาโดยใช้แผนผังเหตุและผล

ในขั้นตอนนี้เป็นการวิเคราะห์ปัญหาค่าความต้านทานภายในของเบตเตอรีรุ่น A7 มีค่าเกินมาตรฐานที่กำหนด โดยใช้แผนผังเหตุและผลวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาด้วยการระดมความคิดจาก

ผู้เชี่ยวชาญจากฝ่ายเทคนิค ฝ่ายการผลิต ฝ่ายควบคุมคุณภาพ และฝ่ายวิศวกรรมร่วมกันวิเคราะห์ปัญหาเพื่อหาสาเหตุต่าง ๆ ที่ก่อให้เกิดปัญหา สามารถวิเคราะห์สาเหตุต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 การวิเคราะห์สาเหตุปัญหาความต้านทานภายในเกินมาตรฐานที่กำหนด

เมื่อนำสาเหตุมาประเมินเพื่อคำนวณคะแนนความสำคัญความเสี่ยง (Risk Priority Number: RPN) ด้วยการวิเคราะห์ความล้มเหลวและผลกระทบ กำหนดเกณฑ์การประเมินสาเหตุด้านความรุนแรง (Severity) ด้านโอกาสที่จะเกิด (Occurrence) และด้านความสามารถในการตรวจสอบ (Detection) แสดงดังตารางที่ 1 เมื่อเกณฑ์การประเมินความสำคัญสาเหตุประยุกต์จากงานวิจัยของ Koothathongsumrit and Meethom [13] และงานวิจัยของ Darmawan [14] โดยการประเมินสาเหตุทั้งหมดดำเนินการด้วยการทำประชาคมติลงความเห็นโดยมีผู้ที่เกี่ยวข้องดังนี้ ผู้จัดการแผนกผลิต แบตเตอรี่รถจักรยานยนต์ หัวหน้าผลิต วิศวกรฝ่ายวิศวกรรม วิศวกรฝ่ายเทคนิค และวิศวกรฝ่ายประกันคุณภาพ

ตารางที่ 1 เกณฑ์การประเมินความสำคัญสาเหตุ

คะแนน	ความรุนแรง	โอกาสที่จะเกิด	ความสามารถในการตรวจสอบ
1	สาเหตุส่งผลกระทบน้อยมากต่อปัญหาความต้านทานภายในเกินมาตรฐานที่กำหนด	สาเหตุมีโอกาสเกิดน้อยมากต่อปัญหาความต้านทานภายในเกินมาตรฐานที่กำหนด	สาเหตุที่ก่อให้เกิดปัญหาความต้านทานภายในเกินมาตรฐานที่กำหนดสามารถตรวจสอบได้ง่ายมาก

ตารางที่ 1 เกณฑ์การประเมินความสำคัญสาเหตุ (ต่อ)

คะแนน	ความรุนแรง	โอกาสที่จะเกิด	ความสามารถในการตรวจสอบ
2	สาเหตุส่งผลกระทบต่อปัญหาความต้านทานภายในเกินมาตรฐานที่กำหนด	สาเหตุมีโอกาสเกิดน้อยต่อปัญหาความต้านทานภายในเกินมาตรฐานที่กำหนด	สาเหตุที่ก่อให้เกิดปัญหาค่าความต้านทานภายในเกินมาตรฐานที่กำหนดสามารถตรวจสอบได้ง่าย
3	สาเหตุส่งผลกระทบต่อปัญหาความต้านทานภายในเกินมาตรฐานที่กำหนด	สาเหตุมีโอกาสเกิดปานกลางต่อปัญหาความต้านทานภายในเกินมาตรฐานที่กำหนด	สาเหตุที่ก่อให้เกิดปัญหาค่าความต้านทานภายในเกินมาตรฐานที่กำหนดสามารถตรวจสอบได้ทั่วไป
4	สาเหตุส่งผลกระทบต่อปัญหาความต้านทานภายในเกินมาตรฐานที่กำหนด	สาเหตุมีโอกาสเกิดมากต่อปัญหาความต้านทานภายในเกินมาตรฐานที่กำหนด	สาเหตุที่ก่อให้เกิดปัญหาค่าความต้านทานภายในเกินมาตรฐานที่กำหนดสามารถตรวจสอบได้ยาก
5	สาเหตุส่งผลกระทบต่อปัญหาความต้านทานภายในเกินมาตรฐานที่กำหนด	สาเหตุมีโอกาสเกิดมากที่สุดต่อปัญหาความต้านทานภายในเกินมาตรฐานที่กำหนด	สาเหตุที่ก่อให้เกิดปัญหาค่าความต้านทานภายในเกินมาตรฐานที่กำหนดสามารถตรวจสอบได้ยากมาก

ตารางที่ 2 การวิเคราะห์และคำนวณคะแนนความสำคัญความเสี่ยง

สาเหตุ	การประเมินความสำคัญจากสาเหตุ			
	S	O	D	RPN
A1	2	2	2	$2 \times 2 \times 2 = 8$
A2	3	2	2	$3 \times 2 \times 2 = 12$
A3	3	2	2	$3 \times 2 \times 2 = 12$
A4	2	2	2	$2 \times 2 \times 2 = 8$
A5	5	4	3	$5 \times 4 \times 3 = 60$
A6	5	4	3	$5 \times 4 \times 3 = 60$
A7	5	4	4	$5 \times 4 \times 4 = 80$
A8	3	2	1	$3 \times 2 \times 1 = 6$

จากการการวิเคราะห์ความล้มเหลวและผลกระทบและการใช้กฎพารेटโต 80:20 พบว่าร้อยละ 80 มาจาก 3 สาเหตุแรก ได้แก่ มุมขอบตัวรับชุดเซลล์ไม่เหมาะสม (RPN = 80) แรงดันกดชุดเซลล์ไม่เหมาะสม (RPN = 60) และระยะหยุดไม่เหมาะสม (RPN = 60) โดยปัจจุบันบริษัทกรณีศึกษาตั้งค่าพารามิเตอร์ทั้ง 3 ปัจจัยตามประสบการณ์และการลองผิดลองถูก ดังนั้นการศึกษาวิจัยนี้จึงต้องการหาค่าที่เหมาะสมในการตั้งค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เพื่อแก้ปัญหาความต้านทานภายในเกินมาตรฐานที่กำหนดของแบตเตอรี่รุ่น A7 ทั้งนี้สำหรับสาเหตุที่ไม่ได้นำมาแก้ไขจะนำมาศึกษาต่ออีกครั้งภายหลังจากการปรับปรุงการผลิตด้วยการตั้งค่าพารามิเตอร์ของเครื่องจักรแล้ว

3.2.2 การออกแบบการทดลอง CRD

การศึกษาวิจัยนี้ใช้วิธีการทดลองอย่างสุ่มสมบูรณ์ (Complete Randomizes Design: CRD) เพื่อทดสอบมุมขอบตัวรับชุดเซลล์ แรงดันกดชุดเซลล์ และระยะหยุด ปัจจัยมีผลต่อค่าความต้านทานภายในหรือไม่ และเพื่อเป็นพิจารณาระดับของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความต้านทานภายในสำหรับนำไปวิเคราะห์ในขั้นตอนต่อไป ปัจจัยและระดับปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ระดับปัจจัยที่ใช้ในการศึกษาทดลอง

ปัจจัย	ตัวแปร	ระดับที่ 1	ระดับที่ 2	ระดับที่ 3	ระดับที่ 4
แรงดันกดชุดเซลล์ (เมกะปาสคาล)	Pressure	3	4	5	6
ระยะหยุด (มิลลิเมตร)	Stopper	23.25	23.75	24.25	24.75
มุมขอบตัวรับชุดเซลล์ (องศา)	Degree	8	10	12	14

จากผลการทดลองสรุปได้ว่า ปัจจัยจากการทดลองด้วยวิธีการออกแบบการทดลอง CRD ทุกปัจจัยมีผลต่อค่าความต้านทานภายใน เมื่อทำการเปรียบเทียบพหุคูณ แสดงดังรูปที่ 4 สามารถเลือกระดับปัจจัยที่ให้ค่าผลลัพธ์ค่าความต้านทานภายในต่ำสุด 2 ระดับ พบว่าแรงดันกดชุดเซลล์ระดับที่ 2 และ 3 ไม่แตกต่างกันและให้ค่าความต้านทานภายในต่ำที่สุดจึงเลือกปัจจัย 2 ระดับนี้มาวิเคราะห์ต่อไป ในทำนองเดียวกันพบว่าระยะหยุดและมุมขอบตัวรับชุดเซลล์ระดับที่ 3 และ 4 ไม่แตกต่างกันและให้ค่าความต้านทานภายในต่ำที่สุดจึงเลือกปัจจัย 2 ระดับนี้ของแต่ละปัจจัยมาวิเคราะห์ โดยระดับของปัจจัยเพื่อไปวิเคราะห์ด้วยออกแบบการทดลองแฟกทอเรียล แสดงดังตารางที่ 4

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Level	N	Mean	Grouping	Level	N	Mean	Grouping	Level	N	Mean	Grouping
1	10	6.698	A	1	10	6.971	A	1	10	5.185	A
4	10	5.714	A	2	10	4.705	B	2	10	4.618	A B
2	10	2.821	B	4	10	2.910	C	3	10	3.110	B C
3	10	2.141	B	3	10	2.424	C	4	10	1.938	C

Means that do not share a letter are significantly different.

แรงดันกดเซลล์ ระยะหยุด มุมขอบตัวรับชุดเซลล์

รูปที่ 4 การเปรียบเทียบพหุคูณ

ตารางที่ 4 ปัจจัยและระดับปัจจัยที่ใช้ในการศึกษาทดลอง

ปัจจัย	ตัวแปร	ระดับต่ำ	ระดับสูง
แรงดันกดชุดเซลล์ (เมกะปาสกาล)	Pressure	4	5
ระยะหยุด (มิลลิเมตร)	Stopper	24.25	24.75
มุมขอบตัวรับชุดเซลล์(องศา)	Degree	12	14

4. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

4.1 การวิเคราะห์อิทธิพลหลักและอิทธิพลร่วมของปัจจัย

ขั้นตอนนี้เป็น การวิเคราะห์อิทธิพลหลักและอิทธิพลร่วมของปัจจัยด้วยการวางแผนการออกแบบการทดลองด้วยแฟกทอเรียล 2^k เมื่อกำหนดจำนวนการทดลอง 10 ซ้ำ ดังนั้นจึงมีจำนวนการทดลองเท่ากับ 80 การทดลอง โดยการวางแผนการทดลองเป็นไป ด้วยวิธีการสุ่มและทำการเก็บข้อมูลค่าความต้านทานภายในจนครบทุกการทดลอง จากนั้นใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อตรวจสอบอิทธิพลและอิทธิพลร่วมของปัจจัย แสดงดังรูปที่ 5

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.972656	85.51%	84.10%	82.11%

Analysis of Variance

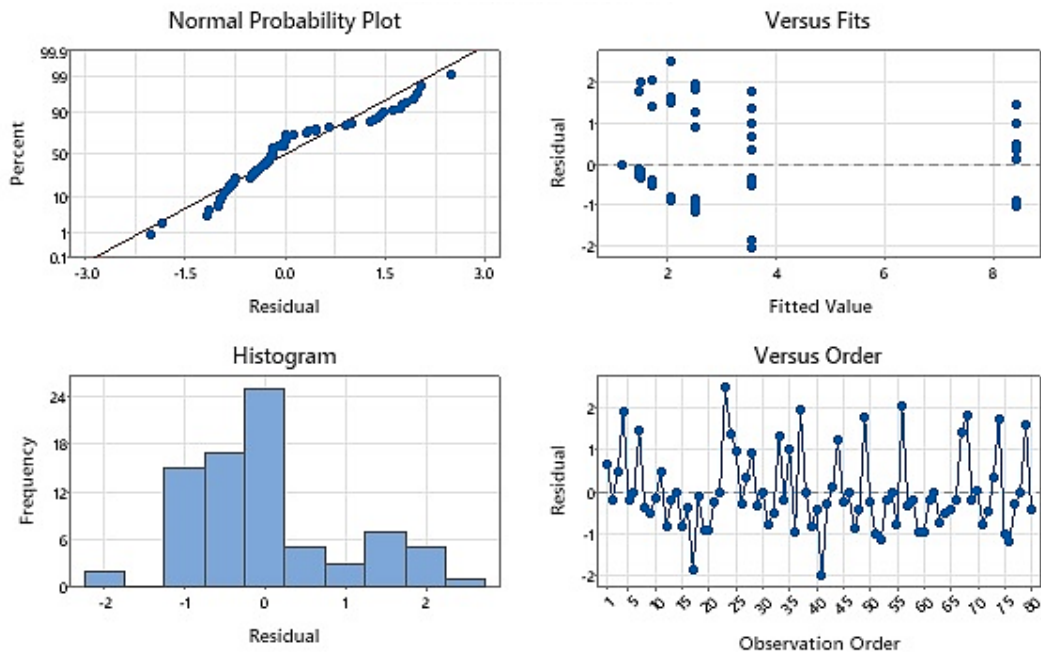
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	7	401.96	57.423	60.70	0.000
Linear	3	269.70	89.902	95.03	0.000
Pressure	1	94.59	94.591	99.98	0.000
Stopper	1	62.04	62.040	65.58	0.000
Degree	1	113.07	113.074	119.52	0.000
2-Way Interactions	3	113.70	37.899	40.06	0.000
Pressure*Stopper	1	18.23	18.231	19.27	0.000
Pressure*Degree	1	66.48	66.485	70.28	0.000
Stopper*Degree	1	28.98	28.980	30.63	0.000
3-Way Interactions	1	18.56	18.557	19.62	0.000
Pressure*Stopper*Degree	1	18.56	18.557	19.62	0.000
Error	72	68.12	0.946		
Total	79	470.07			

รูปที่ 5 การวิเคราะห์อิทธิพลหลักและอิทธิพลร่วมของปัจจัย

จากรูปที่ 5 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนพบว่าค่า P-Value ของปัจจัยแรงดันกดชุดเซลล์ ปัจจัยระยะหยุด และปัจจัยมุมขอบตัวรับชุดเซลล์ มีค่าเท่ากับ 0.000 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่าระดับนัยสำคัญ (α) ที่กำหนดคือ 0.05 ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าทั้งสามปัจจัยมีอิทธิพลหลัก นอกจากนี้พบว่าค่า P-Value ของปัจจัยร่วมก็มีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญจึงสรุปได้ว่าปัจจัยทั้งหมดมีอิทธิพลร่วมต่อค่าความต้านทานภายใน อย่างมีนัยสำคัญ ค่า R-sq เท่ากับร้อยละ 85.51 หมายถึงตัวแบบคณิตศาสตร์ที่ได้มานั้น สามารถอธิบายความผันแปรของค่าตัวแปรตอบสนองซึ่งในที่นี้คือค่าความต้านทานภายใน ที่กระจายรอบค่าเฉลี่ยได้เป็นอย่างดีซึ่งถ้าค่า R-sq มีค่ามาก หมายความว่าตัวแบบที่ได้สามารถคำนวณค่าได้ใกล้เคียงกับค่าสังเกตมาก และเมื่อพิจารณา ค่า R-sq (adj) เท่ากับร้อยละ 84.10 พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับค่า R-sq เท่ากับร้อยละ 85.51 แสดงได้ว่าจำนวนข้อมูลที่เก็บมาจากการทดลองมีจำนวนที่เพียงพอเหมาะสม

ต่อมานำค่าส่วนตกค้างมาทดสอบความพอเพียงของตัวแบบ แสดงดังรูปที่ 6 พบว่า Normal Probability Plot มีการกระจายของค่าความผิดพลาดของข้อมูลมีการกระจายตามแนวเส้นตรงจึงทำให้สรุปได้ค่าค่าความผิดพลาดมีการกระจายแบบปกติ การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล (Independent) Versus Order พบว่าการกระจายตัวของค่าความผิดพลาดมีรูปแบบการกระจายเป็นอิสระ ไม่สามารถทำนายรูปแบบได้แน่นอน แสดงให้เห็นว่าค่าความผิดพลาดมีความเป็นอิสระต่อกัน การตรวจสอบค่าเฉลี่ยของค่าความผิดพลาดโดยพิจารณาจากแผนภูมิการกระจายของ

ค่าความผิดพลาด Versus Fits พบว่าค่าความผิดพลาดในแต่ละระดับมีการกระจายตัวในด้านบวกและลบมีความสมดุลกัน จึงประมาณได้ว่าค่าเฉลี่ยของค่าความผิดพลาดมีค่าใกล้เคียงศูนย์ สรุปได้ว่าข้อมูลการทดลองครั้งนี้มีความเหมาะสมสามารถนำผลการวิจัยไปวิเคราะห์ในขั้นตอนต่อไปได้



รูปที่ 6 การตรวจสอบความเหมาะสมของตัวแบบ

4.2 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัย

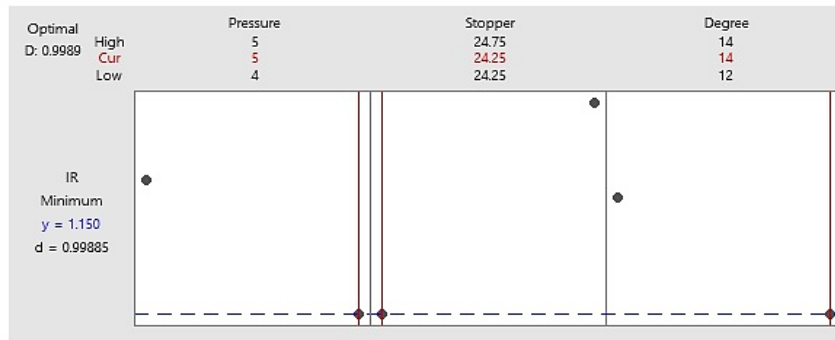
ในขั้นตอนนี้เป็นการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัยซึ่งทำให้ค่าความต้านทานภายในเบี่ยงเบนจากเป้าหมายต่ำสุด โดยกำหนดเป้าหมายค่าความต้านทานภายในของแบตเตอรี่รุ่น A7 ไม่เกิน 1.15 มิลลิโอห์ม ผลการหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัย แสดงดังรูปที่ 7 สรุปได้ว่าควรกำหนดให้แรงดันกวดชุดเซลล์เท่ากับ 5 เมกะปาสคาล ระยะหยุดเท่ากับ 24.25 มิลลิเมตร และมุมขอบตัวรับชุดเซลล์เท่ากับ 14 องศา จึงทำให้ได้ค่าความต้านทานภายในของแบตเตอรี่เป็นไปตามมาตรฐานข้อกำหนดของบริษัทการศึกษา

Multiple Response Prediction

Variable Setting

Pressure	5
Stopper	24.25
Degree	14

Response	Fit	SE Fit	95% CI	95% PI
IR	1.150	0.308	(0.537, 1.763)	(-0.884, 3.184)



รูปที่ 7 ผลการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัย

4.3 การทดสอบสมมติฐานเพื่อยืนยันปัจจัย

ในขั้นตอนนี้เป็น การทดสอบสมมติฐานทางสถิติเพื่อยืนยันว่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมทำให้ค่าความต้านทานภายในเป็นไปตามข้อกำหนดหรือไม่ โดยในงานวิจัยนี้กำหนดสมมติฐานหลัก $H_0 : \mu \leq 1.15$ หมายถึงค่าความต้านทานภายในเฉลี่ยมีค่าไม่เกิน 1.15 มิลลิโอห์ม และสมมติฐานรอง $H_1 : \mu > 1.15$ หมายถึงค่าความต้านทานภายในเฉลี่ยมีค่ามากกว่า 1.15 มิลลิโอห์ม พร้อมทดลองผลิตแบตเตอรี่ เมื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์แรงดันกดชุดเซลล์เท่ากับ 5 เมกะปาสคาล ระยะหยุดเท่ากับ 24.25 มิลลิเมตร และมุมขอบตัวรับชุดเซลล์เท่ากับ 14 องศา จากนั้นสุ่มตัวอย่างแบตเตอรี่จำนวน 30 ลูก เพื่อมาทดสอบสมมติฐานทางสถิติ ผลการวิเคราะห์พบว่าตัวอย่างแบตเตอรี่มีค่าความต้านทานภายในเฉลี่ยเท่ากับ 1.14 มิลลิโอห์ม และนำไปทดสอบสมมติฐานทางสถิติด้วยสถิติทดสอบ Z-test พบว่ามีค่า P-Value เท่ากับ 0.855 ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ (α) ที่กำหนดคือ 0.05 ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าการทดสอบสมมติฐานทางสถิติสามารถยอมรับสมมติฐานหลัก กล่าวคือค่าความต้านทานภายในเฉลี่ยไม่เกิน 1.15 มิลลิโอห์ม แสดงดังรูปที่ 8

Descriptive Statistics

N	Mean	StDev	SE Mean	95% Lower Bound for μ
30	1.14033	0.00890	0.00913	1.12532

μ : population mean of IR
Known standard deviation = 0.05

Test

Null hypothesis	$H_0: \mu = 1.15$
Alternative hypothesis	$H_1: \mu > 1.15$

Z-Value	P-Value
-1.06	0.855

รูปที่ 8 ผลการทดสอบสมมติฐานทางสถิติ

5. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้นำทฤษฎีการออกแบบการทดลองมาประยุกต์ใช้ในโรงงานกรณีศึกษาแบตเตอรี่เพื่อแก้ไขปัญหาแบตเตอรี่ที่ไม่เป็นไปตามข้อกำหนดในกระบวนการผลิตซึ่งมีสาเหตุมาจากการตั้งค่าพารามิเตอร์เครื่องจักรที่ไม่เหมาะสม โดยการวิจัยนี้เลือกใช้การออกแบบการทดลองด้วยวิธีการทดลองอย่างสุ่มสมบูรณ์ การออกแบบการทดลองด้วยแฟกทอเรียล 2^k และการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด พร้อมทั้งการยืนยันระดับที่เหมาะสมของปัจจัยด้วยการทดสอบสมมติฐานทางสถิติ ผลการวิจัยพบว่าปัจจัยทั้งหมดมีอิทธิพลหลักและอิทธิพลร่วมต่อค่าความต้านทานภายในอย่างมีนัยสำคัญ และควรกำหนดค่าพารามิเตอร์แรงดันกดยึดเซลล์เท่ากับ 5 เมกะปาสคาล ระยะหยุดเท่ากับ 24.25 มิลลิเมตร และมุมขอบตัวรับชุดเซลล์เท่ากับ 14 องศา จากการนำผลลัพธ์การวิจัยไปใช้กับกระบวนการผลิตแบตเตอรี่รุ่น A7 สามารถช่วยลดแบตเตอรี่ที่ไม่เป็นไปตามข้อกำหนดเฉลี่ยจาก 127 ลูกต่อเดือน ลดลงเหลือ 46 ลูกต่อเดือน ร้อยละแบตเตอรี่ที่ไม่เป็นไปตามข้อกำหนดลดลงเหลือ 0.51 (จากเดิม 1.33) ลดลงคิดเป็นร้อยละ 61.66 จากยอดเฉลี่ยจำนวนผลิตรวม 8,876 ลูกต่อเดือน โดยมีมูลค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นจากข้อบกพร่องของแบตเตอรี่ที่ไม่เป็นไปตามที่กำหนดเฉลี่ยจาก 30,075 บาทต่อเดือน ลดลงเหลือ 10,784 บาทต่อเดือน คิดเป็นร้อยละ 64.14 สามารถลดต้นทุน 19,291 บาทต่อเดือน หรือ 231,492 บาทต่อปี และจำนวนแบตเตอรี่รถจักรยานยนต์ที่ไม่เป็นไปตามข้อกำหนดที่ลดลงนั้นเป็นเหตุจากการทดลองลดปัญหาค่าความต้านทานภายในเกินมาตรฐานที่กำหนดของแบตเตอรี่รุ่น A7 เท่านั้น

6. ข้อเสนอแนะ

สามารถนำหลักการออกแบบการทดลองนี้ไปประยุกต์ใช้เพื่อค้นหาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการเกิดแบตเตอรี่ที่ไม่เป็นไปตามข้อกำหนดและสามารถหาค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสม ในกระบวนการผลิตที่เป็นกระบวนการไหลชุดเซลล์ลงตัวรับชุดเซลล์กับรุ่นอื่นได้ นอกจากนี้ยังสามารถนำสาเหตุจากตารางการวิเคราะห์ความสำคัญที่ไม่ได้นำมาแก้ไขมาทำการวิเคราะห์ในการวิจัยครั้งต่อไป

References

- [1] Feng J, Guo P, Xu, G. Barriers to electric vehicle battery recycling in a circular economy: an interpretive structural modeling. *Journal of Cleaner Production* 2024;469:143224.
- [2] Exactitude Consultancy. Lead acid battery market [Internet]. 2023 [cited 2023 Apr 15]. Available from: <https://exactitudeconsultancy.com/th/reports/15199/lead-acid-battery-market>.

- [3] Krivík P, Baca P, Kazelle J. Effect of ageing on the impedance of the lead-acid battery. *Journal of Energy Storage* 2021;36:102382.
- [4] Jantana Y, Racttanawai N. Optimizing factors for lemongrass slicer using design of experiment. *Science and technology Nakhon Sawan Rajabhat University Journal* 2022;14(19):83-95. (In Thai)
- [5] Sae-sio B, Sokul N. Reducing defects in packaging by applying experimental results: a case study of snack company. *Industrial Technology Lampang Rajabhat University Journal* 2016;9(2):30-44. (In Thai)
- [6] Homsri P, Kongthana J. Design of experiment (DOE) to reduce in plastic injection process of automotive parts. *Kasem Bundit Engineering Journal* 2013;3(2):73-95. (In Thai)
- [7] Visedmanee J, Khadwilard A. Analysis of factors affecting the volume of lemongrass oil from distiller by experimental design. *RMUTP Research Journal Sciences and Technology* 2017;11(1):34-42. (In Thai)
- [8] Khamteera J, Teerawatthanasukul I. Optimization for sewing machine setup using experimental design technique. *RMUTP Research Journal Sciences and Technology* 2015;9(1):102-11. (In Thai)
- [9] Pacheco D, Librelato TP. Optimising process and product performance in complex systems: a study in the automotive industry. *International Journal of Quality and Reliability Management* 2023;40(4):922-41.
- [10] Jankovic A, Chaudhary G, Goia F. Designing the design of experiments (DOE) – an investigation on the influence of different factorial designs on the characterization of complex systems. *Energy and Buildings* 2021;250:111298.
- [11] Koohathongsumrit N, Meethom W. An integrated approach of fuzzy risk assessment model and data envelopment analysis for route selection in multimodal transportation networks. *Expert Systems with Applications* 2021;171:114342.
- [12] Ketjoy N, Khaosaad N, Sirisamphanwong C, Chorchong T. Degradation of photovoltaic module peak power from internal resistance effect. *Journal of Science and Technology Mahasarakham University* 2013;32(5):547-54. (In Thai)
- [13] Koohathongsumrit N, Meethom W. Route selection in multimodal transportation networks: a hybrid multiple criteria decision-making approach. *Journal of Industrial and Production Engineering* 2021;38(3):171-85.

- [14] Darmawan D. The failure mode and effect analysis of islamic banking product marketing in Indonesia. Journal of Islamic Marketing 2025;16(1):290-305.

ประวัติผู้เขียนบทความ



รชฏ ยิ้มแอ้ม นักศึกษาปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการวิศวกรรมและเทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง เลขที่ 282 ถนนรามคำแหง แขวงหัวหมาก เขตบางกะปิ กรุงเทพมหานคร 10240 E-mail: 6614940009@rumail.ru.ac.th



รศ.ดร.นิธิเดช คูหาทองสัมฤทธิ์ ภาควิชาสถิติ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง เลขที่ 282 ถนนรามคำแหง แขวงหัวหมาก เขตบางกะปิ กรุงเทพมหานคร 10240 E-mail: nitidetech.k@rumail.ru.ac.th

Article History:

Received: February 16, 2025

Revised: April 12, 2025

Accepted: May 21, 2025

การหาพารามิเตอร์ของระบบระดับความเสรีขั้นเดียวไม่เชิงเส้น
ที่ถูกเหนี่ยวนำให้เกิดการสั่นสะเทือนด้วยกระแสหมุนวนของกระแสลม
**DETERMINATION OF THE PARAMETERS OF A NONLINEAR SINGLE
DEGREE OF FREEDOM SYSTEM INDUCED BY VORTEX-INDUCED
VIBRATIONS**

ปริญญญา บุญมาเลิศ¹ ธนู จุญฉาย² ทิพวัลย์ เพชรรัก³ วันชนะ ณรงค์ฤทธิเดช⁴
และ นันท์ชนก หาญตะคุ⁵

^{1,2,3}อาจารย์, สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต

1761 ถนนพัฒนาการ เขตสวนหลวง กรุงเทพฯ 10250,

¹parinya.boo@kbu.ac.th, ²thanu.cho@kbu.ac.th, ³thippawan.phe@kbu.ac.th

^{4,5}อาจารย์, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต

1761 ถนนพัฒนาการ เขตสวนหลวง กรุงเทพฯ 10250,

⁴wanchana.nar@kbu.ac.th, ⁵nunchanok.han@kbu.ac.th

Parinya Boonmalert¹, Thanu Chouychai², Thippawan Phetrak³, Wanchana Narongritidej⁴
and Nunchanok Hantaku⁵

^{1,2,3}Lecturer, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering,
Kasem Bundit University 1761 Pattanakarn Rd. Suanluang, Bangkok 10250, Thailand,

¹parinya.boo@kbu.ac.th, ²thanu.cho@kbu.ac.th, ³thippawan.phe@kbu.ac.th,

^{4,5}Lecturer, Faculty of Engineering, Kasem Bundit University

1761 Pattanakarn Rd. Suanluang, Bangkok 10250, Thailand,

⁴wanchana.nar@kbu.ac.th, ⁵nunchanok.han@kbu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอวิธีการหาพารามิเตอร์ไม่เชิงเส้นของโครงสร้างที่เกิดการสั่นสะเทือนเนื่องจากถูกเหนี่ยวนำด้วยกระแสหมุนวนของกระแสลมที่พัดผ่านและแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของพฤติกรรมชาติของระบบที่ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบเชิงเส้นและระบบที่ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไม่เชิงเส้น ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสแกนแลน ซึ่งเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไม่เชิงเส้นซึ่งให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงเส้น

ส่วนการหาพารามิเตอร์ไม่เชิงเส้นของระบบได้นำอนุกรมของวอลเตอร์รามาประยุกต์ใช้ โดยใช้เป็นแนวทางในการออกแบบเพื่อให้ได้ความถี่ธรรมชาติที่เหมาะสมตามต้องการ ผลการคำนวณตามตัวอย่างบางส่วนของสแกนแลน พบว่าการหาพารามิเตอร์ด้วยวิธีของสแกนแลน ได้ผลการคำนวณที่ถูกต้อง ส่วนพารามิเตอร์ของความแข็งดิ่งของอากาศที่ปรับปรุงเพิ่มเข้ามาสามารถหาได้ด้วยวิธีหาค่าความถี่ธรรมชาติแบบหนึ่งโดยการประยุกต์ใช้อันุกรมของวอลเตอร์รา พบว่าผลการคำนวณมีค่าถูกต้องเช่นกัน จากค่าพารามิเตอร์สมมติที่ใช้ในการคำนวณพบว่าความถี่ธรรมชาติของระบบที่ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงเส้นมีค่า 84.01 rad/sec เมื่อเทียบกับความถี่ธรรมชาติของระบบที่ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไม่เชิงเส้นมีค่า 85.18 rad/sec ซึ่งมีความแตกต่างกัน 1.37% ความแตกต่างที่เกิดขึ้นจากแบบจำลองไม่เชิงเส้นได้รวมเอาค่าความแข็งดิ่งของอากาศขณะที่โครงสร้างเกิดการสั่นสะเทือนเข้าไปด้วย จึงทำให้ความถี่ธรรมชาติของระบบไม่เชิงเส้นมีค่ามากกว่าค่าความถี่ของระบบเชิงเส้นที่มีแต่ค่าความแข็งดิ่งของโครงสร้างเพียงอย่างเดียว จากหลักการนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อหลีกเลี่ยงความเสียหายของโครงสร้างที่เกิดการสั่นสะเทือนที่ความถี่ธรรมชาติ เมื่อเกิดการสั่นสะเทือนที่เกิดจากลม หรือนำการสั่นสะเทือนไปใช้ให้เป็นประโยชน์ เช่น การผลิตไฟฟ้าจากกังหันลมแบบไรโบพัดเพื่อกำหนดความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่แม่นยำ เป็นต้น

คำสำคัญ: การสั่นสะเทือน, กระแสหมุนวน, ความถี่ธรรมชาติ, อนุกรมของวอลเตอร์รา

ABSTRACT

This study presents a method for identifying the nonlinear parameters of a structure subjected to wind-induced vibrations caused by vortex shedding. It highlights the differences in natural frequencies between systems modeled using linear and nonlinear mathematical approaches. In this research, the Scanlan model, a nonlinear aerodynamic model, was selected due to its ability to provide more accurate results than linear models. To estimate the nonlinear parameters of the system, the Volterra series was applied as a theoretical framework to design for a target natural frequency. Partial results based on the Scanlan model showed that this parameter estimation method produced accurate outcomes. Furthermore, the aerodynamic stiffness parameter, which was additionally considered in the nonlinear model, was determined using the damped natural frequency method in conjunction with the Volterra series, also yielding precise results. Using assumed parameter values, the natural frequency of the system based on the linear model was found to be 84.01 rad/sec , while the nonlinear model produced a natural frequency of 85.18 rad/sec , reflecting a 1.37% difference. This discrepancy arises from the inclusion of aerodynamic stiffness during

structural vibration in the nonlinear model, which increases the system's natural frequency compared to the linear model that only accounts for structural stiffness. This principle can be applied to avoid structural damage caused by resonance when the structure vibrates at its natural frequency due to wind excitation. Alternatively, it can be used constructively—for example, in bladeless wind turbines where controlled vibrations are used to generate electricity with high precision in determining the output frequency.

KEYWORD: Vibrations, Vortex Shedding, Natural Frequency, Volterra Series

1. บทนำ

การสั่นสะเทือนของโครงสร้างที่ถูกเหนี่ยวนำด้วยกระแสหมุนวนของกระแสม (Vortex-Induced Vibrations) กำลังเป็นสิ่งที่ได้รับความสนใจของนักวิจัย เนื่องจากสิ่งก่อสร้างหลายอย่างที่อยู่กลางแจ้งเมื่อมีกระแสลมพัดผ่านด้วยความเร็วลมที่มากพอจะทำให้เกิดการหมุนวนของอากาศทางด้านหลังของสิ่งก่อสร้างนั้นและที่ความเร็วลมที่เหมาะสมการหมุนวนนั้นจะมีการสับตัวไปมา (Vortex shedding) [1] ในลักษณะของคลื่นและเหนี่ยวนำให้สิ่งก่อสร้างนั้นเกิดการสั่นสะเทือนในแนวตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของกระแสลมได้ จากปรากฏการณ์ของการเกิดการสั่นสะเทือนนี้อาจส่งผลให้สิ่งก่อสร้างเสียหายได้ หรือในอีกทางหนึ่งอาจนำการสั่นสะเทือนนั้นมาใช้ประโยชน์ได้ เช่น นำมาใช้ผลิตพลังงานไฟฟ้าโดยใช้กังหันลมแบบไร้ใบแทนกังหันลมที่มีใบที่มีอยู่ในปัจจุบันเป็นต้น งานวิจัยนี้จะนำเสนอการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสแกนแลน ซึ่งเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไม่เชิงเส้นและประยุกต์ใช้อ่อนุกรมของวอลเตอร์ราเพื่อใช้หาความถี่ธรรมชาติและ ความถี่ธรรมชาติแบบหนึ่งของระบบระดับความเสรีขึ้นเดียวที่มีมวลที่มีความยาวหนึ่งหน่วย เพื่อใช้เป็นแนวทางในการออกแบบโครงสร้างให้เหมาะสมกับการใช้งานในอนาคต

2. งานที่เกี่ยวข้อง

Scanlan [2] ได้ทำการทดลองและนำเสนอแบบจำลองการสั่นสะเทือนที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของกระแสหมุนวนของของไหลที่เป็นแบบจำลองไม่เชิงเส้นซึ่งให้ผลการคำนวณใกล้เคียงความเป็นจริง

Traivivatana et al [3] ได้แสดงให้เห็นการเกิดกระแสหมุนวนจากการไหลผ่านวัตถุรูปทรงกระบอกที่ตัวเลขเรย์โนลด์ต่าง ๆ โดยทำการคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบปรับขนาดเอลิเมนต์หลายครั้ง

Manshadi et al [4] ได้ประยุกต์ใช้การสั่นสะเทือนของเสาที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของกระแสลมมาใช้แทนกังหันลมซึ่งจะไม่ต้องใช้ใบกังหันเพื่อเป็นแนวทางในการผลิตไฟฟ้า โดยการ

ออกแบบได้ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงเส้นของระบบระดับความถี่ขึ้นเดียว โดยพิจารณาการเหนี่ยวนำของกระแสหมุนวนของลมที่ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนแบบสองทิศทาง

Steffen [5] ได้ทำการศึกษาการสั่นสะเทือนที่ความถี่ต่ำของอาคารสูงระดับเกินกว่า 200 m ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของกระแสหมุนวนของลม

3. ทฤษฎี

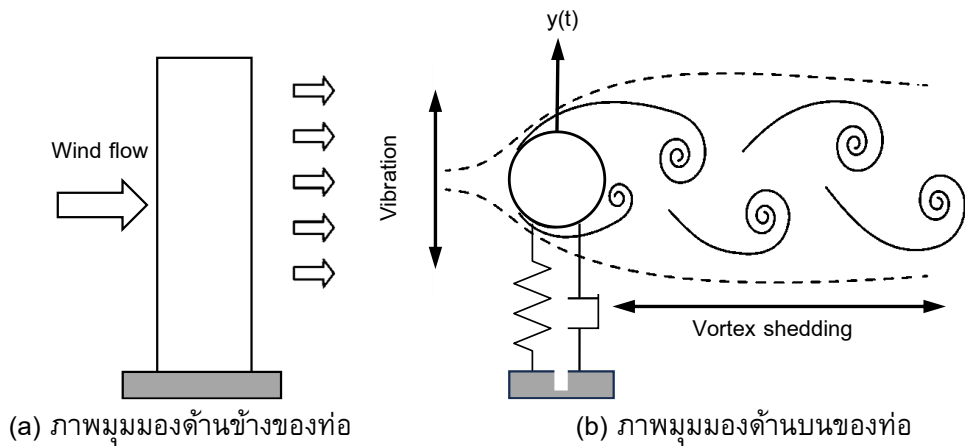
ปรากฏการณ์การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจากการเหนี่ยวนำของกระแสหมุนวนของของไหลได้ถูกนำมาศึกษาในงานทางด้านวิศวกรรมเครื่องกลและวิศวกรรมโยธาเนื่องจากการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นนี้อาจส่งผลให้สิ่งก่อสร้างเสียหายได้หรือในอีกทางหนึ่งอาจนำการสั่นสะเทือนนั้นมาใช้ประโยชน์ได้จากการศึกษาพบว่าเมื่อเกิดการไหลผ่านวัตถุที่มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 1 ที่ความเร็วของการไหลมากเพียงพอจะทำให้ด้านหลังของวัตถุเกิดกระแสหมุนวน และกระแสหมุนวนนี้จะเหนี่ยวนำวัตถุให้เกิดการสั่นสะเทือน โดยที่ความถี่ของกระแสหมุนวนนี้จะหาได้จากตัวเลขสเตรฮาาล (Strouhal Number, St) [6] ที่เป็นฟังก์ชันของตัวเลขเรย์โนลด์ เป็น

$$St(Re) = \frac{fD}{u} \quad (1)$$

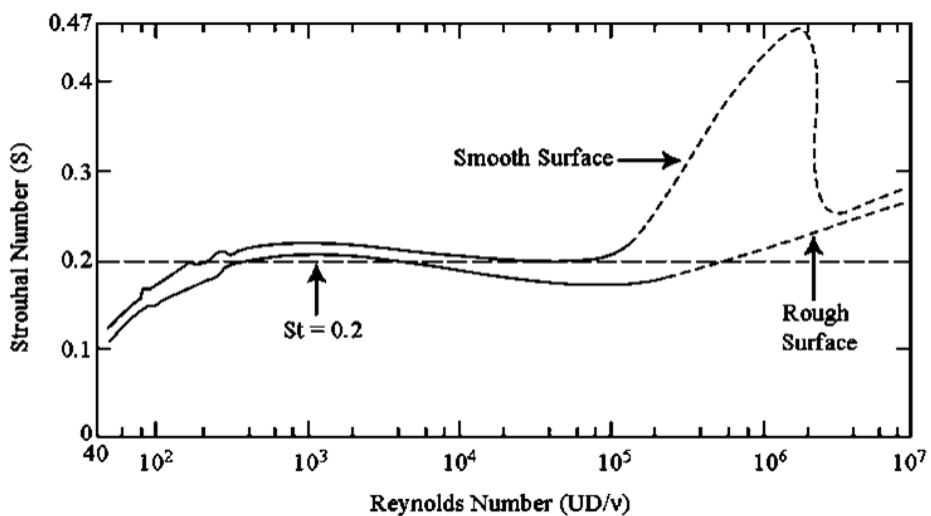
โดยที่ f เป็นความถี่ของกระแสหมุนวนของของไหล, D เป็นเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อ, u เป็นความเร็วของของไหล และ St เป็นตัวเลขสเตรฮาาลซึ่งขึ้นอยู่กับตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds Number, Re) จึงทำให้การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นแปรผันกับความเร็วของกระแสการไหล ขนาดของวัตถุ และ ชนิดของของไหลที่ไหลผ่านวัตถุ โดยมีความสัมพันธ์ของตัวเลขสเตรฮาาลและตัวเลขเรย์โนลด์ ดังแสดงในรูปที่ 2

$$Re = \frac{\rho u D}{\mu} = \frac{u D}{\nu} \quad (2)$$

โดยที่ ρ คือความหนาแน่นของของไหล, μ คือ ความหนืดพลวัตของของไหล (Dynamic Viscosity) และ ν คือความหนืดจลนศาสตร์ (Kinematic Viscosity)



รูปที่ 1 ของไหลไหลปะทะท่อกลมเกิดกระแสหมุนวนและแบบจำลองของระบบมวลสปริงและตัวหน่วง



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขสเตรฮาและตัวเลขเรย์โนลด์ [7]

ที่ตัวเลขสเตรฮาที่มีค่าประมาณ 0.2 ตัวเลขเรย์โนลด์จะมีค่าอยู่ในช่วง 300 ถึง 10^5 การสันนิษฐานที่เกิขึ้นนี้อาจสร้างความเสียหายให้กับสิ่งปลูกสร้างได้และเพื่อป้องกันความเสียหายต่อสิ่งปลูกสร้างประเภทอาคารสูงและสะพานที่อยู่ในท้องที่ที่มีกระแสลมแรง การศึกษาเกี่ยวกับการสันนิษฐานแบบนี้ยังต้องอาศัยผลการทดลองมาช่วยในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับของไหลยังต้องอาศัยการทดลองเป็นหลัก โครงสร้างตามรูปที่ 2 ประกอบจะใช้แบบจำลองเชิงเส้นตามสมการที่ (3)

$$\ddot{y}(t) + 2\zeta\omega_s\dot{y}(t) + \omega_s^2 y(t) = \frac{\rho u^2 DC_L}{2m} \sin(\omega t + \theta) \quad (3)$$

แต่สแกนแลนได้เสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของกระแสหมุนวนที่เกิดจากกระแสลม โดยเป็นแบบจำลองของระบบระดับความเสรีขึ้นเดียวต่อหนึ่งหน่วยความยาว ดังสมการที่ (4)

$$m[\ddot{y}(t) + 2\zeta\omega_s\dot{y}(t) + \omega_s^2 y(t)] = \rho u^2 D \left[\gamma \left(1 - \varepsilon \frac{y^2(t)}{D^2} \right) \frac{\dot{y}(t)}{u} + \beta \frac{y(t)}{D} + \frac{1}{2} C_L \sin(\omega t + \theta) \right] \quad (4)$$

โดยที่ m คือ มวลต่อความยาวของระบบ

$y(t)$ คือ การกระจัด

ζ คือ สัมประสิทธิ์ของตัวหน่วง (Damping Coefficient)

ω_s คือ ความถี่ธรรมชาติทางกลของระบบ

ρ คือ ความหนาแน่นของอากาศ (Air Density)

u คือ ความเร็วเฉลี่ยของของไหล (Mean Wind Velocity)

D คือ ความกว้างของมวลที่ปะทะกับของไหล

γ คือ สัมประสิทธิ์การหน่วงพลศาสตร์ (Aerodynamic Damping Coefficient)

ε คือ สัมประสิทธิ์การตอบสนองเชิงพลศาสตร์ไม่เชิงเส้น (Nonlinear Aerodynamic Response Coefficient)

ω คือ ความถี่ของกระแสหมุนวนของของไหล (Frequency of Vortex Shedding)

β คือ สัมประสิทธิ์ความแข็งตึงเชิงพลศาสตร์ (Aerodynamic Stiffness Coefficient)

C_L คือ สัมประสิทธิ์ของแรงยก (Lift Coefficient) ซึ่งสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของแรงยก F_L ดังนี้

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho u^2 DL} \quad (5)$$

สแกนแลนได้แสดงการหาค่าคงที่ γ และ ε ได้จากการทดลอง โดยพิจารณาว่าเมื่อระบบเกิดการสั่นสะเทือนในสถานะคงตัว (Steady State) แล้ว การสั่นสะเทือนจะอยู่ในรูปของฮาโมนิคแบบเดียวกับระบบเชิงเส้น เป็น

$$y(t) = Y \cos(\omega t) \quad (6)$$

และที่ความถี่พ้อง (Resonance) $\omega = \omega_s$ ซึ่งความถี่ของการสั่นสะเทือนจะสอดคล้องกับตัวเลขสเตรอาลเป็น

$$\frac{\omega A}{u} = 2\pi St \quad (7)$$

โดยที่ St คือ ตัวเลขสเตรอาล และ A คือ พื้นที่หน้าตัดต่อความยาวของระบบ เมื่อการสั่นสะเทือนอยู่ในสถานะคงตัว แสดงว่าพลังงานสูญเสียรวมในหนึ่งรอบของการสั่นสะเทือนเป็นศูนย์นั่นคือ

$$\int_0^T F_d \dot{y}(t) dt = 0 \quad (8)$$

โดยที่ F_d คือ แรงที่เกิดจากการหน่วงมีค่าเป็น

$$F_d = \left[2m\zeta\omega_s - \rho u B \gamma \left(1 - \varepsilon \frac{y^2(t)}{D^2} \right) \right] \dot{y}(t) \quad (9)$$

ขนาดของแอมพลิจูดของการสั่นสะเทือนในสมการที่ (6) จะหาได้โดยแทนสมการที่ (9) ในสมการที่ (8) จะได้

$$Y = \frac{2D}{\varepsilon} \sqrt{1 - \frac{R\zeta}{\gamma}} \quad (10)$$

โดยที่ $R = \frac{4\pi m S_t}{\rho A D}$ และค่าคงที่ γ และ ε สามารถหาได้จากการทดลองโดยการปรับค่าตัวหน่วงสองครั้ง ซึ่งจะทำให้ได้ ค่าแอมพลิจูดในสมการที่ (10) สองค่า ซึ่งจะทำให้สามารถหาค่า γ ได้จาก

$$\gamma = \frac{R \left[\zeta_1 - \frac{Y_1^2}{Y_2^2} \zeta_2 \right]}{1 - \frac{Y_1^2}{Y_2^2}} \quad (11)$$

โดยที่ Y_1 เป็นแอมพลิจูดเมื่อระบบมีอัตราส่วนการหน่วงเป็น ζ_1 และ Y_2 เป็นแอมพลิจูดเมื่อระบบมีอัตราส่วนการหน่วงเป็น ζ_2 ส่วน ε หาได้จาก

$$\varepsilon = \frac{2D}{Y} \sqrt{1 - R \frac{\zeta}{\gamma}} \quad (12)$$

ซึ่งค่าของ Y และ ζ จะใช้ผลจากการทดลองของครั้งที่หนึ่งหรือสองก็ได้

ในงานวิจัยนี้จะนำเสนอการหาค่า β จากความถี่มูลฐาน ซึ่งจะหาได้โดยการใช้อุนุกรมของวอลเตอร์รา โดยปรับสมการที่ (4) ใหม่เป็น

$$\ddot{y}(t) + \left[2\zeta\omega_s - p\gamma \left(1 - \varepsilon \frac{y^2(t)}{D^2} \right) \right] \dot{y}(t) + \left(\omega_s^2 - \frac{pu\beta}{D} \right) y(t) = \frac{1}{2} puC_L \sin(\omega t + \theta) \quad (13a)$$

หรือ

$$\ddot{y}(t) + \left[2\zeta\omega_s - p\gamma \left(1 - \varepsilon \frac{y^2(t)}{D^2} \right) \right] \dot{y}(t) + \left(\omega_s^2 - \frac{pu\beta}{D} \right) y(t) = Ff(t) \quad (13b)$$

โดยที่

$$p = \frac{puD}{m} \quad (14a)$$

แอมพลิจูดของแรงเป็น

$$F = \frac{1}{2} puC_L \quad (14b)$$

และ

$$f(t) = \sin(\omega t + \theta) \quad (14c)$$

เมื่อสัญญาณเข้าของระบบเป็น $Ff(t)$ สัญญาณออกของระบบในรูปของอนุกรมของวอลเตอร์ราเป็น

$$y(t) = \sum_{n=1}^{\infty} F^n y^n(t) \quad (15)$$

แทนสมการที่ (15) ในสมการที่ (13b) จะได้

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^{\infty} F^n \ddot{y}_n(t) + \left[2\zeta\omega_s - p\gamma \left(1 - \frac{\varepsilon}{D^2} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{n2=1}^{\infty} F^{(n1+n2)} y_{n1}(t) y_{n2}(t) \right) \right] \sum_{n=1}^{\infty} F^n \dot{y}_n(t) \\ + \left(\omega_s^2 - \frac{pu\beta}{D} \right) \sum_{n=1}^{\infty} F^n y_n(t) = Ff(t) \end{aligned} \quad (16a)$$

หรือ

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^{\infty} F^n \ddot{y}_n(t) + 2\delta\Omega \sum_{n=1}^{\infty} F^n \dot{y}_n(t) + \frac{p\gamma\varepsilon}{D^2} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{n2=1}^{\infty} \sum_{n3=1}^{\infty} F^{(n1+n2+n3)} y_{n1}(t) y_{n2}(t) \dot{y}_{n3}(t) \\ + \Omega_n^2 \sum_{n=1}^{\infty} F^n y_n(t) = Ff(t) \end{aligned} \quad (16b)$$

โดยที่

$$\Omega_n^2 = \omega_s^2 - \frac{pu\beta}{D} \quad (17a)$$

และ

$$\delta\Omega_n = \frac{2\zeta\omega_s - p\gamma}{2} \quad (17b)$$

ที่สัมประสิทธิ์ F^1 สัญญาณของระบบเชิงเส้นได้

$$\ddot{y}_1(t) + 2\delta\Omega_n \dot{y}_1(t) + \Omega_n^2 y_1(t) = f(t) \quad (18a)$$

$$y_1(t) = H_1[f(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} h_1(\tau) f(t - \tau) d\tau \quad (18b)$$

$$H_1(\Omega) = \frac{1}{(\Omega_n^2 - \Omega^2) + j2\delta\Omega_n\Omega} \quad (18c)$$

จากสมการที่ (18) $H_1[\cdot]$ เป็นโอเปอเรเตอร์เชิงเส้น, $H_1(\Omega)$ พังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่หนึ่งของระบบ และสัญญาณ $y_1(t)$ เป็นสัญญาณแบบฮาร์มอนิกที่มีความถี่เป็น $\Omega_d = \Omega_n \sqrt{1-\delta^2}$ ซึ่งจะทำให้หาค่าของ β ได้จาก

$$\beta = \frac{D}{pu} (\omega_s^2 - \Omega_n^2) \quad (19)$$

โดยที่

$$\Omega_n^2 = \Omega_d^2 + \left(\zeta\omega_s - \frac{p\gamma}{2}\right)^2 \quad (20)$$

ในทางปฏิบัติ Ω_d จะหาได้จากคาบเวลาของการสั่นสะเทือน ซึ่งหาได้จาก

$$\Omega_d = \frac{2\pi}{T_d} \quad (21)$$

โดยที่ T_d เป็นคาบเวลาของการสั่นสะเทือน
จากสมการ (16) ที่สัมประสิทธิ์ F^2 ได้

$$\ddot{y}_2(t) + 2\delta\Omega_n\dot{y}_2(t) + \Omega_n^2 y_2(t) = 0 \quad (22a)$$

$$y_2(t) = H_1[0] = 0 \quad (22b)$$

และสัญญาณออกอันดับที่สามหาจาก สมการ(15) ที่สัมประสิทธิ์ F^3 ได้

$$\ddot{y}_3(t) + 2\delta\Omega_n\dot{y}_3(t) + \Omega_n^3 y_3(t) = -\frac{p\gamma\epsilon}{D^2} y_1^2(t)\dot{y}_1(t) \quad (23a)$$

$$y_3(t) = -\frac{p\gamma\epsilon}{D^2} H_1[y_1^2(t)\dot{y}_1(t)] \quad (23b)$$

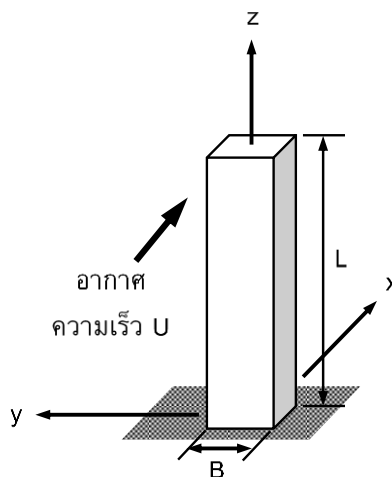
จะเห็นได้ว่าสัญญาณออกในลำดับถัด ๆ ไปของอนุกรมของวอลเตอร์รา จะมีเฉพาะเทอมที่เป็นเลขคี่ เท่านั้น และไม่มีความต้องการหาเนื่องจาก สามารถหาพารามิเตอร์ได้ครบแล้ว และสัญญาณออกในลำดับสูงของอนุกรมของวอลเตอร์ราจะมีความถี่ในลำดับสูง ซึ่งเป็นความถี่ซูปเปอร์ฮาร์โมนิก (Super Harmonic) จึงไม่น่าสนใจ

4. ผลการคำนวณ

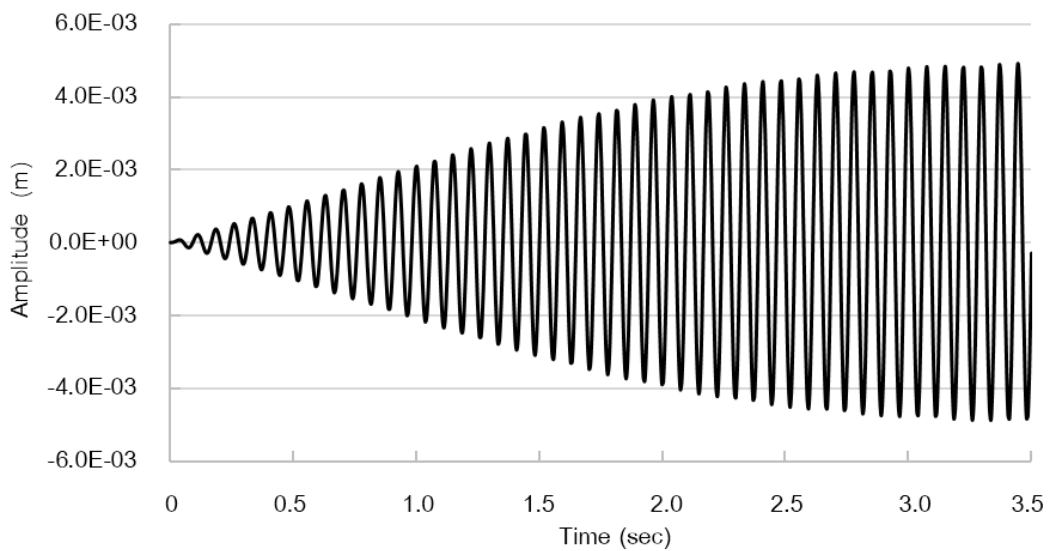
การทดสอบความถูกต้องของวิธีการที่นำเสนอ จะใช้ข้อมูลบางส่วน โดยอ้างอิงการทดลองของสแกนแลน ซึ่งในการทดลองของสแกนแลนได้ทำการทดลองกับแท่งคานที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส กว้าง $B = D = 0.3$ m, ยาว $L = 0.984$ m, มวล $m = 6.085$ kg/m, ความแข็งตึงของสปริง $k = 42.95$ kN/m, สัดส่วนความหน่วง 0.002 , ความถี่ธรรมชาติของระบบเมื่อเกิดการสั่นสะเทือนจากกระแสลมเป็น 11.3 Hz และมีค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังนี้ $\gamma = 6.27$, $\beta = -5.7$, $\varepsilon = 1082.2$ โดยมีกระแสลมที่มีความหนาแน่นของอากาศ $\rho = 1.225$ kg/m³ และความเร็วลมเฉลี่ย $u = 8.5$ m/s ไหลผ่าน ดังรูปที่ 3 ในการคำนวณจะสมมติว่าระบบมีมุมเฟส $\theta = 0$ ซึ่งจะทำให้สมการ (3) เป็น

$$\ddot{y}(t) + [-0.448951 + 154813y^2(t)]\dot{y}(t) + 7256.55y(t) = 0.0545437 \sin(\omega t + \theta) \quad (24)$$

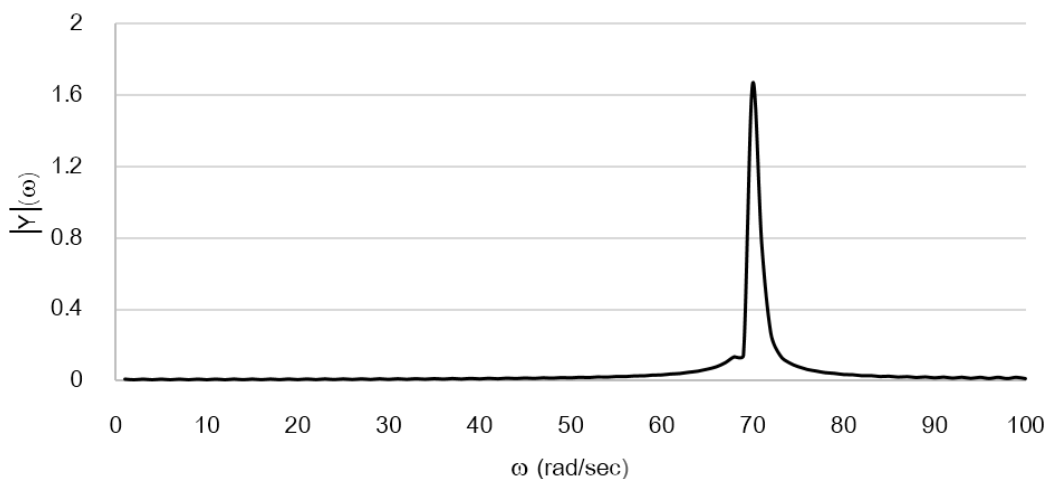
ผลลัพธ์ของการสั่นสะเทือนของระบบตามสมการ (24) หาได้จากการคำนวณเชิงตัวเลขโดยใช้ระเบียบวิธีรุงเงกุตต้า (Runge-Kutta Method) [8] โดยได้สัญญาณออกของระบบในโดเมนเวลาและในโดเมนความถี่ ดังรูปที่ 4 และ 5 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่อระบบเริ่มต้นจากจุดหยุดนิ่งที่ $y(0) = \dot{y}(0) = 0$ สัญญาณออกของระบบจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้น จนกระทั่งเสถียรที่เวลาประมาณ 3 วินาที



รูปที่ 3 รูปแบบของปัญหาที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 4 สัญญาณออกของระบบในโดเมนเวลา



รูปที่ 5 สัญญาณออกของระบบในโดเมนความถี่

เมื่อได้ผลลัพธ์การสั่นสะเทือนของระบบตามรูปที่ 4 และ 5 แล้ว จะสามารถหาพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้ โดย γ และ ε หาได้จากสมการที่ (11) และ (12) ตามลำดับ โดยทำการทดลองสองครั้งโดยปรับค่าสัมประสิทธิ์ของตัวหน่วงทั้งสองครั้งให้ไม่เท่ากัน และทำการวัดขนาดของแอมพลิจูดทั้งสองครั้งได้ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการคำนวณขนาดของแอมพลิจูดที่เปลี่ยนไปกับค่าของ ζ

ครั้งที่	ζ	Y
1	0.001	0.000548158
2	0.002	0.000541817

เมื่อนำค่าของ ζ และแอมพลิจูด Y ที่ได้ไปแทนในสมการที่ (11) และ (12) จะทำให้ได้ค่าของ γ และ ε เป็น $\gamma = 6.27$ และ $\varepsilon = 1082.2$ ซึ่งตรงกับค่าในตัวอย่างที่สมมติไว้ ส่วนค่าของ β จะสามารถหาได้โดยการวัดคาบเวลาของความถี่มูลฐาน จากรูปที่ 5 ในช่วงที่สัญญาณเสถียรแล้วได้ $T = 0.0736$ วินาที แล้วนำค่าคาบเวลานี้ไปคำนวณหาค่า Ω_d จากสมการที่ (21) แล้วนำไปคำนวณหาค่า β จากสมการที่ (19) จะได้ค่า $\beta = -5.7$ ซึ่งมีค่าถูกต้อง จากสมการที่ (24) สัญญาณอันดับที่หนึ่งของอนุกรมของวอลเตอร์ราเป็น

$$\ddot{y}_1(t) - 0.448951\dot{y}_1(t) + (85.18538)^2 y_1(t) = 0.0818f(71t) \quad (25)$$

จะเห็นได้ว่าความถี่ธรรมชาติของระบบทางกลที่สมมติในครั้งแรกมีค่าเป็น

$$\omega_s = \sqrt{\frac{k}{m}} = 84.01 \text{ rad / sec} \quad (26)$$

แต่ด้วยการเคลื่อนที่ตัดแนวขวางกับกระแสลมจึงเกิดความแข็งแรงที่ติดจากอากาศเพิ่มขึ้น จึงทำให้ความถี่ธรรมชาติเปลี่ยนไปเป็นตามสมการ (17a) จึงทำให้ความถี่ธรรมชาติของระบบเปลี่ยนไปเป็น 85.18 rad/s ซึ่งมีความแตกต่างจากเดิมไป 1.37% ถ้าต้องการประยุกต์ไปใช้กับงานที่ต้องการให้เกิดความถี่พ้องจะทำได้โดยกำหนดพารามิเตอร์ของระบบใหม่ โดยพิจารณาจากสมการ (16) โดยกำหนดให้ $\Omega_n = \omega$ และกำหนดค่าความแข็งแรงของสปริงใหม่เป็น

$$k = m\omega^2 + \rho u^2 \beta \quad (27)$$

ถ้าเปลี่ยนค่าความแข็งแรงใหม่ตามสมการ (27) จะได้สมการใหม่เป็น

$$\ddot{y}_1(t) - 2.93706\dot{y}_1(t) + 5041y_1(t) = 0.0545437 \sin(71t) \quad (28)$$

สมการ (28) จะใช้เป็นสมการสำหรับกำหนดความถี่ธรรมชาติของระบบได้เนื่อง จากความถี่ของระบบเป็น ความถี่มูลฐาน แต่จากสมการ (28) จะเห็นว่าสัญญาณออกของระบบไม่เสถียร เนื่องจากมีเทอมของตัวห่วยเป็นลบ แต่สัญญาณออกของระบบโดยรวมตามรูปที่ 4 มีความเสถียร เนื่องจากเทอมไม่เชิงเส้นอันดับสูง ๆ รวมอยู่ด้วย

5. สรุป

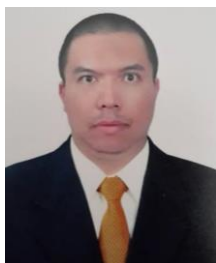
จากการคำนวณตามตัวอย่างที่ใช้ตามข้อมูลของแสกนแลนพบว่าการหาพารามิเตอร์ไม่เชิงเส้น γ และ ε ของแสกนแลน โดยใช้วิธีปรับค่าสัมประสิทธิ์ของการหน่วงของระบบทางกลสามารถทำได้ ในทางปฏิบัติจริงเนื่องจาก $\zeta = \frac{c}{2\sqrt{mk}}$ ซึ่งสามารถปรับ ζ ได้โดยปรับค่า c , m หรือ k ตัวหนึ่งตัวใด ก็ได้ ส่วนค่า β หาได้โดยวัดคาบเวลาของสัญญาณการสั่นสะท้อนเมื่อระบบอยู่ในสถานะทรงตัวมัน (Steady State Response) ความแม่นยำของการวัดคาบเวลา จะทำให้ได้ผลของพารามิเตอร์ β ถูกต้อง ทั้งการวัดขนาดของแอมพลิจูดและคาบเวลาถ้าทำการวัดซ้ำหลาย ๆ ครั้งแล้วนำค่าที่ได้มาเฉลี่ยก็จะทำให้ค่าที่ได้มีความแม่นยำและน่าเชื่อถือมากขึ้น อย่างไรก็ตามพารามิเตอร์ไม่เชิงเส้นจะแปรผันไปตามความเร็วลม และรูปร่างหน้าตัดของโครงสร้าง ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไม่เชิงเส้น จะใช้ได้เฉพาะเจาะจงกับระบบที่กำหนดเท่านั้น ไม่สามารถใช้ได้กับทุก ๆ ระบบได้

References

- [1] White FM. Viscous fluid flow. 2nd ed. New York: McGraw-Hill Book; 1991.
- [2] Scanlan RH. State-of-the-art methods for calculating flutter, vortex-induced, and buffeting response of bridge structures. Final report. Washington, DC: Federal Highway Administration, Offices of Research & Development Structures and Applied Mechanics Division; 1981. Report No. FHWA/RD-80/50.
- [3] Traivivatana S, Boonmarlert P, Theeraek P, Phongthanapanich S, Dechaumphai P. Combined adaptive meshing technique and characteristic-based split algorithm for viscous incompressible flow analysis. Applied Mathematics Mechanics 2007;28(9): 1163-72.
- [4] Manshadi MD, Ghassemi M, Mousavi SM, Mosavi AH, Kovacs L. Predicting the parameters of vortex bladeless wind turbine using deep learning method of long short-term memory. Energies 2021;14(16):4867. doi: 10.3390/en14164867.

- [5] Steffen F. Wind-induced vibration in high-rise buildings [master's dissertation]. Lund: Lund University; 2016.
- [6] Chaiyapinunt S. Fluid mechanics. 3th ed. Bangkok: Chulalongkorn University Press; 2014. (In Thai)
- [7] Adeyanju AA, Boucher D. Theoretical analysis of the bladeless wind turbine performance. Journal of Scientific Research & Reports 2020;26(10):93-106.
- [8] Chapra SC, Canale RP. Numerical methods for engineering. 7th ed. New York: McGraw-Hill Book; 2015.

ประวัติผู้เขียนบทความ



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



ธนู จุญฉาย ปัจจุบันดำรงตำแหน่งอาจารย์ประจำสาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต โทรศัพท์ 0-2320-2777 ต่อ 1203 E-mail: thanu.cho@kbu.ac.th



ทิพวัลย์ เพชรรัก ปัจจุบันดำรงตำแหน่งอาจารย์ประจำสาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต โทรศัพท์ 0-2320-2777 ต่อ 1203 E-mail: thippawan.phe@kbu.ac.th



วันชนะ ณรงค์ฤทธิเดช ปัจจุบันดำรงตำแหน่งอาจารย์ประจำ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต โทรศัพท์ 0-2320-2777
ต่อ 1203 E-mail: wanchana.nar@kbu.ac.th



นันทชนก หาญตะคุ ปัจจุบันดำรงตำแหน่งอาจารย์ประจำ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต โทรศัพท์ 0-2320-2777
ต่อ 1203 E-mail: nunchanok.han@kbu.ac.th

Article History:

Received: November 22, 2024

Revised: July 2, 2025

Accepted: July 3, 2025

TRAVELING SALESMAN PROBLEM FOR OPTIMAL TOURIST ROUTE IN AYUTTHAYA

Tantikorn Pichpibul^{1*} and Nareerat Prechatavanitchakul²

^{1*}Lecturer, School of Engineering, Bangkok University,
9/1, Moo 5 Phaholyothin Road, Khlong Luang District, Pathum Thani 12120, Thailand,
tantikorn.p@bu.ac.th

²Lecturer, School of Entrepreneurship, Sripatum University,
2410/2, Phaholyothin Road, Chatuchak District, Bangkok 10900, Thailand,
nareerat.pr@spu.ac.th

** Corresponding author*

ABSTRACT

This paper explores the traveling salesman problem (TSP) in the context of planning one-day trips for travelers to historical, cultural, and ecotourism sites in Ayutthaya Province, Thailand. A cloud-based decision-making software was introduced to address this issue which combines the Clarke-Wright algorithm with the honey bees mating optimization algorithm. Through experimental evaluations on TSP benchmark problems and real-world traveler data, it was found that the proposed method is on par with some of the leading existing algorithms. As a result, travelers can effectively plan optimal tourist routes.

KEYWORDS: Traveling Salesman Problem, Tourist Route, Clarke-Wright Algorithm, Honey Bees Mating Optimization Algorithm

1. Introduction

This paper primarily addresses the traveling salesman problem (TSP) as it pertains to route planning for bicycle travel through historical, cultural, and ecotourism sites in Ayutthaya Province, Thailand. Figure 1 shows sample sites encompassing nine notable destinations in these categories. Given the array of destinations on the map, each traveler must determine which sites to include in their tour. Subsequently, the chosen destinations by travelers are used to formulate a tourist route, starting from the bicycle shop nearest to Ayutthaya railway station and returning to the same shop upon completion of the trip. The traveler spends

more time on route planning based on the abovementioned process. Therefore, we have developed a cloud-based decision-making software to assist travelers more efficiently. This software introduces an original approach that integrates the Clarke-Wright (CW) algorithm [1] and the honey bees mating optimization (HBMO) algorithm [2], enhancing the efficiency of tourist route planning and particularly supporting traveler decision-making.

The TSP was first formulated as a mathematical problem in 1930, and has since been the subject of numerous articles [3-7]. It is also recognized as an NP-hard problem [8]. In this paper, we present the fundamental concept of the TSP as finding the shortest tour through chosen destinations, ensuring that the traveler visits each destination only once.

The primary contribution of this paper is the development of cloud-based decision-making software that enables travelers to plan their trips effortlessly. It allows the user to interact with Google Maps (<https://maps.google.com>) in a simple and flexible way. Additionally, it encompasses a database that aggregates the input data for the TSP, including historical, cultural, and ecotourism sites, as well as travelers' selected destinations. A secondary yet significant contribution is introducing a robust approach designed to rival existing algorithms in terms of solution quality when addressing the TSP.

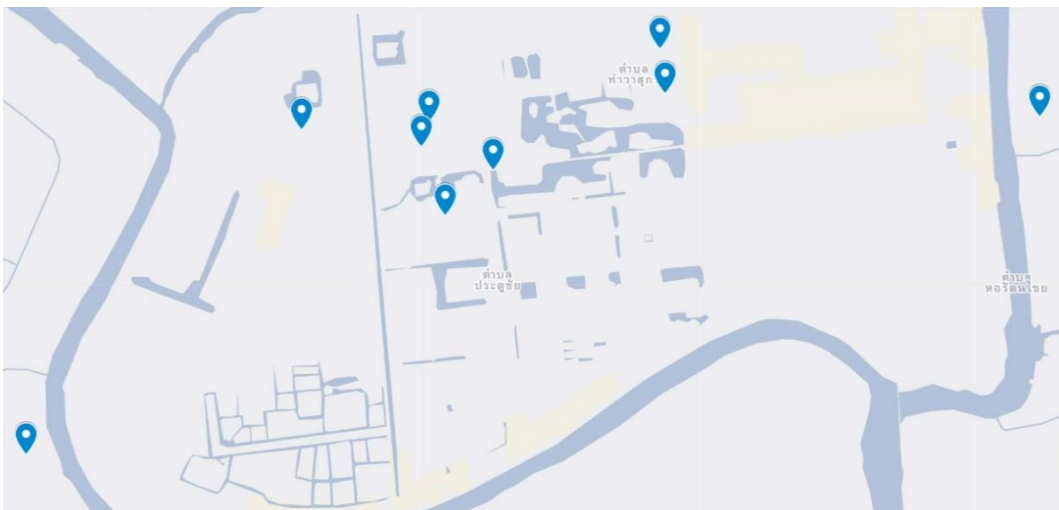


Figure 1 Example of historical, cultural, and ecotourism sites in Ayutthaya

2. Literature Review

Since the introduction of the TSP, numerous approaches have been proposed to tackle the problem. These include simulated annealing [9], tabu search [10-11], genetic algorithms [12], variable neighborhood search [13], and ant colony optimization [14-15], among others. Despite the vast number of approaches already proposed, the development of new methods to solve the TSP has persisted in recent years. Our survey of these recent advancements is presented below.

A quantum-assisted compact genetic algorithm was introduced in [16], utilizing the quantum amplitude amplification technique during the selection process to bypass the local optima problem. The algorithm was tested on the TSP of size 3 and 4 cities using an IBM Qiskit simulator. The study further delved into the number of qubits needed for encoding, gate counts in the circuit model, and the feasibility of implementing this on small-scale devices. The application of the Parallel Binary Cat Swarm Optimization (PBCSO) algorithm to the TSP was studied in [17]. Their findings indicated that PBCSO offers promising potential in analyzing TSP problems. Simulations conducted on Matlab further validated the algorithm's feasibility and efficacy. The importance of formulating and advancing the element decomposition method (EDCM) within the context of the finite element method to address the TSP was emphasized in [18]. Comparisons between the algorithm utilizing EDCM and other methods, such as branch and bound (B&B) and ant colony optimization (ACO) revealed that EDCM outperformed ACO, offering an average improvement of 1.31%. A novel algorithm tailored to a real-world challenge: the symmetric TSP was introduced in [19]. This algorithm draws inspiration from the galaxy-based search algorithm and incorporates innovative concepts like the clockwise search process and the cluster crossover operation. Experimental results using standard benchmark test sets revealed that the proposed algorithm consistently achieves the best average percentage deviation from the lower bound. A hybrid genetic algorithm (HGA) incorporating two local optimization strategies for the TSP was presented in [20]. The first strategy is employed after generating Hamiltonian circuits (HCs), refining them to produce shorter HCs. The second strategy integrates with the mutation operation, aiming to produce shorter HCs. The HGA was designed and evaluated using TSP instances sourced from the TSPLIB. Results demonstrate that the algorithm identifies the optimal Hamiltonian circuits (OHCs) for most small-scale TSP instances. Additionally, the deviations between detected approximate OHCs and given OHCs are minimal for large-scale TSP

instances. An adaptive parallel ant colony optimization algorithm designed for massively parallel processors was introduced in [21]. Central to their algorithm is a unique information exchange strategy between processors. This strategy enables each processor to select a communication partner and update pheromone levels adaptively. Additionally, they devised a method to adjust the information exchange time interval based on solution diversity, aiming to enhance optimization result quality and prevent premature convergence. TSP results indicate that their algorithm boasts rapid convergence, accelerated speed, and high efficiency. A novel overall-regional competitive self-organizing map algorithm was proposed in [22]. Within this framework, two distinctive rules overall competition and regional competition were embedded. The overall competition ensures the winning neuron and its neighboring neurons are less competitive when delineating the tour, while the regional competition intensifies their competitiveness for tour refinement. They crafted an incrementing radius based on iteration progress to smoothly transition from tour outlining to refining. Benchmark comparisons against the standard self-organizing map, tested on two sets of TSP instances from TSPLIB [23], attest to the superior solution quality of their proposed algorithm. A hybrid method combining genetic simulated annealing, ant colony systems, and particle swarm optimization techniques was presented in [24]. Their experiments, based on 25 data sets sourced from TSPLIB [23], revealed that both the average solution and the percentage deviation from the best-known solution achieved by their method surpassed those of the compared methods. An effective local search algorithm integrating simulated annealing and greedy search techniques was proposed in [25]. Drawing from the standard simulated annealing, their approach combined three mutation types, each with distinct probabilities. Subsequent incorporation of the greedy search technique aimed to expedite the algorithm's convergence rate. Key parameters including the cooling coefficient of the temperature, the frequency of the greedy search, the compulsion frequency to accept, and the probability of accepting a new solution were adaptively set based on TSP instance sizes. Comparative results indicated that their approach strikes a superior balance between CPU time and accuracy relative to some recent TSP algorithms. An effective memetic algorithm integrating an enhanced invariance operator with the Lin-Kernighan local search was proposed in [26]. When evaluated on 14 distinct TSP instances from TSPLIB [23], their algorithm demonstrated superior performance compared to other memetic algorithms, both in solution quality and computational efficiency. A novel method utilizing

chaotic ant swarm principles was proposed in [27]. Their algorithm was innovatively designed by integrating a mapping from continuous to discrete space, a reverse operator, and a crossover operator within the chaotic ant swarm framework. Simulations revealed the algorithm's ability to generate optimal solutions for nearly all TSPLIB [23] test problems with sizes up to 150. The further comparative analysis demonstrated that their method stands competitive with other heuristic approaches.

While various approaches have been applied to the TSP, many focus on either global exploration or local exploitation. However, few studies have explored hybrid techniques that combine initial route construction and global refinement in the context of real-world applications. In this paper, the CW algorithm was adopted for its speed and practicality in generating initial solutions, while the HBMO algorithm was chosen for its strong global search capability. This combination addresses both solution quality and real-world applicability, particularly for asymmetric routes derived from map-based data.

3. Methodology

In this section, we introduce an approach rooted in the savings concept and inspired by the natural mating behavior of honey bees, tailored to solve the TSP. The specific procedures of this approach are detailed in the subsequent subsections.

3.1 CW algorithm

In this paper, we present an amalgamation of the CW algorithm and the HBMO algorithm tailored to address the TSP. The flowchart of our approach is illustrated in Figure 2, exemplified by a scenario involving six places. The locations of these places are detailed in Table 1.

1) Savings list calculation: In this step, the savings value ($S_{i,j}$) between place i and place j is computed using equation 1.

$$S_{i,j} = C_{i,1} + C_{1,j} - C_{i,j} \quad (1)$$

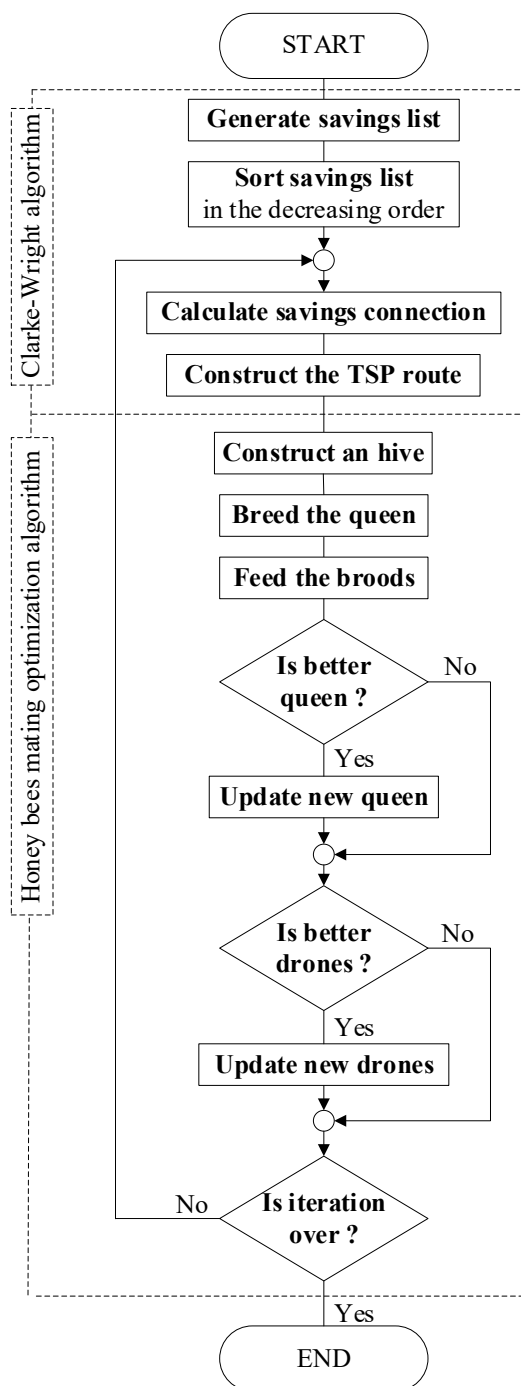


Figure 2 Flowchart of the proposed approach

Table 1 Place locations

Place	Location
Bicycle shop	(72, -73)
Place A	(45, -17)
Place B	(7, -57)
Place C	(56, -10)
Place D	(90, -45)
Place E	(18, 0)

here, $C_{i,1}$ represents the traveling distance from place i to the bicycle shop, $C_{1,j}$ indicates the distance from the bicycle shop to place j , and $C_{i,j}$ signifies the distance between place i and place j . The travel distances, as tabulated in Table 2, are computed using the Euclidean distance formula provided below for illustrative purposes. Actual distance data in the real-world case study are obtained from Google Maps and may be asymmetric.

$$C_{i,j} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (2)$$

In this equation, x_i , y_i and x_j , y_j are the locations of place i and place j , respectively. Note that $S_{i,j} = S_{j,i}$ due to the symmetric nature of the distance. Once all savings values are calculated, they are stored in the savings list, as shown in Table 3.

Table 2 Traveling distance

$C_{i,j}$	1	2	3	4	5	6
1	0	62.17	66.94	65.00	33.29	90.80
2	62.17	0	55.17	13.04	53.00	31.91
3	66.94	55.17	0	67.90	83.86	58.05
4	65.00	13.04	67.90	0	48.80	39.29
5	33.29	53.00	83.86	48.80	0	84.91
6	90.80	31.91	58.05	39.29	84.91	0

Table 3 Savings List

No.	Savings	
	$S_{i,j}$	Value
1	(2, 3)	73.94
2	(2, 4)	114.13
3	(2, 5)	42.46
4	(2, 6)	121.06
5	(3, 4)	64.04
6	(3, 5)	16.37
7	(3, 6)	99.69
8	(4, 5)	49.49
9	(4, 6)	116.51
10	(5, 6)	39.18

2) Savings list sorting: The savings values from Table 3 are then organized in descending order, transitioning from the largest to the smallest values. This reordered list is presented in Table 4.

3) Savings connection calculation: The connection of places is determined by considering the savings values, starting with the largest value from the reordered savings list in Table 4. When any two places, i and j , are connected, they are recorded in the savings connection. This procedure iteratively processes subsequent values from the reordered list until a feasible connection can no longer be established. The finalized savings connection comprises four savings $S_{i,j} (S_{2,6}, S_{4,6}, S_{2,3}, S_{4,5})$ as shown in Figure 3.

4) TSP route construction: In this step, a route for the TSP is constructed. The starting point is designated as the bicycle shop, and the route concludes with a return to the same shop. The TSP route is depicted in Figure 4, with the solution indicated by the total travel distance amounting to 275.4 units. It's worth noting that the travel distance maintains its symmetry; for instance, traveling from 1->5->4->6->2->3->1 is equivalent to 1->3->2->6->4->5->1.

Table 4 New Savings List

No.	Savings	
	$S_{i,j}$	Value
1	(2, 6)	121.06
2	(4, 6)	116.51
3	(2, 4)	114.13
4	(3, 6)	99.69
5	(2, 3)	73.94
6	(3, 4)	64.04
7	(4, 5)	49.49
8	(2, 5)	42.46
9	(5, 6)	39.18
10	(3, 5)	16.37

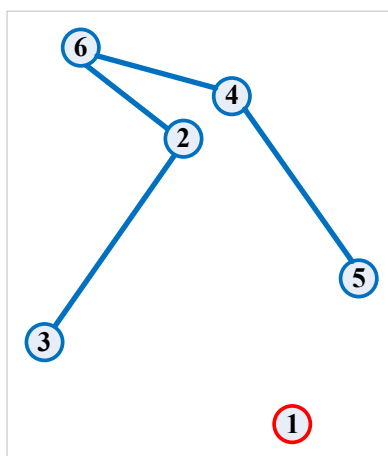


Figure 3 The complete savings connection

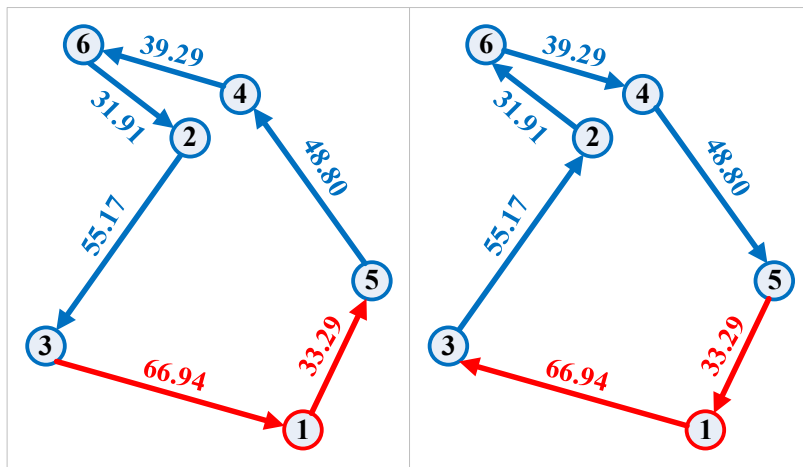


Figure 4 TSP routes

5) New savings list sorting: Typically, savings values are sorted in descending order within the new savings list. We introduce a new sorting procedure tailored for the TSP to enhance the likelihood of producing superior solutions. This procedure organizes the savings values based on the HBMO algorithm. A detailed description of this process is delineated in Subsection 3.2.

3.2 The honey bees mating optimization algorithm

The HBMO algorithm, originally proposed in [2], draws inspiration from the natural mating process of honey bees. Within the hive, the queen bee is pivotal, being responsible for producing the next generation of bees. She mates with multiple drones, storing their sperm. Post-mating, drones perish. The queen then employs the stored sperm for a random mix with her genes to produce a new brood. We adopt this mating process to address the TSP, with the specifics of our approach detailed below.

1) Hive construction: In this procedure, a hive of honey bees is constructed composed of a single queen and multiple drones. The chromosome representation of these honey bees is shown in Figure 5, where each gene within a chromosome corresponds to the savings $S_{i,j}$. While the standard HBMO generates chromosomes through a random selection of places, this method diverges by employing the CW, as outlined in Subsection 3.1, to enhance the quality of solutions in each chromosome. Note that, for the hive's initial iteration, all chromosomes share the same savings $S_{i,j}$ sorted in decreasing order. After that, the

solutions of all chromosomes are calculated. The most optimal among these solutions is designated as the queen bee, while the remaining solutions are assigned to drones.

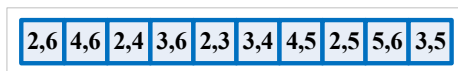


Figure 5 Chromosome representation of honey bees

2) Queen breeding: Within each drone, the queen starts breeding to generate a brood one by one, as shown in Figure 6. The process begins by duplicating an initial chromosome from the queen's chromosome into the brood. In Figure 6 (a), selected genes (gene 2 and gene 3) from a chosen drone are removed and reinserted at another location (gene 1 and gene 2) within the brood's chromosome. Subsequently, in Figure 6 (b), other genes in which the savings $S_{i,j}$ are similar to the inserted genes (savings $S_{4,6}$ and savings $S_{2,4}$) are extracted to prevent duplication. In Figure 6 (c), two genes from the drone's chromosome are then mixed with eight genes from the brood's chromosome. Finally, the brood is generated as shown in Figure 6 (d) in order to represent the new TSP solution that the total traveling distance is equal to 263.61.

3) Broods feeding: Upon completing the queen's breeding process, the quality of each brood can be enhanced through a feeding process, as depicted in Figure 7. From Figure 7 (a) to Figure 7 (c), a selected gene (gene 1) from a chosen brood is extracted and repositioned at another location (gene 3) within the same brood's chromosome. Consequently, a refined brood is produced, as illustrated in Figure 7 (d), which represents a new TSP solution with a total traveling distance of 252.03.

4) Acceptance and stopping criteria: The newly generated broods, originating from the queen breeding and brood feeding processes, are evaluated to determine new TSP solutions. The queen is replaced by the best brood only if this brood's solution surpasses the queen's solution. Additionally, any remaining broods replace the current drones if their solutions are superior to those of the drones. This proposed approach is iteratively executed until the stopping criteria are met, which is determined by a predefined number of iterations.

The integration of the CW algorithm and HBMO allows the system to benefit from both a fast route initialization mechanism and an adaptive global search capability. This hybrid

structure enables the algorithm to efficiently generate high-quality routes and avoid local optima, which is particularly useful for dynamic instances in real-world applications.

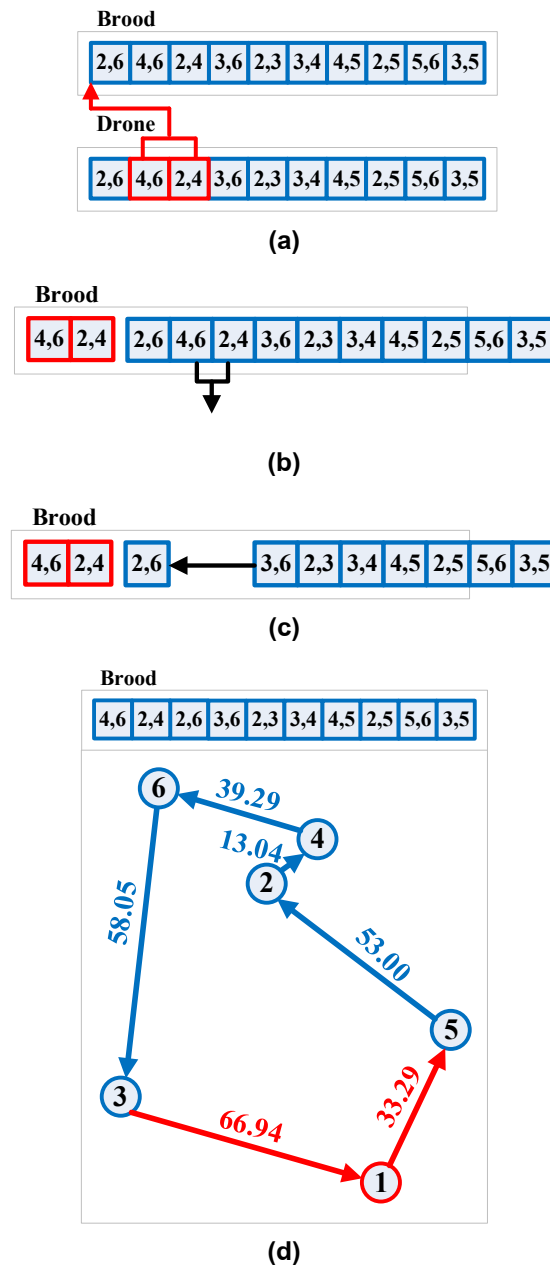


Figure 6 Example of queen breeding process

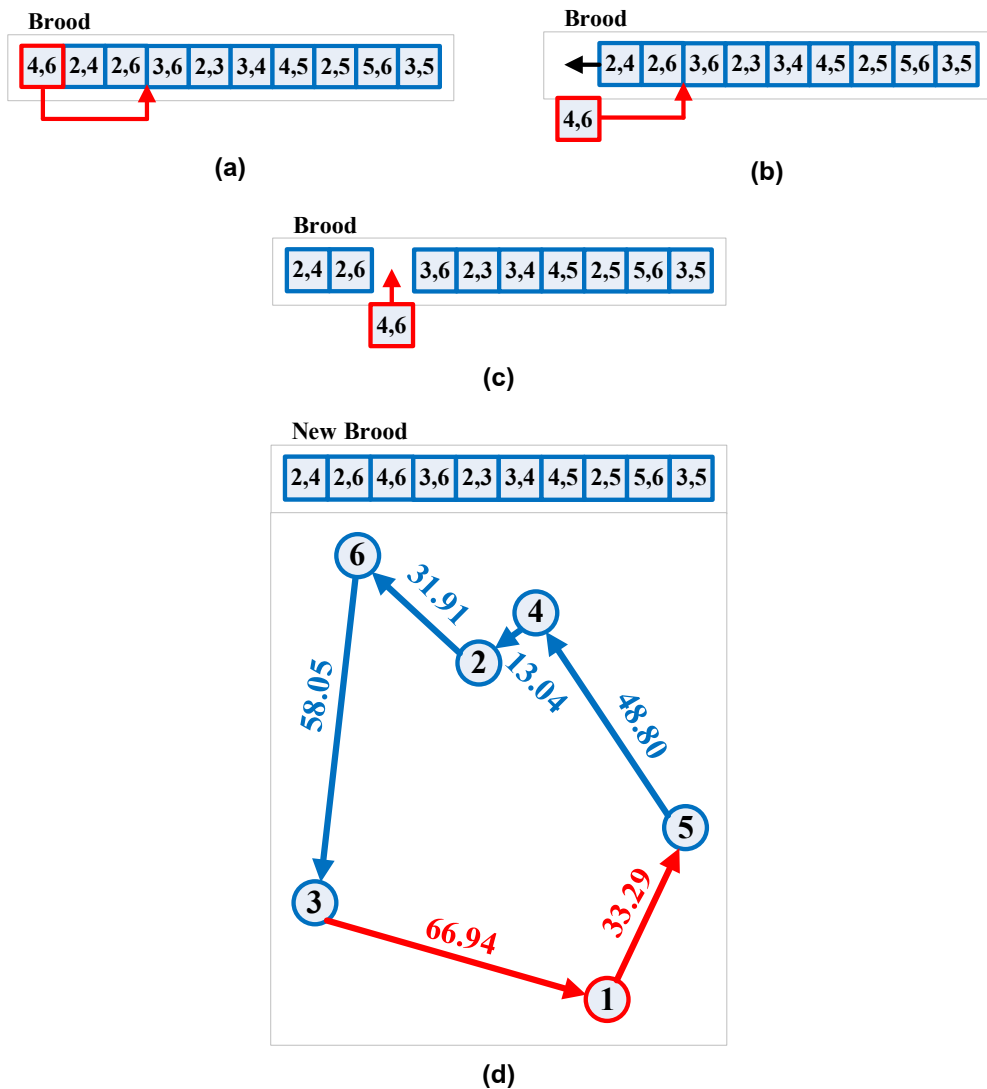


Figure 7 Example of broods feeding process

4. Results and Discussions

The outcomes of the extensive computational testing on the proposed approach are now discussed. Initially, as cited in existing literature, a collection of benchmark problems related to TSP were considered for examination. Subsequently, real-world problems stemming from actual travelers' experiences, which served as the primary motivation for this research, were thoroughly investigated.

The proposed approach was coded using PHP version 8.2.4 and implemented on a cloud server equipped with an Intel® Xeon® Silver 4214 CPU running at 2.20 GHz and supported by 1.99 GB of RAM. The operating environment was the Windows Server 2012 R2 Standard platform. Prior to execution, certain parameters were preset, including Queen=1, Drone=5, Brood=5, Iteration=1000.

4.1 TSP benchmark problems

The performance of the proposed approach was first evaluated using 4 benchmark instances from the TSPLIB library [23]. Each instance is identified by a dataset label followed by the number of nodes. To determine the efficacy of our method, we juxtaposed it with existing TSP algorithms found in the literature.

Table 5 demonstrates the effectiveness of the proposed approach for the solution of the 4 TSP problems. When compared to existing solutions, our method is highly competitive. The proposed approach is able to find all the best known solutions, reported by other approaches which are highlighted by using bold type, for all problems with up to 52 nodes. These indicate that the proposed approach is effective and efficient in producing high quality solutions for the TSP benchmark problems. Therefore, it consistently outperforms.

Table 5 Comparative results with the other algorithms

No.	Instance	Best known	[24]	[27]	[21]	[20]	[19]	[17]	Proposed approach
1	berlin52	7542	7542	—	—	7544	7542	—	7542
2	dantzig42	699	—	—	—	—	—	723	699
3	eil51	426	427	426	426	428	427	513	426
4	oliver30	420	—	420	—	—	—	—	420

4.2 Real-world problem

The real-world problem posed by travelers in Ayutthaya Province, Thailand, was put to the test in our study. The numerical experiment used real data provided by 7 travelers. In this experiment, the case study depends on one day of tourist route in April, 2025, where the traveling distance for general TSP is symmetric. However, the distance of traveling from

place A to place B may differ from the distance when traveling them from place B to place A. Therefore, for this case study, it is asymmetric TSP that our software can also handle problem which has asymmetric distance obtained from Google Maps (<https://maps.google.com>). Although the number of locations in this case study is relatively small, the proposed approach was selected to support practical use in a cloud-based application. Exact methods were not applied, as the study focuses on generating efficient routes under real-world conditions, where responsiveness and adaptability are important. We discuss the case study that the percentage deviation (PD) between the solutions obtained from the proposed approach (new) and the traveler's route (old) is calculated as follows:

$$PD = \left(\frac{new - old}{old} \right) \times 100 \quad (3)$$

From the results in Table 6, we found the new solutions for all travelers. The total traveling distance is reduced by 29.83%. The optimal tourist route, as determined by the proposed approach, markedly outperforms the traveler's original route in all aspects. Furthermore, the seven tourist routes, as charted by the travelers and as proposed by our approach, are depicted in Figure 8.

Table 6 Computational results from the real-world problem

Traveler	Number of places	Solution (km.)	
		Traveler's route	Proposed approach
1	6	15	11
2	7	14	12
3	6	17	15
4	8	15	11
5	7	12	9
6	8	19	11
7	6	9	9

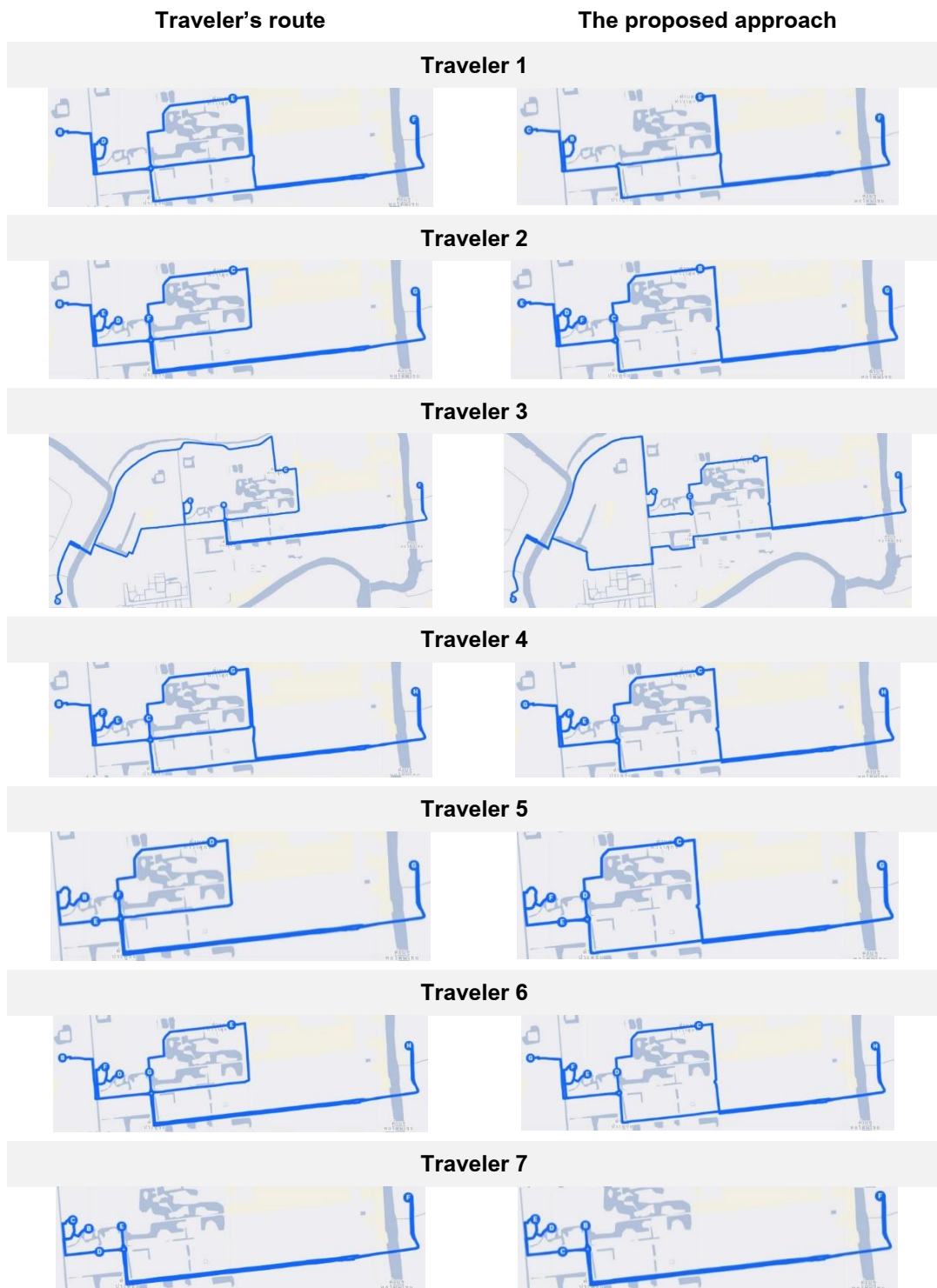


Figure 8 Tourist routes by the travelers and the proposed approach

The visual comparison in Figure 8 demonstrates that the routes generated by the proposed approach are generally more direct and efficient. In contrast, the original routes created by travelers may include unnecessary detours or inefficient sequences due to the lack of systematic planning. This highlights the benefit of applying an optimization algorithm to support decision-making in multi-destination travel.

5. Conclusions

We conducted research on the traveling salesman problem as it pertains to history, culture, and ecotourism in Ayutthaya Province, Thailand. The focus of this study was on route planning for travelers starting from a bicycle shop and heading to their selected destinations. Our method combined the Clarke-Wright algorithm with the honey bees mating optimization algorithm to address the problem. We assessed the efficacy of our approach using TSP benchmark problems, comprising 4 instances sourced from the literature, and juxtaposed our results with the best-known solutions. The findings reveal that our method is on par with top-performing algorithms in terms of solution quality. Notably, it achieved the best-known solution for all tested instances and exhibited superior performance compared to the conventional traveler's route. Consequently, our research underscores the exceptional performance of our approach against other algorithms. Furthermore, the model, methodology, and our proprietary software demonstrate utility in aiding travelers in their decision-making processes.

References

- [1] Clarke G, Wright JW. Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. *Operations Research* 1964;12:568-81.
- [2] Abbass HA. MBO: marriage in honey bees optimization-a haplometrosis polygynous swarming approach. In: *Proceedings of the 2001 Congress on Evolutionary Computation* (IEEE Cat. No.01TH8546) vol.1; 2001 May 27-30; Seoul, Korea. p. 207-14.
- [3] Dantzig G, Fulkerson R, Johnson S. Solution of a large-scale traveling salesman problem. *Journal of the Operations Research Society of America* 1954;2(4):393-410.
- [4] Lin S, Kernighan BW. An effective heuristic algorithm for the traveling salesman problem. *Operations Research* 1973;21(2):498-516.

- [5] Lawler EL, Lenstra JK, Rinnooy Kan AHG, Shmoys DB. The traveling salesman problem. Chichester: John Wiley; 1985.
- [6] Golden BL, Levy L, Vohra R. The orienteering problem. *Naval Research Logistics* 1987;34:307-18.
- [7] Balas E. The prize collecting traveling salesman problem. *Networks* 1989;19(6):621-36.
- [8] Papadimitriou CH. The Euclidean traveling salesman problem is NP-complete. *Theoretical Computer Science* 1977;4:237-44.
- [9] Kirkpatrick S, Gelatt CD., Vecchi MP. Optimization by simulated annealing. *Science* 1983;220:671-80.
- [10] Glover F. Tabu search-part I. *ORSA Journal on Computing* 1989;1(3):190-206.
- [11] Glover F. Tabu search-part II. *ORSA Journal on Computing* 1990;2(1):4-32.
- [12] Potvin JY. Genetic algorithms for the traveling salesman problem. *Annals of Operations Research* 1996;63:337-70.
- [13] Mladenovic N, Hansen P. Variable neighborhood search. *Computers and Operations Research* 1997;24:1097-100.
- [14] Dorigo M, Gambardella LM. Ant colony system: a cooperative learning approach to the traveling salesman problem. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* 1997;1:53-66.
- [15] Dorigo M, Gambardella LM. Ant colonies for the traveling salesman problem. *Biosystems* 1997;43:73-81.
- [16] Suksen K, Benchasattabuse N, Chongstitvatana P. Compact genetic algorithm with quantum-assisted feasibility enforcement. *ECTI Transactions on Computer and Information Technology* 2022;16(4):422-35.
- [17] Pan J, Ji X, Liang A, Huang K, Chu S. Parallel binary cat swarm optimization with communication strategies for traveling salesman problem. *Journal of Internet Technology* 2021;22(7):1621-33.
- [18] Jaiyen E, Leksakul K. Application of element decomposing method for solving traveling salesman problems. *Thai Journal of Mathematics* 2020;18(4):1715-31.
- [19] Phu-ang A, Jitkongchuen D. The Cluster crossover operation for the symmetric travelling salesman problem. *ECTI Transactions on Computer and Information Technology* 2018;12(2):98-105.

- [20] Wang Y. The hybrid genetic algorithm with two local optimization strategies for traveling salesman problem. Computers & Industrial Engineering 2014;70:124-33.
- [21] Chen L, Sun H, Wang S. A parallel ant colony algorithm on massively parallel processors and its convergence analysis for the travelling salesman problem. Information Sciences 2012;199:31-42.
- [22] Zhang J, Feng X, Zhou B, Ren D. An overall-regional competitive self-organizing map neural network for the Euclidean traveling salesman problem. Neurocomputing 2012;89:1-11.
- [23] Reinelt G. TSPLIB-a travelling salesman problem library. ORSA Journal on Computing 1991;3:376-84.
- [24] Chen S, Chien C. Solving the traveling salesman problem based on the genetic simulated annealing ant colony system with particle swarm optimization techniques. Expert Systems with Applications 2011;38(12):14439-50.
- [25] Geng X, Chen Z, Yang W, Shi D, Zhao K. Solving the traveling salesman problem based on an adaptive simulated annealing algorithm with greedy search. Applied Soft Computing 2011;11(4):3680-9.
- [26] Wang Y, Li J, Gao K, Pan Q. Memetic algorithm based on improved Inver-over operator and Lin-Kernighan local search for the euclidean traveling salesman problem. Computers and Mathematics with Applications 2011;62(7):2743-54.
- [27] Wei Z, Ge F, Lu Y, Li L, Yang Y. Chaotic ant swarm for the traveling salesman problem. Nonlinear Dynamics 2011;65:271-81.

Author's Profile



Dr. Tantikorn Pichpibul, School of Engineering, Bangkok University, Pathum Thani, Thailand. Email: tantikorn.p@bu.ac.th

Interested Research Area: Data Analysis, Management Information System, Supply Chain and Logistics Management



Ms.Nareerat Prechatavanitchakul, School of Entrepreneurship, Sripatum University, Bangkok, Thailand. Email: nareerat.pr@spu.ac.th
Interested Research Area: Marketing, Management Information System

Article History:

Received: May 14, 2025

Revised: June 28, 2025

Accepted: July 18, 2025

AXIAL COMPRESSION BEHAVIOR IN BRICK MASONRY WALLS: A COMBINED EXPERIMENTAL AND ANALYTICAL STUDY

Muhammad Zohaib Asim¹, Adnan Nawaz², Tahir Mehmood³, Ali Siddique⁴, Sajid Rasheed⁵
and Asim Sultan⁶

^{1,4,5,6}Lecturer, Civil Engineering Department, NUTECH, Islamabad 44000, Pakistan,

¹muhammad.zohaib@nutech.edu.pk, ⁴alisiddique@nutech.edu.pk,

⁵sajidrasheed@nutech.edu.pk, ⁶asim.sultan@nutech.edu.pk

²Chairman, Civil Engineering Department, COMSATS University Islamabad, Wah Campus,
Wah Cantt 47040, Pakistan, Pakistanadnannawaz@ciitwah.edu.pk

³Director QEC, Civil Engineering Department, COMSATS University Islamabad, Wah Campus,
Wah Cantt 47040, Pakistan, drtahir.mehmood@ciitwah.edu.pk

ABSTRACT

In construction most of the buildings are constructed using brick as a load carry element while there are no standard guidelines and references to practice during preparation of bricks. There is no documented performance sheet available for the mechanical properties of bricks. In this study, bricks using different type of soil as per geological map of Pakistan manufactured by the conventional and zigzag technology are investigated for their mechanical properties. For the comparative analysis of the mechanical properties for the said brick types, 15 masonry prisms along with 10 masonry walls are constructed and investigated for the axial compression. Digital image correlation (DIC) is used to cross-validate the results of deformations measured with linear variable displacement transducer (LVDTs). Furthermore, software models using Abacus are used to correlate the damage analytically. It was observed that zig-zag bricks have more compressive strength than all other conventional bricks although bricks manufactured in Peshawar performed better than other counterparts. The results of this study can be used for designing the experimental program and effective decision-making techniques for mechanical properties of bricks in midrise masonry structure.

KEYWORDS: Digital Image Correlation, Analytical Model, Axial Compression, Masonry Structures, Height to Thickness Ratio

1. Introduction

Bricks have been widely used as building components used for masonry construction globally. Fired clay bricks are used to make load bearing walls in buildings [1]. It's reported that 1.3 trillion bricks are produced worldwide annually. Clay bricks are generally manufactured by baking clay molded blocks in brick kilns. Pakistan has a potential of producing 1.5% clay bricks of the total demand meet by twenty thousand Killens near the urban areas [2].

According to the geological map, Pakistan has a diverse distribution of the sedimentary and metamorphic which is ranging from mudstone to sandstone and shale. Zhang [3] and Oti et al [4] reported that a variation of clay content causes a change in the mechanical properties of bricks. Different tests were performed by researchers to investigate the mechanical properties of bricks. Toure et al [5] investigated the thermal capacity, thermal conductivity, and compressive strength of five different manufacturer bricks and concluded that the vibrated bricks exhibited a lower compressive strength of about 1.6 MPa as compared to an average compressive strength of 2.3 MPa in the case of compressed bricks. Dondi et al [6] investigated the mechanical properties and microstructure of the fired clay bricks and determined that for bricks with equal water absorption, fast firing tends to higher bond strength, lower bulk density, improved frost resistance, and greater mean pore size.

Masonry prisms offer a more accurate representation of actual construction, encapsulating the combined effects of masonry ingredients and workmanship quality. In a study by Singh and Munjal [7], 120 prisms made from burnt clay bricks and concrete blocks, using various mortar types, revealed that compressive strength increased with higher mortar strength and brick strength. Chen et al [8] further explored compressive strength assessment with 192 prisms using burnt clay and pressed-earth bricks, varying mortar proportions and h/t ratios. Their findings contribute to valuable insights into the performance of masonry elements.

Joyklad and Hussain [9] explored the axial and diagonal compressive behavior of ten masonry walls constructed with hollow interlocking bricks. Varying cement-sand grouts, with or without steel bars, revealed that walls with cement-sand grout exhibited reduced deformation. Employing advanced techniques like Zig-zag technology can lead to a 30% reduction in fuel consumption, enhancing heat distribution in the kiln and increasing the production of 1st class bricks from 60% to 95% [10,11]. Yooprasertchai et al [12] investigated

the mechanical properties of concrete made with recycled brick and concrete as a partial replacement for coarse aggregates which show less strength and stiffness than those made with natural aggregates. A cost-effective method using inexpensive glass fiber-reinforced polymer composites (LOC-GFRP) is proposed to address this. The ultimate strain and compressive strength were enhanced by 478% and 271%, respectively. With more LOC-GFRP layers, the resulting bilinear compressive stress vs. strain response demonstrated enhanced ductility and strength. Ali et al [13] investigated the use of plastic as a partial replacement for natural coarse particles in concrete. In order to achieve this, seven concrete mixes were produced by substituting natural aggregates with and without silica fume of comparable replacement levels with cement utilizing 0, 10, 15, and 20% plastic coarse particles. The results showed that adding plastic particles to concrete increased its workability but had a detrimental impact on its mechanical properties and fresh density. Without silica fume, plastic aggregate concrete's compressive and tensile strengths decreased by 32 and 33 percent, respectively.

2. Experimental program

Based on geology, Pakistan is widely distributed in many different classes of soil. According to the soil map of Pakistan, around 26 different types of soil exist in Pakistan. Based on the major soil types, five different regions were selected for the collection of 1st class bricks, as shown in Table 1.

The mechanical and physical properties of 1st class burnt clay bricks, collected from specified regions, were determined by absorption, compressive strength, modulus of rupture, and splitting tensile strength, according to ASTM standards. The typical dimension of the bricks used in this experimental program was L=9" W=4.5" H=3". Before the construction of masonry prisms, the mechanical properties of mortar were determined by preparing 50mm mortar cubes, using one part of cement to 2.75 part of sand by weight with a w/c ratio of 0.485. Ordinary Portland Cement (OPC) was used with the highest compressive strength of 10,000 psi. Locally available sand was used to prepare mortar. 6 mortar specimens were prepared and tested under compression loading after 28 days. The test results of individual bricks and mortar are presented in Table 2. A total of 15 brick masonry prism specimens of varying h/t ratio i.e., 1.42, 2.17, and 2.93 using stack bond were constructed and tested

under compression using a Universal Testing Machine (UTM) with a capacity of 2000 KN. The tests were performed according to ASTM C1314-23a [14].

The thickness of the mortar joints in the masonry prism specimens was 10 mm. Steel plates were placed at the top and bottom of the specimens to ensure that the load was applied uniformly to the prism specimens. The load was applied uniformly not less than two or more than four minutes until the specimen collapsed. A total of 10 walls, single brick wall and double brick wall for each type given in Table 1, were constructed. An experienced mason was hired for the construction of walls. The thickness of the mortar joints was 10 mm. The dimensions of the wall specimens were 700 mm × 700 mm. The wall specimens were subjected to 28 days of curing. Hessian cloth technique was employed for curing wall specimens. The masonry walls were tested under pure axial compression as per ASTM C1717-18 [15] under a reaction frame with a capacity of 1000KN.

The axial load was applied using a hydraulic jack with a uniform rate until the wall failed. The propagation and intimation of cracks were visually inspected and recorded by a camera. A steel girder was used to distribute the load on the wall specimens. The experimental setup is illustrated in Fig. 1. One linear variable differential transducer (LVDT) was attached to the face of the walls to determine the axial deformation in mm that was noted using a data logger, as shown in Fig 2.

Table 1 Regional details

Regions	Type of soil	Brick type	Brick class	Cities
Region A	Alluvial soil	Conventional fired clay bricks	1 st class	Peshawar
Region B	Loamy soil	Conventional fired clay bricks	1 st class	Taxila
Region C	Calcareous sandy soil	Conventional fired clay bricks	1 st class	Sargodha
Region D	Mainly loamy part gravelly soil	Conventional fired clay bricks	1 st class	Quetta
Region E	Loamy and clayey soil	Zig-zag technology bricks	1 st class (Zig-zag)	Rawalpindi

Table 2 Properties of constituent materials

Constituent material	Region	Test conducted	Test Result
Brick	Z	Absorption (%)	13.2
	P	ASTM C67-17 [16]	14.4
	S		16.2
	T		18.9
	Q		19.9
	Z	Compressive strength (MPa)	13.9
	P	ASTM C67-17 [16]	11.3
	S		9.8
	T		9.7
	Q		7.0
	Z	Modulus of rupture (MPa)	4.2
	P	ASTM C67-17 [16]	3.7
	S		2.8
	T		2.7
	Q		2.6
	Z	Splitting tensile strength (MPa)	1.3
	P	ASTM C1006-07 [17]	1
	S		0.7
	T		0.67
	Q		0.3
Mortar	Locally	Compressive strength (MPa)	21.3
	available sand	ASTM C109/C109M-16a [18]	

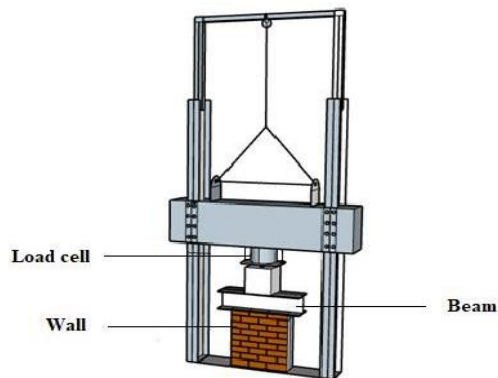


Figure 1 Experimental setup

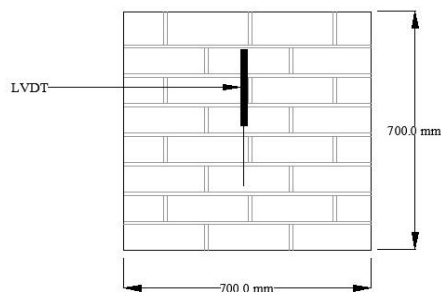


Figure 2 Dimensions and instrumentation of axial compression test

3. Experimental results

3.1 Tests on brick prisms

In this study, a total of 15 prism specimens using bricks were constructed i-e 2 bricks, 3 bricks, and 4 bricks masonry prisms were structured. The compressive strength of the prisms was investigated using UTM having capacity of 5000 KN in accordance with ASTM C1314-23a [14] after 28 days of curing. h/t ratio varied in the prism specimens i.e., 1.42 for 2 brick prisms, 2.17 for 3 brick prisms, and 2.93 for 4 brick prisms. The ultimate load, and the compressive strength of masonry prism specimens are shown in Table 3. It can be observed that the prism strength increases with the increase in the brick strength. The brick units possess the greater part of the prism's volume and provide a direct load transfer path. A similar variation was reported by Thaickavil and Thomas [19]. The variation of compressive strength of masonry prism with the influence of brick strength is shown in Fig.3.

Table 3 Results of test for axial compression on brick prisms

Sr. No.	Region	Single brick strength f_b (MPa)	Designation of prisms	h/t	Max. Load (kN)	Prism strength f_p (MPa)	Modulus of Elasticity E (MPa)
1	Zigzag	13.9	Z2	1.42	155	4.9	3675
2			Z3	2.17	115	4.4	3300
3			Z4	2.93	108.5	4.3	3225
4	Peshawar	11.3	P2	1.42	134.2	4.2	3150
5			P3	2.17	97	3.7	2775
6			P4	2.93	90.9	3.6	2700
7	Sargodha	9.8	S2	1.42	135	4.2	3150
8			S3	2.17	94.4	3.6	2700
9			S4	2.93	82.2	3.3	2475
10	Taxila	9.7	T2	1.42	103.5	3.2	2400
11			T3	2.17	75.9	2.9	2175
12			T4	2.93	69.5	2.8	2100
13	Quetta	7.0	Q2	1.42	93.5	2.9	2175
14			Q3	2.17	69.5	2.7	2025
15			Q4	2.93	50	2.0	1500

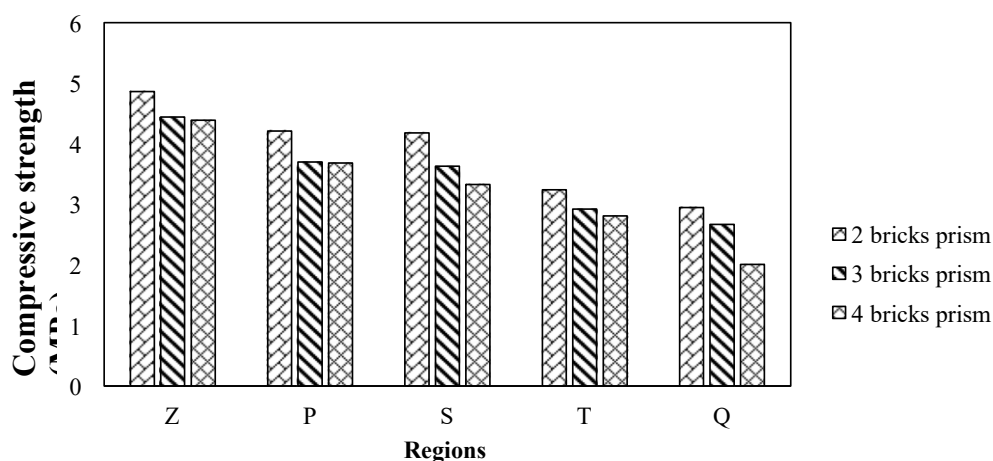


Figure 3 Influence of brick strength on the compressive strength of masonry prism

The percentages of water absorption of bricks are given in Table 2, the bricks collected from the Quetta region exhibited the highest absorption value of 19.9% as compared to other regions. Zig-zag kiln bricks showed the lowest absorption value of 12.96%. Absorption percentage has an inverse relation with the strength so that if the percentage absorption is higher than the compressive strength tends to decrease and vice versa [20,21] as shown in Fig. 3. Fig. 4 shows the comparison of the compressive strength of prisms of different regions with respect to the h/t ratio. The compressive strength of the prism decreases with an increase in the h/t ratio and bulge of specimens reflected Poisson's effect. However, due to the friction between the surface of the prism and steel plates of the machine, the top and bottom of the prism were restricted to bulge laterally and as a result of this, the middle zone of the prism was under tension and the top and bottom of the prism were under compression. A similar variation was reported by previous researchers [19] Masonry is weak in tension because of the weak links at the brick-mortar interface. When the height of the prism increases the zone subjected to tensile stress increases and this tensile zone is vulnerable to cracking due to which the strength of the prism decreased with the increase in height of the prism.

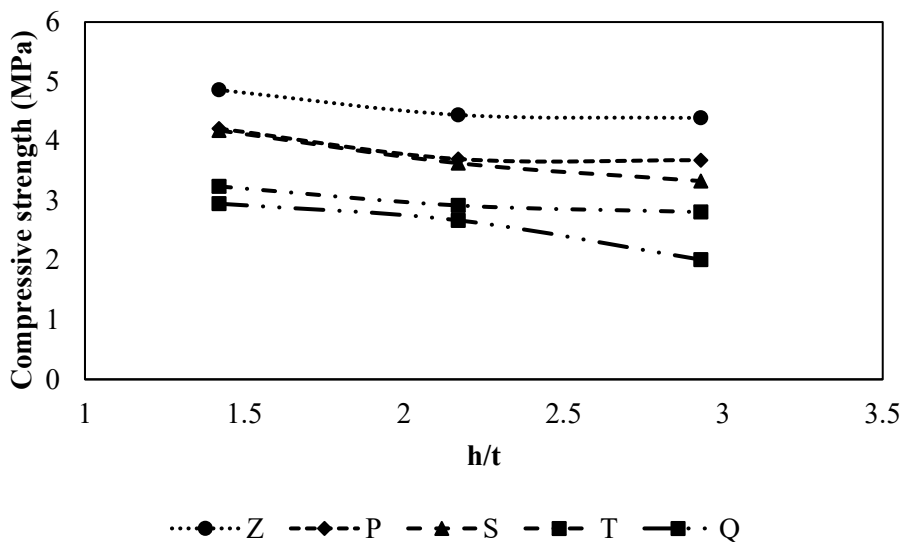


Figure 4 Effect of h/t ratio on the compressive strength of brick prisms

The failure pattern of brick prisms is shown in Fig. 5 where it can be seen that the failure occurred by vertical splitting. Under axial compression, bricks expand laterally but the soft brick strong mortar combination makes them confined hence, the mortar was subjected to a biaxial tension state and the bricks were subjected to a triaxial compression state, resulting in vertical splitting. A similar crack pattern was observed by previous researchers [22]. Teja [23] also investigated the mechanical properties of bricks and observed similar vertical splitting failure along with diagonal and crushing failure in the prism specimens.



Figure 5 Vertical splitting failure of brick prisms

3.2 Wall testing

3.2.1 Axial compression of the double brick wall

A total of ten wall specimens were constructed, one single brick wall and one double brick wall from each region were planned. The compressive strength results of double brick masonry wall specimens are shown in Table 4. The compressive strength of the wall specimens was calculated by dividing the ultimate load over the area of the wall. The Zig-zag brick wall failed at the ultimate load of 600 KN with an axial deformation of 2.8mm and a compressive strength of 3.7 MPa. The Zig-zag wall showed the highest ultimate load carrying capacity and compressive strength as compared to the other regions' walls. The Quetta region wall showed the lowest ultimate load carrying capacity of 374 KN with an axial deformation of 2.8 mm and its compressive strength was 2.34 MPa, which was also lowest as compared to the other regions' walls. The compressive strength of single brick affected the axial compressive strength of the wall as the strength of the Quetta region brick was lowest as compared to the other regions' bricks and ultimately its wall strength also turned

out to be the lowest in all the wall specimens. This could be attributed to the higher percent absorption of Quetta bricks. The failure in axial compression occurred by vertical cracking followed by splitting and crushing of bricks. This type of failure mainly occurs due to different strain characteristics of bricks and mortar joints. Vertical cracks occurred parallel to the direction of the applied load. It was investigated that masonry walls and small wallets in axial compression and concluded that the vertical cracks appeared first at the top course of bricks and then propagated all over the wall specimen.

Table 4 Axial compressive strength of double brick walls

Sr. No	Wall type	Ultimate load (kN)	Compressive strength (MPa)	Axial deformation (mm)
1	Z	600	3.7	2.8
2	P	523	3.3	2.2
3	S	430	2.7	3.4
4	T	400	2.6	1.7
5	Q	374	2.3	2.8

The graph in Fig. 6 illustrates the axial load versus axial deformation response of double brick masonry walls in the specified regions. Initially, all curves displayed linear behavior up to approximately 30% of the maximum load. This was attributed to connections between bricks and mortar, resulting in less cracks. However, as the load continued to increase, the bearing load capacity of the bricks diminished, leading to cracks in the mortar joints. The nonlinear behavior of the wall specimens was primarily associated with the initiation of vertical cracks. The combination of soft bricks and strong mortar caused the bricks to be confined, subjecting the mortar to a biaxial tension and the bricks to a triaxial compression, ultimately leading to vertical splitting failure. Notably, bricks from the Sargodha region exhibited confinement after reaching the ultimate load, indicating a higher load-bearing capacity. Smaller cracks were observed, and as the load increased, more cracks developed internally, showing a regular pattern of deformation.

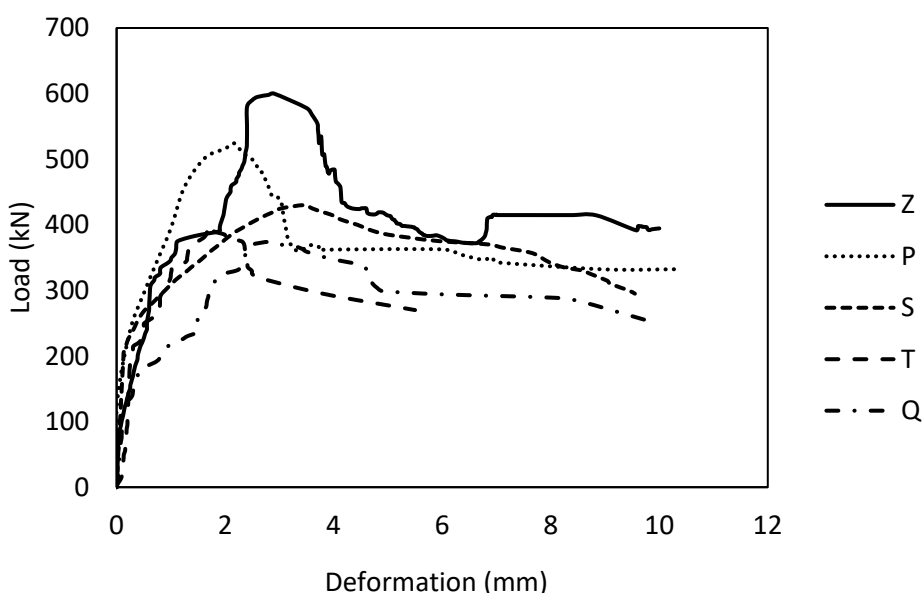


Figure 6 Axial load vs deformation of double brick walls

3.2.2 Axial compression of the single brick wall

The compressive strength results of single brick masonry wall specimens are shown in Table 5. The Zig-zag brick wall failed at the ultimate load of 290 kN with an axial deformation of 2.63 mm and a compressive strength of 3.62 MPa, which was highest compared to other wall types. The Quetta region wall showed the lowest ultimate load-carrying capacity of 180 kN with an axial deformation of 2.85mm and a compressive strength of 2.25 MPa, which was lowest as compared to other regions. The compressive strength of single bricks affected the strength of the wall as the Zig-zag bricks with the highest compressive strength as compared to other regions bricks also exhibited higher strength of Zig-zag brick wall. Tables 4 and 5 also demonstrate that the thickness of wall specimens affects the ultimate load-carrying capacity of the walls. The double brick walls exhibited higher load carrying capacity as compared to the single brick walls because of the lower slenderness ratio of the double brick wall. It has been indicated in the literature that as the slenderness ratio of masonry walls increases, the strength of the masonry wall decreases [24,25]. The slenderness ratio can be calculated by dividing the height over the thickness of the wall specimen. Kirtschig and Anstötz [26] also investigated the relationship between slenderness ratio and compressive strength and concluded that the strength of wall specimens decreased

by increasing the slenderness ratio. Similar to the double brick walls, vertical cracks occurred parallel to the direction of the applied load [27].

Table 5 Axial compressive strength of single brick walls

Sr. No	Wall type	Ultimate load (kN)	Compressive strength (MPa)	Axial deformation (mm)
1	Z	290	3.6	2.6
2	P	250	3.1	2.2
3	S	205	2.6	3.5
4	T	190	2.4	1.5
5	Q	180	2.2	2.8

The graphical representation in Fig. 7 illustrates the axial load versus axial deformation characteristics of single brick masonry walls. Similar trends were observed in single brick walls compared to their double bricks. Initially, all curves exhibited linear behavior up to approximately 30% of the maximum load, attributed to the limited development of cracks due to firm bonding between bricks and mortar. However, as the load increased, the bricks lost their load-bearing capacity, and cracks initiated in the mortar joints, leading to nonlinear behavior beyond the ultimate load. In wall specimens, the nonlinear behavior primarily resulted from the initiation of vertical cracks. The combination of bricks and mortar created a state of triaxial compression for the bricks and biaxial tension for the mortar. Notably, the Sargodha region brick exhibited significantly better post-ultimate load behavior, reflecting the similarity of performance observed in double brick walls. On the other hand, the Taxila region brick wall displayed more brittle behavior compared to other specimens, as of its lowest ultimate deformation.

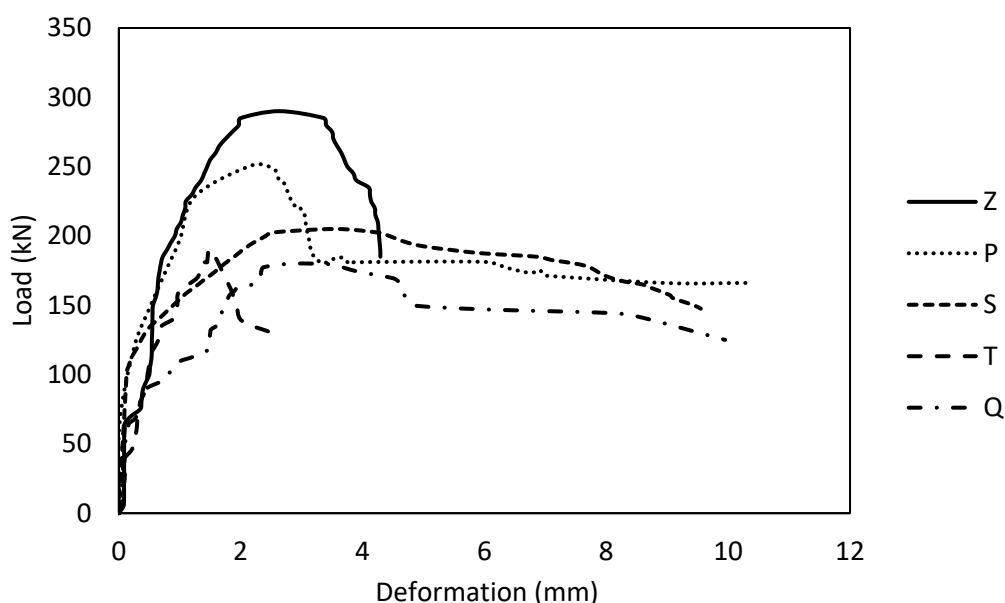


Figure 7 Axial load vs deformation of single brick walls

3.2.3 Ductility ratio of the wall specimens

The ductility level defines the capacity of the specimens to absorb energy and their ability to deform. Ductility is the ability of a structure or its members to undergo a wide inelastic deformation beyond the initial yield deformation without losing load-carrying capacity or without breaking before failure. A structure must have strength as well as ductility for adequate performance. Structures with adequate ductility will not collapse suddenly and can undergo large deformations and provide adequate time to evacuate before failure [28,29]. The ductility (μ) of the wall specimens was calculated as the ratio of ultimate deformation (Δ_u) to yield deformation (Δ_y), as shown in equation (1).

$$\text{Ductility} = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (1)$$

The yield strain was calculated as 80% of the strength [30]. The ductility of double and single brick wall specimens is given in Tables 6 and 7, respectively. The Sargodha region brick wall showed the highest ductility as compared to other regions. More ductile behavior of the specimens reflects that they will absorb more energy before the collapse

[31]. The Quetta region brick showed the lowest ductility as compared to other regions. The ductility of both single and double brick wall specimens was in good agreement with the standard requirement which specifies that the minimum ductility ratio for unreinforced masonry walls should be at least 1.25. The ductility ratio of double and single brick wall specimens of different regions is presented in Figs. 8 and 9, respectively. The ductility factor is affected by the stiffness of the wall specimens as stiffer structure exhibits more brittle behavior.

Table 6 Ductility of double brick wall specimens subjected to axial compression

Sr. No	Wall type	Δu (mm)	Δy (mm)	μ
1	Z	2.80	0.69	4.1
2	P	2.10	0.75	2.8
3	S	3.40	0.71	4.8
4	T	1.71	0.69	2.5
5	Q	2.81	1.51	1.9

Table 7 Ductility of single brick wall specimens subjected to axial compression

Sr. No	Wall type	Δu (mm)	Δy (mm)	μ
1	Z	2.60	0.72	3.6
2	P	2.21	0.75	2.9
3	S	3.50	0.47	7.4
4	T	1.51	0.65	2.6
5	Q	2.81	1.31	2.1

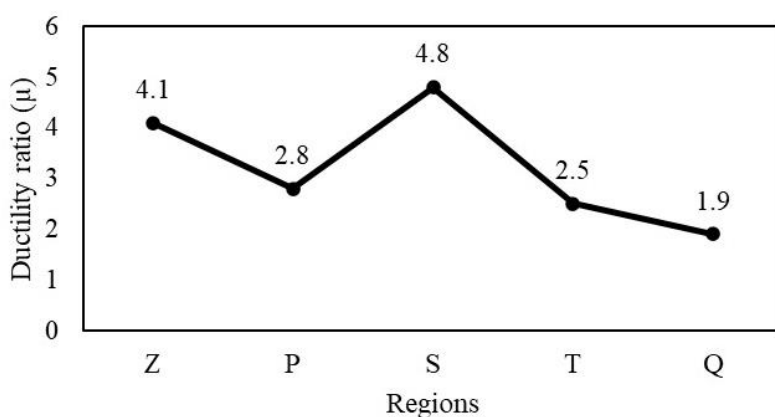


Figure 8 Ductility ratio of double brick walls

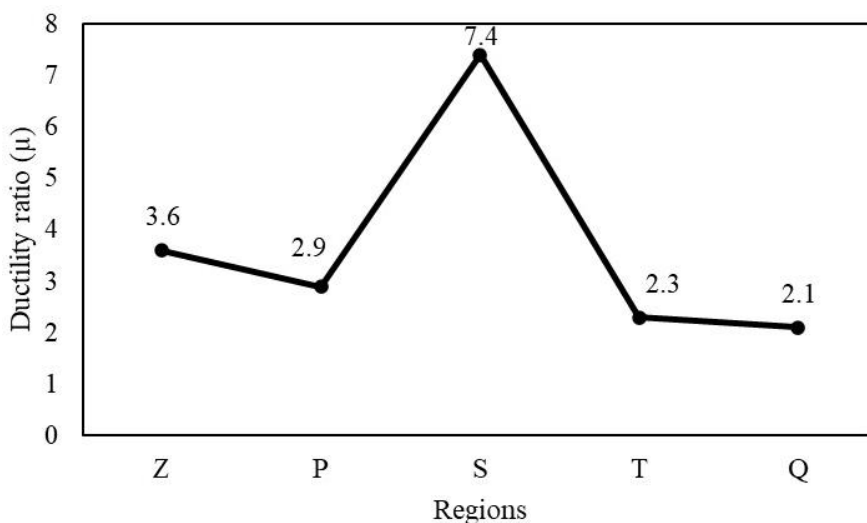


Figure 9 Ductility ratio of single brick walls

3.2.4 Application of DIC technique for axial deformation

An analytical technique of 2D digital image correlation was also used to correlate the deformations results. Digital image correlation (DIC) is an optical technique that incorporates image registration and tracking methods for precise 2D measurements of changes in images [32,33]. In 1975, correlation theories for measuring data changes were extended to digital images for the first-time digital image correlation is a very effective technique to measure deformations and strains without employing LVDTs or a data logger [34]. A digital camera of 18MP with a frequency of 30Hz was used to obtain high-quality images of the test specimens

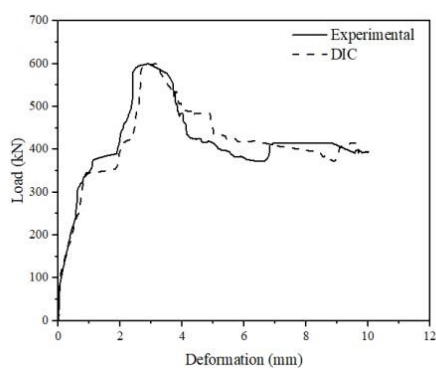
correlate software that was used as an easily accessible opensource platform. For DIC analysis, the creation of the stochastic pattern is a crucial step [35]. High contrast images are required to optimize the DIC analysis. For this purpose, the specimens were painted with white paint, and different points were marked on the front face and a black speckled pattern was applied on the back face of the wall for strains, as shown in Fig 10. The videos of the whole test were recorded at the rate of 30 frames per second to obtain high-quality images. The timeline of the videos recorded by the digital camera was then synchronized with the time recorded by the data logger. A facet of 30x30 pixels was used to track the deformation of the wall during the test. The results obtained from the two-dimensional image correlation (GOM) and LVDTs were compared.



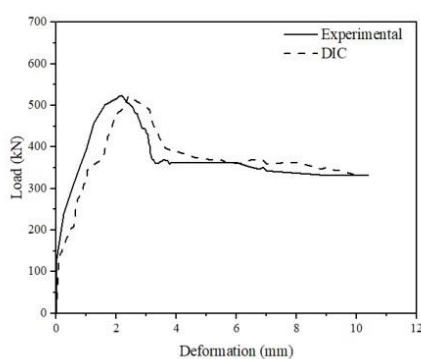
Figure 10 Black speckle pattern over the face of the wall

3.2.5 Comparison of axial deformation of double and single brick walls with DIC technique

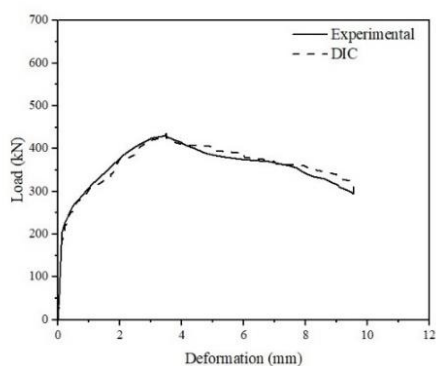
Load deformation curves for the double brick wall specimens of each region, as obtained by the experimental and DIC technique, are shown in Fig. 11. The agreement was found to be reasonably good between the LVDT and DIC measurements. The percentage difference between the experimental and DIC values of maximum deformations for Zigzag, Peshawar, Sargodha, Taxila, and Quetta regions was 3.57%, 0.46%, 1.62%, 1.16%, and 1.79%, respectively. The percentage difference between the experimental and DIC values of maximum deformations for double brick walls of Zigzag, Peshawar, Sargodha, Taxila, and Quetta regions was 2.63%, 0.92%, 1.3%, 1.99%, and 1.05%, respectively.



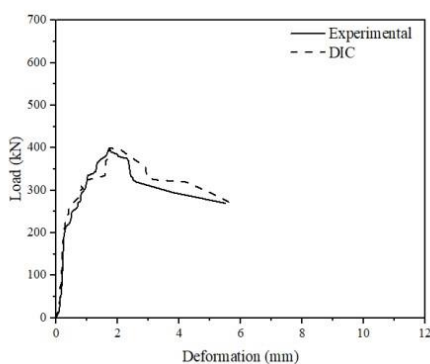
(a) Zigzag



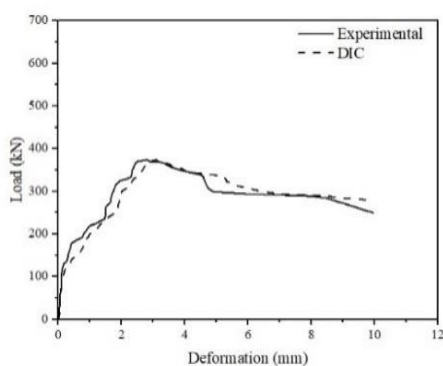
(b) Peshawar



(c) Sargodha



(d) Taxila



(e) Quetta

Figure 11 Comparison of experimental and DIC calculated axial deformations of double brick wall specimens

Table 8 Comparison of Axial Deformation of Walls with DIC and FEM

Sr. No	Wall type	% Difference b/w experimental and	% Difference b/w experimental and	% Difference b/w experimental and	% Difference b/w experimental and
		DIC values	DIC values	FEM values	FEM values
		(Single brick)	(Double brick)	(Single brick)	(Double brick)
1	Z	3.75	2.63	0.76	3.1
2	P	0.46	0.92	19.72	0.46
3	S	1.62	1.3	6.94	1.27
4	T	1.16	1.99	0.66	1.16
5	Q	1.79	1.05	0.35	2.14

3.3 Failure modes of the wall specimens

The observed failure patterns are similar, primarily with significant damage at both the upper and lower courses of the wall. In the case of axial compression on the wall specimens, the primary mode of failure was the development of vertical (flexure) cracks aligning parallel to the applied load direction. Subsequent failures ensued as a result of the splitting and crushing of the bricks within the loading region. In addition to these principal cracks, numerous minor cracks manifested on the walls. The damage initiation originated from the brick surface and extended across the wall surface through joints. The level of brick damage was high due to the comparatively higher compressive strength of the mortar.

Lenczner [36] described the brick-and-mortar behavior subjected to axial load and concluded that the mortar joint appears to expand laterally when the load is applied because of its less rigid behavior, as compared to bricks. When the tensile stress on a brick surpasses its ultimate tensile strength, failure occurs. In our case, the combination of a weak brick and strong mortar resulted in the mortar experiencing tension, while the brick underwent compression. The failure of the brickwork under axial compression primarily initiated from vertical splitting caused by distinct strain characteristics in both mortar joints and bricks. Additionally, horizontal tension in the bricks contributed to the overall failure. Similar behavior was also observed.

Fig. 12 and 13 show the same crack pattern in both the experimental and DIC technique. Cracks observed by DIC showed a good relationship with the experimental results [37].

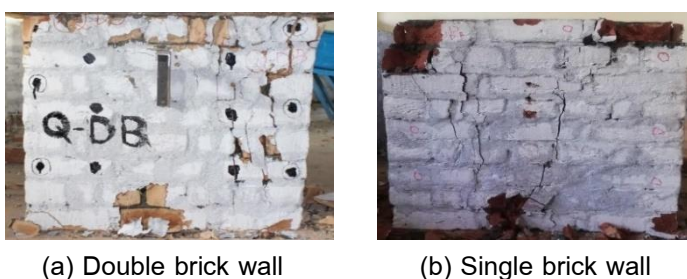


Figure 12 Failure modes of wall specimens subjected to axial loading.

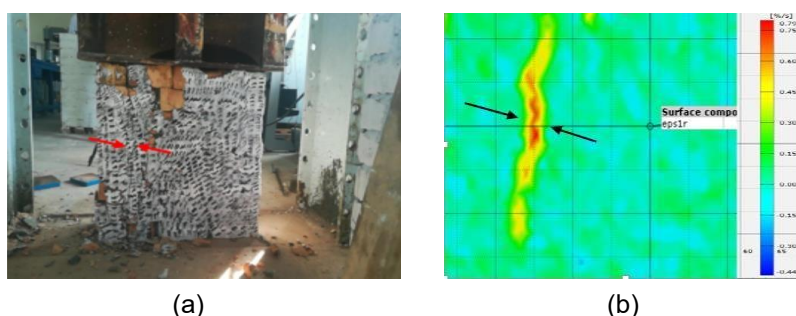


Figure 13 Crack pattern (a) experimental view (b) DIC crack visibility

3.4 Finite element modeling of brick walls

For the numerical idealization of the actual member, accuracy in the modelling of element type and size, geometry, material properties, boundary conditions, and loads is essential. Finite element modeling was carried out to compare experimental and analytical results. Abaqus software was used for numerical modeling of brick masonry walls under axial compression [38]. There are several ways to model masonry in Finite Element Analysis (FEA) varying from a very detailed micro-level to a composite macro level, as discussed by Van Noort [39] and Lourenço [40]. The macroscale model was used in this study. For modeling masonry walls, two parts were defined in the “Part Module” of Abaqus, i.e., top beam, and the masonry wall. These parts were created as 3d deformable type with a solid shape as recommended by previous studies [41,42]. The parts were meshed in the “Mesh Module” of Abaqus but before that, an approximate global seed size of 70 mm was provided from the menu bar in part. The model geometry of a simple and meshed wall is shown in Fig. 14. For both Abaqus/Standard and Abaqus/Explicit, the “Concrete Damaged Plasticity model” was applied, offering a general capability for concrete analysis and appropriate for

masonry. The masonry wall was connected to the beam by forming a surface-to-surface contact in the create [43,44].

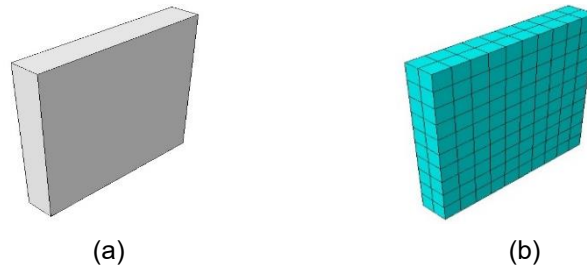


Figure 14 Model geometry used in Abaqus (a) simple wall (b) meshed wall

“Interaction Module”. A reference point (RP-1) was made on the girder to connect it to the wall and load was applied as shown in Fig. 15. Based on previous research the displacement type boundary condition was applied at the top part and ENCASTRE boundary condition was applied to the wall's bottom.

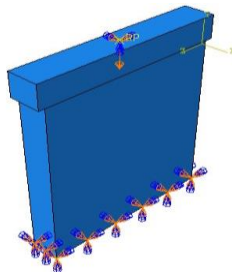


Figure 15 Model showing boundary conditions and load applied in axial compression testing

3.4.1 Comparison of axial compression behavior of double and single brick walls using Abaqus

Abaqus software was used to analytically determine the axial compressive behavior of the wall specimens. The percentage difference between the experimental and analytical values of maximum deformation of double brick wall for Zigzag, Peshawar, Sargodha, Taxila, and Quetta regions' bricks was 3.1%, 0.46%, 1.27%, 1.16%, and 2.14%, respectively. The percentage difference between the experimental and analytical values of maximum load for

the above-mentioned region's bricks was 0.33%, 1.23%, 0.47%, 0.25%, and 0.27%, respectively. Load deformation curves for the single brick wall specimens of each region are shown in Fig. 16. The percentage difference between the experimental and analytical values of maximum deformation for Zigzag, Peshawar, Sargodha, Taxila, and Quetta regions, bricks was 0.76%, 19.72%, 6.94%, 0.66%, and 0.35%, respectively. The percentage difference between the experimental and analytical values of maximum load for the above-mentioned regions bricks was 0.34%, 0.8%, 2.93%, 1.58%, and 3.78%, respectively. A good agreement between the experimental and Abaqus results was observed for both single and double brick walls. Fig.17 (a-d) shows the comparison of damage visualization of the wall specimens using Abaqus. It can be observed that the compression starts from the top of the wall and propagates all over the specimen. The failure of the brickwork under axial compression is usually attributed to horizontal strain in the bricks due to vertical splitting [36]. After observing the crack pattern in software at different stress levels, it was observed that initially, the cracks developed on the upper side of the wall below the girder and then propagated all over the wall.

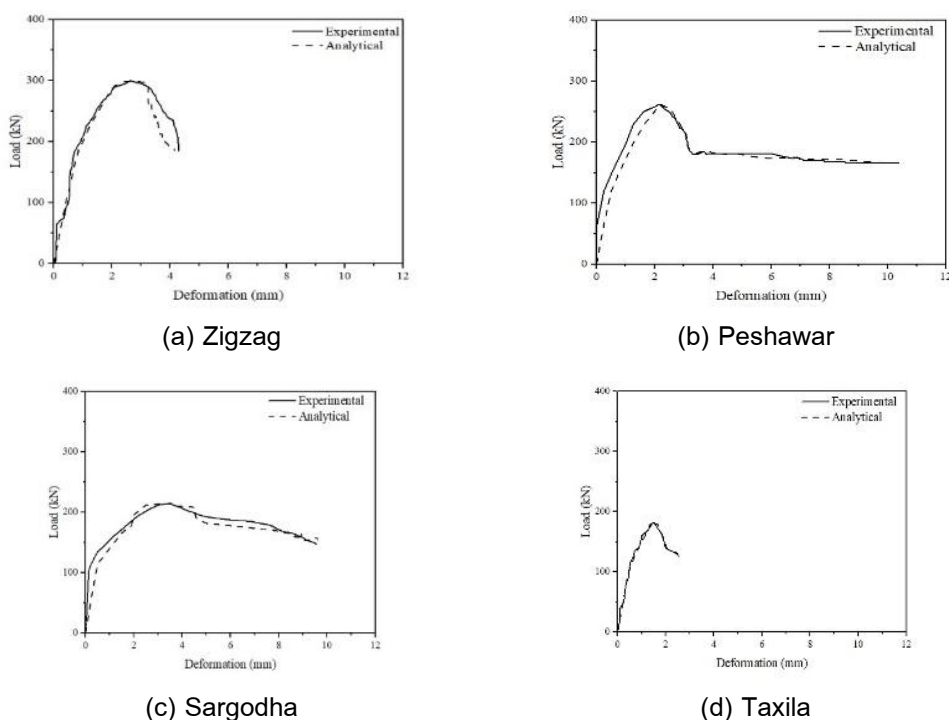
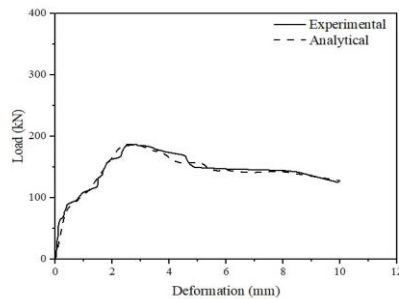


Figure 16 Comparison of the experimental and analytical deformation of single brick wall specimens subjected to axial compression.



(e) Quetta

Figure 16 (continued) Comparison of the experimental and analytical deformation of single brick wall specimens subjected to axial compression

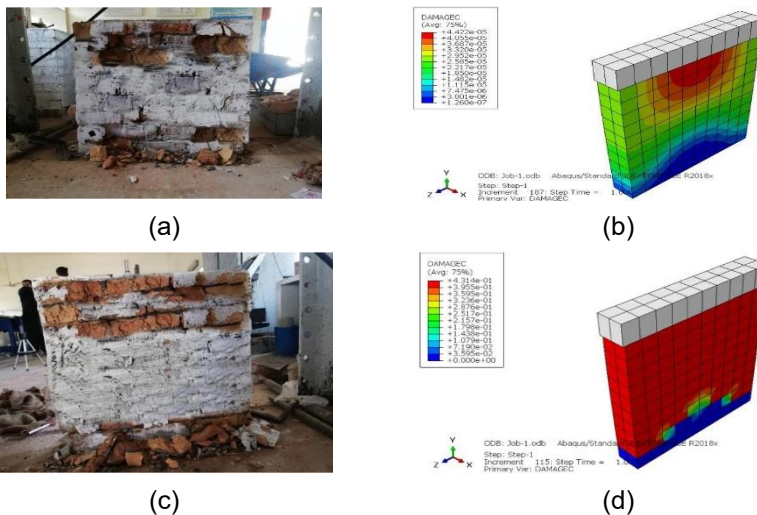


Figure 17 Comparison of damage visualization using Abaqus (a), (c) Experimental view (b), (d) Abaqus software view

4. Conclusion

Masonry walls using different types of bricks are tested against uniaxial compression. The results of deformations and strains as well as a digital image correlation are concluded as follows.

Bricks from the Peshawar region demonstrated superior mechanical properties among conventional kilns, while zig-zag kiln bricks outperformed their conventional counterparts. However, prisms constructed with zig-zag kiln bricks exhibited higher compressive strength

than those from other regions. The study revealed that single brick strength directly influenced masonry prism strength, which decreased with higher h/t ratios. zig-zag kiln bricks also resulted in enhanced compressive strength in both single and double brick walls compared to bricks from other regions.

Validation using LVDT values confirmed the accuracy of deformations obtained through digital image correlation (DIC), indicating satisfactory results. Additionally, DIC monitoring proved effective in identifying incipient cracks before visible signs emerged. This cost-effective DIC system presents a viable alternative for full-scale structural testing, offering potential improvements over existing monitoring approaches. The analytical results obtained by Abaqus software were in good agreement with the experimental results.

Acknowledgment

The authors are very grateful to the Higher Education Commission of Pakistan (HEC) for providing the research grant to carry out this research work.

References

- [1] Sutcu M, Alptekin H, Erdogmus E, Er Y, Gencel O. Characteristics of fired clay bricks with waste marble powder addition as building materials. *Construction and Building Materials* 2015;82:1-8.
- [2] Climate & Clean Air Coalition secretariat. Pakistan moves toward environmentally friendly and cost-effective brick kilns. Paris: United Nations Environment Programme; 2018.
- [3] Zhang L. Production of bricks from waste materials – a review. *Construction and Building Materials* 2013;47:643-55.
- [4] Oti JE, Kinuthia JM, Robinson RB. The development of unfired clay building material using Brick Dust Waste and Mercia mudstone clay. *Applied Clay Science* 2014;102:148-54.
- [5] Toure PM, Sambou V, Faye M, Thiam A. Mechanical and thermal characterization of stabilized earth bricks. *Energy Procedia* 2017;139:676-81.
- [6] Dondi M, Marsigli M, Venturi I. Microstructure and mechanical properties of clay bricks: comparison between fast firing and traditional firing. *British Ceramic Transactions*. 1999;98(1):12-8.

- [7] Singh SB, Munjal P. Bond strength and compressive stress-strain characteristics of brick masonry. *Journal of Building Engineering* 2017;9:10-6.
- [8] Chen Z, Chen W, Mai C, Shi J, Xie Y, Hu H. Experimental study on the compressive behaviors of brick masonry strengthened with modified oyster shell ash mortar. *Buildings* 2021;11(7):266.
- [9] Joyklad P, Hussain Q. Experimental study on axial and diagonal compressive behavior of brick masonry walls. *Kasem Bundit Engineering Journal* 2018;8(2):1-20.
- [10] Lalchandani D, Maithel S. Towards cleaner brick kilns in India: a win-win approach based on zigzag firing technology. Dehli, India: Greentech Knowledge Solutions; 2013.
- [11] The Express Tribune. Brick kiln innovation: zig-zag technology can cut pollution. The Express Tribune. 2018 Sep 13.
- [12] Yooprasertchai E, Saingam P, Hussain Q, Khan K, Ejaz A, Suparp S. Development of stress-strain models for glass fiber reinforced polymer composites confined sustainable concrete made with natural and recycled aggregates. *Construction and Building Materials* 2024;416:135097.
- [13] Ali K, Saingam P, Qureshi MI, Saleem S, Nawaz A, Mehmood T, et al. Influence of recycled plastic incorporation as coarse aggregates on concrete properties. *Sustainability* 2023;15(7):5937.
- [14] ASTM International. ASTM C1314-23a. Standard test method for compressive strength of masonry prisms. West Conshohocken (PA): ASTM International; 2023.
- [15] ASTM International. ASTM C1717-18. Standard test methods for conducting strength tests of masonry wall panels. West Conshohocken (PA): ASTM International; 2018.
- [16] ASTM International. ASTM C67-17. Standard test methods for sampling and testing brick and structural clay tile. West Conshohocken (PA): ASTM International; 2017.
- [17] ASTM International. ASTM C1006-07. Standard test method for splitting tensile strength of masonry units. West Conshohocken (PA): ASTM International; 2007.
- [18] ASTM International. ASTM C109/C109M-16a. Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (Using 2-in. or [50-mm] cube specimens). West Conshohocken (PA): ASTM International; 2013.
- [19] Thaickavil NN, Thomas J. Behaviour and strength assessment of masonry prisms. *Case Studies in Construction Materials* 2018;8:23-38.

- [20] Deboucha S, Hashim R. Correlation between total water absorption and wet compressive strength of compressed stabilised peat bricks. *International Journal of the Physical Sciences* 2011;6(10):2432-8.
- [21] Ali N, Mohd Yusup NF, Sheikh Khalid F, Shahidan S, Abdullah SR. The effect of water cement ratio on cement brick containing High Density Polyethylene (HDPE) as sand replacement. *MATEC Web of Conferences* 2018;150:03010.
- [22] Sathiparan N, Rumeshekumar U. Effect of moisture condition on mechanical behavior of low strength brick masonry. *Journal of Building Engineering* 2018;17:23-31.
- [23] Teja PRR. *Studies on Mechanical Properties of Brick Masonry* [thesis]. Rourkela : National Institute of Technology Rourkela; 2015.
- [24] Hasan SS, Hendry A. Effect of slenderness and eccentricity on the compressive strength of walls. In: *Proceedings of the 4th International Brick Masonry Conference*; 1976 Apr 26-28; Brugge, Belgium.
- [25] Wan Ibrahim WR. *Effect of the slenderness ratio on masonry wall under axial compressive cyclic loading* [dissertation]. Penang, Malaysia: Universiti Sains Malaysia; 2014.
- [26] Kirtschig K, Anstötz W. Kinckuntersuchungen an mauerwerksproben. In: *Proceedings of the 9th International Brick/Block Masonry Conference*; 1991 Oct 13-16; Berlin, German. p. 202-9.
- [27] Churilov S. *Experimental and analytical research of strengthened masonry* [dissertation]. Skopje, Macedonia: University Ss. Cyril and Methodius; 2012.
- [28] Paulay T, Priestley MN. *Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings*. New York: John Wiley & Sons; 1992.
- [29] Faizah R, Satyarno I, Priyosulistyo H, Aminullah A. Improving the masonry brick ductility using mortar bed joint from rubber tire crumbs: a review. *Journal of Physical Science* 2018;29 Suppl 2:117-32.
- [30] Mahmood H, Ingham J. Diagonal compression testing of FRP-retrofitted unreinforced clay brick masonry wallettes. *Journal of Composites for Construction* 2011;15:810-20.
- [31] Triwiyono A, Nugroho ASB, Firstyadi AD, Ottama F. Flexural strength and ductility of concrete brick masonry wall strengthened using steel reinforcement. *Procedia Engineering* 2015;125:940-7.
- [32] Gu J, Liu G, Yang Q, Law SS. Improved SURF method in digital image correlation for estimation of large rotation angle. *Measurement* 2023;207:112372.

- [33] Mudassar AA, Butt S. Improved Digital Image Correlation method. *Optics and Lasers in Engineering*. 2016;87:156-67.
- [34] Keating TJ, Wolf PR, Scarpace FL. An improved method of digital image correlation. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 1975;41(8):993-1002.
- [35] Strauss A, Castillo P, Bergmeister K, Krug B, Wan-Wendner R, Marcon M, et al. Shear performance mechanism description using digital image correlation. *Structural Engineering International*. 2018;28(3):338-46.
- [36] Lenczner D. *Elements of loadbearing brickwork*. Oxford: Pergamon Press; 1972.
- [37] Chen Y, Yan Q, Jia B, Yu X, Wu Y, Luo Y. Experimental and mechanical behavior of rubber-sleeved group studs. *KSCE Journal of Civil Engineering* 2022;26(9):3905-17.
- [38] Dassault Systèmes. *Abaqus analysis user's guide*. Providence (RI), USA: Dassault Systèmes Simulia Corp, 2014.
- [39] Van Noort JR. *Computational modelling of masonry structures* [thesis]. Delft, Netherlands: Delft University of Technology; 2012.
- [40] Lourenço PB. *Computational strategies for masonry structures* [Ph.D. thesis]. Delft, Netherlands: Delft University of Technology; 1996.
- [41] Rafiq A. *Computational modelling of unconfined/unreinforced masonry wall using Abaqus* [thesis]. Peshawar, Pakistan: University of Engineering and Technology; 2016.
- [42] Rehman F, Khan SA, Ur Rehman S, Khan MS, Saleem U, Mughal S, et al. Finite element analysis of brick masonry. In: *Proceeding of 2nd Pak-Turk International Conference on Emerging Technologies in the field of Sciences and Engineering*; 2019 Mar 11-12; Swabii, Pakistan.
- [43] AlGohi BH, Baluch MH, Rahman MK, Al-Gadhib AH, Demir C. Plastic-damage modeling of unreinforced masonry walls (URM) subject to lateral loading. *Arabian Journal for Science and Engineering* 2017;42(9):4201-20.
- [44] da Silva LCM, Milani G, Lourenço PB. Probabilistic-based discrete model for the seismic fragility assessment of masonry structures. *Structures* 2023;52:506-23.

Author's Profile



Muhammad Zohaib Asim, Lecturer at Civil Engineering Department, University of Technology, Islamabad, Pakistan. Concrete Lab, Ground Floor, Civil Engineering Department, NUTECH. +92 336 5745371, muhammad.zohaib@nutech.edu.pk, Masters in Structural Engineering, Structural Materials



Dr Adnan Nawaz, Associate Professor at Civil Engineering Department, COMSATS University Wah Campus, Pakistan, Civil Engineering Department, CUI Wah, +92 51 9314382, adnannawaz@ciitwah.edu.pk, PhD in Structural Engineering, Structural Materials



Dr Tahir Mehmood, Associate Professor at Civil Engineering Department, COMSATS University Wah Campus, Pakistan, Civil Engineering Department, CUI Wah, +92 51 9314382, tahirmehmood@ciitwah.edu.pk, PhD in Structural Engineering, Structural Materials.



Ali Siddique, Lecturer at Civil Engineering Department, University of Technology, Islamabad, Pakistan. Fifth Floor, Civil Engineering Department, NUTECH. +92 340 3226679, ali.saddique@nutech.edu.pk, Masters in Structural Engineering, Structural Materials.



Sajid Rasheed, Lecturer at Civil Engineering Department, University of Technology, Islamabad, Pakistan. Fifth Floor, Civil Engineering Department, NUTECH. +92 301 7588295, sajidrasheed@nutech.edu.pk, Masters in Structural Engineering, Structural Materials.



Asim Sultan, Lecturer at Civil Engineering Department, University of Technology, Islamabad, Pakistan. Fifth Floor, Civil Engineering Department, NUTECH. +92 331 8148045, asim.sultan@nutech.edu.pk, Masters in Structural Engineering, Structural Materials.

Article History:

Received: September 17, 2024

Revised: July 22, 2025

Accepted: August 1, 2025

การประเมินการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์และประสิทธิภาพพลังงาน
จากกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากใบสับประดศรีราชา
EVALUATION OF CO₂ EMISSIONS AND ENERGY EFFICIENCY FROM
FUEL BRIQUETTES PRODUCTION PROCESS USING SRI RACHA
PINEAPPLE LEAVES

ณรงค์ ชัยสงเคราะห์¹ ศรีกุลณัฐ นิลโนรี² และ ศศิธร สรรพอคำ^{3*}

^{1,3*}อาจารย์, คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
เขตพื้นที่อุเทนถวาย, 225 ถ.พญาไท แขวงปทุมวัน เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330,

¹narong_ch@rmutto.ac.th, ^{3*}sasithorn_su@rmutto.ac.th

²อาจารย์, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000, srikulnath.ni@g.sut.ac.th

Narong Chaisongkroh¹ Srikunath Nilnoree² and Sasithorn Sunphorka^{3*}

^{1,3*}Lecturer, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Tawan-ok,
Uthenthawai Campus, 225 Phayathai Rd., Pathumwan, Bangkok 10330, Thailand,

¹narong_ch@rmutto.ac.th, ^{3*}sasithorn_su@rmutto.ac.th

²Lecturer, School of Civil Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology,
Suranari, Mueang Nakhon Ratchasima District, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand,

srikulnath.ni@g.sut.ac.th

* ผู้ประพันธ์บรรณกิจ (Corresponding author)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) และประสิทธิภาพพลังงานจากการใช้ใบสับประดศรีราชามาผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง ได้แก่ ชีวมวลอัดแท่ง ชีวมวลทอรรีฟายด์อัดแท่ง และถ่านชีวภาพอัดแท่งที่ผลิตในระดับห้องปฏิบัติการเปรียบเทียบกับระดับภาคสนาม จากผลการวิจัยพบว่าการผลิตชีวมวลอัดแท่งมีการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำและประสิทธิภาพพลังงานสูง โดยคิดเป็น 2.31 kgCO₂-eq และ 52.38% ตามลำดับ แต่เชื้อเพลิงมีค่าความร้อนต่ำ หากใช้เป็นเชื้อเพลิงจำเป็นต้องใช้ชีวมวลอัดแท่งปริมาณมาก ในขณะที่การผลิตชีวมวลทอรรีฟายด์อัดแท่งและถ่านชีวภาพอัดแท่ง ทำให้เชื้อเพลิงมีค่าความร้อนสูงกว่า แต่

การปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีค่ามากขึ้นและประสิทธิภาพพลังงานต่ำลง เนื่องจากการใช้พลังงานมากในการสลายตัวทางความร้อนของชีวมวล โดยเฉพาะการผลิตถ่านชีวภาพด้วยกระบวนการไพโรไลซิสซึ่งดำเนินการที่อุณหภูมิสูง เมื่อมีการปรับปรุงกระบวนการผลิตถ่านชีวภาพเป็นระดับภาคสนาม ด้วยเตาเผาขนาด 200 ลิตร ที่มีการระบายแก๊สชีวมวลซึ่งเป็นสารระเหยที่ถูกปลดปล่อยออกจากกระบวนการไพโรไลซิส มาควบแน่นเป็นน้ำส้มควันไม้ และหมุนเวียนแก๊สส่วนที่เหลือที่ไม่สามารถควบแน่นได้ มาเป็นแก๊สเชื้อเพลิงร่วม พบว่ามีประสิทธิภาพพลังงานของกระบวนการสูงกว่ากรณีการผลิตถ่านชีวภาพระดับห้องปฏิบัติการอัดแท่ง ที่ไม่มีการหมุนเวียนแก๊สชีวมวลมาใช้ แสดงให้เห็นการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังมีการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำกว่ากระบวนการอื่น เนื่องจากการกักเก็บคาร์บอนบางส่วนในรูปของผลิตภัณฑ์พลอยได้ คือ น้ำส้มควันไม้ และการลดปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ในการให้ความร้อน รวมถึงยังสามารถใช้ถ่านชีวภาพเป็นวัสดุกักเก็บคาร์บอนโดยใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดิน โดยผลการศึกษาี้สามารถใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการพิจารณาแนวทางการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งให้เหมาะสมกับวัตถุประสงค์การผลิตและใช้งาน ในระดับห้องปฏิบัติการตลอดจนอุตสาหกรรม

คำสำคัญ: การปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์, ประสิทธิภาพพลังงาน, วัสดุเศษเหลือทางการเกษตร, เชื้อเพลิงอัดแท่ง, ทอรัรีแฟคชัน

ABSTRACT

This research investigated the carbon dioxide (CO₂) emissions and energy efficiency of the production of briquetted fuels including briquetted biomass, torrefied briquetted biomass, and briquetted biochar, produced at both laboratory and pilot scales, using Sriracha pineapple leaves. The results showed that briquetted biomass production led to low CO₂ emissions and high energy efficiency of 2.31 kgCO₂-eq and 52.38%, respectively. However, this type of fuel had a low heating value, a large quantity was thus required for effective use. In contrast, the torrefied briquetted biomass and briquetted biochar had higher heating values but resulted in increased CO₂ emissions and lower energy efficiency. These were due to the high energy consumption required for biomass energy decomposition, especially in biochar production through pyrolysis which involves high temperatures. After that, the biochar production process was scaled up to the pilot scale using a 200-liter kiln equipped with a condensation system for condensing volatile gases into wood vinegar and recirculating the remaining non-condensable gases as co-fuel. The energy efficiency of the process was improved compared to laboratory-scale biochar production, which did not reuse the biomass

gases. This demonstrated a more efficient energy utility. Additionally, this process emitted less CO₂ than other methods due to partial carbon sequestration in the form of wood vinegar and reduced fuel consumption for heating during pyrolysis. Biochar could have the potential use of biochar as a carbon sink when applied as a soil amendment as well. The findings from this study provided preliminary information for selecting appropriate briquetted fuels production methods, according to production and utilization objectives for both laboratory and industrial scales.

KEYWORDS: CO₂ emission, Energy efficiency, Agricultural wastes, Fuel briquettes, Torrefaction

1. บทนำ

การเกษตรในประเทศไทยเป็นกิจกรรมหลักที่สร้างรายได้และผลิตภัณฑ์มากมาย อย่างไรก็ตาม กระบวนการเผาปลูกและเก็บเกี่ยวทำให้เกิดวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ซึ่งจำเป็นต้องมีการกำจัดหรือแปรรูปอย่างเหมาะสม จากข้อมูลการสำรวจปริมาณสับปะรดและวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการแปรรูปสับปะรดในจังหวัดชลบุรีในปี พ.ศ. 2566 พบว่ามีการผลิตสับปะรดปัดตาเวียหรือสับปะรดศรีราชาถึง 105,667 ตันจากปริมาณทั้งหมด 1,249,408 ตันในประเทศ [1] โดยหลังจากแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ แล้วเกิดวัสดุเหลือทิ้งประเภทต่าง ๆ ได้แก่ ใบ จุก ตัน ก้าน ผล และหน่อ เป็นต้น การกำจัดวัสดุเหลือทิ้งเหล่านี้ล้วนก่อให้เกิดการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจกทั้งสิ้น ตัวอย่างเช่น หากทิ้งวัสดุเหลือทิ้งเหล่านี้ไว้ในไร่จนเกิดการย่อยสลายตามธรรมชาติจะปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ คิดเป็นร้อยละ 58 ของกระบวนการในไร่ทั้งหมด ซึ่งถือว่าเป็นวิธีการที่ทำให้เกิดการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มากที่สุด ลำดับรองลงมา คือ การใช้ปุ๋ย (ร้อยละ 26) และการใช้น้ำมันเชื้อเพลิง (ร้อยละ 15) ตามลำดับ [2]

การนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์มูลค่าเพิ่ม เพื่อลดปริมาณการฝังกลบหรือลดค่าใช้จ่ายในการขนย้ายสำหรับการนำไปกำจัดนอกพื้นที่ รวมถึงอาจสร้างรายได้เพิ่มเติมนั้น สามารถทำได้หลายรูปแบบ หนึ่งในกระบวนการแปรรูปที่เป็นที่นิยม คือ การนำมาผลิตเป็นถ่านชีวภาพ (biochar) และน้ำส้มควันไม้ (wood vinegar) ด้วยกระบวนการไพโรไลซิส (pyrolysis) ซึ่งเป็นกระบวนการสลายตัวทางความร้อนในภาวะจำกัดอากาศ โดยสามารถนำถ่านชีวภาพมาใช้เป็นเชื้อเพลิงหรือผสมดินปลูกได้ รวมถึงสามารถนำน้ำส้มควันไม้ไปใช้ในพื้นที่เพาะปลูกได้ Sunphorka and Yangsawang [3,4] ทำการพัฒนาและการทดสอบเตาเผาผลผลิตขนาดเล็ก 200 ลิตร ซึ่งออกแบบมาเพื่อผลิตถ่านชีวภาพและน้ำส้มควันไม้จากใบสับปะรด ผลการทดลองแปรรูปใบสับปะรดให้เป็นถ่านชีวภาพด้วยกระบวนการไพโรไลซิสในระดับห้องปฏิบัติการ

แสดงให้เห็นว่า ได้ร้อยละผลได้ของแข็ง (solid yield) เท่ากับร้อยละ 33.02 ที่อุณหภูมิ 400 °C และใช้เวลา 60 นาที ถ่านชีวภาพมีค่าความร้อนสูงสุด 23.25 MJ/kg เมื่อทำการทดลองในระดับภาคสนาม โดยการใช้เตาเผาผลพิษต่ำขนาด 200 ลิตร ในการผลิตถ่านชีวภาพและน้ำส้มควันไม้ พบว่า ไบโสบัปเกรด 20 กิโลกรัม สามารถผลิตถ่านชีวภาพได้ประมาณ 2 กิโลกรัม และน้ำส้มควันไม้ประมาณ 10 ลิตร ถ่านชีวภาพที่ได้มีปริมาณองค์ประกอบคาร์บอน เท่ากับร้อยละ 70.49 และมีค่าความร้อนสูงสุด 25.97 MJ/kg และเมื่อนำถ่านชีวภาพจากไบโสบัปเกรดไปอัดแท่งและทดสอบค่าความร้อนพบว่าให้ค่าความร้อนสูงสุด 26.0 MJ/kg

อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาความเป็นไปได้ในด้านการผลิตหรือจำหน่ายเพื่อการผลิตเป็นเชื้อเพลิงหรือพลังงานเพียงอย่างเดียว พบว่านำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาแปรรูปเป็นถ่านชีวภาพอาจไม่ใช่ทางเลือกที่คุ้มค่าหรือเหมาะสมในเชิงเศรษฐศาสตร์สำหรับเกษตรกรมากที่สุด เนื่องจากทางด้านอุตสาหกรรมก็มีการรับซื้อวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรจากเกษตรกรเช่นกัน เพื่อลดปัญหาการเผาไหม้ซึ่งก่อให้เกิดปัญหา PM2.5 การขายวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรให้กับโรงงานอุตสาหกรรมเป็นทางเลือกที่สะดวกกว่าการที่เกษตรกรผลิตถ่านชีวภาพและน้ำส้มควันไม้ในพื้นที่เอง รวมถึงทำให้เกิดการนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรไปรวบรวมและแปรรูปด้วยกระบวนการที่มีการควบคุมตามมาตรฐานของอุตสาหกรรม วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่รับซื้อไปนั้น มักถูกแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงในรูปแบบต่าง ๆ ได้แก่ การผลิตชีวมวลทอรรีฟายด์ (torrefied biomass) ซึ่งเป็นการนำชีวมวลไปผ่านกระบวนการทอรรีแฟคชัน (torrefaction) หรือกระบวนการสลายตัวทางความร้อนในภาวะจำกัดอากาศคล้ายกระบวนการไพโรไลซิส แต่ใช้อุณหภูมิต่ำกว่า และการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง ซึ่งเป็นการนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาผสมกับวัสดุผสมหรือไม่ผสมก็ได้ จากนั้นนำไปขึ้นรูปให้เป็นแท่งเพื่อนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงผลิตความร้อนหรือผลิตไอน้ำร้อนใช้ในโรงงาน [5] ทั้งนี้ เมื่อเปรียบเทียบค่าพลังงานความร้อนที่ได้จากถ่านชีวภาพและเชื้อเพลิงอัดแท่งพบว่ามีค่าเท่ากับ 32.3 และ 16 MJ/kg ตามลำดับ [6] ซึ่งจะเห็นว่าถ่านชีวภาพมีค่าความร้อนสูงกว่าเชื้อเพลิงอัดแท่งประมาณสองเท่าและมีความชื้นต่ำกว่า แต่มีค่าใช้จ่ายสูงกว่าและการดำเนินการที่ซับซ้อนกว่า

จากประเด็นข้างต้น ทำให้มีคำถามงานวิจัยเกี่ยวกับการนำชีวมวลจากชุมชนไปผลิตน้ำส้มควันไม้ ถ่านชีวภาพ ถ่านอัดแท่งหรือการขายให้กับโรงงานทางใดจะมีความเหมาะสมกับชุมชนหรือต่อโรงงานมากกว่า ทั้งในเชิงของการใช้พลังงานและการลดแก๊สเรือนกระจก ดังนั้นการวิเคราะห์ความเหมาะสมในการนำชีวมวลมาใช้ผลิตเป็นเชื้อเพลิงรูปแบบต่าง ๆ จึงมีความน่าสนใจในการนำไปใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการพิจารณาความเหมาะสมในการนำชีวมวลไปใช้ทั้งในเชิงพลังงาน ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในเชิงการชดเชยคาร์บอน รวมถึงความคุ้มค่าในการผลิตและจำหน่าย ซึ่งชุมชนสามารถนำข้อมูลดังกล่าวไปใช้ในการพิจารณาถึงการผลิตถ่านเพื่อ

ใช้เองหรือขายให้กับโรงงาน และโรงงานสามารถนำข้อมูลดังกล่าวไปพิจารณาถึงแนวทางหรือวิธีการนำชีวมวลไปแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่งที่คุ้มค่าต่อการลงทุน

การวิเคราะห์ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในเชิงของการชดเชยคาร์บอน (Carbon offset) นั้น เกี่ยวข้องกับการคำนวณการปล่อยแก๊สเรือนกระจก (Greenhouse Gas (GHG) emissions) ซึ่งเป็นการคำนวณหาผลรวมของการปล่อยแก๊สเรือนกระจกที่อยู่ในรูปแบบของแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน ไนตรัสออกไซด์ ไฮโดรฟลูออโรคาร์บอน เพอร์ฟลูออโรคาร์บอน และซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ ซึ่งจะเป็นแก๊ส 6 ชนิดหลัก [7] เพื่อให้เกิดความสะดวกในการคำนวณ มักจะเป็นการคำนวณการปล่อยแก๊สเรือนกระจกในรูปของปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ เทียบเท่า ต่อหน่วยการทำงานของผลิตภัณฑ์ ซึ่งการคำนวณทำได้โดยใช้ผลรวมของปริมาณการปล่อย คาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าทุกกิจกรรมที่เกี่ยวข้องการผลิต ปริมาณการปลดปล่อย คาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าของแต่ละกิจกรรมสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังสมการ (1) [8]

$$\text{GHG emissions} = \text{Activity data} \times \text{Emission factor} \quad (1)$$

โดยที่ ค่าการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจก (GHG emissions) มีหน่วยเป็น $\text{kgCO}_2\text{-eq}$ ข้อมูล กิจกรรม (Activity data) คือ ค่าที่นำมาใช้ในการคำนวณ เป็นค่าที่เกิดจากกิจกรรมที่ทำให้เกิด แก๊สเรือนกระจกประเภทต่าง ๆ ข้อมูลกิจกรรมอาจจะมีหน่วยที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับประเภทของ การปล่อยหรือในภาคของการคำนวณ และค่าที่ได้จะต้องสัมพันธ์กับค่าอ้างอิงในการปล่อย แก๊สเรือนกระจก ค่าสัมประสิทธิ์ของการปล่อยแก๊สเรือนกระจก (Emission factor) หรือ EF คือ ค่าที่แสดงปริมาณการปล่อยแก๊สเรือนกระจกต่อหน่วย ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ในการปล่อยจะขึ้นอยู่กับ กิจกรรมของการปล่อยในแต่ละประเทศ โดยจะมีค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยแก๊สเรือนกระจกตาม เงื่อนไขเฉพาะของกิจกรรมนั้น ๆ เรียกว่า ค่าการปล่อยเฉพาะของประเทศ ซึ่งได้มาจากการ ตรวจวัดจริงหรือจากการศึกษา สำหรับในกรณีที่บางประเทศไม่มีค่าการปล่อยเฉพาะของ ประเทศสามารถเลือกใช้ค่าการปล่อยที่แนะนำ (default value) ตามคู่มือแนวทางของคณะกรรมการ ระหว่างรัฐบาลว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Intergovernmental Panel on Climate Change) หรือ IPCC [9] จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่ากระบวนการผลิตเชื้อเพลิงที่แตกต่างกัน ส่งผลต่อการปริมาณการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจกแตกต่างกัน Ananpradit et al [10] ศึกษา การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของการนำผักตบชวาเพื่อผลิตพลังงานทดแทน ทั้งหมด 5 กระบวนการ ได้แก่ การผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง การผลิตน้ำมันชีวภาพจากกระบวนการไพโรไลซิส แบบเร็ว การผลิตแก๊สชีวภาพ การผลิตเอทานอล และการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลจากผักตบชวา โดย ผลการศึกษาพบว่า การผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลจากผักตบชวา โดยการนำผักตบชวามาทำการอบแห้ง โดยโรงเรือนพลาสติก มีการปล่อยปริมาณคาร์บอนน้อยที่สุด คือ $0.38 \text{ kgCO}_2\text{-eq}$

คณะผู้วิจัยจึงทำการศึกษาความเหมาะสมในการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง 4 กระบวนการ ได้แก่ การผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่ง การผลิตชีวมวลทอรรีฟายด์อัดแท่ง การผลิตถ่านชีวภาพอัดแท่ง ในระดับห้องปฏิบัติการ และการผลิตถ่านชีวภาพอัดแท่งในระดับภาคสนามด้วยเตาเผาขนาด 200 ลิตร โดยพิจารณาความเหมาะสมทางด้านพลังงาน และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เพื่อเป็นแนวทางในการพิจารณาเลือกกระบวนการที่เหมาะสม โดยใช้วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรคือ ใบสับประดศรียาชา มีการศึกษาผลของกระบวนการต่าง ๆ ต่อร้อยละผลได้ของแข็งและสมบัติบางประการของเชื้อเพลิงที่ได้ เช่น องค์ประกอบและค่าความร้อน เป็นต้น โดยคณะผู้วิจัยมุ่งหวังให้สามารถนำข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยนี้ไปช่วยในการพิจารณานำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรไปใช้เป็นเชื้อเพลิงที่เหมาะสมกับการใช้งานของทางชุมชนและในภาคอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องต่อไป

2. วิธีการดำเนินการวิจัย

2.1 วัตถุดิบ และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

วัตถุดิบที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ ใบสับประดศรียาชาจากพื้นที่ตำบลเขาคันทรง อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี ลักษณะของใบสับประดแสดงดังรูปที่ 1 การเตรียมใบสับประดสำหรับการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการทำได้โดยตัดใบสับประดให้มีความยาวประมาณ 2-3 เซนติเมตร ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องให้แห้งและอบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 60 นาที จากนั้นเก็บในตู้ดูดความชื้นเพื่อเตรียมสำหรับการทดลอง ส่วนการเตรียมใบสับประดสำหรับการทดลองระดับภาคสนาม ซึ่งดำเนินการในเตาเผาผลพิษต่ำขนาด 200 ลิตรนั้น จะนำใบสับประดที่ได้จากในพื้นที่เป้าหมายมาแยกออกเป็นใบ ลักษณะดังรูปที่ 1 และทิ้งไว้ประมาณ 1 สัปดาห์ก่อนนำมาใช้

สำหรับเตาเผาที่ใช้ในการทดลองระดับห้องปฏิบัติการ คือ เครื่องเตาเผาแบบ muffle furnace รุ่น Nabertherm และเตาเผาที่ใช้ในระดับภาคสนามผลิตจากถังเหล็กขนาด 200 ลิตร ซึ่งมีรายละเอียดดังหัวข้อที่ 2.3



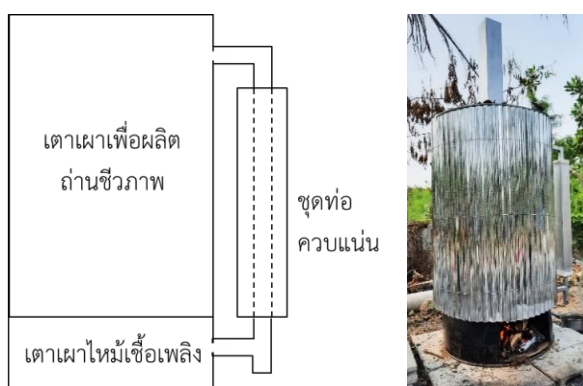
รูปที่ 1 ใบสับประดที่ใช้ในการทดลอง (ซ้าย) และเตาเผาแบบ muffle furnace (ขวา)

2.2 การเตรียมชีวมวลทอรรีฟายด์และถ่านชีวภาพระดับห้องปฏิบัติการ

นำชีวมวลมาใส่ในถ้วยกระเบื้อง จากนั้นชั่งน้ำหนักถ้วยกระเบื้องและน้ำหนักของวัตถุดิบที่ใช้ ปิดฝาถ้วยกระเบื้องและนำไปเข้าเตาเผาแบบ muffle furnace ตั้งอุณหภูมิและเวลาที่ต้องการ จากการทดลองเบื้องต้นพบว่าอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการทอรรีฟเลชัน คือ 250°C และเวลา 75 นาที ตามลำดับ อุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการไพโรไลซิส คือ 400°C และเวลา 60 นาที ตามลำดับ เมื่อครบตามกำหนดเวลาแล้ว ทิ้งไว้ให้เย็นจนถึงอุณหภูมิห้อง นำออกจากเตาเผา ปิดฝา และชั่งน้ำหนัก เก็บถ่านชีวภาพที่ได้ไว้ในตู้ดูดความชื้น จนกว่าจะมีการใช้งาน

2.3 การผลิตถ่านชีวภาพด้วยเตาเผา 200 ลิตร

เตาเผาที่พัฒนาขึ้นนี้ประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ได้แก่ เตาเผาเพื่อผลิตถ่านชีวภาพ เตาเผาไหม้เชื้อเพลิง และชุดท่อควบแน่น ดังแสดงในรูปที่ 2 และมีการเปิดเผยรายละเอียดสิ่งประดิษฐ์แสดงดังอนุสิทธิบัตร เลขที่ 24787 [11] ชุดท่อควบแน่นนี้ทำหน้าที่พาสารระเหยที่เกิดขึ้นจากการสลายตัวทางความร้อนของชีวมวลในเตาเผาเพื่อผลิตถ่านชีวภาพมาควบแน่นให้กลายเป็นน้ำส้มควันไม้ ส่วนสารระเหยบางส่วนที่ไม่สามารถควบแน่นได้จะถูกป้อนกลับเข้าไปที่เตาเผาไหม้เชื้อเพลิงเพื่อเป็นเชื้อเพลิงร่วม การผลิตถ่านชีวภาพจากไบสับปะรดด้วยเตาเผาผลพิษดังนี้ทำได้โดยการชั่งน้ำหนักไบสับปะรด นำไบสับปะรดใส่ในเตาเผาด้านบน หลังจากนั้นปิดฝากเตาเผา นำดินเหนียวอุดบริเวณฝาเตาเผาและรอบท่อระบายควัน นำเชื้อเพลิงใส่ที่เตาเผาไหม้ด้านล่าง จุดไฟและเปิดน้ำหล่อเย็น เมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที น้ำส้มควันไม้จะเริ่มหยดออกมา สังเกตไฟในเตาเผาไหม้และเติมเชื้อเพลิงจนกว่าน้ำส้มควันไม้จะหยุดไหล จากนั้นเผาต่อไปอีก 60 นาที ปล่อยให้เตาเย็นลงข้ามคืน ชั่งน้ำหนักถ่านชีวภาพที่ได้ และเก็บถ่านชีวภาพใส่ภาชนะที่เหมาะสมเพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไป [3]

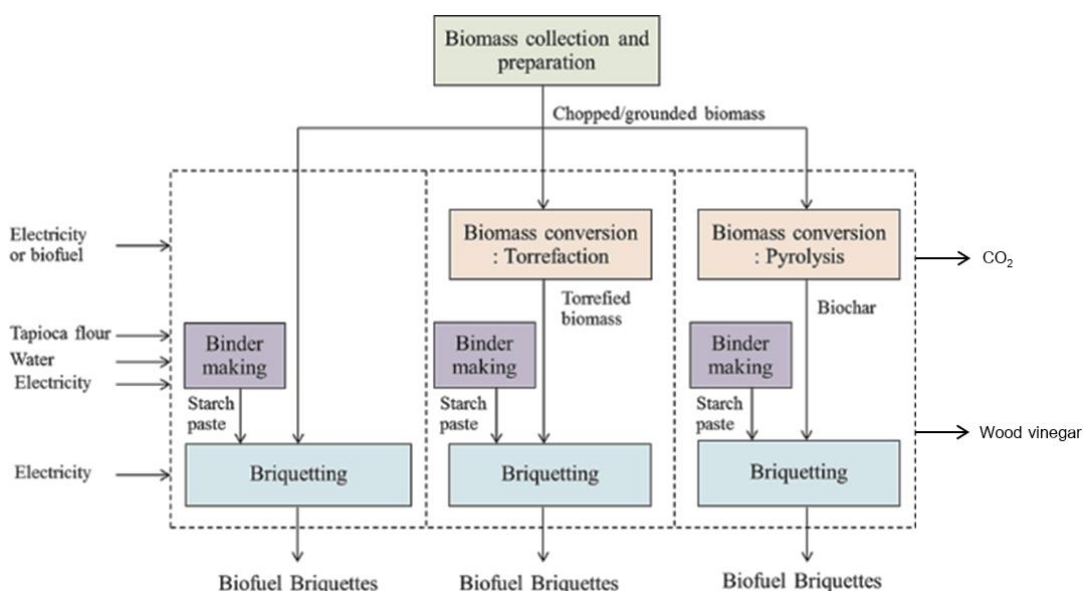


รูปที่ 2 ภาพร่างส่วนประกอบเตาเผา 200 ลิตร (ซ้าย) และเตาเผา 200 ลิตร ภาคสนาม (ขวา)

2.4 การผลิตชีวมวลอัดแท่ง ชีวมวลทอรรีฟายด์อัดแท่ง และถ่านชีวภาพอัดแท่ง

เชื้อเพลิงอัดแท่งทั้ง 3 ชนิดที่นำมาเปรียบเทียบกันนั้นมีข้อได้เปรียบและเสียเปรียบแตกต่างกัน กล่าวคือ ชีวมวลอัดแท่งเป็นการนำชีวมวลแห้งมาตัด และผสมกับวัสดุประสาน จากนั้นอัดขึ้นรูปให้เป็นแท่ง สำหรับชีวมวลทอรรีฟายด์อัดแท่งเป็นการนำชีวมวลมาผ่านกระบวนการทอรรีฟแฟชัน (torrefaction) จากนั้นนำมาผสมกับวัสดุประสานและอัดขึ้นรูปให้เป็นแท่ง ส่วนถ่านชีวภาพอัดแท่งนั้นเป็นการนำชีวมวลมาผ่านกระบวนการไพโรไลซิส จากนั้นนำมาผสมกับวัสดุประสานและอัดขึ้นรูปให้เป็นแท่ง ซึ่งกระบวนการทอรรีฟแฟชันเป็นการสลายตัวทางความร้อนในสภาวะอับอากาศที่อุณหภูมิประมาณ 200-300 °C ส่วนไพโรไลซิสเป็นการสลายตัวทางความร้อนในสภาวะอับอากาศที่อุณหภูมิประมาณ 400-600 °C หรืออาจสูงกว่านั้น

สำหรับวัสดุประสานที่ใช้ในการทดลอง คือ แป้งเปียกซึ่งเตรียมได้โดยการนำแป้งมันสำปะหลัง มาผสมน้ำและต้มให้สุก โดยใช้อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อแป้งมันสำปะหลัง เท่ากับ 3 ต่อ 1 โดยน้ำหนัก จากนั้นนำแป้งเปียกที่เตรียมได้มาผสมกับชีวมวล ชีวมวลทอรรีฟายด์ หรือถ่านชีวภาพ ในอัตราส่วนแป้งเปียกต่อชีวมวลหรือถ่าน เท่ากับ 1 ต่อ 10 โดยน้ำหนัก เมื่อผสมจนทั่วกันแล้วจึงนำเข้าเครื่องอัดแท่ง และตัดตามความยาวที่ต้องการ นำเชื้อเพลิงอัดแท่งที่ได้ไปตากแดด ประมาณ 2-3 วัน แล้วเก็บไว้ในที่แห้ง [4] กระบวนการในการแปรรูปชีวมวลให้เป็นการผลิตชีวมวลอัดแท่ง ชีวมวลทอรรีฟายด์อัดแท่ง และถ่านชีวภาพอัดแท่ง รวมถึงวัสดุและแหล่งพลังงานที่ใช้ ตลอดจนขอบเขตของการวิจัย แสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 กระบวนการแปรรูปชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง

2.5 การวิเคราะห์พลังงานของชีวมวล ชีวมวลทอรรีฟายด์และถ่านชีวภาพ

นำถ่านชีวมวลหรือชีวภาพไปวิเคราะห์องค์ประกอบโดยธาตุ (Ultimate Analysis) ด้วยเครื่อง THERMO FLASH 2000 CHNS/O ANALYZERS โดยเทคนิคการเผาไหม้อย่างรวดเร็ว (flash combustion method) และนำองค์ประกอบโดยธาตุที่ได้ไปคำนวณค่าความร้อนสูงสุดตั้งสมการ (2) [12]

$$\text{ค่าความร้อนสูงสุด (MJ/kg)} = 0.3856 (C + H) - 1.6938 \text{ MJ/kg} \quad (2)$$

โดยที่ C คือ ร้อยละโดยน้ำหนักของธาตุคาร์บอนเฉลี่ย และ H คือ ร้อยละโดยน้ำหนักของธาตุไฮโดรเจนเฉลี่ย

2.6 การคำนวณปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า

งานวิจัยฉบับนี้ เป็นการศึกษาความแตกต่างของการแปรรูปวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่งแบบต่าง ๆ ได้แก่ ชีวมวลอัดแท่ง ชีวมวลทอรรีฟายด์อัดแท่ง และถ่านชีวภาพอัดแท่ง ดังนั้นจึงกำหนดกรอบการวิจัยตาม Life Cycle Inventory (LCI) เฉพาะกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งที่แสดงดังรูปที่ 3 เท่านั้น โดยมีสมมุติฐานและขอบเขตดังนี้

1) ชีวมวลที่เป็นวัตถุดิบตั้งต้นเป็นวัสดุที่นำมาจากพื้นที่เกษตร ซึ่งเกษตรกรมีการเก็บเกี่ยวตากแห้ง ตัดหรือเลื่อยให้มีขนาดเล็ก และรวบรวมอยู่แล้ว แม้ว่าจะไม่มีการนำมาใช้ผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งก็ตาม

2) การทดลองทำในพื้นที่การเกษตรจึงไม่มีขั้นตอนการขนส่ง

3) กระบวนการอัดแท่งสำหรับแต่ละกรณี มีสารขาเข้า (input) ได้แก่ ชีวมวลที่เตรียมไว้แล้ว แป้งมันสำปะหลัง ไฟฟ้าสำหรับเครื่องจักร และน้ำ ส่วนในสารขาออก (output) ได้แก่ เชื้อเพลิงอัดแท่ง (ผลิตภัณฑ์หลัก) คาร์บอนที่สูญเสียในรูปของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำส้มควันไม้แสดงดังรูปที่ 3 โดยมีขอบเขตของกระบวนการแต่ละกรณีในกรอบสี่เหลี่ยม (เส้นประ) เท่านั้น

4) ค่า Emission factor (EF) ของแป้งมันสำปะหลังที่ใช้ในกระบวนการอัดแท่ง น้ำ และไฟฟ้าที่ใช้สำหรับเตาเผา muffle furnace และเครื่องอัดแท่ง นำมาจากฐานข้อมูลจากองค์การบริหารจัดการแก๊สเรือนกระจก (องค์การมหาชน) แสดงดังตารางที่ 1 [13]

5) การคำนวณค่า Emission factor ของเชื้อเพลิงแข็ง คำนวณจากการเปลี่ยนค่าร้อยละองค์ประกอบคาร์บอน (%C content) ให้เป็นน้ำหนักของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากกระบวนการเผาไหม้แบบสมบูรณ์ เมื่อโมลของคาร์บอนเท่ากับโมลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ [14] ตั้งสมการ (3)

$$EF \text{ (kgCO}_2\text{-eq, biomass)} = (\%C \text{ content}/100) \times (44/12) \quad (3)$$

6) คาร์บอนที่สูญเสียไปจากกระบวนการสามารถนำมาคำนวณเป็นค่าการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ โดยถือว่าเป็นการปลดปล่อยของกระบวนการ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ (4)

kgCO₂-eq จากคาร์บอนที่สูญเสียจากกระบวนการ =

$$\left[\left(\frac{\%C_{\text{ชีวมวลเริ่มต้น}}}{100} \times \text{ปริมาณชีวมวลเริ่มต้น} \right) - \left(\frac{\%C_{\text{ผลิตภัณฑ์}}}{100} \times \text{ปริมาณผลิตภัณฑ์} \right) \right] \times \frac{44}{12} \quad (4)$$

โดยที่ %C_{ชีวมวลเริ่มต้น} คือ ปริมาณร้อยละองค์ประกอบคาร์บอนโดยน้ำหนักของชีวมวลก่อนกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง และ %C_{ผลิตภัณฑ์} คือ ปริมาณร้อยละองค์ประกอบคาร์บอนโดยน้ำหนักของชีวมวล ชีวมวลทอรรีฟายด์ หรือถ่านชีวภาพที่ผลิตได้หลังจากกระบวนการ

7) การคำนวณปริมาณเชื้อเพลิงอัดแท่งที่ได้จากแต่ละกระบวนการ สามารถคำนวณได้จากสมการ (5)

ปริมาณเชื้อเพลิงอัดแท่ง =

$$\left[\left(\frac{\text{solid yield (wt.\%)}}{100} \right) \times \text{ปริมาณชีวมวลเริ่มต้น} \right] + \text{ปริมาณแยมันสำหรับหลัง} \quad (5)$$

8) การคำนวณค่าประสิทธิภาพพลังงาน (Energy efficiency; η) คำนวณจากอัตราส่วนระหว่างค่าความร้อนของเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ต่อค่าความร้อนของเชื้อเพลิงที่ใช้ไปหรือพลังงานสุทธิที่เข้าสู่กระบวนการ ดังสมการ (6) [15,16]

$$\eta \text{ (\%)} = \frac{\text{ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงที่ผลิตได้}}{\text{พลังงานสุทธิที่เข้าสู่กระบวนการ}} \times 100 \quad (6)$$

ตารางที่ 1 ค่า emission factor ที่ใช้ในงานวิจัย

ชื่อ	รายละเอียด	หน่วย	ค่า EF (kgCO ₂ eq/ หน่วย)	แหล่งข้อมูล อ้างอิง	วันที่ อัปเดต
แก๊สมัน สำหรับหลัง	เลขที่ใบรับรอง: TGO CFP FY24-047-04-0963	kg	0.5720	Thailand Greenhouse Gas Management Organization [17]	28/11/2566
น้ำประปา- การประปา ส่วน ภูมิภาค	ผลิตโดยใช้น้ำผิวดิน น้ำใต้ ดิน และน้ำทะเล; ครอบคลุม ตั้งแต่ขั้นตอนการสูบน้ำดิบ การผลิตน้ำประปา จนถึงการ ส่งน้ำประปาผ่านระบบท่อ กปภ. สู่ผู้ใช้น้ำ; ข้อมูลการ ผลิตปีงบประมาณ 2561; LCIA method IPCC 2013 GWP 100a V1.03	m ³	0.5410	Thai National LCI Database, TIIS-MTEC- NSTDA (with TGO electricity 2016-2018) [13]	Update July 2022
Electricity, grid mix (ไฟฟ้า)	ไฟฟ้าแบบ grid mix ปี 2016- 2018; LCIA method IPCC 2013 GWP 100a V1.03	kWh	0.5986	Thai National LCI Database, TIIS-MTEC- NSTDA (with TGO electricity 2016-2018) [13]	Update Dec 2019

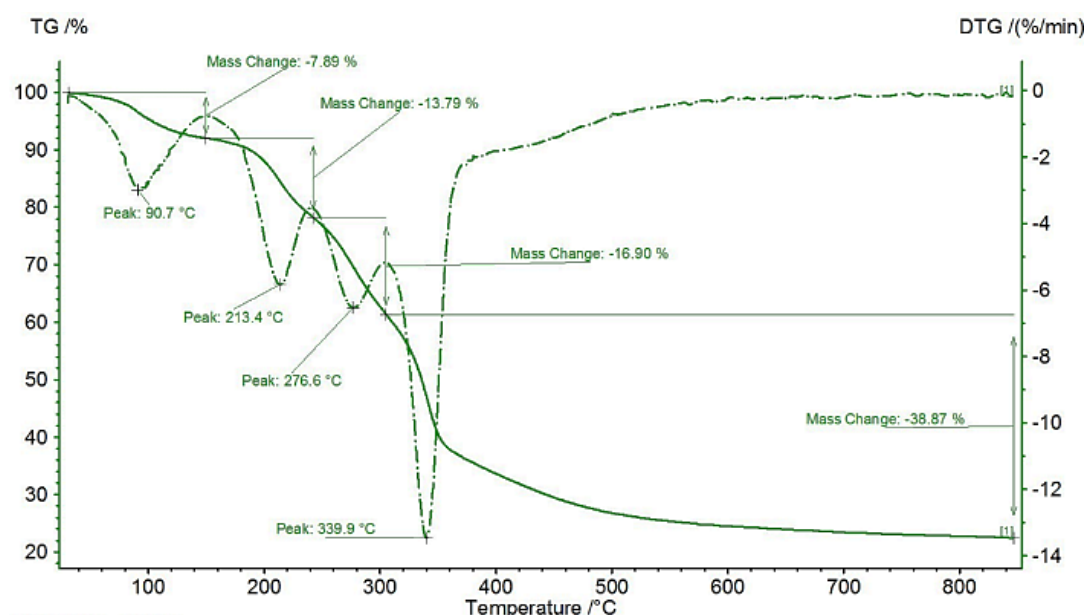
3. ผลการวิจัย

3.1 ลักษณะของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

จากการลงพื้นที่ ณ ตำบลเขาคันทรง อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี พบว่าวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรส่วนใหญ่มาจากไร่นาสับปะรด ได้แก่ ใบสับปะรด ซึ่งบางส่วนมีการนำไปแปรรูป หรือ หากไม่มีการนำออกไปนอกพื้นที่ต้องฝังกลบ [18]

เมื่อนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) พบว่าผลการวิเคราะห์ร้อยละคาร์บอน ร้อยละไฮโดรเจน ร้อยละไนโตรเจน และร้อยละออกซิเจนของไบสับประรด มีค่าเท่ากับ 45.88, 6.60, 1.15 และ 46.37 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ มีค่าความร้อนสูงสุดเท่ากับ 18.54 MJ/kg สำหรับผลการวิเคราะห์ธาตุในเถ้าของไบสับประรดพบว่ามีร้อยละโดยน้ำหนักของธาตุต่าง ๆ ได้แก่ โพแทสเซียมร้อยละ 26.60 คลอรีนร้อยละ 7.64 แคลเซียมร้อยละ 2.89 ฟอสฟอรัสร้อยละ 2.79 แมกนีเซียมร้อยละ 2.35 ซิลิกอนร้อยละ 1.44 และพบธาตุที่มีปริมาณไม่เกินร้อยละ 1 ได้แก่ ซัลเฟอร์ แมงกานีส โซเดียม รูบิเดียม และอื่น ๆ

รูปที่ 4 แสดงผลการวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของไบสับประรดด้วยเทคนิค Thermogravimetric analysis (TGA/DTG) ลักษณะของกราฟจาก TGA/DTG สามารถใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของการสลายตัวขณะได้รับความร้อน เช่น อัตราการสูญเสียน้ำหนัก และอุณหภูมิที่เกิดการสลายตัวสูงสุด เป็นต้น จากข้อมูลการสลายตัวทางความร้อนในช่วงอุณหภูมิห้องถึง 850 °C เมื่อพิจารณาจากกราฟ DTG (เส้นประ) พบว่าเกิดพีคที่ 90.70 °C, 213.40 °C, 276.60 °C และ 339.90 °C จากการใช้พลังงานในการสลายตัวช่วงต่าง ๆ เมื่อพิจารณาควบคู่กับกราฟ TGA (เส้นทึบ) ซึ่งแสดงการสูญเสียน้ำหนักของชีวมวล พบว่า การสลายตัวช่วงแรก ที่อุณหภูมิ 90.70 °C เกิดการสูญเสียน้ำหนักของชีวมวลร้อยละ 7.89 เกิดจากการสูญเสียความชื้นจากกระบวนการทำให้แห้ง จากนั้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะเกิดการปลดปล่อยสารระเหยเนื่องจากการสลายตัวขององค์ประกอบหลักของชีวมวล ได้แก่ เฮมิเซลลูโลส (200–300 °C) รวมถึงเซลลูโลส (250–300 °C) และลิกนินบางส่วน (200–500 °C) [19] ทำให้น้ำหนักของชีวมวลลดลงอย่างรวดเร็ว จากรูปจะเห็นว่าอุณหภูมิที่เกิดการสลายตัวสูงสุด คือ 339.9 °C และชีวมวลมีการสูญเสียน้ำหนักรวมจนเหลือประมาณร้อยละ 40 จากนั้นเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 350 °C ไบสับประรดยังมีการสลายตัวอย่างช้า ๆ จากการสลายตัวของลิกนินและองค์ประกอบที่ซับซ้อนอื่น ๆ ที่เหลืออยู่ จนกระทั่งน้ำหนักของไบสับประรดลดลงเหลือประมาณร้อยละ 25 ซึ่งมีความเป็นไปได้ว่าน้ำหนักที่เหลืออยู่นั้นเป็นน้ำหนักของคาร์บอนคงตัวและเถ้า จากผลการวิเคราะห์ดังกล่าว สามารถเลือกอุณหภูมิที่เหมาะสมในการสลายตัวทางความร้อนสำหรับการเทอร์ริฟลิกชันเพื่อให้เกิดการปลดปล่อยสารระเหยบางส่วน คือ 250 °C และอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการไพโรไลซิสเพื่อให้เกิดการปลดปล่อยสารระเหยมากที่สุด คือ 400 °C



รูปที่ 4 การสลายตัวทางความร้อนของโพลีโพรพิลีน

3.2 องค์ประกอบของเชื้อเพลิงที่ผลิตจากกระบวนการต่าง ๆ

เมื่อนำโพลีโพรพิลีนไปแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงด้วยกระบวนการต่าง ๆ พบว่าลักษณะทางกายภาพของเชื้อเพลิงที่ผ่านกระบวนการทอริรีแฟคชันมีบางส่วนเป็นสีดำและบางส่วนมีสีน้ำตาลเข้ม ลักษณะคล้ายโพลีโพรพิลีนแห้ง ในขณะที่เชื้อเพลิงที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสระดับห้องปฏิบัติการและการไพโรไลซิสระดับภาคสนามด้วยเตาเผาขนาด 200 ลิตร มีลักษณะเป็นสีดำเงา ซึ่งการที่เชื้อเพลิงที่ผ่านกระบวนการทอริรีแฟคชันบางส่วนยังมีสีน้ำตาลคล้ายสีเดิมของโพลีโพรพิลีนแห้งนั้น เนื่องจากการสลายตัวที่อุณหภูมิต่ำ (250 °C) มีเพียงเอมีเซลลูโลสและลิกนินบางส่วนเท่านั้น โดยพิจารณาได้จากผลการวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของโพลีโพรพิลีนที่แสดงดังรูปที่ 4 ในขณะที่องค์ประกอบเซลลูโลสยังคงอยู่มาก ดังนั้นลักษณะของเชื้อเพลิงที่ผ่านกระบวนการทอริรีแฟคชันจึงมีความใกล้เคียงกับชีวมวลเริ่มต้น ในขณะที่เชื้อเพลิงที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสนั้น ดำเนินการที่อุณหภูมิสูงกว่า (400 °C) ซึ่งองค์ประกอบมากกว่าร้อยละ 50 เกิดการสลายตัวแล้ว ทำให้ลักษณะทางกายภาพแตกต่างจากชีวมวลเริ่มต้นมาก อย่างไรก็ตามเชื้อเพลิงที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสระดับห้องปฏิบัติการ และกระบวนการไพโรไลซิสระดับภาคสนามนั้น มีลักษณะทางกายภาพแตกต่างกัน คือ เชื้อเพลิงที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสระดับห้องปฏิบัติการมีสีดำติดมือเล็กน้อย ส่วนเชื้อเพลิงที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสระดับภาคสนามมีสีดำที่ไม่ติดมือ สีดำที่ติดมือนี้น่าจะมาจากน้ำมันที่ติดค้างที่ผิวของถ่านชีวภาพ โดยกระบวนการระดับภาคสนามมีการระบายสารระเหยออกจากส่วนผลิตถ่านชีวภาพ ทำให้สารระเหยที่กลายเป็นน้ำมันที่ติดค้างมี

สีน้ำตาลเข้มหรือสีดำและเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (light hydrocarbon) ตกค้างอยู่ที่ผิวน้อยกว่าการผลิตในระดับห้องปฏิบัติการ ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของถ่านชีวภาพที่ได้จากกระบวนการต่าง ๆ ที่พบว่าถ่านชีวภาพจากกระบวนการระดับภาคสนามมีองค์ประกอบร้อยละของไฮโดรเจนน้อยกว่าถ่านชีวภาพจากกระบวนการระดับห้องปฏิบัติการ ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงร้อยละผลได้ของแข็ง และร้อยละองค์ประกอบของเชื้อเพลิงที่ได้จากกระบวนการทอรรีแฟคชัน การไพโรไลซิสระดับห้องปฏิบัติการ และการไพโรไลซิสระดับภาคสนาม ด้วยเตาเผาขนาด 200 ลิตร จะเห็นได้ว่ากระบวนการทอรรีแฟคชันทำให้เชื้อเพลิงมีร้อยละได้ของแข็งสูงถึงร้อยละ 56.33 แต่ร้อยละคาร์บอนต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการผลิตถ่านชีวภาพ ซึ่งมีร้อยละผลได้ของแข็งต่ำกว่า แต่มีร้อยละคาร์บอนคิดเป็นร้อยละ 33.02 และ 27.07 สำหรับการผลิตถ่านชีวภาพจากห้องปฏิบัติการและการผลิตถ่านชีวภาพจากเตาเผา 200 ลิตร ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการทอรรีแฟคชันดำเนินการที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้การสลายตัวทางความร้อน (thermal cracking) ของชีวมวลเกิดขึ้นบางส่วน จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าเฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนินบางส่วนเริ่มเกิดการสลายตัวทางความร้อนที่อุณหภูมิ 170 °C [20] เฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสมีช่วงการสลายตัวที่อุณหภูมิต่ำ คือ 170–390 °C เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 390 °C ลิกนินส่วนที่เหลือจะสลายตัวต่อไปจนถึงอุณหภูมิมากกว่า 800 °C ซึ่งการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสในช่วงอุณหภูมิต่ำนั้นทำให้ชีวมวลสูญเสียสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำบางส่วนไป จากนั้นอัตราการสลายตัวจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ส่วนสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีโครงสร้างซับซ้อนจะเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นเชื้อเพลิงจากกระบวนการทอรรีแฟคชันนั้น แม้ว่าจะมีองค์ประกอบคาร์บอนสูงกว่าไบสับปรดแห้งเนื่องจากการสลายตัวของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนบางส่วน แต่ก็ยังมีปริมาณองค์ประกอบคาร์บอนน้อยกว่าเชื้อเพลิงที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสที่ดำเนินการที่อุณหภูมิสูงกว่า อย่างไรก็ตาม แม้ว่าการมีองค์ประกอบคาร์บอนสูงจะส่งผลต่อคุณสมบัติทางความร้อนของเชื้อเพลิง กล่าวคือเมื่อร้อยละคาร์บอนมาก ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงมีแนวโน้มสูงขึ้น แต่จะสังเกตได้ว่าร้อยละผลได้ของแข็งกลับลดลง แสดงให้เห็นว่าปริมาณเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ลดลงตามไปด้วย ซึ่งการเลือกกระบวนการที่เหมาะสมจำเป็นต้องคำนึงถึงวัตถุประสงค์การใช้งานและความคุ้มค่าในด้านต่าง ๆ รวมถึงปริมาณและคุณภาพของเชื้อเพลิงที่ผลิตได้

จากการคำนวณค่าความร้อนสูงสุดของเชื้อเพลิงที่ผลิตจากแต่ละกระบวนการ พบว่าชีวมวลจากเตาเผา 200 ลิตร หรือกระบวนการระดับภาคสนามมีค่าความร้อนสูงสุด เนื่องจากการสลายตัวของไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ทำให้เชื้อเพลิงหรือถ่านชีวภาพที่ได้มีปริมาณร้อยละคาร์บอนสูง ส่งผลให้มีค่าความร้อนสูงสุด รองลงมาคือถ่านชีวภาพที่ได้จากกระบวนการระดับห้องปฏิบัติการ และชีวมวลทอรรีฟายด์ ตามลำดับ เนื่องจากยังมีสารระเหยหรือไฮโดรคาร์บอนที่มี

น้ำหนักโมเลกุลต่ำคงเหลืออยู่มาก สังเกตได้จากปริมาณไฮโดรเจนและออกซิเจนที่สูง ทำให้ค่าความร้อนสูงสุดที่คำนวณได้มีค่าลดลง

ตารางที่ 2 การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุของเชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ

ชนิดเชื้อเพลิง	ร้อยละผลได้ของแข็ง (solid yield (wt.%))	ร้อยละองค์ประกอบ (โดยน้ำหนัก)				ค่าความร้อนสูงสุด (MJ/kg)
		คาร์บอน	ไฮโดรเจน	ไนโตรเจน	ออกซิเจน	
ชีวมวลทอรรีฟายด์	56.33	52.26	4.96	1.71	41.07	20.37
ถ่านชีวภาพจากห้องปฏิบัติการ	33.02	61.56	3.12	1.06	34.26	23.25
ถ่านชีวภาพจากเตาเผา 200 ลิตร	27.07	70.49	1.26	1.38	26.87	25.97

3.3 การคำนวณการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ของกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง

จากกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากใบสับประดทั้ง 4 กระบวนการ คือ ชีวมวลอัดแท่ง ชีวมวลทอรรีฟายด์อัดแท่ง ถ่านชีวภาพผลิตในระดับห้องปฏิบัติการอัดแท่ง และถ่านชีวภาพผลิตในระดับภาคสนามอัดแท่ง สามารถนำมาคำนวณการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ โดยมีขอบเขตการศึกษา ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณ และวิธีการคำนวณในหัวข้อที่ 2.4 และ 2.6 จะได้ผลการคำนวณแสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แสดงค่าการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากองค์ประกอบและกระบวนการต่าง ๆ โดยเริ่มจากสมมติฐานในการใช้ชีวมวลตั้งต้นจำนวน 5 กิโลกรัม นำมาผ่านกระบวนการ 4 กระบวนการ โดยกระบวนการแรก คือ การผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง ซึ่งเป็นการนำใบสับประดมาผสมแบริ่งเปียก และเข้าเครื่องอัดแท่ง ทำให้ปัจจัยขาเข้า หรือ input ประกอบด้วย ชีวมวล แบริ่งมันสำปะหลัง น้ำ และพลังงานไฟฟ้าจากเครื่องอัดแท่ง ส่วนปัจจัยขาออก คือ เชื้อเพลิงอัดแท่ง โดยที่ของเสียถือว่าปริมาณน้อยมากจนตัดทิ้งได้ ส่วนกระบวนการผลิตชีวมวลทอรรีฟายด์อัดแท่งและกระบวนการผลิตถ่านชีวภาพระดับห้องปฏิบัติการอัดแท่ง มีกระบวนการที่ใกล้เคียงกัน ต่างกันเพียงอุณหภูมิที่ใช้ในการผลิตเชื้อเพลิง จึงมีปัจจัยขาเข้าประกอบด้วย ชีวมวล แบริ่งมันสำปะหลัง น้ำ พลังงานไฟฟ้าจากเตาเผาและเครื่องอัดแท่ง ส่วนปัจจัยขาออก ประกอบด้วยของเสียและเชื้อเพลิงอัดแท่ง สำหรับกระบวนการผลิตถ่านชีวภาพระดับภาคสนามอัดแท่งนั้น มีการใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อนแทนเตาเผาพลังงานไฟฟ้า และมีการผลิตถ่านชีวภาพร่วมกับการผลิตน้ำส้มควันไม้ ทำให้ปัจจัยขาเข้าประกอบด้วย ชีวมวล แบริ่งมันสำปะหลัง น้ำ ชีวมวลที่ใช้เป็น

เชื้อเพลิง และพลังงานไฟฟ้าจากเครื่องอัดแท่ง ส่วนปัจจัยขาออก ประกอบด้วยของเสีย น้ำส้มควันไม้และเชื้อเพลิงอัดแท่ง

จากผลการคำนวณจะเห็นว่าปัจจัยการผลิตที่ก่อให้เกิดการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มากที่สุด คือ การใช้พลังงานไฟฟ้าจากเตาเผาในระดับห้องปฏิบัติการ ซึ่งส่งผลให้การผลิตชีวมวลทอรรีฟายอัดแท่ง และถ่านชีวภาพผลิตในระดับห้องปฏิบัติการอัดแท่ง มีการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงที่สุด โดยคิดเป็น $3.93 \text{ kgCO}_2\text{-eq}$ และ $4.41 \text{ kgCO}_2\text{-eq}$ ตามลำดับ การที่เตาเผาไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ทำให้เกิดการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงนั้น เนื่องจากต้องใช้เตาเผาหลายครั้งจึงจะได้ปริมาณถ่านชีวภาพหรือชีวมวลทอรรีฟายด์ตามปริมาณที่กำหนด หากใช้เตาเผาที่มีขนาดใหญ่ขึ้นอาจจะทำให้ลดจำนวนครั้งในการใช้ต่อการผลิตหนึ่งครั้ง อย่างไรก็ตามเมื่อมีการผลิตในปริมาณมาก อาจมีการใช้เชื้อเพลิงอื่นในการผลิตแทน เช่น น้ำมัน หรือใช้ไม้เนื้อแข็ง ซึ่งจะทำให้ค่าการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เปลี่ยนแปลงไปจากที่แสดงในตาราง แต่แนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลง เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการผลิตชีวมวลทอรรีฟายอัดแท่ง และถ่านชีวภาพผลิตในระดับห้องปฏิบัติการอัดแท่งพบว่า การผลิตถ่านชีวภาพในระดับห้องปฏิบัติการทำให้เกิดการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่า เนื่องจากการใช้อุณหภูมิสูงและเวลานานกว่า จึงมีการใช้ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น

ในขณะที่การผลิตชีวมวลอัดแท่งและถ่านชีวภาพผลิตในระดับภาคสนามอัดแท่ง ซึ่งไม่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าจากเตาเผา มีการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์น้อยกว่า โดยคิดเป็น $2.61 \text{ kgCO}_2\text{-eq}$ และ $1.78 \text{ kgCO}_2\text{-eq}$ ตามลำดับ โดยปัจจัยหลักที่ทำให้การปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในการผลิตชีวมวลอัดแท่งมีค่ามากกว่า คือ การเกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากการนำชีวมวลอัดแท่งไปใช้เป็นเชื้อเพลิงโดยคิดเป็น $1.68 \text{ kgCO}_2\text{-eq}$ ซึ่งมากกว่าร้อยละ 50 ของปริมาณการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งหมด เนื่องจากชีวมวลแทบจะไม่ผ่านกระบวนการแปรรูป ทำให้องค์ประกอบของชีวมวลอัดแท่งยังคงคล้ายกับชีวมวลเริ่มต้น กล่าวคือ มีองค์ประกอบของสารระเหย หรือไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ทำให้เมื่อเกิดการเผาไหม้จะสามารถปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้มาก โดยมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องระบุว่า การปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งมากกว่าชีวมวลที่ผ่านกระบวนการทอรรีฟายด์อัดแท่ง มีสาเหตุหลักมาจากการเผาไหม้สารระเหย [21]

สำหรับการผลิตถ่านชีวภาพในระดับภาคสนามอัดแท่งนั้น มีการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์น้อยที่สุด ซึ่งจะเห็นว่ามีการใช้ชีวมวลมาเป็นเชื้อเพลิงแทนการใช้พลังงานไฟฟ้าจากเตาเผา โดยชีวมวลที่นำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงนั้น มีการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์คิดเป็น $0.67 \text{ kgCO}_2\text{-eq}$ ซึ่งน้อยกว่าปริมาณการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากการใช้พลังงานไฟฟ้าของเตาเผาในการผลิตชีวมวลทอรรีฟายอัดแท่ง และถ่านชีวภาพผลิตในระดับห้องปฏิบัติการอัดแท่ง ที่คิดเป็น $1.80 \text{ kgCO}_2\text{-eq}$ และ $2.63 \text{ kgCO}_2\text{-eq}$ ตามลำดับ นอกจากนี้

ของเสียหรือการสูญเสียจากกระบวนการผลิตยังน้อยกว่า เนื่องจากสารระเหยที่ถูกปลดปล่อยจากกระบวนการไฟโรไลซิสนั้น บางส่วนถูกควบแน่นและกักเก็บคาร์บอนไว้ในรูปของน้ำส้มควันไม้

นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาถึงกระบวนการใช้งาน โดยทั่วไปแล้ว ถ่านชีวภาพมักมีการใช้งานที่จำเพาะเจาะจงกว่าเชื้อเพลิงชนิดอื่น เนื่องจากถ่านชีวภาพมีความเป็นรูพรุนสูง จึงมีการนำถ่านชีวภาพมาบดแล้วเติมในดิน กล่าวคือ ใช้ถ่านชีวภาพเป็นวัสดุปรับปรุงดิน เพื่อปรับสภาพดินให้พร้อมแก่การทำการเกษตร ซึ่งถือว่าเป็นกระบวนการกักเก็บคาร์บอนอย่างหนึ่ง [22] ดังนั้น หากไม่นำถ่านชีวภาพไปเป็นเชื้อเพลิง แต่เลือกใช้เป็นวัสดุปลูก จะทำให้การปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง ในกรณีของการผลิตถ่านชีวภาพระดับห้องปฏิบัติการอัดแท่ง มีการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงจาก 4.41 เป็น 3.60 kgCO₂-eq และในกรณีของการผลิตถ่านชีวภาพระดับภาคสนามอัดแท่ง มีการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงจาก 1.78 เป็น 0.98 kgCO₂-eq

ตารางที่ 3 ค่าการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของการทำเชื้อเพลิงอัดแท่งแบบต่าง ๆ

รายการ	กรณี/กระบวนการผลิต	หน่วย	ค่า Life Cycle Inventory (LCI)		ค่า EF	kgCO ₂ -eq/หน่วย	kgCO ₂ -eq
			ปริมาณ	ปริมาณ/ Fraction unit			
การผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง							
Input							
ชีวมวล		kg	5.0000	1.0000	1.6823		
แป้งมันสำปะหลัง	ชีวมวลอัดแท่ง	kg	0.5000	0.1000	0.5720		0.0572
	ชีวมวลทอริฟายด์อัดแท่ง	kg	0.2816	0.0563	0.5720		0.0322
	ถ่านชีวภาพผลิตในระดับห้องปฏิบัติการอัดแท่ง	kg	0.1651	0.0330	0.5720		0.0189
	ถ่านชีวภาพผลิตในระดับภาคสนามอัดแท่ง	kg	0.1354	0.0271	0.5720		0.0155
น้ำ	ชีวมวลอัดแท่ง	m ³	0.0015	0.0003	0.541		0.0002
	ชีวมวลทอริฟายด์อัดแท่ง	m ³	0.0008	0.0002	0.5410		0.0001
	ถ่านชีวภาพผลิตในระดับห้องปฏิบัติการอัดแท่ง	m ³	0.0005	0.0001	0.5410		0.0001
	ถ่านชีวภาพผลิตในระดับภาคสนามอัดแท่ง	m ³	0.0004	0.0001	0.5410		0.0000

ตารางที่ 3 ค่าการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของการทำเชื้อเพลิงอัดแท่งแบบต่าง ๆ (ต่อ)

รายการ	กรณี/กระบวนการผลิต	หน่วย	ค่า Life Cycle Inventory (LCI)		ค่า EF kgCO ₂ -eq/ หน่วย	kgCO ₂ -eq
			ปริมาณ	ปริมาณ/ Fraction unit		
การผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง (ต่อ)						
Input						
ไฟฟ้า – เตาเผา*	ชีวมวลอัดแท่ง	kWh	ND	ND	ND	ND
	ชีวมวลทอรรีฟายด์อัดแท่ง	kWh	15.0000	3.0000	0.5986	1.7958
	ถ่านชีวภาพผลิตในระดับห้องปฏิบัติการอัดแท่ง	kWh	21.9600	4.3920	0.5986	2.6291
	ถ่านชีวภาพผลิตในระดับภาคสนามอัดแท่ง	kWh	ND	ND	ND	ND
ชีวมวลที่ใช้เป็นเชื้อเพลิง	ถ่านชีวภาพผลิตในระดับภาคสนามอัดแท่ง	kg	5.0000	1.0000	1.6716**	0.6687
ไฟฟ้า - เครื่องอัด	ชีวมวลอัดแท่ง	kWh	4.8000	0.9600	0.5986	0.5747
	ชีวมวลทอรรีฟายด์อัดแท่ง	kWh	1.2000	0.2400	0.5986	0.1437
	ถ่านชีวภาพผลิตในระดับห้องปฏิบัติการอัดแท่ง	kWh	0.6000	0.1200	0.5986	0.0718
	ถ่านชีวภาพผลิตในระดับภาคสนามอัดแท่ง	kWh	0.6000	0.1200	0.5986	0.0718
Output						
ของเสีย เช่น คาร์บอนจากสารระเหยที่หายไปจากกระบวนการ	ชีวมวลอัดแท่ง	คำนวณจากสมมูลคาร์บอนในสมการที่ (4)				0.0000
	ชีวมวลทอรรีฟายด์อัดแท่ง	คำนวณจากสมมูลคาร์บอนในสมการที่ (4)				0.7788
	ถ่านชีวภาพผลิตในระดับห้องปฏิบัติการอัดแท่ง	คำนวณจากสมมูลคาร์บอนในสมการที่ (4)				0.8824
	ถ่านชีวภาพผลิตในระดับภาคสนามอัดแท่ง	คำนวณจากสมมูลคาร์บอนในสมการที่ (4)				0.2011
น้ำส้มควันไม้	ถ่านชีวภาพผลิตในระดับภาคสนามอัดแท่ง	dm ³	2.5000	0.5000	0.0490	0.0245
เชื้อเพลิงอัดแท่ง	ชีวมวลอัดแท่ง	kg	4.9950	0.9990	ND	1.6806***
	ชีวมวลทอรรีฟายด์อัดแท่ง	kg	3.0976	5.0000	ND	1.1825***

ตารางที่ 3 ค่าการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของการทำเชื้อเพลิงอัดแท่งแบบต่าง ๆ (ต่อ)

รายการ	กรณี/กระบวนการผลิต	หน่วย	ค่า Life Cycle Inventory (LCI)		ค่า EF	kgCO ₂ -eq	kgCO ₂ -eq
			ปริมาณ	ปริมาณ/ Fraction unit	kgCO ₂ -eq/ หน่วย		
การผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง (ต่อ)							
Output							
เชื้อเพลิงอัดแท่ง (ต่อ)	ถ่านชีวภาพผลิตในระดับห้องปฏิบัติการอัดแท่ง	kg	1.8158	0.3632	ND		0.8059***
	ถ่านชีวภาพผลิตในระดับภาคสนามอัดแท่ง	kg	1.4888	0.2978	ND		0.7989***
รวมการปลดปล่อย CO ₂ จากการผลิต	ชีวมวลอัดแท่ง	ผลรวมของค่า kgCO ₂ -eq ทั้งกระบวนการ					2.3126
	ชีวมวลทอรัฟฟายด์อัดแท่ง	ผลรวมของค่า kgCO ₂ -eq ทั้งกระบวนการ					3.9331
	ถ่านชีวภาพผลิตในระดับห้องปฏิบัติการอัดแท่ง	ผลรวมของค่า kgCO ₂ -eq ทั้งกระบวนการ					4.4081
	ถ่านชีวภาพผลิตในระดับภาคสนามอัดแท่ง	ผลรวมของค่า kgCO ₂ -eq ทั้งกระบวนการ					1.7805
การใช้งานถ่านชีวภาพเป็นวัสดุผสมในดินปลูกหรือตัวดูดซับ							
การใช้เป็นวัสดุผสมในดินปลูกหรือตัวดูดซับ	ถ่านชีวภาพผลิตในระดับห้องปฏิบัติการอัดแท่ง	kg	1.8158	0.3632	ND		-0.8059
	ถ่านชีวภาพผลิตในระดับภาคสนามอัดแท่ง	kg	1.4888	0.2978	ND		-0.7989
รวมการปลดปล่อย CO ₂ จากการผลิตและผสมในดิน****	ถ่านชีวภาพผลิตในระดับห้องปฏิบัติการอัดแท่ง	kg	1.8158	0.3632	ND		3.6022
	ถ่านชีวภาพผลิตในระดับภาคสนามอัดแท่ง	kg	1.4888	0.2978	ND		0.9816

หมายเหตุ: ND คือ not determined

* คือ เวลาและ kW จากการใช้ muffle furnace ในห้องปฏิบัติการ

** คือ ร้อยละของคาร์บอน (%C content) ของชีวมวลที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงเท่ากับร้อยละ 45.59

*** คือ ปริมาณเชื้อเพลิงอัดแท่งคำนวณดังสมการ (5) และ kgCO₂-eq ของเชื้อเพลิงอัดแท่ง = kgCO₂-eq ของเชื้อเพลิง + kgCO₂-eq ของแบริ่งน้ำมันส่าปะหลัง

**** คือค่าการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในกรณีให้นำถ่านชีวภาพไปเติมในดิน

ตารางที่ 4 การคำนวณประสิทธิภาพพลังงานสำหรับการทำเชื้อเพลิงอัดแท่งด้วยกระบวนการต่าง ๆ

ก) กระบวนการผลิตชีวมวลอัดแท่ง

Energy in	(MJ)	Energy out	(MJ)
ชีวมวล	92.71	เชื้อเพลิงอัดแท่ง	92.62
แป้งมันสำปะหลัง	8.79	การสูญเสีย (loss)	138.45
ไฟฟ้าจากเครื่องอัด	17.28		
รวม	176.83	รวม	176.83

$\eta = 52.38 \%$

ข) กระบวนการทอรีแฟคชัน ด้วยเตาเผา muffle furnace ระดับห้องปฏิบัติการ

Energy in	(MJ)	Energy out	(MJ)
ชีวมวล	92.71	ชีวมวลทอรีฟายด์	57.36
แป้งมันสำปะหลัง	4.95	การสูญเสีย (loss)	98.62
ไฟฟ้าจากเตาเผา	54.00		
ไฟฟ้าจากเครื่องอัด	4.32		
รวม	155.99	รวม	155.99

$\eta = 36.78 \%$

ค) กระบวนการไพโรไลซิส ด้วยเตาเผา muffle furnace ระดับห้องปฏิบัติการ

Energy in	(MJ)	Energy out	(MJ)
ชีวมวล	92.71	ถ่านชีวภาพ	38.38
แป้งมันสำปะหลัง	2.90	การสูญเสีย (loss)	138.45
ไฟฟ้าจากเตาเผา	79.06		
ไฟฟ้าจากเครื่องอัด	2.16		
รวม	176.83	รวม	176.83

$\eta = 21.70 \%$

ง) กระบวนการไพโรไลซิส ด้วยเตาเผาขนาด 200 ลิตร ระดับภาคสนาม

Energy in	(MJ)	Energy out	(MJ)
ชีวมวล	92.71	ถ่านชีวภาพ	35.15
แป้งมันสำปะหลัง	2.38	การสูญเสีย (loss)	98.40
ชีวมวลที่ใช้เป็นเชื้อเพลิง	36.30		
ไฟฟ้าจากเครื่องอัด	2.16		
รวม	133.55	รวม	133.55

$\eta = 26.32 \%$

การพิจารณาด้านประสิทธิภาพพลังงาน (η) สำหรับการผลิตชีวมวลอัดแท่ง ชีวมวลทอรรีฟายด์อัดแท่ง ถ่านชีวภาพผลิตในระดับห้องปฏิบัติการอัดแท่ง และถ่านชีวภาพผลิตในระดับภาคสนามอัดแท่ง โดยคำนวณอัตราส่วนระหว่างพลังงานจากเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ (energy out) และพลังงานสุทธิที่ใช้ในกระบวนการ (energy in) ดังสมการ (6) จะได้รายการคำนวณดังแสดงในตารางที่ 4 ซึ่งสังเกตได้ว่าปริมาณความร้อนหรือพลังงานที่ได้จากเชื้อเพลิงอัดแท่งนั้น มีค่าน้อยกว่าพลังงานจากชีวมวลเริ่มต้น แม้ว่าเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จะมีค่าความร้อนสูงกว่าค่าความร้อนของชีวมวลเริ่มต้นก็ตาม เนื่องมาจากการนำชีวมวลไปผ่านกระบวนการทอรรีฟเลชันหรือกระบวนการไพโรไลซิส ซึ่งเป็นกระบวนการดูดความร้อน จำเป็นต้องใช้พลังงานบางส่วนไปในการเกิดปฏิกิริยา นอกจากนี้ในกระบวนการทอรรีฟเลชันหรือไพโรไลซิสมักก่อให้เกิดการสูญเสียมวลบางส่วนจากการสลายตัวทางความร้อนของชีวมวล น้ำหนักหรือปริมาณของเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จึงน้อยลง หากปริมาณสารระเหยในชีวมวลเริ่มต้นมาก การสูญเสียมวลในระหว่างกระบวนการผลิตก็จะมากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [23]

จากการคำนวณประสิทธิภาพพลังงาน ดังแสดงในตารางที่ 4 จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพพลังงานกรณีการผลิตชีวมวลอัดแท่งมีค่าสูงที่สุด เนื่องจากไม่ต้องใช้พลังงานในการแปรรูปชีวมวล และใช้เพียงพลังงานที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการอัดแท่ง เมื่อเปรียบเทียบกับการผลิตชีวมวลทอรรีฟายด์อัดแท่ง (ตารางที่ 4(ข)) พบว่าค่าประสิทธิภาพพลังงานต่ำลง เนื่องจากต้องใช้พลังงานจำนวนหนึ่งในกระบวนการทอรรีฟเลชันชีวมวล แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพพลังงานขึ้นกับพลังงานที่ใช้ในการสลายหรือกำจัดความชื้นและสารระเหย [24] เมื่อพิจารณาการผลิตถ่านชีวภาพระดับห้องปฏิบัติการอัดแท่ง (ตารางที่ 4(ค)) พบว่าประสิทธิภาพพลังงานลดลงต่ำที่สุด คือ 21.70% เนื่องจากการผลิตถ่านชีวภาพด้วยกระบวนการไพโรไลซิสใช้อุณหภูมิและพลังงานสูงกว่าการผลิตชีวมวลทอรรีฟายด์ เพื่อให้เกิดการสลายตัวทางความร้อนและเกิดการกำจัดสารระเหยมากขึ้น

อย่างไรก็ตาม สำหรับการผลิตถ่านชีวภาพระดับภาคสนามอัดแท่งนั้น พบว่ามีประสิทธิภาพพลังงานสูงกว่าการผลิตถ่านชีวภาพระดับห้องปฏิบัติการอัดแท่ง โดยพบว่ามีประสิทธิภาพความร้อนเท่ากับ 26.32% เนื่องจากหลักการทำงานของเตาเผาขนาด 200 ลิตร ที่ใช้ในการทดสอบระดับภาคสนาม ตามรายละเอียดในหัวข้อ 2.3 นั้น มีการหมุนเวียนแก๊สชีวมวลหรือสารระเหยที่ถูกปลดปล่อยออกจากชีวมวลในระหว่างกระบวนการไพโรไลซิส มาควบแน่นเป็นน้ำส้มควันไม้ส่วนหนึ่ง อีกส่วนหนึ่งที่ไม่สามารถควบแน่นได้ถูกนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วม ทำให้สามารถลดพลังงานภายนอกที่ต้องนำมาใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิเพื่อผลิตถ่านชีวภาพ ประสิทธิภาพพลังงานจึงสูงกว่าการผลิตในระดับห้องปฏิบัติการที่ไม่มีการหมุนเวียนแก๊สชีวมวลมาใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วม และใช้เพียงพลังงานไฟฟ้าจากเตาเผาเพียงอย่างเดียว

จากผลการทดสอบที่กล่าวมาข้างต้น สามารถสรุปข้อได้เปรียบและเสียเปรียบของการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งแต่ละกระบวนการได้ ดังนี้

1) ชีวมวลอัดแท่ง มีข้อได้เปรียบ คือ ประสิทธิภาพพลังงานสูง และไม่ต้องผ่านกระบวนการสลายตัวทางความร้อน แต่มีข้อเสียเปรียบ คือ ใช้พลังงานสูงในกระบวนการอัดแท่ง

2) ชีวมวลทอรรีฟายด์อัดแท่ง มีข้อได้เปรียบ คือ มีการดำเนินการผ่านกระบวนการทางความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้กำจัดสารระเหยบางส่วนได้ และเชื้อเพลิงมีค่าความร้อนสูงกว่าชีวมวลอัดแท่ง แต่มีข้อเสียเปรียบ คือ เกิดของเสียหรือการสูญเสียระหว่างกระบวนการสูง และประสิทธิภาพพลังงานไม่สูงมากนัก

3) ถ่านชีวภาพผลิตในระดับภาคสนามอัดแท่ง มีข้อได้เปรียบ คือ เชื้อเพลิงที่ได้มีค่าความร้อนสูง มีน้ำส้มควันไม้เป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ มีประสิทธิภาพพลังงานสูงกว่าการดำเนินการระดับห้องปฏิบัติการเนื่องจากการหมุนเวียนแก๊สชีวมวล มีการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์น้อยกว่ากระบวนการอื่น และถ่านชีวภาพที่ผลิตได้สามารถใช้เป็นวัสดุปรับปรุงสภาพดินซึ่งช่วยในการกักเก็บคาร์บอน แต่มีข้อเสียเปรียบ คือ ประสิทธิภาพพลังงานไม่สูงมากนัก

จะเห็นว่าเมื่อคำนึงถึงการนำชีวมวลหรือไบโอสบประตมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่งในแง่ของการใช้เป็นพลังงานทางเลือก กรณีการผลิตชีวมวลอัดแท่งเป็นกระบวนการที่น่าสนใจเนื่องจากมีประสิทธิภาพพลังงานสูง กระบวนการผลิตไม่ซับซ้อนเนื่องจากไม่จำเป็นต้องนำชีวมวลมาแปรรูปผ่านกระบวนการทางความร้อน อย่างไรก็ตามชีวมวลอัดแท่งที่ได้มีค่าความร้อนต่ำ จำเป็นต้องใช้ในปริมาณมากจึงจะได้พลังงานความร้อนตามที่ต้องการ ในกรณีที่จำเป็นต้องผลิตและใช้เชื้อเพลิงอัดแท่งในปริมาณมาก จึงมีการผลิตเป็นชีวมวลทอรรีฟายด์อัดแท่งแทนการผลิตชีวมวลอัดแท่งเนื่องจากการนำชีวมวลมาผ่านกระบวนการทางความร้อนบางส่วน ทำให้สารระเหยลดลง เชื้อเพลิงที่ได้มีค่าความร้อนต่อหน่วยสูงขึ้น แต่ก็มีข้อเสียเปรียบ คือ เกิดการสูญเสียระหว่างกระบวนการและประสิทธิภาพพลังงานลดลง

เมื่อพิจารณาการผลิตเชื้อเพลิงในรูปของถ่านชีวภาพ พบว่าถ่านชีวภาพมีค่าความร้อนสูงสุดมากที่สุด สำหรับการผลิตในระดับห้องปฏิบัติการทำให้เกิดการสูญเสียระหว่างกระบวนการ มีการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูง และมีประสิทธิภาพพลังงานต่ำกว่ากระบวนการอื่น ในขณะที่การผลิตในระดับภาคสนามด้วยเตาเผาขนาด 200 ลิตรนั้น มีการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำที่สุด และมีประสิทธิภาพพลังงานสูงกว่าการผลิตในระดับห้องปฏิบัติการเนื่องจากประสิทธิภาพในการจัดการสารระเหยที่ถูกปลดปล่อยออกจากกระบวนการไพโรไลซิส และนำแก๊สชีวมวลมาใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วม นอกจากนี้ถ่านชีวภาพที่ผลิตได้ยังสามารถใช้เป็นวัสดุกักเก็บคาร์บอน ดังนั้น แม้ว่าในแง่ของพลังงาน การผลิตเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงอาจยังมีข้อเสียเปรียบบางประการ แต่ในแง่ของสิ่งแวดล้อมและการชดเชยคาร์บอน การผลิตถ่านชีวภาพระดับภาคสนามเป็นกระบวนการที่มีความน่าสนใจ

4. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความเหมาะสมในการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง 3 ชนิด ได้แก่ ชีวมวลอัดแท่ง ชีวมวลทอรรีฟายด์ และถ่านชีวภาพอัดแท่งที่ผลิตในระดับห้องปฏิบัติการหรือระดับภาคสนาม โดยใช้ชีวมวลเริ่มต้น คือ ใบสับประดศรียาชา จากตำบลเขาคันทรง อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี จากการทดลองเพื่อผลิตชีวมวลทอรรีฟายด์ ถ่านชีวภาพจากห้องปฏิบัติการ และถ่านชีวภาพจากเตาเผา 200 ลิตร พบว่าได้รับร้อยละผลได้ของแข็งเท่ากับร้อยละ 56.33, 33.02 และ 27.07 ตามลำดับ ในขณะที่ปริมาณร้อยละคาร์บอนมีแนวโน้มในทิศทางตรงกันข้าม โดยคิดเป็นร้อยละ 52.26, 61.56 และ 70.49 ตามลำดับ จากนั้นเมื่อนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง และพิจารณาการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ตลอดกระบวนการผลิตถึงการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง พบว่าการผลิตถ่านชีวภาพในระดับห้องปฏิบัติการอัดแท่งมีค่าการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด คิดเป็น 4.41 kgCO₂-eq รองลงมา คือ การผลิตชีวมวลทอรรีฟายด์อัดแท่ง และชีวมวลอัดแท่ง ตามลำดับ ซึ่งกระบวนการที่มีการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มากที่สุด คือ กระบวนการสลายตัวทางความร้อน โดยกระบวนการไพโรไลซิสก่อให้เกิดการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มากที่สุด เนื่องจากการดำเนินการที่อุณหภูมิสูงและต้องใช้พลังงานปริมาณมาก รองลงมาคือ กระบวนการทอรรีฟเลชันที่ดำเนินการที่อุณหภูมิต่ำกว่า นอกจากนี้ ด้วยเหตุผลทางด้านการใช้พลังงานความร้อนในการผลิตดังกล่าว ประสิทธิภาพพลังงานของการผลิตถ่านชีวภาพระดับห้องปฏิบัติการอัดแท่งจึงน้อยที่สุด ในขณะที่การผลิตชีวมวลอัดแท่งมีการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์น้อยที่สุดและมีประสิทธิภาพพลังงานสูงที่สุด คิดเป็น 2.31 kgCO₂-eq และ 52.38% ตามลำดับ

เมื่อผลิตถ่านชีวภาพอัดแท่งในระดับภาคสนามด้วยเตาเผาขนาด 200 ลิตร พบว่าเตาเผาประเภทนี้ปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์น้อยที่สุดและมีประสิทธิภาพพลังงานสูงกว่าการผลิตในระดับห้องปฏิบัติการ เนื่องจากเตาเผาขนาด 200 ลิตรที่พัฒนาขึ้นใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงแทนพลังงานไฟฟ้า และมีการนำแก๊สชีวมวลที่ปลดปล่อยระหว่างการไพโรไลซิสไปควบแน่นและเก็บในรูปน้ำส้มควันไม้ ส่วนสารระเหยที่ไม่สามารถควบแน่นได้ เมื่อเปลี่ยนวิธีการใช้ถ่านชีวภาพจากการเป็นเชื้อเพลิงไปเป็นวัสดุปรับปรุงดินในพื้นที่การเกษตร พบว่าการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงจาก 1.78 เป็น 0.98 kgCO₂-eq สำหรับการผลิตถ่านชีวภาพระดับห้องปฏิบัติการอัดแท่งและการผลิตถ่านชีวภาพระดับภาคสนามอัดแท่งตามลำดับ ซึ่งข้อได้เปรียบสำคัญด้านการชดเชยคาร์บอนในดำเนินงานด้านการเกษตร เป็นตัวเลือกที่น่าสนใจทางหนึ่งในการดำเนินงานเพื่อส่งเสริมสังคมคาร์บอนต่ำของภาครัฐและอุตสาหกรรม ซึ่งผลการศึกษาสามารถใช้เป็นข้อมูลในการตัดสินใจถึงแนวทางการดำเนินงานเกี่ยวกับการผลิตและใช้งานเชื้อเพลิงอัดแท่ง ให้เหมาะสมกับวัตถุประสงค์หรือข้อจำกัดในการผลิตได้

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเรื่อง การประเมินการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์และประสิทธิภาพพลังงานจากกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากใบสับประดศรีราชา โดย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก ได้รับการสนับสนุนจากกองทุนส่งเสริม ววน. (ทุน Fundamental Fund ประจำปีงบประมาณ 2567) และได้รับการสนับสนุนจากทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณผลประโยชน์ประจำปี 2567 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก (เลขที่สัญญาเงินทุน 039/2567) คณะผู้วิจัยขอขอบคุณคุณปิยะ โกสินทรจิตต์ และบุคลากรที่เกี่ยวข้องในพื้นที่ตำบลเขาคันทรง อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรในการนำมาใช้ในงานวิจัย

References

- [1] Office of Agricultural Economics. Agricultural statistics of Thailand 2022 [Internet]. Bangkok: Office of Agricultural Economics; 2023 [cited 2025 Feb 6]. Available from: <https://oae.go.th/uploads/files/2025/05/15/3eff5bf535e375fc.pdf>. (In Thai)
- [2] King Mongkut's University of Technology Thonburi. Upgrading phulae pineapple to zero waste [Internet]. Bangkok: King Mongkut's University of Technology Thonburi; 2024 [cited 2025 Feb 6]. Available from: <https://www.kmutt.ac.th/en/news-en/30/04/2024/63853/>.
- [3] Sunphorka S, Yangsawang W. Biochar and wood vinegar production from pineapple leaves using low-emission 200-liter kiln and the feasibility study of production. Journal of Engineering and Digital Technology 2023;11(2):1-13. (In Thai)
- [4] Sunphorka S, Yangsawang W. Production of biochar and wood vinegar from Sriracha pineapple leaves using a low-emission kiln. In: Proceedings of the 3rd National Engineering and Construction Symposium; 2023 May 18-19; Si Racha, Chonburi, Thailand. (In Thai)
- [5] Phananumpha N, Boonyayam T, Wongkamchan B, Julchula B, Suksi C, Uriyarak P. Pellet fuels clean alternative energy [Internet]. Bangkok: Forest Research and Development Office, Department of Forestry; 2016 [cited 2025 Feb 6]. Available from: [Pellet fuels clean alternative energy](#). (In Thai)
- [6] Sahoo K, Bilek E, Bergman R, Mani S. Techno-economic analysis of producing solid biofuels and biochar from forest residues using portable systems. Applied Energy 2019;235:578-90. doi: 10.1016/j.apenergy.2018.10.076.

- [7] Notification of the Department of Mineral Fuels Re: criteria on reporting and calculation methods of greenhouse gas emissions from petroleum business operations B.E. 2565 (2022 Aug 16) [internet]. Government gazette vol. 139 (special part 188 Ngor). 2022 [cited 2025 Feb 6]. Available from: <https://ratchakitcha.soc.go.th/documents/17218722.pdf>. (In Thai)
- [8] Kaewsuwan W. Evaluation of greenhouse gas emissions from rowing and canoeing Thailand championships [master's thesis]. Bangkok: Srinakharinwirot University; 2021.
- [9] Thailand Greenhouse Gas Management Organization (TGO). Emission Factor (CFO) [Internet]. Bangkok: TGO; 2023 [cited 2025 Feb 6]. Available from: <https://thaicarbonlabel.tgo.or.th/index.php?lang=TH&mod=YjNKblIXNXBlbUYwYVc5dVgyVnRhWE56YVc5dQ>. (In Thai)
- [10] Ananpradit W, Chaiyat N, Intaniwet A, Lertjaturanont W, Munsin R. Carbon footprint evaluation of water hyacinth for generating renewable energy, Proceeding in 12th Conference on Energy Network of Thailand; 2016 Jun 8-10; Phitsanulok. p. 930-7.
- [11] Sunphorka S, Yangsawang W. Low-emission charcoal kiln for biochar and wood vinegar production. Thai Petty Patent 24787. 2024 Oct 30.
- [12] Demirbaş A, Demirbaş AH. Estimating the calorific values of lignocellulosic fuels. Energy Exploration and Exploitation. 2004;22(2):135-43. doi:10.1260/0144598041475198.
- [13] Thailand Greenhouse Gas Management Organization (TGO). The greenhouse gas emission factors were compiled from secondary data for the 2022 organizational carbon footprint assessment [Internet]. Bangkok: TGO; 2002 [cited 2025 May 9]. Available from: <https://thaicarbonlabel.tgo.or.th/tools/files.php?mod=Y0hKdlpIV%20mpkSE5mWlcxcGMz%20TnBiMjQ9&type=WDBaSIRFVIQ&files=Tnc9PQ>. (In Thai)
- [14] Gmünder S, Toro C, Rojas Acosta JM, Rodriguez Valencia N, Restrepo G, Barrera J, López-Hernández F. Environmental footprint of coffee in Colombia: Guidance document. Bogotá: Quantis; Centro Nacional Para la Producción Más Limpia, Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), Federación Nacional de Cafeteros de Colombia Centro Nacional de Investigaciones de Café (Cenicafé), Embassy of Switzerland in Colombia, Swiss Agency for Development and Cooperation (SDC); 2021.

- [15] Homchat K, Ramphueiphad S. The continuous carbonisation of rice husk on the gasifier for high yield charcoal production. *Results in Engineering* 2022;15:100495. doi: 10.1016/j.rineng.2022.100495.
- [16] Sampavapon A. Simulation of an enhanced biomass gasification integrated with calcium looping CO₂ capture for hydrogen production [master's thesis]. Bangkok: Chulalongkorn University; 2019.
- [17] Thailand Greenhouse Gas Management Organization (TGO). Product Carbon Footprint [Internet]. Bangkok: TGO; 2023 [cited 2025 May 9]. Available from: <https://thaicarbonlabel.tgo.or.th/index.php?lang=TH&mod=Y0hKdlpIVmpkSE5mWVhCd2NtOTJZV3c9&action=WkdWMFIXbHM¶m=TVRVNU5qVT0>. (In Thai)
- [18] National Innovation Agency (Public Organization). The development journey of woven fabric from pineapple fiber to a national-level innovation. 2024 [cited 2025 Jan 21]. Available from: <https://www.nia.or.th/the-path-to-developing-pineapple-fiber-woven-fabrics-into-innovation-product>.
- [19] Escalante J, Chen W, Tabatabaei M, Hoang A, Kwon EE, Lin KA, Saravanakumar A. Pyrolysis of lignocellulosic, algal, plastic, and other biomass wastes for biofuel production and circular bioeconomy: A review of thermogravimetric analysis (TGA) approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2022;169:112914. doi: 10.1016/j.rser.2022.112914.
- [20] Varol EA, Mutlu Ü. TGA-FTIR analysis of biomass samples based on the thermal decomposition behavior of hemicellulose, cellulose, and lignin. *Energies* 2023;16(9): 3674. doi: 10.3390/en16093674.
- [21] Lanjekar PR, Panwar NL, Agrawal C, Gupta T, Meena KK, Meena GL, et al. A review on environmental assessment of thermochemical conversion technologies for energy generation from crop residue. *Earth Energy Science* 2024 Aug 27. doi: 10.1016/j.ees.2024.07.001.
- [22] Deng X, Teng F, Chen M, Du Z, Wang B, Li R, et al. Exploring negative emission potential of biochar to achieve carbon neutrality goal in China. *Nature Communication* 2024;15:1085. doi: 10.1038/s41467-024-45314-y.
- [23] Fambri G, Lombardi G, Badami M, Chiaramonti D. Energy assessment of a slow pyrolysis plant for biochar and heat cogeneration. *Chemical Engineering Transaction* 2024;109:571-6. doi: 10.3303/CET24109096.

- [24] Cremers M, Koppejan J, Middelkamp J, Witkamp J, Sokhansanj S, Melin S, Madrall S. Status overview of torrefaction technologies—a review of the commercialisation status of biomass torrefaction [internet]. IEA Bioenergy; 2015 [cited 2025 May 9]. Available from: https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2015/11/IEA_Bioenergy_T32_Torrefaction_update_2015b.pdf

ประวัติผู้เขียนบทความ



ดร. ณรงค์ ชัยสงเคราะห์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก เขตพื้นที่อุเทนถวาย 225 ถ.พญาไท แขวงปทุมวัน เขตปทุมวัน กทม. 10330 โทรศัพท์ 0826197555 E-mail: narong_ch@rmutto.ac.th



ดร. ศรีกุลณัฐ นิลโนรี สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา ประเทศไทย 30000 โทรศัพท์ 0819309390 E-mail: srikulnath.ni@g.sut.ac.th



ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศศิธร สรรพอด้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก เขตพื้นที่อุเทนถวาย 225 ถ.พญาไท แขวงปทุมวัน เขตปทุมวัน กทม. 10330 โทรศัพท์ 0890182311 E-mail: sasithorn_su@rmutto.ac.th

Article History:

Received: February 13, 2025

Revised: August 3, 2025

Accepted: August 5, 2025

การศึกษาการผลิตถ่านอัดแท่งจากวัสดุเหลือทิ้ง
จากกระบวนการแปรรูปมะขามเปรี้ยวยักษ์

**A STUDY ON THE PRODUCTION OF CHARCOAL BRIQUETTES
FROM THE WASTE MATERIALS OF GIANT TAMARIND PROCESSING**

สรวิศ สอนสารี¹ และ จิตติพร เจาะจง²

¹อาจารย์, สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม
156 หมู่ 5 ตำบลพลายชุมพล อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก 65000,

sorawitsonsaree@psru.ac.th

²อาจารย์, สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม
156 หมู่ 5 ตำบลพลายชุมพล อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก 65000, Titiporn_ant@psru.ac.th

Sorawit Sonsaree¹ and Titiporn Chorchong²

¹Lecturer, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Industrial Technology,
Pibulsongkra Rajabhat University, 156 Village No.5, Plai Chumphon Subdistrict,
Phitsanulok 65000, Thailand, sorawitsonsaree@psru.ac.th

²Lecturer, Department of Physics, Faculty of Science and Technology,
Pibulsongkram Rajabhat University, 156 Village No.5, Plai Chumphon Subdistrict,
Phitsanulok 65000, Thailand, Titiporn_ant@psru.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการผลิตถ่านอัดแท่งจากวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการแปรรูปมะขามเปรี้ยว
ยักษ์ ของกลุ่มวิสาหกิจชุมชนมะขามเปรี้ยวยักษ์ ตำบลวังนกแอ่น อำเภอวังทอง จังหวัดพิษณุโลก
ผลการศึกษาพบว่า อัตราส่วนผสม เปลือก/เมล็ด : แป้งมันสำปะหลัง : น้ำ เท่ากับ 1 : 0.05 : 0.5
เป็นอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมในการอัดแท่ง เนื่องจากเป็นอัตราส่วนที่สามารถขึ้นรูปได้และคงรูป
ได้ดี ภายใต้มาตรฐานทดสอบ ASTM คือ ค่าความร้อน (ASTM D3286) ปริมาณความชื้น (ASTM
D3173) ปริมาณเถ้า (ASTM D3174) และปริมาณสารระเหย (ASTM D3175) เมล็ดมะขามเปรี้ยว
ยักษ์เมื่อนำมาทำเป็นเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งจะให้ค่าความร้อน ปริมาณความชื้น ปริมาณเถ้า และ
ปริมาณสารระเหย เท่ากับ 6,468.14 cal/g, 0.09%, 5.04% และ 91.95% ตามลำดับ เปลือกมะขาม
เปรี้ยวยักษ์เมื่อนำมาทำเป็นเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งจะให้ค่าความร้อน ปริมาณความชื้น ปริมาณเถ้า
และปริมาณสารระเหย เท่ากับ 6,812.73 cal/g, 0.05%, 6.19% และ 84.33% ตามลำดับ และเมื่อ

นำผลการทดสอบมาเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานแสดงให้เห็นว่าสามารถนำเปลือกและเมล็ดมะขามมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงเพื่อใช้งานได้

คำสำคัญ: ถ่านอัดแท่ง, ค่าความร้อน, มาตรฐาน ASTM, มะขามเปรี้ยวยักษ์

ABSTRACT

This research explores the potential of transforming waste materials from the giant tamarind processing industry into valuable charcoal briquettes. The study focuses on the waste generated by the Giant Tamarind Community Enterprise Group in Wang Nok Aen Subdistrict, Wang Thong District, Phitsanulok Province. The study found that a 1 : 0.05 : 0.5 ratio of peel/seed, cassava flour, and water is optimal for compressing blocks, as it allows for good shaping and shape retention. Charcoal briquettes produced from giant tamarind seeds were characterized using ASTM test standards for heat value (D3286), moisture content (D3173), ash content (D3174), and volatile matter content (D3175). The analysis revealed respective values of 6,468.14 cal/g, 0.09%, 5.04%, and 91.95%. In contrast, charcoal briquettes derived from giant tamarind peels, tested under the same ASTM standards, exhibited a heat value of 6,812.73 cal/g, moisture content of 0.05%, ash content of 6.19%, and volatile matter content of 84.33%. These findings, when compared against relevant standard values, demonstrate the viability of both tamarind peels and seeds as biomass fuel sources.

KEYWORDS: Charcoal Briquettes, Heating Value, ASTM Standards, Giant Tamarind

1. บทนำ

การดำเนินงานของมหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม จังหวัดพิษณุโลก มีพันธกิจสำคัญประการหนึ่งคือการเป็นมหาวิทยาลัยเพื่อการพัฒนาท้องถิ่น โดยมีพื้นที่รับผิดชอบ 2 จังหวัด คือ จังหวัดพิษณุโลก และ จังหวัดสุโขทัย ในการดำเนินกิจกรรมต่าง ๆ นั้นในแต่ละปีมหาวิทยาลัยจะได้รับการจัดสรรงบประมาณที่เรียกว่า “งบยุทธศาสตร์เพื่อการพัฒนาท้องถิ่น” โดยในปีงบประมาณ พ.ศ. 2566 คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม ได้ลงพื้นที่บริการวิชาการจังหวัดพิษณุโลก พบว่า ตำบลวังนกแอ่น อำเภอวังทอง จังหวัดพิษณุโลก มีประชาชนประกอบอาชีพเกษตรกรรมโดยการปลูกต้นมะขามเปรี้ยวยักษ์เป็นจำนวนมาก และได้มีการรวมกลุ่มเกษตรกรเป็นวิสาหกิจชุมชน เพื่อแปรรูปผลผลิตทางการเกษตรจากมะขามเปรี้ยวยักษ์ เช่น มะขามเปียก มะขามคูลูก มะขามเปรี้ยวยักษ์แช่อิ่ม และ มะขามเปรี้ยวยักษ์แช่อิ่มอบแห้ง เป็นต้น [1,2] ซึ่งจากกระบวนการดังกล่าวทำให้มีวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเป็นจำนวนมาก ไม่ว่าจะเป็น

เป็นเปลือกมะขามและเมล็ดมะขาม ซึ่งการกำจัดวัสดุเหลือทิ้งดังกล่าวมักจะกำจัดโดยการเผา (เนื่องจากยังไม่ทราบว่าจะเพิ่มมูลค่าจากวัสดุเหลือทิ้งได้อย่างไร) จากกระบวนการนี้เองทำให้เกิดแนวความคิดที่จะเพิ่มมูลค่าวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรจากกระบวนการแปรรูปมะขามเปรี้ยวยักษ์ดังกล่าว

Dangton et al [3] ศึกษาการผลิตถ่านอัดแท่ง กรณีผสมและไม่ผสมแป้งเป็นตัวประสาน และให้ความร้อนและไม่ให้ความร้อนขณะอัดถ่าน จากนั้นวิเคราะห์คุณสมบัติของถ่านอัดแท่ง ประกอบไปด้วย ค่าความร้อน ค่าความชื้น และค่าความหนาแน่น ผลการศึกษาเมื่อผสมแป้งมันสำปะหลังในอัตราส่วน 1:1 และให้ความร้อนกระบอกอัดถ่าน 200 °C พบว่า กรณีผสมแป้งและให้ความร้อนกับกระบอกถ่าน จะมีค่าความร้อน 27 MJ/kg และค่าความชื้นร้อยละ 10.9 โดยน้ำหนัก ส่วนกรณีไม่ผสมแป้งและให้ความร้อน ค่าความร้อนที่ได้มีเท่ากับ 28.4 MJ/kg และมีความชื้นต่ำสุดร้อยละ 8.9 โดยน้ำหนัก Nunkong and Mekkaew [4] นำเปลือกมะพร้าวที่เป็นของเหลือทิ้งจากการเกษตรมาผลิตเป็นถ่านอัดแท่งและใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นวัสดุประสาน พบว่า อัตราส่วนเปลือกมะพร้าวต่อแป้งมัน 55 : 50 เหมาะสมที่สุดเนื่องจากทำให้ลักษณะภายนอกของถ่านมีผิวเรียบ มีสีดำสนิท มีค่าเฉลี่ยความชื้นคิดเป็นร้อยละ 4 เป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนของประเทศไทย ความหนาแน่นเฉลี่ย 0.16 g/cm³ ค่าเฉลี่ยดัชนีการแตกร่วน 0.79 Jumpatam et al [5] ศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมและสมบัติถ่านอัดแท่งจากไม้ไผ่โดยการนำผงถ่านจากไม้ไผ่กับตัวประสาน (แป้งมันสำปะหลัง : น้ำ) มาผสมในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน (ผงถ่าน : แป้งมัน : น้ำ) จากนั้นนำส่วนผสมไปอัดเป็นแท่งโดยใช้เครื่องอัดถ่านแบบเกลียวผลการศึกษาพบว่า ถ่านอัดแท่งอัตราส่วน 10.0 : 1.0 : 3.5 มีประสิทธิภาพการใช้งานมากที่สุด Surin et al [6] ศึกษาอัตราส่วนผสมการผลิตถ่านอัดแท่งและอุณหภูมิสูงสุดของถ่านอัดแท่งจากเศษหน่อไม้เหลือทิ้ง ส่วนผสมจะเป็นอัตราส่วนผสมการผลิตถ่านอัดแท่งจากเศษหน่อไม้เหลือทิ้งร่วมกับผงถ่าน แป้งมันสำปะหลัง และน้ำ โดยใช้กระบวนการอัดขึ้นรูปถ่านด้วยเครื่องอัดแบบเกลียวรูปกรวยและตากแห้งถ่านอัดแท่งจากเศษหน่อไม้เหลือทิ้ง พบว่า อัตราส่วนที่เหมาะสมเศษหน่อไม้ : ผงถ่าน : แป้งมันสำปะหลัง : น้ำ คือ 300 : 2,500 : 500 : 2,500 สามารถทำอุณหภูมิได้สูงสุด 70 °C ช่วงเวลาที่ให้ความร้อนสูงสุด 80 นาที คิดเป็นเวลารวมในการเผาไหม้ 135 นาที Sama et al [7] ทดสอบหาค่าสมบัติทางกายภาพของถ่านอัดแท่งจากผักตบชวา พบว่า อัตราส่วนผสมระหว่างผักตบชวาต่อกะลามะพร้าว 50 : 50 โดยน้ำหนัก เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสม โดยมีค่าความร้อน 5,659.45 cal/g ค่าความหนาแน่น 0.701 g/cm³ ค่าดัชนีการแตกร่วนร้อยละ 0.92 ค่าความชื้นร้อยละ 47 และค่าอัตราการเผาไหม้ 1.21 ชั่วโมง ซึ่งสามารถนำถ่านอัดแท่งนี้ไปประยุกต์ใช้ในการประกอบการต่าง ๆ ที่ใช้ถ่านเป็นเชื้อเพลิงได้ Wilaipon et al [8] ศึกษาอัตราส่วนผสมของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากเศษถ่านจากกระบวนการเผาอิฐมอญ พบว่า อัตราส่วนของผงถ่านร้อยละ 49 น้ำร้อยละ 49 และแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 2 ส่งผลให้ถ่านอัดแท่งให้ความร้อนดีที่สุด 6,726 cal/g (ใช้เวลาในการทำ

ให้น้ำเดือดสั้นที่สุด) จากผลการศึกษางานวิจัยข้างต้นยังพบอีกว่า คุณสมบัติสำคัญ 4 ประการ ที่ควรนำมาเป็นแนวทางการพัฒนาผลิตภัณฑ์ถ่านอัดแท่งสำหรับการบึ่งย่างจากพื้นฐานของคุณค่าที่ส่งมอบให้ลูกค้า คือ ให้ความร้อนนาน ไม่แตกตัว มีกลิ่นหอม และไม่มีสารพิษเจือปน [9]

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า สามารถนำเอาวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาเพิ่มมูลค่าโดยทำถ่านอัดแท่งได้ [10] แต่อย่างไรก็ตามมีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาถึงอัตราส่วนผสมที่มีความเหมาะสมในการทำถ่านอัดแท่ง และค่าความร้อนของเชื้อเพลิงดังกล่าว [8, 11-15] สำหรับงานวิจัยนี้จะเป็นการศึกษาความเป็นไปได้ของการผลิตถ่านอัดแท่งจากวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการแปรรูปมะขามเปรี้ยวยักษ์ ทั้งนี้เพื่อให้ผู้ประกอบการได้ทราบถึงคุณค่าและความเป็นไปได้ในการนำเอาวัสดุเหลือทิ้งดังกล่าวมาพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ถ่านอัดแท่งในกระบวนการผลิต ที่ซึ่งจะช่วยลดของเสียจากกระบวนการผลิตและเพิ่มรายได้ให้กับกลุ่มเกษตรกรได้อีกด้วย โดยในการศึกษาจะเป็นการหาอัตราส่วนผสมในการทำถ่านอัดแท่งที่เหมาะสม การศึกษาหาค่าความร้อน (Heating value) (มาตรฐาน ASTM D3286) ความชื้น (Moisture) (ตามมาตรฐาน ASTM D3173) ปริมาณเถ้า (Ash) (มาตรฐาน ASTM D3174) และปริมาณสารระเหย (Volatile matter) (มาตรฐาน ASTM D3175) ของเปลือกและเมล็ดมะขามเปรี้ยวยักษ์

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ถ่าน คือ ไม้ที่ได้จากกระบวนการเผาไหม้จากการแยกสารอินทรีย์ภายในไม้ในสภาวะจำกัดอากาศ โดยในกระบวนการให้ความร้อน จะช่วยให้สามารถกำจัดน้ำมัน น้ำมันดิน และสารประกอบอื่น ๆ จากไม้ได้ ซึ่งสารประกอบโดยส่วนใหญ่ประกอบด้วย คาร์บอน (80%) สารประกอบไฮโดรคาร์บอน (10-20%) เถ้า (0.5-10%) และแร่ธาตุต่างๆ เช่น กำมะถัน และฟอสฟอรัส [16]

ถ่านอัดแท่ง เป็นการนำแท่งฟืนไม้มาเผาเป็นถ่าน หรือนำวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมาอัดเป็นแท่งเชื้อเพลิง (เชื้อเพลิงเขียว) โดยการอัดแท่งเป็นการใช้แรงกดต่ออนุภาคเล็ก ๆ ทำให้เกิดการอัดแน่นขึ้น ซึ่งการทำเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งประกอบด้วยการใช้แรงดันแก้มวลของอนุภาค อาจมีการใช้ตัวประสานหรือไม่มีการใช้ตัวประสานก็ได้เพื่อให้มวลรวมตัวกันและเกาะกันได้ดี [11]

การทดสอบถ่านอัดแท่ง เป็นการประเมินคุณภาพและองค์ประกอบสำคัญของเชื้อเพลิง โดยจะวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM (American Society for Testing and Materials) [11]

3. วิธีการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการผลิตถ่านอัดแท่งจากวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการแปรรูปมะขามเปรี้ยวยักษ์ โดยวัสดุเหลือทิ้งที่ให้ความสนใจประกอบไปด้วยเมล็ดและเปลือกมะขามเปรี้ยวยักษ์ การศึกษาจะนำวัสดุเหลือทิ้งทั้ง 2 ชนิด มาผลิตเป็นถ่านอัดแท่ง จากนั้นจะดำเนินการวิเคราะห์

คุณสมบัติต่าง ๆ เพื่อจะได้ทราบถึงความเหมาะสมของการนำเอาวัสดุเหลือทิ้งมาใช้ประโยชน์ โดยอุปกรณ์และวิธีการดำเนินงานวิจัยสามารถแสดงได้ดังนี้

3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

(1) เปลือก และ เมล็ดมะขามเปรี้ยวยักษ์ เป็นวัสดุเหลือทิ้งที่เกิดจากกระบวนการแปรรูปมะขามเปรี้ยวยักษ์ของกลุ่มเกษตรกรมะขามเปรี้ยวยักษ์ ตำบลวังนกแอ่น อำเภอวังทอง จังหวัดพิษณุโลก (รูปที่ 1(a) และรูปที่ 1(b))

(2) กาวแบ่งเปียก สำหรับใช้เป็นตัวประสานในการทำถ่านอัดแท่ง

(3) ตะแกรงร่อนขนาด 140 μm ใช้สำหรับร่อนเปลือก และเมล็ดมะขามเปรี้ยวยักษ์ ที่ผ่านการบดก่อนที่จะนำไปทดสอบตามกระบวนการต่าง ๆ (รูปที่ 1(c))

(4) เครื่องอัดแท่งเชื้อเพลิง สามารถอัดแท่งเชื้อเพลิงจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ทำการอัดแท่งด้วยกรรมวิธีอัดเย็น เชื้อเพลิงอัดแท่งจะมีรูปทรงหกเหลี่ยม เส้นผ่านศูนย์กลาง 45 mm มีรูระบายอากาศตรงกลางเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 15 mm ความยาว 70-100 mm (รูปที่ 1(d))

(5) เครื่องบอมม์แคลอริมิเตอร์ (Bomb Calorimeter) ยี่ห้อ IKA รุ่น C5000 มีความแม่นยำในการวิเคราะห์แบบ Adiabatic และ Isoperibol ที่ 0.05%RSD ค่าความร้อนสูงสุดที่สามารถวัดได้ 40,000 Joule หรือ 17,197 BTU/LB และมีความแม่นยำในการวิเคราะห์ $\pm 0.1\%$ ใช้สำหรับตรวจวัดวิเคราะห์ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (รูปที่ 1(e))

(6) ถ้วยครุชชีเบล (Crucible) เป็นภาชนะสำหรับใส่ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการเผา (รูปที่ 1(f))

(7) เตาเผาอุณหภูมิสูง ยี่ห้อ Cabolite รุ่น LEF Series รหัส MF-002 ใช้สำหรับการให้ความร้อน การเผา และการเผาเถ้า (รูปที่ 1(g))

(8) เครื่องชั่งดิจิตอล ยี่ห้อ OHAUS รุ่น PA413 ใช้วัดน้ำหนักของวัสดุทดสอบ (รูปที่ 1(h))

(9) ตู้ดูดความชื้น Desiccator Cabinet แบบใช้ Silica gel Model DE-57 ใช้สำหรับเก็บรักษาวัสดุ/อุปกรณ์ที่ไวต่อความชื้น (รูปที่ 1(i))

(10) เครื่องบด ใช้สำหรับบดเปลือกและเมล็ดมะขามเปรี้ยวยักษ์ (รูปที่ 1(j))



(a) เปลือกมะขาม



(b) เมล็ดมะขาม



(c) ตะแกรงร่อน



(d) เครื่องอัดแท่งเชื้อเพลิง



(e) เครื่องบอมป์แคลอริมิเตอร์



(f) ถ้วยครูชิเบล



(g) เตาเผาอุณหภูมิสูง



(h) เครื่องชั่งน้ำหนัก



(i) ตู้วัดความชื้น



(j) เครื่องบด

รูปที่ 1 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.2 การเตรียมการทดสอบ

(1) เตรียมตัวอย่างเปลือก และเมล็ดมะขามเปรี้ยวยักษ์ ซึ่งจะแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ แบบไม่เผา (แสดงดังรูปที่ 1(a) และ 1(b)) และแบบเผา (แสดงดังรูปที่ 2)

(2) กรณี “ไม่เผาเปลือกและเมล็ดมะขามเปรี้ยวยักษ์” (โดยกระบวนการนี้จะทำให้ทราบว่าเชื้อเพลิงชีวภาพเหมาะกับการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในครัวเรือนได้หรือไม่)

- นำเปลือกและเมล็ดมะขามเปรี้ยวยักษ์บดให้ละเอียด
- นำมาทดสอบสมบัติทางเชื้อเพลิง ประกอบไปด้วย ความร้อน ความชื้น เถ้า และสารระเหย

(3) กรณี “เผาเปลือกและเมล็ดมะขามเปรี้ยวยักษ์”

- นำเปลือกมะขามเปรี้ยวยักษ์เผาให้เป็นถ่านในถัง 200 ลิตร และนำไปบดให้ละเอียด
- นำมาทดสอบสมบัติทางเชื้อเพลิง ประกอบด้วย ความร้อน ความชื้น เถ้า และสารระเหย
- ถ่านที่บดละเอียดจะถูกนำไปทำเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง จากนั้นจะนำไปทดสอบสมบัติทางเชื้อเพลิง

(4) วิเคราะห์ผลการทดสอบ



(a) เปลือก



(b) เมล็ด

รูปที่ 2 ตัวอย่างเปลือกและเมล็ดมะขามเปรี้ยวยักษ์ (เผา)

3.3 การทดสอบตามมาตรฐาน ASTM

3.3.1 การหาค่าความร้อนตามวิธีมาตรฐาน ASTM D3286

- (1) ชั่งน้ำหนักตัวอย่าง 0.5 g
- (2) ทดสอบด้วยเครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์

3.3.2 การหาค่าปริมาณความชื้นตามวิธีมาตรฐาน ASTM D3173

- (1) นำถ้วยครุชชีเบลไปอบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ทิ้งไว้ให้เย็นในตู้ดูดความชื้น จากนั้นชั่งน้ำหนักถ้วยครุชชีเบลพร้อมฝาปิดและบันทึกค่าน้ำหนัก
- (2) ชั่งตัวอย่างประมาณ 1 g ใส่ในถ้วยครุชชีเบลพร้อมฝาปิดบันทึกค่าน้ำหนัก
- (3) อบตัวอย่างในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง แล้วนำไปไว้ในตู้ดูดความชื้นเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำไปชั่งน้ำหนักหลังอบ และคำนวณค่าความชื้นตามสมการ (1)

$$\text{ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)} = \frac{(\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ (g)} - \text{น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ (g)})}{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ (g)}} \times 100 \quad (1)$$

3.3.3 การหาค่าปริมาณเถ้าตามวิธีมาตรฐาน ASTM D3174

- (1) นำถ้วยครุชชีเบลไปอบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ทิ้งไว้ให้เย็นในตู้ดูดความชื้น จากนั้นชั่งถ้วยครุชชีเบลพร้อมฝาปิดและบันทึกน้ำหนัก
- (2) ชั่งน้ำหนักตัวอย่างประมาณ 1 g ใส่ในถ้วยครุชชีเบลพร้อมฝาปิด จากนั้นนำไปชั่งน้ำหนัก
- (3) นำถ้วยครุชชีเบลที่ใส่ตัวอย่างไปเผาที่อุณหภูมิ 750 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง
- (4) นำถ้วยออกจากเตาเผา ทิ้งไว้ให้เย็นในตู้ดูดความชื้นเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำไปชั่งน้ำหนักเพื่อคำนวณปริมาณเถ้าตามสมการ (2)

$$\text{ปริมาณเถ้า (ร้อยละ)} = \frac{(\text{น้ำหนักของเถ้าและถ้วยครุชชีเบล (g)} - \text{น้ำหนักของถ้วยครุชชีเบล (g)})}{\text{น้ำหนักตัวอย่างที่ใช้ (g)}} \times 100 \quad (2)$$

3.3.4 การหาค่าปริมาณสารระเหยตามวิธีมาตรฐาน ASTM D3175

- (1) นำถ้วยครุชชีเบลไปอบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ทิ้งไว้ให้เย็นในตู้ดูดความชื้น จากนั้นชั่งถ้วยครุชชีเบลพร้อมฝาปิดและบันทึกน้ำหนัก
- (2) นำตัวอย่างไปชั่ง 1 g ใส่ในถ้วยครุชชีเบลพร้อมฝาปิด จากนั้นนำไปชั่งน้ำหนัก
- (3) นำถ้วยครุชชีเบลที่ใส่ตัวอย่างไปเผาที่อุณหภูมิ 950 °C เป็นเวลา 7 นาที
- (4) นำถ้วยครุชชีเบลออกจากเตาเผา ทิ้งไว้ให้เย็นในตู้ดูดความชื้นเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำไปชั่งน้ำหนักหลังเผา โดยปริมาณสารระเหย (ร้อยละ) คำนวณได้จากสมการ (3)

$$\text{ปริมาณสารระเหย (ร้อยละ)} = \text{น้ำหนักที่หายไป (ร้อยละ)} - \text{ความชื้น (ร้อยละ)} \quad (3)$$

4. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

การศึกษาการผลิตถ่านอัดแท่งจากวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการแปรรูปมะขามเปรี้ยวยักษ์ มีวัตถุประสงค์เพื่อหาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของวัสดุเหลือทิ้งดังกล่าวที่ซึ่งจะถูกใช้เป็นข้อมูลในการพิจารณาว่ามีความเหมาะสมในการเพิ่มมูลค่าด้วยการนำไปผลิตเป็นถ่านอัดแท่งหรือไม่ ผลการศึกษาสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังนี้

4.1 สมบัติทางเชื้อเพลิงจากเปลือกและเมล็ดมะขามเปรี้ยวยักษ์ (กรณีไม่อัดแท่ง)

จากการทดสอบสมบัติทางเชื้อเพลิงตามมาตรฐาน ASTM ได้แก่ ค่าความร้อน (Heating value) (มาตรฐาน ASTM D3286) ความชื้น (Moisture) (ตามมาตรฐาน ASTM D3173) ปริมาณเถ้า (Ash) (มาตรฐาน ASTM D3174) และปริมาณสารระเหย (Volatile matter) (มาตรฐาน ASTM D3175) สามารถแสดงผลวิจัยได้ดังนี้

4.1.1 กรณีไม่เผา

ผลการทดสอบสมบัติทางเชื้อเพลิงจากเปลือกมะขามเปรี้ยวยักษ์ตามมาตรฐาน ASTM น้ำหนักในการทดลอง 1 g (แสดงดังตารางที่ 1) พบว่า ค่าความร้อนมีค่าเท่ากับ 4,484.98 cal/g ปริมาณความชื้น ปริมาณเถ้า และ ปริมาณสารระเหย เท่ากับ 0.18, 2.42 และ 97.84% ตามลำดับ ผลการทดสอบสมบัติทางเชื้อเพลิงจากเมล็ดมะขามเปรี้ยวยักษ์ตามมาตรฐาน ASTM น้ำหนักในการทดลอง 1 g (แสดงดังตารางที่ 1) พบว่า ค่าความร้อนมีค่าเท่ากับ 4,305 cal/g ปริมาณความชื้น ปริมาณเถ้า และ ปริมาณสารระเหย เท่ากับ 0.18, 2.30 และ 97.22% ตามลำดับ

ตารางที่ 1 สมบัติทางเชื้อเพลิงจากเปลือกและเมล็ดมะขามเปรี้ยวยักษ์ (กรณีไม่เผา)

รายการ	มาตรฐานวิเคราะห์	หน่วย	เปลือก [17]	เมล็ด
ค่าความร้อน (Heating value)	ASTM D 3286	cal/g	4,484.98	4305.33
ปริมาณความชื้น (Moisture)	ASTM D 3173	%	0.18	0.18
ปริมาณเถ้า (Ash)	ASTM D 3174	%	2.42	2.30
ปริมาณสารระเหย (Volatile matter)	ASTM D 3175	%	97.84	97.22

จากการทดสอบสมบัติทางเชื้อเพลิงจากเปลือกมะขามและเมล็ดมะขามเปรี้ยวยักษ์ (กรณีไม่เผา) ที่อัตราส่วน 1 g เท่ากัน พบว่า (1) ค่าความร้อนของเปลือกมะขาม (4,484.98 cal/g) มากกว่าค่าความร้อนของเมล็ดมะขาม (4,305.33 cal/g) เนื่องจากเปลือกมะขามมีความสามารถเผาไหม้ได้ดีกว่าเมล็ดมะขาม (เถ้าของเปลือกมะขามเหลือน้อยกว่าเมล็ดมะขาม) (2) ค่าความชื้นของ

เปลือกมะขามและเมล็ดมะขามมีค่าความชื้นที่เท่ากัน (3) ค่าปริมาณสารระเหยของเปลือกและเมล็ดมะขามเปรี้ยวยักษ์ พบว่า ปริมาณสารระเหยของเชื้อเพลิงจากเปลือกมะขามและเมล็ดมะขามมีค่าที่สูง เนื่องจากเปลือกมะขามและเมล็ดมะขามมีองค์ประกอบทางเคมี เมื่อเกิดการเผาไหม้จะปลดปล่อยสารระเหยออกมาอยู่ในสถานะก๊าซ ซึ่งปริมาณสารระเหยจะมีผลต่อค่าความร้อนเมื่อเชื้อเพลิงที่มีปริมาณสารระเหยสูงจะทำให้ค่าความร้อนที่ได้สูงขึ้นและปริมาณสารระเหยของเชื้อเพลิงจากเปลือกมะขามและเมล็ดมะขามก็สูงถึง 97.84 และ 97.22% ตามลำดับ จึงมีความเหมาะสมที่จะนำมาผลิตถ่านอัดแท่ง (4) ปริมาณเถ้า จากการทดลองพบว่า ปริมาณเถ้าของเชื้อเพลิงจากเปลือกและเมล็ดมะขามผ่านเกณฑ์มาตรฐานคุณสมบัติของเสียที่สามารถนำมาแปรรูปเป็นแท่งเชื้อเพลิง ซึ่งตามมาตรฐานกำหนดปริมาณเถ้าไม่ควรสูงกว่า 20% เมื่อเทียบกับผลการศึกษาปริมาณเถ้าที่ได้ของเชื้อเพลิงเปลือกมะขามและเมล็ดมะขาม 2.42 และ 2.30% ตามลำดับ ดังนั้นเมื่อปริมาณเถ้าต่ำจึงเหมาะสำหรับนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่ง

4.1.2 กรณีเผา

ผลการทดสอบสมบัติทางเชื้อเพลิงจากเปลือกมะขามเปรี้ยวยักษ์ตามมาตรฐาน ASTM น้ำหนักในการทดลอง 1 g (แสดงดังตารางที่ 2) พบว่า ค่าความร้อนมีค่าเท่ากับ 6,737.98 cal/g ปริมาณความชื้น ปริมาณเถ้า และ ปริมาณสารระเหย เท่ากับ 0.14, 7.74 และ 83.90% ตามลำดับ ผลการทดสอบสมบัติทางเชื้อเพลิงจากเมล็ดมะขามเปรี้ยวยักษ์ตามมาตรฐาน ASTM น้ำหนักในการทดลอง 1 g (แสดงดังตารางที่ 2) พบว่า ค่าความร้อนมีค่าเท่ากับ 6,328.36 cal/g ปริมาณความชื้น ปริมาณเถ้า และ ปริมาณสารระเหย เท่ากับ 0.10, 5.26 และ 93.59% ตามลำดับ

ตารางที่ 2 สมบัติทางเชื้อเพลิงจากเปลือกและเมล็ดมะขามเปรี้ยวยักษ์ (กรณีเผา)

รายการ	มาตรฐานวิเคราะห์	หน่วย	เปลือก [17]	เมล็ด
ค่าความร้อน (Heating value)	ASTM D 3286	cal/g	6,737.98	6,328.36
ปริมาณความชื้น (Moisture)	ASTM D 3173	%	0.14	0.10
ปริมาณเถ้า (Ash)	ASTM D 3174	%	7.74	5.26
ปริมาณสารระเหย (Volatile matter)	ASTM D 3175	%	83.90	93.59

จากผลการศึกษาเปรียบเทียบค่าความร้อน ปริมาณความชื้น ปริมาณเถ้า และ ปริมาณสารระเหยของเชื้อเพลิงถ่านจากเปลือกและเมล็ดมะขามเปรี้ยวยักษ์ (กรณีเผา) พบว่า (ก) เชื้อเพลิงถ่านจากเปลือกและเมล็ดมะขามมีค่าความร้อนสูงกว่าค่าความร้อนตามมาตรฐาน (ต้องไม่น้อยกว่า 5,000 cal/g) คือ 6,737.98 และ 6,328.36 cal/g ตามลำดับ ดังนั้นค่าความร้อนที่ได้แสดงให้เห็นว่า

เชื้อเพลิงดังกล่าวเหมาะสมที่จะนำไปผลิตถ่านอัดแท่ง (ข) ค่าความชื้นของเชื้อเพลิงถ่านจากเปลือกและเมล็ดมะขามมีค่าความชื้นน้อยกว่าค่าความชื้นตามมาตรฐาน (ASTM E 3173) (ต้องไม่เกินร้อยละ 10) คือ 0.14 และ 0.10% ตามลำดับ ดังนั้นค่าความชื้นที่ได้แสดงให้เห็นว่าเชื้อเพลิงดังกล่าวเหมาะสมที่จะนำไปผลิตถ่านอัดแท่ง (ค) ปริมาณสารระเหยจะมีผลต่อค่าความร้อนโดยเชื้อเพลิงที่มีปริมาณสารระเหยสูงจะทำให้ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงที่ได้สูง ซึ่งจากผลการศึกษาข้างต้นปริมาณสารระเหยของเชื้อเพลิงถ่านจากเปลือกมะขาม (93.59%) มีค่าสูงกว่าปริมาณสารระเหยของเชื้อเพลิงถ่านจากเปลือกมะขาม (83.90%) และทั้งสองวัสดุมีความเหมาะสมที่จะนำไปผลิตถ่านอัดแท่ง (ง) ปริมาณเถ้าตามมาตรฐานกำหนดปริมาณเถ้าไม่ควรสูงกว่า 20% ซึ่งจากผลการศึกษาข้างต้นเชื้อเพลิงถ่านจากเปลือกและเมล็ดมะขามมีปริมาณเถ้าเท่ากับ 7.74 และ 5.26% ตามลำดับ ดังนั้นทั้งสองวัสดุเหมาะสำหรับนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่ง

4.2 สมบัติทางเชื้อเพลิงจากเปลือกและเมล็ดมะขามเปรี้ยวยักษ์ (แบบอัดแท่งเผา)

การผลิตเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งจากเปลือกมะขามและเมล็ดมะขามเปรี้ยวยักษ์ที่ใช้กาวแบ่งเปียกเป็นตัวประสาน อัดแท่งด้วยวิธีอัดแบบเย็น พบว่า อัตราส่วนผสม (เปลือก/เมล็ด : แบ่ง : น้ำ) ที่ 1 : 1 : 1 และ 1 : 1 : 0.5 ไม่สามารถขึ้นรูปได้เนื่องจากอัตราส่วนผสมดังกล่าวมีกาวแบ่งเปียกเยอะเกินไป จึงทำให้เครื่องอัดถ่านไม่สามารถผลิตถ่านได้ เนื่องจากมีถ่านติดไม่สามารถออกจากเกลียวได้ อัตราส่วนผสม 1 : 0.05 : 0.5 เป็นอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมในการอัดแท่ง เนื่องจากเป็นอัตราส่วนที่สามารถขึ้นรูปได้และคงรูปได้ดี ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า เมื่ออัตราส่วนตัวประสานลดลงจะทำให้ไม่สามารถอัดแท่งเชื้อเพลิงและเชื้อเพลิงไม่สามารถคงรูปได้ แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนตัวประสานมากขึ้นจะทำให้เครื่องอัดถ่านไม่สามารถทำงานได้เนื่องจากตัวประสานมากเกินไปจึงทำให้เกลียวของเครื่องอัดถ่านติด และยังส่งผลต่อสมบัติทางเชื้อเพลิงทำให้มีปริมาณความชื้นที่สูงขึ้น และส่งผลให้ค่าความร้อนต่ำลง โดยลักษณะเชื้อเพลิงของเปลือกและเมล็ดมะขามเปรี้ยวยักษ์อัดแท่ง มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกแสดงดังรูปที่ 3

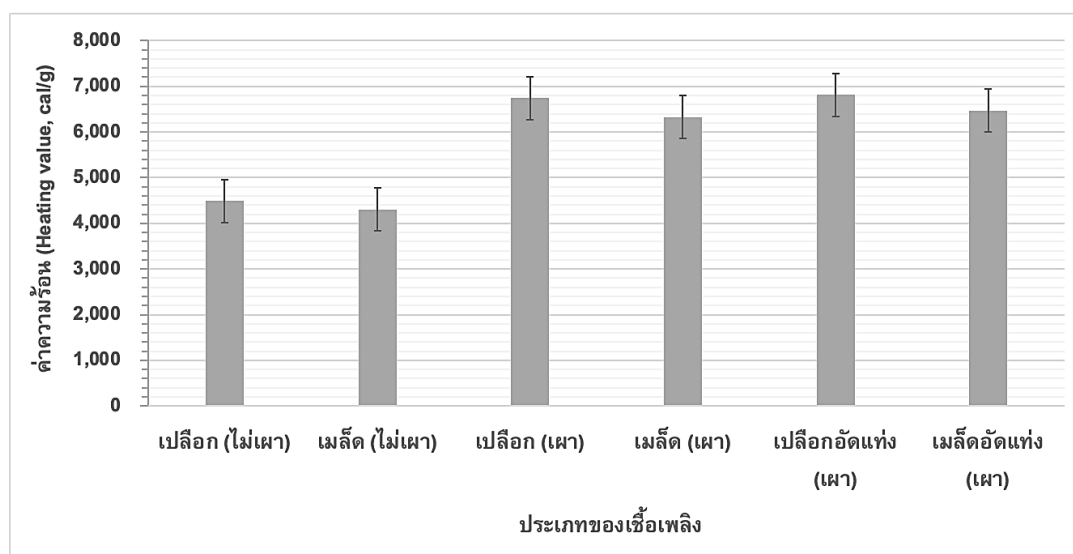


รูปที่ 3 เชื้อเพลิงของเปลือกและเมล็ดมะขามเปรี้ยวยักษ์อัดแท่ง

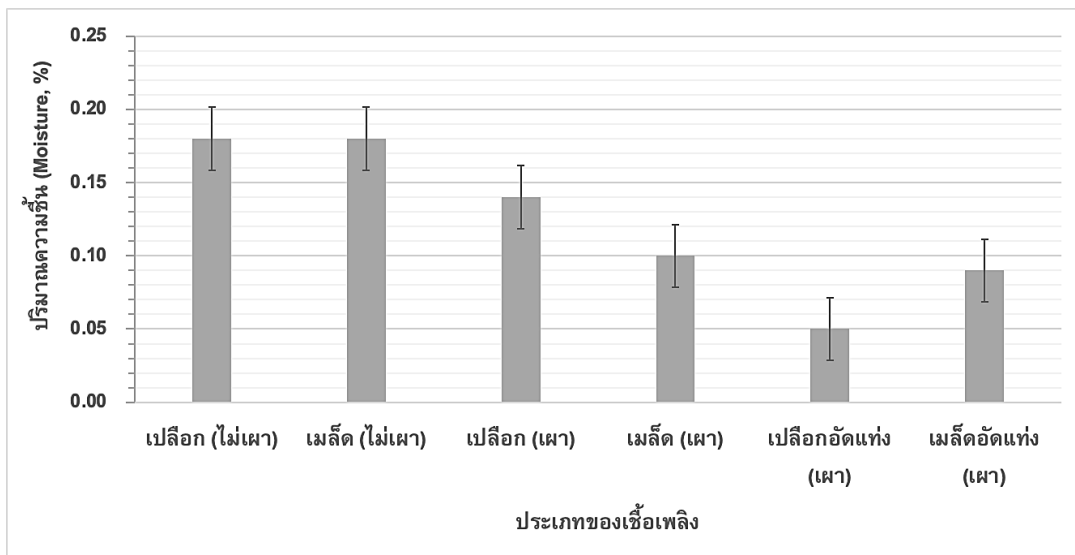
ผลการทดสอบสมบัติทางเชื้อเพลิงจากเปลือกมะขามเปรี้ยวยักษ์ตามมาตรฐาน ASTM น้ำหนักในการทดลอง 1 g (แสดงดังตารางที่ 3) พบว่า ค่าความร้อนมีค่าเท่ากับ 6,812.73 cal/g ปริมาณความชื้น ปริมาณเถ้า และ ปริมาณสารระเหย เท่ากับ 0.05, 6.19 และ 84.33% ตามลำดับ ผลการทดสอบสมบัติทางเชื้อเพลิงจากเมล็ดมะขามเปรี้ยวยักษ์ตามมาตรฐาน ASTM น้ำหนักในการทดลอง 1 g (แสดงดังตารางที่ 3) พบว่า ค่าความร้อนมีค่าเท่ากับ 6,468.14 cal/g ปริมาณความชื้น ปริมาณเถ้า และปริมาณสารระเหย เท่ากับ 0.09, 5.04 และ 91.95% โดยผลการศึกษายังสามารถนำมาแสดงผลเปรียบเทียบได้ดังรูปที่ 4 ถึงรูปที่ 7

ตารางที่ 3 สมบัติทางเชื้อเพลิงจากเปลือกและเมล็ดมะขามเปรี้ยวยักษ์ (กรณีแบบอัดแห้ง เผา)

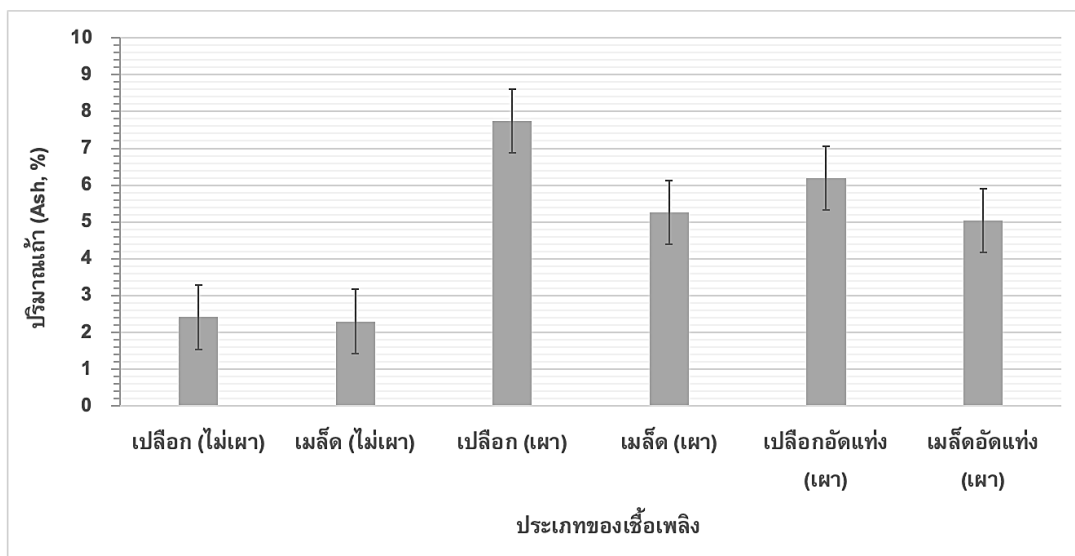
รายการ	มาตรฐานวิเคราะห์	หน่วย	เปลือก [17]	เมล็ด
ค่าความร้อน (Heating value)	ASTM D 3286	cal/g	6,812.73	6,468.14
ปริมาณความชื้น (Moisture)	ASTM D 3173	%	0.05	0.09
ปริมาณเถ้า (Ash)	ASTM D 3174	%	6.19	5.04
ปริมาณสารระเหย (Volatile matter)	ASTM D 3175	%	84.33	91.95



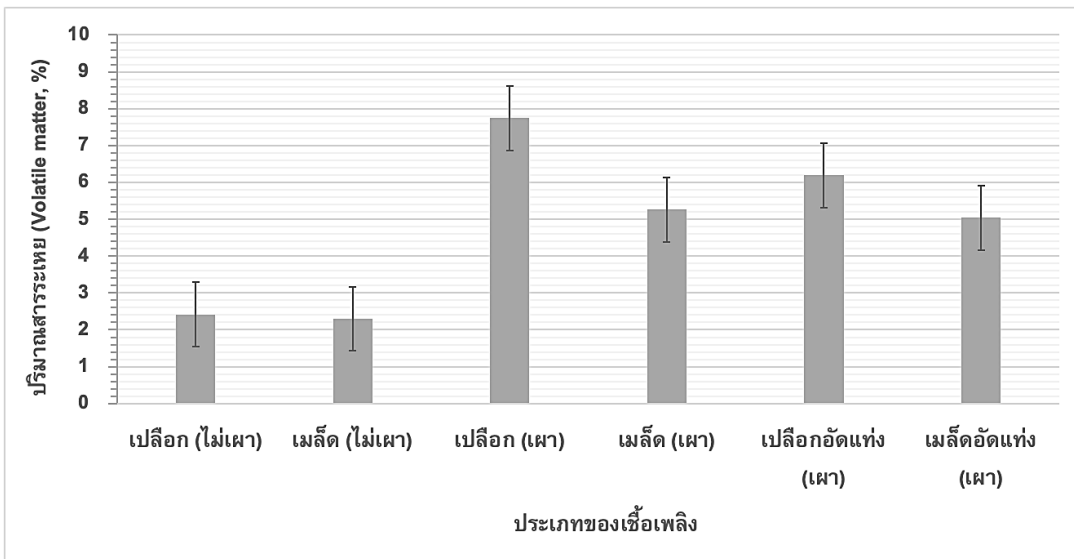
รูปที่ 4 ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (cal/g)



รูปที่ 5 ปริมาณความชื้นของเชื้อเพลิง (%)



รูปที่ 6 ปริมาณเถ้าของเชื้อเพลิง (%)



รูปที่ 7 ปริมาณสารระเหยของเชื้อเพลิง (%)

จากรูปที่ 4 ถึงรูปที่ 7 เมื่อนำผลการศึกษามาเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน (แสดงดังตารางที่ 4) พบว่า (1) เชื้อเพลิงถ่านจากเปลือกและเมล็ดมะขามมีค่าความร้อนสูงกว่าค่าความร้อนตามมาตรฐาน (ASTM D 3286) (ต้องไม่น้อยกว่า 5,000 cal/g) คือ 6,812.73 และ 6,468.14 cal/g ตามลำดับ และเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าความร้อนของถ่านชนิดอื่น พบว่า มีค่าความร้อนสูงกว่าถ่านอัดแท่งจากต้นถั่วเหลือง ที่มีค่าประมาณ 5,087 cal/g [18] และถ่านอัดแท่งจากกะลามะพร้าวที่ผสมกับเหง้ามันสำปะหลัง ที่มีค่าระหว่าง 4,514–6,588 cal/g [19] ดังนั้นค่าความร้อนที่ได้แสดงให้เห็นว่าเชื้อเพลิงดังกล่าวเหมาะสมที่จะนำไปผลิตถ่านอัดแท่ง (2) ค่าความชื้นของเชื้อเพลิงถ่านจากเปลือกมะขามและเมล็ดมะขามมีค่าความชื้นน้อยกว่าค่าความชื้นตามมาตรฐาน (ASTM D 3173) (ต้องไม่เกินร้อยละ 10) คือ 0.05 และ 0.09% ตามลำดับ ดังนั้นค่าความชื้นที่ได้แสดงให้เห็นว่าเชื้อเพลิงดังกล่าวเหมาะสมที่จะนำไปผลิตถ่านอัดแท่ง (และมีค่าผ่านมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนของถ่านอัดแท่งที่กำหนดว่าปริมาณความชื้นไม่เกิน 8% [20] ทั้งนี้เนื่องจากความชื้นมีผลโดยตรงต่อค่าความร้อน การเกิดเชื้อรา ประกอบกับหากแท่งเชื้อเพลิงมีความชื้นมาก จะทำให้การสูญเสียความร้อนไปกับการระเหยในระหว่างการเผาไหม้ ส่งผลให้ค่าความร้อนที่ได้ลดต่ำลง [21]) (3) ปริมาณสารระเหยจะมีผลต่อค่าความร้อนโดยเชื้อเพลิงที่มีปริมาณสารระเหยสูง จะทำให้ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงที่ได้สูง ซึ่งจากผลการศึกษาข้างต้นปริมาณสารระเหยของเชื้อเพลิงถ่านจากเมล็ดมะขาม (91.95%) มีค่าสูงกว่าปริมาณสารระเหยของเชื้อเพลิงถ่านจากเปลือกมะขาม (84.33%) และทั้งสองวัสดุมีความเหมาะสมที่จะนำไปผลิตถ่านอัดแท่ง (4) ปริมาณเถ้าตามมาตรฐานกำหนดปริมาณเถ้าไม่ควรสูงกว่า 20% ซึ่งจากผลการศึกษาข้างต้นเชื้อเพลิงถ่านจากเปลือกและเมล็ดมะขามมีปริมาณ

เท่ากับ 6.19 และ 5.04% ตามลำดับ ดังแสดงให้เห็นว่าทั้งสองวัสดุเหมาะสำหรับนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่ง

ตารางที่ 4 ค่าความร้อน ความชื้น ปริมาณเถ้า และ ปริมาณสารระเหย เปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน [22]

รายการ ค่ามาตรฐาน	ค่ามาตรฐาน		หน่วย
	แบบไม่เผา	แบบเผา	
ค่าความร้อน (Heating value)	>3,000	>5,000	cal/g
ปริมาณความชื้น (Moisture)	20	8	%
ปริมาณเถ้า (Ash)	25	10	%
ปริมาณสารระเหย (Volatile matter)	ควรมีค่าสูง	ควรมีค่าสูง	%

5. สรุปผลการศึกษา

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการผลิตถ่านอัดแท่งจากวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการแปรรูปมะขามเปรี้ยวยักษ์ โดยผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

(1) ผลการศึกษาสมบัติทางเชื้อเพลิงจากเปลือกและเมล็ดมะขามเปรี้ยวยักษ์ พบว่า เปลือกมะขามเปรี้ยวยักษ์เมื่อนำมาทำเป็นเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งจะให้ค่าความร้อนที่สูงกว่าเมล็ดมะขามเปรี้ยวยักษ์ โดยมีค่าความร้อนเท่ากับ 6,812.73 และ 6,468.14 cal/g ตามลำดับ

(2) เมื่อพิจารณา ปริมาณความชื้น ปริมาณเถ้า และปริมาณสารระเหย พบว่า เปลือกและเมล็ดมะขามเปรี้ยวยักษ์มีผลการทดสอบอยู่ภายใต้มาตรฐานการทดสอบของ ASTM หรืออาจกล่าวได้ว่า สามารถนำเปลือกและเมล็ดมะขามมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงเพื่อใช้งานได้

(3) อัตราส่วนผสม เปลือก/เมล็ด : แบริ่งมันสำปะหลัง : น้ำ เท่ากับ 1 : 0.05 : 0.5 เป็นอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมในการอัดแท่ง เนื่องจากเป็นอัตราส่วนที่สามารถขึ้นรูปได้และคงรูปได้ดี ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า เมื่ออัตราส่วนตัวประสานลดลงจะทำให้ไม่สามารถอัดแท่งเชื้อเพลิงและเชื้อเพลิงไม่สามารถคงรูปได้ แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนตัวประสานมากขึ้นจะทำให้เครื่องอัดถ่านไม่สามารถทำงานได้เนื่องจากตัวประสานมากเกินไปจึงทำให้เกิดยวบยิต และยังส่งผลต่อสมบัติทางเชื้อเพลิงทำให้มีปริมาณความชื้นที่สูงขึ้น และส่งผลให้ค่าความร้อนต่ำลง

(4) กลุ่มเกษตรกรสามารถนำวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการแปรรูปมะขามเปรี้ยวยักษ์มาเพิ่มมูลค่าโดยการทำเป็นเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งได้ ซึ่งนอกจากจะเป็นการลดของเสียระหว่างกระบวนการผลิตแล้ว ยังสามารถเพิ่มรายได้ให้กับกลุ่มเกษตรกรได้อีกด้วย แต่อย่างไรก็ตามควรศึกษาผลการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ในการผลิตถ่านอัดแท่ง ประกอบกับควรมี

การศึกษางานวิจัยต่าง ๆ เพิ่มเติม เพื่อศึกษาถึงคุณสมบัติของเมล็ดมะขามเปรี้ยวยักษ์ เพื่อนำมาใช้เป็นตัวประสานแทนแป้ง (กาวแป้งเปียก)

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม และ สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัยนี้

References

- [1] Sonsaree S, Boonthum E, Kaewcharoen E, Jaiton W, Lephon W, Wongsiriwittaya M. Solving poverty through academic service solar drying machine: giant sour tamarind farmers group Phitsanulok province. RMUTL Journal Socially of Engaged Scholarship 2019;3(2):33-41. (In Thai)
- [2] Sonsaree S, Boonthum E, Kaewcharoen E, Lephon W, Wongsiriwittaya M, On-ai K, et al. The increased benefit of the giant sour tamarind farmers group in Phitsanulok province by solar dryers. Industrial Technology and Engineering Pibulsongkram Rajabhat University Journal 2021;3(2):93-103. (In Thai)
- [3] Dangton W, Wongniyom A, Premprayoon K, Jeepetch V, Thongyothee S. Effects of starch and heat on the characteristics and properties of charcoal briquettes. Journal of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University 2023;1(2):1-7. (In Thai)
- [4] Nunkong W, Mekkaew K. Charcoal briquettes from coconut coir. Academic Journal of Science and Technology, Dhonburi Rajabhat University 2023;1(1):1-11. (In Thai)
- [5] Jumpatam J, Laorach L, Arayangkun P, Arayangkun S. Study of the optimal ratios and properties of charcoal briquettes from Bamboo. Agriculture and Technology Journal 2022;3(3):81-93. (In Thai)
- [6] Surin P, Tumjinda C, Komkirin N, Chaliew A. The production of charcoal briquettes from waste bamboo shoots. Vacation Education Innovation and Research Journal 2021;5(2):13-20. (In Thai)
- [7] Sama A, Lenu N, Jarawae R. The development of briquette from water hyacinth. Proceedings of the National Conference on Science and Social Sciences, Nakhon Si Thammarat Rajabhat University; 2017 Feb 13-14; Nakhon Si Thammarat. p. 187-96. (In Thai)

- [8] Wilaipon P, Chareonsawan P, Srihawong N, Menkoed C, Prakobkasikorn P, Kumboon P. Briquette ratio investigation of charcoal briquette produced from brick-burning-process residual charcoal. RMUTL Engineering Journal 2019;4(1):43-50. (In Thai)
- [9] Sookcharoen W, Srasrisom K, Timdang P. The guidelines for development of charcoal briquettes based on the customer value proposition. Journal of Srivanalai vijai Humanities & Social Sciences 2023;13(1):1-13. (In Thai)
- [10] Susanto A, Yanto T. Biocharcoal briquettes from oil palm shells and empty fruit bunches. Jurnal Teknologi Hasil Pertanian 2013;6(2):68-81.
- [11] Wachaisi A, Sriporaya K, Promcham W, Nuchuay P, Sangchaisri S, Seawsakul K, et al. Charcoal briquette production process from industrial waste charcoal. Science Journal, Chandrakasem Rajabhat University 2022;32(2); 87-94. (In Thai)
- [12] Madmanang R, Jijai S, Muadchim M, Pradabphetrat P, Kaewmanee J, Yamirudeng K. The utilization of durian peels and spent coffee grounds to produce briquette charcoal. Srinakharinwirot University Journal of Sciences and Technology 2023;15(29):249766. (In Thai)
- [13] Yoddamnern T, Yotwinyuwong S. Development of charcoal briquette from the cane leaves and the bagasse to community enterprise. Journal of Energy and Environment Technology of Graduate School Siam Technology College 2020;7(2):12-24. (In Thai)
- [14] Boonchom K, Chaisompan N. Study of charcoal briquette from longan wood. Naresuan Phayao Journal 2020;13(2):51-6. (In Thai)
- [15] Jirawongnusun S, Charoensuk C. The study on the production of charcoal briquettes from pomelo peels. Kasem Bundit Engineering Journal 2022;12(1):55-74. (In Thai)
- [16] 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)
- [17] Sonsaree S, Chorchong T. Thermal performance of agricultural waste materials: A case study of giant tamarind peels. Proceeding of the 17th Thailand Renewable Energy for Community Conference; 2024 Oct 28–30; Chiang Mai. p. 26-32. (In Thai)
- [18] Puthikitakawiwonga T, Wiangnon J, Sriboonsom P. Production of biocoal from soybean stalk. Naresuan University Journal 2006;14(3):11-8. (In Thai)

- [19] Phutteesakul R, Suwakantakul A, Kucharrat A. The production of charcoal briquette by coconut shell and cassava rhizome. Journal of Industrial Education, Srinakharinwirot University 2010;4(2):18-28. (In Thai)
- [20] Wirunphan K, Saiplean T, Jaichompoo P. Production of compressed charcoal fuel from the waste materials collected after processing Khao-Larm. RMUTL Engineering Journal 2017;2(1):1-15. (In Thai)
- [21] Department of Industrial Works. Guidelines and qualification criteria of wastes for processing into fuel rods and interlocking blocks. Bangkok: Department of Industrial Works; 2012. (In Thai)
- [22] Anantanukulwong R, Chemae R, Sareanu N. Production of charcoal from agricultural residues. YRU Journal of Science and Technology 2019;4(1):47-53. (In Thai)

ประวัติผู้เขียนบทความ



ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรวิศ สอนสารี สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม 156 หมู่ 5 ตำบลพลายชุมพล อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก 65000 email: sorawitsonsaree@psru.ac.th ปัจจุบันสนใจงานวิจัยทางด้านพลังงานทดแทน แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และการเขียนโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์



ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิตติพร เจาะจง สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม 156 หมู่ 5 ตำบลพลายชุมพล อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก 65000 email: Titiporn_ant@psru.ac.th ปัจจุบันสนใจงานวิจัยทางด้านพลังงานทดแทน การจัดการด้านพลังงาน ฟิสิกส์ พลังงานทดแทน

Article History:

Received: April 5, 2025

Revised: August 8, 2025

Accepted: August 13, 2025

MIXED-INTEGER LINEAR PROGRAMMING MODEL FOR PRODUCTION PLANNING AND LABOR ALLOCATION IN THE MELON FARM

Aekachai Pantong¹ and Sirikarn Chansombut²

¹Ph.D. Student, Faculty of Logistics and Digital Supply Chain, Naresuan University,
Thapo Sub-district, Muang District, Phitsanulok, 65000, Thailand, aekachaip65@nu.ac.th

²Lecturer, Faculty of Logistics and Digital Supply Chain, Naresuan University,
Thapo Sub-district, Muang District, Phitsanulok, 65000, Thailand, sirikarnc@nu.ac.th

ABSTRACT

This research investigates the optimization of the melon supply chain, aiming to minimize production costs through the development of a mixed-integer linear programming (MILP) model. The framework addresses key inefficiencies in current practices, such as suboptimal cultivation scheduling, inefficient labor allocation, and excessive reliance on outsourced workers, by integrating critical decision variables, including planting schedules, harvesting timelines, and workforce planning. The proposed model enables systematic and data-driven management of greenhouse farming operations. Computational experiments using Premium Solver V2023 demonstrate the model's practical effectiveness, achieving a total production cost of 134,400 THB, which represents a 10.16% reduction compared to manual planning, while maintaining production efficiency. These results highlight the potential of mathematical optimization in supporting sustainable agricultural practices and enhancing decision-making processes. Ultimately, the framework functions as a valuable decision-support tool for both farmers and agribusiness managers in optimizing resource allocation and production.

KEYWORDS: Melon Supply Chain, Production planning, Labor allocation, MILP

1. Introduction

Melon (*Cucumis melo*), a fruit classified within the same botanical group as cantaloupe, is celebrated for its sweet flavor and distinctive aromatic profile. These attributes have significantly contributed to its widespread popularity in Thailand. Recent data indicates that the total area dedicated to melon cultivation in Thailand is approximately 1,761.28 rai (1 rai = 0.395 acres) [1]. The feasibility of melon cultivation across multiple provinces is largely

attributed to the adoption of closed greenhouse systems by farmers. These systems enable precise control over environmental conditions and production variables, thereby enhancing both yield and product quality.

This research uses data from the Community Enterprise of the Melon Farmers' Group in Ban Nongkang, Chang Ngam Subdistrict, Nong Ya Sai District, Suphan Buri Province. The melon production process involves several critical stages, including strategic planning, cultivation, harvesting, raw material procurement, and labor resource allocation. Labor inputs are sourced from a combination of in-house farm labor and external contracted labor, which can be flexibly deployed across all stages of production. The labor allocation problem in melon farms arises from a shortage of labor during the harvest period, as the melon harvesting season coincides with the harvest seasons of other agricultural crops that also require external contract labor, leading to competition for limited labor resources. Given the interdependence of these stages, effective planning is essential to ensure operational efficiency. Inefficient planning can result in increased operational costs and reduced overall productivity, highlighting the need for a systematic approach to production management.

The application of the mixed-integer linear programming (MILP) model represents a significant advancement in agricultural supply chain optimization. It provides a structured methodology for addressing challenges related to resource allocation, seasonal variability, and time-sensitive operations. Furthermore, the model serves as a decision-support tool, enabling farmers and producers to make informed decisions that enhance both economic and operational outcomes.

This research applies supply chain management principles to address the complexities inherent in melon production planning. Specifically, a MILP model is proposed to optimize the entire production process. Using real-world data from the case study group, the model integrates key activities such as seed procurement, planting, harvesting, and labor resource allocation at each stage of production. By consolidating these processes into a unified framework, the model aims to minimize total operating costs while ensuring that melon production aligns with customer demand.

2. Related work

Supply chain management (SCM) is a strategic framework that helps coordinate and collaborate between different parts of the supply chain network. It encompasses the

movement of raw materials, information, and financial resources, with the primary goal of meeting customer demand while improving the overall efficiency of the supply chain [2]. Among the tools used in SCM, mathematical models have become key instruments for solving complex optimization problems. These models have gained significant attention in academic research because they provide structured solutions to complex challenges, especially in agricultural food production planning [3].

In agricultural food production planning, mathematical models have been successfully applied to improve raw material procurement and production processes. For example, in the walnut processing industry [4], integrated planning frameworks have been developed to align raw material procurement with production schedules, ensuring that products meet customer demands effectively. Models have been applied to solve labor allocation problems. For example, Wishon [5] developed an optimization model for a farm's growing and labor acquisition schedules. Similarly, harvest planning has been widely studied in industries with time-sensitive operations. Sugarcane harvesting, for instance, has been analyzed to meet the needs of the sugar manufacturing sector [6]. Since sugarcane has a limited harvesting window, good planning is crucial to reduce operational costs and maximize yield. Similarly, apple harvesting [7] has been explored to meet year-round customer demand, thereby ensuring a steady supply of fresh produce. Effective harvest planning not only cuts costs but also improves the responsiveness and efficiency of the supply chain. A comprehensive review by Soto-Silva [8] highlights the growing trend of using mathematical models to address challenges in agricultural supply chains. The findings show the increasing importance of these models in improving operational efficiency and enhancing sustainability in agriculture.

This research aims to develop a MILP model as a decision-support tool for optimizing melon production planning. The model integrates key processes across the entire supply chain, including melon seed procurement, cultivation, harvesting, and labor allocation in melon farming. By combining these processes into a single framework, the model uses real-world data and seeks to align melon production with customer demand while minimizing total operational costs. Its primary objective is to reduce costs related to resource utilization, labor allocation, and logistics, thereby improving the overall efficiency of the supply chain.

3. Problem description

The melon production planning process is intricate, requiring the involvement of multiple stakeholders across various stages, including seed sourcing, cultivation, crop maintenance, and harvesting. The general flow diagram of the melon production process is shown in Figure 1, and the steps involved in the process are described below.

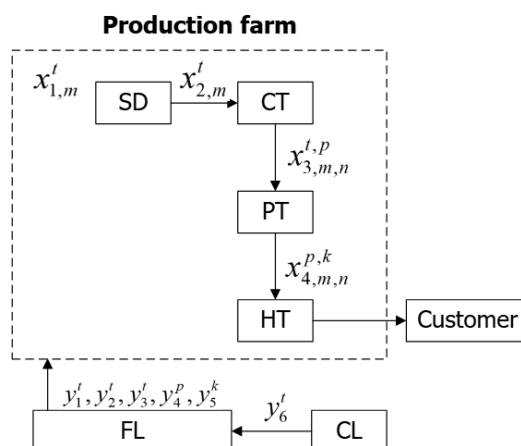


Figure 1 The Production Process for Melons on a Farm

The melon cultivation process begins with the procurement of high-quality melon seeds from suppliers ($x_{1,m}^t$). Farmers germinate melon seeds in seedling trays (SD), achieving a germination rate of approximately 95%. Once the seedlings reach 10 days of age ($x_{2,m}^t$), they are transplanted into growing beds during the Cultivating stage (CT), within a controlled greenhouse environment. Ten days after transplantation, farmers prune the branches and leaves of the melon plants to ensure healthy growth and optimize resource allocation.

Thirty days after pruning, the melon plants enter the flowering stage and become ready for pollination ($x_{3,m,n}^{t,p}$). The pollination process (PT) typically spans about 3 days. After successful pollination, melon plants that have reached at least 75 days of age ($x_{4,m,n}^{p,k}$) are considered mature and ready for harvest (HT). The optimal harvesting window is within 5 days to ensure peak quality and freshness. To meet customer expectations, the melons must be harvested at least one day before delivery.

The entire process, starting from the initial germination of melon seeds through to the final harvesting of mature melons, necessitates the active involvement of both internal farm

labor (FL) ($y_1^t, y_2^t, y_3^t, y_4^p, y_5^k$) and externally contracted labor (CL) (y_6^t). Given the multifaceted constraints inherent in melon production planning, such as resource limitations, labor availability, and environmental uncertainties, meticulous scheduling of planting, harvesting, and labor allocation becomes critical to ensuring operational efficiency and maximizing resource utilization.

4. Mathematical model

The model was formulated as a MILP problem, as described below. It comprises several key components: indices and sets, decision variables, parameters, constraints, and an objective function. Each of these components is crucial for defining the problem and ensuring efficient optimization.

4.1 Model assumptions

This research utilized data collected from the community enterprise of melon growers in Ban Nong Khang, Suphan Buri Province, Thailand, as a case study. The development of the model was guided by the following assumptions:

- 1) The time horizon considered in this study is one year (365 days), with the problem-solving process starting on the first day of January ($t = 1$).
- 2) It is specified that melon seedling cultivation requires 10 days, pollination occurs when the plants reach 30 to 32 days of age after greenhouse planting, and harvesting takes place when the plants are between 75 and 80 days old.
- 3) Each greenhouse can be harvested only once during each harvesting season.
- 4) At the commencement of the calculation, no Work in Process (WIP) inventory exists in any process.

4.2 Mathematical Notation

The details of the mathematical model are presented in Table 1.

Table 1 Mathematical Notation Used in the Model

Indices and sets	
$t \in T$ set of cultivating periods	$m \in M$ set of a group of melon farmers
$p \in P$ set of pollinating periods	$n \in N$ set of a group of melon greenhouses
$k \in K$ set of harvesting periods	
Parameters	
RaT_1 germination rate of melon seeds	CoT_1 cost of seeds
RaT_2 worker rate in the seedlings sector	CoT_2 cost of seeding
RaT_3 planting rate per greenhouse	CoT_3 cost of cultivating
RaT_4 worker rate in the cultivating area	CoT_4 cost of pollinating
RaT_5 worker rate in the pruning sector	CoT_5 cost of harvesting
RaT_6 worker rate in the pollinating sector	CoT_6 cost of farm laborers
RaT_7 worker rate in the harvesting area	CoT_7 cost of contracted laborers
RaT_8 melon yield rate	DeM^k demand of melon in period k
CaP_1 total number of farm laborers	
Decision Variables	
$x_{1,m}^t$ number of seeds planted in period t by famer m	
$x_{2,m}^t$ number of seedlings planted in period t by farmer m	
$x_{3,m,n}^{t,p}$ equal to 1 if cultivating in period t and pollinating in period p by farmer m in greenhouse n and 0 otherwise.	
$x_{4,m,n}^{p,k}$ equal to 1 if pollinating in period p and harvesting in period k by farmer m in greenhouse n and 0 otherwise.	
y_1^t number of laborers working in the seedlings sector in period t	
y_2^t number of laborers working in the cultivating area in period t	
y_3^t number of laborers working in the pruning sector in period t	
y_4^p number of laborers working in the pollinating sector in period p	
y_5^k number of laborers working in the harvesting area in period k	
y_6^t number of contracted laborers acquired in period t	

4.3 Objective function

The Objective function minimizes is the sum of seeding cost ($C^{Seeding}$), cultivating cost ($C^{Cultivating}$), pollinating cost ($C^{Pollinating}$), harvesting cost ($C^{Harvesting}$), and Outsourcing cost ($C^{Outsourcing}$). The total cost of the objective function is defined by Equation (1) as follows:

Minimize:

$$Z = C^{Seeding} + C^{Cultivating} + C^{Pollinating} + C^{Harvesting} + C^{Outsourcing} \quad (1)$$

The seeding cost is defined as the total of the seeds cost and the labor cost in the seedlings sector, which can be calculated using Equation (2) as:

$$C^{Seeding} = CoT_1 \sum_{t \in T} \sum_{m \in M} x_{1,m}^t + CoT_6 \sum_{t \in T} y_1^t \quad (2)$$

The cultivating cost is defined as the total of the seedlings cost, the cultivating cost, and the labor cost in the cultivating area, which can be calculated using Equation (3) as follows:

$$C^{Cultivating} = CoT_2 \sum_{t \in T} \sum_{m \in M} x_{2,m}^t + CoT_3 \sum_{t \in T} \sum_{p \in P} \sum_{m \in M} \sum_{n \in N} x_{3,m,n}^{t,p} + CoT_6 \sum_{t \in T} y_2^t \quad (3)$$

The pollinating cost is defined as the total of the pollinating cost and the labor cost in the pruning and pollinating sectors, which can be calculated using Equation (4) as follows:

$$C^{Pollinating} = CoT_4 \sum_{t \in T} \sum_{p \in P} \sum_{m \in M} \sum_{n \in N} x_{3,m,n}^{t,p} + CoT_6 \left(\sum_{t \in T} y_3^t + \sum_{t \in T} y_4^t \right) \quad (4)$$

The harvesting cost is defined as the total of the harvesting cost and the farm laborers cost in the harvesting area, which can be calculated using Equation (5) as follows:

$$C^{Harvesting} = CoT_5 \sum_{p \in P} \sum_{k \in K} \sum_{m \in M} \sum_{n \in N} x_{4,m,n}^{p,k} + CoT_6 \sum_{k \in K} y_5^k \quad (5)$$

The outsourcing cost, which is the total cost of contracted laborers, can be calculated using Equation (6) as follows:

$$C^{Outsourcing} = CoT_7 \sum_{k \in K} y_6^k \quad (6)$$

4.4 Constraints

The required quantities of resources for melon seedling cultivation can be calculated using constraint Equation (7), as this process requires a 10-day period.

$$RaT_1 x_{1,m}^t \geq x_{2,m}^{t+10}; \forall_{t \in T, m \in M} \quad (7)$$

Constraint Equation (8) determines the labor input required in the seedlings sector.

$$RaT_2 \sum_{m \in M} x_{1,m}^t \leq y_1^t; \forall_{t \in T} \quad (8)$$

Constraint Equation (9) determines the number of seedlings used daily in the melon cultivation process.

$$x_{2,m}^t = RaT_3 \sum_{p \in P} \sum_{n \in N} x_{3,m,n}^{t,p}; \forall_{t \in T, m \in M} \quad (9)$$

Constraint Equation (10) assumes that planting greenhouses are not reused.

$$\sum_{t \in T} \sum_{p \in P} x_{3,m,n}^{t,p} \leq 1; \forall_{m \in M, n \in N} \quad (10)$$

Constraint Equation (11) determines the labor input required in the cultivating area.

$$RaT_4 \sum_{p \in P} \sum_{m \in M} \sum_{n \in N} x_{3,m,n}^{t,p} \leq y_2^t; \forall_{t \in T} \quad (11)$$

The maintenance process for melon plants involves pruning melon branches and leaves 10 days after planting, as described in Equation (12), which determines the labor input required for pruning.

$$RaT_5 y_2^t = y_3^{t=t+10}; \forall_{t \in T} \quad (12)$$

Constraint Equation (13) determines the labor input required in the pollinating sector.

$$RaT_6 \sum_{t \in T} \sum_{m \in M} \sum_{n \in N} x_{3,m,n}^{t,p} \leq y_4^p; \forall_{p \in P} \quad (13)$$

Once melons reach reproductive maturity (30 days), pollination can begin and must be completed within 3 days. The harvest period for melons is 75–80 days, as defined by Equations (14) and (15).

$$\sum_{p \leq t+32} x_{3,m,n}^{t,p} = \sum_{p \geq t+30} \sum_{k \geq t+75}^{p \leq t+32, k \leq t+80} x_{4,m,n}^{p,k}; \forall_{t \in T, m \in M, n \in N} \quad (14)$$

$$\sum_{t \in T} x_{3,m,n}^{t,p} = \sum_{k \in K} x_{4,m,n}^{p,k}; \forall_{p \in P, m \in M, n \in N} \quad (15)$$

Constraint Equation (16) assumes that harvesting greenhouses are not reused.

$$\sum_{p \in P} \sum_{k \in K} x_{4,m,n}^{p,k} \leq 1; \forall_{m \in M, n \in N} \quad (16)$$

Constraint Equation (17) determines the labor input required for the harvesting area.

$$RaT_7 \sum_{p \in P} \sum_{m \in M} \sum_{n \in N} x_{4,m,n}^{p,k} \leq y_5^k; \forall_{k \in K} \quad (17)$$

The harvested melon yield must meet customer demand, and harvesting must be completed one day prior to customer pickup, as defined by Equation (18).

$$RaT_8 \sum_{p \in P} \sum_{m \in M} \sum_{n \in N} x_{4,m,n}^{p,k=k-1} \geq DeM^k; \forall_{k \in K} \quad (18)$$

Constraint Equation (19) determines the maximum labor capacity based on the availability of farm and contracted laborers.

$$y_1^t + y_2^t + y_3^t + y_4^p + y_5^k \leq CaP_1 + y_6^t; \forall_{t \in T, p \in P, k \in K, t = p = k} \quad (19)$$

Constraint Equations (20) and (21) define the variable types.

$$x_{1,m}^t, x_{2,m}^t, y_1^t, y_2^t, y_3^t, y_4^p, y_5^k, y_6^t \geq 0 \text{ and Integer}; \forall_{t \in T, p \in P, k \in K, m \in M} \quad (20)$$

$$x_{3,m,n}^{t,p}, x_{4,m,n}^{p,k} \in \{0,1\}; \forall_{t \in T, p \in P, k \in K, m \in M, n \in N} \quad (21)$$

5. Case study

The melon production process consists of systematic stages: seedling propagation, cultivation and maintenance, and harvesting. The supply chain involves intermediaries who collect the harvested produce for further distribution. The developed mathematical model was tested using the Premium Solver V2023 [9]. However, the solver encountered computational limitations due to the excessive number of decision variables and constraints, exceeding its capacity to derive an optimal solution. To validate the model's accuracy, the researchers conducted a case study simulation by reducing the production planning horizon (Figure 2)

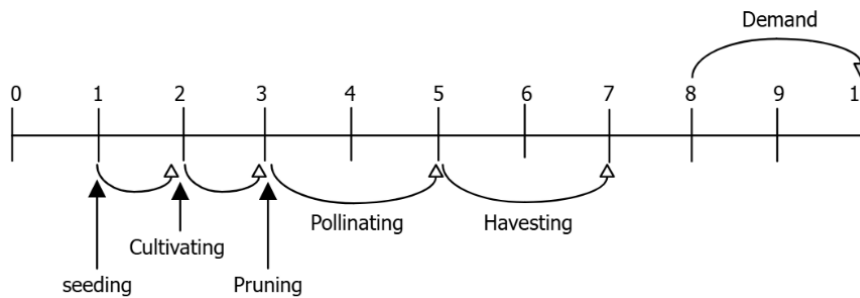


Figure 2 Melon Production Planning Horizon Timeline

The following components systematically structure the proposed melon cultivation framework.

- 1) Seedling:
 - Propagation commences in Period 1 (duration: 1 period).
- 2) Cultivating:
 - Transplanting to greenhouses is conducted upon completion of the seedling stage.
 - Pruning is initiated after the plants have spent 1 period in the greenhouse.
- 3) Pollinating:
 - Initiated when melons reach 3 periods of age.
 - Must be completed within a 2-period window.
- 4) Harvesting:
 - Permitted once melons attain an age of ≥ 5 periods.
 - Must be finalized within 2 periods after eligibility.
- 5) Demand Fulfillment:
 - Harvested melons must meet customer demand specifications.
 - Harvesting must be completed 1 period before customer pickup.

In this case study, the production planning framework uses real-world data from over 700 greenhouse farms to define the scope and scale of the problem by reducing the number of decision variables (Table 2), while incorporating key input data and parameters (Table 3) to ensure the plan meets consumer demand (Table 4). Notably, the reduction in dataset size for model testing did not compromise the model's performance. The resulting melon production plan accurately reflects optimal planting and harvesting quantities and fully satisfies customer demand.

Table 2 Size of the Test Problem

Number of cultivating periods	10
Number of pollinating periods	10
Number of harvesting periods	10
Number of farmers	3
Number of greenhouses	7

Table 3 Input Data and Parameter Values

Parameter	Value
RaT_1	95%
RaT_2	1/1,040 for worker rate in the seedlings sector
RaT_3	800 plants per greenhouse
RaT_4	3 workers per greenhouse per day
RaT_5	1/3 of the laborers are working in the cultivating area.
RaT_6	1 worker per greenhouse per day
RaT_7	3 workers per greenhouse per day
RaT_8	1,140 kilograms per greenhouse
CaP_1	35 workers
CoT_1	6 baht per seed
CoT_2	1 baht per seeding
CoT_3	8,175 baht per greenhouse
CoT_4	3,000 baht per greenhouse
CoT_5	1,520 baht per greenhouse
CoT_6	355 baht per worker per day
CoT_7	450 baht per worker per day

Table 4 Demand for Melon (kilograms)

k	DeM^k	k	DeM^k
1	0	6	0
2	0	7	0
3	0	8	3,420
4	0	9	1,140
5	0	10	2,280

6. Results and discussion

In this study, the researchers employed Premium Solver to compute the optimal solution. The results of the mixed-integer linear programming (MILP) model were applied to melon production planning, encompassing cultivation, pollination, fertilization, and harvesting, as well as labor resource allocation. The detailed outcomes are presented in Tables 5 and 6.

Table 5 Optimized Values of the Decision Variables

t, p, k	$x_{1,m}^t$			$x_{2,m}^t$			y_1^t	y_2^t	y_3^t	y_4^p	y_5^k	y_6^t
	$m=1$	$m=2$	$m=3$	$m=1$	$m=2$	$m=3$						
1	1,685	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0
2	0	0	1,685	1,600	0	0	2	6	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	1,600	0	6	2	0	0	0
4	0	1,685	0	0	0	0	2	0	2	2	0	0
5	0	0	0	0	1,600	0	0	6	0	1	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	4
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	4	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Table 6 Optimized Decision Variables for Melon Greenhouse Operations

m, n	Farmers 1	m, n	Farmers 2	m, n	Farmers 3
1,1	$x_{3,m,n}^{t=2,p=4} = 1$ $x_{4,m,n}^{p=4,k=7} = 1$	2,1	Not selected	3,1	$x_{3,m,n}^{t=3,p=6} = 1$ $x_{4,m,n}^{p=6,k=7} = 1$
1,2	$x_{3,m,n}^{t=2,p=4} = 1$ $x_{4,m,n}^{p=4,k=7} = 1$	2,2	$x_{3,m,n}^{t=5,p=8} = 1$ $x_{4,m,n}^{p=8,k=9} = 1$	3,2	$x_{3,m,n}^{t=3,p=5} = 1$ $x_{4,m,n}^{p=5,k=8} = 1$
		2,3	$x_{3,m,n}^{t=5,p=8} = 1$ $x_{4,m,n}^{p=8,k=9} = 1$		

Remark: The remaining decision variables take the value 0.

This production planning model provides an effective scheduling approach for melon cultivation. For example, when presented with a customer demand of 2,280 kg in period $k=10$ (see Table 3), the model generates a production plan (Table 4) that involves procuring 1,685 seeds in period $t=4$, cultivating 1,600 healthy seedlings by period $t=5$, transplanting them into greenhouses managed by Farmer 2 during the same period (Table 5) using Greenhouse 2 and Greenhouse 3, conducting pollination in period $p=8$, and achieving a harvest of 2,280 kg in period $k=9$. This schedule precisely fulfills the demand while maintaining the critical one-period buffer between harvest and delivery. A comprehensive review of the overall production plan confirms that customer demand is fully satisfied, highlighting the model's practical applicability and efficient management of the production timeline. The optimized total production cost amounts to 134,400 THB, representing a 10.16% reduction compared to manual planning, which incurs a cost of 149,600 THB.

7. Conclusions

This study shows that using a mathematical model can help melon farmers plan their work better. Instead of making decisions based on experience or guesswork, the model helps farmers schedule planting, harvesting, and labor use in a more organized and efficient way. It reduces total production costs by 10.16% and lowers the need for outsourced workers, which makes farm operations more stable and easier to manage.

The results suggest that even small farms can benefit from using optimization tools. The model can also be adapted for other crops with similar growing patterns. In future research, we will focus on expanding the model's scope to include additional components of the melon supply chain, improving its ability to handle real-life challenges such as weather variability and demand uncertainty, and developing enhanced scenario analysis capabilities for various operational conditions.

Acknowledgment

This research was supported by the Ministry of Higher Education, Science, Research and Innovation (MHESI), Thailand. We thank the Melon Farmers' Community Enterprise in Ban Nongkang, Suphan Buri, for providing essential data, and the Faculty of Logistics and Digital Supply Chain, Naresuan University, for access to Premium Solver V2023.

References

- [1] Department of Agricultural Extension. Agricultural production information system [Internet]. Bangkok: Department of Agricultural Extension; 2024 [cited 2025 May 15]. Available from: <https://production.doae.go.th>. (In Thai)
- [2] Chopra S, Meindl P. Supply chain management: strategy, planning, and operation. 6th ed. Harlow: Pearson; 2016.
- [3] Nguyen T, Nguyen-Quang T, Venkatadri U, Diallo C, Adams M. Mathematical programming models for fresh fruit supply chain optimization: a review of the literature and emerging trends. *AgriEngineering* 2021;3(3):519-41.
- [4] Salehi-Amiri A, Zahedi A, Akbapour N, Hajiaghaei-Keshteli M. Designing a sustainable closed-loop supply chain network for walnut industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2021;141:110821. doi: 10.1016/j.rser.2021.110821.
- [5] Wishon C, Villalobos JR, Mason N, Flores H, Lujan G. Use of MIP for planning temporary immigrant farm labor force. *International Journal of Production Economics* 2015;170:25-33.
- [6] Thuankaewsing S, Khamjan S, Piewthongngam K, Pathumnakul S. Harvest scheduling algorithm to equalize supplier benefits: a case study from the Thai sugar cane industry. *Computers and Electronics in Agriculture* 2015;110:42-55.
- [7] González-Araya MC, Soto-Silva WE, Espejo LGA. Harvest planning in apple orchards using an optimization model. In: Plà-Aragónés LM, editor. *Handbook of operations research in agriculture and the agri-food industry*. New York: Springer; 2015. p. 79-105. doi: 10.1007/978-1-4939-2483-7_4.
- [8] Soto-Silva WE, Nadal-Roig E, González-Araya MC, Pla-Aragones LM. Operational research models applied to the fresh fruit supply chain. *European Journal of Operational Research* 2016;251(2):345-55.
- [9] Frontline Systems, Inc. Premium Solver® Platform [Internet]. 2025 [cited 2025 May 20]. Available from: <https://www.solver.com/premium-solver%C2%AE-platform>.

Author's Profile



Aekachai Pantong, Ph.D. Student at Faculty of Logistics and Digital Supply Chain, Naresuan University, Thapo Sub-district, Muang District, Phitsanulok, 65000, Thailand. Email: aekachaip65@nu.ac.th
Domain: Logistics and Supply Chain Management, Optimization



Sirikarn Chansombut, Lecturer at Faculty of Logistics and Digital Supply Chain, Naresuan University, Thapo Sub-district, Muang District, Phitsanulok, 65000, Thailand. Email: sirikarnc@nu.ac.th
Domain: Production planning and scheduling, Optimization, Mathematical modeling, Simulation modeling, Metaheuristics

Article History:

Received: June 5, 2025

Revised: August 14, 2025

Accepted: August 15, 2025

ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต:

ศ.ดร.กัณวีร์ กนิษฐ์พงศ์	สาขาวิศวกรรมขนส่ง สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย
ศ.ดร.โกสินทร์ จำนงไทย	ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศ.ดร.แคลิยา ปัทมพรหม	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ศ.ดร.โจเซฟ เดดารี	สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีและนวัตกรรม มหาวิทยาลัยกรุงเทพธนบุรี
ศ.ดร.ต่อกุล กาญจนาลัย	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ศ.ดร.ปราโมทย์ เดชะอำไพ	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศ.ดร.พานิช วุฒิพฤษ	ภาควิชาครุศาสตร์โยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ
ศ.ดร.วัฒนวงศ์ รัตนวราห	สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่ง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ศ.ดร.สุวัฒน์ จิตตลดากร	ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
Prof. Dr. Belkacem Zeghami	Laboratoire de Mathematiques et Physique des Systeme- Groupe de Mecanique Energetique, Universite de Perpignan, France
รศ.ดร.กมลวัลย์ ลือประเสริฐ	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ
รศ.ดร.กรองแก้ว เลาหลิดานนท์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.กอบชัย เดชหาญ	ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.กัณวรัช พลุปรารักษ์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์
รศ.ดร.กิตติพงศ์ อัครกุล	ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รศ.ดร.จิรนุช เสี่ยงมศักดิ์	สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รศ.ดร.ชูสิทธิ์ ประดับเพ็ชร	สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา
รศ.ดร.ชัยณรงค์ อธิสกุล	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี
รศ.ดร.ณกร อินทร์พยุง	คณะโลจิสติกส์ มหาวิทยาลัยบูรพา

รศ.ดร.ณฐา คุปต์ขันธ์	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รศ.ดร.ณัฐพงศ์ มกระธัช	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.ดนุพล ตันนโยภาส	ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รศ.ดร.ทวีพล ชื้อสัตย์	ภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.เทอดศักดิ์ ร่องวิริยะพานิช	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.ธนู ญะฉาย	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
รศ.ดร.ธีรศิลป์ ทุมวิภาต	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือวัดและอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.นคร ภู่วโรคม	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
รศ.ดร.นิตย์ เพ็ชรรักษ	มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต
รศ.ดร.นิตมา อัจฉริยะโพธา	ศูนย์บริการทางการศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี วิทยาเขตราชบุรี
รศ.ดร.เนตรนภิส ตันเต็มทรัพย์	สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รศ.ดร.บวรโชค ผู้พัฒน์	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.บุญเลิศ สื่อเนย	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
รศ.ดร.บุญวัฒน์ อัดชู	สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.ประยูร สุรินทร์	สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน
รศ.ดร.ปราโมทย์ ศรีน้อย	สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ 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.พาสีร์ หล่อธีรพงศ์	บัณฑิตวิทยาลัยการจัดการและนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.พิภพ สุนทรสมัย	ที่ปรึกษาคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ.ดร.พิศิษฐ์ โกคาร์ตันกุล	สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ.ดร.ไพโรจน์ สิงหนัดกิจ	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รศ.ดร.พุทฺศักดิ์ ชิวสุวิทย์	ภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.ภัทรমন จงประดิษฐ์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.ภาณุวัฒน์ จ้อยกลัด	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
รศ.ดร.ภาวิณี เอี่ยมตระกูล	คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์และการผังเมือง มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รศ.ดร.มนตรี คำเงิน	ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.มนตรี ศิริปรัชญานันท์	ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.มานิช สรรพกิจทิพาการ	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.ยุทธชัย บรรเทึงจิต	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.รัตติกร วรากุลศิริพันธ์	คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
รศ.ดร.ระพี กาญจนะ	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รศ.ดร.วรรณ ข้างสว่าง	คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร
รศ.ดร.วรพจน์ กรีสระเดช	คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.วรากร ศรีเชวงทรัพย์	สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์และปัญญาประดิษฐ์ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
รศ.ดร.วัชร เพียรสุภาพ	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รศ.ดร.วิทยา ทิพย์สุวรรณพร	สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

รศ.ดร.เวทิน ปิยรัตน์	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์
รศ.ดร.สถาพร โอภาสานนท์	สาขาวิชาบริหารธุรกิจระหว่างประเทศ โสจิสติกส์และการขนส่ง มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รศ.ดร.สมใจ จันทร์อุดม	สาขาวิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รศ.ดร.สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รศ.ดร.สมศักดิ์ มิตะถา	ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.สมิตร ส่งพิริยะกิจ	ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.สโรช บุญศิริพันธ์	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ.ดร.สินชัย ชินวรรณ	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.สิริพร โรจนนันต์	สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.เสรี เศวตเศรณี	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ.ดร.สุชาติ เหลืองประเสริฐ	ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน
รศ.ดร.สุทัศน์ ลีลาทวิวัฒน์	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี
รศ.ดร.สุนิติ สุภาพ	ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัย ศรีนครินทรวิโรฒ
รศ.ดร.สุรพล บุญลือ	ภาควิชาเทคโนโลยีและสื่อสารการศึกษา มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.อดิรักษ์ กาญจนหฤทัย	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยรังสิต
รศ.ดร.อรจักร จิตต์โสภาคย์	สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.อิทธิพงศ์ ชัยสายนันท์	บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเอเซียอาคเนย์
รศ.ดร.อำพล การุณสุนทวงษ์	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี
รศ.เรวัฒน์ เหล่าไพบูลย์	ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
รศ.วัชรินทร์ วิทยกุล	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขต บางเขน

รศ.วิญญู แสงวสินกสิกิจ	สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
รศ.ศันสนีย์ สุภาภา	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน
รศ.เอกชัย วิมลมาลา	ภาควิชาเทคโนโลยีวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.เอนก ศิริพานิชกร	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.กรกช ทวีสิน	สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยรามคำแหง
ผศ.ดร.กฤษ สุจริตตั้งธรรม	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม
ผศ.ดร.กัมพล พรหมจิริประวัติ	สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง
ผศ.ดร.กิตติ สถาพรประสารณ์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผศ.ดร.กิตติศักดิ์ วิธินันทกิตต์	สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตบางพระ
ผศ.ดร.กฤษณทล ทองศรี	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.เขมพัฒน์ ต้นต้วฒนกุล	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.จักร จันทลักษณ์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.จักรินทร์ กลั่นเงิน	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา
ผศ.ดร.จารุวรรณ เกษมทรัพย์	สาขาวิชาการจัดการงานวิศวกรรม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
ผศ.ดร.จิราพรณ สุนทรโชติ	ภาควิชาคณิตศาสตร์และวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผศ.ดร.จิราวรรณ อุ่นเมตตาอารี	สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
ผศ.ดร.เจษฎา ชัยโณม	ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผศ.ดร.ฉัตร สุจินดา	ธุรกิจส่วนตัว
ผศ.ดร.ชลัท ทิพาการเกียรติ	สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ผศ.ดร.ชัยรัตน์ ชีระวัฒนสุข	ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.ชัยวัฒน์ นุ่มทอง	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา
ผศ.ดร.ชูชัย สุจิรวงศ์	ภาควิชาครุศาสตร์โยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี
ผศ.ดร.ณพล ศรีศักดิ์	สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยพะเยา
ผศ.ดร.ณัฏวิภา เจียรระโนะวชิระ	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผศ.ดร.ณัฐ โอชนาทรัพย์	สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
ผศ.ดร.ณัฐพงศ์ พันธุ์น้อย	คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
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 มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต
ผศ.ดร.ตรี วาทกิจ	สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะเกษตรและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยนครพนม
ผศ.ดร.ทวีศักดิ์ แทะกระโทก	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผศ.ดร.นที ศรีสวัสดิ์	ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งทอ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.นิพนธ์ วรรณโสภาคย์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผศ.ดร.ปรรัตน์ ศุภมิตรโยธิน	สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
ผศ.ดร.ประภาพรณ เกษราพงศ์	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา
ผศ.ดร.ปริญญา บุญกนิษฐ	สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ผศ.ดร.พงศกร บำรุงไทย	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา

ผศ.ดร.พงษ์ชัย ประกฤตศิริ	ภาควิทยาศาสตร์พื้นฐานและพลศึกษา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา
ผศ.ดร.พิพัฒน์พงศ์ วัฒนวันยู	วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต
ผศ.ดร.พิมพ์เพชร สระทองอ่อน	สาขาวิชาวิศวกรรมยานยนต์ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
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	สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงานและการจัดการ คณะวิทยาศาสตร์ พลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ วิทยาเขตระยอง
ผศ.ดร.วิชัย รุ่งเรืองอนันต์	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.วินัย ไจกล้ำ	คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผศ.ดร.วิรัตน์ จอมขวา	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ คณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ
ผศ.ดร.ศิริดล ศิริธร	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล
ผศ.ดร.สนิท วงษา	ภาควิชาครุศาสตร์โยธา คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและ เทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.สมบุญ เจริญวิไลศิริ	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.สมโพธิ อยู่ไว	สาขาวิชาวิศวกรรมเทคนิคธรณี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.สมศักดิ์ มีนกร	คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา
ผศ.ดร.สิตางค์ ฟิลัยหล้า	ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผศ.ดร.สิทธิพงษ์ เพิ่มพิทักษ์	คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์
ผศ.ดร.สิริชัย จีรวงศ์นุสรณ์	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล รัตนโกสินทร์

ผศ.ดร.สิรวงศ์ กลั่นคำสอน	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา
ผศ.ดร.สุธิดา ที่ปรัภษพันธ์	ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผศ.ดร.โสภา แซ่เฮ้ง	สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ผศ.ดร.สมล แซ่เฮง พิสิษฐ์สังฆการ	ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการเผาไหม้และพลังงานทางเลือก ภาควิชา เทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องต้นกำลัง วิทยาลัยเทคโนโลยี อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.สุรัตน์ อาริรัตน์	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ ทหารลาดกระบัง
ผศ.ดร.อรกมล วังอภิสิทธิ์	สาขาวิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขล าครินทร์
ผศ.ดร.เอกชัย อยู่ประเสริฐชัย	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี
ผศ.กัมปนาท ไชยเพชร	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและเมคคาทรอนิกส์ มหาวิทยาลัย กาฬสินธุ์
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.อุษณีย์ ระหา	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง
ผศ.อนุชิต เจริญ	สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต

อ.ดร.กฤษณ์ อภิญาวิศิษฐ์	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อ.ดร.คมพันธ์ ชมสมุทร	สาขาวิชาวิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อ.ดร.จักรภพ วงศ์วิวัฒน์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
อ.ดร.ฉัตรเพชร ยศพล	สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
อ.ดร.ชัชพันธ์ 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 ศรีสุวรรณนา	ภาควิชาสถิติประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
อ.ดร.ณัฐภรณ์ เจริญธรรม	สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่ง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
อ.ดร.ณัฐวุฒิ ธนศรีสถิต	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
อ.ดร.ดุขี สติเรษฐทวี	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยนเรศวร
อ.ดร.ตันติกร พิษฐ์พิบูล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยกรุงเทพ
อ.ดร.บุญเลิศ วงศ์เจริญแสงศิริ	สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์
อ.ดร.ปริญญา บุญมาเลิศ	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
อ.ดร.ประภาส ผ่องสนาม	สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
อ.ดร.ปรารภนา อินตะวิน	สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อ.ดร.พงศกร พรหมสวัสดิ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง
อ.ดร.พิชฌุฑม์ จรัสบำรุงโรจน์	สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อ.ดร.ภักดีวัฒน์ แสนเจริญ	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
อ.ดร.ภาสินี ศิริประภา	คณะศิลปกรรมและสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
อ.ดร.วรศิริ เดอ กาเดเนตต์ อ.ดร.วาทัญญู รอดประพัฒน์	สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ตะวันออก
อ.ดร.วศิน มหัตถินันต์กุล	ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าพระนครเหนือ
อ.ดร.วิทยา พวงสมบัติ	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล รัตนโกสินทร์
อ.ดร.วีรเดช กิรติชนวิทย์	สาขาวิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
อ.ดร.ศรินรัตน์ วงษ์ลี	กลุ่มวิจัยและพัฒนาชีวเคมี สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์ แห่งชาติ (องค์การมหาชน)
อ.ดร.ศักดิ์ชาย รักการ	สาขาวิชาการจัดการงานวิศวกรรม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัย เกษมบัณฑิต
อ.ดร.สำเร็จ เนตรภู	บริษัท เอส. เอช. เค. เอ็นจิเนียริ่ง จำกัด
อ.ดร.สุชัยญา วงศ์รอด	คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้า ธนบุรี
อ.ดร.สุวรรณี สายสิน	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิม พระเกียรติ
อ.ดร.อติเทพ ศรีคงศรี	สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
อ.ดร.อภิชาติ บัวกล้า	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา
อ.ดร.อนันต์ เดอร์ชิง	ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญ
อ.ดร.อุกฤษฏ์ สมัครสมาน	ภาควิชาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม คณะเกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร
ดร.จุฑา สุนิตย์สกุล	สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ กรมทางหลวง
ดร.พุทธิพงศ์ เหลือรัตนวัฒนา	สำนักก่อสร้างสะพาน กรมทางหลวงชนบท
ดร.อัศคพัฒน์ สว่างสุรีย์	สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง
อ.จิรวัฒน์ ปล้องใหม่	สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัย เกษมบัณฑิต

อ.ณัฐนันท์ รัตน์ไชย	คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ธัญบุรี
อ.นิตยา จันทรเรือง มหาผล	เลขาธิการสภาวิศวกร ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์
อ.ว่าที่ ร.ต.สรารุณี 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

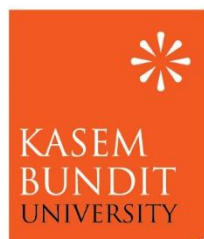
E-mail: engkasemjournal@kbu.ac.th

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