

วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต

KASEM BUNDIT Engineering Journal

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



คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต

ปีที่ 14 ฉบับที่ 3 กันยายน-ธันวาคม 2567
Vol.14 No.3 September-December 2024

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
- เป็นบทความที่ไม่ได้อยู่ในระหว่างพิจารณาของสื่อสิ่งพิมพ์อื่นๆ
- เป็นบทความที่ไม่ละเมิดลิขสิทธิ์ของผู้อื่น เนื้อหาในบทความไม่ได้ลอกเลียนหรือตัดทอนมาจากผลงานวิจัยของผู้อื่นหรือจากบทความอื่นโดยไม่ได้รับอนุญาต หรือปราศจากการอ้างอิงที่เหมาะสม
- ผู้เขียนได้แก้ไขบทความตามข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ (Peer Reviewer) หรือกองบรรณาธิการแล้ว
- บทความในลักษณะอื่นๆ นอกเหนือจากรายละเอียดข้างต้นจะได้รับการพิจารณาจากกองบรรณาธิการเป็นกรณีเฉพาะ

การประเมินบทความ

การประเมินบทความที่ดีมีพลังในวิศวกรรมสารเกษมบัณฑิตมีรายละเอียดดังนี้

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

การส่งบทความ

ผู้เขียนจะต้องจัดเตรียมบทความต้นฉบับที่พิมพ์ตามข้อกำหนดของรูปแบบวารสาร จำนวน 1 ชุด และผู้เขียนบทความกรอกข้อมูลใบนำส่งบทความ พร้อมสแกนใบนำส่งบทความและแนบไฟล์

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

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

ลิขสิทธิ์

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์ในวิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต ถือเป็นกรรมสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต ห้ามนำข้อความทั้งหมดไปตีพิมพ์ซ้ำ ยกเว้นได้รับอนุญาตจากมหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิตแล้ว หากบทความที่ได้รับการตีพิมพ์นั้นเป็นบทความที่จะเมิดลิขสิทธิ์ของผู้อื่นหรือมีความไม่ถูกต้องในเนื้อหาของบทความ ผู้เขียนบทความนั้นต้องเป็นผู้รับผิดชอบ

กำหนดตีพิมพ์

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

จัดพิมพ์โดย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต

คณะที่ปรึกษา:

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

บรรณาธิการ:

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

รองบรรณาธิการ:

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

กองบรรณาธิการ:

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

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

ผู้ช่วยกองบรรณาธิการ:

รศ.วิญญู แสงสินกสิกิจ	อ.ดร.ศักดิ์ชาย รักษการ
อ.ธีรยุทธ จันทรแจ่ม	ผศ.ดร.หนึ่งฤทัย ทิมย้ายงาม
ผศ.วรารกร เกิดทรัพย์	อ.อุบลรัตน์ วาริชวัฒนะ

ฝ่ายเลขานุการ:

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

บทบรรณาธิการ

“วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต” เป็นวารสารที่มุ่งมั่นในการส่งเสริมและเผยแพร่บทความวิชาการและผลงานวิจัยที่มีคุณภาพอย่างต่อเนื่องยาวนานกว่า 14 ปี ความสำเร็จของวารสารปัจจุบันได้ถูกจัดให้เป็น “วารสารกลุ่มที่ 1” เป็นผลสะท้อนถึงความตั้งใจจริงของกองบรรณาธิการและการสนับสนุนจากคณะกรรมการสภามหาวิทยาลัย ผู้บริหารมหาวิทยาลัย คณะผู้ทรงคุณวุฒิ และคณะนักวิจัยที่มีบทบาทสำคัญต่อการพัฒนา ในการก้าวสู่ปี พ.ศ. 2568 วารสารยังคงตั้งเป้าหมายที่จะพัฒนาและยกระดับคุณภาพอย่างต่อเนื่อง เพื่อสามารถตอบโจทย์ความเปลี่ยนแปลงของโลก ในยุคปัจจุบัน ที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีอนาคต เช่น ปัญญาประดิษฐ์ พลังงานสะอาด และแนวคิดทางวิศวกรรมที่ส่งเสริมความยั่งยืน เป็นส่วนหนึ่งในการพัฒนาประเทศในระยะยาว

ในโอกาสส่งท้ายปีเก่าและต้อนรับปีใหม่ พุทธศักราช 2568 กองบรรณาธิการขอขอบคุณทุกท่านที่มีส่วนร่วมในการสนับสนุนและผลักดันวารสารนี้ให้เติบโตและก้าวหน้าอย่างต่อเนื่อง พร้อมขออำนาจสิ่งศักดิ์สิทธิ์ทั้งหลายในสากลโลก โปรดดลบันดาลให้ทุกท่านมีสุขภาพพลานามัยแข็งแรง มีพลังใจและความสำเร็จในทุกด้านและสร้างสรรค์ผลงานวิจัยและวิชาการ เพื่อเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาประเทศต่อไป

รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยฤทธิ์ สัตยาประเสริฐ
บรรณาธิการวิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต

บทความวิจัย (Research Article)

การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนเชิงตัวเลขสำหรับคานเซลล์ูลาร์ที่ใช้วัสดุเชิงประกอบแบบ FGM

NUMERICAL INVESTIGATION ON VIBRATION OF FUNCTIONALLY GRADED CELLULAR BEAM

1

ชนนัฐวิธ รัตนวิเชียร กำธรเกียรติ มุสิกเกต และ บุญชัย ผึ้งไผ่งาม

การปรับปรุงการเก็บข้อมูลและควบคุมการผลิตบรรจุภัณฑ์โดยใช้อินเทอร์เน็ตออฟติงส์ตามแนวทางการบำรุงรักษาแบบทวีผลทุกคนมีส่วนร่วม

IMPROVING DATA COLLECTION AND PRODUCTION CONTROL OF PACKAGING USING THE INTERNET OF THINGS (IOT) IN LINE WITH TOTAL PRODUCTIVE MAINTENANCE (TPM) PRINCIPLES

19

อัญญา มะโนวงศ์ และ ประจวบ กล่อมจิตร์

SMART SECURITY SYSTEM ON RASPBERRY PI WITH FACE RECOGNITION AND OBJECT DETECTION

35

Sa-nga Songmuang

การเพิ่มสมบัติเชิงกลและการต้านทานรังสียูวีของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์

ENHANCEMENT OF MECHANICAL AND UV PROTECTION PROPERTIES OF NANO-TITANIUM DIOXIDE/NATURAL RUBBER COMPOSITES

54

พีรวัส คงสง และ มาหามะสุไฮมี มะแซ

การประยุกต์ใช้เทคนิควิศวกรรมคันเซสำหรับการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์กระเป๋าตังค์จากต้นคลุ้ม

APPLICATION OF KANSEI ENGINEERING TECHNIQUES FOR THE DESIGN AND DEVELOPMENT OF WALLET FROM DONAX CANNIFORMIS

70

อภิชาล ทองมั่ง กำเนิดว่า ธยา ภิรมย์ สุรสิทธิ์ ระวั่งวงศ์ และ ชัยวัฒน์ภทร เลาสัตย์

บทความวิจัย (Research Article) (ต่อ)

การศึกษาคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตเมื่อใช้วัสดุชั้นผิวทางเดิมที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเส้นลวดในยางรถยนต์

A STUDY ON PROPERTIES OF ASPHALT CONCRETE USING RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT IMPROVED WITH TIRE-DERIVED STEEL 85

ธีรเดช เอียดยอด ชลัท ทิพากรเกียรติ และ ภาวัต ไชยชาวนาทิก

การประยุกต์ใช้หลักการซิกซ์ ซิกมาเพื่อลดสินค้าที่ไม่เป็นไปตามข้อกำหนดในกระบวนการบรรจุเครื่องดื่ม

AN APPLICATION OF SIX SIGMA PRINCIPLE FOR REDUCTION NON-CONFORMING PRODUCT IN BEVERAGE FILLING PROCESS 114

เกวณีน สำเภาทอง กวินธร สัยเจริญ และ สิทธิชัย แซ่เหล่ม

การประมาณประสิทธิภาพของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกในการพัฒนากำลังและความแข็งแรงของดินทรายสำหรับการปรับปรุงคุณภาพดิน

EVALUATING THE EFFECTIVENESS OF HYDRAULIC CEMENT IN ENHANCING STRENGTH AND STIFFNESS OF SANDY SOIL FOR GROUND IMPROVEMENT 134

ปณณวิช รุ่งเรือง วรพจน์ เพชรเกตุ ศุภลัทธิ พงศ์วิระสถิตย์ สุธี ปิยะพิพัฒน์ และ อติเทพ ศรีคงศรี

สมบัติการทนต่อแรงกระแทกและสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีนผสมเส้นใยธรรมชาติด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนเหวี่ยง

IMPACT STRENGTH PROPERTIES AND MORPHOLOGY OF NATURAL FIBER/POLYETHYLENE COMPOSITES WITH ROTATIONAL MOLDING PROCESS 153

ศิรประภา ดีประดิษฐ์ ณัฐพล ศรีช่วงโชติ จักรภพ คงสมแสง วรายุส ทรัพย์พล และ สุพัฒน์ สารอรอด

บทความวิจัย (Research Article) (ต่อ)

การแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดร่วมกับการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่มีฟังก์ชันราคาเชื้อเพลิงแบบไม่เรียบด้วยการผสมผสานวิธีการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงการจัดและวิธีเชิงแจกแจง

AN INTEGRATED APPROACH COMBINING COMBINATORIAL OPTIMIZATION AND EXHAUSTIVE ENUMERATION FOR ECONOMIC EMISSION DISPATCH WITH NON-SMOOTH COST FUNCTIONS 174

จิรพันธ์ ทาแกว วันไชย คำเสน ทวีพันธ์ จันทะวัง และ เฟลิน จันทรสุยะ

DISCRETE PARTICLE SWARM OPTIMIZATION ALGORITHM BASED ON INFORMATION SHARING MECHANISM 196

Qinghe Xu, Noppadol Amdee and Adisak Sangsongfa

การศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะระบบส่งกำลังในยานยนต์ไฟฟ้าดัดแปลง

A COMPARATIVE STUDY OF POWERTRAIN SYSTEM PERFORMANCE IN CONVERTED ELECTRIC VEHICLES 215

ภักดี สิทธิฤทธิ์กวิน และ กาจ อัมบุญอาบ

ผลกระทบของเครื่องหมายจราจรบนพื้นทางไม่ชัดเจนต่อพฤติกรรมการขับขี่กรณีศึกษา: งานก่อสร้างบนทางหลวงหมายเลข 35

THE EFFECT OF UNCLEAR ROAD MARKINGS TO DRIVING BEHAVIOR CASE STUDY: CONSTRUCTION PROJECT ON HIGHWAY NO.35 232

พรณรงค์ เลื่อนเพชร อาทิตยา นิ่มอนงค์ สุหฤท มาศเมฆ และ ภาวัด ไชยชาณวาทิก

ผลกระทบของแถบเส้นชะลอความเร็วรูปแบบต่าง ๆ ต่อการตื่นรู้ของผู้ขับขี่สำหรับประยุกต์ใช้บริเวณจุดตัดทางรถไฟ

THE EFFECT OF DIFFERENT RUMBLE STRIP CONFIGURATIONS ON DRIVER AWARENESS FOR APPLICATION AT RAILWAY CROSSINGS 252

อาทิตยา นิ่มอนงค์ และ พรณรงค์ เลื่อนเพชร

การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนเชิงตัวเลขสำหรับคานเซลล์ูลาร์ที่ใช้
วัสดุเชิงประกอบแบบ FGM
NUMERICAL INVESTIGATION ON VIBRATION OF FUNCTIONALLY
GRADED CELLULAR BEAM

ชนนฐิยวัส รัตนวิเชียร¹ กำธรเกียรติ มุสิกเกตุ^{2*} และ บุญชัย ผึ้งไผ่งาม³
¹นักศึกษา, หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโครงสร้าง คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, คลองหก คลองหลวง ปทุมธานี 12110,
Chanonyawat_r@mail.rmutt.ac.th
^{2,3}อาจารย์, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สาขาวิศวกรรมโครงสร้าง คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, คลองหก คลองหลวง ปทุมธานี 12110,
^{2*}kamtornkiat@rmutt.ac.th, ³boonchai_p@rmutt.ac.th

Chanonyawat Ruttanavichean¹, Kamtornkiat Musiket^{2*} and Boonchai Phungpaingam³
¹Student, Master of Engineering Program, Department of Civil Engineering, Faculty of
Engineering, Rajamangala University of Technology Thunyaburi, Klong Hok, Khlong Luang,
Pathumthani 12110, Thailand, Chanonyawat_r@mail.rmutt.ac.th
^{2,3}Lecturer, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala
University of Technology Thunyaburi, Klong Hok, Khlong Luang, Pathumthani 12110, Thailand,
^{2*}kamtornkiat@rmutt.ac.th, ³boonchai_p@rmutt.ac.th

* ผู้ประพันธ์บรรณกิจ (Corresponding author)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนเชิงตัวเลขแบบอิสระสำหรับปัญหาในสองมิติด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) ของคานเซลล์ูลาร์ (Cellular Euler-Bernoulli Beam) ที่มีคุณสมบัติวัสดุเชิงประกอบแบบสองทิศทาง BDFGM (Bi-Directional Functionally Graded Materials) ซึ่งประกอบขึ้นจากวัสดุสองชนิด คือ Aluminum และ Zirconia กฎการผสมตามแบบจำลองของกฎการผสมถูกเสนอเพื่ออธิบายการเปลี่ยนแปลงของเศษส่วนปริมาตรของวัสดุ โดยกำหนดให้ค่าดัชนีการแปรผันของโมดูลัสยืดหยุ่นและความหนาแน่นมีการแปรผันด้วยสมการแบบเอกซ์โพเนนเชียลตามแนวแกนและกฎกำลังตามความลึกของคาน ค่าความถี่ธรรมชาติสามลำดับ

แรกของการเซลล์อย่างง่ายที่ได้จากการวิเคราะห์พบว่า มีการแปรผกผันกับค่าดัชนีการแปรผันที่เพิ่มขึ้นทั้งสองทิศทางโดยดัชนีการแปรผันตามความลึกนั้น ส่งผลต่อการอัตราการลดลงของค่าความถี่ธรรมชาติมากกว่าดัชนีการแปรผันตามแนวแกน แบบจำลองที่เสนอนี้ สามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อการวิเคราะห์และออกแบบวัสดุเชิงประกอบแบบสองทิศทางที่ประกอบด้วยวัสดุที่มีคุณสมบัติต่างกันมากกว่าสองชนิดเพื่อพิจารณาเลือกค่าความถี่ธรรมชาติที่เหมาะสมสำหรับปัญหาที่ต้องการต่อไป

คำสำคัญ: วัสดุเชิงประกอบแบบสองทิศทาง, คานเซลล์ลาร์, วิถีไฟไนท์เอลิเมนต์, การสั่นสะเทือน, ความถี่ธรรมชาติ, รูปร่างโหมด

ABSTRACT

This research performs a freeform numerical vibration analysis for a two-dimensional problem using the Finite Element Method of a cellular Euler-Bernoulli beam with mechanical material properties. BDFGM (Bi-Directional Functionally Graded Materials) is composed of two materials, Aluminum and Zirconia. A mixing law based on rule of mixtures is proposed to account for the variation in the volume fraction of materials. It is determined that the variation indices of elastic modulus and density vary with the exponentially along the axial direction and power law with the depth of the beam. The first three natural frequencies of the simple cellular beams obtained from the analysis are found to be inversely proportional to the variation index increasing in both directions with the variation index increasing with depth. It affects the rate of decrease of the natural frequency value more than the axial variation index. This proposed model can be applied to the analysis and design of bidirectional composites consisting of more than two materials with different properties in order to determine the appropriate natural frequency value for the desired problem.

KEYWORDS: Bi-Directional Functionally Graded Material, Cellular Beam, Finite Element Method, Vibration, Natural Frequency, Mode Shape

1. บทนำ

วัสดุเชิงประกอบแบบ Functionally Graded Materials (FGM) เป็นวัสดุชนิดหนึ่งของวัสดุเชิงประกอบ (Composite Materials) ที่มีโครงสร้างเกิดจากการประกอบกันของวัสดุผสมที่แตกต่างกันหลายประเภททำให้มีคุณสมบัติที่แตกต่างกันอย่างต่อเนื่องตามทิศทางการออกแบบ โดยมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นหรือค่าสัมประสิทธิ์ของการขยายตัวจากความร้อน และทำให้เปลี่ยนองค์ประกอบ

ของวัสดุจากโลหะเป็นเซรามิก ความแข็งแรงของแต่ละตำแหน่งจะแปรเปลี่ยนจากแข็งไปจนถึงอ่อน ทำให้โครงสร้างเชิงประกอบในลักษณะนี้สามารถลดการเกิดปัญหาความเค้นในระหว่างชั้นของส่วนผสมได้ดี ซึ่งตรงข้ามกับวัสดุเชิงประกอบแบบแซนด์วิชหรือลามิเนต (Sandwich/Laminated Composite Materials) เพราะวัสดุประเภทนี้มีการแปรผันคุณสมบัติอย่างกะทันหันบริเวณผิวสัมผัสของวัสดุในแต่ละชนิด และเมื่อมีน้ำหนักบรรทุกมากระทำหรือมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจะทำให้เกิดความเข้มข้นของความเค้น (Stress Concentrations) และความไม่ต่อเนื่องของความเค้นขึ้น ซึ่งจะทำให้เกิดปัญหาการแยกชั้นของวัสดุและการลื่นไถลบริเวณผิวสัมผัส (Delamination and Slipping)

ในอดีตที่ผ่านมาพบว่ามีนักวิจัยหลายกลุ่มทำการศึกษาศึกษาการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนและค่าความถี่ธรรมชาติของคานที่ใช้วัสดุ Functionally Graded Material (FGM) เชิงตัวเลข อาทิเช่น ในปี ค.ศ. 2005 Kobayashi et al [1] ได้ทำการศึกษาศึกษาการสั่นสะเทือนของคานรูปทรงเรขาคณิตที่มีปลายยึดแน่นทั้งสองด้าน จากการศึกษพบว่า มีการแตกร้าวที่บริเวณด้านบนของคาน ซึ่งการแตกร้าวดังกล่าวมีอิทธิพลมาจากค่าความถี่ธรรมชาติและผลจากรูปปร่างโหมดที่สอดคล้อง ในปี ค.ศ. 2009 Sina et al [2] เสนอทฤษฎีคานรูปแบบใหม่ซึ่งได้รับการพัฒนาสำหรับคานคอมโพสิต ถูกนำมาใช้สำหรับการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนอย่างอิสระของคาน FGM สมการเคลื่อนที่ได้มาจากหลักการของแฮมิลตัน ผลการวิจัยพบว่า ค่าที่ได้มีความแตกต่างเล็กน้อยสำหรับความถี่ธรรมชาติ จากทฤษฎีการเปลี่ยนรูปแบบแรงเฉือนลำดับที่หนึ่งแบบดั้งเดิม และรูปปร่างโหมดที่สอดคล้องของทั้งสองวิธีนั้นเหมือนกัน ในปี ค.ศ. 2010 Simsek and Kocaturk [3] ศึกษาคุณลักษณะการสั่นสะเทือนอิสระและบังคับ แบบพหุติกรรมไดนามิกของคาน FGM โดยใช้ทฤษฎีคานรูปแบบต่าง ๆ โดยมีแรงกระทำเคลื่อนที่ และคุณสมบัติวัสดุของคานถูกสมมุติว่ามีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องในทิศทางของความหนาตามกฎเลขชี้กำลังหรือรูปแบบกฎกำลัง ผลการวิจัยพบว่า ปัจจัยจากผลของ Shear Deformation การกระจายตัวของวัสดุ รวมทั้งความเค้นที่เกิดขึ้นในคานได้ถูกเปรียบเทียบกับผลจากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่ามีความสอดคล้องกันดี และสามารถยืนยันถึงผลกระทบของปัจจัยดังกล่าวข้างต้นที่มี ต่อผลเฉลยของการสั่นสะเทือนของคานแบบ FGM ในปี ค.ศ. 2019 Gao et al [4] ได้นำเสนอวิธี Hybrid Chebyshev Surrogate Model with Discrete Singular Method เพื่อทำการวิเคราะห์พฤติกรรมทางพลศาสตร์ของคานเชิงประกอบแบบ FGM ที่มีคุณสมบัติวัสดุที่ไม่แน่นอน จากการศึกษพบว่าความไม่แน่นอนของค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเป็นพารามิเตอร์ ที่มีผลกระทบต่อพฤติกรรมทางพลศาสตร์ของคานมากที่สุด ในปี ค.ศ. 2022 Nguyen et al [5] ทำการวิเคราะห์พฤติกรรมการโก่งเดาะ การดัดและการสั่นสะเทือนของคานเชิงประกอบแบบ FGM ด้วยการใช้ทฤษฎีแรงเฉือนแบบสองตัวแปรอย่างง่าย (A Simple Two-Variable Shear Deformation Theory) และได้อธิบายถึงผลกระทบของรูพรุน ลักษณะการกระจายคุณสมบัติของวัสดุและความเครียดเฉือนต่อค่าของความถี่ธรรมชาติ น้ำหนักบรรทุกวิกฤต การโก่งตัวของคานและความเค้นที่เกิดขึ้น ในปี ค.ศ. 2022 Al-Zahrani et al [6] ได้

ทำการศึกษาวិเคราะห์การสั่นสะเทือนความถี่ธรรมชาติในระนาบ 2 มิติ ของ Functionally Graded Strip Beam ซึ่งมีคุณสมบัติโมดูลัสการเปลี่ยนแปลงของวัสดุทั้งตามแนวแกน และตามความลึกของหน้าตัด โดยใช้วิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ (โปรแกรมสำเร็จรูป ANSYS) จากผลการศึกษาพบว่า คุณสมบัติโมดูลัสการเปลี่ยนแปลงของวัสดุตามแนวแกนจะมีผลต่อค่าความถี่ธรรมชาติมากกว่า คุณสมบัติโมดูลัสการเปลี่ยนแปลงของวัสดุตามความลึกของหน้าตัด

นอกจากนี้ วัสดุเชิงประกอบแบบ FGM ยังมีคุณสมบัติโดดเด่นอีกหลายด้าน เช่น มีความแข็งแรงสูง น้ำหนักเบา และมีความต้านทานความร้อนสูง เป็นต้น ด้วยคุณสมบัติดังกล่าวจึงทำให้วัสดุเชิงประกอบแบบ FGM ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานอย่างแพร่หลาย ไม่ว่าจะเป็นด้านวิศวกรรมการบินและอวกาศ วิศวกรรมยานยนต์ วิศวกรรมไฟฟ้า ชีวการแพทย์ และการนำมาใช้เป็นวัสดุทางเลือกที่ใช้ในงานโครงสร้าง เป็นต้น [7-9]

การศึกษาวงจรกรรมของโครงสร้างที่ทำจากวัสดุเชิงประกอบแบบ FGM จึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจอย่างมาก เนื่องจากได้นำข้อดีของวัสดุทั้งสองชนิดมาใช้ประโยชน์ร่วมกัน ถึงแม้ว่าจะมีงานวิจัยจำนวนมากที่ศึกษาพฤติกรรมของคานเชิงประกอบแบบ FGM ที่มีการแปรผันคุณสมบัติของวัสดุตามทิศทางความลึก หรือตามทิศทางแนวแกนของหน้าตัด (Axially FGM) อย่างไรก็ตามหนึ่งแต่การเสนอแบบจำลองเชิงประกอบแบบ FGM ที่มีการแปรผันคุณสมบัติของวัสดุทั้งสองทิศทาง (Bi-Directional FGM) นั้นยังมีจำนวนไม่มากนัก งานวิจัยในครั้งนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนแบบอิสระ (Free Vibrations) ของคานเซลล์ูลาร์ที่ใช้วัสดุเชิงประกอบแบบ FGM ในสองมิติด้วยวิธีเชิงตัวเลข (Two-Dimensional Numerical Analysis) เพื่อศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของวัสดุในสองทิศทางด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) โดยทำการกำหนดให้การเปลี่ยนแปลงโมดูลัสยืดหยุ่นและความหนาแน่นของวัสดุอยู่ในรูปฟังก์ชันที่ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของคานโดยตรง

2. การวิเคราะห์การสั่นสะเทือน (Vibration Analysis)

สมการในรูปแบบแข็ง (Strong Form) ของวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์สำหรับการวิเคราะห์ปัญหาทางพลศาสตร์ในสองมิติ (2D Elastic Dynamics) ภายหลังจากการใส่สมการเงื่อนไขขอบของการเคลื่อนที่ (Dirichlet BCs) และแรงกระทำ (Neumann BCs) โดยอาศัยหลักของการเปลี่ยนรูปร่างเสมือน (Principle of Virtual Displacement) แล้วนั้น จะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปแบบอ่อน (Weak Form) ที่สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (1)

$$\int_{\Omega} \rho \delta u \ddot{u} d\Omega + \int_{\Omega} \delta \varepsilon \sigma d\Omega = \int_{\Gamma_N} \delta u \bar{t} d\Gamma + \int_{\Omega} \delta u b d\Omega \quad (1)$$

เมื่อ δu และ $\delta \epsilon$ หมายถึงการเคลื่อนที่และความเครียดเสมือนตามลำดับ อาศัยเทคนิคการแบ่งออกเป็นส่วยย่อย ๆ (Discretization) ด้วยวิธีเศษถ่วงน้ำหนักตกค้างของกาเลอร์กิน (Galerkin Weighted Residual Method) Weak Form ในสมการที่ (1) จะถูกเปลี่ยนรูปไปเป็นระบบสมการซึ่งสามารถแสดงให้อยู่ในรูปของสมการสัญลักษณ์เมทริกซ์ ได้เป็น

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = F \quad (2)$$

เมื่อ M คือเมทริกซ์ของมวล (Mass Matrix) และ C คือ เมทริกซ์ของแรงต้านทานการสั่นสะท้อน (Damping Matrix)

$$M = \int_{\Omega} N^T \rho N d\Omega \quad (3)$$

$$C = \int_{\Omega} N^T c N d\Omega \quad (4)$$

โดยที่ K คือสติฟเนสเมทริกซ์หลักของระบบ F และ u คือเวกเตอร์ของแรงกระทำภายนอกและการเปลี่ยนตำแหน่งของโหนดตามลำดับ เครื่องหมายจุดด้านบนตัวแปร u หมายถึงลำดับของอนุพันธ์เทียบกับเวลาของการเปลี่ยนตำแหน่งนั่นเอง

สำหรับการวิเคราะห์การสั่นสะท้อนเพื่อหาค่าความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequencies) รวมถึงรูปร่างที่สอดคล้องกับความถี่ดังกล่าว (Mode Shapes) นั้น เทอมที่เกี่ยวข้องกับแรงภายนอกและแรงต้านทานการสั่นสะท้อนจะถูกกำจัดออกไปจากสมการที่ (2) และสามารถลดรูปลงเป็นสมการอนุพันธ์แบบเอกพันธ์ (Homogeneous Differential Equation) ได้ตั้งสมการที่ (5)

$$\bar{K}\bar{u} + M\ddot{\bar{u}} = 0 \quad (5)$$

สมการที่ (5) ดังกล่าวมีผลเฉลยทั่วไปในรูปของสมการเอ็กโปเนนเชียลที่เป็นฟังก์ชันของเวลาและความถี่เชิงมุม (ω ; Angular Frequency)

$$u = U \exp(j\omega t) \quad (6)$$

โดยที่ $j = \sqrt{-1}$ และ U คือขนาดของการเคลื่อนที่ของโหนด (Amplitude of Displacement) นั้นเอง หากนำผลเฉลยทั่วไปในสมการที่ (6) แทนค่ากลับลงไปในสมการอนุพันธ์ลำดับสองข้างต้น จะทำให้สมการเปลี่ยนเป็นสมการ Eigenvalue Problems ซึ่งสามารถเขียนแสดงใหม่ได้ดังสมการที่ (7) นั้นเอง ถ้าทราบค่าของ ω ก็จะสามารถคำนวณค่าความถี่ธรรมชาติและรูปร่างโหมดที่สอดคล้องได้

$$(\bar{K} - \omega^2 M)\bar{u} = 0 \quad (7)$$

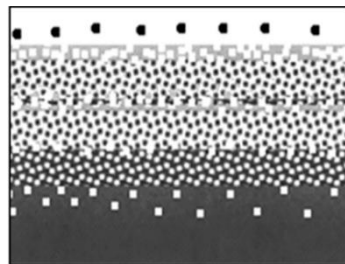
เมื่อ $\omega = \sqrt{k/m}$ คือความถี่เชิงมุม (Angular Frequency) ในหน่วย rad/sec

3. วัสดุเชิงประกอบแบบ FGM (Functionally Graded Materials)

วัสดุเชิงประกอบแบบ FGM ได้รับการเสนอครั้งแรกในช่วงทศวรรษ 1980 โดยนักวิทยาศาสตร์ชาวญี่ปุ่น เพื่อใช้ในการบินอวกาศ จากสาเหตุที่วัสดุคอมโพสิตแบบดั้งเดิมที่ลองใช้ในโครงการล้มเหลวเนื่องจากการแยกตัว (Delamination) และการหลุดลอก (Salling) ของวัสดุโลหะกับเซรามิกที่ใช้และปัญหาเกี่ยวกับความเสียหายในรูปแบบการแตกร้าว (Cracking) ได้มีการพัฒนาวัสดุที่สามารถทนต่อความแตกต่างของอุณหภูมิที่สูงได้ โดยได้ค้นพบว่าปัญหาเหล่านั้นมักเกิดขึ้นจากความไม่ต่อเนื่องของส่วนผสมจึงทำให้เกิดความเค้นสะสมในระหว่างชั้นส่วนผสม การทำให้ส่วนเชื่อมต่อระหว่างวัสดุสองชนิดด้วยส่วนต่อประสานแบบค่อยเป็นค่อยไป จะสามารถแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้ จากแนวความคิดดังกล่าวข้างต้น ทำให้มีการพัฒนาวัสดุคอมโพสิตชนิดใหม่ ๆ โดยทดลองใส่วัสดุชนิดที่สองเข้าไปในวัสดุหลักเพื่อให้วัสดุชนิดที่สองค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเป็นเปอร์เซ็นต์ในวัสดุหลักจาก 0% เป็น 100% ด้วยวิธีอินเทอร์เฟซและพัฒนากระบวนการสร้างวัสดุสมบัติเชิงฟังก์ชัน ที่เรียกกันในที่สุดว่า Functionally Graded Materials (FGM) ดังแสดงในรูปที่ 1



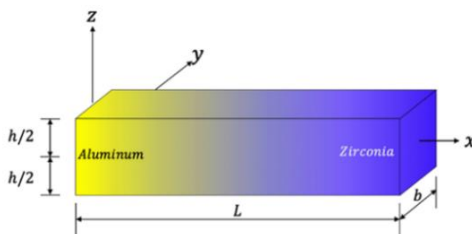
(a) วัสดุคอมโพสิตลามิเนตแบบดั้งเดิม



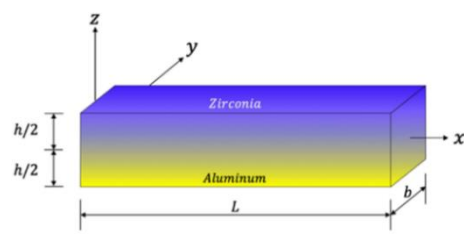
(b) วัสดุเชิงประกอบแบบ FGM

รูปที่ 1 การกระจายสัดส่วนของคุณสมบัติวัสดุ [10]

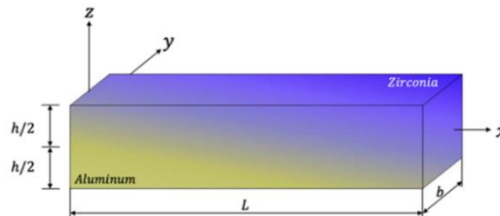
เมื่อพิจารณาคานแบบออยเลอร์-เบอร์นูลลี (Euler-Bernoulli) ที่มีหน้าตัดสม่ำเสมอซึ่งมีความยาว L ความกว้าง b และความสูง h ในระบบพิกัดคาร์ทีเซียนโคออร์ดิเนต x, y, z ที่มีจุดกำเนิดด้านซ้ายตรงกึ่งกลางความสูงของคาน และใช้วัสดุเชิงประกอบแบบ FGM ซึ่งมีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นไม่คงที่ โดยจะแปรผันอย่างต่อเนื่องและมีทิศทางในการแปรผันคุณสมบัติของวัสดุ เช่น โมดูลัสยืดหยุ่น ความหนาแน่นของวัสดุ อัตราส่วนปัวซอง สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน เป็นต้น เป็นไปได้ใน 3 รูปแบบด้วยกันคือ แปรผันตามความยาวของคาน (รูปที่ 2(a)) แปรผันตามความลึกหรือตามขวางของหน้าตัดคาน (รูปที่ 2(b)) และแปรผันสองทิศทางทั้งตามแนวแกนและตามความลึกของหน้าตัดคาน (รูปที่ 2(c))



(a) แปรผันตามความยาวแนวแกน



(b) แปรผันตามความลึก



(c) แปรผันทั้ง 2 ทิศทาง

รูปที่ 2 การแปรผันคุณสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ FGM

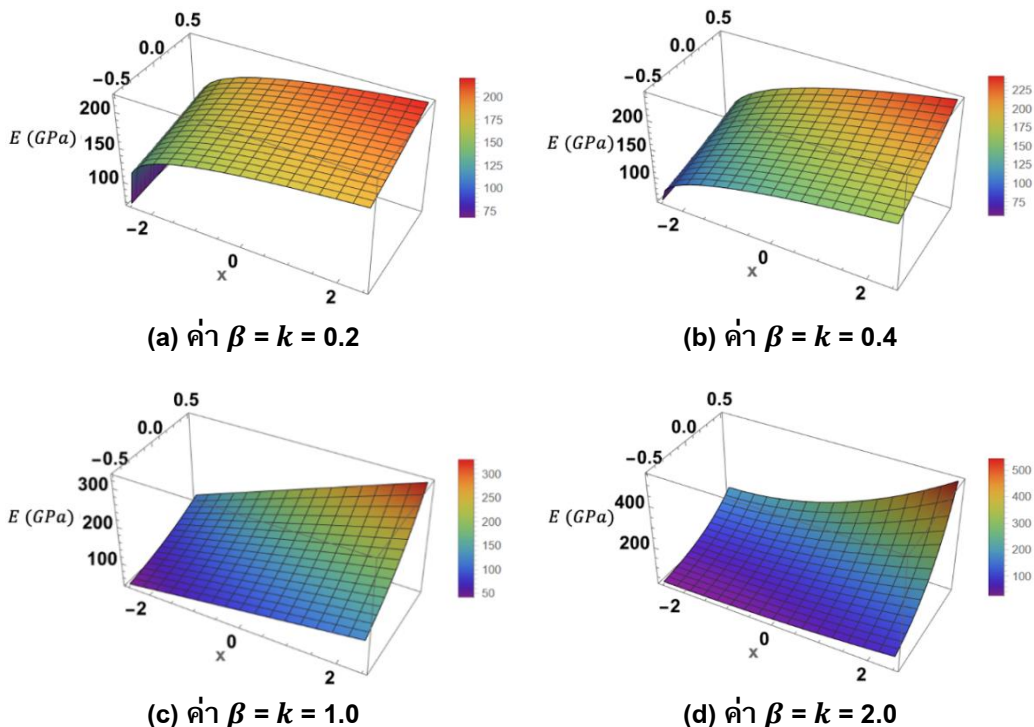
โดยในงานวิจัยครั้งนี้ จะใช้วัสดุเชิงประกอบแบบ FGM ที่กระจายคุณสมบัติของวัสดุแบบสองทิศทาง (Bi-Directional FGM) ตามรูปที่ 2(c) ทั้งในทิศทางตามยาว (ทิศทาง x) และตามขวาง (ทิศทาง z) ของหน้าตัดวัสดุ ด้วยเหตุนี้ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (E) และความหนาแน่น (ρ) ของคาน BDFGM ซึ่งแปรผันของวัสดุตามทิศทางความยาวของคานจะถูกจำลองด้วยสมการเอ็กซ์โปเนนเชียล ซึ่งถูกควบคุมด้วยดัชนีการแปรผัน (Gradient index) β และความแปรผันตามทิศทางความหนาของคานจะถูกจำลองโดยใช้สมการกฎของกำลัง (Power Law) ที่ควบคุมโดยดัชนีการแปรผัน k [11] สมการที่แสดงการกระจายตัวคุณสมบัติของวัสดุทั้งสองทิศทางสำหรับงาน วิจัยในครั้งนี้ แสดงได้ดังสมการที่ (8) และสมการที่ (9) สำหรับโมดูลัสความยืดหยุ่น และความหนาแน่น ตามลำดับ

$$E(x, y) = e^{\frac{\beta}{L}x} [E_z (\frac{2z+h}{2h})^k + E_a \{1 - (\frac{2z+h}{2h})^k\}] \quad (8)$$

$$\rho(x, y) = e^{\frac{\beta}{L}x} [\rho_z (\frac{2z+h}{2h})^k + \rho_a \{1 - (\frac{2z+h}{2h})^k\}] \quad (9)$$

เมื่อ E_z และ ρ_z คือ โมดูลัสความยืดหยุ่นและความหนาแน่นของเซอร์โคเนีย ณ ตำแหน่งมุมซ้ายบน ($z = +\frac{h}{2}$) และ E_a และ ρ_a คือ โมดูลัสความยืดหยุ่นและความหนาแน่นของอลูมิเนียม ณ ตำแหน่งมุมซ้ายล่าง ($z = -\frac{h}{2}$) ตามลำดับ h คือความหนา และ L คือความยาวของคาน

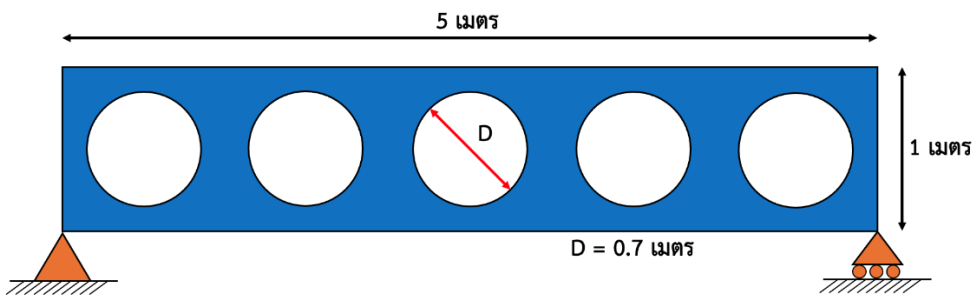
จากตารางที่ 1 ในกรณีนี้ใช้วัสดุแบบ BDFGM โดยมี Aluminum อยู่ด้านล่างและ Zirconia อยู่ด้านบน เมื่อพิจารณาถึงคานที่มีความยาว $L = 5$ เมตร และความหนา $h = 1$ เมตร การเปลี่ยนแปลง Elastic Modulus ที่ค่าดัชนีการแปรผันต่าง ๆ ความแปรผันของวัสดุภายในขอบเขตของคาน BDFGM ที่เป็นไปตามกฎกำลังระหว่างขอบเขตความหนา $-\frac{h}{2} < z < +\frac{h}{2}$ และในเวลาเดียวกันกฎเอ็กซ์โปเนนเชียลภายในขอบเขตแกน $-0 < x < L$ ตามลำดับ ลักษณะการกระจายตัวความเข้มข้นของ Aluminum และ Zirconia ตามสมการที่ (8) และสมการที่ (9) ตลอดพื้นที่หน้าตัดคานที่ศึกษา สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 การเปลี่ยนแปลงโมดูลัสยืดหยุ่นเมื่อค่า $\beta = k = 0.2, 1.0, 2.0$

4. วิธีการและผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์ปัญหาความถี่ธรรมชาติของคานาเซลลูลาร์ (Cellular Beam) ภายใต้สมมุติฐานของความเค้นในระนาบ 2 มิติ ที่มีความยาว 5 เมตร สูง 1 เมตร (อัตราส่วนความยาวต่อความสูงคานาเท่ากับ 5:1) คานามีรูเจาะจำนวนทั้งสิ้น 5 รู ตามความยาวของคานา โดยรูเจาะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ขนาด 0.7 เมตร คานาเซลลูลาร์เชิงประกอบแบบ FGM สำหรับงานวิจัยในครั้งนี้ ถูกกำหนดให้ใช้วัสดุสองชนิด คือ อลูมิเนียม (Aluminum) และ เซอร์โคเนีย (Zirconia) โดยค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุ (Young's modulus) และความหนาแน่น (Density) แปรผันไปในทิศทางตามความยาวและความหนาของวัตถุ (Bi-Directional Functionally Graded Material) ดังแสดงในสมการที่ (8) และสมการที่ (9) โดยกำหนดให้อัตราส่วนปัวซองมีค่าคงที่เท่ากับ 0.28 เนื่องจากการแปรผันที่ส่งผลต่อการวิเคราะห์ทั้งแบบสถิตยศาสตร์และพลศาสตร์นั้น น้อยกว่าการแปรผันของโมดูลัสยืดหยุ่น [12] คุณสมบัติวัสดุของคานา แสดงในตารางที่ 1 กรณีตัวอย่างนี้กำหนดให้เป็นคานาอย่างง่าย (Simple Beam) ที่มีฐานรองรับ (Support) ที่ปลายคานาทางด้านซ้ายเป็นแบบยึดหมุน (Hinged Support) และในขณะที่ปลายคานาด้านขวามีแบบลูกกลิ้ง (Roller Support) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4



รูปที่ 4 โมเดลของคานาเซลลูลาร์

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของวัสดุ

คุณสมบัติ (Properties)	หน่วย (Unit)	อลูมิเนียม (Aluminum: Al)	เซอร์โคเนีย (Zirconia: ZrO_2)
E	GPa	70	200
ρ	kg/m ³	2702	5700

4.1 Mesh Convergence

โดยทั่วไปแล้วการสร้างโครงตาข่ายด้วยขนาดที่ละเอียดจะทำให้ผลลัพธ์ที่ได้เข้าใกล้ Exact Solution แต่เวลาที่ใช้ในการคำนวณก็มากขึ้นเช่นกันสำหรับปัญหาขนาดใหญ่ ดังนั้นจำเป็นต้องมีการเลือกขนาดโครงตาข่ายให้มีความเหมาะสมเพื่อลดเวลาของการคำนวณในขณะที่ยังคงมีความแม่นยำของผลลัพธ์ในระดับที่ยอมรับได้ สามารถทำได้ด้วยการพิจารณาขนาดที่ลดลงของโครงตาข่าย (Element Size) กับการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ธรรมชาติในแต่ละโหมดรูปร่าง (Mode Shapes) ดังแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งมีการลู่อเข้าหาผลเฉลยที่ขนาดของโครงตาข่ายมีค่าเป็น 0.0015625 มม. ซึ่งจะได้นำไปใช้สำหรับการวิเคราะห์ค่าความถี่ธรรมชาติในหัวข้อต่อไป

ตารางที่ 2 ขนาดโครงตาข่ายที่เหมาะสมที่ทำให้ความถี่ธรรมชาติลู่อเข้าหาผลเฉลย

Ele. Size (mm.)	ความถี่ธรรมชาติ (รอบต่อวินาที)			
	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4
0.025	8.1435	14.6970	22.7410	35.9940
0.0125	8.0529	14.2810	22.4580	35.5730
0.00625	7.9635	13.9050	22.1800	35.1580
0.003125	7.9118	13.7010	22.0200	34.9180
0.0015625	7.8754	13.5630	21.9070	34.7500
0.00078125	7.8754	13.5629	21.9031	34.7498

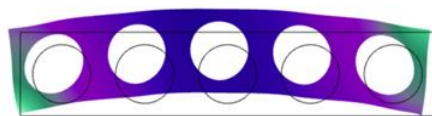
4.2 Model Validation

เนื่องจากไม่สามารถหาค่าผลเฉลยแม่นยำตรงทางทฤษฎี (Close-to-Exact Solution) ของคานตัวอย่างที่มีคุณสมบัติวัสดุแบบ BDFGM นี้ได้ จึงต้องสร้างแบบจำลองของปัญหาสำหรับใช้ในการตรวจสอบแบบจำลอง BDFGM ที่สร้างขึ้น โดยกำหนดให้วัสดุสำหรับตรวจสอบ มีคุณสมบัติ Isotropic ที่มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Elastic Modulus) และอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's Ratio) มีค่าเป็น 30 GPa และ 0.28 ตามลำดับ สามารถทำได้โดยการกำหนดค่าดัชนีการแปรผันทั้งสองทิศทางในสมการที่ (8) และสมการที่ (9) ให้มีค่าเท่ากับศูนย์ เพื่อเปรียบเทียบความถี่ธรรมชาติจำนวน 6 ค่าแรกที่ได้จากการวิเคราะห์กับค่าที่อ้างอิงจาก [13] ผลการเปรียบเทียบดังกล่าวแสดงไว้ในตารางที่ 3 ความถี่ธรรมชาติทั้งหกลำดับซึ่งได้จากการวิเคราะห์กับค่าอ้างอิงนั้น ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยค่าความถี่ธรรมชาติลำดับแรกมาก มีความคลาดเคลื่อนเพียง 3.78 เปอร์เซ็นต์ เท่านั้น

ตารางที่ 3 ความถี่ธรรมชาติ 6 ลำดับแรกเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิง

	ความถี่ธรรมชาติ (รอบต่อวินาที)					
	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4	Mode 5	Mode 6
COMSOL	154.98	621.67	970.24	1269.40	1803.80	2183.10
Ref [13]	149.30	597.80	931.10	1221.30	1732.80	2095.80
Error %	3.78	3.99	4.20	3.94	4.10	4.17

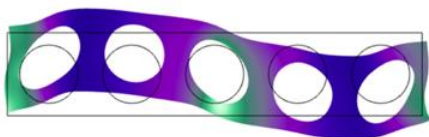
ในการนี้ของรูปร่างโหมด (Mode Shapes) 4 ลำดับแรกที่ได้จากการวิเคราะห์นั้น ผลการตรวจสอบแบบจำลองที่เสนอ ให้รูปร่างที่สอดคล้องกันกับผลจากการอ้างอิง [13] และเป็นรูปร่างโหมดที่เกิดขึ้นได้จริง ดังแสดงในรูปที่ 5



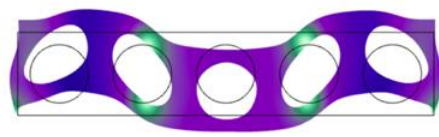
(a) Mode Shape 1



(b) Mode Shape 2



(c) Mode Shape 3



(d) Mode Shape 4

รูปที่ 5 Mode Shapes 4 ลำดับแรกที่เกิดขึ้น

4.3 ผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลข (Numerical Results)

ผลจากการวิเคราะห์เชิงตัวเลขสำหรับคานาเซลลูลาร์อย่างง่ายในระนาบสองมิติซึ่งประกอบไปด้วยวัสดุผสมระหว่างอลูมิเนียมและเซอร์โคเนียที่มีการแปรผันในสองทิศทางโดยค่าดัชนีการแปรผันของวัสดุตามความยาวแนวแกน (β) และตามความลึกของคาน (k) มีค่าอยู่ระหว่าง $0.2 < \beta < 2$ และ $0.2 < k < 2$ ตามลำดับ ทำการคำนวณค่าความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequencies) ใน 3 ลำดับแรกที่เป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีการแปรผัน โดยผลการวิเคราะห์ดังกล่าว แสดงไว้ในตารางที่ 4 ถึง 6 ตามลำดับ

เมื่อค่าดัชนีการแปรผันของวัสดุตามแนวแกน β มีค่าเพิ่มขึ้นนั้น พบว่าค่าความถี่ธรรมชาติสามลำดับแรกของคานเชลูลาร์มีค่าลดลง และในขณะเดียวกัน ค่าดัชนีการแปรผันของวัสดุตามความลึก k มีแนวโน้มที่ส่งผลต่อค่าความถี่ธรรมชาติของคานในลักษณะเดียวกันเมื่อคุณสมบัติของคานมีการเปลี่ยนจากอลูมิเนียม (ด้านซ้ายมือของคาน) ไปเป็นเซอร์โคเนีย (ด้านขวามือของคาน) ซึ่งจะไม่สอดคล้องกับความจริงที่ว่าความถี่ธรรมชาติจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและความแข็งแกร่ง (Rigidity) ของคานมีค่าเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม ในกรณีศึกษาครั้งนี้ มวลหรือความหนาแน่นของวัสดุมีค่าไม่คงที่หากแต่เพิ่มขึ้นตามค่าดัชนีของการแปรผันด้วยเช่นเดียวกัน หากพิจารณาโดยอาศัยทฤษฎีของการสั่นสะเทือนที่กล่าวว่า ความถี่ของการสั่นสะเทือนเป็นปฏิภาคโดยตรงกับโมดูลัสยืดหยุ่นและความแข็งแกร่งของวัสดุ แต่ในขณะเดียวกันก็เป็นปฏิภาคผกผันกับมวลหรือความหนาแน่นของวัสดุ [14] จากหลักความจริงข้อนี้ อาจกล่าวได้ว่า ความถี่ธรรมชาติของการสั่นสะเทือนแบบอิสระที่เพิ่มขึ้นจากการเพิ่มของโมดูลัสยืดหยุ่นจะถูกหักล้างกับค่าที่ลดลงอันเนื่องมาจากมวลหรือความหนาแน่นที่มากขึ้น เมื่อพิจารณาค่าความถี่ธรรมชาติจากตารางที่ 4 ถึง 6 นั้นพบว่า การเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นวัสดุ FGM นั้น ส่งผลต่อการลดลงของค่าความถี่ธรรมชาติของคานเชลูลาร์มากกว่าการเพิ่มขึ้นของค่าโมดูลัสยืดหยุ่นอย่างชัดเจน

ตารางที่ 4 ความถี่ธรรมชาติลำดับแรก (Hz)

β	k					
	0.2	0.4	0.6	0.8	1	2
0.2	80.62	79.23	77.50	75.46	73.15	59.24
0.4	80.22	78.81	77.06	74.99	72.66	58.70
0.6	79.77	78.34	76.56	74.47	72.12	58.11
0.8	79.28	77.82	76.01	73.90	71.53	57.49
1	78.75	77.26	75.43	73.29	70.90	56.83
2	75.62	73.96	71.98	69.73	67.24	53.16

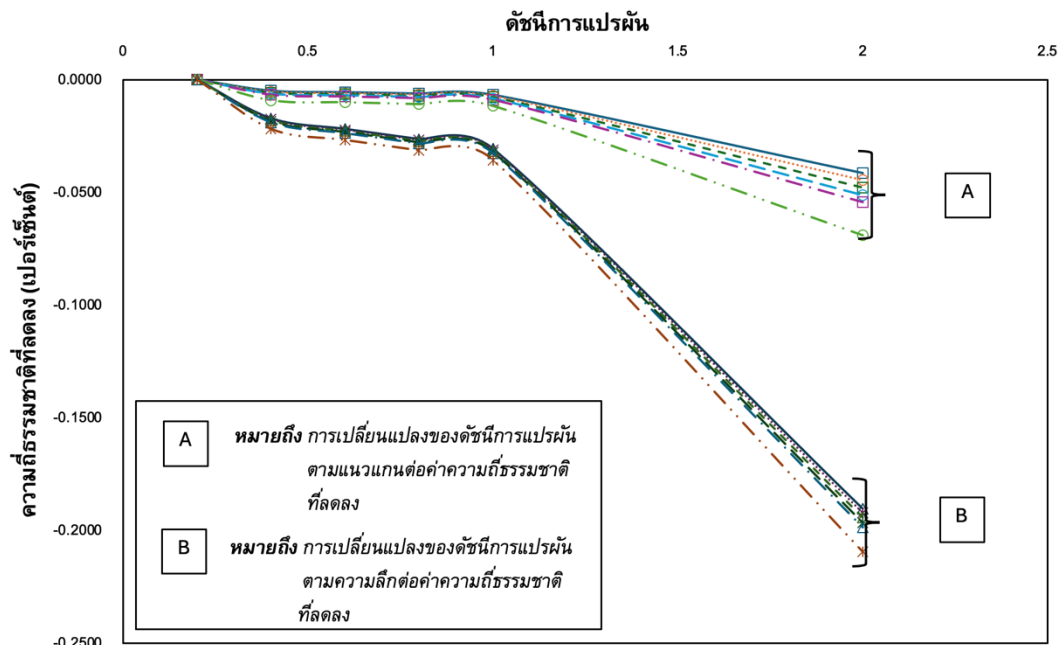
ตารางที่ 5 ความถี่ธรรมชาติลำดับสอง (Hz)

β	k					
	0.2	0.4	0.6	0.8	1	2
0.2	145.95	141.72	137.37	132.92	128.38	104.90
0.4	142.08	137.98	133.77	129.48	125.09	102.39
0.6	138.35	134.38	130.33	126.18	121.95	100.02
0.8	134.76	130.94	127.03	123.04	118.97	97.77
1	131.34	127.66	123.90	120.06	116.14	95.67
2	116.65	113.67	110.62	107.49	104.28	87.02

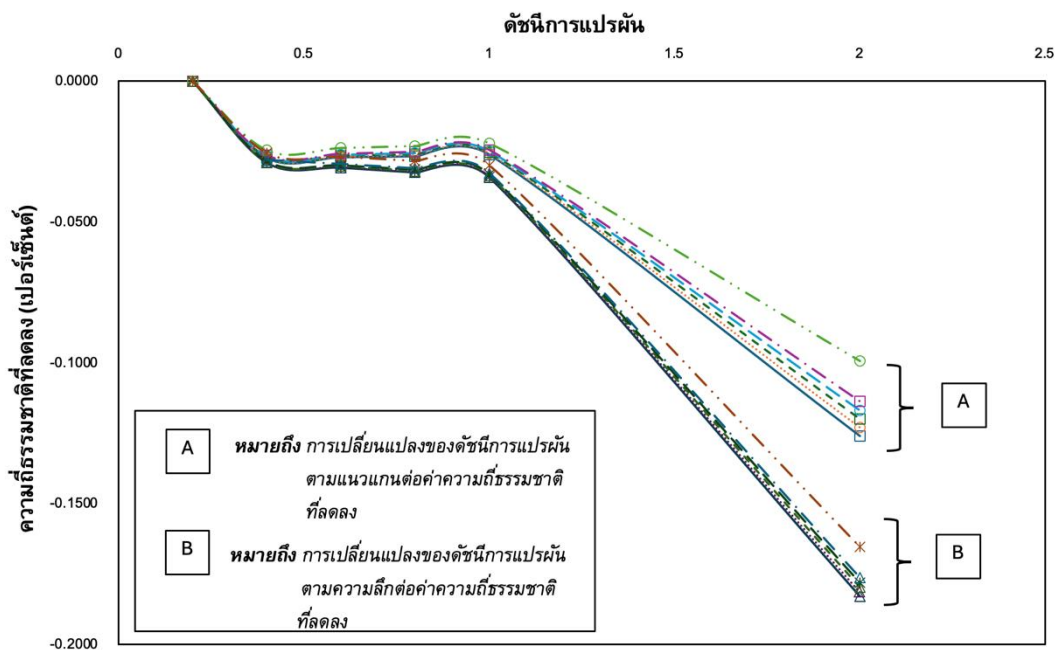
ตารางที่ 6 ความถี่ธรรมชาติลำดับสาม (Hz)

β	k					
	0.2	0.4	0.6	0.8	1	2
0.2	227.02	224.89	222.06	218.54	214.40	186.31
0.4	226.10	223.98	221.16	217.65	213.52	185.49
0.6	225.34	223.23	220.42	216.92	212.79	184.81
0.8	224.73	222.63	219.82	216.33	212.21	184.25
1	224.27	222.18	219.37	215.88	211.76	183.83
2	223.73	221.68	218.90	215.43	211.31	183.37

สำหรับอัตราการลดลงของความถี่ธรรมชาติทั้งสามกรณีนั้น สามารถพิจารณาได้จากกราฟรูปที่ 6 ที่แสดงถึงผลกระทบของดัชนีการแปรผันที่มีต่ออัตราการลดลงของความถี่ธรรมชาติทั้งสามลำดับแรก จากกราฟสามารถจำแนกได้เป็น 2 ช่วงคือ ช่วงที่ดัชนีการแปรผันมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับหนึ่งและมากกว่าหนึ่ง ในช่วงแรกนี้ เมื่อ β มีค่าแปรผันเพิ่มขึ้นจาก 0.2-1.0 และพิจารณาสำหรับแต่ละค่าของ k พบว่าอัตราการลดลงเมื่อ $\beta, k = 1.0$ นั้นมีค่าใกล้เคียงกันสำหรับความถี่ธรรมชาติสามลำดับคือ 0.89, 2.44 และ 0.31 เปอร์เซนต์ตามลำดับ ในขณะที่เมื่อค่าของ k แปรผันเพิ่มขึ้นและพิจารณาสำหรับแต่ละค่าของ β นั้นพบว่า มีค่าเท่ากับ 3.26, 3.28 และ 2.0 เปอร์เซนต์ตามลำดับ

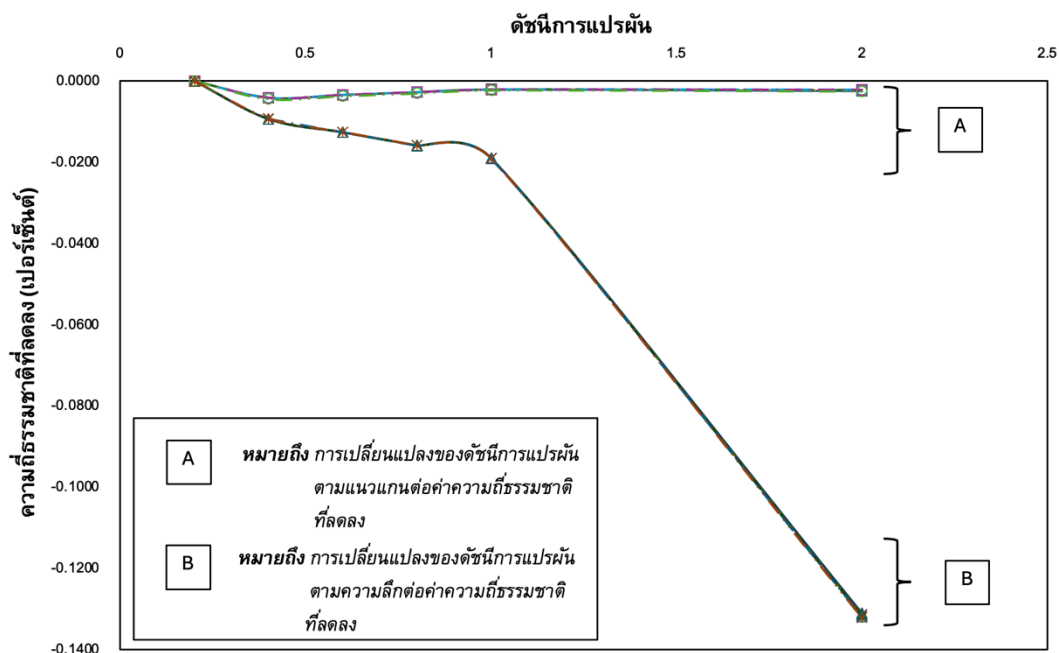


(a) ผลกระทบของดัชนีการแปรผันต่อความถี่ธรรมชาติลำดับแรก



(b) ผลกระทบของดัชนีการแปรผันต่อความถี่ธรรมชาติลำดับที่สอง

รูปที่ 6 ผลกระทบของดัชนีการแปรผันต่ออัตราการลดลงของความถี่ธรรมชาติ



(c) ผลกระทบของดัชนีการแปรผันต่อความถี่ธรรมชาติลำดับที่สาม

รูปที่ 6 ผลกระทบของดัชนีการแปรผันต่ออัตราการลดลงของความถี่ธรรมชาติ (ต่อ)

สำหรับกรณีที่สอง อัตราการลดลงของความถี่ธรรมชาติดังกล่าวในช่วงที่ดัชนีการแปรผันทั้งสองทิศทางมีค่ามากกว่าหนึ่งนั้นพบว่า มีค่าที่สูงกว่ากรณีแรก กล่าวคือ เมื่อ β แปรผันเพิ่มขึ้นและพิจารณาสำหรับแต่ละค่าของ k อัตราการลดลงเมื่อ β , $k = 2.0$ นั้น มีค่าเท่ากับ 6.9, 10.0 และ 0.4 เปอร์เซ็นต์และเมื่อ k แปรผันเพิ่มขึ้นและพิจารณาแต่ละค่าของ β นั้นพบว่ามีค่าเท่ากับ 20.9, 16.55 และ 13.22 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ โดยอัตราการลดลงของค่าความถี่ธรรมชาติทั้งสามลำดับแรกเมื่อดัชนีการแปรผันตามแนวโน้มเพิ่มขึ้นนั้น มีค่าน้อยกว่าอัตราการลดลงของความถี่ธรรมชาติเมื่อค่าดัชนีการแปรผันตามความลึกเพิ่มขึ้น หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า ดัชนีการแปรผันตามความลึกของคานาเซลล์ลูลาร์ส่งผลต่ออัตราการลดลงของความถี่ธรรมชาติในสามลำดับแรกมากกว่าดัชนีการแปรผันตามแนวโน้มอย่างมีนัยสำคัญนั่นเอง

5. สรุปและวิจารณ์ผล

งานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนแบบอิสระของคานาเซลล์ลูลาร์ในระนาบสองมิติที่ประกอบขึ้นจากวัสดุสองชนิดที่มีการแปรผันคุณสมบัติของวัสดุทั้งทิศทาง (ตามความแนวแกนและตามความลึกของคานา) ด้วยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ที่ประกอบด้วยโครงตาข่ายขนาดเล็กมากพอที่ให้ความแม่นยำของผลลัพธ์ในระดับที่ยอมรับได้ แต่เนื่องจากตัวอย่างปัญหาไม่สามารถหา

ค่าผลเฉลยแม่นยำตรงทางทฤษฎีได้ จึงต้องสร้างแบบจำลองสำหรับใช้ในการตรวจสอบโมเดลที่สร้างขึ้น ผลจากการตรวจสอบโมเดลที่เสนอกับค่าอ้างอิงพบว่ามีค่าความแตกต่างของค่าความถี่ธรรมชาติลำดับแรกเพียง 3.78 เปอร์เซ็นต์ เท่านั้น ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และให้ผลของรูปร่างโหมดที่สอดคล้องกันกับผลการอ้างอิงที่เกิดขึ้นได้จริง

ผลการศึกษาการวิเคราะห์ความถี่ธรรมชาติใน 3 ลำดับแรก พบว่า เมื่อค่าดัชนีการแปรผันคุณสมบัติของวัสดุตามความลึกที่มีค่าเพิ่มขึ้นนั้นจะทำให้ค่าความถี่ธรรมชาติของคานาเซลลูลาร์มีค่าลดลง และในขณะเดียวกันค่าดัชนีการแปรผันของวัสดุตามแนวแกนก็ส่งผลต่อค่าความถี่ธรรมชาติของคานาในลักษณะเช่นเดียวกัน แต่ดัชนีการแปรผันคุณสมบัติตามความลึกจะส่งผลต่อการอัตราการลดลงของค่าความถี่ธรรมชาติมากกว่าดัชนีการแปรผันคุณสมบัติของวัสดุตามแนวแกน แบบจำลอง BDFGM ที่เสนอในงานวิจัยนี้ สามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อการวิเคราะห์และออกแบบวัสดุเชิงประกอบแบบสองทิศทางที่ประกอบด้วยวัสดุที่มีคุณสมบัติต่างกันมากกว่าสองชนิดรวมทั้งวัสดุเชิงประกอบแบบสามมิติเพื่อพิจารณากำหนดค่าความถี่ธรรมชาติที่เหมาะสมสำหรับปัญหาที่ต้องการเพื่อลดความเสี่ยงของการเกิดเรโซแนนซ์ต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีสำหรับการสนับสนุนเวลาและแหล่งข้อมูลสำหรับการสืบค้นบทความอื่น ๆ ตลอดจนขอขอบคุณสำนักงานกลางศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ และภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่สนับสนุนซอฟต์แวร์ COMSOL Multiphysics อันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยในครั้งนี้

References

- [1] Kobayashi Y, Harada A, Yamada G. Reduced-order nonlinear modal equations of plates based on the finite element method. JSME International Journal Series C Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing. 2002;45(1):79-86.
- [2] Sina SA, Navazi HM, Haddadpour H. An analytical method for free vibration analysis of functionally graded beams. Materials & Design 2009;30(3):741-7.
- [3] Simsek M, Kocaturk T. Free and forced vibration of a functionally graded beam subjected to a concentrated moving harmonic load. Composite Structures 2009;90(4):465-73.

- [4] Gao K, Li R, Yang, J. Dynamic characteristics of functionally graded porous beams with interval material properties. *Engineering Structures* 2019;197:109441. doi: 10.1016/j.engstruct.2019.109441.
- [5] Nguyen N, Nguyen T, Nguyen T, Vo T. A new two-variable shear deformation theory for bending, free vibration and buckling analysis of functionally graded porous beams. *Composite Structures*. 2022;282:115095. doi: 10.1016/j.compstruct.2021.115095.
- [6] Al-Zahrani MA, Asiri SA, Ahmed KI, Eltaher MA. Free vibration analysis of 2D functionally graded strip beam using finite element method. *Journal of Applied and Computational Mechanics* 2022;8(4):1422-30.
- [7] Sharma NK, Bhandari M, Dean A. Applications of functionally graded materials (FGMs). *International Journal of Engineering Research & Technology* 2014;2(3):334-9.
- [8] Wang M, Zhang P, Fei Q. Computational evaluation of effects of fiber shape on transverse properties of polymer composites considering voids under dynamic loading. *Journal of Aerospace Engineering* 2019;32(4):04019049.
- [9] Taraghi P, Showkati H, Firouzsafari SE. The performance of steel conical shells reinforced with CFRP laminates subjected to uniform external pressure. *Construction and Building Materials* 2019;214:484-96.
- [10] Mahamood RM, Akinlabi ET. Functionally graded materials. *Topics in Mining, Metallurgy and Materials Engineering*. Cham, Switzerland: Springer; 2017. doi: 10.1007/978-3-319-53756-6_2.
- [11] Nejad MZ, Hadi A. Non-local analysis of free vibration of bi-directional functionally graded Euler–Bernoulli nano-beams. *International Journal of Engineering Science* 2016;105:1-11.
- [12] Li X. A unified approach for analyzing static and dynamic behaviors of functionally graded Timoshenko and Euler–Bernoulli beams. *Journal of Sound and vibration* 2008;318(4-5):1210-29.
- [13] Musiket K, Phungpaingam B, Piyaphipat S. Free and forced vibration analyses by n-sided polygonal cell-based strain-smoothed finite element for two-dimensional problem. *RMUTP Research Journal Sciences and Technology* 2023;17(2):53-66. (In Thai)
- [14] Simsek M. Bi-directional functionally graded materials (BDFGMs) for free and forced vibration of Timoshenko beams with various boundary conditions. *Composite Structures* 2015;133:968-78.

ประวัติผู้เขียนบทความ

ชนนัญยวัส รัตนวิเชียร ตำแหน่ง นักศึกษาวิศวกรรมศาสตร์ (สาขาวิชาวิศวกรรมโครงสร้าง) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี คลองหก คลองหลวง ปทุมธานี 12110 โทรศัพท์: 085-118-2890 Email: Chanonyawat_r@mail.rmUTT.ac.th



กำธรเกียรติ มุสิเกต ตำแหน่ง อาจารย์ประจำหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (สาขาวิชาวิศวกรรมโครงสร้าง) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี คลองหก คลองหลวง ปทุมธานี 12110 โทรศัพท์: 087-380-8222 Email: Kamtornkiat@rmUTT.ac.th



บุญชัย ฝั่งไผ่งาม ตำแหน่ง อาจารย์ประจำหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (สาขาวิชาวิศวกรรมโครงสร้าง) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี คลองหก คลองหลวง ปทุมธานี 12110 โทรศัพท์: 089-783-0318 Email: Boonchai_p@rmUTT.ac.th

Article History:

Received: June 24, 2024

Revised: September 5, 2024

Accepted: September 12, 2024

การปรับปรุงการเก็บข้อมูลและควบคุมการผลิตบรรจุภัณฑ์
โดยใช้อินเทอร์เน็ตของสิ่งตามแนวทางการบำรุงรักษาแบบทวิผล
ทุกคนมีส่วนร่วม

IMPROVING DATA COLLECTION AND PRODUCTION CONTROL OF
PACKGING USING THE INTERNET OF THINGS (IOT) IN LINE WITH
TOTAL PRODUCTIVE MAINTENANCE (TPM) PRINCIPLES

อนัญญา มะโนวงศ์¹ และ ประจวบ กล่อมจิตร์²

¹นักศึกษาปริญญาโท, สาขาการจัดการงานวิศวกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี
อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์ เลขที่ 6 ถนนราชמרคาใน
อำเภอเมือง จังหวัดนครปฐม 73000, Manowong_A@silpakorn.edu

²อาจารย์, สาขาอุตสาหกรรมและการจัดการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์ เลขที่ 6 ถนนราชמרคาใน อำเภอเมือง
จังหวัดนครปฐม 73000, klomjit_p@su.ac.th

Anunya Manowong¹ and Prachuab Klomjit²

¹Student, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University,
Sanam Chandra Palace Campus, 6 Rajamankha Nai Rd., Amphoe Muang,
Nakhon Pathom 73000, Thailand, Manowong_A@silpakorn.edu

²Lecturer, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University,
Sanam Chandra Palace Campus, 6 Rajamankha Nai Rd., Amphoe Muang,
Nakhon Pathom 73000, Thailand, klomjit_p@su.ac.th

บทคัดย่อ

วิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาเรื่องการปรับปรุงประสิทธิภาพในการเก็บข้อมูลและควบคุมกระบวนการผลิตบรรจุภัณฑ์โดยใช้ Internet of Things (IoT) ร่วมกับ Total Productive Maintenance (TPM) โดยเริ่มต้นจากการแก้ไขปัญหาที่พบในแผนกผลิตบรรจุภัณฑ์ซึ่งมีผลต่อคุณภาพของสินค้า ปัญหาหลักคือการรั่วของรายการบรรจุภัณฑ์ ด้วยการใช้เทคนิค เช่น 7 QC Tool และ Why Why Analysis เพื่อหาสาเหตุและวิเคราะห์ปัญหาหลัก ผลการวิเคราะห์พบว่าระบบน้ำหล่อเย็นที่ใช้เครื่องซิลเลอร์ไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ตามมาตรฐานได้ เนื่องจากขาดการดูแลและบำรุงรักษา ดังนั้นได้ทำ

การแก้ไขโดยการวางระบบทางเดินน้ำหล่อเย็นใหม่ การติดตั้งอุปกรณ์ IoT ใช้ Arduino Uno และ Raspberry Pi 4 ในการรวบรวมข้อมูลและสร้าง Dashboard สำหรับควบคุมอุณหภูมิน้ำหล่อเย็น และการจัดเก็บข้อมูลผ่าน Google Sheets หลังการติดตั้งอุปกรณ์ระบบสามารถบันทึกการทำงานของเครื่องซิลเลอร์ได้เป็นปัจจุบัน จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์และวางแผนการทำ TPM โดยใช้เสาทั้งหมด 3 เสา คือการติดตั้งเครื่องมือและการปรับปรุงเฉพาะเรื่อง (Equipment and Improvement) การดูแลเครื่องจักรด้วยตนเอง (Autonomous Maintenance) และการบำรุงรักษาตามแผน (Planned Maintenance) ผลการวิจัยเสนอถึงความสำเร็จในการลดจำนวนรายการบรรจุภัณฑ์รั่วอย่างมีนัยสำคัญจาก 40 รายการก่อนการปรับปรุงเหลือเพียง 2 รายการหลังการปรับปรุง ซึ่งเป็นการลดลงถึง 95% และปรับปรุงระบบน้ำหล่อเย็นทำให้สามารถแก้ไขปัญหาได้ตรงจุด ซึ่งเป็นการลดความเสี่ยงในการผลิตและเพิ่มประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์ การนำ IoT ร่วมกับ TPM ในกระบวนการผลิตน้ำหล่อเย็นซิลเลอร์เป็นต้นแบบในการพัฒนาในส่วนย่อยและสามารถประยุกต์ใช้ปรับปรุงในส่วนอื่นของกระบวนการผลิตให้มีประสิทธิภาพขึ้นได้

คำสำคัญ: เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตในทุกสิ่ง (IoT) การบำรุงรักษาแบบทวีผลทุกคนมีส่วนร่วม (TPM) ระบบน้ำหล่อเย็น

ABSTRACT

This research focuses on studying the improvement of efficiency in data collection and process control in packaging production using the Internet of Things (IoT) combined with Total Productive Maintenance (TPM). The initial step involves addressing issues identified in the packaging production department that affect product quality, with the primary problem being packaging leakage. Techniques such as the 7 QC Tools and Why Why Analysis were employed to identify and analyze the root causes. The analysis revealed that the cooling water system using a chiller could not maintain the temperature according to standards due to lack of maintenance. Thus, the cooling water system was redesigned, and IoT devices were installed, including Arduino Uno and Raspberry Pi 4, to collect data and create a dashboard for controlling the cooling water temperature. Data was stored using Google Sheets. Post-installation, the system could log real-time chiller operations. The collected data was then analyzed to plan TPM implementation using three pillars: Equipment and Improvement, Autonomous Maintenance, and Planned Maintenance. The research results demonstrate significant success in reducing the number of packaging leakage cases from 40 incidents before improvement to just 2 incidents afterward, marking a 95% reduction. The

enhancement of the cooling water system effectively addressed the issues, reducing production risks and increasing product efficiency. The integration of IoT with TPM in the chiller cooling water production process serves as a model for further improvements in other production process areas, enhancing overall efficiency.

KEYWORDS: Internet of Things (IoT), Total Productive Maintenance (TPM), Cooling water system.

1. บทนำ

ในปัจจุบันมีการเปลี่ยนแปลงทางเทคโนโลยีอย่างรวดเร็ว การนำเอาเทคโนโลยีระบบอินเทอร์เน็ตในทุกสิ่ง (Internet of Things) [1] มาใช้ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น เนื่องด้วยในกรณีศึกษาเป็นการผลิตบรรจุภัณฑ์ที่ใช้กับผลิตภัณฑ์ของบริษัทตัวอย่าง ในการผลิตถึงบรรจุภัณฑ์ยังพบปัญหาในการผลิต [2] และได้รับข้อร้องเรียนจากลูกค้าเกี่ยวกับคุณภาพสินค้า จึงทำการเก็บข้อมูลการร้องเรียนมาวิเคราะห์ เพื่อนำมาสู่กระบวนการแก้ปัญหา ด้วยการใช้เทคนิค 7 QC Tool [3] และ Why Why Analysis [4] เพื่อหาสาเหตุและวิเคราะห์ปัญหาหลัก และการศึกษาเกี่ยวกับการวางแผนเพื่อเพิ่มความพร้อมในการผลิต [5] การลดของเสียในการผลิตขวดพลาสติก [6] และการศึกษาผลกระทบของการทำความเย็นต่อการหดตัวของชิ้นส่วนพลาสติก [7] แสดงให้เห็นถึงวิธีการที่สามารถใช้เพื่อปรับปรุงการผลิต

จากการศึกษาที่เกี่ยวข้องเหล่านี้ ผู้วิจัยจึงเล็งเห็นว่าการนำเทคโนโลยี Internet of Things (IoT) มาใช้ร่วมกับ Total Productive Maintenance (TPM) [8-9] สามารถทำให้โรงผลิตถึงบรรจุภัณฑ์สามารถปรับปรุงการทำงานได้อย่างมาก การใช้เทคโนโลยี IoT ช่วยให้สามารถเก็บข้อมูลพารามิเตอร์ในแต่ละส่วนที่เฉพาะเจาะจงได้ ซึ่งเป็นการเริ่มต้นในการใช้เทคโนโลยีที่ดี เนื่องจากมีการลงทุนที่ต่ำ และสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับกระบวนการใดกระบวนการหนึ่งในการผลิตได้ ทำให้เกิดผลลัพธ์การเปลี่ยนแปลงที่ดีขึ้น และเมื่อการนำเทคโนโลยี IoT มาใช้แล้วขยายการใช้งานในส่วนอื่น ตามมาเพื่อควบคุมและเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานได้ทั้งโรงงาน

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

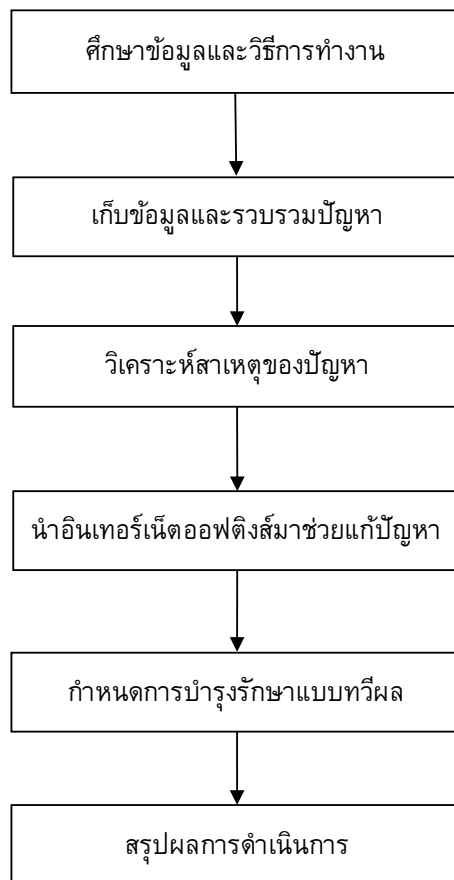
2.1 เพื่อการแก้ไขปัญหาเรื่องคุณภาพสินค้าถึงบรรจุภัณฑ์รั่ว ของแผนกผลิตบรรจุภัณฑ์จากข้อร้องเรียน

2.2 เพื่อนำเอาเทคโนโลยี Internet of Things (IoT) มาใช้รวบรวมข้อมูลและควบคุมการผลิตบรรจุภัณฑ์ในส่วนที่พบปัญหา ทำให้สามารถควบคุมการผลิตและลดขั้นตอนที่ซ้ำซ้อนหรือไม่จำเป็นออกได้

2.3 เพื่อจัดทำแผนซ่อมบำรุงรักษาเชิงป้องกัน Total Productive Maintenance (TPM) ร่วมกับข้อมูลที่เก็บรวบรวมมาจากระบบ Internet of Things (IoT)

3. วิธีการดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย สามารถแบ่งออกเป็นขั้นตอนได้ ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.1 ศึกษาข้อมูลและวิธีการทำงาน

การสร้างแผนภาพ Flow Process Chart เพื่อแสดงกระบวนการป้อนข้อมูลพารามิเตอร์ที่เกิดขึ้นในแผนกผลิตบรรจุภัณฑ์ รวมถึงขั้นตอนที่เกี่ยวข้อง และการตรวจสอบข้อมูล ซึ่งทำให้เข้าใจถึงปัญหาหรือความยุ่งยากที่เกิดขึ้นก่อนปรับปรุง และการเปลี่ยนแปลงหลังการปรับปรุง

กระบวนการป้อนข้อมูลโดยใช้หลักการ ECRS [10] เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดการและการพัฒนากระบวนการผลิตให้ดีขึ้น โดย Flow Process Chart ก่อนปรับปรุง ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 Flow Process Chart ปรับปรุงขั้นตอนการป้อนข้อมูลในแผนกผลิตบรรจุภัณฑ์ (ก่อนการปรับปรุง)

Flow Process Chart											
☒	คน (Man Type)		☐	วัสดุ (Material Type)		☐	เครื่องจักร (Machine Type)		☐	อื่นๆ (Other)	
ชื่อขบวนการ (Subject Charted)			ปรับปรุงขั้นตอนการป้อนข้อมูลในแผนกผลิตบรรจุภัณฑ์				วันที่ (Date)		05-ก.ย.-66		
						จัดทำโดย (Chart By)		อภิญญา มะโนวงศ์			
ฝ่าย (Department)		ผลิตบรรจุภัณฑ์				หมายเลขเอกสาร (Chart No.)					
สถานะ (Method)		ก่อนปรับปรุง				หน้าที่ (Sheet No.)					
ขั้นตอน	ชื่อขบวนการ		จำนวน (Lot)	ระยะ (เมตร)	เวลา (นาที)	สัญลักษณ์				หมายเหตุ	
1	พิมพ์ใบจดบันทึกข้อมูล				2						***ผ่านคอมพิวเตอร์สำนักงาน
2	นำไปหน่วยงานแผนกผลิตบรรจุภัณฑ์			50							
3	บันทึกข้อมูลลงกระดาษ 6 ครั้ง/วัน		6		18						***พนักงานเก็บข้อมูลหน้าเครื่องซิลเลอร์ทะละ2ครั้ง
4	รอการเก็บข้อมูลทุก4 ชั่วโมง/ครั้ง				1440						
5	นำข้อมูลมาบันทึกลงคอมพิวเตอร์			50							
6	บันทึกข้อมูลลงคอมพิวเตอร์				5						
7	ตรวจสอบข้อมูลความถูกต้องของการเก็บข้อมูล				5						
8	จัดเก็บใบบันทึกข้อมูล				1						
9	ทำการวิเคราะห์และสร้างรายงาน				30						
10	ประเมินผลและวางแผนซ่อมบำรุง				60						
11	การตรวจสอบและปรับปรุง				30						
12	ทำการซ่อมบำรุง				60						
รวม			6	100	1651	6	2	1	2	1	
*หมายเหตุ  = การปฏิบัติงาน  = การเดินทาง  = การรอคอย  = การตรวจสอบ  = การจัดเก็บ											

การวิเคราะห์โดยแผนภาพ Flow Process Chart มีขั้นตอนการทำงานทั้งหมด 12 ขั้นตอน มีระยะทางที่ต้องเดินทาง 50 เมตร จากกระบวนการนำใบจดบันทึกข้อมูลบันทึกที่แผนกและกลับมาบันทึกลงบนคอมพิวเตอร์ มีระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการรวมอยู่ที่ 1,651 นาที กระบวนการปฏิบัติงาน 6 ขั้นตอน เดินทาง 2 ขั้นตอน รอคอย 1 ขั้นตอน ตรวจสอบ 2 ขั้นตอน จัดเก็บ 1 ขั้นตอน กระบวนการที่ใช้เวลามากที่สุดคือการรอเก็บข้อมูลทุก 4 ชั่วโมงเก็บถึง 6 ครั้งจึงจะได้ข้อมูลครบ 24 ชั่วโมงเป็นการสุ่มเก็บข้อมูล เพื่อทราบอุณหภูมิของเครื่องซิลเลอร์ทะละเครื่องจักรแต่ละช่วงเวลา

3.2 เก็บข้อมูลและรวบรวมปัญหา

เพื่อเก็บรวบรวมข้อมูลปัญหาสินค้าที่ได้รับการร้องเรียนของโรงงานตัวอย่าง โดยมีรายละเอียดและสาเหตุ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ลักษณะข้อร้องเรียนที่พบปัญหา ตั้งแต่เดือนกรกฎาคม - เดือนกันยายน พ.ศ. 2566

ปัญหา	จำนวน (ครั้ง)	เปอร์เซ็นต์ของเสีย (%)
บรรจุภัณฑ์รั่ว	40	44%
คุณภาพสินค้า (น้ำยา)	13	14%
ถังบรรจุภัณฑ์แตก	10	11%
บรรจุภัณฑ์รั่ว (ฝา)	9	10%
ฉลาก	6	7%
ขนส่ง	6	7%
สินค้าหมดอายุ	4	4%
อื่นๆ	2	3%
ยอดรวม	90	100%

จากการรวบรวมข้อมูลสินค้าที่มีปัญหาทั้งหมด 90 รายการ ปัญหาที่พบมากที่สุดคือ บรรจุภัณฑ์รั่ว 40 ครั้ง คิดเป็น 44% ของรายการสินค้าที่มีปัญหาทั้งหมด ลำดับรองลงมาคือ คุณภาพสินค้าเคมีภัณฑ์ (น้ำยา)

3.3 วิเคราะห์ปัญหาข้อมูลของเสียและวิธีแก้ไข

จากการวิเคราะห์ปัญหาโดยใช้แผนภูมิพาเรโต ผังก้างปลา [3] และการวิเคราะห์ Why-Why [4] พบว่าปัญหาหลักเกิดจากอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นที่ไม่เป็นไปตามมาตรฐาน ซึ่งเกิดจากการขาดการดูแลและบำรุงรักษาเครื่องซิลเลอร์ที่ใช้ในการผลิตน้ำหล่อเย็น ดังนั้น เพื่อแก้ไขปัญหานี้ ควรปรับปรุงระบบน้ำหล่อเย็นและติดตั้งอุปกรณ์ IoT ร่วมกับแผนการบำรุงรักษาแบบทวีผลทุกคนมีส่วนร่วม (TPM) ซึ่งจะช่วยในการเก็บข้อมูลอัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่องและอุณหภูมิน้ำเข้าออก ทำให้ระบบสามารถให้พลังงานที่เพียงพอและมีประสิทธิภาพในการใช้งาน พร้อมทั้งควบคุมคุณภาพของถังบรรจุภัณฑ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3.3.1 การติดตั้ง IoT เก็บข้อมูลอัตราการไหลน้ำเข้าเครื่องและอุณหภูมิน้ำเข้าออก

3.3.1.1 โค้ด Arduino ใช้ในการติดตั้งระบบ IoT เพื่อเก็บข้อมูลอัตราการไหลของน้ำเข้าและน้ำออกจากเครื่อง พร้อมทั้งเก็บข้อมูลอุณหภูมิของน้ำที่เข้าและน้ำที่ออก โดยมีการใช้ Arduino Uno เป็นตัวควบคุม ร่วมกับ Raspberry Pi 4 เพื่อการสื่อสารและประมวลผลข้อมูลผ่านอินเทอร์เน็ต

3.3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการติดตั้งระบบ IoT เพื่อการเก็บข้อมูลและควบคุมอุณหภูมิ และอัตราการไหลของน้ำเข้าและน้ำออก

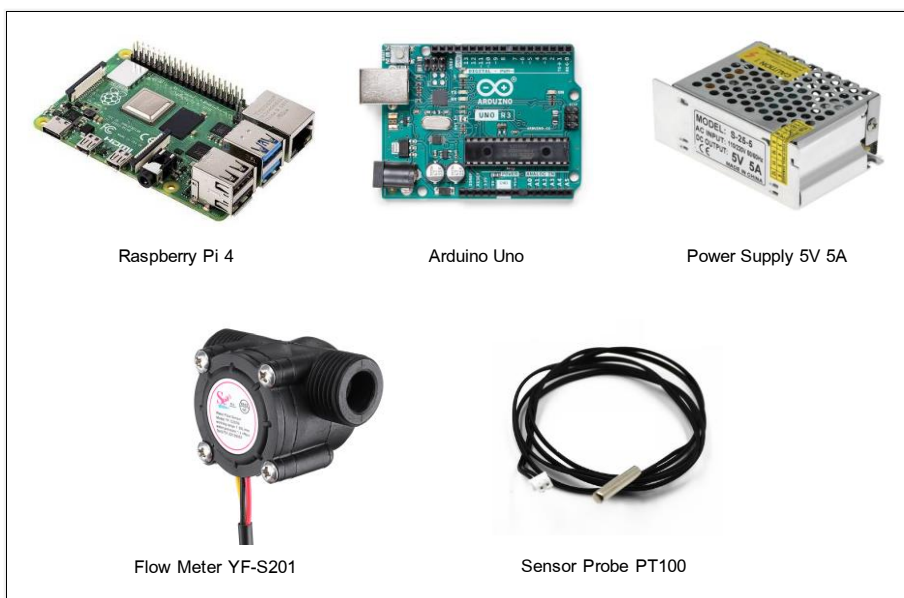
1) บอร์ด Arduino Uno

(1) ติดตั้ง NTC 10 K เพื่ออ่านค่าอุณหภูมิ Chillier และ Cooling Tower จำนวน 4 ตัว

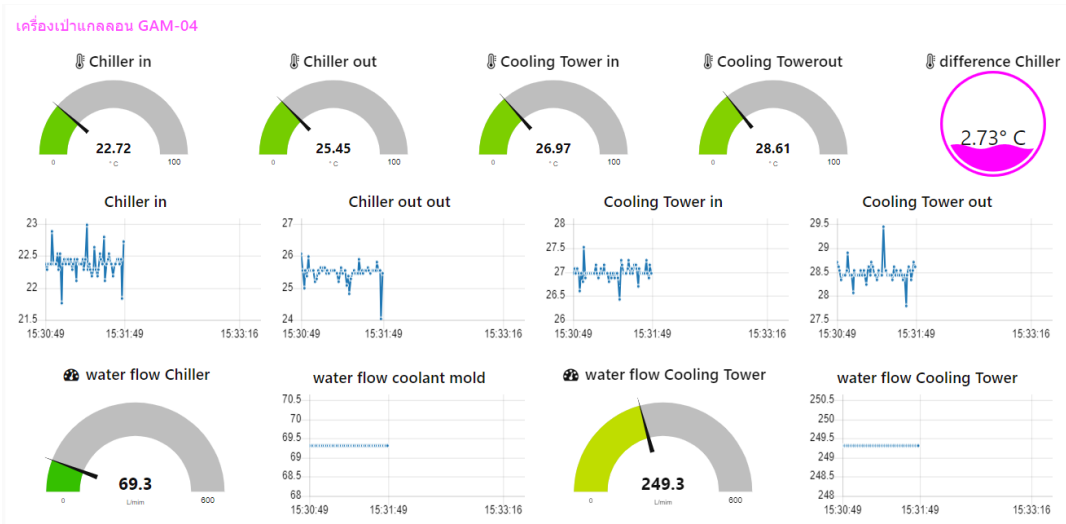
(2) ติดตั้ง Flow Meter เพื่ออ่านค่าอัตราการไหลของน้ำจำนวน 2 ตัว

2) ส่งค่าที่อ่านได้จากบอร์ด Arduino Uno จำนวน 5 ชุด ผ่าน Serial Port 9600 bps เพื่อประมวลผลบนบอร์ด Raspberry pi 4 โดยชุดอุปกรณ์แสดงในรูปที่ 2

3) นำข้อมูลเข้า NODE-RED เพื่อจากการแยกชุดข้อมูลทำ Dashboard แสดงในรูปที่ 3 สำหรับใช้ในการจัดการปรับเครื่องให้เหมาะสมกับเครื่องเป่าแกลลอน ผ่านทาง PC หรือโทรศัพท์ ผ่านทางการเชื่อมต่อเครือข่ายอินเทอร์เน็ตของบริษัทและมีการจัดเก็บค่าข้อมูลผ่าน Google Sheets แสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการติดตั้งระบบ IoT น้ำหล่อเย็น



รูปที่ 3 Node-Red Dash Board

1	ประทับเวลา	เวลา	Chiller in	Chiller ou	Cooling Tower i	Cooling Tower o	water flow Chiller	water flow	Cooling Tower
2	11/13/2023 0:00:00	00:01:59	21.06	21.93	25.98	25.98	489.3		429.3
3	11/14/2023 0:00:00	00:03:59	21.06	22.98	25.72	25.98	489.3		429.3
4	11/15/2023 0:00:00	00:06:00	21.5	22.11	25.81	26.07	489.3		429.3
5	11/16/2023 0:00:00	00:08:01	21.5	22.11	25.81	25.81	489.3		429.3
6	11/17/2023 0:00:00	00:10:01	21.76	22.28	25.54	25.81	489.3		429.3
7	11/18/2023 0:00:00	00:12:02	21.24	22.28	25.54	25.81	489.3		429.3
8	11/19/2023 0:00:00	00:14:03	21.06	21.84	25.63	25.98	489.3		429.3
9	11/20/2023 0:00:00	00:16:03	20.89	21.84	25.63	25.98	489.3		429.3
10	11/21/2023 0:00:00	00:18:04	21.06	21.84	25.54	25.98	489.3		429.3
11	11/22/2023 0:00:00	00:20:05	21.32	22.02	25.54	25.89	489.3		429.3
12	11/23/2023 0:00:00	00:22:05	21.5	22.02	25.63	25.89	489.3		429.3
13	11/24/2023 0:00:00	00:24:06	21.06	22.19	25.72	25.72	489.3		429.3
14	11/25/2023 0:00:00	00:26:07	21.32	21.84	25.63	25.89	489.3		429.3
15	11/26/2023 0:00:00	00:28:07	20.8	22.28	25.63	25.98	369.3		429.3
16	11/27/2023 0:00:00	00:30:08	20.8	21.93	25.63	25.89	369.3		429.3
17	11/28/2023 0:00:00	00:32:09	21.15	21.67	25.63	25.98	369.3		429.3
18	11/29/2023 0:00:00	00:34:10	20.89	21.93	24.92	27.24	369.3		429.3
19	11/30/2023 0:00:00	00:36:10	21.41	22.28	25.72	25.89	369.3		429.3
20	12/1/2023 0:00:00	00:38:11	22.11	21.15	25.54	25	369.3		429.3
21	12/2/2023 0:00:00	00:40:11	21.32	22.37	24.83	25.89	369.3		429.3
22	12/3/2023 0:00:00	00:42:12	20.8	22.02	24.38	25.45	369.3		429.3

รูปที่ 4 การจัดเก็บข้อมูลที่บันทึกลงใน Google Sheets

จากการติดตั้งระบบ IoT จะช่วยให้ผู้ดูแลระบบสามารถตรวจสอบอุณหภูมิ และอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นได้ตลอดเวลาผ่านอินเทอร์เน็ต ทำให้สามารถควบคุม และปรับปรุงการทำงานของระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพเมื่อเกิดปัญหา ในด้านของค่าอุณหภูมิหรืออัตราการไหลของน้ำไม่ได้ตามมาตรฐาน จึงสามารถแก้ไขปัญหาทันทีก่อนที่จะเกิดผลกระทบต่อคุณภาพสินค้า และการตรวจสอบข้อมูลเกี่ยวกับการทำงานของระบบทุกวัน จะช่วยในการวางแผนการบำรุงรักษาและการดูแลรักษาเครื่องจักรให้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและเสถียรภาพ

3.3.2 การใช้ระบบอินเทอร์เน็ตของฟติงส์ (IoT) ร่วมกับการบำรุงรักษาแบบทวีผลทุกคนมีส่วนร่วม (TPM)

3.3.2.1 การติดตั้งเครื่องมือและการปรับปรุงเฉพาะเรื่อง (Equipment and Improvement) การปรับปรุงระบบน้ำหล่อเย็นเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพและคุณภาพในการผลิตบรรจุภัณฑ์ และสามารถร่วมมือกันได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ โดยการวางผังระบบน้ำหล่อเย็นใหม่และการติดตั้งเซนเซอร์เพื่อเก็บข้อมูลอัตราการไหลและอุณหภูมิน้ำเข้าออกเครื่องเป่าถึงช่วยแก้ไขปัญหาการรั่วของถังบรรจุภัณฑ์ และควบคุมอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นให้เหมาะสมกับการทำงาน ดังรูปที่ 5 (ก) การเดินท่อน้ำหล่อเย็นก่อนปรับปรุง และรูปที่ 5 (ข) การเดินท่อน้ำหล่อเย็นหลังปรับปรุง



(ก) ท่อน้ำหล่อเย็นก่อนปรับปรุง



(ข) ท่อน้ำหล่อเย็นหลังปรับปรุง

รูปที่ 5 การเดินท่อน้ำหล่อเย็นก่อนปรับปรุงและหลังปรับปรุง

3.3.2.2 การดูแลเครื่องจักรด้วยตนเอง (Autonomous Maintenance) กำหนดหัวข้อเรื่องการปรับปรุง 3 หัวข้อได้แก่

- 1) จัดทำ Work Instructions (WI) การดูแลเครื่องซิลเลอร์
- 2) จัดทำ Work Instructions (WI) ดูแลท่อน้ำระบบหล่อเย็น
- 3) จัดทำ Work Instructions (WI) การเข้าถึงข้อมูล Dashboard และ Google Sheets

3.3.2.3 การบำรุงรักษาตามแผน (Planned maintenance) กำหนดหัวข้อการปรับปรุงเครื่องซิลเลอร์ และระบบ IoT ได้ 3 หัวข้อได้แก่

1) ตรวจเช็คและบำรุงรักษาเครื่องจักร เพื่อตรวจเช็คช่วยให้สามารถตรวจสอบคุณภาพของเครื่องซิลเลอร์ ระบุปัญหาและปรับปรุงความสามารถในการทำงานของเครื่องเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงาน ช่วยลดความเสียหายและค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมหรือเปลี่ยนชิ้นส่วนที่เสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นในอนาคต

แผนการการตรวจเช็คและบำรุงรักษาเครื่องซิลเลอร์ ประจำปี 2567

ลำดับ	รายการบำรุงรักษา	ความถี่	เดือน											ผู้รับผิดชอบ
			ม.ค	ก.พ	มี.ค	เม.ย	พ.ค	ก.ค	ส.ค	ก.ย	ต.ย	พ.ย	ธ.ค	
1	ตรวจสอบการรั่วของท่อน้ำ	4 ครั้ง/เดือน												
2	ตรวจสอบสภาพจุดต่อข้อต่อท่อน้ำ	4 ครั้ง/เดือน												
3	ทำความสะอาดคอยล์ร้อน	4 ครั้ง/เดือน												
4	ตรวจสอบเกจวัดความดันหน้าเครื่อง	4 ครั้ง/เดือน												
5	ตรวจเช็คคุณภาพน้ำหล่อเย็น	4 ครั้ง/เดือน												
6	ตรวจเช็คสายไฟและสัญญาณการเชื่อมต่อ	1 ครั้ง/เดือน												
7	เช็คเซนเซอร์และอัตราการไหลน้ำ	1 ครั้ง/เดือน												
8	ล้างท่อกำจัดคราบตะกรัน	4 ครั้ง/ปี												
9	ตรวจเช็คน้ำยาทำความเย็น	4 ครั้ง/ปี												
10	ตรวจสอบคอมเพลสเซอร์	4 ครั้ง/ปี												
11	ตรวจสอบคอนเดนซ์เซอร์	4 ครั้ง/ปี												
12	ตรวจสอบดรายเออร์	4 ครั้ง/ปี												
13	ตรวจสอบไสต์กลาส	4 ครั้ง/ปี												
14	ตรวจสอบชุดอีวเอปเรเตอร์	4 ครั้ง/ปี												
15	ตรวจสอบปั๊มน้ำ	4 ครั้ง/ปี												
16	เปลี่ยนตัวกรอง	1 ครั้ง/ปี												
17	ตรวจเช็คกระแสมอเตอร์และเครื่องจักรทั้งหมด	1 ครั้ง/ปี												
18	เปลี่ยนสายข้อต่ออ่อนน้ำหล่อเย็น	1 ครั้ง/ปี												

จัดทำโดย _____
วันที่ _____

อนุมัติโดย _____
วันที่ _____

ตรวจสอบโดย _____
วันที่ _____

รูปที่ 6 ตารางการตรวจเช็ค และบำรุงรักษาเครื่องซิลเลอร์

2) ตรวจเช็คระบบ IoT ที่ติดตั้งเซนเซอร์และอัตราการไหลน้ำเข้าออกให้มีความเสถียรและการเก็บข้อมูล ช่วยให้เห็นใจได้ว่าข้อมูลที่ได้รับมาจากเซนเซอร์มีความถูกต้องและเชื่อถือได้ ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญในการตัดสินใจและการวิเคราะห์ข้อมูลในการปรับปรุงและพัฒนาระบบต่อไป โดยมีการติดตั้งอุปกรณ์ IoT ทั้งภายในและภายนอกตู้ควบคุม แสดงในรูปที่ 7 (ก) ท่อที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ IoT และรูปที่ 7 (ข) อุปกรณ์ภายในตู้ควบคุม



(ก) ท่อที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ IoT



(ข) อุปกรณ์ภายในตู้ควบคุม

รูปที่ 7 ท่อน้ำเข้าน้ำออกที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ IoT และตู้ควบคุม

3) สารรองอะไหล่เป็นส่วนสำคัญของการบำรุงรักษาเครื่องชิลเลอร์ (Chiller) เพื่อให้มีอะไหล่พร้อมใช้งานเมื่อมีความจำเป็น การสำรวจและสำรองอะไหล่แสดงดังรูปที่ 8 เป็นกิจกรรมที่สำคัญในการรักษาสมรรถภาพและป้องกันความเสียหายของเครื่องชิลเลอร์ และควรตรวจสอบเป็นประจำเพื่อรักษาความเสถียรและอายุการใช้งานของเครื่องจักร

				
Compressor 2 ตัว	Filter Dryer 2 ตัว	Expansion Valve 3 ตัว	น้ำยา R22 2 ถัง	เกจ 4 ตัว

รูปที่ 8 รายการอะไหล่สำรองเครื่องชิลเลอร์

4. ผลการวิจัย

4.1 กระบวนการป้อนข้อมูลในแผนกผลิตบรรจุภัณฑ์หลังการปรับปรุง

หลังจากการปรับปรุงโดยการติดตั้งอุปกรณ์ IoT และการใช้ ECRS เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการป้อนข้อมูลในแผนกผลิตบรรจุภัณฑ์ ขั้นตอนการป้อนข้อมูลสามารถปรับปรุงได้โดยการลดขั้นตอน Flow Process Chart ด้วยการลดขั้นตอนและการใช้เทคโนโลยี IoT ร่วมกับ ECRS จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและลดเวลาในการป้อนข้อมูลในแผนกผลิตบรรจุภัณฑ์ ระบบสามารถบันทึก

การทำงานของเครื่องจักรได้เป็นปัจจุบัน ขั้นตอนการป้อนข้อมูลของพารามิเตอร์น้ำหล่อเย็น หลังปรับปรุงสามารถลดขั้นตอนได้ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 Flow Process Chart ปรับปรุงขั้นตอนการป้อนข้อมูลในแผนกผลิตบรรจุภัณฑ์ (หลังการปรับปรุง)

Flow Process Chart										
☒ คน (Man Type)		☐ วัสดุ (Material Type)		☐ เครื่องจักร (Machine Type)		☐ อื่นๆ (Other)				
ชื่อขบวนการ (Subject Charted)		ปรับปรุงขั้นตอนการป้อนข้อมูลในแผนกผลิตบรรจุภัณฑ์				วันที่ (Date)		30-ม.ค.-67		
						จัดทำโดย (Chart By)		อัญญา มะโนวงศ์		
ฝ่าย (Department)		ผลิตบรรจุภัณฑ์				หมายเลขเอกสาร (Chart No.)				
สถานะ (Method)		หลังปรับปรุง				หน้าที่ (Sheet No.)				
ขั้นตอน	ชื่อขบวนการ		จำนวน (Lot)	ระยะ (เมตร)	เวลา (นาที)	สัญลักษณ์				หมายเหตุ
1	ดูข้อมูลและการทำงานของเครื่อง				1	●	➡	□	□	▽
2	ตรวจสอบข้อมูลและความถูกต้องของการเก็บข้อมูล				3	○	➡	□	■	▽
3	ทำการวิเคราะห์และสร้างรายงาน				30	●	➡	□	□	▽
4	ประเมินผลและวางแผนซ่อมบำรุง				60	●	➡	□	□	▽
5	การตรวจสอบและปรับปรุง				30	○	➡	□	■	▽
6	ทำการซ่อมบำรุง				60	●	➡	□	□	▽
รวม			0	0	184	4	0	0	2	0
*หมายเหตุ ○ = การปฏิบัติงาน ➡ = การเดินทาง □ = การรอคอย ■ = การตรวจสอบ ▽ = การจัดเก็บ										

การวิเคราะห์ขั้นตอนการป้อนข้อมูลในแผนกผลิตบรรจุภัณฑ์ด้วย Flow Process Chart แสดงให้เห็นว่าการติดตั้ง IoT ช่วยลดขั้นตอนการทำงานจาก 12 ขั้นตอนเหลือ 6 ขั้นตอน ระยะทางจาก 100 เมตร เหลือ 0 เมตร และเวลารอคอยจาก 1,440 นาที เหลือ 0 นาที พนักงานสามารถเข้าถึงข้อมูลได้ตลอดเวลาและระบบสามารถบันทึกการทำงานของเครื่องซิลเลอร์ได้ทันที โดยการนำหลักการ ECRS มาใช้คือ Eliminate (กำจัด) ขั้นตอนที่ไม่จำเป็นออก, Combine (รวมกัน) ขั้นตอนต่าง ๆ ให้เป็นหนึ่งเดียว, และ Simplify (ทำให้ง่ายขึ้น) ขั้นตอนการทำงาน นอกจากนี้ การวางแผน TPM ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและความพร้อมในการทำงานของเครื่องเป่าถัง ลดเวลาซ่อมแซมและการหยุดการผลิต

4.2 สถิติของเสียหลังจากการปรับปรุง

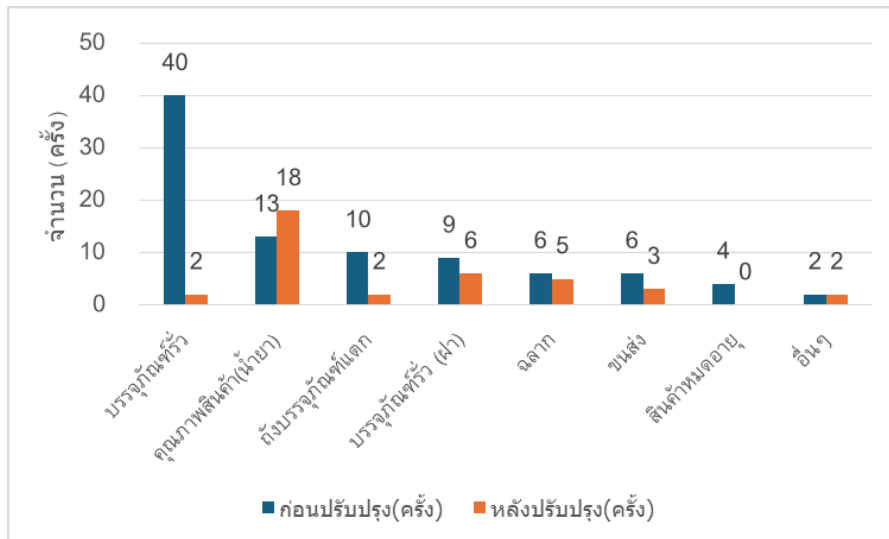
สถิติของเสียหลังจากการปรับปรุง แสดงดังตารางที่ 4 รวบรวมข้อมูลที่ได้รับร้องเรียน ตั้งแต่เดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2566 – เดือนมกราคม พ.ศ. 2567 ตารางที่ 5 เปอร์เซนต์เปรียบเทียบข้อร้องเรียนก่อนและหลังปรับปรุงระบบน้ำหล่อเย็น และรูปที่ 9 กราฟเปรียบเทียบข้อร้องเรียนก่อนและหลังปรับปรุง

ตารางที่ 4 ลักษณะข้อร้องเรียนที่พบปัญหา ตั้งแต่เดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2566 – เดือนมกราคม พ.ศ. 2567

ปัญหา	จำนวนครั้ง	เปอร์เซนต์ของเสีย (%)
คุณภาพสินค้า	18	47%
บรรจุภัณฑ์รั่ว (ฝา)	6	16%
ฉลาก	5	13%
ขนส่ง	3	8%
ถังบรรจุภัณฑ์แตก	2	5%
บรรจุภัณฑ์รั่ว	2	5%
อื่นๆ	2	6%
ยอดรวม	38	100%

ตารางที่ 5 เปอร์เซนต์เปรียบเทียบข้อร้องเรียนก่อนและหลังปรับปรุงระบบน้ำหล่อเย็น

ปัญหา	ก่อน (ครั้ง)	หลัง (ครั้ง)	%เปรียบเทียบ
บรรจุภัณฑ์รั่ว	40	2	ลดลง 95%
คุณภาพสินค้า (น้ำยา)	13	18	เพิ่มขึ้น 28%
ถังบรรจุภัณฑ์แตก	10	2	ลดลง 80%
บรรจุภัณฑ์รั่ว (ฝา)	9	6	ลดลง 33%
ฉลาก	6	5	ลดลง 17%
ขนส่ง	6	3	ลดลง 50%
สินค้าหมดอายุ	4	0	ลดลง 100%
อื่นๆ	2	2	เท่าเดิม
ยอดรวม	90	38	ลดลง 58%



รูปที่ 9 กราฟเปรียบเทียบข้อร้องเรียนก่อนและหลังปรับปรุง

การลดจำนวนรายการบรรจุภัณฑ์รีวจาก 40 รายการก่อนการปรับปรุง เป็น 2 รายการหลังการปรับปรุงเป็นการลดลงถึง 95% หมายความว่าจำนวนรายการที่ลดลงอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับก่อนหน้าการปรับปรุง การลดลงของรายการรีวของถังบรรจุภัณฑ์สื่อถึงการปรับปรุงคุณภาพและประสิทธิภาพในกระบวนการผลิต นอกจากนี้ยังสะท้อนถึงการใช้เทคโนโลยีใหม่ เช่น ระบบ IoT และ TPM เพื่อควบคุมและตรวจสอบระบบน้ำหล่อเย็นอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

5. สรุป

การเก็บข้อมูลพารามิเตอร์น้ำหล่อเย็นก่อนติดตั้งระบบ IoT เริ่มต้นต้องอาศัยการจดบันทึกด้วยมือ ทำให้ข้อมูลไม่แม่นยำและล่าช้า หลังการติดตั้งระบบ IoT ขั้นตอนการป้อนข้อมูลลดลงจาก 12 ขั้นตอน เหลือ 6 ขั้นตอน ระยะทางการทำงานลดลงจาก 100 เมตร เหลือ 0 เมตร และเวลารอคอยจาก 1,440 นาที เหลือ 0 นาที ทำให้พนักงานสามารถเข้าถึงข้อมูลได้ทันทีและแม่นยำมากขึ้น โดยใช้ Arduino Uno และ Raspberry Pi 4 รวบรวมข้อมูลและส่งไปยัง NODE-RED เพื่อสร้าง Dashboard ควบคุมอุณหภูมิน้ำหล่อเย็น ข้อมูลถูกส่งไปยัง Google Sheets เพื่อการวิเคราะห์และวางแผนซ่อมบำรุงรักษาแบบทั่วผลทุกคนมีส่วนร่วม ผลลัพธ์คือจำนวนถังบรรจุภัณฑ์ที่รีวลดลงจาก 40 รายการ เหลือเพียง 2 รายการ คิดเป็นการลดลง 95% และระบบ IoT ช่วยให้พนักงานตรวจสอบสถานะอุณหภูมิและอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นแบบเรียลไทม์ ทำให้สามารถวางแผนการบำรุงรักษาได้ทันทีเมื่อพบค่าที่ผิดปกติ ป้องกันปัญหาก่อนที่จะส่งผลกระทบต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์ การใช้เทคโนโลยี IoT ในการตรวจสอบและควบคุมระบบน้ำหล่อเย็นมีบทบาทสำคัญใน

การปรับปรุงคุณภาพผลิตภัณฑ์และเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต ทำให้การผลิตเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพและลดปัญหาการรั่วของบรรจุภัณฑ์อย่างมีนัยสำคัญ

6. ข้อเสนอแนะ

การวิจัยนี้เป็นโอกาสที่ดีในการพัฒนาและเรียนรู้เกี่ยวกับการใช้เทคโนโลยี และปรับปรุงกระบวนการการทำงานในอุตสาหกรรม การติดตามผลการใช้งานและการปรับปรุงต่อไปช่วยให้สามารถนำเทคโนโลยีและการจัดการมาใช้ในการพัฒนาปรับปรุงกระบวนการในส่วนอื่น ในอนาคตได้ โดยสร้างความเข้าใจและความเชี่ยวชาญที่เพิ่มขึ้นในโรงงาน

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณาจารย์สาขาการจัดการงานวิศวกรรม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์ ที่เป็นต้นสังกัดในการให้ทุน สถานที่ทำวิจัย ความรู้ และขอขอบคุณอุตสาหกรรมพัฒนามูลนิธิ สถาบันพลาสติก ที่ให้ความรู้ และคำปรึกษาในการทำงานวิจัยในครั้งนี้

References

- [1] Sumipol.com. IoT to IIoT when digital transformation arrives in the Industry [Internet]. 2018 [cited 2023 Mar 20]. Available from: <https://www.sumipol.com/knowledge/transformation-iiot/> (In Thai)
- [2] Samnuk P. Fundamental knowledge of Extrusion Blow Molding (EBM). Training document for Plastic Training Course. Bangkok, Thailand: Plastic Institute of Thailand; 2023. (In Thai)
- [3] Saesiu B. 7 QC tools [Internet]. 2014 [cited 2023 Mar 26]. Available from: <https://logisticbasic.blogspot.com/2014/07/7-qc-tools.html> (In Thai)
- [4] Hermes Digital Marketing Thailand. Analyzing and problem solving with Why-Why Analysis/5 Why [Internet]. 2023 [cited 2023 Mar 26]. Available from: <https://www.hrodthai.com/single-post/-why-why-analysis-5-why> (In Thai)
- [5] Barbieri-Silva S, Flores-Perez A, Alvarez JC. TPM, SMED and 5S model to increase efficiency in an automated production line for a company in the food sector. 2022 Congreso Internacional de Innovación y Tendencias en Ingeniería (CONIITI); 2022 Oct 5-7; Bogota, Colombia.

- [6] Manavid T. Waste reduction in blow molding bottle manufacturing [thesis]. Bangkok, Thailand: Chulalongkorn University; 2010.
- [7] Onprang P. Investigate the effect of cooling on the shrinkage of plastic injection part. Journal of Production Manufacturing and Management Technology 2022;1(2):31-50. (In Thai)
- [8] Mudnga T. Autonomous maintenance [Cooperative education report]. Bangkok, Thailand: Thai-Nichi Institute of Technology; 2016. p. 4-6. (In Thai)
- [9] Joochim O, Meekaew J. Application of TPM in production process of aluminium stranded conductors. The 2016 International Conference on Industrial Engineering, Management Science and Application (ICIMSA); 2016 May 23-26; Jeju, Korea.
- [10] Muangngeon A. An application of Lean technique (ECSR+IT) to efficient book return process for Library and Information Center, National Institute of Development Administration. Bangkok, Thailand: National Institute of Development Administration; 2019. p. 15-9. (In Thai).

ประวัติผู้เขียนบทความ



อัญญา มะโนวงศ์ นักศึกษาปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาการจัดการงานวิศวกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์, เลขที่ 6 ถนนราชมรรคาใน อำเภอเมือง จังหวัดนครปฐม 73000 โทรศัพท์ 098-838-5589 Email: Manowong_A@silpakorn.edu



รศ.ดร.ประจวบ กล่อมจิตร อาจารย์ประจำหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาการจัดการงานวิศวกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์, เลขที่ 6 ถนนราชมรรคาใน อำเภอเมือง จังหวัดนครปฐม 73000 โทรศัพท์ 081-806-9875 Email: klomjit_p@su.ac.th

Article History:

Received: April 25, 2024

Revised: September 16, 2024

Accepted: September 20, 2024

SMART SECURITY SYSTEM ON RASPBERRY PI WITH FACE RECOGNITION AND OBJECT DETECTION

Sa-nga Songmuang

Lecturer, Faculty of Science and Technology, Kasem Bundit University

60 Romklao Road, Minburi District, Bangkok 10510, Thailand,

sa-nga.son@kbu.ac.th

ABSTRACT

The smart Security System presented in this research harnesses the capabilities of Raspberry Pi to provide a comprehensive solution for home security and control. The system integrates three main functions aimed at enhancing user safety and convenience. The system employs a camera module to detect and recognize faces in its field of view. In the event of an unauthorized person attempting to enter the premises, the system captures the intruder's face and promptly sends the image to the user's mobile phone. This real-time notification ensures swift awareness and response to potential security threats. The camera is configured to detect and monitor various objects, such as vehicles or individuals, stationary for more than five minutes in front of the home. Upon detection, the system captures images of the objects and transmits them to the user's mobile phone. The system provides users with the capability to remotely control electronic devices within the home. Through the application or system interface, users can turn on or off specified devices. The primary goals of the system include the development of a reliable application for smart home security and control and the evaluation of its performance in real-world scenarios.

KEYWORDS: Raspberry Pi, Face Detective and Recognition, IoT, Mobile Application

1. Introduction

Traditionally, security systems relied on physical locks and alarms, providing a basic level of protection. However, with the rapid advancement of technology and myriad innovations, face detection algorithms have been addressed in many papers such as Haar Cascades [1], Kalman Filter [2] and applied in various fields [3-5]. Besides, OpenCV is a robust open source that supports many methods to detect faces. Face recognition and face

matching were conducted using the OpenCV image processing library. Face detection is not only necessary for the camera node detecting the face but also helpful in pre-processing the input data. Face recognition technology has made remarkable strides in recent years, driven by advancements in machine learning and artificial intelligence [6]. The integration of face recognition and object detection into smart security systems [7-9] stands out as a transformative paradigm [10], promising a robust shield for safeguarding homes. Parallely, the integration of object detection fortifies the system's surveillance capabilities. Building on the works of Garcia et al [11, 12], which highlight the critical role of real-time monitoring in security systems, the inclusion of object detection extends the vigilant eye of the smart security system. Whether it be identifying parked vehicles or monitoring prolonged stationary activity, object detection augments the system's situational awareness.

In recent years, security cameras have been widely accepted by society as a security system, and the introduction of security cameras to shops, downtown areas, public facilities, etc. is proceeding [13]. It is important to prevent unauthorized use of photo data by the administrator of the security camera [14]. This security camera system is created using Raspberry Pi [15], a credit-card-sized computer, that has revolutionized the realm of DIY electronics and programming. Its affordability, versatility, and compact size have made it a favored choice for various projects, including security systems that provide a comprehensive solution for home security and control.

The intersection of face recognition, object detection, and remote device control forms the cornerstone of this study. Motivated by the promising prospects outlined in the existing literature, this paper aims to contribute to the discourse on smart security systems by presenting a novel implementation on the Raspberry Pi [16]. The primary research objectives encompass the development of a reliable application for smart home security and control, coupled with an in-depth evaluation of its real-world performance through user feedback. By addressing these objectives, this study endeavors to extend the frontier of knowledge in the realm of smart security systems while providing practical insights into the application of Raspberry Pi technology in residential settings.

Haar-feature-based cascade classifier for object detection has proved to be an effective classifier [17, 18]. A smart security system's integration of face and object detection is based on the convergence of advanced technologies including computer vision, artificial intelligence (AI), and the Internet of Things (IoT). Real-time face and object identification and recognition

are made possible by the system's utilization of deep learning models and sophisticated algorithms. It consists of multiple parts, including computer vision and image processing. By using computer vision techniques, the system analyzes live video feeds from cameras and extracts relevant environmental data. Algorithms for image processing are used to identify faces and objects in the photographed frames. The development and deployment of the system with integrated face and object detection follow a systematic and structured methodology such as requirement analysis, system design, data collection and processing, model training, integration and testing, deployment and evaluation, and interactive improvement. By following this methodology, the system is developed, evaluated, and refined to deliver reliable, efficient, and user-friendly security solutions. AI algorithms, especially deep learning models like Convolutional Neural Networks (CNNs) [19, 20], are trained on artificial intelligence and machine learning data. Mobile application and user interface design which is the main interface for communicating with the smart security system is a user-friendly mobile application. Real-time warnings, remote control capabilities, and historical data access are all offered by the program.

The first step is detecting faces within the camera's field of view. This involves analyzing the image or video feed to identify areas containing faces. Usually, camera 1 is positioned close to the entrance where authorization is required. The camera will take a picture and process it further if someone requires entrance to the home. Parallely, camera 2 is configured to detect and monitor various objects, such as vehicles or individuals, stationary for more than five minutes in front of the home. Upon detection, the system captures images of the objects and transmits them to the user's mobile phone. This feature adds an extra layer of surveillance, aiding in the monitoring of activities around the property.

2. Methodology

2.1 Hardware Setup

The Smart Security System (shown in Figure 1) presented in this research harnesses the capabilities of Raspberry Pi3 to provide a comprehensive solution for home security and control. To build a face recognition security system, we'll need a Raspberry Pi3 board, a compatible camera module, and a display (optional). The camera module captures images, which are then processed for face recognition.

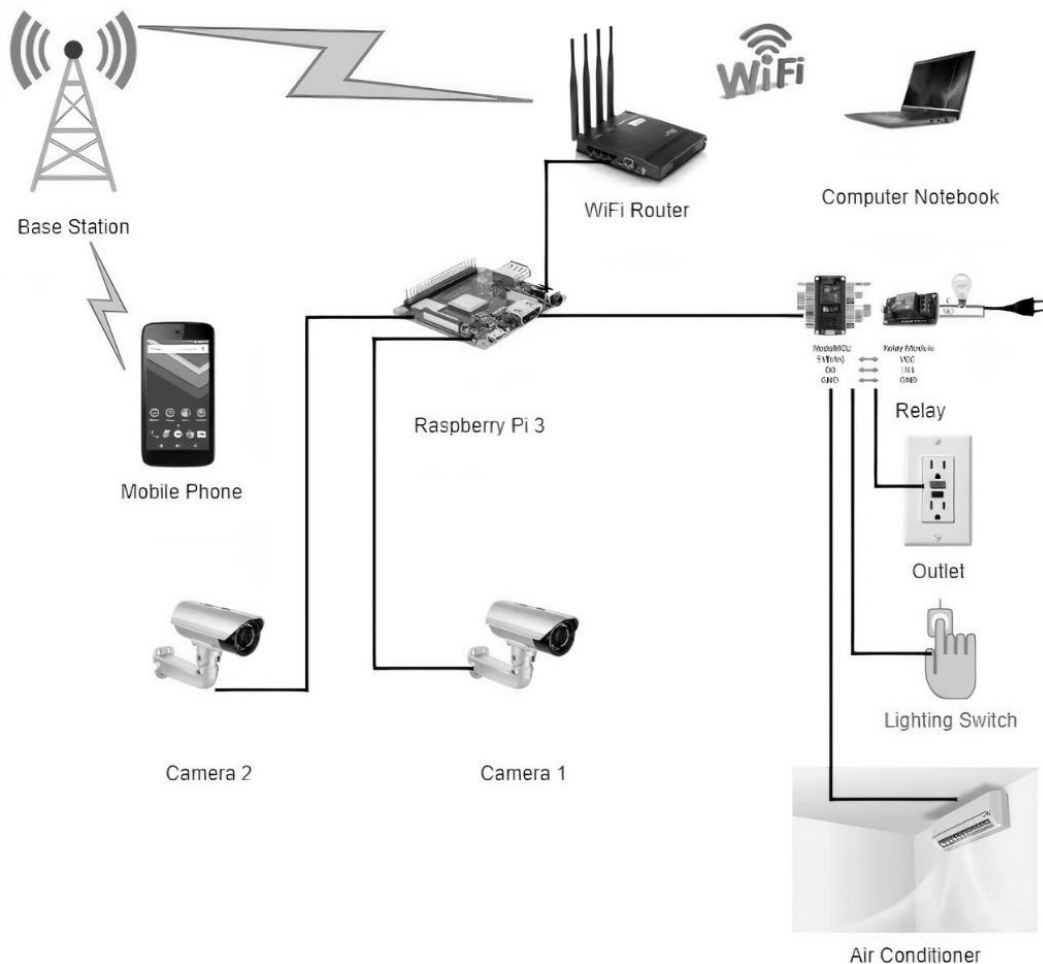


Figure 1 The Smart Security System

Base Station and Wi-Fi Router provide the network infrastructure for all devices to communicate. We connected the Wi-Fi router to the internet and configured it to ensure strong and secure wireless connectivity. The base station will act as the central hub, connected to the Wi-Fi network. Raspberry Pi3 acts as the main processing unit for face and object detection algorithms. It is connected to the Wi-Fi network. Camera 1 and camera 2 captured video footage for processing by the Raspberry PI (For cameras placement in a real-world setting are shown in Figure 2). We connected the cameras to the Raspberry Pi3. Position the cameras strategically around the property for optimal coverage. The cameras utilized in our smart security system are equipped with a 1/3" progressive scan image sensor, offering a maximum resolution of 1280 x 960 pixels and a frame rate of 30fps, ensuring high-

quality video capture. Each camera features a 4mm lens with an aperture of F/2.0, providing a 45.3-degree angle of view, and is mounted using an M12 lens mount. For optimal day and night functionality, the cameras include an IR cut filter with an auto-switch mechanism. They offer a wide horizontal view angle of 88 degrees and a vertical view angle of 65 degrees, effectively covering extensive areas. Additionally, these cameras can focus on objects as close as 0.5 meters, making them versatile for various security applications. Install cameras at the house with a height of 2.8 meters outside to provide the system with a wide-angle vision. With 88° horizontal and 65° vertical view angles provided by the cameras' wide-angle lenses, this arrangement optimizes coverage and reduces blind spots. To guarantee that the monitored area, including the ground directly below, is optimally covered, adjust the horizontal tilt between 0° and 45° and the vertical tilt between 10° and 30°. Adverse weather conditions such as heavy rain and fog can obscure the cameras' view and reduce detection accuracy. Even with optimal placement, cameras have a limited field of view. Wide-angle lenses provide broader coverage but may introduce distortion at the edges, affecting detection accuracy. Overlap the fields of vision of neighboring cameras to close any gaps and guarantee sufficient lighting to improve the quality of the images. This configuration lowers blind areas, increases face and object identification accuracy, and guarantees thorough monitoring. Computer Notebook used for monitoring, configuring, and maintaining the Raspberry Pi3 and system software. Ensure the notebook is connected to the same Wi-Fi network and has software installed to access and monitor the Raspberry Pi3. We used a relay to control the power supply to various electronic devices such as outlet, lighting switch, and air conditioner. These are the devices that will be controlled by the smart security system for automated responses. We connected these devices to the relay, enabling the Raspberry Pi3 to control them. The mobile phone provides remote monitoring and control capabilities to the user. It installed a mobile application that can receive notifications and control the system remotely.



Figure 2 The cameras placement in a real-world setting

2.2 Software Implementation

The software aspect involves installing, developing, and configuring the necessary libraries and frameworks (shown in Figure 3). Open-source libraries like OpenCV and dlib provide the tools needed for face detection and recognition. Machine learning models can be trained on a dataset of faces to ensure accurate recognition.

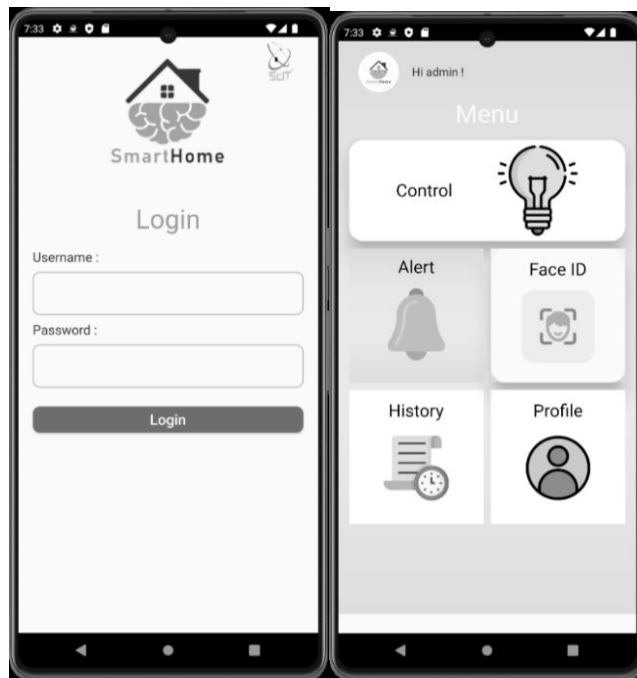


Figure 3 The smart security application or system interfaces

2.3 Face Recognition

The methodical approach used in the development and implementation of the smart security system with integrated face recognition and object detection includes 1) requirement analysis, which collects information about the required features and functionalities of the smart security system, defines the hardware and software requirements, including performance metrics like detection accuracy, response time, and power consumption. 2) system design, which is based on the requirements analysis and comprises choosing the right technologies and algorithms for face recognition and object identification in addition to specifying the system's components, interfaces, and interactions. 3) data collection and

preprocessing to gather and prepare the data required for training and testing models, which guarantee quality and consistency. Collecting images and videos of faces from various sources such as publicly available datasets and custom recordings and gathering images and videos of common objects in the targeted environment (e.g., vehicles, packages) from sources like custom datasets. Labeling the collected data with appropriate tags (e.g., bounding boxes for faces and objects) using annotation tools. Applying transformations such as rotation, scaling, and brightness adjustments to increase the diversity of the dataset improves model robustness and standardizes the image sizes and pixel values to ensure consistency. 4) model training, in which the machine learning models for face and object detection. Using algorithms like Multi-task Cascaded Convolutional Networks for initial face detection. Using deep learning frameworks like TensorFlow and employing deep learning models for feature extraction and recognition, splitting the dataset into training validations and test sets, and training the models using techniques like transfer learning, starting from pre-trained weights and fine-tuning on my specific dataset. 5) feature encoding and matching, in which the system encodes the extracted facial features into a compact representation known as a face embedding or descriptor. To find comparable faces, these embeddings are compared with those kept in a database using similarity metrics such as cosine similarity or Euclidean distance for setting a threshold to determine matches and non-matches [21] and use the trained face recognition model to extract feature vectors (embeddings) from detected faces. 6) database management, managing the storage and retrieval of facial embeddings and identities. Using a robust system (e.g., MySQL) depending on the scale of the application. Storing facial embeddings, identities, and metadata (e.g., timestamps, image paths). 7) real-time identification and verification, capturing live video feeds from cameras and process frames in real-time using the trained models. Identifying recognized faces and objects, and triggering alerts or actions if unknown or suspicious entities are detected. The system authenticates after identification and then either grants access or sets off notifications under pre-established regulations. 8) integration and testing, which verify the system's robustness, functionality, and performance under varied circumstances, the trained models are integrated into the framework of the smart security system along with other parts like cameras, Internet of Things (IoT) devices, and the mobile application. Conducting intensive testing in both controlled and real-world environments. Test for different scenarios, lighting conditions, and angles to ensure robustness. In low-light or nighttime, cameras may struggle

to capture clear and detailed images, which can hinder the accuracy of object detection algorithms. The lack of sufficient light can cause images to appear grainy or dark, making it difficult for the system to differentiate between objects, identify edges, or recognize patterns. The cameras include an IR cut filter with an auto-switch mechanism which can enhance image quality in darkness and algorithms will be optimized for low-light performance to improve detection accuracy during nighttime conditions. 9) implementation and assessment, which completed system is implemented in residential properties, which are real-world settings. Continuously monitor system performance, including detection accuracy, response time, and user interactions. The accuracy of face and object detection in our system is significantly influenced by the distance between the camera and the monitored objects. At close distances (0.5 to 2 meters), the cameras capture high-detail images, ensuring precise recognition, though extreme close-ups may cause distortion. Medium distances (2 to 5 meters) provide a balanced view, maintaining high accuracy with clear and identifiable features. At longer distances (5 to 10 meters), the detail reduces, leading to moderate accuracy as environmental noise increases. Beyond 10 meters, significant detail loss and environmental factors like lighting and obstructions further decrease detection reliability, making accurate recognition challenging. Optimal camera placement, high-resolution sensors, and advanced algorithms are essential to mitigate these issues and maintain accuracy across varying distances. In a controlled test, the system was tasked with detecting a person's face 50 times. The results were impressive, achieving a 100% accuracy rate, meaning that every instance of face detection resulted in the corrected identification of the individual.

The system employs the camera module to detect and recognize faces in its field of view. Once faces are detected (shown in Figure 4), the system employs a trained machine-learning model to compare the captured face with stored facial features of members in the home. If a match is found, access is granted; otherwise, appropriate actions, like sending alerts, can be triggered. In the event of an unauthorized person attempting to enter the premises, the system captures the intruder's face and promptly sends the image to the user's mobile phone. This real-time notification ensures swift awareness and response to potential security threats (shown in Figure 5).

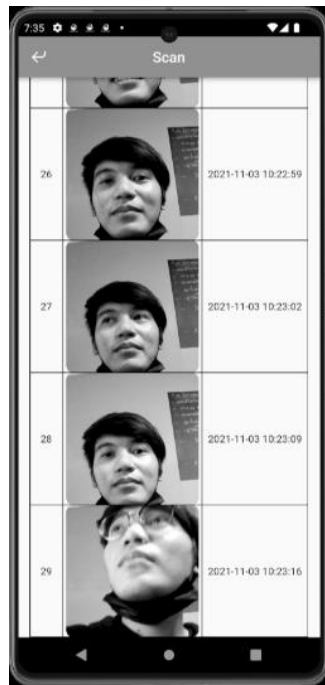


Figure 4 Face detection and recognition

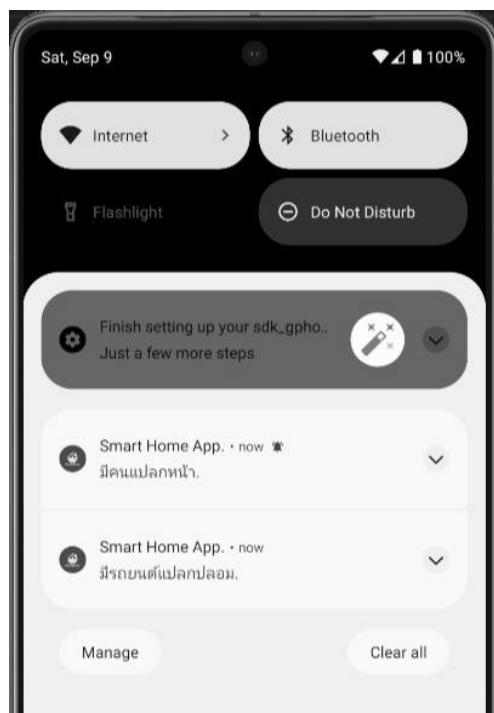


Figure 5 Real-time notifications

2.4 User Management

The system can be programmed to manage authorized users. New users can be enrolled by capturing their images and adding them to the database. Parallely, the system provides users with the capability to remotely control electric devices within the home. The owner can operate electric devices with the help of their smartphone or other mobile device. This study represents a simple system where the Raspberry Pi3 controls three electronic devices such as lighting, air conditioning, and outlet using a relay (shown in Figure 6). Through the application or system interface, users can turn on or off specified devices, offering not only security but also enhanced energy management and convenience.



Figure 6 The interface for controlling electric devices

3. Conclusions

This Smart Security System on Raspberry Pi3 represents an innovative approach to residential security, combining facial recognition, object detection, and remote device control. These integrated features aim to provide users with comprehensive and user-friendly home security solutions. The study's success is contingent on user feedback that serves as a crucial indicator of the system's effectiveness in meeting these aims. By analyzing user responses (shown in Figure 7), the research aims to gauge the system's usability, reliability, and overall contribution to home security and automation.

The following are the key takeaways from the user feedback: 1) System performance evaluation, the main goal of user feedback is to assess how well the smart security system performs in practical situations. by requesting input on a range of topics, including ease of use, efficacy in detecting intrusions, dependability in object identification, and practicality in controlling devices remotely. 2) Evaluation of user experience, evaluating the user experience that the smart security system offers is one of the main goals of the user feedback. User perceptions of the system's usability, compatibility with daily activities, and notification response time. 3) Validation of research hypotheses, in addition, user input confirms the research goals and hypotheses that guided the creation and implementation of the smart security system. Researchers can determine the system's effectiveness in accomplishing its goals and providing value to users by contrasting users' perceptions and experiences with the system's planned outcomes.

On the user feedback gathered from the questionnaire, the following conclusions can be drawn: 1) Moderate User-Friendliness, the average response for user-friendliness is 4.35 indicating a moderate level of user-friendliness. It falls within a range where improvements or refinements may enhance the overall user experience. 2) Positive Perception of Intruder Detection, users express a positive perception of the system's effectiveness in intruder detection with an average response of 4.62. This suggests that the face recognition feature successfully identifies potential intruders contributing to a sense of security among respondents. 3) High Reliability in Object Detection, the system's reliability in detecting and capturing images of objects receives positive feedback with an average response of 4.58. This indicates that users find the object detection feature dependable contributing to effective surveillance around the home. 4) Moderate Convenience in Remote Device Control, users rate the convenience of the remote device control feature moderately with an average

response of 4.38. While the system provides a degree of convenience. There may be areas for improvement to further enhance the user's experience in controlling electronic devices remotely. 5) Positive Perception of Notification Response Time. The system's notification response time receives positive feedback with an average response of 4.62. Users appreciate the system's promptness in sending notifications contributing to a timely awareness of security events. 6) Moderate Integration with Daily Routine. The integration of the smart security system into users' daily routines is perceived moderately with an average response of 4.50. This suggests that the system is making strides in becoming a seamless part of users' lives. There may be opportunities for further integration. And 7) Positive Overall Satisfaction. The overall satisfaction with the smart security system is positive with an average response of 4.62. Users express contentment with the system indicating that it successfully meets their expectations and contributes positively to their sense of security.

In summary, the smart security system on Raspberry Pi with face recognition and object detection is generally well-received by users. The system demonstrates effectiveness in intruder and object detection with positive feedback on notification response time. While there are areas for improvement, particularly in user-friendliness and convenience in remote device control, the overall satisfaction level suggests that the system is meeting user expectations and contributing positively to their security and daily routines.

The benefits of the system are as follows; 1) Enhanced security that offers a robust authentication method that is difficult to forge, providing a higher level of security compared to traditional methods like PINs or keys. 2) Convenience-authorized users can access secured areas without the need for physical keys or remembering complex passwords. 3) Real-time alerts. The system can be programmed to send real-time alerts via notifications to the owner's smartphone when unauthorized access is detected. 4) Data logging. The system can maintain logs of all access attempts, providing a record of who entered the premises and when. 5) Remote monitoring. Raspberry Pi-based systems can be accessed remotely, allowing homeowners to monitor their property even when they are away. And 6) Remote control of electric devices. The system provides users with the capability to remotely control electric devices within the home via the application or system interface.

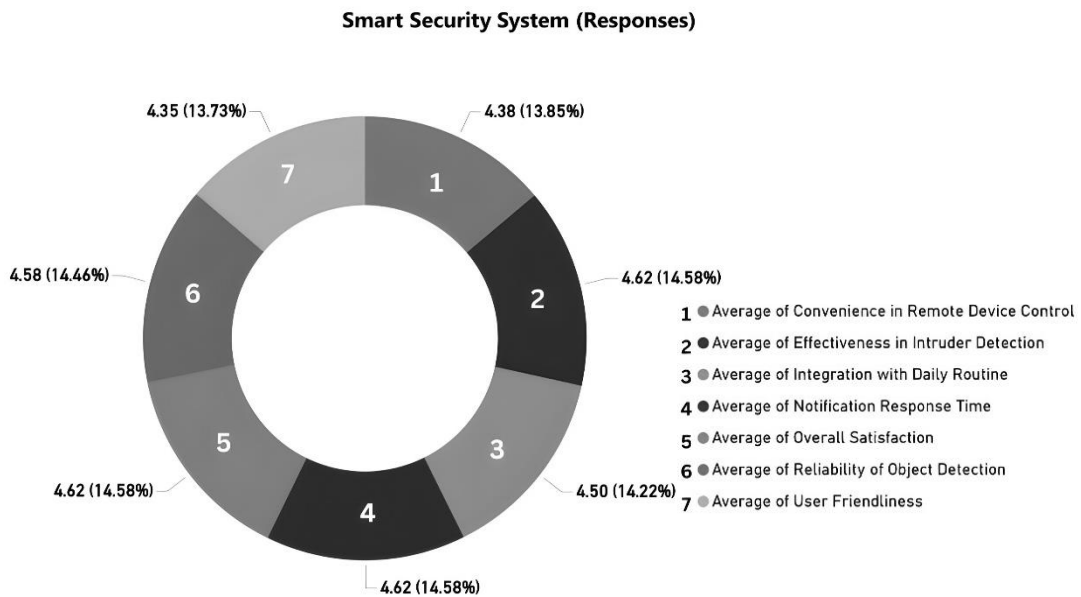


Figure 7 The user feedback gathered from the questionnaire

4. Discussion

The proposed smart security system on Raspberry PI with integrated face recognition and object detection offers several unique aspects and improvements that differentiate it from existing commercially available systems. While features such as face recognition, object detection, and remote device control are indeed common in various security systems, this research aims to innovate and improve upon these functionalities in several key areas:

1) **Open-Source and Customizability.** The proposed system leverages open-source software and libraries, such as Open-CV for computer vision and TensorFlow for machine learning. This open-source allows developers to customize and extend the system according to their specific needs, offering a level of flexibility and adaptability. 2) **Cost-Effectiveness and Accessibility.** Utilizing the Raspberry PI as the core platform significantly reduces the cost of the system compared to proprietary hardware solutions. 3) **Enhanced Privacy and Data Security.** The system can be configured to process data locally on the Raspberry PI minimizing the need to transmit sensitive data to external servers. This local processing is unauthorized access common with cloud-based commercial systems. 4) **Integration of Multiple Functionalities on a Single Platform.** This integration ensures coherent interaction between different functionalities, optimizing system performance and user experience. While

many commercial systems offer integrating features seamlessly on a single Raspberry PI platform is a notable achievement. 5) Scalability and Expandability. The design of the system allows for easy scalability and expandability. Users can add more cameras, sensors, and devices as needed without significant reconfiguration. And 6) User-Centric Design and Feedback Loop. By actively engaging with users and iteratively improving the system based on real-world usage and feedback, the proposed system aims to provide more user-friendly and effective solutions tailored to the specific needs of its users.

These unique aspects collectively contribute to a comprehensive and innovative security solution that addresses the limitations of current commercial systems and meets the evolving needs of users. It also faces certain limitations that may impact its overall performance and reliability such as 1) Accuracy in Face and Object Detection. Face recognition and face matching were conducted using the OpenCV image processing library. For face recognition, a classifier that uses the Harr features-based cascade function is used to identify faces in real-time. The algorithm employs a series of classifiers trained on positive and negative images to detect facial features with high accuracy. It uses 30 images of each person with a tilted face angle to trim everything except the face and divide them into each person. For our experiment, the detection rate for one mage was 99.73%, and the detection rate for one sequence was 100%. The metric that is used to confirm an authorized person is the similarity score between the facial embeddings of the detected face and the stored embeddings of authorized individuals. The system calculates the similarity between the extracted feature vector and the stored feature vectors of authorized individuals using cosine similarity metrics. Distinguishing between a photo and a real person is crucial for preventing spoofing attacks in face recognition systems. We used liveness detection to determine if the face being captured by the camera is of a live person or a static image, and motion analysis was used to track head movements and facial feature shifts. The system is highly dependent on the quality of the trained models and the dataset used for training. While deep learning models (Convolutional Neural Networks or CNNs) are employed to enhance detection accuracy, the system may still experience challenges in correctly identifying faces and objects under various conditions. Factors such as low-resolution images, partial occlusions, and variations in lighting and angles can reduce the accuracy of detection and recognition. 2) Potential for False Positives and Negatives. The system may produce false positives (incorrectly identifying a non-threat as a threat) and false negatives (failing to identify an actual threat).

False positives can lead to unnecessary alerts and inconvenience for users, while false negatives pose a significant security risk by allowing unauthorized access or failing to detect suspicious activity. The balance between sensitivity and specificity is crucial, and fine-tuning this balance is an ongoing challenge. 3) Processing Power and Latency. While the Raspberry PI is a powerful and cost-effective platform, it has limited processing power compared to dedicated high-performance computing systems. Real-time processing of video feeds to face and object detection can be resource-intensive, potentially leading to latency issues. 4) Susceptibility to Environmental Factors. Environmental factors play a significant role in the performance of the face and object detection algorithm. Changes in lighting conditions, such as bright sunlight, shadows, or low light, can adversely affect the system's ability to accurately detect and recognize faces and objects. And 5) Limited Database Capacity. The system's capacity to store and manage the facial embeddings and identities in its database is limited by the storage and memory constraints of the Raspberry PI. As the number of recognized individuals increases, maintaining an efficient and fast database query process becomes challenging.

In conclusion, while the proposed system offers several benefits, it is important to acknowledge and address these limitations to enhance its reliability, accuracy, and overall user satisfaction. Continuous research, development, and user feedback will be essential in mitigating these challenges and improving the system's performance in real-world applications.

Acknowledgment

I would like to acknowledge and give my warmest thanks to Prof. Yusaku Fujii who invited me to join his team for a research collaboration at Gunma University, Japan. His guidance and sharing me in-depth in the security camera carried me to share the knowledge with my students and led us to produce this study. I would also like to give special thanks to Kiattisak Singthong and Titinan Engbunmeesakul (my students) as a collaborative study and led us to complete this study.

References

- [1] Wilson PI, Fernandez J. Facial feature detection using haar classifiers. Journal of Computing Sciences in Colleges 2006;21:127-33.
- [2] Qian RJ, Sezan MI, Matthews KE. A robust real-time face tracking algorithm. Proceedings of 1998 International Conference on Image Processing (ICIP98) vol. 1; 1998 Oct 7; Chicago, USA. Piscataway, USA: IEEE; 2002. p. 131-5.
- [3] Do HM, Mouser C, Liu M, Shaeng W. Human-robot collaboration in a mobile visual sensor network. Proceeding of 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA); 31 2014 May 31 - June 7; Hong Kong, China. Piscataway, USA: IEEE; 2014. p. 2203-8.
- [4] Sheng W, Ou Y, Tran D, Tadesse E, Liu M, Yan G. An integrated manual and autonomous driving framework based on driver drowsiness detection. Proceeding of 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems; 2013 Nov 3-7; Tokyo, Japan. Piscataway, USA: IEEE; 2014. p. 4376-81.
- [5] Tran D, Tadesse E, Sheng W, Sun Y, Liu M, Zhang S. A driver assistance framework based on driver drowsiness detection. Proceeding of 2016 IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems; 2016 Jun 19-22; Chengdu, China. Piscataway, USA: IEEE; 2016. p. 173-8.
- [6] Kundu T, Saravanan C. Advancements and recent trends in emotion recognition using facial image analysis and machine learning models. Proceeding of 2017 International Conference on Electrical, Electronics, Communication, Computer, and Optimization Techniques; 2017 Dec 15-16; Mysuru, India. Piscataway, USA: IEEE; 2018. p. 1-6.
- [7] Amit Y, Felzenszwalb P, Girshick R. Object detection. In: Ikeuchi K, editor. Computer Vision. Cham, Switzerland; Springer: 2021. p. 875-83.
- [8] See J, Lee SW. An integrated vision-based architecture for home security system. IEEE Transactions on Consumer Electronics 2007;53(2):489-98.
- [9] Ravishankar V, Vinod V, Kumar T, Bhalla K. Sensor integration and facial recognition deployment in a smart home system. Proceedings of the 2nd International Conference on Recent Trends in Machine Learning, IoT, Smart Cities and Applications; 2021 Mar 28-29; Hyderabad, India. Singapore: Springer; 2022. p. 759-71.
- [10] Hilbert M. Digital technology and social change: the digital transformation of society from a historical perspective. Dialogues in Clinical Neuroscience 2020;22:189-94.

- [11] Usamentiaga R, Lema DG, Pedrayes OD, Garcia DF. Automated surface defect detection in metals: A comparative review of object detection and semantic segmentation using deep learning. *IEEE Transactions on Industry Applications* 2022;58:4203-13.
- [12] Carranza-García M, Torres-Mateo J, Lara-Benítez P, García-Gutiérrez J. On the performance of one-stage and two-stage object detectors in autonomous vehicles using camera data. *Remote Sens* 2021;13:89.
- [13] Lijima T, Takita A, Fujii Y. Try to improve safety and security by utilizing security cameras considering privacy protection which is led by the municipality. *Proceedings of International Conference on Technology and Social Science* 2017; 2017 May 10-12; Kiryu, Japan.
- [14] Kato S, Takita A, Yoshiura N, Ohta N, Maru K, Ueda H, et al. Development of security camera with privacy protection and, social experiment using the security camera with privacy protection. *Proceedings of the 4th IIAE International Conference on Industrial Application Engineering* 2016; 2016 Sep 22-24; Tokyo, Japan. p. 356-9.
- [15] Faisal F, Hossain SA. Smart security system using face recognition on Raspberry Pi. *Proceedings of 13th International Conference on Software, Knowledge, Information Management and Applications (SKIMA)*; 2019 Aug 26-28; Island of Uikulhas, Maldives.
- [16] Wang F, Zheng R, Li P, Song H, Du D, Sun J. Face recognition on Raspberry Pi on MobileNetV2. *Proceeding of 2021 International Symposium on Artificial Intelligence and its Application on Media*; 2021 May 21-23; Xi'an, China. Piscataway, USA: IEEE; 2021. p. 116-20.
- [17] Shivappriya SN, Priyadarsini MJ, Stateczny A, Puttamadappa C, Paramesshachari BD. Cascade object detection and remote sensing object detection method based on trainable activation function. *Remote Sensing* 2021;13:200.
- [18] Zhuang X, Kang W, Wu Q. Real-time vehicle detection with foreground-based cascade classifier. *IET Image Processing* 2016;10(4):289-96.
- [19] Archana R, Jeevaraj PSE. Deep learning models for digital image processing: a review. *Artificial Intelligence Review* 2024;57:11.

- [20] Shin HC, Roth HR, Gao M, Lu L, Xu Z, Nogues I, et al. Deep convolutional neural networks for computer-aided detection: CNN architectures, dataset characteristics and transfer learning. *IEEE Transactions on Medical Imaging* 2016;35(5):1285-98.
- [21] Wang L, Zhang Y, Feng J. On the Euclidean distance of images. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 2005;27(8):1334-9.

Author's Profile



Asst.Prof.Sa-nga Songmuang: Vice-Dean for Administration Affairs and Student Affairs, Kasem Bundit University, Faculty of Science and Technology, 60 Romklao Road, Minburi District, Bangkok 10510, Thailand. E-mail: sa-nga.son@kbu.ac.th

Article History:

Received: February 19, 2024

Revised: October 3, 2024

Accepted: October 4, 2024

การเพิ่มสมบัติเชิงกลและการต้านทานรังสียูวีของวัสดุเชิงประกอบ
ยางธรรมชาติผสมนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์

ENHANCEMENT OF MECHANICAL AND UV PROTECTION PROPERTIES
OF NANO-TITANIUM DIOXIDE/NATURAL RUBBER COMPOSITES

พีรวัส คงสง¹ และ มาหามะสุไฮมี มะแซ²

¹อาจารย์, สาขาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี
ราชมงคลอีสาน 744 ถ. สุรนารายณ์ ต. ในเมือง อ. เมือง จ. นครราชสีมา 30000,
physics_psu@windowsslive.com

²อาจารย์, สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
1 ถ. ราชดำเนินนอก ต. บ่อหย่าง อ. เมือง จ. สงขลา 90000, susumeme1983@yahoo.com

Peerawas Kongsong¹ and Mahamasuhaimi Masae²

¹Lecturer, Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering and Technology,
Rajamangala University of Technology Isan, 744, Suranarai Rd., Muang,
Nakhon Ratchasima, 30000 Thailand,
physics_psu@windowsslive.com

²Lecturer, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala
University of Technology University 1, Ratchadamnoennok Rd., Bo Yang, Muang
Songkhla, Songkhla, 90000 Thailand, susumeme1983@yahoo.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของการเติมผงนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติภายใต้รังสียูวี เตรียมวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติกับผงนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปริมาณ 0, 1, 2, 3 และ 4 phr ในเครื่องบดแบบสองลูกกลิ้ง ขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป ทดสอบความต้านทานแรงดึง และทำการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาพบว่า จากการทดสอบสมบัติทางสัณฐานวิทยาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ผงนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์มีการกระจายตัวที่ดี ส่งผลให้มีค่าสมบัติเชิงกลดีขึ้นตามปริมาณของการเติมผงนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ จากการตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง แสดงให้เห็นถึงลักษณะรอยแตกของวัสดุเชิงประกอบระหว่างผงนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์

และยางธรรมชาติที่ผ่านการฉายยูวีเป็นเวลา 30 วัน ที่ปริมาณ 0, 1, 2, 3, และ 4 phr แสดงให้เห็นถึงผิวรอยแตกของยางธรรมชาติที่เสียหายภายหลังการฉายรังสียูวี โดยพบว่ารอยแตกลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณผงนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์

คำสำคัญ: ยางธรรมชาติ, วัสดุเชิงประกอบ, นาโนไทเทเนียมไดออกไซด์, ยูวี, การบ่มเร่ง

ABSTRACT

The purpose of this research was to study the influence of adding titanium dioxide nanoparticles on the mechanical properties of natural rubber under UV radiation. The composite was prepared by mixing natural rubber with titanium dioxide nanoparticles at quantities 0, 1, 2, 3, and 4 phr in a two-roll rubber mill. The composites were molded using a compression molding machine, and tensile strength tests were conducted along with morphological studies. The morphological properties observed using a scanning electron microscope revealed that the titanium dioxide nanoparticles were well dispersed, leading to improved mechanical properties with increasing amounts of titanium dioxide nanoparticles. Optical microscope showed the crack patterns of the composite material between titanium dioxide nanoparticles and natural rubber after UV exposure for 30 days at 0, 1, 2, 3, and 4 phr. The results indicated that the cracks on the natural rubber surface decreased as the amount of titanium dioxide nanoparticles increased.

KEYWORDS: natural rubber, composite, nano-titanium dioxide, UV, aging

1. บทนำ

ยางธรรมชาติจัดเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย ปัจจุบันมีการนำยางธรรมชาติไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ มากมาย ยางธรรมชาติมีสมบัติที่เด่น ได้แก่ การทนต่อแรงดึง มีความยืดหยุ่นสูง ความร้อนภายในที่เกิดขณะใช้งานต่ำ และมีสมบัติการเหนียวติดกันที่ดี จึงเหมาะสำหรับการผลิตยางรถบรรทุก ยางล้อเครื่องบิน หรือใช้ผสมกับยางสังเคราะห์ในการผลิตยางรถยนต์ นอกจากนั้นยังมีความต้านทานต่อการฉีกขาดสูง ทั้งที่อุณหภูมิต่ำและอุณหภูมิสูง แม้ว่ายางธรรมชาติมีสมบัติที่ดีเหมาะสำหรับการสร้างผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ มากมาย [1] แต่ยางธรรมชาติก็มีข้อเสียหลัก คือ การเสื่อมสภาพเร็วภายใต้แสงแดด ออกซิเจน โอโซน และความชื้น เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติมีพันธะคู่อยู่มาก ทำให้ยางธรรมชาติมีความว่องไวต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและโอโซน โดยมีแสงแดดและความชื้นเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์จากยางจึงต้องมีการเติมสารเคมีในกลุ่มของสารป้องกันการเสื่อมสภาพ

ของยาง (Antidegradants) เพื่อยืดอายุการใช้งาน และทำให้ยางธรรมชาติมีสมบัติที่ดีขึ้นในด้านการป้องกันแสงแดด ซึ่งสารที่ใช้เติมให้ยางธรรมชาติมีสมบัติตามที่ต้องการตามข้างต้น ได้แก่ ไอโซพรีนิลฟีนิลฟีนิลลีนไดเอมีน (IPPD) ไทเมทิลไดไฮโดรควิโนลีน (TMQ) ไดบิวทิลครีโซล (BHT) และไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เป็นต้น ผงนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์มีการใช้กันอย่างแพร่หลาย เป็นสารตัวเติมในพอลิเมอร์เชิงประกอบหลายชนิด เนื่องจากสามารถช่วยให้พอลิเมอร์มีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น ผงนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์มีอิทธิพลต่อการเสริมแรงและความคงตัวทางความร้อนของพอลิเมอร์เชิงประกอบ [2-4]

ผงนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ เป็นสารประกอบออกไซด์ของโลหะไทเทเนียม ที่ถูกนำมาใช้มากในอุตสาหกรรมด้านต่าง ๆ ปัจจุบันมีการนำผงนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์มาใช้ประโยชน์มากในรูปแบบรูไทล์ (Rutile) ซึ่งเกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมในด้านต่าง ๆ ได้แก่ สีน้าสุภาพ เครื่องสำอาง เสื้อผ้า และอุตสาหกรรมสี เนื่องจากรูไทล์สามารถดูดกลืนและหักเหแสงช่วงที่ตามองเห็นได้สูง อนุภาคขนาดเล็ก มีค่าดัชนีหักเหสูงสะท้อนแสงได้ดี [5] ส่วนชนิดอะนาเทส (Anatase) นิยมใช้ในกระบวนการใช้แสงขั้นสูง การนำมาใช้ประโยชน์เกี่ยวข้องกับด้านต่าง ๆ ได้แก่ ใช้สำหรับสารให้สี สารเคลือบผลิตภัณฑ์ สารกึ่งตัวนำผลิตกระแสไฟฟ้า ใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ด้านการบำบัดมลพิษ ฆ่าเชื้อโรคในน้ำและอากาศ สร้างพื้นผิวทำความสะอาดตัวเอง และใช้เป็นส่วนผสมในเครื่องสำอาง เพราะเฟสอะนาเทสให้ผลปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติกที่ดีกว่าเฟสรูไทล์ และสามารถดูดซับรังสียูวีได้ดี แต่การนำทั้งสองเฟสมาผสมกันยังให้ผลที่ดีกว่า เนื่องจากเฟสผสมถูกกระตุ้นด้วยแสงทำให้อิเล็กตรอนในแถบเวเลนซ์ของรูไทล์ถูกกระตุ้นได้ง่ายกว่าเนื่องจากมีแถบช่องว่างพลังงานเท่ากับ 3.02 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งน้อยกว่าอะนาเทสที่มีแถบช่องว่างพลังงานเท่ากับ 3.20 อิเล็กตรอนโวลต์ ทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่มายังแถบการนำของรูไทล์และเกิดการหน่วงการกลับมารวมกันของอิเล็กตรอนและหลุมประจุบวก นอกจากนั้นรูไทล์จะทำหน้าที่เป็นตัวกักอิเล็กตรอนไว้ เมื่อเฟสผสมถูกกระตุ้นด้วยพลังงานอิเล็กตรอนในแถบเวเลนซ์ของรูไทล์จะถูกกระตุ้นได้ง่ายกว่า เนื่องจากมีช่องว่างแถบพลังงานน้อยกว่าอะนาเทส แต่อิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นไปสู่แถบการนำแล้วกลับมารวมกับหลุมประจุบวกในแถบเวเลนซ์ได้อย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตามเมื่อมีอะนาเทสผสมอยู่ด้วย อะนาเทสจะทำหน้าที่กักอิเล็กตรอนไว้ และในที่สุดอิเล็กตรอนปรากฏผิวทำให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติกได้ โครงสร้างเฟสผสมนี้ เช่น ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ Degussa P25 ที่มีอัตราส่วนผสมระหว่างเฟสอะนาเทสต่อรูไทล์เท่ากับ 85:15 เปอร์เซนต์ นอกจากนี้ยังมีการนำผงนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์มาใช้เป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพของยางธรรมชาติ เพราะไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีสมบัติในการสะท้อน (Reflect) การกระเจิง (Scatter) และการดูดซับ (Absorb) รังสียูวีที่ดี [6-12] จากการศึกษาโดยการนำผงไทเทเนียมไดออกไซด์เฟสรูไทล์ขนาด 75 นาโนเมตร ผสมกับยางธรรมชาติพบว่า การเพิ่มปริมาณรูไทล์ส่งผลให้การเสื่อมสภาพของยางลดลงภายใต้การฉายรังสียูวี โดย

พื้นผิวของยางจะมีรอยแตกลดลง นอกจากนี้วัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่ผสมรูไทล์จะมีผลในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียอีกด้วย แต่ในงานวิจัยนี้ขนาดอนุภาครูไทล์ยังมีขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับไทเทเนียมไดออกไซด์ Degussa P25 [13] ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกไทเทเนียมไดออกไซด์ Degussa P25 ที่มีส่วนผสมของรูไทล์ที่มีสมบัติในการสะท้อนแสงที่ดีและอะนาเทสที่ดูดซับแสงยูวีได้ดี และยังมีขนาดอนุภาคที่เล็กมาก (20 นาโนเมตร) ซึ่งจะช่วยให้สมบัติเชิงกลให้ยาง โดยอนุภาคที่เล็กจะมีการกระจายตัวที่ดี ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มสมบัติเชิงกลโดยการเสริมแรงให้กับวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ [14]

ดังนั้นคณะวิจัยจึงมีความน่าสนใจเกี่ยวกับการนำยางธรรมชาติมาผสมกับอนุภาคผงนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ เพื่อปรับปรุงสมบัติของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติให้มีความทนทานภายใต้การฉายรังสียูวี โดยศึกษาปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสมที่สามารถเพิ่มสมบัติเชิงกลและคงความแข็งแรงเมื่อผ่านการฉายรังสียูวี

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 ขั้นตอนการเตรียมยางคอมพาวด์

นำยาง STR 5L ปริมาณ 300 กรัม มาทำการบดผสมในเครื่องบดผสม 2 ลูกกลิ้ง (Two-roll mill ยี่ห้อ รุ่น ML-D6L12 INV) บดยางจนพ่นลูกกลิ้งและผิวเรียบสม่ำเสมอ ใช้เวลา 5 นาที หลังจากนั้นเติมสารเคมียางตามลำดับดังตารางที่ 1 เริ่มต้นเติมสารกระตุ้นกรดสเตียริก (Steric acid) 2 phr ในการผสมสารเคมียาง ผสมสารลำดับก่อนให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกัน ก่อนเติมสารเคมีชนิดอื่นตามลำดับ ตามด้วยสารกระตุ้นซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO) 4 phr สารเร่งปฏิกิริยาเตตระเมทิลไทอูรัมไดซัลไฟด์ (Tetramethylthiuram disulphide, TMTD) 3.5 phr และสารเร่งปฏิกิริยาไซโคลเฮกซิลเบนโซไทโอะโซลซัลฟิไนด์ (N-cyclohexyl-2-benzothiazole sulfonamide, CBS) 1 phr เติมสารทำให้ยางคงรูป กำมะถัน (Sulphur) 0.5 phr ในลำดับสุดท้ายเติมสารตัวเติมไทเทเนียมไดออกไซด์ (P25 TiO₂ Degussa Co, Germany (Titanium oxide, TiO₂, Degussa, Rutile: Anatase 85:15, 99.9%, 20 nm, 50 m²/g)) 0, 1, 2, 3 และ 4 phr และตั้งยางคอมพาวด์ทิ้งไว้อย่างน้อย 16 ชั่วโมง

2.2 การขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปแม่พิมพ์อัด

ทำการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยกระบวนการอัดเข้าแม่พิมพ์ โดยเครื่องขึ้นรูปแบบอัด (Compression molding, รุ่น PR2D-W300L350 PM-PCL-HMI ยี่ห้อ Chareon) โดยตั้งค่าอุณหภูมิในการขึ้นรูปที่ 150 °C นำยางที่บดย่อยเสร็จแล้วไปใส่ในแม่พิมพ์จนเต็ม เมื่ออุณหภูมิถึงค่าที่ตั้งไว้แล้วให้นำแม่พิมพ์ไปใส่ในเครื่องอัดขึ้นรูป โดยใช้เวลารวม 20 นาที ให้ความร้อนก่อนการอัดเท่ากับ 10 นาที

เวลาในการอัด 10 นาที ความดัน 110 MPa เมื่อครบเวลานำแม่พิมพ์ออกจากเครื่องขึ้นรูป แล้วนำชิ้นยางออกจากแม่พิมพ์และนำไปตัดตกแต่งให้สวยงามก่อนนำไปทดสอบ

ตารางที่ 1 อัตราส่วนของการผสมยางคอมพาวด์

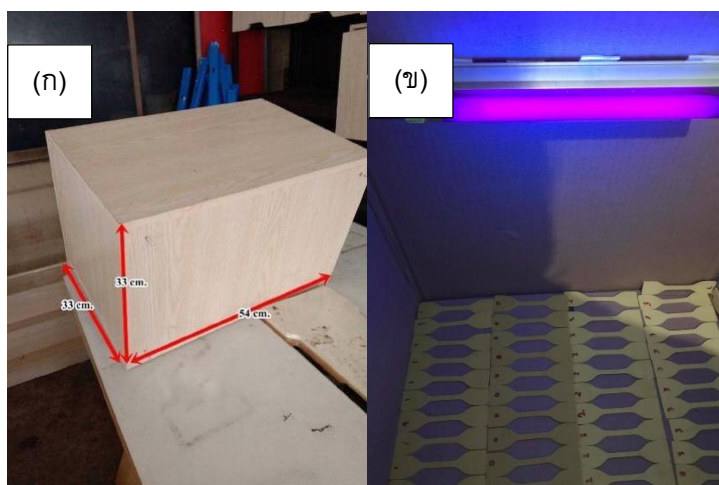
ส่วนผสม	ปริมาณ (phr)
ยางธรรมชาติ STR 5L	100
สเตียริกแอซิด (Steric acid) (สารกระตุ้น)	2
ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO) (สารกระตุ้น)	4
เตตระเมทิลไทูรัมไดซัลไฟด์ (Tetramethylthiuram disulphide, TMTD) (สารเร่งปฏิกิริยา)	3.5
ไซโคลเฮกซิลเบนโซโซลซัลไฟน์ไมด์ (N-cyclohexyl-2- benzothiazole sulfonamide, CBS) (สารเร่งปฏิกิริยา)	1
สารกำมะถัน (Sulphur) (สารทำให้ยางคงรูป)	0.5
ผงนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide, TiO ₂) (สารตัวเติม)	0, 1, 2, 3 และ 4

2.3 การทดสอบสมบัติเชิงกลและการวิเคราะห์สัณฐานวิทยา

2.3.1 นำชิ้นยางที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปมาตัดให้ได้ขนาดความหนา 3 มิลลิเมตร ยาว 115 มิลลิเมตร ระยะห่างตัวรองรับตัวอย่าง (Gauge length) 33 มิลลิเมตร ความกว้างช่วง Gauge length 6 มิลลิเมตร ความเร็วการทดสอบ (Crosshead speed) 500 มิลลิเมตรต่อนาที การทดสอบสมบัติการต้านทานแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D412-06 ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง (Universal testing machine, UTM รุ่น LR 10K ยี่ห้อ LLOYD) เพื่อวัดค่าความเค้น (Stress) ความเครียด (Strain) และค่ายังส์มอดุลัส (Young's modulus)

2.3.2 ศึกษาลักษณะพื้นผิวของยางที่ผ่านการผสมและอัดขึ้นรูป โดยการนำยางที่ขึ้นรูปแล้วมาฉายรังสียูวีในชุดทดสอบการป้องกันรังสียูวีของยางที่ออกแบบขึ้น แสดงดังรูปที่ 1 ซึ่งกล่องมีขนาด 54×33×33 เซนติเมตร (รูปที่ 1(ก)) มีพัดลมสำหรับลดอุณหภูมิภายในกล่องทดสอบ โดยใช้หลอดไฟแบล็คไลท์ที่กำลัง 6 วัตต์ มีความยาวคลื่นในย่านยูวี (310–400 นาโนเมตร) โดยมีระยะห่างชิ้นงานกับหลอดไฟที่ 30 เซนติเมตร และใช้เวลาในการทดสอบเป็นเวลา 30 วัน เพื่อดูผลการทดสอบการป้องกันรังสียูวีของยาง การศึกษาสัณฐานวิทยาของผิวชิ้นงาน โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope, OM ยี่ห้อ OLYMPUS รุ่น BX60M) ใช้กำลังขยายที่ 200 เท่า และศึกษาการกระจายตัวของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ในเนื้อชิ้นงาน โดยการตัดชิ้นงานให้มีขนาดที่เหมาะสมกับสัดับ ตัดชิ้นงานลงบนสัดับด้วยเทปคาร์บอน นำไปเคลือบ

ผิวด้วยเครื่องเคลือบทอง (รุ่น MP-19020NCTR ยี่ห้อ Neo coater) ทำการทดสอบด้วย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุด้วยเทคนิค EDS (Scanning electron microscope and energy dispersive X-ray spectrometer, SEM-EDS รุ่น JSM-7800F ยี่ห้อ Jeol)



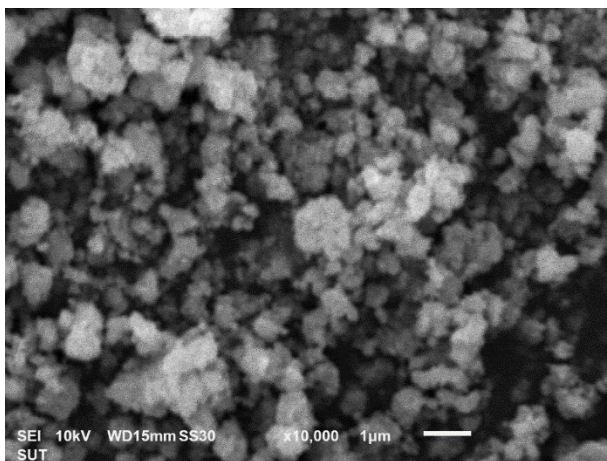
รูปที่ 1 ชุดทดสอบการป้องกันรังสียูวีของยาง (ก) กล่องจำลองรังสียูวี (ข) การฉายรังสียูวี โดยใช้หลอดไฟแบล็คไลท์ กำลัง 6 วัตต์

3 ผลการวิจัย

3.1 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาและการกระจายตัวของธาตุ

จากผลการตรวจสอบสัณฐานวิทยาของผงนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์และวัสดุเชิงประกอบระหว่างผงนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์และยางธรรมชาติด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เพื่อดูลักษณะและการกระจายตัวของผงนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบ แสดงดังรูปที่ 2 และ 3 จากรูปที่ 2 เป็นภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผงนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ก่อนนำไปผสมในยางธรรมชาติ (ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า) พบว่า ผงนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้นั้นมีลักษณะอยู่รวมกันเป็นกลุ่ม โดยมีขนาดเล็กในระดับนาโนและมีรูปร่างไม่แน่นอน เมื่อนำผงนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ไปผสมในยางธรรมชาติ และวิเคราะห์บริเวณพื้นผิวของภาคตัดขวางชิ้นงานเพื่อวิเคราะห์การกระจายตัวของผงนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ในเนื้อยางที่ปริมาณ 0, 1, 2, 3, และ 4 phr (ดังแสดงในรูปที่ 3) พบว่า ผงนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์มีการกระจายตัวที่ดีในเนื้อยางและไม่จับตัวกันเป็นก้อน เมื่อเติมผงนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ในปริมาณที่มากขึ้น พบปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์

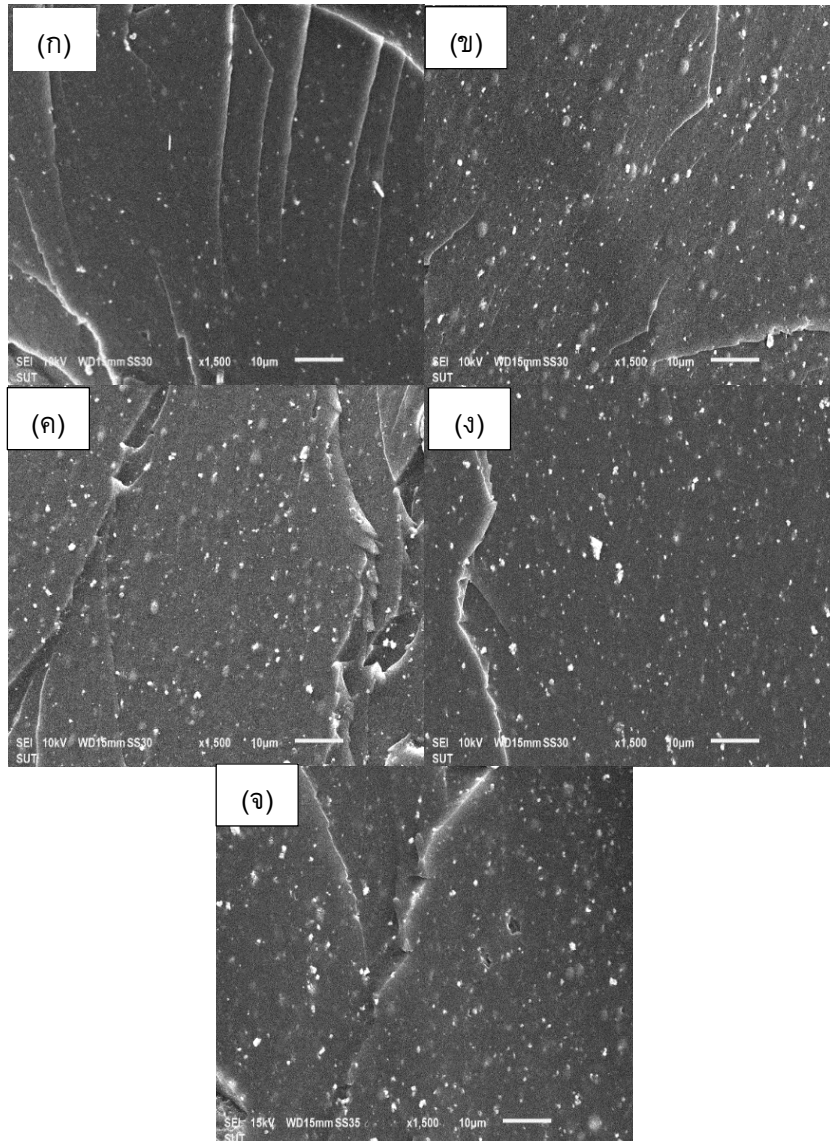
มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณผงนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติม เมื่อนำชิ้นงานทดสอบที่มีการเติมปริมาณผงนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ 4 phr (รูปที่ 3 (จ)) ซึ่งเป็นสูตรที่มีการเติมปริมาณผงนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์มากที่สุดไปวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุและปริมาณธาตุด้วยเทคนิค EDS mapping (ดังแสดงในรูปที่ 4 และ 5) จากรูปที่ 4 ซึ่งเป็นผลการกระจายตัวของธาตุ พบว่า บนผิวชิ้นงานมีการกระจายตัวที่ดีของธาตุต่าง ๆ โดยมีธาตุ C, O, Zn และ Ti บนผิวชิ้นงาน เมื่อทำการวิเคราะห์เชิงปริมาณ โดยผลการวิเคราะห์แสดงในรูปที่ 5 บนผิวตัวอย่างมีธาตุ C, O, Zn และ Ti คิดเป็น 94.95, 1.50, 2.41 และ 1.14% ตามลำดับ จากผลการวิเคราะห์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและเทคนิค EDS mapping ทำให้เห็นว่าผงนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์มีการกระจายตัวที่ดีในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ ซึ่งส่งผลที่ดีกับสมบัติเชิงกลของยาง [14]



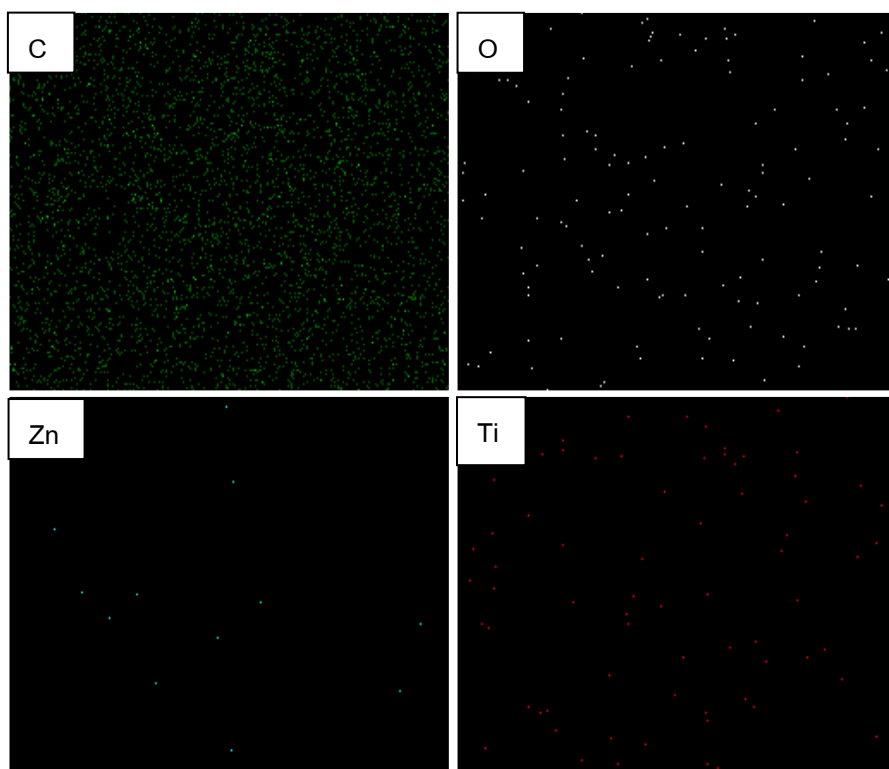
รูปที่ 2 ภาพถ่ายของผงนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 10,000 เท่า

จากผลการตรวจสอบมาตรฐานวิทยาศาสตร์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงของวัสดุเชิงประกอบระหว่างผงนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์และยางธรรมชาติที่ปริมาณผงนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ 0, 1, 2, 3, และ 4 phr (กำลังขยาย 200 เท่า) เพื่อดูลักษณะความเสียหายของชิ้นงานที่ผ่านการฉายรังสียูวีเป็นเวลา 30 วัน ซึ่งส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบ ดังแสดงในรูปที่ 6 จากรูปแสดงให้เห็นถึงลักษณะรอยแตกของผิวชิ้นงาน ซึ่งบ่งบอกถึงลักษณะการเสียหายภายหลังการฉายรังสียูวี เห็นได้ว่ายางธรรมชาติที่ไม่มีการเติมผงนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์พบรอยแตกบนผิวทั่วชิ้นงาน (รูปที่ 6 (ก)) สำหรับพื้นผิววัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ 1 phr พบรอยแตกเล็กน้อยดังวงกลมสีแดงในรูปที่ 6 (ข) เมื่อเพิ่มปริมาณผงนาโน

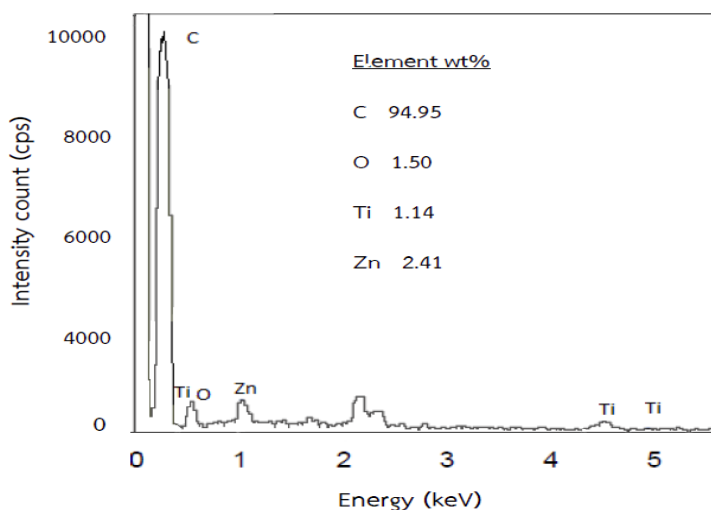
ไทเทเนียมไดออกไซด์มากขึ้น (2, 3, และ 4 phr) พบว่าไม่พบรอยแตก เนื่องจากการดูดซับและการสะท้อนแสงยูวีของผงนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ส่งผลให้ยังมีการเสื่อมสภาพลดลง [12-13, 15]



รูปที่ 3 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดบริเวณพื้นผิวของภาคตัดขวางชิ้นงานของวัสดุเชิงประกอบระหว่างผงนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์และยางธรรมชาติ ปริมาณผงนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ (ก) 0 phr, (ข) 1 phr, (ค) 2 phr, (ง) 3 phr และ (จ) 4 phr กำลังขยาย 1,500 เท่า



รูปที่ 4 ผลการวิเคราะห์ EDS mapping ของวัสดุเชิงประกอบระหว่างผงนาโนไทเทเนียม ไดออกไซด์และยางธรรมชาติ ปริมาณผงนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ 4 phr



รูปที่ 5 ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุของวัสดุเชิงประกอบระหว่างผงนาโนไทเทเนียม ไดออกไซด์ (4 phr) และยางธรรมชาติด้วยเทคนิค EDS



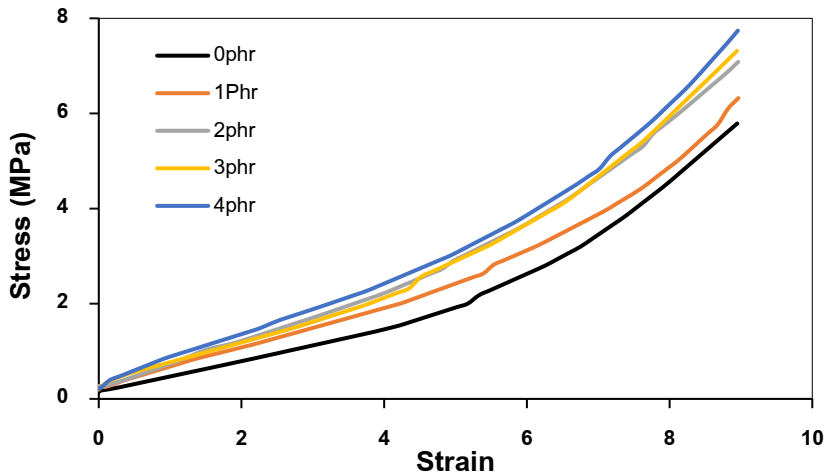
รูปที่ 6 ภาพถ่ายพื้นผิววัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติผสมผงนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ (ก) 0 phr, (ข) 1 phr, (ค) 2 phr, (ง) 3 phr และ (จ) 4 phr ที่ผ่านการฉายรังสียูวีเป็นเวลา 30 วัน กำลังขยาย 200 เท่า

3.2 ผลการทดสอบความต้านทานแรงดึง

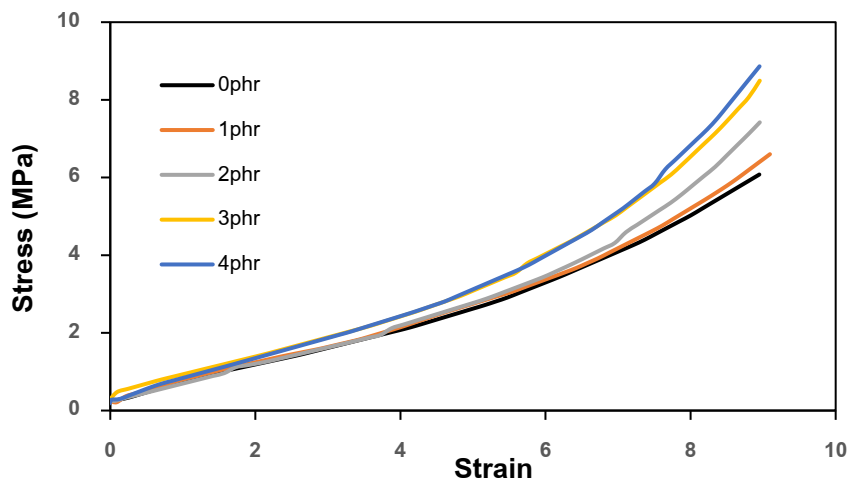
ในการทดสอบความต้านทานแรงดึงของตัวอย่างวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่ผสมผงนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปริมาณ 0, 1, 2, 3 และ 4 phr พบว่า ชิ้นงานไม่ขาดในช่วงที่มีการทดสอบเนื่องจากวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติมีการยึดตัวที่ดี ซึ่งไม่สามารถคำนวณค่าความทนแรงดึง

สูงสุดและค่าการยืดตัวเมื่อขาดได้ จากรูปที่ 7 และ 8 แสดงค่าเฉลี่ยความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุเชิงประกอบระหว่างผงนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ทั้งก่อนและหลังการฉายรังสียูวี จากผลการศึกษา พบว่า การเพิ่มปริมาณผงนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ค่าความเค้นมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการเติมผงนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ช่วยเสริมแรงให้กับวัสดุเชิงประกอบอย่างธรรมชาติ [12] ส่งผลให้ค่าความเค้นมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เติมลงไป และผงไทเทเนียมไดออกไซด์มีการกระจายตัวที่ดี ดังแสดงในรูปที่ 4 เมื่อเปรียบเทียบความเค้นและความเครียดก่อนและหลังฉายรังสียูวี พบว่าวัสดุเชิงประกอบอย่างธรรมชาติหลังฉายรังสียูวีมีค่าความเค้นมีแนวโน้มสูงขึ้น เนื่องจากการบ่มเร่งภายใต้แสงยูวีมีผลต่อความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยง (Crosslink density) ส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบอย่างธรรมชาติมีความแข็งแรงมากขึ้น ทำให้แนวโน้มค่าความเค้นหลังฉายรังสียูวีมีแนวโน้มมากกว่าก่อนฉายรังสียูวี [12, 15] เมื่อนำกราฟความเค้นและความเครียดมาคำนวณค่ามอดุลัสแรงดึง ดังแสดงในรูปที่ 9 เมื่อพิจารณาค่ามอดุลัสแรงดึง พบว่าค่ามอดุลัสแรงดึงมีแนวโน้มที่สูงขึ้นเป็นผลมาจากการเพิ่มอัตราส่วนผสมของผงนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ในขณะเดียวกันการเพิ่มอัตราส่วนผสมของผงนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ 4 phr มีค่ามอดุลัสแรงดึงที่สูงที่สุด รองลงมาคืออัตราส่วนผสมของผงนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ 3, 2, 1 phr ตามลำดับ และสูตรที่ไม่เติมผงนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์มีค่ามอดุลัสแรงดึงที่น้อยที่สุด แสดงให้เห็นว่าเมื่อเติมผงนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ส่งผลให้สมบัติเชิงกลดีขึ้น เนื่องจากผงนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์เข้าไปช่วยเสริมแรงให้กับวัสดุเชิงประกอบอย่างธรรมชาติ [14] เมื่อเปรียบเทียบกับหลังการฉายรังสียูวี พบว่า ค่ามอดุลัสแรงดึงมีค่าลดลง เนื่องจากการเสื่อมสภาพของยางที่เกิดจากแสงยูวี ส่งผลให้พื้นผิวของวัสดุเชิงประกอบอย่างธรรมชาติมีรอยแตก ดังแสดงในรูปที่ 6 เมื่อเพิ่มปริมาณผงนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ พบว่า ค่ามอดุลัสแรงดึงมีแนวโน้มสูงขึ้น เนื่องจากผงนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มากขึ้นช่วยลดการสึกกร่อนและสะท้อนรังสียูวีได้มากขึ้น ซึ่งช่วยปกป้องวัสดุเชิงประกอบอย่างธรรมชาติจากการเสื่อมสภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยที่ไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถดูดกลืนรังสียูวีได้ในช่วงความยาวคลื่น 275 ถึง 405 นาโนเมตร เพราะไทเทเนียมไดออกไซด์มีแถบพลังงานที่เหมาะสมสำหรับการดูดกลืนรังสีในช่วงนี้ ซึ่งจะเกิดการสร้างคู่อิเล็กตรอนและโฮล (Electron-hole pairs) ที่สามารถทำปฏิกิริยากับสารต่าง ๆ บนพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ นอกจากนี้ไทเทเนียมไดออกไซด์ยังมีการสะท้อนรังสียูวีที่ดี เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์มีดัชนีหักเหสูง (High refractive index) ซึ่งทำให้สามารถสะท้อนรังสียูวีได้อย่างมีประสิทธิภาพ [16-17] การสะท้อนนี้ช่วยลดปริมาณรังสียูวีที่สามารถทะลุผ่านวัสดุเชิงประกอบได้ ดังนั้นการเติมไทเทเนียมไดออกไซด์ในยางธรรมชาติจึงช่วยเพิ่มความทนทานต่อรังสียูวีและลดการเสื่อมสภาพของวัสดุได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลต่อค่ามอดุลัสแรงดึงที่สูงกว่าการไม่เติมหรือเติมผงนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ในปริมาณที่น้อยกว่า [12] และเมื่อเติมผงนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์มากขึ้น พบว่า

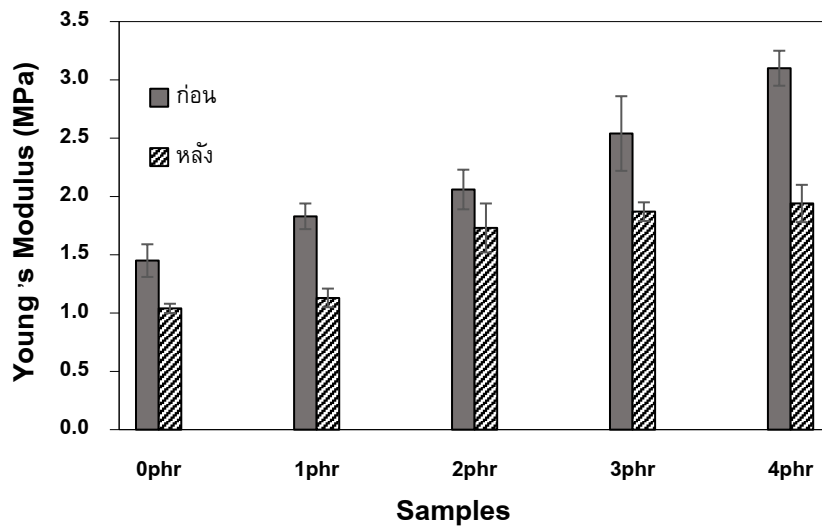
ไม่มีรอยแตกที่ผิวภายหลังการฉายรังสียูวี ซึ่งส่งผลให้ยางมีค้ำยังมอดุลัสแรงดึงที่ดีกว่าการเติมผงนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ 1 phr และ 0 phr



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของผงนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปริมาณ 0, 1, 2, 3 และ 4 phr ที่ผสมในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ ก่อนฉายรังสียูวี



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของผงนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปริมาณ 0, 1, 2, 3 และ 4 phr ที่ผสมในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ หลังฉายรังสียูวี เป็นเวลา 30 วัน



รูปที่ 9 ค่าเฉลี่ยของค่ายังมอดุลัสแรงดึงของผงนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปริมาณ 0, 1, 2, 3, และ 4 phr ที่ผสมในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ ก่อนและหลังฉายรังสียูวีเป็นเวลา 30 วัน

4. สรุปผลการวิจัย

การต้านรังสียูวีของวัสดุเชิงประกอบระหว่างผงนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์และยางธรรมชาติ โดยทำการบดผสมยางธรรมชาติกับสารเคมียางและเติมผงนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเครื่องผสมแบบ 2 ลูกกลิ้ง ขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปร้อน ทำการตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาและทดสอบสมบัติเชิงกลก่อนและหลังการทดสอบภายใต้รังสียูวีเป็นระยะเวลา 30 วัน สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

4.1 จากผลการตรวจสอบสัณฐานวิทยาและการกระจายตัวของธาตุของผงนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์และวัสดุเชิงประกอบระหว่างผงนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์และยางธรรมชาติด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและ EDS พบว่า ผงนาโนไทเทเนียมผงนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์มีขนาดเล็กในระดับนาโนและมีรูปร่างไม่แน่นอน มีการกระจายตัวที่ดีในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ

4.2 จากการตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงของวัสดุเชิงประกอบระหว่างผงนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์และยางธรรมชาติที่ผ่านการฉายรังสียูวีเป็นเวลา 30 วัน พบว่า วัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่ไม่มีการเติมผงนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์พบรอยแตกที่ผิวทั่วชิ้นงาน จากนั้นรอยแตกลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณผงนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์มากขึ้น

4.3 การเพิ่มปริมาณผงนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ ส่งผลให้ค่าความเค้นและค่ามอดุลัสแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เป็นผลมาจากผงนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์เข้าไปช่วยเสริมแรงให้กับวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ เมื่อนำชิ้นงานไปฉายรังสียูวี พบว่าค่ามอดุลัสแรงดึงมีแนวโน้มลดลง

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ สาขาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่สนับสนุนเอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์ต่าง ๆ ในการวิจัย ขอขอบคุณนางสาวสาวิตรี ดับทฤกษ์รัฐ ที่ช่วยดำเนินการและรวบรวมผลในการวิจัยครั้งนี้ จึงขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้ด้วย

References

- [1] Rubbercenter and Technology Co., Ltd. Rubber [Internet]. [updated 2022 May 26; cited 2022 Jul 19]. Available from: <https://www.rubbercenter.co.th/content/27439>. (In Thai)
- [2] Findik F, Yilmaz Y, Köksal T. Investigation of mechanical and physical properties of several industrial rubbers. Materials and Design 2004;25(4):269-76.
- [3] Phoempoon P. Carbon nanotubes-rubber blend (natural rubber-styrenebutadiene rubber) composite [thesis]. Songkhla, Thailand: Prince of Songkla University; 2009. (In Thai)
- [4] Hayeemasae N, Surya I, Ismail H. Morphology and thermal stability of nano titanium dioxide filled natural rubber prepared by latex mixing method. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2018;309:012110. doi: 10.1088/1757-899X/309/1/012110.
- [5] Aiemsard P. The modification of amorphous TiO₂ surface for the color retention of lake pigment [thesis]. Nakhon Pathom, Thailand: Silpakorn University; 2016. (In Thai)
- [6] Sikong L. Titanium dioxide photocatalyst. Songkhla: C.P. Printing; 2017. (In Thai)
- [7] Kongsong P, Phoempoon P, Masae M. Photocatalytic efficiency of potassium doped TiO₂ nanowire-nanoparticle hetero-structured films coated on glass substrate under visible light irradiation. Journal of Materials Science and Applied Energy 2018;7(2):300-6.
- [8] Masae M, Sririkun W, Kongsong P. Enhancement of band gap and electrical conductivity properties of TiO₂ nanowire by Ni with hydrothermal method. Journal of Materials Science and Applied Energy 2022;11(1):1-8.

- [9] Kongsong P, Jantaporn W, Masae M. Enhanced photocatalytic activity of Ni doped TiO₂ nanowire–nanoparticle hetero–structured films prepared by hydrothermal and sol–gel methods. *Surface and Interface Analysis* 2020;52(8):486-92.
- [10] Mehrnaz S, Kongsong P, Taleb A, Dokhane N, Sikong L. Large scale and facile synthesis of Sn doped TiO₂ aggregates using hydrothermal synthesis. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 2019;189:254-62.
- [11] Kongsong P, Taleb A, Masae M, Jeenarong A, Hansud P, Khumruean S. Effect of nitrogen doping on the photocatalytic activity and hydrophobic property of rutile TiO₂ nanorods array. *Surface and Interface Analysis* 2018;50(12-13):1271-7.
- [12] Zhang H, Yang H, Shentu B, Chen S, Chen M. Effect of titanium dioxide on the UV-C ageing behavior of silicone rubber. *Journal of Applied Polymer Science* 2018;135(14):46099-106.
- [13] Seentrakoon B, Junhasavasdikul B, Chavasiri W. Enhanced UV-protection and antibacterial properties of natural rubber/rutile-TiO₂ nanocomposites. *Polymer Degradation and Stability* 2013;98(2):566-78.
- [14] Thammachot N. *Engineering materials*. Bangkok, Thailand: SE-Education; 2015. (In Thai)
- [15] Zhang H, Yang H, Shentu B. Effect of surface modification of titanium dioxide on the UV-C aging behavior of silicone rubber. *Journal of Applied Polymer Science* 2019;136(10):47170-80.
- [16] Noman MT, Ashraf MA, Ali A. Synthesis and applications of nano-TiO₂. *Environmental Science and Pollution Research* 2019;26:3262-91.
- [17] Mhadhbi M, Abderazzak H, Avar B. Synthesis and properties of Titanium Dioxide nanoparticles [Internet]. *Updates on Titanium Dioxide*. IntechOpen; 2023. Available from: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.111577>.

ประวัติผู้เขียนบทความ



ผศ.ดร.พีรวัส คงสง สาขาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี เลขที่ 744 ต.ในเมือง อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000 หมายเลขโทรศัพท์ 044-233-073 ต่อ 3352 โทรศัพท์มือถือ 085-7884988 โทรสาร 044-233074 E-Mail: physics_psu@windowslive.com

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

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



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

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

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

Article History:

Received: May 1, 2024

Revised: October 3, 2024

Accepted: October 9, 2024

การประยุกต์ใช้เทคนิควิศวกรรมคั่นเซสำหรับการออกแบบและพัฒนา
ผลิตภัณฑ์กระเป๋าตังค์จากต้นคลุ้ม

APPLICATION OF KANSEI ENGINEERING TECHNIQUES FOR
THE DESIGN AND DEVELOPMENT OF WALLET FROM
DONAX CANNIFORMIS

อภิชาล ทองมั่ง กำเนิดว่า¹ ธยา ภิรมย์² สุรสิทธิ ระวังวงศ์^{3*} และ ชัยวัฒน์ภัทร เลาสัตย์⁴

^{1,2,3*}อาจารย์ สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล
ศรีวิชัย, 2/4 ถ.ราชดำเนินนอก ต.ปอ้อย อ.เมือง จ.สงขลา 90000

¹apichon.tk@rmutsv.ac.th, ²thaya.p@rmutsv.ac.th, ^{3*}surasit.r@rmutsv.ac.th

⁴อาจารย์ สาขาการออกแบบ คณะศิลปกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา
160 ม.4 ต.เขารูปช้าง อ.เมือง จ.สงขลา 90000, chaiwattanapat@gmail.com

Apichon Thongmung Kamnerdwam¹, Thaya Pirom², Surasit Rawangwong^{3*}
and Chaiwattanapat Laosat⁴

^{1,2,3*}Lecturer, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering,
Rajamankala University of Technology Srivijaya, 2/4 Ratchadamnoennok Rd.

Boyang Sub-district, Muang District, Songkhla 90000, Thailand,

¹apichon.tk@rmutsv.ac.th, ²thaya.p@rmutsv.ac.th, ^{3*}surasit.r@rmutsv.ac.th,

⁴Lecturer, Program in Design, Faculty of Fine Arts, Songkhla Rajabhat University,
160 Moo 4 Khao Rup Chang Sub-district, Muang District, Songkhla 90000, Thailand,
chaiwattanapat@gmail.com

* ผู้ประพันธ์บรรณกิจ (Corresponding author)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์กระเป๋าตังค์จากคลุ้มจักสาน โดย
การประยุกต์ใช้เทคนิควิศวกรรมคั่นเซ งานวิจัยนี้เริ่มจากการสำรวจและคัดเลือกคำแสดงความรู้สึก
หรือคำคั่นเซของลูกค้ำที่มีต่อผลิตภัณฑ์ จากนั้นสำรวจอารมณ์ ความรู้สึก และความต้องการของ
ลูกค้ำทั้งด้านความรู้สึกและด้านคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่มีต่อภาพตัวแทนผลิตภัณฑ์สำหรับนำไปใช้
ในการออกแบบผลิตภัณฑ์ ซึ่งแบบสอบถามที่ใช้ในการสำรวจข้อมูลเป็นแบบลิเคิร์ต ข้อมูลที่ใช้ใน

การสร้างแบบสอบถามที่ 3 ส่วนหลักคือ ส่วนคำแสดงขอบเขตความรู้สึก ส่วนขอบเขตคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ และภาพตัวแทนผลิตภัณฑ์ จากนั้นนำข้อมูลที่ได้จากการสำรวจมาวิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์เชิงปริมาณ ผลการวิจัยพบว่ามีความรู้สึกรู้สึกในการออกแบบผลิตภัณฑ์กระเป๋า สตางค์จากคลุ้มจักสานหลัก ๆ คือ กะทัดรัด โดดเด่น ใช้งานสะดวก ทันสมัย และสะดุดตา ทั้งพบว่าข้อกำหนดและคุณลักษณะสำหรับการออกแบบผลิตภัณฑ์กระเป๋า สตางค์จากคลุ้มจักสาน ประกอบด้วย ขนาดของผลิตภัณฑ์ ผิวสัมผัส วัสดุเปิด-ปิดกระเป๋า วัสดุเย็บขอบผลิตภัณฑ์ และรูปทรงของผลิตภัณฑ์ มีความสอดคล้องกับอารมณ์ ความรู้สึก และความต้องการของลูกค้ามากยิ่งขึ้น

คำสำคัญ: วิศวกรรมคันทเซ, การออกแบบทางอารมณ์, ต้นคลุ้ม, ผลิตภัณฑ์กระเป๋า สตางค์

ABSTRACT

The objective of this research is to design and develop a wallet product from Donax canniformis basketry by applying Kansei engineering techniques. This research began with a survey and selection of words expressing feelings or Kansei of customers towards the product. Then, explore the emotions, feelings, and needs of customers in terms of feelings and product characteristics towards product representative images for use in product design. The questionnaire used in the data survey was a Likert type. The data used to create the third questionnaire, the main part include, the words section expressing the extent of feelings, the scope of product features, and product representative images. The data obtained from the survey was then analyzed using quantitative analysis. The results of the research found that the words expressing the feelings in designing a wallet product from Donax canniformis wicker were compact, outstanding, convenient to use, modern, and eye-catching. In addition, the requirements and features for designing a wallet from Donax canniformis include product size, texture, material for opening and closing the bag, product edge sewing material, and product shape. It is more consistent with the emotions, feelings, and needs of customers.

KEYWORDS: Kansei Engineering, Emotional Design, Donax Canniformis, Wallet Product

1. บทนำ

ศิลปะพื้นบ้านเป็นศิลปะที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินชีวิตของมนุษย์ที่สืบทอดกันมา และพัฒนา มาเป็นเวลายาวนาน ศิลปะพื้นบ้านจึงเป็นกระจกสะท้อนให้เห็นวิถีชีวิตชาวบ้านแต่ละยุคสมัย [1] จังหวัดสตูล เป็นสังคมเกษตรกรรมการประมงและเป็นพื้นที่เพาะปลูกพืชไร่ พืชสวน นอกจากนี้ยัง

เป็นแหล่งภูมิปัญญาท้องถิ่นและการประกอบอาชีพด้านหัตถกรรมที่มีลักษณะมุ่งเน้นการผลิตเพื่อพึ่งพาตนเอง ผลิตภัณฑ์ต้นกลุ่มเป็นภูมิปัญญาท้องถิ่นของอำเภอทุ่งหว้า จังหวัดสตูล เนื่องจากพื้นที่จังหวัดสตูล มีต้นคลุ้มอยู่เป็นจำนวนมาก ซึ่งจุดเด่นของคลุ้มคือไม้ขึ้นรา จึงเป็นจุดเริ่มต้นให้ชุมชนนำเอาวัสดุมาขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เพื่อจำหน่าย [2] แต่ผลิตภัณฑ์ของวิสาหกิจชุมชนยังไม่ค่อยตอบสนองความต้องการของลูกค้าเพราะรูปแบบผลิตภัณฑ์ยังคงเป็นรูปแบบเดิม ๆ จึงทำให้ผู้บริโภคตัดสินใจเลือกซื้อยาก เพราะโดยทั่วไปทางกลุ่มผู้ผลิตจะมีความสามารถในการขึ้นรูป แต่ทางกลุ่มก็ยังมีข้อด้อยในด้านการออกแบบผลิตภัณฑ์ที่ยังไม่ตรงตามความต้องการของลูกค้าในเชิงคุณลักษณะและการใช้งาน เพราะผลิตภัณฑ์คลุ้มเป็นหัตถกรรมที่สานด้วยมือจึงมีข้อจำกัดในการออกแบบ [3] และจากการที่คณะผู้วิจัยได้ลงพื้นที่เพื่อสำรวจสภาพของกลุ่มวิสาหกิจชุมชนผู้ผลิตคลุ้ม กรณีศึกษา ตำบลนาทอน อำเภอทุ่งหว้า จังหวัดสตูล พบว่าทางกลุ่มฯ ยังคงผลิตผลิตภัณฑ์แบบเดิม ๆ ออกมาจำหน่าย ดังเช่น ฝาชี และ ตะกร้า เป็นต้น ซึ่งยังขาดการคิดค้นออกแบบและผลิตผลิตภัณฑ์ใหม่ ๆ ที่เป็นการเพิ่มมูลค่าสินค้าและสามารถตอบสนองความต้องการของลูกค้าได้ โดยเฉพาะลูกค้ากลุ่มวัยทำงานที่ถือเป็นลูกค้ากลุ่มเป้าหมายที่มีกำลังซื้อในปัจจุบัน ผู้วิจัยจึงมีความสนใจในการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์กระเป๋าสตางค์จากคลุ้มจักสาน ซึ่งตรงกับความต้องการขั้นต้นของทางกลุ่มฯ ในการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ดังกล่าว โดยประยุกต์ใช้เทคนิควิศวกรรมคันเซ (Kansei Engineering; KE) ซึ่งเป็นการแปลอารมณ์ความรู้สึกความต้องการของลูกค้าที่มีต่อผลิตภัณฑ์ให้เป็นแนวทางการออกแบบหรือข้อกำหนดเชิงคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ [4-7] ทั้งนี้วิศวกรรมคันเซจะเข้ามาช่วยในการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์กระเป๋าสตางค์ให้มีรูปแบบใหม่ตรงกับอารมณ์ความรู้สึกของผู้บริโภคมากที่สุด พร้อมให้มีประโยชน์ใช้สอยเหมาะสมกับกลุ่มผู้บริโภคที่เป็นกลุ่มวัยทำงานรวมถึงผู้ใช้งานทั่วไปในปัจจุบัน

ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและสำรวจความต้องการ และอารมณ์ความรู้สึกของลูกค้าที่มีต่อผลิตภัณฑ์ เพื่อนำไปสู่การออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์กระเป๋าสตางค์จักสานจากคลุ้มโดยประยุกต์ใช้เทคนิควิศวกรรมคันเซมาใช้ในการออกแบบผลิตภัณฑ์ ซึ่งเป็นงานทำมือจากวิสาหกิจชุมชนในท้องถิ่นและไม่มีคู่แข่งทางการตลาดมากนัก และในปัจจุบันลูกค้าส่วนใหญ่นิยมผลิตภัณฑ์จักสานซึ่งมีเอกลักษณ์ที่สวยงามและเป็นการอนุรักษ์ภูมิปัญญาพื้นบ้าน

2. วิธีการวิจัย

2.1 การเลือกขอบเขต

ผลิตภัณฑ์ที่ทำการศึกษา คือผลิตภัณฑ์กระเป๋าสตางค์จักสานจากคลุ้ม เนื่องจากผลิตภัณฑ์ยังมีรูปแบบที่ยังไม่หลากหลายและยังไม่เข้าถึงกลุ่มผู้บริโภค กลุ่มผู้ผลิตต้องการพัฒนาผลิตภัณฑ์ให้ตอบสนองความต้องการของลูกค้ามากขึ้น โดยมีขอบเขตกลุ่มเป้าหมายเป็นกลุ่มลูกค้าในพื้นที่

จังหวัดสตูลและจังหวัดสงขลาในวัยทำงานและผู้ใช้งานทั่วไปทั้งผู้หญิงและผู้ชาย

2.2 การกำหนดขอบเขตความรู้สึกรู้สึก

เป็นการคัดเลือกคำแสดงความรู้สึกหรือคำคันเซ (Kansei Word) ที่จะเชื่อมโยงกับคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ดังนี้

1) การรวบรวมคำแสดงความรู้สึก ได้รวบรวมคำแสดงความรู้สึกหรือคำคันเซที่สื่อถึงผลิตภัณฑ์กระแสตางค์จากกลุ่มจักสาน จำนวน 47 คำ มาจากหลายแหล่ง เช่น สื่ออินเทอร์เน็ตและหนังสือ

2) การคัดเลือกคำแสดงความรู้สึก โดยนำคำแสดงความรู้สึกที่ได้จากการรวบรวมคำแสดงความรู้สึกในขั้นตอนก่อนหน้าเพื่อคัดเลือกคำที่มีความสำคัญหรือมีผลกระทบต่อมุมมองการออกแบบเพื่อใช้ในการสื่อถึงผลิตภัณฑ์ ซึ่งการคัดเลือกคำแสดงความรู้สึกจะตัดสินใจจากค่าความเที่ยงตรง (Index of item objective congruence: IOC) ของคำแสดงความรู้สึกกับผลิตภัณฑ์ที่กำลังศึกษา คือกระแสตางค์จากต้นคลุ้ม โดยค่า IOC ที่มากกว่า 0.5 เพราะมีความเที่ยงตรงและยอมรับได้

3) การแปลความหมาย นำผลการคัดเลือกคำแสดงความรู้สึกที่ผ่านการคัดเลือกที่มีค่า IOC มากกว่า 0.5 ไปคัดกรองกับผู้เชี่ยวชาญด้านการออกแบบผลิตภัณฑ์ เพื่อคัดเลือกคำแสดงความรู้สึกที่สื่อถึงผลิตภัณฑ์มากที่สุด

ผู้วิจัยได้เอามาประยุกต์ใช้วัดความเที่ยงตรงของคำแสดงความรู้สึกที่เหมาะสมกับของผลิตภัณฑ์ที่ศึกษา

2.3 การกำหนดขอบเขตคุณลักษณะผลิตภัณฑ์

การได้มาซึ่งคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่แสดงถึงขอบเขตของคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ข้างต้นมีวัตถุประสงค์เพื่อนำไปใช้ในการสร้างข้อกำหนด โดยแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

1) การรวบรวมคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ เป็นการค้นหาคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่มีความสำคัญต่อการรับรู้และความรู้สึกของผู้บริโภค และทำการรวบรวมคุณลักษณะต่าง ๆ มาจากสื่ออินเทอร์เน็ตและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2) การคัดเลือกคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ ขั้นตอนนี้เป็นการรวบรวมคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ไปทำแบบสอบถามที่ 2 มีการให้คะแนนแบบลิเคิร์ต (Likert Scale) โดยมีเกณฑ์ในการคัดเลือก คือการหาค่าเฉลี่ยเลขคณิต

3) การกำหนดคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ การนำผลจากขั้นตอนก่อนหน้าไปคัดกรองกับผู้เชี่ยวชาญ เพื่อคัดเลือกคุณลักษณะที่มีความสำคัญที่สุดสำหรับกระแสตางค์จากกลุ่มจักสาน

2.4 การรวบรวมภาพผลิตภัณฑ์

ขั้นตอนนี้เป็นกระบวนการรวบรวมภาพตัวแทนผลิตภัณฑ์แต่ละภาพจะแตกต่างกัน เป็นกระเป๋าสตางค์ ที่มีคุณลักษณะผลิตภัณฑ์แตกต่างกันในหลาย ๆ รูปแบบ ซึ่งภาพได้ทำการ สืบค้นจากสื่ออินเทอร์เน็ต และกลุ่มจักสานต้นคลุ้มเป็นหลัก จากนั้นประยุกต์ใช้แผนภาพ ความสัมพันธ์ (Affinity Diagram) แบ่งกลุ่มตัวแทนผลิตภัณฑ์ที่แสดงถึงข้อกำหนดขอบเขต คุณลักษณะเพื่อนำไปทำแบบสอบถามที่ 3

2.5 การสร้างแบบสอบถามเพื่อทำการประเมินผลิตภัณฑ์

ขั้นตอนนี้เป็นการสร้างแบบสอบถามที่ 3 ที่มีองค์ประกอบของแบบสอบถาม 3 ส่วน คือ คำ คั่นเซที่แสดงขอบเขตความรู้สึก คุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่แสดงขอบเขตคุณลักษณะ และภาพ ตัวแทนผลิตภัณฑ์ เป็นข้อมูลผลการวิจัยในขั้นตอนก่อนหน้า จากนั้นเก็บข้อมูลจากกลุ่มผู้บริโภค เป้าหมาย จำนวน 246 คน

2.6 การสังเคราะห์

เป็นการประเมินแบบสอบถามด้วยหลักการทางสถิติและสรุปผล จากการเก็บแบบสอบถาม ที่ 3 นำผลที่ได้มาหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าแสดงความรู้สึกกับคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ โดย ประยุกต์ใช้หลักการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีเชิงปริมาณประเภท 1 (Quantification Theory Type 1 Analysis; QT1) มีขั้นตอนการวิเคราะห์ ดังนี้

1) รวบรวมผลจากการเก็บแบบสอบถามที่ 3 นำคะแนนที่ประเมินในแต่ละค่าแสดงความรู้สึก ของตัวแทนผลิตภัณฑ์แต่ละภาพมาหาค่าเฉลี่ยเพื่อดูแนวโน้มของข้อมูลว่าค่าแสดงความรู้สึกแต่ละ คำมีความสัมพันธ์กับตัวแทนผลิตภัณฑ์เพียงใด

2) วิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์พหุคูณยกกำลังสอง โดยนำส่วนของข้อมูลที่ได้จาก แบบสอบถามมาวิเคราะห์ผลด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ จะได้ค่า R-Square หรือค่า สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์พหุคูณกำลังสอง (MCC^2) โดยทั่วไปค่า MCC^2 จะมีค่าอยู่ระหว่าง -1.00 ถึง +1.00 สำหรับงานวิจัยนี้กำหนดค่า MCC^2 มากกว่า 0.7 จึงจะยอมรับผล [8]

3) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแสดงความรู้สึกกับคุณลักษณะผลิตภัณฑ์หลัก นำข้อมูลจาก แบบสอบถามมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าแสดงความรู้สึกกับคุณลักษณะผลิตภัณฑ์หลัก (Partial Correlation Coefficient; PCC) ที่มีน้ำหนักความสัมพันธ์มาก โดยมีระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.7

4) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแสดงความรู้สึกกับคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อย หาความสัมพันธ์ ระหว่างค่าแสดงความรู้สึกกับคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อย (Category Score; CS) ที่มีน้ำหนัก

ความสัมพันธ์มาก โดยกำหนดระดับนัยสำคัญ เท่ากับ 0.7 เพื่อกำหนดเป็นแนวทางที่ช่วยให้นักออกแบบมีข้อมูลพื้นฐานในการออกแบบผลิตภัณฑ์ให้ตรงต่อความต้องการ อารมณ์ และความรู้สึกของลูกค้า

2.7 การออกแบบและขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ต้นแบบ

นำเอาข้อกำหนดที่ได้จากการสรุปผลข้อมูลขั้นตอนก่อนหน้าให้กับทีมออกแบบเพื่อกำหนดเป็นแนวทางที่ช่วยให้นักออกแบบมีข้อมูลพื้นฐานในการออกแบบผลิตภัณฑ์และขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ต้นแบบกระเป๋าสตางค์จากกลุ่มจักสาน

2.8 การประเมินความพึงพอใจ

ขั้นตอนนี้เป็นการสร้างแบบสอบถามที่ 4 เพื่อสำรวจและประเมินความพึงพอใจของลูกค้าต่อผลิตภัณฑ์กระเป๋าสตางค์จากกลุ่มจักสานที่พัฒนาขึ้นมาใหม่โดยการหาขนาดของกลุ่มตัวอย่างจำนวน 246 คน ว่ามีผลระดับคะแนนความพึงพอใจในระดับเกณฑ์คะแนนใดของแต่ละค่าแสดงความรู้สึก

3. ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผล

ผลการประยุกต์ใช้เทคนิควิศวกรรมค้นหาลำดับการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์กระเป๋าสตางค์จากกลุ่มจักสาน สรุปผลการวิจัยได้ดังต่อไปนี้

3.1 ผลการกำหนดขอบเขตค่าแสดงความรู้สึก

จากการเก็บรวบรวมข้อมูลของคำค้นหาคำแสดงความรู้สึกที่ได้ผ่านการทำแบบสอบถามที่ 3 มีค่าแสดงความรู้สึกที่สื่อถึงผลิตภัณฑ์กระเป๋าสตางค์จากกลุ่มจักสาน จำนวนทั้งสิ้น 47 คำ โดยจากการวิเคราะห์ข้อมูลผู้ตอบแบบสอบถามที่ 1 พบว่า ผู้ตอบแบบสอบถามส่วนใหญ่เป็นเพศหญิง 82.4% และอายุ 22-28 ปี 36.9% พบว่ามีคำค้นหาคำแสดงความรู้สึก (IOC > 0.5) จำนวน 47 คำ เนื่องจากคำค้นหามีจำนวนมากเกินไปและไม่สื่อถึงผลิตภัณฑ์ จึงได้นำคำค้นหามาคัดเลือกโดยผู้เชี่ยวชาญด้านการออกแบบจำนวน 3 ท่านอีกครั้งเพื่อหาคำค้นหาคำที่เหมาะสมที่สุด ดังนั้น คำค้นหาคำที่ผ่านการคัดเลือกขั้นสุดท้ายมีจำนวน 10 คำ แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการกำหนดขอบเขตค่าแสดงความรู้สึกรู้สึก 10 คำ

ผลการกำหนดขอบเขตค่าแสดงความรู้สึกรู้สึก			
คำแสดงความรู้สึกรู้สึกที่ผ่านเกณฑ์	IOC > 0.5	คำแสดงความรู้สึกรู้สึกที่ผ่านเกณฑ์	IOC > 0.5
ทันสมัย	0.84	ใช้งานสะดวก	0.90
แปลกใหม่	0.87	โดดเด่น	0.89
คุ้มค่า	0.90	ประณีต	0.89
กระทัดรัด	0.91	ทนทาน	0.95
สีธรรมชาติ	0.93	สะอาด	0.91

3.2 ผลการกำหนดขอบเขตคุณลักษณะ

จากการรวบรวมคุณลักษณะผลิตภัณฑ์และเก็บข้อมูลด้วยแบบสอบถามที่ 2 ได้นำผลที่ได้จากการหาค่าเฉลี่ยของคุณลักษณะผลิตภัณฑ์มาทำการคัดเลือก โดยมีเกณฑ์ในการกำหนดคือ คัดเลือกคุณลักษณะที่มีระดับคะแนนมากกว่าค่าเฉลี่ยรวมของคุณลักษณะทั้งหมด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 4.43 จากนั้นทำการปรึกษาผู้เชี่ยวชาญด้านการออกแบบ 3 ท่าน ทางผู้เชี่ยวชาญมองว่าคุณลักษณะผลิตภัณฑ์กระเป๋าสตางค์จากกลุ่มจักสานนั้นเพียงพอต่อการทำแบบสอบถามที่ 3 และผลจากการคัดกรองทำให้ได้คุณลักษณะผลิตภัณฑ์หลักของกระเป๋าสตางค์จำนวน 6 คุณลักษณะ และคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อย จำนวน 13 คุณลักษณะ แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่มีคะแนนมากกว่าค่าเฉลี่ย

ลำดับ	คุณลักษณะผลิตภัณฑ์หลัก	คุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อย	ค่าเฉลี่ย
1	รูปทรงผลิตภัณฑ์	ทรงเหลี่ยม, ทรงโค้ง	4.71
2	ขนาดผลิตภัณฑ์	ขนาดเล็ก, ขนาดกลาง, ขนาดใหญ่	4.52
3	วัสดุเย็บขอบผลิตภัณฑ์	หนังแท้, ผ้า	4.44
4	วัสดุปิดปากกระเป๋	ซิป, ตะขอปิดแบบเกลียว	4.49
5	ผิวสัมผัส	ผิวเงา, ผิวด้าน	4.38
6	ลายสานผลิตภัณฑ์	ลายสอง, ลายขัด	4.49

3.3 ผลการกำหนดภาพตัวแทนผลิตภัณฑ์

ผลการรวบรวมภาพตัวแทนผลิตภัณฑ์ พบว่าผลิตภัณฑ์กระเป๋าสตางค์จากกลุ่มจักสานมีคุณลักษณะหลากหลาย มีจำนวนทั้งหมด 24 ภาพ จากนั้นประยุกต์ใช้แผนภาพความสัมพันธ์ทำการแบ่งกลุ่มภาพตัวแทนผลิตภัณฑ์ที่มีคุณสมบัติครอบคลุมถึงคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อยที่ผ่านการคัดเลือกมากที่สุด แสดงดังรูปที่ 1

รูปทรงของผลิตภัณฑ์		ขนาดผลิตภัณฑ์		
ทรงสี่เหลี่ยม	ทรงโค้ง	เล็ก	กลาง	ใหญ่
ภาพที่ 2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,24	ภาพที่ 1,2,3	ภาพที่ 1,4,6,7,9,11,19,20,22,23,24	ภาพที่ 2,3,10,11,15,18,21	ภาพที่ 5,8,12,13,14,16,17

โทนสี		วัสดุปิดปากกระเป๋า	
สีธรรมชาติ	สีเข้ม	zip	ตะขอปิดเกลียว
ภาพที่ 1,2,6,7,8,10,11,14,19,22	ภาพที่ 3,4,5,9,12,13,15,16,17,18,20,21,23,24	ภาพที่ 1,2,3,4,5,6,7,8,9,12,13,15,16,17,18,20,21,22,23,24	ภาพที่ 10,11,14

วัสดุเย็บขอบ		วัสดุที่ใช้ทำสายคล้อง	
ผ้า	หนังแท้	หนังแท้	เชือกถัก
ภาพที่ 3,4,5,6,9,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23	ภาพที่ 2,7,,10,11,12	ภาพที่ 8,9,13,19,22	ภาพที่ 15,16

ผิวสัมผัส		ลวดลายของผลิตภัณฑ์	
ผิวเงา	ผิวด้าน	ลายสอง	ลายขัด
ภาพที่ 3,4,5,6,8,10,11,12,13,18,24	ภาพที่ 1,2,7,9,14,15,16,17,19,20,21,22,23	ภาพที่ 1,2,4,6,8,10,11,12,13,14,19,21,22	ภาพที่ 3,5,7,9,15,16,17,18,20,23,24

รูปที่ 1 ผลการแบ่งกลุ่มตามคุณลักษณะผลิตภัณฑ์กระเป๋าสตางค์

ดังนั้นจากการแบ่งกลุ่มและเปรียบเทียบภาพตัวแทนผลิตภัณฑ์ที่สามารถสรุปได้ว่า ภาพตัวแทนผลิตภัณฑ์ที่มีคุณสมบัติครอบคลุมคุณลักษณะย่อยมากที่สุดมีจำนวน 5 ภาพ แสดงดังรูปที่ 2 โดยแต่ละภาพของตัวแทนผลิตภัณฑ์จะครอบคลุมคุณลักษณะย่อย ดังนี้ ภาพที่ 1 ครอบคลุมคุณลักษณะย่อยของขนาดผลิตภัณฑ์เป็นขนาดเล็ก ภาพที่ 2 ครอบคลุมคุณลักษณะย่อยของผลิตภัณฑ์เป็นขนาดเล็กและวัสดุเย็บขอบเป็นหนังแท้ ภาพที่ 3 ครอบคลุมคุณลักษณะย่อยของผลิตภัณฑ์เป็นรูปทรงเหลี่ยม ภาพที่ 4 ครอบคลุมคุณลักษณะย่อยของผลิตภัณฑ์เป็นการเปิด-ปิดแบบซิป และภาพที่ 5 เนื่องจากค่า PCC ไม่สอดคล้องกับค่า CS ภาพผลิตภัณฑ์จึงไม่ครอบคลุมคุณลักษณะย่อย



ภาพที่ 1



ภาพที่ 2



ภาพที่ 3



ภาพที่ 4



ภาพที่ 5

รูปที่ 2 ภาพตัวแทนผลิตภัณฑ์ที่มีคุณลักษณะครอบคลุมคุณลักษณะย่อย

3.4 ผลการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีเชิงปริมาณประเภทที่ 1

จากการนำข้อมูลจากแบบสอบถามที่ 3 มาวิเคราะห์ทฤษฎีเชิงปริมาณประเภทที่ 1 หรือการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์พหุคูณ (Multiple Correlation Coefficient; MCC^2) ระหว่างค่าแสดงความรู้สึก จำนวน 10 คำ กับภาพตัวแทนผลิตภัณฑ์จำนวน 5 ภาพ จึงสรุปได้ว่าคะแนนเฉลี่ยของค่าแสดงความรู้สึกมากที่สุดที่ตรงกับค่า MCC^2 ที่มากกว่า 0.7 มีจำนวน 5 คำ ที่ผ่านเกณฑ์เพื่อนำไปวิเคราะห์สมการถดถอยด้วยโปรแกรม Minitab 16 จากนั้นหาค่าคุณลักษณะผลิตภัณฑ์หลัก (PCC) และค่าคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อย (CS) ที่มีค่าการวิเคราะห์เป็นค่าบวก ที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 ($P\text{-Value} < 0.05$) เมื่อคุณลักษณะผลิตภัณฑ์หลักและผลิตภัณฑ์ย่อยมีครบทุกเงื่อนไขเพราะมีผลต่อความรู้สึกในทิศทางเดียวกัน เพื่อให้ได้ข้อสรุปที่ชัดเจนยิ่งขึ้น ดังนั้นสรุปผลการวิเคราะห์ได้ แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ค่าแสดงความรู้สึก

ภาพที่	PPC	P-Value	ความรู้สึก	คุณลักษณะ ผลิตภัณฑ์ หลัก	คุณลักษณะ ผลิตภัณฑ์ ย่อย	CS	P-Value	MCC ²
2	0.857	0.000	กะทัดรัด	ขนาดผลิตภัณฑ์	ขนาดเล็ก	0.273	0.000	0.780
1	0.170	0.000	โดดเด่น	ผิวสัมผัส	ผิวด้าน	0.382	0.200	0.700
4	0.266	0.000	ใช้งาน สะดวก	วัสดุปิดปาก กระเป๋	ชิป	0.101	0.031	0.770
2	0.151	0.000	ทันสมัย	วัสดุเย็บขอบ ผลิตภัณฑ์	หนังแท้	0.642	0.000	0.720
3	0.985	0.000	สะอาดตา	รูปทรง ผลิตภัณฑ์	ทรงเหลี่ยม	0.503	0.000	0.750

ตารางที่ 3 เป็นผลการวิเคราะห์ข้อมูลการคัดเลือกคุณลักษณะกระเป๋าสตางค์จากกลุ่มจักษณ
มาสรุปเป็นข้อกำหนดเพื่อช่วยให้ทีมออกแบบเป็นแนวทางที่จะช่วยให้นักออกแบบผลิตภัณฑ์ได้
ตามความต้องการของผู้บริโภค ซึ่งได้ข้อกำหนดการออกแบบมี 5 ข้อกำหนด ดังนี้

1) คุณลักษณะขนาดของผลิตภัณฑ์ ควรออกแบบให้มีขนาดเล็ก เพื่อให้คุณลักษณะของขนาด
ผลิตภัณฑ์สื่อถึงความรู้สึกกะทัดรัด ในการออกแบบสามารถดูแนวทางคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ของ
ขนาดได้ในภาพตัวแทนผลิตภัณฑ์ภาพที่ 2

2) คุณลักษณะของผิวสัมผัส ควรออกแบบให้เป็นผิวด้าน เพื่อให้คุณลักษณะของผิวสัมผัสสื่อ
ถึงความรู้สึกโดดเด่น โดยในการออกแบบสามารถดูแนวทางผลิตภัณฑ์ของผิวสัมผัสได้ในภาพ
ตัวแทนผลิตภัณฑ์ภาพที่ 1

3) คุณลักษณะของวัสดุปิดปากกระเป๋ ควรออกแบบเป็นชิป เพื่อให้คุณลักษณะของวัสดุปิด
ปากกระเป๋สื่อถึงความรู้สึกใช้งานสะดวก โดยในการออกแบบสามารถดูแนวทางผลิตภัณฑ์ของ
วัสดุปิดปากกระเป๋ได้ในภาพตัวแทนผลิตภัณฑ์ภาพที่ 4

4) คุณลักษณะของวัสดุเย็บขอบผลิตภัณฑ์ ควรออกแบบเป็นหนังแท้ เพื่อให้คุณลักษณะของ
วัสดุเย็บขอบผลิตภัณฑ์สื่อถึงความรู้สึกทันสมัย โดยในการออกแบบสามารถดูแนวทางผลิตภัณฑ์
ของวัสดุเย็บขอบได้ในภาพตัวแทนผลิตภัณฑ์ภาพที่ 2

5) คุณลักษณะของรูปทรงผลิตภัณฑ์ ควรออกแบบให้เป็นทรงเหลี่ยม เพื่อให้คุณลักษณะของ
รูปทรงผลิตภัณฑ์สื่อถึงความรู้สึกสะอาดตา โดยในการออกแบบสามารถดูแนวทางคุณลักษณะ
ผลิตภัณฑ์ของรูปทรงได้ใน ภาพตัวแทนผลิตภัณฑ์ภาพที่ 3

3.5 ผลการออกแบบและขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ต้นแบบ

จากการวิเคราะห์ข้างต้น เมื่อได้ผลสรุปจากการวิเคราะห์ของแบบสอบถามที่ 3 ได้นำผลสรุปดังกล่าวให้กับทีมออกแบบเพื่อสร้างแบบร่างของผลิตภัณฑ์กระเป๋าตังค์จากคลุ้มจักสาน โดยทีมนักออกแบบได้ใช้คำแสดงความรู้สึกในการออกแบบผลิตภัณฑ์ ได้แก่ กะทัดรัด โดดเด่น ใช้งานสะดวก และทันสมัย จากนั้นให้กลุ่มวิสาหกิจชุมชน ทำการจักสานขึ้นรูปและเย็บตกแต่งด้วยหนังแสดงดังผลิตภัณฑ์ต้นแบบกระเป๋าตังค์จากคลุ้มจักสาน แสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ผลิตภัณฑ์กระเป๋าตังค์จากต้นคลุ้ม

จากรูปที่ 3 ข้อกำหนดในการออกแบบผลิตภัณฑ์กระเป๋าตังค์จากคลุ้มจักสาน คือ 1) ขนาดของผลิตภัณฑ์มีการออกแบบให้มีขนาดเล็ก ซึ่งให้ความรู้สึกกะทัดรัดเมื่อได้ใช้งานกระเป๋าตังค์ 2) ผิวสัมผัสจะออกแบบเป็นผิวด้าน ซึ่งเป็นเอกลักษณ์ของผิวตามธรรมชาติของตอกจากต้นคลุ้ม และยังเพิ่มความโดดเด่นให้แก่ตัวผลิตภัณฑ์มากยิ่งขึ้น 3) วัสดุปิดปากกระเป๋ามีการออกแบบการเปิด-ปิด แบบซิปเพื่อง่ายต่อการเปิด-ปิด และยังใช้งานสะดวก 4) วัสดุเย็บขอบผลิตภัณฑ์กระเป๋าตังค์มีการออกแบบโดยใช้หนังแท้ในการเย็บขอบมาผสมผสานกับลายสาน และยังช่วยเพิ่มความทันสมัยให้แก่ผลิตภัณฑ์มากยิ่งขึ้น 5) รูปทรงผลิตภัณฑ์ มีการออกแบบเป็นทรงเหลี่ยมสามารถพับเปิด-ปิดได้ ซึ่งให้ความสะดวกเมื่อได้ใช้งานกระเป๋าตังค์

3.6 ผลการประเมินความพึงพอใจ

หลังจากได้ออกแบบผลิตภัณฑ์กระเป๋าตังค์จากคลุ้มจักสาน จากนั้นผู้วิจัยได้ไปสำรวจความพึงพอใจของผู้บริโภคที่มีต่อผลิตภัณฑ์ พบว่าผลการประเมินความพึงพอใจของกลุ่มผู้บริโภค

ประกอบด้วย เพศหญิงและชาย ส่วนใหญ่อายุช่วง 26-30 ปี ผลของความพึงพอใจด้านกะทัดรัดเป็นอันดับแรก มีระดับความพึงพอใจในระดับดีมากที่สุด มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.76 ระดับความพึงพอใจที่รองลงมาคือด้านประณีต มีระดับความพึงพอใจอยู่ในระดับดีมากที่สุด มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.73 และด้านแปลกใหม่ มีระดับความพึงพอใจอยู่ในระดับดีมากที่สุด มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.72

ผลการวิจัย พบว่าผลิตภัณฑ์กระเป๋าสตางค์ได้รับการออกแบบคุณลักษณะผลิตภัณฑ์รูปแบบใหม่ สามารถตอบโจทย์ความต้องการอารมณ์ความรู้สึกของลูกค้าในระดับความพึงพอใจ อยู่ในระดับดีมาก ซึ่งผลการวิจัยสอดคล้องกับงานวิจัย Rawangwong et al [9] ได้ออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์โคมไฟจากกระจุกจักษ์สานโดยประยุกต์ใช้วิศวกรรมคันเซร่วร่วมกับแบบจำลองคาโน ซึ่งสามารถตอบสนองความต้องการของลูกค้าเชิงอารมณ์ความรู้สึก ในระดับความพึงพอใจในระดับดี Yodwangjai [10] ได้ออกแบบและพัฒนาเก้าอี้รับประทานอาหารด้วยวิศวกรรมคันเซ ซึ่งพบว่าคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อยจะแสดงความรู้สึกที่แตกต่างกันสามารถนำมาสร้างเป็นแบบผลิตภัณฑ์ใหม่ตามค่าแสดงความรู้สึก และยังสามารถออกแบบร่วมกันได้ตามความต้องการของผู้บริโภค ต่อมา Rawangwong et al [11] ได้ประยุกต์ใช้วิศวกรรมคันเซในการออกแบบและพัฒนาเครื่องเรือนประเภทโต๊ะทีวีจากลำต้นไม้ปาล์มน้ำมัน พบว่าแนวทางในการออกแบบผลิตภัณฑ์สามารถช่วยให้นักออกแบบกำหนดคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่สอดคล้องกับความต้องการของผู้บริโภคได้ ต่อมา Rawangwong et al [12] ได้ประยุกต์ใช้วิศวกรรมคันเซในการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์เครื่องหนังประเภทกระเป๋าเป้ และ Rawangwong et al [13] ได้ประยุกต์ใช้วิศวกรรมคันเซในการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์จากย่านลิเภากระเป๋าสตางค์ พบว่าการออกแบบผลิตภัณฑ์สื่อถึงความคิดสร้างสรรค์ เรียบง่าย และโดดเด่นน่าสนใจ

4. สรุปและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้เทคนิควิศวกรรมคันเซ เพื่อออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์กระเป๋าสตางค์จกสานจากกลุ่ม โดยผลิตภัณฑ์สามารถสะท้อนถึงการรับรู้อารมณ์ ความรู้สึกของผู้บริโภคได้ งานวิจัยได้เริ่มจัดทำแบบสอบถามที่ 1 เพื่อคัดเลือกค่าแสดงความรู้สึกที่มีต่อผลิตภัณฑ์ ได้จำนวน 47 ค่า พบว่ามีค่า IOC ทั้งหมด 47 ค่าและได้นำไปคัดเลือกกับผู้เชี่ยวชาญ คุณลักษณะหลักจำนวน 6 คุณลักษณะ และคุณลักษณะย่อยจำนวน 13 คุณลักษณะ ต่อมาคัดเลือกภาพตัวแทนผลิตภัณฑ์ โดยใช้แผนภาพความสัมพันธ์ พบว่ามีภาพผลิตภัณฑ์จำนวน 5 ภาพ ที่มีคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ตรงกับคุณลักษณะย่อยมากที่สุด หลังจากนั้นจัดทำแบบสอบถามที่ 3 โดยการวิเคราะห์ด้วยวิธีการเชิงปริมาณ (QT1) เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างขอบเขตค่าแสดงความรู้สึกกับขอบเขตคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ และการวิเคราะห์ผลด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ เพื่อหาค่า MCC^2 ค่า PCC และค่า CS ผลการออกแบบผลิตภัณฑ์พบว่า ทีมออกแบบได้ใช้ค่าแสดงความรู้สึกในการออกแบบผลิตภัณฑ์กระเป๋าสตางค์ ประกอบด้วย กะทัดรัด โดดเด่น ใช้งานสะดวก ทันสมัย และสะอาดตา

โดยมีการออกแบบขนาดของผลิตภัณฑ์ให้มีขนาดเล็ก และออกแบบรูปทรงให้เป็นทรงเหลี่ยม สามารถพับเปิด-ปิดได้ ยังมีผิวสัมผัสเป็นผิวด้านที่เป็นเอกลักษณ์ของผิวตามธรรมชาติของเส้นตอกจากต้นคลุ้ม อีกทั้งวัสดุเปิด-ปิดมีการออกแบบให้เปิด-ปิดแบบชิป เพื่อสะดวกต่อการใช้งาน และวัสดุเย็บขอบได้นำหนังฟอกผาตมาผสมผสานกับลายสานเพื่อช่วยให้กระเป๋าสาตางค์มีความโดดเด่น สวยงาม และทันสมัยมากขึ้น ดังนั้นผลการวิจัย พบว่าผลิตภัณฑ์กระเป๋าสาตางค์จากคลุ้มจักสาน ที่ได้รับการออกแบบนั้นสามารถตอบโจทย์และสอดคล้องกับความต้องการอารมณ์ความรู้สึกของลูกค้าได้มากยิ่งขึ้น ซึ่งผลลัพธ์จากการวิจัยทำให้ได้ต้นแบบผลิตภัณฑ์กระเป๋าสาตางค์จากคลุ้มจักสานรูปแบบใหม่เพิ่มขึ้นมาจากผลิตภัณฑ์แบบเดิมของทางกลุ่มฯ นั่นคือ ผาชี และตะกร้า เป็นต้น โดยกลุ่มผู้ผลิตคลุ้ม ภูมิศึกษา สามารถนำต้นแบบที่ได้ไปสู่การผลิตกระเป๋าสาตางค์จากคลุ้มจักสานเพื่อเพิ่มมูลค่าสินค้าสำหรับจัดจำหน่ายแก่ลูกค้ากลุ่มเป้าหมายคือ กลุ่มวัยทำงาน และผู้ใช้งานทั่วไป นอกจากนี้ ผลลัพธ์จากการวิจัยยังสามารถใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ประเภทอื่น ๆ ที่สามารถตอบสนองความต้องการของลูกค้าต่อไป

จากการวิจัยนี้ควรมีการศึกษาวิจัยร่วมกับเทคนิคการออกแบบผลิตภัณฑ์อื่น ๆ เช่น เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ (QFD) แบบจำลองคานาโน (Kano Model) และควรจะมีการประยุกต์ใช้อย่างต่อเนื่อง เนื่องจากยุคสมัยความต้องการของลูกค้าที่เปลี่ยนไป เพื่อสร้างความมั่นใจในการตอบสนองต่อความต้องการของลูกค้าได้อย่างต่อเนื่อง และทันกับการเปลี่ยนแปลงของลูกค้า และในการออกแบบและขึ้นรูปผลิตภัณฑ์แบบใหม่ขึ้นมามาทดลองตลาด ถึงแม้ว่าผลิตภัณฑ์สามารถตอบโจทย์ความต้องการเชิงอารมณ์ความรู้สึกของลูกค้าได้ดียิ่งขึ้น แต่เพื่อให้เข้าถึงตลาดได้มากขึ้น กลุ่มวิสาหกิจชุมชน ควรให้ความสำคัญและตระหนักในด้านอื่น ๆ ร่วมด้วย เช่น การศึกษากลยุทธ์ทางการตลาด และการลดต้นทุนในการผลิต เป็นต้น

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนงบประมาณเงินกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม ประจำปี 2566 ขอบคุณกลุ่มวิสาหกิจชุมชนภูมิศึกษา ตำบลนาทอน อำเภอทุ่งหว้า จังหวัดสตูล

References

- [1] Chudhavipata W. Folk art. Bangkok: Chulalongkorn University; 2009. (In Thai)
- [2] Leesuwana V. Thailand basketry. Bangkok: OS Printing House; 1989. (In Thai)
- [3] Muangmeesri B, Vanpetch W, Phongphit S, Ekpetch C. Design procedure development in Bulrush Reed product development by the community management. Surattani Rajabhat Journal 2008;1(2):131-9. (In Thai)

- [4] Faisha M, Mohamad E, Jaafar R, Rahman AA, Adiyanto O, Jatmiko HA, et al. Integrated approach to customer requirement using quality function deployment and kansei engineering to improve packaging design. Asia-Pacific Journal of Science and Technology 2021;26(2):1-10.
- [5] Nagamachi M. Kansei engineering as a powerful consumer-oriented technology for product development. Applied Ergonomics 2002;33(3):289-94.
- [6] Schutte S. Designing feelings into products: integrating kansei engineering methodology in product development. [thesis]. Linkoping, Sweden: Linkopings University; 2002.
- [7] Kumpong N, Kasemset C. Application of kansei engineering in food product development framework: A case study of parboiled rice. Proceedings of IE-Network Conference 2012; 2012 Oct 17-19; Phetchaburi, Thailand. p. 2030-7.
- [8] Kikumoto M., Kurita Y. and Ishihara S. Kansei engineering study on car seat lever position. International Journal of Industrial Ergonomics 2021;86:103215.
- [9] Rawangwong S, Homkhiew C, Srivabut C, Phanthasri P. Application of kansei engineering technique and kano model for design and development of lamp products from krajoed basketry. The Journal of Industrial Technology 2022;18(3):161-78 (In Thai)
- [10] Yodwangjai S. Product design and development for dinner chair of kansei engineering. KKU Engineering Journal 2014;41(2):191-200. (In Thai)
- [11] Rawangwong S, Homkhiew C, Chantaramanee S, Chumsri P. Application of kansei engineering techniques in the design and development of TV table furniture products from oil palm trunks. Ladkrabang Engineering Journal 2022;39(2):13-26. (In Thai)
- [12] Rawangwong S, Homkhiew C, Pirom T, Kamnerdwam AT, Boonyaso T. An application of kansei engineering technique for the design and development of leather product: a case study of leather manufacturer. muang district, songkhla province. Journal of Engineering and Innovation 2022;15(1):144-56. (In Thai).
- [13] Rawangwong S, Kamnerdwam AT, Homkhiew C, Laosat C, Srivabut C, Boonyaso T. Application of quality function deployment techniques with kansei engineering for the design and development of Bags in the Lygodium. RMUTL Engineering Journal 2024;9(1):52-64. (In Thai)

ประวัติผู้เขียนบทความ



อภิชล ทองมั่ง กำเนิดว่า อาจารย์ประจำ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ถ.ราชดำเนินนอก ต.บ่อหย่าง อ.เมือง จ.สงขลา 90000 E-mail: apichon.tk@rmutsv.ac.th
งานวิจัยที่สนใจ: Optimization, Simulation modelling, Ergonomics, Work improvement, Mathematical modelling



ธยา ภิรมย์ อาจารย์ประจำ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ถ.ราชดำเนินนอก ต.บ่อหย่าง อ.เมือง จ.สงขลา 90000 E-mail: thaya.p@rmutsv.ac.th
งานวิจัยที่สนใจ: Product design, Simulation modelling, Ergonomics



สุรสิทธิ์ ระวีวงศ์ อาจารย์ประจำ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ถ.ราชดำเนินนอก ต.บ่อหย่าง อ.เมือง จ.สงขลา 90000 E-mail: surasit.r@rmutsv.ac.th
งานวิจัยที่สนใจ: Work improvement, Product design, Manufacturing engineering, Machining, Design of experiments for engineering



ชัยวัฒน์ภทร เลาสัตย์ อาจารย์ประจำ โปรแกรมการออกแบบ สาขาการออกแบบ คณะศิลปกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา ต.เขารูปช้าง อ.เมือง จ.สงขลา 90000 E-mail: chaiwattanapat@gmail.com
งานวิจัยที่สนใจ: Product design, Arts and crafts

Article History:

Received: July 17, 2024

Revised: October 7, 2024

Accepted: October 18, 2024

การศึกษาคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตเมื่อใช้วัสดุชั้นผิวทางเดิม
ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเส้นลวดในยางรถยนต์

**A STUDY ON PROPERTIES OF ASPHALT CONCRETE
USING RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT IMPROVED WITH
TIRE-DERIVED STEEL**

ธีรเดช เอียดยอด¹ ชลัท ทิพากรเกียรติ² และ ภาวัด ไชยชาณวาทิก³

¹นักศึกษาระดับปริญญาโท, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย, 2/4 ถนนราชดำเนินนอก ตำบลบ่อหย่างอำเภอเมือง จังหวัดสงขลา 90000, teeradetiadyod@gmail.com

²อาจารย์, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย 2/4 ถนนราชดำเนินนอก ตำบลบ่อหย่างอำเภอเมือง จังหวัดสงขลา 90000, chalat.t@rmuts.ac.th

³อาจารย์, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต 1761 ถนนพัฒนาการ แขวงสวนหลวง เขตสวนหลวง กรุงเทพฯ 10250, ch.bhawat@gmail.com

Teeradet ladyod¹, Chalat Tipakornkiat² and Bhawat Chaichannawatik³

¹Master Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya, 2/4 Ratchadamnoennok Rd., Boyang Sub-district, Muang District, Songkhla 90000, Thailand, teeradetiadyod@gmail.com

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

³Lecturer, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasem Bundit University, 1761 Pattanakarn Rd., Suanluang, Bangkok 10250, Thailand, ch.bhawat@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาคูณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมกับวัสดุชั้นผิวทางเดิมและปรับปรุงคุณภาพด้วยเส้นลวดในยางรถยนต์ ขนาดประมาณ 10-20 มิลลิเมตร โดยงานวิจัยนี้ได้ออกแบบส่วนผสม กำหนดเป็นร้อยละโดยน้ำหนักของมวลรวม หินฝุ่น, 3/8", 1/2" และ 3/4" เท่ากับ

40: 23: 17: 20 ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์เท่ากับร้อยละ 5.0 โดยน้ำหนักของวัสดุมวลรวม งานวิจัยนี้มีการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรม ได้แก่ ค่าเสถียรภาพ ค่าการไหล และ SEM พบว่าที่อัตราส่วนผสม W0.1 จะให้ค่าเสถียรภาพสูงที่สุดถึง 2,524.77 lbs ซึ่งมากกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตธรรมดาที่มีค่าเสถียรภาพเพียง 2,260 ปอนด์ และในทุก ๆ อัตราส่วนผสมเส้นลวดในยางรถยนต์มีค่าความหนาแน่นที่สูงกว่ามาตรฐานทั้งหมด สอดคล้องกับการมีเส้นลวดในยางรถยนต์เป็นส่วนผสมนั้นจะเกิดการสร้างพันธะยึดเกาะกันภายในมวลรวมแอสฟัลต์ยึดเกาะกันที่ผิวหน้าของเส้นลวดในยางรถยนต์ซึ่งมีความขรุขระยึดจับกับยางแอสฟัลต์ได้ดีจากผลการทดสอบ SEM ซึ่งผ่านเกณฑ์กำหนดสำหรับชั้น Binder Course สามารถนำไปใช้ได้กับงานที่มีปริมาณการจราจรสูง (Heavy Traffic) จะช่วยลดอัตราส่วนผสมของมวลรวมใหม่และเป็นการนำวัสดุมาหมุนเวียนใช้ใหม่ได้ การเพิ่ม RAP เป็นส่วนผสมสามารถลดการใช้มวลรวมใหม่ได้ถึงร้อยละ 20 ลดราคาต้นทุนงาน AC Binder Course ลงร้อยละ 5 ต่อตารางเมตร และลดจำนวนในการทำลายยางรถยนต์เก่าที่ผ่านการใช้งานมาแล้วอีกด้วย

คำสำคัญ: แอสฟัลต์คอนกรีต, วัสดุชั้นผิวทางเดิม, เส้นลวดในยางรถยนต์

ABSTRACT

This research studied the properties of asphalt concrete that was mixed with the original pavement material and improved with wires in car tires, size approximately 10-20 millimeters. This research is designed to define the mixture as the percentage by weight of the aggregate. Rock dust, 3/8", 1/2", 3/4" are equal to 40 : 23 : 17 : 20. The amount of asphalt cement is equal to 5.0% by total weight of aggregate. This research tested the engineering properties, including stability, flow, and SEM. It was found that at a mix ratio of W0.1, the highest stability was 2,524.77 lbs, which is higher than HMA, which has a stability value of only 2,260 lbs. Every wire mixture in tires has a higher density than all HMA. Consistent with the presence of tire-derived steel, bonds will form within the asphalt aggregate, bonding together on the surface of the wires in tires, which are rough and adhere to the asphalt. It can be clearly seen from the photo of the SEM test results that it passed the criteria specified for the Binder Course class. It can be used in road with high traffic volumes (Heavy Traffic). It will reduce the mixing ratio of new aggregates and allow for recycling of materials. Adding RAP as an ingredient can reduce the use of new aggregate by up to 20 percent and reduce the cost of AC Binder Course by 5 percent per

square meter. It can be reused and reduces the cost of destroying old tires that have already been used.

KEYWORDS: Asphalt Concrete, RAP, Tire-derived steel

1. บทนำ

ในประเทศไทยมีทางหลวงแผ่นดินที่อยู่ในความดูแลของกรมทางหลวง จำนวน 52,341.804 กม. [1] ซึ่งแต่ละปีต้องใช้งบประมาณ 20,925 ล้านบาทในการบำรุงรักษาทางหลวง [2] เนื่องจากการขยายตัวทางเศรษฐกิจและโครงข่ายทางหลวงที่เพิ่มมากขึ้น ประกอบกับปริมาณการจราจรที่สูงขึ้นทำให้ผิวทางของถนนได้รับความเสียหายก่อนระยะเวลาตามที่ได้ออกแบบไว้และก่อนจะทำการซ่อมบำรุงผิวทางใหม่จะต้องทำการขุดไส (Milling) ผิวทางเดิมที่เสียหายออกก่อน ทำให้วัสดุส่วนนี้มีปริมาณที่มากและกองเก็บไว้โดยเปล่าประโยชน์ หากนำวัสดุดังกล่าวมาใช้ประโยชน์ได้จะเป็นการลดงบประมาณในการซ่อมแซมบำรุงรักษาถนนและลดปริมาณวัสดุมวลรวมผสมแอสฟัลต์ซึ่งในปัจจุบันแหล่งวัสดุมวลรวมที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานมีจำนวนที่น้อยลงอย่างมาก

ในแต่ละปีมีปริมาณยางรถยนต์ในประเทศไทยมียางรถยนต์ที่ใช้จนแล้ว จำนวน 57 ล้านเส้น [3] โดยส่วนประกอบสำคัญอย่างหนึ่งของยางรถยนต์ คือ ลวด ซึ่งลวดที่อยู่ภายในยางรถยนต์นี้มีคุณสมบัติการรับแรงดึงสูง และสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้ [4]

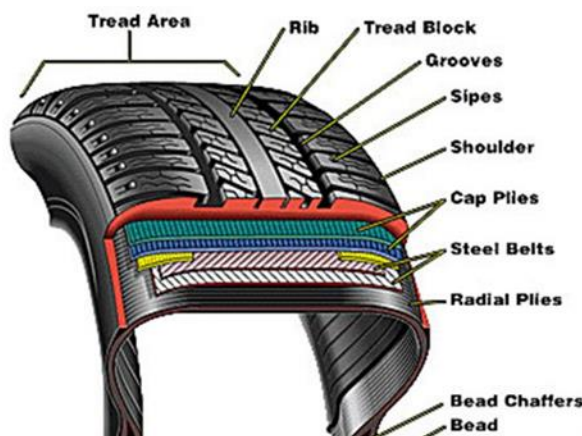
เหล็กลวดสำหรับนำไปผลิตลวดเหล็กเสริมยางรถยนต์ ได้แก่ เหล็กลวดเปียโน ที่ถูกนำไปดัดเย็บหลายขั้นตอน เพื่อให้ได้ลวดเหล็กที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางในช่วง 0.15-0.38 มม. ซึ่งจะนำไปผลิตต่อเป็น Bead Wire สำหรับช่วยยึดโครงสร้างของยาง และ Tire Cord สำหรับเสริมหน้ายาง เพื่อเพิ่มความสามารถในการรับแรง ซึ่งใช้ในงานผลิตล้อรถต่าง ๆ รวมถึงล้อเครื่องบินด้วย ผลิตภัณฑ์ในกลุ่มนี้ต้องผ่านการดัดขึ้นรูปสูง และต้องการความแข็งแรงสูงมาก ดังนั้นจึงต้องการเหล็กลวดคาร์บอนสูง และต้องมีความสะอาดสูงมาก โดยทั้งธาตุผสมตกค้าง และสารมลทินในปริมาณที่ต่ำมาก และคุณภาพผิวของเหล็กลวดต้องดีมากเพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายขึ้นในระหว่างการดัดเย็บ

ในปัจจุบันมีงานวิจัยด้านการนำวัสดุชั้นผิวทางเดิม (Reclaimed Asphalt Pavement: RAP) กลับมาใช้ซ้ำ ซึ่งพบว่ามีคุณสมบัติที่เหมาะสมทางวิศวกรรม รวมถึงมีงานวิจัยการนำเส้นใย (fiber) ชนิดต่าง ๆ มาใช้ร่วมกับงานด้านผิวทาง รวมถึงงานวัสดุด้านอื่น ๆ อีกเช่นกัน แต่ยังไม่มีการนำลวดกำลังสูงในยางรถยนต์มาใช้เป็นส่วนผสมปรับปรุงคุณภาพงานผิวทาง ผู้วิจัยเล็งเห็นถึงประโยชน์จากตรงส่วนนี้จึงนำมาพัฒนาส่วนผสมเพื่อใช้ในชั้นผิวทางต่อไป

2. ทบทวนวรรณกรรม

2.1 ยางรถยนต์

ยางรถยนต์เป็นนวัตกรรมที่มีพัฒนาการทั้งทางด้านวัสดุ และด้านการออกแบบที่น่าสนใจ จากในตอนแรกเริ่มมีการประดิษฐ์ออกมาเป็น ยางรถยนต์ทำจากยางธรรมชาติทั้งหมดมีลักษณะเป็น ล้อตันทั้งชิ้น ต่อมาจึงค่อยๆ มีการเปลี่ยนแปลงและพัฒนาจนกลายเป็นล้อยางที่บรรจุลมข้างในเช่น ทุกวันนี้ ปัจจุบันนี้เราเรียกยางรถยนต์กันว่า “คอมโพสิต (composite)” เนื่องจากเมื่อเรานำยาง หนึ่งเส้นมาลองวิเคราะห์ห้องค์ประกอบต่างๆ แล้วพบว่าประกอบไปด้วยยางธรรมชาติ 14% ยางสังเคราะห์ 27% ผงเขม่าดำ (carbon black) 10% น้ำมัน (processing oil) 10% ผ้าใบ 4% เส้นลวดเหล็ก 10% และสารอื่น ๆ อีก 7% ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสูตรของแต่ละผู้ผลิต ผู้วิจัยได้เลือกใช้ เส้นลวดจาก 2 ส่วนประกอบในล้อยาง ได้แก่ ชั้นโครงยางเป็นชั้นที่อยู่เหนือแผ่นยางรองด้านใน ซึ่ง ประกอบด้วยเส้นใยไฟเบอร์ที่เป็นสิ่งทอบาง ๆ (หรือสายเคเบิล) ที่ผูกมัดเข้ากับวัสดุยาง และ ชั้นปลอกยางชั้นส่วนนี้เป็นตัวกำหนดความแข็งแรงโดยส่วนใหญ่ของยางรถยนต์ ซึ่งประกอบด้วย เหล็กเส้นเรียบบางที่มีความทนทานหลายเส้นผูกมัดกับวัสดุยาง เพราะเล็งเห็นว่าเส้นลวดทั้งสองส่วนนี้มีความยืดหยุ่นสูงพอที่จะรองรับการผิดรูปที่เกิดจากการกระแทก การตกหลุม และ สิ่งกีดขวางอื่น ๆ บนท้องถนน น่าจะนำมาเสริมกำลังให้กับแอสฟัลต์คอนกรีตได้



รูปที่ 1 ส่วนประกอบของยางรถยนต์ [5]

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี ค.ศ.2018 Nokkaew and Parakul [6] ได้ศึกษาพฤติกรรมทางวิศวกรรมของแอสฟัลต์ คอนกรีตโดยวิธีมาร์แชลล์เมื่อใช้ปริมาณวัสดุชั้นผิวทางเดิมหมุนเวียนเพื่อใช้งานใหม่ต่างกัน โดยใช้

วัสดุผลรวมหินปูนจำนวน 1 แหล่ง ปริมาณ RAP ไม่คัดแยกขนาด ผลการศึกษาพบว่า ปริมาณของวัสดุชั้นทางเดิมหมุนเวียนที่เหมาะสมที่สุดต่อการนำไปใช้งานเท่ากับร้อยละ 40 ของมวลรวม

ในปี ค.ศ.2020 Xing et al [7] ได้ศึกษาผลของความยาวเส้นใยและการรักษาพื้นผิวของเส้นใยอะรามิตต่อประสิทธิภาพของสารยึดเกาะแอสฟัลต์ปรับปรุงด้วยเส้นใยอะรามิต (AFMA) การทดลองนี้ใช้เส้นใยอะรามิตทั้งหมด 4 ขนาด คือ 1 mm, 2 mm, 3 mm, and 6 mm ผลการศึกษานี้สามารถใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงสำหรับการประยุกต์ใช้เส้นใยในสารยึดเกาะแอสฟัลต์และใช้ในการปรับปรุงส่วนผสมของยางแอสฟัลต์คอนกรีตได้

ในปี ค.ศ.2021 Gupta et al [8] ได้ศึกษาการเลือกเส้นใยเพื่อปรับปรุงส่วนผสมยางพอร์สแอสฟัลต์ การศึกษานี้ได้เลือกใช้เส้นใย 4 ชนิดมาศึกษา ได้แก่ aramid fiber, aramid pulp, glass-hybrid fiber, cellulose fiber มีการทดสอบ Cantabro test, permeability test, indirect tensile strength (ITS) test, and moisture susceptibility test. ผลการศึกษาพบว่า aramid pulp มีค่าความต้านทานต่อการเสียดสีที่ดี ในขณะที่ glass-hybrid fibers จะมีค่าความต้านทานแรงดึงทางอ้อม (ITS) ดีที่สุด และจากเส้นใยทั้งหมด aramid pulp เป็นเส้นใยที่ดีที่สุดในการปรับปรุงความต้านทานทางกล

ในปี ค.ศ.2021 Al-Ridha et al [9] ได้ศึกษาอิทธิพลของการเพิ่มเส้นใยเหล็กต่อความเสียหายจากความชื้นและการต้านทานการเสื่อมสภาพของแอสฟัลต์คอนกรีต งานวิจัยนี้ใช้เกณฑ์ชั้น wearing courses เพื่อความทนทานต่อการเสียดสีอย่างถาวรและการรับแรงดึงด้านข้าง ผลการศึกษาพบว่าการใส่เส้นใยเหล็ก 0.2% โดยปริมาตรของส่วนผสมทั้งหมด ทำให้ความต้านทานแรงดึงทางอ้อมเพิ่มขึ้น

ในปี ค.ศ.2023 Guo et al [10] ได้ศึกษาการใช้เส้นใยในการเป็นส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต โดยได้แบ่งการศึกษาเป็นเส้นใยธรรมชาติและเส้นใยสังเคราะห์ ผู้วิจัยได้สนใจเส้นใยคาร์บอนที่นำมาผสมกับแอสฟัลต์พบว่าที่ความยาวของเส้นใย 3 ซม.ผสมในอัตราส่วน 0.025 ต่อน้ำหนักมวลรวมมีค่าความต้านทานต่อการเสียดสีสูงขึ้นถึง 24.5% และมีอายุมากกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตแบบธรรมดาที่ไม่ผสมเส้นใยถึง 2.4 เท่า

ในปี ค.ศ.2018 Gao and Wu [11] ได้ศึกษาการใช้ ESEM เพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติของเส้นใยหินบะซอลต์เมื่อเป็นส่วนผสมในแอสฟัลต์ผลการศึกษาพบว่าเส้นใยหินบะซอลต์เข้าไปสร้างพันธะทางเคมีสร้างแรงยึดเหนี่ยวตามพื้นผิวของเส้นใยกับแอสฟัลต์มีความคงทนต่อการเสียดสีได้ดีเมื่อเปรียบเทียบกับแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเส้นใยหินบะซอลต์จะพบว่ามีรอยแตกกว้างบริเวณพื้นผิวมากกว่า

จากการศึกษางานวิจัยทั้งภายในประเทศไทยและต่างประเทศจะเห็นได้ว่า มีการนำวัสดุเส้นใยธรรมชาติและเส้นใยสังเคราะห์จากขยะเหลือใช้ชนิดต่าง ๆ มาผสมเพื่อปรับปรุงคุณภาพในแอสฟัลต์คอนกรีตนั้น มีผลต่อคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตไปในทิศทางที่ดีขึ้น การนำเส้นใยชนิดต่าง ๆ เช่น เส้นใยอะรามิต มาปรับปรุงคุณภาพแอสฟัลต์คอนกรีตสามารถลดค่าการเกิด

ร่องล้อได้ดีเนื่องจากผลการทดสอบแรงดึงทางอ้อมมีแนวโน้มสูงขึ้นจากแอสฟัลต์ธรรมดา และเส้นใยอะรามิตยังช่วยลดค่าการแตกหักเสียรูปของแอสฟัลต์ได้ดี [8] ทำให้เพิ่มระยะเวลาของรอบการบำรุงรักษาถนน จากงานวิจัยถึงแม้ว่าเส้นใยจากธรรมชาติจะให้ผลการทดสอบที่ดีแต่ก็ยังส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมนักวิจัยจึงหันมาให้ความสนใจกับเส้นใยสังเคราะห์กันมากขึ้น เช่น เส้นใยโพลีโพรพิลีน เส้นใยโพลีเอสเตอร์ เส้นใยคาร์บอน การนำวัสดุจำพวกเส้นใยสังเคราะห์เมื่อนำมาผสมกับยางแอสฟัลต์แล้วจะช่วยลดช่องว่างระหว่างมวลรวมเพิ่มพื้นที่การยึดเกาะกันระหว่างยางแอสฟัลต์และเส้นใย โดยจะศึกษาที่ความยาวของเส้นใยที่ต่างกันพบว่าเมื่อผลต่อการยึดเกาะมากกว่าความแตกต่างของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย [10] การนำผิวทางเดิมกลับมาใช้ใหม่นั้นเป็นงานวิจัยที่สมควรส่งเสริมอย่างมาก เนื่องจากปัจจุบันนี้วัสดุมวลรวมที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานนั้นค่อนข้างที่จะขาดแคลนหรือไม่ก็ต้องแบกรับค่าใช้จ่ายในการขนส่งวัสดุที่สูงเนื่องจากระยะทางขนส่งไกล จากงานวิจัยข้างต้นที่ใช้ผิวทางเดิมในสัดส่วนประมาณร้อยละ 40 ของมวลรวม [6] ซึ่งถือว่าเป็นปริมาณที่เยอะพอสมควรหากนำไปใช้จริงในการก่อสร้างถนน สัดส่วนผสมของเส้นใยชนิดต่าง ๆ ที่นำมาปรับปรุงคุณภาพร่วมกับยางแอสฟัลต์นั้นให้ผลการทดสอบที่แตกต่างกันเนื่องมาจากตัวแปร ขนาด รูปร่าง ชนิด น้ำหนัก อุณหภูมิ สารเคลือบ ฯ ล้วนส่งผลต่อคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมทั้งหมด ปัจจัยสำคัญอีกอย่างที่จะส่งผลต่อผลการทดสอบทางวิศวกรรมนั้นขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุชั้นผิวทางเดิมที่นำมาใช้ เพราะอาจมาจากแหล่งที่ต่างกัน ปริมาณจราจรต่างกัน อายุบริการที่ต่างกันของสายทางนั้น ๆ ความเสียหายในขณะขุดไสผิวเดิมต่างกัน

ผู้วิจัยได้สังเกตเห็นว่า เส้นลวดกำลังแรงดึงสูงที่อยู่ภายในยางรถยนต์นั้นมีคุณลักษณะและคุณสมบัติคล้ายคลึงกับเส้นใยสังเคราะห์ในงานวิจัยที่ผ่านมา และยังถือว่าเป็นการนำขยะของเสียหมุนเวียนมาใช้ใหม่ ตามที่ได้ศึกษาค้นคว้ามาแล้วข้างต้น ไม่ว่าจะเป็นในด้านการเสริมกำลังรับแรงดึงทางด้านข้างและเพิ่มค่าเสถียรภาพของแอสฟัลต์คอนกรีต เพิ่มแรงยึดเกาะกันระหว่างมวลรวมในระดับอนุภาคมีค่าความต้านทานต่อการเสียรูปและค่าเสถียรภาพที่ดีขึ้น เมื่อนำมาผสมปรับปรุงคุณภาพร่วมกับผิวทางเดิมที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว คาดว่าจะมีค่าผลการทดสอบทางวิศวกรรมที่ดีขึ้นมีการยึดเกาะที่ดีระหว่างอนุภาคของมวลรวมและแอสฟัลต์ ทั้งยังเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างถนนใหม่ ลดต้นทุนการกำจัดของเสียจากยางรถยนต์เก่าและเป็นทางเลือกในการบำรุงรักษาผิวถนนให้กับหน่วยงานของรัฐได้

3. วิธีการดำเนินงาน

ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีต โดยวิธีมาร์แชลล์ (Mashall Test) ตามมาตรฐานการทดสอบ ที่ ทล.ท.-604/2517 [12] และใช้เกณฑ์กำหนดสำหรับชั้น Binder Course ขนาด 19.0 มิลลิเมตร ตามมาตรฐานกรมทางหลวงที่ ทล.ม.- 408/2532 [13]



รูปที่ 2 การทดสอบมาร์แชลล์

วัสดุที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้

- 1) วัสดุผสมรวมจากโรงม่หิน ธนบดีศิลา ห้างหุ้นส่วนชิวรยะลาก่อสร้าง ต.ลิดล อ.เมือง จ.ยะลา
- 2) ใช้วัสดุชั้นผิวทางเดิม (Reclaimed Asphalt Pavement: RAP) จากการขุดไส (milling) ชั้นผิวทางเดิมในโครงการก่อสร้าง ทางหลวงหมายเลข 4085 สาย ปากน้ำเทพา - บ.บันนังตามาดอน บ.ปลักบอ - บ.ทุ่งโหนด กม.25+000 - กม.37+800 นำมาคัดแยกขนาดก่อนนำไปทดสอบ
- 3) ยางรถยนต์ที่ใช้งานแล้วจาก ร้านเพชรเกษมยางยนต์ อ.นาทวี ขนาดหน้ากว้างยาง 215 มม. โดยไม่ได้ระบุยี่ห้อของผู้ผลิตยาง เพื่อเอาเส้นลวดข้างในขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 - 1 มม. มาใช้เป็นส่วนผสม
- 4) ใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ เกรด 60-70 ซึ่งเป็นเกรดที่ใช้ในงานของกรมทางหลวง ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.1 ออกแบบวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตธรรมดาโดยวิธีมาร์แชลล์

ใช้ก้อนตัวอย่างทดสอบขนาดสูง 2.5 นิ้ว เส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว ก้อนตัวอย่างจำนวน 5 ชุด ๆ ละ 3 ก้อน แต่ละชุดประกอบด้วยวัสดุผสมรวมคละที่ได้จากการผสมมวลรวมขนาดต่าง ๆ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 1 ตามอัตราส่วนที่กำหนดไว้ที่ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์เท่าร้อยละ 4.5, 5.0, 5.5, 6.0 และ 6.5 โดยน้ำหนักของมวลรวม การบดทับก้อนตัวอย่างที่ได้จากการผสมส่วนผสมโดยบดทับด้านละ 75 ครั้ง ที่อุณหภูมิส่วนผสม 150 องศาเซลเซียส เมื่อก้อนตัวอย่างเย็นลงแล้ว จึงดันก้อนตัวอย่างออกจากแบบ (Mold) แล้วนำมาหาค่าเสถียรภาพและการไหล (Stability and Flow) ความแน่นและช่องว่างอากาศ (Density and Void) ของทุก ๆ ชุดตัวอย่าง เพื่อหาอัตราส่วนของวัสดุผสมรวมกับปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสมในการใช้งาน

ตารางที่ 1 ขนาดผลของวัสดุมวลรวม

Sieve Size	% Passing				Combined	Desired	Tolerant Limit
	Bin 1	Bin 2	Bin 3	Bin 4			
1"				100	100	100	100
3/4"				67.0	93.4	90 - 100	88 - 98
1/2"			100	4.2	80.8	-	76 - 86
3/8"		100	29.4	1.8	68.4	56 - 80	63 - 73
# 4	100	41.6	1.2	0.6	49.9	35 - 65	45 - 55
# 8	85.9	2.8	0.5		35.1	23 - 49	30 - 40
# 16	57.1	0.7			23.0	-	19 - 27
# 30	35.3				14.1	-	10 - 18
# 50	23.7				9.5	5 - 19	6 - 14
# 100	16.9				6.8	-	5 - 10
# 200	11.4				4.6	2 - 8	4 - 6
Mix Proportion		40	23	17	20		

3.2 ออกแบบวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์โดยวิธีมาร์แชลล์

ใช้ก้อนตัวอย่างทดสอบขนาดสูง 2.5 นิ้ว เส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว ก้อนตัวอย่างจำนวน 5 ชุดๆ ละ 3 ก้อน แต่ละชุดประกอบด้วยวัสดุมวลรวมผลที่ได้จากการผสมมวลรวมขนาดต่าง ๆ ตามอัตราส่วนที่กำหนดไว้ที่ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์เท่าร้อยละ 4.5, 5.0, 5.5, 6.0 และ 6.5 โดยน้ำหนักของมวลรวม ปริมาณ RAP ที่ผ่านการคัดแยกขนาด ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2 ที่ผสมร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักของมวลรวม ปริมาณเส้นลวดในยางรถยนต์ที่ตัดเป็นชิ้นขนาดเล็ก ขนาด 10-20 มิลลิเมตร ในอัตราส่วนร้อยละ W0.1, W0.3 และ W0.5 โดยน้ำหนักของมวลรวม การบดทับก้อนตัวอย่างที่ได้จากการผสมส่วนผสมโดยบดทับด้านละ 75 ครั้ง ที่อุณหภูมิส่วนผสม 150 องศาเซลเซียส เมื่อก้อนตัวอย่างเย็นลงแล้ว จึงดันก้อนตัวอย่างออกจากแบบ (Mold) แล้วนำมาหาค่าเสถียรภาพและการไหล (Stability and Flow) ความแน่นและช่องว่างอากาศ (Density and Void) ของทุก ๆ ชุดตัวอย่าง เพื่อหาอัตราส่วนของวัสดุมวลรวมกับปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสมในการทำงาน



รูปที่ 3 เส้นลวดไผ่ใยรถยนต์ขนาด 10-20 มิลลิเมตร



รูปที่ 4 ก้อนตัวอย่างทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP และเส้นลวดไผ่ใยรถยนต์

ตารางที่ 2 ขนาดละเอียดของวัสดุผิวทางเดิม

Sieve Size	% Passing	Desired
	RAP	
1"	100	100
3/4"	92.8	88 – 98
1/2"	77.2	76 – 86
3/8"	63.8	63 – 73
#4	51.7	45 – 55
#8	39.1	30 – 40
#16	26.2	19 – 27
#30	16.5	10 – 18
#50	10.6	6 – 14
#100	6.8	5 – 10
#200	5.1	4 - 6

3.3 เปรียบเทียบคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตธรรมดา กับแอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์

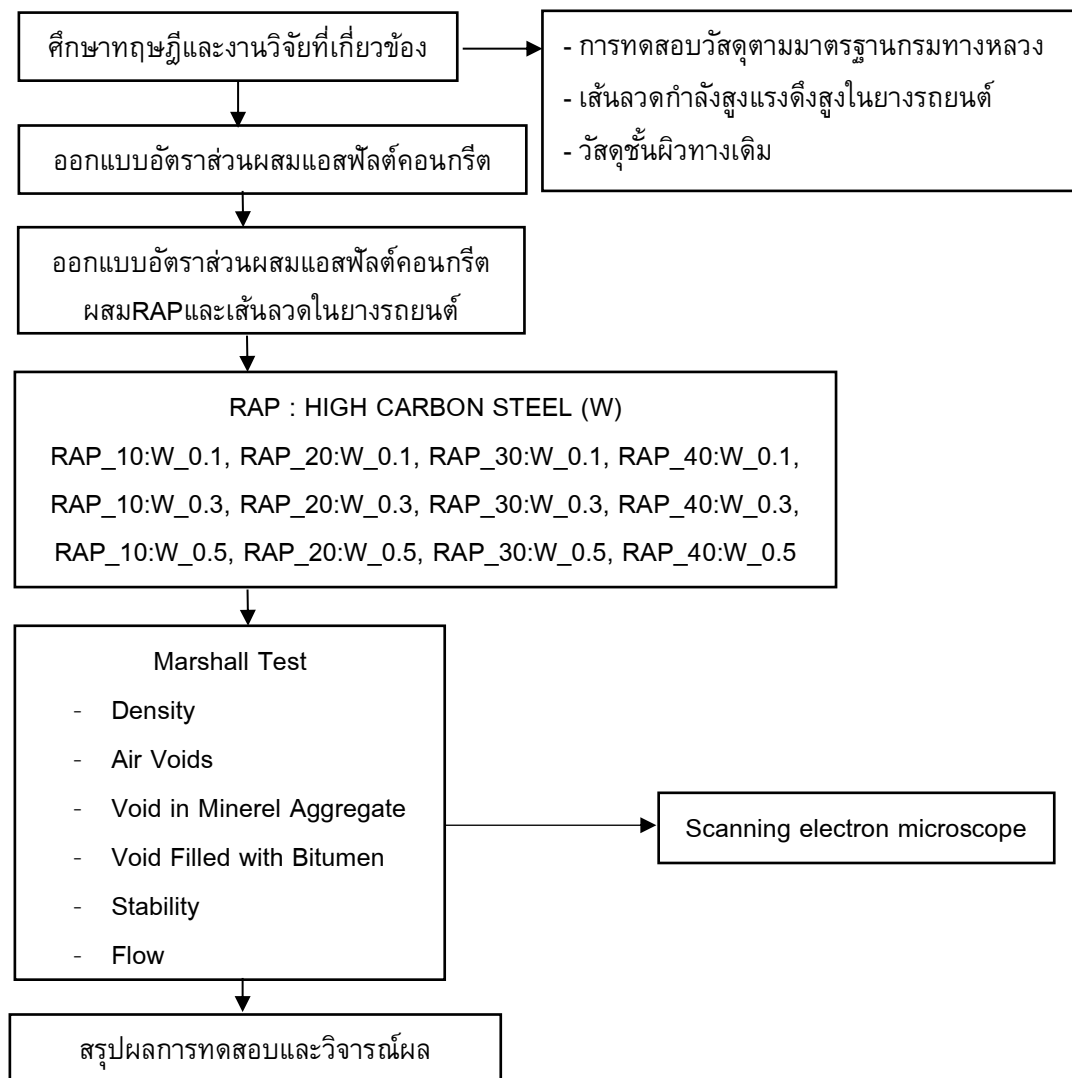
โดยจะพิจารณาจากค่าเสถียรภาพ ค่าอัตราการใช้ ค่าความหนาแน่น ค่าร้อยละของช่องว่างอากาศ เปรียบเทียบกับค่าข้อกำหนดในมาตรฐานกรมทางหลวง ทล.ม.- 408/2532 ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ข้อกำหนดในการออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตตามมาตรฐานกรมทางหลวง
ทล.ม.- 408/2532 [13]

ชั้นทาง	
รายการ	Binder Course
Blows	75
Stability Min N (lb)	8,006 (1,800)
Flow 0.25 mm (0.01 in)	8 - 16
% Air Void	3 - 6
Percent Voids in Mineral Aggregate (VMA) (Min)	13
Stability/Flow (Min) N/0.25 mm (lb/0.01 in)	712 (160)
Percent Strength index (Min)	75

3.4 เปรียบเทียบคุณสมบัติพื้นฐานโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM)

โดยจะพิจารณาลักษณะรูปร่าง พื้นผิวหน้าของตัวอย่าง การจัดเรียงตัว การยึดเกาะระหว่างอนุภาค เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของตัวอย่าง แอสฟัลต์คอนกรีตแบบธรรมดา (HMA) และแอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์ที่กำลังขยาย 10, 50 และ 100 เท่า



หมายเหตุ: คำอธิบายสัญลักษณ์ตัวย่อ

- RAP_10 = ส่วนผสมRAP อัตราส่วนร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของมวลรวม
- W_0.1 = ส่วนผสมเส้นลวดในยางรถยนต์ อัตราส่วนร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนักของมวลรวม

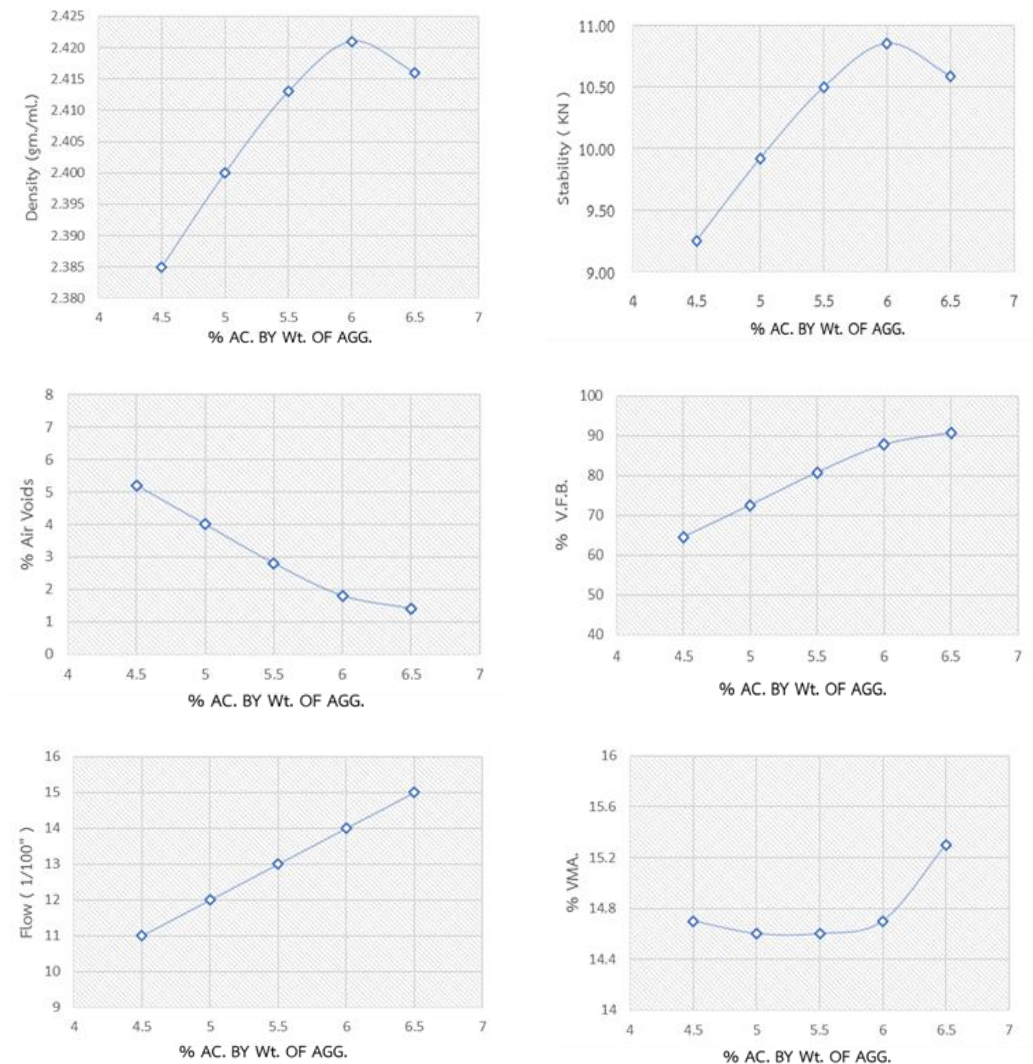
รูปที่ 5 แผนผังขั้นตอนการทำวิจัย

4. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

4.1 ผลทดสอบคุณสมบัติแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีมาร์แชลล์

ผลการทดสอบคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตแบบธรรมดาที่ไม่มีส่วนผสมของ RAP และ เส้นลวดในยางรถยนต์ โดยใช้วัสดุมวลรวมตามสัดส่วนผสมที่แสดงไว้ในตารางที่ 1 ผสมกับ แอสฟัลต์ซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 4.5, 5.0, 5.5, 6.0 และ 6.5 โดยน้ำหนักของมวลรวม

ผลทดสอบนี้จะนำไปใช้เป็นค่าเปรียบเทียบกับอัตราส่วนผสมที่มี RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์ต่อไป ดังแสดงในตารางที่ 4 และรูปที่ 6



รูปที่ 6 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติที่ได้จากการออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีมาร์แชลล์

ตารางที่ 4 ผลทดสอบคุณสมบัติแอสฟัลต์คอนกรีต

MIX PROPORTION HOT BIN 1 : 2 : 3 : 4 = 40 : 23 : 17 : 20						
% AC by Wt. of Agg.	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	Tolerant
Density	2.385	2.400	2.413	2.421	2.416	2.391-2.408
% Air Void	5.2	4.0	2.8	1.8	1.4	3 - 6
Stability (lbs)	2,080	2,230	2,360	2,440	2,380	1,800 min
Flow (1/100")	11	12	13	14	15	8 - 16
Stability/Flow	189.1	185.8	181.5	174.2	158.6	160 min
VFB (%)	64.6	72.6	80.8	87.8	90.8	66-77
VMA (%)	14.7	14.6	14.6	14.7	15.3	13 min

4.2 ผลทดสอบคุณสมบัติแอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์ที่อัตราส่วนแอสฟัลต์ซีเมนต์ต่าง ๆ

ผลการทดสอบคุณสมบัติโดยส่วนใหญ่มีทิศทางที่ดีขึ้นกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตแบบธรรมดา ถึงแม้ว่าค่าจะไม่ได้สูงมากแต่ก็ยังผ่านอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของกรมทางหลวง ดังผลแสดงต่อไปนี้

4.2.1 ผลทดสอบคุณสมบัติแอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์ที่อัตราส่วนแอสฟัลต์ซีเมนต์ร้อยละ 4.5

ค่าความหนาแน่น (Density) พบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์มีค่าความหนาแน่นดีกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตธรรมดาในทุกอัตราส่วนผสมและสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานของกรมทางหลวง จะเห็นได้จากการทดสอบเมื่อเพิ่มปริมาณ RAP ค่าความหนาแน่นจะยิ่งเพิ่มสูงขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 5 และรูปที่ 7

ค่าร้อยละของช่องว่างอากาศ (Air Voids) พบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์มีค่าร้อยละของช่องว่างอากาศอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานกรมทางหลวง ถึงแม้ว่าจะอยู่ในเกณฑ์ล่างเนื่องจากเส้นลวดในยางรถยนต์ที่ผสมลงไปในมวลรวมผสมกับยางแอสฟัลต์และส่วนละเอียดจาก RAP เข้าไปแทรกแทนที่ช่องว่างได้น้อย ดังแสดงในตารางที่ 5 และรูปที่ 7

ค่าเสถียรภาพ (Stability) พบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์มีค่าเสถียรภาพไม่ค่อยมีความแตกต่างกัน อัตราส่วนผสมที่มีค่าเสถียรภาพมากที่สุดคือ RAP ร้อยละ 10 ผสมกับเส้นลวดในยางรถยนต์ร้อยละ 0.3 มีค่าเท่ากับ 2,424 lbs ทุกอัตราส่วนจะผ่านเกณฑ์มาตรฐานของกรมทางหลวง ดังแสดงในตารางที่ 5 และรูปที่ 7

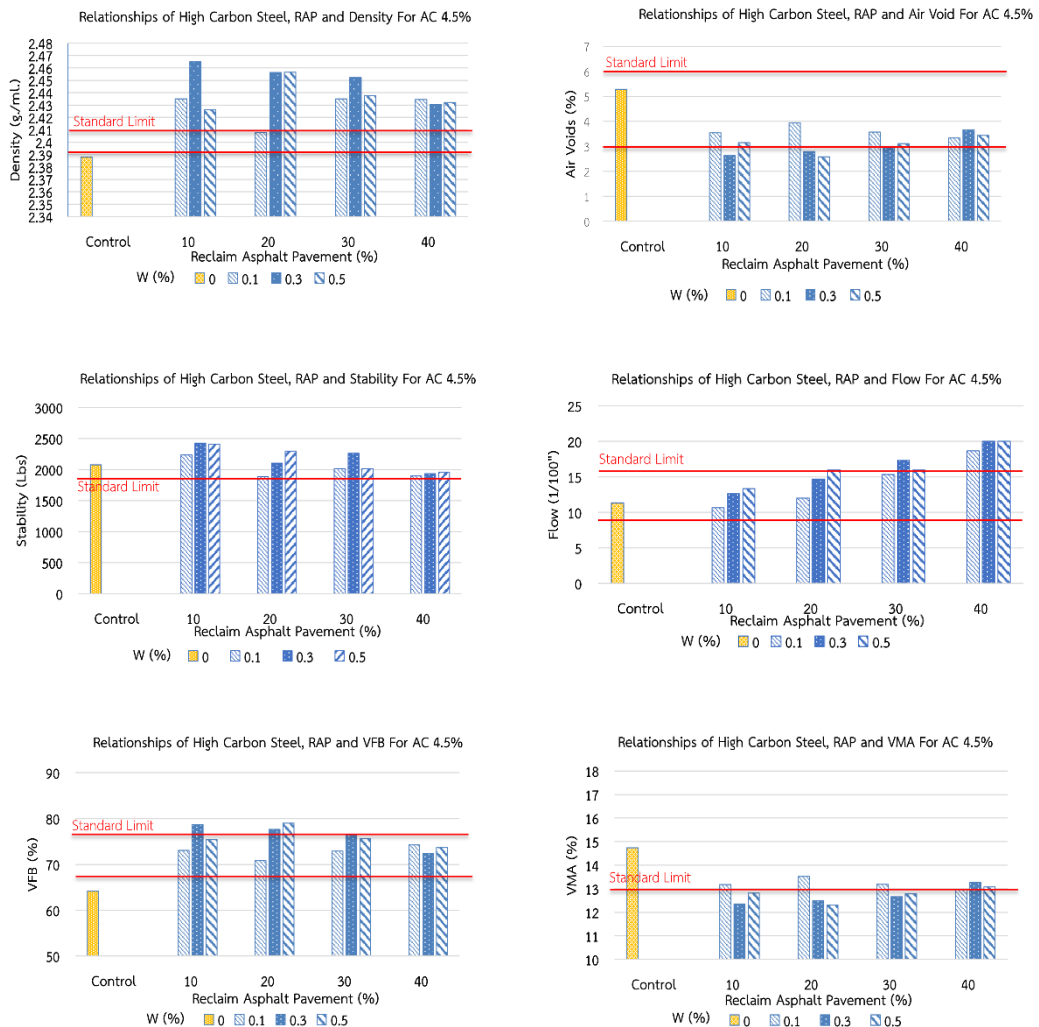
ค่าการไหล (Flow) พบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์มีค่าการไหลเพิ่มมากขึ้นเมื่ออัตราส่วนผสมของ RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์ที่เพิ่มขึ้น และส่วนใหญ่ก็มีค่ามากกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตแบบธรรมดา แต่ที่ปริมาณ RAP ร้อยละ 10, 20 และ 30 ก็ยังผ่านเกณฑ์มาตรฐานของกรมทางหลวง ดังแสดงในตารางที่ 5 และรูปที่ 7

ร้อยละช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์ (Voids filled with Bitumen, VFB) พบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์มีค่าร้อยละช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์มากกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตแบบธรรมดาทุกอัตราส่วน ดังแสดงในตารางที่ 5 และรูปที่ 4

ปริมาณช่องว่างของวัสดุผสมรวม (Voids in Mineral Aggregate, VMA) พบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์มีค่าปริมาณช่องว่างของวัสดุผสมรวมน้อยกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตแบบธรรมดาในทุกอัตราส่วน ดังแสดงในตารางที่ 5 และรูปที่ 7

ตารางที่ 5 ผลทดสอบคุณสมบัติแอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์ที่อัตราส่วนแอสฟัลต์ซีเมนต์ร้อยละ 4.5

Mixed simple	Density (g/cm ³)	Air Void (%)	Stability (lb.)	VFB (%)	VMA (%)	Flow (0.25 mm)
Control	2.390	5.29	2078.80	64.14	14.74	11
RAP10 W0.1	2.430	3.55	2238.53	73.06	13.18	11
RAP10 W0.3	2.453	2.63	2424.59	78.70	12.35	13
RAP10 W0.5	2.440	3.15	2409.56	75.42	12.82	13
RAP20 W0.1	2.420	3.94	1889.00	70.86	13.53	12
RAP20 W0.3	2.450	2.80	2105.64	77.63	12.50	15
RAP20 W0.5	2.453	2.59	2295.63	78.99	12.31	16
RAP30 W0.1	2.427	3.57	2013.63	72.93	13.20	15
RAP30 W0.3	2.443	2.97	2261.85	76.52	12.66	17
RAP30 W0.5	2.440	3.11	2013.45	75.66	12.78	16
RAP40 W0.1	2.433	3.34	1898.07	74.30	12.99	19
RAP40 W0.3	2.427	3.66	1936.67	72.44	13.28	20
RAP40 W0.5	2.433	3.44	1955.99	73.67	13.08	20



รูปที่ 7 ผลการเปรียบเทียบคุณสมบัติแอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์ที่อัตราส่วนแอสฟัลต์ซีเมนต์ร้อยละ 4.5

4.2.2 ผลทดสอบคุณสมบัติแอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์ที่อัตราส่วนแอสฟัลต์ซีเมนต์ร้อยละ 5.0

ค่าความหนาแน่น (Density) พบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์มีค่าความหนาแน่นดีกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตธรรมดาในทุกอัตราส่วนผสมและสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานของกรมทางหลวง อาจมาเนื่องจากการผสมเส้นลวดในยางรถยนต์ลงไปใหม่รวมเมื่อผสมกับยางแอสฟัลต์จะเกิดการสร้างพันธะยึดเกาะกันเกิดขึ้นในระดับอนุภาคจะเห็นได้จาก

ค่าการทดสอบอัตราส่วนมวลรวมเดียวกัน เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นลวดในยางรถยนต์ ค่าความหนาแน่นจะยิ่งเพิ่มสูงขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 6 และรูปที่ 8

ค่าร้อยละของช่องว่างอากาศ (Air Voids) พบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์มีค่าร้อยละของช่องว่างอากาศมีค่าค่อนข้างน้อยกว่าค่ามาตรฐานกรมทางหลวง อาจเนื่องจากเส้นลวดในยางรถยนต์ที่ผสมลงไปมวลรวมผสมกับยางแอสฟัลต์และส่วนละเอียดจาก RAP เข้าไปแทรกแทนที่ช่องว่างได้น้อย แต่ก็มีข้อดีตรงที่หากนำไปใช้ในพื้นที่ที่มีอากาศค่อนข้างร้อนจะมีผลดีต่อการลดการเกิดการแฉิมที่ผิวหน้าได้เมื่ออุณหภูมิผิวหน้าของแอสฟัลต์สูง และเมื่อผิวทางมีการตีเส้นจราจรการที่มีค่าช่องว่างระหว่างอากาศน้อยจะทำให้อายุของสัติเส้นมากกว่าผิวทางที่มีช่องว่างอากาศมาก ดังแสดงในตารางที่ 6 และรูปที่ 8

ค่าเสถียรภาพ (Stability) พบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์มีค่าเสถียรภาพไม่ค่อยมีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด จะเห็นอัตราส่วนผสมที่มีค่าเสถียรภาพมากที่สุดคือ RAP ร้อยละ 10 ผสมกับเส้นลวดในยางรถยนต์ร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนักของมวลรวม มีค่าเท่ากับ 2,524.77 lbs โดยส่วนใหญ่แล้วทุกอัตราส่วนจะผ่านเกณฑ์มาตรฐานของกรมทางหลวง ดังแสดงในตารางที่ 6 และรูปที่ 8

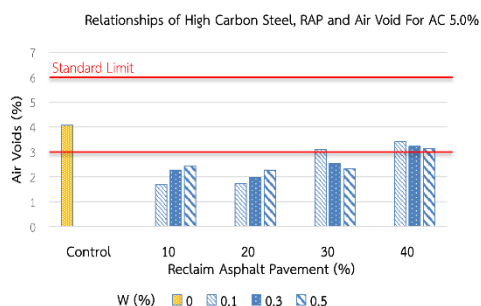
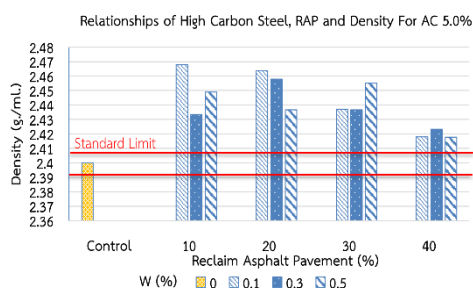
ค่าการไหล (Flow) พบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์มีการไหลเพิ่มมากขึ้นเมื่ออัตราส่วนผสมของ RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์ที่เพิ่มขึ้นและส่วนใหญ่ก็มีค่ามากกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตแบบธรรมดา แต่ที่ปริมาณ RAP ร้อยละ 10 และ ร้อย 20 ก็ยังผ่านเกณฑ์มาตรฐานของกรมทางหลวง ดังแสดงในตารางที่ 6 และรูปที่ 8

ร้อยละช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์ (Voids filled with Bitumen, VFB) พบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์มีค่าร้อยละช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์มากกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตแบบธรรมดาทุกอัตราส่วน ดังแสดงในตารางที่ 6 และรูปที่ 8

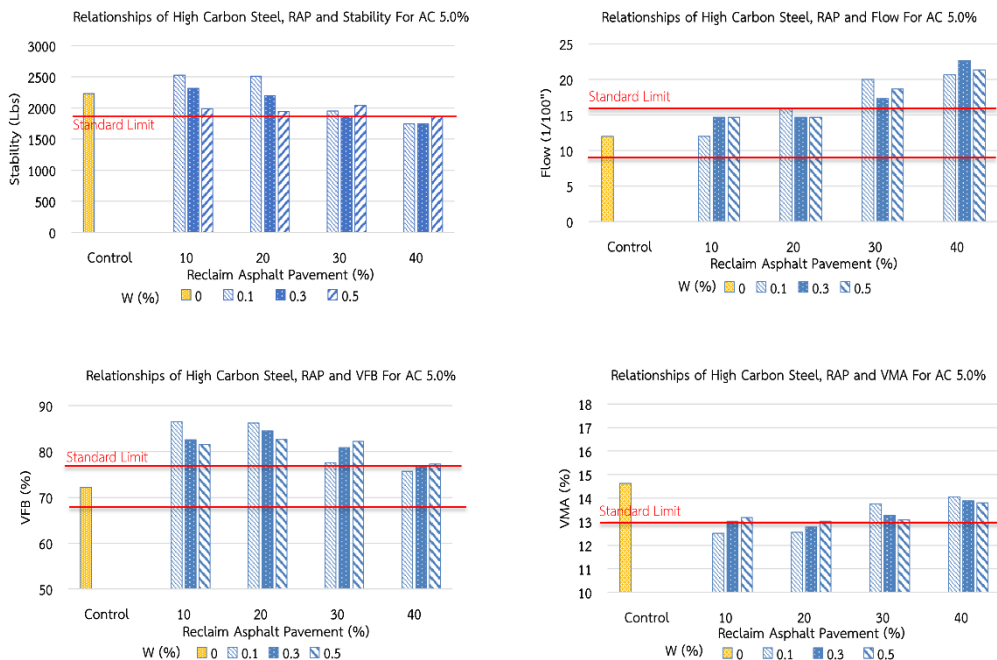
ปริมาณช่องว่างของวัสดุมวลรวม (Voids in Mineral Aggregate, VMA) พบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์มีค่าปริมาณช่องว่างของวัสดุมวลรวมน้อยกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตแบบธรรมดา แต่ส่วนใหญ่ก็ยังผ่านเกณฑ์มาตรฐานของกรมทางหลวง ค่านีจะเป็นตัวบ่งชี้ว่ามวลรวมมีช่องว่างเพียงพอสำหรับให้แอสฟัลต์ยึดเกาะเชื่อมประสานกับอนุภาคต่าง ๆ ป้องกันการแฉิมทะลักของแอสฟัลต์ที่ผิวหน้า ดังแสดงในตารางที่ 6 และรูปที่ 8

ตารางที่ 6 ผลทดสอบคุณสมบัติแอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์ ที่อัตราส่วนแอสฟัลต์ซีเมนต์ร้อยละ 5.0

Mixed simple	Density (g/cm ³)	Air Void (%)	Stability (lb.)	VFB (%)	VMA (%)	Flow (0.25 mm)
Control	2.400	4.07	2078.80	64.14	14.74	11
RAP10 W0.1	2.460	1.69	2524.77	73.06	13.18	11
RAP10 W0.3	2.443	2.27	2316.08	82.59	13.03	15
RAP10 W0.5	2.440	2.43	1989.23	81.54	13.18	15
RAP20 W0.1	2.457	1.73	2508.48	86.23	12.55	16
RAP20 W0.3	2.453	1.98	2198.91	84.52	12.77	15
RAP20 W0.5	2.447	2.26	1942.79	82.64	13.03	15
RAP30 W0.1	2.423	3.09	1951.59	77.53	13.77	20
RAP30 W0.3	2.437	2.54	1862.51	80.83	13.28	17
RAP30 W0.5	2.447	2.32	2037.88	82.24	13.08	19
RAP40 W0.1	2.417	3.41	1743.67	75.71	14.05	21
RAP40 W0.3	2.420	3.23	1742.67	76.74	13.89	23
RAP40 W0.5	2.423	3.14	1863.00	77.28	13.80	21



รูปที่ 8 ผลการเปรียบเทียบคุณสมบัติแอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์ ที่อัตราส่วนแอสฟัลต์ซีเมนต์ร้อยละ 5.0



รูปที่ 8 ผลการเปรียบเทียบคุณสมบัติแอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์ที่อัตราส่วนแอสฟัลต์ซีเมนต์ร้อยละ 5.0 (ต่อ)

4.2.3 ผลทดสอบคุณสมบัติแอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์ที่อัตราส่วนแอสฟัลต์ซีเมนต์ร้อยละ 5.5

ค่าความหนาแน่น (Density) พบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์มีค่าความหนาแน่นดีกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตธรรมดาเกือบทุกอัตราส่วนผสมและสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานของกรมทางหลวง มีเพียงส่วนผสมที่ RAP ร้อยละ 10 และ ร้อยละ 20 ที่ผสมเส้นลวดร้อยละ 0.1 เท่านั้นที่มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์เพียงเล็กน้อย ดังแสดงในตารางที่ 7 และรูปที่ 9

ค่าร้อยละของช่องว่างอากาศ (Air Voids) พบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์มีค่าร้อยละของช่องว่างอากาศมีค่าค่อนข้างน้อยกว่าค่ามาตรฐานกรมทางหลวง ดังแสดงในตารางที่ 7 และรูปที่ 9

ค่าเสถียรภาพ (Stability) พบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์มีค่าเสถียรภาพน้อยกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตแบบธรรมดา โดยอัตราส่วนผสมที่มีค่าเสถียรภาพผ่านเกณฑ์คือ RAP ร้อยละ 10 และ ร้อยละ 20 ในทุกอัตราส่วนผสมเส้นลวดในยางรถยนต์ ดังแสดงในตารางที่ 7 และรูปที่ 9

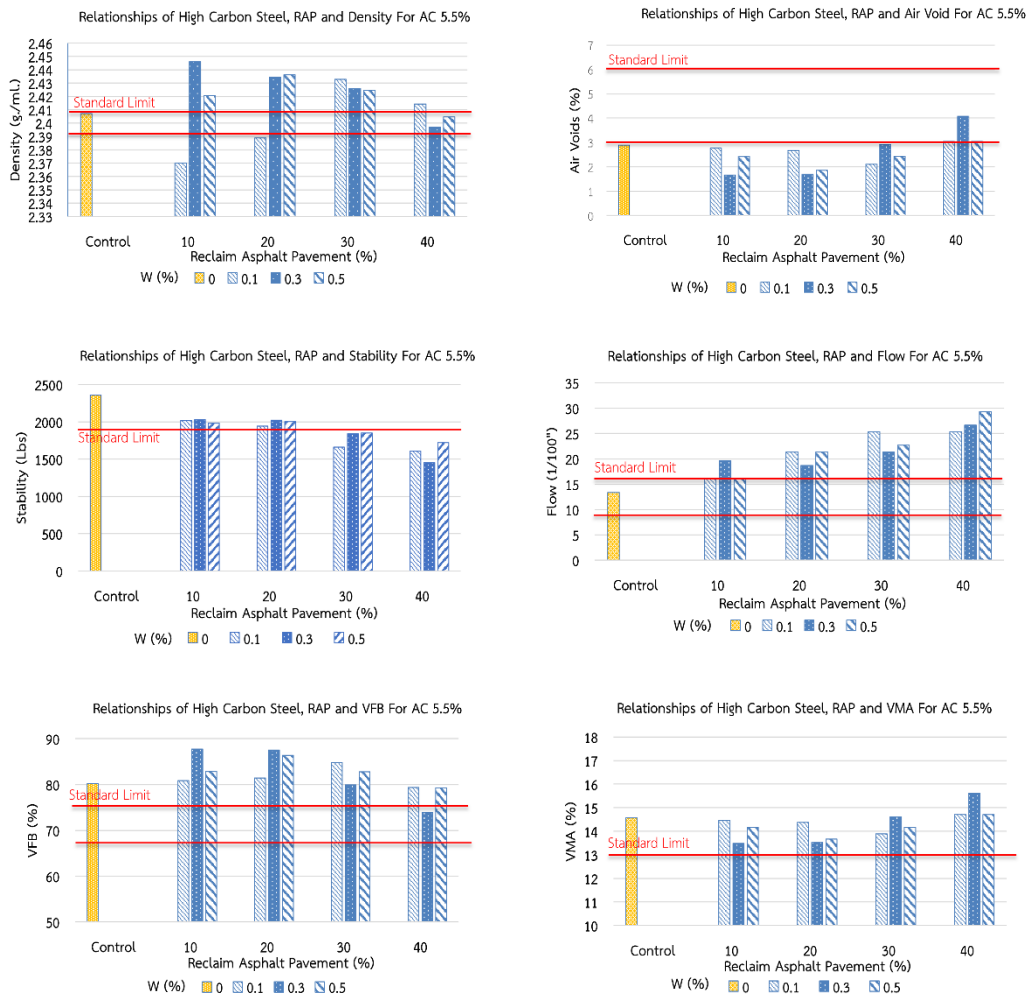
ค่าการไหล (Flow) พบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์มีค่าการไหลเพิ่มมากขึ้นเมื่ออัตราส่วนผสมของ RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์ที่เพิ่มขึ้นและส่วนใหญ่ก็มีค่ามากกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตแบบธรรมดา แต่ที่ปริมาณ RAP ร้อยละ 10 ก็ยังอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของกรมทางหลวง ดังแสดงในตารางที่ 7 และรูปที่ 9

ร้อยละช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์ (Voids filled with Bitumen, VFB) พบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์มีค่าร้อยละช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์มากกว่าเกณฑ์มาตรฐานในทุกอัตราส่วนผสม ดังแสดงในตารางที่ 7 และรูปที่ 9

ปริมาณช่องว่างของวัสดุมวลรวม (Voids in Mineral Aggregate, VMA) พบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์มีค่าปริมาณช่องว่างของวัสดุมวลรวมไม่แตกต่างจากแอสฟัลต์คอนกรีตแบบธรรมดา และทุกอัตราส่วนยังผ่านเกณฑ์มาตรฐานของกรมทางหลวง ดังแสดงในตารางที่ 7 และรูปที่ 9

ตารางที่ 7 ผลทดสอบคุณสมบัติแอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์ที่อัตราส่วนแอสฟัลต์ซีเมนต์ร้อยละ 5.5

Mixed simple	Density (g/cm ³)	Air Void (%)	Stability (lb.)	VFB (%)	VMA (%)	Flow (0.25 mm)
Control	2.410	2.89	2363.33	80.19	14.57	13
RAP10 W0.1	2.417	2.76	2017.25	80.89	14.46	16
RAP10 W0.3	2.443	1.66	2030.16	87.72	13.49	20
RAP10 W0.5	2.423	2.43	1984.33	82.85	14.17	16
RAP20 W0.1	2.420	2.67	1942.08	81.41	14.38	21
RAP20 W0.3	2.440	1.69	2024.19	87.48	13.52	19
RAP20 W0.5	2.440	1.86	2005.00	86.40	13.66	21
RAP30 W0.1	2.427	2.11	1662.09	84.78	13.89	25
RAP30 W0.3	2.413	2.93	1840.16	79.94	14.61	21
RAP30 W0.5	2.420	2.44	1850.00	82.82	14.17	23
RAP40 W0.1	2.407	3.04	1609.15	79.33	14.70	25
RAP40 W0.3	2.383	4.08	1455.36	73.89	15.62	27
RAP40 W0.5	2.407	3.05	1724.33	79.27	14.71	29



รูปที่ 9 ผลการเปรียบเทียบคุณสมบัติแอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์ที่อัตราส่วนแอสฟัลต์ซีเมนต์ร้อยละ 5.5

4.2.4 ผลทดสอบคุณสมบัติแอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์ที่อัตราส่วนแอสฟัลต์ซีเมนต์ร้อยละ 6.0

ค่าความหนาแน่น (Density) พบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP เมื่อเพิ่มอัตราส่วนเส้นลวดในยางรถยนต์ค่าความหนาแน่นจะมีแนวโน้มสูงขึ้น และทั้งหมดผ่านเกณฑ์มาตรฐานของกรมทางหลวง ดังแสดงในตารางที่ 8 และรูปที่ 10

ค่าร้อยละของช่องว่างอากาศ (Air Voids) พบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์มีค่าร้อยละของช่องว่างอากาศมีค่าน้อยกว่าค่ามาตรฐานกรมทางหลวงในทุกอัตราส่วนผสม ดังแสดงในตารางที่ 8 และรูปที่ 10

ค่าเสถียรภาพ (Stability) พบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP เมื่อเพิ่มอัตราส่วนเส้นลวดในยางรถยนต์ ค่าเสถียรภาพจะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น โดยอัตราส่วนผสมที่มีค่าเสถียรภาพมากที่สุดคือ RAP ร้อยละ 20 เส้นลวด 0.5 โดยน้ำหนักของมวลรวม ดังแสดงในตารางที่ 8 และรูปที่ 10

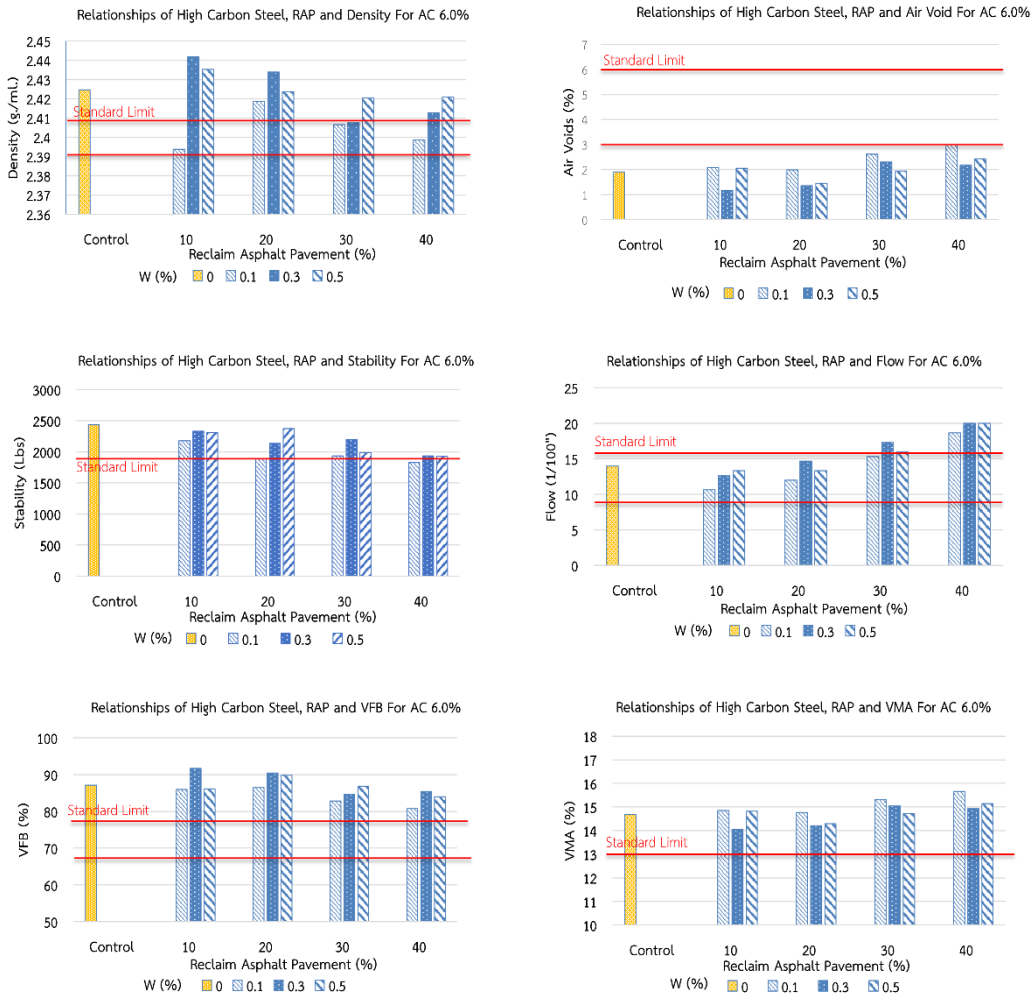
ค่าการไหล (Flow) เมื่อเพิ่มอัตราส่วน RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์ให้มากขึ้นพบว่า ค่าการไหลจะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น แต่ที่ปริมาณ RAP ร้อยละ 10 และ ร้อยละ 20 ในทุกอัตราส่วนผสม เส้นลวดในยางรถยนต์ อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของกรมทางหลวง ดังแสดงในตารางที่ 8 และรูปที่ 10

ร้อยละช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์ (Voids filled with Bitumen, VFB) พบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์มีค่าร้อยละช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์มีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณ RAP แต่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นลวดในยางรถยนต์ ดังแสดงในตารางที่ 8 และรูปที่ 10

ปริมาณช่องว่างของวัสดุมวลรวม (Voids in Mineral Aggregate, VMA) พบว่า ค่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ RAP แต่มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นลวดในยางรถยนต์ และทุกอัตราส่วนยังผ่านเกณฑ์มาตรฐานของกรมทางหลวง ดังแสดงในตารางที่ 8 และรูปที่ 10

ตารางที่ 8 ผลทดสอบคุณสมบัติแอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์ ที่อัตราส่วนแอสฟัลต์ซีเมนต์ร้อยละ 6.0

Mixed sample	Density (g/cm ³)	Air Void (%)	Stability (lb.)	VFB (%)	VMA (%)	Flow (0.25 mm)
Control	2.420	1.89	2436.67	87.10	14.68	14
Rap10 W0.1	2.417	2.08	2176.93	85.97	14.84	11
Rap10 W0.3	2.440	1.17	2331.33	91.67	14.05	13
Rap10 W0.5	2.417	2.06	2310.33	86.13	14.82	13
Rap20 W0.1	2.417	1.99	1889.00	85.23	14.77	12
Rap20 W0.3	2.433	1.35	2133.00	90.48	14.21	15
Rap20 W0.5	2.430	1.45	2375.67	89.83	14.30	13
Rap30 W0.1	2.403	2.62	1935.20	82.87	15.31	15
Rap30 W0.3	2.413	2.31	2201.00	84.63	15.04	17
Rap30 W0.5	2.420	1.94	1987.00	86.84	14.72	16
Rap40 W0.1	2.393	3.01	1828.27	80.76	15.65	19
Rap40 W0.3	2.413	2.18	1935.72	85.40	14.93	20
Rap40 W0.5	2.407	2.42	1929.21	83.99	15.14	20



รูปที่ 10 ผลการเปรียบเทียบคุณสมบัติแอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์ที่อัตราส่วนแอสฟัลต์ซีเมนต์ร้อยละ 6.0

4.2.5 ผลทดสอบคุณสมบัติแอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์ที่อัตราส่วนแอสฟัลต์ซีเมนต์ร้อยละ 6.5

ค่าความหนาแน่น (Density) พบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP เมื่อเพิ่มอัตราส่วนเส้นลวดในยางรถยนต์ค่าความหนาแน่นจะมีแนวโน้มลดลงอย่างเห็นได้ชัด แต่ส่วนใหญ่ก็ผ่านเกณฑ์มาตรฐานของกรมทางหลวง ดังแสดงในตารางที่ 9 และรูปที่ 11

ค่าร้อยละของช่องว่างอากาศ (Air Voids) พบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์มีค่าร้อยละของช่องว่างอากาศมีค่าน้อยกว่าค่ามาตรฐานกรมทางหลวงในทุกอัตราส่วนผสม ดังแสดงในตารางที่ 9 และรูปที่ 11

ค่าเสถียรภาพ (Stability) เมื่อเพิ่มอัตราส่วน RAP พบว่าค่าเสถียรภาพจะมีแนวโน้มลดลง โดยมีเพียงอัตราส่วนผสม RAP ร้อยละ 10 และ 20 ที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานกรมทางหลวง ดังแสดงในตารางที่ 9 และรูปที่ 11

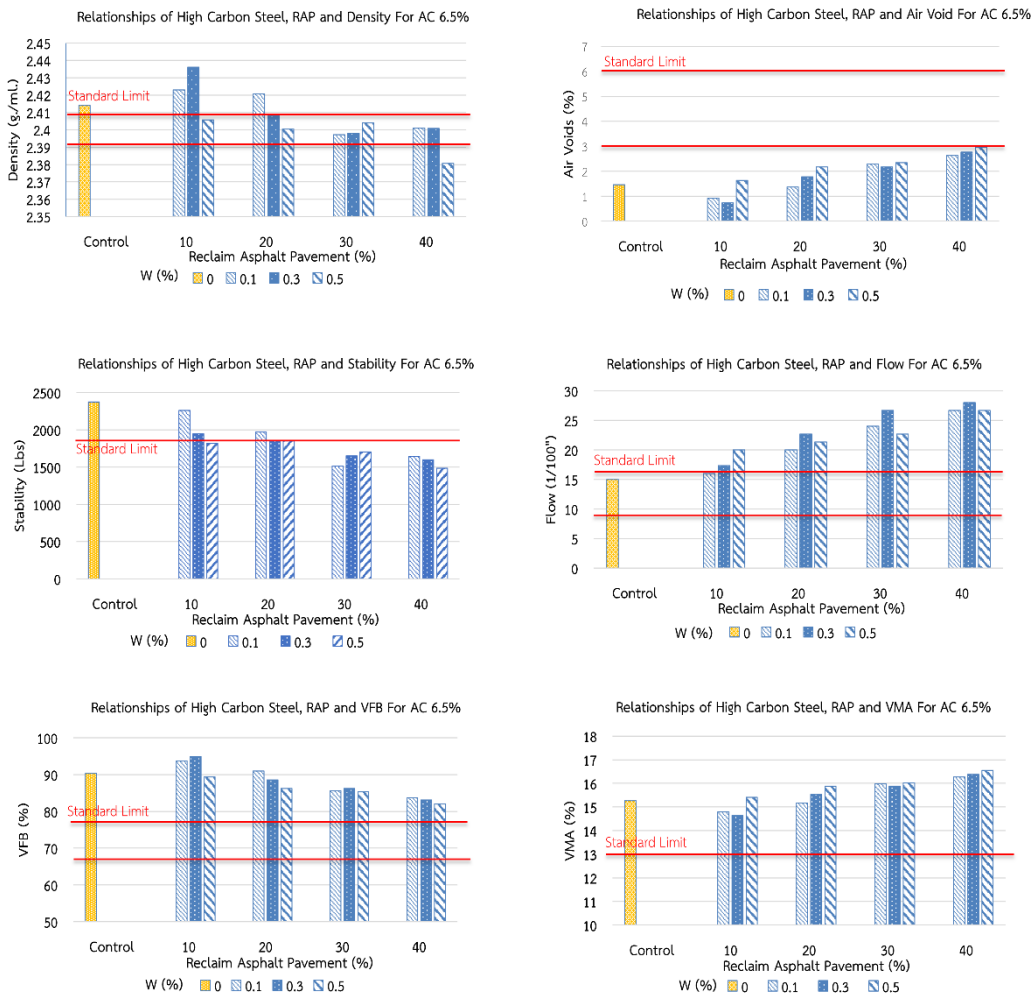
ค่าการไหล (Flow) เมื่อเพิ่มอัตราส่วน RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์ให้มากขึ้นพบว่าค่าการไหลจะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น และทุกอัตราส่วนผสมสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานของกรมทางหลวง ดังแสดงในตารางที่ 9 และรูปที่ 11

ร้อยละช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์ (Voids filled with Bitumen, VFB) พบว่าแอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์มีค่าร้อยละช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์มีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณ RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์ ดังแสดงในตารางที่ 9 และรูปที่ 11

ปริมาณช่องว่างของวัสดุมวลรวม (Voids in Mineral Aggregate, VMA) พบว่าค่าปริมาณช่องว่างของวัสดุมวลรวมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณ RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์ และทุกอัตราส่วนยังผ่านเกณฑ์มาตรฐานของกรมทางหลวง ดังแสดงในตารางที่ 9 และรูปที่ 11

ตารางที่ 9 ผลทดสอบคุณสมบัติแอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์ที่อัตราส่วนแอสฟัลต์ซีเมนต์ร้อยละ 6.5

Mixed simple	Density (g/cm ³)	Air Void (%)	Stability (lb.)	VFB (%)	VMA (%)	Flow (0.25 mm)
Control	2.420	1.47	2376.67	90.00	15.26	15
Rap10 W0.1	2.430	0.92	2258.97	93.76	14.80	16
Rap10 W0.3	2.430	0.75	1949.00	94.91	14.64	17
Rap10 W0.5	2.410	1.64	1821.35	89.36	15.41	20
Rap20 W0.1	2.417	1.37	1972.67	91.00	15.18	20
Rap20 W0.3	2.407	1.78	1851.57	88.53	15.53	23
Rap20 W0.5	2.400	2.18	1852.16	86.28	15.87	21
Rap30 W0.1	2.397	2.30	1514.86	85.61	15.98	24
Rap30 W0.3	2.400	2.18	1652.27	86.27	15.88	27
Rap30 W0.5	2.393	2.34	1704.28	85.38	16.02	23
Rap40 W0.1	2.387	2.64	1643.12	83.77	16.27	27
Rap40 W0.3	2.383	2.76	1598.33	83.14	16.38	28
Rap40 W0.5	2.380	2.97	1482.32	82.08	16.55	27



รูปที่ 11 ผลการเปรียบเทียบคุณสมบัติแอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์ที่อัตราส่วนแอสฟัลต์ซีเมนต์ร้อยละ 6.5

4.3 ผลการทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM)

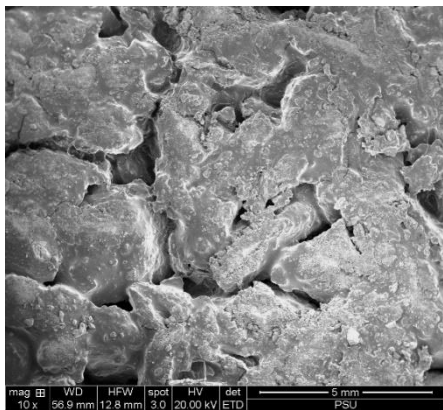
พบว่าเมื่อนำก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตแบบธรรมดา (HMA) แอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์ไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แบ่งภาพเป็นกำลังขยาย 10, 50, 100 เท่าตามลำดับ จะเห็นความแตกต่างระหว่างสองตัวอย่างได้อย่างชัดเจน

การจัดเรียงตัวภายในมวลรวม เมื่อใส่เส้นลวดในยางรถยนต์เข้ามาเป็นส่วนผสมจะสังเกตว่า มีการลดช่องว่างระหว่างมวลรวมเหลือน้อยลงเมื่อเทียบกับแอสฟัลต์คอนกรีตแบบธรรมดา ซึ่งก็ตรง

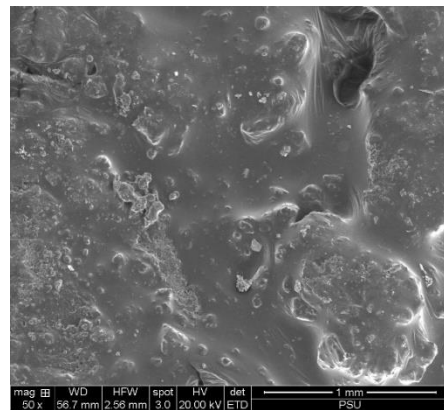
กับผลจากการทดสอบมาร์แชลล์ที่มีค่าความหนาแน่นเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณของเส้นลวดในยางรถยนต์ ดังแสดงในรูปที่ 12 a) และรูปที่ 13 a)

เมื่อมีเส้นลวดเข้ามามีการสร้างพันธะยึดเกาะเชื่อมต่อระหว่างรอยแตกหักและส่วนที่เป็นช่องว่างอากาศภายในมวลรวมซึ่งก็สอดคล้องกับงานวิจัย [11] ที่เส้นใยสร้างพันธะยึดเกาะกับยางแอสฟัลต์แล้วส่งผลให้มีค่าความต้านทานต่อการเสียรูปเพิ่มสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 13 a) b) และ c)

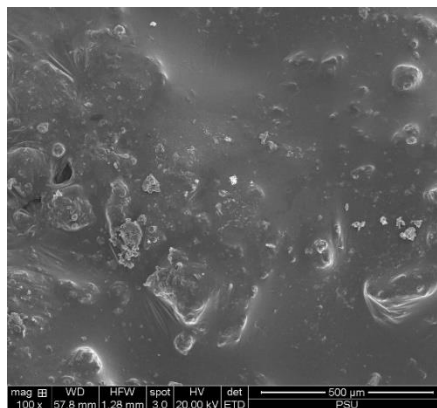
จากในรูปที่ 13 c) จะสังเกตว่า เส้นลวดถูกห่อหุ้มไปด้วยยางแอสฟัลต์เกือบทั้งเส้นและที่ผิวหน้าของเส้นลวดยังมีพื้นที่ผิวที่ค่อนข้างขรุขระช่วยเสริมแรงยึดเกาะกับยางแอสฟัลต์ได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งข้อดีตรงส่วนนี้จะส่งผลให้แอสฟัลต์คอนกรีตที่มีเส้นลวดเป็นส่วนผสมสามารถทนต่อการรับน้ำหนักบรรทุกทุกในระยะยาวได้ดีกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตแบบธรรมดา



a) กำลังขยาย 10 เท่า

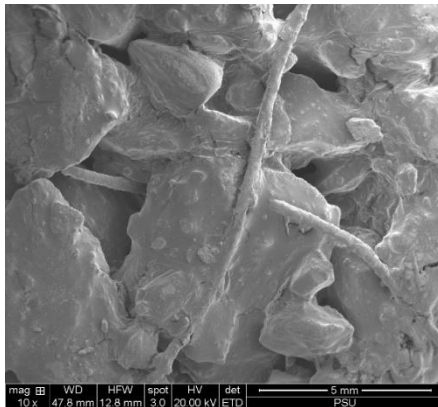


b) กำลังขยาย 50 เท่า

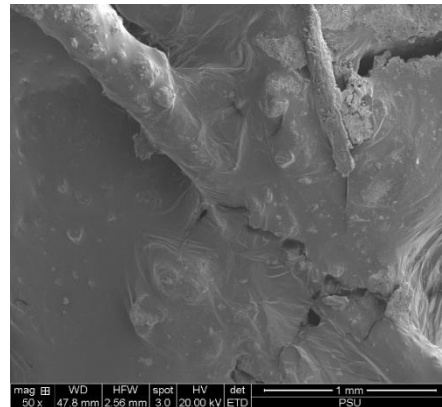


c) กำลังขยาย 100 เท่า

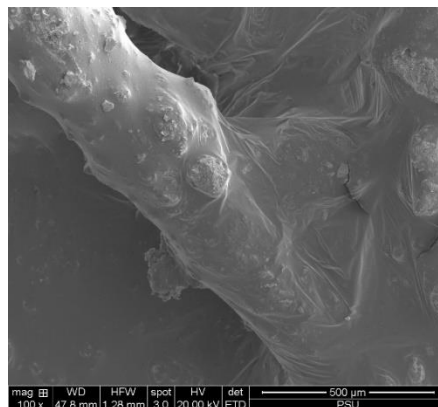
รูปที่ 12 ภาพถ่าย SEM แอสฟัลต์คอนกรีตแบบธรรมดา



a) กำลังขยาย 10 เท่า



b) กำลังขยาย 50 เท่า



c) กำลังขยาย 100 เท่า

รูปที่ 13 ภาพถ่าย SEM แอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP และเส้นลวดในยางรถยนต์

5. สรุปและอภิปรายผลงานวิจัย

ผลการทดลองทั้งหมดสรุปว่า เส้นลวดในยางรถยนต์ผสมปรับปรุงคุณภาพสามารถใช้เป็นส่วนผสมในชั้นผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตได้ โดยที่อัตราส่วนยาง AC ร้อยละ 5.0 RAP ร้อยละ 10 สามารถใช้ W0.1 โดยน้ำหนักของมวลรวม ถึงแม้ปริมาณเส้นลวดที่ใช้อาจจะน้อยกว่างานวิจัยที่ผ่านมาในประเทศอิรัก [9] ที่ใช้เส้นใยเหล็กร้อยละ 0.2 ปรับปรุงคุณภาพแอสฟัลต์ ก็ยังมีค่าเสถียรภาพสูงที่สุดถึง 2,524.77 lbs ซึ่งสูงกว่าค่าแอสฟัลต์คอนกรีตแบบธรรมดาถึงร้อยละ 10 ทั้งนี้ในทุก ๆ อัตราส่วนผสมเส้นลวดในยางรถยนต์มีความหนาแน่นที่สูงกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตแบบธรรมดาทั้งหมด สอดคล้องกับการมีเส้นลวดในยางรถยนต์เป็นส่วนผสมนั้นจะเกิดการสร้างพันธะยึดเกาะกันภายในมวลรวมแอสฟัลต์ยึดเกาะกันที่ผิวหน้าของเส้นลวดในยางรถยนต์ซึ่งมีความขรุขระจากผลการทดสอบ SEM ทำให้เห็นได้ชัดว่าการมีวัสดุประเภทเส้นใยผสมปรับปรุงคุณภาพ

ในแอสฟัลต์คอนกรีตช่วยเพิ่มแรงยึดเกาะภายในสอดคล้องกับงานวิจัยในประเทศจีน [11] ที่ใช้เส้นใยหินบะซอลต์ปรับปรุงคุณภาพแอสฟัลต์คอนกรีตได้ผลดี การใช้ RAP เป็นส่วนผสมในงานวิจัยครั้งนี้ถึงแม้จะใช้ได้เพียงร้อยละ 10 ของมวลรวม ซึ่งหากเทียบกับงานวิจัยในประเทศไทยที่ผ่านมาที่ใช้ได้ถึงร้อยละ 40 [6] ซึ่งถือว่าต่างกันมาก แต่ค่าเสถียรภาพและค่าความหนาแน่นที่สัดส่วน RAP เท่ากันในงานวิจัยนี้มีค่าที่สูงกว่างานวิจัยที่ดังกล่าวที่ผ่านมา สามารถลดการใช้มวลรวมได้ถึงร้อยละ 20 ลดราคาต้นทุนงาน AC Binder Course ลงร้อยละ 5 ต่อตารางเมตร ถึงแม้ว่าคุณสมบัติโดยรวมจะไม่ได้ดีมากแต่ในภาพรวมก็ผ่านเกณฑ์มาตรฐานของกรมทางหลวง ซึ่งหากนำไปใช้จริงในชั้นผิวทางของกรมทางหลวงถึงแม้จะไม่ได้ใช้ในเส้นทางสายหลักที่มีปริมาณการจราจรที่สูงมากก็สามารถใช้ในทางสายรองหรือทางขนาน (Frontage Road) ที่มีปริมาณการจราจรที่น้อยกว่าก็จะช่วยลดอัตราส่วนผสมของมวลรวมใหม่และเป็นการนำวัสดุมาหมุนเวียนใช้ใหม่ได้และลดต้นทุนในการทำลายยางรถยนต์เก่าที่ผ่านการใช้งานมาแล้วอีกด้วย

ผู้วิจัยขอเสนอแนะว่าในการนำวัสดุชั้นผิวทางเดิม RAP มาเป็นส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตนั้นควรทดลองศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติของการนำ RAP มาปรับปรุงคุณภาพระหว่าง RAP ของสายทางที่มีอายุบริการที่ต่างกันและสายทางที่มีปริมาณการจราจรที่ต่างกัน

เส้นลวดในยางรถยนต์ที่ผ่านการใช้งานแล้ววัสดุชนิดนี้ถือเป็นเรื่องใหม่สำหรับภายในประเทศที่มีการนำมาปรับปรุงคุณภาพแอสฟัลต์คอนกรีต หากมีการทดสอบวัสดุชนิดนี้ร่วมกับยางแอสฟัลต์ชนิดอื่นและเพิ่มสัดส่วนของเส้นลวดให้มากยิ่งขึ้น เช่น ยาง AC 40-50 ที่มีความแข็งแรงมากกว่า ยาง AC 60-70 เส้นลวดอาจช่วยให้ผิวถนนมีความแข็งแรงและมีความยืดหยุ่นมากขึ้นได้ ซึ่งในปีงบประมาณ 2566 ที่ผ่านมายางชนิดนี้กำลังนิยมใช้ในการก่อสร้างถนนเส้นทางสายหลักของกรมทางหลวง หากผลเป็นที่น่าพอใจผ่านเกณฑ์มาตรฐานคงจะลดปริมาณวัสดุมวลรวมในการก่อสร้างถนนอย่างมากทั้งยังเป็นการช่วยสิ่งแวดล้อมอีกทางหนึ่งด้วย

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์ในการทดสอบงานวิจัยในครั้งนี้

References

- [1] Bureau of Planning. Department of Highways. Highway registration information system [Internet]. 2023 [cited 2023 Nov 23]. Available from: <http://hris2.doh.go.th/home>. (In Thai)

- [2] The Secretariat of the House of Representatives. Budget of the Thailand Government No. 3, Fiscal Year 2023, Volume 5 [Internet]. 2022 [cited 2022 May 31]. Available from: <https://dl.parliament.go.th/handle/20.500.13072/597553>. (In Thai)
- [3] Department of Land Transport. Data report Department of Land Transport fiscal year 2023 [Internet]. 2023 [cited 2023 Sep 30]. Available from: <https://web.dlt.go.th/statistics/>. (In Thai)
- [4] Bridgestone Sales (Thailand). Tire Basic Structure. [Internet]. 2021 [cited 2021 Nov 3]. Available from: <https://bridgestonetruckcenter.com/blog/post/detail/51>. (In Thai)
- [5] Tire Bid Online. Tire composition. [Internet]. 2022 [cited 2022 Jun 3]. Available from: <https://tiresbid.com/content/post/detail/5548>. (In Thai)
- [6] Nokkaew N, Parakul D. Engineering Performance of Asphalt Concrete by Marshall Test Using Different Reclaimed Asphalt Pavement Content. SWU Engineering Journal 2018;13(3):114-26. (In Thai)
- [7] Xing X, Liu T, Pei J, Huang J, Li R, Zhang J, et al. Effect of fiber length and surface treatment on the performance of fibermodified Binder. Construction and Building Materials 2020;248:118702.
- [8] Gupta A, Fresno DC, Gonzalez PL, Hernandez JR. Selection of fibers to improve porous asphalt mixtures using multi-criteria analysis. Construction and Building Materials 2021;266:121198.
- [9] Al-Ridha AS, Alkaissi ZA, Kareem SM. Evaluating the influence of adding steel fibers on the moisture damage and aging resistance of hot asphalt mixtures. Materials Today: Proceedings 2021;47:2520-28.
- [10] Guo Y, Tataranni P, Sangiorgi C. The use of fibres in asphalt mixtures: A state of the art review. Construction and Building Materials 2023;390:131754.
- [11] Gao C, Wu W. Using ESEM to analyze the microscopic property of basalt fiber reinforced asphalt concrete. International Journal of Pavement Research and Technology 2018;11:374-80.
- [12] Department of Highway. Test Number DH-T 604/1974. Standard Test Asphalt Concrete by Marshall Method. Bangkok, Thailand: Department of Highway; 1974. (In Thai)
- [13] Department of Highway. Standard No.DH-S 408/2532. Asphalt Concrete. Bangkok, Thailand: Department of Highway; 1989. (In Thai)

ประวัติผู้เขียนบทความ



ธีรเดช เอียดยอด นักศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย เลขที่ 1 ถนนราชดำเนินนอก ตำบลบ่อยาง อำเภอเมืองสงขลา จังหวัดสงขลา 90000 เบอร์ติดต่อ 082 439 8674 E-mail: teeradetiadyod@gmail.com
งานวิจัยที่สนใจ: งานด้านวัสดุวิศวกรรม



ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชลัท ทิพากรเกียรติ สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย เลขที่ 1 ถนนราชดำเนินนอก ตำบลบ่อยาง อำเภอเมืองสงขลา จังหวัดสงขลา 90000 เบอร์ติดต่อ 088 340 3799 E-mail: chalat.t@rmutsv.ac.th
งานวิจัยที่สนใจ: วิศวกรรมความปลอดภัยทางถนน วิศวกรรมจราจรและวางแผนการขนส่ง และงานด้านวัสดุวิศวกรรม



ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาวัต ไชยชาณวาทิก คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต 10250 เบอร์ติดต่อ 02-320-2777 ต่อ 1202 E-mail: ch.bhawat@gmail.com
งานวิจัยที่สนใจ: งานด้านการวางแผนด้านการจราจรและขนส่ง ความปลอดภัยทางถนน การวิเคราะห์และบริหารจัดการด้านการจราจร

Article History:

Received: February 24, 2024

Revised: October 23, 2024

Accepted: November 1, 2024

การประยุกต์ใช้หลักการซิกซ์ ซิกม่าเพื่อลดสินค้าที่ไม่เป็นไปตามข้อกำหนด ในกระบวนการบรรจุเครื่องดื่ม

AN APPLICATION OF SIX SIGMA PRINCIPLE FOR REDUCTION NON-CONFORMING PRODUCT IN BEVERAGE FILLING PROCESS

เกวลิน สำเภาทอง¹ กวินธร สัยเจริญ² และ สิทธิชัย แซ่เหล่ม³

¹นักศึกษาปริญญาโท, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการจัดการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และ
เทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์,
เลขที่ 6 ถนนราชมรรคาใน อำเภอเมือง จังหวัดนครปฐม 73000,

kewalinsampaothong.23@gmail.com

^{2,3}อาจารย์, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการจัดการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี
อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์, เลขที่ 6 ถนนราชมรรคาใน
อำเภอเมือง จังหวัดนครปฐม 73000,

²saicharoen_k@silpakorn.edu, ³saelem_s@silpakorn.edu

Kewalin Sampaothong¹, Kawinthorn Saichareon² and Sittichai Saelem³

¹Student, Department of Industrial Engineering and Management, Faculty of Engineering
and Industrial Technology, Silpakorn University, Sanam Chandra Palace Campus,
6, Rajamankha Nai Rd., Amphoe Muang, Nakhon Pathom 73000, Thailand,

kewalinsampaothong.23@gmail.com

^{2,3}Lecturer, Department of Industrial Engineering and Management, Faculty of Engineering
and Industrial Technology, Silpakorn University, Sanam Chandra Palace Campus,
6, Rajamankha Nai Rd., Amphoe Muang, Nakhon Pathom 73000, Thailand,

²saicharoen_k@silpakorn.edu, ³saelem_s@silpakorn.edu

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดปริมาณของเสียที่เกิดจากการเติมปริมาณเครื่องดื่มไม่ได้ตามข้อกำหนดการผลิต โดยประยุกต์ใช้หลักการของทฤษฎีซิกซ์ ซิกม่าในการช่วยปรับปรุงกระบวนการบรรจุเครื่องดื่มให้มีการแปรผันน้อยที่สุด ซึ่งงานวิจัยนี้ดำเนินการตามขั้นตอนของ DMAIC ประกอบไปด้วย ขั้นตอนการกำหนดปัญหา (Define Phase) การตรวจวัดสภาพปัญหา (Measure Phase) การวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหา (Analyze Phase) การปรับปรุง (Improve

Phase) และ การควบคุม (Control Phase) ในขั้นตอนการวิเคราะห์ปัญหาจะหาปัจจัยที่มีผลต่อของเสียโดยใช้การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment: DOE) ด้วยวิธีการ 2^k Factorial Design แบบกำหนดระดับปัจจัย 2 ระดับ ผลการทดลองพบว่าเมื่อตั้งค่าเครื่องจักรด้วยค่าที่เหมาะสมดังนี้ ปรับความยาวของ Vent tube เพิ่มขึ้นจากเดิม 3 มิลลิเมตร ปรับแรงดันใน Ring Bowl เพิ่มขึ้นจากเดิม 0.1 บาร์ และ ปรับระดับน้ำใน Ring Bowl เพิ่มขึ้นจากเดิม 20 มิลลิเมตร จะส่งผลให้ของเสียประเภทเต็มเครื่องดื่มเกินมาตรฐานกำหนด (Overfill) จากเดิม 16.31% ลดลงเหลือ 0% และค่าความสามารถของกระบวนการ (C_{pk}) จากเดิม 0.33 เพิ่มขึ้นเป็น 0.68

คำสำคัญ: ซิกซ์ ซิกมา, ลดของเสีย, การบรรจุเครื่องดื่ม

ABSTRACT

The objective of this paper was to reduce non-conforming product from filling the beverages process. The DMAIC method from Sig Sigma was applied as a research methodology to reduce variability in the beverage filling process, which consists of five phases including define, measure, analyze, improve, and control. In the analyze phase, Design of Experiment (DOE) with the 2^k Factorial Design method at two levels was used for identifying factors that affect with non-conforming product. The experimental results showed that when the machine was configured with the following optimal settings: increasing the length of the vent tube by 3 millimeters, increasing the pressure in the ring bowl by 0.1 bar, and raising the water level in the ring bowl by 20 millimeters from the original settings, the waste from overfill was reduced from 16.31% to 0%, and Process Capability (C_{pk}) increased from 0.33 to 0.68.

KEYWORDS: six sigma, reducing waste, beverage filling

1. บทนำ

อุตสาหกรรมเครื่องดื่มในประเทศไทยเป็นอุตสาหกรรมขนาดใหญ่มีมูลค่าตลาดประมาณ 7.2 แสนล้านบาท และในปี 2565 ถึง 2567 มีแนวโน้มขยายตัวสูงขึ้น เนื่องจากการฟื้นตัวของตลาดหลังจากเกิดปัญหา COVID-19 [1] และถึงแม้ว่าอุตสาหกรรมเครื่องดื่มบรรจุขวดจะใช้เงินลงทุนเริ่มต้นสูง แต่มีการพัฒนาเครื่องจักรและเทคโนโลยีอย่างต่อเนื่อง ทำให้สามารถลดต้นทุนการผลิตได้ จึงมีผู้ประกอบการรายใหม่เข้าสู่ตลาดเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ลูกค้ามีแบรนด์เครื่องดื่มทางเลือกมากขึ้น และทำให้ตลาดมีการแข่งขันที่สูงขึ้น ซึ่งบริษัทต้องปรับตัว โดยการนำกลยุทธ์ที่สำคัญของ

ภาคการผลิต คือ การลดต้นทุนที่เกิดจากการสูญเสียในกระบวนการผลิต เพื่อเพิ่มผลกำไรให้กับบริษัทมากขึ้นและสร้างความได้เปรียบเหนือคู่แข่งเพื่อความอยู่รอดทางธุรกิจ

บริษัทผู้ผลิตเครื่องตีบบรรจุขวดทรายใหญ่แห่งหนึ่ง ต้องการเพิ่มความสามารถของกระบวนการบรรจุเครื่องตีบให้ปริมาณเครื่องตีบมีระดับการเติมเครื่องตีบที่เป็นไปตามมาตรฐานเท่ากันในทุกการบรรจุลงขวด เนื่องจากฝ่ายประกันคุณภาพทำการสุ่มตรวจสอบปริมาณเครื่องตีบ หากพบว่าไม่อยู่ในระดับที่มาตรฐานบริษัทกำหนดจะมีการนำกลับไปผ่านกระบวนการใหม่ (Rework) หรือกำจัดทิ้ง (Reject) ซึ่งจะทำให้เกิดต้นทุนสินค้าคุณภาพต่ำ (Cost of Poor Quality; COPQ) ซึ่งเมื่อทำการสำรวจข้อมูลย้อนหลังพบว่าเกิดมูลค่าของเสียนับหลายล้านบาทต่อปีเมื่อเทียบกับอัตราเฉลี่ยการผลิต สามารถสะท้อนได้จากค่าความสามารถของกระบวนการ (C_{pk}) ซึ่งพบว่ามีค่าเท่ากับ 0.33 ในปี 2566

จากงานวิจัยก่อนหน้าพบว่าเมื่อต้องการลดของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตหรือต้องการเพิ่มความสามารถในกระบวนการ (C_p / C_{pk}) จะนิยมใช้หลักการซิกม่า ซิกม่า (Six Sigma) [2-8] โดยใช้เครื่องมือคุณภาพและวิธีการทางสถิติมาประยุกต์ใช้ และดำเนินการตามกรอบแนวคิด DMAIC โดยขั้นตอนการวิเคราะห์จะดำเนินการออกแบบการทดลองด้วยวิธี 2^k Factorial Design [3, 5-7, 9] จากนั้นจะหาปัจจัยหลักและปัจจัยที่ Interaction ต่อกันที่ส่งผลต่อตัวแปรตามด้วยวิธี Multiple Regression Analysis แล้วนำปัจจัยที่ถูกเลือกไปหาค่าที่เหมาะสมด้วยฟังก์ชัน Response Optimizer และนำค่าที่ได้ไปปรับตั้งเครื่องจักร [3, 6, 7, 9] สุดท้ายจะทำการควบคุมกระบวนการเพื่อรักษามาตรฐานโดยใช้ Control Chart ผลลัพธ์ที่ได้คือ ได้ค่าที่เหมาะสมสำหรับการปรับตั้งเครื่องจักรในกระบวนการผลิต [3-10] สัดส่วนของของเสียลดลง [2, 3, 5, 6, 8-10] และค่าความสามารถในกระบวนการ (C_p / C_{pk}) เพิ่มขึ้น [6]

ดังนั้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดปริมาณของเสียที่เกิดจากการเติมปริมาณเครื่องตีบไม่ได้ตามที่โรงงานกำหนด โดยนำทฤษฎี Six Sigma มาประยุกต์ใช้โดยทำตามวิธีการทำงานแบบ DMAIC เพื่อมาช่วยปรับปรุงกระบวนการบรรจุเครื่องตีบให้มีการแปรผันน้อยที่สุด

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 หลักการ Six Sigma

Six Sigma เป็นเครื่องมือที่นิยมนำมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพและควบคุมของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต ซึ่งจะนำเอาเครื่องมือคุณภาพต่าง ๆ และวิธีการทางสถิติมาใช้อย่างเป็นระบบเพื่อลดความแปรผันในกระบวนการและลดของเสียที่จะเกิดขึ้นในกระบวนการผลิต โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดต้นทุนจากการเกิดข้อผิดพลาด เพิ่มผลกำไร และสร้างความพึงพอใจให้แก่ลูกค้า [11] ในปีค.ศ. 2014 Ayisha อ้างถึงใน Kaewyindee [12] ได้กล่าวว่าหากต้องการให้บริษัท

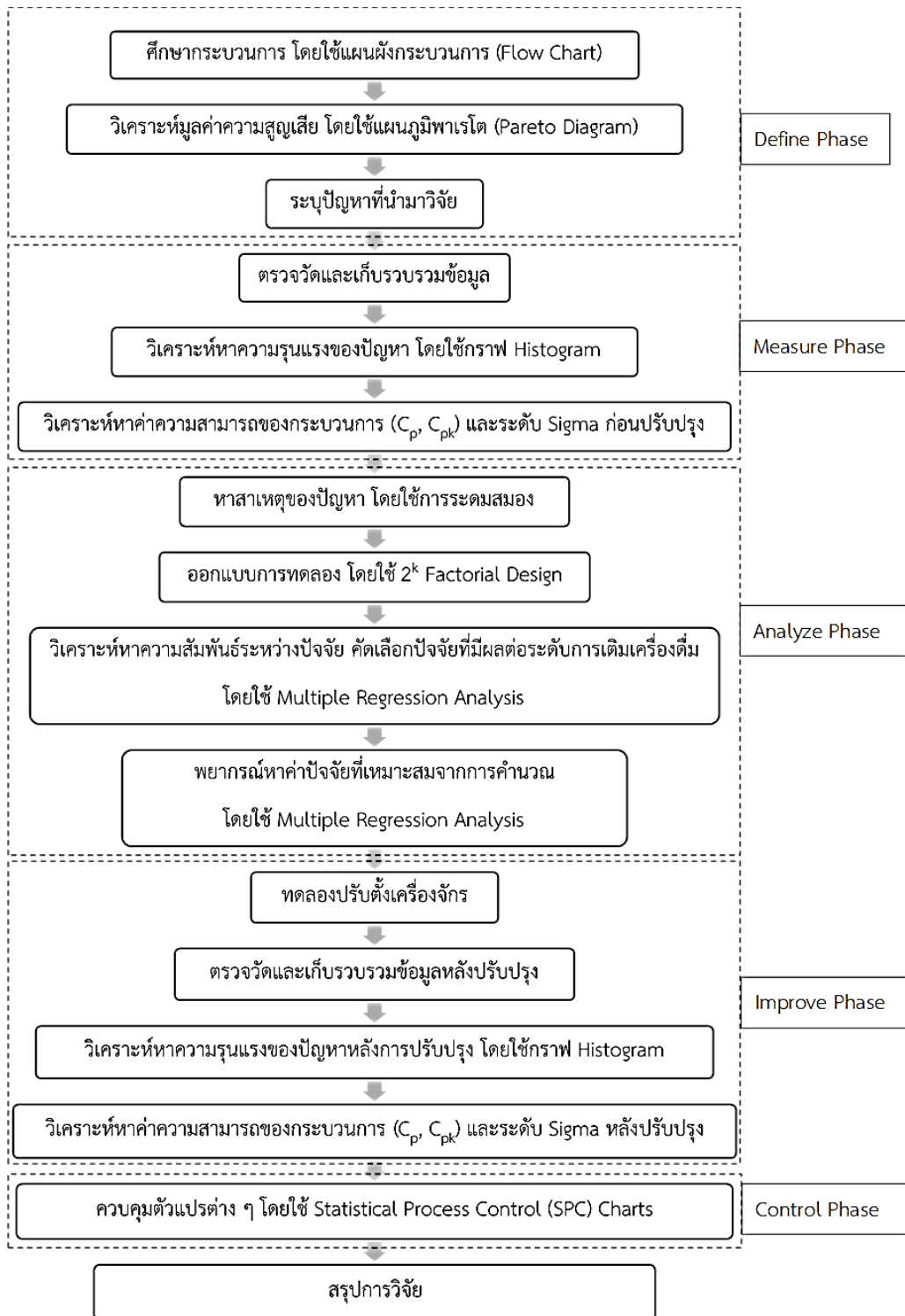
สามารถแข่งขันได้จะต้องลดความแปรปรวนในกระบวนการผลิตและลดของเสีย จะสามารถสร้างความพึงพอใจให้กับลูกค้าได้และช่วยเพิ่มความสามารถในการแข่งขันทางธุรกิจได้ โดยประยุกต์ใช้หลักการ DMAIC สำหรับการแก้ไขปัญหา ซึ่งมีขั้นตอนของการปฏิบัติทั้งหมด 5 ขั้นตอน คือ 1) การกำหนดปัญหา (Define Phase) 2) การตรวจวัด (Measure Phase) 3) การวิเคราะห์ (Analyze Phase) 4) การปรับปรุง (Improve Phase) และ 5) การควบคุม (Control Phase) ซึ่งในแต่ละขั้นตอนจะมีการนำเครื่องมือคุณภาพมาช่วยในการวิเคราะห์ข้อมูล คือ แผนภูมิพาเรโต (Pareto Diagram) ฮิสโตแกรม (Histogram) แผนภูมิควบคุม (Control Chart) เป็นต้น

2.2 การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูล และหาผลกระทบของพารามิเตอร์เพื่อตรวจสอบตัวปัจจัย (Factor) หรือตัวแปรใดที่มีผลต่อสิ่งที่สนใจ (Response) โดยนำหลักทางคณิตศาสตร์และสถิติมาใช้ในการลดจำนวนการทดลอง โดยในการวิจัยครั้งนี้ผู้จัดทำเลือกวิธีการออกแบบการทดลองแบบ 2^k Factorial Design เป็นการออกแบบการทดลองในกรณีที่มีปัจจัย k ปัจจัย ซึ่งแต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ ระดับเหล่านี้อาจจะเกิดจากข้อมูลเชิงปริมาณ หรืออาจจะเกิดจากข้อมูลเชิงคุณภาพ จะแทนด้วยระดับสูงและต่ำ ทำให้ทราบถึงอิทธิพลของปัจจัยหลักที่สนใจแล้วยังทำให้ทราบปัจจัยร่วมหรือปฏิสัมพันธ์ (Interaction) โดยขั้นตอนของการออกแบบการทดลอง ดังนี้ กำหนดปัญหา เลือกตัวแปรที่ใช้ชีวิต กำหนดปัจจัย ออกแบบการทดลอง วิเคราะห์ข้อมูล และ สรุปผล [9]

3. วิธีการดำเนินการวิจัย

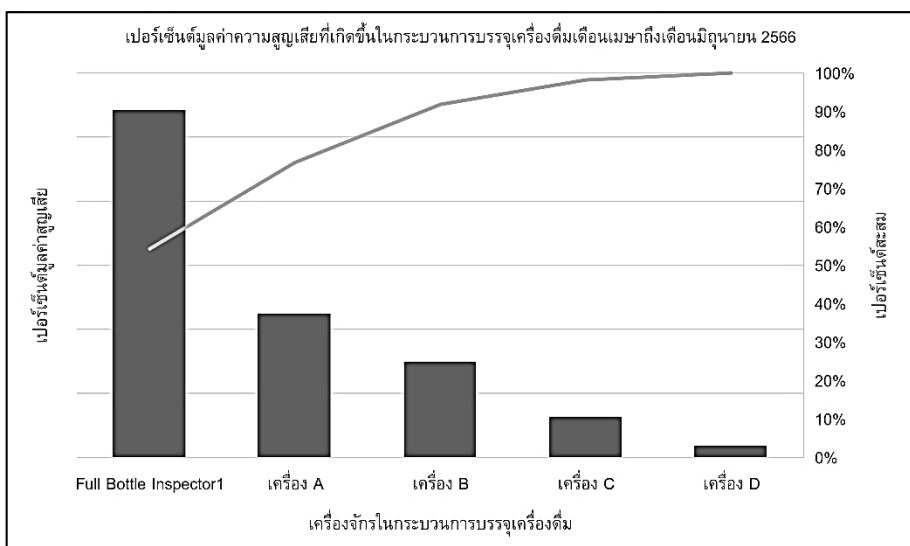
จากการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ผู้จัดทำได้กำหนดขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย โดยนำทฤษฎี Six Sigma มาประยุกต์ใช้ตามวิธีการทำงานแบบ DMAIC ซึ่งประกอบไปด้วย 5 ขั้นตอนหลัก คือ การกำหนดปัญหา (Define Phase) การตรวจวัดสภาพปัญหา (Measure Phase) การวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหา (Analyze Phase) การปรับปรุง (Improve Phase) และการควบคุม (Control Phase) รายละเอียดวิธีการดำเนินงานและเครื่องมือที่ใช้ในการทำวิจัยแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ขั้นตอนที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย

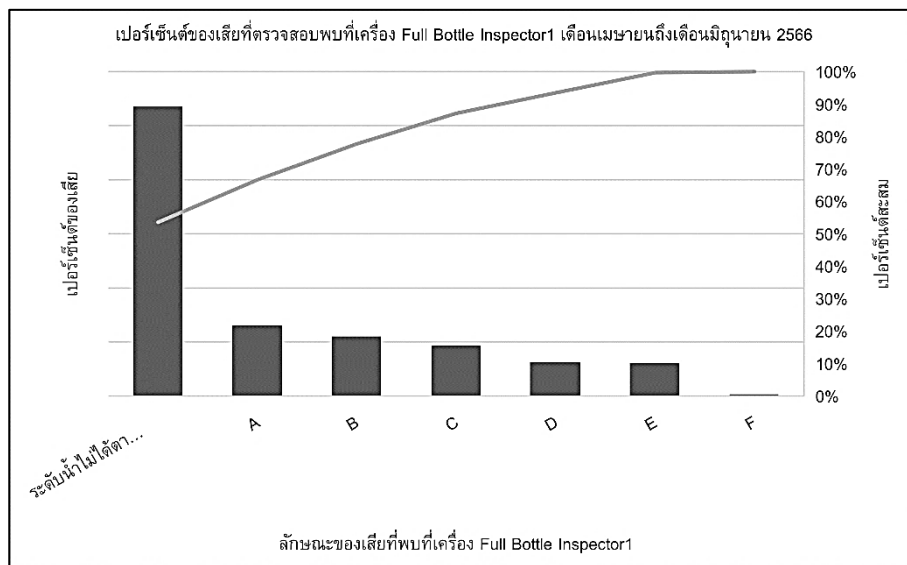
3.1 ขั้นตอนการกำหนดปัญหา (Define Phase)

ผู้วิจัยได้ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลของเสียในกระบวนการบรรจุเครื่องดื่มที่เครื่องตรวจสอบคุณภาพต่าง ๆ เป็นระยะเวลา 3 เดือน เริ่มตั้งแต่เดือนเมษายนจนถึงเดือนมิถุนายนปี 2566 หลังจากนั้นทางผู้วิจัยได้นำข้อมูลมาทำการวิเคราะห์หามูลค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นแต่ละเครื่องจักร และใช้แผนภูมิพาเรโตมาจัดลำดับเปอร์เซ็นต์มูลค่าความสูญเสีย เพื่อให้ทราบถึงปัญหาที่มีความสูญเสียมากที่สุด ตามรูปที่ 2 พบว่าเครื่อง Full Bottle Inspector1 เป็นจุดที่มีมูลค่าสูญเสียมากที่สุด ในกระบวนการบรรจุเครื่องดื่ม



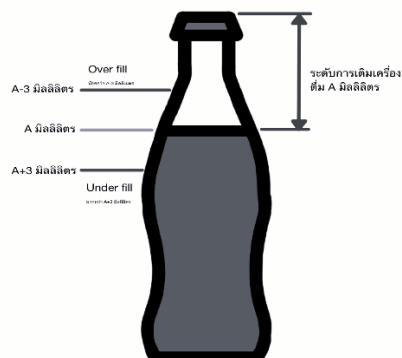
รูปที่ 2 แผนภูมิพาเรโตเปอร์เซ็นต์มูลค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการบรรจุเครื่องดื่ม

ผู้วิจัยจึงทำการเก็บรวบรวมข้อมูลลักษณะของเสียที่พบที่เครื่อง Full Bottle Inspector1 แล้วนำข้อมูลมาทำการวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์ของเสียที่พบแต่ละลักษณะที่เกิดขึ้น และใช้แผนภูมิพาเรโตมาจัดลำดับเปอร์เซ็นต์ของเสีย เพื่อให้ทราบถึงลักษณะปัญหาที่มีพบของเสียมากที่สุด ตามรูปที่ 3 พบว่าลักษณะของเสียที่มีเปอร์เซ็นต์สูงที่สุดที่ตรวจสอบพบที่เครื่อง Full Bottle Inspector1 คือ ระดับน้ำไม่ได้ตามที่กำหนด ทำให้ผู้วิจัยได้ตัดสินใจเลือกศึกษาและแก้ไขปัญหาของเสียที่เกิดจากการเติมเครื่องดื่มไม่ได้ระดับตามมาตรฐานที่โรงงานกำหนด



รูปที่ 3 แผนภูมิฟารโตเปอร์เซ็นต์ของเสียที่พบแต่ละลักษณะที่เครื่อง Full Bottle Inspector1

ทางโรงงานตัวอย่างได้กำหนดการวัดระดับการเติมเครื่องดื่มจะเริ่มวัดตั้งแต่ปากขวดถึงระดับเครื่องดื่ม ตามรูปที่ 4 โดยค่ามาตรฐานระดับการเติมเครื่องดื่มของโรงงานตัวอย่างกำหนดอยู่ที่ $A \pm 3$ มิลลิเมตร หากระดับการเติมเครื่องดื่มน้อยกว่า $A-3$ มิลลิเมตร ถือว่าเป็นของเสียประเภทเติมเครื่องดื่มเกินมาตรฐานกำหนด (Overfill) และหากระดับการเติมเครื่องดื่มมากกว่า $A+3$ มิลลิเมตร ถือว่าเป็นของเสียประเภทเติมเครื่องดื่มต่ำกว่ามาตรฐานกำหนด (Underfill)



รูปที่ 4 กำหนดการวัดระดับการเติมเครื่องดื่ม

3.2 ขั้นตอนการตรวจวัดสภาพปัญหา (Measure Phase)

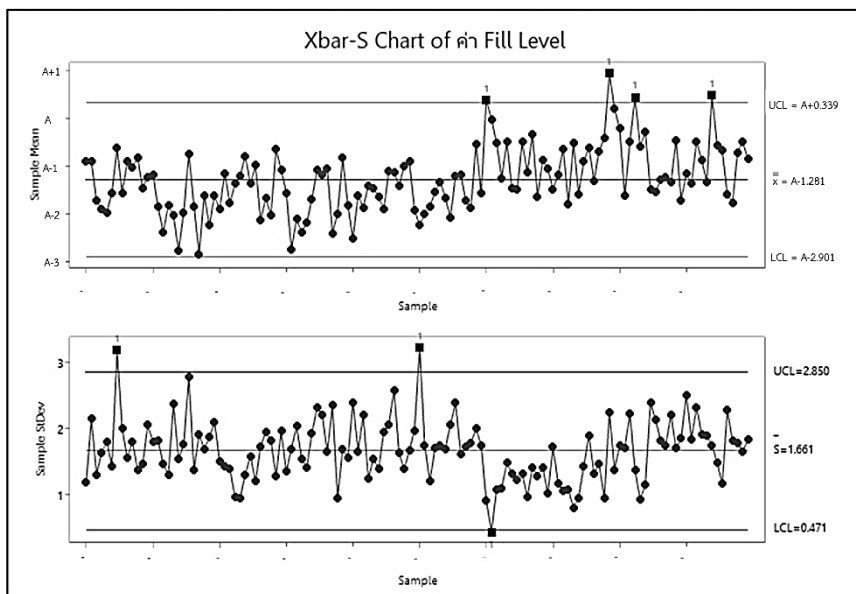
ผู้จัดทำได้เก็บรวบรวมข้อมูลการตรวจวัดระดับการเติมเครื่องต็มที่ผ่านการบรรจุที่เครื่อง Filler โดยผู้วิจัยทำการเก็บขวดเครื่องต็ม หัวจ่ายละ 10 ครั้ง ครั้งละ 3 ขวด ตั้งแต่เดือนมกราคม 2565 ถึงเดือนพฤษภาคม 2566 สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 1 (กำหนดให้ A คือ ค่ามาตรฐานของระดับการเติมเครื่องต็ม)

ตารางที่ 1 ข้อมูลตรวจวัดระดับการเติมเครื่องต็มเดือนมกราคม 2565 ถึงเดือนพฤษภาคม 2566

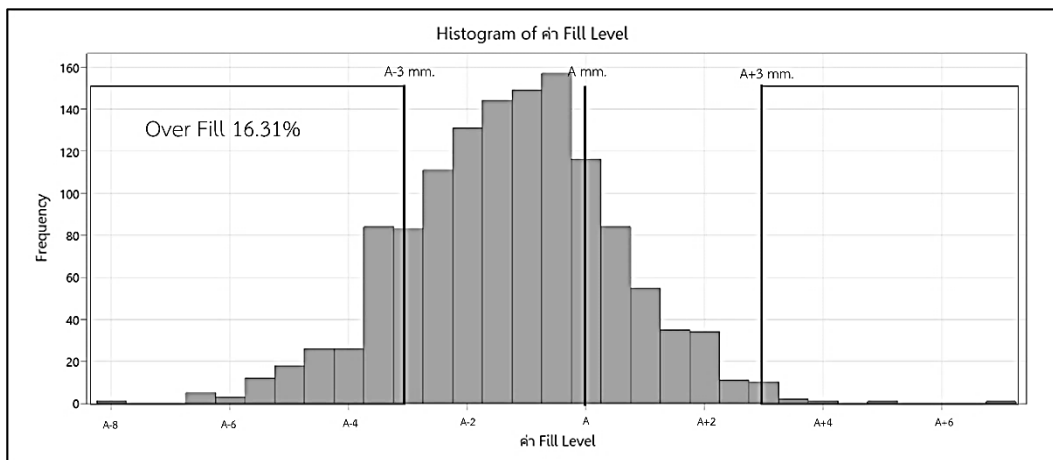
หัว จ่าย ที่	ค่า Fill Level (มิลลิเมตร)									
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ครั้งที่ 6	ครั้งที่ 7	ครั้งที่ 8	ครั้งที่ 9	ครั้งที่ 10
1	A+0.03	A-2.5	A-0.02	A-1.08	A-1.78	A-0.49	A-2.55	A-0.18	A+1.09	A-1.48
2	A+0.68	A-2.80	A-2.24	A-3.50	A-1.60	A+2.96	A-3.27	A+0.44	A-0.77	A+1.03
3	A-1.86	A-2.03	A-2.48	A-0.70	A-1.77	A+0.54	A-4.32	A-1.48	A-2.49	A-0.68
4	A-0.7	A-1.99	A-0.54	A-3.75	A-1.45	A-0.50	A-5.01	A-0.03	A-1.64	A-3.24
5	A+2.17	A-3.73	A-0.50	A-3.52	A-2.79	A-1.54	A-2.94	A-1.14	A-2.41	A-3.24

ผู้วิจัยได้นำข้อมูลมาวิเคราะห์หาค่ากราฟแผนภูมิควบคุม ตามรูปที่ 5 พบว่าระดับการเติมเครื่องต็มเฉลี่ยอยู่ที่ A-1.281 มิลลิเมตร มีค่าความแปรปรวนเฉลี่ย 1.661 และกระบวนการบรรจุมีหัวบรรจุเครื่องต็มที่ไม่อยู่ภายใต้สภาวะควบคุม จึงต้องทำการปรับปรุงให้กระบวนการกลับมาอยู่ภายใต้สภาวะควบคุม

ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์หาค่ากราฟ Histogram ตามรูปที่ 6 พบว่าในปัจจุบันระดับการเติมเครื่องต็มกราฟมีแนวโน้มเบ้ขวา และพบว่าเกิดของเสียประเภทเติมเครื่องต็มเกินมาตรฐานกำหนด (Overfill) 16.31% ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกปัญหาการเติมเครื่องต็มเกินมาตรฐานกำหนด (Overfill) เป็นหัวข้อศึกษาหาสาเหตุของปัญหา

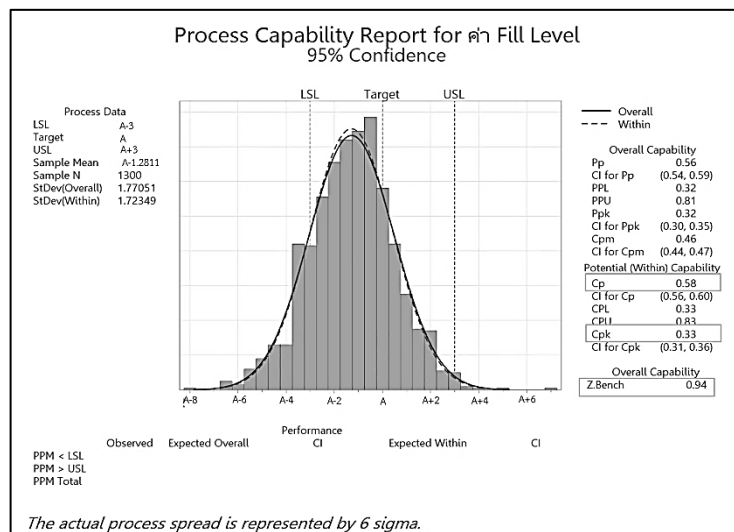


รูปที่ 5 กราฟแผนภูมิควบคุมระดับการเติมเครื่องตีมาก่อนการปรับปรุง



รูปที่ 6 กราฟ Histogram ระดับการเติมเครื่องตีมาก่อนการปรับปรุง

และผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์หาความสามารถของกระบวนการก่อนการปรับปรุงได้ผลลัพธ์ตามรูปที่ 7 พบว่าระดับการเติมเครื่องตีอยู่ที่ระดับ 0.94 ซิกม่า ค่าความสามารถของกระบวนการ (C_{pk}) อยู่ที่ 0.33 และค่าศักยภาพของความสามารถ (C_p) อยู่ที่ 0.58



รูปที่ 7 Process Capability Report ก่อนปรับปรุง

3.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหา (Analyze Phase)

หลังจากกำหนดปัญหา และวัดผลก่อนการปรับปรุงแล้ว จึงเข้าสู่การนำปัญหามาทำการวิเคราะห์หาสาเหตุของของเสียที่เกิดจากเติมเครื่องตีไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานประเภท Overfill โดยใช้วิธีการระดมความคิดจากผู้ที่มีความรู้ความสามารถและประสบการณ์ ซึ่งประกอบไปด้วยระดับหัวหน้าแผนกบรรจุ หัวหน้าแผนกช่างซ่อมบำรุง และหัวหน้าแผนกประกันคุณภาพ ซึ่งผู้จัดทำจะทำการวิเคราะห์แยกสาเหตุของปัญหาพบสาเหตุหลัก 3 ข้อหลัก คือ

1) ความยาวของ Ventube ไม่เหมาะสม หากความยาวของ Ventube น้อยจะส่งผลให้ระดับการเติมเครื่องตีสูงเกินที่กำหนด

2) แรงดันใน Ring Bowl ไม่เหมาะสม หากแรงดันใน Ring Bowl สูงมากเกินไปจะส่งผลให้ระดับการเติมเครื่องตีสูงเกินที่กำหนด

3) ระดับเครื่องตีใน Ring Bowl ไม่เหมาะสม หากระดับเครื่องตีใน Ring Bowl ต่ำมากเกินไปจะส่งผลให้เติมเครื่องตีไม่ทันเมื่อใช้ความเร็วรอบเครื่องจักรสูง ทำให้เกิดของเสียประเภทระดับการเติมเครื่องตีต่ำกว่าที่กำหนด หรือถ้าระดับเครื่องตีใน Ring Bowl ต่ำมาก ๆ จะทำให้เติมเครื่องตีไม่ได้ เนื่องจากเครื่องบรรจุจะเรียกเครื่องตีมาไม่ทันรอบการเติม หากระดับเครื่องตีใน Ring Bowl สูงมากเกินไปจะส่งผลให้ CO₂ ไม่ถูกเติมลงมา เนื่องจากมีเครื่องตีไปแทนที่ ทำให้เครื่องตีเกิดฟองมากจนเป็นของเสียประเภทระดับการเติมเครื่องตีต่ำกว่าที่กำหนด

ผู้วิจัยนำปัจจัยที่ได้จากการระดมสมองมาออกแบบการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นเทียบกับตัวแปรตาม เพื่อคัดเลือกปัจจัยที่มีผลต่อระดับการเติมและหาปัจจัยที่ Interaction ต่อกัน โดยใช้โปรแกรม Minitab Statistical Software Version 16 สำหรับการออกแบบการทดลอง

ด้วยวิธี 2^k Factorial Design แบบกำหนดระดับปัจจัย 2 ระดับ คือ ระดับต่ำ (-1) และระดับสูง (+1) ดังตารางที่ 2 โดยกำหนดให้ B คือ ความยาวของ Vent tube ปัจจุบัน C คือ แรงดันใน Ring Bowl ปัจจุบัน และ D คือ ระดับน้ำใน Ring Bowl ปัจจุบัน

ตารางที่ 2 ปัจจัยและระดับที่ใช้ในการทดลอง 2^k Factorial Design แบบ 2 ระดับ

ปัจจัย	ระดับปัจจัย		หน่วย
	ต่ำ (-)	สูง (+)	
ความยาวของ Vent tube	B+2	B+5	มิลลิเมตร
แรงดันใน Ring Bowl	C-2	C	บาร์
ระดับน้ำใน Ring Bowl	D+20	D+40	มิลลิเมตร

กำหนดตัวแปรต้น ตัวแปรตาม ตัวแปรควบคุม ดังนี้

ตัวแปรต้น คือ ความยาวของ Vent tube แรงดันใน Ring Bowl และระดับน้ำใน Ring Bowl

ตัวแปรตาม คือ ระดับการเติมเครื่องตี

ตัวแปรควบคุม คือ ความเร็วรอบเครื่องบรรจุ ผู้ผลิตขวด ขวดใหม่ หัวบรรจุ อุณหภูมิเครื่องตี และความหนาแน่นของเครื่องตี

การทดลองนี้ผู้วิจัยกำหนดค่าความเชื่อมั่นที่ร้อยละ 95 ซึ่งจะเก็บข้อมูลระดับการเติมเครื่องตีจำนวน 20 หัวบรรจุต่อการทดลอง โดยมีแผนทั้งหมด 8 การทดลอง ดังตารางที่ 3

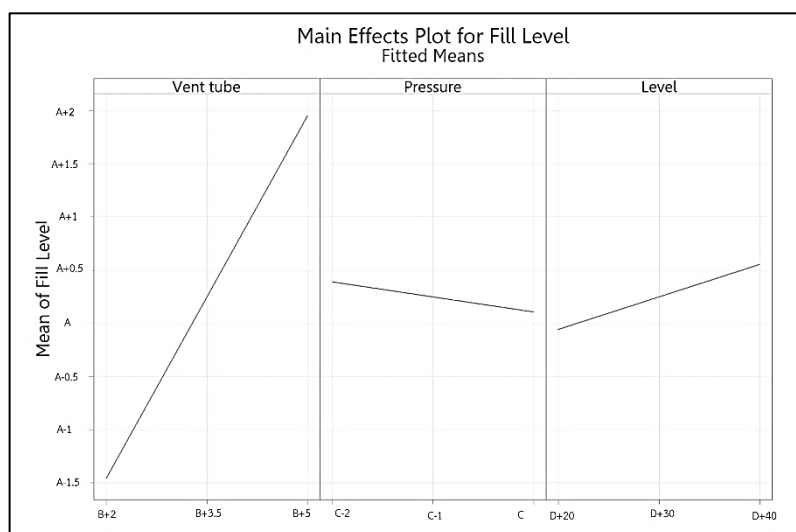
ตารางที่ 3 แผนการทดลอง 2^k Factorial Design แบบ 2 ระดับต่อกัน

RunOrder	CenterPt	Blocks	ความยาวของ Vent tube	แรงดันใน Ring Bowl	ระดับน้ำใน Ring Bowl
1	1	1	B+2	C	D+40
2	1	1	B+2	C	D+20
3	1	1	B+2	C-2	D+20
4	1	1	B+2	C-2	D+40
5	1	1	B+5	C	D+20
6	1	1	B+5	C-2	D+20
7	1	1	B+5	C	D+40
8	1	1	B+5	C-2	D+40

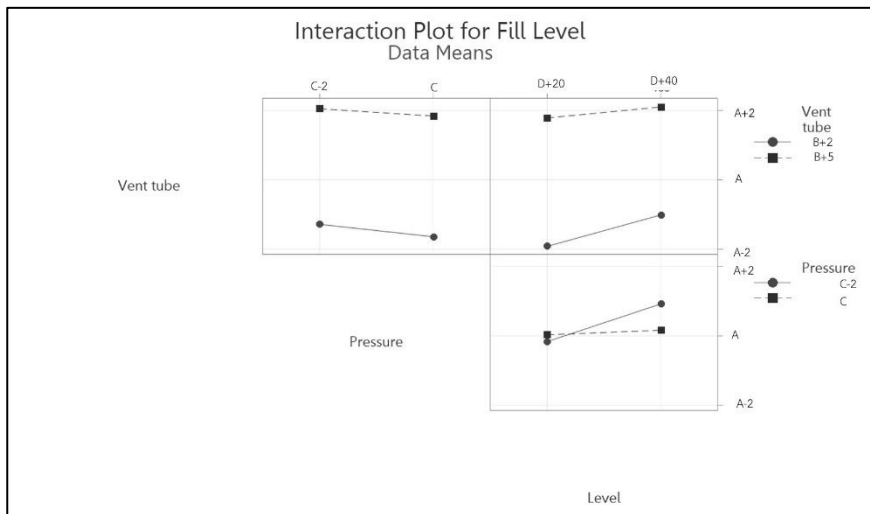
ผู้วิจัยได้นำข้อมูลมาวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้โปรแกรม Minitab Statistical Software Version 16 ฟังก์ชัน Multiple Regression Analysis ได้ผลการทดลอง ดังรูปที่ 8 และรูปที่ 9 ซึ่งจะพิจารณาจากค่า P-Value หากค่า P-Value มีค่าน้อยกว่า 0.05 จะสรุปได้ว่าปัจจัยนั้นส่งผลต่อตัวแปรตามอย่างมีนัยสำคัญ จากภาพจะเห็นได้ว่าปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อระดับการเติมเครื่องดื่ม คือ ความยาวของ Vent tube และ ระดับน้ำใน Ring Bowl และพบว่า แรงดันใน Ring Bowl กับ ระดับน้ำใน Ring Bowl มีความสัมพันธ์ที่ Interaction ต่อกันตามรูปที่ 10 ผู้จัดทำจึงนำ 3 ปัจจัยหลักนี้ มาหาค่าที่เหมาะสมในลำดับถัดไป

Regression Analysis: Fill Level versus Vent tube, Pressure, Level					
Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	5	496.486	99.297	70.76	0.000
Vent tube	1	465.636	465.636	331.83	0.000
Pressure	1	3.223	3.223	2.30	0.132
Level	1	15.012	15.012	10.70	0.001
Vent tube*Level	1	3.490	3.490	2.49	0.117
Pressure*Level	1	9.125	9.125	6.50	0.012
Error	154	216.100	1.403		
Lack-of-Fit	2	0.257	0.128	0.09	0.914
Pure Error	152	215.843	1.420		
Total	159	712.586			
Model Summary					
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)		
1.18459	69.67%	68.69%	67.26%		

รูปที่ 8 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของปัจจัยที่ส่งผลต่อการเติมเครื่องดื่ม



รูปที่ 9 Main Effects Plot for Fill Level



รูปที่ 10 Interaction Plot for Fill Level

จากการวิเคราะห์ข้อมูลโดย Multiple Regression Analysis ได้สมการเชิงเส้น ดังนี้

$$\text{Fill Level} = -230.5 + 2.023 \text{ Vent tube} + 20.07 \text{ Pressure} + 1.728 \text{ Level} - 0.00985 \text{ Vent tube} * \text{Level} - 0.2388 \text{ Pressure} * \text{Level}$$

และใช้โปรแกรม Minitab Statistical Software Version 16 ฟังก์ชัน Response Optimizer ทำการวิเคราะห์หาค่าที่เหมาะสมสำหรับการปรับตั้งเครื่องบรรจุเครื่องดื่ม (Filler) ดังตารางที่ 4 และเพื่อให้ปรับใช้กับเครื่องจักรหน้างานได้จริง จึงสรุปได้ว่าค่าที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยที่ส่งผลให้ระดับการเติมเครื่องดื่มอยู่ที่ A มิลลิเมตร คือ ความยาวของ Vent tube เพิ่มขึ้นจากเดิม 3 มิลลิเมตร แรงดันใน Ring Bowl เพิ่มขึ้นจากเดิม 0.1 บาร์ และ ระดับน้ำใน Ring Bowl เพิ่มขึ้นจากเดิม 20 มิลลิเมตร

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์การหาค่าที่เหมาะสม

Solution

Solution	Vent tube	Pressure	Level	Fill Level Fit	Composite Desirability
1	B+3.5	C+0.1	D+21.8812	A	1

4. ผลการดำเนินงานวิจัย

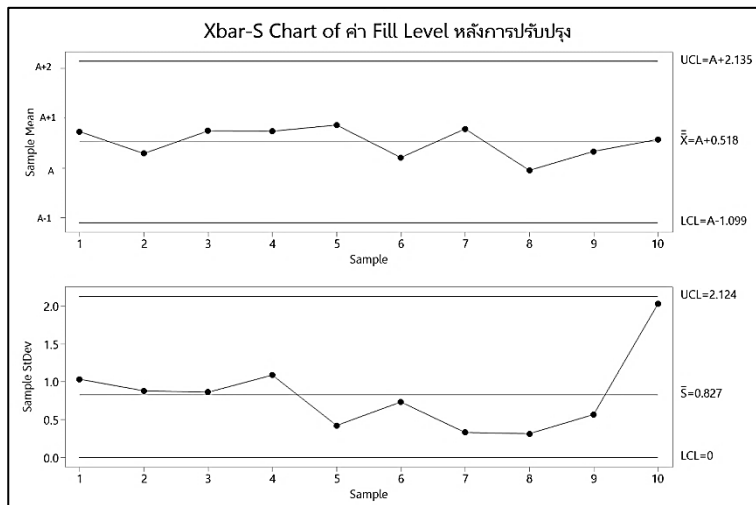
4.1 ขั้นตอนการปรับปรุง (Improve Phase)

หลังจากที่ผู้วิจัยได้ค่าพยากรณ์ที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยที่ส่งผลให้ระดับการเติมเครื่องเติมอยู่ที่ A มิลลิเมตรแล้วนั้น ลำดับถัดไปผู้วิจัยจะนำค่าที่ได้ไปทำการทดลองปรับตั้งค่าพารามิเตอร์เครื่องบรรจุเครื่องเติม (Filler) พร้อมทั้งทำการเก็บรวบรวมข้อมูลการตรวจวัดระดับการเติมเครื่องเติมที่ผ่านการบรรจุหลังการปรับปรุง จำนวน 10 หัวจ่าย หัวจ่ายละ 3 ครั้ง เดือนตุลาคม 2566 ได้ข้อมูลตามตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ข้อมูลตรวจวัดระดับการเติมเครื่องเติมหลังการปรับปรุง

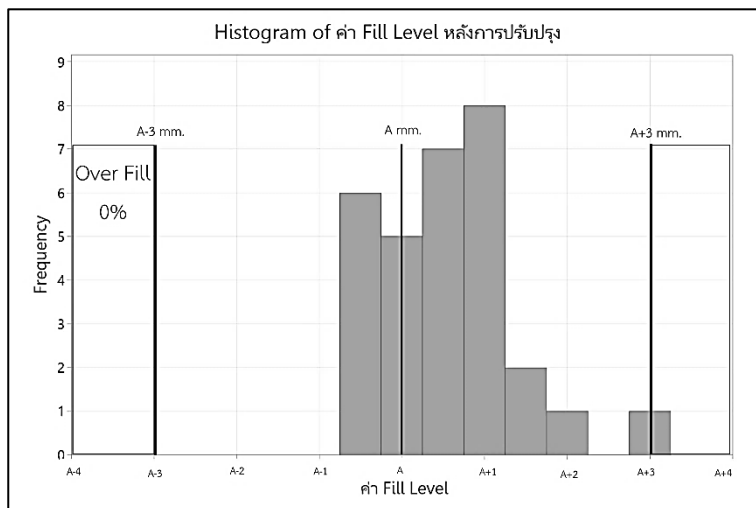
หัวจ่ายที่	ค่า Fill Level (มิลลิเมตร)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
1	A+1.70	A+0.84	A-0.36
2	A-0.70	A+1.00	A+0.56
3	A+1.53	A-0.18	A+0.87
4	A+1.91	A-0.24	A+0.53
5	A+1.15	A+0.37	A+1.05
6	A+0.3	A+0.89	A-0.57
7	A+0.47	A+0.74	A+1.13
8	A+0.25	A-0.38	A-0.02
9	A-0.12	A+0.14	A+0.97
10	A+2.91	A-0.54	A-0.66

และผู้จัดทำได้นำข้อมูลมาทำการวิเคราะห์หากราฟแผนภูมิควบคุม ตามรูปที่ 11 พบว่าระดับการเติมเครื่องเติมหลังการปรับปรุงเฉลี่ยอยู่ที่ A+0.518 มิลลิเมตร มีค่าความแปรปรวนหลังการปรับปรุงเฉลี่ย 0.827 และกระบวนการบรรจุไม่มีหัวบรรจุเครื่องเติมออกนอกสภาวะควบคุม



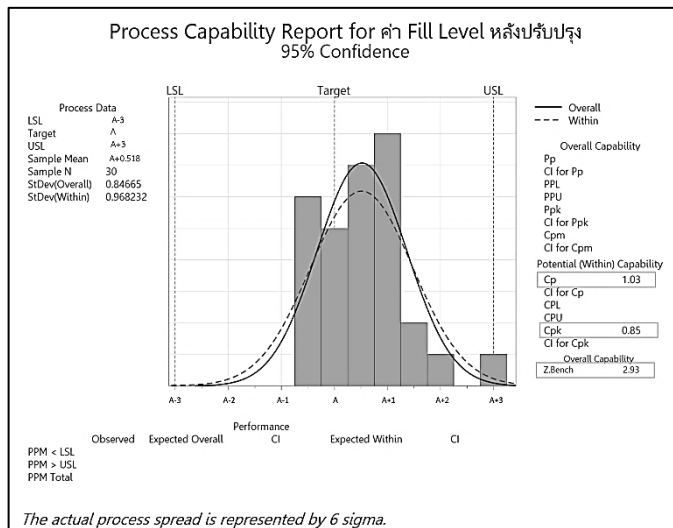
รูปที่ 11 กราฟแผนภูมิควบคุม ระดับการเติมเครื่องเติมหลังการปรับปรุง

ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์หากราฟ Histogram ตามรูปที่ 12 พบว่าหลังการปรับปรุงระดับการเติมเครื่องเติมกราฟมีแนวโน้มเบ้ซ้าย และพบว่าการเกิดของเสียประเภทเติมเครื่องเติมเกินมาตรฐานกำหนด (Overfill) 0%



รูปที่ 12 กราฟ Histogram ระดับการเติมเครื่องเติมหลังการปรับปรุง

และผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์หาความสามารถของกระบวนการหลังการปรับปรุงได้ผลลัพธ์ตามรูปที่ 13 พบว่าระดับการเติมเครื่องเติมอยู่ที่ระดับ 2.93 ซิกมา ค่าความสามารถของกระบวนการ (C_{pk}) อยู่ที่ 0.85 และค่าศักยภาพของความสามารถ (C_p) อยู่ที่ 1.03



รูปที่ 13 Process Capability Report หลังการปรับปรุง

จากการปรับปรุงค่าพารามิเตอร์เครื่องบรรจุเครื่องดื่ม (Filler) ตามค่าพยากรณ์ที่ได้จากวิธีทางสถิติของแต่ละปัจจัย โดยปรับความยาวของ Vent tube เพิ่มขึ้นจากเดิม 3 มิลลิเมตร แรงดันใน Ring Bowl เพิ่มขึ้นจากเดิม 0.1 บาร์ และ ระดับน้ำใน Ring Bowl เพิ่มขึ้นจากเดิม 20 มิลลิเมตร สามารถเปรียบเทียบข้อมูลก่อนและหลังการปรับปรุง ได้ดังตารางที่ 6 พบว่า ค่าเฉลี่ยระดับการเติมเครื่องดื่มก่อนการปรับปรุงอยู่ที่ A-1.281 มิลลิเมตร หลังการปรับปรุงอยู่ที่ A+0.518 มิลลิเมตร แสดงว่าระดับการเติมเครื่องดื่มอยู่ในมาตรฐานที่โรงงานกำหนด ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) ก่อนการปรับปรุงอยู่ที่ 1.661 หลังการปรับปรุงอยู่ที่ 0.827 ลดลงจากเดิม 0.834 แสดงว่าความแปรปรวนของกระบวนการบรรจุเครื่องดื่มลดลง ของเสียประเภทเติมเครื่องดื่มเกินมาตรฐานกำหนด (Overfill) ก่อนการปรับปรุงอยู่ที่ 16.31% หลังการปรับปรุงอยู่ที่ 0% ลดลงจากเดิม 100% แสดงว่าไม่เกิดของเสียประเภทเติมเครื่องดื่มเกินมาตรฐานกำหนด (Overfill) ค่าความสามารถของกระบวนการ (C_{pk}) ก่อนการปรับปรุงอยู่ที่ 0.33 หลังการปรับปรุงอยู่ที่ 0.85 เพิ่มขึ้นจากเดิม 0.52 ค่าศักยภาพของความสามารถ (C_p) ก่อนการปรับปรุงอยู่ที่ 0.58 หลังการปรับปรุงอยู่ที่ 1.03 เพิ่มขึ้นจากเดิม 0.45 และระดับการเติมเครื่องดื่มก่อนการปรับปรุงอยู่ที่ 0.94 ซิกมา หลังการปรับปรุงอยู่ที่ 2.93 ซิกมา เพิ่มขึ้นจากเดิม 1.99 ซิกมา แสดงว่ากระบวนการบรรจุเครื่องดื่มมีประสิทธิภาพเพิ่มสูงขึ้น

ตารางที่ 6 เปรียบเทียบข้อมูลก่อนและหลังการปรับปรุง

ตัวชี้วัด	ก่อนการปรับปรุง	หลังการปรับปรุง	ค่าความแตกต่าง
ค่าเฉลี่ยระดับการเติมเครื่องเติม	A-1.281	A+0.518	
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	1.661	0.827	ลดลงจากเดิม 0.834
เปอร์เซ็นต์ของเสีย (%)	16.31	0	ลดลงจากเดิม 100%
ค่าความสามารถของกระบวนการ (C_{pk})	0.33	0.85	เพิ่มขึ้นจากเดิม 0.52
ค่าศักยภาพของความสามารถ (C_p)	0.58	1.03	เพิ่มขึ้นจากเดิม 0.45
ระดับซีกม่า	0.94	2.93	เพิ่มขึ้นจากเดิม 1.99 ซีกม่า

4.2 ขั้นตอนการควบคุม (Control Phase)

หลังการปรับค่าพารามิเตอร์เครื่องจักรพบว่าได้ผลไปในทางที่ดีขึ้น จำนวนของเสียลดลง และความแปรปรวนในกระบวนการลดลงอย่างชัดเจน ผู้วิจัยเล็งเห็นว่าจะต้องมีการควบคุมคุณภาพกระบวนการเพื่อยังคงรักษาสภาพกระบวนการบรรจุเครื่องเติมหลังการปรับปรุงให้มีประสิทธิภาพที่ต่อเนื่องและยั่งยืน โดยสุ่มเก็บขวดตัวอย่างส่งให้ทางแผนกประกันคุณภาพตรวจวัดระดับการเติมเครื่องเติมในทุกวัน ๆ และใช้ Statistical Process Control Chart ประเภท แผนภูมิควบคุม เป็นเครื่องมือสำหรับการควบคุมดูแลความผันแปรของกระบวนการ เพื่อให้ทราบถึงแนวโน้มของกระบวนการที่จะเกิดความผิดปกติขึ้นและจะได้แก้ไขได้ทันที

5. สรุป

จากผลการดำเนินงานวิจัยที่นำทฤษฎี Six Sigma มาปฏิบัติตามขั้นตอนการทำงานแบบ DMAIC ทำให้ทราบปัจจัยที่มีผลต่อระดับการเติมเครื่องเติมที่ไม่ได้ตามมาตรฐานโรงงานกำหนดและทราบค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเพื่อให้ระดับการเติมเครื่องเติมอยู่ที่ A มิลลิเมตร คือ ความยาวของ Vent tube เพิ่มขึ้นจากเดิม 3 มิลลิเมตร แรงดันใน Ring Bowl เพิ่มขึ้นจากเดิม 0.1 บาร์ และ ระดับน้ำใน Ring Bowl เพิ่มขึ้นจากเดิม 20 มิลลิเมตร จากการปรับปรุงพบว่าค่าเฉลี่ยระดับการเติมเครื่องเติมหลังการปรับปรุงอยู่ที่ A+0.518 มิลลิเมตร แสดงว่าระดับการเติมเครื่องเติมอยู่ในมาตรฐานที่โรงงานกำหนด ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) ลดลงจากเดิม 0.834 ของเสียประเภทเติมเครื่องเติมเกินมาตรฐานกำหนด (Overfill) ลดลงจากเดิม 100% ค่าความสามารถของกระบวนการ (C_{pk}) เพิ่มขึ้นจากเดิม 0.52 ค่าศักยภาพของความสามารถ (C_p) เพิ่มขึ้นจากเดิม 0.45 และระดับการเติมเครื่องเติม เพิ่มขึ้นจากเดิม 1.99 ซีกม่า แสดงว่ากระบวนการบรรจุเครื่องเติม

มีประสิทธิภาพเพิ่มสูงขึ้น การวิจัยนี้สามารถบรรลุวัตถุประสงค์การลดของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการบรรจุเครื่องดื่มได้สำเร็จ

6. ข้อเสนอแนะ

หากผู้ที่สนใจงานวิจัยการศึกษาเพื่อลดของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการบรรจุเครื่องดื่มสามารถนำวิธีการดังกล่าวไปประยุกต์ใช้กับกระบวนการบรรจุของเหลวในภาชนะอื่น ๆ เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาได้ และในการศึกษาครั้งต่อไปสามารถเพิ่มเครื่องมือการออกแบบพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Design) ซึ่งจะเป็นแบบจำลองที่มีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นกับตัวแปรอิสระกำลังหนึ่งหรือกำลังในการหาคำตอบ และใช้การออกแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design; CCD) สามารถเพิ่มความแม่นยำของค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์เครื่องจักรได้มากยิ่งขึ้น

References

- [1] Yongpisanphob W. Business/Industry Innovation 2019-2021: Beverage Products: Bank of Ayudhya Public Company Limited [Internet]. 2022 [cited 2023 Feb 1]. Available from: <https://www.krungsri.com/th/research/industry/industry-outlook/food-beverage/beverage/io/io-beverage-2022>. (In Thai)
- [2] Ketsarapong P, Sriyanalugsana S. Reducing defective in food refrigerator production process with six sigma technique. Kasem Bundit Engineering Journal 2019;9(2):25-37. (In Thai)
- [3] Promthep S, Thawesaengskulthai D. Defective reduction in flexible packaging film production process. Research and Development Journal 2011;22(4):77-85. (In Thai)
- [4] Mahanil N, Joomsawat P, Makpin K, Weerawong K. Reducing waste in the liquid detergent packaging process by applying the six sigma concept. Journal of Science and Technology, Southeast Bangkok University 2023;3(1):1-12. (In Thai)
- [5] Noirach K, Chutima P. Reduction of waste from welding splash in motorcycle battery production process. Research and Development Journal 2014;25(3):55-61. (In Thai)
- [6] Pinthet K, Suksomkit P, Taweedeche T. Reduction of waste in the thermoforming plastic process using six sigma technique: a case study of a packaging factory. Journal of Science and Technology Thonburi University 2022;6(1):109-21. (In Thai)

- [7] Ritprasertsri T. Reduction of waste time in sauce production process using lean six sigma concept [Master's Thesis in Industrial Engineering]. Bangkok, Thailand: Chulalongkorn University; 2016. (In Thai)
- [8] Arunrat A. Reduction of losses in bottled drinking water production process: a case study of a drinking water factory [Master's Independent Study in Industrial Management]. Songkhla, Thailand: Prince of Songkla University; 2021. (In Thai)
- [9] Saesiw B, Sosakun N. Reducing defects in the packaging process by applying experimental design: a case study of a snack company. Journal of Industrial Technology Lampang Rajabhat University 2016;9(2):30-44. (In Thai)
- [10] Pankham V, et al. Reduction of syrup loss from under volume standard problems in production process 5. Journal of Science and Technology Thonburi University. 2022;6(2):109-19. (In Thai)
- [11] Wongkart P. Saltiness variation reduction of soaking process in canned pickled mustard greens manufacturing by six sigma techniques [Master's thesis]. Bangkok, Thailand: Chulalongkorn University; 2011. (In Thai)
- [12] Kaewyindee W. Defect reduction in dyeing and finishing processes in a sample factory using the DMAIC method [Master's thesis]. Nakhon Pathom, Thailand: Silpakorn University; 2019. (In Thai)

ประวัติผู้เขียนบทความ



เกวลิน สำเภอทอง นักศึกษาปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาการจัดการงานวิศวกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์ เลขที่ 6 ถนนราชมรรคาใน อำเภอเมือง จังหวัดนครปฐม 73000 โทรศัพท์ 086-8121322 Email: kewalinsampaothong.23@gmail.com



อาจารย์กวินธร สัยเจริญ อาจารย์ประจำหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการและโลจิสติกส์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรมและการจัดการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์ เลขที่ 6 ถนนราชมรรคาใน อำเภอเมือง จังหวัดนครปฐม 73000 โทรศัพท์ 098-2493951 Email: saicharoen_k@silpakorn.edu



ดร.สิทธิชัย แซ่เหล่ม อาจารย์ประจำหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการจัดการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์ เลขที่ 6 ถนนราชมรรคาใน อำเภอเมือง จังหวัดนครปฐม 73000 โทรศัพท์ 089-7221410 Email: saelem_s@silpakorn.edu

Article History:

Received: May 11, 2024

Revised: November 1, 2024

Accepted: November 5, 2024

การประเมินประสิทธิภาพของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกในการพัฒนากำลังและ
ความแข็งแรงของดินทรายสำหรับการปรับปรุงคุณภาพดิน

EVALUATING THE EFFECTIVENESS OF HYDRAULIC CEMENT IN ENHANCING STRENGTH AND STIFFNESS OF SANDY SOIL FOR GROUND IMPROVEMENT

ปณณวิช รุ่งเรือง¹ วรพจน์ เพชรเกต² ศุภสิทธิ์ พงศ์ศิระสถิตย์³ สุธี ปิยะพิพัฒน์⁴ และ
อติเทพ ศรีคงศรี⁵

¹นักศึกษาปริญญาโท, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี
ราชมงคลธัญบุรี 39 ม.1 ถ.รังสิต-นครนายก ต.คลองหก อ.คลองหก จ.ปทุมธานี 12110,
punnawit_r@mail.rmutt.ac.th

²นักศึกษาปริญญาเอก, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี
ราชมงคลธัญบุรี 39 ม.1 ถ.รังสิต-นครนายก ต.คลองหก อ.คลองหก จ.ปทุมธานี 12110,
warapot_p@mail.rmutt.ac.th

^{3,4}อาจารย์, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
39 ม.1 ถ.รังสิต-นครนายก ต.คลองหก อ.คลองหก จ.ปทุมธานี 12110,
³supasit.p@en.rmutt.ac.th, ⁴suthee.p@en.rmutt.ac.th

⁵อาจารย์, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
60 ถ. ร่มเกล้า เขตมีนบุรี กรุงเทพมหานคร 10510, atitep.sri@kbu.ac.th

Punnawit Rungruang¹, Warapot Petchgate², Supasit Pongsivasathit³, Suthee Piyapiphat⁴
and Atitep Srikongsri⁵

¹Master student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering,
Rajamangala University of Technology Thanyaburi, 39 Moo 1 Rangsit-Nakhonnayok Street,
Khonghok Subdistrict, Klonghok District, Pathumthani 12110, Thailand,
punnawit_r@mail.rmutt.ac.th.

²Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering,
Rajamangala University of Technology Thanyaburi, 39 Moo 1 Rangsit-Nakhonnayok Street,
Khonghok Subdistrict, Klonghok District, Pathumthani 12110, Thailand,
warapot_p@mail.rmutt.ac.th.

^{3,4}Lecturer, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering,
Rajamangala University of Technology Thanyaburi, 39 Moo 1 Rangsit-Nakhonnayok Street,
Khonghok Subdistrict, Klonghok District, Pathumthani 12110, Thailand,

³supasit.p@en.rmutt.ac.th, ⁴suthee.p@en.rmutt.ac.th

⁵Lecturer, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasem Bundit
University, 60 Romklao Rd., Minburi Bangkok 10510, Thailand, atitep.sri@kbu.ac.th.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกในการปรับปรุงสมบัติความแข็งแรงของดินทรายได้แก่ ค่ากำลังกดอัดแกนเดียว (q_u) และค่ามอดุลัสซีแคนท์ (E_{50}) ของผลทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจากการทดสอบแรงกดอัดแกนเดียว ตัวอย่างดินทดสอบนำมาจากสถานที่ก่อสร้างอาคารสูบน้ำดิบวัดราษฎร์จำนงค์ จังหวัดหนองคาย ดินทดสอบถูกผสมกับปูน HC ที่ร้อยละ 10, 15, 20, 25 และ 30 ของน้ำหนักดินแห้ง ทำการบ่มตัวอย่างดินผสมที่ 3, 7, 14 และ 28 วัน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อปริมาณซีเมนต์เท่ากับ 1:1 ในการประเมินปูน HC เพื่อเป็นสารผสมเพิ่มที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมในงานปรับปรุงคุณภาพดินจะนำผลทดสอบที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลทดสอบของปูนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ชนิดที่ 1 (OPC) ภายใต้ปริมาณซีเมนต์และอายุการบ่มเดียวกัน ผลการทดสอบพบว่า การเพิ่มขึ้นของปริมาณปูนซีเมนต์และอายุการบ่มทำให้ค่า q_u และ E_{50} เพิ่มขึ้นเป็นไปในทางเดียวกันของปูนทั้ง 2 ชนิด แต่อย่างไรก็ดีพบว่าผลทดสอบของดินผสมปูน HC มีค่าน้อยกว่าเล็กน้อยเมื่อเทียบกับดินผสมปูน OPC เนื่องจากองค์ประกอบของออกไซด์ที่แตกต่างกัน ผลการวิเคราะห์ผลทดสอบด้วยโครงสร้างทางจุลภาคแสดงถึงการพัฒนาแท่งเอทริงไคต์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของดินที่ผสมปูนซีเมนต์ทั้ง 2 ชนิด มีลักษณะที่คล้ายคลึงกันมาก นอกจากนี้ยังพบว่าความสัมพันธ์แบบกราฟเส้นตรงระหว่างค่า q_u และ E_{50} ของปูนทั้งสองชนิดแทบไม่แตกต่างกัน หากนำข้อมูลทั้งหมดมาหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า q_u และ E_{50} สามารถเขียนเป็นสมการได้แก่ $E_{50} = 78.165q_u$ ดังนั้นปูน HC สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานปรับปรุงคุณภาพดินอย่างยั่งยืนโดยเฉพาะกับเทคนิคการผสมลึก ทดแทนการใช้ปูน OPC เนื่องจากปูนชนิดนี้เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

คำสำคัญ: การปรับปรุงคุณภาพดิน, ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก, แรงกดอัดทิศทางเดียว, มอดุลัสซีแคนท์, การวิเคราะห์ผลทดสอบด้วยโครงสร้างทางจุลภาค

ABSTRACT

This research aims to investigate the effectiveness of hydraulic cement (HC) in improving the strength and stiffness properties of sandy soil, specifically focusing on unconfined compressive strength (q_u) and the secant modulus (E_{50}), derived from the stress-strain relationship of unconfined compression tests. The soil samples used were sandy soil obtained from the construction site of a water pumping station at Ratchamnong Temple in Nong-Khai Province. These samples were mixed with HC at varying proportions of 10 %, 15%, 20%, 25%, and 30% by dry weight. The curing periods employed were 3, 7, 14, and 28 days, with a water/cement ratio of 1 : 1 . To evaluate HC as an environmentally friendly admixture for ground improvement, the test results using HC were compared with those using ordinary Portland cement (OPC) under identical cement content and curing periods. The results indicated that increasing the cement content and curing period enhanced both q_u and E_{50} for both HC and OPC, showing similar trends for both types of cement. However, the results for HC were slightly lower than those for OPC, likely due to differences in oxide composition. Scanning Electron Microscope analysis reveals that the development of Ettringite formation, resulting from the cement hydration reaction, shows significant similarity between HC and OPC as the curing period increases. Despite this, the linearly correlation between q_u and E_{50} for HC admixture was nearly identical to that for OPC admixture. From the overall results, the relationship between q_u and E_{50} can be expressed as $E_{50} = 78.165q_u$. Therefore, HC admixture can be effectively used in sustainable ground improvement, particularly in deep mixing methods, as an environmentally friendly alternative to OPC admixture.

KEYWORDS: Ground Improvement, Hydraulic cement, Unconfined compressive strength, Secant Modulus, Scanning Electron Microscope analysis

1. บทนำ

เทคนิคการทำให้เสาเข็มดินซีเมนต์ด้วยวิธีการผสมลึก (Deep Mixing Method, DMM) ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมการก่อสร้าง Ministry of Transport [1] ของประเทศญี่ปุ่นเปิดเผยว่าวิธี DMM นำมาใช้เป็นครั้งแรกในปี 1989 เพื่อเป็นฐานรากของโครงสร้างท่าเรือ เช่น กำแพงกันคลื่นหรือแนวป้องกันชายฝั่ง โดยใช้รูปแบบเสาแบบบล็อกและแบบผนัง และมีการเผยแพร่มาตรฐานการออกแบบในปี 1999 [2] และ 2007 [3] เทคนิคนี้ทำให้สามารถเพิ่มสมบัติ

เชิงกลของชั้นดินอ่อน The Ports and Harbours Association of Japan [4-6] ได้เผยแพร่มาตรฐานการออกแบบและก่อสร้างวิธี DMM ในเวอร์ชันภาษาญี่ปุ่น ต่อมา The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan [7-9] เผยแพร่มาตรฐานในเวอร์ชันภาษาอังกฤษ วิธีการออกแบบเสาแบบกลุ่มสำหรับการปรับปรุงชั้นดินอ่อนเพื่อรองรับคันดินถูกเผยแพร่โดย Public Works Research Center [10] และมีการปรับปรุงในปี 2004 [11] วิธี DMM ยังนำมาใช้เพิ่มเติมในระบบฐานรากลึกของอาคารในประเทศญี่ปุ่น พร้อมกับมีการเสนอแนวทางการออกแบบและการควบคุมคุณภาพสำหรับดินปรับปรุงโดยวิธี DMM [12] วิธี DMM ยังสามารถนำไปใช้เพื่อลดความเสี่ยงจากการเกิดปรากฏการณ์ดินเหลว (Liquefaction Mitigation) [13] นอกจากนี้มีการศึกษาพฤติกรรมความสามารถในการรับน้ำหนักตามแนวตั้งของเสาเดี่ยวรูปตัว T ในชั้นดินอ่อนโดยการทดสอบในห้องปฏิบัติการและภาคสนามแบบเต็มรูปแบบ [14, 15] Pongsivasathit et al [16] นำเทคนิคนี้มาเป็นโครงสร้างของเขื่อนที่ประกอบด้วยดินซีเมนต์ที่เรียงแถวเป็นลักษณะของรังผึ้ง (Honey Comb Structure) ร่วมกับกำแพงเสาเข็มคอนกรีตอัดแรงเพื่อใช้เป็นเขื่อนกันน้ำในบ่อขนาดใหญ่แห่งหนึ่ง

โดยทั่วไปเมื่อซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับดินจับตัวกันแข็งเป็นลักษณะคล้ายเสาเข็มในชั้นดิน ทำหน้าที่เสริมความเสถียรภาพของชั้นดินและช่วยลดการทรุดตัวของชั้นดิน [17-22] ความแข็งแรงของดินซีเมนต์จะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยโดยเฉพาะอย่างยิ่งชนิดของสารผสมได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Ordinary Portland Cement, OPC) ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายโดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณภาคพื้นเอเชียตะวันออกเฉียงใต้

ปัจจุบันสภาวะโลกร้อนที่เกิดจากการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หรือก๊าซเรือนกระจกเป็นปัญหาที่ทุกหน่วยงานต้องช่วยระดมกันแก้ไข โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุตสาหกรรมการผลิตผงปูนซีเมนต์ที่เป็นแหล่งปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จำนวนมากสู่ชั้นบรรยากาศโลก ดังนั้นจึงได้มีการผลิตปูนชนิดใหม่ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (Hydraulic Cement, HC) หรืออาจเรียกว่าปูนซีเมนต์คอมโพสิต (Composite Cement) ที่สามารถใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ [23] เนื่องจากปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมีการแทนที่ปูนเม็ดด้วยวัสดุอื่น อย่างเช่น ยิปซัม แก้วลอย รวมไปถึงกากจากอุตสาหกรรม เช่น ตะกรันเหล็ก ประมาณร้อยละ 10 จึงทำให้ช่วยลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ แม้ค่าการปล่อยลดลงเพียงเล็กน้อย แต่ในการก่อสร้างใช้ปริมาณปูนจำนวนมาก จึงช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่ชั้นบรรยากาศได้อย่างมีนัยสำคัญ

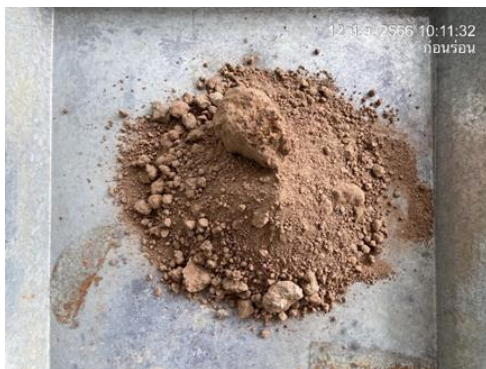
อย่างไรก็ดีในงานปรับปรุงคุณภาพดินในประเทศไทย การใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกนั้นยังไม่มีเป็นที่นิยมมากนักเมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เนื่องจากยังขาดข้อมูลพื้นฐานที่จำเป็นสำหรับการประยุกต์ใช้ในการออกแบบ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการพัฒนา กำลังและความแข็งแรงของดินที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก ศึกษาถึงประสิทธิภาพของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกในด้านการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยการเปรียบเทียบกับผลการทดสอบของดิน

ตัวอย่างที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ สำหรับดินที่ใช้ในการทดสอบจะใช้ตัวอย่างดินที่เก็บจากโครงการก่อสร้างอาคารสูบน้ำดิบ วัดราษฎร์จำนงค์ จังหวัดหนองคาย เนื่องจากเป็นโครงการที่ต้องทำกำแพงเสาเข็มดินซีเมนต์ในชั้นทรายเพื่อแก้ไขการเอียงของโครงสร้างอาคารสูบน้ำที่เกิดขึ้นมากเกินจนขาดความเสถียรภาพในระหว่างการขุดลึก โดยโครงการนี้จะมีการประยุกต์ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกทดแทนการใช้ปูนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ ผลการวิจัยจะเป็นข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญด้านการพัฒนาเทคนิคการปรับปรุงคุณภาพดินอย่างยั่งยืนโดยใช้สารผสมเพิ่มที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

2. วิธีดำเนินงานวิจัย

2.1 การเตรียมวัสดุ

การศึกษาวิจัยนี้ใช้ดินทราย บริเวณริมฝั่งแม่น้ำโขง วัดราษฎร์จำนงค์ หมู่ 3 ตำบลเมืองหมี่ อำเภอเมือง จังหวัดหนองคาย เก็บตัวอย่างแบบถูกรบกวน (Disturbed sample) ที่ระดับความลึก 0-1 เมตร ที่มีขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ดังแสดงในรูปที่ 1 และเมื่อนำมาจำแนกชนิดดินตามวิธีระบบเอกภาพ (Unified Soil Classification) พบว่าเป็นดินทรายชนิด SP (Poorly graded sand) แล้วเก็บตัวอย่างดินบรรจุในภาชนะปิด ตารางที่ 1 แสดงคุณสมบัติเบื้องต้นของดินทราย และปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการศึกษานี้มี 2 ชนิด คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 และ ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกชนิด GU ดังแสดงในรูปที่ 2



(a)



(b)

รูปที่ 1 ลักษณะของดินตัวอย่างก่อนร่อน (a) และลักษณะของดินตัวอย่างหลังร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 (b)

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกายภาพของดินทราย

คุณสมบัติทางกายภาพของดิน	
Natural Water Content (%)	2.49
Specific Gravity, Gs	2.74
Liquid Limit, LL (%)	20.30
Plastic Limit, PL (%)	ไม่สามารถหาค่าได้
Plasticity Index, PI (%)	ไม่สามารถหาค่าได้
% ปริมาณดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4	100%
% ปริมาณดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200	1.30%
จำแนกชนิดดินตามระบบเอกภาพ	SP



(a)



(b)

รูปที่ 2 ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกชนิด GU (a) และปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 (b)

ในตารางที่ 2 แสดงถึงองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ทั้งสองชนิดที่ใช้ในการทดสอบ จะเห็นได้ว่าเป็นความแตกต่างกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งปริมาณสารที่มีผลต่อการพัฒนากำลังของดินซีเมนต์ ได้แก่ ซิลิกาและอลูมินา ที่ปูน OPC มีค่ามากกว่าปูน HC อย่างไรก็ดีพบว่าปูน HC กลับมีค่าแคลเซียมออกไซด์ที่มากกว่าปูน OPC ซึ่งก็มีผลต่อการพัฒนากำลังของดินซีเมนต์เช่นเดียวกัน [24, 25]

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (HC) และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC)

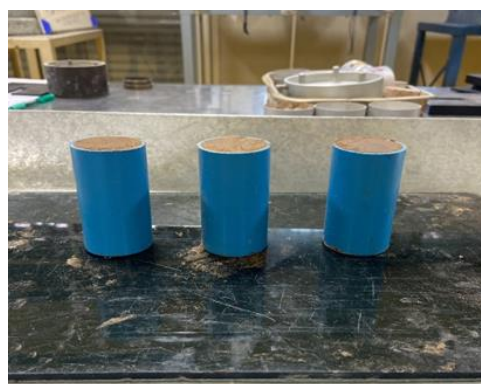
Chemical Composition	HC (%)	OPC (%)
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	70.02	67.30
ซิลิกาออกไซด์ (SiO ₂)	15.58	17.16
อลูมินาออกไซด์ (Al ₂ O ₃)	3.44	4.02
เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe ₂ O ₃)	2.95	3.06
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	1.09	2.39
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO ₃)	5.68	4.53
โซเดียมออกไซด์ (Na ₂ O)	0.27	0.43
โพแทสเซียมออกไซด์ (K ₂ O)	0.492	0.431
ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO ₂)	0.228	0.289

2.2 การเตรียมวัสดุ

นำดินทรายที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 มาผสมกับปูน HC และในทำนองเดียวกันนำดินทรายมาผสมกับปูน OPC ด้วย เพื่อใช้เป็นตัวเปรียบเทียบประสิทธิภาพของปูน HC ในอัตราส่วนที่เท่ากันได้แก่ ร้อยละ 10, 15, 20, 25 และ 30 โดยน้ำหนักดินแห้ง เติมน้ำในส่วนผสมที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c ratio) เท่ากับ 1:1 สังเกตว่าปริมาณน้ำที่ผสมอยู่ในสัดส่วนที่มากจึงอาจมีบางส่วนที่เป็น น้ำอิสระ (free water) ที่ในการช่วยทำให้ส่วนผสมเข้ากันง่ายขึ้น เนื่องด้วยปริมาณที่มากจึงทำให้ดินซีเมนต์มีกำลังไม่สูงหากเปรียบเทียบกับกำลังของคอนกรีตผสม จากนั้นนำส่วนผสมมาผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องผสมคอนกรีตขนาดเล็ก เมื่อผสมเข้ากันดีแล้วจึงนำตัวอย่างดินซีเมนต์ที่ได้ใส่ในแบบหล่อตัวอย่างทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 cm. สูง 7 cm. แล้วห่อด้วยพลาสติกและเก็บในที่ลับแสงเพื่อลดการสูญเสียความชื้นของตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 3 โดยจะเก็บตัวอย่างไว้เป็นเวลา 3, 7, 14 และ 28 วัน ก่อนนำไปทดสอบหาค่ากำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive strength, q_u) ตามมาตรฐาน ASTM D 2166 ในตารางที่ 3 แสดงจำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบในแต่ละกรณีศึกษา



(a)



(b)

รูปที่ 3 การเก็บรักษาตัวอย่าง (a) และการจัดทำตัวอย่าง (b)

ตารางที่ 3 อัตราส่วนผสมซีเมนต์และจำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

ปริมาณซีเมนต์ต่อ น้ำหนักดินแห้ง (เปอร์เซ็นต์)	อายุการบ่ม (วัน) และจำนวนตัวอย่าง							
	Hydraulic Cement				Portland Cement			
	3	7	14	28	3	7	14	28
10	5	5	5	5	5	5	5	5
15	5	5	5	5	5	5	5	5
20	5	5	5	5	5	5	5	5
25	5	5	5	5	5	5	5	5
30	5	5	5	5	5	5	5	5
รวม	25	25	25	25	25	25	25	25
รวมทั้งหมด	200 ตัวอย่าง							

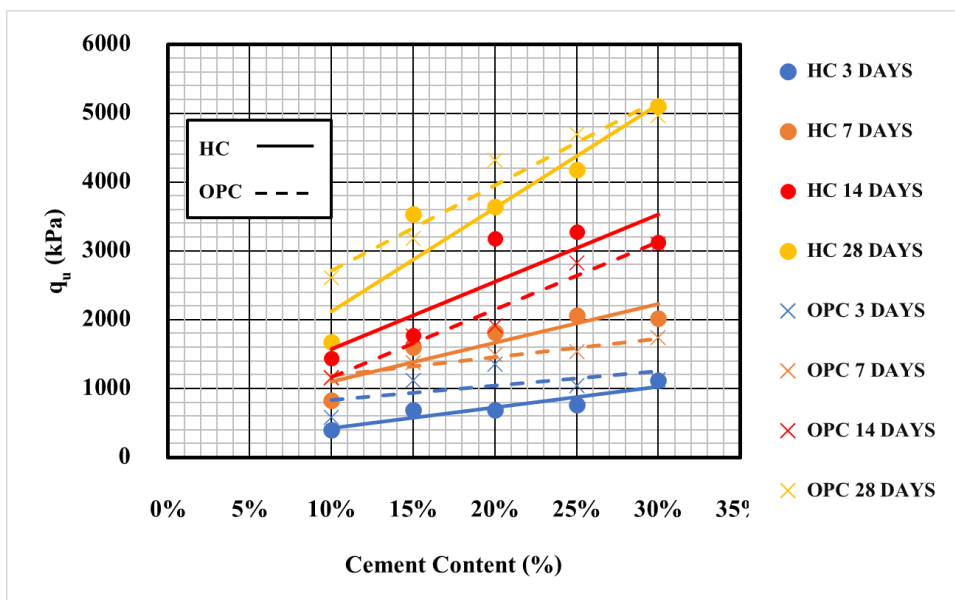
3. ผลการทดสอบ

3.1 ผลการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว

3.1.1 อิทธิพลของปริมาณซีเมนต์ที่มีผลต่อค่า q_u

ในการนำเสนอข้อมูล เนื่องจากข้อมูลเป็นความเฉลี่ยและต้องการศึกษาความสัมพันธ์ของกำลังรับน้ำหนักของดินซีเมนต์กับอายุการบ่มและปริมาณซีเมนต์ จึงทำการพล็อตความสัมพันธ์แบบ Regression ข้อมูล และในงานวิจัยนี้จะขอเสนอเป็นความสัมพันธ์แบบเส้นตรง เนื่องจากอายุการบ่มมากที่สุดเพียงแค่ 28 วัน ค่ากำลังของดินซีเมนต์ยังคงเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญอยู่ โดย

ผลการศึกษาระหว่างค่า q_u เฉลี่ยกับปริมาณซีเมนต์ทั้งสองชนิด ที่อัตราส่วนต่างๆ พบว่าเมื่ออัตราส่วนผสมของซีเมนต์ทั้งสองชนิดเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่า q_u เฉลี่ยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น [26] ในลักษณะของสมการกราฟเส้นตรงอย่างมีนัยสำคัญ และค่า q_u เฉลี่ยที่ได้จากการผสมเพิ่มซีเมนต์ทั้งสองชนิดมีค่าที่ใกล้เคียงกันดังแสดงในรูปที่ 4 ทั้งนี้ค่า q_u เฉลี่ยที่ได้จากการผสมเพิ่มด้วย HC ให้แนวโน้มน้อยกว่าค่า q_u เฉลี่ยที่ได้จากการผสมเพิ่มด้วย OPC เล็กน้อยในทุกอายุการบ่มอยู่เฉลี่ยร้อยละ 10.66 ทั้งนี้อาจเป็นเพราะในกระบวนการผลิต HC นั้นมีการปรับลดปริมาณเม็ดปูนลง แล้วแทนที่ด้วยวัสดุปอซโซลาน [27] โดยปูน OPC แม้ว่ามีสารแคลเซียมออกไซด์น้อยกว่าปูน HC อยู่เล็กน้อย แต่พบว่าปูน OPC มีปริมาณสารสำคัญอื่น ๆ ที่มีผลต่อกำลังของดินซีเมนต์ เช่น สารซิลิกา ออกไซด์ อลูมินาออกไซด์ และอื่น ๆ เป็นต้น ที่สูงกว่าปูน HC ดังแสดงในตารางที่ 2 จึงทำให้กำลังความแข็งแรงของดินซีเมนต์ผสมปูน OPC มีแนวโน้มมากกว่าเล็กน้อยเมื่อเทียบกับกรณีผสมปูน HC ทั้งนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Vinoth et al [28]

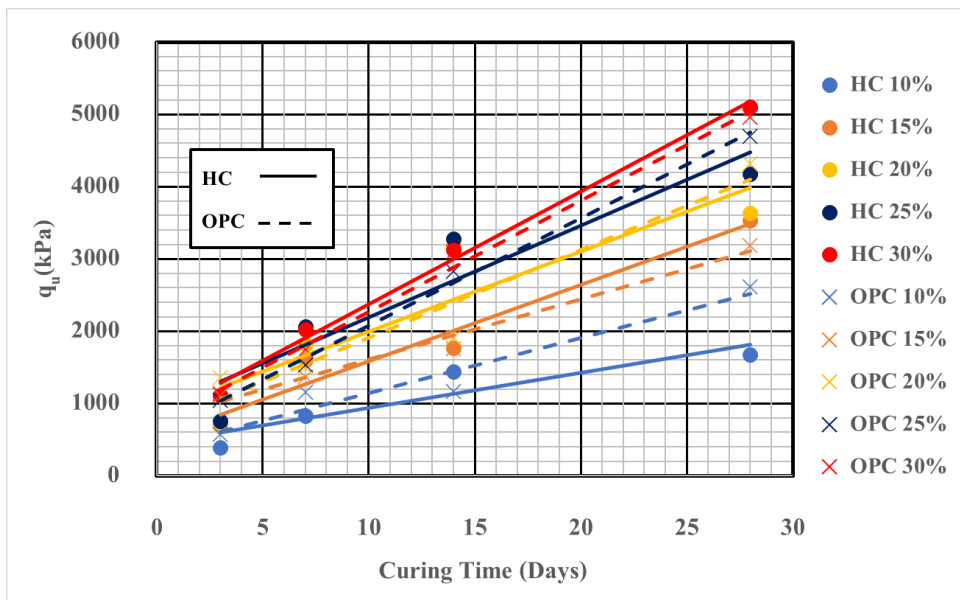


รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unconfined Compressive Strength (q_u) กับปริมาณซีเมนต์ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

3.1.2 อิทธิพลของระยะเวลาการบ่มที่ผลต่อค่า q_u

จากการศึกษาพบว่า ระยะเวลาในการบ่มยังเป็นอีกปัจจัยที่สำคัญที่ส่งผลให้ค่า q_u มีการพัฒนาเพิ่มสูงขึ้นตามอายุการบ่ม ดังแสดงในรูปที่ 5 เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยา Calcium Silicate Hydrate (CSH) และ Calcium Aluminate Hydrate (CAH) [29-30] จะค่อย ๆ พัฒนาการเกิดปฏิกิริยา

ตามอายุของการบ่มของวัสดุประสานทั้งสองชนิด (HC และ OPC) ค่า q_u เฉลี่ยมีแนวโน้มการพัฒนาแปรผันตรงกับปริมาณ HC และ OPC สังเกตได้จากค่า q_u เฉลี่ยที่ได้จากการผสมด้วย OPC มีแนวโน้มสูงกว่าค่า q_u เฉลี่ยจากการผสมด้วย HC ในช่วงแรกของการบ่มอยู่เฉลี่ยร้อยละ 21.36 แสดงถึงปฏิกิริยาในดินที่ผสมด้วย HC เกิดช้ากว่าดินที่ผสมด้วย OPC เล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ดังในตารางที่ 2 จะเห็นได้ว่า แม้ว่าปูน OPC จะมีปริมาณของสารแคลเซียมออกไซด์ที่น้อยกว่า HC แต่ในองค์ประกอบอื่นๆ ที่สำคัญของปูน OPC เช่น สารซิลิกาออกไซด์ และอลูมินาออกไซด์ เป็นต้น สูงกว่าปูน HC จึงทำให้กำลังของดินผสมปูน OPC จึงมีค่ามากกว่าการนิปูน HC อย่างไรก็ดีเมื่อระยะเวลาการบ่มเพิ่มขึ้นความแตกต่างของค่า q_u ระหว่างดินที่ผสมด้วยปูนทั้งสองชนิดจะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณซีเมนต์ สังเกตจากที่ปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 30 มีความแตกต่างเพียงร้อยละ 2.5 แต่ที่ปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 มีความแตกต่างกันถึงร้อยละ 30.44 ดังแสดงในรูปที่ 5



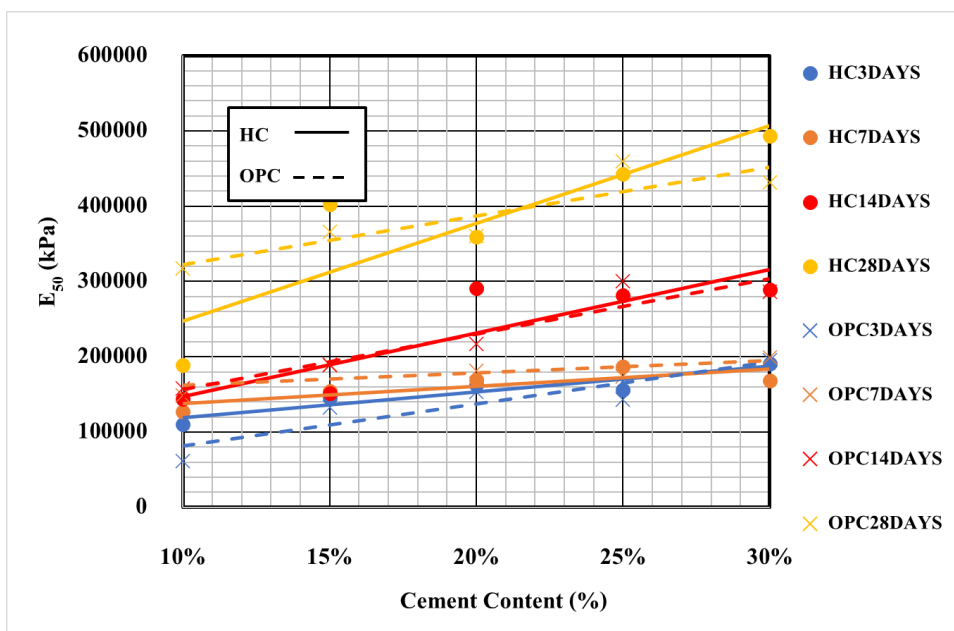
รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Unconfined Compressive Strength (q_u) กับปริมาณซีเมนต์ที่อัตราส่วนต่าง ๆ และ อายุการบ่ม

แต่อย่างไรก็ดีเนื่องจากปูน HC มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ ที่สูงกว่าอาจทำให้จะส่งผลให้ดินซีเมนต์เกิดการแตกร้าวเนื่องจากการยึดหดตัว (Volume Change) จากปฏิกิริยา Hydration หรือการสูญเสียน้ำ ดังนั้นในการบ่มดินผสมปูน HC จำเป็นต้องเตรียมในสภาพแวดล้อมที่มีความชื้นเพียงพอเพื่อป้องกันการสูญเสียน้ำอาจสามารถช่วยลดการหดตัวและการแตกร้าวของดินซีเมนต์ได้

สำหรับการศึกษานี้ยังไม่พบเห็นรอยแตกขนาดเล็กบนก้อนตัวอย่างทั้งกรณี OPC หรือ HC อาจเป็นเพราะตัวอย่างทดสอบถูกทำปมในสภาวะที่เหมาะสมมีการสูญเสียความชื้นที่น้อยจากการห่อหุ้มตัวอย่างด้วยแผ่น PVC แบบใส และถูกเก็บในภาชนะที่มิดชิด ดังแสดงในรูปที่ 3

3.1.3 อิทธิพลของปริมาณซีเมนต์ที่ผลต่อค่า E_{50}

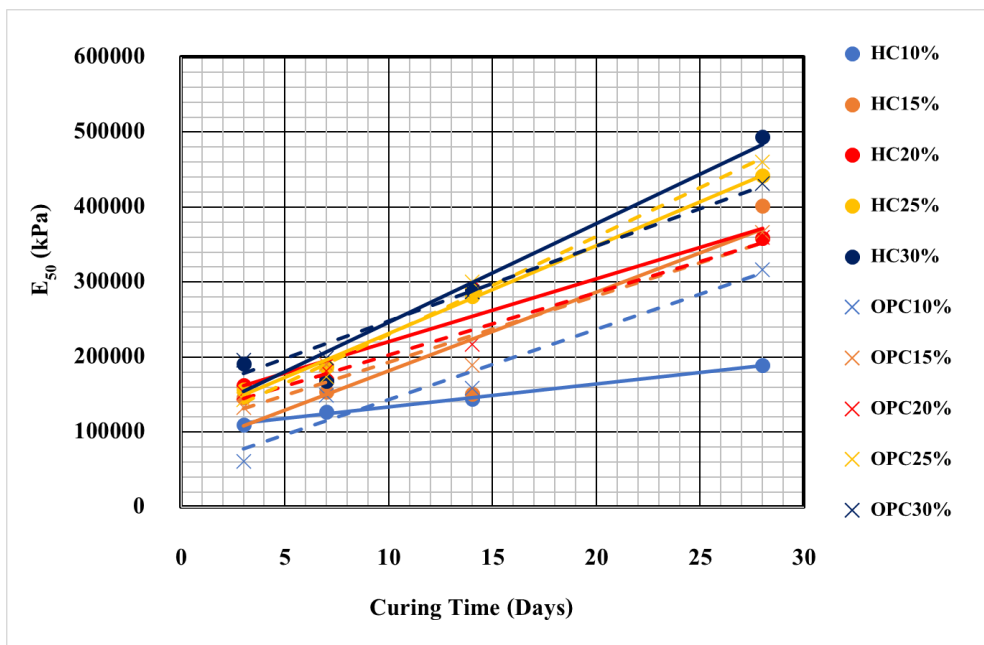
เมื่อกำหนดให้ E_{50} เป็นค่ามอดุลัสซีแคนท์ (Secant Modulus) ที่สามารถหาจากสมการดังต่อไปนี้ $E_{50} = (q_u/2)/\epsilon_{50}$ โดยที่ ϵ_{50} คือค่าความเครียดแนวแกนบนความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่สอดคล้องกับค่าของ $q_u/2$ ที่ได้จากผลการทดสอบ จากรูปที่ 6 แสดงผลของค่าเฉลี่ย E_{50} ที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในลักษณะของกราฟเส้นตรงตามปริมาณซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น อีกทั้งการพัฒนาของค่าเฉลี่ย E_{50} ของดินผสมซีเมนต์ทั้งสองชนิดยังมีลักษณะที่ใกล้เคียงกันกับลักษณะแนวโน้มของอิทธิพลของปริมาณซีเมนต์ที่ผลต่อค่า q_u เฉลี่ยกล่าวคือค่าเฉลี่ย E_{50} ของดินผสมปูน HC มีค่าน้อยกว่าของดินผสมปูน OPC เล็กน้อย อยู่เฉลี่ยร้อยละ 4.56 ทั้งนี้เนื่องจากด้วยเหตุผลในทำนองเดียวกันกับหัวข้อที่ 3.1.1 ปูน OPC โดยรวมมีปริมาณของสารที่สำคัญต่อกำลังมากกว่าปูน HC อยู่เล็กน้อย เช่น สารซิลิกาออกไซด์ อลูมินาออกไซด์ และอื่น ๆ ทำให้ดินผสมปูน HC มีการพัฒนาความแข็งแรงที่ช้ากว่าเล็กน้อย



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Secant Modulus (E_{50}) กับปริมาณซีเมนต์ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

3.1.4 อิทธิพลของอายุการบ่มที่ผลต่อค่า E_{50}

จากรูปที่ 7 แสดงแนวโน้มของการพัฒนาค่าเฉลี่ย E_{50} ต่ออายุการบ่มของดินซีเมนต์มีลักษณะเป็นสมการเส้นตรง การเพิ่มขึ้นของอายุการบ่มทำให้ค่าเฉลี่ย E_{50} เพิ่มขึ้นตาม และพบว่าค่าเฉลี่ย E_{50} ของดินผสมปูน HC มีค่าน้อยกว่าของดินผสมปูน OPC ในทุกอายุการบ่ม แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อความแข็งแรงของดินผสมซีเมนต์ทั้งสองชนิด แต่ปูน OPC จะมีการพัฒนาที่เร็วกว่าเฉลี่ยอยู่ร้อยละ 14.34 ยกเว้นแต่กรณีที่ผสมปูนในปริมาณสูง (ร้อยละ 30) พบว่าจะมีค่าน้อยกว่าในช่วงแรกแต่พออายุการบ่มถึง 28 วัน ดินผสมปูน HC กลับมีค่าสูงกว่าอยู่ร้อยละ 4.1 ทั้งนี้อาจเป็นเพราะในปูน HC มีสารแคลเซียมออกไซด์ที่สูงกว่าปูน OPC (อ้างอิงตารางที่ 2) หากผสมในปริมาณที่สูงมากพอก็อาจทำให้มีการพัฒนาความแข็งแรงได้เร็วกว่าเมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้น สารแคลเซียมออกไซด์ที่มากกว่ามีผลทำให้การพัฒนากำลังของดินซีเมนต์ดีขึ้นในระยะยาว [31]

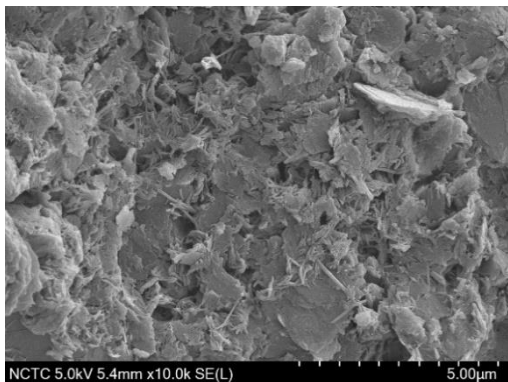


รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Secant Modulus (E_{50}) ที่อายุการบ่มต่าง ๆ

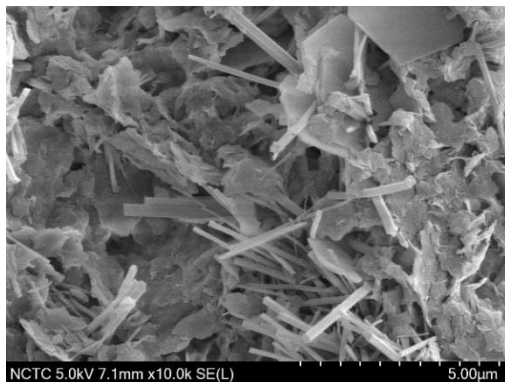
3.2 การวิเคราะห์ผลทดสอบด้วยโครงสร้างทางจุลภาค (SEM)

จากรูปที่ 8 แสดงภาพโครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างดินที่ผสมปูนซีเมนต์ทั้งสองชนิด ในอัตราส่วนร้อยละ 25 ที่อายุการบ่ม 3 วัน พบว่ากรณี OPC แสดงให้เห็นถึงการพัฒนาของผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่มากกว่ากรณี HC อย่างมีนัยยะสำคัญแม้ว่าจะมีอายุการบ่มเพียงแค่ 3 วัน

โดยมีปริมาณแท่งผลึกคล้ายเข็มหรือแท่งเอททริงโกต์เกิดขึ้นสำหรับกรณี OPC ที่มากกว่ากรณี HC อย่างชัดเจน

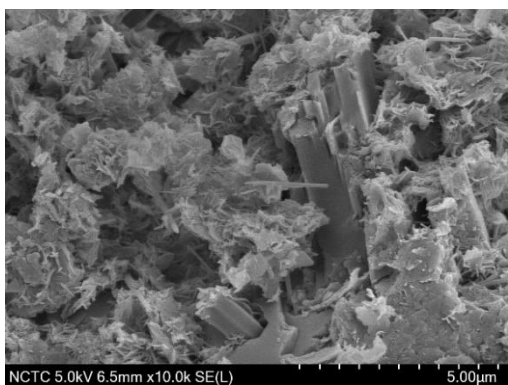


(a)

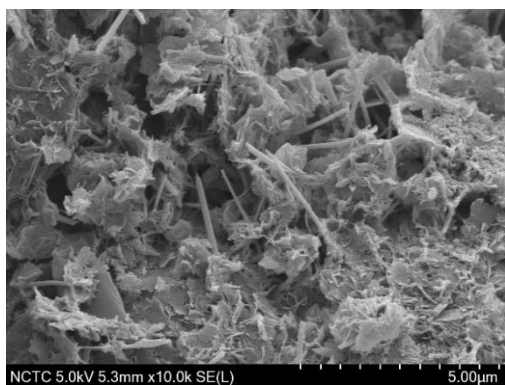


(b)

รูปที่ 8 ภาพโครงสร้างทางจุลภาคของดินผสมปูน HC ร้อยละ 25 อายุการบ่ม 3 วัน (a) และ ภาพโครงสร้างทางจุลภาคของดินผสมปูน OPC ร้อยละ 25 อายุการบ่ม 3 วัน (b)



(a)



(b)

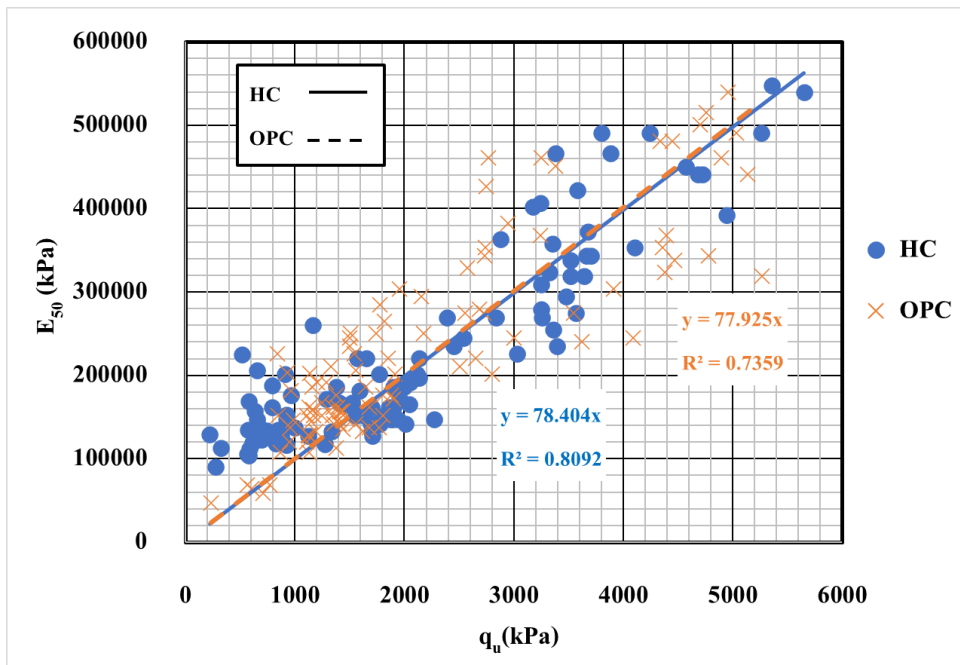
รูปที่ 9 ภาพโครงสร้างทางจุลภาคของดินผสมปูน HC ร้อยละ 25 อายุการบ่ม 28 วัน (a) และ ภาพโครงสร้างทางจุลภาคของดินผสมปูน OPC ร้อยละ 25 อายุการบ่ม 28 วัน (b)

ในขณะที่รูปที่ 9 แสดงภาพโครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างดินที่ผสมเพิ่มซีเมนต์ทั้งสองชนิดที่อัตราส่วนร้อยละ 25 สำหรับอายุการบ่ม 28 วัน พบว่า เมื่อระยะเวลาการบ่มที่นานขึ้นการพัฒนาของผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ทั้งสองชนิดมากขึ้น ในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการพัฒนากำลังของกรณีปูน HC มีแนวโน้มเพิ่มเมื่อระยะเวลาการบ่ม

ที่มากขึ้น ผลผลิตจากปฏิกิริยานี้ทำให้ความหนาแน่นของดินซีเมนต์ที่ผสมด้วยปูนทั้งสองชนิดเพิ่มขึ้น [32] จึงทำให้ความสามารถในการรับแรงสูงขึ้นตามด้วยดังแสดงในหัวข้อที่ผ่านมา

3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า q_u และค่า E_{50}

เมื่อนำผลทดสอบแรงกดอัดแกนเดียว มาหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า q_u กับ E_{50} ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 10 การเพิ่มขึ้นของค่า q_u มีผลทำให้ค่า E_{50} เพิ่มขึ้นตาม สามารถแสดงเป็นความสัมพันธ์แบบสมการเส้นตรง และเมื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่า q_u กับ E_{50} ของปูนทั้ง 2 ชนิด พบว่าสมการมีความคล้ายคลึงกันอย่างมีนัยสำคัญ สำหรับกรณีผสมด้วยปูน HC สามารถเขียนเป็นสมการเส้นตรงได้ดังสมการที่ (1)



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงกดอัดแกนเดียว (q_u) และ Secant Modulus (E_{50})

$$E_{50} = 78.404(q_u) \quad (1)$$

จากความใกล้เคียงกันหากนำข้อมูลทดสอบทั้งหมดของปูนทั้ง 2 ชนิดมาหาความสัมพันธ์ สามารถเขียนเป็นสมการเส้นตรงได้ดังสมการที่ (2)

$$E_{50} = 78.165(q_u) \quad (2)$$

ซึ่งใกล้เคียงกับการวิจัยที่ผ่านมาของ Sarkar et al [33] ที่พบว่า $E_{50} = 69.32(q_u)$ ดังนั้น แนวโน้มในการทดแทนการใช้ปูน OPC ด้วยปูน HC สามารถทำได้เนื่องจากผลการศึกษาชี้แสดงให้เห็นว่า มีการพัฒนากำลังของดินทรายผสม HC สอดคล้องเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับดินทรายผสม OPC อย่างมีนัยสำคัญ

4. สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาการพัฒนา กำลังและความแข็งแรงของดินที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วย ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก สามารถสรุปได้ดังนี้

1) ดินผสมปูน HC ให้การพัฒนากำลังที่ต่ำกว่าดินผสมด้วยปูน OPC อยู่เล็กน้อย ทั้งนี้เป็น เพราะองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกันของปูนทั้งสองชนิด โดยปูน OPC มีปริมาณของสารที่สำคัญต่อกำลังมากกว่าปูน HC ยกเว้นสารแคลเซียมออกไซด์ ที่ปูน HC มีค่ามากกว่าเล็กน้อย ส่งผลทำให้มีการพัฒนากำลังของปูน HC ช้ากว่าปูน OPC

2) ผลกระทบของปริมาณปูนที่ผสมและอายุการบ่มของปูนทั้งสองชนิดมีความสอดคล้องกัน อย่างมีนัยสำคัญ การเพิ่มปริมาณปูนที่ผสมและอายุการบ่มทำให้ค่า E_{50} และ q_u เพิ่มขึ้นตาม การเพิ่มปริมาณซีเมนต์และอายุการบ่มทำให้ปูนทั้งสองมีค่าความต่างของค่า E_{50} และ q_u ลดลง

3) ความสัมพันธ์ระหว่าง E_{50} และ q_u ของปูนทั้งสองชนิดสามารถแสดงออกเป็นสมการ เส้นตรงและพบว่าปูนทั้งสองชนิดมีความสัมพันธ์ที่ใกล้เคียงกันมากแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย และ เมื่อนำผลทดสอบทั้งหมดของปูนทั้งสองชนิดมาหาความสัมพันธ์ระหว่าง E_{50} และ q_u พบว่าสามารถ แสดงออกด้วยสมการ $E_{50} = 78.165(q_u)$ สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา สามารถนำไปประยุกต์ใช้ เพื่อการออกแบบเสาเข็มดินซีเมนต์บนชั้นดินทรายได้ โดยเฉพาะบริเวณพื้นที่ริมฝั่งแม่น้ำโขง จังหวัดหนองคาย

การใช้ปูน HC เพื่อทดแทนปูน OPC ในงานปรับปรุงคุณภาพดินแบบยั่งยืนโดยเฉพาะกับ วิธีการผสมลิกสามารถทำได้ เป็นการช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่ ชั้นบรรยากาศเนื่องจากในงานผสมลิกต้องใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ที่สูงมาก

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ บริษัท ซอยล์ ซีเมนต์ คอลัมน์ จำกัด และ บริษัท เกษมดีชายน แอนด์ คอนสัลแตนท์ จำกัด ที่เอื้อเฟื้อดินทราย บริเวณริมฝั่งแม่น้ำโขง วัดราษฎร์จำนงค์ และปูนซีเมนต์ ไฮดรอลิกที่ใช้ในการทำวิจัย

References

- [1] Ministry of Transport. Technical standards for port and harbour facilities. London, UK: Ministry of Transport; 1989.
- [2] Ministry of Transport. Technical standards for port and harbour facilities. Tokyo, Japan: The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan; 1999.
- [3] Public Works Research Institute. Manual of ALicc method for ground improvement. Tsukuba, Japan: Public Works Research Institute; 2007.
- [4] The Ports and Harbours Association of Japan. Technical standards and commentaries for port and harbour facilities in Japan (Japanese version). Tokyo, Japan: The Ports and Harbours Association of Japan; 1989.
- [5] The Ports and Harbours Association of Japan. Technical standards and commentaries for port and harbour facilities in Japan (Japanese version). Tokyo, Japan: The Ports and Harbours Association of Japan; 1999.
- [6] The Ports and Harbours Association of Japan. Technical standards and commentaries for port and harbour facilities in Japan (Japanese version). Tokyo, Japan: The Ports and Harbours Association of Japan; 2007.
- [7] The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan. Technical standards and commentaries for port and harbour facilities in Japan (English version). Tokyo, Japan: The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan; 1991.
- [8] The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan. Technical standards and commentaries for port and harbour facilities in Japan (English version). Tokyo, Japan: The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan; 2002.
- [9] The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan. Technical standards and commentaries for port and harbour facilities in Japan (English version). Tokyo, Japan: The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan; 2009.
- [10] Public Works Research Center. Technical manual on deep mixing method for on land works. Tokyo, Japan: Public Works Research Center; 1999.
- [11] Public Works Research Center. Technical manual on deep mixing method for on land works. Tokyo, Japan: Public Works Research Center; 2004.
- [12] The Building Center of Japan. Design and quality control guideline of improved ground for building. Tokyo, Japan: The Building Center of Japan; 1997.

- [13] Ministry of Construction. Design and construction manual of liquefaction prevention techniques (draft). Joint Research Report. Tokyo, Japan: Ministry of Construction; 1999.
- [14] Yi Y, Liu S, Puppala AJ, Xi P. Vertical bearing capacity behaviour of single T-shaped soil–cement column in soft ground: laboratory modelling, field test, and calculation. *Acta Geotechnica* 2017;12(5):1077-88.
- [15] Yi Y, Liu S, Puppala AJ, Jing F. Variable-diameter deep mixing column for multi-layered soft ground improvement: Laboratory modeling and field application. *Soils and Foundations* 2019;59:633-43.
- [16] Pongsivasathit S, Petchgate W, Horpibulsuk S, Piyaphipat S. Composite contiguous pile wall and deep mixing column wall as a dam – design, construction and performance. *Case Studies in Construction Materials* 2021;15:e00771.
- [17] Coastal Development Institute of Technology. The deep mixing method – principle, design and construction. Lisse, Netherlands: A.A. Balkema Publishers; 2002.
- [18] Coastal Development Institute of Technology. The premixing method—principle, design and construction. London, United Kingdom: UK: A.A. Balkema Publishers; 2003.
- [19] Coastal Development Institute of Technology. Technical manual of deep mixing method for marine works. Tokyo, Japan: Coastal Development Institute of Technology; 2008.
- [20] Coastal Development Institute of Technology. Technical manual of premixing method. Tokyo, Japan: Coastal Development Institute of Technology; 2008.
- [21] Coastal Development Institute of Technology. Technical manual of light-weight geomaterial. Tokyo, Japan: Coastal Development Institute of Technology; 2008.
- [22] Coastal Development Institute of Technology. Technical manual of pneumatic flow mixing method. Tokyo, Japan: Coastal Development Institute of Technology; 2008.
- [23] Thai Cement Manufacturers Association. Hydraulic cement. Bangkok, Thailand: Thai Cement Manufacturers Association; 2022. (In Thai)
- [24] Petry TM, Little DN. Review of stabilization of clays and expansive soil in pavements and lightly loaded structures-history, practice, and future. *Journal of Materials in Civil Engineering* 2002;14(6):447-60.
- [25] Horpibulsuk S, Miura N, Nagaraj TS. Clay–water/cement ratio identity for cement admixed soft clays. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 2005;131(2):187-92.

- [26] Chaiyaput S, Manandhar S, Karki S, Ayawanna j. Characteristics of cement treated soil: A case study from soft Bangkok clay and red soil of Nepal. Lowland Technology International Journal 2020;22(2):178-91.
- [27] Suwanklang P, Chachamnan S, Suksiripattanapong C. Unconfined compressive strength and indirect tensile strength of crushed rock-cement waste improved with hydraulic cement. The 27th National Convention on Civil Engineering; 2002 Aug 24-26; Chiang Rai, Thailand. (In Thai)
- [28] Vinoth G, Moon S. W, Moon J, Ku T. Early strength development cement-treated sand using low-carbon rapid-hardening cements. Soils and Foundations 2018;58(5):1200-11.
- [29] Lambe TW, Michaels AS, Moh ZC. Improvement of soil-cement with alkali metal compounds. Highway Research Board Bulletin 1959;241:67-108.
- [30] Moh ZC. Reaction of soil minerals with cement and chemicals. Highway Research Record 1965;86:39-61.
- [31] Wang TZ, Wang CM, Zhang ZM, Huang XH. Mechanical property of cement-stabilized soil with nano-CaO and reinforcement mechanism analysis. Chemical Engineering Transactions 2016;51:1195-200.
- [32] Soeurt R, Somna R, Chalee W. Effect of alkaline activator on properties of mortar containing fly ash. Annual Concrete Conference 11; 2016 Feb 17-19; Nakhon Ratchasima, Thailand. (In Thai)
- [33] Sarkar PK, Chao KC, Wong KN, Wang M. Evaluation of index properties affecting unconfined compressive strength of jet-grouted soil columns for Bangkok soils. International Conference on Deep Foundations and Ground Improvement; 2022 May 18-20; Berlin, Germany.

ประวัติผู้เขียนบทความ



ปุ่นณวิช รุ่งเรือง นักศึกษาปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี 39 ม.1 ต.คลองหก อ.คลองหก จ.ปทุมธานี 12110 โทรศัพท์ 02-549-3410 Email: punnawit_r@mail.rmutt.ac.th



วราพจน์ เพชรเกตุ นักศึกษาปริญญาเอก หลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี 39 ม.1 ต.คลองหก อ.คลองหก จ.ปทุมธานี 12110 โทรศัพท์ 02-549-3410 Email: warapot_p@mail.rmutt.ac.th



ศุภสิทธิ์ พงศ์ศิริสวัสดิ์ รองศาสตราจารย์ ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี 39 ม.1 ต.คลองหก อ.คลองหก จ.ปทุมธานี 12110 โทรศัพท์ 02-549-3410 Email: supasit.p@en.rmutt.ac.th



สุธี ปิยะพิพัฒน์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี 39 หมู่ที่ 1 ถนนรังสิตนครนายก อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110 เบอร์โทรศัพท์ 02-549-3410 Email: suthee.p@en.rmutt.ac.th



อติเทพ ศรีคงศรี อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต 60 ถ. ร่มเกล้า เขตมีนบุรี กรุงเทพมหานคร 10510 Email: atitap.sri@kbu.ac.th

Article History:

Received: May 23, 2024

Revised: December 6, 2024

Accepted: December 6, 2024

สมบัติการทนต่อแรงกระแทกและสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบ
พอลิเอทิลีนผสมเส้นใยธรรมชาติด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนเหวี่ยง
**IMPACT STRENGTH PROPERTIES AND MORPHOLOGY OF NATURAL
FIBER/POLYETHYLENE COMPOSITES WITH ROTATIONAL MOLDING
PROCESS**

ศิริประภา ดีประดิษฐ์¹ ณัฐพล ศรีช่วงโชติ² จักรภพ คงสมแสง³ วรายุส ทรัพย์พล⁴
และ สุพัฒน์ สารอรรธ⁵

¹อาจารย์, มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา เลขที่ 96 ถนนปรีดีพนมยงค์ ตำบลประตูชัย
อำเภอพระนครศรีอยุธยา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา 13000, d_siraprapha@aru.ac.th

²นักวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา เลขที่ 96 ถนนปรีดีพนมยงค์ ตำบล
ประตูชัย อำเภอพระนครศรีอยุธยา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา 13000,
nutthapol_tech_006@hotmail.com

^{3,4,5}นักศึกษา, มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา เลขที่ 96 ถนนปรีดีพนมยงค์ ตำบลประตูชัย
อำเภอพระนครศรีอยุธยา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา 13000,
³jakkaphopdew@gmail.com, ⁴Warayutsapphon10@gmail.com, ⁵Earth52231@gmail.com

Siraprapha Deepradit¹ Nutthapol Srichuangchote² Jakkaphop Kongsomsawang³
Warayut Sapphon⁴ and Supat Sara-ud⁵

¹Lecturer, Phranakhon Si Ayutthaya Rajabhat University, 96 Pridi Banomyong Road.,
Pratuchai, Phranakhon Si Ayutthaya, Phranakhon Si Ayutthaya 13000, Thailand,
d_siraprapha@aru.ac.th

²Scientist, Phranakhon Si Ayutthaya Rajabhat University, 96 Pridi Banomyong Road.,
Pratuchai, Phranakhon Si Ayutthaya, Phranakhon Si Ayutthaya 13000, Thailand,
nutthapol_tech_006@hotmail.com

^{3,4,5}Student, Phranakhon Si Ayutthaya Rajabhat University, 96 Pridi Banomyong Road.,
Pratuchai, Phranakhon Si Ayutthaya, Phranakhon Si Ayutthaya 13000, Thailand,
³jakkaphopdew@gmail.com, ⁴Warayutsapphon10@gmail.com, ⁵Earth52231@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยเรื่องการศึกษาสมบัติการทนต่อแรงกระแทกและสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีนผสมเส้นใยกาบกล้วยจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนเหวี่ยง มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างเส้นใยกาบกล้วยและพอลิเอทิลีนสำหรับการขึ้นรูปด้วยกระบวนการหมุนเหวี่ยง และทดสอบสมบัติการทนต่อแรงกระแทกและสัณฐานวิทยาของผลิตภัณฑ์พอลิเอทิลีนผสมที่เสริมแรงด้วยเส้นใยกาบกล้วย โดยศึกษาอัตราส่วนของเส้นใยกาบกล้วยที่ 0%, 10%, 20%, 30%, 40% และ 50% โดยน้ำหนัก และศึกษาส่วนผสมของเส้นใยกาบกล้วยที่ไม่ผ่านการดัดแปลงผิวและเส้นใยกาบกล้วยที่ผ่านการดัดแปลงผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน ผลการวิจัยพบว่าสมบัติการทนต่อแรงกระแทกของพอลิเอทิลีนคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยกาบกล้วยที่ไม่ผ่านการดัดแปลงผิวมีค่า 3.96, 5.33, 4.18, 3.74, 2.11, และ 1.03 kJ/m² ตามลำดับ และพอลิเอทิลีนคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยกาบกล้วยที่ผ่านการดัดแปลงผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน มีค่า 3.96, 5.57, 4.87, 3.74, 2.90 และ 1.20 kJ/m² ตามลำดับ ซึ่งอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุด คือ 10% โดยน้ำหนัก วัสดุผสมที่ใช้เส้นใยที่ผ่านการดัดแปลงผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนมีค่าการทนต่อแรงกระแทกที่สูงกว่าวัสดุผสมที่ใช้เส้นใยที่ไม่ผ่านการดัดแปลงผิวในทุกอัตราส่วน สำหรับการทดสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงให้เห็นว่าการดัดแปลงผิวเส้นใยด้วยสารคู่ควบไซเลนสามารถช่วยปรับปรุงการยึดเกาะบริเวณผิวระหว่างเส้นใยกาบกล้วยและพอลิเอทิลีนให้ดีขึ้น ทำให้วัสดุผสมมีสมบัติเชิงกลที่เพิ่มสูงขึ้น

คำสำคัญ: วัสดุเชิงประกอบ, สมบัติการทนต่อแรงกระแทก, สัณฐานวิทยา, กระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนเหวี่ยง

ABSTRACT

Research on impact strength and morphology of natural fiber-reinforced composite materials from the rotational molding process aimed to determine the appropriate ratio of banana fibers to polyethylene for process formation. Additionally, the impact resistance and morphological characteristics of polyethylene products reinforced with banana fibers were examined. The percentage of banana peel fibers by weight at 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, and 50% was examined, including the combination of untreated banana fibers and treated fibers with a silane coupling agent. The results showed that the impact strength of polyethylene composite reinforced with untreated banana fibers was not modified. The values were as follows: 3.96, 5.33, 4.18, 3.74, 2.11, and 1.03 kJ/m², and the silane coupling agent-modified polyethylene composite reinforced with banana fibers. The values were as follows: 3.96, 5.57, 4.87, 3.74,

2.90, and 1.20 kJ/m², the optimal ratio is 10% by weight. Composites based on fibers modified with silane have higher impact resistance values than composites using unmodified fibers in all ratios. Morphological tests revealed that the beam emission of electrons has demonstrated that adding silane dual agents to the fiber surface can enhance adhesion at the polyethylene-banana leaf fiber interface, improving the mechanical characteristics of the composite material.

KEYWORDS: composites materials, impact strength, morphology, rotational molding Process

1. บทนำ

วัสดุเชิงประกอบประกอบด้วยองค์ประกอบที่มีคุณสมบัติทางเคมีหรือกายภาพต่างกันอย่างชัดเจน ซึ่งเมื่อรวมกันแล้วจะให้สมบัติเฉพาะที่แต่ละส่วนเองไม่สามารถทำได้ โดยวัสดุเชิงประกอบมีสององค์ประกอบหลัก คือ เมทริกซ์ (Matrix) และส่วนเสริมแรง (Reinforcement) [1] เมทริกซ์ทำหน้าที่ห่อหุ้มส่วนเสริมแรงและช่วยป้องกันจากปัจจัยภายนอก เช่น ความชื้นและอุณหภูมิ นอกจากนี้ยังทำหน้าที่ถ่ายโอนแรงไปยังส่วนเสริมแรงเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุโดยรวม ส่วนเสริมแรงมีบทบาทเป็นโครงสร้างหลักในการเสริมความแข็งแรง ซึ่งอาจมีรูปแบบเป็นเส้นใยอนุภาคจากเส้นใยธรรมชาติกำลังได้รับความสนใจ เนื่องจากมีคุณสมบัติเบา แข็งแรง สามารถย่อยสลายได้ และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม [2] วัสดุเชิงประกอบจากเส้นใยธรรมชาติมีความสำคัญในงานวิจัยและอุตสาหกรรมเนื่องจากความสามารถในการทดแทนวัสดุเสริมแรงสังเคราะห์แบบเดิม ๆ เช่น ไฟเบอร์กลาส ซึ่งมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมสูง เส้นใยธรรมชาติมีความเบา สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ และมีต้นทุนต่ำ จึงตอบโจทย์ความต้องการวัสดุที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและยั่งยืน นอกจากนี้ วัสดุเสริมแรงจากเส้นใยธรรมชาติมักมาพร้อมกับสมบัติทางกลที่เหมาะสม โดยเฉพาะในด้านความแข็งแรงและความทนทาน ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่น่าสนใจสำหรับการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์ ก่อสร้าง และการผลิตบรรจุภัณฑ์ รวมถึงผลิตภัณฑ์ที่ต้องการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ตลอดวงจรชีวิตของวัสดุ [3]

เส้นใยธรรมชาติจำพวกเส้นใยพืชเป็นเส้นใยเซลลูโลส ประกอบด้วย ไมโครไฟบริล (Microfibrils) ซึ่งเป็นส่วนที่มีการจัดเรียงตัวอยู่ในส่วนอสังฐานที่เป็นพอลิกลินิน (Lignin) และเฮมิ-เซลลูโลส (Hemi-cellulose) โดยไมโครไฟบริลเรียงตัวตามความยาวของเส้นใยมุมที่เกิดขึ้นระหว่างการจัดเรียงตัวของ Fibril กับแนวแกนเส้นใย เรียกว่า Microfibrillar Angle ซึ่งลักษณะโครงสร้างภายในเส้นใยเซลลูโลส การเกิดพันธะไฮโดรเจนและการพันกันภายในเส้นใยทำให้เกิดความแข็งแรง (Strength) และความแข็งตึง (Stiffness) ของเส้นใย [4] สมบัติเชิงกลของเส้นใย

ธรรมชาติไม่ได้ขึ้นอยู่กับชนิดของเส้นใยธรรมชาติเท่านั้นสมบัติต่าง ๆ ยังขึ้นอยู่กับปริมาณของเซลลูโลสและปัจจัยอื่น ๆ เช่น จำนวนเซลล์ ขนาดของเซลล์ และขนาดของลูเมน เส้นใยธรรมชาติที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ เส้นใยจากกล้วยน้ำว้า เนื่องจากเมื่อศึกษางานวิจัยของ Khan et al [5] พบว่าเมื่อเปรียบเทียบเส้นใยจากกล้วยน้ำว้ากับเส้นใยจากใบชนิดอื่นซึ่งมีขนาดเดียวกัน เส้นใยกล้วยมีความต้านแรงดึงดีที่สุด การทดสอบทางกลแสดงให้เห็นว่าความต้านทานแรงดึงของเส้นใยนี้ดีกว่าเส้นใยธรรมชาติชนิดอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญ (590 MPa) เมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยป่าน (249 MPa) และเส้นใยชิลล์ (350 MPa) ความแข็งแรงทางกลที่สูงที่สุดเกิดจากการมีระดับการตกผลึกสูงของเส้นใยนี้ (67%) ซึ่งคำนวณจากสเปกตรัม FTIR และจากรูปทรง องค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญของเส้นใยกล้วยประกอบไปด้วย เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และความชื้น โดยองค์ประกอบที่มีสัดส่วนมากที่สุดคือเซลลูโลส [6]

กระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะกลวง (Hollow Articles) มีหลายวิธี เช่น การเป่าขึ้นรูป การฉีดขึ้นรูป การขึ้นรูปแบบหมุนเหวี่ยง เป็นต้น ซึ่งการขึ้นรูปแบบหมุนเหวี่ยงเป็นหนึ่งในวิธีที่นิยม เนื่องจากช่วยให้สามารถผลิตชิ้นงานที่มีลักษณะกลวงได้อย่างมีประสิทธิภาพและความหนาสม่ำเสมอ [7] โดยเฉพาะการผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างลักษณะที่ไม่ซับซ้อนและมีขนาดใหญ่ ซึ่งไม่สามารถทำการผลิตโดยกระบวนการขึ้นรูปแบบอื่นได้ ชิ้นงานที่ผลิตโดยวิธีการหมุนเหวี่ยงมีตั้งแต่ขนาดเล็กจนถึงถึงที่มีขนาดใหญ่ โดยทั่วไปวิธีการขึ้นรูปแบบหมุนเหวี่ยงนิยมใช้ขึ้นรูปพลาสติกในกลุ่มเทอร์โมพลาสติก แต่ก็มีการนำมาประยุกต์ใช้กับการขึ้นรูปเทอร์โมเซตบางชนิดด้วย ซึ่งลักษณะพิเศษของกระบวนการขึ้นรูปชนิดนี้คือ ในขั้นตอนของกระบวนการผลิตไม่มีการใช้ความดันที่สูง (High Pressure) และอัตราเฉือนที่สูง (High Shear Rate) ซึ่งแตกต่างจากเทคนิคการขึ้นรูปอื่น เช่น การฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์และการอัดรีด ทำให้ต้นทุนในการทำแม่พิมพ์และอุปกรณ์อื่น ๆ ของเครื่องขึ้นรูปแบบหมุนเหวี่ยง มีราคาถูก และมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน นอกจากนี้เทคนิคนี้ยังสามารถผลิตชิ้นงานที่มีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าการขึ้นรูปด้วยเทคนิควิธีการอื่นเมื่อใช้พอลิเมอร์ชนิดเดียวกัน [8] สำหรับวัสดุเชิงประกอบที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติ กระบวนการหมุนเหวี่ยงมีข้อดีหลายประการ เช่น ในขณะที่ขึ้นรูปช่วยให้เส้นใยสามารถกระจายตัวได้อย่างทั่วถึงในทุกทิศทางและทำให้วัสดุมีความแข็งแรงในหลายมิติ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อใช้เส้นใยธรรมชาติที่มีโครงสร้างไม่สม่ำเสมอ การกระจายตัวที่ดีจะช่วยเพิ่มสมบัติการรับแรงทำให้โครงสร้างของวัสดุคอมโพสิตมีความแข็งแรงและความทนทานต่อแรงกระทำที่สูงขึ้น และกระบวนการหมุนเหวี่ยงเป็นวิธีที่ไม่ต้องใช้แม่พิมพ์หลายชิ้นเหมือนวิธีอื่น ๆ จึงประหยัดทั้งเวลาและค่าใช้จ่ายในการผลิต [9]

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่า งานวิจัยวัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีนผสมเส้นใยธรรมชาติที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการหมุนเหวี่ยงยังมีอยู่จำนวนน้อย ซึ่งบ่งชี้ถึงโอกาสในการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อเพิ่มความเข้าใจในด้านคุณสมบัติและการปรับปรุงสมบัติของวัสดุเชิงประกอบเหล่านี้ ดังเช่น งานวิจัยของ Srichuangchote et al [10] ซึ่งมุ่งเน้นการศึกษาวัดวัสดุเชิงประกอบที่ขึ้นรูปด้วย

กระบวนการหมუნเหวี่ยงโดยใช้เส้นใยป่านศรนารายณ์ และงานวิจัยของ Deepradit et al [11] ได้ศึกษาสมบัติการทนต่อแรงดึงของวัสดุคอมโพสิตที่เสริมแรงพอลิเอทิลีนด้วยเส้นใยป่านศรนารายณ์โดยขึ้นรูปด้วยกระบวนการหมუნเหวี่ยง อย่างไรก็ตามยังขาดการวิจัยที่เจาะลึกสมบัติการทนต่อแรงกระแทกของวัสดุประเภทนี้และปัจจัยที่ส่งผลต่อการกระจายตัวและการยึดเกาะระหว่างเมทริกซ์พอลิเอทิลีนกับเส้นใยธรรมชาติในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมუნเหวี่ยง ดังนั้น การศึกษาวิจัยเพิ่มเติมเกี่ยวกับสมบัติการทนต่อแรงกระแทกของวัสดุคอมโพสิตพอลิเอทิลีนเสริมเส้นใยป่านศรนารายณ์ที่ผ่านการดัดแปลงผิวด้วยไซเลนและไม่ได้ดัดแปลงผิวจึงเป็นเรื่องจำเป็น ทั้งนี้ การวิจัยนี้จะช่วยให้ทราบถึงวิธีการปรับปรุงการยึดเกาะและความทนทานของวัสดุ อีกทั้งยังมีศักยภาพในการพัฒนาเพื่อใช้งานจริงในอุตสาหกรรมที่ต้องการวัสดุที่มีความแข็งแรงและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการใช้เส้นใยธรรมชาติจากใบป่านศรนารายณ์ในปริมาณที่เหมาะสมเพื่อช่วยเสริมสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เชิงประกอบ โดยการปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยด้วยการเคลือบไซเลน 2% โดยน้ำหนัก เพื่อช่วยเพิ่มการยึดเกาะระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์พอลิเมอร์ ซึ่งช่วยแก้ปัญหาความชอบน้ำและความเป็นขั้วของเส้นใยธรรมชาติกับพอลิเมอร์ที่ไม่ชอบน้ำ นอกจากนี้ การใช้กระบวนการขึ้นรูปแบบหมუნเหวี่ยง ซึ่งเป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับวัสดุเชิงประกอบเสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติ ช่วยให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีการกระจายตัวของเส้นใยที่สม่ำเสมอ งานวิจัยนี้ทดสอบสมบัติการทนต่อแรงกระแทกและสัญญาณวิทยาของวัสดุเชิงประกอบเสริมแรงด้วยเส้นใยจากใบป่านศรนารายณ์ซึ่งขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ด้วยกระบวนการหมუნเหวี่ยง โดยมีวัตถุประสงค์ของการวิจัยเพื่อศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างเส้นใยป่านศรนารายณ์และพอลิเอทิลีนสำหรับการขึ้นรูปด้วยกระบวนการหมუნเหวี่ยง และเพื่อทดสอบสมบัติการทนต่อแรงกระแทกและสัญญาณวิทยาของผลิตภัณฑ์พอลิเอทิลีนผสมที่เสริมแรงด้วยเส้นใยป่านศรนารายณ์

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 การเตรียมเส้นใย

วิธีการเตรียมเส้นใย เส้นใยธรรมชาติที่ใช้ คือ เส้นใยป่านศรนารายณ์ โดยตัดเส้นใยให้อยู่ในรูปของเส้นใยสั้นๆ ให้มีความยาวประมาณ 2 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 1 จากนั้นนำมาทำความสะอาดเส้นใยเบื้องต้น เริ่มจากละลายไซเดียมไฮดรอกไซด์ในน้ำ อัตราส่วนสารละลายต่อเส้นใย คือ 10:1 นำเส้นใยป่านศรนารายณ์มาแช่ในสารละลายไซเดียมและกวนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง เสร็จแล้วจึงนำมาล้างด้วยน้ำกลั่นไปเรื่อย ๆ จนได้ค่า pH ประมาณ 6-7 ตากแดดไว้ให้แห้งเป็นเวลา 2 วัน จากนั้นจึงนำเส้นใยไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อลดความชื้นเนื่องจากเส้นใยธรรมชาติมักมีความชื้นสะสมจากสภาพแวดล้อม หากนำเส้นใยที่มีความชื้นสูงไปใช้โดยตรงในการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบ อาจเกิดปัญหาความไม่เสถียรในโครงสร้าง ความชื้นสามารถ

ส่งผลให้เส้นใยเกิดการหดหรือขยายเมื่อเจอความร้อนและการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ จึงต้องอบเส้นใยเพื่อลดความชื้นให้เหลือน้อยที่สุด และปรับปรุงความเสถียรต่อการเปลี่ยนขนาดของเส้นใย โดยการอบที่อุณหภูมิที่เหมาะสมช่วยปรับสภาพของเส้นใย ลดการเปลี่ยนแปลงของขนาดหรือรูปร่างเมื่อเกิดการขึ้นรูปและช่วยให้เส้นใยคงความสม่ำเสมอและแข็งแรง ซึ่งทำให้วัสดุเชิงประกอบที่ผลิตมีคุณภาพที่ดีขึ้น เรียกขั้นตอนนี้ว่า เส้นใยกากกล้วยที่ไม่ผ่านการดัดแปลงผิว

การเตรียมเส้นใยที่ผ่านการดัดแปลงผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน ตัวประสานที่ใช้คือ สารคู่ควบไวโนลไตรเอทอกซีไซเลน (Vinyltriethoxysilane: VTES) ความเข้มข้น 2% โดยน้ำหนักวิธีการเตรียมเริ่มจากละลายสารคู่ควบไซเลนด้วยน้ำกลั่น ปรับ pH ของสารละลายด้วยกรดอะซิติกให้ได้ pH 3.5 นำเส้นใยกากกล้วยที่ผ่านขั้นตอนการเตรียมเส้นใยแล้ว มาแช่ในสารละลายไซเลน กวนและแช่ในสารละลายไซเลน เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง อัตราส่วนสารละลายไซเลนต่อเส้นใยคือ 10:1 จากนั้นนำเส้นใยไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เรียกขั้นตอนนี้ว่า เส้นใยกากกล้วยที่ผ่านการดัดแปลงผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน

การเตรียมส่วนผสม งานวิจัยนี้ใช้ผงพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) ชื่อทางการค้า M9001 RWP กับเส้นใยกากกล้วยน้ำว่า โดยชั่งน้ำหนักของผง LLDPE และเส้นใยกากกล้วยที่อัตราส่วน 0%, 10%, 20%, 30%, 40% และ 50% โดยน้ำหนัก โดยมีน้ำหนักรวมผง LLDPE และเส้นใยกากกล้วย 800 กรัม จากนั้นนำผง LLDPE และเส้นใยกากกล้วยใส่ในแม่พิมพ์ กวนให้เข้ากันและตรวจสอบว่าผง LLDPE และเส้นใยกากกล้วยกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ โดยไม่มีการกระจุกเป็นกลุ่ม ซึ่งการผสมที่ไม่สม่ำเสมออาจทำให้คอมโพสิตที่ได้มีความแข็งแรงไม่เท่ากันในแต่ละส่วนและมีคุณภาพลดลง



รูปที่ 1 เส้นใยกากกล้วยที่ใช้ในงานวิจัย

2.2 การขึ้นรูปชิ้นงาน

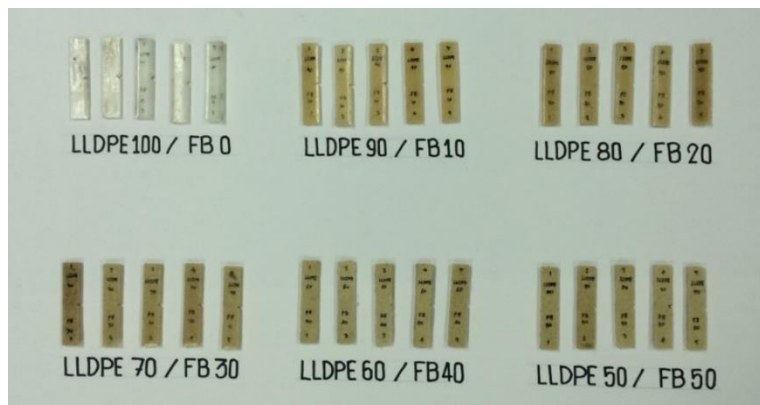
การขึ้นรูป (Forming Testing) นำพอลิเอทิลีนคอมโพสิตที่ได้ไปขึ้นรูปชิ้นงานในแม่พิมพ์รูปทรงลูกบาศก์ ขนาด $200 \times 200 \times 200$ มิลลิเมตร โดยใช้กรรมวิธีการขึ้นรูปด้วยกระบวนการหมุนเหวี่ยงยี่ห้อ BP รุ่น RMM 2012 ดังรูปที่ 2 ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ในการขึ้นรูป 12 นาที ความเร็วในการหมุนของแกนเพลลา 18 รอบต่อนาที [10] ตามอัตราส่วนที่ศึกษา คือ เส้นใย 0, 10, 20, 30, 40, และ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (น้ำหนักรวมของวัตถุดิบเท่ากับ 800 กรัม) ชิ้นงานที่ได้มีลักษณะเป็นรูปทรงลูกบาศก์ ขนาด $200 \times 200 \times 200$ มิลลิเมตร



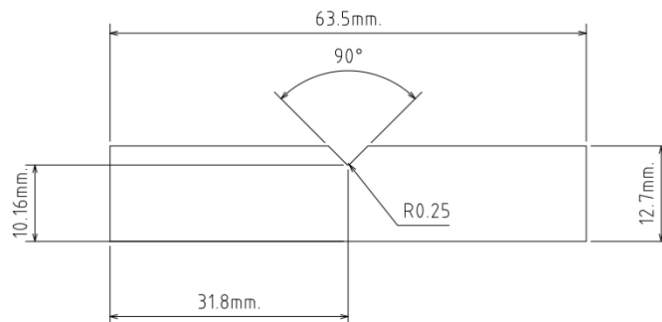
รูปที่ 2 เครื่องหมุนเหวี่ยง ยี่ห้อ BAIPAI รุ่น RMM2012

2.3 การทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทก

ในงานวิจัยนี้ทดสอบสมบัติการทนต่อแรงกระแทกซึ่งบอกถึงความสามารถในการดูดซับพลังงานของวัสดุคอมโพสิตก่อนเกิดการแตกหักเสียหาย แสดงชิ้นงานดังรูปที่ 3 โดยตัดชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยกระบวนการหมุนเหวี่ยง ตามมาตรฐาน ASTM D256-10 จำนวน 5 ชิ้น ด้วยเครื่องจักรกลอัตโนมัติที่ทำงานได้ด้วยระบบคอมพิวเตอร์ (CNC) จึงทำให้ชิ้นงานทุกชิ้นถูกผลิตภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน มีความแม่นยำและมีขนาดใกล้เคียงกัน แสดงดังรูปที่ 4 และทดสอบด้วยเครื่องทดสอบสมบัติการทนต่อแรงกระแทก IZOD type GT-7045-I



รูปที่ 3 ชิ้นงานทดสอบสมบัติการทนต่อแรงกระแทก



รูปที่ 4 มาตรฐานชิ้นงานทดสอบสมบัติการทนต่อแรงกระแทกตามมาตรฐาน ASTM D256-10

ผลการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบสมบัติการทนต่อแรงกระแทก พลังงานที่อ่านได้จาก เข็มหน้าปัดสามารถนำมาคำนวณเป็น Impact Strength ได้จากสูตรสมการ (1)

$$\text{Impact strength} = \frac{\text{Energy (J)}}{\text{Area (m}^2\text{)}} \quad (1)$$

สูตรที่ใช้คำนวณการทดสอบสมบัติการทนต่อแรงกระแทก

$$E = E' - (E_1 + E_2) \quad (2)$$

$$E_1 = L \times (W/2) \times [(\cos \alpha' - \cos \alpha)(\cos \beta' - \cos \beta)] \quad (3)$$

$$E_2 = L \times W \times (\cos \alpha' - \cos \theta) \quad (4)$$

โดยที่ E = พลังงานที่เหลือหลังจากแรงกระแทก (พลังงานที่ไม่ถูกใช้ไปกับการทำให้ชิ้นทดสอบแตกหัก)

E' = พลังงานทั้งหมดเริ่มต้นจากลูกตุ้ม (พลังงานศักย์เริ่มต้นก่อนการปล่อย)

E_1 = พลังงานที่ใช้กับแรงเสียดทานที่จุดหมุนของลูกตุ้ม

E_2 = พลังงานที่ใช้ในการทำลายชิ้นงาน

L = ความยาวของลูกตุ้ม

W = น้ำหนักของลูกตุ้ม

α = มุมของลูกตุ้มก่อนการกระแทก

α' = มุมของลูกตุ้มหลังการกระแทก

β = มุมในแนวตั้งที่สัมพันธ์กับการเคลื่อนที่

β' = มุมสุดท้ายของการเคลื่อนที่ในแนวตั้ง

θ = มุมที่ลูกตุ้มตกลงหลังจากชิ้นงานแตก

2.4 วิเคราะห์สมบัติทางสัณฐานวิทยา (Morphology Analysis)

ชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยกระบวนการหมุนเหวี่ยงถูกนำไปวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิวของวัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีน เพื่อศึกษาถึงการยึดเกาะที่บริเวณอินเทอร์เฟซระหว่างเส้นใยและพอลิเมอร์เมทริกซ์ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) รุ่น SU3500 โดยชิ้นงานที่นำไปส่อง SEM ต้องนำไปแช่ในไตรเจนเหลว ก่อนทำการหักชิ้นงานทดสอบ เพื่อให้การยึดเกาะบริเวณอินเทอร์เฟซระหว่างผิวของเส้นใยและพลาสติกยังคงเดิม โดยมีลักษณะดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 การเตรียมตรวจสอบสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีนผสมเส้นใย

3. ผลการวิจัย

3.1 ผลการทดสอบสมบัติการทนต่อแรงกระแทก

ผลของสมบัติการทนต่อแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบที่ผสมเส้นใยกาบกล้วยที่ไม่ผ่านการดัดแปลงผิว แสดงในตารางที่ 1 และสมบัติการทนต่อแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบที่ผสมเส้นใยกาบกล้วยที่ผ่านการดัดแปลงผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน แสดงในตารางที่ 2 และผลการเปรียบเทียบสมบัติการทนต่อแรงกระแทกของการเติมเส้นใยกาบกล้วย แสดงดังรูปที่ 6

ตารางที่ 1 สมบัติการทนต่อแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีนผสมเส้นใยกาบกล้วยที่ไม่ผ่านการดัดแปลงผิว

อัตราส่วน (%)		การทนต่อแรงกระแทก (kJ/m ²)	
LLDPE	FB	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
100	0	3.96	0.0152
90	10	5.33	0.0045
80	20	4.18	0.0114
70	30	3.74	0.0045
60	40	2.11	0.0084
50	50	1.03	0.0055

จากตารางที่ 1 แสดงผลการทดสอบสมบัติการทนต่อแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีนเสริมแรงด้วยเส้นใยกาบกล้วยที่ไม่ผ่านการดัดแปลงผิว ปริมาณของเส้นใยในวัสดุผสม 0-50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่า วัสดุผสมมีค่าสมบัติการทนต่อแรงกระแทก เท่ากับ 3.96, 5.33, 4.18, 3.74, 2.11, และ 1.03 kJ/m² ตามลำดับ

ผลการทดสอบสมบัติการทนต่อแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีนเสริมแรงด้วยเส้นใยกาบกล้วยที่ผ่านการดัดแปลงผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน แสดงดังตารางที่ 2 ปริมาณของเส้นใยในวัสดุผสม 0-50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่า วัสดุผสมมีสมบัติการทนต่อแรงกระแทก เท่ากับ 3.96, 5.57, 4.87, 3.74, 2.90 และ 1.20 kJ/m² ตามลำดับ เมื่อได้ทำการเปรียบเทียบผลการทดสอบสมบัติการทนต่อแรงกระแทกระหว่างวัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีนเสริมแรงด้วยเส้นใยกาบกล้วยที่ไม่ผ่านการดัดแปลงผิวกับวัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีนเสริมแรงด้วยเส้นใยกาบกล้วยที่ผ่านการดัดแปลงผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนแสดงดังรูปที่ 6

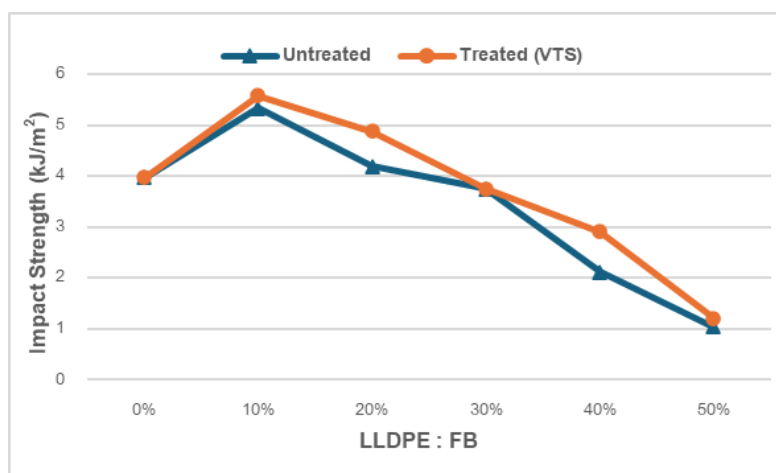
ตารางที่ 2 สมบัติการทนต่อแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีนผสมเส้นใย
กาบกล้วยที่ผ่านการดัดแปลงผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน

อัตราส่วน (%)		การทนต่อแรงกระแทก (kJ/m ²)	
LLDPE	FB+VTS	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
100	0	3.96	0.0000
90	10	5.57	0.0158
80	20	4.87	0.0055
70	30	3.74	0.0084
60	40	2.90	0.0187
50	50	1.20	0.0114

ผลการทดสอบสมบัติการทนต่อแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีนเสริมแรงด้วยเส้นใยกาบกล้วย จากรูปที่ 6 พบว่า วัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีนเสริมแรงด้วยเส้นใยกาบกล้วยที่ไม่ผ่านการดัดแปลงผิว ปริมาณของเส้นใยในวัสดุผสม 0-50 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก มีสมบัติการทนต่อแรงกระแทก เท่ากับ 3.96, 5.33, 4.18, 3.74, 2.11, และ 1.03 kJ/m² ตามลำดับ ในขณะที่วัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีนเสริมแรงด้วยเส้นใยกาบกล้วยที่ผ่านการดัดแปลงผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน ปริมาณของเส้นใยในวัสดุผสม 0-50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีสมบัติการทนต่อแรงกระแทก เท่ากับ 3.96, 5.57, 4.87, 3.74, 2.90 และ 1.20 kJ/m² ตามลำดับ

จากตารางที่ 1 และ 2 การทดสอบสมบัติการทนต่อแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีนเสริมแรงด้วยเส้นใยกาบกล้วยที่ไม่ผ่านการดัดแปลงผิวและผ่านการดัดแปลงผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน จะเห็นได้ว่าเมื่อปริมาณของเส้นใยในวัสดุที่ผสมเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้สมบัติการทนต่อแรงกระแทกลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับพอลิเอทิลีนบริสุทธิ์ (พอลิเอทิลีน 100 เปอร์เซ็นต์) เนื่องจากสมบัติเด่นของพอลิเมอร์ที่มีความเหนียวเป็นอย่างมาก เมื่อทำการเติมเส้นใยที่มีความแข็งแรงเข้าไปทำให้วัสดุที่ผสมมีสมบัติที่เปลี่ยนแปลงไป คือ มีความเปราะ (Brittle) และเมื่อได้รับพลังงานจากการกระแทกสามารถรับหรือดูดกลืนพลังงานได้น้อยลง เมื่อเปรียบเทียบกับสมบัติการทนต่อแรงกระแทกระหว่างวัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีนเสริมแรงด้วยเส้นใยกาบกล้วยที่ไม่ผ่านการดัดแปลงผิวกับวัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีนเสริมแรงด้วยเส้นใยกาบกล้วยที่ผ่านการดัดแปลงผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน พบว่าวัสดุผสมที่ใช้เส้นใยที่ผ่านการดัดแปลงผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนมีสมบัติการทนต่อแรงกระแทกที่สูงกว่าวัสดุผสมที่ใช้เส้นใยที่ไม่ผ่านการดัดแปลงผิวในทุกอัตราส่วน เนื่องจากสารไซเลนทำหน้าที่เป็นสารคู่ควบที่ช่วยเพิ่มการยึดเกาะระหว่างเส้นใยและพอลิเมอร์ผ่านกลไกทางเคมีที่สำคัญ 1) เพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างเส้นใยกับพอลิเมอร์ เส้นใยธรรมชาติส่วนใหญ่

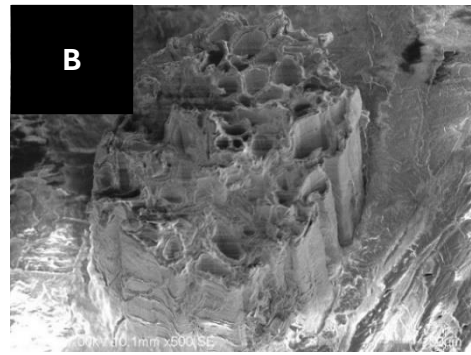
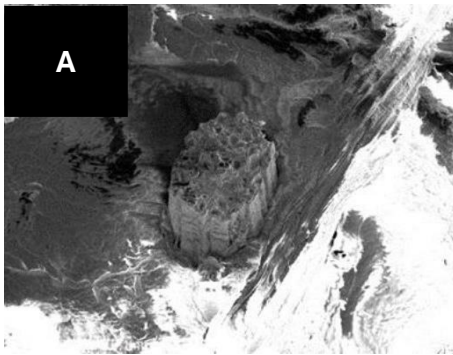
มีคุณสมบัติที่มีขั้วและชอบน้ำ ในขณะที่พอลิเอทิลีนมีคุณสมบัติที่ไม่ชอบน้ำและไม่มีขั้ว ทำให้เกิดการยึดเกาะที่ไม่ดีระหว่างกัน การดัดแปลงผิวด้วยสารไซเลน (เช่น อัลโคซิลาน) สามารถสร้างสะพานเชื่อมที่ช่วยปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์พอลิเมอร์โดยสร้างพันธะไฮโดรเจนหรือพันธะโคเวเลนต์ระหว่างหมู่ซิลานอล (Si-OH) บนเส้นใยกับหมู่พอลิเมอร์ ซึ่งทำให้เกิดการยึดติดที่แน่นหนามากขึ้น 2) เพิ่มการยึดเกาะทางเคมีและความเสถียรของโครงสร้าง เมื่อสารไซเลนทำปฏิกิริยากับน้ำบนพื้นผิวของเส้นใยเกิดการสร้างพันธะซิลอกเซน (Si-O-Si) ซึ่งช่วยเสริมความแข็งแรงของโครงสร้างเส้นใยและลดการหลุดร่อนจากเมทริกซ์พอลิเมอร์ที่มักเกิดในเส้นใยที่ไม่ผ่านการดัดแปลงผิว การยึดเกาะนี้ช่วยให้วัสดุเชิงประกอบสามารถรับแรงกระแทกได้ดีขึ้น เนื่องจากมีความแข็งแรงมากขึ้นจากการเสริมด้วยพันธะทางเคมีที่เสถียร 3) การกระจายแรงที่สม่ำเสมอมากขึ้นด้วยการเชื่อมต่อทางเคมีที่แข็งแรงมากขึ้นระหว่างเส้นใยและพอลิเมอร์ วัสดุเชิงประกอบที่มีเส้นใยผ่านการดัดแปลงผิวด้วยสารไซเลนสามารถกระจายพลังงานจากการกระแทกได้ดีขึ้น ทำให้แรงกระแทกที่ตกกระทบถูกกระจายไปทั่วพื้นที่ ทำให้เกิดความเสถียรในการทนแรงกระแทกที่สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุที่ใช้เส้นใยที่ไม่ผ่านการดัดแปลงผิว [12]



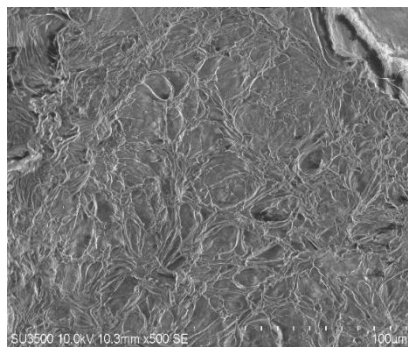
รูปที่ 6 ผลการทดสอบสมบัติการทนต่อแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีนเสริมแรงด้วยเส้นใยกาบกล้วย

3.2 ผลการทดสอบสมบัติทางสัณฐานวิทยา

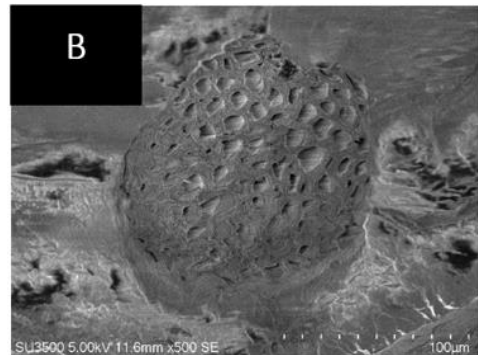
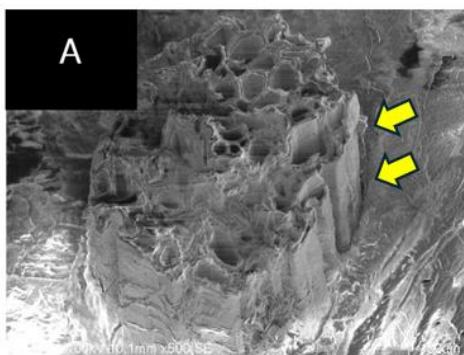
การทดสอบสมบัติทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิว ดำเนินการทดสอบโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เพื่อศึกษาลักษณะการยึดเกาะที่บริเวณอินเทอร์เฟสระหว่างเส้นใยกาบกล้วยและพอลิเอทิลีน ด้วยกำลังขยาย 200 และ 500 แสดงดังรูปที่ 7 ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 8 ถึงรูปที่ 13



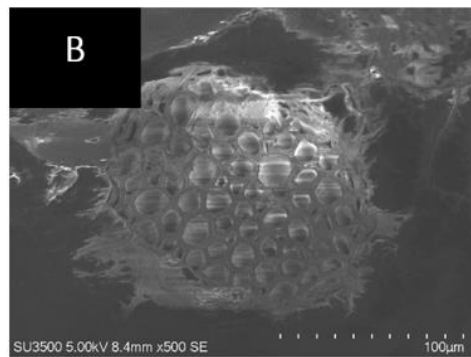
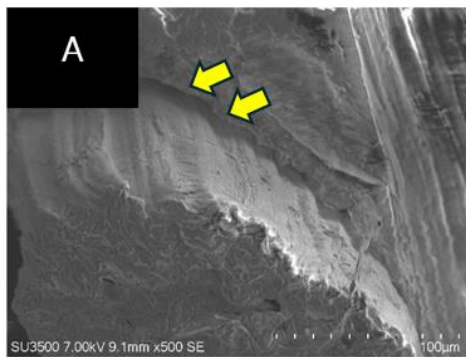
รูปที่ 7 ลักษณะการยึดเกาะที่อินเทอร์เฟสระหว่างพอลิเอทิลีนและเส้นใยคาร์บอนที่ไม่ผ่านการดัดแปลงผิวที่ LLDPE 90 FB 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กำลังขยาย 200 เท่า (A) และกำลังขยาย 500 เท่า (B)



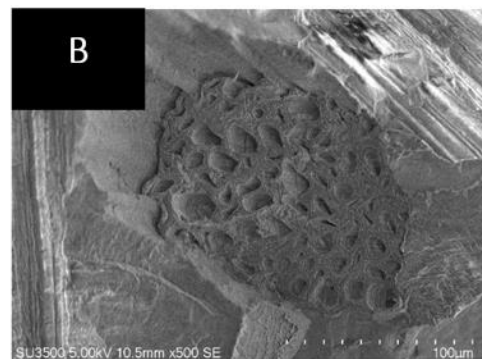
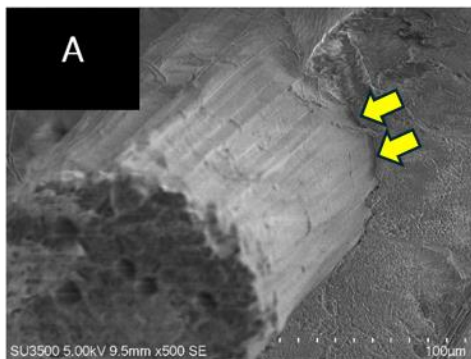
รูปที่ 8 ลักษณะสัณฐานวิทยาของ LLDPE (100%) ที่ไม่เติมเส้นใยคาร์บอน



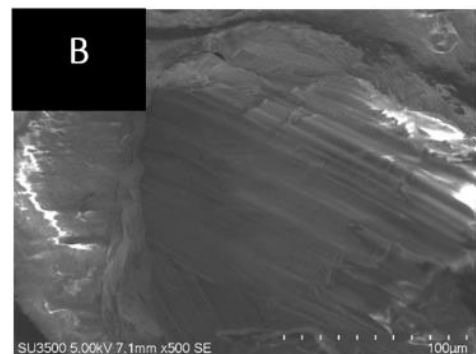
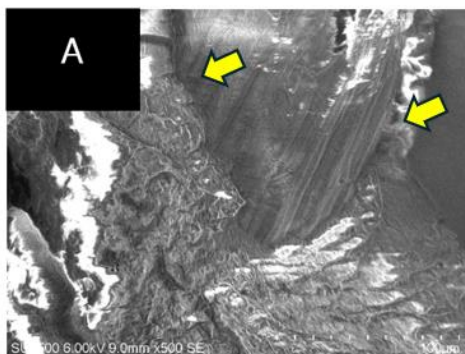
รูปที่ 9 ลักษณะการยึดเกาะที่อินเทอร์เฟสระหว่างพอลิเอทิลีนและเส้นใยคาร์บอนที่ไม่ผ่านการดัดแปลงผิว (A) และเส้นใยที่ผ่านการดัดแปลงผิว (B) LLDPE 90% FB 10% wt



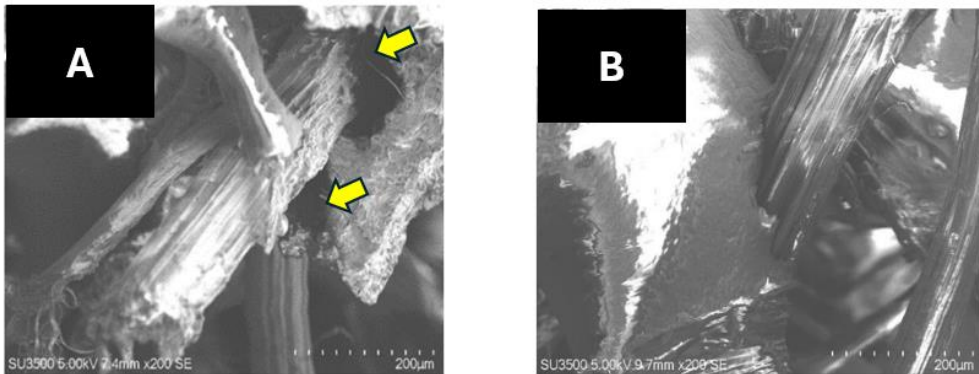
รูปที่ 10 ลักษณะการยึดเกาะที่อินเทอร์เฟซระหว่างพอลิเอทิลีนและเส้นใยกาบกล้วยที่ไม่ผ่านการดัดแปลงผิว (A) และเส้นใยที่ผ่านการดัดแปลงผิว (B) LLDPE 80% FB 20% wt



รูปที่ 11 ลักษณะการยึดเกาะที่อินเทอร์เฟซระหว่างพอลิเอทิลีนและเส้นใยกาบกล้วยที่ไม่ผ่านการดัดแปลงผิว (A) และเส้นใยที่ผ่านการดัดแปลงผิว (B) LLDPE 70% FB 30% wt



รูปที่ 12 ลักษณะการยึดเกาะที่อินเทอร์เฟซระหว่างพอลิเอทิลีนและเส้นใยกาบกล้วยที่ไม่ผ่านการดัดแปลงผิว (A) และเส้นใยที่ผ่านการดัดแปลงผิว (B) LLDPE 60% FB 40% wt



รูปที่ 13 ลักษณะการยึดเกาะที่อินเทอร์เฟซระหว่างพอลิเอทิลีนและเส้นใยคาร์บอนที่ไม่ผ่านการตัดแปลงผิว (A) และเส้นใยที่ผ่านการตัดแปลงผิว (B) LLDPE 50% FB 50% wt

จากการศึกษาลักษณะการยึดเกาะที่อินเทอร์เฟซระหว่างพอลิเอทิลีนและเส้นใยคาร์บอนที่ไม่ผ่านการตัดแปลงผิวและผ่านการตัดแปลงผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงให้เห็นว่าการตัดแปลงผิวเส้นใยด้วยสารคู่ควบไซเลนสามารถช่วยปรับปรุงการยึดติดที่บริเวณผิวระหว่างเส้นใยคาร์บอนและพอลิเอทิลีนให้ดีขึ้นทำให้วัสดุผสมมีสมบัติการทนต่อแรงกระแทกที่เพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับเส้นใยคาร์บอนที่ไม่ผ่านการตัดแปลงผิว

จากการศึกษาวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติจากกากกล้วยด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนเหวี่ยงควรพิจารณาปัจจัยหลายประการที่อาจมีผลต่อกระบวนการขึ้นรูปและสมบัติสุดท้ายของวัสดุ เช่น ความเร็วการหมุนของแม่พิมพ์สามารถส่งผลต่อการกระจายตัวของเส้นใยในวัสดุเชิงประกอบ การหมุนที่เร็วอาจทำให้เกิดการกระจายตัวของเส้นใยที่ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งส่งผลต่อสมบัติทางกล เช่น ความทนทานต่อแรงกระแทก หรือ ความแข็งแรงโดยรวมของวัสดุ เมื่อเส้นใยธรรมชาติเพิ่มขึ้นในพอลิเอทิลีน ความหนืดของวัสดุเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจส่งผลต่อการไหลตัวของวัสดุในระหว่างกระบวนการขึ้นรูป การไหลตัวไม่ดีอาจทำให้วัสดุเกิดการจับตัวไม่สม่ำเสมอและทำให้คุณสมบัติของวัสดุลดลง เช่น ความเหนียวหรือความทนทานต่อแรงกระแทก พื้นผิวติดด้านผนังในและด้านนอกของชิ้นงานหลังจากการขึ้นรูปอาจได้รับผลกระทบจากการหมุนเหวี่ยง ขึ้นอยู่กับความเร็วและรูปทรงของแม่พิมพ์ พื้นผิวที่มีลักษณะไม่สม่ำเสมอหรือมีการยึดติดของสารเติมแต่งในบางส่วนอาจส่งผลต่อสมบัติทางกล เช่น ความทนทานต่อแรงกระแทก และขนาดและรูปทรงของผลิตภัณฑ์หลังจากการขึ้นรูปและการเย็นตัวมีผลต่อสมบัติทางกลของวัสดุ เช่น การบิดตัวหรือการเสียรูป โดยปกติแล้ว ขนาดที่ใหญ่ขึ้นอาจทำให้เกิดการเสียรูปที่มากขึ้นหากไม่ควบคุมการเย็นตัวอย่างเหมาะสม

4. อภิปรายผล

การทดสอบสมบัติการทนต่อแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีนเสริมแรงด้วยเส้นใยกาบกล้วยที่ผ่านการดัดแปลงผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน (Silane Coupling Agent) และไม่ผ่านการดัดแปลงผิวแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงในสมบัติการทนต่อแรงกระแทกที่ชัดเจน โดยที่วัสดุที่ใช้เส้นใยที่ผ่านการดัดแปลงผิวมีสมบัติการทนต่อแรงกระแทกสูงกว่าวัสดุที่ใช้เส้นใยที่ไม่ผ่านการดัดแปลงผิว ผลลัพธ์นี้สอดคล้องกับงานวิจัยที่คล้ายคลึงกันที่ศึกษาเกี่ยวกับการปรับปรุงสมบัติทางกลของวัสดุเชิงประกอบโดยการดัดแปลงผิวของเส้นใยธรรมชาติ เช่น การใช้สารไซเลนเพื่อเพิ่มการยึดเกาะระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์พอลิเอทิลีน [12] การทดสอบ SEM แสดงให้เห็นถึงการหลุดออกของเส้นใยจากเมทริกซ์พอลิเอทิลีนในวัสดุที่ไม่ผ่านการดัดแปลงผิว (ในทุกอัตราส่วนของการเติมเส้นใย) โดยมีช่องว่าง (Voids) ระหว่างเฟส การเปลี่ยนแปลงนี้ทำให้วัสดุเชิงประกอบที่ไม่มีการดัดแปลงผิวมีสมบัติความเหนียวต่ำและเปราะ (Brittle) เมื่อได้รับแรงกระแทก ในขณะที่วัสดุเชิงประกอบที่ผ่านการดัดแปลงผิวด้วยสารไซเลนแสดงการยึดเกาะที่ดีกว่าระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์พอลิเอทิลีน ทำให้วัสดุมีสมบัติการทนต่อแรงกระแทกที่สูงขึ้น เนื่องจากช่องว่างระหว่างเฟสลดลงและสามารถกระจายพลังงานจากการกระแทกได้ดีขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Wang et al [12] ปริมาณเส้นใยในวัสดุเชิงประกอบเมื่อเกิน 20% โดยน้ำหนักยังคงมีผลต่อการยึดเกาะระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์ พอลิเอทิลีน เนื่องจากเส้นใยในปริมาณสูงมีแนวโน้มการรวมกลุ่มกันหรือพันกัน ทำให้การกระจายตัวของเส้นใยในวัสดุไม่สม่ำเสมอ ส่งผลให้ค่าความทนทานต่อแรงกระแทกและแรงดึงลดลง ซึ่งเป็นแนวโน้มที่สอดคล้องกับการศึกษาก่อนหน้านี้ที่แสดงว่าปริมาณเส้นใยสูงทำให้เกิดการรวมกลุ่มและยึดเกาะระหว่างผิวไม่ดี ทำให้สมบัติของวัสดุเปลี่ยนแปลงไป ดังเช่นงานวิจัยของ Dassanayake et al [13]

ความสัมพันธ์ระหว่างผลการทนต่อแรงกระแทกและลักษณะสัญญาณวิทยาของวัสดุเชิงประกอบสามารถอธิบายได้ผ่านการสังเกตจากผลการทดสอบแรงกระแทก (Impact Testing) และภาพ SEM ที่แสดงโครงสร้างของวัสดุ การศึกษาความสัมพันธ์นี้ช่วยให้เห็นว่าโครงสร้างภายในของวัสดุมีผลต่อความสามารถในการดูดซับพลังงานจากการกระแทก การยึดเกาะระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์ ถ้าการยึดเกาะระหว่างเส้นใยธรรมชาติและพอลิเอทิลีนไม่ดี (เช่น เมื่อเส้นใยไม่ได้รับการดัดแปลงผิว) ทำให้เกิดช่องว่างระหว่างเฟสในวัสดุ ซึ่งเป็นพื้นที่ที่ไม่สามารถถ่ายเทแรงหรือพลังงานได้ดี ส่งผลให้วัสดุมีลักษณะเป็นวัสดุที่เปราะและสามารถดูดซับพลังงานได้ไม่ดีจากการกระแทก [14] ในขณะที่เมื่อเส้นใยผ่านการดัดแปลงผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนช่วยลดช่องว่างระหว่างเฟสเหล่านี้และเพิ่มการยึดเกาะทางเคมี ทำให้โครงสร้างภายในวัสดุมีความแข็งแรงขึ้นและสามารถกระจายพลังงานจากการกระแทกได้ดีขึ้น [12] ผลของช่องว่างระหว่างเฟส ผลลัพธ์จาก SEM สามารถแสดงให้เห็นถึงลักษณะของช่องว่างภายในวัสดุ ซึ่งมีผลต่อสมบัติการทนต่อแรงกระแทก หากวัสดุมีช่องว่างระหว่างเฟสมากเกินไป พลังงานจากการกระแทกถูกสูญเสียไปโดย

ไม่สามารถกระจายไปทั่ววัสดุได้ ส่งผลให้วัสดุมีความเปราะมากขึ้น ภาพ SEM ที่แสดงโครงสร้างที่เป็นระเบียบและไม่แสดงช่องว่างระหว่างเฟสมากเกินไปสามารถช่วยอธิบายได้ว่าทำไมวัสดุที่ผ่านการดัดแปลงผิวมีสมบัติการทนต่อแรงกระแทกสูงกว่าวัสดุที่ไม่ผ่านการดัดแปลงผิว [15] และความเสถียรของวัสดุ วัสดุที่มีการยึดเกาะระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์ที่ดีช่วยให้วัสดุมีความเสถียรและทนทานมากขึ้นเมื่อรับแรงกระแทก ทำให้วัสดุสามารถทนต่อการเปลี่ยนรูปได้ดีและดูดซับพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในทางตรงกันข้ามวัสดุที่มีช่องว่างระหว่างเฟสมากจะมีความเปราะมากขึ้นและสามารถดูดซับพลังงานจากการกระแทกได้ไม่ดี [16]

การนำวัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีนเสริมแรงด้วยเส้นใยกาบกล้วยมาใช้ทดแทนวัสดุเชิงประกอบที่ทำจากเส้นใยสังเคราะห์ เช่น เส้นใยแก้ว หรือเส้นใยคาร์บอน ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย โดยเฉพาะค่าความต้านทานแรงกระแทกที่ได้จากวัสดุเชิงประกอบที่มีเส้นใยธรรมชาติในปริมาณต่าง ๆ ตามผลการทดสอบ ถึงแม้ว่าในบางกรณีวัสดุที่เสริมด้วยเส้นใยกาบกล้วยมีค่าความต้านทานแรงกระแทกที่ดี (เช่น 5.34 kJ/m^2 ถึง 5.58 kJ/m^2 เมื่อเส้นใยมีปริมาณ 10%) แต่เมื่อเทียบกับวัสดุที่ทำจากเส้นใยสังเคราะห์เช่น เส้นใยแก้วหรือคาร์บอนซึ่งมักมีความต้านทานแรงกระแทกสูงกว่าในหลายกรณี การทดแทนด้วยวัสดุเส้นใยธรรมชาตินั้นอาจไม่สามารถให้สมบัติที่เทียบเคียงได้ หากพิจารณาจากการใช้งานที่ต้องการความทนทานต่อแรงกระแทกที่สูงมาก สำหรับการทดแทนวัสดุอื่น ๆ เช่น พลาสติกหรือวัสดุเชิงประกอบที่ต้องการความทนทานในระดับกลางถึงต่ำ เช่น ในผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องรับแรงกระแทกสูงมากหรือการใช้งานที่ไม่เสี่ยงต่อการรับแรงกระแทกในระดับสูง วัสดุเส้นใยกาบกล้วยสามารถใช้ทดแทนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ตัวอย่างเช่น อุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนภายในรถยนต์ เฟอ์นเจอร์ หรือวัสดุก่อสร้างที่ต้องการวัสดุที่เบาและทนทาน [17]

5. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

การทดสอบสมบัติการทนต่อแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีนเสริมแรงด้วยเส้นใยกาบกล้วยที่ไม่ผ่านการดัดแปลงผิวและผ่านการดัดแปลงผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน พบว่าที่ปริมาณเส้นใยกาบกล้วยที่ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักมีสมบัติการทนต่อแรงกระแทกสูงสุด เท่ากับ 5.34 kJ/m^2 และ 5.58 kJ/m^2 ตามลำดับ เมื่อปริมาณของเส้นใยในวัสดุที่ผสมเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกลดลงเมื่อเทียบกับพอลิเอทิลีน 100 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากสมบัติเด่นของพอลิเมอร์ที่มีความเหนียวเป็นอย่างมาก เมื่อทำการเติมเส้นใยที่มีความแข็งแรงเข้าไปทำให้วัสดุที่ผสมมีสมบัติที่เปลี่ยนแปลงไป คือ มีความเปราะ

สำหรับการทดสอบสมบัติทางสัณฐานวิทยา การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิววัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีนเสริมแรงด้วยเส้นใยกาบกล้วยที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการหมุนเหวี่ยง

ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงให้เห็นว่าการดัดแปลงผิวของเส้นใยกาบกล้วยด้วยสารคู่ควบไซเลนสามารถช่วยในการปรับปรุงการยึดเกาะที่อินเตอร์เฟสระหว่างเส้นใยกาบกล้วยและพอลิเอทิลีนให้ดีขึ้น การทดสอบสมบัติทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดของวัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีนเสริมแรงด้วยเส้นใยกาบกล้วยที่ไม่ผ่านการดัดแปลงผิวในทุกส่วนผสมพบการหลุดออกจนเกิดเป็นช่องว่างการยึดเกาะระหว่างเส้นใยกาบกล้วยกับเมทริกซ์ของพอลิเอทิลีน ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีนที่ผ่านการดัดแปลงผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนในทุกส่วนผสมมีลักษณะการยึดเกาะระหว่างเส้นใยกาบกล้วยกับเมทริกซ์ของพอลิเอทิลีนได้ดีกว่ามากและมีความสม่ำเสมอกันตลอดแนวอินเทอร์เฟส จะเห็นได้ถึงความปริมาณเส้นใยในวัสดุผสมที่มากกว่า 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ส่งผลต่อการจับตัวการรวมกลุ่มกันและการพันกันของเส้นใยและทำให้ค่าการทนต่อแรงดึง และค่าต่อแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีนลดลง

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรมีการศึกษาวัสดุเชิงประกอบที่ใช้เส้นใยธรรมชาติอื่น ๆ เพื่อเปรียบเทียบสมบัติและประสิทธิภาพกับเส้นใยกาบกล้วย

5.2.2 ควรพัฒนาเทคนิคการผลิตที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น เช่น การปรับปรุงกระบวนการหมุนเหวี่ยง หรือการใช้เทคโนโลยีใหม่ ๆ ในการผลิตวัสดุเชิงประกอบ

5.2.3 ควรมีการทดสอบสมบัติของวัสดุในสภาวะการใช้งานจริง เพื่อประเมินความทนทานและประสิทธิภาพในระยะยาว

5.2.4 ควรนำวัสดุคอมโพสิตที่พัฒนาขึ้นไปใช้ในผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เช่น บรรจุภัณฑ์ หรือวัสดุก่อสร้าง เพื่อเพิ่มมูลค่าและการใช้งาน

5.2.5 ควรมีการวิเคราะห์ต้นทุนและผลประโยชน์ของการใช้วัสดุเชิงประกอบเสริมแรงในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เพื่อสนับสนุนการตัดสินใจในการลงทุน

References

- [1] Kangishwar S, Radhika N, Sheik AA, Chavali A, Hariharan S. A comprehensive review on polymer matrix composites: material selection, fabrication, and application. Polymer Bulletin 2023;80:47-87. doi: 10.1007/s00289-022-04087-4.
- [2] Chairi M, Bahaoui J, Hanafi I, Mata CF, Di BG. Composite materials: A review of polymer and metal matrix composites, their mechanical characterization, and mechanical properties.

- In: Li L, Pereira A, Pereira AL, editors. Next Generation Fiber-Reinforced Composites - New Insights. London, UK: IntechOpen; 2023.
- [3] Kamarudin SH, Mohd Basri MS, Rayung M, Abu F, Ahmad S, Norizan MN, et al. A review on natural fiber reinforced polymer composites (NFRPC) for sustainable industrial applications. *Polymers* 2022;14(17):3698. doi: 10.3390/polym14173698.
- [4] Thomas S, Paul SA, Pothen LA, Deepa B. Natural fibres: structure, properties and applications. In: Kalia S, Kaith BS, Kaur I, editors. Berlin, German: Springer; 2011. p. 3-42.
- [5] Khan MZ, Sarkar MAR, Forhad Ibne Al Imam M, O.Malinen R. Fiber morphology and pulping study of banana pseudo-stem. *International Journal of Fiber and Textile Research* 2013;3(1):31-5.
- [6] Li W, Zhang Y, Li J, Zhou Y, Li R, Zhou W. Characterization of cellulose from banana pseudo-stem by heterogeneous liquefaction. *Carbohydrate Polymers* 2015;132:513-9. doi: 10.1016/j.carbpol.2015.06.066.
- [7] Hanana FE, Rodrigue D, Rotational molding of polymer composites reinforced with natural fibers. *Plastics Engineering* 2015;71(7):28-31.
- [8] Yadav J, Ramkumar P, Parwani A. A comprehensive review to evaluate the consequences of material, additives, and parameterization in rotational molding. *Journal of Polymer Research* 2023;30:231. doi: 10.1007/s10965-023-03591-z.
- [9] Arribasplata-Seguin A, Quispe-Dominguez R, Tupia-Anticona W, Acosta-Sullcahuaman J. Rotational molding parameters of wood-plastic composite materials made of recycled high density polyethylene and wood particles. *Composites Part B: Engineering* 2021; 217:108876. doi: 10.1016/j.compositesb.2021.108876.
- [10] Srichuangchote N, Surin P, Wong-on J. Effect of fiber content and surface treatment on the mechanical properties of sisal fiber composites produced by rotational molding. In: *Proceedings of the 8th National Conference on Industrial Operations Development*; 2017 May 19; Bangkok, Thailand. p.144-9. (In Thai)
- [11] Deepradit S, Srichuangchote N, Kongsomsawang J, Sapphon W, Sara-ud S. A study of tensile properties of reinforced polyethylene composite with banana fibers by rotational molding process. *ARU Journal Science and Technology* 2022;4(2):16-28. (In Thai)
- [12] Wang Q, Chen T, Wang X, Zheng Y, Zheng J, Song G, et al. Recent progress on moisture absorption aging of plant fiber reinforced polymer composites. *Polymers* 2023; 15(20):4121. doi: 10.3390/polym15204121.

- [13] Dassanayake RS, Acharya S, Abidi N. Biopolymer-based materials from polysaccharides: properties, processing, characterization and sorption applications. In: Edebalı S, editor. Advanced Sorption Process Applications. London, UK: IntechOpen; 2019.
- [14] Molla A, Moyeen AA, Mashfiqua Mahmud R, Haque MJ. Plant fiber-reinforced green composite: a review on surface modification, properties, fabrications and applications. Materials Open Research 2024;3:6. doi: 10.12688/materialsopenres.17651.1.
- [15] Athijayamani, A, Thiruchitrabalam M, Natarajan U, Pazhanivel B. Effect of moisture absorption on the mechanical properties of randomly oriented natural fibers/polyester hybrid composite. Materials Science and Engineering A 2009;517(1):344-53.
- [16] Gupta MK, Singh R. PLA-coated sisal fibre-reinforced polyester composite: water absorption, static and dynamic mechanical properties. Journal of Composite Materials 2019;53(1):65-72.
- [17] Akil HM, Santulli C, Sarasini F, Tirillo J, Valente T. Environmental effects on the mechanical behaviour of pultruded jute/glass fibre-reinforced polyester hybrid composites. Composites Science and Technology 2014;94:62-70.

ประวัติผู้เขียนบทความ



ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริประภา ดีประดิษฐ์ สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา เลขที่ 96 ถนนปรีดีพนมยงค์ ตำบลประตูชัย อำเภอพระนครศรีอยุธยา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา 13000 E-mail: d_siraprapha@aru.ac.th
งานวิจัยที่สนใจ: Simulation, Operations Research, Supply Chain Management



นายณัฐพล ศรีช่วงโชติ สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา เลขที่ 96 ถนนปรีดีพนมยงค์ ตำบลประตูชัย อำเภอพระนครศรีอยุธยา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา 13000 E-mail: nutthapol_tech_006@hotmail.com
งานวิจัยที่สนใจ: Polyethylene composite, Natural fiber



นายจักรภพ คงสมแสง สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา เลขที่ 96 ถนนปรีดีพนมยงค์ ตำบลประตูชัย อำเภอพระนครศรีอยุธยา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา 13000 E-mail: jakkaphopdew@gmail.com
งานวิจัยที่สนใจ: Polyethylene composite, Natural fiber



นายวรายุส ทรัพย์พล สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา เลขที่ 96 ถนนปรีดีพนมยงค์ ตำบลประตูชัย อำเภอพระนครศรีอยุธยา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา 13000 E-mail: Earth52231@gmail.com
งานวิจัยที่สนใจ: Polyethylene composite, Natural fiber



นายสุพัฒน์ สารอรรถ สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา เลขที่ 96 ถนนปรีดีพนมยงค์ ตำบลประตูชัย อำเภอพระนครศรีอยุธยา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา E-mail: Warayutsapphon10@gmail.com
งานวิจัยที่สนใจ: Polyethylene composite, Natural fiber

Article History:

Received: September 23, 2024

Revised: December 11, 2024

Accepted: December 16, 2024

การแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดร่วมกับการปล่อย
ก๊าซเรือนกระจกที่มีฟังก์ชันราคาเชื้อเพลิงแบบไม่เรียบด้วยการผสมผสาน
วิธีการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงการจัดและวิธีเชิงแจกแจง

**AN INTEGRATED APPROACH COMBINING COMBINATORIAL
OPTIMIZATION AND EXHAUSTIVE ENUMERATION FOR ECONOMIC
EMISSION DISPATCH WITH NON-SMOOTH COST FUNCTIONS**

จิรพนธ์ ทาแกง¹ วันไชย คำแสน² ทวินันท์ จันทะวัง³ และ เฟลิน จันทรสุยะ⁴

^{1,2,3}อาจารย์, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล

ล้านนา ลำปาง 200 หมู่ 17 ต.พิชัย อ.เมือง จ.ลำปาง 52000,

¹chiraphon@rmutl.ac.th, ²wanchai_kh@rmutl.ac.th, ³Thawinan_ja@rmutl.ac.th

⁴อาจารย์, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล

ล้านนา เชียงราย 99 หมู่ 10 ต.ทรายขาว อ.พาน จ.เชียงราย 57120, jansuya@rmutl.ac.th

Chiraphon Takeang¹, Wanchai Khamsen², Thawinan Janthawang³ and Phlearn Jansuya⁴

^{1,2,3} Lecturer, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna

Lampang, 200 Moo 17, Phichai Sub-District, Mueang District, Lampang 52000, Thailand,

¹chiraphon@rmutl.ac.th, ²wanchai_kh@rmutl.ac.th, ³thawinan_ja65@rmutl.ac.th

⁴Lecturer, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna ChiangRai,

99 Moo 10, Saikhaw Sub-District, Phan District, Chiang Rai 57120, Thailand,

jansuya@rmutl.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการผสมผสานการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงการจัดร่วมกับการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงแจกแจง เพื่อแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดโดยร่วมกับการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่มีฟังก์ชันราคาเชื้อเพลิงเป็นแบบไม่เรียบ มีวิธีการคือ ใช้คำตอบที่ได้จากวิธีการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงการจัด ซึ่งก็คือวิธีการ SA เป็นคำตอบเริ่มต้น จากนั้นกำหนดขอบเขตการค้นหาใหม่รอบ ๆ คำตอบเริ่มต้น และใช้วิธีการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงแจกแจง ซึ่งก็คือBCO ใช้กรณีศึกษาที่ประกอบด้วยระบบที่มีขนาดใหญ่มีเครื่องกำเนิด 40 หน่วย และเป็นระบบที่มีฟังก์ชันราคาเชื้อเพลิงแบบไม่เรียบ ผลที่ได้ถูกนำไปเปรียบเทียบกับ SA และ BCO ในแง่

ของคุณภาพของคำตอบ และความเร็วในการหาคำตอบ ซึ่งวิธีที่นำเสนอให้คุณภาพของคำตอบที่ดีที่สุด และหาคำตอบได้เร็วที่สุด และเพื่อทดสอบประสิทธิภาพ ได้เปรียบเทียบผลกับวิธี GSA และ CFLBO ผลการเปรียบเทียบ วิธีที่นำเสนอให้ผลของคำตอบในแง่ของต้นทุนการผลิตที่ต่ำที่สุด จึงสรุปได้ว่าวิธีการที่นำเสนอนำไปใช้หาคำตอบในปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดที่มีฟังก์ชันราคาเชื้อเพลิงแบบไม่เรียบได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดเชิงการจัด, การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดเชิงแจกแจง, การจ่ายโหลดอย่างประหยัด

ABSTRACT

This research is a combination of finding the optimal solution by combinatorial optimization and exhaustive enumeration methods. To solve the problem of economical load distribution combined with greenhouse gas emissions with a non-smooth function. The method is to use the answer obtained from the optimal arrangement method, which is the SA method, as the initial answer. It then redefines the search boundary around the initial answer and uses the distributional optimal solution, BCO. Use a case study consisting of a large system with 40 generator units with demand 10500 MW and a system with a non-smooth cost function. The results were compared with SA and BCO in terms of the quality of the answers and the speed of convergence to the answers. The proposed method provides the best quality of answers and converge on the answer as quickly as possible. In addition, to test the efficiency, the results were compared with the GSA and CFLBO methods. The results of the comparison of the proposed methods yielded the answer in terms of the lowest production cost. Therefore, it can be concluded that the proposed method can be used to efficiently find solutions to the economical load distribution problem with a non-smooth fuel price function.

KEYWORDS: combinatorial optimization, exhaustive enumeration, economic dispatch

1. บทนำ

ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัด (Economic Dispatch: ED) เป็นปัญหาของการวางแผนการผลิตพลังงานไฟฟ้า โดยวัตถุประสงค์หลักของปัญหา ED คือการใช้ต้นทุนในการผลิตพลังงานไฟฟ้าให้มีค่าต่ำที่สุด โดยจะต้องตอบสนองความต้องการของระบบไฟฟ้า ตลอดจนเงื่อนไขข้อบังคับของระบบ และข้อจำกัดของเครื่องกำเนิดแต่ละตัว โดยเครื่องกำเนิดแต่ละตัวจะมีฟังก์ชันค่าใช้จ่ายราคาเชื้อเพลิงที่แตกต่างกัน ซึ่งส่งผลให้เครื่องกำเนิดแต่ละตัวมีกำลังการผลิต และมีค่าใช้จ่ายจาก

ราคาเชื้อเพลิงที่แตกต่างกัน แม้ว่าจะมีขอบเขตการผลิตที่เท่ากัน ทำให้ปัญหา ED ยังคงเป็นปัญหาหลักที่น่าสนใจสำหรับนักวิจัยจำนวนมากในการค้นหาคำตอบที่ดีกว่าคำตอบเดิมที่มีอยู่

ปัญหา ED คือฟังก์ชันราคาเชื้อเพลิงที่แสดงอยู่ในรูปสมการทางคณิตศาสตร์ ฟังก์ชันราคาเชื้อเพลิงของเครื่องกำเนิดแต่ละตัวจะไม่เหมือนกัน แม้ว่าการผลิตจะเท่ากันก็ตาม โดยพื้นฐานจะถูกแทนด้วยสมการกำลังสอง โดยมีข้อจำกัดในการผลิตของเครื่องกำเนิด และความต้องการพลังงานของระบบไฟฟ้า เป็นข้อบังคับ ในอดีตที่ผ่านมาการแก้ปัญหา ED จะใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์เข้ามาแก้ปัญหา เช่นการทำซ้ำแลมบ์ดา (Lambda iteration) [1] วิธีการ gradient methods [2] วิธี Lagrangian relaxation [3] และวิธี dynamic programs [4] อย่างไรก็ตามวิธีการเหล่านี้ไม่สามารถที่จะหาคำตอบที่ดีที่สุดได้ เมื่อระบบไฟฟ้าเป็นระบบที่ซับซ้อนมากขึ้น และมีขนาดใหญ่ คำตอบที่ได้เป็นเพียงคำตอบเฉพาะถิ่น (local) เท่านั้น ต่อมามีการพัฒนาวิธีการแก้ปัญหา ED ที่สามารถใช้งานได้จริง เป็นเทคนิคที่สามารถให้คำตอบที่ดี ใช้เวลาในการค้นหาคำตอบไม่นาน เทคนิคนี้เรียกว่า เมต้า-ฮิวริสติกส์ (Meta-heuristic techniques) ซึ่งได้รับแรงบันดาลใจมาจากปรากฏการณ์ทางธรรมชาติ โดยวิธีเมต้า-ฮิวริสติกส์นี้ ยังสามารถที่จะแยกออกมาเป็นสองกลุ่ม ตามลักษณะของการค้นหาคำตอบ คือ วิธีการค้นหาเชิงการจัด (combinatorial optimization method) และวิธีการค้นหาเชิงแจกแจง (exhaustive enumeration method) ตัวอย่างวิธีการค้นหาเชิงการจัด เป็นการสุ่มหาคำตอบเริ่มต้น และหาคำตอบใหม่ที่ดีกว่าคำตอบเดิม เช่น จำลองการอบอ่อน (Simulated Annealing: SA) [5-7] วิธีการค้นหาแบบตาบ (Tabu Search: TS) [8, 9] เทคนิควิธีการหาคำตอบแบบแมงช้าง (Ant Lion Method: ALM) [10] และวิธีการค้นหาแบบปลาวาฬ (Whale Optimization Method: WOM) [11] ส่วนวิธีการค้นหาเชิงแจกแจงเป็นการสุ่มหาคำตอบครั้งละหลาย ๆ คำตอบ และเลือกคำตอบที่ดีที่สุด ซึ่งแต่ละวิธีการอาจมีเทคนิคการหาคำตอบหลังจากสุ่มค่าเริ่มต้นแตกต่างกันไป ยกตัวอย่างเช่นวิธีการทางพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA) [12-14] วิธีอนุภาคกลุ่ม (Particle Swarm Optimization: PSO) [15-17] วิธีการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงมด (Ant Colony Optimization: ACO) [18, 19] และวิธีการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงผึ้ง (Bee Colony Optimization: BCO) [20-24] นอกจากนี้ปัจจุบันนี้ยังมีเงื่อนไขของการจ่ายโหลดอย่างประหยัดที่มีความสำคัญในการผลิต นั่นคือการปล่อยก๊าซเรือนกระจกซึ่งมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างมากมีงานวิจัยหลายเรื่องที่พยายามแก้ปัญหาดังกล่าวโดยใช้วิธีเมต้าฮิวริสติกส์ เช่น วิธีแรงบันดาลใจทางชีวภาพ (Bio-Inspired Optimization) [25] วิธีการของคูลอมบ์และกฎของแฟรงคลิน (Coulomb's and Franklin's Law Based Optimization: CFLBO) [26] และวิธีอนุภาคกลุ่มแบบใหม่ (New Particle Swarm Optimization: (NPSO) [27] วิธีการทั้งสองกลุ่มได้รับความนิยมในการนำมาใช้แก้ปัญหา ED ซึ่งวิธีการเหล่านี้สามารถแก้ปัญหาได้ดี ให้คำตอบที่เป็น global คำตอบที่ได้เป็นคำตอบที่ดี และมีคุณภาพ

แต่เนื่องจากเป็นเทคนิคการหาคำตอบที่เริ่มต้นด้วยการสุ่ม โดยวิธีการค้นหาคำตอบเชิงการจัดจะสุ่มค่าขึ้นมาค่าหนึ่ง และหาคำตอบใหม่ใกล้ ๆ ค่าเดิม แต่เป็นคำตอบที่ดีกว่าเดิม มีข้อดีคือมีความเร็วในการค้นหาคำตอบ แต่มักจะมีข้อเสียคือ หากการสุ่มหาคำตอบเริ่มแรกได้คำตอบที่ไม่ดีมีความเป็นไปได้ที่จะทำให้คำตอบที่ได้เป็นเพียงคำตอบที่เป็น local ส่วนวิธีการหาคำตอบเชิงแจกแจง เป็นการสุ่มหาคำตอบครั้งละหลาย ๆ ค่า และนำเอาทุกค่ามาเปรียบเทียบกันเพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุด ข้อดีคือคำตอบที่ได้มักจะเป็นคำตอบที่เป็น global แต่มีข้อเสียคือใช้เวลาในการค้นหาคำตอบนาน และมีลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบที่ค่อนข้างช้า จากข้อดีและข้อเสียของการค้นหาคำตอบเชิงการจัดกับการค้นหาคำตอบเชิงแจกแจง ข้อเสียดังกล่าวสามารถแก้ไขได้ด้วยการผสมผสานวิธีทั้งสอง ในงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีการจำลองการอบอุ่น (SA) ซึ่งเป็นหนึ่งในวิธีการหาคำตอบเชิงการจัด เนื่องจากเป็นวิธีการที่มีความเร็วในการค้นหาคำตอบ แต่เนื่องจากความเร็วในการค้นหาคำตอบ ทำให้คำตอบที่ได้มักติดอยู่ที่คำตอบแบบ local และใช้วิธีการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงผึ้ง (BCO) ซึ่งเป็นวิธีการหาคำตอบเชิงแจกแจง เนื่องจากเป็นวิธีการที่ใช้พารามิเตอร์น้อย และไม่ซับซ้อน แต่ผลของคำตอบอยู่ที่การตั้งค่าประชากรเริ่มต้น หากประชากรเริ่มต้นมีจำนวนน้อย จะทำให้ได้คำตอบที่เป็น local และหากใช้ประชากรเริ่มต้นมาก การลู่เข้าหาคำตอบจะไม่ดี ดังนั้นหากนำเอาข้อดีข้อเสียของทั้งสองวิธีมารวมกัน จะทำให้ได้วิธีการแบบผสมผสาน (Hybrid Method) เพื่อแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดที่มีฟังก์ชันราคาเชื้อเพลิงเป็นแบบไม่เรียบ ซึ่งเป็นการวางแผนการผลิตกำลังไฟฟ้าแบบสแตติกส์ จะมีวิธีการคือใช้วิธีการ SA หาคำตอบ เมื่อได้คำตอบแล้ว คำตอบนั้นจะถูกกำหนดให้เป็นค่าเริ่มต้นแทนการสุ่ม จากนั้นกำหนดขอบเขตใหม่รอบ ๆ คำตอบที่ได้จาก SA และใช้คุณสมบัติที่ดีของวิธี BCO เพื่อค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดภายในขอบเขตการค้นหาที่กำหนดขึ้นมาใหม่ ซึ่งจะทำให้ขอบเขตการค้นหาคำตอบแคบลง เป็นผลให้การลู่เข้าหาคำตอบดีขึ้น และทำให้ได้คำตอบที่เป็น global โดยวิธีที่เสนอ จะนำผลเฉลยที่ดีที่สุดหรือคำตอบที่ดีที่สุดมาคำนวณหาการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของเครื่องกำเนิดแต่ละตัว ผลลัพธ์จากวิธีการที่นำเสนอจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับวิธีการดั้งเดิมคือ SA และ BCO ในแง่ของคุณภาพของคำตอบ และความเร็วในการลู่เข้าหาคำตอบ นอกจากนี้เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีการที่เสนอที่เชื่อมโยงกับผลการวิจัยทั่วโลก จึงทำการเปรียบเทียบกับวิธี ซึ่งได้รับการตีพิมพ์ในวารสารวิชาการในระดับนานาชาติ

2. ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัด

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีการผสมผสานวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดเชิงการจัด (SA) กับวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดเชิงแจกแจง (BCO) เพื่อแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัด ซึ่งเป็นการวางแผนการผลิตแบบสแตติกส์ และมีฟังก์ชันราคาเชื้อเพลิงเป็นแบบไม่เรียบ โดยอยู่ภายใต้เงื่อนไขข้อบังคับต่าง ๆ ของระบบ ที่สำคัญคือฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function) ดังสมการที่ (1)

$$\text{Minimize: } TC = \sum_{i=1}^N F_i(P_i) \quad (1)$$

โดยที่ TC คือ ต้นทุนรวมในการผลิตกำลังไฟฟ้า, I คือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ i , N คือ จำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับระบบทั้งหมด และ $F_i(P_i)$ คือ ต้นทุนของเชื้อเพลิงการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า i

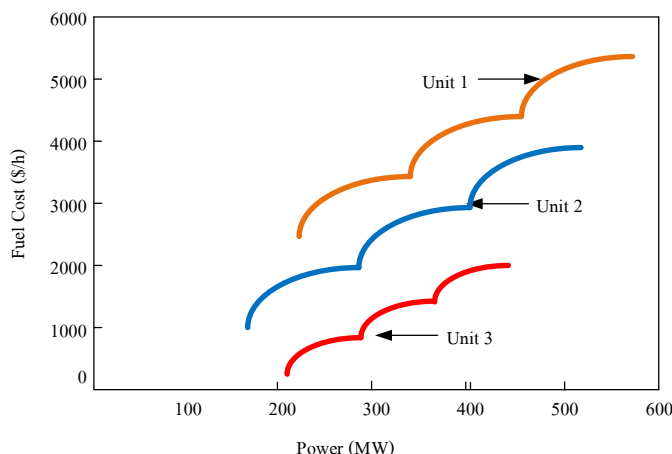
นอกจากนี้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดยังมีเงื่อนไข ข้อบังคับที่สำคัญดังต่อไปนี้

2.1 ฟังก์ชันราคาเชื้อเพลิงของเครื่องกำเนิด

ฟังก์ชันราคาเชื้อเพลิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ เป็นฟังก์ชันราคาเชื้อเพลิงที่เป็นแบบไม่เรียบ (Non-Smooth Cost Function) ลักษณะเด่นคือมีความไม่ต่อเนื่อง เกิดขึ้นเนื่องจากข้อจำกัดบางประการในการปฏิบัติงานจริง เช่น ผลกระทบของจุดวาล์ว (valve-point effects) การเปลี่ยนเชื้อเพลิง (fuel switching) และต้นทุนการเริ่มเดินเครื่อง (start-up costs) ซึ่งทำให้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัด มีความซับซ้อนมากขึ้นและยากต่อการหาผลลัพธ์ที่เหมาะสมที่สุด โดยในการควบคุมวาล์วที่ใช้กับกังหันไอน้ำในโรงไฟฟ้าพลังความร้อน เมื่อมีการเปิดวาล์ว ฟังก์ชันต้นทุนจะแสดงลักษณะเป็นคลื่นหรือฟันเลื่อย เนื่องจากผลกระทบของจุดวาล์ว ซึ่งแสดงออกในรูปของสมการคณิตศาสตร์ที่เป็น Sinusoidal Function ดังสมการที่ (2) และมีลักษณะดังรูปที่ 1

$$F_i(P_i) = a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i + \left| e_i \times \sin \left(f_i \times (P_i^{\min} - P_i) \right) \right| \quad (2)$$

โดยที่ a_i , b_i , c_i , e_i และ f_i คือ สัมประสิทธิ์ราคาเชื้อเพลิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า i



รูปที่ 1 ลักษณะของฟังก์ชันค่าใช้จ่ายแบบไม่เรียบ

2.2 เงื่อนไข ข้อบังคับของเครื่องกำเนิด

ในการแก้ปัญหการจ่ายโหลดอย่างประหยัด ที่สำคัญที่สุดจะต้องคำนึงถึงข้อจำกัดกำลังไฟฟ้าสมดุล และข้อจำกัดพิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.2.1 ข้อจำกัดกำลังไฟฟ้าสมดุลของระบบ (Power Balance Constraint)

คือ อัตราการผลิตพลังงานไฟฟ้ารวมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกตัวต้องมีค่าเท่ากับความต้องการปริมาณไฟฟ้า (Demand) ดังสมการที่ (3) รวมกับกำลังสูญเสียรวมในระบบส่งจ่าย (Power Losses) ดังสมการที่ (4)

$$\sum_{i=1}^N (P_i) = P_D + P_{loss} \quad (3)$$

$$P_{loss} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N P_i B_{ij} P_j + \sum_{j=1}^N B_{0i} P_i + B_{00} \quad (4)$$

โดยที่ P_i คือ กำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า i , P_D คือ กำลังไฟฟ้าที่โหลดต้องการ, P_{loss} คือ กำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง และ B_{ij} , B_{0i} และ B_{00} คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสียของสายส่ง

2.2.2 ข้อจำกัดพิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator Rating Constraint)

เครื่องกำเนิดแต่ละตัวจะมีข้อจำกัดพิกัดการผลิตแตกต่างกัน แม้ว่าจะมีพิกัดกำลังการผลิตเท่ากัน ดังนั้นในการผลิตกำลังไฟฟ้า จะต้องอยู่ในข้อจำกัดพิกัดของเครื่องกำเนิด ดังสมการที่ (5)

$$P_i^{\min} \leq P_i \leq P_i^{\max} \quad (5)$$

2.3 เงื่อนไขการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของเครื่องกำเนิด

การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากเครื่องกำเนิดพลังงานความร้อน เกิดจากกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิง เช่น ถ่านหิน ก๊าซธรรมชาติ หรือน้ำมัน เพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้า เมื่อเชื้อเพลิงถูกเผาไหม้ในเตาเผา จะปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญออกมา มีผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ โดยการปล่อยก๊าซเหล่านี้จะเพิ่มความร้อนในบรรยากาศและส่งผลกระทบต่อภาวะโลกร้อน การปล่อยมลพิษเหล่านี้สามารถแสดงเป็นผลรวมของฟังก์ชันกำลังสองและฟังก์ชันเลขชี้กำลังดังสมการที่ (6)

$$E_i(P_i) = \alpha_i + \beta_i P_i + \gamma_i P_i^2 + \eta_i \exp(\delta_i P_i) \quad (6)$$

โดย α_i , β_i , γ_i , η_i และ δ_i คือ สัมประสิทธิ์การปล่อยมลพิษของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า i

3. การผสมผสานวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดเชิงการจัดและวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดเชิงแจกแจง

ในการผสมผสานกันของวิธีการเชิงการจัดและวิธีการเชิงแจกแจงในงานวิจัยนี้ใช้วิธี SA ผสมผสานกับวิธี BCO โดยได้ทำการเปรียบเทียบในแง่ของคุณภาพของคำตอบ และความเร็วในการลู่เข้าหาคำตอบกับวิธีการ SA และ BCO แบบดั้งเดิม ซึ่งมีวิธีการดังต่อไปนี้

3.1 การจำลองการอบอุ่น

การจำลองการอบอุ่น Simulated Annealing (SA) เป็นวิธีที่ได้รับแรงบันดาลใจจากกระบวนการทำให้โลหะเย็นลงอย่างช้า ๆ ในกระบวนการหลอมโลหะของแข็งจะถูกหลอมที่อุณหภูมิสูงจนกระทั่งโมเลกุลทั้งหมดสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ จากนั้นจึงดำเนินการทำให้เย็นลง SA เป็นวิธี meta-heuristic โดยทั่วไปขั้นตอนวิธีการจำลองการอบอุ่นจะสุ่มเลือกคำตอบที่อยู่ภายใต้เงื่อนไขข้อบังคับของระบบ จากนั้นจะประเมินคุณภาพของคำตอบ และจะตัดสินใจว่าย้ายไปยังคำตอบใหม่ที่ดีกว่าเดิมหรืออยู่กับคำตอบปัจจุบันโดยพิจารณาจากความน่าจะเป็น และเงื่อนไขต่าง ๆ กลไกเพิ่มเติมสำหรับวิธี SA พารามิเตอร์ที่ต้องควบคุม ซึ่งรวมถึงอุณหภูมิเริ่มต้น อุณหภูมิสุดท้าย การลดอุณหภูมิและการทำซ้ำในแต่ละอุณหภูมิซึ่งอธิบายไว้ดังต่อไปนี้

3.1.1 อุณหภูมิเริ่มต้น

จะต้องตั้งค่าอุณหภูมิเริ่มให้เหมาะสมเพื่อเพิ่มโอกาสในการสุ่มคำตอบเริ่มแรกที่ดี หากตั้งอุณหภูมิเริ่มต้นสูงเกินไป จะทำให้การลู่เข้าหาคำตอบช้าลงเนื่องจากกระบวนการในการสุ่มที่ทำให้พื้นที่ในการสุ่มหาคำตอบกว้างมากขึ้น และในทางกลับกันหากตั้งอุณหภูมิเริ่มต้นต่ำเกินไปจะทำให้ได้คำตอบที่ติดอยู่ใน local ซึ่งไม่มีวิธีการเฉพาะในการค้นหาอุณหภูมิเริ่มต้นที่เหมาะสมกับแต่ละปัญหา ปกติจะตั้งอุณหภูมิเริ่มต้นไว้สูงพอที่จะยอมรับคำตอบที่เลวร้ายที่สุด แต่ยังคงอยู่ในขอบเขตเงื่อนไข ข้อบังคับ จากนั้นจึงค่อย ๆ ลดอุณหภูมิลง

3.1.2 อุณหภูมิต่ำสุด

ในระหว่างการหาคำตอบของวิธี SA ปกติจะปล่อยให้อุณหภูมิลดลงจนถึงศูนย์องศา แต่อย่างไรก็ตามขึ้นอยู่กับเกณฑ์การหยุดทำงาน ซึ่งอาจหยุดทำงานที่อุณหภูมิต่ำกว่า หรือจุดที่สูงกว่า เมื่อได้คำตอบที่เหมาะสม หรือเมื่อระบบแข็งตัว

3.1.3 การลดอุณหภูมิ

เมื่อตั้งอุณหภูมิเริ่มต้น และอุณหภูมิสุดท้ายแล้วจำเป็นต้องหาวิธีเปลี่ยนจากอุณหภูมิเริ่มต้นเป็นอุณหภูมิสุดท้าย วิธีที่อุณหภูมิลดลงมีความสำคัญมากต่อความสำเร็จของวิธีการ SA ในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการลดอุณหภูมิแบบลูกโซ่มาร์คอฟ (Markov Chain) เนื่องจากการลดอุณหภูมิแบบเร็ว ซึ่งในงานวิจัยนี้ต้องการความเร็วในการคำตอบ ดังสมการที่ (7)

$$T(k) = \frac{T(0)}{\log(1+k)}, k = 1, 2, \dots \quad (7)$$

โดยที่ k คือ จำนวนรอบที่กำลังทำซ้ำ

$T(k)$ คือ อุณหภูมิในจำนวนรอบที่ k

$T(0)$ คือ ค่าอุณหภูมิเริ่มต้น

$T(0)$ เป็นค่าอุณหภูมิเริ่มต้น ควรมีค่าบวกและมากเพียงพอ วิธีการ SA รับประกันว่าจะเข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงกว้างด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ $f(x)$ เมื่อ $k \rightarrow \infty$ หรือในรูปแบบการลดอุณหภูมิอย่างง่าย ๆ ดังเช่นสมการที่ (8)

$$T(k) = \alpha T(k-1) \quad (8)$$

โดยที่ α คือค่าคงที่มีค่าน้อยกว่า 1 ซึ่ง α เรียกว่าการลดอุณหภูมิแบบเลขชี้กำลัง (Exponential Cooling Scheme หรือ ECS) นำเสนอครั้งแรกด้วยการใช้ค่า $\alpha = 0.95$ ในงานวิจัยนี้ได้ทดลองปรับค่าตั้งแต่ 0.8 จนถึง 0.99 และเลือกค่าที่ 0.89 เนื่องจากได้ทดสอบจนเป็นค่าที่เหมาะสม

3.1.4 การทำซ้ำในแต่ละอุณหภูมิที่ลดลง

การปรับจำนวนการทำซ้ำของวิธีการ SA ให้เหมาะสมเป็นสิ่งสำคัญมาก การใช้การวนซ้ำของแต่ละอุณหภูมิที่ลดลงจะทำให้การหาคำตอบเป็นไปอย่างรวดเร็วซึ่งจะต้องสอดคล้องกับความเร็วในการลดลงของอุณหภูมิด้วยซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้การลดอุณหภูมิแบบเชิงเส้น (Linear Cooling Scheme หรือ LCS) กำหนดการลดค่าอุณหภูมิดังสมการ (9)

$$T(k) = T(k-1) - T' \quad (9)$$

โดยที่ T' เป็นค่าอุณหภูมิที่ลดลงไปในช่วงจำนวนการวนรอบที่กำหนด

3.2 การหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงผึ้ง

หลักการเบื้องต้นของวิธีฝูงผึ้ง เป็นวิธีการค้นหาค่าที่เหมาะสมที่เลียนแบบพฤติกรรม การหาน้ำหวานของผึ้ง ซึ่งมีผึ้งเป็นตัวดำเนินการ โดยแบ่งชนิดของผึ้งออกเป็น 2 ประเภท คือ ผึ้ง สอดแนม (Scout Bee) และ ผึ้งงาน (Employee Bee) เพื่อค้นหาคำตอบ สมมุติให้คำตอบที่ต้องการ คือ แหล่งน้ำหวาน หน้าที่ของผึ้งสอดแนม คือ ค้นหาแหล่งน้ำหวานในขอบเขตของคำตอบที่เป็นไปได้ (Search Space) เมื่อผึ้งสอดแนม ค้นหาคำตอบได้ ก็จะบินกลับมาที่รังผึ้ง เพื่อสื่อสารกับ ผึ้งตัวอื่น ๆ ภายในรังผึ้ง การสื่อสารของผึ้งจะใช้วิธีการเด่นลักษณะต่าง ๆ เพื่อบอกปริมาณ น้ำหวาน ทิศทางของแหล่งน้ำหวาน จากนั้น ผึ้งงานก็จะไปทำหน้าที่ขโมยน้ำหวานในแหล่งน้ำหวาน โดยจำนวนผึ้งงานจะแปรตามปริมาณแหล่งน้ำหวาน และระยะทาง ข้อดีของวิธีการนี้ คือ มี โครงสร้างที่ง่าย และสามารถหาคำตอบได้ดี ขั้นตอนการดำเนินงานของวิธีฝูงผึ้งนี้ จะต้องมีการกำหนดค่าของพารามิเตอร์ที่สำคัญได้แก่

n คือ จำนวนของผึ้งสอดแนม (Number of Scout Bee)

m คือ จำนวนแหล่งน้ำหวานที่มีการเลือกแล้วจากทั้งหมด จากการหาของผึ้งสอดแนม n ตัว

e คือ จำนวนแหล่งน้ำหวานที่มีปริมาณน้ำหวานมากที่สุด จากที่เลือกแล้ว m แหล่ง

n_{ep} คือ จำนวนผึ้งงานที่กำหนดให้ไปหาที่แหล่งน้ำหวาน e แหล่ง

n_{sp} คือ จำนวนผึ้งงานที่กำหนดให้ไปหาที่แหล่งน้ำหวาน $m-e$ แหล่ง

ระเบียบวิธีฝูงผึ้งมีรายละเอียดแต่ละขั้นตอนดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดค่าพารามิเตอร์ให้กับวิธีการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงผึ้ง

ขั้นตอนที่ 2 ให้ผึ้งสอดแนมจำนวน n ตัว ค้นหาคำตอบเริ่มต้น ซึ่งคำตอบเหล่านี้ต้องเป็น คำตอบที่เป็นไปได้ นั่นคือ อยู่ภายในขอบเขตที่กำหนด และสอดคล้องกับเงื่อนไข

ขั้นตอนที่ 3 ประเมินผลของคำตอบที่ได้จากการค้นหาของผึ้งสอดแนม พร้อมทั้งจัดเรียงลำดับ จากคำตอบที่มีคุณภาพดีที่สุดไปหาคำตอบที่มีคุณภาพต่ำที่สุด

ขั้นตอนที่ 4 เลือกคำตอบที่มีผลการประเมินที่ดี m คำตอบ

ขั้นตอนที่ 5 คัดแยกคำตอบ e คำตอบนี้ ออกเป็น 2 กลุ่ม โดยที่กลุ่มแรกมีคำตอบที่ดีที่สุด e คำตอบ และกลุ่มที่ 2 มีคำตอบที่ด้อยลงมา $m-e$ คำตอบ

ขั้นตอนที่ 6 ให้ผึ้งงานจำนวน n_{ep} ตัว ค้นหาคำตอบรอบ ๆ e คำตอบ และผึ้งงานจำนวน n_{sp} ตัว ค้นหาคำตอบรอบ ๆ $m-e$ คำตอบ

ขั้นตอนที่ 7 ประเมินผลของคำตอบที่ได้จากการค้นหาของผึ้งงานในแต่ละแหล่ง และเลือกคำตอบที่ดีที่สุดของแต่ละแหล่ง

ขั้นตอนที่ 8 ตรวจสอบเงื่อนไขการหยุด ถ้าตรงตามเงื่อนไข ให้หยุดการค้นหา ถ้าไม่ให้เพิ่มจำนวนรอบของการทำซ้ำ แล้วไปดำเนินในขั้นตอนที่ 2

3.3 การผสมผสานวิธี SA กับวิธี BCO เพื่อแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดที่มีฟังก์ชันราคาเชิงพหุแบบไม่เรียบ

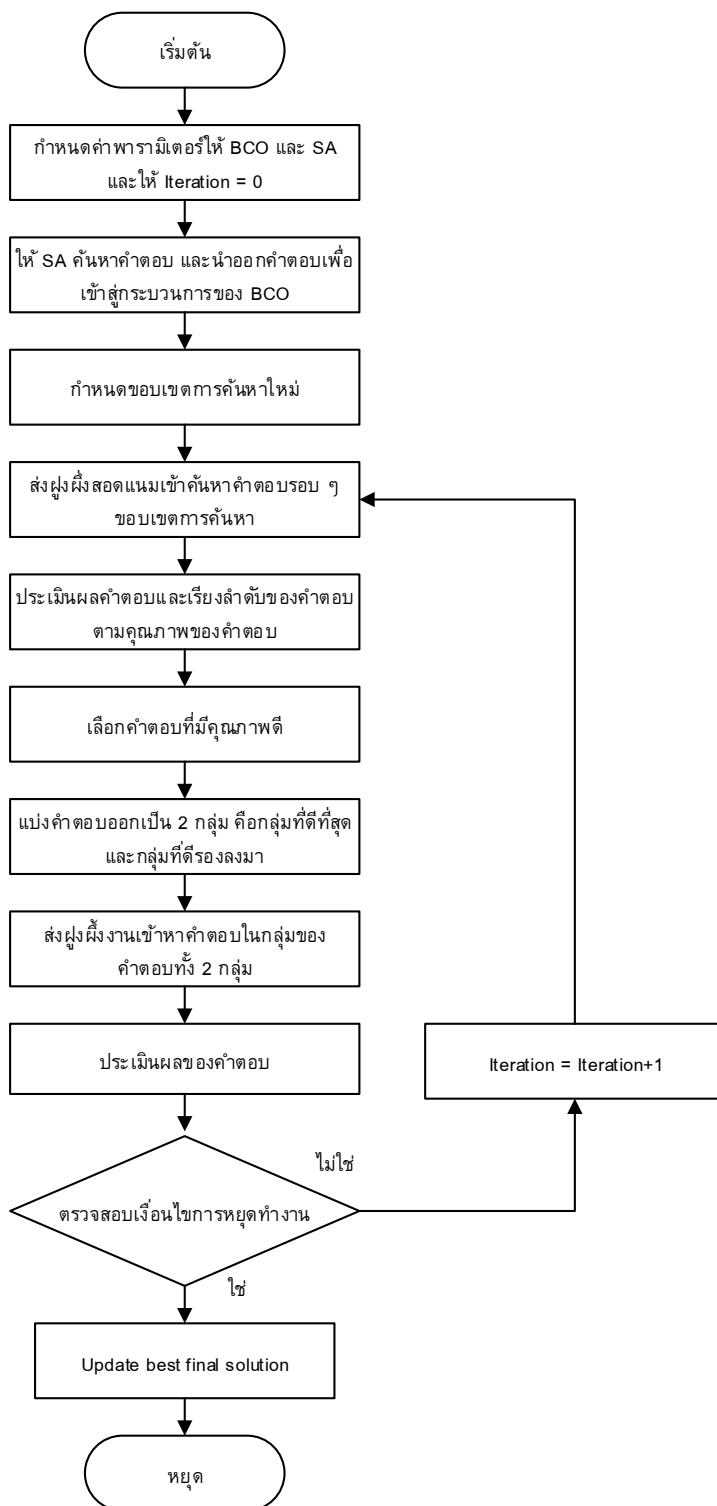
SA มีคุณสมบัติเด่นในการหลีกเลี่ยงการติดอยู่ในคำตอบเฉพาะถิ่น ในขณะที่วิธี BCO มีจุดเด่นในการปรับปรุงคำตอบในพื้นที่ที่กำหนดได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเน้นที่การทำงานแบบร่วมมือระหว่างผึ้งสอดแนม และผึ้งงาน การเลือกใช้ SA และ BCO มาจากความสามารถที่ต่างกัน ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ให้เหมาะสมกับปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัด ที่มีฟังก์ชันเชิงพหุแบบไม่เรียบได้อย่างมีประสิทธิภาพ วิธีที่นำเสนอนี้มีข้อดีกว่าวิธีการอื่นหลายประการ เช่น ประสิทธิภาพในการหลีกเลี่ยงคำตอบเฉพาะถิ่น การปรับปรุงคำตอบในระดับลึก ลดเวลาในการค้นหาคำตอบ โดยในการผสมผสานวิธีการ SA เข้ากับวิธีการ BCO เป็นการค้นหาคำตอบสำหรับปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดที่มีฟังก์ชันราคาเชิงพหุแบบไม่เรียบนั้น ในเบื้องต้นเป็นการนำเอาวิธี SA เข้าไปเป็นโปรแกรมฟังก์ชันของวิธี BCO โดยมีลำดับขั้นตอนการทำงานดังรูปที่ 2

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดค่าพารามิเตอร์ให้กับวิธีการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงผึ้งดังตารางที่ 1 และสำหรับวิธีการ SA ดังตารางที่ 2

ขั้นตอนที่ 2 ให้วิธีการ SA ค้นหาคำตอบในรอบแรก โดยใช้คุณสมบัติการหาคำตอบของวิธีการ SA เพื่อนำผลของคำตอบไปเป็นค่าเริ่มต้น

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์สำหรับวิธี BCO

Parameters	Number
Population size (n)	20
Selected sites (m)	10
Best sites (e)	5
Bees around best sites (n_{ep})	50
Bees around other sites (n_{sp})	50



รูปที่ 2 แผนผังการทำงานของวิธีการที่นำเสนอ

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์สำหรับวิธี SA

Parameters	Number
Initial temperature	100
Final temperature	5
Cool shed	0.89
Maximum number of tries	1000
Maximum number of successes within	50

จากตารางที่ 1 จำนวนประชากร Population size = 20 เป็นค่าที่สมดุลระหว่าง การสำรวจ พื้นที่คำตอบ (exploration) และ เวลาในการคำนวณ หากมากเกินไปจะเพิ่มเวลาในการคำนวณ หากน้อยเกินไปจะลดความสามารถในการค้นหาคำตอบ

Selected sites คือจำนวนคำตอบที่ดีที่สุดที่ถูกเลือกเพื่อสำรวจในรอบถัดไป เป็นการควบคุมว่าฝูงงานจะเลือกสำรวจบริเวณที่มีศักยภาพในการปรับปรุงคำตอบมากที่สุดกี่จุด การเลือก Selected sites = 10 ช่วยให้เกิดความสมดุลระหว่างการสำรวจ และการปรับปรุง โดยยังสามารถครอบคลุมพื้นที่คำตอบได้ในวงกว้าง

Best sites คือจำนวนจุดที่ดีที่สุด ใน Selected sites ซึ่งจะควบคุมการปรับปรุงในพื้นที่ที่มีโอกาสสูงที่สุดในการได้คำตอบที่ดีกว่า การเลือก เลือก Best sites = 5 เพื่อให้ฝูงผึ้งสามารถทุ่มทรัพยากรไปที่จุดที่มีโอกาสให้คำตอบที่ดีที่สุด โดยยังเหลือพื้นที่สำหรับการสำรวจในจุดอื่น

Bees around best sites จำนวนฝูงผึ้งที่ทำการสำรวจเชิงลึกในพื้นที่รอบ Best sites การเลือก Bees around best sites = 50 เพื่อเพิ่มโอกาสในการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดในพื้นที่ที่มีศักยภาพมากที่สุด

Bees around other sites จำนวนฝูงผึ้งที่สำรวจพื้นที่รอบ ๆ จุดอื่น ๆ ที่ถูกเลือก การตั้งค่า Bees around other sites ให้เท่ากับ Bees around best sites เพื่อให้เกิดการสำรวจในจุดที่เหลืออย่างเพียงพอ โดยไม่ละเลยจุดอื่น ๆ ที่อาจนำไปสู่คำตอบที่ดีกว่าในรอบถัดไป

การตั้งค่าพารามิเตอร์สำหรับ BCO ในครั้งนี้เกิดจากการพิจารณาลักษณะของปัญหาและการปรับแต่งจากการทดลองหลายร้อยครั้ง เพื่อให้มั่นใจว่าค่าที่เลือกช่วยสร้างสมดุลระหว่าง ประสิทธิภาพและความแม่นยำ

จากตารางที่ 2 Initial temperature คืออุณหภูมิเริ่มต้น อุณหภูมิเริ่มต้นที่สูงนี้ถูกตั้งขึ้นเพื่อให้กระบวนการของ SA สามารถสำรวจคำตอบที่หลากหลายได้ในช่วงแรกโดยไม่จำกัดตัวเลือก ค่าที่สูงนี้ช่วยให้ SA สามารถหลุดจาก local optimum ได้ในช่วงเริ่มต้น ซึ่งทำให้สามารถสำรวจพื้นที่การค้นหาที่กว้างขึ้นในระยะแรก

Final temperature อุณหภูมิสุดท้ายถูกตั้งไว้ที่ 5 องศาเพื่อให้การค้นหามีความละเอียดในระยะสุดท้าย ขณะที่ลดอุณหภูมิไปจนถึงระดับต่ำสุด ในงานวิจัยนี้ได้ทดลองปรับค่าอุณหภูมิสุดท้ายให้ต่ำตั้งแต่ 1-5 องศาซึ่งปรากฏว่า ในช่วงอุณหภูมินี้ให้คำตอบที่ดีที่สุดใกล้เคียงกัน แต่เวลาในการค้นหาคำตอบนั้นค่อนข้างต่างกันมาก โดยพบว่ายิ่งตั้งอุณหภูมิสุดท้ายไว้ต่ำจะยิ่งใช้เวลาในการค้นหาคำตอบนาน

Cooling Rate ที่ 0.89 หมายถึงอุณหภูมิจะลดลง 11% ในแต่ละขั้นตอน ค่า cooling rate ที่สูงจะทำให้การลดอุณหภูมิช้าลง ซึ่งช่วยให้กระบวนการค้นหามีเวลาเพียงพอในการสำรวจพื้นที่ที่หลากหลาย โดยเฉพาะในช่วงแรก โดยได้ทำการปรับตั้งแต่ 0.80-0.99 ค่า cooling rate ที่ 0.89 ถือว่าเหมาะสมสำหรับการหาคำตอบในการแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดที่มีฟังก์ชันราคาเชื้อเพลิงแบบไม่เรียบก่อนจะเริ่มลดการสำรวจและมุ่งไปที่การปรับปรุงในพื้นที่ใกล้เคียง

Maximum Number of Tries เป็นจำนวนครั้งสูงสุดที่อัลกอริทึมสามารถเปลี่ยนแปลงคำตอบในหนึ่งรอบ การตั้งค่า maximum number of tries ที่ 1000 ช่วยให้กระบวนการค้นหามีโอกาสหลาย ๆ ครั้งในการสำรวจพื้นที่การค้นหทั้งหมด โดยไม่ทำให้การคำนวณใช้เวลานานเกินไป ทำให้ได้ผลลัพธ์ที่มีความแม่นยำ โดยยังคงสามารถควบคุมเวลาในการคำนวณ

Maximum Number of Successes within เป็นจำนวนความสำเร็จสูงสุดที่สามารถเกิดขึ้นในหนึ่งรอบก่อนที่จะหยุดกระบวนการ หากมีการการยอมรับการเปลี่ยนแปลงที่ดีขึ้นเกิดขึ้น 50 ครั้งภายในหนึ่งรอบ การคำนวณจะหยุดก่อนที่จะใช้เวลานานเกินไป จำนวนนี้ทำหน้าที่ในการควบคุมว่าอัลกอริทึมจะหยุดหรือไม่ โดยอิงจากจำนวนความสำเร็จที่เกิดขึ้น ภายในข้อจำกัดเวลาที่ตั้งไว้

ขั้นตอนที่ 3 ดึงค่า $P_{i(SA)}$ ที่ได้จากวิธี SA เป็นนำมาใช้เป็นคำตอบเริ่มต้น เมื่อ $P_{i(SA)}$ คือค่ากำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดแต่ละตัวที่ได้จากวิธี SA

ขั้นตอนที่ 4 กำหนดขอบเขตการค้นหาคำตอบใหม่ ซึ่งจะให้ได้ค่ากำลังไฟฟ้าต่ำสุด และกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเครื่องกำเนิดแต่ละตัวใหม่ ดังสมการที่ (10) และ (11)

$$P_i^{\max(\text{new})} = P_{i(SA)} + (P_{i(SA)} \times \text{rank}) \quad (10)$$

$$P_i^{\min(\text{new})} = P_{i(SA)} - (P_{i(SA)} \times \text{rank}) \quad (11)$$

เมื่อ rank คือตัวคูณเพื่อใช้เป็นตัวกำหนดให้ขอบเขตพื้นที่การค้นหาลดลงหรือเพิ่มขึ้น มีค่ามากกว่า 0 และน้อยกว่า 1

ขั้นตอนที่ 5 ให้ฝั่งสอดแนมจำนวน n ตัว ค้นหาคำตอบเริ่มต้นภายในขอบเขตพื้นที่ที่ถูกกำหนดขึ้นมาใหม่ ด้วยสมการที่ (12) ซึ่งจะมีช่วงของการค้นหาแคบลงมาก

$$P_i = P_i^{\min(\text{new})} + ((P_i^{\max(\text{new})} - P_i^{\min(\text{new})}) \times \text{rand}(0,1)) \quad (12)$$

เมื่อถึงขั้นตอนนี้ขั้นตอนการดำเนินงานจะกลับไปขั้นตอนการดำเนินงานของวิธีฝูงผึ้งในหัวข้อ 3.2 ขั้นตอนที่ 2 จนถึงขั้นตอนที่ 8 และถ้าคำตอบไม่เป็นไปตามเงื่อนไขกำหนดก็จะย้อนกลับมาในขั้นตอนที่ 5 ของวิธีการผสมผสานที่นำเสนอ

4. ผลการทดสอบ

วิธีการผสมผสาน (Hybrid method) ที่นำเสนอ ได้รับการทดสอบเพื่อประเมินประสิทธิภาพด้วยปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัด ในสองกรณีศึกษาที่มีฟังก์ชันราคาเชื้อเพลิงเป็นแบบไม่เรียบ ระบบที่พิจารณาประกอบด้วยหน่วยผลิตไฟฟ้าจำนวน 40 หน่วย ซึ่งสามารถให้พลังงานรวมที่มีความต้องการโหลด 10500 MW ในระบบทดสอบนี้ พิจารณาผลกระทบจากการโหลดที่จุตวาล์ว นอกจากนี้ โดยไม่คิดการสูญเสียในสายส่งกำลังไฟฟ้า และพิจารณาอัตราการปล่อยก๊าซเรือนกระจก โดยแบ่งการเปรียบเทียบผลเป็น 2 กรณี กรณีที่ 1 ใช้วิธี SA และ BCO แบบดั้งเดิมในการเปรียบเทียบและประเมินประสิทธิภาพของแต่ละวิธีกับวิธีการที่นำเสนอ จะเปรียบเทียบในแง่ของคุณภาพของคำตอบ และความเร็วในการหาคำตอบ ซึ่งวิธีการทั้งหมดจะดำเนินการในช่วงเวลาเดียวกัน ด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์เครื่องเดียวกัน กรณีที่ 2 วิธีการที่นำเสนอจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับวิธีที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่เป็นบทความวิจัยระดับนานาชาติ เพื่อประเมินประสิทธิภาพของวิธีการที่นำเสนอ โดยวิธีที่นำมาเปรียบเทียบมีคุณลักษณะของเครื่องกำเนิด พารามิเตอร์ของระบบ และเงื่อนไขข้อบังคับเหมือนกันทั้งหมด

4.1 ผลการทดสอบ และเปรียบเทียบ

ระบบทดสอบสำหรับงานที่นำเสนอ ประกอบด้วยเครื่องกำเนิด 40 หน่วย ที่ความต้องการของระบบ 10,500 MW เป็นระบบที่มีลักษณะต้นทุนแบบไม่ราบเรียบ และคิดอัตราการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ไม่คิดความสูญเสียในสายส่ง คุณลักษณะของเครื่องกำเนิดแต่ละตัวดัง [26] โดยการเปรียบเทียบผลในงานวิจัยนี้ ได้ทำการเปรียบเทียบกับวิธี CFLBO และวิธี Gravitational Search Algorithm: GSA ทั้งสองวิธีมักถูกนำมาใช้แก้ปัญหาที่มีความซับซ้อน ทำให้ถูกนำมาใช้ในการแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดที่มีฟังก์ชันราคาเชื้อเพลิงที่ไม่ราบเรียบ โดยเฉพาะวิธี CFLBO เป็นแนวคิดที่น่าสนใจ และเป็นนวัตกรรมใหม่ที่ถูกนำมาใช้ในการแก้ปัญหานี้ การเปรียบเทียบวิธีผสมผสานที่นำเสนอกับวิธี CFLBO และ GSA เนื่องจากทั้งสองวิธีนี้ได้รับการยอมรับว่ามีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาฟังก์ชันต้นทุนแบบไม่ต่อเนื่อง และเหมาะสมกับลักษณะของปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัด ซึ่งมี Valve-point Effects และข้อจำกัดที่ซับซ้อน

นอกจากนี้ การเปรียบเทียบกับวิธีดั้งเดิม อาจไม่ได้แสดงถึงจุดเด่นของวิธีผสมผสานที่น่าเสนออย่างเต็มที่ เนื่องจากวิธีดั้งเดิมเหล่านั้นอาจมีข้อจำกัดในด้านการจัดการฟังก์ชันต้นทุนแบบไม่ต่อเนื่อง ผลการเปรียบเทียบดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการเปรียบเทียบกับวิธี SA, BCO, GSA [28] และ CFLBO [26]

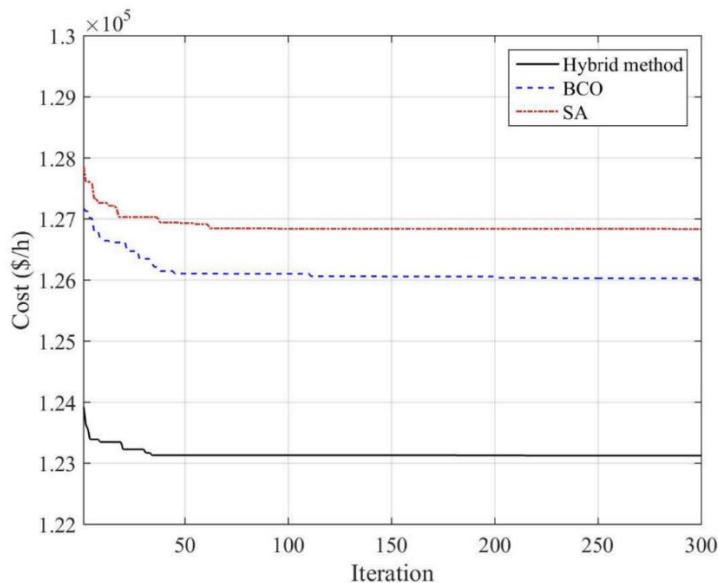
Unit	SA	BCO	GSA	CFLBO	Hybrid method
P_1 (MW)	112.6638	113.8608	113.9989	110.4068	113.9302
P_2 (MW)	112.0271	113.9505	113.9896	113.4505	113.9169
P_3 (MW)	90.5274	118.2157	119.9995	108.4061	92.0030
P_4 (MW)	178.5957	180.9283	179.7857	177.7379	177.5020
P_5 (MW)	93.7829	96.9003	97.0000	88.3691	96.9867
P_6 (MW)	134.6855	137.3831	139.0128	121.9143	239.9631
P_7 (MW)	289.1011	298.9043	299.9885	285.3091	299.7903
P_8 (MW)	291.3122	299.7165	300.0000	299.3117	283.5355
P_9 (MW)	295.1700	288.2939	296.2025	289.0739	299.7623
P_{10} (MW)	130.3227	130.8089	130.3850	130.0000	130.0927
P_{11} (MW)	319.1238	140.2398	245.4775	240.4698	318.1252
P_{12} (MW)	233.1609	143.1103	318.2101	243.3303	241.6763
P_{13} (MW)	379.8767	390.2516	394.6257	395.5716	391.9489
P_{14} (MW)	387.7647	385.1233	395.2016	395.2566	394.5924
P_{15} (MW)	386.9074	388.4389	306.0014	394.2189	394.2358
P_{16} (MW)	389.7757	385.0000	395.1005	396.0000	394.3498
P_{17} (MW)	496.3630	417.6393	489.2569	447.4039	490.8084
P_{18} (MW)	498.4421	512.6025	488.7598	495.1025	484.0925
P_{19} (MW)	438.4017	514.0314	499.2320	478.8628	423.7259
P_{20} (MW)	512.2324	473.4005	455.2821	424.4995	507.7054
P_{21} (MW)	445.2992	469.4305	433.4520	499.9355	438.6248
P_{22} (MW)	421.8027	505.1345	433.8125	512.4599	433.9239

ตารางที่ 3 ผลการเปรียบเทียบกับวิธี SA, BCO, GSA [28] และ CFLBO [26] (ต่อ)

Unit	SA	BCO	GSA	CFLBO	Hybrid method
P_{23} (MW)	446.2070	500.9483	445.5136	500.6126	434.1913
P_{24} (MW)	436.4232	525.2841	452.0547	456.7811	446.4250
P_{25} (MW)	458.8028	440.4011	492.8864	440.8122	436.9798
P_{26} (MW)	453.1461	466.0732	433.3695	438.6621	433.7342
P_{27} (MW)	10.6757	10.0085	10.0026	10.9679	10.2157
P_{28} (MW)	11.3398	10.0043	10.0246	10.4538	11.1558
P_{29} (MW)	10.2961	10.0138	10.0125	10.4108	10.2489
P_{30} (MW)	96.0320	96.7902	96.9125	89.5072	96.9058
P_{31} (MW)	185.7889	189.3333	189.9689	183.3655	189.9895
P_{32} (MW)	180.9851	188.3923	175.0000	183.0703	189.8184
P_{33} (MW)	189.7550	188.0397	189.0181	173.0104	189.8180
P_{34} (MW)	198.4082	199.9584	200.0000	199.7548	199.8031
P_{35} (MW)	192.1324	199.0090	200.0000	199.4690	199.8970
P_{36} (MW)	198.0056	199.1051	199.9978	199.3909	199.8120
P_{37} (MW)	105.7192	106.8353	109.9969	105.0895	109.9315
P_{38} (MW)	109.2942	106.0028	109.0126	96.2228	109.9323
P_{39} (MW)	105.3740	106.1313	109.4560	96.33841	109.9688
P_{40} (MW)	474.4860	454.4314	421.9987	458.0239	459.9023
P_T (MW)	10500	10500	10500	10500	10500
F_T (\$/h)	126744.0379	126092.01	125782	125404.06	123181
Emission (Ton/h)	223993.1887	271472.4855	210932.9	229799.4	215355.5128

ตารางที่ 3 แสดงให้เห็นว่า Hybrid method มีความสามารถในการค้นหาจุดที่เหมาะสมในพื้นที่การค้นหามากกว่าเมื่อเทียบกับวิธี SA และวิธี BCO วิธีแบบ Hybrid method ให้ต้นทุนการผลิตที่ต่ำที่สุดอยู่ที่ 123181 \$/h ซึ่งให้ผลลัพธ์ของคำตอบในแง่ของต้นทุนการผลิตที่ดีเมื่อเทียบกับผลลัพธ์

อื่น ๆ ในตาราง อย่างไรก็ตาม วิธีที่นำเสนอได้ให้ค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกอยู่ที่ 215355.5128 Ton/h ซึ่งยังมีค่าสูงกว่าวิธี GSA เล็กน้อย แต่ต้นทุนการผลิตรวมยังต่ำกว่ามาก ในรูปที่ 3 วิธีการของ SA ลู่เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมตั้งแต่การทำซ้ำประมาณ 60 ครั้งเป็นต้นไป BCO ลู่เข้าหาคำตอบที่การทำซ้ำประมาณ 120 ครั้งเป็นต้นไปในขณะที่ Hybrid method ลู่เข้าหาคำตอบด้วยการทำซ้ำน้อยกว่า 30 ครั้ง จะเห็นได้ว่า Hybrid method มีความเร็วในการลู่เข้าที่เร็วที่สุด



รูปที่ 3 ลักษณะการลู่เข้าหาคำตอบ

5. สรุป

การแก้ปัญหาค่าตอบที่หาได้โดยง่ายด้วยเทคนิคของการใช้วิธีการเชิงการจัดร่วมกับวิธีเชิงแจกแจง เป็นเทคนิคการค้นหาคำตอบที่นำเอาลักษณะเด่นของแต่ละวิธีมารวมกันเพื่อเสริมข้อเด่น และกำจัดข้อด้อย โดยวิธีเชิงการจัดผู้วิจัยได้ใช้วิธี SA ซึ่งเป็นวิธีที่ลู่เข้าหาคำตอบได้อย่างรวดเร็ว แต่คุณภาพของคำตอบยังไม่ดี และวิธีเชิงแจกแจงผู้วิจัยได้ใช้วิธี BCO ซึ่งลู่เข้าหาคำตอบได้ช้า แต่ให้คุณภาพของคำตอบที่ดีกว่า SA เทคนิควิธีคือ ให้วิธี SA หาคำตอบที่ดีที่สุดของมา โดยเขียนโปรแกรมให้วิธี SA เป็นฟังก์ชันใน M-File ใช้คำตอบที่ได้จากวิธี SA เป็นค่าเริ่มต้นในการค้นหาคำตอบ จากนั้นกำหนดช่วงในการค้นหาคำตอบรอบ ๆ คำตอบเริ่มต้นให้เกิดค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดใหม่ ยังผลให้ขอบเขตในการค้นหาคำตอบแคบลง และเนื่องมาจากการค้นหาคำตอบโดยวิธีการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงผึ้งนั้น เป็นการค้นหาคำตอบแบบสุ่ม ความกว้างของค่าที่จะต้องทำการสุ่มนั้นจะลดลงอย่างมาก อีกทั้งค่าเริ่มต้นที่ได้มาจากวิธี SA เป็นค่าที่เป็นไป

ตามเงื่อนไขของเครื่องกำเนิดแต่ละตัวอยู่แล้ว ยิ่งทำให้เกิดความเร็วในการค้นหาคำตอบมากขึ้น ซึ่งคำตอบที่ได้มีโอกาสที่จะเป็นคำตอบเฉพาะถิ่น (Local) น้อยมาก ในการค้นหารอบต่อไป จะเป็นการใช้คุณสมบัติของวิธีการ BCO ในการค้นหาคำตอบ ซึ่งจะเป็นการค้นหาคำตอบที่ทำให้การลู่เข้าหาคำตอบเป็นไปอย่างรวดเร็ว ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบกับระบบขนาดใหญ่ที่ประกอบด้วยเครื่องกำเนิด 40 หน่วยที่มีความซับซ้อนของระบบคือเป็นฟังก์ชันราคาเชื้อเพลิงแบบไม่เรียบ และคำนวณค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกรวมจะเครื่องกำเนิดแต่ละตัว เปรียบเทียบการลู่เข้าหาคำตอบกับวิธี SA และ BCO แบบดั้งเดิม ซึ่งจะเห็นได้ว่าวิธีที่นำเสนอแนะนั้นสามารถลู่เข้าหาคำตอบได้อย่างรวดเร็ว ลู่เข้าหาคำตอบที่ประมาณน้อยกว่า 30 Iteration และในแง่ของต้นทุนการผลิตรวมเมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบระหว่างวิธี SA และ BCO วิธีที่นำเสนอแนะให้ผลลัพธ์ของคำตอบที่ดีกว่า และมีค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับสองวิธีแบบดั้งเดิม และเพื่อเป็นการทดสอบประสิทธิภาพของวิธีการที่นำเสนอแนะ ผู้วิจัยได้ทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์ของคำตอบกับวิธี GSA และ CFLBO จะเห็นได้ว่าวิธีการที่นำเสนอแนะนี้ ให้ค่าของคำตอบที่ดีกว่า ในแง่ของต้นทุนการผลิตรวม แต่ค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกยังมีค่าสูงกว่าวิธี GSA เล็กน้อย อันเนื่องมาจากการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยไม่ได้นำค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมาเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในการวิจัยนี้ยังคงเป็นต้นทุนการผลิตรวมตามสมการที่ 1 ซึ่งเป็นงานที่ผู้วิจัยจะดำเนินการต่อไปในเรื่องเกี่ยวกับ Multi-Objective Function จากการทดสอบวิธีที่นำเสนอแนะมีโอกาสได้ค่าที่เหมาะสมมากกว่าเดิม ค่าที่ได้นี้เป็นที่ยอมรับได้ และมีคำตอบที่ดีกว่า ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการวางแผนการผลิตกำลังงานไฟฟ้าในโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพได้

References

- [1] Wood AJ, Wollenberg BF. Power generation operation and control. New York, USA: Wiley; 1984.
- [2] Chang Y, Chan T, Lee W. Economic dispatch of chiller plant by gradient method for saving energy. Applied Energy 2010;87(4):1096-101.
- [3] El-Keib AA, Ma H, Hart JL. Environmentally constrained economic dispatch using the LaGrangian relaxation method. IEEE Transactions Power Systems 1994;9(4):1723-9.
- [4] Ringlee RJ, Williams DD. Economic dispatch operation considering valve throttling losses, II-distribution of system loads by the method of dynamic programming. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems 1963:615-20.
- [5] Venkatesh M, Raghu R. Economic load dispatch using simulated annealing algorithm. International Research Journal of Engineering and Technology 2015;2(3):1961-4.

- [6] Ziane I, Benhamida F, Graa A. Simulated annealing algorithm for combined economic and emission power dispatch using max/max price penalty factor. *Neural Computing and Applications* 2017;28:197-205.
- [7] Bouddou R, Benhamida F, Haba M, Belgacem M, Meziane MA. Simulated annealing algorithm for dynamic economic dispatch problem in the electricity market incorporating wind energy. *Ingénierie des Systèmes d'Information* 2020;25(6):719-27.
- [8] Naama B, Bouzeboudja H, Allali A. Solving the economic dispatch problem by using tabu search algorithm. *Energy Procedia* 2013;36:694-701.
- [9] Kumar VJ. Optimization of economic load dispatch problem by using tabu search algorithm. *International Journal of Latest Trends in Engineering and Technology* 2017;8(4-1):182-7.
- [10] Daniel L, Chaturvedi KT. Economic load dispatch using ant lion optimization. *International Journal of Engineering Trends and Technology* 2019;67(4):81-4.
- [11] Nazari-Heris M, Mehdinejad M, Mohammadi-Ivatloo B, Babamalek-Gharehpetian G. Combined heat and power economic dispatch problem solution by implementation of whale optimization method. *Neural Computing Applications* 2019;31:421-36.
- [12] Okozi SO, Ogbonna GC, Olubiwe M, Ezugwu EO. Solution to the economic dispatch problem of the Nigerian power system using genetic algorithm. *Nigerian Journal of Technology* 2019;38(4):1036-47.
- [13] Pulluri H, Vyshnavi M, Shraddha P, Sai Priya B, Hari TS, Preeti. Genetic algorithm with multi-parent crossover solution for economic dispatch with valve point loading effects. In: Saini HS, Srinivas T, Vinod Kumar DM, Chandragupta Mauryan KS, editors. *Innovations in Electrical and Electronics Engineering*. Singapore: Springer; 2020. p. 429-38.
- [14] Kalakova A, Nunna HSVSK, Jamwal PK, Doolla S. A novel genetic algorithm based dynamic economic dispatch with short-term load forecasting. *IEEE Transactions on Industry Applications* 2020;57(3):2972-82.
- [15] Chen X, Li K, Xu B, Yang Z. Biogeography-based learning particle swarm optimization for combined heat and power economic dispatch problem. *Knowledge-Based Systems* 2020;208:106463.
- [16] Khan NH, Wang Y, Tian D, Raja MAZ, Jamal R, Muhammad Y. Design of fractional particle swarm optimization gravitational search algorithm for optimal reactive power dispatch problems. *IEEE Access* 2020;8:146785-806.

- [17] Paramguru J, Kumar Barik S, Kumar Barisal A, Dhiman G, HJ Rutvij, Alkahtani M, et al. Addressing economic dispatch problem with multiple fuels using oscillatory particle swarm optimization. Computers, Materials and Continua 2021;69(3):2863-82.
- [18] Suresh V, Janik P, Jasinski M. Metaheuristic approach to optimal power flow using mixed integer distributed ant colony optimization. Archives of Electrical Engineering 2020;69(2):335-48.
- [19] Godha NR, Bapat VN, Korachagaon I. Ant colony optimization technique for integrating renewable DG in distribution system with techno-economic objectives. Evolving Systems 2022;13:485-98.
- [20] Tung NS, Chakravorty S. Solution to economic power dispatch planning problem considering generator constraints using artificial bee colony algorithm. International Journal of Hybrid Information Technology 2016;9(5):399-406.
- [21] Raghav RS, Amudhave J, Dhavachelvan P. Enhanced artificial bee colony optimization for solving economic load dispatch. IIOAB Journal 2018;8(2):208-16.
- [22] Aurasopon A, Khamsen W. An improved local search involving bee colony optimization using lambda iteration combined with a golden section search method to solve an economic dispatch problem. Przegląd Elektrotechniczny 2019;95(1):202-8.
- [23] Aurasopon A, Takeang C. Hybrid algorithm combining lambda iteration and bee colony optimization to solve an economic dispatch problem with prohibited operating zones. Przegląd Elektrotechniczny 2019;95(10):12-7.
- [24] Aurasopon A, Takeang C. Multiple hybrid of lambda iteration and bee colony optimization method for solving economic dispatch problem. International Journal Electrical Engineering and Informations 2021;13(1):57-72.
- [25] Tahir MW, Abbas G, Ilyas MA, Ullah N, Muyeen SM. Economic emission and energy scheduling for renewable rich network using bio-inspired optimization. IEEE Access.2022;10:79713-29.
- [26] Suman M, Sakthivel VP. Coulomb's and Franklin's law based optimization for nonconvex economic and emission dispatch problems. International Energy Journal 2020;20:225-38.

- [27] Singh N, Chakrabarti T, Chakrabarti P, Margala M, Gumta A, Phani Praveen S, et al. Novel heuristic optimization technique to solve economic load dispatch and economic emission load dispatch problems. *Electronics* 2023;12(13):2921.
- [28] Guvenc U, Sonmez Y, Duman S, Yorukeren N. Combined economic and emission dispatch solution using gravitational search algorithm. *Scientia Iranica* 2012;19(6):1754-62.

ประวัติผู้เขียนบทความ



ผศ.ดร.จิรพนธ์ ทาแกง อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ลำปาง เลขที่ 200 หมู่ 17 ต.พิชัย อ.เมือง จ.ลำปาง 52000 โทรศัพท์ 054342547 โทรสาร 054342549 โทรศัพท์มือถือ 0863697901 E-mail: chiraphon@rmutl.ac.th

งานวิจัยที่สนใจ: ระบบไฟฟ้ากำลัง (Power System) การจ่ายโหลดอย่างประหยัด (Economic Dispatch) พลังงานแสงอาทิตย์ (Solar energy)



รศ.ดร.วันไชย คำเสน อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ลำปาง เลขที่ 200 หมู่ 17 ต.พิชัย อ.เมือง จ.ลำปาง 52000 โทรศัพท์ 054342547 โทรสาร 054 342549 E-mail: wanchai_kh@rmutl.ac.th

งานวิจัยที่สนใจ: อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Power Electronic) การจ่ายโหลดอย่างประหยัด (Economic Dispatch)



นางสาวทวิพันธ์ จันทะวัง อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ลำปาง เลขที่ 200 หมู่ 17 ต.พิชัย อ.เมือง จ.ลำปาง 52000 โทรศัพท์ 0650013720 E-mail: Thawinan_jan@rmutl.ac.th

งานวิจัยที่สนใจ: Meta-Heuristics ในระบบไฟฟ้ากำลัง การจ่ายโหลดอย่างประหยัด (Economic Dispatch)



อาจารย์เฟลิน จันทรสุยะ อาจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย
เลขที่ 99 หมู่ 10 ต.ทรายขาว อ.พาน จ.เชียงราย 57120 โทรศัพท์
053723979 E-mail: jansuya@rmutl.ac.th
งานวิจัยที่สนใจ: พลังงานทดแทน การส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย ระบบไฟฟ้า
กำลัง การจ่ายโหลดอย่างประหยัด (Economic Dispatch)

Article History:

Received: October 7, 2024

Revised: December 1, 2024

Accepted: December 16, 2024

DISCRETE PARTICLE SWARM OPTIMIZATION ALGORITHM BASED ON INFORMATION SHARING MECHANISM

Qinghe Xu¹, Noppadol Amdee^{2*} and Adisak Sangsongfa³

¹Student, Faculty of Industrial Technology, Muban Chom Bueng Rajabhat University,
46 Moo 3, Chombueng District, Ratchaburi 70150, Thailand,
64a951005@mcru.ac.th

^{2,3}Lecturers, Faculty of Industrial Technology, Muban Chom Bueng Rajabhat University,
46 Moo 3, Chombueng District, Ratchaburi 70150, Thailand,
²noppadolamd@mcru.ac.th, ³adisaksan@mcru.ac.th

** Corresponding author*

ABSTRACT

To better solve NP-complete problems, this paper proposes a Discrete Particle Swarm Optimization algorithm based on an Information Sharing Mechanism (ISM-DPSO). The algorithm uses a mechanism of sharing the pheromone of the ant colony algorithm to update particles; the particle swarm threshold function application is initialized. At the same time, to enhance the algorithm's global search ability, a particle swarm is initialized at a certain probability, and on this basis, using a nonlinear dynamic adjusting pheromone persistent rate strategy to guide the information memory. The proposed algorithm is applied to the knapsack problem with single constraints and the vehicle cargo loading problem with multiple constraints, and the optimization results are compared with the basic discrete particle swarm optimization algorithm (DPSO). The experimental results show that the ISM-DPSO algorithm outperforms the DPSO algorithm in terms of both the optimal value and the algorithm's fitted value, and the search results are superior to those of the DPSO algorithm.

KEYWORDS: Information sharing mechanisms, Pheromone persistence, Discrete particle swarm optimization, Knapsack problems, Cargo dispensing

1. Introduction

In 1997, Kennedy and Eberhart proposed a discrete binary particle swarm algorithm [1] based on the basic particle swarm algorithm [2] to solve combinatorial optimization problems.

This opened a research boom in improving and applying discrete particle swarm algorithms. Zhang et al [3] proposed a multi-particle swarm cooperative optimization to solve the complex coalition generation problem. Lin et al [4] applied a discrete particle swarm algorithm to data center network traffic scheduling research to achieve good results. Xu et al [5] used a discrete binary particle swarm algorithm based on the Pareto criterion to solve the multi-objective optimization problem of distribution network reconfiguration. Liu et al [6] used a hybrid discrete particle algorithm to optimize the Steiner minimum tree construction problem.

From numerous use cases, the study of discrete particle swarm algorithms is often aimed at optimizing NP-complete problems [7]. The 0-1 knapsack problem is a very classical class of combinatorial optimization NP-complete problems, and the study of this problem is of great importance both in theory and in practice, such as vehicle loading, traffic planning, investment decision, material cutting, and optimal resource allocation [8-10] can be modeled as knapsack problems. For the solution of knapsack problems, there are two main categories: the first category is the traditional methods, such as exact solution method, metaheuristic algorithm, hidden enumeration method, branch delimitation method, etc. [11-13], which can quickly obtain the actual optimal value for some small-scale knapsack problems, but with the increasing scale of the problem in practice, the increase of constraints and the exponential growth of the solution space, making These conventional algorithms are complex to obtain the optimal solution. Therefore, scholars have turned their attention to another class of evolutionary algorithms based on swarm intelligence. These swarm intelligence-based algorithms include genetic algorithms [14], ant colony algorithms [15], fish swarm algorithms [16], and particle swarm algorithms [17-20]. These algorithms are increasingly used due to simple implementation and robustness advantages.

For the binary discrete problem, this paper proposes the Discrete particle swarm algorithm based on an information sharing mechanism (ISM-DPSO), which uses the pheromone sharing mechanism of the ant colony algorithm [21] to update particle velocity, borrow the threshold function to initialize the particle swarm, and dynamically adjust the persistence rate of the pheromone. Experiments show that the algorithm can successfully solve the complex 0-1 backpack problem and vehicle cargo allocation problem, and its performance is superior compared with the basic discrete particle swarm algorithm.

2. Model Description

The 0-1 knapsack problem is a combinatorial optimization problem that requires selecting items from a set to maximize the total value without exceeding the capacity of a knapsack. This model is widely applied in various fields, such as investment portfolio selection, resource allocation, cargo loading, steel cutting, employee scheduling, advertising placement, the traveling salesman problem, and course scheduling. It involves making optimal decisions under limited resource constraints. By modeling these problems as 0-1 knapsack problems, one can use relevant algorithms to find the optimal or near-optimal solutions.

2.1 Mathematical model of the backpacking problem

The mathematical function of the backpacking problem can be described as

$$\max f(X) = \sum_{j=1}^n p_j x_j \quad (1)$$

$$s.t. \quad \sum_{j=1}^n g_j x_j \leq C \quad (2)$$

Where n is the number of items, g_j is the item's weight, p_j is the item's value, C is the backpack's capacity $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, x_j is a 01 variable, $j \in [1, n]$, when $x_j = 1$ means the j item is selected, when $x_j = 0$ means the j th item is not selected.

2.2 Mathematical model for vehicle cargo dispensing

The vehicle cargo assembly problem mainly studies how the cargo is assembled to reasonably use the vehicle volume and load. Suppose the truck's capacity is C and the load is G . There are i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$) cargoes of different weights and volumes waiting to be assembled. Assume that.

1) The boxed cargo has no priority, and the cargo and OD volumes need to be more compressible.

2) The goods are delivered to the same destination, and the volume and weight of each type differ.

Then, the objective function is as follows.

$$\max f(x) = \lambda \sum_{i=1}^n g_i x_i + \eta \sum_{i=1}^n c_i x_i \quad (3)$$

$$s.t. \sum_{i=1}^n g_i x_i \leq G \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^n c_i x_i \leq C \quad (5)$$

$$0 \leq g_i \leq G \quad (6)$$

$$0 \leq c_i \leq C \quad (7)$$

$$\lambda + \eta = 1 \quad (8)$$

Where: g_i is the weight of cargo i , c_i is the volume of freight i , $\lambda \in (0,1)$, when $\lambda = 1$, it means that the maximum load capacity is sought; $\eta \in (0,1)$, when $\eta = 1$, it means that the maximum volume utilization is desired; x_i is a 01 variable, then x_i takes the value of 1, it means that this batch of cargo needs to be loaded with cargo i , and vice versa. If the optimal solution is $(1,1,0,1,0,...)$, the cargo to be loaded is 1, 2, 4,

3. Discrete particle swarm algorithm based on information sharing mechanism

3.1 Basic particle swarm algorithm

The individuals in the particle swarm algorithm, which we call particles, search for the optimal value in the solution space by mimicking the predatory behavior of birds and tracking two "extremes": one is to search for the current optimal value, called the individual extremum and the other is to search for the current optimal value of the whole population, called the global extremum. The speed and position update equations are shown below

$$v_j^{k+1} = \omega v_j^k + c_1 \zeta (p_j^k - x_j^k) + c_2 \eta (p_g^k - x_j^k) \quad (9)$$

$$x_j^{k+1} = x_j^k + v_j^{k+1} \quad (10)$$

where $v_j = [v_{j1}, v_{j2}, \dots, v_{jm}]$ is the velocity of a particle j , which represents the distance between the present position of a particle j and its next target position; ω is called the inertia weight; c_1 is the weight coefficient of the particle tracking its own historical optimum, which represents the particle's knowledge and is called the cognitive constant; c_2 is the weight coefficient of the particle monitoring the population optimum, which means the particle's knowledge of the whole population and is reached the social knowledge constant; ξ and η is a random number uniformly distributed in the interval $[0,1]$; p_j is the individual optimum searched so far; p_g is the optimum searched so far for the whole population; $x_j = [x_{j1}, x_{j2}, \dots, x_{jm}]$ is the current position of the particle j . The particle population is updated iteratively according to Eq. (9) and (10) Until a satisfactory solution is found or a certain number of iterations is reached, the algorithm stops computing and outputs the search result.

3.2 Discrete particle swarm algorithm based on information sharing mechanism

The core of the primary particle swarm algorithm adjusted to a binary discrete particle swarm algorithm is to change the successive states of each particle to only two states of 0 or 1. There are only four possibilities for transforming the current state of a particle to the next state: transforming from 1 state to 1 state, from 1 state to 0 state, from 0 state to 0 state, and from 0 state to 1 state. The state change of each bit of a particle will be determined by the pheromone stored in the pheromone matrix P shared by all particles in that bit. For example, if the state of the i th bit of the j th particle is 0, the state of the historical optimum at the i th bit is 0. The state of the global optimum particle is 1. The pheromone generated by the particle changing from the current state 0 to the historical optimum 0 is v_{00}^i , and the pheromone generated by the particle changing from the current state 0 to the global optimum one is v_{01}^i , The basic principle is shown in Figure 1.

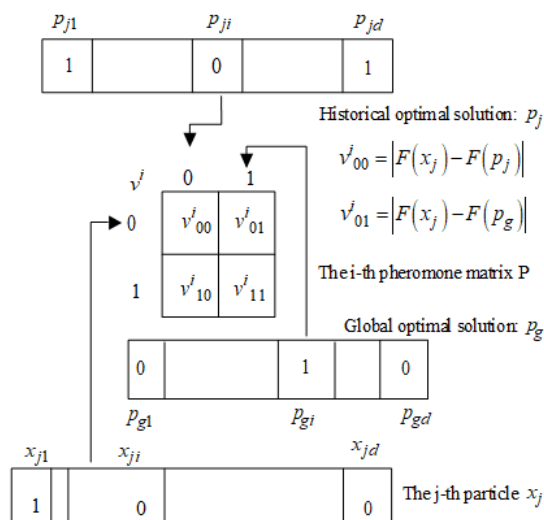


Figure 1 Basic schematic diagram

A binary sequence is constructed using the threshold function for initializing the particle population, and the mathematical expression is shown below.

$$\eta_s(x) = \begin{cases} 0, & x < s \\ 1, & x > s \end{cases} \quad (11)$$

A binary sequence of corresponding d -bit length is obtained by iterating the Logistic mapping d times, constituting the particle's initial state. Where: s is a constant, taken as 0.5 in this paper.

Also, to enhance the global search capability of the ISM-DPSO algorithm, the particle population is reinitialized with probability k , which can be expressed as

$$P_j = R_j(P_j), \quad rand() < k \quad (12)$$

Where: P_j denotes the j th particle, $R_j(P_j)$ denotes re-initialization of P_j , $rand()$ is a random number between $[0,1]$, k is a constant, and $k = 0.01$ is taken in this paper.

In this paper, the particle swarm velocity update formula is reselected by drawing on the pheromone-sharing mechanism in the ant colony algorithm. The updated formula is as follows.

$$v(x_j(i), p_j(i), i)^{t+1} = \rho \times v(x_j(i), p_j(i), i)^t + (1 - \rho)(F(p_j) - F(x_j)) \quad (13)$$

$$v(x_j(i), p_g(i), i)^{t+1} = \rho \times v(x_j(i), p_g(i), i)^t + (1 - \rho)(F(p_g) - F(x_j)) \quad (14)$$

Where: $i = 1, \dots, d$ is the length (dimension) of the particle; j denotes the j th particle $j = 1, \dots, n$; x_j denotes the current position of the particle, p_j denotes the historical optimal position of the particle, p_g denotes the optimal position of the particle population; $x_j(i)$ denotes the value of the i th position of the j th particle, $p_j(i)$ denotes the value of the historical optimal i th position of the j th particle, $p_g(i)$ denotes the value of the global optimal i th position; F is the particle fitness function, t represents the number of iterations; v_i^{t+1} is the velocity pheromone matrix of the i th position at $t+1$ th iteration, using a velocity pheromone update one particle after another. ρ denotes the pheromone persistence rate, and $1 - \rho$ represents the evaporation rate. The smaller the value ρ , the faster the pheromone evaporates, and the information retained in the past will be forgotten more quickly. This paper uses a strategy of nonlinear dynamic adjustment of pheromone persistence rate to guide the memorability of information. The specific expression is as follows.

$$\rho = -(\rho_{\max} - \rho_{\min}) \times (\text{iter} / \text{Gen})^m + \rho_{\max} \quad (15)$$

Where ρ takes values in the range $[0.9, 0.1]$, m is a constant, $\rho_{\max}$ and denotes the maximum and minimum pheromone persistence rates.

This approach converts the continuous particle swarm algorithm into a discrete binary particle swarm algorithm on the one hand and, on the other hand, enables the particles to judge the flight direction based on the persistence and timeliness of their information and also to refer to the information left behind by other particles, thus allowing all particle information in the population to be shared adequately and promptly.

The ISM-DPSO algorithm, through the information-sharing mechanism, can effectively handle the correlated factors in the problem. It allows particles to consider the information of other particles during the search process, thereby capturing the factor correlations within the problem. The strategy of dynamically adjusting the pheromone persistence rate enables the

algorithm to adapt to the search requirements at different stages. For problems with high correlations, the algorithm can enhance its adaptability to correlated factors by adjusting the pheromone persistence rate.

3.3 ISM-DPSO algorithm steps

This paper proposes a discrete particle swarm algorithm based on an information-sharing mechanism. The algorithm's detailed steps are as follows.

Step 1: Initialization and Parameter Settings.

- Set the total number of particles, maximum number of iterations, and particle length.
- Define the value and weight of the items as well as the capacity of the knapsack.

Step 2: Initialization of the Velocity Information Matrix.

- Initialize a three-dimensional matrix u for storing velocity information.

Step 3: Construction of Particles.

- Randomly initialize the position of particles, where a binary array of length n represents each particle, indicating whether the corresponding item is selected.

Step 4: Particle Correction to Create Feasible Solutions.

- Check if each particle exceeds the knapsack capacity, and if so, remove items until the capacity is not exceeded.

Step 5: Start the Particle Swarm Optimization Algorithm.

- Begin the iterative process to calculate the fitness of each particle (total value).
- Update the global and local historical best particles.
- Update the velocity information matrix u of the particles.
- Update the position of the particles based on the velocity information matrix.
- Correct the particles to ensure they do not exceed the knapsack capacity.
- Record the global best fitness value and plot the changes in the best fitness during the iteration process.
- Output the final global best fitness value.

4. Experimental Analysis

4.1 KP problem example analysis

This paper uses four widely cited examples of well-known KP problems to analyze the performance of the discrete particle swarm algorithm based on the information-sharing mechanism. The hardware used in this experiment is an Intel(R) Core(TM) i5-6200U CPU @ 2.30 GHz with 8.00 GB RAM; the software is Windows 10 and MATLAB.

Example 1: The set of weights of items $W=[71,34,82,23,1,88,12,57,10,68,5,33,37,69,98,24,26,83,16,26,18,43,52,71,22,65,68,8,40,40,24,72,16,34,10,19,28,13,34,98,29,31,79,33,60,74,44,56,54,17]$, the set of values of items $P = [26,59,30,19,66,85,94,8,3,44,5,1,41,82,76,1,12,81,73,32,74,54,62,41,19,10,65,53,56,53,70,66,58,22,72,33,96,88,68,45,44,61,78,78,6,66,11,59,83,48]$, the maximum capacity of the backpack is $C=300$ and the size is $d= 50$.

Example 2: The set of weights of items $W=[19,53,61,74,98,70,15,59,64,29,98,79,74,85,52,70,84,91,84,75,78,72,5,46,26,95,38,79,28,92,12,37,37,58,94,44,25,3,12,67,2,98,12,2,34,68,68,81,92,16]$, the set of values of items $P = [12,61,63,78,49,46,44,36,37,66,43,16,14,73,72,72,83,15,83,65,21,49,36,20,22,80,94,3,73,1,91,62,8,58,79,67,53,8,85,82,70,43,22,53,22,14,41,41,77,75]$, the maximum capacity of the backpack is $C=500$ and the size is $d=50$.

Example 3: The set of weights of items $W=[3,68,24,80,76,9,24,2,46,75,56,41,95,46,23,34,64,76,6,48,25,73,87,67,58,7,93,66,55,75,38,27,53,6,100,36,26,17,53,88,21,9,34,90,32,47,4,6,57,50,30,25,41,24,12,74,92,17,32,96,35,76,52,93,64,55,1,70,26,35,2,97,82,22,41,37,63,28,90,13]$, the set of values of the items $P=[38,16, 29,47,22,25,17,49,15,15,75,11,56,99,51,92,59,37,13,98,61,50,32,17,44,79,41,53,45,29,62,64,2,23,31,45,57,68,57,26,51,26,86,83,94,20,98,24,91,89,1,63,21,46,74,56,64,72,58,8,74,24,27,35,94,49,65,21,16,25,1,45,63,4,37,25,39,68,49,11]$, the maximum capacity of the backpack $C=800$ and the scale $d=80$.

Example 4: The set of weights of items $W=[42,30,27,93,8,34,47,64,82,76,70,79,23,5,67,9,97,29,7,61,73,3,44,85,7,51,49,90,59,38,55,39,62,85,54,81,38,42,90,90,26,50,22,71,52,41,77,32,49,2,96,84,20,48,17,62,87,94,84,26,73,52,12,70,42,47,94,13,47,89,90,7,51,39,24,6,74,69,5,47]$, the set of values of the items $P = [15,64,82,87,81,54,65,98,42,99,6,50,90,99,96,57,76,12,47,18,46,73,99,60,40,60,15,5,65,69,19,72,51,33,11,72,69,64,97,95,32,59,34,3,27,99,82,44,66,83,72,28,64,90,15,38,65,91,68,28,17,80,1,29,54,8,11,11,70,40,93,65,51,49,75,35,41,60,72,57]$, the maximum capacity of the backpack $C=1000$ and the scale $d=80$.

The population size of all experiments is 20, and each function is run independently for 30 times with 1000 iterations. This paper takes the maximum and minimum retention factors $\rho_{\min} = 0.1$ for pheromones. The inertia weights for both ISM-DPSO and DPSO algorithms are linearly decreasing strategies, which reduce linearly with iterations between [0.95,0.4], and the obtained data are shown in Table 1 and Figure 2. Where OPT denotes the optimal value that the instance can be found, Best, Worst, and Mean are the best, worst, and average values of the results obtained by each algorithm in 30 independent calculations; Gap is the relative difference between the optimal value OPT and the average value Mean, as shown in equation (16). The closer the Gap fitting value is to 0, the better the algorithm's average performance. Time is the average duration over 30 runs.

The mathematical expression is.

$$Gap = \frac{|OPT - mean|}{OPT} \times 100\% \quad (16)$$

Table 1 Comparison table of the optimization results of the two algorithms

No	Examples	OPT	Algorithm	Best	Worst	Mean	Gap	Time
1	Example 1	1063	DPSO	1048	1015	1030.8	0.030	4.72
		1063	ISM-DPSO	1063	1034	1052.2	0.010	4.65
2	Example 2	1153	DPSO	1153	1118	1136.8	0.014	6.94
		1153	ISM-DPSO	1153	1148	1152	0.001	6.88
3	Example 3	2085	DPSO	1959	1888	1920	0.079	7.15
		2085	ISM-DPSO	2085	1963	2012.3	0.035	7.04
4	Example 4	2337	DPSO	2267	2176	2234.9	0.044	10.12
		2337	ISM-DPSO	2337	2267	2302.8	0.015	9.36

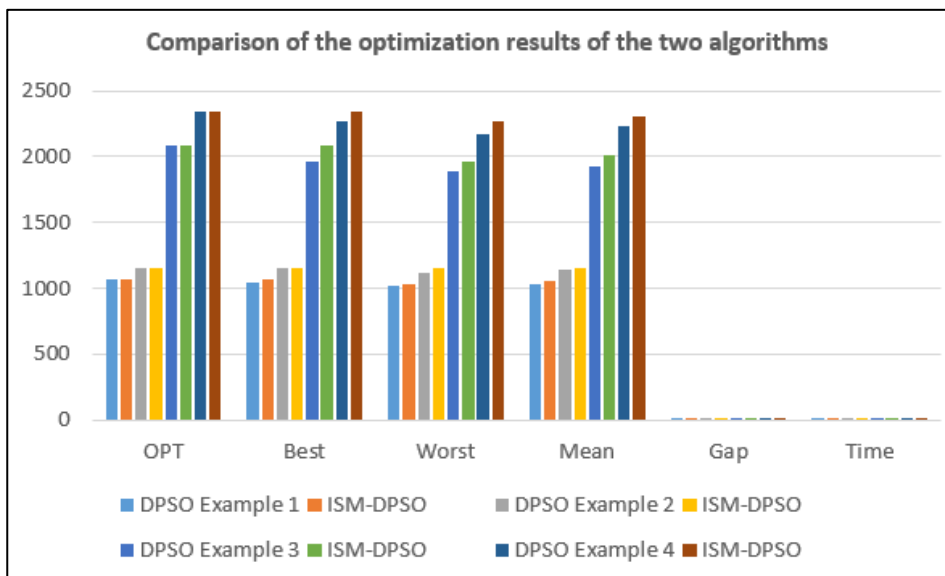


Figure 2 Comparison of the optimization results of the two algorithms

As seen from Table 1 and Figure 2, for the above four examples, ISM-DPSO shows its superiority over the DPSO algorithm in terms of both the optimal value and the fitted value of the algorithm, and the search result is better than that of the DPSO algorithm.

Figure 3-figure Supplement 6 shows the curve of the maximum value of each instance as the number of iterations increases. Figure 3-figure supplement 5 shows that the maximum value is generated at 735 iterations for instance 1, 396 for instance 2, 995 for instance 3, and 826 for instance 2. Thus, we find that more iterations are required to apply ISM-DPSO to obtain the maximum value.

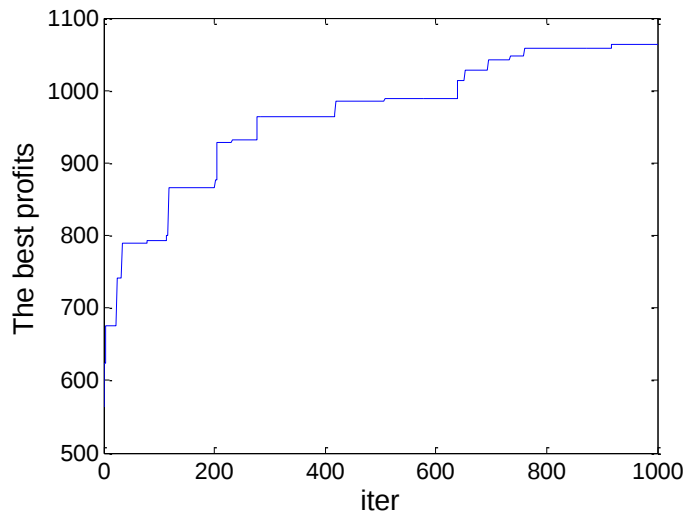


Figure 3 Example 1 Maximum value

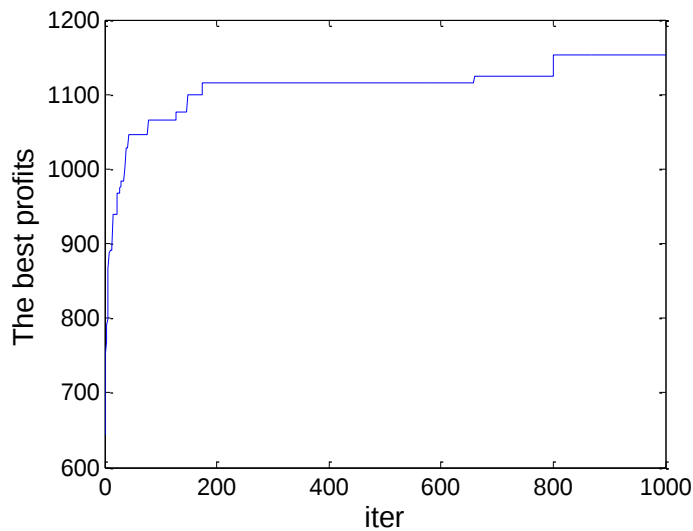


Figure 4 Example 2 Maximum value

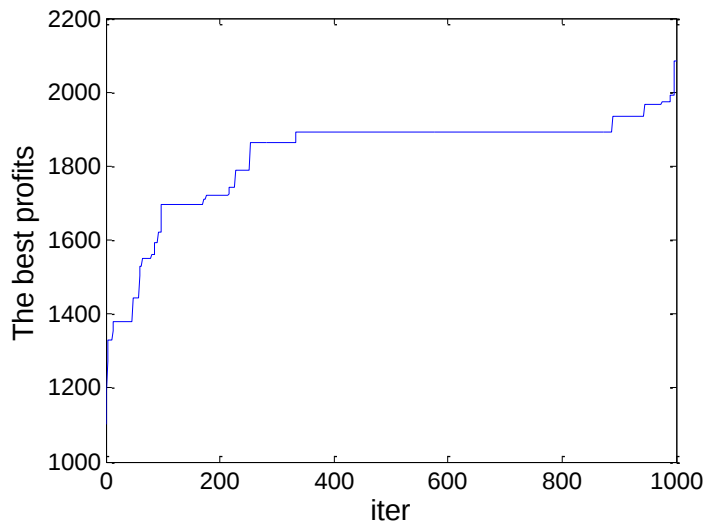


Figure 5 Example 3 Maximum value

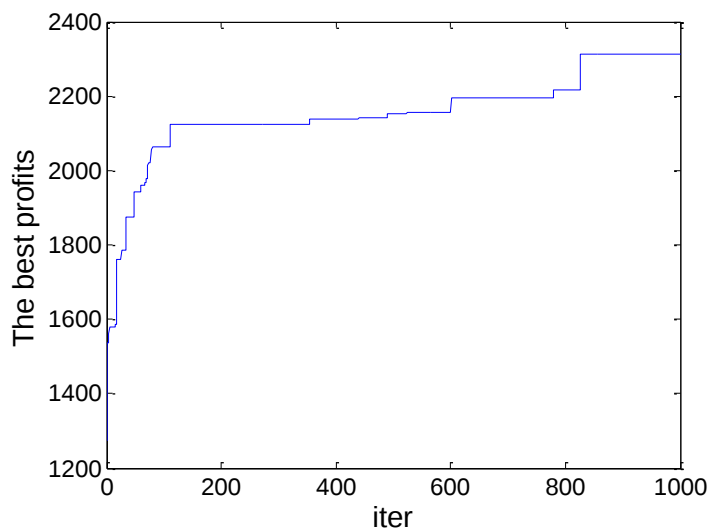


Figure 6 Example 4 Maximum value

To verify the variation of ISM-DPSO performance with the number of iterations, the above four examples were experimented with 1000, 2000, 3000, 5000, and 10000 iterations. Other parameters are kept constant, and the mean values obtained from 30 independent runs are shown in Table 2. Mean1 is the mean value when the number of iterations is 1000, Mean2 is the mean value when the number of iterations is 2000, Mean3 is the mean value

when the number of iterations is 3000, Mean4 is the mean value when the number of iterations is 5000, and Mean5 is the mean value when the number of iterations is 10000.

Table 2 Variation of the mean value with the number of iterations

No	Examples	OPT	Algorithm	Mean1	Mean2	Mean3	Mean4	Mean5
1	Example 1	1063	DPSO	1030.8	1032.1	1033.6	1033.4	1034
		1063	ISM-DPSO	1052.2	1054	1055.4	1058	1058
2	Example 2	1153	DPSO	1136.8	1140	1144	1143	1144.2
		1153	ISM-DPSO	1152	1152.2	1152.4	1152.5	1152.8
3	Example 3	2085	DPSO	1920	1928	1930	1930.3	1929
		2085	ISM-DPSO	2012.3	2022.8	2032.6	2038.4	2038.5
4	Example 4	2337	DPSO	2234.9	2250	2248	2260	2252
		2337	ISM-DPSO	2302.8	2308	2314	2317.6	2319.8

As seen from Table 2, the mean value of ISM-DPSO is closer to the optimal value as the number of iterations increases in a specific pack size range. And the mean value of DPSO does not change significantly as the number of iterations increases. With the increase in the backpack size, especially for the super-large backpack problem, ISM-DPSO is better than DPSO in finding the optimal value. Still, it needs to be revised, which indicates that the information-sharing mechanism-based optimization approach needs to be stronger after the complexity of the problem exceeds a specific size. New methods need to be found to optimize it.

4.2 Vehicle cargo dispensing problem-solving

A box truck with a load capacity of 30t and a compartment volume of 70m³ is to be fitted to 14 kinds of cargoes selected, the weight set of various cargoes $W=[2.00, 3.80, 3.05, 5.00, 7.10, 5.00, 4.30, 1.05, 2.05, 1.80, 5.05, 2.85, 4.30, 4.50]$ in t; the volume set of cargoes $V = [5.30, 12.00, 7.10, 10.00, 6.00, 13.70, 12.00, 1.50, 5.90, 3.05, 3.90, 3.00, 10.50, 8.50]$, in m³, which was obtained from the literature (Ma et al., 2015). The population size of all experiments at this time was 20, the dimensionality of the search space was 14 dimensions,

the maximum number of iterations was 1000, and other parameter settings were kept constant. The functions were run 30 times independently using DPSO and ISM-DPSO, respectively, and the results obtained are shown in Table 3.

Table 3 Comparison of the results obtained by the two methods

Algorithm	DPSO	ISM-DPSO
Optimal solution code	10110101110011	11110011010011
Total volume of loaded cargo (m3)	65.55	69.95
Volume utilization (%)	93.60	99.93
Total weight of loaded cargo (t)	28.75	29.8
Load utilization (%)	95.83	99.93

As shown in Table 3, the volume utilization rate of ISM-DPSO is as high as 99.93%, while the volume utilization rate of DPSO is only 93.60%. In terms of load, the load utilization of ISM-DPSO is 99.93%, while the load utilization of DPSO is only 95.83%. It can be seen that ISM-DPSO can balance the load and volume utilization rates well, making full use of the vehicle loading space and effectively solving the problem of vehicle cargo distribution.

4.3 Scenario Application Guidance

This article experimentally validated the performance of the ISM-DPSO algorithm in solving 0-1 knapsack problems and vehicle cargo allocation problems. The results indicated that the ISM-DPSO algorithm outperformed the traditional DPSO algorithm in multiple independent experiments, particularly in finding global optimal solutions and demonstrating higher stability and quality.

The article calculated the average performance metric of the algorithm, known as the Gap value, which is the relative difference between the algorithm's average and the optimal value. The closer the Gap value is to 0, the closer the algorithm's average performance is to the optimal solution, indicating higher efficiency. In our experiments, the ISM-DPSO algorithm showed a smaller Gap value in all test cases, proving its high efficiency. To effectively apply the ISM-DPSO algorithm in various scenarios, it is first necessary to confirm whether the problem is suitable for modeling as a 0-1 knapsack problem or a combinatorial

optimization problem with a similar structure, such as investment portfolio selection, resource allocation, cargo loading, steel cutting, employee scheduling, advertising placement, and the traveling salesman problem, all of which can be modeled as 0-1 knapsack problems. Subsequently, it transforms the actual problem into a mathematical model that ISM-DPSO can handle, defining the necessary decision variables, objective functions, and constraints. Then, the algorithm parameters are adjusted according to the characteristics of the problem, such as the size of the particle swarm and the pheromone persistence rate, and the algorithm is implemented and tested on a series of well-designed test problems to evaluate its performance. Assess the algorithm's efficiency through metrics such as the Gap value and average running time and compare it with other algorithms to showcase its advantages. Adjust parameters or strategies based on the evaluation results to optimize the algorithm's performance, apply it to real-world problems, and monitor and adjust to fit actual situations. Finally, the application process and algorithm results will be documented and shared.

5. Conclusions

The proposed discrete particle swarm optimization algorithm based on an information-sharing mechanism (ISM-DPSO) significantly improves performance in solving 0-1 knapsack problems and vehicle cargo allocation problems by enhancing the initialization of the particle swarm and incorporating a pheromone-sharing mechanism. Experimental results demonstrate that ISM-DPSO outperforms the traditional DPSO algorithm in finding global optimal solutions and exhibits higher stability and quality across multiple independent experiments.

Despite its superior performance in many cases, ISM-DPSO shows limitations when addressing extremely large-scale problems. Future research could explore combining other optimization techniques, such as hybrid intelligent algorithms or adaptive strategies, to enhance further the algorithm's global search ability and solution quality. Additionally, the applicability of ISM-DPSO could be extended to a broader range of real-world optimization problems to validate its wide adaptability and practicality.

Overall, ISM-DPSO is an effective optimization algorithm with promising applications. It demonstrates significant advantages in solving complex discrete optimization problems and provides a solid foundation for further research and application.

Acknowledgment

The authors would like to thank the Department of Industrial Technology Management, Faculty of Industrial Technology, Muban Chombueng Rajabhat University, for supporting the research tools used in this research.

References

- [1] Kennedy J, Eberhart R. A discrete binary version of the particle swarm algorithm. Proceedings of the 1997 Conference on System, Man, and Cybernetics; 1997 Oct 12-15; Orlando, USA. Piscataway, USA: IEEE; 1997. p.4104-8.
- [2] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization. Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks; 1995 Nov 27-Dec 1; Perth, Australia. Piscataway, USA: IEEE; 1995. p. 1942-8.
- [3] Zhang G, Jiang J, Xia N, Su Z. Solutions of complicated coalition generation based on discrete particle swarm optimization. Acta Electronica Sinica 2007;35(2):323-7.
- [4] Lin Z, Gao W, Wu C, Li Y. Data center network flow scheduling based on DPSO algorithm. Acta Electronica Sinica 2016;44(9):2197-202.
- [5] Xu Z, Yang W, Zhang W, Chen S. Multi-objective distribution network reconfiguration based on chain loops and improved binary particle swarm optimization. Power System Protection and Control 2021;49(6):114-23. (In Chinese)
- [6] Liu G, Huang Y, Wang X, Guo W, Chen G. Hybrid discrete particle swarm algorithm for X-architecture steiner minimal tree construction with slew constraints. Chinese Journal of Computers 2021; 4(12):2542-59. (In Chinese)
- [7] Garey MR, Johnson DS. Computers and intractability: a guide to the theory of NP-completeness. San Francisco, USA: W. H. Freeman and Company;1979.
- [8] Bas E. A capital budgeting problem for preventing workplace mobbing by using analytic hierarchy process and fuzzy 0-1 bidimensional knapsack model. Expert Systems with Applications 2011;38(10):12415-22.
- [9] Han D, Huang W, Yan Z. Virtual Bidding Strategy in Electricity Market Based on Deep Reinforcement Learning. Proceedings of the CSEE 2022;42(4):1443-54. (In Chinese)
- [10] Shih W. A branch and bound method for the multiconstraint zero-one knapsack problem. Journal of the Operational Research Society 1979;30(4):369-78.

- [11] Storn R, Price K. Differential evolution-a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. *Journal of Global Optimization* 1997;11(4): 341-59.
- [12] He Y, Wang J, Zhang X, Li H, Liu X. Encoding transformation-based differential evolution algorithm for solving knapsack problem with single continuous variable. *Swarm and Evolutionary Computation* 2019;50: 981-92.
- [13] Jiang H, Guo T, Yang Z. Research progress of vehicle routing problem. *Acta Electronica Sinica* 2022;50(2):480-92.
- [14] He Y, Wang X, Li W, Zhang X, Chen Y. Research on genetic algorithms for the discounted {0-1} knapsack problem. *Chinese Journal of Computers* 2016; 39(12):2614-30. (In Chinese)
- [15] Ren Z, Zhao S, Huang S, Liang Y. Hybrid optimization algorithm of ant colony optimization and Lagrangian relaxation for solving multidimensional knapsack problem. *Control and Decision* 2016; 31(7):1178-84. (In Chinese)
- [16] Li Y, Zhang J, Liu Q, Zhang W. Advanced artificial fish swarm algorithm for large scale multiple knapsack problem. *Systems Engineering and Electronics* 2018; 40(3):710-6.
- [17] Liu Y, Ma L. Solving 0-1 knapsack problem by fuzzy particle swarm optimization. *Application Research of Computers* 2011;28(11):4026-31. (In Chinese)
- [18] Geng Y, Wu F S. Research on knapsack problem based on the hybrid algorithm of particle swarm optimization and simulated annealing. *Control Engineering of China* 2019;26(5):991-6. (In Chinese)
- [19] Xu Q, Wu T, Wang W. Nonlinear dissipative particle swarm algorithm and its applications. *IEEE ACCESS* 2021;(9):158862-71.
- [20] Xu Q, Amdee N, Sangsongfa A. Design study of high-power PV grid-connected inverter system based on the particle swarm algorithm. *Primera Scientific Engineering* 2024;5(3):16-38.
- [21] Xiao J, Yu X, Zhou G, Sun K, Zhou Z. An improved ant colony algorithm for indoor AGV path planning. *Chinese Journal of Scientific Instrument* 2022;43(3):277-85. (In Chinese)
- [22] Ma H, Qiu X. A heuristic algorithm for the ordinary scattered cargoes' container-loading question. In: Liu R, Zhang J, Guan C, editors. *Logistics: The Emerging Frontiers of Transportation and Development in China*. Reston, USA: ASCE; 2009. p. 4790-95.

Author's Profile

Mr. Qinghe Xu, (Ph.D. Student) Department of Industrial Technology Management, Faculty of Industrial Technology, Muban Chom Bueng Rajabhat University, Ratchaburi, Thailand.

Email: 64a951005@mcru.ac.th

Interested Research: Artificial Intelligence Algorithm and New Energy



Asst. Prof. Dr. Noppadol Amdee, Department of Industrial Technology Management, Faculty of Industrial Technology, Muban Chom Bueng Rajabhat University, Ratchaburi, Thailand.

Email: noppadolamd@mcru.ac.th

Interested Research: Design of Experiment, Artificial Intelligence Algorithm, and Cost Analysis



Dr. Adisak Sangsongfa, Department of Industrial Technology Management, Faculty of Industrial Technology, Muban Chom Bueng Rajabhat University, Ratchaburi, Thailand.

Email: adisaksan@mcru.ac.th

Interested Research: Artificial Intelligence Algorithm

Article History:

Received: September 29, 2024

Revised: December 15, 2024

Accepted: December 16, 2024

การศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะระบบส่งกำลังในยานยนต์ไฟฟ้าดัดแปลง A COMPARATIVE STUDY OF POWERTRAIN SYSTEM PERFORMANCE IN CONVERTED ELECTRIC VEHICLES

ภักดี สิทธิฤทธิกวิน¹ และ กาจ อิมบุญอาบ²

^{1,2}อาจารย์, สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาลัยเชียงราย

199 ม. 6 ต.ป่าอ้อดอนชัย อ. เมือง จ.เชียงราย 57000,

¹pakdee.me@gmail.com, ²Kaj.me@gmail.com

Pakdee Sittirirkawin and Kaj Imboonarb

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

Chiangrai college, 199 Moo 6 Paoordonchai Subdistric, Muang, Chiangrai, 57000, Thailand,

¹pakdee.me@gmail.com, ²Kaj.me@gmail.com

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ในการวิจัยนี้เพื่อศึกษาออกแบบระบบส่งกำลังของรถโดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเป็นต้นกำลังในสองรูปแบบ คือแบบแรกที่ไม่ใช้เกียร์โดยที่มอเตอร์ไฟฟ้าเชื่อมต่อกับเฟืองท้ายโดยตรง และแบบที่สองใช้เกียร์โดยที่มอเตอร์ไฟฟ้าเชื่อมต่อผ่านเกียร์แล้วจึงส่งกำลังไปยังเฟืองท้ายของรถ จากนั้นจึงศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะการขับเคลื่อนของรถที่มีระบบส่งกำลังทั้งสองแบบ ในแง่ของความเร็วรถ อัตราเร่ง ความสิ้นเปลืองพลังงาน น้ำหนักบรรทุก ความสามารถในการขึ้นทางชัน โดยการวิ่งทดสอบในเส้นทางในสถาบันและนอกสถาบันในสภาวะมีน้ำหนักบรรทุก หลังจากการคำนวณออกแบบพบว่ารถสามารถใช้มอเตอร์ไฟฟ้าที่มีขนาดพิกัด 10 kW แรงดันไฟฟ้า 72 V และใช้แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนฟอสเฟต (LiFePO₄) ความจุ 100 Ah แรงดัน 72 V และเมื่อทำการทดสอบการใช้งานกับระบบส่งกำลังแบบใช้เกียร์ที่บรรทุกน้ำหนักเต็มพิกัด 1,800 kg มีสมรรถนะการขับเคลื่อนแบบที่ 1 (ภายในสถาบัน) ดีกว่าระบบส่งกำลังแบบไม่ใช้เกียร์สามารถขับได้ระยะ 20.4 km มีความเร็วรถ 37 km/hr สิ้นเปลืองพลังงานไป 5.4 kWh

คำสำคัญ: ระบบส่งกำลัง, มอเตอร์ไฟฟ้า, ยานยนต์ไฟฟ้า

ABSTRACT

The objective of this research was to study the design of a powertrain system for electric vehicles using two different configurations of electric motors: the first configuration directly

connects the electric motor to the rear differential without a gearbox, while the second configuration uses a gearbox between the electric motor and the rear differential. Subsequently, the study aimed to compare the driving performance of vehicles with both powertrain systems in terms of speed, acceleration rate, energy efficiency, payload weight, and hill climbing capability. Tests were conducted both on and off-campus under loaded conditions. After designing and calculations, it was found that the vehicle could effectively utilize an electric motor rated at 10 kW with an electrical voltage of 72 V. It employed a 72 V lithium iron phosphate (LiFePO₄) battery with a capacity of 100 Ah. During operational tests with the gearbox-equipped powertrain system under full load (1,800 kg), the cycle driving type 1 (within the institute) better driving performance compared to the direct-drive system. Specifically, it achieved a driving range of 20.4 km, a speed of 37 km/hr, and consumed 5.4 kWh of energy.

KEYWORDS: powertrain system, electric motors, electric vehicles

1. บทนำ

จากสถานการณ์ยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ (BEVs) ในประเทศไทยปัจจุบันพบว่า การจดทะเบียนรถยนต์ใหม่ของไทยอ้างอิงข้อมูลของกรมขนส่งทางบกพบว่าในช่วง 5 ปีที่ผ่านมาปริมาณยานยนต์ไฟฟ้าที่จดทะเบียนใหม่มีปริมาณเพิ่มขึ้นสูงในทุกปี โดยเฉพาะในปี 2565 มียอดจดทะเบียนยานยนต์ไฟฟ้าใหม่ขยายตัวสูงถึงร้อยละ 98.0 มียอดจดทะเบียนแล้วจำนวน 31,493 คัน [1] เนื่องจากรถ BEVs มีความสิ้นเปลืองพลังงานน้อยกว่ารถที่ใช้เครื่องยนต์สันดาปภายใน มีงานวิจัยศึกษาเกี่ยวข้องกับการออกแบบรถดังกล่าวด้วยอย่างเช่น มีการศึกษาออกแบบและวิเคราะห์ระบบส่งกำลังในยานยนต์ไฟฟ้านั้นส่วนบุคคลโดยมีการเสนอสมการการออกแบบหาพิกัดมอเตอร์ ความจุแบตเตอรี่ที่เหมาะสมในการขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้า ผลการศึกษาพบว่าระบบส่งกำลังของรถถูกประเมินจากการเปลี่ยนแปลงในความเร็วของรถและความเร่งความสามารถได้ทางชัน รวมถึงชุดแบตเตอรี่ ระบบบริหารจัดการแบตเตอรี่ คอนเวอร์เตอร์ ระบบควบคุม [2] และยังพบว่าการออกแบบแบบจำลองใน MATLAB Simulink ใช้วิเคราะห์แบบจำลองระบบส่งกำลังของ BEVs ที่ถูกสร้างขึ้นและตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่าง SOC ความเร็ว แรงบิดของมอเตอร์ แรงบิดของเพลากับเวลาตามลำดับและได้มีการสร้างแบบจำลองระบบส่งกำลังของรถยนต์ไฟฟ้านำไปทดสอบกับรถ Ford Focus และ Nissan Leaf EV เป็นพื้นฐาน [3] รวมไปถึงศึกษาการออกแบบมอเตอร์เหนี่ยวนำสำหรับรถยนต์ไฟฟ้าใช้ในเมือง เนื่องจากเป็นต้นกำลังที่สำคัญเข้ามาแทนเครื่องยนต์ มีการจำลองการทำงานของมอเตอร์อินดักชันใน MATLAB ผลลัพธ์ที่ได้

พบว่ามอเตอร์ที่ออกแบบไว้สามารถทำงานได้ดีและควบคุมการทำงานได้ [4] และยังพบการออกแบบรถบรรทุกไฟฟ้าที่เน้นศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการออกแบบระบบส่งกำลังสำหรับรถบรรทุกไฟฟ้าที่ใช้แบตเตอรี่ โดยการวิเคราะห์ประโยชน์ทางพลังงานของระบบเกียร์หลายระดับเมื่อเปรียบเทียบกับระบบเกียร์หนึ่งระดับสำหรับรถบรรทุกไประยะไกล [5] มีการจำลองการใช้พลังงานของรถจากเครื่องมือคำนวณการใช้พลังงานของยานพาหนะ เพื่อการปรับปรุงแบตเตอรี่ขนาดมอเตอร์ไฟฟ้า และอัตราทดเกียร์

ในส่วนงานวิจัยด้านรถ BEVs ในประเทศไทยก็พบงานวิจัยออกแบบรถขนาดเล็กอย่าง เช่น การศึกษาออกแบบและพัฒนายานยนต์ไฟฟ้าต้นแบบและประเมินสมรรถนะยานยนต์ไฟฟ้าที่ได้พัฒนา เป็นยานยนต์ 4 ล้อ ขับเคลื่อน 2 ล้อหลัง ใช้มอเตอร์กระแสตรงชนิดบัสเลสดีซีมอเตอร์เป็นต้นกำลัง ใช้แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนฟอสเฟตเป็นแหล่งพลังงาน ทำความเร็วได้ 28.4 km/hr และเมื่อชาร์จประจุเต็มที่ 1 ครั้งรถจะสามารถวิ่งได้ 21.398 km โดยใช้พลังงานไฟฟ้า 8 kWh [6] และยังได้ศึกษาออกแบบยานยนต์ไฟฟ้าขนาดเล็กสำหรับผู้สูงอายุจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB & Simulink และทำการจำลองการขับขึ้นโปรแกรมทำให้ทราบว่ารถจะสามารถทำความเร็วในทางราบสูงสุดที่ 39.3 km/h ขับได้ระยะทาง 28 km ขึ้นทางชันได้ 2.29 องศา [7] และยังพบการศึกษาการออกแบบและสร้างรถสามล้อไฟฟ้าที่มีโครงสร้างน้ำหนักเบามอเตอร์ไฟฟ้าพิกัด 2 Hp แรงดัน 60 V ใช้โครงสร้างแบบท่อโครงถักใช้แบตเตอรี่ขนาด 12 V ความจุ 60 Ah รถสามารถวิ่งได้ระยะทาง 80 km ความเร็วสูงสุด 47 km/h รับน้ำหนักบรรทุกได้ 480 kg และขึ้นเนินได้ 35 องศา ระยะเวลาในการชาร์จไฟเข้าแบตเตอรี่ 7 ชั่วโมง [8, 9]

ในการพัฒนารถ BEVs ที่ประหยัดพลังงานและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมพบว่ามีงานวิจัยในด้านการใช้แผงโซลาร์เซลล์เข้ามาทำงานร่วมกับระบบเก็บประจุแบตเตอรี่ของรถซึ่งจะช่วยเพิ่มระยะทางการวิ่งของรถให้เพิ่มมากขึ้นได้อีก อย่างเช่นการประดิษฐ์รถบรรทุกสามล้อไฟฟ้าออกแบบประสิทธิ์พลังงานแสงอาทิตย์ตัวรถปรับปรุงดัดแปลงจากรถบรรทุกสามล้อไฟฟ้านำมาติดตั้งมอเตอร์พิกัด 3,000 W และใช้แผงโซลาร์เซลล์ติดตั้งเป็นหลังคาที่ด้านบนของกระบะ [10] รวมไปถึงการดัดแปลงรถเครื่องยนต์เป็นรถยนต์ BEVs เพิ่มมากขึ้น ซึ่งสิ่งสำคัญในการดัดแปลงรถประเภทหนึ่งก็คือ การคำนวณออกแบบต้นกำลังที่เป็นมอเตอร์และระบบส่งกำลัง เพื่อนำมาทดแทนเครื่องยนต์เดิมให้มีขนาดที่เหมาะสมกับลักษณะการใช้งานเพื่อที่จะไม่ให้อินเปลืองค่าใช้จ่ายที่เกินความจำเป็นเนื่องจากมอเตอร์ไฟฟ้า แบตเตอรี่ และระบบควบคุม มีราคาค่อนข้างแพง จึงมีงานวิจัยที่ศึกษาการออกแบบรถในกลุ่มดังกล่าว อย่างเช่น ได้ทำการศึกษาพัฒนาดัดแปลงรถตุ๊กตุ๊กที่ใช้เครื่องยนต์เป็นต้นกำลังให้เปลี่ยนมาเป็นการใช้มอเตอร์ไฟฟ้าชนิด BLDC มีพิกัด 10 kW แรงดัน 72 V เป็นต้นกำลัง [11] และยังพบการนำโครงสร้างรถกระบะเครื่องยนต์ดีเซลเก่ามาดัดแปลงเป็นรถยนต์ไฟฟ้าซึ่งมีประเด็นที่น่าสนใจ เนื่องจากระบบส่งกำลังของรถยนต์กระบะบรรทุกจะมีเกียร์และเฟืองท้ายที่จะช่วยสร้างอัตราทดให้กับมอเตอร์ช่วยในการออกตัวของรถได้ดี และสามารถเลือกใช้

อัตราทดที่เหมาะสมกับความเร็วที่วิ่งในสถานที่ต่าง ๆ ซึ่งรถกลุ่มนี้ส่วนใหญ่ใช้ความเร็วต่ำไม่เกิน 35 km/hr ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดการพัฒนาระบบการขับเคลื่อนรถจากเครื่องยนต์เปลี่ยนมาใช้ต้นกำลังจากมอเตอร์ไฟฟ้า โดยการออกแบบและสร้างมีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) ศึกษาออกแบบระบบส่งกำลังของรถที่ใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเป็นต้นกำลังในแบบที่ไม่ใช้เกียร์และแบบที่ใช้เกียร์ และ 2) ศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะการขับเคลื่อนของรถที่มีระบบส่งกำลังทั้งสองแบบ ในแง่ของความเร็วรถ อัตราเร่ง ความสิ้นเปลืองพลังงาน น้ำหนักบรรทุก ความสามารถการขึ้นทางชัน

2. วัสดุและวิธีการทดสอบ

2.1 เครื่องมือ

- 1) เครื่องวัดความสิ้นเปลืองพลังงานรุ่น C10s Compact แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 72 V, Accuracy class 1.5
- 2) อุปกรณ์ติดตามบันทึกความเร็ว ระยะทางรถ (GPS Tracker) C6 Car Truck Vehicle Tracking GSM GPRS / SMS GPS Tracker รุ่น TGPS6506_620, Accuracy class 1.5

2.2 ขั้นตอนการออกแบบระบบขับเคลื่อน

กำหนดข้อมูลเบื้องต้นที่ใช้ในการออกแบบรถแสดงดังตารางที่ 1 นำข้อมูลมาคำนวณหาขนาดมอเตอร์และขนาดแบตเตอรี่ที่เหมาะสม โดยเริ่มต้นจากการคำนวณหาแรงต้านทานการเคลื่อนที่ในส่วนต่าง ๆ ของรถ แล้วจึงทำการคำนวณหาแรงบิดที่ล้อขับเคลื่อนและคำนวณหาแรงบิดที่มอเตอร์ส่งกำลังผ่านชุดเกียร์และเฟืองท้ายของรถ สุดท้ายจึงนำผลมาคำนวณหาเกียร์ที่ใช้ในการขับเคลื่อนเพื่อเลือกใช้มอเตอร์ให้เหมาะสมกับการใช้งานจริง

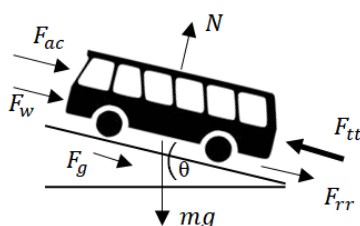
ตารางที่ 1 ข้อมูลการออกแบบรถไฟฟ้าดัดแปลง

ลำดับ	รายละเอียด	สัญลักษณ์	คุณลักษณะ
1	จำนวนผู้โดยสารรวมคนขับ		15 คน
2	มวลของรถ ผู้โดยสารและคนขับ	m	ไม่เกิน 2,000 kg
3	ความเร็วสูงสุด	V_{max}	35 km/hr (9.72 m/s)
4	ชนิดมอเตอร์	BLCD	แรงดัน 72 V
5	แบตเตอรี่ลิเทียมฟอสเฟต หรือ LiFePO_4	V_B	72 V
6	มุมไต่ทางชัน	θ	10 องศา

ตารางที่ 1 ข้อมูลการออกแบบรถไฟฟ้าตัดแปลง (ต่อ)

ลำดับ	รายละเอียด	สัญลักษณ์	คุณลักษณะ
7	เวลาที่ใช้อัตราเร่ง	t_a	20 วินาที at 0 – 35 km/hr
8	ค่าสัมประสิทธิ์ความต้านระหว่างล้อยางกับผิวถนน (พื้นถนน ลาดยาง)	C_{rr}	0.012
9	ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ	C_d	0.5
10	ความหนาแน่นอากาศที่อุณหภูมิ 35 °C	ρ	1.2 kg/m ³
11	พื้นที่ส่วนหน้าของรถ	A_f	1.5 m ²
12	รัศมีของล้อยาง ที่ขนาดยาง 265/70R16	R_w	0.3165 m
13	แฟกเตอร์การเสียดทานระหว่างเพลากับลูกปืน	R_f	1.1
14	ความเร็วเชิงมุม คิดที่ความเร็วรถ 35 km/hr	ω	30.62 rad/s
15	อัตราทดเฟืองท้าย	G_r	4.29
16	อัตราทดเกียร์ 1, 2, 3	G_g	4.784, 2.423, 1.443

การคำนวณแรงต้านทานการเคลื่อนที่ในส่วนต่าง ๆ ของรถในการหมุนของล้อ ในขณะที่รถเคลื่อนที่จะเกิดแรงต้านทานการเคลื่อนที่ขึ้นโดยมีสมการที่เกี่ยวข้องดังนี้



รูปที่ 1 แรงต้านทานการเคลื่อนที่ของรถในรูปแบบต่าง ๆ

1) แรงผลึก

ในการหาแรงผลึกหรือแรงต้านทานรวมทั้งหมดที่ต้นกำลังมอเตอร์ไฟฟ้า จะต้องใช้รถขับเคลื่อนไปได้ซึ่งจะประกอบไปด้วย แรงต้านทานการหมุนของล้อ (F_{rr}) แรงต้านทานของอากาศ (F_w) แรงต้านทานการขึ้นทางชันของรถ (F_g) แรงต้านทานการเร่ง (F_{ac})

$$F_{tt} = F_{rr} + F_w + F_g + F_{ac} \quad (1)$$

2) แรงต้านทานการหมุนของล้อ

เป็นแรงที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของยาง พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างยางกับถนน

$$F_{rr} = C_{rr} mg \cos(\theta) \quad (2)$$

โดยที่ F_{rr} คือ แรงต้านทานการหมุนของล้อ (N) C_{rr} คือ สัมประสิทธิ์ของความเสียดทานการหมุน m คือ น้ำหนักของรถที่ตกลงที่ล้อ (kg) g คือ ความเร่งจากแรงโน้มถ่วงของโลก (m/s^2) θ คือ มุมองศาความชันของถนน

3) แรงต้านทานของอากาศ

การเกิดแรงต้านทานของอากาศจากรูปทรงพื้นที่หน้าตัดของรถส่วนที่ปะทะกับอากาศหรือ กระแสลม

$$F_w = \frac{1}{2} \rho C_d A v^2 \quad (3)$$

โดยที่ F_w คือ แรงต้านทานของอากาศ (N), ρ คือ ความหนาแน่นอากาศ (kg/m^3), C_d คือ ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านทานอากาศ, A คือ พื้นที่หน้าตัดของรถไฟฟ้า (m^2), v คือ ความเร็วของรถไฟฟ้า (m/s)

4) แรงต้านทานการขึ้นทางชันของรถ

$$F_g = mg \sin(\theta) \quad (4)$$

โดยที่ F_g คือ แรงต้านทานการขึ้นทางชัน (N)

5) แรงต้านทานการเร่ง

เป็นผลเนื่องมาจากความเฉื่อยของรถขณะเคลื่อนที่รถยนต์จะเคลื่อนที่ได้จะต้องใช้กำลังของเครื่องยนต์บางส่วนส่งไปเป็นกำลังขับเคลื่อนที่ล้อกำลังที่ขับเคลื่อนจะต้องมากพอที่จะเอาชนะกำลังที่สูญเสียไปเนื่องจากแรงต้านทานการเคลื่อนที่ต่าง ๆ ที่อัตราเร็วขณะนั้นเมื่อรถวิ่งบนพื้นราบ

$$F_{ac} = \frac{m(v_2 - v_1)}{t_a} \quad (5)$$

โดยที่ F_{ac} คือ แรงต้านทานการเร่ง (N), v_2 คือ ความเร็วหลังการเร่ง (m/s), v_1 คือ ความเร็วเริ่มต้น (m/s), t_a คือ เวลาที่ใช้เร่งรถจากความเร็วเริ่มต้น v_1 ไปเป็น v_2 (s)

6) แรงบิดที่ล้อ

$$T_w = F_{tr} R_w R_f \quad (6)$$

โดยที่ T_w คือ แรงบิดที่ล้อยาง (N.m), R_w คือ รัศมีของล้อยาง (m), R_f คือ แฟคเตอร์การเสียดทานระหว่างเพลากับลูกปืนกำหนดให้เป็น 1.1 เมื่อเลือกล้อและยาง 265/70R16 จะได้เส้นผ่านศูนย์กลาง 633 mm

7) การเลือกพิกัดมอเตอร์

ส่วนของพิกัดมอเตอร์จะเป็นต้นกำลังของรถที่จะใช้ในการขับเคลื่อนรถไฟฟ้า แสดงดังสมการ (7)

$$P_e = T_w \omega \quad (7)$$

โดยที่ P_e คือ กำลังที่เพลามอเตอร์ (W), T_w คือ แรงบิดกำลังที่เพลามอเตอร์ (N.m), ω คือ ความเร็วเชิงมุม (rad/s) การหาความเร็วรอบที่ต้องการในการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้านั้น อัตราเร็วของรถจะมีความสัมพันธ์กับอัตราเร็วรอบโดยขึ้นอยู่กับอัตราทดเฟืองท้ายและอัตราเกียร์ต่าง ๆ ซึ่งสามารถวิเคราะห์หาอัตราเร็วของรถได้ ดังสมการ (8)

$$N = \frac{V \cdot 100}{2\pi r \cdot 60} \quad (8)$$

โดยที่ N คือ ความเร็วเพลารถเฟืองท้าย (rpm), V คือ ความเร็วของรถ, r คือ รัศมีของล้อและยาง

ในการขับเคลื่อนตัวรถมีความจำเป็นต้องมีระบบเกียร์เพื่อมาช่วยปรับแรงบิดและความเร็วในย่านการทำงานเช่น การออกตัว การขับสภาวะปกติ ซึ่งการขับในพื้นที่จำกัดเช่นภายใน สถาบันฟาร์ม สถานที่ท่องเที่ยว โดยส่วนใหญ่จะถูกจำกัดความเร็วไม่เกิน 30-35 km/hr จึงทำให้เราสามารถลดพิกัดขนาดมอเตอร์ให้เล็กลงได้ความเร็วรอบมอเตอร์และพิกัดมอเตอร์ผ่านอัตราทดเกียร์และเฟืองท้ายสำหรับการติดตั้งเป็นต้นกำลังให้กับรถ

$$N_m = N G_g G_r \quad (9)$$

$$P_m = \frac{P_e}{G_g G_r} \quad (10)$$

โดยที่ N_m คือ ความเร็วรอบมอเตอร์ P_m คือ พิกัดมอเตอร์ G_g คือ อัตราทดเกียร์ต่าง ๆ G_r คือ อัตราทดเฟืองท้าย

8) การคำนวณหาพิกัดความจุแบตเตอรี่

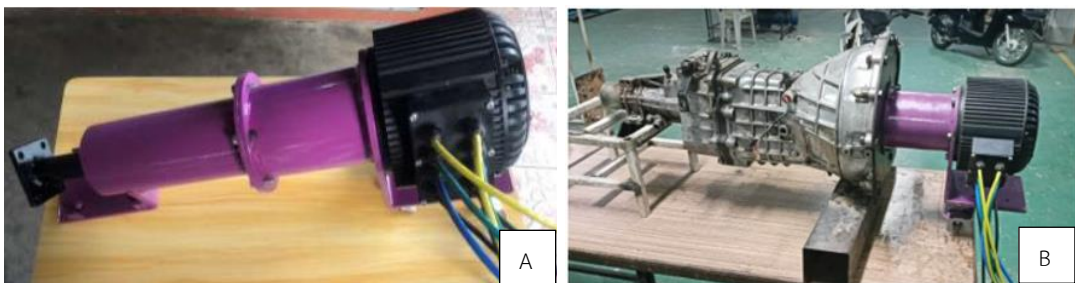
ในการหาขนาดพิกัดความจุของแบตเตอรี่เบื้องต้นที่เหมาะสมต่อการใช้งาน โดยจะพิจารณาจากระยะทางการวิ่งของรถ ความเร็วที่ใช้หรือกำหนดจากระยะเวลาในการใช้งาน โดยใช้สมการ (11)

$$B_v = \frac{P_m H_r}{V_B} \quad (11)$$

โดยที่ B_v คือ ความจุแบตเตอรี่ที่ต้องการ (Ah) H_r คือ ระยะเวลาในการวิ่งของรถ (ชั่วโมง) V_B คือ แรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ (V)

2.3 ขั้นตอนการทดลอง

ในการทดลองการขับเคลื่อนของรถจะแบ่งการทดสอบระบบส่งกำลังเป็น 2 แบบ ดังนี้ 1) ไม่ใช้เกียร์ โดยการใช้ต้นกำลังมอเตอร์ขับเคลื่อนผ่านเพลากลางส่งกำลังไปยังชุดเฟืองท้ายแสดงดังรูปที่ 2A และ 2) ใช้เกียร์โดยใช้ต้นกำลังมอเตอร์เชื่อมต่อกับเกียร์ที่มี 3 อัตราทด ผ่านเพลากลางไปยังชุดเฟืองท้ายแสดงดังรูปที่ 2B โดยมีเงื่อนไขการทดสอบสมรรถนะการขับเคลื่อนดังนี้



รูปที่ 2 การติดตั้งมอเตอร์ไฟฟ้าเข้ากับระบบส่ง (A) ไม่ใช้เกียร์ และ (B) ใช้เกียร์

- 1) ทดสอบการขับเคลื่อนแบบไม่มีน้ำหนักบรรทุกและน้ำหนักบรรทุกครบ 15 ที่นั่ง 1,050 kg.
- 2) การเก็บข้อมูลความเร็วและความสิ้นเปลืองพลังงานในแต่ละเส้นทางขับเคลื่อนโดยเก็บข้อมูลทดสอบจำนวน 3 ครั้ง แบ่งเป็น 2 แบบ ดังนี้

2.1) วัฏจักรการขับขี่แบบที่ 1 เส้นทางถนนภายในสถาบันเป็นที่มีสภาพการจราจรหนาแน่น มีสภาพถนนแคบ ทางแยกมากสลับกับตัวชะลอความเร็วและหยุดนิ่งจำนวน 4 ครั้ง ในช่วงเวลาเช้าเริ่มต้นระหว่างเวลา 07.00 น. ถึง 09.00 น. ระยะทาง 5.2 km

2.2) วัฏจักรการขับขี่แบบที่ 2 เส้นทางนอกสถาบันมีสภาพถนนทางตรง และทางโค้ง ไม่มีจุดหยุดนิ่งของรถ ในช่วงเวลาเดียวกันระยะทาง 5 km

ในการเก็บข้อมูลโดยเชื่อมต่อกับอุปกรณ์แสดงพิกัดตำแหน่ง GPS Tracker ได้ติดตั้งไว้บริเวณด้านบนของหลังคาของรถตั้งค่าการเก็บข้อมูลความเร็วรถทุกๆ 1 วินาที ก่อนเริ่มต้นจัดเก็บข้อมูลใช้เวลาเก็บข้อมูล 1,200 วินาที เมื่อเก็บข้อมูลครบทั้ง 3 ครั้งในแต่ละเส้นทาง นำข้อมูลที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยความเร็วแล้วจึงนำไปแสดงผลเป็นวัฏจักรการขับขี่

3) การทดสอบด้านสมรรถนะการขับขี่จะทดสอบเฉพาะในสภาวะวัฏจักรการขับขี่แบบที่ 1 เท่านั้นเนื่องจาการถออกแบบเพื่อใช้งานภายในสถาบันเป็นหลัก โดยรถขับแบบไม่ใช้เกียร์และแบบใช้เกียร์ ด้านสมรรถนะการขับขี่ พิจารณาจากในแง่ของ อัตราเร่ง ความสามารถในการขึ้นทางชัน ความเร็วสูงสุด และ ทดสอบหาน้ำหนักสูงสุดที่รถยังคงสามารถวิ่งได้ในทางราบ

4) การทดสอบความสิ้นเปลืองพลังงานและระยะทางที่รถวิ่งสูงสุด จะทำการวิ่งทดสอบจนระดับพลังงานที่เหลืออยู่ในแบตเตอรี่ (State of Charge) ลดลงเหลือ 10 เปอร์เซ็นต์ ใช้วัฏจักรการขับขี่ในแบบที่ 1 และ แบบที่ 2 โดยรถขับแบบไม่ใช้เกียร์และแบบใช้เกียร์ เก็บข้อมูลจำนวน 3 ครั้ง ในสภาพแวดล้อมที่ใกล้เคียงกัน อุณหภูมิเฉลี่ยไม่เกิน 30 องศา ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ 60-70%

3. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

3.1 ข้อมูลจากการคำนวณหาขนาดต้นกำลังมอเตอร์

จากข้อมูลทั่วไปที่ใช้ในการออกแบบรถในตารางที่ 1 นำมาคำนวณหาแรงต้านทานการเคลื่อนที่ของรถทั้งหมดและคำนวณหาพิกัดมอเตอร์ให้ได้ข้อมูลจากสมการการคำนวณต่าง ๆ ที่ผ่านมาย่างต้นนำมาแสดงในตารางที่ 2 และแสดงตัวอย่างการคำนวณดังนี้

แรงบิดการหมุนล้อทั้งหมด จากสมการที่ (6) $T_w = 3,020 \text{ N} \times 0.3165 \text{ m} \times 1.1 = 1,051.6 \text{ N.m}$

กำลังที่ใช้ขับเคลื่อน จากสมการที่ (7) $P_e = 1,051.6 \text{ N.m} \times 3.72 \text{ rad/s} = 32.2 \text{ kW}$

กำลังที่ใช้ขับเคลื่อน จากสมการที่ (8) $P_m = 32.2 \text{ kW} / 4.29 = 7.67 \text{ kW}$ โดยคิดเฉพาะอัตราทดเฟืองท้าย 4.29 จากตารางที่ 1 กรณีที่ต้องการใช้กำลังสูงสุดแบบไม่ใช้เกียร์ นำไปสู่การเลือกพิกัดมอเตอร์ที่เหมาะสมได้ 7.67 kW แต่ขนาดดังกล่าวไม่มีจำหน่ายในท้องตลาดจึงเลือกมอเตอร์พิกัด 10 kW ชนิด BLDC 72 V เมื่อได้พิกัดมอเตอร์ที่ต้องการนำมาคำนวณหาขนาดความจุของแบตเตอรี่ลิเทียมฟอสเฟตโดยใช้สมการที่ (11) แสดงตัวอย่างการคำนวณดังนี้

ขนาดแบตเตอรี่ $B_v = (10,000 \text{ W} \times 0.5 \text{ hr}) / 72 \text{ V} = 69.4 \text{ Ah}$

โดยกำหนดระยะทางที่ใช้ในการวิ่งภายในสถาบัน 10 km ใช้เวลาประมาณไม่เกิน 0.5 ชั่วโมง ในการวิ่งแต่ละรอบทำให้ได้แบตเตอรี่ขนาด 69.4 Ah ตามผลการคำนวณข้างต้น แต่ผู้วิจัยได้เลือกแบตเตอรี่ขนาด 7.2 kW.hr 100 Ah แรงดัน 72 V ที่มีจำหน่ายในท้องตลาดทั่วไป

ตารางที่ 2 ข้อมูลที่ได้จากการคำนวณ

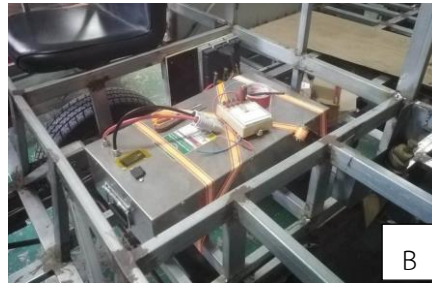
รายการคำนวณ	สัญลักษณ์	ผลการคำนวณ
1. แรงต้านทานจากอากาศ	F_w	42.5 N
2. แรงต้านทานจากการหมุนของยาง	F_{rr}	266.6 N
3. แรงต้านทานจากน้ำหนักรถขณะขึ้นถนนชัน	F_g	1,966.4 N
4. แรงต้านทานเกิดจากแรงเฉื่อยของรถยนต์เมื่อเร่งเครื่อง	F_a	745.2 N
5. แรงต้านทั้งหมด	F_{tt}	3,020 N
6. แรงบิดการหมุนล้อทั้งหมด	T_w	1,051.6 N.m
7. กำลังที่ใช้ขับเคลื่อนโดยไม่ใช้อัตราทดเกียร์และเฟืองท้าย	P_e	32.2 kW
8. กำลังที่ใช้ในการขับเคลื่อนผ่านอัตราทดเกียร์และเฟืองท้าย	P_m	7.67 kW
9. พิกัดมอเตอร์ที่เลือก ชนิด BLDC 72 V	-	10 kW
10. ขนาดแบตเตอรี่	B_v	100 Ah



รูปที่ 3 การติดตั้งมอเตอร์ไฟฟ้าเข้ากับตัวรถ: ไม่ใช้เกียร์ (A) และ ใช้เกียร์ (B)

จากนั้นนำข้อมูลขนาดมอเตอร์และแบตเตอรี่มาออกแบบติดตั้งลงในตัวรถบริเวณใต้ที่นั่งคนขับรถแสดงดังรูปที่ 4B โดยมอเตอร์ต้นกำลังจะมีการเชื่อมต่อกับระบบส่งกำลังในสองลักษณะคือ แบบที่ 1 ไม่ใช้เกียร์โดยการใช้ต้นกำลังมอเตอร์ขับผ่านเพลากลางส่งกำลังไปยังชุดเฟืองท้ายแสดงดังรูปที่ 3A และ แบบที่ 2 ใช้เกียร์โดยใช้ต้นกำลังมอเตอร์เชื่อมต่อกับเกียร์ที่มี 3 อัตราทด ผ่านเพลากลางไปยังชุดเฟืองท้าย แสดงดังรูปที่ 3B

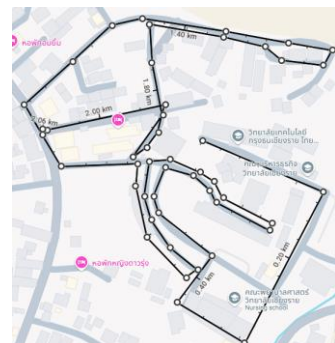
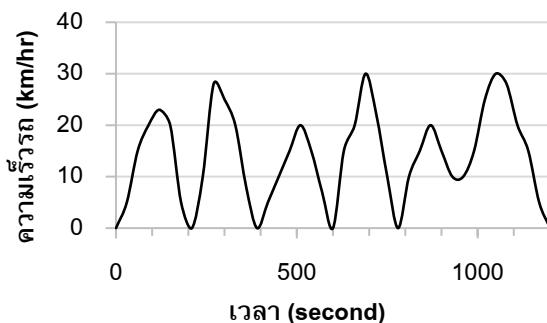
เมื่อดำเนินการติดตั้งมอเตอร์ แบตเตอรี่ และระบบควบคุมการทำงานของรถเสร็จเรียบร้อยแล้ว จึงทำการประกอบตัวถังรถ แก้อี้นั่ง หลังคา และกระจกด้านหน้ารถ แสดงรายละเอียดดังรูปที่ 4A จากนั้นจึงนำรถไปทดสอบตามเงื่อนไขสภาวะต่าง ๆ โดยเริ่มต้นด้วยการชั่งน้ำหนักรถเปล่า ไม่มีผู้โดยสาร และ บรรทุกผู้โดยสารเต็มพิกัดจำนวน 15 คน มีน้ำหนัก 1,050 kg และ 1,850 kg ตามลำดับ ซึ่งน้ำหนักบรรทุกเป็นไปตามที่ได้ออกแบบไม่เกิน 2,000 kg



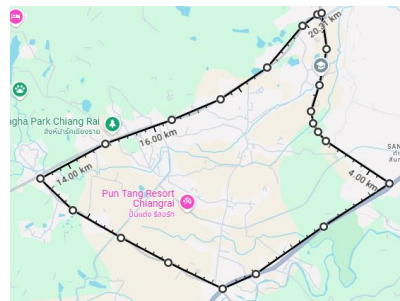
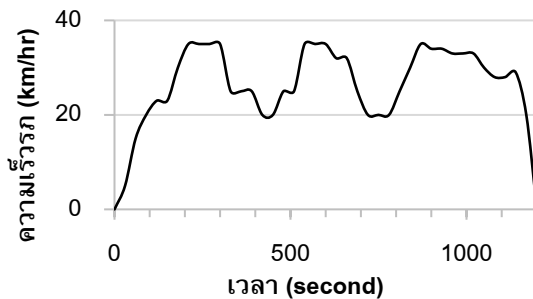
รูปที่ 4 รถรับส่งนักศึกษาในโครงการวิจัย (A) และ การติดตั้งแบตเตอรี่ (B)

3.2 วิจัยการขับขี่

จากการนำรถวิ่งทดสอบโดยบรรทุกผู้โดยสารเต็มพิกัด 15 คน ด้วยการเชื่อมต่อต้นกำลังมอเตอร์แบบใช้เกียร์ เพื่อศึกษาวิจัยการขับขี่ในเส้นทางภายในสถาบันและด้านนอกสถาบัน ทำให้ได้วิจัยการขับขี่เส้นทางนอกพื้นที่สถาบันแสดงดังรูปที่ 5 มีสภาพการจราจรไม่หนาแน่น ใช้เวลาเก็บข้อมูล 1,200 วินาที รถใช้ความเร็วเฉลี่ยอยู่ที่ 31 km/hr ทำความเร็วสูงสุดได้ 35.5 km/hr ในส่วนการขับขี่รถภายในพื้นที่ของสถาบันมีวิจัยการขับขี่แสดงดังรูปที่ 6 รถใช้ความเร็วเฉลี่ยอยู่ที่ 18 km/hr ทำความเร็วสูงสุดได้ 30 km/hr เนื่องจากพื้นที่มีสภาพถนนทางโค้ง ตัวชะลอความเร็วการจราจรหนาแน่น ทำให้รถทำความเร็วสลับกับหยุดนิ่งรถจึงไม่สามารถทำความเร็วสูงสุด



รูปที่ 5 วิจัยการขับขี่แบบที่ 1



รูปที่ 6 วัฏจักรการขับเคลื่อนแบบที่ 2

3.3 การทดสอบสมรรถนะการขับขี่

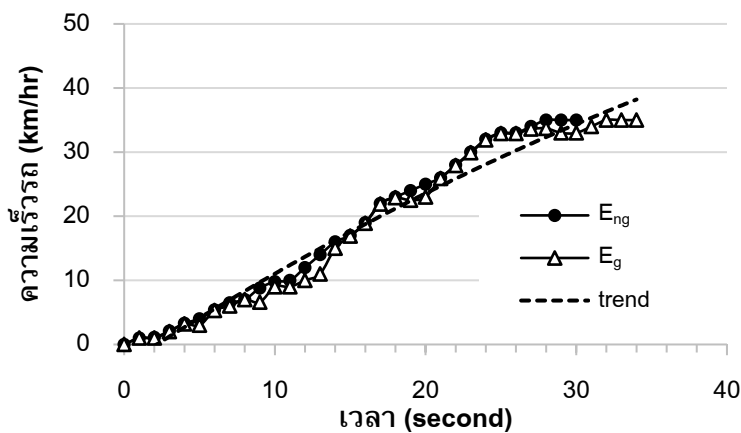
จากการทดสอบสมรรถนะวัฏจักรการขับที่แบบที่ 1 ตามลักษณะการเชื่อมมอเตอร์กับระบบส่งกำลังแบบไม่ใช้เกียร์กับแบบที่ใช้เกียร์แสดงข้อมูลดังในตารางที่ 3 พบว่ารถที่ไม่ใช้เกียร์สามารถทำระยะทางสูงสุดที่รถวิ่งได้ต่อการชาร์จประจุแบตเตอรี่ 1 ครั้งความจุ 100 เปอร์เซนต์ เมื่อรถบรรทุกน้ำหนักเต็มพิกัดรถสามารถวิ่งได้ระยะสูงสุด 18.6 km มีความเร็วสูงสุด 34 km/hr และขึ้นทางชันได้สูงสุด 11 องศา และเมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลการออกแบบด้านความเร็วสูงสุดได้ต่ำกว่าที่ออกแบบไว้ที่ 35 km/hr ซึ่งอาจเกิดจากแรงต้านทานการหมุนของล้อสัมผัสระหว่างยางกับผิวถนนคอนกรีต ซึ่งขณะออกแบบได้ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ของถนนลาดยางมะตอยอาจน้อยกว่าถนนคอนกรีตเล็กน้อยจึงทำให้ความเร็วรถลดลงจากที่ออกแบบ ส่วนมุมทางชันทำได้ใกล้เคียงกับที่ได้ออกแบบไว้ 10 องศา

ตารางที่ 3 ข้อมูลการทดสอบสมรรถนะวัฏจักรการขับเคลื่อนแบบที่ 1

ลักษณะ การใช้งาน	สภาวะ บรรทุก	การขึ้น ทางชัน (องศา)	ระยะ ทางการวิ่ง (km)	ความเร็ว สูงสุด (km/hr)	พลังงาน ไฟฟ้าที่ใช้ (kW.hr)	อัตราความ สิ้นเปลือง พลังงาน (Wh/km)	น้ำหนัก สูงสุด (kg)
ไม่ใช้ เกียร์	NL	17	26.2	43	5.4	206	1,200
	FL	11	18.6	34	6.2	322	
ใช้เกียร์	NL	23	25.3	45	6.1	241	1,800
	FL	15	20.4	37	5.4	293	

หมายเหตุ: NL คือ ไม่มีน้ำหนักบรรทุก, FL คือ บรรทุกเต็มพิกัด

ในส่วนของการเชื่อมต่อมอเตอร์แบบที่ใช้เกียร์รถสามารถวิ่งได้ระยะสูงสุด 20.4 km มีความเร็วสูงสุด 37 km/hr และขึ้นทางชันได้สูงสุด 15 องศา ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบการเชื่อมต่อมอเตอร์ทั้ง 2 แบบพบว่ารถที่มีการเชื่อมต่อมอเตอร์แบบใช้เกียร์รถสามารถทำความเร็วและระยะทางที่วิ่งได้ไกลกว่ารวมไปถึงมีความสามารถขึ้นทางชันได้ดีกว่าเนื่องจากคนขับรถสามารถปรับเปลี่ยนอัตราทดให้เหมาะสมกับความเร็วของรถ เนื่องจากผู้ขับสามารถใช้เกียร์ 1 ขณะรถออกตัว และใช้เกียร์ 2 และ 3 ในความเร็วถัดไป รวมไปถึงการขึ้นทางชันได้มากกว่าเพราะสามารถใช้เกียร์ 1 ที่อัตราทดสูงจึงส่งผลให้มอเตอร์มีแรงบิดเพียงพอในการขับเคลื่อนรถไปข้างหน้าได้และยังสามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้สูงสุด 1800 kg ซึ่งมากกว่ารถไม่ใช้เกียร์ที่ไม่สามารถปรับเปลี่ยนอัตราทดได้



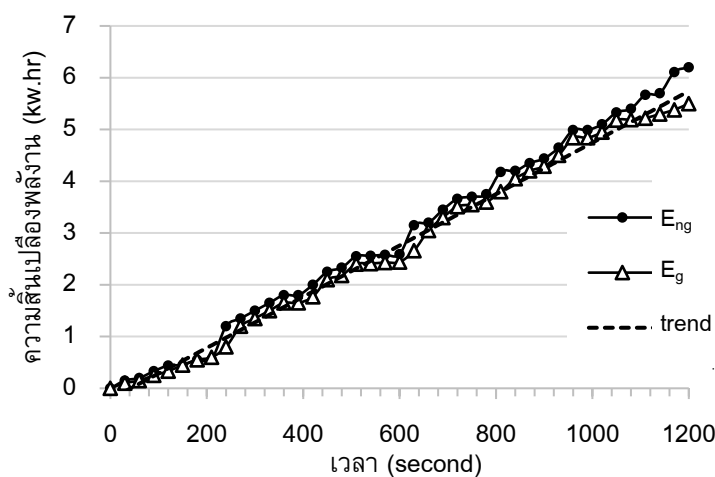
รูปที่ 7 การทดสอบอัตราเร่งของรถ

จากการทดสอบอัตราเร่งของรถที่บรรทุกเต็มพิกัดจากความเร็วเริ่มต้นเป็นศูนย์จนถึงความเร็ว 35 km/hr พบว่ารถที่ไม่ใช้เกียร์ใช้เวลา 30 วินาที ส่วนรถที่ใช้เกียร์ใช้เวลา 35 วินาที ซึ่งการใช้เวลามากกว่าเนื่องจากรถจะต้องมีการเปลี่ยนเกียร์จากอัตราทดที่ 1-3 ซึ่งในขณะที่มีการเปลี่ยนอัตราทดจะสูญเสียความเร็วช่วงเวลา 10, 18 และ 25 วินาที ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่รถเปลี่ยนเกียร์แสดงให้เห็นดังรูปที่ 7 แต่เมื่อเทียบกับข้อมูลการออกแบบพบว่าอัตราเร่งของรถทำได้ต่ำกว่าค่าการออกแบบที่ใช้เวลา 20 วินาที ในการทำความเร็วจาก 0-35 km/m อาจเกิดจากระบบส่งกำลังที่นำมาใช้เป็นของเก่าผ่านการใช้งานมานานทำให้มีค่าแรงเสียดทานสูงกว่าปกติ

3.4 การทดสอบอัตราความสิ้นเปลืองพลังงาน

การทดสอบความสิ้นเปลืองพลังงานกรณีใช้เส้นทางวัฏจักรการขับแบบที่ 1 แสดงดังรูปที่ 8 เป็นการขับแบบมีภาระน้ำหนักเต็มพิกัดโดยศึกษาเปรียบเทียบกันระหว่างการเชื่อมต่อมอเตอร์แบบที่ไม่ใช้เกียร์ (E_{ng}) กับแบบใช้เกียร์ (E_g) พบว่ารถที่ไม่ใช้เกียร์ใช้พลังงานไปทั้งหมด 6.2 kW.hr

มากกว่ารถที่ใช้เกียร์ที่มีความสิ้นเปลืองพลังงานอยู่ที่ 5.4 kW.hr เนื่องจากการขับที่วัฏจักรการขับที่แบบที่ 1 มีการขับที่วิ่งสลับการหยุดจอดเป็นช่วง ๆ แสดงวัฏจักรการขับที่ดังรูปที่ 5 ทำให้รถที่ใช้อัตราทดเดียวไม่สามารถปรับอัตราทดช่วยในการออกตัวในแต่ละครั้งได้ซึ่งการออกตัวจากสภาวะหยุดนิ่งแต่ละครั้งรถจะต้องใช้พลังงานในการขับเคลื่อนมอเตอร์สูงกว่าขณะใช้ความเร็วคงที่ซึ่งจะสังเกตได้จากความสิ้นเปลืองพลังงานในรูปการขับที่ดังรูปที่ 8 ที่เวลา 220, 600, 880 วินาที เป็นจุดที่รถออกตัวจากการจอด กราฟจะมีความชันเพิ่มอย่างเห็นได้ชัด จึงทำให้รถกินพลังงานมากกว่าแบบที่ใช้เกียร์

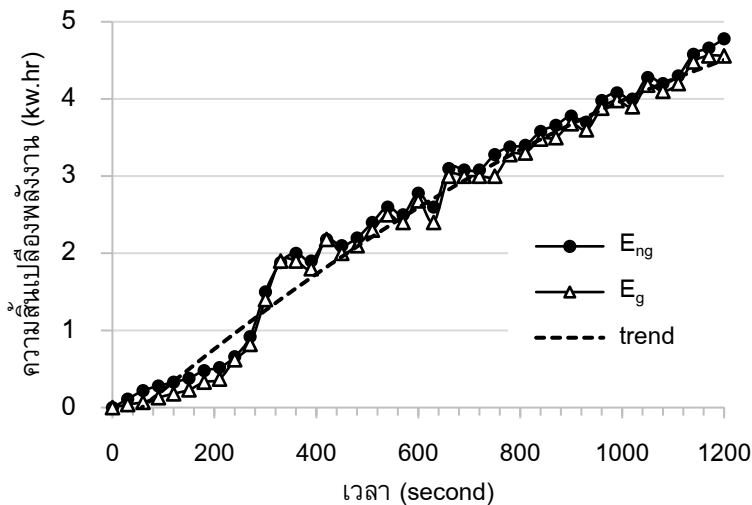


รูปที่ 8 ความสิ้นเปลืองพลังงานวัฏจักรการขับที่แบบที่ 1

การพิจารณาในแง่อัตราความสิ้นเปลืองพลังงานโดยพิจารณาจากพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ไป ต่อหนึ่งหน่วยระยะทางที่รถสามารถวิ่งได้ (Wh/km) พบว่ารถที่บรรทุกน้ำหนักเต็มพิกัดขับผ่านชุดเกียร์มีอัตราความสิ้นเปลืองพลังงานอยู่ที่ 293 Wh/km น้อยกว่ารถที่ไม่ใช้เกียร์แต่เมื่อเปรียบเทียบกับยานยนต์ไฟฟ้าที่จำหน่ายในท้องตลาดปัจจุบันโดยปกติแล้วอยู่ที่ 166-208 Wh/km ซึ่งรถจากงานวิจัยจะมีอัตราการใช้พลังงานสูงกว่าอาจเนื่องมาจากข้อจำกัดการออกแบบ วัสดุที่ใช้ประสิทธิภาพของอุปกรณ์

กรณีใช้เส้นทางวัฏจักรการขับที่แบบที่ 2 แสดงดังรูปที่ 9 เป็นการขับแบบมีภาระน้ำหนักเต็มพิกัดโดยศึกษาเปรียบเทียบกันระหว่างการเชื่อมต่อมอเตอร์แบบไม่ใช้เกียร์กับแบบใช้เกียร์พบว่ารถจะใช้พลังงานมากในช่วงแรกของการออกตัวในช่วง 0-200 วินาที และเมื่อใช้เวลา 1,200 วินาที ซึ่งรถที่ไม่ใช้เกียร์ใช้พลังงานไปทั้งหมด 4.8 kW.hr ใกล้เคียงกับรถที่ใช้เกียร์ที่มีความสิ้นเปลืองพลังงานอยู่ที่ 5.1 kW.hr เนื่องจากการวัฏจักรการขับที่แบบที่ 2 มีการขับที่วิ่งที่มีความเร็วรถ

สมมติว่าไม่มีจุดหยุดนิ่งแสดงวัฏจักรดังรูปที่ 6 ทำให้รถที่ใช้อัตราทดเดียวสามารถรักษาความเร็วได้ดีไม่ต้องใช้พลังงานในการออกตัวในแต่ละครั้ง



รูปที่ 9 ความสิ้นเปลืองพลังงานวัฏจักรการขับที่แบบที่ 2

จากการทดสอบการใช้งานแบตเตอรี่แบบเตอรี่ลิเทียมฟอสเฟตขนาด 7.2 kW.hr 100 Ah แรงดัน 72 V โดยการชาร์จเต็ม 100 เปอร์เซ็นต์เป็นเวลา 3 ชั่วโมง พบว่ารถไม่ใช้เกียร์และไม่มีน้ำหนักบรรทุกจะวิ่งได้ระยะทางสูงสุด 26.2 km มีระยะทางการวิ่งได้มากกว่ารถบรรทุกเต็มพิกัดที่วิ่งได้ 18.6 km ทั้งนี้เนื่องจากกรณีที่บรรทุกน้ำหนักเต็มพิกัดขณะวิ่งทดสอบตัวมอเตอร์ไฟฟ้าจะต้องใช้พลังงานมากกว่าและกินกระแสสูงกว่ามีการดึงพลังงานจากแบตเตอรี่ไปใช้มากกว่าจึงทำให้รถวิ่งได้ระยะทางน้อยกว่า และเมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลการออกแบบพบว่ารถใช้ระยะทางวิ่งได้สูงสุด 26.2 km ใช้เวลา 28 นาที ใช้เวลาได้น้อยกว่าการออกแบบที่ 30 นาที ซึ่งอาจเกิดจากแรงต้านทานอากาศและแรงเสียดทานของระบบส่งกำลังที่มากกว่าค่าที่ออกแบบ

4. สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาออกแบบรถรับส่งนักศึกษาโดยการคำนวณจากข้อมูลจำเพาะของรถทำให้ได้มอเตอร์ไฟฟ้าชนิด BLDC ที่มีขนาดพิกัด 10 kW แรงดันไฟฟ้า 72 V และใช้แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมฟอสเฟต (LiFePO₄) ความจุ 100 Ah แรงดัน 72 V และทำการทดสอบการใช้ต้นกำลังมอเตอร์กับระบบส่งกำลัง จากผลการทดสอบพบว่ารถที่ใช้บรรทุกน้ำหนักเต็มพิกัดใช้ระบบส่งกำลังแบบใช้เกียร์มีประสิทธิภาพการขับในวัฏจักรแบบที่ 1 ในสถาบันดีกว่าระบบส่งกำลังแบบที่ไม่ใช้เกียร์ โดยที่รถแบบใช้เกียร์สามารถขับได้ระยะ 20.4 km มีความเร็วรถ 37 km/hr สิ้นเปลืองพลังงานไป

5.4 kWh เนื่องจากมีเกียร์ช่วยในการขับเคลื่อนตามช่วงความเร็วต่าง ๆ ที่เกิดจากการหยุดจอดเป็นช่วง ๆ ขณะวัฏจักรการขับขี่แบบที่ 1 จึงทำให้ประหยัดพลังงานได้ดีกว่า แต่รถที่ไม่ใช้เกียร์จะประหยัดพลังงานได้ดีกว่าในการขับขี่ในวัฏจักรแบบที่ 2 นอกเขตสถาบันเนื่องจากรถวิ่งในความเร็วสม่ำเสมอไม่มีการจอดหยุดนิ่งและใช้พลังงานน้อยกว่า รวมไปถึงการขับขี่แบบไม่มีน้ำหนักบรรทุกในวัฏจักรการขับขี่แบบที่ 1 รถไม่ใช้เกียร์กินพลังงานน้อยกว่า เนื่องจากรถไม่มีเกียร์มีน้ำหนักน้อยกว่าและไม่มีน้ำหนักบรรทุกทำให้รถมีน้ำหนักรวมต่ำกว่ามาก รถจึงออกตัวได้ง่ายกว่าผู้ขับขี่จึงไม่จำเป็นต้องใช้อัตราทดเกียร์ช่วยขณะออกตัวเป็นข้อดีสบายกว่าไม่ต้องเปลี่ยนเกียร์บ่อย

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัทอุตสาหกรรมท่อน้ำไทยจำกัด และ วิทยาลัยเชียงราย ที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัยในครั้งนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

References

- [1] Office of Industrial Economics. Documents for the 1st Morning Talk seminar: Report on the situation of the modern automotive industry towards the goal of a sustainable economy, the situation of electric vehicles. Bangkok, Thailand: Office of Industrial Economics; 2023. (In Thai)
- [2] Mali A, Shukla A, Husain A, Hole K, Edake V. Design and analysis of powertrain for electric vehicle. International Research Journal of Engineering and Technology. 2021;8(8):1222-42.
- [3] Tomar V, Chitra A, Krishnachaitanya D, Raghavendra Rao NS, Indragandhi V, Raziasultana W. Design of powertrain model for an electric vehicle using MATLAB/Simulink. Proceedings of the 2021 Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT); 2021 Nov 27-29; Kuala Lumpur, Malaysia. p. 1-7.
- [4] Güneş MT, Dalcali A, Öztürk T, Ocak C, Cernat M. An induction motor design for urban use electric vehicle. Proceedings of the 2016 International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC); 2016 Sep 25-28; Varna, Bulgaria. p. 261-66.
- [5] Verbruggen R, Rangarajan V, Hofman T. Powertrain design optimization for a battery electric heavy-duty truck. Proceedings of 2019 American Control Conference; 2019 Jul 10-12; Philadelphia, USA. p. 1488-93.
- [6] Ludui M, Khobkhan P, Kunkiang V, Pothi N. Design and development of prototype electric vehicle. Journal of Science, Engineering and Technology 2021;1(1):19-29. (In Thai)

- [7] Jensanyayut T. Design of a small electric vehicle for the elderly [Master of Engineering]. Pathum Thani, Thailand: Rajamangala University of Technology Thanyaburi; 2020. (In Thai)
- [8] Monatrakul W, Thirasuwan W, Hemarat P. Design of the utility electrical tricycle vehicle. Proceeding of the 28th Conference of The Mechanical Engineering Network of Thailand; 2014 Oct 15-17; Khon Kaen, Thailand. p. 485-92. (In Thai)
- [9] Suksing P, Trapsingh W. Design and build a driverless miniature electric train guiding control system. Proceeding of the 15th Conference on Energy Network of Thailand; 2011 May 3-5; Phuket, Thailand. p. 361-72. (In Thai)
- [10] Ruangrunghchaikul T, Aumkratum S. Multipurpose three wheel solar mini truck. Thai Journal of Science and Technology 2022;8(2):200-11. (In Thai)
- [11] Sittiritkawin P, Yodkhad P, Saengnual S, Khuanlieng W. Development of power unit connection set from electric motor for use in a Tuk Tuk electric vehicle. Proceeding of the 5th National Conference on Science and Technology of Thailand; 2021 Jan 15-16; Nonthaburi, Thailand. p. 224-35. (In Thai)

ประวัติผู้เขียนบทความ



ภักดี สิทธิฤทธิ์ภักวิน ตำแหน่ง อาจารย์ประจำหลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกล (สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล) คณะวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาลัยเชียงราย เลขที่ 199 ม.6 ต.ป่าอ้อดอนชัย อ.เมือง จ.เชียงราย 57000 โทรศัพท์ 086-3023878 Email: pakdee.me@gmail.com
งานวิจัยที่สนใจ: ด้านพลังงานความร้อนจากเตาเผาขยะ และยานยนต์ไฟฟ้า



กาจ อัมบุญอาบ ตำแหน่ง อาจารย์ประจำหลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกล (สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล) คณะวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาลัยเชียงราย เลขที่ 199 ม.6 ต.ป่าอ้อดอนชัย อ.เมือง จ.เชียงราย 57000 โทรศัพท์ 092-993077 Email: Kaj.me@gmail.com
งานวิจัยที่สนใจ: วิศวกรรมยานยนต์

Article History:

Received: August 29, 2024

Revised: December 18, 2024

Accepted: December 19, 2024

ผลกระทบของเครื่องหมายจราจรบนพื้นทางไม่ชัดเจนต่อพฤติกรรมการขับขี่
กรณีศึกษา: งานก่อสร้างบนทางหลวงหมายเลข 35

THE EFFECT OF UNCLEAR ROAD MARKINGS TO DRIVING BEHAVIOR
CASE STUDY: CONSTRUCTION PROJECT ON HIGHWAY NO.35

พรณรงค์ เลื่อนเพชร¹ อาทิตยา นิมอนงค์² สุหฤท มาศเมฆ³ และ ภาวัด ไชยชาณวาทิก⁴

¹อาจารย์, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร,

1381 ถนนประชากรราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กทม. 10800, pornnarong.l@rmutp.ac.th

²อาจารย์, คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
วิทยาเขตอุเทนถวาย, 225 ถ.พญาไท แขวงปทุมวัน เขตปทุมวัน กทม. 10330, atittaya_ni@rmutto.ac.th

³วิศวกรขนส่งอาวุโส, บริษัท ทรานส์โค้ด จำกัด, 999/29 ถนนศรีวิรา แขวงพลับพลา เขตวังทองหลาง
กทม. 10310, masmek.stb@gmail.com

⁴อาจารย์, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต, 1761 ถนนพัฒนาการ แขวงพัฒนาการ
เขตสวนหลวง กทม. 10250, bhawat.cha@kbu.ac.th

Pornnarong Lueanpech¹, Atittaya Nimanong², Suharit Masmek³ and Bhawat Chaichannawatik⁴

¹Lecturer, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon,
1381 Pracharat 1 Rd., Wongsawang, Bangsue, Bangkok 10800, Thailand,
pornnarong.l@rmutp.ac.th

²Lecturer, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Tawan-ok,
Uthenthawai Campus, 225 Phayathai Rd., Pathumwan, Bangkok, 10330, Thailand,
atittaya_ni@rmutto.ac.th

³Senior Transport Engineer, Transcode Co.,Ltd, 999/29 Srivara Rd., Phlabphla, Wang
Thonglang, Bangkok 10310, Thailand, masmek.stb@gmail.com

⁴Assistant Professor, Faculty of Engineering, Kasem Bundit University,
1761 Phatthanakan Rd., Phatthanakan, Suan Luang, Bangkok 10250, Thailand,
bhawat.cha@kbu.ac.th

บทคัดย่อ

การก่อสร้างโครงการก่อสร้างทางหลวงพิเศษระหว่างเมืองหมายเลข 82 (M82) ช่วงบางขุนเทียน-
บ้านแพ้ว ตามรูปแบบที่กำหนดจะเป็นการดำเนินการก่อสร้างบริเวณพื้นที่เกาะกลางเดิมของถนน

พระราม 2 และ ปรับปรุงเครื่องหมายจราจรบนพื้นทางเพื่อป้องกันความสับสนของผู้ขับขี่ แต่เนื่องจากการดำเนินงานปรับปรุงในบางช่วงของพื้นที่ก่อสร้างยังไม่สมบูรณ์ ส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมการขับขี่ของผู้ใช้ทาง การศึกษามีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินผลกระทบต่อพฤติกรรมการขับขี่ที่เกิดขึ้นจากเครื่องหมายจราจรบนพื้นทางที่ไม่ชัดเจนโดยเฉพาะในพื้นที่ก่อสร้าง โดยการเปรียบเทียบพฤติกรรมการขับขี่ในพื้นที่ก่อสร้างบนทางหลวงหมายเลข 35 ระหว่างบริเวณที่มีเครื่องหมายจราจรบนพื้นทางไม่ชัดเจน (กม.32+700 ขาเข้ากรุงเทพฯ) และ บริเวณที่มีเครื่องหมายจราจรบนพื้นทางปกติ (กม.15+500 ขาเข้ากรุงเทพฯ) ด้วยการประเมินอัตราการไหลของกระแสจราจร พฤติกรรมการใช้ความเร็วของยานพาหนะ และ ตำแหน่งของยานพาหนะในช่องจราจร ผลการเปรียบเทียบอัตราการไหลของกระแสจราจรสามารถสรุปได้ว่าในบริเวณพื้นที่เครื่องหมายจราจรบนพื้นทางปกติ สามารถระบายการจราจรได้มากกว่าบริเวณพื้นที่เครื่องหมายจราจรบนพื้นทางไม่ชัดเจน การเปรียบเทียบพฤติกรรมการใช้ความเร็วของยานพาหนะ พบว่า ในบริเวณพื้นที่เครื่องหมายจราจรบนพื้นทางปกติ ยานพาหนะสามารถทำความเร็วได้มากกว่าบริเวณพื้นที่เครื่องหมายจราจรบนพื้นทางไม่ชัดเจน โดยเฉพาะในช่วงนอกชั่วโมงเร่งด่วน แต่เมื่อพิจารณาในช่วงชั่วโมงเร่งที่มีการจราจรหนาแน่น พบว่า พฤติกรรมการความเร็วของยานพาหนะทั้ง 2 พื้นที่มีค่าใกล้เคียงกัน สำหรับการเปรียบเทียบอัตราการเปลี่ยนช่องจราจร สามารถสรุปได้ว่า ในช่วงเวลาที่มีความหนาแน่นน้อย อัตราการเปลี่ยนช่องจราจรบริเวณพื้นที่เครื่องหมายจราจรบนพื้นทางไม่ชัดเจนจะเกิดขึ้นค่อนข้างสูง สำหรับอัตราการขับขี่คร่อมช่องจราจรและทับเครื่องหมายจราจรบนพื้นทางพบว่าบริเวณพื้นที่เครื่องหมายจราจรบนพื้นทางไม่ชัดเจนมีอัตราการขับขี่คร่อมช่องจราจรและทับเครื่องหมายจราจรบนพื้นทางมากกว่าบริเวณพื้นที่เครื่องหมายจราจรบนพื้นทางปกติ ผลการศึกษาชี้ให้เห็นถึงอิทธิพลของเครื่องหมายจราจรบนพื้นทางที่มีต่อพฤติกรรมการขับขี่ภายในพื้นที่ก่อสร้าง ซึ่งผลลัพธ์สามารถนำไปสู่ข้อเสนอแนะในการควบคุมงานก่อสร้างให้เป็นไปตามมาตรฐาน เพื่อให้สามารถบริหารจัดการจราจรระหว่างก่อสร้างได้อย่างมีประสิทธิภาพ ลดโอกาสการเกิดอุบัติเหตุ

คำสำคัญ: พื้นที่ก่อสร้าง, เครื่องหมายจราจรบนพื้นทางไม่ชัดเจน, เครื่องหมายจราจรบนพื้นทางปกติ, อิทธิพล, พฤติกรรมการขับขี่

ABSTRACT

The construction of the elevated motorway no.82 (M82) between Bang Khun Thian and Ban Paeo is currently underway, utilizing the existing central median of Rama II Road as a construction zone. While traffic marking modifications have been implemented to mitigate driver confusion, some areas are still under improvement, which has led to disruptions in traffic flow and altered driver behavior. The purpose of this study was to assess how driving

behavior is affected by unclear road markings, especially in areas under construction. The study investigated the influence on traffic flow rate, vehicle speed, and lateral position by contrasting driving behavior in work zones on Highway 35 between the section with unclear road markings (km 32+700 Bangkok-bound) and a section with typical road markings (km 15+500 Bangkok-bound). Traffic flow rates were examined, and it was found that sections with typical road markings provided more significant traffic flow rates than sections with unclear road markings. Vehicle speed assessments revealed that vehicles in sections with typical road markings might travel at higher speeds, especially during off-peak periods. On the other hand, both sections' vehicle speed behavior was consistent during peak periods when traffic was heavy. In regards to the lane-changing behavior, the study demonstrated that there was a comparatively high rate of lane-changing in the section with unclear road markings during periods of low traffic density. The sections with unclear road markings also exhibited greater rates of lane crossing compared to the typical road markings section. The study's findings demonstrate how road markings influence drivers' behaviors once traveling in construction areas. The outcomes can be utilized to provide recommendations to coordinate construction activities in compliance with standards, facilitate efficient traffic control during construction, and reduce the risk of accidents.

KEYWORDS: Work Zone, Unclear Road Markings, Typical Road Markings, Influence, Driving Behavior

1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากการก่อสร้างโครงการก่อสร้างทางหลวงพิเศษระหว่างเมืองหมายเลข 82 (M82) ช่วงบางขุนเทียน-บ้านแพ้ว ซึ่งตามรูปแบบที่กำหนดจะเป็นการดำเนินการก่อสร้างบริเวณพื้นที่เกาะกลางเดิมของถนนพระราม 2 จึงมีความจำเป็นต้องกันแนวเพื่อแบ่งแยกพื้นที่ก่อสร้าง และดำเนินการปรับเครื่องหมายจราจรบนพื้นทางใหม่ เพื่อป้องกันอุบัติเหตุที่เกิดขึ้นจากความสับสนของผู้ขับขี่ อย่างไรก็ตาม มาตรฐานการบำรุงรักษาเครื่องหมายจราจรบนพื้นทาง สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร [1] แนะนำไว้ว่าหากมีความจำเป็นต้องดำเนินการแก้ไขซ่อมแซม ก็ควรจะต้องดำเนินการซ่อมแซมหรือปรับแต่งให้อยู่ในสภาพที่ใช้งานปกติโดยไม่รื้อซ้ำ ทั้งนี้ โดยปกติการดำเนินงานในพื้นที่ก่อสร้างมักจะใช้วิธีการหลบเส้นหรือทาสีทับเครื่องหมายเดิมให้สะอาด ก่อนที่จะดำเนินการตีเส้นเครื่องหมายจราจรใหม่ให้ชัดเจน แต่เนื่องจากการเลือกใช้ผลิตภัณฑ์ของผู้รับจ้าง สภาพอากาศ และเหตุสุดวิสัยต่าง ๆ ทำให้ไม่สามารถควบคุมคุณภาพของ

เครื่องหมายจราจรบนพื้นทางได้อย่างสมบูรณ์ ทำให้เกิดเหตุการณ์เครื่องหมายจราจรบนพื้นทางไม่ชัดเจนในบางช่วงของพื้นที่ก่อสร้าง ซึ่งก่อให้เกิดความสับสนต่อผู้ขับขี่ และมีโอกาสก่อให้เกิดอุบัติเหตุร้ายแรง โดยเฉพาะผู้ขับขี่ที่ไม่ชินเส้นทาง เครื่องหมายจราจรบนพื้นทางเป็นองค์ประกอบสำคัญของความปลอดภัยและประสิทธิภาพของการจราจร เนื่องจากสัญลักษณ์เหล่านี้ช่วยให้ผู้ขับขี่คนเดินเท้า และ ผู้ใช้รถใช้ถนนสามารถเดินทางได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบมาตรฐานเครื่องหมายจราจรระหว่างสหรัฐอเมริกา สหภาพยุโรป และเอเชีย พบว่าสหรัฐอเมริกา ได้จัดทำคู่มือเกี่ยวกับอุปกรณ์ควบคุมการจราจรแบบสากล (Manual on Uniform Traffic Control Devices) ซึ่งเป็นเอกสารอ้างอิงหลักสำหรับมาตรฐานการทำเครื่องหมายจราจร กำหนดขนาด สี และการวางตำแหน่งของเครื่องหมายถนนต่าง ๆ โดยมีเป้าหมายเพื่อให้มั่นใจว่าผู้ใช้ถนนมีความสอดคล้องและชัดเจน ในทางตรงกันข้าม สหภาพยุโรป แต่ละรัฐสมาชิกพัฒนามาตรฐานระดับชาติขึ้นมาเอง ซึ่งมักแตกต่างกันในแง่ของการออกแบบและการดำเนินการ [2] ในทำนองเดียวกัน ทวีปเอเชียประเทศต่าง ๆ เช่น ญี่ปุ่น จีน และอินเดีย ต่างมีแนวปฏิบัติในการทำเครื่องหมายถนนที่เป็นเอกลักษณ์ของตนเอง [3] ปัจจัยในด้านความสามารถในการประยุกต์ใช้มาตรฐานเครื่องหมายจราจรข้ามภูมิภาคจึงมีความสำคัญมากขึ้น ความพยายามในการปรับปรุงมาตรฐานเหล่านี้สามารถช่วยเพิ่มความปลอดภัยบนท้องถนน สามารถรองรับปริมาณจราจรที่เพิ่มขึ้น รวมถึงการบูรณาการระบบขนส่งที่ดีและมีประสิทธิภาพ [2, 4-6]

สำหรับอิทธิพลของเครื่องหมายจราจรที่มีต่อพฤติกรรมการขับขี่ยานพาหนะ การศึกษาของ Diamandouros and Gatscha [7] สรุปไว้ว่าเครื่องหมายจราจรบนพื้นทางที่ปรับปรุงแล้วจะเพิ่มความสะดวกสบายของผู้ขับขี่ โดยเฉพาะผู้ขับขี่สูงอายุ เนื่องจากการมองเห็นเครื่องหมายจราจรที่ดียิ่งขึ้นทำให้เกิดสิ่งกระตุ้นการคาดการณ์ของสภาพแวดล้อมถนน ซึ่งช่วยให้การคาดการณ์และตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงบนท้องถนนข้างหน้าได้ดีขึ้น โดยแม้ว่าการศึกษาจะสังเกตเห็นการเพิ่มขึ้นของความเร็วของผู้ขับขี่ในพื้นที่เครื่องหมายจราจรที่ปรับปรุงแล้ว แต่ก็ไม่ได้ถือว่าเป็นอันตรายต่อความปลอดภัย เนื่องจากการมองเห็นที่เพิ่มขึ้นยังช่วยให้มีเวลาในการดูล่วงหน้ามากขึ้น ทำให้ผู้ขับขี่สามารถตอบสนองต่ออันตรายที่อาจเกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น การศึกษาด้วยเครื่องจำลองการขับขี่เสมือนจริงของ Horberry et al [8] พบว่าเครื่องหมายจราจรบนพื้นทางที่ปรับปรุงแล้วนำไปสู่ผลลัพธ์เชิงบวกหลายประการต่อพฤติกรรมการขับขี่ ประกอบด้วย การรักษาตำแหน่งของยานพาหนะภายในช่องทางได้ดีขึ้น การใช้ความเร็วที่สม่ำเสมอมากขึ้น ความสามารถในการขับขี่เพิ่มขึ้น และ รู้สึกมั่นใจมากขึ้นในการขับขี่อย่างปลอดภัย ซึ่งข้อค้นพบเหล่านี้ชี้ให้เห็นว่าเครื่องหมายจราจรที่ปรับปรุงแล้วสามารถปรับปรุงความปลอดภัยบนท้องถนนได้โดยช่วยการรับรู้ทางสายตาและประสิทธิภาพของผู้ขับขี่ในสภาวะที่มีข้อจำกัด การศึกษาของ Babic and Brijs [9] ซึ่งเป็นการตรวจสอบว่าประสิทธิภาพของเครื่องหมายจราจรบริเวณกึ่งกลางถนนและป้ายเตือนแนวนอน ที่จะมีแนวโน้มส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมการขับขี่ โดยเฉพาะความเร็วก่อนและขณะที่

ยานพาหนะอยู่ในโค้งราบ ผลการศึกษาพบว่าทั้งเครื่องหมายกึ่งกลางถนนและป้ายเตือนแนวนอนเมื่อใช้เพียงอย่างเดียวหรือใช้ร่วมกับป้ายเตือนแนวตั้ง สามารถลดความเร็วในการขับขี่ลงอย่างมีนัยสำคัญ Bosurgi et al [10] ศึกษาถึงบทบาทของเครื่องหมายจราจรบนพื้นทางที่มีความสำคัญพื้นฐานต่อความปลอดภัยในการจราจร เนื่องจากเป็นเครื่องมือในการนำทางเพื่อการขับขี่ที่สำคัญสำหรับทั้งกรณีผู้ขับขี่ยานพาหนะทั่วไปและยานยนต์ไร้คนขับ อย่างไรก็ตาม เมื่อเครื่องหมายจราจรเสื่อมสภาพ ผู้ขับขี่จะชะลอความเร็วเพื่อให้มีความปลอดภัยมากขึ้น

สำหรับกรณีของความไม่ชัดเจนของเครื่องหมายจราจรบนพื้นทางที่สามารถส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมขับขี่ยานพาหนะ การศึกษาของ Davidse et al [11] สรุปไว้ว่าเครื่องหมายจราจรบนพื้นทางที่ไม่ชัดเจนสามารถนำไปสู่ผลกระทบหลายประการต่อพฤติกรรมขับขี่ ประกอบด้วย

- 1) แนวโน้มการใช้ความเร็วที่เพิ่มขึ้น โดยเมื่อเครื่องหมายจราจรมองเห็นได้ยาก ผู้ขับขี่บางกลุ่มอาจชะลอความเร็วลงด้วยการเพิ่มความเร็ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากคุ้นชินกับการขับขี่บนถนนเส้นดังกล่าว

- 2) การเปลี่ยนตำแหน่งภายในช่องจราจร ผู้ขับขี่อาจเปลี่ยนตำแหน่งภายในช่องจราจรขณะขับขี่เข้าใกล้ขอบทางเมื่อเครื่องหมายจราจรไม่ชัดเจน ซึ่งอาจเพิ่มความเสี่ยงของการเกิดอุบัติเหตุ

นอกจากนี้ ผลการศึกษายังระบุว่าความชัดเจนของเครื่องหมายจราจร อาจส่งผลให้ผู้ขับขี่เกิดความประมาท ซึ่งเพิ่มความเสี่ยงของอุบัติเหตุ แต่อย่างไรก็ตาม เครื่องหมายจราจรบนพื้นทางที่ไม่ชัดเจนสามารถส่งผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อพฤติกรรมขับขี่ ซึ่งอาจนำไปสู่การเพิ่มความเสี่ยงของอุบัติเหตุและความปลอดภัยบนท้องถนนที่ลดลง [12]

เมื่อพิจารณาถึงความสัมพันธ์ระหว่างการออกแบบถนนกับพฤติกรรมขับขี่ ซึ่งแสดงให้เห็นข้อมูลเชิงลึกที่เกี่ยวข้องกับการตัดสินใจของผู้ขับขี่ การศึกษาในประเทศเคนยาได้ตรวจสอบความสัมพันธ์ของการออกแบบถนนต่ออุบัติเหตุบนทางหลวง [13] ซึ่งสามารถสรุปถึงทฤษฎีการยุติอุบัติเหตุ (Accident Cessation Theory) โดยให้ความสำคัญไปที่ความสอดคล้องทางเรขาคณิตในการออกแบบทางหลวง ซึ่งเห็นว่าทุกองค์ประกอบควรได้รับการออกแบบให้มีความปลอดภัยที่ความเร็วที่เหมาะสม

สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างเครื่องหมายจราจรบนพื้นทางกับพฤติกรรมขับขี่ของยานพาหนะ ปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งที่มีอิทธิพลคือความชัดเจนของเครื่องหมายจราจรบนพื้นทาง ผู้ขับขี่อาจต้องการมองเห็นเครื่องหมายจราจรเหล่านี้เพื่อรักษาตำแหน่งในช่องจราจร ควบคุมความเร็ว และ คาดการณ์การเปลี่ยนแปลงที่จะเกิดขึ้น การศึกษาพบว่าความชัดเจนและการมองเห็นได้ของเครื่องหมายจราจรสามารถส่งผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อการปฏิบัติตามข้อกำหนดด้านความเร็วและกฎจราจรอื่น ๆ ของผู้ขับขี่ การศึกษาของ Suliman et al [14] พบว่าการมีเครื่องหมายจราจรบนพื้นทางที่ชัดเจนและบำรุงรักษาอย่างดีมีความสัมพันธ์กับอัตราการปฏิบัติตามข้อกำหนดด้านความเร็วที่สูงขึ้น ซึ่งบ่งชี้ว่าการกำหนดข้อกำหนดความเร็วที่น่าเชื่อถือและ

ความชัดเจนของเครื่องหมายจราจรสามารถเป็นกลยุทธ์ที่มีประสิทธิภาพในการปรับปรุงความปลอดภัยบนท้องถนน นอกจากนี้ งานวิจัยยังได้ตรวจสอบผลกระทบของเครื่องหมายจราจรบนพื้นทางต่ออัตราการไหลของยานพาหนะและตำแหน่งของยานพาหนะในช่องจราจร ผลการศึกษาพบว่า การมีเครื่องหมายจราจรบนพื้นทางที่ชัดเจนสามารถช่วยควบคุมการไหลของการจราจรและลดความแปรปรวนในตำแหน่งของยานพาหนะในช่องจราจร โดยข้อจำกัดของการศึกษานี้คือยังไม่ครอบคลุมถึงการใชยานพาหนะแบบอัตโนมัติ [14-16] นอกจากนี้ การศึกษาเพิ่มเติมในอนาคตจำเป็นต้องทำความเข้าใจถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นจากคุณลักษณะของเครื่องหมายจราจรบนพื้นทาง เช่น สี ความกว้าง และ การสะท้อนแสง ซึ่งสามารถปรับให้เหมาะสมเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ในการควบคุมพฤติกรรมของผู้ขับขี่ [17]

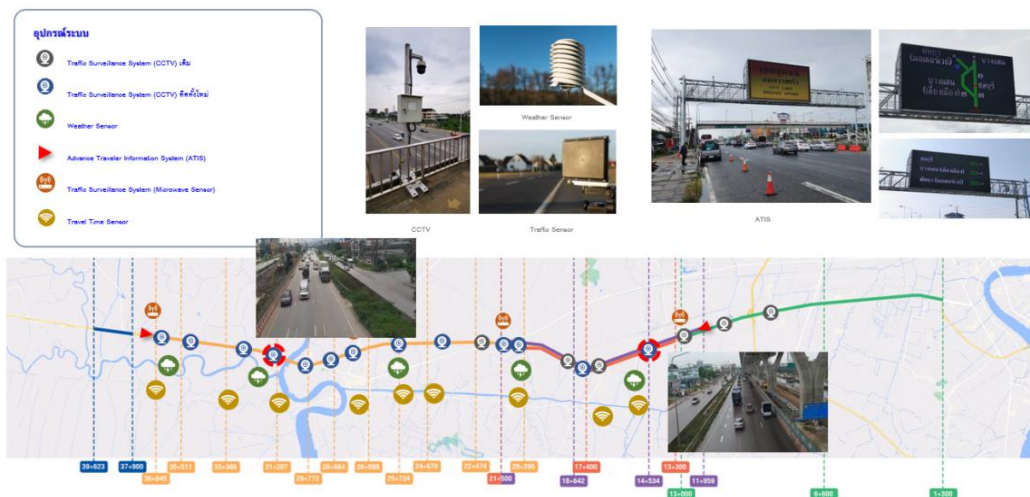
ผลจากการศึกษาทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมาในต่างประเทศสามารถสรุปได้ว่าเครื่องหมายจราจรบนพื้นทางมีอิทธิพลอย่างมากต่อพฤติกรรมผู้ขับขี่เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการควบคุมการจราจรและความปลอดภัย แต่ผลการศึกษาทบทวนส่วนใหญ่จะเป็นการศึกษาเฉพาะอิทธิพลที่มีต่อช่วงถนนที่เปิดให้บริการทั่วไปไม่รวมถึงพฤติกรรมผู้ขับขี่ที่เกิดขึ้นในบริเวณพื้นที่ก่อสร้างซึ่งมีการปรับปรุงลักษณะทางกายภาพให้สามารถระบายการจราจรควบคู่กันไปกับการดำเนินกิจกรรมภายในพื้นที่ก่อสร้าง การศึกษานี้จึงมีแนวคิดในการประเมินผลกระทบต่อพฤติกรรมผู้ขับขี่โดยการเปรียบเทียบระหว่างพื้นที่ซึ่งมีเครื่องหมายจราจรบนพื้นทางชัดเจนเป็นปกติ (Normal Road Markings) และ พื้นที่ซึ่งเครื่องหมายจราจรบนพื้นทางไม่ชัดเจน (Unclear Road Markings) ที่เกิดขึ้นจากเครื่องหมายจราจรบนพื้นทางไม่ชัดเจนโดยเฉพาะในพื้นที่ก่อสร้างซึ่งมีการปรับเปลี่ยนลักษณะทางกายภาพตลอดเวลา ผลการศึกษาสามารถชี้ให้เห็นถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อความสามารถในการระบายการจราจร และพฤติกรรมผู้ขับขี่ยานพาหนะภายในพื้นที่ก่อสร้าง โดยจะสามารถพัฒนาองค์ความรู้ไปสู่การบริหารจัดการจราจรระหว่างก่อสร้าง เพื่อลดโอกาสการเกิดอุบัติเหตุอันเนื่องมาจากความสับสนในการเลือกใช้ช่องจราจรของผู้ขับขี่

2. วิธีการศึกษา

2.1 พื้นที่ศึกษา

การศึกษานี้พิจารณาใช้ข้อมูลด้านจราจรจากพื้นที่ก่อสร้างโครงการทางหลวงระหว่างเมืองหมายเลข 82 (M82) ซึ่งเป็นโครงการก่อสร้างขนาดใหญ่ในลักษณะทางยกระดับบนทางหลวงหมายเลข 35 (ถนนพระราม 2) โดยคัดเลือกทิศทางขาเข้ากรุงเทพฯ ที่ กม.32+700 และ กม.15+500 เป็นพื้นที่ศึกษาเพื่อดำเนินการเปรียบเทียบพฤติกรรมผู้ขับขี่ที่เกิดจากความไม่ชัดเจนของเครื่องหมายจราจรบนพื้นทาง เนื่องจากเป็นตำแหน่งที่การดำเนินงานปรับปรุงเครื่องหมายจราจรยังไม่แล้วเสร็จสมบูรณ์ สำหรับทางหลวงหมายเลข 35 มีลักษณะทางกายภาพ

เป็นถนนระดับดินขนาด 8 ช่องจราจรสำหรับทางหลัก โดยมี 4 ช่องจราจรสำหรับแต่ละทิศทาง นอกจากนี้ ยังมี 4 ช่องจราจรสำหรับทางคู่ขนาน โดยมี 2 ช่องจราจรสำหรับแต่ละทิศทาง ทั้งนี้ ทางหลักและทางคู่ขนานจะถูกแบ่งแยกด้วยรูปแบบต่าง ๆ เช่น ร่องกด (Depress Median) เกาะยก (Raise Median) และ แผงคอนกรีตเสริมเหล็ก (Concrete Barrier) รายละเอียดพื้นที่ศึกษา แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 พื้นที่ศึกษาและตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ต่าง ๆ

2.2 การเก็บข้อมูลภายในพื้นที่ศึกษา

2.2.1 การเก็บข้อมูลเพื่อการวิเคราะห์ปริมาณจราจรและความเร็วของยานพาหนะ

สำหรับข้อมูลปริมาณจราจรและความเร็วของยานพาหนะใช้ข้อมูลจากอุปกรณ์ Microwave Sensor แสดงดังรูปที่ 2 ซึ่งมีการติดตั้งอยู่ภายในพื้นที่ศึกษา บริเวณที่มีเครื่องหมายจราจรบนพื้นผิวถนนไม่ชัดเจน (กม.32+700 ขาเข้ากรุงเทพฯ) และ บริเวณที่มีเครื่องหมายจราจรบนพื้นผิวถนนปกติ (กม.15+500 ขาเข้ากรุงเทพฯ) ทำการเก็บข้อมูลช่วงเดือนตุลาคม พ.ศ. 2565 โดยแบ่งช่วงเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์ออกเป็นช่วงเวลาเร่งด่วนเช้า ช่วงเวลาเร่งด่วนเย็น และนอกช่วงเวลาเร่งด่วน เพื่อศึกษาแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงและความแตกต่างพฤติกรรมความเร็วตามช่วงเวลาที่กำหนด



กม.32+700 (ขาเข้ากรุงเทพฯ)



กม.15+500 (ขาเข้ากรุงเทพฯ)



รูปที่ 2 อุปกรณ์ Microwave Sensor ซึ่งติดตั้งอยู่ภายในพื้นที่ศึกษา

2.2.2 การเก็บข้อมูลเพื่อการวิเคราะห์ตำแหน่งของยานพาหนะในช่องจราจร

สำหรับข้อมูลตำแหน่งรถในช่องจราจรสำหรับนำมาประเมินอัตราการเปลี่ยนช่องจราจร และ อัตราการขับขึ้นหรือทับเส้นแบ่งช่องจราจร ระหว่างพื้นที่ซึ่งมีเครื่องหมายจราจรบนพื้นทาง ชัดเจนเป็นปกติ (Normal Road Markings) และ พื้นที่ซึ่งเครื่องหมายจราจรบนพื้นทางไม่ชัดเจน (Unclear Road Markings) ใช้ข้อมูลจากระบบกล้องโทรทัศน์วงจรปิด (CCTV) ที่ติดตั้งภายในพื้นที่ แสดงดังรูปที่ 3 เพื่อศึกษาพฤติกรรมการขับขึ้นเนื่องมาจากการที่ผู้ขับขี่เกิดความสับสนในการใช้ ช่องจราจร โดยทำการเก็บข้อมูลช่วงเดือนตุลาคม พ.ศ. 2565



กม.32+700 (ขาเข้ากรุงเทพฯ)



กม.15+500 (ขาเข้ากรุงเทพฯ)

รูปที่ 3 ภาพจากระบบกล้องโทรทัศน์วงจรปิด (CCTV) ภายในพื้นที่ศึกษา

2.3 การวิเคราะห์ผลกระทบต่อพฤติกรรมการขับขึ้น

2.3.1 การวิเคราะห์ผลกระทบต่ออัตราการไหลของกระแสจราจร

การวิเคราะห์อัตราการไหลของกระแสจราจรเพื่อที่จะประเมินแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของ อัตราการไหลของกระแสจราจรในแต่ละช่วงวันเวลาในพื้นที่วิเคราะห์ โดยการเปรียบเทียบอัตรา

การไหลในช่วงเวลาเร่งด่วนเช้า (ช่วง 07.00 น. ถึง 09.00 น.) ช่วงเวลาเร่งด่วนเย็น (ช่วง 15.00 ถึง 18.00 น.) และนอกช่วงเวลาเร่งด่วน (ช่วง 10.00 ถึง 13.00 น.) ระหว่างพื้นที่ซึ่งมีเครื่องหมายจราจรบนพื้นทางชัดเจนเป็นปกติ (Normal Road Markings) และ พื้นที่ซึ่งเครื่องหมายจราจรบนพื้นทางไม่ชัดเจน (Unclear Road Markings) เพื่อแสดงให้เห็นถึงผลกระทบที่มีต่ออัตราการไหลของกระแสจราจรในแต่ละวันเวลาในพื้นที่วิเคราะห์

2.3.2 การวิเคราะห์พฤติกรรมการใช้ความเร็ว (Speed Profile)

การวิเคราะห์พฤติกรรมการใช้ความเร็วของยานพาหนะเพื่อที่จะประเมินแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของความเร็ว ซึ่งเป็นตัวแปรที่แสดงให้เห็นพฤติกรรมของผู้ขับขี่ในแต่ละวันเวลาในพื้นที่วิเคราะห์ โดยการเปรียบเทียบความเร็วที่ 85 เปอร์เซ็นไทล์ ในช่วงเวลาเร่งด่วนเช้า (ช่วง 07.00 น. ถึง 09.00 น.) ช่วงเวลาเร่งด่วนเย็น (ช่วง 15.00 ถึง 18.00 น.) และนอกช่วงเวลาเร่งด่วน (ช่วง 10.00 ถึง 13.00 น.) ระหว่างพื้นที่ซึ่งมีเครื่องหมายจราจรบนพื้นทางชัดเจนเป็นปกติ (Normal Road Markings) และ พื้นที่ซึ่งเครื่องหมายจราจรบนพื้นทางไม่ชัดเจน (Unclear Road Markings) เพื่อแสดงให้เห็นถึงผลกระทบที่มีต่อพฤติกรรมการใช้ความเร็วในแต่ละวันเวลาในพื้นที่วิเคราะห์

2.3.3 การวิเคราะห์ตำแหน่งของยานพาหนะในช่องจราจร (Lateral Position)

การวิเคราะห์ตำแหน่งรถในช่องจราจรเป็นการเปรียบเทียบข้อมูลอัตราการเปลี่ยนช่องจราจร และ อัตราการขับขึ้นหรือทับเส้นแบ่งช่องจราจร ในช่วงเวลาเร่งด่วนเช้า (ช่วง 07.00 น. ถึง 09.00 น.) ช่วงเวลาเร่งด่วนเย็น (ช่วง 15.00 ถึง 18.00 น.) และนอกช่วงเวลาเร่งด่วน (ช่วง 10.00 ถึง 13.00 น.) โดยการเปรียบเทียบระหว่างพื้นที่ซึ่งมีเครื่องหมายจราจรบนพื้นทางชัดเจนเป็นปกติ (Normal Road Markings) และ พื้นที่ซึ่งเครื่องหมายจราจรบนพื้นทางไม่ชัดเจน (Unclear Road Markings) เพื่อศึกษาพฤติกรรมการขับขึ้นที่อาจจะส่งผลให้เกิดการชะลอตัวหรือการติดขัดของกระแสจราจรโดยเฉพาะในช่วงเร่งด่วน อันเนื่องมาจากการที่ผู้ขับขี่เกิดความสับสนในการใช้ช่องจราจร

3. การวิเคราะห์ข้อมูลและผลการวิจัย

3.1 การวิเคราะห์ผลกระทบต่ออัตราการไหลของกระแสจราจร

การวิเคราะห์ผลกระทบต่ออัตราการไหลของกระแสจราจร กรณีเครื่องหมายจราจรบนพื้นทางปกติ ซึ่งได้วิเคราะห์เปรียบเทียบบริเวณ กม.15+500 ทิศทางขาเข้ากรุงเทพฯ และ บริเวณที่มีเครื่องหมายจราจรบนพื้นทางไม่ชัดเจน บริเวณ กม.32+700 ทิศทางขาเข้ากรุงเทพฯ เช่นกัน โดย

ไต้หวันเปรียบเทียบในช่วงวันทำงานและวันหยุด แบ่งเป็นช่วงเวลาเร่งด่วนเช้า ช่วงเวลาเร่งด่วนเย็น และนอกช่วงเวลาเร่งด่วน โดยมีรายละเอียดผลการวิเคราะห์ดังนี้

3.1.1 อัตราการไหลของกระแสจราจรวันทำงาน

ผลการศึกษา พบว่า เมื่อพิจารณาอัตราการไหลของกระแสจราจรในวันทำงานแต่ละช่วงเวลา แสดงดังรูปที่ 4 พบว่า มีความแตกต่างกันตามช่วงเวลา โดยสามารถสรุปได้ ดังนี้

1) ช่วงเวลาเร่งด่วนเช้า (ช่วง 07.00 น. ถึง 09.00 น.) มีปริมาณจราจรเฉลี่ยบริเวณพื้นที่เครื่องหมายจราจรบนพื้นทางปกติ 2,081 คัน/ชม. และบริเวณพื้นที่เครื่องหมายจราจรบนพื้นทางไม่ชัดเจน 1,954 คัน/ชม.

2) ช่วงเวลาเร่งด่วนเย็น (ช่วง 15.00 ถึง 18.00 น.) โดยปริมาณจราจรเฉลี่ยบริเวณพื้นที่เครื่องหมายจราจรบนพื้นทางปกติ 2,057 คัน/ชม. และบริเวณพื้นที่เครื่องหมายจราจรบนพื้นทางไม่ชัดเจน 2,284 คัน/ชม

3) นอกช่วงเวลาเร่งด่วน (ช่วง 10.00 ถึง 13.00 น.) ปริมาณจราจรเฉลี่ยบริเวณพื้นที่เครื่องหมายจราจรบนพื้นทางปกติ 1,752 คัน/ชม. และบริเวณพื้นที่เครื่องหมายจราจรบนพื้นทางไม่ชัดเจน 1,614 คัน/ชม.

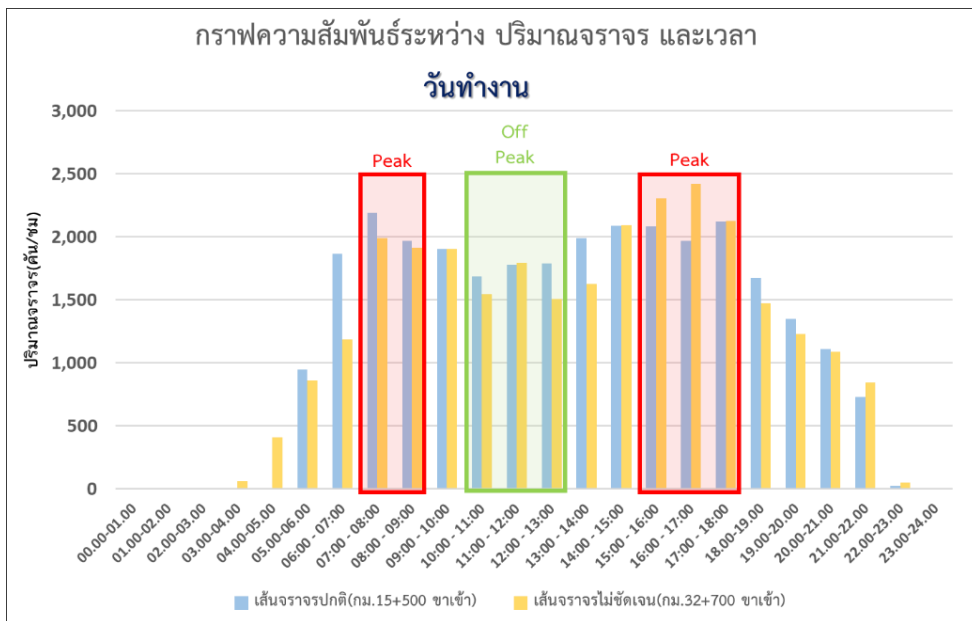
3.1.2 อัตราการไหลของกระแสจราจรวันหยุด

ผลการศึกษา พบว่า เมื่อพิจารณาอัตราการไหลของกระแสจราจรในวันหยุดแต่ละช่วงเวลา แสดงดังรูปที่ 5 พบว่า มีความแตกต่างกันตามช่วงเวลา โดยสามารถสรุปได้ ดังนี้

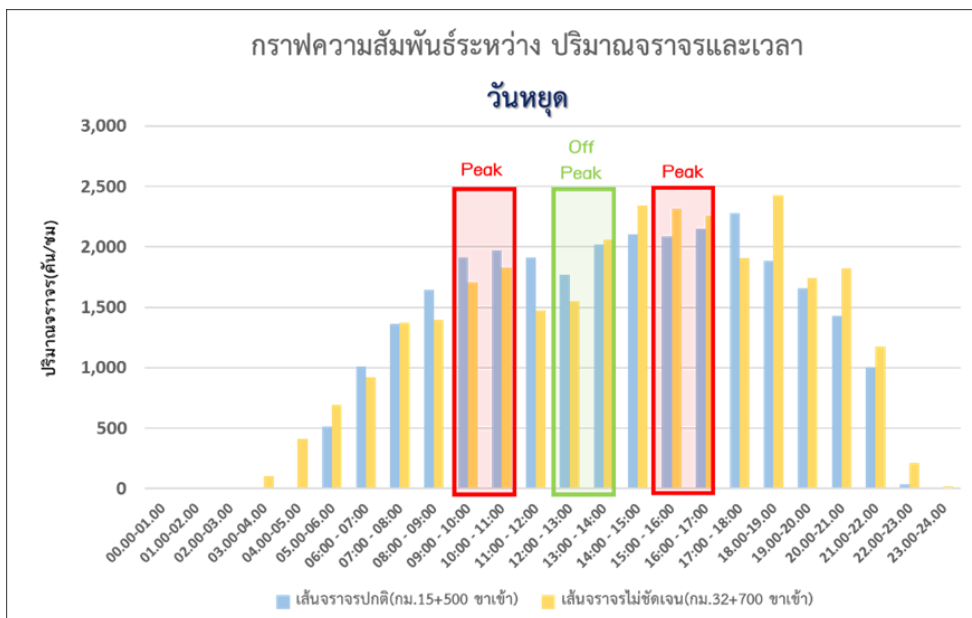
1) ช่วงเวลาเร่งด่วนเช้า (ช่วง 09.00 ถึง 11.00 น.) มีปริมาณเฉลี่ยบริเวณพื้นที่เครื่องหมายจราจรบนพื้นทางปกติ 1,939 คัน/ชม. และบริเวณพื้นที่เครื่องหมายจราจรบนพื้นทางไม่ชัดเจน 1,767 คัน/ชม.

2) ช่วงเวลาเร่งด่วนเย็น (ช่วง 15.00 ถึง 17.00 น.) โดยมีปริมาณจราจรเฉลี่ยบริเวณพื้นที่เครื่องหมายจราจรบนพื้นทางปกติ 2,116 คัน/ชม. และบริเวณพื้นที่เครื่องหมายจราจรบนพื้นทางไม่ชัดเจน 2,284 คัน/ชม.

3) นอกช่วงเวลาเร่งด่วน (ช่วง 12.00 ถึง 14.00 น.) โดยมีปริมาณจราจรเฉลี่ยบริเวณพื้นที่เครื่องหมายจราจรบนพื้นทางปกติ 1,893 คัน/ชม. และบริเวณพื้นที่เครื่องหมายจราจรบนพื้นทางไม่ชัดเจน 1,804 คัน/ชม.



รูปที่ 4 การเปรียบเทียบอัตราการไหลของกระแสจราจรในวันทำงาน



รูปที่ 5 การเปรียบเทียบอัตราการไหลของกระแสจราจรในวันหยุด

3.2 การวิเคราะห์ผลกระทบต่อพฤติกรรมการใช้ความเร็ว

การวิเคราะห์ผลกระทบต่อพฤติกรรมการใช้ความเร็ว กรณีเครื่องหมายจราจรบนพื้นทางปกติ ซึ่งได้วิเคราะห์เปรียบเทียบบริเวณ กม.15+500 ทิศทางขาเข้ากรุงเทพฯ และ บริเวณที่มีเครื่องหมายจราจรบนพื้นทางไม่ชัดเจน บริเวณ กม.32+700 ทิศทางขาเข้ากรุงเทพฯ เช่นกัน โดยได้วิเคราะห์เปรียบเทียบในช่วงวันทำงานและวันหยุด แบ่งเป็นช่วงเวลาเร่งด่วนเช้า ช่วงเวลาเร่งด่วนเย็น และ นอกช่วงเวลาเร่งด่วน โดยมีรายละเอียดผลการวิเคราะห์ดังนี้

3.2.1 ผลกระทบต่อพฤติกรรมการใช้ความเร็วของยานพาหนะในวันทำงาน

ผลการศึกษา พบว่า เมื่อพิจารณาพฤติกรรมการใช้ความเร็วของยานพาหนะในวันทำงานแต่ละช่วงเวลา แสดงดังรูปที่ 6 พบว่า มีความแตกต่างกันเล็กน้อย โดยสามารถสรุปได้ ดังนี้

1) ช่วงเวลาเร่งด่วนเช้าความเร็วที่ 85 เปอร์เซ็นต์ไทล์ บริเวณพื้นที่เครื่องหมายจราจรบนพื้นทางปกติ มีค่าเท่ากับ 84.17 กม./ชม. และ บริเวณพื้นที่เครื่องหมายจราจรบนพื้นทางไม่ชัดเจน มีค่าเท่ากับ 81.04 กม./ชม.

2) ช่วงเวลาเร่งด่วนเย็นความเร็วที่ 85 เปอร์เซ็นต์ไทล์ บริเวณพื้นที่เครื่องหมายจราจรบนพื้นทางปกติ มีค่าเท่ากับ 78.63 กม./ชม. และ บริเวณพื้นที่เครื่องหมายจราจรบนพื้นทางไม่ชัดเจน มีค่าเท่ากับ 79.51 กม./ชม.

3) นอกช่วงเวลาเร่งด่วน ความเร็วที่ 85 เปอร์เซ็นต์ไทล์ บริเวณพื้นที่เครื่องหมายจราจรบนพื้นทางปกติ มีค่าเท่ากับ 81.31 กม./ชม. และ บริเวณพื้นที่เครื่องหมายจราจรบนพื้นทางไม่ชัดเจน มีค่าเท่ากับ 83.33 กม./ชม.

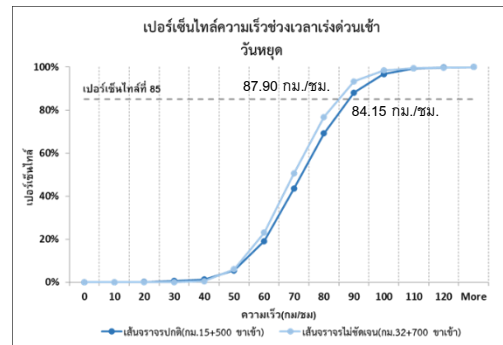
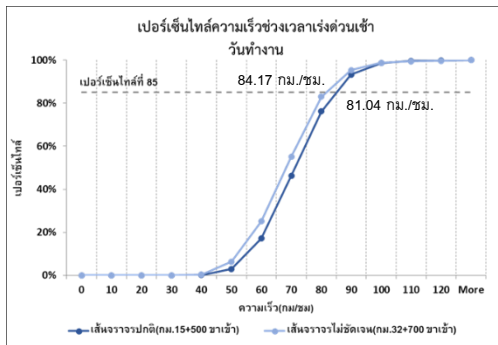
3.2.2 ผลกระทบต่อพฤติกรรมการใช้ความเร็วของยานพาหนะในวันหยุด

ผลการศึกษา พบว่า เมื่อพิจารณาพฤติกรรมการใช้ความเร็วของยานพาหนะในวันหยุดแต่ละช่วงเวลา แสดงดังรูปที่ 6 พบว่า มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยสามารถสรุปได้ ดังนี้

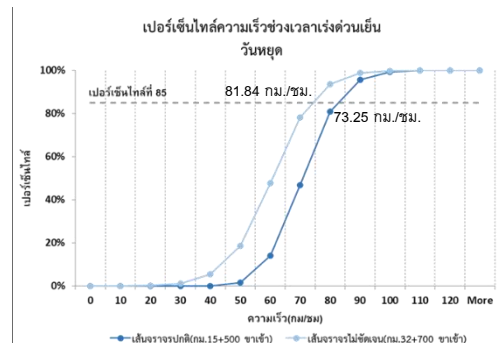
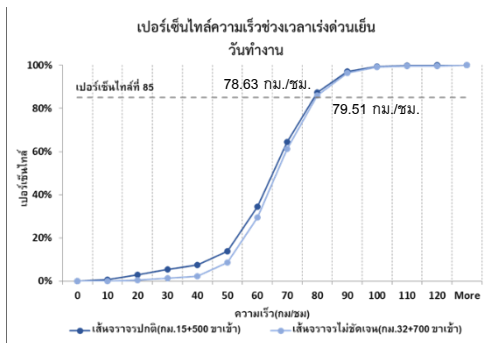
1) ช่วงเวลาเร่งด่วนเช้า ความเร็วที่ 85 เปอร์เซ็นต์ไทล์ บริเวณพื้นที่เครื่องหมายจราจรบนพื้นทางปกติ มีค่าเท่ากับ 87.90 กม./ชม. และบริเวณพื้นที่เครื่องหมายจราจรบนพื้นทางไม่ชัดเจน มีค่าเท่ากับ 84.15 กม./ชม.

2) ช่วงเวลาเร่งด่วนเย็น ความเร็วที่ 85 เปอร์เซ็นต์ไทล์ บริเวณพื้นที่เครื่องหมายจราจรบนพื้นทางปกติ มีค่าเท่ากับ 81.84 กม./ชม. และบริเวณพื้นที่เครื่องหมายจราจรบนพื้นทางไม่ชัดเจน มีค่าเท่ากับ 73.25 กม./ชม.

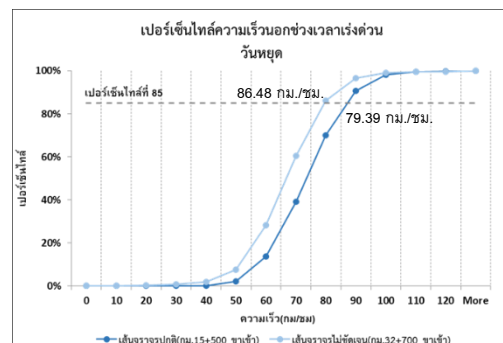
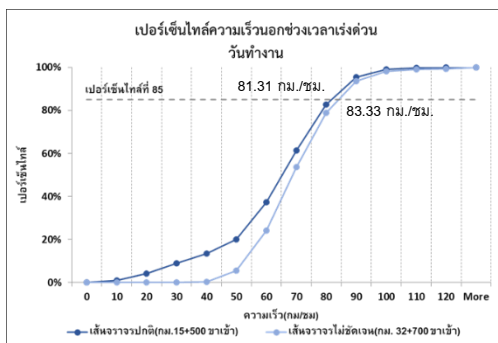
3) นอกช่วงเวลาเร่งด่วน ความเร็วที่ 85 เปอร์เซ็นต์ไทม์ บริเวณพื้นที่เครื่องหมายจราจรบนพื้นทางปกติ มีค่าเท่ากับ 86.48 กม./ชม. และบริเวณพื้นที่เครื่องหมายจราจรบนพื้นทางไม่ชัดเจน มีค่าเท่ากับ 79.39 กม./ชม.



ก. พฤติกรรมการใช้ความเร็วช่วงเร่งด่วนเช้า



ข. พฤติกรรมการใช้ความเร็วช่วงเร่งด่วนเย็น



ค. พฤติกรรมการใช้ความเร็วนอกช่วงเวลาเร่งด่วน

รูปที่ 6 พฤติกรรมการใช้ความเร็วของยานพาหนะวันทำงานและวันหยุด

3.3 การวิเคราะห์ผลกระทบต่อตำแหน่งของยานพาหนะในช่องจราจร (Lateral Position)

การวิเคราะห์ผลกระทบต่อตำแหน่งของยานพาหนะในช่องจราจร กรณีเครื่องหมายจราจรบนพื้นผิวถนนไม่ชัดเจน ซึ่งได้วิเคราะห์เปรียบเทียบระหว่างบริเวณที่มีเครื่องหมายจราจรบนพื้นผิวถนนไม่ชัดเจน (กม.32+700 ขาเข้ากรุงเทพฯ) และ บริเวณที่มีเครื่องหมายจราจรบนพื้นผิวถนนปกติ (กม.15+500 ขาเข้ากรุงเทพฯ) ซึ่งได้วิเคราะห์เปรียบเทียบจำนวนครั้งการเปลี่ยนช่องจราจรต่อปริมาณจราจรในช่วงวันทำงานและวันหยุด แบ่งเป็นช่วงเวลาเร่งด่วนเช้า ช่วงเวลาเร่งด่วนเย็น และนอกช่วงเวลาเร่งด่วน โดยมีรายละเอียดผลการวิเคราะห์ดังนี้

3.3.1 อัตราการเปลี่ยนช่องจราจร

การเปรียบเทียบอัตราการเปลี่ยนช่องจราจรของยานพาหนะในพื้นที่ศึกษาแสดงดังตารางที่ 1 พบว่า ในช่วงเวลาเร่งด่วนวันทำงาน อัตราการเปลี่ยนช่องจราจรบริเวณเครื่องหมายจราจรบนพื้นทางไม่ชัดเจนมีอัตราการลดลงแตกต่างจากบริเวณเครื่องหมายจราจรบนพื้นทางปกติคิดเป็นร้อยละ 3.03 แต่มีอัตราเพิ่มขึ้นในช่วงวันหยุดคิดเป็นร้อยละ 13.26 เนื่องจากในช่วงวันหยุดความหนาแน่นของปริมาณจราจรในช่วงเร่งด่วนมีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับในช่วงวันทำงาน อาจส่งผลให้ผู้ขับขี่มีโอกาสในการเปลี่ยนช่องจราจรมากกว่า สำหรับในช่วงนอกเวลาเร่งด่วน สามารถสรุปได้ว่า อัตราการเปลี่ยนช่องจราจรบริเวณพื้นที่เครื่องหมายจราจรบนพื้นทางไม่ชัดเจนมีอัตราเพิ่มขึ้นแตกต่างจากบริเวณพื้นที่เครื่องหมายจราจรบนพื้นทางปกติ ในวันทำงานคิดเป็นร้อยละ 2.25 และมีอัตราการลดลงในช่วงวันหยุดคิดเป็นร้อยละ 1.55

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบอัตราการเปลี่ยนช่องจราจรในพื้นที่ศึกษา

ตัวชี้วัด	ช่วงเวลาเร่งด่วน		นอกช่วงเวลาเร่งด่วน	
	วันทำงาน	วันหยุด	วันทำงาน	วันหยุด
กรณีเครื่องหมายจราจรบนพื้นทางปกติ				
จำนวนครั้งการเปลี่ยนช่องจราจร	336	264	160	204
ปริมาณจราจรรายชั่วโมง	3,095	2,218	1,962	1,892
อัตราการเปลี่ยนช่องจราจร	10.86%	11.90%	8.15%	10.78%
กรณีเครื่องหมายจราจรบนพื้นทางไม่ชัดเจน				
จำนวนครั้งการเปลี่ยนช่องจราจร	240	568	176	164
ปริมาณจราจรรายชั่วโมง	3,067	2,257	1,692	1,776
อัตราการเปลี่ยนช่องจราจร	7.83%	25.17%	10.40%	9.23%
ความแตกต่าง (%)	-3.03%	+13.26%	+2.25%	-1.55%

3.3.2 อัตราการขั้บซีคร่อมช่องจราจรและทับเครื่องหมายจราจรบนพื้นทาง

การเปรียบเทียบอัตราการขั้บซีคร่อมช่องจราจรและทับเครื่องหมายจราจรบนพื้นทางของยานพาหนะในพื้นที่ศึกษา แสดงดังตารางที่ 2 พบว่า ในช่วงเวลาเร่งด่วนวันทำงาน อัตราการขั้บซีคร่อมช่องจราจรและทับเส้นแบ่งช่องจราจรบริเวณพื้นที่เครื่องหมายจราจรบนพื้นทางไม่ชัดเจนมีอัตราเพิ่มขึ้นแตกต่างจากบริเวณพื้นที่เครื่องหมายจราจรบนพื้นทางปกติคิดเป็นร้อยละ 8.73 โดยในช่วงวันหยุดเพิ่มขึ้นคิดเป็นร้อยละ 10.35 สำหรับในช่วงนอกเวลาเร่งด่วน สามารถสรุปได้ว่า อัตราการขั้บซีคร่อมช่องจราจรและทับเส้นแบ่งช่องจราจรบริเวณพื้นที่เครื่องหมายจราจรบนพื้นทางไม่ชัดเจนมีอัตราเพิ่มขึ้นแตกต่างจากบริเวณพื้นที่เครื่องหมายจราจรบนพื้นทางปกติ ในวันทำงานคิดเป็นร้อยละ 10.09 และมีอัตราเพิ่มขึ้นในช่วงวันหยุดคิดเป็นร้อยละ 19.69 เมื่อพิจารณาภาพรวมสามารถสรุปได้ว่า ในช่วงวันหยุดความหนาแน่นของปริมาณจราจรทั้งในช่วงชั่วโมงเร่งด่วนและนอกชั่วโมงเร่งด่วนมีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับในช่วงวันทำงาน อาจจะส่งผลให้ผู้ขับขี่มีโอกาสในการเปลี่ยนช่องจราจรมากกว่า ทำให้เกิดพฤติกรรมขั้บซีคร่อมช่องจราจรและทับเครื่องหมายจราจรบนพื้นทางเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบอัตราการขั้บซีคร่อมช่องจราจรและทับเครื่องหมายจราจรบนพื้นทาง

ตัวชี้วัด	ช่วงเวลาเร่งด่วน		นอกช่วงเวลาเร่งด่วน	
	วันทำงาน	วันหยุด	วันทำงาน	วันหยุด
กรณีเครื่องหมายจราจรบนพื้นทางปกติ				
จำนวนครั้งการขั้บซีคร่อมช่องจราจร	307	244	52	28
ปริมาณจราจรรายชั่วโมง	3,095	2,218	1,962	1,892
อัตราการขั้บซีคร่อม/ทับเครื่องหมายจราจร	9.92%	2.65%	11.00%	1.48%
กรณีเครื่องหมายจราจรบนพื้นทางไม่ชัดเจน				
จำนวนครั้งการขั้บซีคร่อมช่องจราจร	572	476	220	376
ปริมาณจราจรรายชั่วโมง	3,067	2,257	1,692	1,776
อัตราการขั้บซีคร่อม/ทับเครื่องหมายจราจร	18.65%	13.00%	21.09%	21.17%
ความแตกต่าง (%)	+8.73%	+10.35%	+10.09%	+19.69%

4. สรุปผลการวิจัย

การศึกษานี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อประเมินผลกระทบต่อพฤติกรรมการขับขี่ที่เกิดขึ้นจากเครื่องหมายจราจรบนพื้นทางไม่ชัดเจนโดยเฉพาะในพื้นที่ก่อสร้างซึ่งมีการปรับเปลี่ยนลักษณะทางกายภาพตลอดเวลา โดยการเปรียบเทียบพฤติกรรมการขับขี่ระหว่างบริเวณที่มีเครื่องหมายจราจรบนพื้นทางปกติ (กม.15+500 ขาเข้ากรุงเทพฯ) และ บริเวณที่มีเครื่องหมายจราจรบนพื้นทางไม่ชัดเจน (กม.32+700 ขาเข้ากรุงเทพฯ) ในช่วงวันทำงานและวันหยุด แบ่งเป็นช่วงเวลาเร่งด่วนเช้า ช่วงเวลาเร่งด่วนเย็น และนอกช่วงเวลาเร่งด่วน ด้วยการประเมินผลกระทบที่มีต่ออัตราการไหลของกระแสจราจร พฤติกรรมการใช้ความเร็วของยานพาหนะ และ ผลกระทบต่อตำแหน่งของยานพาหนะ ในช่องจราจร ผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่า อัตราการไหลของกระแสจราจรในบริเวณพื้นที่เครื่องหมายจราจรบนพื้นทางปกติ สามารถระบายการจราจรได้มากกว่าบริเวณพื้นที่เครื่องหมายจราจรบนพื้นทางไม่ชัดเจนในทุกช่วงเวลาที่ยกมา สำหรับพฤติกรรมการใช้ความเร็วของยานพาหนะ เมื่อพิจารณาความเร็วที่ 85 เปอร์เซ็นต์ไทม์ของยานพาหนะ พบว่า พฤติกรรมการใช้ความเร็วในบริเวณพื้นที่เครื่องหมายจราจรบนพื้นทางปกติ ยานพาหนะสามารถทำความเร็วได้มากกว่าบริเวณพื้นที่เครื่องหมายจราจรบนพื้นทางไม่ชัดเจน โดยเฉพาะในช่วงนอกชั่วโมงเร่งด่วน ทั้งนี้ เมื่อพิจารณาในช่วงชั่วโมงเร่งที่มีการจราจรหนาแน่น พบว่า พฤติกรรมการความเร็วของยานพาหนะทั้ง 2 พื้นที่มีค่าใกล้เคียงกัน สำหรับผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อตำแหน่งของยานพาหนะ ในช่องจราจรจากการพิจารณาอัตราการเปลี่ยนช่องจราจร อัตราการขับขี่คร่อมช่องจราจร และ ทับเครื่องหมายจราจรบนพื้นทาง สามารถสรุปได้ว่า ในช่วงเวลาที่มีความหนาแน่นน้อย (วันหยุด และ นอกชั่วโมงเร่งด่วน) อัตราการเปลี่ยนช่องจราจรบริเวณพื้นที่เครื่องหมายจราจรบนพื้นทางไม่ชัดเจนจะเกิดขึ้นค่อนข้างสูง (10.35%-19.69%) สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Davidse et al [11] นอกจากนี้ยังพบว่าบริเวณพื้นที่เครื่องหมายจราจรบนพื้นทางไม่ชัดเจนมีอัตราการขับขี่คร่อมช่องจราจรและทับเครื่องหมายจราจรบนพื้นทางมากกว่าบริเวณพื้นที่เครื่องหมายจราจรบนพื้นทางปกติ ในทุกช่วงเวลาที่ยกมา (2.25%-13.26%)

ผลการศึกษาสามารถชี้ให้เห็นถึงอิทธิพลของเครื่องหมายจราจรบนพื้นทางที่มีต่อความสามารถในการระบายการจราจร และพฤติกรรมการขับขี่ยานพาหนะภายในพื้นที่ก่อสร้าง ซึ่งผลลัพธ์สามารถนำไปสู่ข้อเสนอแนะในการควบคุมงานก่อสร้างในการปรับปรุงลักษณะทางกายภาพของเครื่องหมายจราจรบนพื้นทางให้เป็นไปตามมาตรฐาน เพื่อให้สามารถบริหารจัดการจราจรระหว่างก่อสร้างได้อย่างมีประสิทธิภาพ ลดโอกาสการเกิดอุบัติเหตุอันเนื่องมาจากความสับสนในการเลือกใช้ช่องจราจร อย่างไรก็ตาม ผลการศึกษาที่เกิดขึ้นเป็นเพียงการวิเคราะห์จากข้อมูลภายในพื้นที่ก่อสร้างโครงการทางหลวงระหว่างเมืองหมายเลข 82 (M82) เท่านั้น ซึ่งอาจจะเป็นข้อจำกัดในการพิจารณาประยุกต์ใช้ในพื้นที่อื่น ๆ ที่มีลักษณะทางกายภาพแตกต่างกัน

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ บริษัท ทรานส์โด้ จำกัด ผู้รับจ้างโครงการก่อสร้างทางหลวงพิเศษระหว่างเมือง หมายเลข 82 สายทางยกระดับบางขุนเทียน-บ้านแพ้ว ตอน 11 (ควบคุมบริหารจราจรระหว่างก่อสร้าง) กรมทางหลวง สำหรับการให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลจราจรในการศึกษา

References

- [1] Office of Transport and Traffic Policy and Planning. Traffic sign maintenance manual traffic and transportation safety standards study project. Bangkok, Thailand: Ministry of Transport; 2003. (In Thai)
- [2] Gibreel GM, Easa SM, Hassan Y, El-Dimeery IA. State of the art of highway geometric design consistency. Journal of Transportation Engineering 1999;125(4):305-13. doi: 10.1061/(ASCE)0733-947X(1999)125:4(305).
- [3] Peckham G. Choosing the right product safety label formats: A critical decision for product safety engineers. In: Steve B, editor. Proceedings of the 2010 IEEE Symposium on product compliance engineering; 2010 Oct 18-20, Boston, USA. Boston, USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE); 2011. p.1-5. doi: 10.1109/PSES.2010.5637824.
- [4] Latif SD. Design of horizontal and vertical alignment for the centerline of a federal highway. International Journal of Engineering and Manufacturing. 2020;10:27-42. doi: 10.5815/ijem.2020.03.03.
- [5] Chai H, Xie J, Zhao XL. Operating speed based criteria for design consistency evaluation on motorways in China. Applied Mechanics and Materials 2013;361-3: 2092-5. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.361-363.2092.
- [6] Ng JC, Sayed T. Effect of geometric design consistency on road safety. Canadian Journal of Civil Engineering 2004;31(2):218-27. doi: 10.1139/I03-090.
- [7] Diamandouros K, Gatscha M. Rainvision: The impact of road markings on driver behavior – wet night visibility. Transportation Research Procedia 2016;14:4344-53. doi: 10.1016/j.trpro.2016.05.356.
- [8] Horberry T, Anderson J, Regan M. The possible safety benefits of enhanced road markings: A driving simulator evaluation. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour 2006;9(1):77-87. doi: 10.1016/j.trf.2005.09.002.

- [9] Babic D, Brijs T. Low-cost road marking measures for increasing safety in horizontal curves: a driving simulator study. *Accident Analysis & Prevention* 2021;153:106013. doi: 10.1016/j.aap.2021.106013.
- [10] Bosurgi G, Marra S, Pellegrino O, Sollazzo G, Villari M. Effects of road marking visibility on vehicles driving along curves: A preliminary study in a simulated environment. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board* 2022;2676(12):691-702. doi: 10.1177/036119812 21097095.
- [11] Davidse RJ, Driel CV, Goldenbeld C. The effect of altered road markings on speed and lateral position [internet]. Leidschendam, Netherlands: SWOV; 2004 [cited 2022 February 10]. Available from: <http://www.swov.nl/rapport/R-2003-31.pdf>.
- [12] Yahia HA, Ismail A, Ali SIA, Almselati ASI, Ladin MA. Attitudes and awareness of traffic safety among drivers in Tripoli-Libya. *Research Journal of Applied Sciences Engineering and Technology* 2014;7(24):5297-303. doi: 10.19026/rjaset.7.929.
- [13] Munge RM, Masiga C, Ngari L. Contribution of road design to road accidents along Thika superhighway, Kenya. *The International Journal of Humanities & Social Studies* 2020;8(6):120-7. doi: 10.24940/theijhss/2020/v8/i6/HS2006-001.
- [14] Suliman A, Gargoum, El-Basyouny K, Kim A. Towards setting credible speed limits: Identifying factors that affect driver compliance on urban roads, *Accident Analysis & Prevention* 2016;95(A):138-48. doi: 10.1016/j.aap.2016.07.001.
- [15] Wang C, Quddus MA, Ison S. The effect of traffic and road characteristics on road safety: A review and future research direction. *Safety Science* 2013;57:264-75. doi: 10.1016/J.SSCI.2013.02.012.
- [16] Akple MS, Sogbe E, Atombo C. Evaluation of road traffic signs, markings and traffic rules compliance among drivers in Ghana. *Case Studies on Transport Policy* 2020;8(4):1295-306. doi: 10.1016/j.cstp.2020.09.001.
- [17] Amini E, Roja, Katrakazas C, Antoniou C. Negotiation and decision-making for a pedestrian roadway crossing: A literature review. *Sustainability* 2019;11(23):6713. doi: 10.3390/su11236713.

ประวัติผู้เขียนบทความ



อาจารย์ ดร.พรณรงค์ เลื่อนเพ็ชร สังกัดสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร เลขที่ 1381 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กทม. 10800 Email: pornnarong.l@rmutp.ac.th สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาเอก สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ระดับปริญญาตรี สาขาวิชาเทคโนโลยีโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ และ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

งานวิจัยที่สนใจ ได้แก่ วิศวกรรมขนส่งและจราจร วิศวกรรมทาง การ ประเมินความปลอดภัยทางถนน และ การพัฒนาระบบจราจรอัจฉริยะ (Intelligent Transportation System)



อาจารย์อาทิตยา นิ่มอนงค์ ปัจจุบันดำรงตำแหน่งประธานหลักสูตรวิศวกรรมโยธา ระดับปริญญาตรี อาจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก พื้นที่อุเทนถวาย เลขที่ 225 ถนนพญาไท แขวงและเขตปทุมวัน กทม. 10330 Email: atittaya_ni@mmutto.ac.th สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยศรีปทุม

งานวิจัยที่สนใจ ได้แก่ วิศวกรรมขนส่งและจราจร วิศวกรรมทาง และ ความปลอดภัยทางถนน



นายสุทธุต มาศเมฆ วิศวกรจราจรและขนส่งอาวุโส บริษัท ทรานส์โค้ด จำกัด เลขที่ 999/29 ถนนศรีวิรา แขวงพลับพลา เขตวังทองหลาง กทม. 10310 Email: masmek.stb@rgmail.com สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย ระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

งานวิจัยที่สนใจ ได้แก่ วิศวกรรมขนส่งและจราจร วิศวกรรมทาง การ
ประเมินความปลอดภัยทางถนน และ การพัฒนาระบบจราจรอัจฉริยะ
(Intelligent Transportation System)



ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาวัด ไชยชาณวาทิก ปัจจุบันดำรงตำแหน่ง
ผู้อำนวยการศูนย์วิจัยความยั่งยืนและนวัตกรรมทางเทคโนโลยีการขนส่ง
(TransIT) คณะวิศวกรรมศาสตร์ และ อาจารย์ประจำบัณฑิตวิทยาลัย
สาขาการจัดการงานวิศวกรรม มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต เลขที่ 1761 ถนน
พัฒนาการ แขวงพัฒนาการ เขตสวนหลวง กทม. 10250 Email:
bhawat.cha@kbu.ac.th สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาเอก สาขาวิชา
วิศวกรรมการขนส่ง จากสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (AIT) รับผิดชอบ
การสอนวิชาวิศวกรรมขนส่งและโลจิสติกส์ วิศวกรรมทาง วิศวกรรม
จราจร และการจัดการระบบโครงสร้างพื้นฐาน เป็นต้น
งานวิจัยที่สนใจวิจัย ได้แก่ การวางแผนและจัดการจราจรและขนส่ง ความ
ปลอดภัยทางถนน เป็นต้น

Article History:

Received: September 24, 2024

Revised: December 20, 2024

Accepted: December 20, 2024

ผลกระทบของแถบเส้นชะลอความเร็วรูปแบบต่าง ๆ ต่อการตื่นรู้ของผู้ขับขี่
สำหรับประยุกต์ใช้บริเวณจุดตัดทางรถไฟ

THE EFFECT OF DIFFERENT RUMBLE STRIP CONFIGURATIONS ON
DRIVER AWARENESS FOR APPLICATION AT RAILWAY CROSSINGS

อาทิตยา นิมอนงค์¹ และ พรณรงค์ เลื่อนเพ็ชร²

¹อาจารย์, คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล
ตะวันออก วิทยาเขตอุเทนถวาย, 225 ถ.พญาไท แขวงปทุมวัน เขตปทุมวัน กทม. 10330,
atittaya_ni@rmutto.ac.th

²อาจารย์, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร,
1381 ถนนประชากรราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กทม. 10800, pornnarong.l@rmutp.ac.th

Atittaya Nimanong¹ and Pornnarong Lueanpech²

¹Lecturer, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology
Tawan-ok, Uthenthawai Campus, 225 Phayathai Rd., Pathumwan, Bangkok, 10330, Thailand,
atittaya_ni@rmutto.ac.th

²Lecturer, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon,
1381 Pracharat 1 Rd., Wongsawang, Bangsue, Bangkok 10800, Thailand,
pornnarong.l@rmutp.ac.th

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความดังของเสียงและความสั่นสะเทือนภายในห้องโดยสารของยานพาหนะจากการเคลื่อนที่ผ่านแถบเส้นชะลอความเร็วที่ออกแบบ โดยเลือกใช้รถจักรยานยนต์ รถยนต์นั่งส่วนบุคคล รถกระบะและรถบรรทุก เป็นยานพาหนะทดสอบ สำหรับการประเมินผลกระทบที่มีต่อการตื่นรู้ของผู้ขับขี่จะพิจารณาจากความต่างระดับเสียงและความสั่นสะเทือนภายในห้องโดยสารก่อนและหลังเคลื่อนที่ผ่านแถบเส้นชะลอความเร็ว ผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่าระดับความดังของเสียงภายในห้องโดยสารขณะที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ผ่านแถบชะลอความเร็วจะเพิ่มขึ้นตามความเร็วของรถ ในทางกลับกันความสั่นสะเทือนของยานพาหนะภายในห้องโดยสารขณะเคลื่อนที่ผ่านแถบชะลอความเร็วนั้นจะลดลงเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น สำหรับรูปแบบแถบเส้นชะลอความเร็วที่เหมาะสม ผลการศึกษาสรุ้ได้ว่า รูปแบบแถบเส้นชะลอความเร็วที่เหมาะสมแตกต่างกันออกไปตามยานพาหนะทดสอบแต่ละประเภทและแต่ละช่วงความเร็ว โดย

ผลจากการพิจารณาความเร็ว 85 เปอร์เซ็นต์ที่โวลต์ที่ระยะ 350 เมตรก่อนเข้าสู่บริเวณจุดตัดทางรถไฟ พบว่า รูปแบบของแถบเส้นชะลอความเร็วที่เหมาะสมสำหรับรถจักรยานยนต์ รูปแบบที่มีขนาด กว้าง 10 ซม.หนา 0.3 ซม. ระยะห่างระหว่างแถบ 25 ซม. รถยนต์นั่งส่วนบุคคล รูปแบบที่มีขนาด กว้าง 10 ซม.หนา 0.6 ซม. ระยะห่างระหว่างแถบ 25 ซม. รถกระบะ รูปแบบที่มีขนาด กว้าง 10 ซม.หนา 0.6 ซม. ระยะห่างระหว่างแถบ 50 ซม. และ รถบรรทุก รูปแบบที่มีขนาด กว้าง 20 ซม.หนา 0.6 ซม. ระยะห่างระหว่างแถบ 50 ซม. ตามลำดับ ผลลัพธ์ที่จะได้จากการศึกษานี้ช่วยเพิ่มความก้าวหน้าของความรู้ เพื่อปรับปรุงข้อกำหนดการออกแบบ เพื่อให้มั่นใจในความปลอดภัยในการข้ามทางรถไฟ ลดความน่าจะเป็นในการเกิดอุบัติเหตุ และเพิ่มประสิทธิภาพการให้บริการของระบบรถไฟ

คำสำคัญ: แถบเส้นชะลอความเร็ว, ระดับเสียง, ความสั่นสะเทือน, รูปแบบที่เหมาะสม

ABSTRACT

The aim of this study is to evaluate the noise and vibration level in the vehicle cockpit, while moving through the designed rumble strip. The motorcycle, passenger car, pick-up truck and heavy truck are selected as test vehicles. In order to assess the impact of driver awareness, it is considered the difference in noise and vibrations level within the cockpit while moving through the rumble strip. The results concluded that the noise level inside a cockpit, while the vehicle is moving through a rumble strip, increases according to the speed of the vehicle. On the other hand, the vibration level inside a cockpit tends to decrease, corresponding to the movement velocity. Taking into account the appropriate design for the rumble strip, each vehicle type is inconsistent. We found that the most appropriate rumble strip design for motorcycles is 10 cm wide and 0.3 cm thick, with 25 cm spacing between the stripes. Passenger cars are also 10 cm wide but 0.6 cm thick, and the spacing between the stripes remains 25 cm. The appropriate rumble strip design for pick-up trucks is the same as for passenger cars, but the spacing between the stripes is 50 cm. In the case of heavy trucks, the design is higher than others, with a width of 20 cm, a thickness of 0.6 cm, and a spacing of 50 cm between the stripes. The outcome enhances the advancement of knowledge in order to improve design requirements for ensuring safety at railway crossings, mitigating the likelihood of accidents, and optimizing the efficiency of the railway system.

KEYWORDS: Rumble Strip, Noise Level, Vibration Level, Appropriate Design

1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

โครงข่ายทางรถไฟในประเทศไทยมีระยะทางรวม 4,043 กิโลเมตร ประกอบด้วย เส้นทางสายหลักหรือสายประธาน 5 เส้นทาง กระจายไปตามภูมิภาคต่างๆ ของประเทศครอบคลุมพื้นที่บริการ 47 จังหวัด โดยส่วนใหญ่ประเภทของทางรถไฟมีลักษณะเป็นรถไฟทางเดี่ยว ระยะทาง 3,763 กิโลเมตร รถไฟฟ้าทางคู่ระยะทาง 173 กิโลเมตร และรถไฟทางสาม ระยะทาง 107 กิโลเมตร เนื่องจากทางรถไฟทางคู่และทางสาม มีระยะทางค่อนข้างน้อย ทำให้เกิดความล่าช้าโดยเฉพาะในช่วงที่มีการรอสับหลัก อีกทั้งโครงข่ายทางรถไฟส่วนใหญ่มีสภาพทรุดโทรมตามอายุการใช้งาน ขาดการซ่อมบำรุง นอกจากนี้ เส้นทางรถไฟบางส่วนยังพาดผ่านชุมชนและที่อยู่อาศัย ก่อให้เกิดจุดตัดระหว่างถนนกับทางรถไฟทั่วประเทศ จำนวน 2,460 จุด โดยที่ทางผ่านระดับถนนที่รถไฟจะต้องหยุดหรือชะลอความเร็ว ซึ่งเป็นจุดที่เกิดอุบัติเหตุได้บ่อยครั้ง มีจำนวนมากถึง 2,200 จุด [1]

ในแต่ละปีมีอุบัติเหตุขบวนรถไฟชนยานพาหนะบริเวณจุดตัดระหว่างทางถนนและทางรถไฟจำนวนมาก อุบัติเหตุที่เกิดขึ้นนอกจากส่งผลกระทบต่อโดยตรงให้เกิดความสูญเสียชีวิตและ มีผู้บาดเจ็บรวมถึงทรัพย์สินเสียหาย ยังส่งผลกระทบต่อการให้บริการเดินรถไฟที่ต้องเสียเวลาในการบริหารจัดการเหตุการณ์จากอุบัติเหตุดังกล่าวด้วย จากสถิติที่ผ่านมาระหว่างปี พ.ศ. 2558-2564 พบว่า มีอุบัติเหตุขบวนรถไฟชนกับยานพาหนะเกิดขึ้น จำนวน 437 ครั้ง มีผู้เสียชีวิต 163 รายและผู้บาดเจ็บ 401 ราย [2] โดยอุบัติเหตุส่วนมากเกิดขึ้นบริเวณจุดตัดที่มีลักษณะเป็นทางลักผ่านมากถึงร้อยละ 44 ซึ่งไม่มีเครื่องกั้น และ อุปกรณ์ด้านความปลอดภัย รวมถึงไม่ใช้ทางข้ามที่ถูกกฎหมาย นอกจากนี้ ยังพบว่าหน่วยงานที่เกี่ยวข้องในพื้นที่ไม่สามารถดำเนินการปิดกั้นหรือติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันได้ เนื่องจากมีการต่อต้านจากประชาชนที่อยู่ในชุมชนใกล้เคียงบริเวณทางลักผ่านนั้น

ผลจากการสำรวจจุดตัดทางถนนและทางรถไฟทั่วประเทศ เมื่อปี พ.ศ. 2564 พบว่า มีจุดตัดทางถนนและทางรถไฟทั่วประเทศ 2,975 จุด แบ่งเป็น จุดตัดต่างระดับ (สะพานข้ามทางรถไฟ ทางลอดใต้ทางรถไฟ) จำนวน 621 แห่ง จุดตัดระดับเดียวกัน (จุดตัดทางถนนและทางรถไฟ) จำนวน 2,136 แห่ง ประกอบด้วย จุดตัดที่มีเครื่องกั้น 1,358 จุด (ใช้คนกั้น 413 แห่ง และเครื่องกั้นอัตโนมัติ 945 แห่ง) และจุดตัดประเภทป้ายจราจร 152 จุด โดยการสำรวจพบจุดตัดที่มีลักษณะเป็นทางลักผ่าน (จุดข้ามทางรถไฟที่สร้างขึ้นในเขตทางรถไฟโดยไม่ได้รับอนุญาต) จำนวน 626 แห่ง

กรมการขนส่งทางราง (ขร.) ซึ่งเป็นหน่วยงานที่กำกับดูแลงานด้านระบบขนส่งทางรางของประเทศ ได้ดำเนินการโครงการศึกษาเพื่อลดอุบัติเหตุจุดตัดทางถนนและทางรถไฟ ร่วมกับ กองทุนเพื่อความปลอดภัยในการใช้รถใช้ถนน (กปถ.) พบว่า สาเหตุหลักของการเกิดอุบัติเหตุ ประกอบด้วย ลักษณะทางกายภาพของจุดตัดไม่เหมาะสม ไม่มีอุปกรณ์เครื่องกั้น หรือ มีสิ่งบดบังทัศนวิสัย การก่อสร้างจุดตัดทางลักผ่านโดยไม่ได้รับอนุญาต และ วินัยการขับขี่ [3] โดยได้จัดทำแผนแม่บทการแก้ไขปัญหาอุบัติเหตุบริเวณจุดตัดเพื่อเสนอแนวทางการปรับปรุงแก้ไขให้หน่วยงาน

ที่รับผิดชอบปรับปรุงจุดตัดทางถนนและทางรถไฟให้มีมาตรฐานและเหมาะสมกับพื้นที่การจราจรแต่ละพื้นที่

การศึกษาเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้แถบเส้นชะลอความเร็วในปัจจุบันมุ่งเน้นไปที่การประเมินประสิทธิผลจากการประยุกต์ใช้งาน Vadeby and Anund [4] ตรวจสอบประสิทธิภาพความปลอดภัยและความคิดเห็นของผู้ขับขี่ ผลการศึกษาบ่งชี้ว่า การติดตั้งแถบเส้นชะลอความเร็วช่วยให้การบาดเจ็บสาหัสทุกประเภทลดลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยที่ผู้ขับขี่ส่วนใหญ่เห็นด้วยกับการประยุกต์ใช้แถบเส้นชะลอความเร็ว โดยเฉพาะผู้ขับขี่รถจักรยานยนต์ สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Hossain et al [5] ซึ่งใช้การวิเคราะห์หอนุกรมเวลาแบบ Intervention ในการประเมินความปลอดภัยของแถบเส้นชะลอความเร็ว โดยสามารถสรุปได้ว่าการติดตั้งแถบเส้นชะลอความเร็ว สามารถลดการสถิติการชนของยานพาหนะในพื้นที่โดยรวมลงได้ สำหรับการประยุกต์ใช้แถบเส้นชะลอความเร็วในประเทศไทย Satthayamalee [6] ซึ่งได้ทำการศึกษาเพื่อกำหนดมาตรฐานในการใช้งานแถบชะลอความเร็ว โดยทดสอบแถบชะลอความเร็ว 3 รูปแบบ ประกอบด้วยแบบ Mille in แบบ Transverse Raised และ แบบ Thermoplastic Profiled Marking ผลการศึกษาพบว่า ระดับเสียงภายในห้องโดยสารมีความแตกต่างกับกรณีไม่ขับผ่านแถบชะลอความเร็วมากกว่า 2 dB(A) ซึ่งผู้ขับขี่สามารถรู้สึกถึงความแตกต่างได้

การออกแบบแถบเส้นชะลอความเร็วรูปแบบต่าง ๆ มีผลต่อการระดับเสียง การสั่นสะเทือน และการรับรู้ของผู้ขับขี่ หลายการศึกษาได้มีการพิจารณาเปรียบเทียบปัจจัยในด้านต่าง ๆ ทั้งทางด้านการออกแบบรูปแบบของแถบเส้นชะลอความเร็ว และ สภาพของยานพาหนะ ยกตัวอย่างเช่น การศึกษาของ Walton and Meyer [7] ศึกษาเกี่ยวกับระดับเสียงและการสั่นสะเทือนภายในห้องโดยสารจากรถทดสอบ 3 ประเภท ได้แก่ รถยนต์นั่งส่วนบุคคล รถบรรทุกขนาดเล็กและรถบรรทุกขนาดใหญ่ พบว่า รถยนต์นั่งส่วนบุคคลมีระดับเสียงภายในห้องโดยสารเพิ่มขึ้น 10 dB(A) จากระดับเสียงปกติ (Ambient Condition) สำหรับรถบรรทุกขนาดใหญ่มีระดับเสียงภายในห้องโดยสารเพิ่มขึ้น 4 dB(A) ถ้ามีการเพิ่มความหนาของแถบชะลอความเร็ว ระดับเสียงก็จะเพิ่มขึ้นด้วย โดยระยะห่างระหว่างแถบชะลอความเร็วที่เหมาะสมควรมีระยะห่าง 24 นิ้ว รูปแบบของเส้นชะลอความเร็วที่มีผลต่อพฤติกรรมของผู้ขับขี่ การศึกษาของ Montella et al [8] ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างพฤติกรรมการใช้ความเร็วของผู้ขับขี่และการตื่นรู้ที่เกิดจากรูปแบบการควบคุมความเร็วที่แตกต่างกัน ผลการศึกษาพบว่า รูปแบบที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด ได้แก่ การทำเครื่องหมายพื้นมังกร (การทำให้เกิดมุมมองว่าถนนแคบลง) การลงสีบริเวณทางแยก (หลักการการสร้างจุดสังเกต) และ การยกเกาะกลางขึ้น (การลดขนาดถนนทางกายภาพ) โดยพฤติกรรมการใช้ความเร็วลดลงอย่างเห็นได้ชัดที่ระยะทาง 250 ม. ก่อนถึงจุดตัดทางแยก

ภาพรวมของการประยุกต์ใช้ในระดับประเทศ การศึกษาของ Karkle et al [9] ศึกษาการประยุกต์ใช้แถบเส้นชะลอความเร็วในสหรัฐอเมริกา ผลการศึกษาพบว่า การประยุกต์ใช้แถบ

เส้นชะลอความเร็วสามารถลดโอกาสการเสียหลักของยานพาหนะหลุดออกจากถนนเพิ่มความปลอดภัยให้แก่ถนนในพื้นที่ นอกจากนี้ยังสามารถสรุปได้ว่ารูปแบบที่เหมาะสมของแถบเส้นชะลอความเร็ว มีขนาดอยู่ที่ ความยาว 16 นิ้ว ความกว้าง 7 นิ้ว ความหนา 0.5 นิ้ว โดยมีระยะห่าง 12 นิ้ว ต่อเนื่อง ซึ่งสามารถก่อให้เกิดระดับเสียงที่เหมาะสมสำหรับแจ้งเตือนผู้ขับขี่ ทั้งนี้ การติดตั้งบนผิวทางแอสฟัลต์นั้นให้ผลลัพธ์ที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด โดยไม่เหมาะสำหรับการติดตั้งบนทางหลวงที่มีขนาดช่องจราจรแคบหรือไม่มีไหล่ทาง

อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพของการประยุกต์ใช้แถบเส้นชะลอความเร็วซึ่งจะขึ้นอยู่กับรูปแบบของแถบเส้นชะลอความเร็วที่สามารถการแปลงพลังงานจากการเคลื่อนที่ของยานพาหนะไปเป็นเสียงที่สามารถกระตุ้นการรับรู้ของผู้ขับขี่ได้อย่างเหมาะสม รวมถึงการตอบสนองทั้งต่อเสียงและการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในห้องโดยสาร การศึกษาของ Miles et al [10] ศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพของแถบเส้นชะลอความเร็ว พบว่าปัจจัยมีผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงเสียงประกอบด้วย ความกว้าง ความยาว และ ขนาดช่องว่างของแถบเส้นชะลอความเร็ว โดยระดับเสียงจะเพิ่มขึ้นเมื่อความกว้างและความยาวของแถบเพิ่มขึ้น รวมถึงเสียงจะเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาของแถบเส้นชะลอความเร็วเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ ยังพบว่าการใช้แถบชะลอความเร็วแบบชุดผิวทาง และการสร้างปุ่มโพรไฟล์รูปร่างต่างๆ สามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเสียงที่เพียงพอสำหรับผู้ขับขี่ยานพาหนะ โดยที่แถบชะลอความเร็วแบบชุดผิวทางเป็นเพียงรูปแบบเดียวที่สามารถส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเสียงที่เพียงพอสำหรับรถบรรทุก ทั้งนี้ ความขรุขระของผิวทาง และความเร็วของยานพาหนะที่เพิ่มขึ้น ส่งผลโดยตรงต่อปริมาณเสียงรบกวนในสภาพแวดล้อม

สำหรับการตอบสนองของมนุษย์ต่อแหล่งกำเนิดเสียงที่ระดับต่าง ๆ จะเริ่มมีความรู้สึกและรับรู้ถึงแรงสั่นสะเทือน (Vibration Decibels) เมื่อมีความสั่นสะเทือนอยู่ที่ 65 VdB โดยที่ระดับการสั่นสะเทือนในช่วงระหว่าง 70-75 VdB จะเป็นระดับการสั่นสะเทือนที่อยู่ในเกณฑ์ที่มนุษย์ยอมรับได้ไม่ก่อความเดือดร้อนรำคาญ สำหรับระดับการสั่นสะเทือนที่จะเริ่มส่งผลต่อการตื่นรู้ของมนุษย์อยู่ในช่วงระหว่าง 80-85 VdB [11] การศึกษาของ Houix et al [12] ซึ่งศึกษาอิทธิพลการรับรู้ของมนุษย์โดยการวัดเวลาการตอบสนองเมื่อขับขี่ยานพาหนะผ่านแถบเส้นชะลอความเร็วผ่านอุปกรณ์ Driving Simulator ผลการศึกษาพบว่า การสั่นสะเทือนบริเวณพวงมาลัยไม่มีอิทธิพลต่อเวลาการตอบสนองของผู้ขับขี่ โดยที่เวลาการตอบสนองของผู้ขับขี่จะลดลงเมื่อเวลาที่ยานพาหนะไต่อยู่บนแถบเส้นชะลอความเร็วลดลง กรณีการตอบสนองต่อระดับเสียง การศึกษาของ Pimentel et al [13] โดยการเปรียบเทียบความดังของเสียงที่เกิดจากยานพาหนะระหว่างถนนที่มีการติดตั้งและไม่มีติดตั้งแถบเส้นชะลอความเร็วในพื้นที่ทดสอบ ผลการเปรียบเทียบพบว่าระดับเสียงที่เพิ่มขึ้นจากการติดตั้งแถบเส้นชะลอความเร็ว อยู่ระหว่าง 6 -7 dB(A) อย่างไรก็ตาม การใช้แถบชะลอความเร็วยังก่อให้เกิดเสียงรบกวนที่เพิ่มขึ้นในสภาพแวดล้อมอีกเช่นกัน การศึกษาของ Kasess et al [14] ระบุว่าเสียงรบกวนภายในและภายนอกห้องโดยสารมีความสัมพันธ์กัน

ค่อนข้างสูง ระดับเสียงที่ดังเป็นตัวชี้วัดที่ดีที่สุดของสถานการณ์อันตราย สำหรับรูปแบบของแถบเส้นชะลอความเร็วที่เหมาะสมสรุปได้ว่า ช่องว่างระหว่างแถบเส้นชะลอความเร็วที่ไม่สม่ำเสมอส่งผลให้ระดับเสียงลดลง ในขณะที่แถบเส้นชะลอความเร็วทั่วไปส่งผลกระทบต่อทางเสียงที่เพียงพอ โดยเฉพาะในรถยนต์โดยสารส่วนบุคคล แต่จะมีการตอบสนองด้วยเสียงและการสั่นสะเทือนที่ต่ำกว่าในรถบรรทุก

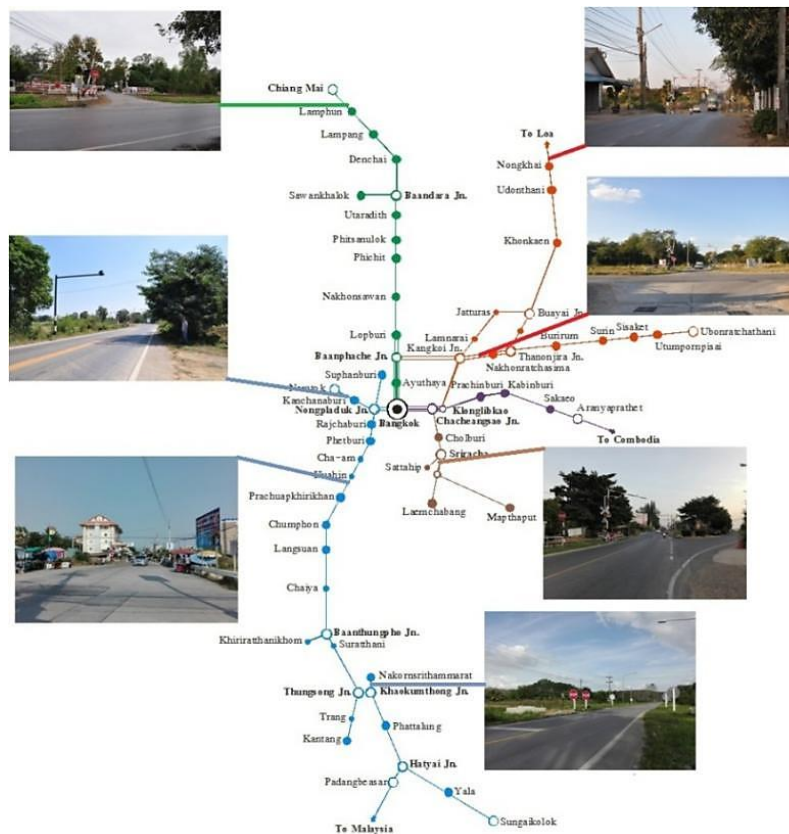
เมื่อพิจารณาผลการศึกษาทบทวนสามารถสรุปได้ว่าระดับเสียงและการสั่นสะเทือนที่เกิดจากการขับขี่ผ่านแถบเส้นชะลอความเร็วสามารถแจ้งเตือนและสร้างการตื่นรู้ให้แก่ผู้ขับขี่ยานพาหนะได้ แต่ผลการศึกษาทบทวนส่วนใหญ่จะเป็นการศึกษาเฉพาะการติดตั้งแถบเส้นชะลอความเร็วบนช่วงถนนและในตำแหน่งที่ต้องการแจ้งเตือนผู้ขับขี่ การเกิดอุบัติเหตุบริเวณจุดตัดทางรถไฟในประเทศไทยยังเกิดขึ้นอยู่เสมอ ยังความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สิน ความไม่คุ้นเคยเส้นทางของผู้ใช้ถนนไม่ทราบว่ามีจุดตัดทางรถไฟ อีกทั้งลักษณะทางกายภาพของจุดตัดทางรถไฟที่ไม่เหมาะสม มุมมองที่ไม่ชัดเจน ล้วนเป็นสาเหตุให้เกิดอุบัติเหตุได้ทั้งสิ้น การจัดทำแถบเส้นชะลอความเร็วที่มีประสิทธิภาพจะช่วยลดอัตราการเกิดอุบัติเหตุลงได้

การศึกษานี้จึงมีแนวคิดในการประเมินเปรียบเทียบผลกระทบของแถบเส้นชะลอความเร็วรูปแบบต่าง ๆ ที่มีต่อการตื่นรู้ของผู้ขับขี่ สำหรับการนำไปประยุกต์ใช้เพื่อแจ้งเตือนผู้ขับขี่เมื่อเข้าสู่บริเวณจุดตัดทางรถไฟ โดยคัดเลือกจุดตัดทางรถไฟในแต่ละภูมิภาคของประเทศไทยมาเป็นพื้นที่ศึกษา และทำการประเมินผลกระทบของแถบเส้นชะลอความเร็วรูปแบบต่าง ๆ ในพื้นที่ทดสอบ ผลการศึกษาสามารถพัฒนาองค์ความรู้ไปสู่การปรับปรุงมาตรฐานการออกแบบเพื่อบริหารจัดการความปลอดภัยบริเวณจุดตัดทางรถไฟ ลดโอกาสการเกิดอุบัติเหตุ และเพิ่มประสิทธิภาพการเดินทางด้วยระบบรถไฟ

2. วิธีการศึกษา

2.1 พื้นที่ศึกษา

การศึกษานี้พิจารณาเลือกพื้นที่บริเวณจุดตัดทางรถไฟ จำนวน 7 จุด ครอบคลุมทั้ง 4 ภูมิภาคของประเทศไทยเป็นพื้นที่ศึกษา โดยการคัดเลือกพื้นที่ศึกษาพิจารณาจากข้อมูลสถิติการเกิดอุบัติเหตุที่เกิดขึ้นบริเวณจุดตัดทางรถไฟระหว่างปี พ.ศ. 2556-2565 ที่ได้รับการบันทึกภายในฐานข้อมูลของการรถไฟแห่งประเทศไทย จุดตัดทางรถไฟที่ใช้เป็นพื้นที่ศึกษา แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ตำแหน่งจุดตัดทางรถไฟพื้นที่ศึกษา

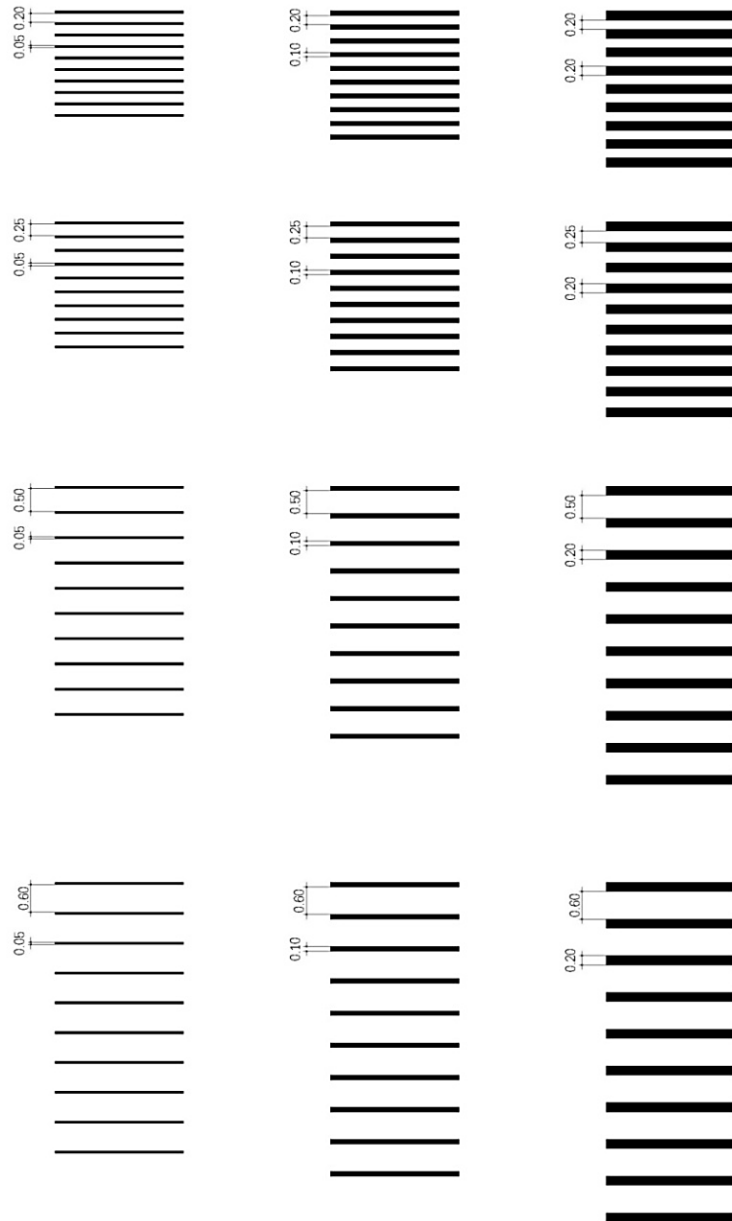
2.2 รูปแบบแถบเส้นชะลอความเร็ว

การศึกษานี้ดำเนินการพิจารณากำหนดรูปแบบแถบเส้นชะลอความเร็วที่ใช้ในการทดสอบและประเมินประสิทธิภาพ จำนวน 24 รูปแบบ ประกอบด้วย

- 1) แถบชะลอความเร็วกว้าง 5 เซนติเมตร จำนวน 10 แถบ ระยะห่างแต่ละแถบ 20, 25, 50 และ 60 เซนติเมตร ความหนา 3 และ 6 มิลลิเมตร รวม 8 รูปแบบ
- 2) แถบชะลอความเร็วกว้าง 10 เซนติเมตร จำนวน 10 แถบ ระยะห่างแต่ละแถบ 20, 25, 50 และ 60 เซนติเมตร ความหนา 3 และ 6 มิลลิเมตร รวม 8 รูปแบบ
- 3) แถบชะลอความเร็วกว้าง 20 เซนติเมตร จำนวน 10 แถบ ระยะห่างแต่ละแถบ 20, 25, 50 และ 60 เซนติเมตร ความหนา 3 และ 6 มิลลิเมตร รวม 8 รูปแบบ

สำหรับการกำหนดจำนวนชุดของแถบเส้นชะลอความเร็วพิจารณาโดยกำหนดให้ยานพาหนะใช้เวลาอยู่บนชุดแถบชะลอความเร็วเป็นเวลา 6 วินาที ซึ่งเป็นเวลาที่มากกว่าค่า PIEV ตามที่มาตรฐานการออกแบบของ AASHTO โดยกำหนดให้เท่ากับ 2-2.5 วินาที ในสภาพร่างกายปกติ [15]

และ เพิ่มเป็น 4 วินาที เมื่อสภาพร่างกายเหนื่อยล้าจากการเดินทางไกล หรือ พบปัญหาที่ยากต่อการตัดสินใจ โดยดำเนินการติดตั้ง จำนวน 3 ชุด ระยะห่างระหว่างชุด 40 เมตร สำหรับกรณีของแถบเส้นชะลอความเร็วที่ความหนา 6 มิลลิเมตร การศึกษานี้พิจารณาดำเนินการภายหลังการประเมินประสิทธิภาพของเส้นหนา 3 มิลลิเมตร แล้วเสร็จ โดยดำเนินการเพิ่มความหนาของแถบเส้นชะลอความเร็วเดิมอีก 3 มิลลิเมตร รูปแบบแถบเส้นชะลอความเร็วที่ใช้ในการทดสอบ แสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 รูปแบบของแถบเส้นชะลอความเร็วที่ใช้ในการศึกษา

2.3 การติดตั้งแถบเส้นชะลอความเร็วในพื้นที่ทดสอบ

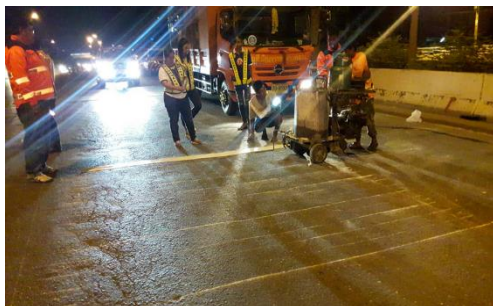
การดำเนินงานติดตั้งแถบเส้นชะลอความเร็วรูปแบบต่างๆ เพื่อประเมินประสิทธิภาพพิจารณา คัดเลือกพื้นที่บริเวณถนนพระราม 2 เป็นพื้นที่ทดสอบ เนื่องจากเป็นเส้นทางที่มีองค์ประกอบ การจราจรจากยานพาหนะหลายประเภทครอบคลุมประเภทของยานพาหนะที่มีการใช้งานใน บริเวณจุดตัดทางรถไฟในพื้นที่ศึกษา และ เป็นพื้นที่ซึ่งยานพาหนะทดสอบสามารถใช้ความเร็วได้ อย่างอิสระ รวมถึงสามารถใช้งานได้อย่างต่อเนื่องภายหลังการทดสอบแล้วเสร็จ สำหรับการติดตั้ง แถบเส้นชะลอความเร็วพิจารณาใช้วัสดุเทอร์โมพลาสติกที่หลอมตัวด้วยความร้อน โดยทำ การละลายส่วนผสมต่างๆ ให้เข้ากันด้วยเครื่องผสมเทอร์โมพลาสติก สำหรับการตีแถบเส้นชะลอ ความเร็วดำเนินการด้วยอุปกรณ์เครื่องตีเส้นแบบพ่น โดยดำเนินการวัดความหนาของเส้นให้ เป็นไปตามที่ได้กำหนดไว้ การดำเนินงานติดตั้งแถบเส้นชะลอความเร็วรูปแบบต่าง ๆ ในพื้นที่ ทดสอบ แสดงดังรูปที่ 3



ก. การเตรียมการก่อนตีแถบเส้นชะลอ ความเร็ว



ข. การกำหนดขนาดความกว้างและระยะห่าง ของแถบเส้นชะลอความเร็ว



ค. การตีเส้นแถบชะลอความเร็วด้วย สีเทอร์โมพลาสติก



ง. การวัดความหนาของแถบเส้นชะลอ ความเร็ว

รูปที่ 3 การดำเนินงานติดตั้งแถบเส้นชะลอความเร็วในพื้นที่ทดสอบ

2.4 การเก็บข้อมูลภายในพื้นที่ศึกษาและพื้นที่ทดสอบ

2.4.1 การเก็บข้อมูลระดับเสียงภายในห้องโดยสาร

อุปกรณ์เครื่องวัดเสียง (Sound Meter) ที่มีความละเอียดระดับ 0.1 dB ได้มีการติดตั้งบนยานพาหนะทดสอบแต่ละประเภท เพื่อตรวจสอบค่าเฉลี่ยความเข้มของเสียงภายในห้องโดยสารบริเวณที่นั่งคนขับ สำหรับย่านความถี่ของเสียงที่อุปกรณ์สามารถบันทึกได้จะอยู่ในช่วง 31.5 Hz–8 KHz โดยมีระดับในการวัดความเข้มของเสียงอยู่ที่ 30-130 dB

2.4.2 การเก็บข้อมูลระดับการสั่นสะเทือนภายในห้องโดยสาร

อุปกรณ์เครื่องวัดการสั่นสะเทือน (Vibration Meter) ที่สามารถบันทึกค่าการสั่นสะเทือนภายในห้องโดยสารได้ทั้ง 3 แกน ได้มีการติดตั้งยึดแน่นกับตัวยานพาหนะ โดยการศึกษานี้พิจารณาติดตั้งบริเวณคอลโซลหน้ารถใกล้กับพวงมาลัย เนื่องจากเป็นบริเวณที่ผู้ขับขี่สามารถรับรู้การสั่นสะเทือนได้มากที่สุด โดยวัดค่าความเร็วการสั่น (Velocity Vibration) แล้วรายงานค่าการสั่นสะเทือนภายในห้องโดยสารในหน่วย VdB (Vibration Decibels) แสดงดังรูปที่ 4



ก. การติดตั้งอุปกรณ์บนรถจักรยานยนต์



ข. การติดตั้งอุปกรณ์บนรถยนต์ส่วนบุคคล



ค. การติดตั้งอุปกรณ์บนรถกระบะ



ง. การติดตั้งอุปกรณ์บนรถบรรทุก 6 ล้อ



รูปที่ 4 การติดตั้งอุปกรณ์วัดเสียงและสั่นสะเทือนภายในห้องโดยสาร

2.5 การประเมินผลรูปแบบแถบเส้นชะลอความเร็ว

สำหรับการประเมินผลรูปแบบแถบเส้นชะลอความเร็วรูปแบบต่างๆ การศึกษานี้พิจารณาเปรียบเทียบความต่างของระดับเสียงเฉลี่ยในห้องโดยสารระหว่างกรณีถนนพื้นที่ทดสอบที่มี

การติดตั้งแถบเส้นชะลอความเร็ว และ กรณีถนนบริเวณจุดตัดทางรถไฟต่าง ๆ ในพื้นที่ศึกษา สำหรับการเปรียบเทียบความสั่นสะเทือนภายในห้องโดยสารจะพิจารณาเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานตามผลการศึกษาของ Wilson Ihrig & Associates, Inc. [11] เพื่อประเมินการตื่นรู้ของผู้ขับขี่ที่มีต่อแถบเส้นชะลอความเร็วรูปแบบต่าง ๆ

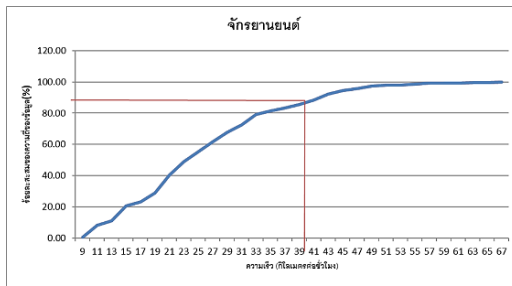
แถบเส้นชะลอความเร็วที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้บริเวณจุดตัดทางรถไฟ โดยพิจารณาดังนี้

- 1) ระดับเสียงภายในห้องโดยสารมีความแตกต่างกับ กรณีไม่ขับผ่านแถบชะลอความเร็วเกินกว่า 4 dB(A) ระยะเวลาเกิด เสียงมากกว่า 0.35 วินาที [16]
- 2) สามารถสร้างการสั่นสะเทือนได้ 70-79 VdB ซึ่งเป็นระดับที่ยังไม่รบกวนจนยอมรับไม่ได้ [17]

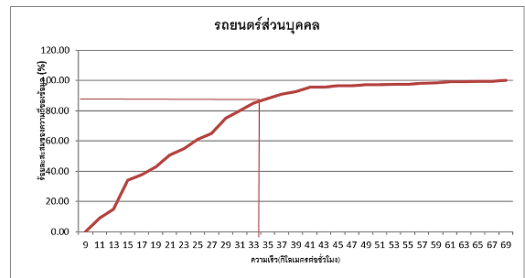
3. การวิเคราะห์ข้อมูลและผลการวิจัย

3.1 การใช้ความเร็วของยานพาหนะบริเวณจุดตัดทางรถไฟ

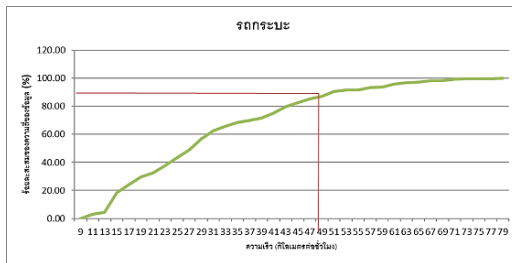
การเก็บข้อมูลความเร็วของยานพาหนะบริเวณ 350 เมตร ก่อนถึงจุดตัดทางรถไฟต่าง ๆ ในพื้นที่ศึกษา ซึ่งจากการสำรวจพื้นที่ศึกษาพบว่าระยะ 350 เมตรก่อนถึงจุดตัดทางรถไฟ เป็นระยะที่เริ่มติดตั้งป้ายเตือนทางรถไฟป้ายแรก สามารถสรุปพฤติกรรมการใช้ความเร็วของยานพาหนะแต่ละประเภทได้ว่า ยานพาหนะประเภทรถกระบะ ใช้ความเร็วมากที่สุด จากการเก็บข้อมูลความเร็วยานพาหนะในพื้นที่ศึกษาจำนวน 698 คัน เป็นรถจักรยานยนต์ 235 คัน รถยนต์นั่งส่วนบุคคล 200 คัน รถกระบะ 240 คัน และรถบรรทุก 6 ล้อ 23 คัน โดยพิจารณาค่าความเร็วที่ 85th เปอร์เซ็นไทล์ ซึ่งเป็นความเร็วที่ยานพาหนะร้อยละ 85 ในกระแสจราจรใช้ พบว่ายานพาหนะประเภทรถกระบะมีค่าความเร็วที่ 85th เปอร์เซ็นไทล์สูงสุดอยู่ที่ 48.1 กิโลเมตร/ชั่วโมง ทั้งนี้เนื่องจากสมรรถนะของรถ และปัจจัยจากผู้ขับขี่ เนื่องจากส่วนหนึ่งเป็นรถที่ใช้บรรทุกสินค้าจึงต้องทำความเร็วมากกว่ารถชนิดอื่นๆ รองลงมาได้แก่ ยานพาหนะประเภทรถบรรทุก 6 ล้อ ความเร็วที่ 85th เปอร์เซ็นไทล์ มีค่าอยู่ที่ 45.8 กิโลเมตร/ชั่วโมง และ ยานพาหนะประเภทรถจักรยานยนต์ ความเร็วที่ 85th เปอร์เซ็นไทล์ มีค่าอยู่ที่ 39.5 กิโลเมตร/ชั่วโมง โดยที่ยานพาหนะประเภทรถยนต์ส่วนบุคคล ใช้ความเร็วต่ำที่สุด เนื่องจากเป็นรถยนต์ที่ใช้ในครอบครัว ผู้ขับขี่มักจะมีคามระมัดระวังมากกว่ารถชนิดอื่นๆ โดยความเร็วที่ 85th เปอร์เซ็นไทล์ มีค่าอยู่ที่ 33.5 กิโลเมตร/ชั่วโมง รายละเอียดพฤติกรรมการใช้ความเร็วของยานพาหนะประเภทต่างๆ บริเวณจุดตัดทางรถไฟพื้นที่ศึกษาแสดงดังรูปที่ 5 ค่าความเร็วที่ 85th เปอร์เซ็นไทล์ของยานพาหนะแต่ละประเภทถูกนำไปใช้ในการวิเคราะหาค่าระดับเสียงและค่าความสั่นสะเทือนเมื่อยานพาหนะวิ่งผ่านแถบเส้นชะลอความเร็วรูปแบบต่าง ๆ



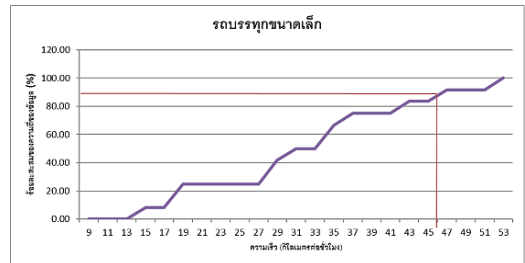
ก. รถจักรยานยนต์



ข. รถยนต์ส่วนบุคคล



ค. รถกระบะ



ง. รถบรรทุก 6 ล้อ

รูปที่ 5 ความเร็วที่ 85th เปอร์เซนต์ไทล์ ของยานพาหนะบริเวณจุดตัดทางรถไฟ

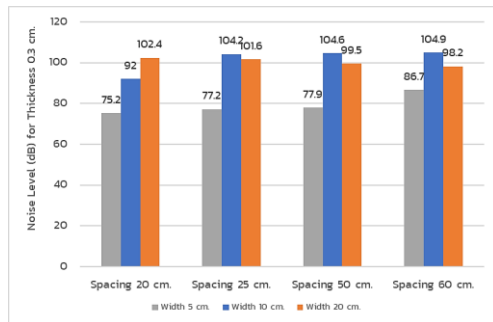
3.2 ผลกระทบของแถบเส้นชะลอความเร็วแต่ละรูปแบบ

จากแถบตัวอย่างทดสอบจำนวน 24 รูปแบบ ได้เก็บข้อมูลระดับเสียงและความสั่นสะเทือนในห้องโดยสารในสภาพอากาศปกติสภาพถนนแห้งสภาพการมองเห็นชัดเจน ทำการเก็บข้อมูล 5 ค่าต่อความเร็วทดสอบ

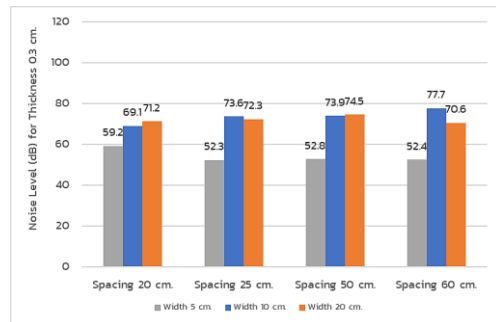
3.2.1 ระดับเสียงภายในห้องโดยสาร

ระดับเสียงภายในห้องโดยสารของยานพาหนะแต่ละประเภท แสดงดังรูปที่ 6 และ 7 สามารถสรุปได้ว่า ยานพาหนะประเภทรถจักรยานยนต์ มีค่าเฉลี่ยของเสียงสูงที่สุด โดยมีค่าอยู่ที่ 93.7 dB สำหรับแถบชะลอความเร็วที่มีความหนา 3 มม. และ 98.17 dB สำหรับแถบชะลอความเร็วที่มีความหนา 6 มม. รองลงมาได้แก่ ยานพาหนะประเภทรถบรรทุก 6 ล้อ มีค่าอยู่ที่ 75.54 dB สำหรับแถบชะลอความเร็วที่มีความหนา 3 มม. และ 73.52 dB สำหรับแถบชะลอความเร็วที่มีความหนา 6 มม. ส่วนยานพาหนะประเภทรถยนต์ส่วนบุคคล และ รถกระบะ มีค่าเฉลี่ยใกล้เคียงกัน มีค่าอยู่ในช่วง 62-66 dB สำหรับแถบชะลอความเร็วที่มีความหนา 3 มม. และ 65-67 dB สำหรับแถบชะลอความเร็วที่มีความหนา 6 มม. โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการวัดค่าระดับเสียงภายในห้องโดยสารพบว่า ที่ความหนาและระยะห่างแถบเท่ากันเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้นระดับเสียงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยแถบชะลอความเร็วที่มีความหนา 6 มม. จะก่อให้เกิดเสียงมากกว่าที่ระยะห่างระหว่างแถบ

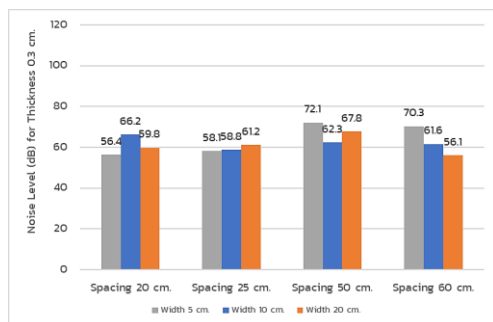
เท่ากันและความเร็วเท่ากัน ซึ่งทำให้สามารถสรุปได้ว่าผลต่างของความดังเสียงจะผกผันตามความเร็วและความหนาของแถบ ส่วนระยะห่างระหว่างแถบที่มากขึ้นจะมีผลให้ค่าความดังของเสียงลดลง



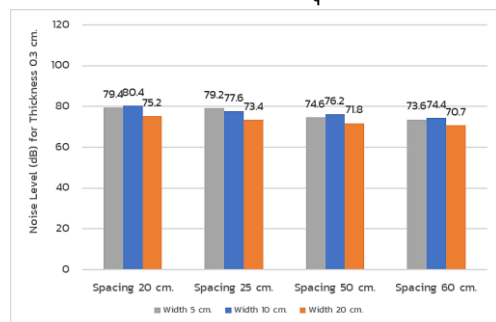
ก. รถจักรยานยนต์



ข. รถยนต์ส่วนบุคคล

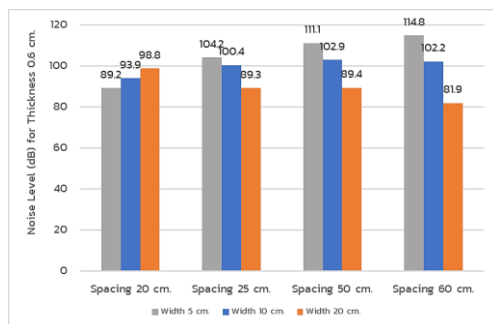


ค. รถกระบะ

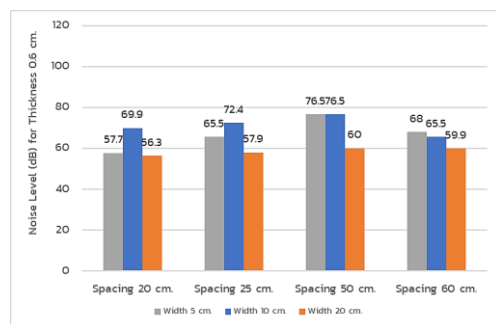


ง. รถบรรทุก 6 ล้อ

รูปที่ 6 ระดับเสียงภายในห้องโดยสารที่ความหนา 0.3 ซม.

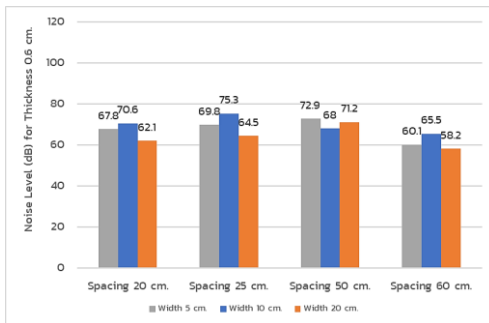


ก. รถจักรยานยนต์

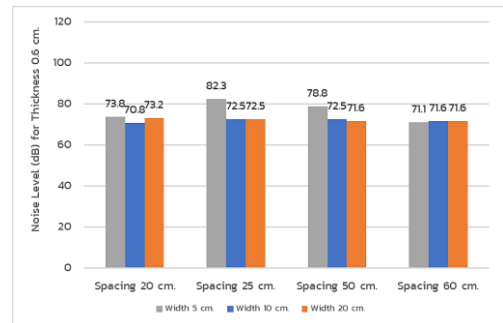


ข. รถยนต์ส่วนบุคคล

รูปที่ 7 ระดับเสียงภายในห้องโดยสารที่ความหนา 0.6 ซม.



ค. รถกระบะ

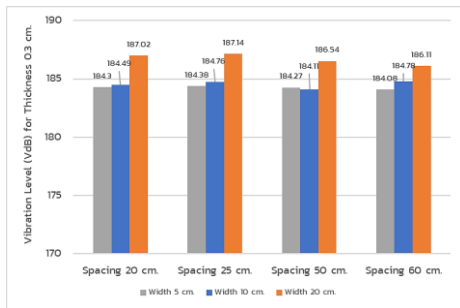


ง. รถบรรทุก 6 ล้อ

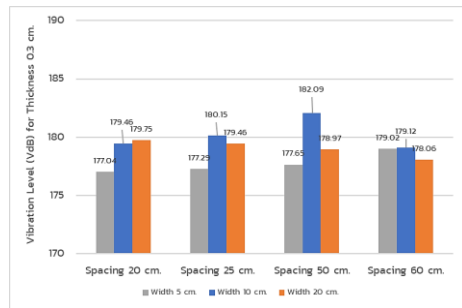
รูปที่ 7 ระดับเสียงภายในห้องโดยสารที่ความหนา 0.6 ซม. (ต่อ)

3.2.2 ระดับการสั่นสะเทือนภายในห้องโดยสาร

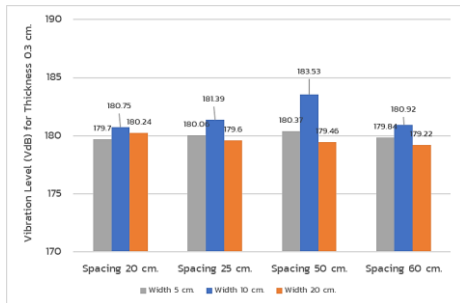
ระดับการสั่นสะเทือนภายในห้องโดยสารของยานพาหนะแต่ละประเภท แสดงดังรูปที่ 8 และ 9 สามารถสรุปได้ว่า ยานพาหนะประเภทรถจักรยานยนต์ มีค่าเฉลี่ยของเสียงสูงที่สุด โดยมีค่าอยู่ที่ 185.16 VdB สำหรับแถบชะลอความเร็วที่มีความหนา 3 มม. และ 185.19 VdB สำหรับแถบชะลอความเร็วที่มีความหนา 6 มม. รองลงมาได้แก่ ยานพาหนะประเภทรถบรรทุก 6 ล้อ มีค่าอยู่ที่ 184.11 VdB สำหรับแถบชะลอความเร็วที่มีความหนา 3 มม. และ 184.51 VdB สำหรับแถบชะลอความเร็วที่มีความหนา 6 มม. ส่วนยานพาหนะประเภทรถยนต์ส่วนบุคคล และ รถกระบะ มีค่าเฉลี่ยใกล้เคียงกัน มีค่าอยู่ในช่วง 179-180 VdB สำหรับแถบชะลอความเร็วที่มีความหนา 3 มม. และ 181-182 VdB สำหรับแถบชะลอความเร็วที่มีความหนา 6 มม. โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการวัดค่าระดับการสั่นสะเทือนภายในห้องโดยสารพบว่า ค่าความสั่นสะเทือนภายในห้องโดยสารที่ได้จากการเก็บข้อมูลในพื้นที่ทดสอบมีค่าค่อนข้างสูง โดยมีค่าอยู่ในช่วง 177-188 VdB ซึ่งอาจเป็นผลมาจากปัจจัยภายนอกอื่นๆ เช่น ความสั่นสะเทือนของเครื่องยนต์ สำหรับผลลัพธ์ที่ได้จากการวัดค่าระดับความสั่นสะเทือนภายในห้องโดยสารสามารถสรุปได้ว่า เมื่อความเร็วเพิ่มมากขึ้นระดับความสั่นสะเทือนจะลดลง และ แถบชะลอความเร็วที่มีระยะห่างมากกว่าจะเกิดความสั่นสะเทือนสูงขึ้น โดยที่ความหนาของแถบชะลอความเร็วจะไม่มีผลต่อระดับความสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในยานพาหนะแต่ละประเภท



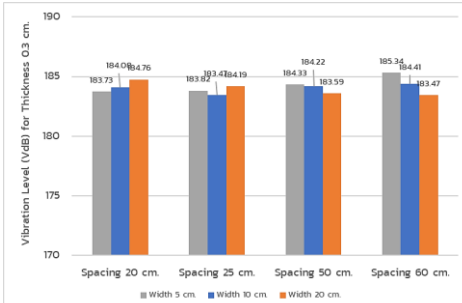
ก. รถจักรยานยนต์



ข. รถยนต์ส่วนบุคคล

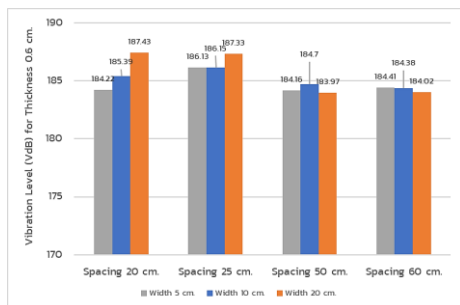


ค. รถกระบะ

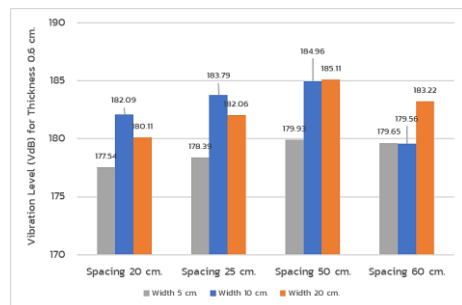


ง. รถบรรทุก 6 ล้อ

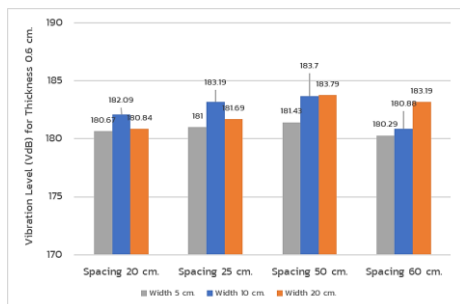
รูปที่ 8 ระดับการสั่นสะเทือนภายในห้องโดยสารที่ความหนา 0.3 ซม.



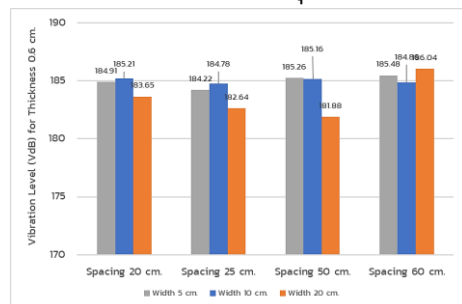
ก. รถจักรยานยนต์



ข. รถยนต์ส่วนบุคคล



ค. รถกระบะ



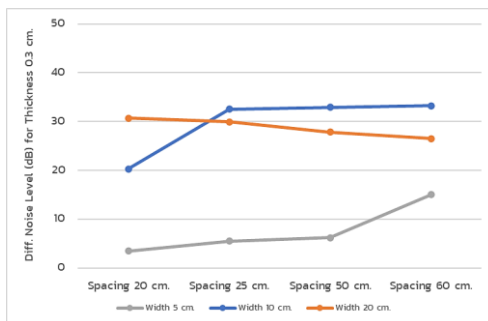
ง. รถบรรทุก 6 ล้อ

รูปที่ 9 ระดับเสียงภายในห้องโดยสารที่ความหนา 0.6 ซม.

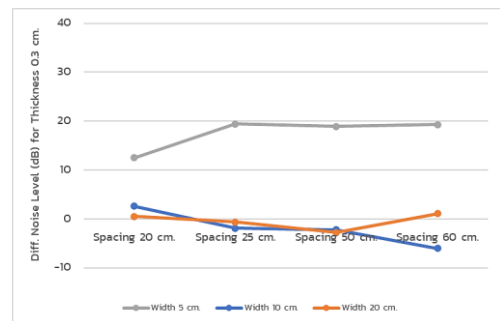
3.3 การรับรู้ของผู้ขับขีที่เกิดจากแถบเส้นชะลอความเร็วแต่ละรูปแบบ

3.3.1 การเปรียบเทียบความต่างของระดับเสียงในห้องโดยสาร

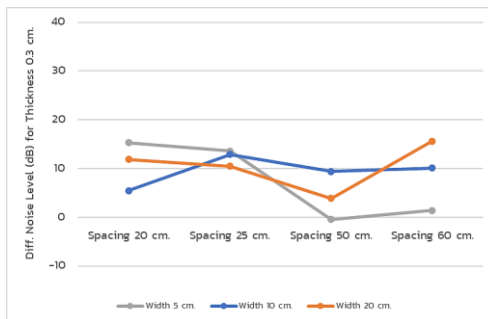
การเปรียบเทียบความต่างของระดับเสียงเฉลี่ยในห้องโดยสารระหว่างกรณีถนนพื้นที่ทดสอบที่มีการติดตั้งแถบเส้นชะลอความเร็ว และ กรณีถนนบริเวณจุดตัดทางรถไฟต่าง ๆ ในพื้นที่ศึกษาของยานพาหนะแต่ละประเภท แสดงดังรูปที่ 10 และ 11 สามารถสรุปได้ว่า ยานพาหนะประเภทรถจักรยานยนต์ มีค่าความต่างของระดับเสียงมากที่สุด รองลงมาได้แก่ ยานพาหนะประเภทรถยนต์ส่วนบุคคล, รถกระบะ และ รถบรรทุก 6 ล้อ มีค่าความต่างของระดับเสียงน้อยที่สุด โดยแถบชะลอความเร็วที่ความหนา 6 มม. จะมีค่าความต่างของระดับเสียงในห้องโดยสารมากกว่า ในขณะที่ระยะห่างระหว่างแถบชะลอความเร็วที่มากขึ้นจะมีผลให้ค่าความต่างของเสียงลดลง



ก. รถจักรยานยนต์



ข. รถยนต์ส่วนบุคคล

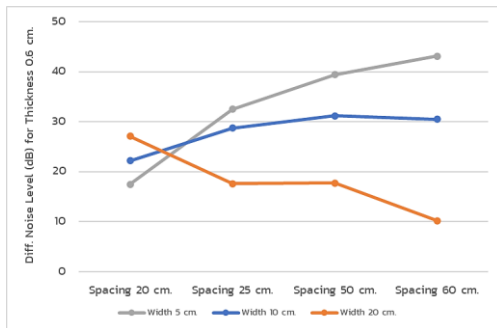


ค. รถกระบะ

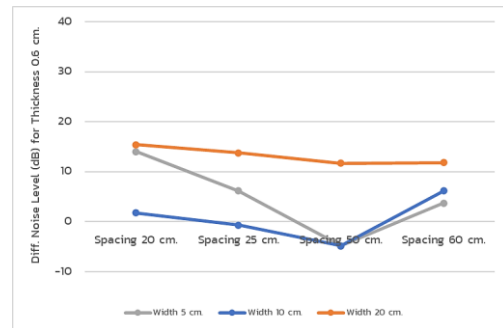


ง. รถบรรทุก 6 ล้อ

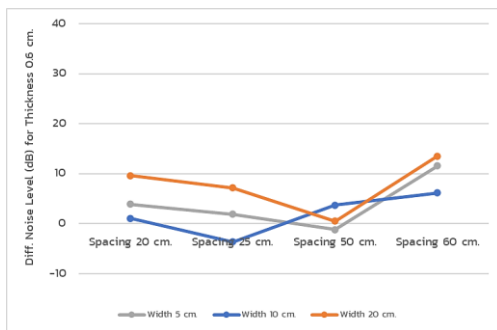
รูปที่ 10 ความต่างของระดับเสียงภายในห้องโดยสารที่ความหนา 0.3 ซม.



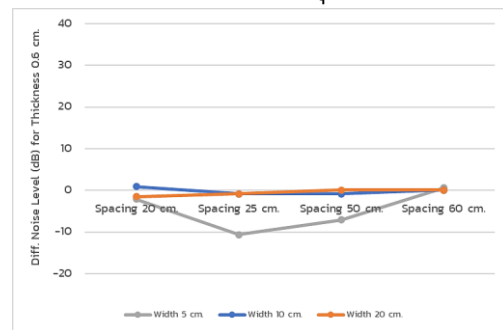
ก. รถจักรยานยนต์



ข. รถยนต์ส่วนบุคคล



ค. รถกระบะ



ง. รถบรรทุก 6 ล้อ

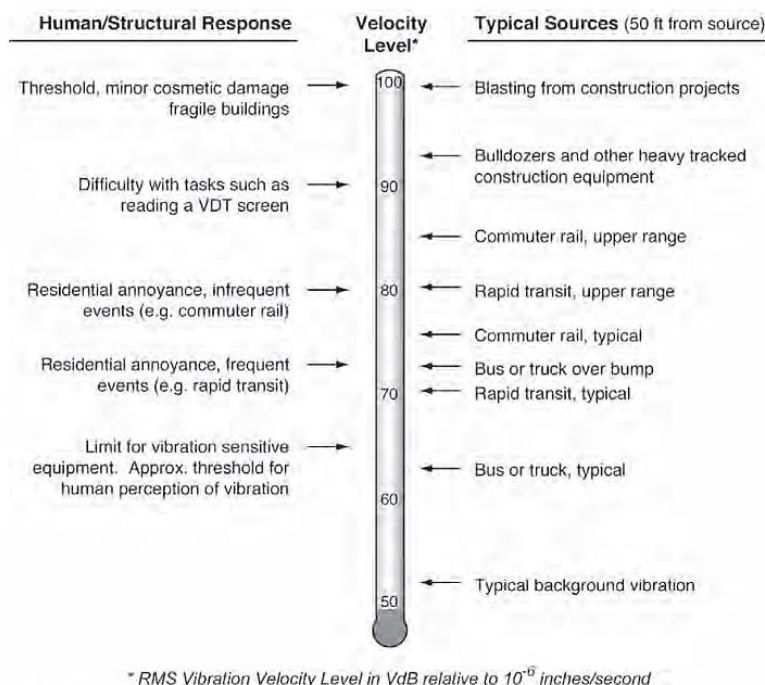
รูปที่ 11 ความต่างของระดับเสียงภายในห้องโดยสารที่ความหนา 0.6 ซม.

การวิเคราะห์ทางสถิติจากข้อมูลของระดับเสียงในห้องโดยสาร ก่อนและหลังรถทดสอบวิ่งผ่านแถบเส้นชะลอความเร็ว โดยการทดสอบ Paired t-Test โดยตั้งสมมุติฐานระดับเสียงหลังรถทดสอบวิ่งผ่านแถบเส้นชะลอความเร็วมีค่ามากกว่าระดับเสียงก่อนรถทดสอบวิ่งผ่านแถบเส้นชะลอความเร็วด้วยความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ พบว่าค่า P-Value ของแถบชะลอความเร็วทุกรูปแบบมีค่าน้อยกว่า 0.05 แสดงว่าระดับเสียงในห้องโดยสารมีค่าสูงขึ้นอย่างมีนัยยะสำคัญ เมื่อรถทดสอบวิ่งผ่านแถบเส้นชะลอความเร็ว

3.3.2 การเปรียบเทียบความสั่นสะเทือนภายในห้องโดยสาร

การเปรียบเทียบความสั่นสะเทือนภายในห้องโดยสารของยานพาหนะแต่ละประเภทบนถนนพื้นที่ทดสอบที่มีการติดตั้งแถบเส้นชะลอความเร็ว โดยการเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานตามผลการศึกษาของ Wilson Ihrig & Associates, Inc. [11] เพื่อประเมินการตื่นรู้ของผู้ขับขี่ที่มีต่อแถบเส้นชะลอความเร็วรูปแบบต่างๆ แสดงดังรูปที่ 12 ผลการศึกษาพบว่า ค่าความสั่นสะเทือนภายในห้องโดยสารของยานพาหนะทุกประเภทมีค่ามากกว่าค่ามาตรฐาน (มากกว่า 100 VdB) โดยที่ยานพาหนะประเภทรถจักรยานยนต์ มีค่าความสั่นสะเทือนในห้องโดยสารสูงที่สุด รองลงมาได้แก่

ยานพาหนะประเภทรถบรรทุก 6 ล้อ โดยที่ รถยนต์ส่วนบุคคลและรถกระบะ มีค่าใกล้เคียงกัน ทำให้สามารถสรุปได้ว่าเส้นแถบชะลอความเร็วที่ออกแบบสามารถสะท้อนให้ผู้ขับขี่เกิดความตื่นตัวรับรู้ก่อนถึงจุดตัดทางรถไฟในระยะเวลาที่สามารถชะลอเพื่อหยุดได้อย่างปลอดภัย



รูปที่ 12 การตอบสนองของมนุษย์และแหล่งกำเนิดความสั่นสะเทือนที่ระดับต่าง ๆ [11]

การวิเคราะห์ทางสถิติจากข้อมูลค่าความสั่นสะเทือนภายในห้องโดยสาร ก่อนและหลังรถทดสอบวิ่งผ่านแถบเส้นชะลอความเร็ว โดยการทดสอบ Paired t-Test โดยตั้งสมมุติฐานว่าความสั่นสะเทือนภายในห้องโดยสารหลังรถทดสอบวิ่งผ่านแถบเส้นชะลอความเร็วมีค่ามากกว่าค่าความสั่นสะเทือนก่อนรถทดสอบวิ่งผ่านแถบเส้นชะลอความเร็วด้วยความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ พบว่าค่า P-Value ของแถบชะลอความเร็วทุกรูปแบบมีค่าน้อยกว่า 0.05 แสดงว่าความสั่นสะเทือนภายในห้องโดยสารมีค่าสูงขึ้นอย่างมีนัยยะสำคัญ เมื่อรถทดสอบวิ่งผ่านแถบเส้นชะลอความเร็ว

4. สรุปผลการวิจัย

การศึกษามีจุดมุ่งหมายเพื่อประเมินรูปแบบของแถบเส้นชะลอความเร็วที่เหมาะสม สามารถสะท้อนให้ผู้ขับขี่เกิดความตื่นตัวรับรู้ก่อนถึงจุดตัดทางรถไฟในระยะเวลาที่สามารถชะลอความเร็วได้อย่างปลอดภัย สำหรับการนำไปประยุกต์ใช้เพื่อแจ้งเตือนผู้ขับขี่เมื่อเข้าสู่บริเวณจุดตัดทางรถไฟ

โดยคัดเลือกจุดตัดทางรถไฟในแต่ละภูมิภาคของประเทศไทยมาเป็นพื้นที่ศึกษา และทำการประเมินผลกระทบของแถบเส้นชะลอความเร็วรูปแบบต่าง ๆ ในพื้นที่ทดสอบ โดยการประเมินค่าความต่างของเสียงก่อนและหลังผ่านแถบเส้นชะลอความเร็ว ทั้ง 24 รูปแบบ และการวัดค่าความสั่นสะเทือนในห้องโดยสาร สามารถสรุปได้ว่า ที่ความหนาและระยะห่างของแถบชะลอความเร็วเท่ากัน เมื่อความเร็วเพิ่มขึ้นระดับเสียงก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยที่ความหนาของแถบชะลอความเร็วที่ 6 มม. จะให้เสียงที่มากกว่าความหนาแถบ 3 มม. ส่วนระยะห่างระหว่างแถบที่มากขึ้นจะมีผลให้ค่าความต่างของเสียงลดลง อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาค่าความสั่นสะเทือนซึ่งพบว่า ในทุก ๆ รูปแบบ มีค่าสูงเกินกว่าค่ามาตรฐานการรับรู้ได้ของมนุษย์อยู่แล้ว โดยมีค่าประมาณ 177-188 VdB ทำให้สามารถสรุปได้ว่าเส้นแถบชะลอความเร็วที่ออกแบบสามารถสะท้อนให้ผู้ขับขี่เกิดความตื่นตัวรับรู้ก่อนถึงจุดตัดทางรถไฟในระยะที่สามารถชะลอเพื่อหยุดได้อย่างปลอดภัย

ข้อสังเกตจากการทดสอบระดับเสียง พบว่า ยานพาหนะประเภทรถจักรยานยนต์ มีค่าเฉลี่ยของเสียงสูงที่สุด ทั้งนี้อาจเนื่องจากการถูกรบกวนจากปัจจัยสิ่งแวดล้อมมากกว่ารถชนิดอื่น ๆ เนื่องจากการติดตั้งอุปกรณ์อยู่ภายนอกไม่มีห้องโดยสาร หากมีการทดสอบค่าระดับเสียง ยานพาหนะประเภทรถจักรยานยนต์ควรหาเครื่องมือที่มีขนาดเล็กลง สามารถติดตั้งภายในหมวกนิรภัยได้ และควรใช้หมวกนิรภัยชนิดเต็มใบเพื่อป้องกันเสียงรบกวนจากภายนอกให้ได้มากที่สุด อย่างไรก็ตาม การวัดค่าเสียงและความสั่นสะเทือนในห้องโดยสารของยานพาหนะภายในพื้นที่ทดสอบ อาจจะมีผลกระทบมาจากประเภทผิวจราจรเดิม และ สภาพแวดล้อมโดยรอบพื้นที่ ซึ่งควรมีการประเมินเปรียบเทียบเพิ่มเติม รวมถึงควรมีการนำรูปแบบแถบเส้นชะลอความเร็วที่เหมาะสมกับจุดตัดทางรถไฟจุดต่าง ๆ ไปติดตั้งบนพื้นที่จริง เพื่อประเมินผลด้านความปลอดภัยบริเวณจุดตัดทางรถไฟ โดยปัจจัยสำคัญที่ใช้ในการประเมินประกอบด้วยสถิติการเกิดอุบัติเหตุภายหลังการติดตั้ง รวมถึงความเร็วของยานพาหนะประเภทต่าง ๆ บริเวณก่อนถึงทางแยกจุดตัดทางรถไฟ

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ สำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัยนี้ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออกที่ให้การส่งเสริมการดำเนินการวิจัยให้ลุล่วงเป็นอย่างดี และ ขอขอบคุณคุณสมประสงค์ อรรถาธิต ผู้อำนวยการสำนักงานบำรุงทางธนบุรีที่ช่วยสนับสนุนการดำเนินงานทดสอบบนผิวจราจร

References

- [1] Roywiratana S. Teaching documents for the seminar on the railway network of Thailand and the region. Bangkok, Thailand: Infrastructure engineering and management, Kasetsart university; 2017. (In Thai)
- [2] Operation control division, State railway of Thailand. Statistics on train accidents for fiscal years 2011-2021. Bangkok, Thailand: State railway of Thailand; 2022. (In Thai)
- [3] Department of rail transport. Master plan for improving future railway intersections. Study project to reduce accidents at road and railway intersections. Bangkok, Thailand: Department of rail transport; 2022. (In Thai)
- [4] Vadeby A, Anund A. Effectiveness and acceptability of milled rumble strips on rural two-lane roads in Sweden. European transport research review 2017;9;29. doi: 10.1007/s12544-017-0244-x.
- [5] Hossain A, Sun X, Rahman A, Khanal S. Safety evaluation of centerline rumble strips on rural two-lane undivided highways: Application of intervention time series analysis. IATSS Research 2023;47(2):286-98. doi: 10.1016/j.iatssr.2023.05.001.
- [6] Sattayamalee S. Research to determine the standard for using rumble strips to reduce traffic speed. Nakhon Ratchasima, Thailand: Suranaree university of technology; 2010. (In Thai)
- [7] Walton S, Meyer E. The effect of rumble strip configuration on sound and vibration levels. ITE Journal 2002;72(12):28-32.
- [8] Montella A, Aria M, D'Ambrosio A, Galante F, Mauriello F, Perneti M. Simulator evaluation of drivers' speed, deceleration and lateral position at rural intersections in relation to different perceptual cues. Accident Analysis & Prevention 2011;43(6):2072-84. doi: 10.1016/j.aap. 2011.05.030.
- [9] Karkle DE, Rys MJ, Russell ER. Centerline rumble strips usage in the united states. Journal of the Transportation Research Forum 2011;50(1): 101-17. doi: 10.5399/osu/jtrf.50.1.2676.
- [10] Miles JD, Finley MD. Factors that influence the effectiveness of rumble strip design. Transportation Research Record 2007;2030(1):1-9. doi: 10.3141/2030-01.
- [11] Wilson Ihrig & Associates, Inc. Central area guideway ground borne noise and vibration report and northern area Berryessa extension. VTA Capital expressway light rail project; 2008.

- [12] Houix O, Bonnot S, Vienne F, Vericel B, Pardo LF, Misdariis N, Susini P. Perceptual influence of the vibratory component on the audio component of alarms produced by rumble strips, by measuring reaction times. Proceedings of the Acoustics 2012 Nantes Conference; 2012 Apr 23-27; Nantes, France. p.1083-8.
- [13] Pimentel RL, de Melo RA, Rolim IA. Estimation of increases in noise levels due to installation of transverse rumble strips on urban roads. Applied Acoustics. 2014;76:453-61. doi: 10.1016/j.apacoust.2013.09.014.
- [14] Kasess CH, Maly T, Majdak P, Waubke H. Effects of rumble strip parameters on acoustics, vibration, and perception. Acta Acustica 2021;5:54. doi: 10.1051/aacus/2021047.
- [15] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). A policy on geometric design of highways and streets. 7th ed. Washington, D.C., USA: AASHTO; 2018.
- [16] Spring GS. Rumble strips in Missouri. Rolla, USA: Department of Civil Engineering, University of Missouri-Rolla; 2003.
- [17] ATS Consulting. Noise and vibration study: AC transit. Oakland, California, USA: ATS Consulting; 2005.

ประวัติผู้เขียนบทความ



อาจารย์อาทิตยา นิ่มมอนงค์ ปัจจุบันดำรงตำแหน่งประธานหลักสูตรวิศวกรรมโยธา ระดับปริญญาตรี อาจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก พื้นที่อุเทนถวาย เลขที่ 225 ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กทม. 10330 Email: atittaya_ni@rmutto.ac.th สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยศรีปทุม

งานวิจัยที่สนใจ ได้แก่ วิศวกรรมขนส่งและจราจร วิศวกรรมการทาง และความปลอดภัยทางถนน



อาจารย์ ดร.พรณรงค์ เลื่อนเพชร สังกัดสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร เลขที่ 1381 ถนนประชากรราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กทม. 10800 Email: pornnarong.l@rmutp.ac.th สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาเอก สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ระดับปริญญาตรี สาขาวิชาเทคโนโลยีโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ และ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

งานวิจัยที่สนใจ ได้แก่ วิศวกรรมขนส่งและจราจร วิศวกรรมทาง การประเมินความปลอดภัยทางถนน และ การพัฒนาระบบจราจรอัจฉริยะ (Intelligent Transportation System)

Article History:

Received: September 1, 2024

Revised: December 19, 2024

Accepted: December 20, 2024

ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต:

ศ.ดร.กัณวีร์ กนิษฐ์พงศ์	สาขาวิศวกรรมขนส่ง สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย
ศ.ดร.โกสินทร์ จำนงไทย	ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศ.ดร.แคลิยา ปัทมพรหม	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ศ.ดร.โจเซฟ เคดารี	สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีและนวัตกรรม มหาวิทยาลัยกรุงเทพธนบุรี
ศ.ดร.ต่อกุล กาญจนาลัย	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ศ.ดร.ปราโมทย์ เดชะอำไพ	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศ.ดร.พานิช วุฒิพฤษ	ภาควิชาครุศาสตร์โยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ
ศ.ดร.วัฒนวงศ์ รัตนวราห	สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่ง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ศ.ดร.สุวัฒน์ 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.กรองแก้ว เลาหลิดานนท์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.กอบชัย เดชหาญ	ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.กัณวรัช พลุปรารักษ์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์
รศ.ดร.กิตติพงศ์ อัครกุล	ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รศ.ดร.จิรนุช เสี่ยงมศักดิ์	สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รศ.ดร.ชูสิทธิ์ ประดับเพ็ชร	สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา
รศ.ดร.ชัยณรงค์ อธิสกุล	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี
รศ.ดร.ณกร อินทร์พยุง	คณะโลจิสติกส์ มหาวิทยาลัยบูรพา

รศ.ดร.ณฐา คุปต์ชัยเกียรติ	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รศ.ดร.ดนุพล ตันนโยภาส	ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รศ.ดร.ทวีพล ชื้อสัตย์	ภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.เทอดศักดิ์ ร่องวิริยะพานิช	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.ธนู ญะฉาย	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
รศ.ดร.ธีรศิลป์ ทุมวิภาต	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือวัดและอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.นกร ภู่วโรคม	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
รศ.ดร.นิตย์ เพ็ชรรักษ์	มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต
รศ.ดร.นิตมา อัจฉริยะโพธา	ศูนย์บริการทางการศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี วิทยาเขตราชบุรี
รศ.ดร.เนตรนภิส ตันเต็มทรัพย์	สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รศ.ดร.บวรโชค ผู้พัฒน์	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.บุญเลิศ สื่อเนย	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
รศ.ดร.บุญวัฒน์ อัดชู	สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.ประยูร สุรินทร์	สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน
รศ.ดร.ปราโมทย์ ศรีน้อย	สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
รศ.ดร.ปรีดา ไชยมหาวัน	สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยพะเยา
รศ.ดร.พนิต ภูจินดา	ภาควิชาการวางแผนภาคและเมือง คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รศ.ดร.พรฤดี เนติโสภากุล	คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.พานิช วุฒิพฤษ	ภาควิชาครุศาสตร์โยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.พาสีทธิ์ หล่อธีรพงศ์	บัณฑิตวิทยาลัยการจัดการและนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.พิภพ สุนทรสมัย	ที่ปรึกษาคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต

รศ.ดร.พิศิษฐ์ โภคารัตน์กุล	สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
รศ.ดร.ไพโรจน์ สิงห์นันทกิจ	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รศ.ดร.พุศศักดิ์ ชิวสุวิทย์	ภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.ภัทรমন จงประดิษฐ์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.ภาณุวัฒน์ จ้อยกลัด	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
รศ.ดร.ภาวิณี เอี่ยมตระกูล	คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์และการผังเมือง มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รศ.ดร.มนตรี คำเงิน	ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.มนตรี ศิริปรัชญานันท์	ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.มานิช สรรพกิจพิภากร	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.ยุทธชัย บรรเทึงจิตร	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.รัตติกร วรากุลศิริพันธุ์	คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
รศ.ดร.ระพี กาญจนะ	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รศ.ดร.วรรณุช แจงสว่าง	คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร
รศ.ดร.วรพจน์ กรีสระเดช	คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.วรากร ศรีเชวงทรัพย์	สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์และปัญญาประดิษฐ์ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
รศ.ดร.วัชร เพียรสุภาพ	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รศ.ดร.วิทยา ทิพย์สุวรรณพร	สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.เวคิน ปิยรัตน์	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์
รศ.ดร.สถาพร โอภาสานนท์	สาขาวิชาบริหารธุรกิจระหว่างประเทศ โฉจิสติกส์และการขนส่ง มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

รศ.ดร.สมใจ จันทร์อุดม	สาขาวิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รศ.ดร.สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รศ.ดร.สมศักดิ์ มิตะถา	ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.สมิตร ส่งพิริยะกิจ	ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.สโรช บุญศิริพันธ์	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ.ดร.สินชัย ชินวรรธน์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.สิริพร โรจนนันต์	สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.เสรี เทวตเศรณี	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ.ดร.สุทัศน์ ลีลาทวิวัฒน์	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี
รศ.ดร.สุนติ สุภาพ	ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัย ศรีนครินทรวิโรฒ
รศ.ดร.สุรพล บุญลือ	ภาควิชาเทคโนโลยีและสื่อสารการศึกษา มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.อดิรักษ์ กาญจนหฤทัย	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยรังสิต
รศ.ดร.อรฉัตร จิตต์โสภาคย์	สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.อิทธิพงศ์ ชัยสายันท์	บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเอเซียอาคเนย์
รศ.ดร.อำพล การุณสุนทวงษ์	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี
รศ.เรวัฒน์ เหล่าไพบูรณ์	ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
รศ.วัชรินทร์ วิทยกุล	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขต บางเขน
รศ.วิญญู แสงสนิทกิจ	สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
รศ.ศันสนีย์ สุภาภา	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยา เขตบางเขน
รศ.เอกชัย วิมลมาลา	ภาควิชาเทคโนโลยีวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี

รศ.เอนก ศิริพานิชกร	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.กรกช ทวีสิน	สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยรามคำแหง
ผศ.ดร.กฤษ สุจริตตั้งธรรม	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม
ผศ.ดร.กัมพล พรหมจิริประวัติ	สาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง
ผศ.ดร.กิตติ สถาพรประสารณ์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผศ.ดร.กิตติศักดิ์ วิธินันทกิตต์	สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตบางพระ
ผศ.ดร.กฤษณ ทองศรี	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.เขมพัฒน์ ดันติวัฒนกุล	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.จักร จันทลักขณา	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.จารุวรรณ เกษมทรัพย์	สาขาวิชาการจัดการงานวิศวกรรม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผศ.ดร.จิราพรณ สุนทรโชติ	ภาควิชาคณิตศาสตร์และวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผศ.ดร.จิราวรรณ อุ่นเมตตาอารี	สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
ผศ.ดร.เจษฎา ชัยนิยม	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 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ผศ.ดร.ณพล ศรีศักดิ์	สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยพะเยา
ผศ.ดร.ณัฏฐา เจียรไนวชิระ	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผศ.ดร.ณัฐ โอชนาทรัพย์	สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
ผศ.ดร.ณัฐพงศ์ พันธุ์น้อย	คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผศ.ดร.ณัฐพงศ์ มกระฐ์	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี
ผศ.ดร.ดนัย เผ่าฤทธิธรรม	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอม เกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.ดวงพร กาศาสมบัติ	สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อมและความปลอดภัย คณะ วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม
ผศ.ดร.ดาวุด ทองทา	ภาควิชาคณิตศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี
ผศ.ดร.ติกะ บุญนาค	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต
ผศ.ดร.ตรี วาทกิจ	สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะเกษตรและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยนครพนม
ผศ.ดร.ทวีศักดิ์ เตชะกระโทก	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผศ.ดร.นที ศรีสวัสดิ์	ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งทอ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.นิพนธ์ วรรณโสภาคย์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผศ.ดร.ปรรัตน์ ศุภมิตรโยธิน	สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
ผศ.ดร.ประภาพรณ เกษราพงศ์	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา
ผศ.ดร.ปริญญา บุญกนิษฐ	สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ผศ.ดร.พงศกร บำรุงไทย	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา
ผศ.ดร.พงษ์ชัย ประกฤตศรี	ภาควิทยาศาสตร์พื้นฐานและพลศึกษา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา
ผศ.ดร.พิพัฒน์พงศ์ วัฒนวันยู	วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต
ผศ.ดร.พิมพ์เพชร สระทองอุ่น	สาขาวิชาวิศวกรรมยานยนต์ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

ผศ.ดร.มนทล นาวงษ์	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ธัญบุรี
ผศ.ดร.มณูญ มาศนิยม	ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ผศ.ดร.รัฐภูมิ ฐัฒนคุณ	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยสยาม
ผศ.ดร.วรณูญ วงษ์เสรี	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.วัชรินทร์ ดงบัง	สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงานและการจัดการ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ วิทยาเขตระยอง
ผศ.ดร.วิชัย รุ่งเรืองอนันต์	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.วินัย ไฉกล้ำ	คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผศ.ดร.วิรัตน์ จอมขวา	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ คณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ
ผศ.ดร.ศิรตล ศิริธร	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล
ผศ.ดร.สนิท วงษา	ภาควิชาครุศาสตร์โยธา คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและ เทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.สมบุญ เจริญวิไลศิริ	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.สมโพธิ อยู่ไว	สาขาวิชาวิศวกรรมเทคนิคธรณี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.สมศักดิ์ มีนกร	คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา
ผศ.ดร.สิตางค์ ฟิลย์หล้า	ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผศ.ดร.สิทธิพงษ์ เพิ่มพิทักษ์	คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผศ.ดร.สิริชัย จิรวงศ์นุสรณ์	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล รัตนโกสินทร์
ผศ.ดร.สิรางค์ กลั่นคำสอน	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา
ผศ.ดร.สุจิตา ทิพย์รักษพันธุ์	ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ผศ.ดร.สมุล แซ่เฮง พิสิษฐ์สังฆการ	ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการเผาไหม้และพลังงานทางเลือก ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องต้นกำลัง วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.สุรัตน์ อาริรัตน์	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผศ.ดร.อรกมล วังอภิสิทธิ์	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ผศ.กัมปนาท ไชยเพชร	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและเมคคาทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
ผศ.กานติส สุดสาคร	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผศ.จิรเมธา สังข์เกษม	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
ผศ.นราธิป แสงชัย	ศูนย์แห่งความเป็นเลิศเฉพาะทางด้านการวิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมเครื่องเรือน วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.พรสิริ ขาติปรีชา	คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์
ผศ.วรรณะ ประภาภรณ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
ผศ.วรกร เกิดทรัพย์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
ผศ.สหรัตน์ วงษ์ศรีษะ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ผศ.สาธิต รุ่งฤดีสมบัติกิจ	สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
ผศ.สุชาติ เหลืองประเสริฐ	ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผศ.อุษณีย์ ระหา	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง
ผศ.อนุชิต เจริญ	สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
อ.ดร.กฤษณ์ อภิญาวิศิษฐ์	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อ.ดร.คมพันธ์ ชมสมุทร	สาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อ.ดร.จักรภพ วงศ์วิวัฒน์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
อ.ดร.ฉัตรเพชร ยศพล	สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

อ.ดร.ชัชพันธ์ ขำญาติ	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน
อ.ดร.ชัยรัตน์ ตั้งดวงดี	ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
อ.ดร.ชาติ ฤทธิ์ธีรัญ	สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
อ.ดร.ชาญยุทธ กฤตสุนันท์กุล	ภาควิชาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร
อ.ดร.ชาญวิทย์ อุดมศักดิ์กุล	สำนักงานสภานโยบายการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรมแห่งชาติ
อ.ดร.ชานินทร์ ศรีสุวรรณภา	ภาควิชาสถิติประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
อ.ดร.ณัฐภรณ์ เจริญธรรม	สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่ง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
อ.ดร.ณัฐวุฒิ ธนศรีสถิต	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
อ.ดร.ดุชนิ สติระเศรษฐี	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยนเรศวร
อ.ดร.ตันติกร พิษณุพิบูล	คณะกรรมการโลจิสติกส์และการคมนาคมขนส่ง สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์
อ.ดร.บุญเลิศ วงศ์เจริญแสงศิริ	สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์
อ.ดร.ปริญญา บุญมาเลิศ	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
อ.ดร.ประภาส ผ่องสนาม	สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
อ.ดร.ปรารธนา อินตะวิน	สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อ.ดร.พงศกร พรหมสวัสดิ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง
อ.ดร.พิชฌุฑม์ จรัสบำรุงโรจน์	สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
อ.ดร.ภักดิ์วัฒน์ แสนเจริญ	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
อ.ดร.ภาสินี ศิริประภา	คณะศิลปกรรมและสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
อ.ดร.วรศิริ เดอ กาเดอนด์	สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
อ.ดร.วาทัญญ รอดประพัฒน์	สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก

อ.ดร.วศิน มหัตนรินทร์กุล	ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
อ.ดร.วิทยา พวงสมบัติ	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
อ.ดร.วีรเดช กীরติชนวิทย์	สาขาวิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
อ.ดร.ศรินรัตน์ วงษ์ลี	กลุ่มวิจัยและพัฒนาชีวเคลือบ สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน)
อ.ดร.ศักดิ์ชาย รักการ	สาขาวิชาการจัดการงานวิศวกรรม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
อ.ดร.สำเริง เนตรภู	บริษัท เอส. เอช. เค. เอ็นจิเนียริ่ง จำกัด
อ.ดร.สุวรรณี สายสิน	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ
อ.ดร.อดิเทพ ศรีคงศรี	สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
อ.ดร.อภิชาติ บัวกล้า	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา
อ.ดร.อนันต์ เดอร์ชิง	ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญ
อ.ดร.เอกชัย อยู่ประเสริฐชัย	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ดร.จุฑา สุนิตย์สกุล	สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ กรมทางหลวง
ดร.พุทธิพงศ์ เหลือรัตนวัฒนา	สำนักก่อสร้างสะพาน กรมทางหลวงชนบท
ดร.อัศคพัฒน์ สว่างสุริย์	สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง
อ.จิรวัฒน์ ปล้องใหม่	สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
อ.ณัฐนนท์ รัตนไชย	คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อ.นิตยา จันทรเรือง มหาผล	เลขาธิการสภาวิศวกร ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต
อ.ว่าที่ ร.ต.สรายุภูมิ 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

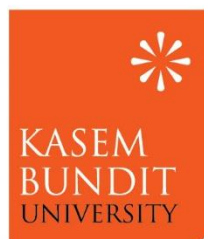
E-mail: engkasemjournal@kbu.ac.th

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