

วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต

ISSN 2286-668X

KASEM BUNDIT

Engineering Journal

ปีที่ 13 ฉบับที่ 1 มกราคม - เมษายน 2566
Vol.13 No.1 January - April 2023



คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต

วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต

ปีที่ 13 ฉบับที่ 1 มกราคม-เมษายน 2566

Kasem Bundit Engineering Journal (KBEJ)

Volume 13 No.1 January-April 2023

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต

วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต

Kasem Bundit Engineering Journal (KBEJ)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต

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

วัตถุประสงค์

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

บทความที่สามารถตีพิมพ์ลงในวิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต

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

- เป็นบทความวิจัยหรือบทความทางวิชาการ ในลักษณะที่จะนำไปสู่ความก้าวหน้าทางวิชาการและวิชาชีพ
- เป็นบทความที่ไม่เคยได้รับการตีพิมพ์มาก่อนทั้งภายในประเทศหรือต่างประเทศ
- เป็นบทความที่ไม่ได้อยู่ในระหว่างการพิจารณาของสื่อสิ่งพิมพ์อื่น ๆ
- เป็นบทความที่ไม่ละเมิดลิขสิทธิ์ของผู้อื่น 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.ชัยฤทธิ์ สัตยาประเสริฐ	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
------------------------------	--

รองบรรณาธิการ:

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

กองบรรณาธิการ:

ศ.ดร.โกสินทร์ จำนงไทย	ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศ.ดร.โจเซฟ เคดารี	สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีและ นวัตกรรม มหาวิทยาลัยกรุงเทพธนบุรี
ศ.ดร.ต่อกุล กาญจนาลัย	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ศ.ดร.ปราโมทย์ 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 ศิริปรัชญานันท์	ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ
รศ.ดร.ยุทธชัย บรรเทึงจิตร	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระ จอมเกล้าพระนครเหนือ

รศ.ดร.รัตติกกร วรากุลศิริพันธุ์
รศ.ดร.วิทยา ทิพย์สุวรรณพร

รศ.ดร.เวทิน ปิยรัตน์

รศ.ดร.สมิตร ส่งพิริยกิจ

รศ.ดร.อิทธิพงศ์ ชัยสายันท์
รศ.ศันสนีย์ สุภาภา
ผศ.ดร.มนตรี คำเงิน

อ.ดร.ชาญยุทธ กฤตสุนันท์กุล

อ.ดร.ชาญวิทย์ อุดมศักดิ์กุล

อ.ดร.วศิน มหัตนรินทร์กุล

ผู้ช่วยกองบรรณาธิการ:

รศ.วิญญู แสงสินกสิกิจ
ผศ.อนุชิต เจริญ
ผศ.ดร.หนึ่งฤทัย ทิมย้ายงาม
อ.ดร.ประภาส ผ่องสนาม

ฝ่ายเลขานุการ:

คุณยุพิน ไชยโคตร

คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
องครักษ์

ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัย
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเอเซียอาคเนย์

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีพระจอม
เกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ภาควิชาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัย
นเรศวร

สำนักงานสภานโยบายการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและ
นวัตกรรมแห่งชาติ

วิศวกร ที่ปรึกษาโรงงาน อาจารย์พิเศษ ภาควิชาเทคโนโลยี
อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

อ.ดร.ศักดิ์ชาย รักการ

อ.ธีรยุทธ จันท์แจ่ม

ผศ.วรกร เกิดทรัพย์

อ.อุบลรัตน์ วาริชวัฒนะ

คุณรุ่งนภาพร ภูธรธราช

บทบรรณาธิการ

ปัจจุบัน วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต (Kasem Bundit Engineering Journal) ได้ดำเนินการก้าวเข้าสู่ปีที่ 13 ในปี พ.ศ.2566 นี้ หนึ่งในช่วงที่ผ่านมาเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence) เริ่มเข้ามามีบทบาทและเป็นประเด็นสำคัญที่ถูกพูดถึงอย่างกว้างขวางถึงข้อดีและข้อเสียของเทคโนโลยีดังกล่าว

ในบทบรรณาธิการครั้งนี้จึงได้ทดลองใช้ Chat GPT ซึ่งเป็นระบบประมวลผลภาษาธรรมชาติที่พัฒนาขึ้นโดย OpenAI เพื่อช่วยในการเขียนบทบรรณาธิการ ซึ่งผลจากการทดลองใช้งาน พบว่าบทบรรณาธิการที่ได้ออกมามีข้อบกพร่องและต้องการการปรับปรุงแก้ไข ตลอดจนผู้ใช้จะต้องให้ข้อมูลเพิ่มเติมให้กับปัญญาประดิษฐ์เพื่อให้เนื้อหาที่ได้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น โดยบทบรรณาธิการที่ได้ผ่านการเรียบเรียงแล้วเบื้องต้นมีผลลัพธ์ ดังนี้

“สวัสดีครับ ผู้อ่านทุกท่าน,

ในยุคที่เทคโนโลยีเข้ามามีบทบาทสำคัญในการทำงานและชีวิตประจำวัน การใช้เทคโนโลยีใหม่ ๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความสะดวกสบายในการทำงานซึ่งเป็นสิ่งที่ทุกท่านปรารถนา การใช้เทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์สามารถช่วยสืบค้น และสร้างเนื้อหาที่มีคุณภาพสูง ได้เร็วขึ้นและอีกทั้งยังช่วยลดเวลาในการเขียนให้น้อยลงด้วย

ในบทบรรณาธิการครั้งนี้ของวารสารวิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต ผมต้องการเน้นในเรื่องของการใช้เทคโนโลยีและอุปกรณ์ต่าง ๆ เพื่อช่วยให้การเขียนบทความและสร้างเนื้อหาที่มีคุณภาพสูงมีความสะดวกสบายและรวดเร็วยิ่งขึ้น ซึ่งในปัจจุบัน เทคโนโลยีและอุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น แชทบอท (Chatbot) หรือ แชทจีพีที (ChatGPT) ได้รับความนิยมอย่างมาก เพราะมีความสามารถในการช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการทำงาน เช่น ในการสร้างเนื้อหา ตอบคำถาม และประมวลผลข้อมูล โดยสามารถทำได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพสูง ทั้งนี้เทคโนโลยีและอุปกรณ์ต่าง ๆ จะมีข้อดีและข้อเสีย ซึ่งผู้ใช้จะต้องใช้ให้ถูกต้อง

ในสุดท้ายขออวยพรและขอบคุณผู้อ่านและผู้เขียนบทความทุกท่านที่มีส่วนร่วมในการสร้างความรู้และแบ่งปันประสบการณ์ทางวิชาการกับวารสารวิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต โดยเราหวังว่าบทความและเนื้อหาทั้งหมดในวารสารนี้จะเป็นประโยชน์และมีคุณค่าต่อผู้อ่านทุกท่าน ในการพัฒนาองค์ความรู้ใหม่ๆ ในวงการวิศวกรรมและสาขาอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง”

รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยฤทธิ์ สัตยาประเสริฐ
บรรณาธิการวิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต

บทความวิจัย (Research Article)

THE EFFECT OF ANNEALING TEMPERATURE ON PROPERTIES OF PZT CERAMIC FILMS PREPARED VIA SPIN-COATING PROCESS

1

Marut Khieokae, Kanut Jimpak, Suphattra Kritwattanakorn, Suwimol Jaitalawanich, Tinno Kwandee and Pichitchai Butnoi

การเรียนรู้แบบเสริมกำลังโดยใช้โมเดลสำหรับควบคุมการเคลื่อนที่ในแนวระนาบของแขนหุ่นยนต์

MODEL-BASED REINFORCEMENT LEARNING FOR PLANAR MOTION CONTROL OF ROBOTIC ARMS

12

เมธา เมืองประเสริฐ พิศศักดิ์ เจริมประยงค์ และ กิตติพงศ์ บุญโสง

การปรับปรุงประสิทธิภาพกระบวนการกลึงขึ้นรูปวัสดุ KCF Guide Pin โดยใช้หลักการออกแบบการทดลอง: บริษัท ยู เค เอ็นจิเนียริง แอนด์ ซัพพลาย จำกัด

THE IMPROVEMENT OF THE TURNING PROCESS EFFICIENCY OF KCF GUIDE PIN USING THE DESIGN OF EXPERIMENT: UK ENGINEERING & SUPPLY CO.,LTD.

35

ภชรดิษฐ์ แป้งจิตต์ และ วรารุท พันธุ์บุญมี

การเชื่อมเสียดทานแบบกวนอะลูมิเนียมผสม AA 7075-T651 โดยใช้อุปกรณ์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนแบบหัวกวนคู่

FRICTION STIR WELDING OF AA7075-T651 ALUMINUM ALLOY USING DOUBLE-SIDED FRICTION STIR WELDING EQUIPMENT

48

วรงค์ บุญช่วยแทน จักรนรินทร์ ฉัตรทอง วรธนพร ชีวภูมิพงศ์ และ จตุพร ใจดำรงค์

การอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองด้วยลมร้อนและลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ

DRYING OF BARRACUDA MANGO USING HOT AIR AND COMBINED HOT AIR-MICROWAVE

72

สัญญาต มานะเสวตกุล จิรวัดน์ สิตรานนท์ และ กิตติศักดิ์ วินันท์กิตต์

บทความวิจัย (Research Article) (ต่อ)

การศึกษาและพัฒนาระบบโลจิสติกส์และโซ่อุปทานการผลิตกาแฟ กรณีศึกษาไร่กาแฟ
จงซ่าง อำเภอนครไทย จังหวัดพิษณุโลก

THE STUDY AND DEVELOPMENT OF LOGISTICS AND SUPPLY CHAIN
SYSTEMS FOR COFFEE PRODUCTION: A CASE STUDY OF JONGSANG
COFFEE FARM AT NAKON THAI, PHITSANULOK

88

หทัยชนก พวงแย้ม เพชรายุทธ แซ่หลี่ วชิระ วิจิตรพงษา และ อลงกรณ์ เมืองไหว

ปัจจัยที่มีผลต่อการเดินทางช่วงแรกของผู้ใช้บริการรถไฟฟ้า

INFLUENCE FACTORS FOR THE FIRST MILE OF MASS TRANSIT SYSTEM
PASSENGER

104

กัณฑ์ธีร์ เนติโรจนชัยชาญ และ ศิรตล ศิริธร

THE EFFECT OF ANNEALING TEMPERATURE ON PROPERTIES OF PZT CERAMIC FILMS PREPARED VIA SPIN-COATING PROCESS

Marut Khieokae¹, Kanut Jinpak², Suphattra Kritwattanakorn³, Suwimol Jairtalawanich⁴,
Tinno Kwandee⁵ and Pichitchai Butnoi⁶

^{1,2,3,4,5,6}Lecturer, Department of Industrial Technology, Faculty of Technical Education,
Rajamangala University of Technology Krungthep, 2 Nang linchi Road, Tungmahamek,
Sathon, Bangkok 10120 Thailand,

¹marut.k@mail.rmutk.ac.th, ²lershbhundtu.s@mail.rmutk.ac.th,

³suphattra.k@mail.rmutk.ac.th, ⁴suwimol.j@mail.rmutk.ac.th, ⁵Tinno.k@mail.rmutk.ac.th,

⁶pichitchai.b@mail.rmutk.ac.th

ABSTRACT

In this work, lead zirconate titanate $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ or PZT films under 20% mol of Pb-excess were fabricated on $\text{Ti}/\text{SiO}_2/\text{Si}$ wafer by spin-coating method. The PZT films were annealed at different temperatures of 550, 600 and 650 °C for 30 min under atmosphere. The effects of annealing temperature on microstructure, surface morphology and phase formation of PZT ceramic films were investigated by Field-emission scanning electron microscope (FE-SEM), Atomic force microscopy (AFM) and X-ray diffraction (XRD), respectively. The PZT ceramic films exhibited perovskite phase that crystallographic orientations increased with increasing annealing temperatures. Moreover, the average grain sizes and film thickness slightly increased with increasing annealing temperatures.

KEYWORDS: PZT ceramic films, Spin-coating, annealing temperature, AFM

1. Introduction

Lead zirconate titanate $[\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ or PZT] film are widely used in electronic devices such as memory, micro electro mechanical system (MEMS) sensors actuators and high power transducers due to their high piezoelectric performance [1-3]. Nowadays, the increasing demand of thin materials or portable devices, it has been researched and developed piezoelectric materials with lightweight and high performance. Moreover, PZT 52/48 composition has attracted great attention and its composition is close to the

morphotropic phase boundary (MPB) which exhibited excellent ferroelectric and piezoelectric properties [4-6].

A variety of methods were used to prepare PZT ceramic films such as Rf-magnetron sputtering [7], chemical vapor deposition (CVD) [8], screen printing [9] and sol-gel dip coating [10, 11]. Among those methods, sputtering and spin-coating methods have received higher than other methods. The ceramic films fabricated by sputtering process exhibit high dense morphology and good electrical properties. However, the sputtering process is expensive process due to it operate under high vacuum for long time deposition. Therefore, spin-coating is very attractive method. It is inexpensive and simple for film preparation. Spin coating is a technique for using centrifugal force to prepare films from solution. The solution is dispensed onto the center of a substrate, which is then rotated at high speed. The thickness of films can control by the spin speed and the viscosity of the solution [12-14]. However, it is difficult to obtain uniform phase structure and flat surface morphology by spin coating [14]. Additionally, the annealing process under heat treatment results in film cracking. As a result, dense, crack-free coatings with good surface roughness are required to form PZT ceramic films with good electrical properties.

In this work, we present a method of precursor solution and PZT ceramic film fabrication by a sol-gel method deposited on substrate via spin-coating technique, and then characterize the prepared films to obtain their properties such as phase formation, morphologies, and microstructure.

2. Experimental

Lead acetate trihydrate [$\text{Pb}(\text{CH}_3\text{CO}_2)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, 99% of purity (Sigma-Aldrich)], zirconium (IV) propoxide solution [$\text{Zr}(\text{OCH}_2\text{CH}_2\text{CH}_3)_4$, 70wt.% in 1-propanol (Sigma-Aldrich)], Titanium (IV) isopropoxide, $\text{Ti}[\text{OCH}(\text{CH}_3)_2]_4$, 97% of purity, (Sigma-Aldrich), 2-methoxyetanol and acetylacetone were used as raw materials of sol-gel method to prepare the PZT precursor solution. Firstly, $\text{Pb}(\text{CH}_3\text{CO}_2)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ was dissolved in 2-methoxy- ethanol and continuous stirred at room temperature (RT) until cleaned solution. Then, the prepared solution was vacuum distilled at 120 °C. At the same time, $\text{Zr}(\text{OCH}_2\text{CH}_2\text{CH}_3)_4$ and $\text{Ti}[\text{OCH}(\text{CH}_3)_2]_4$ were weighed and dissolved in 2-methoxyetanol in a separate container under Ar atmosphere. After that, all solutions were mixed in a flask and mixed solution was refluxed at 120 °C for

2 h. After distillation, the clear and light-yellow solution is kept stirring to cooled to RT. The PZT solution was controlled to be 0.5 M.

The PZT films were fabricated by spin-coated on Ti/SiO₂/Si substrates at 500 rpm for 10 sec. and 3000 rpm for 30 sec. subsequently given a pyrolysis treatment at 400 °C for 10 min. Then, annealed at different temperature of 550, 600 and 650 °C for 30 min. in air, with heating rate of 5 °C /min.

The phase formation was identified using XRD technique (X'Pert Pro MPD, PANalytical). The films thickness was characterized by FE-SEM (JSM-6335F, JEOL). The surface morphologies were observed by an atomic force microscope (AFM, Nanoscope III, Digital Instruments). While the surface roughness and grain size were obtained from these AFM images.

3. Results

After the PZT ceramic films are annealed at different temperatures of 550, 600 and 650 °C for 30 min. The phase formation is analyzed using XRD and the XRD patterns of PZT ceramic films with different annealing temperatures and standard peak of tetragonal PZT ceramic are presented in Figure 1. We can see that the diffraction intensity of 001 and 110 peaks is increased with increasing anneal temperature and it shows the highest value at an annealed 650°C. In addition, the perovskite and unknown phase coexist in these films [15, 16]. However, the number of unknowns decreased with increasing temperature, while the crystallinity was found to increase.

The cross-section and surface morphologies of PZT ceramic films are characterized by using FE-SEM and displayed in Figure 2. From cross-section image (Figure 2(a)-(c)) can observe that the PZT ceramic films coated on the substrate have a well bonded with Si-wafer. All samples exhibited uniform thickness and high density. The ceramic films showed average thickness of 707, 827 and 900 nm, respectively. Moreover, the thickness slightly increased with increasing annealing temperature from 550 to 650 °C. However, a slight increase can be observed in the average grain size with increasing annealing temperature, as seen in Figure 2(c-e) and Table 1.

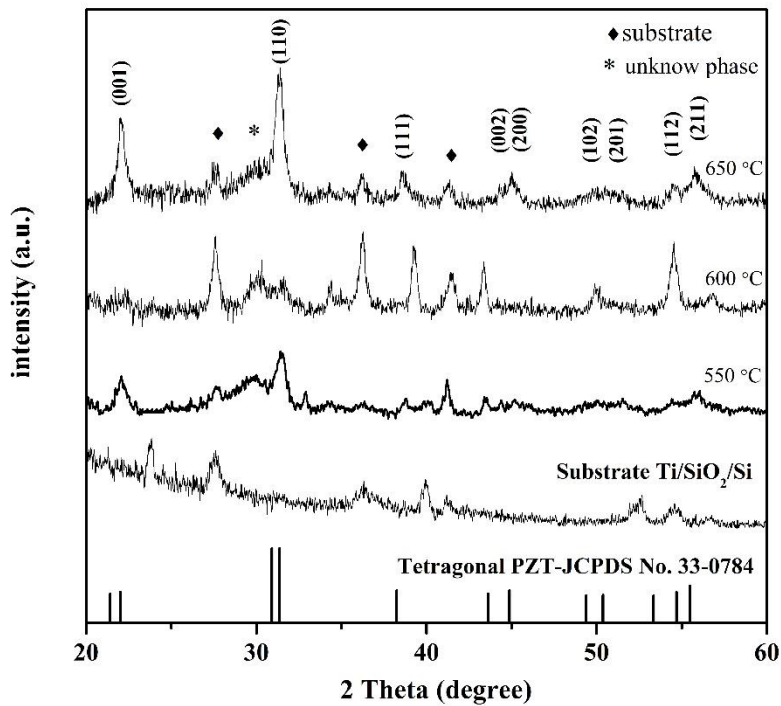


Figure 1 XRD patterns of PZT ceramic films annealed at different temperature of 550, 600 and 650 °C for 30 minutes.

Table 1 The PZT ceramic films properties at various annealing temperature

Ceramic films properties	Annealing Temperature (°C)		
	550	600	650
Thickness (μm)	0.7 ± 0.2	0.8 ± 0.1	0.9 ± 0.1
Grain size (nm)	244 ± 32	273 ± 28	270 ± 20
RMS (nm)	10.5 ± 0.3	8.6 ± 0.4	8.4 ± 0.2

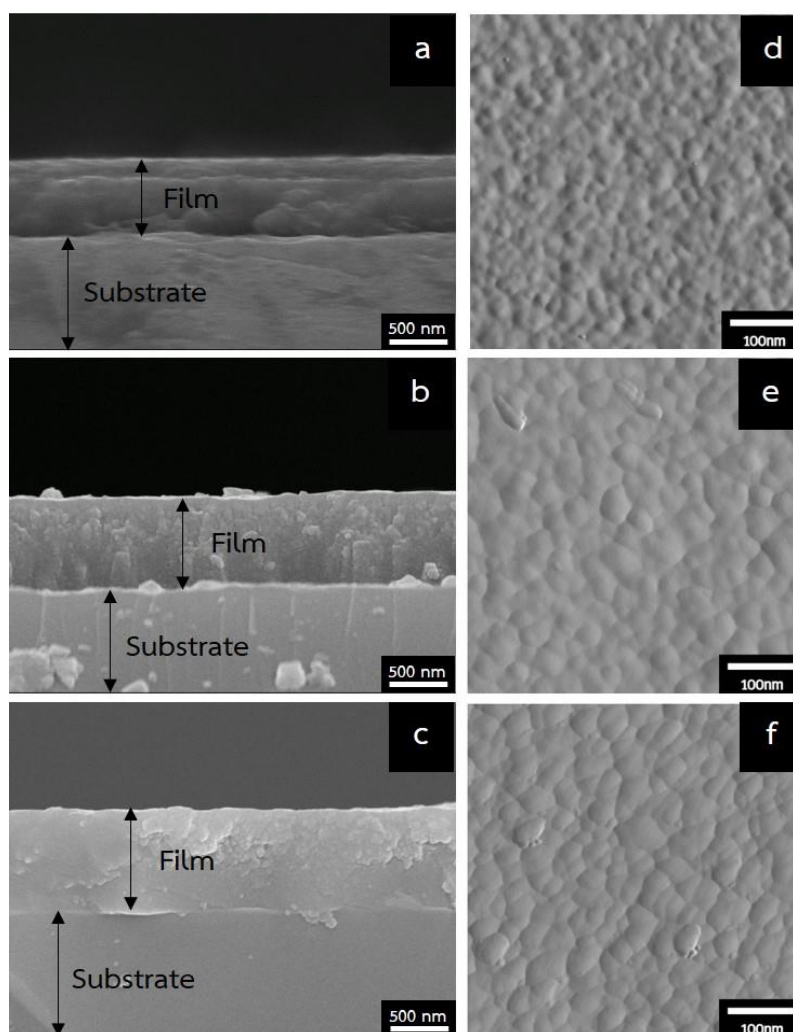


Figure 2 Cross-sectional SEM, (a) – (c) and surface SEM, (d) – (f) of PZT ceramic films annealed at different temperature of 550, 600 and 650 °C.

To analyze the dependence of surface roughness and surface morphologies of the PZT ceramic films on Si-wafer substrates are also characterized by atomic force microscopy (AFM) as shown in Figure 3. The grains and Root Mean Square (RMS) surface roughness were determined from AFM images [3, 17]. According to the results of AFM surface morphology, the initial surface shows a high RMS roughness of 11 nm of the sample annealed at 550 °C. Although, the roughness of the PZT ceramic films was decreased to about 8.6 nm and 8.4 nm for samples annealed at 600 and 650 °C., respectively. The surface roughness of PZT ceramic films can be significantly smoothed up by increase the annealing temperature.

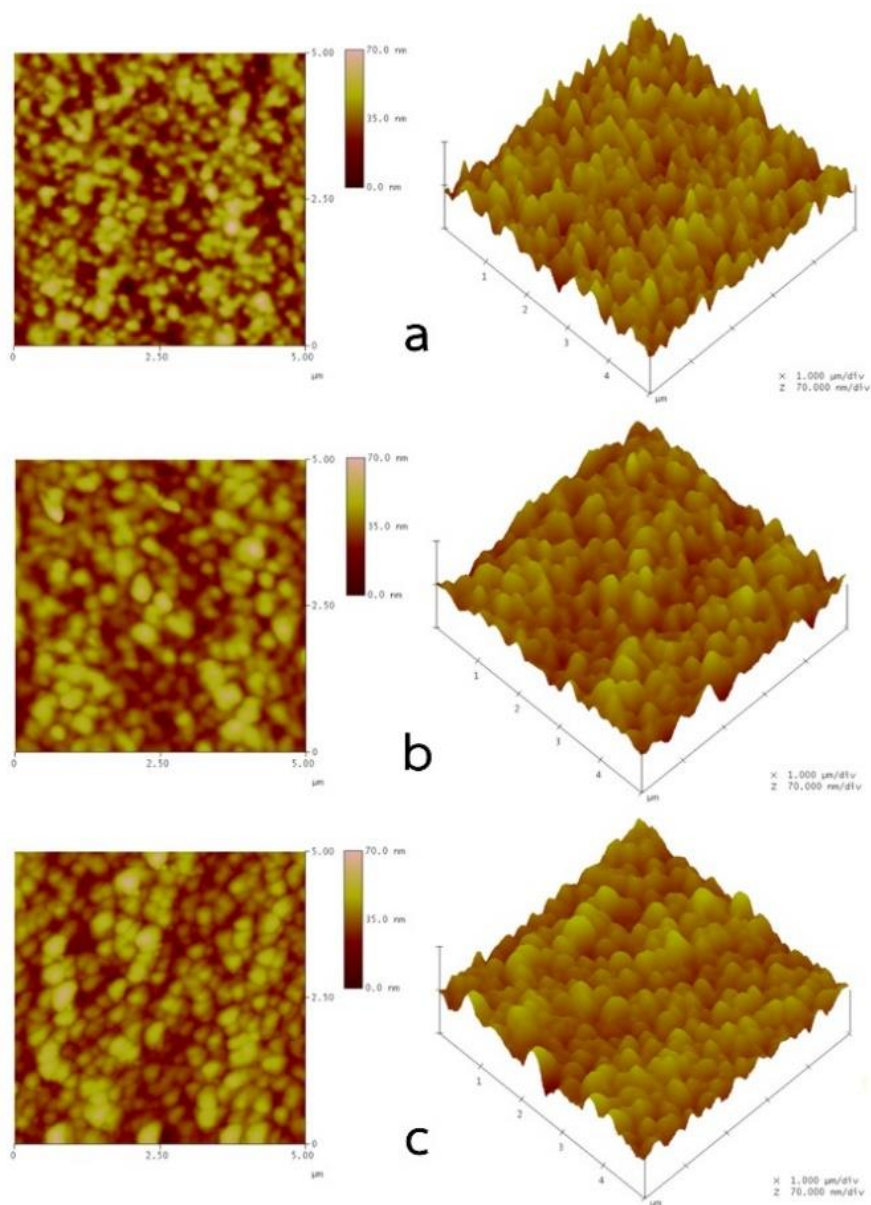


Figure 3 AFM images of PZT ceramic films annealed at different temperature of 550, 600 and 650 °C.

4. Discussions

After spin-coating, on Si-wafer substrates were coated with a gel - solution, good bonded to the substrate by capillary force [18]. Then, gel solution became a ceramic film by annealing process. Liquid volatilizing to be formed crystallinity as ceramic films [19, 20].

However, crystal structure depends on annealing temperature. From this result, the gel solution was transformed into perovskite phase of the PZT tetragonal structure of annealing at 650 °C for 30 min. In addition, an amorphous structure has been observed, the amorphous phase is not formed into completed crystals at the annealing condition. The perovskite phase increase with increasing annealing temperature. The PZT ceramic film, annealed at high temperature can improve surface roughness because of grain growth effects [5, 17]. The grain growth occurring at high temperature processes, the ionic mobility increases with increasing temperature, which explain by grain-boundary diffusion [17, 18]. Meanwhile, grain growth significantly increases the grain size and surface roughness. Resulting in narrowing the gap between grain boundaries or merging of other grains in the meantime [21]. It is well known that the electrical properties of ceramic films such as dielectric, ferroelectric, and piezoelectric properties are strongly influenced by grain size and porosity. Generally, remnant polarization of hysteresis loops and dielectric constant are increased while the grain size decreases. In contrast, the ferroelectric and piezoelectric properties increased with large grain size [22]. SEM and AFM images indicate that a fine grain size, around 270 nm, a densely and smooth surface without porosity could be found after annealing at 650 °C. It is for possibility as piezoelectric film application.

5. Conclusion

In this work, lead zirconate titanate $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ ceramic films under 20% mol of Pb-excess were successfully fabricated by spin-coating technique. The surface roughness was improved with increasing annealing temperature. The PZT ceramic film annealed at 650 °C shows high perovskite phase, high smooth surface. The higher degree of perovskite phase in the ceramic film annealed at 650 °C for possible as good electrical properties of PZT ceramic film device.

Acknowledgements

This work was supported by Metallurgical Technology Division, Department of Industrial Technology, Faculty of Technical Education, Rajamangala University of Technology Krungthep (UTK), Thailand.

References

- [1] Trolrier-McKinstry S, Muralt P. Thin film piezoelectrics for MEMS. In: Setter N, editor. Electroceramic-based MEMS: fabrication-technology and applications. Boston, MA: Springer US; 2005. p. 199-215.
- [2] Yu HG, Zou L, Deng K, Wolf R, Tadigadapa S, Trolrier-McKinstry S. Lead zirconate titanate MEMS accelerometer using interdigitated electrodes. *Sensors and Actuators, A: Physical* 2003;107(1):26-35.
- [3] Cui Y, Zhang Q, Yao M, Dong W, Gao S. Vibration piezoelectric energy harvester with multi-beam. *AIP Advances* 2015;5:41332.
- [4] Butnoi P, Pisitpipathsin N, Kantha P, Bintachitt P, Pengpat K. Phase transition and dielectric properties of PNNZT-BNLT ceramics. *Ferroelectrics*. 2013;452(1):1-6.
- [5] Garbacz H, Wieciński P, Kuczyńska D, Kubacka D, Kurzydowski KJ. The effect of grain size on the surface properties of titanium grade 2 after different treatments. *Surface and Coatings Technology* 2018;335:13-24.
- [6] Periyannan J, Muniyandi M, Venkatesan GN. Effect of thickness and annealing temperature on the properties of PZT films at morphotropic phase boundary composition prepared by sol-gel spin-on technique. *Advanced Materials Research* 2014;895:17-20.
- [7] Ma Y, Song J, Wang X, Liu Y, Zhou J. Synthesis, microstructure and properties of magnetron sputtered lead zirconate titanate (Pzt) thin film coatings. *Coatings* 2021;11(8):944.
- [8] Li J, Yuan N, Li K, Tong KY, Chan HL-W. Properties of sol-gel PZT films based on indium-tin oxide substrate. *Ferroelectrics* 2001;260(1):189-94.
- [9] Simon L, Le Dren S, Gonnard P. PZT and PT screen-printed thick films. *Journal of the European Ceramic Society* 2001;21(10):1441-4.
- [10] Shakeri A, Abdizadeh H, Golobostanfard MR. Synthesis and characterization of thick PZT films via sol-gel dip coating method. *Applied Surface Science* 2014;314:711-9.
- [11] Chen B, Wu L, Chure M, Chen Y. Fabrication of PZT BY sol-gel method. In: *Proceedings of the 2010 Symposium on Piezoelectricity, Acoustic Waves and Device Applications*. 2010. p. 310–4.

- [12] Zhang JX, Hoshino K. Chapter 2 - Fundamentals of nano/microfabrication and scale effect. In: Zhang JX, Hoshino K, editors. Molecular Sensors and Nanodevices 2nd edition. Elsevier; 2019. p. 43–111.
- [13] Maziat Akmal MH, Warikh ARM, Azlan UAA, Azmi NA. The effects of different annealing temperatures and number of deposition layers on the crystallographic properties sodium niobate (KNN) thin films synthesized by sol-gel spin coating technique. Journal of Advanced Manufacturing Technology 2017;11(1):91-102
- [14] Kwoka M, Lyson-Sypien B, Comini E, Krzywiecki M, Waczynski K, Szuber J. Surface properties of SnO₂ nanolayers prepared by spin-coating and thermal oxidation. Nanotechnology 2020;31(31):315714.
- [15] Fu D, Ishikawa K, Yoshimi Y, Suzuki H. Long-Time Piezoelectric Relaxation in Lead Zirconate Titanate Thin Film. Japanese Journal of Applied Physics 2002;41:580-2.
- [16] Godard N, Grysan P, Defay E, Glinšek S. Growth of {100}-oriented lead zirconate titanate thin films mediated by a safe solvent. Journal of Materials Chemistry C 2021;9(1):281–7.
- [17] Mohd Arif NAA, Jiun CC, Shaari S. Effect of annealing temperature and spin coating speed on Mn-Doped ZnS nanocrystals thin film by spin coating. Journal of Nanomaterials 2017:2560436.
- [18] Scriven LE. Physics and Applications of DIP Coating and Spin Coating. MRS Online Proceeding Library 1988;121(1):717–29.
- [19] Nguyen K, Bellec E, Zatterin E, Le Rhun G, Gergaud P, Vaxelaire N. Structural insights of electrical aging in PZT thin films as revealed by in situ biasing X-ray diffraction. Materials 2021;14(16):4500.
- [20] Butnoi P, Intawin P, Yongsiri P, Pisitpipathsin N, Pengpad P, Bintachitt P, et al. Effect of BCZT dopant on ferroelectric properties of PZT ceramics. Key Engineering Materials 2016;675-676:509-12.
- [21] Kim B-N, Hiraga K, Morita K, Chen I-W. Rate of creep due to grain-boundary diffusion in polycrystalline solids with grain-size distribution. Philosophical Magazine 2005; 85(20):2281-92.
- [22] Zhu Y, Ren T, Zhang N, Liu L, Li Z. Effect of annealing temperature on properties of sputtered PZT thin films. Integrated Ferroelectrics 2007;90(1):3-11.

Author's Profile

Marut Khieokae received the M.Eng. degree in Metallurgical Engineering from Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Thailand. Currently, he is a lecturer in the department of Industrial Technology, Faculty of Technical Education, Rajamangala University of Technology Krungthep, Thailand. His research interests focus on the metallic material, structure, and mechanical properties of metal.



Kanut Jinpak received the B.S.Ind.Ed. degree in Industrial Engineering from King Mongkut's University of Technology Thonburi, Thailand. Currently, he is currently a lecturer in the department of Industrial Technology, Faculty of Technical Education, Rajamangala University of Technology Krungthep, Thailand. His research interests focus on metallic materials, metal casting, and metal welding processes.



Suphattra Kritwattanakorn received the M.Eng. degree in Manufacturing Engineering from Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Thailand. Currently, she is currently a lecturer in the department of Industrial Technology, Faculty of Faculty of Technical Education, Rajamangala University of Technology Krungthep, Thailand. Her research interests focus on simulation models, production planning, and control.



Suwimol Jaitalawanich received the M.Eng. degree in Industrial Engineering from Faculty of Engineering Chulalongkorn University, Thailand., Thailand. Currently, she is currently a lecturer in the department of Industrial Technology, Faculty of Technical Education, Rajamangala University of Technology Krungthep, Thailand. Her research interests focus on process improvement, quality control and management, waste reduction, and time study.



Tinno Kwandee received the M.T. degree in Master of Technology from the Technological University of the Philippines, Philippines. Currently, he is a lecturer in the department of industrial technology at the Faculty of Technical Education, Rajamangala University of Technology Krungthep, Thailand. His research interests focus on metallic materials, metal casting, and metal welding processes.



Pichitchai Butnoi received the Ph.D. degree in Materials Science from the Faculty of Science, Chiang Mai University, Thailand. Currently, he is a lecturer in the department of industrial technology at the Faculty of Technical Education, Rajamangala University of Technology Krungthep, Thailand. His research interests focus on the fabrication and characterization of energy storage systems based on piezoelectric materials.

Article History:

Received: November 16, 2022

Revised: February 3, 2023

Accepted: February 3, 2023

การเรียนรู้แบบเสริมกำลังโดยใช้โมเดลสำหรับควบคุมการเคลื่อนที่ ในแนวระนาบของแขนหุ่นยนต์

MODEL-BASED REINFORCEMENT LEARNING FOR PLANAR MOTION CONTROL OF ROBOTIC ARMS

เมธา เมืองประเสริฐ¹ พิศักดิ์ เจิมประยงค์² และ กิตติพงษ์ บุญโล่ง^{3*}

¹นิสิต, สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

169 ถ.ลงหาดบางแสน ต.แสนสุข อ.เมืองชลบุรี จ.ชลบุรี 20131, metamps14@gmail.com

^{2,3}อาจารย์, สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

169 ถ.ลงหาดบางแสน ต.แสนสุข อ.เมืองชลบุรี จ.ชลบุรี 20131,

²pisak.ch@eng.buu.ac.th, ³kittipong@eng.buu.ac.th

Meta Mueangprasert¹, Pisak Chermprayong² and Kittipong Boonlong^{3*}

¹Student, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering Burapha University,

169 Long-Had Bangsaen Rd., Saen Suk Sub-district, Muang District, Chonburi 20131,

Thailand, metamps14@gmail.com

^{2,3}Lecturer, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering Burapha University,

169 Long-Had Bangsaen Rd., Saen Suk Sub-district, Muang District, Chonburi 20131, Thailand,

²pisak.ch@eng.buu.ac.th, ³kittipong@eng.buu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอวิธีการเรียนรู้แบบเสริมกำลังโดยใช้โมเดล (MBRL) สำหรับควบคุมการเคลื่อนที่ในแนวระนาบของแขนหุ่นยนต์ 2 องศาอิสระและ 3 องศาอิสระ โดยทดสอบผ่านกรณีศึกษา 3 ปัญหา คือ ปัญหาการวางวัตถุ ปัญหาการไปถึงเป้าหมายของแขนหุ่นยนต์ 2 องศาอิสระและ 3 องศาอิสระที่มีการเพิ่มสัญญาณรบกวนการเคลื่อนที่และมีเงื่อนไขการฝึกสอนที่แตกต่างกัน พร้อมทั้งเปรียบเทียบวิธีจลนศาสตร์แบบผกผัน (IK) กับวิธี MBRL ที่ใช้เทคนิคการถดถอยการเรียนรู้ของเครื่อง 3 เทคนิค คือ การถดถอยของกระบวนการเกาส์เซียน (GPR) โครงข่ายประสาทเทียม (ANN) และซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนสำหรับการถดถอย (SVR) ในการสร้างแบบจำลองสิ่งแวดล้อมร่วมกับวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดกลยุทธวิวัฒนาการการปรับตัวของเมทริกซ์ความแปรปรวนร่วม (CMA-ES) จากผลการทดลองพบว่าการใช้เทคนิค GPR ร่วมกับวิธี CMA-ES จะให้ประสิทธิภาพสูงสุด เนื่องจากเทคนิค GPR เป็นการประมาณความแปรปรวนสัมพัทธ์ที่พิจารณา

ถึงสัญญาณรบกวน ดังนั้นจึงทำให้ผลอัตราความสำเร็จของเทคนิค GPR มีค่าเท่ากับ 100%, 96-100% และ 98-100% ในปัญหาการวางวัตถุ ปัญหาการไปถึงเป้าหมายของแขนหุ่นยนต์ 2 องศาอิสระและ 3 องศาอิสระตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าเทคนิค ANN, SVR, และ IK อย่างชัดเจน แม้ว่าเทคนิค GPR จะใช้เวลาในการฝึกสอนมากที่สุด แต่ก็ถือว่ามีความเหมาะสมกว่าเทคนิคอื่น ซึ่งมีอัตราความสำเร็จโดยเฉลี่ยประมาณเพียง 50%

คำสำคัญ: การควบคุมแขนหุ่นยนต์, การเรียนรู้แบบเสริมกำลังโดยใช้โมเดล, การถดถอยการเรียนรู้ของเครื่อง, กลยุทธ์วิวัฒนาการการปรับตัวของเมทริกซ์ความแปรปรวนร่วม

ABSTRACT

This research proposes model-based reinforcement learning (MBRL) for planar motion control of 2-DOF and 3-DOF robotic arms. Three case studies - placing task, 2-DOF and 3-DOF reaching tasks - are used as test problems. The 2-DOF and 3-DOF reaching tasks were investigated with additional noise in motion control signal and different training techniques. Within MBRL, 3 machine learning regression techniques, Gaussian process regression (GPR), artificial neural network (ANN) and support vector regression (SVR) were used to create environment model and then combined with an optimization algorithm, covariance matrix adaptation evolution strategy (CMA-ES). They were also benchmarked with the standard technique inverse kinematics (IK). The results show that MBRL with GPR and CMA-ES has the highest performance against the other 3 techniques. Since GPR is approximating covariance that considered noise, therefore, its success rates, which are 100%, 96-100% and 98-100% success rate in placing task, 2-DOF and 3-DOF reaching task respectively, was higher than those of ANN, SVR and IK, obviously. Although GPR spent the most training time, GPR was more suitable than other techniques of which the approximately average success rate was only 50%.

KEYWORDS: robotic arm control, model-based reinforcement learning, machine learning regression, covariance matrix adaptation evolution strategy

1. บทนำ

ในอดีตแขนหุ่นยนต์ได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นอย่างมากในด้านอุตสาหกรรม ไม่ว่าจะเป็นการนำแขนหุ่นยนต์ไปใช้ในการเคลื่อนย้ายวัตถุ การนำไปใช้งานในพื้นที่แคบ ๆ หรือสภาพแวดล้อมที่มนุษย์ไม่สามารถเข้าไปทำงานได้ แต่ในปัจจุบันด้วยความก้าวหน้าของเทคโนโลยีจึงมีการนำ

หุ่นยนต์มาใช้งานในด้านอื่น ๆ มากยิ่งขึ้น เช่น ในด้านการแพทย์ที่นำแขนหุ่นยนต์มาช่วยในการผ่าตัดเปลี่ยนข้อเข่าเทียม [1] และช่วยดูแลผู้ป่วยโรคกล้ามเนื้ออ่อนแรง [2] ในด้านการเกษตรที่นำแขนหุ่นยนต์มาใช้ในการเก็บเกี่ยวมะเขือเทศ [3]

การควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์เป็นสิ่งสำคัญในการใช้งานหุ่นยนต์ โดยวิธีการที่นิยมนำมาใช้ควบคุมหุ่นยนต์อย่างอัตโนมัติ คือ การเขียนโปรแกรมพีแอลซี (Programmable logic controller; PLC) ซึ่งเหมาะกับงานที่มีรูปแบบซ้ำ ๆ เป็นเวลานาน แต่อย่างไรก็ตามหากต้องการนำไปประยุกต์ใช้สำหรับงานที่ไม่ได้มีการทำงานซ้ำ ๆ หรือมีการหยิบและวางวัตถุ (Pick and Place) ที่ตำแหน่งเริ่มต้นและเป้าหมายเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา เช่น การช่วยเหลือผู้ป่วยที่เป็นอัมพาตในการหยิบสิ่งของต่าง ๆ หรือการหยิบสินค้าบนชั้นวางตามรายการสั่งซื้อของลูกค้าในร้านสะดวกซื้อ ก็จะต้องมีการตั้งโปรแกรมการทำงานเป็นจำนวนมาก ซึ่งอาจทำให้พื้นที่ของหน่วยความจำไม่สามารถรองรับได้ วิธีการที่ถูกนำเสนอในการแก้ไขปัญหา คือ การเรียนรู้ของเครื่อง (Machine learning) โดย Jiang et al [4] ได้นำเสนอวิธีการเรียนรู้แบบเสริมกำลังเชิงลึกที่มีพื้นฐานมาจากอัลกอริทึม DDPG แบบอนสมมาตร ในการควบคุมหุ่นยนต์โดยมุ่งไปยังการหารูปภาพของเป้าหมายให้มีประสิทธิภาพ Zhang et al [5] ได้นำเสนอวิธีการเรียนรู้แบบเสริมกำลัง PPO ที่ถูกปรับปรุงสำหรับการควบคุมแขนหุ่นยนต์ 6 องศาอิสระ อีกทั้ง Joshi et al [6] ยังได้นำเสนอวิธีการเรียนรู้แบบเสริมกำลังเชิงลึก Double deep Q-learning (DDQN) ร่วมกับ Grasp-Q-Network สำหรับการจับวัตถุของแขนหุ่นยนต์ Baxter แต่อย่างไรก็ตามวิธีการดังกล่าวจะเป็นการเรียนรู้แบบเสริมกำลังโดยไม่ใช้โมเดล ซึ่งเป็นหนึ่งในประเภทของวิธีการเรียนรู้แบบเสริมกำลังที่มีข้อเสีย คือ ต้องใช้จำนวนข้อมูลและเวลาในการฝึกสอนเป็นจำนวนมากในการแก้ไขปัญหา ในขณะที่วิธีการอีกประเภทหนึ่งสามารถแก้ไขปัญหาเหล่านี้ได้ คือ การเรียนรู้แบบเสริมกำลังโดยใช้โมเดล โดยมีงานวิจัยของ Li et al [7] ที่นำเสนอวิธีการเรียนรู้แบบเสริมกำลังโดยใช้โมเดลในการควบคุมหุ่นยนต์ Baxter และ Deisenroth et al [8] ที่นำเสนอวิธีการเรียนรู้แบบเสริมกำลังโดยใช้โมเดลสำหรับควบคุมแขนหุ่นยนต์ในปัญหาการวางซ้อนกล่อง (Block stacking task) ซึ่งวิธีการดังกล่าวสามารถลดจำนวนข้อมูลและเวลาในการฝึกสอนของกรณีศึกษาได้ อีกทั้งยังให้ประสิทธิภาพการทำงานที่ดี ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอวิธีการเรียนรู้แบบเสริมกำลังโดยใช้โมเดลสำหรับควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ 2 องศาอิสระและ 3 องศาอิสระในแนวระนาบผ่านกรณีศึกษา พร้อมทั้งเปรียบเทียบเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่องที่ใช้ในวิธีการที่นำเสนอร่วมกับวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุด เพื่อหาเทคนิคที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดในการควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์

2. การเรียนรู้แบบเสริมกำลังโดยใช้โมเดล (Model-based reinforcement learning; MBRL)

การเรียนรู้แบบเสริมกำลังโดยใช้โมเดลคือหนึ่งในประเภทของการเรียนรู้แบบเสริมกำลังที่แบ่งตามการจำลองสิ่งแวดล้อมโดยการให้ตัวแทน (Agent) ได้เรียนรู้และทำความเข้าใจถึงความสัมพันธ์ของสถานะ (State) การกระทำ (Action) และรางวัล (Reward) ในสภาพแวดล้อม (Environment) ที่จำลองขึ้น เพื่อที่จะสามารถวางแผนการตัดสินใจได้ว่าควรกระทำสิ่งใดในสถานะต่าง ๆ เพื่อให้ได้รางวัลรวม (Cumulative reward) ในระยะยาวมากที่สุด [9]

2.1 แบบจำลองสิ่งแวดล้อม (Environment model)

ในการจำลองสิ่งแวดล้อมของวิธีการ MBRL เป็นการประมาณความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวแปรนำเข้า (Input variable; IV) และค่าตัวแปรส่งออก (Output variable; OV) โดยใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่องที่มีความเหมาะสมสำหรับปัญหาการถดถอย เพื่อวางแผนการตัดสินใจในการเลือกการกระทำต่อสถานะต่าง ๆ ซึ่งงานวิจัยนี้ได้นำมาประยุกต์ใช้งานทั้งหมด 3 เทคนิคดังนี้

1) การถดถอยของกระบวนการเกาส์เซียน (Gaussian process regression; GPR) เป็นระเบียบวิธีแบบเบย์เซียน (Bayesian) ที่ประมาณความแปรปรวนระหว่างข้อมูลฝึกสอนด้วยฟังก์ชันความแปรปรวนเฉพาะ [10] โดยฟังก์ชันที่นิยมใช้งานคือ Squared exponential function แสดงดังสมการที่ (1)

$$k(x, x') = \sigma_f^2 \exp \left[\frac{-(x - x')^2}{2l^2} \right] \quad (1)$$

โดย $k(x, x')$ คือ ฟังก์ชันความแปรปรวนเฉพาะระหว่าง x กับ x'

x และ x' คือ คุณลักษณะของข้อมูล

σ_f^2 คือ ค่าความแปรปรวน

l คือ ค่าความยาวสเกล (Length scale)

ในทางปฏิบัติแล้วข้อมูลมักจะมีสัญญาณรบกวน (Noise) ซึ่งอาจเกิดจากข้อผิดพลาด (Error) ในการวัดหรือสิ่งแวดล้อม เป็นต้น ดังนั้นจึงสามารถพิจารณาความสัมพันธ์ของข้อมูลดังสมการที่ 2

$$y = f(x) + N(0, \sigma_n^2) \quad (2)$$

โดย y คือ ค่าที่ต้องการทำนาย

$f(x)$ คือ ฟังก์ชันแฝง (Latent function)

N คือ สัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียน

σ_n^2 คือ ค่าความแปรปรวนในสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียน

เมื่อสัญญาณรบกวนถูกพิจารณา ฟังก์ชันความแปรปรวนเฉพาะระหว่าง x กับ x' ในสมการที่ (1) จึงเปลี่ยนเป็นดังสมการที่ (3)

$$k(x, x') = \sigma_f^2 \exp \left[\frac{-(x - x')^2}{2l^2} \right] + \sigma_n^2 \delta(x, x') \quad (3)$$

โดย $\delta(x, x')$ คือ Kronecker delta function ซึ่งจะเท่ากับ 1 หาก x, x' มีค่าเท่ากัน และเท่ากับ 0 หากเงื่อนไขเป็นอย่างอื่น

จากสมการที่ (3) ตัวแปร l, σ_f, σ_n จะต้องหาค่าที่เหมาะสมที่สุด โดยกำหนดให้เวกเตอร์ตัวแปรตัดสินใจ $\{\theta\} = \{l, \sigma_f, \sigma_n\}$

สมมติให้ $\{y\} = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ คือ ชุดข้อมูลเอาต์พุตจำนวน n ตัว โดย $x_1, x_2, \dots, x_n$ คือตัวแปรอินพุตของ $\{y\}$ และ y^* คือค่าเอาต์พุตที่ต้องการทำนายจากตัวแปรอินพุต x^* ในตอนเริ่มต้นต้องคำนวณฟังก์ชันความแปรปรวนดังสมการที่ (3) ของชุดข้อมูลทั้งหมดที่เป็นไปได้ ซึ่งจะได้เมทริกซ์ดังสมการที่ (4) และ (5) ดังนี้

$$[K] = \begin{bmatrix} k(x_1, x_1) & k(x_1, x_2) & \dots & k(x_1, x_n) \\ k(x_2, x_1) & k(x_2, x_2) & \dots & k(x_2, x_n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ k(x_n, x_1) & k(x_n, x_2) & \dots & k(x_n, x_n) \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$[K_*] = [k(x_*, x_1) \quad k(x_*, x_2) \quad \dots \quad k(x_*, x_n)], \quad [K_{**}] = [k(x_*, x_*)] \quad (5)$$

โดยการจำลองแบบกระบวนการเกาส์เซียน ข้อมูลที่มีจะสามารถแทนด้วยตัวอย่างที่สร้างจากการแจกแจงแบบเกาส์เซียนหลายตัวแปร (Gaussian normal distribution) ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \{y\} \\ y^* \end{bmatrix} \approx N \left(\{0\}, \begin{bmatrix} K & K_*^T \\ K_* & K_{**} \end{bmatrix} \right) \quad (6)$$

ทั้งนี้จะมุ่งความสนใจไปที่ความน่าจะเป็นเงื่อนไข (Conditional probability) $p(y^*|\{y\})$ ซึ่งมีความหมายว่า “เมื่อมีชุดข้อมูล $\{y\}$ ความเป็นไปได้ที่ทำนายได้ค่าเป็น y^* เป็นเท่าใด” โดยความน่าจะเป็นนี้จะขึ้นอยู่กับตามการแจกแจงแบบเกาส์เซียนดังสมการที่ (7)

$$y^*|\{y\} \approx N([K]^*[K]^{-1}\{y\}, [K_{**}] - [K_*][K]^{-1}[K_*]^T) \quad (7)$$

ค่าที่ดีที่สุดของการประมาณ y^* คือค่าเฉลี่ยของการแจกแจงดังกล่าว จะได้ดังสมการที่ (8)

$$\bar{y}^* = [K]^*[K]^{-1}\{y\} \quad (8)$$

ขณะที่ความไม่แน่นอนของการประมาณอธิบายได้ด้วยค่าความแปรปรวน ดังสมการที่ (9)

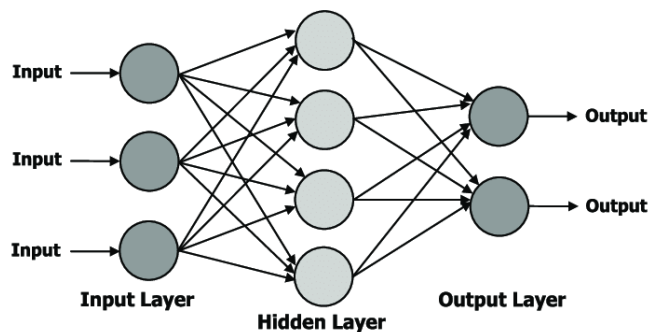
$$\text{var}(y^*) = [K_{**}] - [K_*][K]^{-1}[K_*] \quad (9)$$

ทั้งนี้จะต้องหาค่าตัวแปรตัดสินใจ $\{\theta\} = \{\mu, \sigma, \sigma_n\}$ ที่เหมาะสมที่สุด โดยมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่กำหนดตามทฤษฎีของเบย์ (Bayes' theorem) ซึ่งแสดงด้วยค่าลอการิทึมความคล้าย (Likelihood Logarithm) ดังสมการที่ (10)

$$\log p(\{y\}|\{x\}, \{\theta\}) = -\frac{1}{2}\{y\}^T[K]^{-1}\{y\} - \frac{1}{2}\log(\det([K])) - \frac{n}{2}\log 2\pi \quad (10)$$

หลังจากได้ค่าตัวแปรตัดสินใจที่เหมาะสมก็ถือเป็นอันเสร็จสิ้นการจำลองของวิธี GPR

2) โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial neural network; ANN) เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ลอกเลียนแบบการทำงานมาจากระบบประสาทของมนุษย์ให้มาอยู่บนเครื่องคอมพิวเตอร์ เพื่อให้คอมพิวเตอร์สามารถคิด วิเคราะห์ และประมวลผลได้ในลักษณะเดียวกับโครงข่ายประสาทของมนุษย์ [11] โดยจะมีชั้นการทำงานทั้งหมด 3 ชั้น (รูปที่ 1) คือ 1) ชั้นข้อมูลนำเข้า (Input layer) เป็นชั้นที่ทำหน้าที่ในการรับข้อมูลเข้ามาในโครงข่ายประสาท และส่งต่อไปยังชั้นแอบแฝง 2) ชั้นแอบแฝง (Hidden layer) เป็นชั้นที่ทำหน้าที่ประมวลผลข้อมูลเพื่อส่งต่อไปยังชั้นข้อมูลส่งออก โดยในชั้นนี้สามารถมีได้มากกว่า 1 ชั้น และในแต่ละชั้นสามารถมีได้มากกว่า 1 โหนด 3) ชั้นข้อมูลส่งออก (Output layer) เป็นชั้นที่ทำหน้าที่รับข้อมูลจากชั้นแอบแฝงในชั้นสุดท้าย และทำการแสดงผลที่ได้จากการประมวลผลในโครงข่ายประสาทเทียม



รูปที่ 1 ชั้นการทำงานของโครงข่ายประสาทเทียม [12]

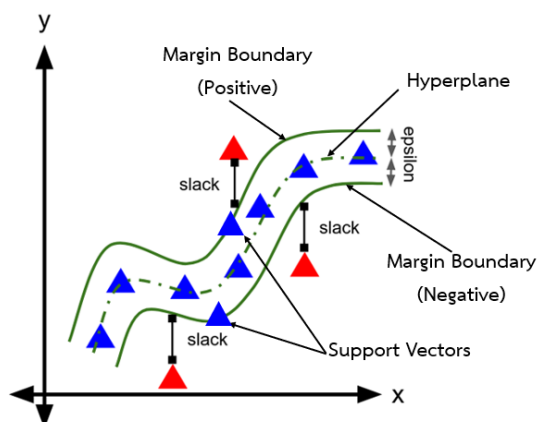
3) ซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนสำหรับการถดถอย (Support vector regression; SVR) เป็น การสร้างแนวแบ่งข้อมูล (Hyperplane) ด้วยฟังก์ชันเคอร์เนล (Kernel function) เพื่อใช้ในการ ทำนายค่า (สมการที่ 11 แสดงฟังก์ชันเคอร์เนลเรเดียลเบสิส (Radial basis function; RBF)) โดย หาระยะห่างระหว่างเส้นขอบเขต (Margin boundary) กับแนวแบ่งข้อมูลที่มีค่าเหมาะสมที่สุด ซึ่งจุด ที่อยู่บนเส้นขอบเขตจะเรียกว่า ซัพพอร์ตเวกเตอร์ (Support vectors) [13] แสดงดังรูปที่ 2

$$K(x, x') = \exp \left[-\frac{\|x - x'\|^2}{2\sigma^2} \right] \quad (11)$$

โดย $K(x, x')$ คือ ฟังก์ชันความแปรปรวนระหว่าง x กับ x'

x และ x' คือ คุณลักษณะของข้อมูล

σ คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

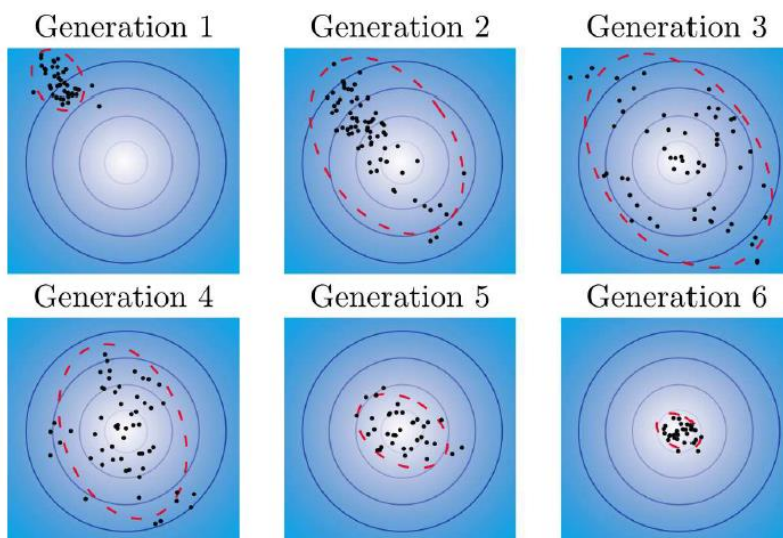


รูปที่ 2 องค์ประกอบของซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนสำหรับการถดถอย [14]

2.2 วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุด (Optimization algorithm)

ในการเลือกการกระทำต่อสถานะต่าง ๆ จะประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดเพื่อหาการกระทำที่ดีที่สุดจากแบบจำลองสิ่งแวดล้อมที่สร้างขึ้น ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วิธีกลยุทธ์วิวัฒนาการการปรับตัวของเมทริกซ์ความแปรปรวนร่วม (Covariance matrix adaptation evolution strategy; CMA-ES) ที่เป็นการใช้เทคนิคของเมทริกซ์ความแปรปรวนร่วมในการหาค่าตอบและเหมาะสมสำหรับปัญหาที่มีความสัมพันธ์แบบไม่เชิงเส้น อีกทั้งยังเป็นวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบสุ่มโดยไม่ใช้อนุพันธ์ (Derivative-free optimization) [15]

ขั้นตอนในการหาค่าตอบของ CMA-ES (รูปที่ 3) โดยสรุปเป็นขั้นตอนดังแสดงเป็นแต่ละข้อ โดยตัวแปรที่เขียนอยู่ในเครื่องหมาย {...} แทนเวกเตอร์ที่มีขนาดเท่ากับ $n \times 1$ โดย (n) เป็นจำนวนตัวแปรที่ทำการหาค่าเหมาะสมที่สุด ขณะที่ตัวแปรที่อยู่ในเครื่องหมาย [...] คือเมทริกซ์ขนาด $n \times n$ และตัวแปรที่อยู่นอกเหนือจากที่กล่าวมาเป็นค่าสเกลาร์



รูปที่ 3 การหาค่าตอบของ CMA-ES [16]

(1) กำหนดตัวแปรค่าคงที่ได้แก่ ขนาดประชากรคำตอบ (Population size; λ) ขนาดตัวอย่าง (Sample size) จำนวนคำตอบรุ่นลูก (Number of offspring) และ μ เป็นจำนวนคำตอบรุ่นพ่อแม่ (Parent number) ที่ถูกเลือก จำนวนจุดค้นหาที่ถูกเลือกในประชากร (Number of selected search points in the population) โดยที่ $\mu \leq \lambda$

(2) กำหนดค่าเริ่มต้นของค่าเฉลี่ย (Mean; m) ขนาดก้าว (Step size; σ) เมทริกซ์ความแปรปรวน $[C] =$ เมทริกซ์เอกลักษณ์ (Identity matrix) $[I]$ เส้นทางวิวัฒนาการแบบไอโซทรอปิก

(Isotropic evolution path) $\{p_s\} = \{0\}$ เส้นทางวิวัฒนาการแบบแอนไอโซทรอปิก (Anisotropic evolution path) $\{p_s\} = \{0\}$

(3) สุ่มค่าตอบใหม่แล้วประเมินสร้างคำตอบ x ใหม่จากการแจกแจงแบบปกติหลายตัวแปร (Multivariate normal distribution) ที่มีตำแหน่งค่าเฉลี่ย $= \{m\}$ และเมทริกซ์ความแปรปรวน $[V] = \sigma^2[C]$

(4) คำนวณค่าความแข็งแรง (Fitness; f_i) ของ $\{x_i\}$ แต่ละตัวจากฟังก์ชันที่ต้องการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด

(5) จัดเรียง $\{x_1\}, \{x_2\}, \dots, \{x_n\}$ ตามค่าความแข็งแรง โดย $\{x_1\}$ จะให้ค่าความแข็งแรงมากที่สุด ดังนั้นจึงเป็นคำตอบที่ดีที่สุด

(6) อัปเดต $\{m\}$ โดยใช้ค่า $\{x_1\}, \{x_2\}, \dots, \{x_n\}$

(7) อัปเดต $\{p_s\}$ โดยใช้ค่าปัจจุบันของ $\{p_s\}, \sigma, [C]$ และ $\{m\}-\{m'\}$

(8) อัปเดต $\{p_s\}$ โดยใช้ค่าปัจจุบันของ $\{p_s\}, \sigma, \{m\}-\{m'\}$ และ $\{p_s\}$

(9) อัปเดต $[C]$ โดยใช้ค่าปัจจุบันของ $[C], \{p_s\}, \{x\}-\{m'\}, \sigma$

(10) อัปเดต σ โดยใช้ค่าปัจจุบันของ σ และ $\{p_s\}$

(11) สิ้นสุดการค้นหาคำตอบ เมื่อจำนวนรอบซึ่งนับจากขั้นตอนที่ 3 - 10 ครบตามค่าที่กำหนดไว้ และจะได้ $\{x_1\}$ เป็นผลลัพธ์ของการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดของ CMA-ES

3. การดำเนินการของวิธีการเรียนรู้แบบเสริมกำลังโดยใช้โมเดล

ในการฝึกสอน (Training) ของวิธี MBRL จะเริ่มต้นจากการให้ตัวแทนเคลื่อนที่แบบสุ่มในแต่ละครั้ง (Step) ของรอบการทำงาน (Episode) พร้อมเก็บข้อมูลของสถานะ (State; S) การกระทำ (Action; A) และสถานะถัดไป (Next state; S') จนครบจำนวนรอบที่กำหนดไว้ เพื่อนำมาใช้ในการสร้างแบบจำลองสิ่งแวดล้อมด้วยเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง โดยมีข้อมูลนำเข้า คือ สถานะและการกระทำ ข้อมูลส่งออก คือ สถานะถัดไป จากนั้นในรอบการทำงานถัดไปจึงกำหนดตำแหน่งเป้าหมายที่ต้องการให้ตัวแทนไปถึงแบบสุ่มที่มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ และนำขั้นตอนวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดมาใช้ในการหาการกระทำที่ดีที่สุดของแต่ละครั้งการเคลื่อนที่จากแบบจำลองสิ่งแวดล้อมที่สร้างขึ้น พร้อมเก็บข้อมูลของสถานะ การกระทำและสถานะถัดไปจนครบจำนวนครั้งสูงสุดที่กำหนดไว้หรือเคลื่อนที่ไปถึงเป้าหมายในแต่ละรอบ แล้วนำข้อมูลที่ได้นำไปรวมกับชุดข้อมูลเดิมเพื่อสร้างแบบจำลองสิ่งแวดล้อมอีกครั้ง และทำซ้ำจนกระทั่งตรงตามเงื่อนไขของการหยุดสร้างแบบจำลองสิ่งแวดล้อม เช่น ครบจำนวนรอบสูงสุดที่กำหนดไว้ในการสร้างแบบจำลองสิ่งแวดล้อมหรือตัวแทนเคลื่อนที่ไปถึงเป้าหมายติดต่อกันเป็นจำนวน N รอบ จากนั้นจึงนำแบบจำลองสิ่งแวดล้อมมาใช้ในการทดสอบ (Test) เพื่อหาประสิทธิภาพของแบบจำลอง

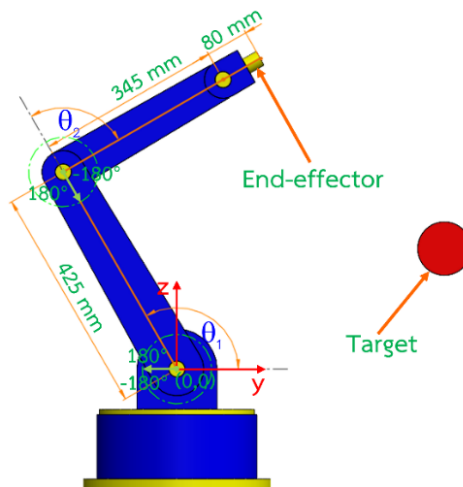
4. กรณีศึกษา

4.1 ปัญหาการไปถึงเป้าหมายของแขนหุ่นยนต์ 2 องศาอิสระ (2-DOF Reaching task)

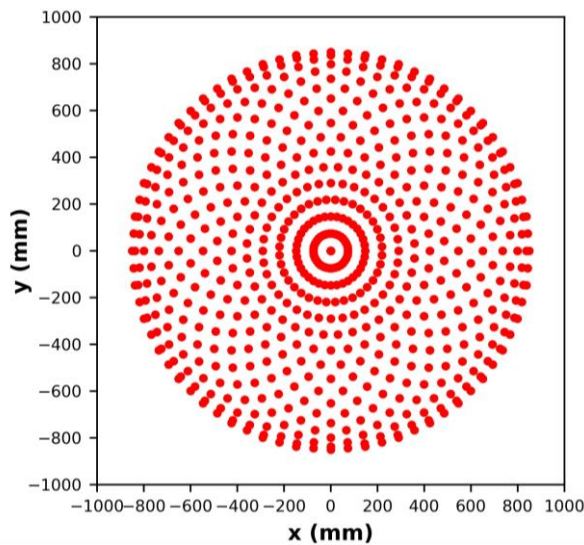
ปัญหาการไปถึงเป้าหมายของแขนหุ่นยนต์ 2 องศาอิสระเป็นการควบคุมการเคลื่อนที่แบบเชิงมุม (Angular motion) ด้วยการหมุนของมุมข้อต่อ 2 มุมในระนาบ yz เพื่อให้ปลายแขนหุ่นยนต์ (End-effector) ไปถึงตำแหน่งเป้าหมายที่ต้องการ 0 ซึ่งแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 กรณี คือ

1) การควบคุมการหมุนของมุมข้อต่อที่มีการกำหนดจำนวนรอบสูงสุดในการสร้างแบบจำลองสิ่งแวดล้อมและการเพิ่มสัญญาณรบกวนแบบเอกรูป (Uniform noise) ของการหมุนที่มีค่าเท่ากับ 0.0% 2.5% 5.0% 7.5% 10.0% 15.0% และ 20.0% เนื่องจากในทางปฏิบัติแล้วหากต้องการควบคุมให้มุมข้อต่อหมุนไปยังมุมที่ต้องการ อาจมีปัจจัยที่ส่งผลให้มุมที่วัดได้จริงมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นได้ เช่น สัญญาณทางไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมุมข้อต่อ โดยหากส่งสัญญาณการควบคุมให้มุมข้อต่อหมุนไปยังมุม 40 องศา มุมที่เป็นไปได้จากการหมุนจะมีค่าอยู่ระหว่าง 36 ถึง 44 องศาในกรณีที่มีสัญญาณรบกวนเท่ากับ 10.0%

ในแต่ละครั้งการเคลื่อนที่ มุมข้อต่อทั้ง 2 มุมสามารถหมุนได้ระหว่าง -45 ถึง 45 องศา และมีขอบเขตของการหมุนอยู่ระหว่าง -180 ถึง 180 องศา แสดงดังรูปที่ 4 ดังนั้นจึงทำให้มีตำแหน่งเป้าหมายที่เป็นไปได้แสดงดังรูปที่ 5

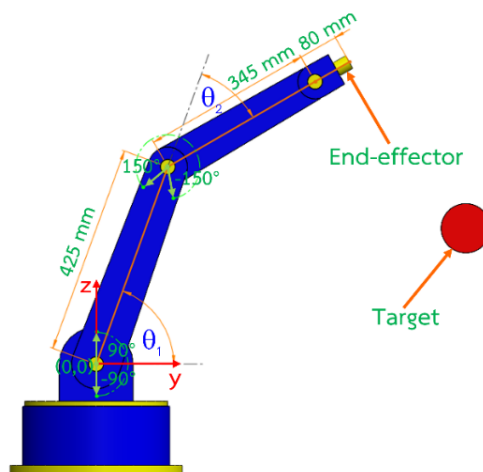


รูปที่ 4 การจำลองปัญหา 2-DOF Reaching task กรณีที่ 1

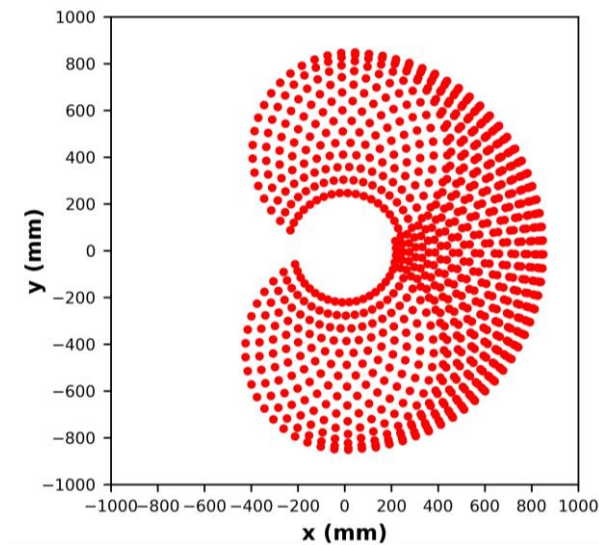


รูปที่ 5 ตำแหน่งเป้าหมายที่เป็นไปได้ของปัญหา 2-DOF Reaching task กรณีที่ 1

2) การควบคุมการหมุนของมุมข้อต่อที่ไม่มีกำหนดจำนวนรอบสูงสุดในการสร้างแบบจำลองสิ่งแวดล้อมและไม่มีการเพิ่มสัญญาณรบกวนของการหมุน โดยในแต่ละครั้งของการเคลื่อนที่ มุมข้อต่อทั้ง 2 มุมจะสามารถหมุนได้ระหว่าง -11.46 ถึง 11.46 องศา และมีขอบเขตการหมุนของมุมข้อต่อที่ 1 อยู่ระหว่าง -90 ถึง 90 องศา มุมข้อต่อที่ 2 อยู่ระหว่าง -150 ถึง 150 องศา แสดงดังรูปที่ 6 ดังนั้นจึงทำให้มีตำแหน่งเป้าหมายที่เป็นไปได้แสดงดังรูปที่ 7



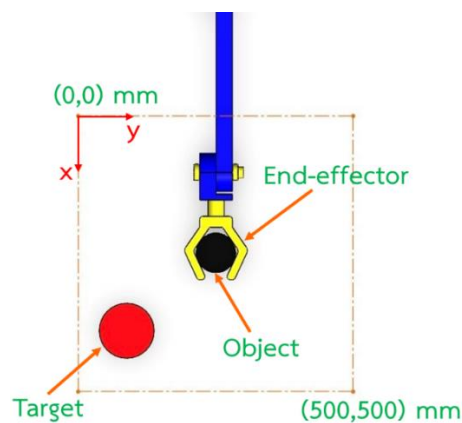
รูปที่ 6 การจำลองปัญหา 2-DOF Reaching task กรณีที่ 2



รูปที่ 7 ตำแหน่งเป้าหมายที่เป็นไปได้ของปัญหา 2-DOF Reaching task กรณีที่ 2

4.2 ปัญหาการวางวัตถุ (Placing task)

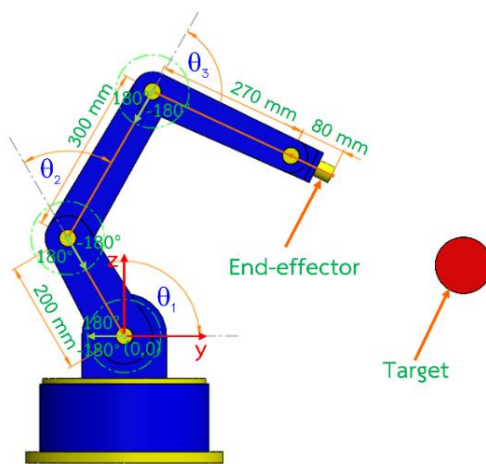
ปัญหาการวางวัตถุเป็นการนำวัตถุไปวางยังตำแหน่งเป้าหมายที่ต้องการ ผ่านการควบคุมการเคลื่อนที่แบบเชิงเส้น (Linear motion) ของปลายแขนหุ่นยนต์ในระนาบ xy [4] โดยในแต่ละครั้งของการเคลื่อนที่จะสามารถเคลื่อนที่ได้ระหว่าง -30 ถึง 30 มม. ทั้งในแนวแกน x และแกน y อีกทั้งยังมีขอบเขตของการเคลื่อนที่และตำแหน่งเป้าหมายในแต่ละแกนอยู่ภายใน 500 มม. แสดงดังรูปที่ 8



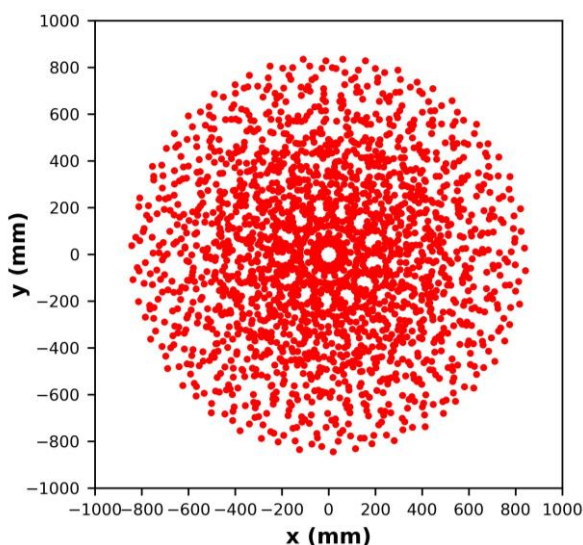
รูปที่ 8 การจำลองปัญหาการวางวัตถุ

4.3 ปัญหาการไปถึงเป้าหมายของแขนหุ่นยนต์ 3 องศาอิสระ (3-DOF Reaching task)

ปัญหาการไปถึงเป้าหมายของแขนหุ่นยนต์ 3 องศาอิสระจะมีวัตถุประสงค์ของปัญหาเหมือนกับปัญหาการไปถึงเป้าหมายของแขนหุ่นยนต์ 2 องศาอิสระ แต่จะเป็นการควบคุมการหมุนของมอเตอร์ 3 มุม โดยในแต่ละครั้งการเคลื่อนที่ มุมข้อต่อทั้ง 3 มุมจะสามารถเคลื่อนที่ด้วยการหมุนระหว่าง -45 ถึง 45 องศา และมีขอบเขตการหมุนอยู่ระหว่าง -180 ถึง 180 องศา แสดงดังรูปที่ 9 ในทำนองเดียวกันกับปัญหา 2-DOF Reaching task กรณีที่ 1 ตำแหน่งเป้าหมายที่เป็นไปได้แสดงดังรูปที่ 10 อีกทั้งยังมีการเพิ่มสัญญาณรบกวนแบบเอกรูปของการหมุนที่เท่ากับ 0.0% 5.0% และ 10.0%



รูปที่ 9 การจำลองปัญหา 3-DOF Reaching task



รูปที่ 10 ตำแหน่งเป้าหมายที่เป็นไปได้ของปัญหา 3-DOF Reaching task

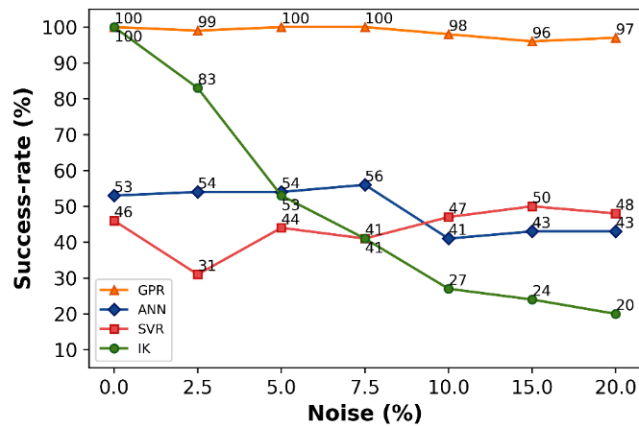
ในการกำหนดสถานะและการกระทำของแต่ละปัญหา จะกำหนดให้สถานะเป็นตำแหน่งพิกัดปลายแขนหุ่นยนต์ในระนาบ yz การกระทำเป็นการหมุนของมุมข้อต่อทั้ง 2 มุมและ 3 มุมสำหรับปัญหาการไปถึงเป้าหมายของแขนหุ่นยนต์ 2 องศาอิสระและ 3 องศาอิสระตามลำดับ แต่ในส่วนของปัญหาการวางวัตถุ จะกำหนดให้ตำแหน่งพิกัดปลายแขนหุ่นยนต์ในระนาบ xy เป็นสถานะ การเคลื่อนที่ในแกน x และแกน y เป็นการกระทำ อีกทั้งการให้รางวัลของทุกปัญหาจะกำหนดให้มีค่าเท่ากับระยะห่างระหว่างปลายแขนหุ่นยนต์กับเป้าหมาย

5. ผลการทดลอง

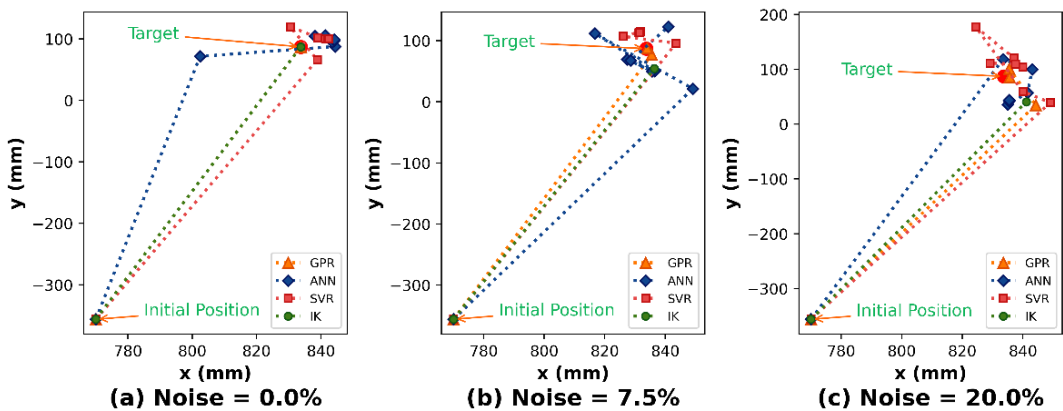
งานวิจัยนี้ดำเนินการทดสอบผ่านการเขียนโปรแกรมภาษาไพทอน (Python) ด้วยคอมพิวเตอร์ที่ใช้ GPU รุ่น NVIDIA GeForce MX150 และได้กำหนดรายละเอียดเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่องที่นำมาใช้ในวิธีการ MBRL เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงาน โดยเทคนิค GPR จะใช้ฟังก์ชันค่าคงที่ (Constant kernel) ฟังก์ชันเรเดียลเบสิส (Radial basis function) และฟังก์ชันสีขาว (White kernel) เป็นฟังก์ชันเคอร์เนล เทคนิค ANN จะใช้จำนวนชั้นแอบแฝงเท่ากับ 6 ชั้นและในแต่ละชั้นมีจำนวน 30 โหนด อีกทั้งยังใช้ฟังก์ชันกระตุ้น คือ ฟังก์ชันเรล (ReLU) ในชั้นแอบแฝงและฟังก์ชันไฮเพอร์โบลิกแทนเจนต์ (Tanh) ในชั้นข้อมูลส่งออก และเทคนิค SVR ใช้ฟังก์ชันเรเดียลเบสิสเป็นฟังก์ชันเคอร์เนล ซึ่งประสิทธิภาพการทำงานจะวัดด้วยอัตราความสำเร็จ (Success rate) ที่คำนวณจากการทดสอบ (Test) การเคลื่อนที่ไปยังเป้าหมายที่เกิดจากการสุ่ม โดยมีระยะห่างระหว่างปลายแขนหุ่นยนต์กับเป้าหมายที่ยอมรับได้น้อยกว่าหรือเท่ากับ 10 มม. เป็นจำนวน 100 รอบสุดท้ายในการฝึกสอน อีกทั้งการทดสอบในทุกปัญหาจะไม่พิจารณาถึงความเร็วและความแรงในการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์เป็นสถานะในการเรียนรู้ ซึ่งเป็นทำนองเดียวกันกับงานวิจัยของ Libera et al [17] โดยในทางปฏิบัติแล้ว ส่วนใหญ่เช่นเซอร์วัดความเร็วและความแรงจะไม่ค่อยมีการนำมาใช้งานเนื่องจากมีต้นทุนที่สูง ทั้งนี้ในกรณีนี้ความเร็วและความแรงก็จะคำนวณด้วยค่าเชิงตัวเลขจากตำแหน่งของปลายแขนหุ่นยนต์ ทำให้มีความแตกต่างกันระหว่างสัญญาณจริงกับสัญญาณโดยการประมาณ ซึ่งค่าที่แตกต่างกันนี้จะส่งผลให้เกิดสัญญาณรบกวนกับตำแหน่งของปลายแขนหุ่นยนต์ รวมถึงในการควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ในทางปฏิบัติ ก็อาจจะมีตำแหน่งที่คลาดเคลื่อนไปเนื่องจากแรงเฉื่อยที่เกิดขึ้นเนื่องจากความเร็วและความแรง รวมถึงความคลาดเคลื่อนเนื่องจากเซ็นเซอร์วัดตำแหน่ง ซึ่งความคลาดเคลื่อนดังกล่าวนี้ก็ถือเป็นสัญญาณรบกวนต่อตำแหน่งของปลายแขนหุ่นยนต์เช่นเดียวกัน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงพิจารณาทั้งกรณีศึกษาที่ไม่มีสัญญาณรบกวนและมีสัญญาณรบกวนเพื่อให้สอดคล้องกับการประยุกต์ใช้ต่อไป โดยปัญหาการไปถึงเป้าหมายของแขนหุ่นยนต์ 2 องศาอิสระกรณีที่มีการเพิ่มสัญญาณรบกวนได้กำหนดให้แขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่แบบสุ่ม 1 รอบการทำงานจำนวน 7 ครั้ง และมีจำนวนรอบสูงสุดในการสร้าง

แบบจำลองสิ่งแวดล้อมเท่ากับ 250 รอบ ซึ่งในแต่ละรอบสามารถเคลื่อนที่ได้สูงสุด 7 ครั้ง อีกทั้งตำแหน่งมุมข้อต่อเริ่มต้นจะเกิดจากการสุ่มในทุกรอบการทำงาน

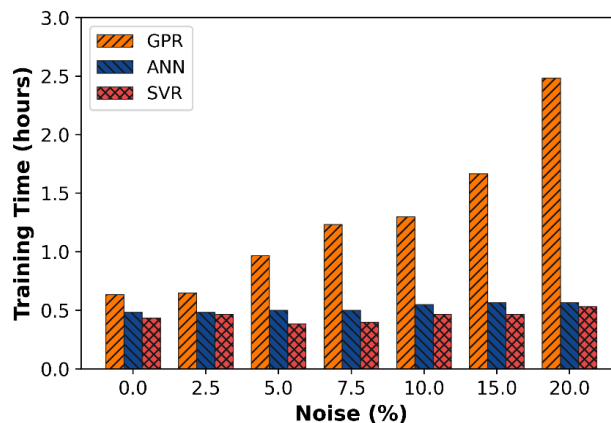
จากรูปที่ 11 เป็นการเปรียบเทียบอัตราความสำเร็จของแต่ละเทคนิคในวิธี MBRL และวิธี จลนศาสตร์แบบผกผัน (Inverse kinematic; IK) ที่เป็นการคำนวณในทางทฤษฎี ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดในการคำนวณมุมของข้อต่อต่าง ๆ เมื่อทราบตำแหน่งพิกัดเป้าหมาย [18] โดยพบว่าเทคนิค GPR ให้อัตราความสำเร็จสูงที่สุดในทุกสถานการณ์รอบวง เนื่องจากพื้นฐานของเทคนิค GPR จะสามารถจัดการกับสถานการณ์รอบวงได้ดี แม้สถานการณ์รอบวงเพิ่มขึ้น [10] แต่ในเทคนิค ANN และ SVR มีอัตราความสำเร็จใกล้เคียงกันในทุกสถานการณ์รอบวงเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของสถานการณ์รอบวงไม่ได้ส่งผลถึงความแม่นยำของแบบจำลอง อีกทั้งเทคนิค GPR ยังสามารถไปถึงเป้าหมายได้สำเร็จ ด้วยจำนวนครั้งการเคลื่อนที่ที่น้อยกว่าเทคนิค ANN และ SVR ดังรูปที่ 12 ซึ่งแสดงเส้นทางการเคลื่อนที่ของแต่ละเทคนิคจากตำแหน่งเริ่มต้นที่มีพิกัดเท่ากับ (770.03, -356.15) มม. ไปยังตำแหน่งเป้าหมายที่มีพิกัดเท่ากับ (833.76, 87.00) มม. ในกรณีตัวอย่างที่มีสถานการณ์รอบวงเท่ากับ 0.0% 7.5% และ 20.0% และสำหรับวิธี IK พบว่าอัตราความสำเร็จมีค่าลดลงเมื่อสถานการณ์รอบวงเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของสถานการณ์รอบวง ทำให้ข้อต่อมีความคลาดเคลื่อนในการหมุนมากยิ่งขึ้น จึงส่งผลให้ปลายแขนหุ่นยนต์ไปถึงตำแหน่งเป้าหมายได้ยากขึ้น ตัวอย่างเช่น หากตำแหน่งพิกัดเป้าหมายเท่ากับ (833.76, 87.00) มม. กรณีไม่มีสถานการณ์รอบวงจะสามารถคำนวณมุมข้อต่อที่ 1 และ 2 ได้เท่ากับ 15.5 และ -19.0 องศาตามลำดับ และสามารถหมุนไปยังตำแหน่งเป้าหมายได้สำเร็จ แต่หากมีสถานการณ์รอบวงเท่ากับ 20% อาจจะทำให้แขนหุ่นยนต์หมุนไปยังมุม 13.7 และ -21.6 องศาที่มีพิกัดเท่ากับ (841.12, 40.62) มม. ซึ่งไม่สามารถไปถึงเป้าหมายได้ เนื่องจากมีระยะห่างระหว่างปลายแขนหุ่นยนต์กับเป้าหมายเท่ากับ 44.75 มม. โดยเส้นทางการเคลื่อนที่สำหรับวิธี IK แสดงดังรูปที่ 12 แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาถึงเวลาในการฝึกสอน (Training time) ดังรูปที่ 13 จะพบว่าเทคนิค GPR ใช้เวลาการฝึกสอนมากที่สุดในทุกสถานการณ์รอบวง เนื่องจากใช้เมทริกซ์ความแปรปรวนร่วมในการคำนวณเพื่อสร้างแบบจำลอง [10] หากสถานการณ์รอบวงเพิ่มขึ้น ความยากในการคำนวณจึงยากขึ้นไปด้วย แต่ในเทคนิค ANN และ SVR มีเวลาในการฝึกสอนใกล้เคียงกันในทุกสถานการณ์รอบวง เนื่องจากมีพื้นฐานในการคำนวณที่รวดเร็ว และสถานการณ์รอบวงที่เพิ่มขึ้นไม่ได้มีผลต่อความยากในการคำนวณ



รูปที่ 11 การเปรียบเทียบอัตราความสำเร็จในแต่ละเทคนิคของปัญหา 2-DOF Reaching task กรณีที่ 1



รูปที่ 12 เส้นทางเคลื่อนที่ในแต่ละเทคนิคของปัญหา 2-DOF Reaching task กรณีที่ 1



รูปที่ 13 เวลาการฝึกสอนในแต่ละเทคนิคของปัญหา 2-DOF Reaching task กรณีที่ 1

จากผลการทดสอบของปัญหาการไปถึงเป้าหมายของแขนหุ่นยนต์ 2 องศาอิสระกรณี 1 พบว่าวิธี MBRL ที่ใช้เทคนิค GPR จะให้อัตราความสำเร็จสูงที่สุด แม้ว่าจะใช้เวลาฝึกสอนมากที่สุด แต่ในช่วงที่มีสัญญาณรบกวนต่ำ ๆ ก็ใช้เวลาที่ใกล้เคียงกับเทคนิค ANN และ SVR อีกทั้งในทางปฏิบัติแล้ว หากแขนหุ่นยนต์สามารถไปถึงเป้าหมายได้ ก็ถือว่าบรรลุวัตถุประสงค์ของปัญหา ซึ่งเทคนิค GPR ให้อัตราความสำเร็จโดยเฉลี่ยมากถึง 96-100% ในขณะที่เทคนิคอื่น ให้อัตราความสำเร็จโดยเฉลี่ยเพียง 50% เท่านั้น ดังนั้นจึงนำวิธี MBRL ที่ใช้เทคนิค GPR และ CMA-ES มาใช้ในการทดสอบสำหรับปัญหาการไปถึงเป้าหมายของแขนหุ่นยนต์ 2 องศาอิสระกรณีที่ 2 และปัญหาการวางวัตถุ หากปลายแขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปถึงเป้าหมายติดต่อกันจำนวน 100 รอบ จึงถือเป็นการสิ้นสุดการสร้างแบบจำลองสิ่งแวดล้อม จากนั้นจึงวัดอัตราความสำเร็จ ซึ่งปัญหาการไปถึงเป้าหมายของแขนหุ่นยนต์ 2 องศาอิสระกรณีที่ 2 กำหนดให้แขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่แบบสุ่มจำนวน 22 ครั้งใน 1 รอบการทำงาน และสามารถเคลื่อนที่ได้สูงสุด 22 ครั้งในแต่ละรอบการฝึกสอน และตำแหน่งมุมข้อต่อเริ่มต้นในแต่ละรอบอยู่ที่ 0 องศาของทั้ง 2 มุม สำหรับปัญหาการวางวัตถุกำหนดให้ปลายแขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่แบบสุ่มจำนวน 5 ครั้งใน 1 รอบการทำงาน และสามารถเคลื่อนที่ได้สูงสุด 17 ครั้งในแต่ละรอบการฝึกสอน โดยพิกัดปลายแขนหุ่นยนต์เริ่มต้นในแต่ละรอบอยู่ที่ (250, 250) มม.

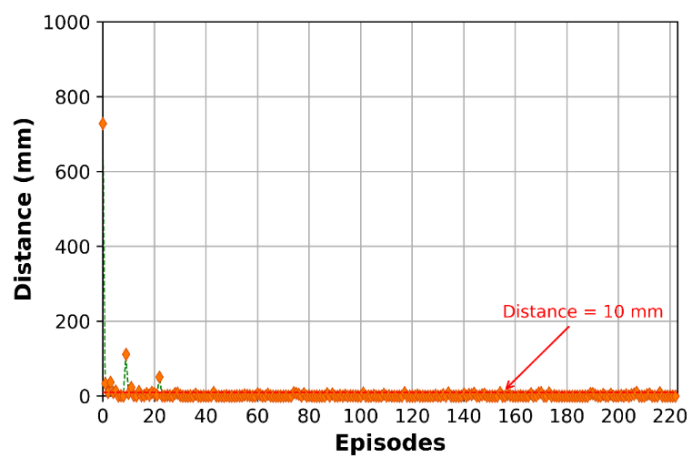
จากตารางที่ 1 และตารางที่ 2 จะพบว่าข้อมูลที่ใช้ในการฝึกสอนทั้งหมดของปัญหาการไปถึงเป้าหมายของแขนหุ่นยนต์ 2 องศาอิสระกรณีที่ 2 และปัญหาการวางวัตถุมีค่าน้อยกว่าการศึกษาก่อนหน้านี้ [4] ที่ใช้ข้อมูลในการฝึกสอนมากถึง 360,000 และ 270,000 ข้อมูลตามลำดับ อีกทั้งยังใช้เวลาในการฝึกสอนน้อยกว่าการศึกษาก่อนหน้าที่ใช้เวลามากถึง 15 ชั่วโมง 24 นาที และ 14 ชั่วโมง 1 นาทีตามลำดับ ในขณะที่อัตราความสำเร็จมีค่ามากกว่าการศึกษาก่อนหน้าที่มีอัตราความสำเร็จเพียง 95% และ 98% ตามลำดับ ซึ่งจากรูปที่ 14 ถึง รูปที่ 15 แสดงระยะห่างระหว่างปลายแขนหุ่นยนต์และเป้าหมายในแต่ละรอบการทำงานของปัญหาการไปถึงเป้าหมายของแขนหุ่นยนต์ 2 องศาอิสระกรณีที่ 2 และปัญหาการวางวัตถุ

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบปัญหา 2-DOF Reaching task กรณีที่ 2

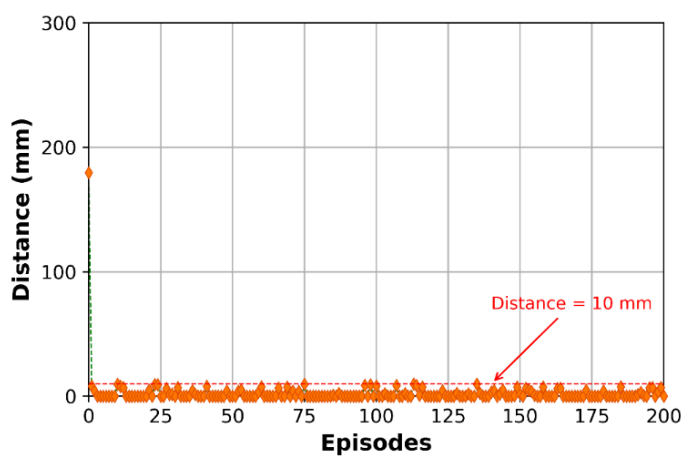
ตัวแปร	ค่า
จำนวนรอบการฝึกสอน	223
ข้อมูลในการฝึกสอน	4,906
เวลาในการฝึกสอน	3 ชั่วโมง 38 นาที
อัตราความสำเร็จ	100 %

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบปัญหาการวางวัตถุ

ตัวแปร	ค่า
จำนวนรอบการฝึกสอน	201
ข้อมูลในการฝึกสอน	3,417
เวลาในการฝึกสอน	1 ชั่วโมง 8 นาที
อัตราความสำเร็จ	100 %



รูปที่ 14 ระยะห่างในแต่ละรอบของปัญหา 2-DOF Reaching task กรณีที่ 2

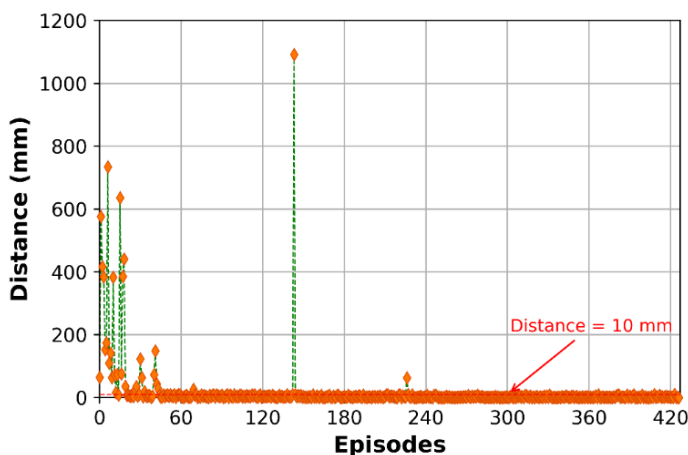


รูปที่ 15 ระยะห่างในแต่ละรอบการทำงานของปัญหาการวางวัตถุ

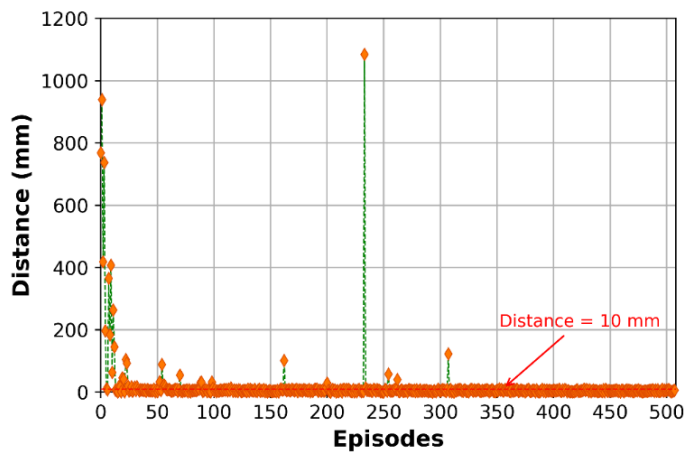
นอกจากนี้ในปัญหาการไปถึงเป้าหมายของแขนหุ่นยนต์ 3 องศาอิสระยังได้นำวิธี MBRL ที่ใช้เทคนิค GPR และ CMA-ES มาทำการทดสอบโดยเพิ่มสัญญาณรบกวนที่มีค่าเท่ากับ 0.0% 5.0% และ 10.0% หากปลายแขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปถึงเป้าหมายติดต่อกันจำนวน 100 รอบ จึงถือเป็นการสิ้นสุดการสร้างแบบจำลองสิ่งแวดล้อม จากนั้นจึงวัดอัตราความสำเร็จ อีกทั้งกำหนดให้แขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่แบบสุ่มจำนวน 7 ครั้งใน 1 รอบการทำงาน และสามารถเคลื่อนที่ได้สูงสุด 7 ครั้งในแต่ละรอบการฝึกสอนโดยตำแหน่งมุมข้อต่อเริ่มต้นของทั้ง 3 มุมจะเกิดจากการสุ่มในทุกรอบ ซึ่งจากตารางที่ 3 พบว่าเมื่อสัญญาณรบกวนมีค่ามากขึ้น จำนวนรอบการฝึกสอนและเวลาในการฝึกสอนจะมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย ในขณะที่อัตราความสำเร็จมีค่ามากถึง 98-100% โดยจากรูปที่ 16 ถึง รูปที่ 18 จะแสดงระยะห่างระหว่างปลายแขนหุ่นยนต์และเป้าหมายในแต่ละรอบการทำงานของปัญหาการไปถึงเป้าหมายของแขนหุ่นยนต์ 3 องศาอิสระในกรณีที่มีสัญญาณรบกวนเท่ากับ 0.0% 5.0% และ 10.0% ตามลำดับ

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบปัญหา 3-DOF Reaching task

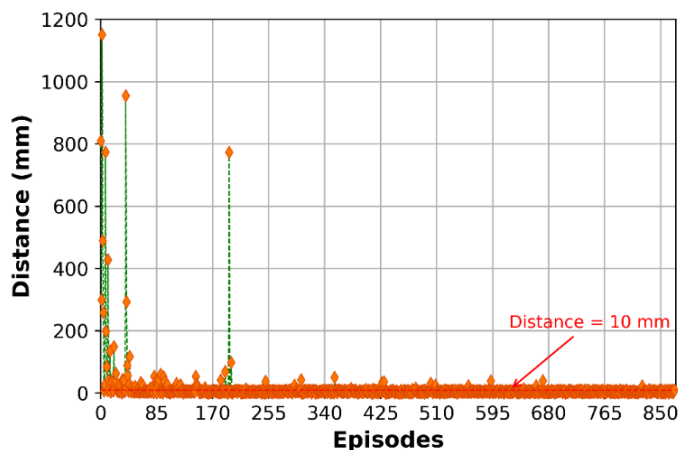
ตัวแปร	สัญญาณรบกวน		
	0.0%	5.0%	10.0%
จำนวนรอบการฝึกสอน	427	508	872
ข้อมูลในการฝึกสอน	2,989	3,556	6,104
เวลาในการฝึกสอน	1 ชั่วโมง 38 นาที	4 ชั่วโมง 58 นาที	19 ชั่วโมง 32 นาที
อัตราความสำเร็จ	100%	100%	98%



รูปที่ 16 ระยะห่างในแต่ละรอบของปัญหา 3-DOF Reaching task กรณี Noise = 0.0%



รูปที่ 17 ระยะห่างในแต่ละรอบของปัญหา 3-DOF Reaching task กรณี Noise = 5.0%



รูปที่ 18 ระยะห่างในแต่ละรอบของปัญหา 3-DOF Reaching task กรณี Noise = 10.0%

6. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธี MBRL เพื่อใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ 2 องศาอิสระและ 3 องศาอิสระในแนวนอนผ่านกรณีศึกษา 3 ปัญหา โดยนำเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง 3 เทคนิค คือ GPR, ANN และ SVR มาใช้ในการสร้างแบบจำลองสิ่งแวดล้อมร่วมกับการหาค่าเหมาะสมที่สุด CMA-ES พร้อมทั้งเปรียบเทียบกับวิธี IK จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า การใช้เทคนิค GPR ร่วมกับการหาค่าเหมาะสมที่สุด CMA-ES จะมีประสิทธิภาพมากที่สุดเมื่อเทียบกับเทคนิคอื่น ๆ และวิธี IK โดยมีอัตราความสำเร็จสูงถึง 96-100% ในปัญหาการไปถึงเป้าหมายของแขนหุ่นยนต์ 2 องศาอิสระกรณีที่มีการกำหนดจำนวนรอบสูงสุดในการสร้างแบบจำลองสิ่งแวดล้อมและการเพิ่มสัญญาณรบกวนการเคลื่อนที่ อีกทั้งในปัญหาการไปถึงเป้าหมายของแขนหุ่นยนต์

2 องศาอิสระกรณีที่ไม่มีกำหนดจำนวนรอบสูงสุดในการสร้างแบบจำลองสิ่งแวดล้อมและปัญหาการวางวัตถุ ยังให้อัตราความสำเร็จเท่ากับ 100% รวมถึงใช้ข้อมูลและเวลาในการฝึกสอนน้อยกว่าการศึกษาก่อนหน้า และให้อัตราความสำเร็จสูงถึง 98-100% แม้มีการเพิ่มขึ้นของมุมมองต่อ ในปัญหาการไปถึงเป้าหมายของแขนหุ่นยนต์ 3 องศาอิสระ ทั้งนี้เนื่องจากเทคนิค GPR เป็นระเบียบวิธีแบบเบย์เซียน ซึ่งใช้การประมาณความแปรปรวนสัมพัทธ์ที่พิจารณาถึงสัญญาณรบกวน ดังสมการที่ (3) ดังนั้นจึงทำให้ได้ผลอัตราความสำเร็จสูงกว่าเทคนิค ANN, SVR รวมถึงวิธี IK อย่างชัดเจน แม้ว่า GPR จะใช้เวลาในการฝึกสอนมากที่สุด แต่ก็ถือว่าเหมาะสมกว่าเทคนิคอื่น ซึ่งมีอัตราความสำเร็จโดยเฉลี่ยประมาณเพียง 50% เท่านั้น ทั้งนี้จากผลการทดสอบที่ได้ ยังสามารถนำวิธี MBRL ไปใช้ประโยชน์ในการฝึกสอนกับแขนหุ่นยนต์จริง โดยการใช้กล้องในการตรวจจับพิกัดตำแหน่งของปลายแขนหุ่นยนต์ ตำแหน่งวัตถุและตำแหน่งเป้าหมายเพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับฝึกสอนของวิธีการ MBRL

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพาที่ให้การสนับสนุนในการทำงานวิจัยนี้

References

- [1] Roche M. The MAKO robotic-arm knee arthroplasty system. Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery 2021;141(12):2043-7.
- [2] Rivera GP, Eichmann C, Scherzinger S, Puck L, Roennau A, Dillmann R. Flexible, Personal service robot for ALS patients. IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO); 2019. p. 1595-600.
- [3] Zhao Y, Gong L, Liu C, Huang Y. Dual-arm robot design and testing for harvesting tomato in greenhouse. IFAC-PapersOnLine 2016;49(16):161-5.
- [4] Jiang R, Wang Z, He B, Zhou Y, Li G, Zhu Z. A data-efficient goal-directed deep reinforcement learning method for robot visuomotor skill. Neurocomputing 2021;462: 389-401.
- [5] Zhang Z, Zheng C. Simulation of robotic arm grasping control based on proximal policy optimization algorithm. Journal of Physics: Conference Series 2022;2203(1):012065.

- [6] Joshi S, Kumra S, Sahin F. Robotic grasping using deep reinforcement learning. IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE); 2020. p. 1461-66.
- [7] Li X, Shang W, Cong S. Model-based reinforcement learning for robot control. IEEE International Conference on Advanced Robotics and Mechatronics (ICARM); 2020. p. 300-5.
- [8] Deisenroth MP, Rasmussen CE, Fox D. Learning to control a low-cost manipulator using data-efficient reinforcement learning. Robotics: Science and Systems VII 2011;7:57-64.
- [9] Moerland TM, Broekens J, Jonker CM. Model-based reinforcement learning: a survey. arXiv preprint arXiv:200616712 2020.
- [10] Williams C, Rasmussen C. Gaussian processes for regression. Advances in neural information processing systems 1995;8.
- [11] Abraham A. Artificial neural networks. Handbook of measuring system design 2005
- [12] Rahimi HN, Nazemizadeh M. Dynamic analysis and intelligent control techniques for flexible manipulators: a review. Advanced Robotics 2014;28(2):63-76.
- [13] Drucker H, Burges CJ, Kaufman L, Smola A, Vapnik V. Support vector regression machines. Advances in neural information processing systems 1996;9.
- [14] Beny MA. Support vector machine: regression [Internet]. 2019 [cited 2022 Nov 15]. Available from: <https://medium.com/it-paragon/support-vector-machine-regression-cf65348b6345>
- [15] Hansen N. The CMA evolution strategy: a tutorial. arXiv preprint arXiv:160400772 2016
- [16] Tan U, Rabaste O, Adnet C, Ovarlez JP. On the eclipsing phenomenon with phase codes. IEEE International Radar Conference (RADAR); 2019. p. 1-5.
- [17] Libera DA, Romeres D, Jha DK, Yerazunis B, Nikovski D. Model-based reinforcement learning for physical systems without velocity and acceleration measurements. IEEE Robotics and Automation Letters 2020;5(2):3548-55.
- [18] Rokbani N, Alimi AM. Inverse kinematics using particle swarm optimization, a statistical analysis. Procedia Engineering 2013;64:1602-11.

ประวัติผู้เขียนบทความ



เมธา เมืองประเสริฐ นิสิตระดับมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา 169 ถ.ลงหาดบางแสน ต.แสนสุข อ.เมืองชลบุรี จ.ชลบุรี 20131

E-mail: metamps14@gmail.com

งานวิจัยที่สนใจ: Robotics, Optimization, Machine Learning, Artificial Neural Network



พิศักดิ์ เจิมประยงค์ อาจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา 169 ถ.ลงหาดบางแสน ต.แสนสุข อ.เมืองชลบุรี จ.ชลบุรี 20131

E-mail: pisak.ch@eng.buu.ac.th

งานวิจัยที่สนใจ: Unmanned Aerial Vehicle (UAV), Robot Kinematics and Dynamics, Robot Design



กิตติพงษ์ บุญโล่ง อาจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา 169 ถ.ลงหาดบางแสน ต.แสนสุข อ.เมืองชลบุรี จ.ชลบุรี 20131

E-mail: kittipong@eng.buu.ac.th

งานวิจัยที่สนใจ: Single and Multiple Objective Optimization, Evolutionary Algorithms, Mechanical Vibration, Surrogate Model Optimization, Machine Learning, Deep Learning, Reinforcement Learning

Article History:

Received: September 3, 2022

Revised: March 9, 2023

Accepted: March 9, 2023

การปรับปรุงประสิทธิภาพกระบวนการกลึงชิ้นรูปวัสดุ

KCF Guide Pin โดยใช้หลักการออกแบบการทดลอง:

บริษัท ยู เค เอ็นจิเนียริง แอนด์ ซัพพลาย จำกัด

THE IMPROVEMENT OF THE TURNING PROCESS EFFICIENCY OF KCF GUIDE PIN USING THE DESIGN OF EXPERIMENT: UK ENGINEERING & SUPPLY CO.,LTD.

ภชรดิษฐ์ แปงจิตต์¹ และ วรารุช พันธุ์บุญมี²

¹อาจารย์, สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี
ราชมงคลกรุงเทพ เลขที่ 2 ถนนนางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพฯ 10120,
Phacharadit.p@mail.rmutk.ac.th

²กรรมการบริษัท, บริษัท ยู เค เอ็นจิเนียริง แอนด์ ซัพพลาย จำกัด 23 หมู่ 9 ตำบลนาป่า
อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี 20000, Warawut@ukengineering.co.th

Phacharadit Paengchit¹ and Warawut Phanboonmee²

¹Lecturer, Department of Technology Industrial, Faculty of Technical Education,
Rajamangala University of Technology Krungthep, 2 Nang Linchi Road, Thungmahamek,
Sathon, Bangkok 10120, Thailand, Phacharadit.p@mail.rmutk.ac.th

²Director, UK Engineering & Supply Co.,Ltd., 23 M.3 Napa, Muang, Chonburi 20000,
Thailand, Warawut@ukengineering.co.th

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้สนใจศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความเรียบผิวในกระบวนการกลึงโดยอาศัยหลักการออกแบบการทดลอง (Design of Experiments) สำหรับการกลึงชิ้นรูปวัสดุ KCF Guide Pin ด้วยเครื่องกลึงอัตโนมัติ โดยเทคนิคการออกแบบการทดลองแบบแฟคตอเรียลที่มีสองปัจจัย (3^2) มีปัจจัยที่เกี่ยวข้อง คือความเร็วรอบ และอัตราการป้อน ซึ่งแต่ละปัจจัยมี 3 ระดับ ผลตอบสนองในการทดสอบครั้งนี้คือ ความหยาบผิว (Ra) โดยค่าความลึกการตัดเป็นค่าคงที่ 0.1 มิลลิเมตร ผลจากการทดสอบและนำมาวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % พบว่าปัจจัยหลักคือ อัตราการป้อน ซึ่งมีผลกระทบต่อนความหยาบผิวอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีปัจจัยร่วม คือความเร็วรอบ และมีสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยและระดับปัจจัยที่มีผลกระทบต่อนความ

หยาบผิวน้อยที่สุด คือ ความเร็วรอบ 280 รอบต่อนาที และอัตราการป้อนตัด 0.08 มิลลิเมตรต่อรอบ แสดงให้เห็นค่าความหยาบผิวน้อยสุด 0.739 μm

คำสำคัญ: ความหยาบผิว, การออกแบบการทดลอง, การวิเคราะห์ความแปรปรวน

ABSTRACT

This research has focused on finding the appropriate conditions for the factors that affect the minimum surface roughness in the turning process using the design of experiments technique of the turning process of KCF guide pins with the automatic lathe. A two-factor factorial design, speed, and feed rate were investigated. Both factors have been assigned three levels. The effect of cutting variables (depth 0.1 mm) on the surface roughness was investigated. The results from the experiment and the analysis of variance with a 95% confidence level showed that feed rate has much more influence on surface roughness than speed rate. The appropriate condition factors for speed and feed rate are 280 rpm and 0.08 mm per round, which show the minimum surface roughness is 0.739 μm .

KEYWORDS: Surface Roughness, Design of Experiments, Analysis of Variance

1. บทนำ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นรูปวัสดุเป็นอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตอย่างต่อเนื่องในการพัฒนาด้านเทคโนโลยีการผลิตและด้านบุคลากรของอุตสาหกรรมการผลิตต่างๆ ดังเช่น อุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ และอุตสาหกรรมแม่พิมพ์ เป็นต้น ซึ่งเป็นอุตสาหกรรมการผลิตที่มีความสำคัญต่อการพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศ

อุตสาหกรรมการผลิตชิ้นรูปวัสดุในปัจจุบันได้นำเอาเทคโนโลยีสมัยใหม่ช่วยในกระบวนการผลิตโดยเฉพาะเทคโนโลยีเครื่องจักรกลอัตโนมัติ (CNC Machine) เช่น เครื่องกลึงอัตโนมัติ (CNC Lathe) และเครื่องกัดอัตโนมัติ (CNC Milling) เป็นต้น สามารถทำการผลิตชิ้นงานได้จำนวนมาก ลดเวลาและลดต้นทุนการผลิตชิ้นงาน สามารถผลิตชิ้นงานมีความซับซ้อนและชิ้นงานมีคุณภาพ [1] สร้างความเชื่อมั่นในชิ้นงานและความพึงพอใจของลูกค้า ดังนั้นกระบวนการตัดเฉือนเป็นกระบวนการผลิตชิ้นรูปวัสดุ เช่น การกลึง การกัด การเจาะ เป็นต้น เครื่องกลึงอัตโนมัติ เป็นกระบวนการตัดเฉือนชิ้นรูปวัสดุ ที่ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิต และเครื่องมือตัด (Cutting Tool) เป็นเครื่องมือที่สำคัญต่อในกระบวนการตัดเฉือนการขึ้นรูปวัสดุ จะต้องมีการเลือกใช้สภาวะการตัดเฉือนที่เหมาะสมสำหรับเครื่องกลึงอัตโนมัติ ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความหยาบผิวในกระบวนการกลึงชิ้นรูปวัสดุ ได้แก่ ความเร็วรอบ อัตราการป้อน และความลึกในการกลึง [2, 3] และ

อายุการใช้งานของเครื่องมือตัด (Tool Life) [4, 5] จึงมีส่วนสำคัญอย่างมากต่อความหยาบผิวของชิ้นงาน เนื่องจากเครื่องมือตัด เริ่มมีการสึกหรอ ส่งผลให้ค่าความหยาบผิวสูงเพิ่มขึ้น และไม่ได้ตามเงื่อนไขหรือความต้องการของลูกค้าที่กำหนดและจำนวนชิ้นงานที่เสียทำให้มีต้นทุนในกระบวนการตัดเฉือนขึ้นรูปวัสดุสูงขึ้น [6, 7]

จากการสอบถามข้อมูลกับช่างเทคนิคที่มีหน้าที่รับผิดชอบควบคุมกระบวนการกลึงขึ้นรูปชิ้นงานถึงปัญหาที่เกิดขึ้นในการกระบวนการกลึงตัดเฉือนวัสดุ พบว่าค่าความหยาบผิวสำเร็จของชิ้นงานไม่ได้ตามข้อกำหนด โดยลูกค้าได้กำหนดค่าความหยาบผิว $0.8 \mu\text{m}$ หรือมีค่าความหยาบผิวน้อยกว่า $0.8 \mu\text{m}$ เนื่องจากช่างเทคนิคได้ใช้ความเร็วรอบ 240 รอบต่อนาที และอัตราการป้อน 0.06 มิลลิเมตรต่อรอบ ตามคำแนะนำของบริษัทผู้ขายเครื่องมือตัด จึงทำให้คมตัดของเครื่องมือเกิดการสึกหรอเพิ่มขึ้นในขณะการกลึงชิ้นงาน ทำให้มีผลกระทบต่อค่าความหยาบผิวของชิ้นงานและต้นทุนการกลึงชิ้นงานเพิ่มขึ้น จะต้องเปลี่ยนเครื่องมือตัดทุกครั้ง เมื่อพบว่าค่าความหยาบผิวของชิ้นงานเพิ่มขึ้น จากปัญหาในกระบวนการกลึงตัดเฉือนขึ้นรูปวัสดุดังกล่าวนี้ สามารถนำหลักการออกแบบการทดลอง มาประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงประสิทธิภาพในกระบวนการกลึงตัดเฉือน ซึ่งเป็นเครื่องมือในทางวิทยาศาสตร์และเป็นวิธีการเทคนิคทางวิศวกรรมอุตสาหการที่นำมาใช้ในอุตสาหกรรมการผลิต [8] โดยนำไปพัฒนาปรับปรุงประสิทธิภาพในกระบวนการตัดเฉือน เป็นวิธีการที่เข้าใจง่ายและสามารถนำไปใช้งานได้จริง ดังนั้นเพื่อการปรับปรุงประสิทธิภาพในกระบวนการกลึงตัดเฉือน จึงต้องทำการศึกษาวิเคราะห์ข้อมูล ทดสอบ และการพิจารณาตรวจสอบวิเคราะห์ข้อมูล โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติในการหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความหยาบผิวชิ้นงานในกระบวนการกลึงขึ้นรูปวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม KCF Guide Pin ด้วยเครื่องกลึงอัตโนมัติ ที่แปรเปลี่ยนไปตามอายุการใช้ของเครื่องมือตัด เพื่อพัฒนาปรับปรุงคุณภาพผิวของชิ้นงานหรือค่าความหยาบผิวน้อยที่สุด ในกระบวนการกลึงขึ้นรูปชิ้นงาน

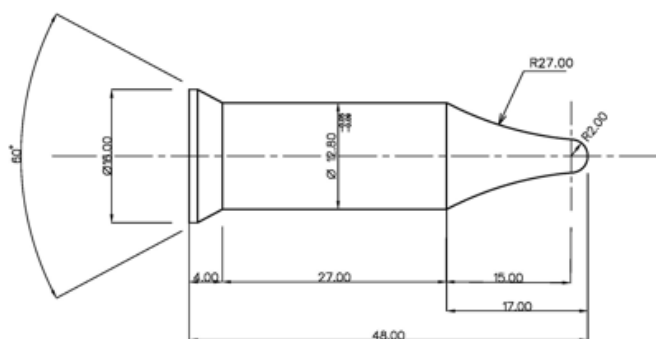
2. วิธีการทดลอง

2.1 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

ดำเนินการทดสอบการกลึงขึ้นรูปวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม KCF ด้วยเครื่องกลึงอัตโนมัติ HYUNDAI รุ่น KIT-250 โดยใช้เครื่องมือตัดเคลือบด้วย PVD Coated Carbide (KYOCERA) และด้ามจับมีดกลึงขนาด 20 X 20 มิลลิเมตร (KYOCERA) แสดงดังรูปที่ 1 ทำการกลึงวัสดุชิ้นงานตามแบบที่กำหนด แสดงดังรูปที่ 2 และวัดค่าความหยาบผิวของชิ้นงานที่ผ่านกลึงอัตโนมัติ โดยใช้เครื่องวัดความหยาบผิว Mahr Model : MarSurfPSi และบันทึกค่าความหยาบผิว แสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 1 เครื่องกลึงอัตโนมัติ การจับยึดชิ้นงานและเครื่องมือตัด



รูปที่ 2 แบบงานชิ้นงานขึ้นรูป



รูปที่ 3 การวัดค่าความหยาบผิวชิ้นงานด้วยเครื่องวัดความหยาบผิว

2.2 การกำหนดปัจจัยและผลตอบสนอง

จากปัจจัยที่มีแนวโน้มส่งผลกระทบต่อค่าความหยาบผิวในกระบวนการกลึงขึ้นรูปด้วยเครื่องกลึงอัตโนมัติ จึงได้นำวิธีการออกแบบการทดลอง ด้วยเทคนิคการออกแบบการทดลองแบบแฟคตอเรียลที่มีสองปัจจัย (3^2) (General Factorial Design) ซึ่งเป็นวิธีการเทคนิคทางวิศวกรรมอุตสาหการมาประยุกต์ใช้ในการพัฒนาปรับปรุงประสิทธิภาพในกระบวนการกลึงด้วยเครื่องกลึงอัตโนมัติ และกำหนดปัจจัยหลักที่มีผลกระทบต่อความหยาบผิว คือ ความเร็วรอบ และอัตราการป้อน และระดับของปัจจัยมี 3 ระดับที่มีผลต่อความหยาบผิว แสดงในตารางที่ 1 และผลตอบสนองในการทดสอบคือ ค่าความหยาบผิว

ตารางที่ 1 ปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดสอบ

ปัจจัย	ระดับต่ำ	ระดับกลาง	ระดับสูง	หน่วย
ความเร็วรอบ (Cutting speed)	220	250	280	รอบ/นาที
อัตราการป้อน (Feed rate)	0.04	0.06	0.08	มิลลิเมตร/รอบ

3. ผลการทดลอง

3.1 การวิเคราะห์ข้อมูลเป็นขั้นตอนที่สำคัญการออกแบบการทดลอง เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลหาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความหยาบผิวในกระบวนการกลึงขึ้นรูป ด้วยวิธีทางสถิติโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ ด้วยวิธีการการออกแบบการทดลองทั่วไป ซึ่งมีปัจจัยทั้งหมด 3^2 เท่ากับ 9 ขึ้น โดยทำการทดสอบจำนวน 3 ซ้ำ รวมจำนวนชิ้นงานทดสอบ 27 ชิ้น

3.2 ผลการทดสอบการกลึงขึ้นรูป แสดงในตารางที่ 2

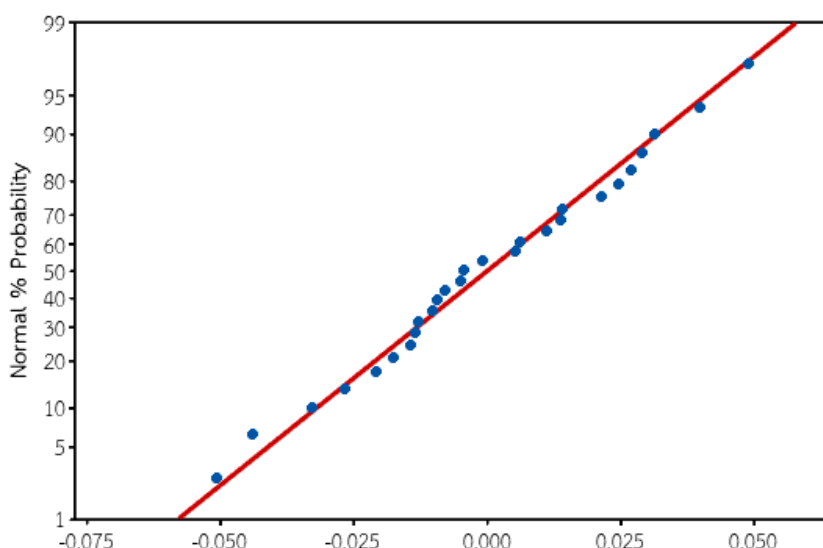
ตารางที่ 2 ค่าความหยาบผิว (R_a) ที่ได้จากการทดสอบการกลึงขึ้นรูป

ลำดับ	ความเร็วรอบ (Cutting speed) (รอบ/นาที)	อัตราการป้อน (Feed rate) (มิลลิเมตร/รอบ)	ค่าความหยาบผิว (R_a) (μm)
1	220	0.04	0.839
2	220	0.04	0.843
3	220	0.04	0.878
4	250	0.04	0.868

ตารางที่ 2 ค่าความหยาบผิว (Ra) ที่ได้จากการทดสอบการกลึงขั้นรูป (ต่อ)

ลำดับ	ความเร็วรอบ (Cutting speed) (รอบ/นาที)	อัตราการป้อน (Feed rate) (มิลลิเมตร/รอบ)	ค่าความหยาบผิว (Ra) (μm)
5	250	0.04	0.808
6	250	0.04	0.847
7	280	0.04	0.851
8	280	0.04	0.880
9	280	0.04	0.789
10	220	0.06	0.854
11	220	0.06	0.849
12	220	0.06	0.872
13	250	0.06	1.025
14	250	0.06	1.079
15	250	0.06	0.986
16	280	0.06	1.157
17	280	0.06	1.109
18	280	0.06	1.141
19	220	0.08	0.804
20	220	0.08	0.831
21	220	0.08	0.816
22	250	0.08	0.896
23	250	0.08	0.909
24	250	0.08	0.946
25	280	0.08	0.739
26	280	0.08	0.743
27	280	0.08	0.788

3.3 การวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยหลักและปัจจัยร่วม ที่มีผลกระทบต่อความหยابผิว ในกระบวนการกลึงขึ้นรูปอย่างมีนัยสำคัญ ได้จากการสังเกตแผนภาพการแจกแจงแบบปกติของข้อมูลที่ได้จากการทดสอบการกลึงขึ้นรูปมีความเหมาะสมกับในรูปแบบทางสถิติของแผนการออกแบบการทดลอง ดังรูปที่ 4 และผลจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน ดังตารางที่ 3



รูปที่ 4 การแจกแจงแบบปกติของข้อมูลการกลึงขึ้นรูปทดสอบ

ตารางที่ 3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของแผนการทดลองแบบแฟคตอเรียลที่มีสองปัจจัย (3^2)

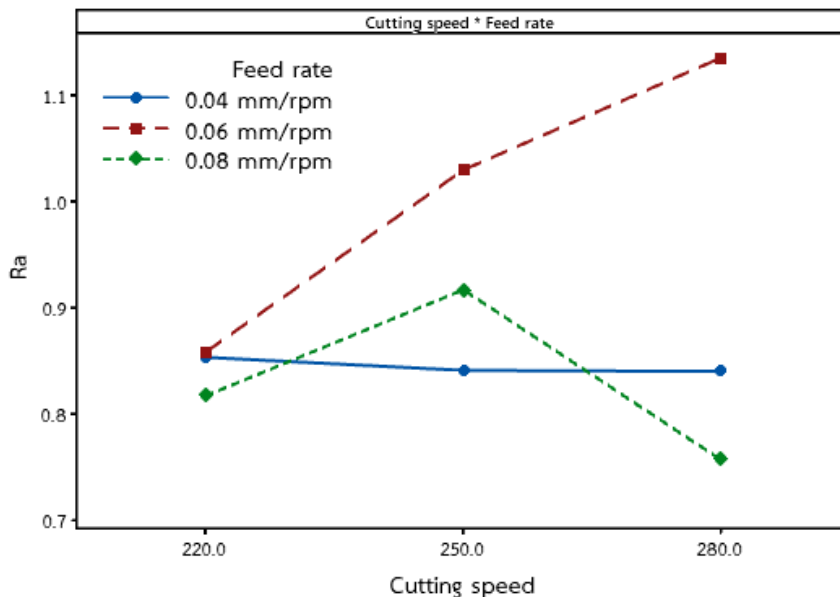
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-Value	p-valueProb >F	Remarks
Model	0.33	8	0.042	46.37	< 0.0001	significant
A-Cutting speed	0.037	2	0.019	20.79	< 0.0001	
B-Feed rate	0.18	2	0.088	97.80	< 0.0001	
AB	0.12	4	0.030	33.45	< 0.0001	
Pure Error	0.016	18	8.966E-004			
Cor Total	0.35	26				

3.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน พบว่าปัจจัยหลักและปัจจัยร่วม ที่มีอิทธิพลต่อความเรียบผิวอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีค่า P-Value ของปัจจัยมีค่าน้อยกว่า 0.05 ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองมีค่าความเชื่อมั่น 95.37 % แสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ระดับความเชื่อมั่นของค่าความหยาบผิวของชิ้นงานทดสอบ

S	R-sq	R-sq (adj)	R-sq (pred)
0.0299432	95.37 %	93.32 %	89.59 %

การหาสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความหยาบผิวน้อยที่สุด จากรูปที่ 5 เป็นกราฟแสดงผลกระทบของปัจจัยหลักซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่สภาวะที่เหมาะสมที่สุด ที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวน้อยกว่า $0.8 \mu\text{m}$ และแสดงให้เห็นว่าอัตราการป้อนเป็นปัจจัยหลักและความเร็วตัดเป็นปัจจัยร่วมที่มีผลกระทบต่อความหยาบผิว ดังนั้นปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดได้จากการประมวลผลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ ในการทดลองนี้คือ ความเร็วรอบเท่ากับ 280 รอบต่อนาที และอัตราการป้อนตัดเท่ากับ 0.08 มิลลิเมตรต่อรอบ



รูปที่ 5 กราฟแสดงปัจจัยร่วมระหว่างความเร็วรอบและอัตราการป้อนที่มีผลกระทบต่อความหยาบผิว (Ra)

3.5 การยืนยันผลการทดสอบในทางสถิติ โดยดำเนินการทดสอบภายใต้เงื่อนไขในช่วงระดับปัจจัยที่กำหนดไว้ คือความเร็วรอบเท่ากับ 280 รอบต่อนาที อัตราการป้อนตัดเท่ากับ 0.08 มิลลิเมตรต่อรอบ และความลึกในการตัด 0.1 มิลลิเมตร และทำการทดสอบยืนยันซ้ำจำนวน 20 ครั้ง แล้วนำค่าความหยาบผิวที่ได้จากการตรวจสอบ เพื่อยืนยันผลของสภาวะที่เหมาะสมของระดับปัจจัย แสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ค่าความหยาบผิว (Ra) ที่ได้จากการทดสอบยืนยันผล

ลำดับ	ความเร็วรอบ (Cutting speed) (รอบ/นาที)	อัตราการป้อน (Feed rate) (มิลลิเมตร/รอบ)	ค่าความหยาบผิว (μm)
1	280	0.08	0.792
2	280	0.08	0.807
3	280	0.08	0.784
4	280	0.08	0.796
5	280	0.08	0.793
6	280	0.08	0.815
7	280	0.08	0.789
8	280	0.08	0.799
9	280	0.08	0.809
10	280	0.08	0.816
11	280	0.08	0.793
12	280	0.08	0.810
13	280	0.08	0.788
14	280	0.08	0.743
15	280	0.08	0.789
16	280	0.08	0.796
17	280	0.08	0.807
18	280	0.08	0.788

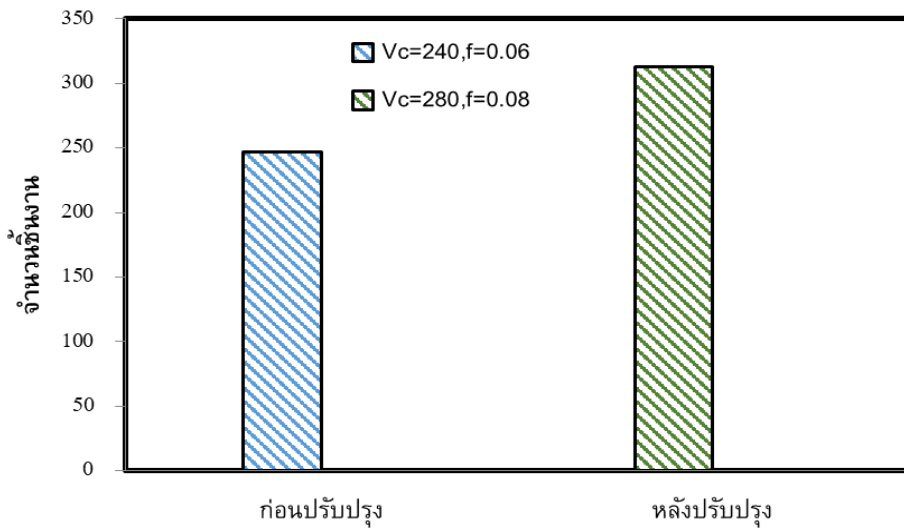
ตารางที่ 5 ค่าความหยาบผิว (Ra) ที่ได้จากการทดสอบยืนยันผล (ต่อ)

ลำดับ	ความเร็วรอบ (Cutting speed) (รอบ/นาที)	อัตราการป้อน (Feed rate) (มิลลิเมตร/รอบ)	ค่าความหยาบผิว (μm)
19	280	0.08	0.780
20	280	0.08	0.791
ค่าเฉลี่ยความหยาบผิว (μm)			0.794
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน			0.015

จากตารางที่ 5 แสดงให้เห็นค่าความหยาบผิวโดยเฉลี่ยเท่ากับ $0.794 \mu\text{m}$ และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.015 จากผลการกลึงชิ้นงานทดสอบที่สภาวะที่เหมาะสม อยู่ในช่วงของค่าความเชื่อมั่น 95 % ดังนั้นวิธีการออกแบบการทดลองและการทดสอบครั้งนี้มีความน่าเชื่อถือ สามารถนำมาช่วยพัฒนาปรับปรุงกระบวนการกลึงขึ้นรูปวัสดุได้อย่างมีประสิทธิภาพและเพิ่มจำนวนชิ้นงานในกระบวนการกลึงได้จริง

ดังนั้น สภาวะที่เหมาะสมที่สุดของระดับปัจจัยในกระบวนการกลึงเป็นตัวแปรที่สำคัญจะต้องพิจารณาที่ทำให้มีผลกระทบต่อค่าความหยาบผิวและต้นทุนการผลิตชิ้นงานเพิ่มขึ้น เนื่องจากอายุการใช้งานของเครื่องมือตัดลดลงและต้องเปลี่ยนเครื่องมือตัดบ่อยครั้ง

จากการทดสอบในครั้งนี้ โดยพิจารณาจำนวนชิ้นงานที่ได้จากการวัดค่าความหยาบผิว ไม่เกิน $0.8 \mu\text{m}$ ก่อนทำการปรับปรุงผู้ปฏิบัติงานได้กำหนดเงื่อนไขหรือปัจจัยในการตัดเฉือนตามคำแนะนำจากบริษัทผู้ผลิตเครื่องมือตัด ที่ความเร็วรอบ 240 รอบต่อนาที อัตราการป้อน 0.06 มิลลิเมตรต่อรอบ และความลึกการตัด 0.1 มิลลิเมตร ได้ชิ้นงานที่มีค่าความหยาบผิว ไม่เกิน $0.8 \mu\text{m}$ จำนวน 247 ชิ้นต่อ 1 คมตัด และหลังการปรับปรุงผู้ปฏิบัติงานได้กำหนดเงื่อนไขหรือปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จากการประมวลผลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ แสดงดังรูปที่ 5 คือความเร็วรอบเท่ากับ 280 รอบต่อนาที และอัตราการป้อนตัดเท่ากับ 0.08 มิลลิเมตรต่อรอบ โดยความลึกการตัดคงที่ 0.1 มิลลิเมตร ได้ชิ้นงานที่มีค่าความหยาบผิว ไม่เกิน $0.8 \mu\text{m}$ จำนวน 312 ชิ้นต่อ 1 คมตัด เมื่อเปรียบเทียบจำนวนปริมาณการผลิตชิ้นงานก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุง มีจำนวนชิ้นงานเพิ่มขึ้นจากการกลึงขึ้นรูปด้วยเครื่องกลึงอัตโนมัติ ที่ค่าสภาวะที่เหมาะสมที่ความเร็วรอบ 280 รอบต่อนาที และอัตราการป้อนตัด 0.08 มิลลิเมตรต่อรอบ แสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 กราฟแสดงการเปรียบเทียบจำนวนชิ้นงานที่มีค่าความหยาบผิว (R_a) ไม่เกิน $0.8 \mu m$

4. สรุป

จากการทดสอบการกลิ้งชิ้นงาน เพื่อปรับปรุงคุณภาพของชิ้นงานกลิ้งสำหรับเครื่องกลิ้งอัตโนมัติ โดยใช้วิธีการการออกแบบการทดลอง มาประยุกต์ใช้ในการหาค่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการตัดเฉือนขึ้นรูปที่มีผลกระทบต่อความหยาบผิว จากผลการทดสอบและนำมาวิเคราะห์ความแปรปรวน ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ผลจากการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าผลกระทบเนื่องจากปัจจัยหลักคือ อัตราการป้อน ซึ่งมีผลกระทบต่อความหยาบผิว อย่างมีนัยสำคัญ ($p\text{-value} < 0.05$) และ ยังแสดงให้เห็นผลกระทบของปัจจัยร่วมระหว่างปัจจัย คือ ความเร็วรอบและอัตราการป้อน มีผลกระทบต่อความหยาบผิวอย่างมีนัยสำคัญ ($p\text{-value} < 0.05$) จากการหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยและระดับปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าความหยาบผิวน้อยที่สุด คือ ความเร็วรอบ 280 รอบต่อนาที และอัตราการป้อนตัด 0.08 มิลลิเมตรต่อรอบ แสดงให้เห็นค่าความหยาบผิวน้อยสุด $0.739 \mu m$ และยืนยันผลการทดสอบในทางสถิติ โดยการกลิ้งชิ้นงานที่สภาวะที่เหมาะสมจำนวนซ้ำ 20 ครั้ง จากผลการทดสอบการกลิ้งชิ้นงานที่สภาวะที่เหมาะสมอยู่ในช่วงของค่าความเชื่อมั่น 95 %

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณคณะกรรมการอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ และ กรรมการผู้จัดการ บริษัท ยู เค เอ็นจิเนียริง แอนด์ ชัพพลาย จำกัด ที่ให้การสนับสนุนอุปกรณ์เครื่องมือในการทำวิจัยและสถานที่เก็บข้อมูลผลการทดลองครั้งนี้ด้วย

References

- [1] Grzesik W. Influence of tool wear on surface roughness in hard turning using differently shaped ceramic tools. *Wear* 2008;256:327-35.
- [2] Paengchit P, Saikaew C. Effects of cutting speed and feed rate on surface roughness in hard turning of AISI 4140 with mixed ceramic cutting tool. *Key Engineering Materials* 2018;779:153-58.
- [3] Singh H, Kumar P. Tool wear optimization in turning operation by Taguchi method. *Indian Journal of Engineering and Materials Science* 2004;11:19-24.
- [4] Aslantas K, Uzun I, Çicek A. Tool life and wear mechanism of coated and uncoated $Al_2O_3/TiCN$ mixed ceramic tools in turning hardened alloy steel. *Wear* 2012;274-275:442-51.
- [5] Tamizharasan T, Selvaraj T, Noorul Haq A. Analysis of tool wear and surface finish in hard turning. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2006;28:671-79.
- [6] Özel T, Karpt Y, Figueira L, Davim JP. Modelling of surface finish and tool flank wear in turning of AISI D2 steel with ceramic wiper inserts. *Journal of Materials Processing Technology* 2007;189:192-98.
- [7] Grzesik W, Wanat T. Surface finish generated in hard turning of quenched alloy steel parts using conventional and wiper ceramic inserts. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 2006;46(15):1988-95.
- [8] Paengchit P, Saikaew C. Feed rate affecting surface roughness and tool wear in dry hard turning of AISI 4140 steel automotive parts using $TiN+AlCrN$ coated inserts. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 2018;307:012024.

ประวัติผู้เขียนบทความ



ภชรดิษฐ์ แปงจิตต์ อาจารย์ประจำคณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
 โทรศัพท์ 02-287-9693 E-Mail: Phacharadit.p@mail.rmuk.ac.th
 Interested Field: Safety Engineering, Fire Protection System and Productivity Improvement



วรารุณ พันธุ์บุญมี กรรมการผู้จัดการ บริษัท ยูเค เอ็นจิเนียริง แอนด์ ซัพพลาย จำกัด

โทรศัพท์ 038-441-282 E-Mail: Warawut@ukengineering.co.th

Interested Field: Productivity Improvement and Process Engineering

Article History:

Received: January 11, 2023

Revised: March 31, 2023

Accepted: April 1, 2023

การเชื่อมเสียดทานแบบกวนอะลูมิเนียมผสม AA 7075-T651 โดยใช้อุปกรณ์
การเชื่อมเสียดทานแบบกวนแบบหัวกวนคู่

**FRICION STIR WELDING OF AA7075-T651 ALUMINUM ALLOY USING
DOUBLE-SIDED FRICTION STIR WELDING EQUIPMENT**

วรพงศ์ บุญช่วยแทน¹ จักรนรินทร์ ฉัตรทอง² วรธนพร ชีววุฒิพงศ์³ และ จตุพร ใจดำรงค์⁴

^{1,2,3,4}อาจารย์, สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย, 1 ถ.ราชดำเนินนอก ต.บ่อหย่าง อ.เมือง จ.สงขลา 90000

¹worapong.b@rmutsv.ac.th, ²Jaknarin.c@rmutsv.ac.th, ³watthanaphon.c@rmutsv.ac.th,

⁴jatuporn.j@rmutsv.ac.th

^{1,2,3}นักวิจัย, หน่วยวิจัยเทคโนโลยีการแปรรูปวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี
ราชมงคลศรีวิชัย, 1 ถ.ราชดำเนินนอก ต.บ่อหย่าง อ.เมือง จ.สงขลา 90000

Worapong Boonchouytan¹, Jaknarin Chatthong², Watthanaphon Cheewawuttipong³
and Jatuporn Jaidumrong⁴

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

Rajamankala University of Technology Srivijaya, 1 Ratchadamnoennok Rd. Boyang
Sub-district, Muang District, Songkhla 90000, Thailand,

¹worapong.b@rmutsv.ac.th, ²romadorn.b@hotmail.com, ³watthanaphon.c@rmutsv.ac.th,

⁴jatuporn.j@rmutsv.ac.th

^{1,2,3}Researcher, Materials Processing Technology Research Unit, Faculty of Engineering,
Rajamankala University of Technology Srivijaya, 1 Ratchadamnoennok Rd. Boyang
Sub-district, Muang District, Songkhla 90000, Thailand

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างอุปกรณ์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนแบบหัวกวนคู่ และเพื่อศึกษาการเชื่อมเสียดทานแบบกวนโดยใช้อุปกรณ์ดังกล่าว โดยที่อุปกรณ์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนแบบหัวกวนคู่มีส่วนประกอบหลัก จำนวน 5 ชิ้นส่วน ประกอบด้วย แกนเพลลาขับ ชุดเฟือง ห้องเครื่อง เพลาหมุน และหัวกวน โดยใช้วัสดุอะลูมิเนียมผสม AA7075-T651 ที่มีขนาดความกว้าง × ความยาว × ความหนา คือ 50 × 300 × 6 มิลลิเมตร ภายใต้ความเร็วหมุนเชื่อม 3 ระดับ คือ 710 1000 และ 1400 รอบต่อนาที และความเร็วเดินเชื่อม 3 ระดับ คือ 14 20 และ

40 มิลลิเมตรต่อหน้าที่ ผลการทดลองพบว่า รอยเชื่อมเมื่อเพิ่มระดับความเร็วเดินเชื่อมมากขึ้นจะเกิดช่องว่าง (Hole) ที่มีจำนวนกว้างมากขึ้นในด้าน Retreating Side อันเนื่องมาจากการเสียดทานระหว่างหัวกวนกับเนื้อวัสดุที่มีความร้อนสะสมไม่มากพอขณะเชื่อม สภาวะการเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่ความเร็วหมุนเชื่อมที่ 710 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อมที่ 14 มิลลิเมตรต่อนาที มีค่าความแข็งแรงดึงมากที่สุด คือ 360.58 MPa ค่าความแข็งสูงสุด 156.4 HV ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 710 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อม 40 มิลลิเมตรต่อนาที ส่วนค่าความแข็งแรงดัด ที่บริเวณด้านหน้า (Face Bend) สูงสุด 40.26 MPa ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 710 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อม 14 มิลลิเมตรต่อนาที และด้านหลัง (Root Bend) สูงสุด 26.10 MPa ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 710 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อม 14 มิลลิเมตรต่อนาที

คำสำคัญ: การเชื่อมเสียดทานแบบกวน, หัวกวนแบบคู่, อุปกรณ์

ABSTRACT

This research aimed to design and make double-sided friction stir welding equipment and to study friction stir welding using the double-sided friction stir welding equipment. The double-sided friction welding equipment consisted of 5 major parts, i.e. drive shaft, gear train, engine compartment, rotary shaft, and friction stir welding head. AA7075-T651 aluminum alloy was used with 50 x 300 x 6 mm (width x length x thickness) under 3 levels of stir rotation speed, i.e. 710, 1,000, and 1,400 rpm and 3 levels of welding speed, i.e. 14, 20, and 40 mm/min. The findings from the experiment showed that there were wider holes in welds at the retreating side due to the friction between the stir welding head and materials that did not absorb enough heat during the welding process. Friction stir welding at the rotation speed of 710 rpm and welding speed of 14 mm/min produced the highest tensile strength of 360.58 MPa. The highest hardness was produced at the rotation speed of 710 rpm and welding speed of 40 mm/min. The highest bending strength at the face bend, 40.26 N, was produced at rotation speed of 710 rpm and welding speed of 14 mm/min. The highest bending strength at the root bend, 26.10 N, was produced at the rotation speed of 710 rpm and welding speed of 14 mm/min.

KEYWORDS: Friction Stir Welding, Double-Sided, Equipment

1. บทนำ

ในปัจจุบันอะลูมิเนียมได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในวงการอุตสาหกรรมเป็นอย่างมากโดยเฉพาะ อุตสาหกรรมยานยนต์ที่เพิ่มมากขึ้นและมีแนวโน้มสูงขึ้นเรื่อย ๆ ดังที่จะสังเกตได้จากยานพาหนะส่วนใหญ่ใช้อะลูมิเนียมเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิต เนื่องจากข้อดีของอะลูมิเนียมที่มีน้ำหนักเบา มีอัตราส่วนความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูง มีความเหนียวสูง ทนต่อการกัดกร่อน ทนต่อการแตกหัก เชื่อมได้ดี และบำรุงรักษาได้ง่าย ทำให้ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย [1] จึงทำให้อุตสาหกรรมผลิตเครื่องบิน (Aircraft Industry) อุตสาหกรรมยานยนต์ (Automotive Industry) อุตสาหกรรมผลิตเรือ (Boat Industry) และอุตสาหกรรมผลิตรถไฟฟ้า (Electric Train Industry) นำอะลูมิเนียมไปผลิตเป็นชิ้นส่วน (Part) ต่าง ๆ ในอุตสาหกรรม เพื่อนำไปสู่ผลิตภัณฑ์ (Product) ที่มีน้ำหนักเบา ซึ่งสามารถช่วยให้ผลิตภัณฑ์มีการใช้พลังงานที่น้อยลง โดยอะลูมิเนียม เกรด 5xxx ซึ่งเป็นอะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียม เกรด 6xxx อะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียม-ซิลิกอน และเกรด 7xxx อะลูมิเนียมผสมสังกะสี โดยทั้งสามเกรดนี้มักจะได้รับความสนใจในการใช้งานวิศวกรรมอย่างมาก เพราะมีสมบัติทางกลที่ดี [2] อย่างไรก็ตามในการนำไปใช้งานของชิ้นส่วนอะลูมิเนียมผสมที่ใดก็ตาม มาข้างต้น ที่มีประสิทธิภาพจะเกี่ยวข้องกับกรรมวิธีต่อเนื่องอื่น ๆ โดยเฉพาะกรรมวิธีการขึ้นรูป (Materials Forming) เพื่อสร้างสรรค์เป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ซึ่งมีการเชื่อมต่อ (Joint) เข้ามาเกี่ยวข้องอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้

การเชื่อมเสียดทานแบบกวนมีข้อดีและข้อได้เปรียบกว่ากระบวนการเชื่อมในสภาวะหลอมละลาย เช่น มีความร้อนที่ต่ำกว่าจุดหลอมละลายของวัสดุ ทำให้ไม่เกิดรูพรุนหรือรอยแตกในแนวเชื่อม ไม่เกิดการบิดตัวของแนวเชื่อม รวมถึงการใช้อุปกรณ์ในการเชื่อมที่น้อยกว่า เป็นต้น ดังนั้นการเชื่อมเสียดทานแบบกวนจึงกลายเป็นกระบวนการที่เหมาะสมมากสำหรับการเชื่อมวัสดุ โดยเฉพาะอะลูมิเนียมที่มีความแข็งแรง [3] แต่การเชื่อมเสียดทานแบบกวนทั่ว ๆ ไป มีการนำผลงานวิจัยมาเผยแพร่และมีการวิจัยกันอย่างกว้างขวาง สำหรับการเชื่อมเสียดทานแบบกวนด้วยหัวกวนแบบคู่หนึ่งก็มีการวิจัยที่เคยดำเนินการมาก่อนหน้า อาทิเช่น การศึกษาเปรียบเทียบการเชื่อมเสียดทานแบบกวนระหว่างเครื่องมือเชื่อมแบบคู่กับเครื่องมือเชื่อมแบบเดี่ยวโดยใช้วิธีการเชิงตัวเลข จะศึกษาการกระจายอุณหภูมิ ความเครียด การไหลของวัสดุ และความเร็วของวัสดุ ผลการทดลองพบว่า การเชื่อมด้วยเครื่องมือเชื่อมทั้งสองวิธี มีความสัมพันธ์ที่ดี เครื่องมือเชื่อมแบบคู่สามารถสร้างอุณหภูมิที่สูงกว่าเครื่องมือเชื่อมแบบเดี่ยว การกระจายความเครียดมีความสมมาตรกันสำหรับเครื่องมือเชื่อมแบบคู่ในทางตรงกันข้ามกับไม่มีความสมมาตรในเครื่องมือเชื่อมแบบเดี่ยว การหมุนเชื่อมซ้อนทับกันตำแหน่งเดิมของเครื่องมือเชื่อมแบบคู่ทำให้มีโอกาสเกิดข้อบกพร่องในรอยเชื่อมน้อยลงเครื่องมือเชื่อมแบบเดี่ยว [4] การเชื่อมเสียดทานแบบกวนเครื่องมือเชื่อมแบบคู่วัสดุ AA 7108 T79 สำหรับศึกษาพารามิเตอร์ของกระบวนการเชื่อม เครื่องมือเชื่อมแบบคู่ช่วยสร้างความร้อนเพื่อให้วัสดุมีการเสียรูปพลาสติกในพื้นที่รอยเชื่อม บริเวณรอยเชื่อมปราศจาก

ข้อบกพร่อง นอกจากนี้เทคโนโลยีการกวนของเครื่องมือเชื่อมแบบคู่ส่งผลกระทบโดยตรงต่อสมบัติทางกลของรอยเชื่อม โดยพบว่าเครื่องมือเชื่อมแบบคู่หัวพินหกเหลี่ยม มีค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ยสูงสุด 208 MPa ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1500 รอบต่อนาที (rpm) และความเร็วเดินเชื่อม 70 มิลลิเมตรต่อนาที (mm/min) [5] การออกแบบและประดิษฐ์เครื่องมือเชื่อมแบบคู่เพื่อศึกษาเปรียบเทียบระหว่างเครื่องมือเชื่อมแบบคู่และเครื่องมือเชื่อมแบบเดี่ยว ด้วยกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน เครื่องมือเชื่อมแบบคู่สามารถช่วยให้เกิดการสร้างความร้อนที่สูงขึ้น ทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปเชิงพลาสติกอย่างรุนแรงในบริเวณแนวเชื่อม การเชื่อมที่ปราศจากข้อบกพร่องนั้นไม่ได้ขึ้นอยู่กับความเร็วหมุนเชื่อมเท่านั้น แต่ยังขึ้นอยู่กับปัจจัยของความเร็วเดินเชื่อมและความเร็วหมุนเชื่อมด้วย ค่าความแข็งที่สูงขึ้นนั้นสังเกตได้จากความเร็วเดินเชื่อมและความเร็วหมุนเชื่อมที่สูงขึ้น [6] จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องข้างต้นจะพบว่า เครื่องมือเชื่อมแบบเดี่ยวสำหรับการเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่ใช้อยู่ในปัจจุบันมีการหมุนวนของเนื้อโลหะที่ไม่ทั่วถึง หรือการหมุนวนของเนื้อโลหะไม่เข้ากันดี ดังนั้นจึงเสนอการเชื่อมเสียดทานแบบกวนชนิดหัวกวนแบบคู่ (Double Twin Shoulder) ในการที่จะกำจัดข้อด้อยเหล่านั้นและส่งผลทำให้มีประสิทธิภาพพรอยเชื่อมที่ดีกว่า

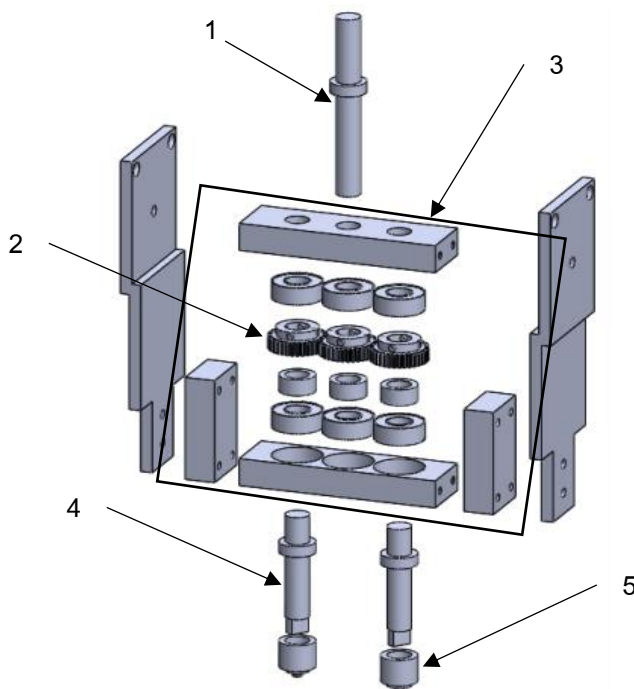
จากที่กล่าวมาข้างต้น คณะผู้วิจัยจึงมีความสนใจในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของหัวกวนแบบคู่ (Double Twin Shoulder) โดยเริ่มตั้งแต่กระบวนการสร้างอุปกรณ์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนแบบหัวกวนคู่ การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเชื่อม คือ ปัจจัยความเร็วหมุนเชื่อม ปัจจัยความเร็วเดินเชื่อม เพื่อศึกษาโครงสร้างทางโลหะวิทยา สมบัติทางกล ประกอบด้วย ความแข็งแรง ความแข็งแรงดึง และความแข็งแรงดัด อีกทั้งนำผลการทดลองมาปรับปรุงเพื่อทำการเปรียบเทียบความเหมาะสมทั้งในด้านงานวิจัยและอุตสาหกรรมต่อไปจะเป็นฐานข้อมูลในแง่ภาคอุตสาหกรรมได้นำไปปรับใช้ได้ต่อไป

2. วัสดุ อุปกรณ์ และกระบวนการวิจัย

2.1 การออกแบบของอุปกรณ์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนแบบหัวกวนคู่

หลักการออกแบบอุปกรณ์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนแบบหัวกวนคู่ แสดงดังรูปที่ 1 ได้ตั้งสมมุติฐานบนพื้นฐานของการใช้งานร่วมกับทรัพยากรที่มีอยู่ให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด โดยการประยุกต์ใช้ร่วมกับเครื่องกัดแนวตั้ง และกำหนดให้เพลลาหมุนของเครื่องกัดแนวตั้งเป็นเพลลาขับเคลื่อนกำลังไปยังส่วนอื่น ๆ และกลไกของอุปกรณ์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนแบบหัวกวนคู่ กลไกการทำงานเริ่มต้นจากแกนเพลลาขับ (หมายเลข 1) จะถูกสวมเข้ากับหัวจับของเครื่องกัดแนวตั้ง (Collet Holder) จากนั้นก็จะส่งกำลังหมุนไปยังชุดเฟือง (หมายเลข 2) ซึ่งชุดเฟืองจะมี 3 ตัว แต่ละตัวจะเป็นเฟืองตรง โมดูล 1.5 มีจำนวนฟัน 35 ฟัน ซึ่งเฟืองตัวกลางจะทำหน้าที่หมุนส่งกำลังต่อไปยังเฟืองขับตัวข้างทั้งสองหมุนตามและหมุนไปพร้อม ๆ กัน โดยมีอัตราการส่งกำลังเท่ากับ 1:1 นั้น

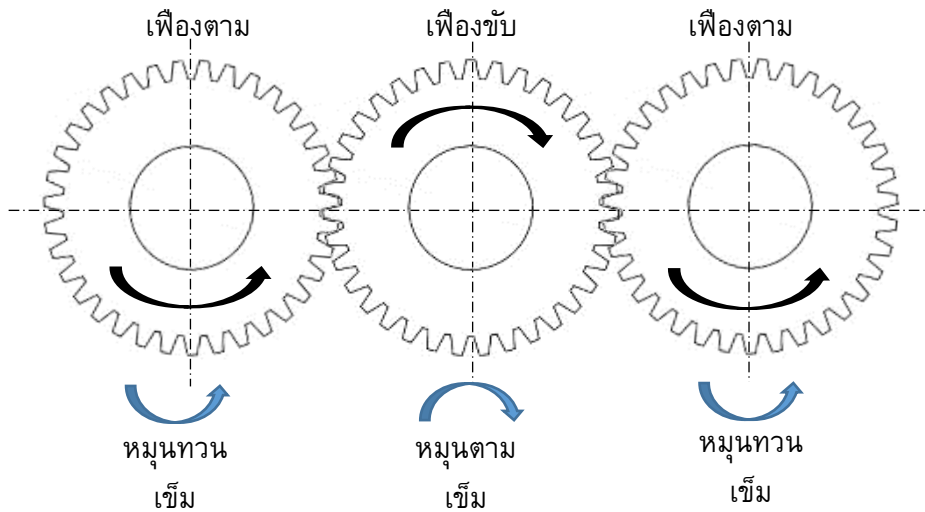
หมายความว่า ถ้ากำหนดให้เครื่องกัดแนวตั้งหมุนด้วยความเร็วรอบ 710 rpm ก็จะทำให้เฟืองตามหมุนด้วยความเร็วรอบ 710 rpm เช่นเดียวกัน ซึ่งชุดเฟืองจะบรรจุอยู่ในห้องเครื่อง (หมายเลข 3) ซึ่งภายในจะมีชุดลูกปืนทั้งด้านบนและด้านล่างเพื่อให้ชุดเฟืองหมุนได้สะดวกมากยิ่งขึ้น ชุดเฟืองที่ทำหน้าที่หมุนตามทั้งสองตัวปลายอีกข้างจะต่อเข้ากับเพลาลูกหมุน (หมายเลข 4) สำหรับการรองรับการหมุนที่เชื่อมต่อกับเพลาลูก และส่วนปลายของเพลาลูกจะประกอบเข้ากับหัวกวน (หมายเลข 5) ที่จะมีทั้งหัวพิน (Pin) และบ่ากวน (Shoulder) ซึ่งสามารถถอดเปลี่ยนได้ในยามที่ต้องการศึกษาหรือทดลองในรูปแบบที่แตกต่างกัน



รูปที่ 1 แบบอุปกรณ์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนแบบหัวกวนคู่

2.2 กลไกการส่งกำลังของอุปกรณ์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนแบบหัวกวนคู่

ระบบการส่งกำลังของอุปกรณ์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนแบบหัวกวนคู่มีต้นกำลังมาจากการหมุนของเพลาลูกเครื่องกัดแนวตั้งแล้วส่งกำลังต่อมายังชุดเฟือง ซึ่งชุดเฟืองจะมีเฟืองที่ขบกันอยู่ 3 ตัว โดยตัวตรงกลางจะรับการส่งกำลังโดยตรงมาจากการหมุนของเพลาลูกเครื่องกัดแนวตั้ง แล้วไปหมุนขับให้เฟืองที่อยู่ด้านข้างหมุนตามในทิศทางที่ต่างกัน โดยที่เฟืองที่อยู่ด้านขวาจะหมุนทวนเข็มนาฬิกา ส่วนเฟืองที่อยู่ด้านซ้ายจะหมุนตามเข็มนาฬิกา แสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 กลไกการส่งกำลังของอุปกรณ์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนแบบหัวกวนคู่

2.3 หัวกวนของอุปกรณ์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนแบบหัวกวนคู่

หัวกวนจะทำหน้าที่หมุนอยู่ในเนื้อของวัสดุและดำเนินการกวนเนื้อของวัสดุให้เคลื่อนที่มารวมตัวเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งจะมีส่วนประกอบทั้งหัวพิน (Pin) และบ่ากวน (Shoulder) โดยหัวพิน (Pin) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร (mm) และมีความยาว 5 mm และบ่ากวน (Shoulder) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 mm แสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 หัวกวนของอุปกรณ์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนแบบหัวกวนคู่

2.4 กระบวนการทดลองเชื่อมเสียดทานแบบกวนแบบหัวกวนคู่

วัสดุทดลองอะลูมิเนียม AA7075-T651 ขนาดความกว้าง × ความยาว × ความหนา คือ 50 × 300 × 6 mm โดยมีส่วนผสมทางเคมี (เปอร์เซ็นต์ต่อน้ำหนัก) แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมี (เปอร์เซ็นต์ต่อน้ำหนัก) ของวัสดุทดลอง

Elements	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr	Al	Tensile Strength (MPa)
AA7075-T651	0.4	0.5	1.5	0.3	2.50	5.50	0.2	0.23	Bal.	538.70

เครื่องกัดแนวตั้ง (Vertical Milling Machine) ยี่ห้อ OBRAECI STROJE รุ่น FGV 32 สำหรับใช้ในการทดลองการเชื่อมเสียดทานแบบกวนสองหัว และประกอบอุปกรณ์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนแบบหัวกวนคู่ แสดงดังรูปที่ 4

ปัจจัยในการทดลอง 2 ปัจจัย ประกอบด้วย ความเร็วหมุนเชื่อม 3 ระดับ คือ 710 1,000 และ 1,400 rpm และความเร็วเดินเชื่อม 3 ระดับ คือ 14 20 และ 40 mm/min โดยเป็นการเชื่อมแบบต่อชนในท่าราบ

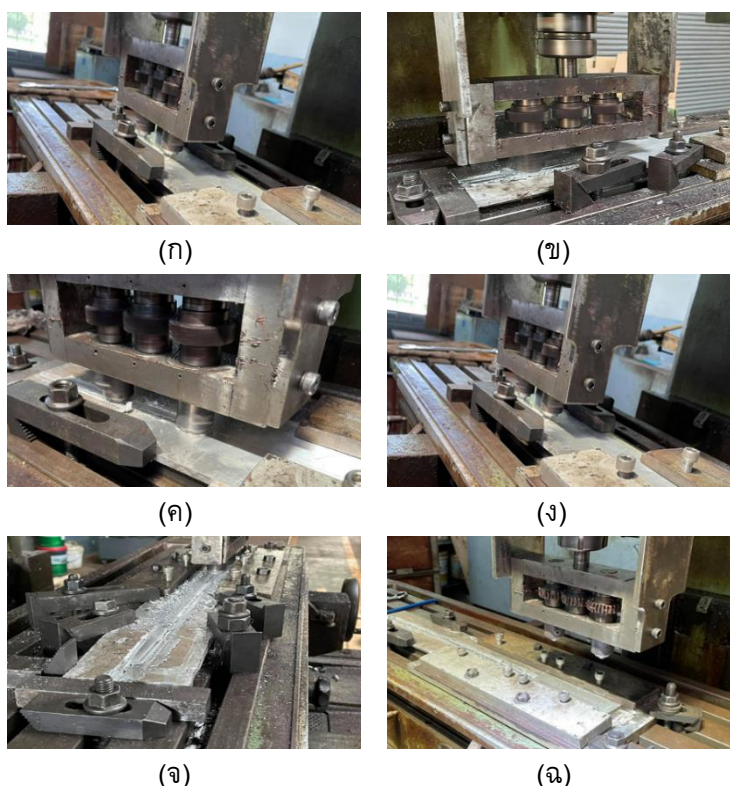


รูปที่ 4 การประกอบอุปกรณ์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนแบบหัวกวนคู่

2.5 กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนแบบหัวกวนคู่

การเชื่อมเสียดทานแบบกวนแบบหัวกวนคู่ในทุก ๆ สภาวะการทดลองประกอบด้วยขั้นตอนดังนี้ (ก) เปิดเครื่องกัดแนวตั้งให้หัวพินหมุนตามเข็มนาฬิกาและทวนเข็มนาฬิกา (ข) จากนั้นหัวพินสอดลงไปในเนื้อวัสดุ จนกระทั่งปลายของหัวพินสัมผัสกับเนื้อวัสดุในระยะเวลาที่กำหนดเป็นระยะเวลา 30 วินาที (s) เนื่องจากระยะเวลาที่กำหนดนั้น ทำให้อะลูมิเนียมเกิดการหลอมละลายที่ดี

และสามารถไหลวนรอบ ๆ หัวพินได้สะดวกก่อนทำการเดินแนวเชื่อมด้วยความเร็วเดินแนวเชื่อมที่กำหนด (ค) จากนั้นความร้อนที่เกิดจากการเสียดทานระหว่างผิวหัวพิน และปากของเครื่องมือจะทำให้เกิดความร้อนที่ทำให้วัสดุเกิดการอ่อนตัวและเกิดการเคลื่อนที่ไหลวนรอบ ๆ หัวพิน (ง) เดินเชื่อมตามความเร็วในการเดินแนวเชื่อมที่กำหนดในขั้นตอนนี้จะเกิดการรวมตัวของวัสดุ (จ) ทำให้เกิดรอยต่อขึ้น (ฉ) เมื่อสิ้นสุดการเชื่อมก่อนยกหัวพินออกจากรอยเชื่อม ก่อนทำการยกหัวพินควรให้การเสียดทานที่เกิดจากหัวพินคงที่ ณ ตำแหน่งสุดท้ายของการเชื่อมประมาณ 30 s แสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนแบบหัวกวนคู่

2.6 การตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกลของรอยเชื่อม

การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและจุลภาค เมื่อเชื่อมชิ้นงานเสร็จแล้วดำเนินการตรวจสอบรอยเชื่อมด้วยสายตาเบื้องต้นไม่พบข้อบกพร่องใด ๆ ของรอยเชื่อม จากนั้นนำชิ้นทดสอบไปทำการตัดชิ้นงานทดสอบตามแบบที่กำหนด จากนั้นนำชิ้นทดสอบไปหล่อด้วยน้ำยา Epoxy Resin แล้วดำเนินการขัดด้วยกระดาษทรายน้ำตั้งแต่เบอร์ 320 จนถึงเบอร์ 1500 ตามลำดับ เมื่อขัดด้วยกระดาษทรายน้ำจนผิวหน้าของชิ้นทดสอบเรียบตามความต้องการแล้ว ก็ตามด้วยการขัดสักหลาดด้วยผงอะลูมินาขนาด 3, 0.5 และ 0.1 ไมโครเมตร (μm) ตามลำดับ

การทดสอบความแข็ง ชั้นทดสอบความแข็งจะเป็นชั้นทดสอบเดียวกันกับชั้นทดสอบที่ตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและจุลภาค การทดสอบจะเป็นแบบวิกเกอร์กดบริเวณพื้นที่หน้าตัดของรอยเชื่อม ระยะห่างระหว่างรอยกด 1 mm แรงกดที่ใช้ 100 กรัมแรง (gf) เป็นเวลา 10 s

การทดสอบความแข็งแรงดึง เป็นการทดสอบเพื่อหาความแข็งแรงของวัสดุภายใต้การรับภาระหรือแรงแบบดึง ในขั้นตอนนี้ชั้นทดสอบที่ได้จากกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวนจะตัดตามขวางกับแนวเชื่อมเพื่อนำไปทดสอบความแข็งแรงโดยขึ้นรูปชั้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E8M นำชั้นทดสอบที่เตรียมโดยการตัดตามขวางกับรอยเชื่อมไปทดสอบความแข็งแรงที่อุณหภูมิห้อง ความเร็วในการดึง 1 mm/min

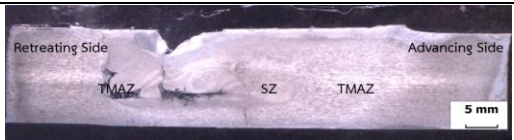
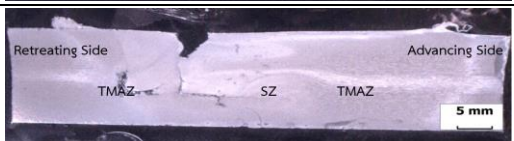
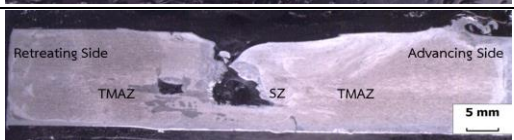
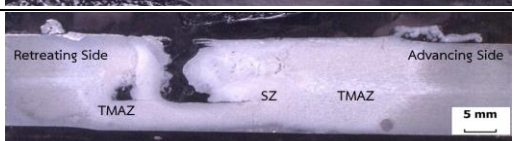
การทดสอบความแข็งแรงดัด เป็นการทดสอบเพื่อดูพฤติกรรมการแปรรูปของวัสดุหลังจากทำการตัดโค้ง โดยพิจารณาดูว่าผิวด้านนอกของชั้นทดสอบตรงบริเวณที่ทำการตัดโค้งเกิดรอยแตกขึ้นหรือไม่ หลังจากทำการตัดโค้งชั้นทดสอบด้วยรัศมีความโค้งที่กำหนด จนได้มุมตามที่กำหนดไว้ในมาตรฐานการทดสอบ การทดสอบบนรอยเชื่อมทั้งหมดโดยจุดสามจุดตามมาตรฐาน ASTM E8M นำชั้นทดสอบที่เตรียมโดยการตัดตามขวางกับรอยเชื่อมไปทดสอบการดัดโค้งที่อุณหภูมิห้อง ความเร็วในการดัด 1 mm/min

3. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

3.1 โครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อม

โครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม และความเร็วเดินเชื่อมที่ต่างกัน แสดงดังรูปที่ 6 พบว่าบริเวณรอยเชื่อมที่ถูกกวนมีข้อบกพร่องเกิดขึ้นกับรอยเชื่อม อันเนื่องมาจากความร้อนและแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นมีไม่มากพอที่จะทำให้เนื้อโลหะเกิดการประสานกันระหว่างการเชื่อม เมื่อสังเกตก็จะพบว่า เมื่อเพิ่มความเร็วหมุนเชื่อมและความเร็วเดินเชื่อมมากขึ้นจะทำให้เกิดช่องว่าง (Hole) ในรอยเชื่อมกว้างมากขึ้น ซึ่งเป็นอิทธิพลที่ส่งผลมาจากการสะสมของความร้อนในแนวเชื่อมที่ไม่สามารถรักษาและสะสมความร้อนได้มากนักในขณะที่หัวกวนเร่งทำการหมุนเชื่อมอย่างต่อเนื่องจึงทำให้เกิดปรากฏการณ์ดังกล่าว ภาพรวมของโครงสร้างมหภาคได้นำเสนอพื้นที่ต่าง ๆ ของรอยเชื่อมที่มีบริเวณติดกันและต่อเนื่องกัน เช่น บริเวณรอยกวน (Stir Zone: SZ) บริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนจากทางกล (Thermo-Mechanical Affected Zone: TMAZ) บริเวณที่ได้รับผลกระทบความร้อน (Heat Affected Zone: HAZ) และเนื้อโลหะเดิม (Base Metal: BM) [7] และเป็นที่น่าสนใจในบริเวณรอยกวน พบว่ารอยเชื่อมที่เมื่อเพิ่มระดับความเร็วเดินเชื่อมมากขึ้นจะพบช่องว่าง (Hole) ที่มีจำนวนกว้างมากขึ้นในด้าน Retreating Side อันเนื่องมาจากการเสียดทานระหว่างหัวกวนกับเนื้อวัสดุที่มีความร้อนสะสมไม่มากพอขณะเชื่อม เมื่อเริ่มเดินแนวเชื่อมตามความเร็วเดินที่กำหนดทำให้เนื้อวัสดุยังไม่เกิดการเปลี่ยนรูปเชิงพลาสติก (Plastic

Deformation) ที่จะทำให้อันวัสดุไหลไปยังบริเวณต่าง ๆ ได้ตามความเร็วหมุนเชื่อมที่กำหนด [8]

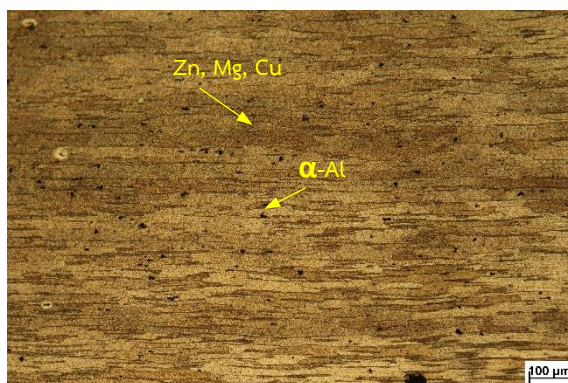
ความเร็วหมุนเชื่อม (rpm)	ความเร็วเดินเชื่อม (mm/min)	ลักษณะโครงสร้างมหภาค
710	14	
	20	
	40	
1000	14	
	20	
	40	
1400	14	
	20	
	40	

รูปที่ 6 โครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อม

3.2 โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม

3.2.1 โครงสร้างจุลภาคของเนื้อโลหะเดิม

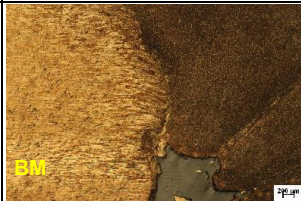
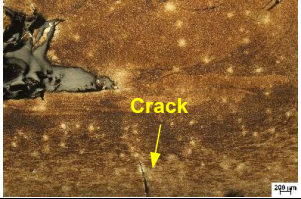
อะลูมิเนียมผสม AA7075-T651 แสดงดังรูปที่ 7 โครงสร้างของเกรนเฟส α -Al (พื้นสีขาว) มีลักษณะเป็นแท่ง (Rod) ที่ยืดยาวต่อเนื่องกันมีโครงสร้างยูเทคติก Zn Mg และ Cu (ขอบสีดำ) จัปกลุ่มรอบเฟส α -Al



รูปที่ 7 โครงสร้างจุลภาคของบริเวณเนื้อโลหะเดิมอะลูมิเนียมผสม AA 7075-T651

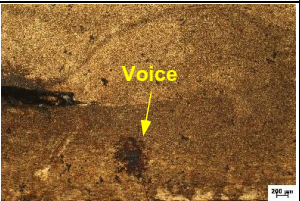
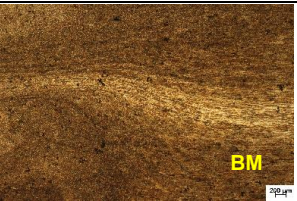
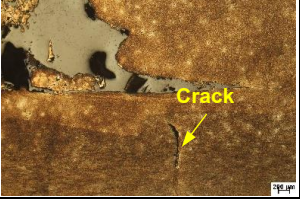
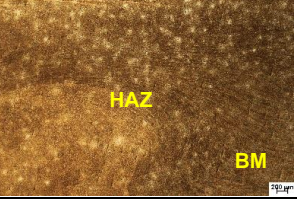
3.2.2 โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อม

โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม และความเร็วเดินเชื่อมที่ต่างกัน ตามความเร็วหมุนเชื่อมที่ 710 1000 และ 1400 rpm แสดงดังรูปที่ 8-10 ตามลำดับ พบว่า บริเวณ SZ ของรอยเชื่อม เผยให้เห็นโครงสร้างเกรนที่ละเอียดและสมดุลกันเนื่องจากการตกผลึกใหม่แบบไดนามิกระหว่างกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ส่วนเกรนในบริเวณ TMAZ Advancing Side (AS) และ TMAZ Retreating Side (RS) เผยให้เห็นถึงโครงสร้างที่บิดเบี้ยวอย่างมากของอะลูมิเนียมเมทริกซ์ที่มีการยืดตัวอย่างมากในเกรนอันเนื่องมาจากความเครียดที่เกิดขึ้นในบริเวณนี้ระหว่างกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน [9]

ความเร็ว เดินเชื่อม (mm/min)	TMAZ Advancing Side (AS)	Stir Zone (SZ)	TMAZ Retreating Side (RS)
14			
20			
40			

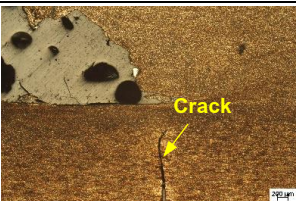
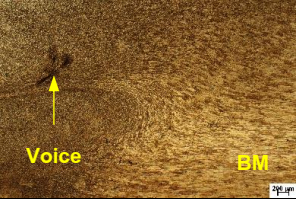
รูปที่ 8 โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 710 rpm

เมื่อลองวิเคราะห์ถึงโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 710 rpm พบว่า บริเวณ SZ เกรนมีความละเอียดและมีขนาดเล็กมากกว่าบริเวณ TMAZ แต่ยังปรากฏให้เห็นถึงรอยแตกร้าว (Crack) ขนาดเล็กในรอยเชื่อม อันเนื่องมาจากความร้อนที่สะสมมาจากการเสียดทานของเนื้อวัสดุกับเครื่องมือเชื่อมสะสมมากเกินไปจนเกิดความเครียดส่งผลให้เนื้อวัสดุเกิดรอยแตกร้าวดังกล่าว [10] นอกจากนี้บริเวณ TMAZ ทั้งด้าน AS และ RS ไม่พบรอยแตกร้าวแต่จะเห็นรูปร่างของเกรนที่บิดเบี้ยวไปเป็นอย่างมาก เกรนมีรูปร่างที่ยืดยาวออกเหมือนถูกดึงซึ่งเป็นผลมาจากการหมุนวนของเครื่องมือเชื่อมที่ส่งผลโดยตรงต่อเนื้อวัสดุและโครงสร้างตามลำดับ

ความเร็ว เดินเชื่อม (mm/min)	TMAZ Advancing Side (AS)	Stir Zone (SZ)	TMAZ Retreating Side (RS)
14			
20			
40			

รูปที่ 9 โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1000 rpm

ข้อสังเกตจากโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมในสภาวะที่เพิ่มความเร็วหมุนเชื่อมเพิ่มขึ้น (1000 – 1400 rpm) พบว่า เกรนบริเวณ SZ มีความละเอียดและเล็กกว่าความเร็วหมุนเชื่อมที่ต่ำกว่า (710 rpm) อันเนื่องมาจากหัวพินซึ่งทำหน้าที่หมุนวนในรอยเชื่อมถูกแรงกดอัดที่สูงขึ้น ทำให้เนื้อวัสดุบริเวณ SZ มีความร้อนสะสมที่มากขึ้นเกิดการตกผลึกแบบไดนามิก (Dynamic Recrystallization ; DRX) จนทำให้เกิดการตกผลึกใหม่ซึ่งเกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการเชื่อม เสียทานแบบกวนที่มีหัวพินเป็นสาเหตุนั่นเอง นอกจากนี้เมื่อพิจารณาถึงบริเวณ TMAZ ทั้งด้าน AS และ RS จะเห็นได้ว่ามีเกรนที่บิดเบี้ยวและยืดยาวออกมากขึ้นและเห็นได้ชัดขึ้นเมื่อความเร็วหมุนเชื่อมถึงขั้นสุด (1400 rpm) สาเหตุเนื่องมาจากในกระบวนการเชื่อมเสียทานแบบกวน เครื่องมือเชื่อมสัมผัสกับเนื้อวัสดุโดยตรงและเกิดการหมุนวนด้วยแรงเหวี่ยงจากความเร็วหมุนเชื่อมที่ได้รับส่งต่อกำลังมาจากเครื่องกัดแนวตั้ง เมื่อเครื่องมือเชื่อมได้รับแรงหมุนที่เพิ่มขึ้นก็จะทำให้เนื้อวัสดุที่อยู่ในสภาวะพลาสติกเคลื่อนที่ไปตามทิศทางของแรงหมุนจนทำให้โครงสร้างของเนื้อวัสดุที่มีทิศทางไปตามทิศทางเดียวกับการหมุนของเครื่องมือเชื่อมด้วย

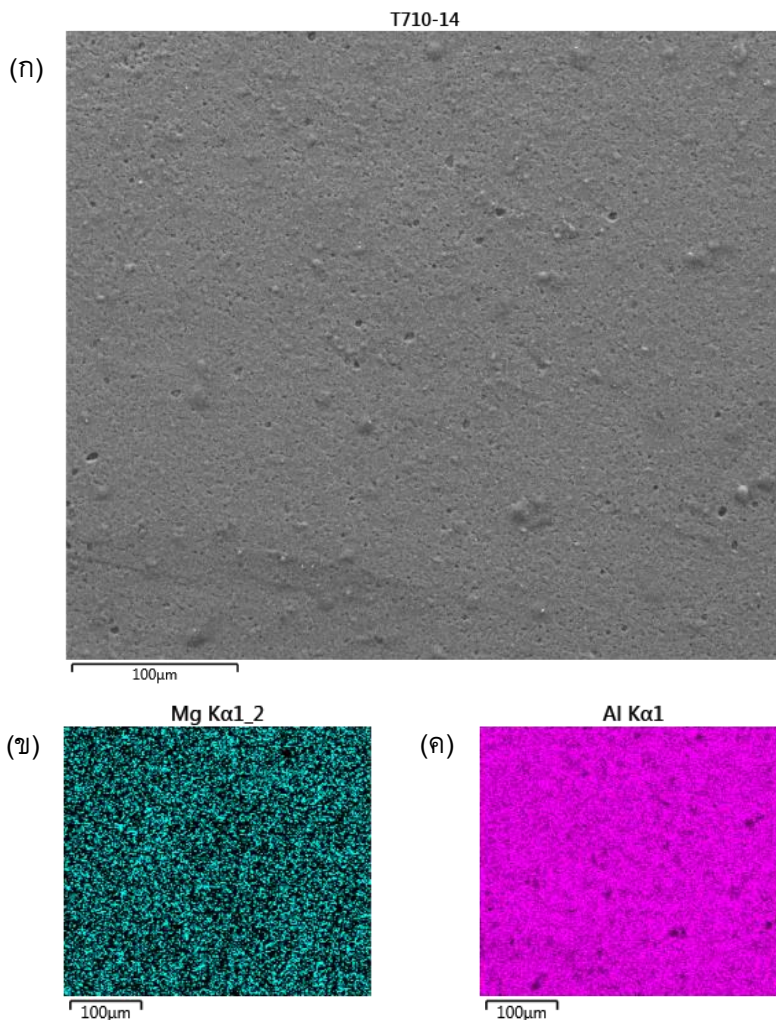
ความเร็ว เดินเชื่อม (mm/min)	TMAZ Advancing Side (AS)	Stir Zone (SZ)	TMAZ Retreating Side (RS)
14			
20			
40			

รูปที่ 10 โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1400 rpm

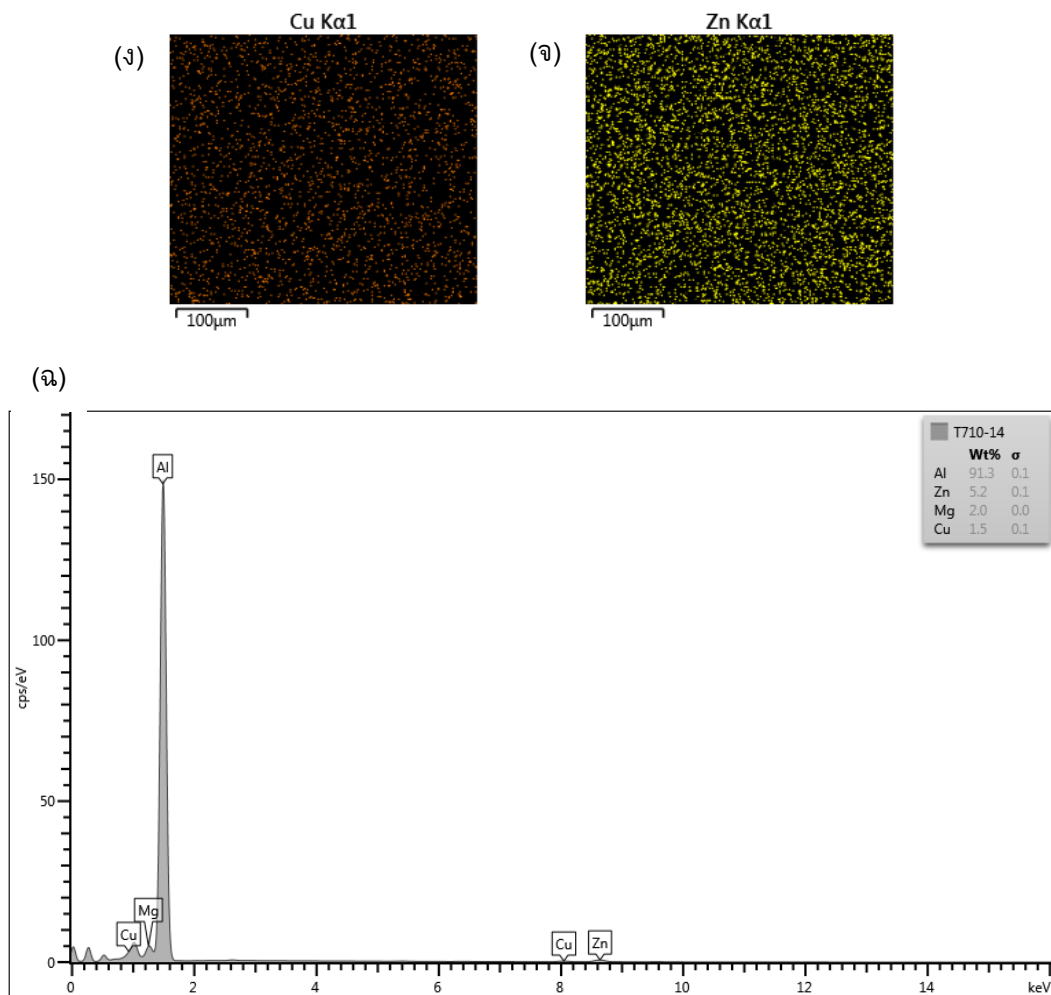
จุดที่น่าสนใจของโครงสร้างจุลภาคอีกอย่าง พบว่า ความเชื่อมโยงของโครงสร้างมหภาคต่อเนื่องมายังโครงสร้างจุลภาคนั้นคือ ร่องรอยของสิ่งบกพร่องในแนวเชื่อมทั้งรูพรุน (Voice) หรือช่องว่าง (Holes) แต่สิ่งหนึ่งที่ไม่อาจมองเห็นได้ด้วยในระดับมหภาคคือ รอยแตกร้าวจากความเร็วหมุนเชื่อมที่ต่ำ (710 rpm) ไปถึงระดับที่สูง (1400 rpm) พบว่า มีรอยแตกร้าวบริเวณ SZ ที่มีขนาดความยาวเพิ่มมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด จุดสังเกตที่ความเร็วหมุนเชื่อม 710 rpm ความเร็วเดินเชื่อม 20 mm/min เทียบกับ ความเร็วหมุนเชื่อม 1000 rpm ความเร็วเดินเชื่อม 40 mm/min เทียบกับ ความเร็วหมุนเชื่อม 1400 rpm ความเร็วเดินเชื่อม 14 mm/min จะเห็นว่าความยาวของรอยแตกร้าวที่เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งย่อมส่งผลโดยตรงต่อค่าความแข็งแรงดึงที่จะกล่าวถึงต่อไป อย่างไรก็ตามการสังเกตดังกล่าวมีสาเหตุมาจากการตกผลึกแบบไดนามิก (Dynamic Recrystallization; DRX) มีมากเกินไปจนทำให้เกิดการตกผลึกของเกรนที่สะสมในบริเวณ SZ และเนื้อวัสดุเกิดความเครียดมากเกินไปจนเกิดรอยแตกในที่สุด [11]

โครงสร้างทางจุลภาคที่ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy; SEM) ของรอยเชื่อม ที่ความเร็วหมุนเชื่อมที่ 710 rpm ความเร็วเดินเชื่อม 14 mm/min แสดงดังรูปที่ 11(ก) บริเวณแนวเชื่อม SZ เกิดการแตกหักของเฟส α กระจัดกระจาย

ทั่วบริเวณที่ถูกกวน เกรนมีความละเอียดมากกว่าบริเวณที่มีผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อน TMAZ เนื่องมาจากบริเวณแนวเชื่อมจะถูกหมุนวนด้วยหัวพินโดยตรงจึงทำให้เกรนบริเวณนี้มีความละเอียดมากกว่า นอกจากนี้การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง Energy Dispersive X-ray Analyzer (EDX) พบว่า การวิเคราะห์ห่อนุภาคในบริเวณนี้แสดงรูปที่ 11(ข-ค) แสดงให้เห็นว่ามีส่วนประกอบของ Al เป็นเฟสหลักของรอยเชื่อม และมีเฟส สังกะสี (Zn) แมกนีเซียม (Mg) และทองแดง (Cu) กระจุกกระจายอยู่ทั่วบริเวณรอยเชื่อมตามรูปร่างของรอยเชื่อม ส่วนรูปที่ 11(ข) แสดงการตรวจสอบการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ (Quantitative Analysis) พบว่ามีปริมาณธาตุอะลูมิเนียม (Al) 91.3% ปริมาณธาตุ Zn 5.2% ปริมาณธาตุ Mg 2.0% และปริมาณธาตุ Cu 1.5% ตามลำดับ



รูปที่ 11 โครงสร้าง SEM และ EDX บริเวณรอยเชื่อม



รูปที่ 11 โครงสร้าง SEM และ EDX บริเวณรอยเชื่อม (ต่อ)

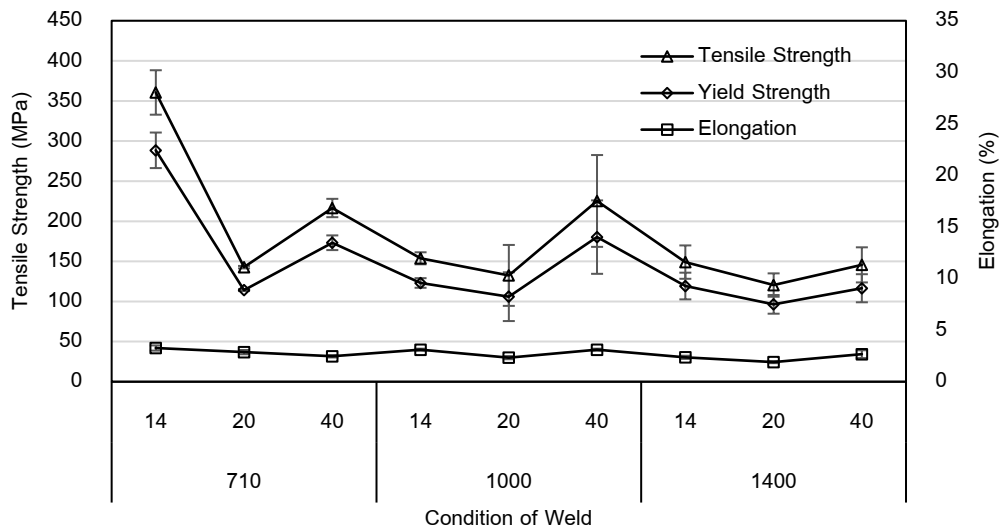
3.3 ความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อม

ผลของค่าความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อมเมื่อเปรียบเทียบการทดลองพบว่า ที่สภาวะการเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่ใช้ความเร็วหมุนเชื่อมที่ 710 rpm ความเร็วเดินเชื่อมที่ 14 mm/min มีค่าความแข็งแรงดึงมากที่สุด คือ 360.58 MPa ส่วนความแข็งแรงดึงต่ำที่สุด คือ 120.51 MPa ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1400 rpm ความเร็วเดินเชื่อมที่ 20 mm/min ผลการทดลองสภาวะอื่น ๆ แสดงดังตารางที่ 2 เป็นสิ่งที่น่าสังเกตเมื่อพิจารณาผลของค่าความแข็งแรงดึงแล้วพบว่า เมื่อเพิ่มความเร็วหมุนเชื่อมมากขึ้นจะทำให้ค่าความแข็งแรงดึงค่อย ๆ ลดลง ซึ่งผลจากค่าความแข็งแรงดึงดังกล่าวมีอิทธิพลมาจากโครงสร้างทางจุลภาคที่เห็นได้ชัดว่าเกิดรอยแตกร้าวในรอยเชื่อมอย่างชัดเจนเมื่อเพิ่มความหมุนเชื่อมมากขึ้น

ตารางที่ 2 ความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อม

Rotation Speed (rpm)	Welding Speed (mm/min)	Tensile Strength (MPa)	Yield Strength (MPa)	Elongation (%)
710	14	360.58	288.46	3.27
	20	142.78	114.22	2.87
	40	216.53	173.22	2.47
1000	14	153.86	123.09	3.10
	20	132.50	106.00	2.33
	40	225.33	180.26	3.10
1400	14	149.08	119.26	2.37
	20	120.51	96.41	1.90
	40	145.65	116.52	2.67
Base Metal	AA7075-T651	538.70	430.96	13.86

รูปที่ 12 แสดงกราฟค่าความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อมเสียดทานแบบกวนทุกสภาวะ จุดที่น่าสังเกต คือ สภาวะการเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่ใช้ความเร็วหมุนเชื่อมที่ 710 rpm ความเร็วเดินเชื่อมที่ 14 mm/min ซึ่งมีค่าความแข็งแรงดึงมากที่สุด คือ 360.58 MPa ตรงปัจจัยดังกล่าวเป็นปัจจัยที่อยู่ต่ำที่สุดของการทดลองก็ว่าได้ กล่าวคือ เป็นปัจจัยที่ใช้ค่าความเร็วหมุนเชื่อมที่ต่ำสุดของการทดลอง (710 rpm) และ ใช้ความเร็วเดินเชื่อมที่ต่ำสุดของการทดลอง (14 mm/min) แต่กลับได้ผลของค่าความแข็งแรงดึงมากที่สุด สาเหตุเนื่องมาจากปัจจัยการเชื่อมที่สมดุลสามารถสร้างความร้อนที่เหมาะสมและมีปริมาณมากพอที่จะทำให้การเกิดการไหลของวัสดุอย่างเหมาะสม [12, 13] อีกครั้งการตกผลึกของเกรนอย่างพอดีซึ่งไม่เกิดรอยแตกร้าวในรอยเชื่อมจนเป็นเหตุให้มีค่าความแข็งแรงที่ดีได้ ขณะเดียวกันเมื่อลงพิจารณาไปถึงค่าเปอร์เซ็นต์ความยืด (Elongation) จะพบว่า มีค่าอัตราการยืดไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ในทุก ๆ สภาวะการทดลอง ทั้งนี้เนื่องมาจากผลของการเชื่อมที่มีข้อบกพร่องในรอยเชื่อมค่อนข้างมาก ประกอบกับปัจจัยการเชื่อมที่ยังไม่สมดุลเลยส่งผลทำให้ผลการทดสอบดังกล่าว

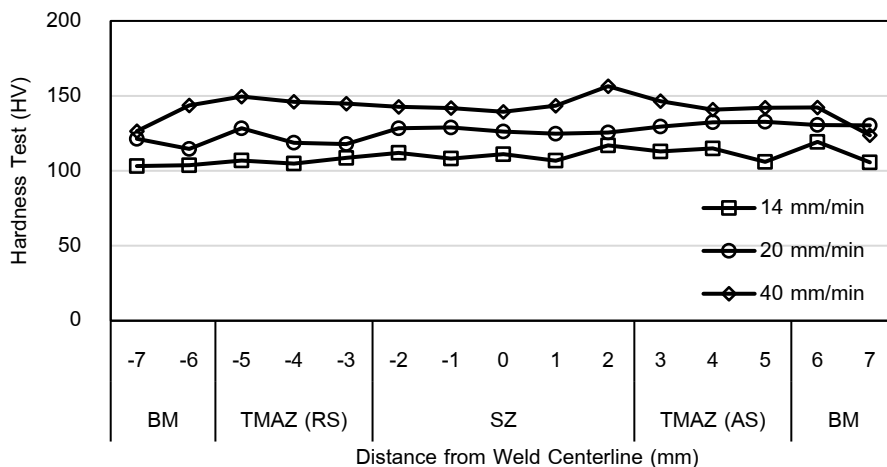


รูปที่ 12 ค่าความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อมเสียดทานแบบกวนทุกสภาวะ

3.4 ความแข็งแรงของรอยเชื่อม

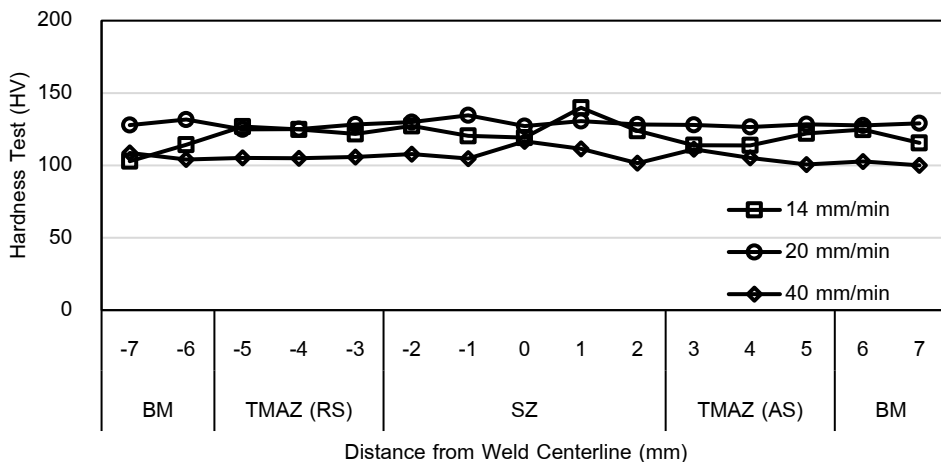
ผลของค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมได้แสดงตามลำดับความเร็วหมุนเชื่อม 710 1000 และ 1400 rpm แสดงดังรูปที่ 13-15

1) ความแข็งแรงของรอยเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 710 rpm ความเร็วเดินเชื่อมที่ 14 20 และ 40 mm/min แสดงดังรูปที่ 13 พบว่า ความแข็งแรงของชั้นทดสอบที่บริเวณ SZ มีความแข็งแรงสูงสุด ที่ความเร็วเดินเชื่อม 40 mm/min มีความแข็งแรงประมาณ 156.4 HV ส่วนบริเวณ SZ ที่มีความแข็งแรงต่ำสุด คือ ความเร็วเดินเชื่อม 14 mm/min โดยมีความแข็งแรงประมาณ 106.8 HV



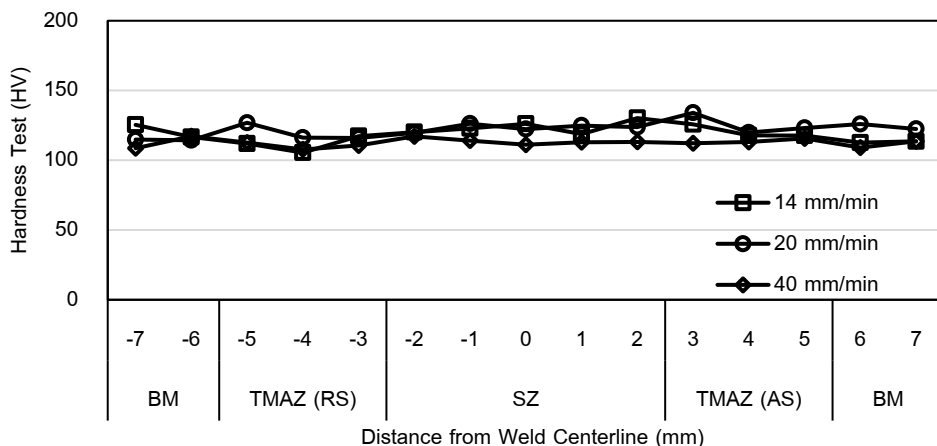
รูปที่ 13 กราฟความแข็งแรงที่ความเร็วหมุนเชื่อม 710 rpm

2) ความแข็งของรอยเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1000 rpm ความเร็วเดินเชื่อมที่ 14 20 และ 40 mm/min แสดงดังรูปที่ 14 พบว่า ความแข็งของชั้นทดสอบที่บริเวณ SZ มีความแข็งสูงสุด ที่ความเร็วเดินเชื่อม 14 mm/min มีความแข็งประมาณ 138.9 HV ส่วนบริเวณ SZ ที่มีความแข็งต่ำสุด คือ ความเร็วเดินเชื่อม 40 mm/min โดยมีความแข็งประมาณ 101.6 HV



รูปที่ 14 กราฟความแข็งที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1000 rpm

3) ความแข็งของรอยเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1400 rpm ความเร็วเดินเชื่อมที่ 14 20 และ 40 mm/min แสดงดังรูปที่ 15 พบว่า ความแข็งของชั้นทดสอบที่บริเวณ SZ มีความแข็งสูงสุด ที่ความเร็วเดินเชื่อม 14 mm/min มีความแข็งประมาณ 130.2 HV ส่วนบริเวณ SZ ที่มีความแข็งต่ำสุด คือ ความเร็วเดินเชื่อม 40 mm/min โดยมีความแข็งประมาณ 111.1 HV



รูปที่ 15 กราฟความแข็งที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1400 rpm

รูปแบบการแสดงผลของความแข็งของรอยเชื่อมด้วยความเร็วหมุนเชื่อมและความเร็วเชื่อมที่แตกต่างกัน เป็นที่น่าสังเกตว่าค่าความแข็งส่วนใหญ่เป็นค่าที่เกาะกลุ่มกันมีค่าที่ใกล้เคียงกับค่าเนื้อโลหะเดิม สาเหตุเนื่องมาจากวัสดุในบริเวณ SZ ต้องผ่านการหมุนจนถึงสองครั้ง ทำให้ความเข้มข้นของการป้อนความร้อนจะมากขึ้น ด้วยเหตุนี้อัตราการระบายความร้อนจึงมากกว่าวัสดุที่ใช้ผ่านขั้นตอนเดียว [6] ดังนั้นค่าความแข็งแรงสูงสุดของการทดสอบในครั้งนี้เท่ากับ 156.4 HV ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 710 rpm ความเร็วเดินเชื่อม 40 mm/min และค่าความแข็งแรงต่ำสุดของการทดสอบในครั้งนี้เท่ากับ 101.6 HV ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1000 rpm ความเร็วเดินเชื่อม 40 mm/min

3.5 ความแข็งแรงดัดของรอยเชื่อม

ผลการทดสอบความแข็งแรงดัดของรอยเชื่อม สำหรับที่ความเร็วหมุนเชื่อม 710 1000 และ 1400 rpm แสดงดังตารางที่ 3

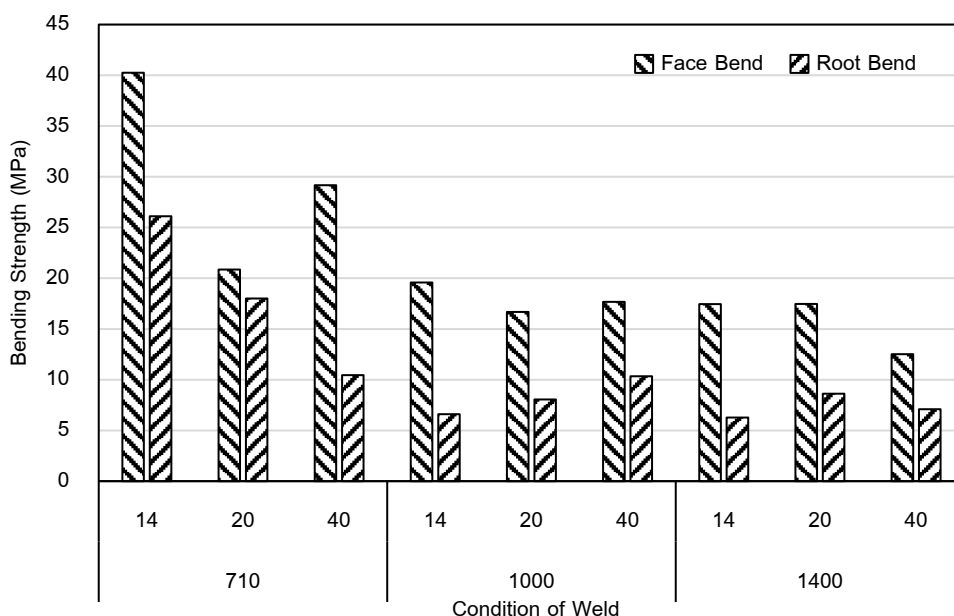
ตารางที่ 3 ความแข็งแรงดัดของรอยเชื่อม

Rotation Speed (rpm)	Welding Speed (mm/min)	Bending Strength (MPa)	
		Face Bend	Root Bend
710	14	40.26	26.10
	20	20.86	18.00
	40	29.17	10.45
1000	14	19.58	6.60
	20	16.68	8.06
	40	17.68	10.34
1400	14	17.46	6.27
	20	17.47	8.62
	40	12.51	7.10

จากข้อมูลผลการทดสอบความแข็งแรงดัดของรอยเชื่อมเชื่อมเสียดทานแบบกวนแบบหัวกวนคู่ในตารางที่ 3 สามารถแสดงผลได้ดังรูปที่ 16 ผลการทดสอบค่าความแข็งแรงดัดของรอยเชื่อมการเชื่อมเสียดทานแบบกวนอะลูมิเนียมผสม AA7075-T651 แบบหัวกวนคู่ พบว่า ค่าความแข็งแรงดัด (Bending Strength) ด้านหน้า (Face Bend) สูงสุดที่ความเร็วหมุนเชื่อม 710 rpm ความเร็วเดินเชื่อม

14 mm/min เท่ากับ 40.26 MPa ส่วนค่าความแข็งแรงดัดต่ำสุดที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1400 rpm ความเร็วเดินเชื่อม 40 mm/min ได้ค่าความแข็งแรงดัด เท่ากับ 12.51 MPa เมื่อพิจารณาถึงค่าความแข็งแรงดัด ด้านหลัง (Root Bend) สูงสุดที่ความเร็วหมุนเชื่อม 710 rpm ความเร็วเดินเชื่อม 14 mm/min เท่ากับ 26.10 MPa ส่วนค่าความแข็งแรงดัดต่ำสุดที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1400 rpm ความเร็วเดินเชื่อม 14 mm/min ได้ค่าความแข็งแรงดัด เท่ากับ 6.27 MPa

เมื่อวิเคราะห์ผลการทดลองพบว่า เมื่อยิ่งเพิ่มความเร็วหมุนเชื่อมและความเร็วเดินเชื่อมผลการทดสอบความแข็งแรงดัดยิ่งลดลงทั้งด้านหน้า และด้านหลัง เนื่องมาจากการเปลี่ยนรูปเชิงพลาสติกไม่สมบูรณ์ในระหว่างกระบวนการเชื่อม เนื่องจากการสร้างความร้อนจากการเสียดทานไม่เหมาะสม [14] การแก้ปัญหาต้องเพิ่มความเร็วเดินเชื่อมและลดความเร็วหมุนเชื่อม [15]



รูปที่ 16 ค่าความแข็งแรงดัดของของรอยเชื่อมเชื่อมเสียดทานแบบกวนแบบหัวกวนคู่

4. สรุป

1) อุปกรณ์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนแบบหัวกวนคู่ มีส่วนประกอบหลัก 5 ชิ้นส่วน ประกอบด้วย แกนเพลลาขับ ชุดเฟือง ห้องเครื่อง เพลาหมุน และหัวกวน โดยที่หัวกวนจะมีทั้งหัวพินและปากกวน

2) รอยเชื่อมเมื่อเพิ่มระดับความเร็วเดินเชื่อมมากขึ้นจะเกิดช่องว่าง ที่มีจำนวนกว้างมากขึ้นในด้าน Retreating Side อันเนื่องมาจากการเสียดทานระหว่างหัวกวนกับเนื้อวัสดุที่มีความร้อนสะสมไม่มากพอขณะเชื่อม

- 3) รอยแตกร้าวขนาดเล็กในรอยเชื่อม เกิดจากความร้อนที่สะสมมาจากการเสียดทานของเนื้อวัสดุกับเครื่องมือเชื่อมจนมากเกินไปเกิดความเครียดส่งผลให้เนื้อวัสดุเกิดรอยแตกร้าว
- 4) เกรนที่บิดเบี้ยวและยืดยาวในบริเวณ TMAZ ทั้งด้าน AS และ RS เกิดจากกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนเครื่องมือเชื่อมสัมผัสกับเนื้อวัสดุโดยตรงและเกิดการหมุนวนด้วยแรงเหวี่ยง
- 5) สภาวะการเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่ใช้ความเร็วหมุนเชื่อมที่ 710 rpm ความเร็วเดินเชื่อมที่ 14 mm/min ซึ่งมีค่าความแข็งแรงตึงมากที่สุด คือ 360.58 MPa
- 6) ค่าความแข็งแรงสูงสุดของการทดลองในครั้งนี้เท่ากับ 156.4 HV ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 710 rpm ความเร็วเดินเชื่อม 40 mm/min
- 7) ค่าความแข็งแรงดัด ด้านหน้าสูงสุดที่ความเร็วหมุนเชื่อม 710 rpm ความเร็วเดินเชื่อม 14 mm/min เท่ากับ 40.26 MPa และด้านหลังสูงสุดที่ความเร็วหมุนเชื่อม 710 rpm ความเร็วเดินเชื่อม 14 mm/min เท่ากับ 26.10 MPa

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการจัดสรรจัดงบประมาณผ่านกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (ววน.) ประจำปี พ.ศ. 2564 ภายใต้แผนงานยุทธศาสตร์ การวิจัยและพัฒนานวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

References

- [1] Wang GQ, Zhao YH, Tang YY. Research progress of bobbin tool friction stir welding of aluminum alloys: A review. Acta Metallurgica Sinica (English Letters) 2020;33(1):13-29.
- [2] Dimopoulos A, Vairis A, Vidakis N, Petousis M. On the friction stir welding of Al 7075 thin sheets. Metals 2021;11(1):57.
- [3] Sajadifar SV, Moeini G, Scharifi E, Lauhoff C, Bohm S, Niendorf T. On the effect of quenching on postweld heat treatment of friction-stir-welded aluminum 7075 alloy. Journal of Materials Engineering and Performance 2019;28(8):5255-65.
- [4] Rahul J, Kanchan K, Surjya KP, Shiv BS. Counter rotating twin-tool system in friction stir welding process: A simulation study. Journal of Materials Processing Technology 2018;255:121-8.
- [5] Maulikkumar BP, Komal GD. Studies the twin stir technology and welded parameters of friction stir welding on AA7108 T79. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology 2021;13(6):592-8.

- [6] Kumari K, Pal SK, Singh SB. Friction stir welding by using counter-rotating twin tool. *Journal of Materials Processing Technology* 2015;215(1):132-41.
- [7] Song Y, Yang X, Cui L, Hou X, Shen Z, Xu Y. Defect features and mechanical properties of friction stir lap welded dissimilar AA2024-AA7075 aluminum alloy sheets. *Materials and Design* 2014;55:9-18.
- [8] Safarballi B, Shamanian M, Eslami A. Effect of post-weld heat treatment on joint properties of dissimilar friction stir welded 2024-T4 and 7075-T6 aluminum alloys. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 2018;28(7):1287-97.
- [9] Chen Y, Li H, Wang X, Ding H, Zhang F. A comparative investigation on conventional and stationary shoulder friction stir welding of Al-7075 butt-lap structure. *Metals* 2019;9(12):1264.
- [10] Ni Y, Fu L, Shen Z, Liu XC. Role of tool design on thermal cycling and mechanical properties of a highspeed micro friction stir welded 7075-T6 aluminum alloy. *Journal of Manufacturing Processes* 2019;48:145-53.
- [11] Zhang C, Huang G, Zhang D, Sun Z, Liu Q. Microstructure and mechanical properties in dissimilar friction stir welded AA2024/7075 joints at high heat input: effect of post-weld heat treatment. *Journal of Materials Research and Technology* 2020;9(6):14771-82.
- [12] Padmanaban G, Balasubramanian V. Selection of FSW tool pin profile, shoulder diameter and material for joining AZ31B magnesium alloy-An experimental approach. *Materials & Design* 2009;30(7):2647-56.
- [13] Sivaraj P, Kanagarajan D, Balasubramanian V. Effect of post weld heat treatment on tensile properties and microstructure characteristics of friction stir welded armour grade AA7075-T651 aluminium alloy. *Defence Technology* 2014;10(1):1-8.
- [14] Vetrivel SM, Giridharan K, Peter PD, Chakravarthi G, Stalin B, Alagar K, Manoj KP, Murugesan B. Microstructural and mechanical behaviors of friction stir welded dissimilar AA6082-AA7075 joints. *Advances in Materials Science and Engineering* 2021;41:13895.
- [15] Pushpanath DP, Balamuruga KG, Mahadevan K. Investigation on the change effected by the tool type on the hardness of friction stir processed AA6063 aluminium alloy. *Journal of Applied Sciences* 2012;12(10):1067-70.

ประวัติผู้เขียนบทความ



วรพงศ์ บุญช่วยแทน ปัจจุบันตำแหน่งรองศาสตราจารย์ ผู้รับผิดชอบหลักสูตรสาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย การศึกษาระดับปริญญาตรี วศ.บ.วิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ปริญญาโท วศ.ม.วิศวกรรมอุตสาหกรรมและระบบ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ E-mail: worapong.b@rmuts.ac.th



จักรนรินทร์ ฉัตรทอง ปัจจุบันตำแหน่งผู้ช่วยศาสตราจารย์ ผู้รับผิดชอบหลักสูตรสาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย การศึกษาระดับปริญญาตรี วศ.บ.วิศวกรรมอุตสาหกรรม-การผลิต สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล ปริญญาโท วศ.ม.วิศวกรรมการผลิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ E-mail: jaknarin.c@rmuts.ac.th



วรรณพร ชีววุฒิพงศ์ ปัจจุบันตำแหน่งผู้ช่วยศาสตราจารย์ ผู้รับผิดชอบหลักสูตรสาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย การศึกษาระดับปริญญาตรี วศ.บ.วิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ปริญญาโท วศ.ม.วิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ปริญญาเอก D.Eng. (Fiber Amenity Engineering) University of Fukui, Japan E-mail: watthanaphon.c@rmuts.ac.th



จตุพร ใจดำรงค์ ปัจจุบันตำแหน่งผู้ช่วยศาสตราจารย์ ผู้รับผิดชอบหลักสูตรสาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย การศึกษาระดับปริญญาตรี วศ.บ.วิศวกรรมอุตสาหกรรม-การผลิต สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล ปริญญาโท วศ.ม.วิศวกรรมการผลิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ E-mail: jatuporn.j@rmuts.ac.th

Article History:

Received: November 2, 2022

Revised: March 24, 2023

Accepted: April 1, 2023

การอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองด้วยลมร้อนและลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ

DRYING OF BARRACUDA MANGO USING HOT AIR AND COMBINED HOT AIR-MICROWAVE

สัญญาธิต มานะเสวตกุล¹ จิรวัดน์ สิตรานนท์² และ กิตติศักดิ์ วิธินันท์³

¹นักศึกษา, หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีพลังงาน) สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก, 43 ม.6 ต. บางพระ อ. ศรีราชา

จ. ชลบุรี 2110, manasavetkul.k@gmail.com

^{2,3}อาจารย์, หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีพลังงาน) สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก, 43 ม.6 ต. บางพระ อ. ศรีราชา

จ. ชลบุรี 2110, ²jirawat_si@rmutto.ac.th, ³kittisak_wi@rmutto.ac.th

Sanchit Manasavetkul¹, Jirawat Sitranon² and Kittisak Witinantakit³

¹Student, Master of Engineering Program (Energy Technology) School of Engineering and Innovation, Rajamangala University of Technology Tawan-ok, 43 Moo 6 Bangpra Subdistrict, Sriracha District, Chonburi 2110, Thailand, manasavetkul.k@gmail.com

^{2,3}Lecturer, Master of Engineering Program (Energy Technology) School of Engineering and Innovation, Rajamangala University of Technology Tawan-ok, 43 Moo 6 Bangpra Subdistrict, Sriracha District, Chonburi 2110, Thailand,

²jirawat_si@rmutto.ac.th, ³k_yong28@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองสุกด้วยลมร้อนที่ความเร็วลม 2 เมตรต่อวินาที โดยใช้ลมร้อนอุณหภูมิ 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส และลมร้อนอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ร่วมกับไมโครเวฟกำลังไฟ 700 วัตต์ เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้ง ความแตกต่างของสีมะม่วงโดยรวมก่อนและหลังอบแห้ง ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ปริมาณน้ำอิสระ และการหดตัวของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองสุก จากการศึกษาพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งทำให้อบแห้งมะม่วงได้เร็วขึ้น ใช้เวลาอบแห้งและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลดลง โดยการอบแห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการอบแห้งสั้นที่สุด 320 นาที และความแตกต่างของสีมะม่วงโดยรวม

ก่อนและหลังอบแห้งน้อยที่สุด ($\Delta E=6.08$) ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำที่สุด 478.73 เมกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำระเหย การหดตัวน้อยที่สุดร้อยละ 79.77 ปริมาณน้ำอิสระมีค่า 0.516 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานอาหารแห้ง การอบแห้งด้วยเทคนิคผสมผสาน คือการอบแห้งมะม่วงด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ตามด้วยไมโครเวฟที่กำลังไฟ 700 วัตต์ เปรียบเทียบการอบแห้งมะม่วงด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส พบว่าการอบแห้งด้วยเทคนิคผสมผสานใช้เวลาในการอบแห้งสั้นลงร้อยละ 3.12 และความแตกต่างของสีมะม่วงโดยรวมก่อนและหลังอบแห้งลดลงร้อยละ 40.30 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลดลงร้อยละ 36.7 การหดตัวลดลงร้อยละ 11.12 และปริมาณน้ำอิสระมีค่า 0.505 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานอาหารแห้ง

คำสำคัญ: ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ, มะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง, ไมโครเวฟ, ลมร้อน

ABSTRACT

The objective of this research was to study on drying kinetic, total color difference of mango before and after drying, before and after drying, specific energy consumption, water activity and shrinkage. The Nam Dok Mai mangoes were dried with hot air at 2 m/s, temperature of 50, 60, 70 °C and hot air at 70 °C in combination with a microwave with a power of 700 watts. The study found that increasing drying temperature results in faster drying of mangoes. As a result, the drying time and the specific energy consumption are reduced. Drying mangoes with hot air at 70 °C took the shortest drying time of 320 minutes, total color difference of mango before and after drying was minimal ($\Delta E=6.08$), specific energy consumption was lowest at 478.73 MJ/kg_{evaporated} water, The smallest shrinkage at 79.77% and water activity was 0.516, which was within the dry food standard. Comparison between drying of mangoes with hot air at 70 °C and drying by combined drying technique with hot air at 70 °C and microwave at 700 watts. It was found that drying by combined technique had shorter the drying time by 3.12%, the color difference before and after drying was reduced by 40.30%, specific energy consumption was reduced by 36.7%, shrinkage decreased by 11.12% and water activity was 0.505, which was within the dry food standard.

KEYWORDS: specific energy consumption, barracuda mango, microwave, hot air

1. บทนำ

มะม่วง เป็นไม้ยืนต้นในสกุล ชื่อสามัญ Mango *Mangifera* ซึ่งเป็นไม้ผลเมืองร้อน ชื่อทางวิทยาศาสตร์ : *Mangifera indica* Linn เป็นพืชที่มีถิ่นกำเนิดในอินเดีย มะม่วงมีหลากหลายสาย

พันธุ์ เช่น เขียวเสวย ฟ้านั้น แก้ว โชคอนันต์ อกร่อง แรดและน้ำดอกไม้ เป็นต้น มะม่วงนิยมปลูกกันมากในประเทศไทย มีพื้นที่ปลูกประมาณ 2 ล้านไร่ มีผลผลิตประมาณ 2.1 ล้านตัน เป็นอันดับ 4 ของโลก รองจาก ประเทศอินเดีย เม็กซิโก และปากีสถาน เนื่องจากประเทศไทยมีสภาพภูมิอากาศเหมาะสมกับการเพาะปลูก ประกอบกับเป็นพืชปลูกง่าย เจริญเติบโตได้ดี มีคุณค่าทางโภชนาการ ทั้งวิตามินและแร่ธาตุต่าง ๆ มะม่วงจึงเป็นผลไม้ชนิดหนึ่งที่ได้รับการพัฒนาและส่งเสริมการผลิตตามนโยบายของรัฐบาล [1] มะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง (barracuda mango) เป็นพันธุ์ที่ทำให้ออกดอกติดผลนอกฤดูได้ ทรงพุ่มเล็กใบค่อนข้างใหญ่ ขอบใบเป็นคลื่น การเรียงตัวของใบเป็นระเบียบ ทนต่อแมลงและโรคได้ดีปานกลาง มีผลขนาดปานกลางใช้เวลาตั้งแต่ออกดอกจนกระทั่งผลแก่ประมาณ 110-115 วัน ผลจะมีสีเหลืองสวยถ้าได้รับการห่อ ผลสุกมีสีเหลืองนวล เนื้อสีเหลืองละเอียด รสหวาน กลิ่นหอมซึ่งเป็นเอกลักษณ์ น้ำหนักต่อผลประมาณ 300 กรัม [2] เป็นมะม่วงรับประทานสุก แต่เมื่อสุกจะเกิดการเสื่อมสภาพอย่างรวดเร็ว และในช่วงฤดูกาลออกผลมักพบปัญหามะม่วงน้ำดอกไม้สีทองมีมากจนล้นตลาดส่งผลให้ราคามะม่วงน้ำดอกไม้สีทองตกต่ำ ดังนั้นจำเป็นต้องมีการถนอมอาหารเพื่อยืดอายุการเก็บรักษาและเพิ่มมูลค่า การอบแห้งเป็นวิธีการถนอมอาหารวิธีหนึ่งที่ลดความชื้นของผลิตภัณฑ์อาหารจนถึงจุดที่จุลินทรีย์ไม่สามารถเจริญเติบโตได้ ซึ่งเป็นที่มาของการเสื่อมเสียของผลิตภัณฑ์อาหาร

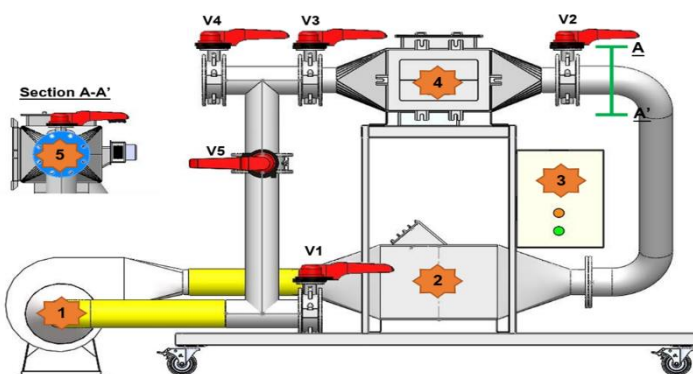
การอบแห้งสามารถทำได้หลายวิธี เช่นวิธีการตากแห้งมะม่วงด้วยพลังงานแสงอาทิตย์เป็นวิธีที่ง่ายใช้อุปกรณ์ไม่ซับซ้อน แต่วิธีนี้จะใช้เวลาในการอบแห้งที่นานกว่าการอบแห้งด้วยตู้อบแบบลมร้อนถึงร้อยละ 85 [3] การอบแห้งด้วยลมร้อน ส่วนใหญ่จะใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลางพาความร้อนถ่ายเทไปยังผิวด้านนอกของผลิตภัณฑ์ทำให้น้ำหรือความชื้นระเหยออกจากผิววัตถุ การระเหยออกของน้ำที่ผิวจะรวดเร็วกว่าการเคลื่อนที่ของน้ำภายในวัตถุไปยังผิวทำให้ในการอบแห้งด้วยลมร้อนในช่วงแรกมีอัตราการอบแห้งที่เร็ว จากนั้นอัตราการอบแห้งก็จะลดลง จนถึงจุดหนึ่งจะไม่เปลี่ยนแปลง [4] การอบแห้งมะม่วงด้วยลมร้อน เป็นวิธีที่ง่าย สะดวก ราคาเครื่องจักรไม่แพง [5, 6] มะม่วงที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนยังคงมีคุณค่าทางโภชนาการ เช่น วิตามินซีและเบต้าแคโรทีน เป็นต้น [7] การอบแห้งมะม่วงด้วยเทคนิคไมโครเวฟ ความถี่คลื่นไมโครเวฟทำให้โมเลกุลของน้ำในมะม่วงเกิดการสั่นสะเทือนจนเกิดเป็นพลังงานจลน์และเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนอย่างรวดเร็ว [8] แต่การทำแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟเป็นแหล่งพลังงานเพียงอย่างเดียว ทำแห้งผลิตภัณฑ์ที่มีความชื้นสูง เช่น ผลไม้และผัก ที่ต้องใช้เวลาในการทำแห้งเป็นเวลานาน จะมีค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับการลงทุนและการใช้งานของเครื่องมือค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับการทำแห้งแบบลมร้อน อย่างไรก็ตามการใช้คลื่นไมโครเวฟในการทำแห้งวัสดุที่มีความชื้นต่ำจะมีประสิทธิภาพดีกว่า จึงมีการประยุกต์ใช้คลื่นไมโครเวฟผสมผสานกับการทำแห้งแบบลมร้อน [9] ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาจนพลาสมาการอบแห้ง ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ความแตกต่าง

ของสีมะม่วงโดยรวมก่อนและหลังอบแห้ง ปริมาณน้ำอิสระ และการหดตัวในการอบแห้งมะม่วง น้ำดอกไม้น้ำหอมสูง

2. อุปกรณ์และวิธีการดำเนินการวิจัย

2.1 เครื่องอบแห้งระดับห้องปฏิบัติการ

เครื่องอบแห้งระดับห้องปฏิบัติการดังรูปที่ 1 ประกอบไปด้วยระบบให้ความร้อนกับอากาศโดยฮีตเตอร์ไฟฟ้า 0 ถึง 6000 วัตต์ และระบบให้ความร้อนโดยไม่โครเวฟ 0 ถึง 1000 วัตต์ ยี่ห้อ LG รุ่น MS2448BKW พร้อมปรับตั้งผ่านชุดควบคุมกำลังไมโครเวฟแบบทำงานต่อเนื่อง ยี่ห้อ Newsail รุ่น LCEL01D พร้อมชุดมอเตอร์หมุนถาดอบแห้ง ระบบการวัดและควบคุมอุณหภูมิแบบ PID (Proportional integral derivative control) ยี่ห้อ Delta รุ่น DTA4849 ซึ่งสามารถควบคุมอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งให้คงที่ในช่วงอุณหภูมิที่กำหนดโดยไม่มีการแกว่งของอุณหภูมิ มีความละเอียด 0.1 องศาเซลเซียส เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิแบบ thermocouple type k มีค่าสัมประสิทธิ์แรงดันต่ออุณหภูมิ $41 \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ ย่านการวัดอุณหภูมิ -200 ถึง 1350°C ต่อกับเครื่องบันทึกอุณหภูมิ Data logger ยี่ห้อ Graphtec รุ่น GL220 มีความละเอียด $\pm 0.05\%$ ของค่าที่อ่านได้ ซึ่งน้ำหนักผลิตภัณฑ์ระหว่างการอบแห้งด้วยโหลดเซลล์พิกัด 2 กิโลกรัม ยี่ห้อ Tedeo Huntleigh รุ่น 1022 แรงดันเอาต์พุต 2mV/V อุปกรณ์แสดงค่าน้ำหนัก ยี่ห้อ Eyecon รุ่น EICMC-1AB ความละเอียดในการอ่านค่า 0.1 กรัม ความแม่นยำ $\pm 0.01\%$ ค่าพลังงานไฟฟ้าจะใช้เครื่องวัดและบันทึกแบบดิจิทัล ยี่ห้อ Schneider รุ่น PM2200



รูปที่ 1 เครื่องอบแห้งระดับห้องปฏิบัติการ ประกอบด้วย (1) พัดลม (2) ฮีตเตอร์ (3) ตัวควบคุม (4) ห้องอบแห้ง (5) แม็กนีตรอน

2.2 วิธีการทดลอง

เตรียมมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองระยะสุก วันที่ 4-7 หลังการเก็บเกี่ยว [10] ซึ่งมะม่วงจะสุกจัดและจะเริ่มเน่าเสียในวันที่ 8 ดังรูปที่ 2 โดยเลือกผลที่มีสีและขนาดสม่ำเสมอ น้ำหนักประมาณ 300 กรัม และวัดค่าความหวานของมะม่วงก่อนอบแห้งเท่ากับ 18 ± 2 องศาบริกซ์ โดยใช้เครื่อง Refractometer ยี่ห้อ OEM รุ่น RHB-90ATC ย่านการวัดความหวาน: 0-90 องศาบริกซ์ ความแม่นยำ 0.5 องศาบริกซ์



ผลมะม่วงในวันที่ 7 ของการเก็บรักษา ผลมะม่วงในวันที่ 8 ของการเก็บรักษา

รูปที่ 2 ระยะสุกมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง [10]

นำมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองสุกมาทำความสะอาด ปอกเปลือก แล้วหั่นขนาด (กว้างxยาวxหนา) $2 \times 4 \times 1$ เซนติเมตร จำนวน 12 ชิ้น น้ำหนักโดยรวมประมาณ 108 ± 2 กรัม นำมาวางบนตะแกรง และนำมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองสุกที่เตรียมไว้บางส่วนมาหาความชื้นเริ่มต้นก่อนการอบแห้ง ส่วนชิ้นมะม่วงที่จัดวางบนตะแกรงนำเข้าเครื่องอบแห้ง ดังรูปที่ 3 โดยมีการอบแห้ง 2 วิธี ดังนี้



รูปที่ 3 ชิ้นมะม่วงที่จัดวางบนตะแกรงเข้าเครื่องอบแห้ง

1) การอบแห้งด้วยลมร้อน (Hot air drying, HA) จะทดลองจำนวน 3 ซ้ำ โดยตั้งอุณหภูมิลมร้อนตรงบริเวณทางเข้าห้องอบแห้งตามเงื่อนไขการทดลอง 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 2 เมตรต่อวินาที [11] วัดความเร็วลมที่ตำแหน่งเดียวกับการวางชั้นมะม่วงในห้องอบแห้งโดยเปิดวาล์ว V1-V4 และปิดวาล์ว V5 เพื่อปล่อยลมร้อนที่ผ่านห้องอบแห้งทั้งหมด ซึ่งน้ำหนักของมะม่วงจำนวน 12 ชิ้น โดยใช้โหลตเซลส์ และวัดอุณหภูมิห้องอบแห้งและมะม่วง โดยใช้เซ็นเซอร์แบบ thermocouple type k เชื่อมต่อกับเครื่องบันทึกอุณหภูมิและวัดค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้ง

2) การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ (Hot air and microwave drying, HA&MW) แบบผสมผสานสองขั้นตอนจะทดลองจำนวน 3 ซ้ำ ขั้นตอนแรกอบแห้งด้วยลมร้อนโดยตั้งค่าลมร้อน 70 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 2 เมตรต่อวินาที [11] โดยเปิดวาล์ว V1-V4 และปิดวาล์ว V5 อบแห้งมะม่วงจนความชื้นลดลงเหลือร้อยละ 70 มาตรฐานแห้ง เนื่องจากช่วงแรกมะม่วงมีความชื้นสูง ลมร้อนจะถ่ายเทความร้อนให้กับเนื้อมะม่วงทำให้ความชื้นระเหยออกอย่างต่อเนื่องจนความชื้นของมะม่วงจะลดลง ความชื้นในมะม่วงเคลื่อนที่ออกมาได้ช้าลงเพราะผิวหน้าของมะม่วงอุณหภูมิสูงขึ้นจึงปิดพัดลมและระบบให้ความร้อนจากฮีตเตอร์ไฟฟ้าแล้วเปลี่ยนเป็นอบแห้งมะม่วงด้วยไมโครเวฟ 700 วัตต์ แบบจิ้งหะ เปิด 20 วินาที และปิด 10 วินาที [6] เป็นขั้นตอนที่สอง และบันทึกค่าการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักและค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้งเหมือนกับวิธีในข้อที่ 1

2.3 การหาความชื้นและอัตราการอบแห้งของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง

สามารถทำได้โดยนำชิ้นมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองที่ต้องการหาความชื้นมาชั่งน้ำหนัก แล้วเอาไปอบแห้งในตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง [12] หลังจากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักเพื่อหาน้ำหนักแห้งของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง แล้วนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาปริมาณความชื้นดังสมการที่ (1)

$$M_d = \frac{w-d}{d} \times 100\% \quad (1)$$

เมื่อ M_d คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง (%d.b.) d คือ น้ำหนักของวัสดุแห้ง (kg) และ w คือ น้ำหนักของวัสดุสด (kg)

ในการทดลองได้ดำเนินการบันทึกการเปลี่ยนมวลหรือปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากมะม่วง ซึ่งเมื่อสิ้นสุดการทดลองจะสามารถวิเคราะห์หาอัตราการอบแห้งได้ดังสมการที่ (2)

$$DR = \frac{\Delta w}{\Delta t} \quad (2)$$

เมื่อ DR คือ อัตราการอบแห้ง (กรัมน้ำระเหยต่อนาที) Δw คือ มวลน้ำที่ระเหย (กรัม) และ Δt คือ เวลาที่เปลี่ยนแปลง (นาที)

2.4 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (specific energy consumption, SEC) คือ การนำน้ำหนักมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองก่อนการอบแห้งและหลังการอบแห้ง และปริมาณพลังงานที่ใช้ตลอดกระบวนการอบแห้งมาคำนวณดังสมการที่ (3) [13]

$$SEC = \frac{3.6E_p}{(m_i - m_f)} \quad (3)$$

เมื่อ SEC คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (เมกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำระเหย) E_p คือ ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้ง (กิโลวัตต์ชั่วโมง) m_i คือ มวลของมะม่วงก่อนอบแห้ง (กิโลกรัม) และ m_f คือ มวลของมะม่วงหลังอบแห้ง (กิโลกรัม)

2.5 การทดสอบคุณภาพด้านสีของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง

ทดสอบสีมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองด้วยเครื่อง 3HN รุ่น Portable colorimeter NH310 ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 0.04 (ΔE^*_{ab}) ระบบสีที่วัดได้ คือ CIE $L^*a^*b^*$ โดยจะวัดค่าสี $L^*a^*b^*$ ที่ชั้นมะม่วงตำแหน่ง หัว กลาง ท้ายของชั้นมะม่วง ซึ่งแต่ละการทดลองใช้ 9 ตัวอย่าง จากนั้นนำค่าสีที่วัดได้มาวิเคราะห์ค่าทางสถิติ คำนวณหาความแตกต่างของสีโดยรวมก่อนและหลังอบแห้ง โดยใช้สมการที่ (4) [14]

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

เมื่อ ΔE คือ ค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวม ΔL^* คือ ค่าความแตกต่างของความสว่าง Δa^* คือ ค่าความแตกต่างของความเป็นสีแดงถึงสีเขียว และ Δb^* คือ ค่าความแตกต่างของความเป็นสีเหลืองถึงสีน้ำเงิน

2.6 การหัตตัว

หาปริมาตรของชั้นมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองโดยใช้หลักการแทนที่ปริมาตรของชั้นมะม่วงในโทลูอีน (Toluene, $C_6H_5CH_3$) แล้วนำไปหาค่าการหัตตัวจากสมการที่ (5) [15]

$$S = \left(1 - \frac{V_f}{V_o}\right) \times 100 \quad (5)$$

เมื่อ S คือ การหัตตัวหลังการอบแห้ง (ร้อยละ) V_f คือ ปริมาตรของมะม่วงสุกหลังการอบแห้ง (ลูกบาศก์เซนติเมตร) และ V_o คือ ปริมาตรของมะม่วงสุกก่อนการอบแห้ง (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

2.7 การวัดค่าปริมาณน้ำอิสระ

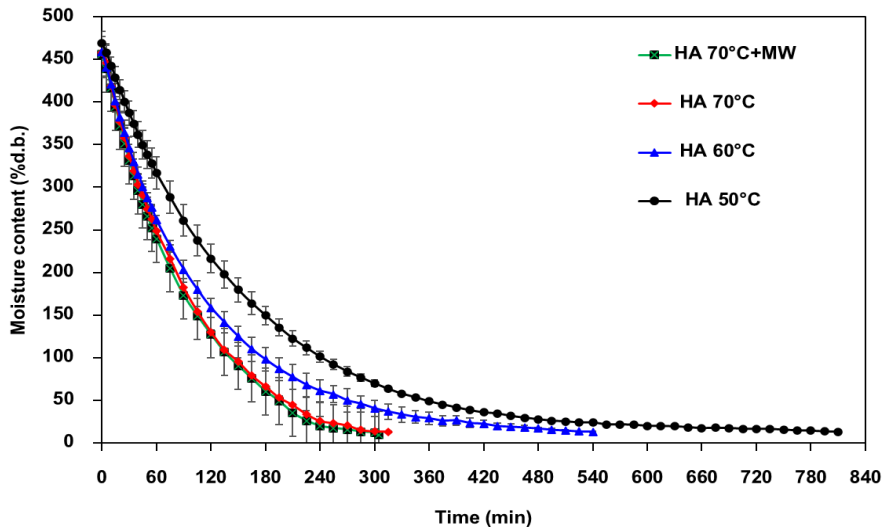
การวัดค่าปริมาณน้ำอิสระโดยนำเอาชิ้นมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองมาทดสอบด้วยเครื่องมือวัดปริมาณน้ำอิสระ ยี่ห้อ Aqualab รุ่น Pre ช่วงการอ่านค่า 0.03 ถึง 1.00 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความแม่นยำในการวัด ± 0.003 โดยควรมีค่าต่ำกว่า 0.6 ที่อยู่ในเกณฑ์อาหารแห้ง ซึ่งจุลินทรีย์ประเภทเชื้อราไม่สามารถเจริญเติบโตได้ [16]

3. ผลการวิจัย

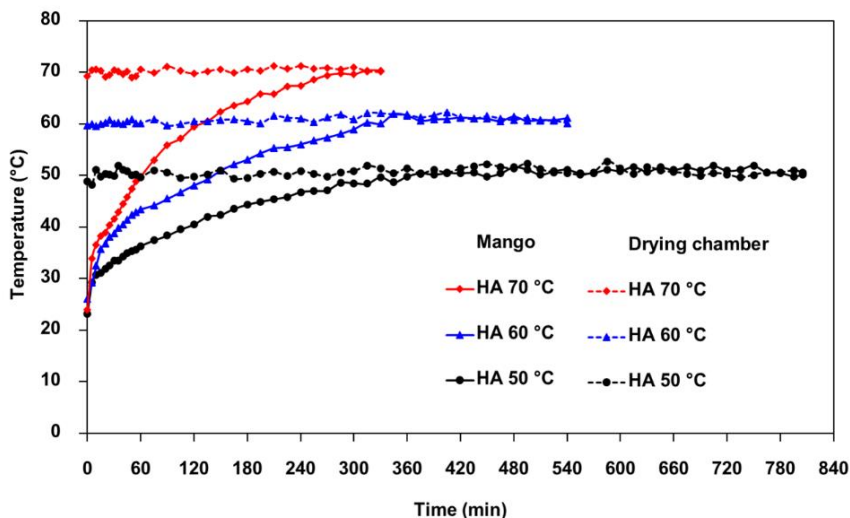
3.1 การอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองด้วยลมร้อน

จากการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองจากความร้อนเริ่มต้นที่ร้อยละ 470.11 มาตรฐานแห้งอบแห้งด้วยลมร้อนจนมีความชื้นสุดท้ายประมาณร้อยละ 13 มาตรฐานแห้ง พบว่าการเปลี่ยนแปลงความชื้นจะเป็นในทิศทางเดียวกันทั้ง 3 อุณหภูมิ ดังรูปที่ 4 คือ ความชื้นจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 2-3 ชั่วโมงแรก เนื่องจากในช่วงแรกของการอบแห้งมะม่วงมีความชื้นสูง เมื่อลมร้อนถ่ายเทความร้อนให้กับเนื้อมะม่วง และมะม่วงมีช่องว่างของเซลล์มากทำให้น้ำที่อยู่ด้านในระเหยออกมาด้านนอกได้ดี ช่วงท้ายของการอบแห้งความชื้นของมะม่วงจะลดลงและมีการหัตตัวของมะม่วงทำให้ช่องว่างของเซลล์ลดลงส่งผลให้น้ำระเหยออกได้ช้า [17] สำหรับปัจจัยของอุณหภูมิลมร้อนที่ใช้ในการอบแห้งมีผลต่อระยะเวลาในการอบแห้ง [3] คือเมื่ออบแห้งด้วยอุณหภูมิลมร้อน 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 2 เมตรต่อวินาที โดยที่อุณหภูมิลมร้อน 70 องศาเซลเซียส จะใช้ระยะเวลา 320 นาที ซึ่งสั้นกว่าการอบแห้งด้วยอุณหภูมิลมร้อน 50 และ 60 องศาเซลเซียส ที่ใช้เวลากการอบแห้ง 810 นาที และ 540 นาที ตามลำดับ เนื่องจากอุณหภูมิลมร้อนที่สูงขึ้นทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่เนื้อมะม่วงมากขึ้นและส่งผลให้ช่วยเร่งอัตราการถ่ายเทมวลจากภายในเนื้อมะม่วงสู่อากาศได้ดีขึ้น [18] โดยในช่วงแรกที่มีมะม่วงมีความชื้นสูงความร้อนที่มะม่วงได้รับจะใช้ในการระเหยน้ำเป็นส่วนใหญ่ เมื่อความชื้นมะม่วงเริ่มลดลง ความร้อนที่มะม่วงได้รับจึงใช้ใน

การเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น โดยเนื้อมะม่วงจะค่อยๆ เพิ่มอุณหภูมิขึ้น จนถึงเวลาประมาณ 300 นาที อุณหภูมิเนื้อมะม่วงจะใกล้เคียงกับอุณหภูมิอบแห้งจนสิ้นสุดการอบแห้ง ดังรูปที่ 5

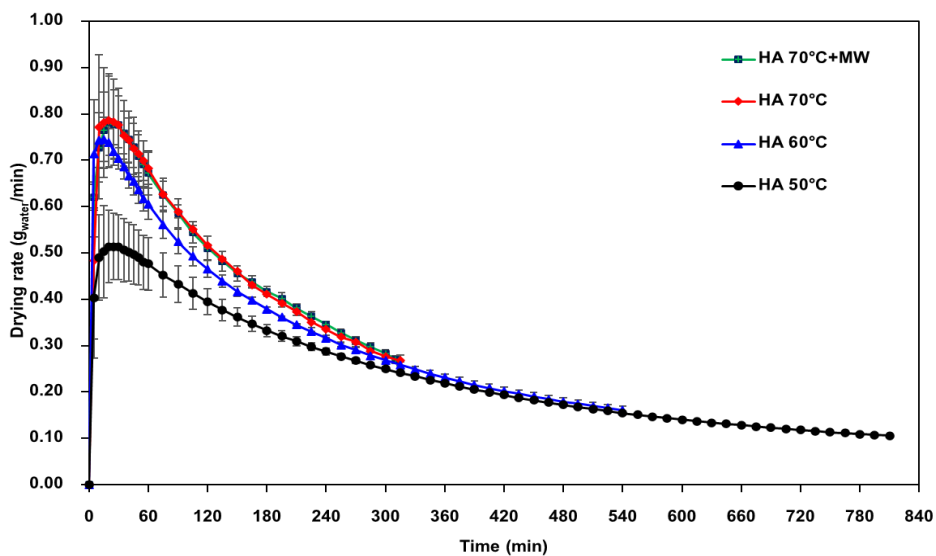


รูปที่ 4 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของมะม่วงระหว่างการอบแห้งด้วยอุณหภูมิลมร้อน 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส และการอบแห้งด้วยเทคนิคผสมผสาน



รูปที่ 5 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของมะม่วงระหว่างการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส

เมื่อพิจารณาถึงการอบแห้งด้วยเทคนิคผสมผสานโดยการอบแห้งมะม่วงด้วยลมร้อน จนมีความชื้นลดลงเหลือร้อยละ 70 มาตรฐานแห้ง จากนั้นเปลี่ยนเป็นอบแห้งด้วยไมโครเวฟที่กำลังไฟ 700 วัตต์ โดยไมโครเวฟทำงานแบบเปิด 20 วินาที และปิด 10 วินาที ใช้เวลาในการอบแห้งทั้งสองขั้นตอนรวม 310 นาที พบว่าการอบแห้งมะม่วงด้วยเทคนิคผสมผสานใช้เวลาในการอบแห้งสั้นกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนธรรมดา 70 องศาเซลเซียส เพียงอย่างเดียว 10 นาที ดังรูปที่ 4 เนื่องจากคลื่นไมโครเวฟช่วยลดปัญหาการเกิดลักษณะเปลือกแข็งที่ผิวหน้าของมะม่วงจึงทำให้ความชื้นระเหยออกมาได้เร็วกว่าการอบแห้งโดยใช้ความร้อนเพียงอย่างเดียวและพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟเข้าสู่ภายในมะม่วงโดยตรงจึงทำให้เกิดความร้อนจากภายในเนื้อมะม่วงส่งผลให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น [9] ดังรูปที่ 6

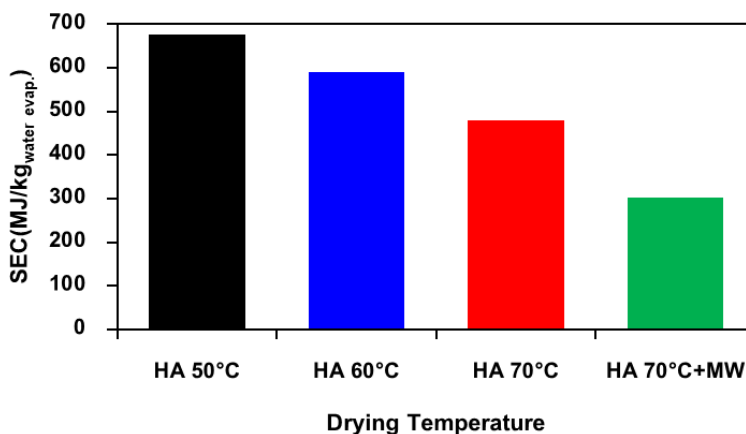


รูปที่ 6 อัตราการอบแห้งของมะม่วงระหว่างการอบแห้งด้วยอุณหภูมิลมร้อน 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส และการอบแห้งด้วยเทคนิคผสมผสาน

3.2 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

จากการทดลองอบแห้งขึ้นมะม่วง แล้วนำน้ำหนักก่อนและหลังอบแห้ง ปริมาณพลังงานที่ใช้ตลอดกระบวนการอบแห้งมาคำนวณหาค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ พบว่า ในการอบแห้งด้วยลมร้อน การเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งจาก 50 เป็น 60 องศาเซลเซียส และจาก 60 เป็น 70 องศาเซลเซียส จะทำให้ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลดลงร้อยละ 12.63 และ 18.98 ตามลำดับ โดยอุณหภูมิอบแห้ง 70 องศาเซลเซียส มีการใช้พลังงานจำเพาะน้อยที่สุด 478.73 เมกะจูลต่อกิโลกรัม และที่อุณหภูมิอบแห้ง 50 องศาเซลเซียส มีการใช้พลังงานจำเพาะสูงสุด 676.34 เมกะจูล

ต่อกิโลกรัม เนื่องจากอิทธิพลของอุณหภูมิอบแห้งที่สูงทำให้มีอัตราการถ่ายเทความร้อนในชั้นมะม่วงสูงส่งผลให้ความชื้นระเหยออกจากมะม่วงได้เร็วทำให้ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งน้อยลง [19] เมื่อนำการอบแห้งด้วยเทคนิคไมโครเวฟเข้ามาผสมผสานแบบสองขั้นตอน พบว่า การอบแห้งด้วยเทคนิคผสมผสานสองขั้นตอน โดยอบแห้งมะม่วงอุณหภูมิร้อน 70 องศาเซลเซียส ต่อด้วยไมโครเวฟกำลัง 700 วัตต์ จะใช้เวลาในการอบแห้งที่สั้นกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว จึงส่งผลให้ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลดลงร้อยละ 36.7 เมื่อเปรียบเทียบกับ การอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว ดังรูปที่ 7 เนื่องจากการอบแห้งมะม่วงด้วยลมด้วยจนเหลือความชื้นร้อยละ 70 มาตรฐานแห้ง ความชื้นภายในมะม่วงจะถ่ายเทออกมายังผิวนอกได้ช้าลง คลื่นไมโครเวฟสามารถผ่านจากผิวนอกของมะม่วงเข้าไปในเนื้อมะม่วงเพื่อกระตุ้นให้น้ำในเนื้อมะม่วงแพร่ออกมาที่ผิวและระเหยออกจากมะม่วงได้เร็วกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อน

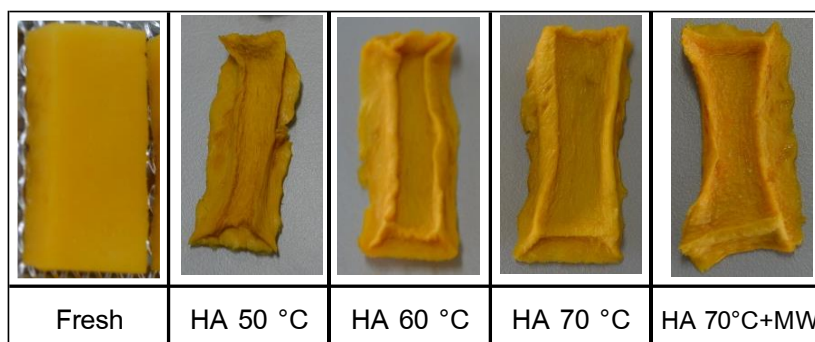


รูปที่ 7 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้งมะม่วง

3.3 คุณภาพด้านสีของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง

คุณภาพด้านสีของมะม่วงหลังการอบแห้งด้วยลมร้อนทุกอุณหภูมิพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งส่งผลให้ค่า L^* , a^* , b^* และ ΔE มีแนวโน้มลดลง ดังรูปที่ 8 และตารางที่ 1 ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งทั้ง 3 อุณหภูมิส่งผลต่อค่าสีของมะม่วงหลังการอบแห้งโดยจะมีค่าความสว่าง (L^*) ค่าสีแดง (a^*) และค่าสีเหลือง (b^*) สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับผลสด [20] เมื่อพิจารณาถึงความต่างของอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง พบว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 60 และ 70 องศาเซลเซียส มีค่า L^* , a^* และ b^* ใกล้เคียงกัน และที่อุณหภูมิ 50 และ 70 องศาเซลเซียส มีค่า L^* ไม่แตกต่างกัน นอกจากนี้เมื่อพิจารณาค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวม (ΔE) ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส มีค่าน้อยที่สุด แต่เมื่อเปรียบเทียบกับ การอบแห้งด้วยเทคนิคผสมผสานสองขั้นตอน คือการอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ต่อด้วยไมโครเวฟกำลังไฟ 700 วัตต์ พบว่า มะม่วงหลังการ

อบแห้งมีค่าความแตกต่างของสีโดยรวมลดลงอย่างมีนัยสำคัญซึ่งมีค่าเหลือ 3.63 โดยมะม่วงมีค่า L^* และ b^* ก่อนอบแห้งและหลังอบแห้งใกล้เคียงกัน แต่มีค่าสีแดงเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล ระหว่างการอบแห้ง [21]



รูปที่ 8 ชิ้นมะม่วงก่อนและหลังการอบแห้งด้วยอุณหภูมิต่าง ๆ

ตารางที่ 1 สีของมะม่วงและค่าความแตกต่างของสีโดยรวมหลังอบแห้ง

Temp (°C)	L^*	a^*	b^*	ΔE
Fresh	32.38 ± 0.23^c	3.91 ± 0.16^d	17.67 ± 0.20^c	N/A
HA 50 °C	34.14 ± 0.50^{ab}	9.64 ± 0.17^a	25.73 ± 0.48^a	10.04 ± 0.33^a
HA 60 °C	35.68 ± 0.39^a	6.10 ± 0.19^c	23.87 ± 0.53^{ab}	7.35 ± 0.55^b
HA 70 °C	35.16 ± 0.35^a	5.53 ± 0.25^c	22.84 ± 0.52^b	6.08 ± 0.52^b
HA 70 °C +MW	33.27 ± 0.61^{bc}	7.14 ± 0.20^b	16.26 ± 0.70^c	3.63 ± 0.29^c

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยตามหลังด้วยตัวอักษรที่เหมือนกันภายในคอลัมน์เดียวกันไม่แตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

3.4 การหัตถ์และปริมาณน้ำอิสระ

การอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียวที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส มีอัตราการหัตถ์สูงกว่าอุณหภูมิ 60 และ 70 องศาเซลเซียส ดังตารางที่ 2 เนื่องจากอุณหภูมิต่ำทำให้การถ่ายเทความร้อนและการคายความชื้นภายในเนื้อมะม่วงต่ำกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิสูง โดยที่อุณหภูมิสูงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่ผิวของมะม่วงเกิดเป็นโซนแข็งที่ผิว เนื่องจากการจับตัวของน้ำตาลในเนื้อมะม่วงทำให้เกิดการหัตถ์น้อยลง [18] เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบการอบแห้งด้วยลมที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส กับการอบแห้งด้วยเทคนิคผสมผสานสองขั้นตอน โดยอบแห้งมะม่วงอุณหภูมิ

ร้อน 70 องศาเซลเซียส ต่อด้วยไมโครเวฟกำลังไฟ 700 วัตต์ พบว่า การอบแห้งมะม่วงด้วยเทคนิคผสมผสาน มีการหดตัวของมะม่วงน้อยกว่าอบแห้งมะม่วงอุณหภูมิร้อน 70 องศาเซลเซียส ร้อยละ 11.12 เนื่องจากคลื่นไมโครเวฟทำให้เกิดความร้อนอย่างรวดเร็วจึงเกิดแรงดันสูงภายในเนื้อมะม่วงระหว่างการอบแห้งทำให้เกิดรูพรุน เช่นเดียวกับการอบพริกทองด้วยเทคนิคไมโครเวฟ ร่วมกับการอบแห้งแบบลมร้อน [22] ปริมาณน้ำอิสระของมะม่วงหลังการอบแห้งด้วยลมร้อน อุณหภูมิ 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส และการอบแห้งด้วยเทคนิคผสมผสานสองขั้นตอน มีค่า 0.540 0.515 0.516 และ 0.505 ตามลำดับ ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญโดยมีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ไม่เกิน 0.6 ซึ่งเป็นค่าที่เชื้อจุลินทรีย์ประเภทเชื้อราไม่สามารถเติบโตได้ [15]

ตารางที่ 2 ค่าความชื้น การหดตัว และปริมาณน้ำอิสระของผลิตภัณฑ์

Temp (°C)	Moisture content (%d.b.)	Shrinkage (%)	Water activity (a_w)
Fresh	470.11	N/A	0.988±0.0053 ^a
HA 50 °C	12.96	84.81±0.150 ^a	0.540±0.0052 ^b
HA 60 °C	12.88	83.26±0.153 ^a	0.515±0.0065 ^b
HA 70 °C	13.05	79.77±0.652 ^b	0.516±0.0112 ^b
HA70 °C +MW	9.37	68.65±0.312 ^c	0.505±0.0106 ^b

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยตามหลังด้วยตัวอักษรที่เหมือนกันภายในคอลัมน์เดียวกันไม่แตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

4. สรุป

การอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้อีสทองสุกด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส พบว่าอุณหภูมิมีผลต่อความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะและระยะเวลาการอบแห้ง ความแตกต่างของสีโดยรวมและการหดตัวของมะม่วงจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดยที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส จะมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ความแตกต่างของสีโดยรวมและการหดตัวของมะม่วงหลังอบแห้ง สูงกว่าที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิการอบแห้งที่แตกต่างกันไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของปริมาณน้ำอิสระ ดังนั้น การอบแห้งมะม่วงด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส จะใช้เวลาอบแห้งสั้นที่สุด 320 นาที ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำที่สุด 478.73 เมกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำระเหย ความแตกต่างของสีมะม่วงโดยรวม 6.08 การหดตัวน้อยที่สุด ร้อยละ 79.77 เมื่อพิจารณาถึงการนำเอาไมโครเวฟกำลังไฟ 700 วัตต์ เข้ามาผสมผสานกับการอบแห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ในการอบแห้งมะม่วงเป็นแบบสองขั้นตอน มีผลให้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นลง ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ความแตกต่างของสีโดยรวมและ

การหดตัวของมะม่วงลดลง เมื่อเทียบกับการอบแห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เพียงอย่างเดียว

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก ที่สนับสนุนงานวิจัยนี้

References

- [1] Sukkhet S. Research and breeding of mango. Bangkok: Department of Agriculture; 2015. (In Thai)
- [2] Peerasak C. Cultivation of nam dok mai mango. Bangkok: National Research Council of Thailand. (In Thai)
- [3] Mugodo K, Workneh TS. The kinetics of thin-layer drying and modelling for mango slices and the influence of differing hot-air drying methods on quality. Heliyon 2021;7(6):e07182.
- [4] Tanapat S. Comparative study of drying using hot air and far infrared [thesis]. Ubon Ratjathanee: Ubon Ratjathanee University; 2007. (In Thai)
- [5] Wilawan C, Withu C, Touchpong C. Effect of swirling air flow drying on color of ripe mango. Proceedings of the 2nd Graduate School Conference. Bangkok; 2018. p. 752-60. (In Thai)
- [6] Jia Y, Khalifa I, Hu L, Zhu W, Li J, Li K, et al. Influence of three different drying techniques on persimmon chips characteristics: A comparison study among hot-air, combined hot-air-microwave, and vacuum-freeze drying techniques. Food and Bioproducts Processing Journal 2019;118:67-76.
- [7] Singh S, Kawade S, Dhar A, Powar S. Analysis of mango drying methods and effect of blanching process based on energy consumption, drying time using multi-criteria decision-making. Cleaner Engineering and Technology Journal 2022;8:100500.
- [8] Duanraem P, Chartree P, Pakpoom P, Nattakamon L. The optimization of combined microwave and hot air for drying system. Industrial Technology and Engineering Pibulsongkram Rajabhat University Journal 2019;1(3):21-33. (In Thai)
- [9] Chaleeda B. Hybrid drying technology application for preservation of heat sensitive food products. KMUTT Research and Development Journal 2012;35(2):269-84. (In Thai)

- [10] Sakaya S, Tawarat T, Krawee T. Postharvest Changes in Quality Characteristics of Nam Dokmai Mango. Proceedings of the 13th Thai Society of Agricultural Engineering Conference. Chiangmai; 2012. p. 518-25. (In Thai)
- [11] Sriariyakul W. Drying of Nam Dok Mai mango using far-infrared radiation in combination with hot-air. Journal of Industrial Technology 2021;17(3):169-82.
- [12] AOAC (Association of Official Analytical Chemists). Official Methods of Analysis. 17th ed. Association of Official Analytical Chemists. Maryland: Gaithersburg; 2000.
- [13] Tirawanichakul S, Chanchiew S, Tirawanichakul Y. Pennywort drying using infrared radiation drying kinetics, energy consumption and quality aspect. KKU Research Journal 2013;18(2):311-24. (In Thai)
- [14] Pei Y, Li Z, Song C, Li J, Xu W, Zhu G. Analysis and modelling of temperature and moisture gradient for ginger slices in hot air drying. Journal of Food Engineering 2022;323 (February):111009.
- [15] Ojadiran JO, Okonkwo CE, Olaniran AF, Iranloye YM, Adewumi AD, Erinle O, et al. Hot air convective drying of hog plum fruit (*Spondias mombin*): effects of physical and edible-oil-aided chemical pretreatments on drying and quality characteristics. Heliyon 2021;7(11):e08312.
- [16] Piyanuch R, Maliwan K. Effects of sugar, citric acid and pectin content on quality of mulberry fruit leather product. RMUTP Research Journal 2020;14(1):58-69. (In Thai)
- [17] Bounnak M, Yingyong P, Benya M. Effect of drying temperature on quality of cassumunar ginger (Plai) Rhizome (*Zingiber montanum* (Koenig) Link ex. Dieter). Thai Agricultural Research Journal 2011;29(1):59-72. (In Thai)
- [18] Bi YX, Zielinska S, Ni JB, Li XX, Xue XF, Tian WL, et al. Effects of hot-air drying temperature on drying characteristics and color deterioration of rape bee pollen. Food Chemistry X 2022 Sep 28;16:100464.
- [19] Im-erb N, Witinantakit K. The Study of drying kinetics and qualities of dried banana slices by vacuum-infrared drying. SWU Engineering Journal 2021;16(3):24-36. (In Thai)
- [20] Duangsrisen W. Effect of raw material preparation method prior drying and temperature in hot-air drying process on the drying time and melon of quality. Journal of Science and Technology Mahasarakham University 2021;40(5):341-6. (In Thai)

- [21] Choosri W, Wiriawattana P, Promsakha na Sakon Nakhon P, Choosri T. Effect of hot-air drying process on properties of dried ripe bananas and pumpkins. Journal of Food technology, Siam University 2020;15(1):37-52. (In Thai)
- [22] Therdtai N, Krajangmathekul S. Effect of microwave assisted hot air drying on quality of dried pumpkin. Proceedings of the 49th Kasetsart University Annual Conference: Agro-Industry. Bangkok; 2011. p. 133-40. (In Thai)

ประวัติผู้เขียนบทความ



สัญญาชิต มานะเสวตกุล ตำแหน่ง นักศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน) สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก 43 ม.6 ต.บางพระ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี 20110
โทรศัพท์ 092-9195352 Email: manasavetkul.k@gmail.com



จิรวัดน์ สิตรานนท์ ตำแหน่ง อาจารย์ประจำหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน) สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก 43 ม.6 ต.บางพระ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี 20110
โทรศัพท์ 081-001-0903 Email: jirawat_si@rmutto.ac.th



กิตติศักดิ์ วิวิณท์กิตต์ ตำแหน่ง อาจารย์ประจำหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน) สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก 43 ม.6 ต.บางพระ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี 20110
โทรศัพท์ 086-386-1885 Email: kittisak_wi@rmutto.ac.th

Article History:

Received: January 5, 2023

Revised: March 13, 2023

Accepted: April 8, 2023

การศึกษาและพัฒนาระบบโลจิสติกส์และโซ่อุปทานการผลิตกาแฟ
กรณีศึกษาไร่กาแฟจาง อำเภอนครไทย จังหวัดพิษณุโลก

THE STUDY AND DEVELOPMENT OF LOGISTICS AND SUPPLY CHAIN
SYSTEMS FOR COFFEE PRODUCTION: A CASE STUDY OF JONGSANG
COFFEE FARM AT NAKON THAI, PHITSANULOK

หทัยชนก พวงแย้ม¹ เพชรรายุธ แซ่หลี² วชิระ วิจิตรพงษ์³ และ อลงกรณ์ เมืองไหว⁴
^{1,2,3,4}อาจารย์, สาขาวิศวกรรมโลจิสติกส์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏ
พิบูลสงคราม 156 หมู่ 5 ต.ปลายชุมพล อ.เมือง จ.พิษณุโลก 65000,

¹Hathaithanok@gmail.com, ²phetcharayud@psru.ac.th, ³wachira.tran@psru.ac.th,
⁴alongkorn@psru.ac.th

Hathaithanok Pongyaem¹, phetcharayud Sae-lee², Wachira Wichitphongsa³
and Alongkorn Muangwai⁴

^{1,2,3,4}Lecturer, Department of Logistics Engineering, Faculty of Industrial Technology,
Pibulsongkram Rajabhat University 156 M.5, Phlai Chumphon, Mueang Phitsanulok
District, Phitsanulok 65000, Thailand,

¹Hathaithanok@gmail.com, ²phetcharayud@psru.ac.th, ³wachira.tran@psru.ac.th,
⁴alongkorn@psru.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาโซ่อุปทานและเพิ่มความได้เปรียบในเชิงการแข่งขันในธุรกิจกาแฟ ด้วยกลยุทธ์ด้านการจัดการและโลจิสติกส์ และเพื่อเสนอแนะการพัฒนาโซ่อุปทานกระบวนการผลิต โดยใช้ตัวอย่างกรณีศึกษาของไร่กาแฟจาง ผลการศึกษาพบว่าการดำเนินการเพาะปลูกและการผลิตมีศักยภาพและเพิ่มความได้เปรียบในด้านการแข่งขัน เพราะมีต้นทุนในการเพาะปลูกดูแลรักษาต่ำ มีตลาดรองรับที่แน่นอน แต่ยังประสบปัญหาด้านแรงงานและการจัดการแมลงศัตรูพืชที่ทำให้ผลผลิตเสียหาย ดังนั้นภาครัฐควรผลักดันและส่งเสริมให้เกิดการรวมกลุ่มของเกษตรกรรายย่อยในแต่ละพื้นที่ เพื่อให้มีแรงงานเพียงพอ และควรสนับสนุนในด้านองค์ความรู้และเงินทุนในการผลิตและแปรรูปกาแฟแก่กลุ่มเกษตรกร เพื่อสร้างมูลค่าเพิ่มและสร้างรายได้ให้กับเกษตรกร

คำสำคัญ: กาแฟ โซ่อุปทาน แผนผังสายธารคุณค่า

ABSTRACT

This research aimed to study supply chains and increase competitive advantage in coffee business through management and logistics strategies to suggest the development of supply chains in the production process. The study was conducted in the lower northern provincial cluster 1 consisting of Sukhothai, Uttaradit, Phitsanulok and Phetchabun at least one in each province. The results showed that coffee cultivation in each study area had potential and competitive advantages because of the low cost of cultivation and there are certain markets. Most farmers faced labor and funding difficulties in coffee production and processing. Therefore, the products are often sold as fresh bean with low price. Therefore, the government should promote the integration of farmers in each area to get enough workers and should support knowledge and funding in coffee production and processing to create added value and make income for them.

KEYWORDS: Coffee, Supply Chain, Value Steam Mapping

1. บทนำ

จากยุทธศาสตร์กาแฟของประเทศไทยในปี 2560-2564 คาดว่าความต้องการกาแฟจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากความต้องการของโรงงานแปรรูปเพิ่มขึ้นจาก 70,000 ตัน เป็น 75,000 ตัน ในปี 2560 หรือเพิ่มขึ้นร้อยละ 7.14 [1] ซึ่งไม่ได้มีมากนักแต่ในประเทศไทยเท่านั้น ทว่าโลกก็มีปริมาณบริโภคกาแฟเพิ่มมากขึ้นด้วยเช่นกัน ส่งผลให้ธุรกิจกาแฟของไทย มียอดส่งออกมาเป็นอันดับที่ 10-11 ของโลก มาอย่างต่อเนื่อง จากข้อมูลของกระทรวงพาณิชย์ และจาก International Coffee Organization ล่าสุดในเดือนเมษายน 2563 ระบุว่ายอดการส่งออกเมล็ดกาแฟของไทย มีปริมาณสูงถึง 81,000 ตัน เป็นอันดับที่ 10 ของประเทศผู้ส่งออกเมล็ดกาแฟมากที่สุด เพิ่มขึ้นจากช่วงปี 2016/2017 ถึง 4% [2] จากความต้องการในการบริโภคกาแฟที่เพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง แต่ผู้ประกอบการยังต้องใช้ต้นทุนที่สูงในกระบวนการผลิตและแปรรูปจนถึงปลายทางที่ผู้บริโภคการศึกษาโซ่อุปทานเพื่อวิเคราะห์ความได้เปรียบในเชิงการแข่งขันในธุรกิจกาแฟด้วยกลยุทธ์ด้านการจัดการและโลจิสติกส์ [3] เพื่อนำไปสู่การพัฒนาโซ่อุปทานกระบวนการผลิตจึงเป็นสิ่งสำคัญ

จากอัตราการเพิ่มขึ้นของความต้องการกาแฟนั้นมีมากขึ้นและถ้าหากผู้ประกอบการสามารถวางแผนและบริหารจัดการให้สามารถผลิตกาแฟได้อย่างมีประสิทธิภาพและเกิดต้นทุนต่ำ จะส่งผลให้ได้ผลผลิตกาแฟที่มีคุณภาพ และก่อให้เกิดรายได้ที่สูงขึ้นตามมา ด้วยเหตุผลที่รัฐบาลมีนโยบายสำคัญในการสร้างการขยายตัวและความมีเสถียรภาพทางเศรษฐกิจของประเทศการพัฒนาเศรษฐกิจ ดังนั้นเพื่อส่งเสริมและสนับสนุนสมรรถนะทางเศรษฐกิจการค้าให้พัฒนาอย่าง

ทันเหตุการณ์และก่อให้เกิดมูลค่าเพิ่ม จึงมีความจำเป็นที่ภาครัฐและเอกชน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ผู้ผลิต ผู้ประกอบการในพื้นที่ที่ต้องมีการเตรียมความพร้อมอย่างรอบด้าน โดยเฉพาะ การศึกษาระบบโซ่อุปทาน เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาใช้เป็นข้อมูลตั้งต้นในการวางแผนและพัฒนา กระบวนการผลิตให้มีประสิทธิภาพ

จากความต้องการในการบริโภคกาแฟที่เพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง แต่ผู้ประกอบการยังคงมีต้นทุน ที่สูงขึ้น เนื่องจากราคาปัจจัยการผลิตเพิ่มขึ้น ดังนั้นเพื่อให้ได้ผลผลิตที่มีคุณภาพสำหรับส่งมอบให้ ผู้บริโภค ผู้วิจัยจึงได้ศึกษาระบบโซ่อุปทานการเพาะปลูกและผลิตกาแฟ โดยเริ่มตั้งแต่การ เพาะปลูก การดูแลรักษา การเก็บเกี่ยวผลผลิต การแปรรูป การขนส่ง และการกระจายสินค้า โดยใช้ตัวอย่างกรณีศึกษาของ ไร่กาแฟงาช้าง ซึ่งตั้งอยู่ในพื้นที่บ้านใหม่ร่องกล้า อำเภอนครไทย จังหวัดพิษณุโลก เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ระบบโซ่อุปทาน และเสนอแนะแนวทางในการพัฒนา ด้านโลจิสติกส์ เพื่อให้ผู้ประกอบการสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตและสามารถตอบสนอง ความต้องการของผู้บริโภคได้

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาโซ่อุปทานและเพิ่มความได้เปรียบในเชิงการแข่งขันในธุรกิจกาแฟด้วยกลยุทธ์ด้านการจัดการและโลจิสติกส์

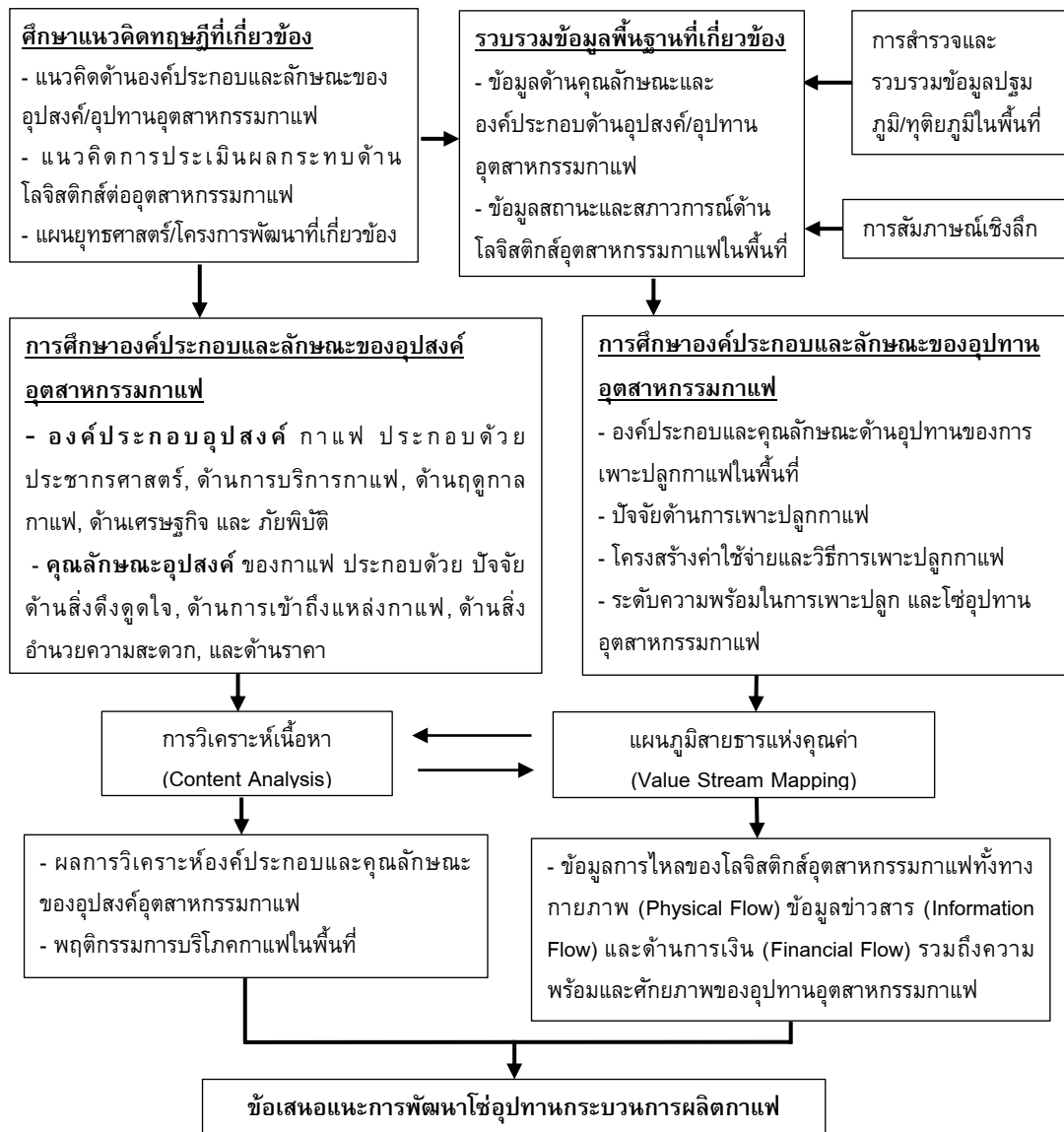
3. วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 การเก็บรวบรวมข้อมูล

ผู้วิจัยทำการเก็บข้อมูลโดยใช้วิธีการลงพื้นที่สำรวจและสัมภาษณ์เชิงลึกเกษตรกรผู้เพาะปลูก กาแฟกรณีศึกษา คือ คุณช่วง ศักดิ์เจริญชัยกุล เจ้าของไร่กาแฟงาช้าง อำเภอนครไทย จังหวัด พิษณุโลก ข้อมูลที่เก็บรวบรวม ได้แก่ 1) ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับพื้นที่เพาะปลูกกาแฟ 2) ข้อมูล เกี่ยวกับการเพาะปลูกและดูแลรักษา กาแฟในแต่ละช่วงเวลา 3) ข้อมูลเกี่ยวกับการเก็บเกี่ยว การ แปรรูป การขนส่งและการจัดจำหน่าย

3.2 กรอบแนวความคิดของการวิจัย

ศึกษาแนวคิดและรวบรวมข้อมูลด้านองค์ประกอบและลักษณะของอุปสงค์/อุปทาน อุตสาหกรรมกาแฟ แผนยุทธศาสตร์/โครงการพัฒนาที่เกี่ยวข้อง วิเคราะห์องค์ประกอบและ คุณลักษณะของอุปสงค์อุตสาหกรรมกาแฟ สร้างแผนภูมิสายธารแห่งคุณค่า และข้อเสนอแนะการ พัฒนาโซ่อุปทานกระบวนการผลิตกาแฟ แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 กรอบแนวคิดการวิจัย

3.3 ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Sangworn and Teeravaraprug [4] ได้ทำการศึกษาใช้อุบาสถกรรมกาแพและวิเคราะห์ต้นทุนใช้อุบาสถกรรมกาแพของปลาสามพัก ด้วยการนำ SCOR Model มาประยุกต์ใช้ ผลการศึกษา พบว่า ใช้อุบาสถกรรมกาแพของปลาสามพัก ประกอบด้วย ผู้เลี้ยงปลา ผู้ค้าส่ง ผู้ผลิตปลาสามพัก ผู้ค้าปลีก และลูกค้า โดยมีต้นทุนใช้อุบาสถกรรมกาแพที่เกิดขึ้นที่ผู้เลี้ยงปลา ผู้ค้าส่ง ผู้ผลิตปลาสามพัก และผู้ค้าปลีก เป็น 21.48 30.70 97.86 และ 122.82 บาทต่อกิโลกรัมตามลำดับ เมื่อคำนวณมูลค่าเพิ่มที่เกิดขึ้น พบว่า มูลค่าเพิ่มที่เกิดขึ้น

โดยรวมเท่ากับ 51.47 บาทต่อกิโลกรัม โดยเกิดขึ้นในแต่ละองค์ประกอบ ดังนี้ 3.62 20.72 18.96 และ 8.17 บาทต่อกิโลกรัม ซึ่งจากผลการวิเคราะห์มูลค่าเพิ่มจะเห็นว่า มูลค่าเพิ่มที่ผู้เลี้ยงปลา มีค่าต่ำที่สุดและต่ำกว่ามูลค่าเพิ่มที่เกิดขึ้นในส่วนอื่น ๆ มาก ดังนั้นจึงได้นำเสนอแนวทางเพิ่มมูลค่าเพิ่มที่ผู้เลี้ยงปลาและแนวทางในการสร้างความเข้มแข็งให้โซ่อุปทาน โดยการสร้างความร่วมมือกันในลักษณะ Cluster เช่น กลุ่มผู้เลี้ยงปลาและกลุ่มผู้ผลิตปลาสามัคคี เพื่อให้เกิดความเชื่อมโยงและช่วยเหลือกันภายในกลุ่ม

Sudchalee et al [5] ได้ศึกษาโซ่อุปทานการค้าปลีกของร้านจำหน่ายของฝาก โดยการนำแนวคิด SCOR MODEL มาประยุกต์ใช้ จากการศึกษาพบว่า ปัญหาที่เกิดขึ้นเกิดจากการวางแผนการจัดหาสินค้าไม่ตรงตามความต้องการของลูกค้า เกิดจากการบรรจุสินค้าไม่เหมาะสมและพนักงานไม่ได้คำนวณความต้องการสินค้าของลูกค้าให้สอดคล้องกับกำลังการผลิต โดยผู้วิจัยได้เสนอแนวทางการปรับปรุงด้านการวางแผนการจัดหา โดยเปลี่ยนรูปแบบการจัดหาสินค้าเป็นการรับสินค้าจากผู้ผลิตโดยตรง เปลี่ยนวิธีการแพ็คของสินค้าแต่ละชนิดให้เหมาะสมกับลักษณะของสินค้า ทำฉลากวันหมดอายุและควรติดโลโก้ของร้านเพื่อดึงดูดความสนใจของลูกค้า โดยภายหลังจากปรับปรุงมีการประเมินประสิทธิภาพเพื่อเป็นแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพการดำเนินงานของโซ่อุปทานธุรกิจค้าปลีกต่อไป

Luechaiwut and Yusuk [6] ได้ศึกษาและปรับปรุงกระบวนการให้บริการจัดส่งสินค้าด้วยแนวคิดการจัดการซัพพลายเชนแบบลีน โดยใช้แผนผังสายธารคุณค่า ผลการวิจัยพบว่า การจัดการซัพพลายเชนแบบลีน โดยการสร้างแผนผังสายธารคุณค่าของกระบวนการให้บริการจัดส่งสินค้า ทำให้ร้านขายเฟอร์นิเจอร์ท้องถิ่นแก้ไขปัญหาได้ โดยลดขั้นตอนการทำงานที่ไม่จำเป็นและไม่ก่อให้เกิดคุณค่าได้ 17 ขั้นตอน ส่งผลให้ค่าแรงงานลดลง 36,000 บาทต่อเดือน และค่าวัสดุสิ้นเปลืองลดลง 10,000 บาทต่อเดือน

จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง หากนำทฤษฎี SCOR Model มาประยุกต์ใช้จะสามารถสร้างได้เพียง 2 ระดับเท่านั้น ผู้วิจัยจึงนำหลักการจัดการโซ่อุปทานและแผนผังสายธารคุณค่ามาประยุกต์ใช้ เพื่อการวางแผนและเสริมสร้างศักยภาพในการเพาะปลูกกาแฟ

3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

นำข้อมูลที่ได้จากการเก็บรวบรวมจากการลงพื้นที่มาสรุปเป็นโซ่อุปทานกาแฟ เพื่อให้เห็นภาพรวมของการเพาะปลูกกาแฟ ทำการวิเคราะห์ SWOT [7] จากข้อมูลที่ได้จากการลงพื้นที่แต่ละแห่ง เพื่อทำการวิเคราะห์และประเมินภาพรวมเกี่ยวกับศักยภาพและความได้เปรียบในการแข่งขัน ผู้วิจัยได้ใช้แผนภาพสายธารคุณค่า (VSM) [8] ในการวิเคราะห์และปรับปรุงการไหลของงานในกระบวนการผลิตและแปรรูปกาแฟ เพื่อมุ่งขจัดความสูญเปล่าหรือกิจกรรมที่ไม่สร้างมูลค่าเพิ่มออกจากกระบวนการ

4. ผลการวิจัย

4.1 โขอุปทานการผลิตกาแฟ ของไร่กาแฟจาง

ไร่กาแฟจาง ตั้งอยู่ใกล้กับหมู่บ้านร่องกล้าหรือบ้านใหม่ร่องกล้า ที่ระดับความสูง 1,400 เมตร จากระดับน้ำทะเล มีพื้นที่เพาะปลูกทั้งหมด 20 ไร่ อยู่ในเขตอำเภอนครไทย จังหวัดพิษณุโลก ด้วยสภาพพื้นที่ที่มีความโดดเด่นด้านสภาพอากาศที่มีความหนาวเย็นตลอดทั้งปี จึงเหมาะกับการปลูกกาแฟอาราบิก้า สายพันธุ์คาติมอร์ ซึ่งเป็นพันธุ์ดั้งเดิมที่มีอยู่ในพื้นที่ คุณจาง ศักดิ์เจริญชัยกุล เจ้าของไร่กาแฟจาง ได้กล่าวว่า ตนและครอบครัวได้ทำการปลูกผักและผลไม้ในพื้นที่มานานกว่า 25 ปีแล้ว พบว่าการเพาะปลูกผักไม่มีความยั่งยืน มีรายได้ไม่แน่นอน และจากการสังเกตเห็นว่ามีต้นกาแฟเติบโตได้ดีและติดผลดก จึงได้ศึกษาหาข้อมูล จนพบว่ากาแฟอาราบิก้า สายพันธุ์คาติมอร์ คุณจางจึงคัดเลือกเมล็ดพันธุ์และทำการเพาะชำเองก่อนที่จะนำไปเพาะปลูกลงในพื้นที่แซมกับต้นพลับเดม ปัจจุบันต้นกาแฟในไร่มีอายุ 14 ปีแล้ว ผ่านการตัดแต่งกิ่งใหม่ (โค่นทำสาว) มาแล้ว 1 ครั้ง

การเพาะปลูก ใช้เมล็ดพันธุ์ดั้งเดิมจากต้นกาแฟที่เจริญเติบโตได้ดีและติดผลดกในพื้นที่ โดยทำการคัดเลือกเมล็ดและเพาะต้นกล้าเอง ก่อนนำไปปลูกแซมกับต้นพลับเดมในแปลง ระยะห่างในการเพาะปลูก คือ 2x2 เมตร หรือ 400 ต้น/ไร่ ไม่มีการจัดหาระบบน้ำในไร่ แสดงดังรูปที่ 2 อาศัยน้ำฝนและร่มเงาจากต้นพลับเดมเป็นหลัก

การดูแลรักษา ใส่ปุ๋ยแล้ว 1 ครั้งในช่วงต้นปี และใส่ปุ๋ยเคมี 2 ครั้ง/ปี มีการให้น้ำช่วยในช่วงเดือนเมษายนที่มีสภาพอากาศแห้งแล้งมาก เพื่อไม่ให้เกิดการเจริญเติบโตหยุดชะงัก ในเดือนพฤษภาคมจะทำการตัดแต่งกิ่ง เมื่อต้นกาแฟมีอายุได้ 3 ปี จะเริ่มให้ผลผลิต เมื่อต้นกาแฟมีอายุมาก ต้นสูงใหญ่ ทำให้เก็บเกี่ยวผลผลิตยากและสังเกตเห็นว่าผลกาแฟแห้งติดต้นและผลผลิตลดลง จะตัดต้นกาแฟทำสาว เพื่อให้เกิดต้นใหม่ มีทรงพุ่มเตี้ยและเก็บเกี่ยวผลผลิตได้ง่าย หลังจากตัดกิ่ง (ทำสาว) 2 ปี ต้นกาแฟก็จะเริ่มให้ผลผลิตใหม่ได้ โดยที่ไร่จะตัดต้นทำสาวเมื่อต้นอายุได้ 10 ปี การดูแลรักษาจะใช้แรงงานในครอบครัวเป็นหลัก



รูปที่ 2 สภาพทั่วไปของไร่กาแฟจาง

การเก็บเกี่ยวผลผลิต ต้นกาแฟจะเริ่มให้ผลผลิตได้ในปีที่ 3 ดอกจะบานช่วงเดือนกันยายน-ตุลาคม เมื่อผลกาแฟสุกจะเป็นสีแดงหรือสีแดงเล็ดหมูเรียกว่า “เชอร์รี่” สามารถเก็บเกี่ยวได้ช่วงเดือนธันวาคม-มีนาคม การเก็บเกี่ยวจะเก็บเฉพาะผลเชอร์รี่ (ผลสีแดง) ต้นกาแฟ 1 ต้นจะเก็บเกี่ยวได้ 2-3 รอบ เนื่องจากผลกาแฟจะสุกไม่พร้อมกันต้องเลือกเก็บ ต้นกาแฟ 1 ต้นจะเก็บผลเชอร์รี่ได้ประมาณ 70-80 กิโลกรัม โดยในช่วงเก็บเกี่ยวจะใช้แรงงานในการเก็บอย่างน้อยวันละ 5 คน ให้ค่าจ้างวันละ 300 บาท/คน กาแฟที่เก็บเกี่ยวได้เมื่อนำไปสีเป็นกาแฟกะลาแล้วจะได้ผลผลิต 400-500 กิโลกรัม/ไร่

การแปรรูป ผลเชอร์รี่แดงที่เก็บเกี่ยวได้สามารถนำไปผ่านกระบวนการแปรรูป เพื่อนำไปจัดจำหน่ายต่อ โดยมีเครื่องสีกาแฟและเครื่องคั่วกาแฟเป็นของตนเอง กาแฟที่ผ่านกระบวนการแปรรูปแล้วแบ่งเป็น 3 ประเภท ดังนี้

1) กาแฟกะลา เป็นการนำผลเชอร์รี่ที่เก็บเกี่ยวได้ไปแช่น้ำหมักไว้ในถังไม่เกิน 12 ชั่วโมงเพื่อให้เปลือกเปื่อยยุ่ยก่อน แล้วจึงนำมาล้างให้สะอาด เพื่อเอาเปลือกสีแดงและเมือกออก แล้วนำไปตากให้แห้ง จนความชื้นในเมล็ดมีค่า เท่ากับ 9-10 % แล้วจึงใส่ถุงตาข่ายเพื่อนำไปจัดเก็บไว้รอจำหน่ายหรือแปรรูปต่อไป กาแฟกะลาตากแห้งสามารถจัดเก็บได้นานถึง 1 ปี แสดงดังรูปที่ 3 ทั้งนี้ต้องเฝ้าระวังและป้องกันไม่ให้เกิดมอดในระหว่างการจัดเก็บ ผลเชอร์รี่สดที่ได้จากการเก็บเกี่ยวของไร่กาแฟงช้างจะนำมาแปรรูปเป็นกาแฟกะลาทั้งหมดก่อนที่จะนำไปจัดเก็บ



รูปที่ 3 กาแฟกะลาที่จัดเก็บไว้สำหรับรอแปรรูปและจัดจำหน่าย

2) กาแฟสาร เป็นกาแฟที่ได้จากการนำกาแฟกะลาที่ตากแห้งแล้วมาสีด้วยเครื่องสี เพื่อกะเทาะให้เปลือกสีครีมหลุดออก หลังจากนั้นจะนำไปคัดขนาดตามเกรด ผลผลิตที่ได้สามารถนำไปจำหน่ายให้กับโรงคั่ว และร้านกาแฟ เพื่อนำไปคั่วและจำหน่ายต่อไป

3) กาแฟคั่ว เป็นกาแฟที่ได้จากการนำกาแฟสารที่ผ่านการคัดขนาดแล้วไปคั่วในระยะเวลาต่างๆ เพื่อให้ได้กาแฟที่พร้อมสำหรับการนำไปบดสำหรับชงกาแฟต่อไป การคั่วกาแฟแบ่งเป็น 3 ระยะ

คือ คั่วอ่อน คั่วกลางและคั่วเข้ม ซึ่งจะใช้เวลาในการคั่วต่างกัน ทำให้มีรสชาติ ความหอมและความเข้มของกาแฟต่างกัน การคั่วกาแฟเป็นงานที่ละเอียดอ่อนและซับซ้อน เนื่องจากมีปัจจัยหลายอย่างส่งผลกระทบต่อคุณภาพของกาแฟที่ได้ เช่น ขนาดของเมล็ดกาแฟสด ความชื้นของเมล็ดกาแฟ อุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้ในการคั่ว เป็นต้น

การขนส่ง ใช้รถกระบะของตนเองเป็นหลัก ในการขนส่งผลผลิตจากไร่มายังพื้นที่จัดเก็บ เนื่องจากเส้นทางเข้าไปยังไร่กาแฟค่อนข้างแคบและยากลำบาก โดยเฉพาะในหน้าฝน หากเป็นการจัดจำหน่ายกาแฟสดหรือกาแฟคั่วในพื้นที่ใกล้เคียงก็จะใช้รถกระบะในการจัดส่งให้ หรืออาจจะให้ผู้ซื้อนำรถมารับสินค้าเองทั้งนี้ขึ้นอยู่กับรถของทั้งสองฝ่าย หากเป็นการสั่งซื้อในพื้นที่ต่างจังหวัดและมีปริมาณไม่มากจะใช้บริการขนส่งพัสดุในพื้นที่ในการจัดส่งสินค้าให้กับลูกค้า

การจัดจำหน่าย ปัจจุบันจัดจำหน่ายกาแฟใน 2 รูปแบบ คือ ขายปลีกและส่งแบบกาแฟกะลาและขายแบบกาแฟคั่ว ไม่ได้นิยมขายขายกาแฟแบบผลเชอร์รี่สด และแบบกาแฟสดเนื่องจากไม่คุ้มค่า กาแฟกะลาจะนำไปจำหน่ายให้กับพ่อค้าคนกลางในราคา 120 บาท/กิโลกรัม เพื่อนำไปแปรรูปต่อ แต่โดยส่วนใหญ่แล้วจะขายในรูปแบบกาแฟคั่วมากกว่า เนื่องจากได้ราคาที่ดีกว่า โดยมีราคาตั้งแต่ 350-1,500 บาท/กิโลกรัม ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับเกรดของกาแฟ ในการขายกาแฟคั่วร้อยละ 50 เป็นการขายให้กับลูกค้า เพื่อให้ลูกค้านำไปขายต่อโดยติดแบรนด์ของลูกค้าเอง ส่วนที่เหลืออีกร้อยละ 50 จะคั่วขายในแบรนด์ของตนเอง ชื่อแบรนด์ว่า “กาแฟจางช้าง” แสดงดังรูปที่ 4 ปัจจุบันมีช่องทางการจัดจำหน่ายทั้งแบบผ่านช่องทางออนไลน์ ลูกค้ามารับเองและจัดส่งให้กับร้านกาแฟต่าง ๆ ที่อยู่ในพื้นที่ใกล้เคียง นอกจากนี้ยังมีร้านเล็ก ๆ สำหรับขายกาแฟด้วย

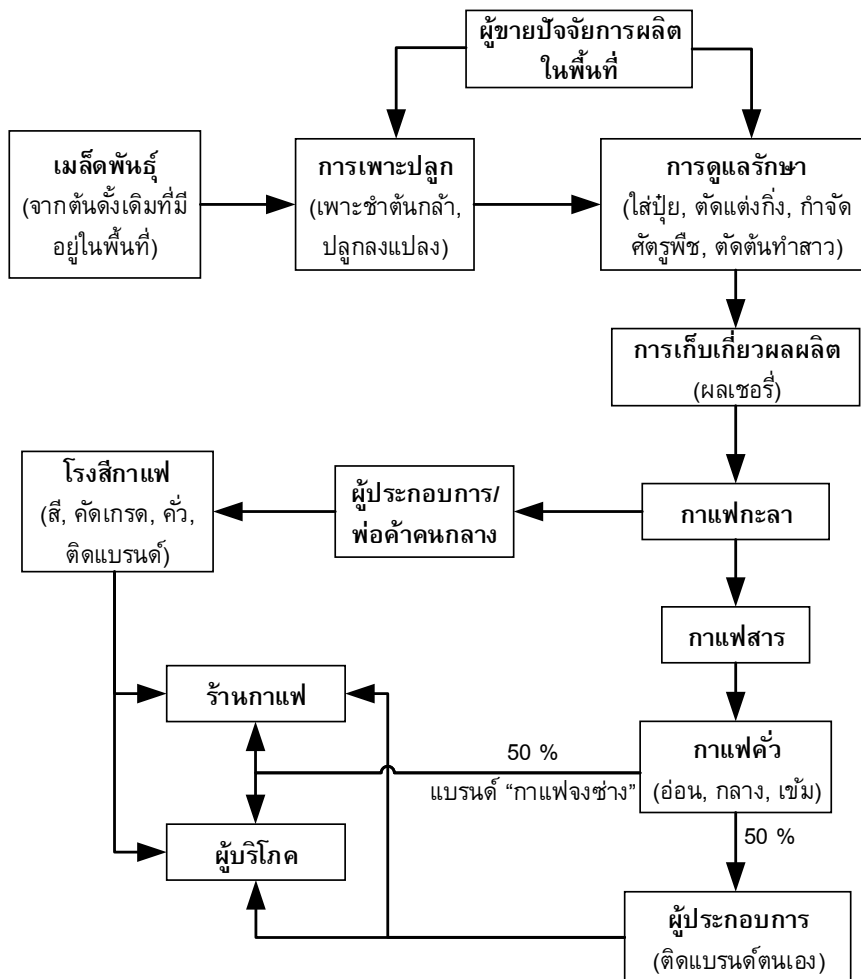


รูปที่ 4 กาแฟจางช้างแบบคั่วอ่อน คั่วกลางและคั่วเข้ม

ปัญหาและอุปสรรค ประสบปัญหาโรครากปม โรคใบแห้ง และมอดเจาะทำลายผลกาแฟ ทำให้ผลผลิตบางส่วนได้รับความเสียหาย ได้มีการใช้สารชีวภัณฑ์เข้ามาช่วยในการป้องกันโรคและกำจัดมอดร่วมกับการเก็บผลที่มีมอดเจาะไปเผาทำลาย เพื่อลดการระบาดของมอด นอกจากนี้ยัง

ประสบปัญหาขาดแคลนแรงงานในช่วงเก็บเกี่ยวผลผลิต เนื่องจากการเก็บเกี่ยวผลกาแฟสดทำได้ช้าและต้องใช้ทักษะในการคัดเลือกและเก็บผลกาแฟสุกในระยะที่เหมาะสมเท่านั้น เพราะจะส่งผลต่อคุณภาพของกาแฟที่ผลิตได้

จากข้อมูลการผลิตและแปรรูปกาแฟของไร่กาแฟจางช้างที่ได้กล่าวมาผู้วิจัยได้นำมาเขียนเป็นแผนภาพโซ่อุปทานได้ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 โซ่อุปทานการผลิตกาแฟของไร่กาแฟจางช้าง

4.2 ผลการวิเคราะห์ SWOT ของไร่กาแฟงช้าง

จุดแข็ง

- 1) มีการผลิตและแปรรูปเมล็ดกาแฟแบบครบวงจร สามารถควบคุมคุณภาพในกระบวนการต่าง ๆ ได้
- 2) เจ้าของไร่มีความรู้ ความเชี่ยวชาญ และประสบการณ์ในการผลิตกาแฟมาอย่างยาวนาน
- 3) มีเครื่องสีและเครื่องคั่วที่ทันสมัยเป็นของตนเอง
- 4) มีฐานลูกค้าที่เป็นลูกค้าประจำ มีตลาดรองรับที่แน่นอนสามารถจำหน่ายสินค้าได้ทั้งแบบขายส่งและขายปลีก
- 5) มีพนักงานประจำซึ่งเป็นลูกสาวที่มีทักษะ ความรู้และประสบการณ์ในการปรุง และคั่วกาแฟ จากบริษัทที่มีชื่อเสียงด้านกาแฟมาก่อน
- 6) มีช่องทางการขายที่หลากหลาย ได้แก่ การขายทางออนไลน์ การขายผ่านหน้าร้านของตนเอง และมีตัวเลือกในการจัดส่งสินค้าที่หลากหลาย

จุดอ่อน

- 1) ขาดแคลนแรงงานในการเก็บเกี่ยวผลผลิต เนื่องจากไร่กาแฟอยู่ในพื้นที่ห่างไกล เป็นชุมชนขนาดเล็ก และต้องใช้คนในพื้นที่ที่มีทักษะและความชำนาญ ทำให้หาคนงานได้ยาก ต้องใช้เวลาในการเก็บเกี่ยวผลผลิตและก่อให้เกิดต้นทุนสูง
- 2) ในกระบวนการคัดแยกเมล็ดกาแฟก่อนนำไปคั่วต้องใช้เวลาในการคัดแยกขนาดด้วยมือ ทำให้เกิดความล่าช้าในการทำงาน
- 3) ปริมาณของผลผลิตที่ได้ในแต่ละปียังไม่เพียงพอต่อความต้องการของตลาด

โอกาส

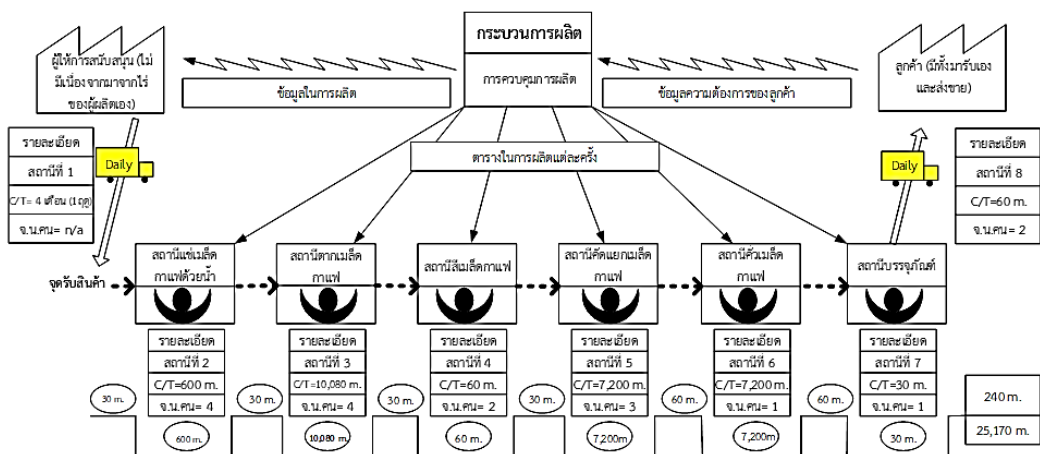
- 1) พื้นที่เพาะปลูกกาแฟตั้งอยู่ในพื้นที่ที่เป็นแหล่งท่องเที่ยว สามารถพัฒนาเป็นแหล่งท่องเที่ยวเชิงเกษตรได้ในอนาคต
- 2) ด้วยความก้าวหน้าของเทคโนโลยีในปัจจุบัน ทำให้มีเครื่องจักรหรือเทคโนโลยีใหม่ ๆ ที่สามารถนำมาเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิต หรือช่วยเพิ่มช่องทางการติดต่อและจำหน่ายกาแฟได้ ทำให้สามารถเข้าถึงลูกค้ารายใหม่ ๆ ได้มากขึ้น
- 3) มีหน่วยงานรัฐที่สามารถให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์สำหรับการผลิตและแปรรูปกาแฟ

อุปสรรค

- 1) ประสบปัญหาโรครากปม โรคใบแห้ง และมอดเจาะผล ส่งผลให้ผลผลิตบางส่วนได้รับความเสียหาย
- 2) ผลกระทบจากโรคระบาด Covid 19 ส่งผลกระทบให้ความต้องการบริโภคกาแฟลดลง

4.3 แผนผังสายธารคุณค่า (Value Stream Mapping: VSM)

ในการศึกษากระบวนการแปรรูปของเมล็ดกาแฟของไร่กาแฟช้าง ในส่วนของการผลิตตั้งแต่การเก็บเกี่ยวเมล็ดกาแฟสดจากไร่มาทำการแปรรูปเพื่อบรรจุในขั้นตอนสุดท้าย คณะผู้วิจัยได้ใช้ทฤษฎีของการจัดสายธารคุณค่า โดยสายธารคุณค่านี้จะแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน ได้แก่ 1) สายธารคุณค่าปัจจุบัน 2) สายธารคุณค่าอนาคต แต่เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาขั้นตอนการดำเนินการในภาพรวมทั้งระบบจึงจัดทำเพียงแต่สายธารคุณค่าปัจจุบันเท่านั้น อีกทั้งในการเก็บเกี่ยวในบางครั้งจะได้ปริมาณที่ไม่เท่ากันทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาพอากาศ ฤดูกาล และจำนวนพนักงานที่เก็บเกี่ยวผลผลิต (ทางโรงผู้ผลิตประสบปัญหาในเรื่องของพนักงานที่ขาดแคลนเป็นประจำ) ซึ่งในแผนภาพสายธารคุณค่าที่จัดทำขึ้นนั้นจะใช้เวลาโดยเฉลี่ยของการเก็บเกี่ยวและการผลิตทั้งหมดในแต่ละครั้งได้แก่ ตั้งแต่ส่งสินค้าเข้ามากระบวนการแรกจนถึงกระบวนการสุดท้ายตามข้อจำกัดและปัจจัยที่ได้กล่าวไว้ ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 สายธารคุณค่าปัจจุบันของการแปรรูปกาแฟ

จากรูปที่ 6 บอกถึงขั้นตอนในการแปรรูปเมล็ดกาแฟซึ่งอยู่ในส่วนกลางน้ำของโซ่อุปทานของงานวิจัยนี้ โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1) การเก็บเกี่ยวผลผลิตจากไร่จะมีคนงานที่ผู้ประกอบการเป็นคนจ้างเพื่อเข้ามาเก็บเกี่ยวผลผลิตในแต่ละครั้ง ซึ่งคนงานในแต่ละครั้งจะหายากและมีจำนวนน้อยเนื่องจากแรงงานต้องมีความชำนาญพอสมควร ความคุ้มค่าที่ได้เมื่อแลกกับสภาพร่างกายในการเก็บในแต่ละวัน จึงไม่ค่อยมีคนงานเข้ามาเก็บเกี่ยว ดังนั้นทางผู้ประกอบการจึงจำเป็นต้องจ้างแรงงานเหล่านี้เป็นจำนวนเงินที่สูง เพื่อดึงดูดใจให้มีแรงงานเข้ามาเก็บเกี่ยวผลผลิตดังกล่าว ซึ่งผลผลิตที่ได้ทั้งหมดจะมาจากไร่ของ

ผู้ประกอบการเอง โดยไม่มีการซื้อเมล็ดกาแฟจากที่อื่นเข้ามาปะปน เนื่องจากคุณภาพที่กาแฟได้จากไร่อื่นหรือแหล่งอื่นนั้นมีความหลากหลายแตกต่างกัน จึงมีความเสี่ยงที่เมล็ดกาแฟในไร่ของตนจะได้รับผลกระทบตามไปด้วย จนส่งผลให้รสชาติของกาแฟเปลี่ยนแปลงไปจากของเดิม (คุณสมบัติและรสชาติของกาแฟที่แตกต่างกันเป็นผลมาจากการเพาะปลูก การให้น้ำ ให้อุณหภูมิ และสภาพพื้นที่ที่แตกต่างกัน) และอาจทำให้จำนวนลูกค้าลดน้อยลงตามไปด้วย ช่วงของการเก็บเกี่ยวผลผลิตจะอยู่ในช่วงเดือนธันวาคม - มีนาคมของทุกปี รวม 4 เดือน

2) เมื่อได้เมล็ดกาแฟจากไร่มาแล้วจะทำการขนส่งด้วยรถกระบะจากไร่มายังจุดรับสินค้าที่อยู่ใกล้เคียงกับสถานประกอบการหรือโรงผลิต โดยพนักงานจะทำการขนเมล็ดกาแฟลงจากรถเพื่อนำมาเข้ายังสถานีงานที่ 1 คือ สถานีสำหรับการแช่เมล็ดกาแฟด้วยน้ำ เพื่อให้เปลือกนุ่มและเปื่อยใช้พนักงาน 4 คนสำหรับจุดนี้และใช้เวลาในการแช่ 600 นาทีต่อการขนมาในแต่ละครั้ง (ไม่สามารถระบุจำนวนปริมาณที่แน่นอนได้เนื่องจากปัจจัยดังกล่าวข้างต้น คณะผู้วิจัยจึงใช้เป็นค่าเฉลี่ยทั้งหมดซึ่งได้ข้อมูลมาจากพนักงานของสถานประกอบการเอง)

3) เมื่อแช่น้ำจนเปลือกนุ่มหมดแล้วจะนำเมล็ดกาแฟทั้งหมดที่ได้มาล้างเมื่อออก แล้วทำการตากแดดทั้งหมด 7 แดด (นับจากวันที่มีแสงแดดทั้งวันเท่านั้น) จนวัดความชื้นในเมล็ดมีค่าเท่ากับ 9-10 % เพื่อให้จัดเก็บได้นาน และยังส่งผลให้ได้กาแฟที่มีรสชาติดีด้วย โดยใช้เวลาประมาณ 10,080 นาที และใช้พนักงาน 4 คน

4) หลังจากนั้นนำเมล็ดกาแฟที่ได้มาสีด้วยเครื่องสีเมล็ดกาแฟโดยเฉพาะ เพื่อทำการคัดแยกเปลือกที่ยังติดอยู่ออกให้หมดหลังจากการตากแดด ลักษณะจะเหมือนการสีข้าวสาร โดยเมล็ดกาแฟจะไหลตกลงมาในถังรองรับที่จัดเตรียมไว้ ซึ่งจะมีการแยกขนาดเบื้องต้นของเมล็ดกาแฟที่ได้ออกมา การสีแต่ละครั้งจะใช้เวลาประมาณ 60 นาที

5) เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการสีแล้วจะนำเมล็ดกาแฟทั้งหมดมายังสถานีการคัดแยกเมล็ดกาแฟ ซึ่งขั้นตอนนี้ถือว่าเป็นขั้นตอนที่สำคัญมากเพราะต้องใช้คนงานในการคัดแยกทั้งหมดไม่สามารถใช้เครื่องจักรในการคัดแยกได้ จึงทำให้ต้องใช้เวลานานและต้องใช้ความชำนาญของพนักงานเป็นหลัก โดยส่วนใหญ่จะเป็นพนักงานหญิงเพราะต้องใช้ความละเอียดและต้องนั่งคัดแยกตลอดทั้งวัน ซึ่งการคัดแยกดังกล่าวมีวัตถุประสงค์เพื่อคัดเมล็ดกาแฟที่เสียหรือไม่ได้ขนาดออกไป ซึ่งจะมีราคาขายที่ต่างกัน โดยจะต้องทำการคัดแยกที่ละเม็ดเท่านั้น เวลาที่ใช้โดยเฉลี่ยในแต่ละครั้งที่มีการเข้ามาของผลผลิตจะอยู่ที่ประมาณ 7,200 นาที

6) ขั้นตอนต่อไปจะเป็นขั้นตอนของการนำเมล็ดกาแฟมาคั่วโดยใช้เครื่องคั่วกาแฟที่จัดทำขึ้นมาเป็นเฉพาะ โดยเมล็ดกาแฟจะถูกนำไปใส่ในเครื่องตามปริมาณที่กำหนดไว้ และพนักงานจะต้องใช้ความร้อนและเวลาที่เหมาะสมในแต่ละครั้ง เพื่อไม่ให้เมล็ดกาแฟที่ได้มีรสชาติผิดแปลกไป กระบวนการนี้เมล็ดกาแฟจะเปลี่ยนสีจากสีเข้มน้ำตาลเป็นสีน้ำตาลไหม้และมีกลิ่นหอมของกาแฟ จะใช้เวลาโดยเฉลี่ยของขั้นตอนนี้อยู่ที่ 7,200 นาที ในแต่ละล็อตที่เข้ามา

7) ขั้นตอนบรรจุภัณฑ์จะเป็นขั้นตอนสุดท้ายของการผลิต เมล็ดกาแฟที่ได้จะถูกนำมาใส่ในถุงพลาสติกขนาด 10 กิโลกรัม สำหรับขายส่ง และจะนำมาใส่บรรจุภัณฑ์ที่สวยงามที่เป็นลักษณะเฉพาะของสถานประกอบการขนาด 200 กรัม สำหรับการขายปลีกหรือเป็นของฝากสำหรับคนที่มาซื้อหรือขายทางออนไลน์

จากที่กล่าวมาทั้งหมดเป็นขั้นตอนทั้งหมดในการแปรรูปเมล็ดกาแฟของกรณีศึกษาซึ่งสถานประกอบการที่ศึกษานี้เป็นสถานประกอบการที่มีการปลูกมาอย่างยาวนานและเป็นเจ้าแรกของการปลูกหรือนำเมล็ดกาแฟเข้ามาขยายพันธุ์ให้กับคนในพื้นที่ได้ปลูกและขายกันจนถึงปัจจุบัน การปลูกและแปรรูปกาแฟนี้จะต้องใช้ความชำนาญและเชี่ยวชาญเป็นอย่างมาก เพราะทุกขั้นตอนที่เกี่ยวข้องในกระบวนการจะส่งผลต่อคุณสมบัติและรสชาติกาแฟที่ได้รับ

5. สรุปผลและการอภิปรายผล

5.1 การวิเคราะห์ศักยภาพและความได้เปรียบในการแข่งขัน

1) โรงกาแฟงช่วงมีศักยภาพและความได้เปรียบในการแข่งขันอยู่ในระดับสูง เนื่องจากมีความได้เปรียบทั้งในด้านของแหล่งทรัพยากรและด้านต้นทุนการเพาะปลูกและการผลิตกาแฟ ด้วยที่ตั้งของโรงกาแฟที่ตั้งอยู่ในพื้นที่ที่มีสภาพอากาศเหมาะสม และใช้สายพันธุ์ดั้งเดิมที่ให้ผลดกและเจริญเติบโตได้ดีที่มีอยู่ในพื้นที่ ทำให้ง่ายต่อการเพาะปลูกและดูแลรักษา ประกอบกับเจ้าของไร่มีความรู้ ความเชี่ยวชาญ และประสบการณ์ในการผลิต มีเครื่องจักรที่ใช้ในการแปรรูปกาแฟเป็นของตนเอง และมีพนักงานประจำที่มีความรู้และประสบการณ์ในการปรุง และคั่วกาแฟ ทำให้สามารถปรับปรุง ดัดแปลงและพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ ๆ ได้ มีแบรนด์สินค้าเป็นของตนเอง ผลผลิตที่ได้มีตลาดรองรับที่แน่นอน สามารถขายผลผลิตได้หลายช่องทางและได้ราคาสูง

2) แนวทางในการพัฒนาศักยภาพของโรงกาแฟงช่วง

2.1) ในปัจจุบันเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับการผลิตกาแฟมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นเพื่อเป็นการเพิ่มศักยภาพและสร้างความได้เปรียบในการแข่งขันที่สูงขึ้น จึงควรพิจารณาถึงความเหมาะสม ความคุ้มค่าและความเป็นไปได้ในการนำเทคโนโลยีเข้ามาช่วยในกระบวนการผลิตที่ล่าช้าหรือต้องใช้เวลาานาน เช่น การเก็บเกี่ยวผลผลิต การคั่วขนาด เป็นต้น

2.2) ควรมีการวางแผนและจัดบันทึก เพื่อหามาตรการหรือวิธีการป้องกัน ก่อนที่จะเกิดโรคและแมลงระบาด ทำให้ผลผลิตได้รับความเสียหาย

2.3) ควรปรับเปลี่ยนวิธีการจ้างงาน เพื่อสร้างแรงจูงใจให้กับคนงานในการเก็บเกี่ยวผลผลิต เช่น การจ่ายค่าจ้างตามปริมาณผลผลิตที่เก็บเกี่ยวได้ การให้เงินค่าจ้างพิเศษสำหรับผู้คัดและเก็บผลผลิตได้ดีตามมาตรฐานที่กำหนด เป็นต้น

5.2 แนวทางการพัฒนาโซ่อุปทานการผลิตกาแฟของไร่กาแฟจาง

1) ควรมีการรวมกลุ่มและสร้างเครือข่ายผู้เพาะปลูกและผลิตกาแฟที่อยู่ในพื้นที่ใกล้เคียงร่วมกัน เพื่อแลกเปลี่ยนข้อมูลข่าวสารและความรู้ในด้านการผลิตกาแฟ รวมถึงการแบ่งปันและใช้เครื่องจักรร่วมกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเครื่องจักรที่มีราคาแพง เพื่อลดเวลาและเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิต นอกจากนี้ยังทำให้สามารถใช้เครื่องจักรได้อย่างคุ้มค่าด้วย

2) เนื่องจากวัตถุดิบหลักคือ ผลกาแฟสดที่เก็บเกี่ยวได้จากไร่กาแฟจางไม่เพียงพอต่อการนำไปแปรรูปเพื่อตอบสนองความต้องการของลูกค้า ดังนั้นจึงควรหาซัพพลายเออร์เพิ่มเติมจากกลุ่มหรือเครือข่ายผู้เพาะปลูกและผลิตกาแฟในพื้นที่ เพื่อจัดหาเมล็ดกาแฟที่มีคุณภาพป้อนเข้าสู่กระบวนการผลิต ให้มีสินค้าเพียงพอสำหรับตอบสนองความต้องการของลูกค้า เพื่อเป็นการรักษารฐานลูกค้าและสามารถรองรับการเติบโตของกลุ่มลูกค้าในอนาคตได้

3) ภาครัฐควรจัดให้มีหน่วยงานกลางในการรวบรวมและปรับปรุงข้อมูลให้เป็นปัจจุบันเกี่ยวกับสภาพภูมิอากาศ โรคระบาด แมลงและศัตรูพืชที่ส่งผลกระทบต่อการผลิตกาแฟในแต่ละช่วงเวลาของแต่ละพื้นที่ เพื่อเป็นข้อมูลให้กับเกษตรกรในการวางแผนและบริหารจัดการ เพื่อป้องกันและลดความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นได้

5.3 ข้อเสนอแนะ

1) ควรพิจารณาถึงความเป็นไปได้ในนำเครื่องคัสดขนาดเมล็ดกาแฟมาใช้แทนการคัสดด้วยมือในกระบวนการคัสดขนาดของเมล็ดกาแฟสด ซึ่งจะสามารถลดการจ้างงานและลดเวลาในการทำงานได้

2) เนื่องจากพื้นที่เพาะปลูกกาแฟของไร่กาแฟจางตั้งอยู่ในพื้นที่ที่เป็นแหล่งท่องเที่ยวสำคัญอย่างภูมโล ภูหินร่องกล้า และภูทับเบิก ดังนั้นจึงมีโอกาสดังกล่าวที่สามารถพัฒนาไร่กาแฟเป็นแหล่งท่องเที่ยวเชิงเกษตรแก่ผู้ที่สนใจได้ ทั้งนี้ยังเป็นการสร้างความเชื่อมั่นแก่ลูกค้า และเป็นการประชาสัมพันธ์อีกทางหนึ่งด้วย

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยราชภัฏวชิรวิทยาสังคราม ประจำปีงบประมาณ 2563 คณะผู้วิจัยจึงขอขอบคุณทางมหาวิทยาลัยที่ให้การสนับสนุนงบประมาณมา ณ โอกาสนี้

Reference

- [1] Office of Agricultural Economics. Coffee strategy [Internet]. 2017 [cited 2021 May 28]. Available from: www.doa.go.th/hort (In Thai)

- [2] EXIM Excellence Academy (EXAC). Thai coffee [Internet]. 2020 [cited 2021 May 28]. Available from: <https://exac.exim.go.th/> (In Thai)
- [3] The Federation of Thai Industries. Logistics management [Internet]. 2020 [cited 2021 May 28]. Available from: www.fti.or.th (In Thai)
- [4] Sangworn S, Teeravaraprug J. Supply chain cost of pickled fish : case study - OTOP Banmi Lopburi. MUT Journal of Business Administration 2012;9(1):84-97 (In Thai)
- [5] Sudchalee P, Wanna N, Sirisaranlak P. The study of retail supply chain: a case study of souvenir shop. The 6th KPRU National Conference; 2019 Dec 20; Kamphaeng phet Rajabhat University. (In Thai)
- [6] Luechaiwut C, Yusuk U. Improvement of the delivery service process with the concept of lean supply chain management using the value stream mapping (vsm): a case study of local furniture store. The 6th National Conference on Quality Management and Technology Innovation; 2020 Nov 28; The Eastern University of Management and Technology. (In Thai)
- [7] Sereerat S, Laksitanonsuporn P. Marketing strategy and marketing management. Bangkok: Thirafilm and Scitex; 1998. (In Thai)
- [8] Jantawong J. An approach for the reduce waste of knock down home business Chiang Rai province [Master of Business Administration]. Thailand: Mae Fah Luang University; 2017. (In Thai)

ประวัติผู้เขียนบทความ



นางสาวหทัยชนก พวงแย้ม อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโลจิสติกส์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม 156 หมู่ 5 ตำบลพลายชุมพล อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก 65000 เบอร์โทรศัพท์/โทรสาร 055-267124 เบอร์โทรศัพท์มือถือ 063-5928759
หัวข้องานวิจัยที่สนใจ: การบริหารจัดการต้นทุนด้านโลจิสติกส์และการขนส่ง การจัดการคลังสินค้า การจัดการด้านโลจิสติกส์และโซ่อุปทาน



นายเพชรยุทธ แซ่หลี่ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโลจิสติกส์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม 156 หมู่ 5 ตำบลพลายชุมพล อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก 65000 เบอร์โทรศัพท์/โทรสาร 055-267124 เบอร์โทรศัพท์มือถือ 093-7317337
หัวข้องานวิจัยที่สนใจ: การวางแผนการดำเนินงาน การวางแผนและควบคุมการผลิต การจัดเส้นทางขนส่ง



ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วชิระ วิจิตรพงษ์ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโลจิสติกส์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม 156 หมู่ 5 ตำบลพลายชุมพล อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก 65000 เบอร์โทรศัพท์/โทรสาร 055-267124 เบอร์โทรศัพท์มือถือ 087-3140051
หัวข้องานวิจัยที่สนใจ: แบบจำลองในงานวิศวกรรมโลจิสติกส์ การจัดการและออกแบบระบบขนส่งและการจราจร



ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อลงกรณ์ เมืองไหว อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโลจิสติกส์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม 156 หมู่ 5 ตำบลพลายชุมพล อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก 65000 เบอร์โทรศัพท์/โทรสาร 055-267124 เบอร์โทรศัพท์มือถือ 089-8350866
หัวข้องานวิจัยที่สนใจ: การจัดการโลจิสติกส์และโซ่อุปทาน การบริหารคุณภาพในงานอุตสาหกรรม

Article History:

Received: November 8, 2022

Revised: April 7, 2023

Accepted: April 10, 2023

ปัจจัยที่มีผลต่อการเดินทางช่วงแรกของผู้ใช้บริการรถไฟฟ้า

INFLUENCE FACTORS FOR THE FIRST MILE OF MASS TRANSIT SYSTEM PASSENGER

กันต์ณธีร์ เนติโรจนชัยชาญ¹ และ ศิรดล ศิริธร²

¹นักศึกษาปริญญาโท, กลุ่มสาขาวิชาโลจิสติกส์และระบบขนส่งทางราง, คณะวิศวกรรมศาสตร์,
มหาวิทยาลัยมหิดล, 25/25 ถนนพุทธมณฑล สาย 4 แขวงศาลายา เขตพุทธมณฑล
จังหวัดนครปฐม 73170, Kannatee.n@gmail.com

²อาจารย์, กลุ่มสาขาวิชาโลจิสติกส์และระบบขนส่งทางราง, คณะวิศวกรรมศาสตร์,
มหาวิทยาลัยมหิดล, 25/25 ถนนพุทธมณฑล สาย 4 แขวงศาลายา เขตพุทธมณฑล
จังหวัดนครปฐม 73170, siradol@gmail.com

Kannatee Natirojanachaicharn¹ and Siradol Siridhara²

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

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

บทคัดย่อ

ปัญหาการจราจรในกรุงเทพมหานครเป็นปัญหาสำคัญที่ก่อให้เกิดการสูญเสียทางด้านเศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อม ซึ่งภาครัฐได้ให้ความสำคัญในการแก้ไขปัญหาด้วยการใช้ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนเป็นระบบหลักตามแผนแม่บทการพัฒนาโครงข่ายระบบขนส่งมวลชนสายหลักและสายรองในกรุงเทพฯและปริมณฑล ภาครัฐได้มีการลงทุนพัฒนาก่อสร้างโครงข่ายระบบขนส่งมวลชนระยะที่หนึ่งจำนวน 10 สายทางจนใกล้จะแล้วเสร็จ ซึ่งพบว่าปัจจัยด้านการเชื่อมต่อการเดินทางมีส่วนสำคัญต่อการเลือกใช้ระบบขนส่งมวลชน เนื่องจากการใช้ระบบขนส่งมวลชนจะต้องมีการเชื่อมต่อการเดินทางในช่วงแรกจากต้นทางเพื่อไปยังสถานี หรือเดินทางช่วงสุดท้ายเพื่อเดินทางต่อจากสถานีเพื่อไปยังจุดหมายที่ต้องการ ในการศึกษานี้ได้ศึกษาปัจจัยในการเลือกรูปแบบและวิธีการเดินทางช่วงแรกเนื่องจากจะมีผลต่อการลดการใช้ยานพาหนะส่วนบุคคลมากที่สุด โดยใช้เทคนิควิธีการที่กำหนดสถานการณ์ขึ้นในการเลือกรูปแบบการเดินทาง (Stated

Preference method) จากกลุ่มตัวอย่างที่ใช้วิธีการตอบแบบสอบถามออนไลน์จำนวน 477 ตัวอย่าง จากการศึกษาพบว่าผู้โดยสารระบบขนส่งมวลชนให้ความสำคัญกับเรื่องระยะเวลาในการเดินทางมากที่สุด ตามด้วย ระยะเวลาารคอยและค่าใช้จ่ายในการเดินทาง การพัฒนาระบบการเชื่อมต่อที่สามารถสนองตอบความต้องการของผู้โดยสารจะช่วยให้จำนวนผู้ใช้ระบบขนส่งมวลชนเพิ่มมากขึ้น

คำสำคัญ: การเดินทางช่วงแรก, การเดินทางด้วยรถไฟฟ้า, รูปแบบการเดินทาง, แบบจำลอง

ABSTRACT

The traffic congestion in Bangkok causes significant problems that negatively impact economy, social and environmental status. Therefore, the Thai government implemented the Mass Transit System development masterplan for Bangkok and its vicinity area to ease the problems. The government has invested in construction of Mass Transit system networking. and the first stage of ten (10) mass transit line is nearly finish. The connectivity is important for mass transit system users which passengers have to travel first mile or last mile from their home to the mass transit system. The objective of this study is to evaluate the influential factors for the first travel of the passengers as it is the key factor to reduce the use of private vehicle. The stated preference method was used to get the opinion from 477 samples, using online questionnaire. Multinomial Logit Model was used to understand the travelling factors. The result showed that passengers have given priority to 1) travel time, 2) waiting time and 3) travel cost respectively. The P-Value of all parameters are more than 99% level of confidence. Networking development which is in accordant with passengers' need will increase the use of mass transit system.

KEYWORDS: First mile, Mass Transit System, Mode Choice, Modelling

1. บทนำ

รูปแบบการให้บริการของระบบขนส่งมวลชนแบบรถไฟฟ้านั้นจะให้บริการจากสถานีไปยังสถานีให้ต้องมีการเชื่อมต่อการเดินทาง [1] ซึ่งการพัฒนาการเข้าถึงระบบขนส่งสาธารณะจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและลดค่าใช้จ่ายแก่ผู้โดยสาร [2] การดำเนินการของภาครัฐในการจัดทำระบบขนส่งสาธารณะด้วยระบบรถไฟฟ้าในพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑลได้มีการพัฒนาในส่วนระบบหลักอย่างแต่เนื่อง การจัดทำ การเข้าถึงจะเพิ่มความคุ้มค่าในการพัฒนาระบบรถไฟฟ้า [2] การเชื่อมต่อการเดินทางด้วยรูปแบบวิธีการเดินทางแบบต่าง ๆ เช่น การเดิน รถจักรยาน รถส่วนบุคคล รถโดยสารประจำทาง รถสามล้อ เป็นต้น [3] จึงมีความสำคัญในการเดินทางช่วงแรก (First

Mile) หรือการเดินทางช่วงสุดท้าย (Last Mile) ของผู้โดยสารรถไฟฟ้า [4] หากผู้โดยสารไม่ได้รับประสบการณ์ในการเดินทางช่วงแรก/ช่วงสุดท้ายที่ดีและคุ้มค่าแล้วก็จะมีผลต่อการเลือกการใช้ระบบขนส่งสาธารณะในการเดินทางและหันไปใช้การเดินทางด้วยรถส่วนบุคคลแทน [5]

คุณภาพในการให้บริการที่ผู้โดยสารรับรู้ขึ้นยังขึ้นกับปัจจัยทางสังคมของผู้โดยสาร เช่น อายุ เพศ ระดับรายได้ วัตถุประสงค์ในการเดินทาง ฯลฯ ซึ่งความแตกต่างของผู้โดยสารแต่ละกลุ่มก็จะมี การพิจารณาลำดับความสำคัญของปัจจัยในการเลือกรูปแบบการเดินทางที่แตกต่างกัน เช่น ราคา ค่าโดยสาร ระยะเวลาเดินทาง ระยะเวลารอ ความสะดวกสบาย คุณภาพการให้บริการ และรวมถึง การเชื่อมต่อการเดินทางกับการเดินทางในช่วงหลัก การขาดการเชื่อมต่อในการเดินทางกับระบบขนส่งสาธารณะที่ดีจะทำให้ผู้โดยสารไม่เลือกใช้การเดินทางด้วยระบบขนส่งสาธารณะ [6] ความเข้าใจถึงปัจจัยในการเลือกใช้รูปแบบการเดินทางของผู้โดยสารจะช่วยให้สามารถกำหนดรูปแบบ การเชื่อมต่อการเดินทางที่จะทำให้มีผู้ใช้บริการระบบขนส่งสาธารณะมากขึ้น [7] รวมถึงการจัดทำ รูปแบบการให้บริการแบบใหม่ ๆ จากการพัฒนาด้านเทคโนโลยียังทำให้สามารถพัฒนารูปแบบ การให้บริการที่สนองตอบความต้องการของผู้โดยสารลดภาระค่าโดยสารและค่าดำเนินการของผู้ให้บริการลง เช่น การเดินทางแบบแบ่งปัน (Ride Sharing) การให้บริการแบบ On Demand หรือ การที่ความถี่ในการเดินรถแปรเปลี่ยนตามความต้องการของผู้โดยสาร [8]

การศึกษานี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมของผู้โดยสารรถไฟฟ้าในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑลการเดินทางช่วงแรก เนื่องจากจะเป็นจุดที่มีผลต่อการลดการใช้จ่ายพาหนะส่วนบุคคลมากที่สุด ด้วยวิธีการสำรวจที่กำหนดสถานการณ์ขึ้นในการเลือกรูปแบบการเดินทาง (Stated Preference Survey) เพื่อศึกษาถึงปัจจัยที่สำคัญ และระดับของค่าปัจจัยที่มีผลต่อพฤติกรรมในการเลือกรูปแบบการเดินทางช่วงแรก

2. การทบทวนวรรณกรรม

การเดินทางช่วงแรก/ช่วงสุดท้ายเป็นส่วนสำคัญของการเดินทางด้วยระบบขนส่งสาธารณะ เป็นการเดินทางช่วงเริ่มต้น หรือช่วงที่สิ้นสุดในการเดินทางของคนหรือการขนส่งสินค้า [9] การส่งเสริมการใช้ระบบขนส่งสาธารณะจำเป็นที่จะต้องมีการควบคุมการเดินทางส่วนบุคคลด้วยการบริหารความต้องการเดินทาง (Travel Demand Management) และการบริหารการเดินทาง (Mobility Management) เพื่อปรับเปลี่ยนพฤติกรรมของผู้เดินทาง ความตั้งใจเชิงพฤติกรรมเป็น ปัจจัยทางจิตวิทยาที่จะทำให้เกิดการกระทำจริง ซึ่งทัศนคติมีผลโดยตรงต่อความตั้งใจเชิง พฤติกรรม [10]

การวิเคราะห์ทางเลือกเป็นการศึกษาเกี่ยวกับการตอบสนองปัจจัยพฤติกรรมของบุคคลที่อยู่ใน กลุ่มตัวอย่าง [11] เป็นการวิเคราะห์เพื่ออธิบายเกณฑ์ในการเลือกจากเก็บข้อมูลความพึงพอใจ รายบุคคล เมื่อบุคคลทำการเลือกสินค้าหรือบริการ แต่ละคนจะมีข้อพิจารณาที่แตกต่างกันขึ้นกับ

แต่ละปัจเจกบุคคล ความเข้าใจในพฤติกรรมการตัดสินใจและปัจจัยที่เกี่ยวข้องมีความสำคัญในการจัดหาระบบขนส่งที่เหมาะสม แนวทางการวิเคราะห์ทางเลือกที่ไม่ต่อเนื่องเป็นการวิเคราะห์ที่มีสมมุติฐานว่าแต่ละปัจเจกบุคคลจะเลือกสิ่งที่ตนเองจะได้ประโยชน์สูงสุด

ฟังก์ชันอรรถประโยชน์ (Utility Function) เป็นการแสดงถึงความพึงพอใจของปัจเจกบุคคลในการเลือกใช้สินค้าหรือบริการ ซึ่งแต่ละคนจะให้มูลค่าของปัจจัยที่แตกต่างกัน โดยทางเลือกจะมีสองแบบคือ ความพึงพอใจแบบเปิดเผย (Revealed Preference) เป็นการประเมินมูลค่าโดยใช้ทางเลือกที่มีอยู่จริง และ ความพึงพอใจที่ทางเลือกไม่มีอยู่จริง (Stated Preference) [11, 12] ฟังก์ชันอรรถประโยชน์จะอยู่ในรูปของสมการ [13]

$$U_i = V_i + \varepsilon_i \quad (1)$$

โดย U_i = อรรถประโยชน์ทั้งหมดของทางเลือก i

V_i = ระดับของอรรถประโยชน์ของทางเลือก i ที่สังเกตได้

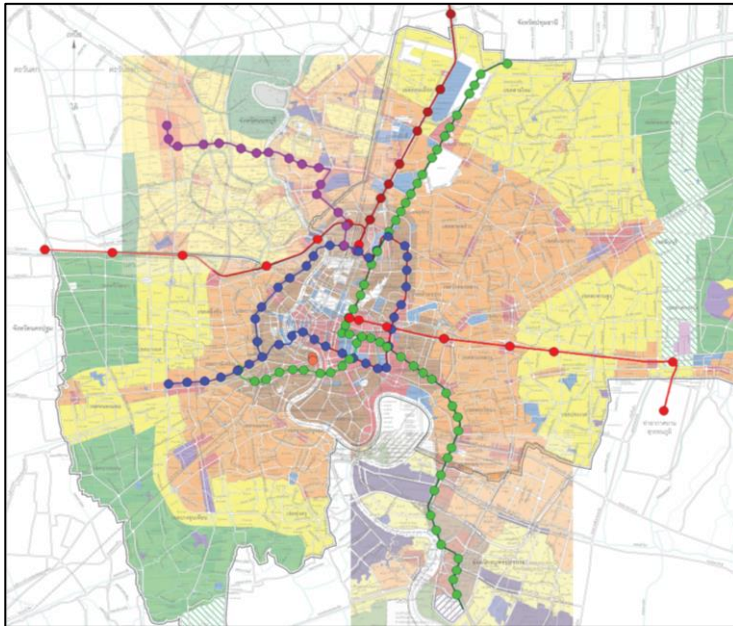
ε_i = อรรถประโยชน์ของทางเลือก i เฉพาะบุคคลที่ไม่สามารถสังเกตได้

จากการศึกษาการเดินทางช่วงแรก/ช่วงสุดท้ายด้วยรถโดยสารอัตโนมัติ โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีสามปัจจัย (Three-factor theory analysis) [14] พบว่าปัจจัยในเรื่องความถี่ในการให้บริการกับความสะดวกสบายในการเดินทางเป็นปัจจัยสำคัญในการเลือกใช้บริการ ในการศึกษาเรื่องอิทธิพลของปัจจัยด้านสังคมกับการเดินทางช่วงสุดท้ายในเขตเมือง [15] เปรียบเทียบระหว่างการเดิน การใช้รถจักรยานและรถโดยสารสาธารณะจากสถานีรถไฟฟ้าในประเทศสิงคโปร์ ด้วยวิธี Multinomial logit regression model พบว่าระยะทางจากสถานีรถไฟฟ้าเป็นปัจจัยสำคัญในการเลือกรูปแบบการเดินทาง การเดินทางระยะสั้นผู้เดินทางจะเลือกการเดินเป็นลำดับแรก แล้วเปลี่ยนเป็นการใช้รถจักรยาน และรถโดยสารสาธารณะตามระยะทางที่เพิ่มขึ้น ส่วนปัจจัยรองที่มีผลต่อการเลือกวิธีการเดินทางจะเป็นปัจจัยเศรษฐกิจและสังคม และปัจจัยด้านคุณภาพการให้บริการเช่น จำนวนรถโดยสาร ความถี่ในการให้บริการจะมีความสำคัญตามลำดับ

รถขนส่งที่สาธารณะเป็นรูปแบบการเดินทางที่ผสมผสานระหว่างการเดินทางแบบส่วนตัวกับแบบสาธารณะ ที่มีการปรับรูปแบบให้สนองตอบความต้องการเดินทางของผู้โดยสาร อาทิเช่น การกำหนดความถี่ในการให้บริการที่ปรับเปลี่ยนได้ การที่สามารถปรับเส้นทางและตำแหน่งจุดรับ-ส่งตามความต้องการของผู้โดยสาร โดยที่การเดินทางยังคงมีลักษณะที่มีการเดินทางร่วมกับผู้อื่น ยานพาหนะที่ให้บริการมักจะเป็นรถโดยสารขนาดเล็ก หรือรถสามล้อที่มีที่นั่งหลายแถว

2.1 พื้นที่ศึกษา

การศึกษานี้ครอบคลุมผู้ที่ใช้อาศัยอยู่ในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑลที่ได้ใช้ระบบรถไฟฟ้า ซึ่งขณะที่ทำการศึกษามีเส้นทางรถไฟฟ้าที่เปิดให้บริการแล้ว 8 เส้นทาง รวมระยะทาง 214 กม. 128 สถานี แนวเส้นทาง ที่ตั้งสถานีที่เปิดให้บริการแล้ว และแผนการใช้ประโยชน์ที่ดินตามแนวเส้นทางแสดงได้ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แนวเส้นทางรถไฟฟ้าที่เปิดให้บริการแล้วและแผนการใช้ประโยชน์ที่ดินตามแนวเส้นทางรถไฟฟ้าที่เปิดให้บริการแล้ว

2.2 แบบสอบถาม

การศึกษาได้จัดทำแบบสอบถามให้ผู้ตอบทำผ่านทางออนไลน์ โดยคำถามจะประกอบด้วย ข้อมูล 6 ส่วน ได้แก่ ข้อมูลพื้นฐานด้านเศรษฐกิจและสังคม ข้อมูลเกี่ยวกับวัตถุประสงค์และลักษณะการเดินทางด้วยระบบรถไฟฟ้า ข้อมูลวิธีการเดินทางจากที่พักไปยังสถานีรถไฟฟ้า ข้อมูลสถานีต้นทางและปลายทางของการเดินทางด้วยรถไฟฟ้า ข้อมูลวิธีการเดินทางจากสถานีรถไฟฟ้าไปยังปลายทาง และการตัดสินใจเลือกรูปแบบการเดินทางจากเงื่อนไขการตัดสินใจกรณีต่าง ๆ มีคำถามรวมทั้งสิ้น 29 ข้อ

ในส่วนของการเลือกรูปแบบการเดินทางจะมีคำถาม 6 ข้อ โดยแต่ละข้อมี 5 รูปแบบทางเลือกในการเดินทาง ประกอบด้วย การเดิน การใช้รถจักรยานยนต์ รถแท็กซี่ รถโดยสารประจำทาง และรถขนส่งสาธารณะ ในสถานการณ์ที่มีระยะเวลาเดินทาง ระยะเวลารอคอย ค่าบริการ ที่แตกต่าง

กัน และมีตัวแปรหุ่น (Dummy Variable) สำหรับการเลือกการเดินทางถึงสาธารณะว่าเป็นแบบส่วนตัวหรือแบบสาธารณะ ชุดแบบสอบถามได้พิจารณาระยะการเดินทางเป็น 2 กลุ่ม คือกลุ่มที่เดินทางในระยะไม่เกิน 2 กม. และกลุ่มที่เดินทางในระยะ 2-5 กม. แล้วทำการกำหนดระยะเวลาเดินทาง ค่าใช้จ่าย ให้สอดคล้องกับระยะโดยมีการแบ่งระดับ (Level) เป็น 3 ระดับ เช่นเดียวกับการกำหนดระยะเวลาจอดรถ ส่วนรูปแบบความเป็นส่วนตัวที่เป็นตัวแปรหุ่นจะมี 2 ระดับ เพื่อให้ชุดคำถามครอบคลุม ด้วยการใช้โปรแกรม NGene ด้วยวิธี Fractional Factorial Design ในการสร้างกลุ่มแบบสอบถาม 12 กลุ่ม รวมคำถาม 72 ข้อ ที่จะทำให้แบบสอบถามมีความครอบคลุมเพื่อนำมาใช้วิเคราะห์

จากข้อมูลจำนวนผู้โดยสารในปี 2562 มีจำนวนผู้ใช้รถไฟฟ้าเฉลี่ยวันละ 1.14 ล้านเที่ยวต่อวัน จากคำนวณด้วยวิธีของ Taro Yamane จำนวนของแบบสอบถามที่ระดับเชื่อมั่นร้อยละ 95 เป็นจำนวนอย่างน้อย 400 ชุด แบบสอบถามใช้การเผยแพร่ผ่านช่องทางออนไลน์ เช่น FaceBook Page ของกลุ่มผู้ใช้รถไฟฟ้า กลุ่มไลน์ของกลุ่มสาขาวิชาโลจิสติกส์และระบบขนส่งทางราง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหิดล เป็นต้น

2.3 การวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลที่ได้จากแบบสอบถามออนไลน์ จะคัดแยกข้อมูลที่ตอบเป็นเหตุเป็นผลมาทำการวิเคราะห์เบื้องต้นทางด้านสังคมและประชากร (Socio-demographic) หลังจากนั้นจึงทำการจัดเรียงลำดับใหม่ข้อมูลใหม่ด้วยวิธีสุ่ม

การวิเคราะห์ข้อมูลใช้โปรแกรม NLogit วิเคราะห์ข้อมูลแบบ Multinomial Logit Model เพื่อหาสัมประสิทธิ์ของปัจจัยในการเลือกรูปแบบการเดินทาง ซึ่งประกอบด้วยรูปแบบการเดินทางด้วยการเดิน รถจักรยานยนต์รับจ้าง รถโดยสารประจำทาง รถแท็กซี่ และรถขนส่งถึงสาธารณะ โดยพิจารณาเลือกค่าสัมประสิทธิ์ที่จะทำให้ระดับนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นอย่างน้อยร้อยละ 95 ขึ้นไปมาพิจารณา

3. ผลการศึกษา

จากการสำรวจด้วยแบบสอบถามออนไลน์ในช่วงระหว่างเดือนมกราคม ถึงมีนาคม 2565 มีผู้ตอบแบบสอบถามทั้งสิ้น 477 ราย ส่วนใหญ่ของผู้ตอบแบบสอบถามจะเป็นเพศหญิง (53%) มีกลุ่มอายุ 21 ปี ถึง 35 ปี (54.7%) กลุ่มรายได้ 15,000 บาท ถึง 35,000 บาท (54.8%) ประกอบอาชีพเป็นพนักงานบริษัทเอกชน (53.9%) การเดินทางโดยใช้ระบบขนส่งมวลชนส่วนใหญ่มีวัตถุประสงค์เพื่อการพักผ่อนท่องเที่ยวและการเดินทางไปทำงาน (82%) รายละเอียดด้านเศรษฐกิจและสังคมของผู้ตอบแบบสอบถาม แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ข้อมูลด้านเศรษฐกิจและสังคมของผู้ตอบแบบสอบถาม

รายการ	จำนวน	จำนวนร้อยละ (%)
เพศ		
- ชาย	214	44.9
- หญิง	253	53.0
- ไม่ระบุ	10	2.1
อายุ		
- น้อยกว่า 18 ปี	17	3.6
- 18 – 20 ปี	20	4.2
- 21 – 25 ปี	58	12.2
- 26 – 30 ปี	107	22.4
- 31 – 35 ปี	96	20.1
- 36 – 40 ปี	45	9.4
- 41 – 45 ปี	32	6.7
- 46 – 50 ปี	37	7.8
- 51 – 55 ปี	36	7.5
- 56 – 60 ปี	15	3.1
- มากกว่า 60 ปี	14	2.9
ระดับรายได้		
- น้อยกว่า 5,000 บาท	42	8.8
- 5,001 – 15,000 บาท	54	11.3
- 15,001 – 25,000 บาท	119	24.9
- 25,000 – 35,000 บาท	87	18.2
- 35,001 – 45,000 บาท	56	11.7
- 45,001 – 55,000 บาท	30	6.3
- 55,001 – 65,000 บาท	15	3.1
- 65,001 – 75,000 บาท	17	3.6
- 75,001 – 85,000 บาท	11	2.3
- มากกว่า 85,000 บาท	46	9.6
อาชีพ		
- พนักงานบริษัทเอกชน	257	53.9
- รับราชการหรือพนักงานของรัฐ	73	15.3

ตารางที่ 1 ข้อมูลด้านเศรษฐกิจและสังคมของผู้ตอบแบบสอบถาม (ต่อ)

รายการ	จำนวน	จำนวนร้อยละ (%)
อาชีพ (ต่อ)		
- นักเรียนหรือนักศึกษา	62	13.0
- อาชีพอิสระ	51	10.7
- อื่น ๆ	34	7.1
วัตถุประสงค์ในการเดินทาง		
- พักผ่อน/ท่องเที่ยว	204	43
- ทำงาน	187	39
- ติดต่อธุรกิจ	71	15
- เรียนหนังสือ	18	4

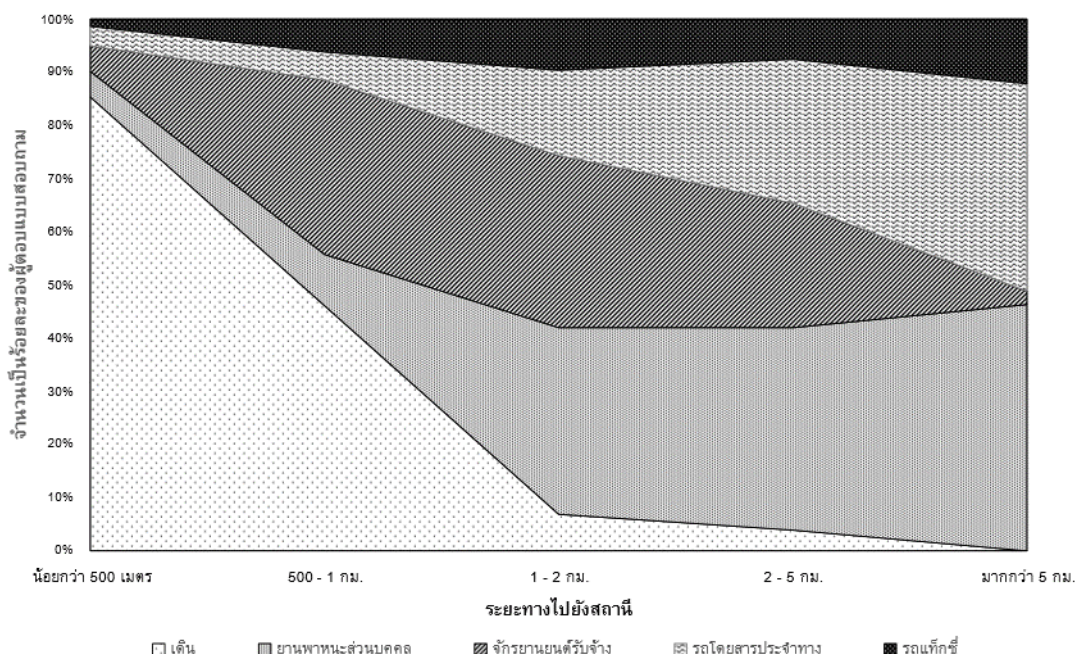
ในส่วนการครอบครองยานพาหนะพบว่าเกือบทุกครัวเรือนมีการครอบครองรถยนต์อย่างน้อย 1 คัน (85.1%) และมีครอบครัวที่ครอบครองรถจักรยานยนต์ประมาณกึ่งหนึ่ง (55.3%) มีเพียงร้อยละ 8.2 ที่ครอบครัวไม่มีการครอบครองยานพาหนะประเภทใดเลย รายละเอียดการครอบครองรถยนต์และรถจักรยานยนต์แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 จำนวนยานพาหนะที่ครอบครองแต่ละครัวเรือนของผู้ตอบแบบสอบถาม

การครอบครอง รถยนต์ของครัวเรือน	การครอบครองรถจักรยานยนต์ของครัวเรือน				
	ไม่มี	1	2	> 2	รวม
ไม่มี	8.2%	4.2%	1.7%	0.8%	14.9%
1	15.1%	12.4%	4.8%	3.1%	35.4%
2	11.7%	9.2%	5.2%	2.3%	28.5%
> 2	9.6%	3.8%	2.5%	5.2%	21.2%
รวม	44.7%	29.6%	14.3%	11.5%	100.0%

สำหรับวิธีการเดินทางเมื่อระยะทางน้อยกว่า 500 ม. ผู้ตอบแบบสอบถามส่วนใหญ่จะเลือกวิธีการเดิน เมื่อระยะทางเพิ่มเป็น 1 กม. สัดส่วนการใช้รถจักรยานยนต์รับจ้าง รถส่วนบุคคล และรถโดยสารจะเพิ่มขึ้นแทนการเดิน เมื่อระยะทางเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 1 กม. การใช้ยานพาหนะส่วนบุคคล

กับรถโดยสารประจำทางจะเป็นสัดส่วนหลักของการเดินทาง สัดส่วนของวิธีการเดินทางกับระยะทางแสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 สัดส่วนร้อยละของรูปแบบการเดินทางแยกในแต่ละช่วงระยะทางไปยังสถานีรถไฟฟ้า

ผู้ตอบแบบสอบถามจะส่วนใหญ่เดินทางด้วยรถไฟฟ้าสายสีน้ำเงิน (35.8%) ตามด้วยรถไฟฟ้าสายสีเขียวอ่อน (23.1%) และสีเขียวเข้ม (10.9%) ตามลำดับ รายละเอียดของสายทางรถไฟฟ้าที่เริ่มต้นการเดินทางกับสายทางที่สิ้นสุดการเดินทางด้วยรถไฟฟ้าแสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ต้นสายทางและปลายสายทางของการใช้ระบบรถไฟฟ้า

ต้นสายทาง	ปลายสายทาง				
	สีน้ำเงิน	สีเขียวอ่อน	สีเขียวเข้ม	สีม่วง	อื่น ๆ
สีน้ำเงิน	144 (30.2%)	9 (1.9%)	6 (1.3%)	5 (1.0%)	6 (1.3%)
สีเขียวอ่อน	16 (3.4%)	67 (14%)	20 (4.2%)	2 (0.4%)	5 (1.0%)
สีเขียวเข้ม	4 (0.8%)	13 (2.7%)	32 (6.7%)	-	2
สีม่วง	33 (6.9%)	5 (1.0%)	3 (0.6%)	24 (5.0%)	-
สายอื่น ๆ	15 (3.1%)	5 (1.0%)	17 (3.6%)	3 (0.6%)	41 (8.6%)

จากการวิเคราะห์การเลือกรูปแบบการเดินทางระหว่างการเดิน (Walk) รถจักรยานยนต์รับจ้าง (mc) รถโดยสารประจำทาง (bus) รถแท็กซี่ (taxi) และรถขนส่งสาธารณะ (para) พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของปัจจัยที่มีผลในการตัดสินใจเลือกรูปแบบการเดินทางของผู้ใช้รถไฟฟ้าด้วยวิธี Multinomial Logit Regression สมการอรรถประโยชน์ของรูปแบบการเดินทางทั้ง 5 รูปแบบแสดงดังสมการที่ 1 ถึงสมการที่ 5 ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4 และตารางที่ 5

$$U_{walk} = \beta_{time} \times time \quad (2)$$

$$U_{mc} = ASC_{mc} + \beta_{cost} \times cost + \beta_{time} \times time + \beta_{waittime} \times waittime \quad (3)$$

$$U_{(bus)} = ASC_{bus} + \beta_{cost} \times cost + \beta_{time} \times time + \beta_{waittime} \times waittime \quad (4)$$

$$U_{(taxi)} = ASC_{taxi} + \beta_{cost} \times cost + \beta_{time} \times time + \beta_{waittime} \times waittime \quad (5)$$

$$U_{(para)} = ASC_{para} + \beta_{cost} \times cost + \beta_{time} \times time + \beta_{waittime} \times waittime + \beta_{sharepara} \times sharepara \quad (6)$$

โดย ASC_{mc} = ค่าคงที่เฉพาะของการเดินทางด้วยรถจักรยานยนต์รับจ้าง

ASC_{bus} = ค่าคงที่เฉพาะของการเดินทางด้วยรถโดยสารประจำทาง

ASC_{taxi} = ค่าคงที่เฉพาะของการเดินทางด้วยรถแท็กซี่

ASC_{para} = ค่าคงที่เฉพาะของการเดินทางด้วยรถขนส่งสาธารณะ

β_{time} = สัมประสิทธิ์ของระยะเวลาเดินทาง

time = ระยะเวลาเดินทาง (นาที)

β_{cost} = สัมประสิทธิ์ของอัตราค่าโดยสาร

cost = อัตราค่าโดยสาร (บาท)

$\beta_{waittime}$ = สัมประสิทธิ์ของระยะเวลารอคอย

waittime = ระยะเวลารอคอย (นาที)

$\beta_{sharepara}$ = สัมประสิทธิ์ของความเป็นส่วนตัวในการใช้รถขนส่งสาธารณะ

sharepara = ค่าความเป็นส่วนตัว (0 เป็นส่วนตัว, 1 ไม่เป็นส่วนตัว)

ตารางที่ 4 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของปัจจัยเลือกรูปแบบการเดินทาง

Cor.Mat.	CHOICE	COST	TIME	WATIME	SHARE
CHOICE	1	-0.04564	-0.06873	-0.06741	-0.07822
COST	-0.04564	1	-0.28014	0.27435	0.04135
TIME	-0.06873	-0.28014	1	-0.22459	-0.06987
WATIME	-0.06741	0.27435	-0.22459	1	0.08721
SHARE	-0.07822	0.04135	-0.06987	0.08721	1

จากค่าสหสัมพันธ์ของปัจจัยที่พิจารณาพบว่าไม่มีตัวแปรใดในชุดแบบสอบถามที่มีความสัมพันธ์ต่อกัน

ตารางที่ 5 ค่าสัมประสิทธิ์ของปัจจัยเลือกรูปแบบการเดินทางของผู้ใช้รถไฟฟ้า

ตัวแปร	ค่าสัมประสิทธิ์	p-value	b/St.Er,
TIME	-0.07390***	0.0000	-18.28
COST	-0.01231***	0.0004	-3.53
WATIME	-0.04168***	0.0000	-6.97
ASCMC	-0.62272***	0.0000	-5.82
ASCBUS	-0.50257***	0.0096	-2.59
ASCTAXI	-0.27119***	0.0001	-3.89
ASCPARA	-0.71490***	0.0000	-6.01
SHAREPARA	-0.40741***	0.0003	-3.61
Log likelihood function	-4304.57285		
R-squared	0.0502		
Chi-squared [DF = 4]	454.96500		
Number of Observation =	2862		

หมายเหตุ ***, **, * ค่าระดับความเชื่อมั่นที่ 1%, 5%, 10% ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ทุกตัวเป็นปัจจัยลบต่อการเลือกรูปแบบการเดินทาง ซึ่งสอดคล้องกับความเป็นจริงที่เมื่อเวลาเดินทาง ระยะเวลาการรอคอยและค่าใช้จ่ายน้อยเพิ่มขึ้น ค่าอรรถประโยชน์จะปรับลดลง ค่า asymptotic equivalent Wald statistics แสดงให้เห็นว่าเวลา

ผลต่อการตัดสินใจมากที่สุด ตามมาด้วยระยะเวลาที่รอใช้บริการ (WATIME) ความเป็นส่วนตัวในการเดินทาง (SHAREPARA) และค่าใช้จ่ายในการเดินทาง (COST) ค่าคงที่เฉพาะของแต่ละรูปแบบการเดินทางจะแสดงให้เห็นทัศนคติและแนวโน้มในการเลือกวิธีเดินทาง ในกรณีที่ไม่มีค่าใช้จ่ายในการเดินทางและการใช้ระยะเวลาในการเข้าถึงและรอคอยเท่ากันแล้วผู้เดินทางมีแนวโน้มที่จะเลือกเดินทางด้วยการเดินมากที่สุด ตามด้วยการใช้รถแท็กซี่ (ASCTAXI) รถโดยสารประจำทาง (ASCBUS) รถจักรยานยนต์รับจ้าง (ASCMC) และรถโดยสารกึ่งสาธารณะ (ASCPARA) ตามลำดับ

การทดสอบความสัมพันธ์ของตัวแปรพบว่าค่า χ^2 ที่คำนวณได้ 454.965 มากกว่าค่า χ^2 วิฤติที่องศาอิสระ 4 และระดับความเชื่อมั่น 95% ($\chi^2_{0.05,4} = 9.488$) แสดงว่าตัวแปรที่นำมาพิจารณาในแบบจำลองนั้นมีอิทธิพลต่อการตัดสินใจของผู้เดินทางอย่างมีนัยสำคัญ

4. สรุปผลการวิจัย

การศึกษานี้ได้ศึกษาพฤติกรรมการเลือกวิธีการเดินทางของผู้ใช้รถไฟฟ้า โดยพบว่าปัจจัยในเรื่องเวลาในการเข้าถึงระบบรถไฟฟ้ามากที่สุด ตามด้วยระยะเวลารอคอย และค่าใช้จ่ายเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการเลือกวิธีการเดินทางตามลำดับ ซึ่งจะช่วยในการนำไปใช้ในการวางแผนและเสนอวิธีการเดินทางที่จะช่วยจูงใจให้มีการใช้รถไฟฟ้ามากขึ้น

ในการนำเสนอรูปแบบวิธีการเดินทางแบบรถโดยสารกึ่งสาธารณะจะต้องมีการประชาสัมพันธ์และทำให้ผู้โดยสารเข้าใจในเรื่องรูปแบบวิธีการเดินทางของรถโดยสารกึ่งสาธารณะ เพื่อเปลี่ยนความเคยชินกับรูปแบบการเดินทางแบบเดิม การศึกษาชี้ให้เห็นว่าปัจจัยด้านเวลาการเดินทางเข้าถึงรถไฟฟ้าและเวลาการรอใช้บริการรถโดยสารกึ่งสาธารณะมีความสำคัญกว่าความเป็นส่วนตัวในการใช้บริการและค่าใช้จ่ายด้านตัวเงิน ดังนั้นในการออกแบบการเดินทางต้องพิจารณาให้ผู้เดินทางใช้เวลาน้อยที่สุด อาทิเช่น การกำหนดจุดรับ-ส่ง และเส้นทางเดินทางที่สามารถเข้าถึงระบบรถไฟฟ้าได้โดยง่าย การเพิ่มความถี่ในการให้บริการ เป็นต้น การออกแบบและจัดทำระบบการเชื่อมต่อที่มีประสิทธิภาพจะช่วยส่งเสริมให้ผู้เดินทางตัดสินใจเปลี่ยนรูปแบบจากการเดินทางด้วยรถส่วนตัวมาใช้รถไฟฟ้าเพิ่มขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณกลุ่มสาขาวิชาโลจิสติกส์และระบบขนส่งทางราง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ที่ได้สนับสนุนการใช้โปรแกรมและห้องปฏิบัติการในการดำเนินงานวิจัยนี้

References

- [1] Guo Y, Yang L, Huang W, Guo Y. Traffic safety perception, attitude, and feeder mode choice of metro commute: evidence from Shenzhen. *International Journal Environmental Research and Public Health* [Internet]. 2020 [cited 2021 Apr 29];17(24):9402. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7765347/>
- [2] Sivakumaran K, Li Y, Cassidy M, Madanat S. Access and the choice of transit technology. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 2014;59:204-21.
- [3] De M, Sikarwar S, Kumar V. Intelligent systems to enhance last mile connectivity for upcoming smart cities in India. *Environment and Planning B Planning and Design* 2017;2:16-31.
- [4] Venter CJ. Measuring the quality of the first/last mile connection to public transport. *Research in Transportation Economics* 2020;83:100949.
- [5] Wang H, Odoni A. Approximating the Performance of a “Last Mile” transportation system. *Transportation Science* 2014;50:141223041352002.
- [6] Campbell KB, Brakewood C. Sharing riders: How bikesharing impacts bus ridership in New York City. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 2017;100:264-82.
- [7] Mozayani S. Comparing different transit strategies to tackle the last-mile issue in low demand areas Case study: York Region Transit [Internet]. 2019 [cited 2023 Mar 31]. Available from: <https://www.semanticscholar.org/paper/Comparing-different-transit-strategies-to-tackle-in-Mozayani/20f03f470765ce115e9735ddb5330e5956931595>
- [8] Kanuri C, Venkat K, Maiti S, Mulukutla P. Leveraging innovation for last-mile connectivity to mass transit. *Transportation Research Procedia* 2019;41:655-69.
- [9] Nocera S, Pungillo G, Bruzzone F. How to evaluate and plan the freight-passengers first-last mile. *Transport Policy* [Internet]. 2021 Jan 8 [cited 2021 Apr 29];113:56-66 Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0967070X19306584>
- [10] Ajzen I. The theory of planned behavior. *Organizational Behavior and Human Decision Processes* 1991;50(2):179-211.
- [11] Hensher D, Rose J, Greene W. *Applied Choice Analysis*. Cambridge: Cambridge University Press; 2005.
- [12] Danielis R, Rotaris L. Analysing freight transport demand using stated preference data: a survey and a research project for the Friuli-Venezia Giulia Region¹. *Trasporti Europei* 1999;13.

- [13] Šimeček M. Discrete choice analysis of travel behaviour. Transactions on Transport Sciences 2019;10(1):5-9.
- [14] Chee PNE, Susilo YO, Wong YD. Determinants of intention-to-use first-/last-mile automated bus service. Transportation Research Part A Policy and Practice 2020;139:350-75.
- [15] Meng M, Koh P, Wong Y. Influence of socio-demography and operating streetscape on last-mile mode choice. Journal of Public Transportation [Internet]. 2016;19(2):38-54. Available from: <https://scholarcommons.usf.edu/jpt/vol19/iss2/3>

ประวัติผู้เขียนบทความ



กัณฑ์ธีร์ เนติโรจนชัยชาญ กลุ่มสาขาวิชาโลจิสติกส์และระบบขนส่งทางราง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล 25/25 ถนนพุทธมณฑล สาย 4 แขวงศาลายา เขตพุทธมณฑล จังหวัดนครปฐม 73170
E-mail: Kannatee.n@gmail.com โทรศัพท์ 086-380-4849
งานวิจัยที่สนใจ: การจราจรและขนส่ง ระบบขนส่งทางราง



ศิริดล ศิริวัชร กลุ่มสาขาวิชาโลจิสติกส์และระบบขนส่งทางราง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล 25/25 ถนนพุทธมณฑล สาย 4 แขวงศาลายา เขตพุทธมณฑล จังหวัดนครปฐม 73170
E-mail: siradol@gmail.com โทรศัพท์ 02-889-2138 ต่อ 6619
งานวิจัยที่สนใจ: การจราจรและขนส่ง ระบบขนส่งทางราง

Article History:

Received: September 28, 2022

Revised: April 15, 2023

Accepted: April 19, 2023

ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต:

ศ.ดร.กัณวีร์ กนิษฐ์พงศ์	สาขาวิศวกรรมขนส่ง สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย
ศ.ดร.โกสินทร์ จำนงไทย	ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศ.ดร.โจเซฟ เคดาร์	สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีและนวัตกรรม มหาวิทยาลัยกรุงเทพธนบุรี
ศ.ดร.ต่อกุล กาญจนาลัย	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ศ.ดร.ปราโมทย์ เตชะอำไพ	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศ.ดร.วัฒนวงศ์ รัตนวราห์	สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่ง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ศ.ดร.สุวัฒนา จิตตลดาการ	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.กอบชัย เดชหาญ	ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.กัณวรัช พลุปราชญ์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์
รศ.ดร.จิรนุช เสี่ยงมศักดิ์	สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รศ.ดร.ฐิติพร ประดับเพชร	สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา
รศ.ดร.ณกร อินทร์พวง	คณะโลจิสติกส์ มหาวิทยาลัยบูรพา
รศ.ดร.ณฐา คุปต์ชัยยิร	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี ราชมงคลธัญบุรี
รศ.ดร.دنุพล ตันนโยภาส	ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รศ.ดร.ทวีพล ชื้อสัตย์	ภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.เทอดศักดิ์ รองวิริยะพานิช	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.ธนู ญะฉาย	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต

รศ.ดร.ธีรศิลป์ ทุมวิภาต	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมื่อวัดและอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.นคร ภู่วโรคม	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
รศ.ดร.นิตย์ เพ็ชรรักษ์	รองอธิการบดี สายงานวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต
รศ.ดร.เนตรนภิส ดันเต็มทรัพย์	สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รศ.ดร.บวรโชค ผู้พัฒนา	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.บุญเลิศ สื่อเนย	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
รศ.ดร.บุญวัฒน์ อัฐขุ	สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.ประยูร สุรินทร์	สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน
รศ.ดร.ปราโมทย์ ศรีน้อย	สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
รศ.ดร.พนิต ภูจินดา	ภาควิชาการวางแผนภาคและเมือง คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รศ.ดร.พรฤดี เนติโสภาคกุล	คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.พานิช วุฒิพฤษ	ภาควิชาครุศาสตร์โยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.พาสีทธิ์ หล่อธีรพงศ์	บัณฑิตวิทยาลัยการจัดการและนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.พิภพ สุนทรสมัย	ที่ปรึกษาคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
รศ.ดร.พิศิษฐ์ โภคารตันกุล	สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
รศ.ดร.ไพโรจน์ สิงหนัดกิจ	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รศ.ดร.พุทักดิ์ ชิวสุทย์	ภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.ภัทรมน จงประดิษฐ์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.ภาวิณี เอี่ยมตระกูล	คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์และการผังเมือง มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รศ.ดร.มนตรี ศิริปรัชญานันท์	ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

รศ.ดร.ยุทธชัย บรรเทึงจิตร	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.รัตติกว วรากุลศิริพันธุ์	คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
รศ.ดร.วรวพจน์ กรีสระเดช	คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.วรากร ศรีเชวงทรัพย์	สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
รศ.ดร.วัชรระ เพียรสุภาพ	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รศ.ดร.วิทยา ทิพย์สุวรรณพร	สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.เวทิน ปิยรัตน์	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์
รศ.ดร.สมศักดิ์ มิตะถา	ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.สมิตร ส่งพิริยะกิจ	ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.สินชัย ชินวรรัตน์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.เสรี เศวตเสรณี	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ.ดร.สุทัศน์ ลีลาทวิวัฒน์	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.สุนิติ สุภาพ	ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
รศ.ดร.สุรพล บุญลือ	ภาควิชาเทคโนโลยีและสื่อสารการศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.อดิศักดิ์ กาญจนพิกุล	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยรังสิต
รศ.ดร.อรจักร จิตต์โสภาคย์	สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.อิทธิพงษ์ ชัยสายันท์	บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
รศ.ดร.อำพล การุณสุนทวงษ์	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.เรวัฒน์ เหล่าไพบูรณ์	ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

รศ.วัชรินทร์ วิทยกุล	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน
รศ.วิญญู แสงสินกสิกิจ	สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
รศ.ศันสนีย์ สุภาภา	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน
รศ.เอนก ศิริพานิชกร	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.กรกช ทวีสิน	สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยรามคำแหง
ผศ.ดร.กฤษ สุจริตตั้งธรรม	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม
ผศ.ดร.กัมพล พรหมจระประวัต	สาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง
ผศ.ดร.กิตติพงศ์ อัครสกุล	ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผศ.ดร.กิตติศักดิ์ วิธินันทกิตต์	สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตบางพระ
ผศ.ดร.กฤษทอล ทองศรี	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.เชมพัฒน์ ตันติวัฒนกุล	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.จักร จันทลักษณ์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.จารุวรรณ เกษมทรัพย์	สาขาวิชาการจัดการงานวิศวกรรม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
ผศ.ดร.จิราพรรณ สุนทรโชติ	ภาควิชาคณิตศาสตร์และวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผศ.ดร.เจษฎา ชัยโณม	ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผศ.ดร.ฉัตร สุจินดา	ธุรกิจส่วนตัว
ผศ.ดร.ชลัท ทิพาการเกียรติ	สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ผศ.ดร.ชัยรัตน์ ธีระวัฒนสุข	ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ผศ.ดร.ชัยวัฒน์ นุ่มทอง	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา
ผศ.ดร.ชูชัย สุจิรวงศ์	ภาควิชาครุศาสตร์โยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี
ผศ.ดร.ณัฐพงศ์ พันธุ์น้อย	คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผศ.ดร.ณัฐพงศ์ มกระธัช	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี
ผศ.ดร.दनัย เผ่าหฤหรรษ์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอม เกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.ดวงพร กาชาสปี	สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อมและความปลอดภัย คณะ วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม
ผศ.ดร.ดาวุด ทองทา	ภาควิชาคณิตศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี
ผศ.ดร.ติกะ บุญนาค	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์
ผศ.ดร.ทวีศักดิ์ แทะกระโทก	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผศ.ดร.นที ศรีสวัสดิ์	ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งทอ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.นิพนธ์ วรรณโสภาคย์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผศ.ดร.ปรรัตน์ ศุภมิตรโยธิน	โปรแกรมวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
ผศ.ดร.ปรีดา ไชยมหาวัน	สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยพะเยา
ผศ.ดร.พงศกร บำรุงไทย	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา
ผศ.ดร.พงษ์สัณฐ์ ประกฤตศรี	ภาควิทยาศาสตร์พื้นฐานและพลศึกษา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา
ผศ. ดร.พิพัฒน์พงศ์ วัฒนวันนุ	วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต
ผศ.ดร.ภาณุวัฒน์ จ้อยกลัด	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผศ.ดร.มนตรี คำเงิน	ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผศ.ดร.มนูญ มาศนิยม	ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ผศ.ดร.รัฐวุฒิ ฐัแทนคุณ	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยสยาม

ผศ.ดร.วรัญญู วงษ์เสรี	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.วัชรินทร์ ดงบัง	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยบูรพา
ผศ.ดร.วิชัย รุ่งเรืองอนันต์	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.วินัย ใจกล้า	คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผศ.ดร.วิรัตน์ จอมขวา	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.ศิริดล ศิริธร	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล
ผศ.ดร.สนิธ วงษา	ภาควิชาครุศาสตร์โยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.สมบุญ เจริญวิไลศิริ	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.สมโพธิ อยู่ไว	สาขาวิชาวิศวกรรมเทคนิคธรณี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.สมศักดิ์ มีนกร	คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา
ผศ.ดร.โสรัช บุญศิริพันธ์	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผศ.ดร.สิตางค์ ฟิลย์หล้า	ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผศ.ดร.สิทธิพงษ์ เพิ่มพิทักษ์	คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผศ.ดร.สิริชัย จีรวงศ์นุสรณ์	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ผศ.ดร.สิริพร โรจนนันต์	ภาควิชาเทคโนโลยีวัสดุ มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.สิรางค์ กลั่นคำสอน	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา
ผศ.ดร.สุมล แซ่เฮง พิสิษฐ์สังฆการ	ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการเผาไหม้และพลังงานทางเลือก ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องต้นกำลัง วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.สุรัตน์ อาวีรัตน์	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผศ.ดร.อรกมล วังอภิสิทธิ์	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ผศ.กานติส สุตสาคร	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผศ.จิรเมธา สังข์เกษม	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผศ.นราธิป แสงชัย	ศูนย์แห่งความเป็นเลิศเฉพาะทางด้านการวิจัยและพัฒนา อุตสาหกรรมเครื่องเรือน วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.วรรณะ ประภาภรณ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
ผศ.วรารกร เกิดทรัพย์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผศ.สหัสรัตน์ วงษ์ศรีษะ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ผศ.สาธิต รุ่งฤดีสมบัติกิจ	สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัย เกษตรศาสตร์
ผศ.สุชาติ เหลืองประเสริฐ	ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผศ.อุษณีย์ ระหา	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง
ผศ.อนุชิต เจริญ	สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
อ.ดร.กฤษชัย วิถีพานิช	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์
อ.ดร.กฤษณ์ อภิญาวิศิษฐ์	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล พระนคร
อ.ดร.คมพันธ์ ชมสมุทร	สาขาวิชาวิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี ราชมงคลพระนคร
อ.ดร.จักรภพ วงศ์วิวัฒน์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี
อ.ดร.ฉัตรเพชร ยศพล	สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
อ.ดร.ชัยพันธ์ ขำญาติ	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยา เขตบางเขน
อ.ดร.ชัยรัตน์ ตั้งดวงดี	ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี
อ.ดร.ชาติ ฤทธิ์ธีรชัย	สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
อ.ดร.ชาญยุทธ กฤตสุนันท์กุล	ภาควิชาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัย นเรศวร
อ.ดร.ชาญวิทย์ อุดมศักดิ์กุล	สำนักงานสภานโยบายการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและ นวัตกรรมแห่งชาติ

อ.ดร.ชานินทร์ ศรีสุวรรณนา	ภาควิชาสถิติประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
อ.ดร.ณัฐกรณ์ เจริญธรรม	สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่ง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
อ.ดร.ณัฐภูมิ ธนศรีสถิต	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
อ.ดร.ดุขุฎี สติระเศรษฐี	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยนเรศวร
อ.ดร.ตันติกร พิษณุพิบูล	คณะกรรมการจัดการโลจิสติกส์และการคมนาคมขนส่ง สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์
อ.ดร.บุญเลิศ วงศ์เจริญแสงสิริ	สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์
อ.ดร.ปริญญา บุญกนิษฐ	สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อ.ดร.ปริญญา บุญมาเลิศ	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
อ.ดร.ประภาส ผ่องสนาม	สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
อ.ดร.ปรารธนา อินตะวิน	สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อ.ดร.พงศกร พรหมสวัสดิ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง
อ.ดร.พิชญุตม์ จรัสบำรุงโรจน์	สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
อ.ดร.ภาควัฒน์ แสนเจริญ	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
อ.ดร.ภาสินี ศิริประภา	คณะศิลปกรรมและสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
อ.ดร.วาทัญญ รอดประพัฒน์	สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
อ.ดร.วศิน มหัตนรินทร์กุล	ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
อ.ดร.วิทยา พวงสมบัติ	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
อ.ดร.ศรินทร์ดี วงษ์สี	กลุ่มวิจัยและพัฒนาชีวเคมี สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน)
อ.ดร.ศักดิ์ชาย รักการ	สาขาวิชาการจัดการงานวิศวกรรม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
อ.ดร.สำเร็จ เนตรภู	บริษัท เอส. เอช. เค. เอ็นจิเนียริ่ง จำกัด

อ.ดร.สุวรรณณี สายสิน	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ
อ.ดร.อดิเทพ ศรีคงศรี	สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
อ.ดร.อภิชาติ บัวกล้า	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา
อ.ดร.อนันต์ เดอร์ชิง	ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญ
อ.ดร.เอกชัย อยู่ประเสริฐชัย	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ดร.พุทธิพงษ์ หะลีรัตน์วัฒนา	สำนักก่อสร้างสะพาน กรมทางหลวงชนบท
ดร.อัศคพัฒน์ สว่างสุริย์	วิศวกรโยธาเชี่ยวชาญ สำนักวิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง
อ.จิรวรรณ ปล้องไหม	สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
อ.ณัฐนันท์ รัตนไชย	คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อ.นิตยา จันทร์เรือง มหาผล	เลขาธิการสภาวิศวกร ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต
อ.นิตมา อัจฉริยะโพธา	ศูนย์บริการทางการศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี วิทยาเขตราชบุรี
อ.ว่าที่ ร.ต.สรวิชัย ดาแก้ว	คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
อ.สมเดช อิงคะวะระ	สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา



ปรัชญา ปณิธาน

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

เป้าหมาย และวัตถุประสงค์

1. ผลิตบัณฑิตทางวิศวกรรมศาสตร์ เพื่อแสวงหาเทคโนโลยีที่ทันสมัย อันนำไปสู่การพัฒนาตนเองทางเทคโนโลยีในการพัฒนาอุตสาหกรรมของประเทศ
2. ให้บริการวิชาการด้านวิศวกรรมศาสตร์แก่สังคม

วิสัยทัศน์

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

ผู้เขียนจะต้องจัดเตรียมบทความต้นฉบับที่พิมพ์ตามข้อกำหนดของรูปแบบวารสาร จำนวน 1 ชุด และผู้เขียนบทความกรอกข้อมูลใบนำส่งบทความ พร้อมสแกนใบนำส่งบทความและแนบไฟล์ต้นฉบับบทความ มาที่

E-mail: engkasemjournal@kbu.ac.th

และสมัครสมาชิกพร้อมส่งบทความผ่านระบบ Online Journal System ได้ที่

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

ท่านที่สนใจสามารถดูรายละเอียดและดาวน์โหลดแบบฟอร์มต่างๆ หรือสอบถามเพิ่มเติม ได้ที่

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



www.kbu.ac.th

วิทยาเขตพัฒนาการ

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

วิทยาเขตร่มเกล้า

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