

วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต

KASEM BUNDIT Engineering Journal

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



คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต

ปีที่ 14 ฉบับที่ 1 มกราคม - เมษายน 2567
Vol.14 No.1 January - April 2024

วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต

ปีที่ 14 ฉบับที่ 1 มกราคม-เมษายน 2567

Kasem Bundit Engineering Journal (KBEJ)

Volume 14 No.1 January-April 2024

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต

วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต

Kasem Bundit Engineering Journal (KBEJ)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต

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

วัตถุประสงค์

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

บทความที่สามารถตีพิมพ์ลงในวิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต

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

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

การประเมินบทความ

การประเมินบทความที่ดีมีพลังในวิศวกรรมสารเกษมบัณฑิตมีรายละเอียดดังนี้

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

การส่งบทความ

ผู้เขียนจะต้องจัดเตรียมบทความต้นฉบับที่พิมพ์ตามข้อกำหนดของรูปแบบวารสาร จำนวน 1 ชุด และผู้เขียนบทความกรอกข้อมูลใบนำส่งบทความ พร้อมสแกนใบนำส่งบทความและแนบไฟล์

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

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

ลิขสิทธิ์

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์ในวิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต ถือเป็นกรรมสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต ห้ามนำข้อความทั้งหมดไปตีพิมพ์ซ้ำ ยกเว้นได้รับอนุญาตจากมหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิตแล้ว หากบทความที่ได้รับการตีพิมพ์นั้นเป็นบทความที่ละเมิดลิขสิทธิ์ของผู้อื่นหรือมีความไม่ถูกต้องในเนื้อหาของบทความ ผู้เขียนบทความนั้นต้องเป็นผู้รับผิดชอบ

กำหนดตีพิมพ์

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

จัดพิมพ์โดย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต

คณะที่ปรึกษา:

ดร.วัลลภ สุวรรณดี	อธิการบดี มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
ดร.สุวัฒน์ สุวรรณดี	รองอธิการบดีฝ่ายบริหาร มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
ดร.เสนีย์ สุวรรณดี	รองอธิการบดีฝ่ายวางแผนและพัฒนา มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
ดร.อริศ สุวรรณดี	รองอธิการบดีฝ่ายทรัพยากรบุคคล มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
รศ.ดร.ประสาร มาลากุล ณ อยุธยา	รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
ผศ.อิงอร ตันพันธ์	ผู้ช่วยอธิการบดีฝ่ายวิชาการ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
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 เตชะอำไพ	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Prof. Dr.Belkacem Zeghamati	Laboratoire de Mathematiques et Physique des Systeme- Groupe de Mecanique Energetique, Universite de Perpignan, France
รศ.ดร.จิรนุช เสี่ยงมศักดิ์	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รศ.ดร.บุญเลิศ สือเจย	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
รศ.ดร.พิภพ สุนทรสมัย	ที่ปรึกษาคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
รศ.ดร.มนตรี คำเงิน	ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีพระจอม เกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.มนตรี ศิริปรัชญานันท์	ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ

รศ.ดร.ยุทธชัย บรรเทึงจิตร	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.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 รักการ
อ.ธีรยุทธ จันทรแจ่ม	ผศ.ดร.หนึ่งฤทัย ทิมย้ายงาม
ผศ.วรารกร เกิดทรัพย์	อ.อุบลรัตน์ วาริชวัฒนะ

ฝ่ายเลขานุการ:

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

บทบรรณาธิการ

ปัจจุบัน “วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต” (Kasem Bundit Engineering Journal) ได้ดำเนินการก้าวเข้าสู่ปีที่ 14 ในการนี้ทางกองบรรณาธิการมีความยินดีเป็นอย่างยิ่งที่ได้เป็นส่วนหนึ่งในการเผยแพร่ผลงานวิจัยและวิชาการทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ในวงกว้าง เพื่อพัฒนาและยกระดับคุณภาพด้านวิชาการและวิจัย ตลอดจนเพิ่มความสามารถในการแข่งขันให้ประเทศไทยให้สามารถพัฒนาไปสู่การเป็นประเทศที่พัฒนาแล้วตามเจตนารมณ์ของยุทธศาสตร์ของประเทศ

เนื่อง ในช่วงเดือนเมษายน-พฤษภาคม 2567 นี้ ทางกองบรรณาธิการจะทำการยื่นขอให้ศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (TCI) ทำการประเมินคุณภาพวารสารรอบที่ 5 พ.ศ. 2568-2572 และหวังว่าวารสารจะสามารถรักษาระดับคุณภาพในฐานะ “วารสารกลุ่มที่ 1” เพื่อเป็นประโยชน์ต่อนักวิชาการ นักวิจัย และผู้เขียนทุกท่านที่ได้ให้การสนับสนุนการดำเนินงานของวารสารฯ มาอย่างต่อเนื่องต่อไป

สุดท้ายนี้ กองบรรณาธิการใคร่ขออำนาจสิ่งศักดิ์สิทธิ์ทั้งหลายในสากลโลก โปรดดลบันดาลให้ทุกท่านมีสุขภาพแข็งแรง ปลอดภัยจากการภัยอันตรายใดๆ เพื่อให้สามารถสร้างสรรค์ผลงานวิจัยและวิชาการเพื่อเป็นประโยชน์ต่อประเทศสืบไป

รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยฤทธิ์ สัตยาประเสริฐ
บรรณาธิการวิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต

บทความวิจัย (Research Article)

การหาค่าคงที่ของสปริงแบบคิวบิกของระบบระดับความเสรีขั้นเดียวไม่เชิงเส้น

PARAMETER EXTRACTION OF CUBIC SPRING OF NONLINEAR SDOF
SYSTEM

1

ปริญญา บุญมาเลิศ และ ธนุ จุญฉาย

พฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีส่วนผสมของเศษยางจากยางรถยนต์
รีไซเคิล

BEHAVIORS OF REINFORCED CONCRETE BEAMS CONTAINING CRUMB
RUBBER FROM RECYCLED TIRES

15

ปรัชญา ก้านบัว ลาวัลย์ ชันเกษตร อธิธิ ผลิตศิริ และ ณัฐภูมิ อินทบุตร

การปรับปรุงวิธีการทำงานในการตอกก่อนอินเสิร์ตสำหรับชิ้นส่วนชุดเฟืองเกียร์:
กรณีศึกษาในบริษัทฉีดขึ้นรูปอะลูมิเนียม

METHOD IMPROVEMENT IN PUNCH INSERT FOR PART CASE GEAR:
A CASE STUDY IN AN ALUMINIUM DIE CASTING COMPANY

31

จิรวัฒน์ วรวิชัย กิตติ วิโรจรัตนภาพิศา อุกฤษฏ์ ธนทรัพย์ทวี และ อารุณี วงษ์ขาว

การประมาณขนาดหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในระบบจำหน่ายเชิงเศรษฐศาสตร์ให้
เหมาะสมกับโหลดและลดกำลังไฟฟ้าสูญเสีย

ESTIMATING THE ECONOMICALLY OPTIMAL SIZE OF DISTRIBUTION
TRANSFORMER TO SUITABLE THE LOAD AND REDUCE ELECTRICAL
POWER LOSSES

48

บุญเลิศ สือเฉย

ผลกระทบของความชื้นต่อสมบัติทางกลของชิ้นงานในการพิมพ์ 3 มิติด้วยวัสดุ
ไนลอน 6

EFFECTS OF MOISTURE ON MECHANICAL PROPERTIES OF 3D-PRINTED
PART WITH NYLON 6

62

อุกฤษฏ์ ธนทรัพย์ทวี มาโนช นำฟู และ กิตติ วิโรจรัตนภาพิศา

การหาค่าคงที่ของสปริงแบบคิวบิกของระบบระดับความเสรี
ชั้นเดียวไม่เชิงเส้น

PARAMETER EXTRACTION OF CUBIC SPRING OF
NONLINEAR SDOF SYSTEM

ปริญา บุญมาเลิศ¹ และ ธนู ชูยฉาย²

^{1,2}อาจารย์, สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต

1761 ถนนพัฒนาการ เขตสวนหลวง กรุงเทพฯ 10250

¹parinya.boo@kbu.ac.th, ²thanuchouychai@gmail.com

Parinya Boonmalert¹ and Thanu Chouychai²

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

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

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

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้แสดงวิธีการหาค่าคงที่ของสปริงไม่เชิงเส้นแบบคิวบิกด้วยวิธีถดถอยแบบกำลังสองน้อยสุด โดยทำการคำนวณทั้งในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ซึ่งพบว่าค่าคงที่ของระบบไม่เชิงเส้นแบบคิวบิกจากการคำนวณทั้งสองแบบให้ผลลัพธ์ที่แม่นยำเหมือนกันไม่ว่าระบบจะมีการหน่วงเกินหรือระบบมีการหน่วงน้อย ในส่วนของเวลาที่ใช้ในการคำนวณพบว่าค่าการคำนวณในโดเมนเวลามีความเร็วมากกว่าการคำนวณในโดเมนความถี่อยู่ประมาณ 10 % ส่วนความผิดพลาดของการคำนวณทางทฤษฎีอยู่ในระดับต่ำกว่า $10^{-10}\%$ นอกจากนี้ยังพบว่าค่าความผิดพลาดแปรผันโดยตรงกับชนิดของตัวแปรที่ใช้ สำหรับตัวแปรทศนิยมขนาดใหญ่จะมีความผิดพลาดอยู่ที่ระดับ $10^{-10}\%$ และถ้าใช้ตัวแปรทศนิยมขนาดใหญ่มากความผิดพลาดจะไม่เกิน $10^{-12}\%$

คำสำคัญ: สปริงไม่เชิงเส้นแบบคิวบิก, การหน่วงน้อย, การหน่วงเกิน

ABSTRACT

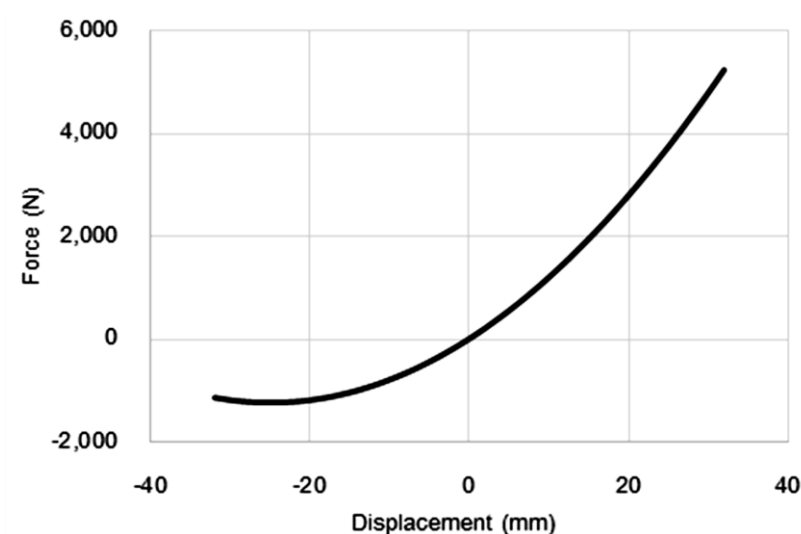
This research introduces a method for determining the parameter of cubic nonlinear springs by least square regression method. Calculations are conducted in both the time-domain and the frequency-domain. It was observed that both approaches yielded equally accurate

results, regardless of whether the system exhibited over-damping or under-damping characteristics. In terms of computational time, the time-domain calculation proved to be approximately 10% faster than the frequency-domain calculation, with a theoretical calculation error of less than $10^{-10}\%$. Furthermore, it was discovered that the error was directly associated with the type of variables used. When employing double variables, the error remained within the range of $10^{-10}\%$, while using long double variables ensured that the error did not exceed $10^{-12}\%$.

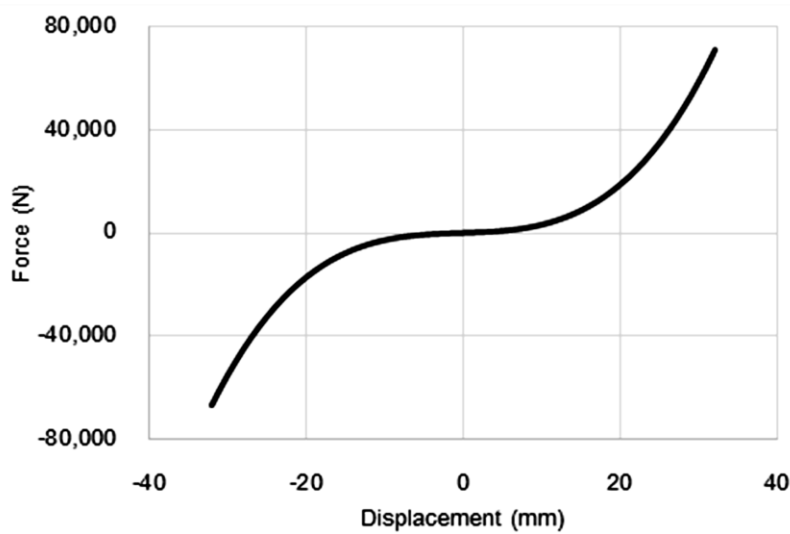
KEYWORDS: Cubic Nonlinear Spring, Under Damping, Over damping

1. บทนำ

โดยปกติแล้วแรงของสปริงจะต้องสมดุลหรือเกือบสมดุลรอบแกนระยะกระจัด แต่จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะกระจัดของสปริงแบบควอดราติก (Quadratic Spring) จะพบว่าแรงไม่สมมาตรรอบแกนระยะกระจัดเนื่องจากแรงของสปริงในส่วนที่เป็นทอมกำลังสองจะมีค่าเป็นบวกเสมอถึงแม้ว่าระยะกระจัดจะเป็นลบ ดังแสดงในรูปที่ 1 เมื่อเทียบกับแรงที่เกิดจากสปริงแบบคิวบิก (Cubic Spring) จะพบว่าแรงของสปริงแบบคิวบิกมีความสมมาตรรอบแกนระยะกระจัดมากกว่า ดังแสดงในรูปที่ 2 ด้วยเหตุนี้งานวิจัยนี้จึงนำเสนอ การหาค่าคงที่ไม่เชิงเส้นของสปริงแบบคิวบิก โดยใช้วิธีแยกสัญญาณที่วัดได้จากระบบไม่เชิงเส้นที่มีระดับความถี่เดียว ที่มีตัวหน่วงแบบของเหลวหนืดและมีสปริงไม่เชิงเส้นแบบคิวบิก โดยทำการคำนวณทั้งในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการหาค่าพารามิเตอร์ของสปริงของระบบทางฟิสิกส์ต่อไป



รูปที่ 1 สปริงแบบควอดราติก $F_s(t) = ky(t) + \beta y^2(t)$



รูปที่ 2 สปริงแบบคิวบิก $F_k(t) = ky(t) + \beta y^2(t) + \gamma y^3(t)$

2. งานที่เกี่ยวข้อง

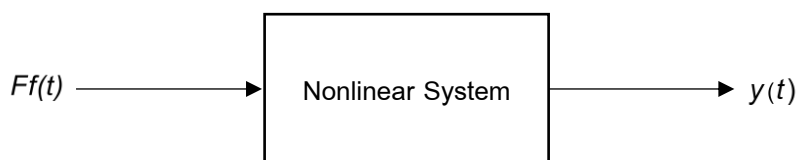
Boonmalert and Chouychai [1] ได้นำเสนอการหาพารามิเตอร์ไม่เชิงเส้นของระบบที่มีสปริงแบบควอดราติกในโดเมนของเวลา และได้ทำการทดสอบใช้จริงกับระบบทางฟิสิกส์ และพบว่าค่าความแข็งตึงไม่เชิงเส้นกำลังสองมีค่าต่ำมาก

Dong et al [2] ได้ศึกษาระบบไม่เชิงเส้นมวลสปริงและตัวหน่วงของการชนของรถไฟโดยใช้แบบจำลอง CLGAN

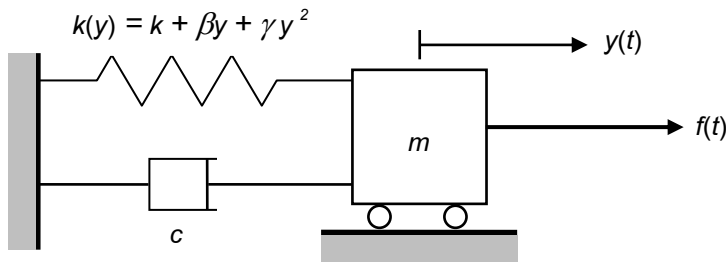
Peeters et al [3] ได้แนะนำวิธีการหาพารามิเตอร์ของระบบแบบหลายสัญญาณเข้าและหลายสัญญาณออกในโดเมนของความถี่ที่ใช้ชื่อว่า PolyMAX ซึ่งให้ผลลัพธ์ที่มีความเสถียร

Xie et al [4] ได้ศึกษาระบบไม่เชิงเส้นที่เกิดจากการไหลของอากาศที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยใช้ระเบียบวิธีของการแกว่งกวัด (Galerkin Method) และทฤษฎีแผ่นแบนของวอน คาร์มาน (Von Karman Plate Theory)

3. ทฤษฎี



รูปที่ 3 ระบบไม่เชิงเส้นระดับความเสถียรขึ้นเดียว



รูปที่ 4 ระบบที่ใช้ในการทดสอบ

งานวิจัยนี้จะอ้างอิงจากระบบระดับความเสถียรเดียวที่มีตัวหน่วงแบบของเหลวหนืดและมีสปริงไม่เชิงเส้นแบบคิวบิก (Cubic Spring) ดังแสดงในรูปที่ 3 และ 4 โดยมีสมการของการเคลื่อนที่ของระบบเป็น

$$m\ddot{y}(t) + c\dot{y}(t) + ky(t) + \beta y^2(t) + \gamma y^3(t) = Ff(t) \quad (1)$$

ที่ $F = 1$ สัญญาณออกของระบบในรูปของอนุกรมของวอลเตอร์รา (Volterra Series) [5] เป็น

$$y(t) = \sum_{n=1}^{\infty} y_n(t) \quad (2)$$

โดยที่

$$y_n(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} h_n(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n) \prod_{i=1}^n f(t - \tau_i) d\tau_i \quad (3)$$

n time

และที่ $F \neq 1$ สัญญาณออกของระบบในรูปของอนุกรมของวอลเตอร์ราเป็น

$$y(t) = \sum_{n=1}^{\infty} F^n y_n(t) \quad (4)$$

เมื่อแทนสมการ (4) ในสมการ (1) ได้

$$\begin{aligned} m \sum_{n=1}^{\infty} F^n \ddot{y}_n(t) + c \sum_{n=1}^{\infty} F^n \dot{y}_n(t) + k \sum_{n=1}^{\infty} F^n y_n(t) + \beta \sum_{n1=1}^{\infty} \sum_{n2=1}^{\infty} F^{(n1+n2)} y_{n1}(t) y_{n2}(t) \\ + \gamma \sum_{n1=1}^{\infty} \sum_{n2=1}^{\infty} \sum_{n3=1}^{\infty} F^{(n1+n2+n3)} y_{n1}(t) y_{n2}(t) y_{n3}(t) = Ff(t) \end{aligned} \quad (5)$$

สัญญาณออกแต่ละอันดับของอนุกรมของวอลเตอร์รา หาได้จากการเทียบสัมประสิทธิ์ของ F

$$\text{ที่ } F^1 \text{ ได้} \quad m\ddot{y}_1(t) + c\dot{y}_1(t) + ky_1(t) = f(t) \quad (6)$$

$$\text{หรือ} \quad y_1(t) = H_1[f(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} h_1(\tau)f(t-\tau)d\tau \quad (7)$$

โดยที่ $H_1[]$ เป็นโอเปอเรเตอร์ (operator) อันดับหนึ่งของระบบเชิงเส้น

$$\text{ที่ } F^2 \text{ ได้} \quad m\ddot{y}_2(t) + c\dot{y}_2(t) + ky_2(t) + \beta y_1^2(t) = 0 \quad (8a)$$

$$m\ddot{y}_2(t) + c\dot{y}_2(t) + ky_2(t) = -\beta y_1^2(t) \quad (8b)$$

$$y_2(t) = -\beta H_1[y_1^2(t)] \quad (8c)$$

$$\text{ที่ } F^3 \text{ ได้} \quad m\ddot{y}_3(t) + c\dot{y}_3(t) + ky_3(t) + 2\beta y_1(t)y_2(t) + \gamma y_1^3(t) = 0 \quad (9a)$$

$$m\ddot{y}_3(t) + c\dot{y}_3(t) + ky_3(t) = -2\beta y_1(t)y_2(t) - \gamma y_1^3(t) \quad (9b)$$

$$y_3(t) = -H_1[2\beta y_1(t)y_2(t) + \gamma y_1^3(t)] \quad (9c)$$

$$\text{และที่ } F^4 \text{ ได้} \quad m\ddot{y}_4(t) + c\dot{y}_4(t) + ky_4(t) + 2\beta y_1(t)y_3(t) + \beta y_2^2(t) + 3\gamma y_1^2(t)y_2(t) = 0 \quad (10a)$$

$$m\ddot{y}_4(t) + c\dot{y}_4(t) + ky_4(t) = -2\beta y_1(t)y_3(t) - \beta y_2^2(t) - 3\gamma y_1^2(t)y_2(t) \quad (10b)$$

$$y_4(t) = -H_1[2\beta y_1(t)y_3(t) + \beta y_2^2(t) + 3\gamma y_1^2(t)y_2(t)] \quad (10c)$$

ในการหาค่าคงที่ไม่เชิงเส้นจะหาได้จาก $y_3(t)$ แต่เพื่อป้องกันสัญญาณอันดับที่สูงกว่า 3 เข้ามา รบกวนจึงทำการแยกสัญญาณออกเป็น 4 อันดับ ถ้า $y_1(t), y_2(t), y_3(t)$ และ $y_4(t)$ หาได้จากการ ทดลองด้วยการใส่สัญญาณ $Ff(t), i = 1, 2, 3, 4$ เข้าสู่ระบบสี่ครั้ง โดยที่แต่ละครั้งมีแอมพลิจูดของ แรงแตกต่างกัน จะแยกสัญญาณทั้งสี่อันดับของวอลเตอร์รา [6] ได้จากสมการ (4) ในรูปเมตริกเป็น

$$\begin{Bmatrix} y^{(1)}(t) \\ y^{(2)}(t) \\ y^{(3)}(t) \\ y^{(4)}(t) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1^1 & F_1^2 & F_1^3 & F_1^4 \\ F_2^1 & F_2^2 & F_2^3 & F_2^4 \\ F_3^1 & F_3^2 & F_3^3 & F_3^4 \\ F_4^1 & F_4^2 & F_4^3 & F_4^4 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \\ y_3(t) \\ y_4(t) \end{Bmatrix} \quad (11)$$

โดยที่ $y^{(i)}(t)$, $i = 1, 2, 3, 4$ คือสัญญาณออกของระบบที่เกิดสัญญาณเข้า $F_i f(t)$, $i = 1, 2, 3, 4$ สัญญาณออกของระบบลำดับต่าง ๆ ที่ได้จากการวัดสัญญาณเมื่อเทียบกับสัญญาณทางทฤษฎีเป็น

$$y_1(t) = H_1[f(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} h_1(\tau) f(t - \tau) d\tau \quad (12)$$

$$y_2(t) = -\beta H_1[y_1^2(t)] = -\beta \int_{-\infty}^{\infty} h_1(\tau) y_1^2(t - \tau) d\tau \quad (13)$$

$$y_3(t) = -H_1[2\beta y_1(t)y_2(t) + \gamma y_1^3(t)] \quad (14a)$$

$$y_3(t) = -2\beta \int_{-\infty}^{\infty} h_1(\tau) y_1(t - \tau) y_2(t - \tau) d\tau - \gamma \int_{-\infty}^{\infty} h_1(\tau) y_1^3(t - \tau) d\tau \quad (14b)$$

หรือ
$$y_3(t) = -2\beta y_{3\beta}(t) - \gamma y_{3\gamma}(t) \quad (14c)$$

โดยที่
$$y_{3\beta}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h_1(\tau) y_1(t - \tau) y_2(t - \tau) d\tau \quad (15a)$$

และ
$$y_{3\gamma}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h_1(\tau) y_1^3(t - \tau) d\tau \quad (15b)$$

ถ้า $y_3(t)$ เป็นสัญญาณที่คำนวณได้จากสมการ (11) จะเห็นว่าสัญญาณอันดับที่สาม สามารถคำนวณหาค่าคงที่ไม่เชิงเส้นของสปริงได้ทั้งสองค่า จึงใช้สัญญาณอันดับสามคำนวณหาค่าคงที่ไม่เชิงเส้นของระบบ ความผิดพลาดระหว่างทฤษฎีกับการทดลองจะหาได้จาก

$$E(t) = y_3(t) + 2\beta y_{3\beta}(t) + \gamma y_{3\gamma}(t) \quad (16)$$

เมื่อกำหนดให้ $t = k\Delta t$ ซึ่งจะทำให้หาค่าคงที่ไม่เชิงเส้นของสปริงได้โดยใช้วิธีถดถอยแบบกำลังสองน้อยสุด (Least Squares Regression) [7] ดังนี้

$$R = \sum_{k=1}^N E^2(k) = \sum_{k=1}^N \left[y_3(k) + 2\beta y_{3\beta}(k) + \gamma y_{3\gamma}(k) \right]^2 \quad (17)$$

สามารถหาอนุพันธ์ของ R เทียบกับ β และ γ ได้เป็น

$$\frac{\partial R}{\partial \beta} = 4 \sum_{k=1}^N \left[y_3(k) + 2\beta y_{3\beta}(k) + \gamma y_{3\gamma}(k) \right] y_{3\beta}(k) = 0 \quad (18a)$$

$$\frac{\partial R}{\partial \gamma} = 2 \sum_{k=1}^N \left[y_3(k) + 2\beta y_{3\beta}(k) + \gamma y_{3\gamma}(k) \right] y_{3\gamma}(k) = 0 \quad (18b)$$

และจัดให้อยู่ในรูปแบบเมทริกซ์ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} \sum_{k=1}^N y_{3\beta}^2(k) & \sum_{k=1}^N y_{3\beta}(k) y_{3\gamma}(k) \\ \sum_{k=1}^N y_{3\beta}(k) y_{3\gamma}(k) & \sum_{k=1}^N y_{3\gamma}^2(k) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 2\beta \\ \gamma \end{Bmatrix} = - \begin{Bmatrix} \sum_{k=1}^N y_3(k) y_{3\beta}(k) \\ \sum_{k=1}^N y_3(k) y_{3\gamma}(k) \end{Bmatrix} \quad (19)$$

โดยค่าของ β และ γ จะสามารถคำนวณหาได้จากสมการ (19)

สำหรับโดเมนความถี่ ในกรณีที่ระบบมีค่าของตัวหน่วงเกิน สัญญาณในโดเมนเวลาจะลดเป็นศูนย์อย่างรวดเร็ว ทำให้ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณหาค่าคงที่ของสปริงมีค่าน้อย จึงทำให้ระบบที่มีค่าของตัวหน่วงเกินจะมีข้อมูลของสัญญาณในโดเมนความถี่มากกว่าในโดเมนเวลา ดังนั้นค่าของ β และ γ ที่คำนวณในโดเมนความถี่จะทำได้โดย พิจารณาสมการ (14) ถ้าให้ $u_\beta(t) = y_1(t)y_2(t)$ และ $u_\gamma(t) = y_1^3(t)$ ดังนั้นสัญญาณออกอันดับที่สามของวอลเตอร์ราเป็น

$$y_3(t) = -2\beta \int_{-\infty}^{\infty} h_1(\tau) u_\beta(t-\tau) d\tau - \gamma \int_{-\infty}^{\infty} h_1(\tau) u_\gamma(t-\tau) d\tau \quad (20)$$

และสัญญาณออกอันดับที่สามในโดเมนความถี่ได้

$$Y_3(f) = -2\beta H_1(f)U_\beta(f) - \gamma H_1(f)U_\gamma(f) \quad (21a)$$

$$Y_3(f) = -2\beta Y_{3\beta}(f) - \gamma Y_{3\gamma}(f) \quad (21b)$$

โดยที่ $Y_{3\beta}(f) = H_1(f)U_\beta(f) \quad (22a)$

และ $Y_{3\gamma}(f) = H_1(f)U_\gamma(f) \quad (22b)$

ถ้า $Y_3(f)$ เป็นสัญญาณที่วัดได้จากสมการ (11) ความผิดพลาดของสัญญาณที่ได้จากการวัดสัญญาณและทฤษฎีคือ

$$E(f) = Y_3(f) + 2\beta Y_{3\beta}(f) + \gamma Y_{3\gamma}(f) \quad (23)$$

การหาค่าของ β และ γ จะสามารถหาได้โดยวิธีลดถอยแบบกำลังสองน้อยสุด

$$R = \sum_{k=1}^N E^*(k)E(k) \quad (24a)$$

$$R = \sum_{k=1}^N \left[Y_3(k) + 2\beta Y_{3\beta}(k) + \gamma Y_{3\gamma}(k) \right]^* \left[Y_3(k) + 2\beta Y_{3\beta}(k) + \gamma Y_{3\gamma}(k) \right] \quad (24b)$$

โดยที่ $()^*$ คือ สังกะยเชิงซ้อน (complex conjugate) และ $f = k\Delta f$

สามารถหาอนุพันธ์ของ R เทียบกับ β และ γ ได้เป็น

$$\begin{aligned} \frac{\partial R}{\partial \beta} = 2 \sum_{k=1}^N \left\{ \left[Y_3(k) + 2\beta Y_{3\beta}(k) + \gamma Y_{3\gamma}(k) \right]^* Y_{3\beta}(k) \right. \\ \left. + \left[Y_3(k) + 2\beta Y_{3\beta}(k) + \gamma Y_{3\gamma}(k) \right] Y_{3\beta}^*(k) \right\} = 0 \end{aligned} \quad (25a)$$

$$\frac{\partial R}{\partial \gamma} = \sum_{k=1}^N \left\{ \left[Y_3(k) + 2\beta Y_{3\beta}(k) + \gamma Y_{3\gamma}(k) \right]^* Y_{3\gamma}(k) + \left[Y_3(k) + 2\beta Y_{3\beta}(k) + \gamma Y_{3\gamma}(k) \right] Y_{3\gamma}^*(k) \right\} = 0 \quad (25b)$$

สามารถจัดอยู่ในรูปแบบเมทริกซ์ได้เป็น

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} 2 \sum_{k=1}^N |Y_{3\beta}(k)|^2 & \sum_{k=1}^N \left[Y_{3\gamma}^*(k) Y_{3\beta}(k) + Y_{3\gamma}(k) Y_{3\beta}^*(k) \right] \\ \sum_{k=1}^N \left[Y_{3\gamma}^*(k) Y_{3\beta}(k) + Y_{3\gamma}(k) Y_{3\beta}^*(k) \right] & 2 \sum_{k=1}^N |Y_{3\gamma}(k)|^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 2\beta \\ \gamma \end{Bmatrix} \\ & = - \begin{Bmatrix} \sum_{k=1}^N \left[Y_3^*(k) Y_{3\beta}(k) + Y_3(k) Y_{3\beta}^*(k) \right] \\ \sum_{k=1}^N \left[Y_3^*(k) Y_{3\gamma}(k) + Y_3(k) Y_{3\gamma}^*(k) \right] \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (26)$$

$$\text{โดยที่} \quad |Y(f)|^2 = Y^*(f)Y(f) = Y(f)Y^*(f) \quad (27)$$

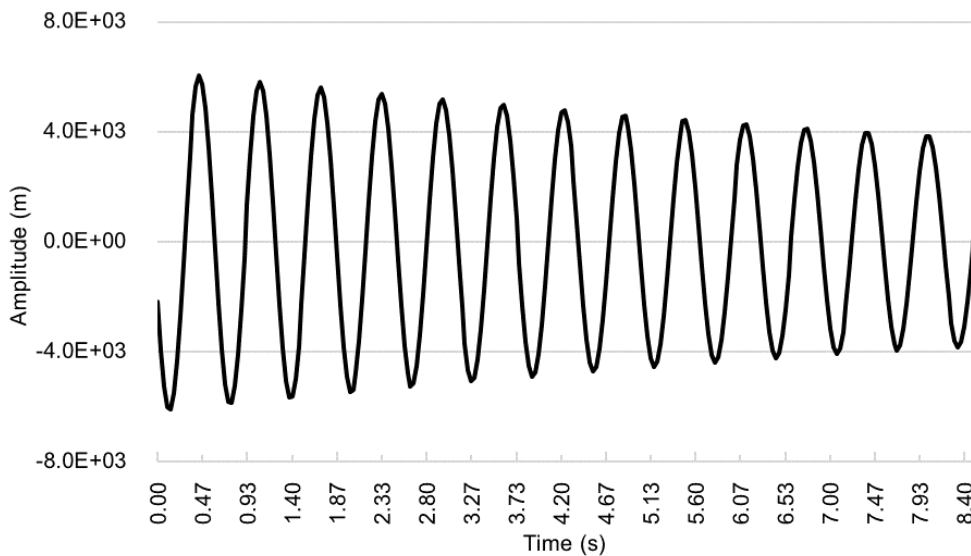
ทำให้สามารถหาค่าของ β และ γ ได้จากสมการ (26)

4. ผลการคำนวณ

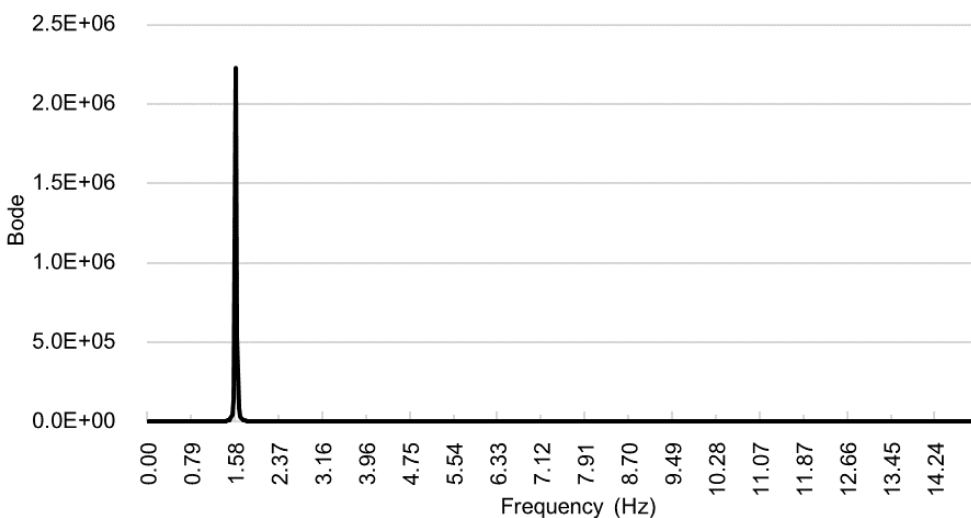
ในการทดสอบความถูกต้องของการคำนวณหาค่าคงที่ของสปริงทั้งสองแบบ จะทำการคำนวณจากระบบในสมการ (1) โดยกำหนดให้ $m = 1 \text{ kg}$, $c = 2 \text{ N.s/m}$, และ $k = 100 + 2y(t) + 5y^2(t) \text{ N/m}$ ผลการคำนวณหาค่า β และ γ จากสมการ (19) และ (26) ได้ค่า $\beta = 2$ และ $\gamma = 5$ ถูกต้องเหมือนกัน นอกจากนี้ได้ทำการทดสอบโดยการปรับเปลี่ยนค่าของตัวหน่วง $\zeta = \frac{c}{2m\omega_n}$ โดยใน

การคำนวณทดสอบในช่วง $0.00 \leq \zeta \leq 0.95$ พบว่าสามารถคำนวณหาค่า β และ γ ได้ถูกต้องทุกค่าของ ζ โดยในรูปที่ 5 และ 6 เป็นสัญญาณออกของระบบในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ที่มีค่า $\zeta = 0.0005$ ตามลำดับ ซึ่งจะพบว่าสัญญาณออกของระบบในโดเมนเวลามีข้อมูลที่จะใช้ในการคำนวณมากกว่าสัญญาณออกของระบบในโดเมนความถี่ ในรูปที่ 7 เป็นสัญญาณออกของระบบในโดเมนเวลาที่มีค่า $\zeta = 0.95$ ซึ่งจะพบว่าสัญญาณออกของระบบในโดเมนเวลาจะลดลงเป็นศูนย์อย่างรวดเร็ว แต่สัญญาณออกของระบบในโดเมนความถี่ในรูปที่ 8 จะมีข้อมูลที่จะใช้ในการคำนวณมากกว่า ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 9 ที่แสดงความผิดพลาดจากการคำนวณหาค่า β และ γ ในโดเมน

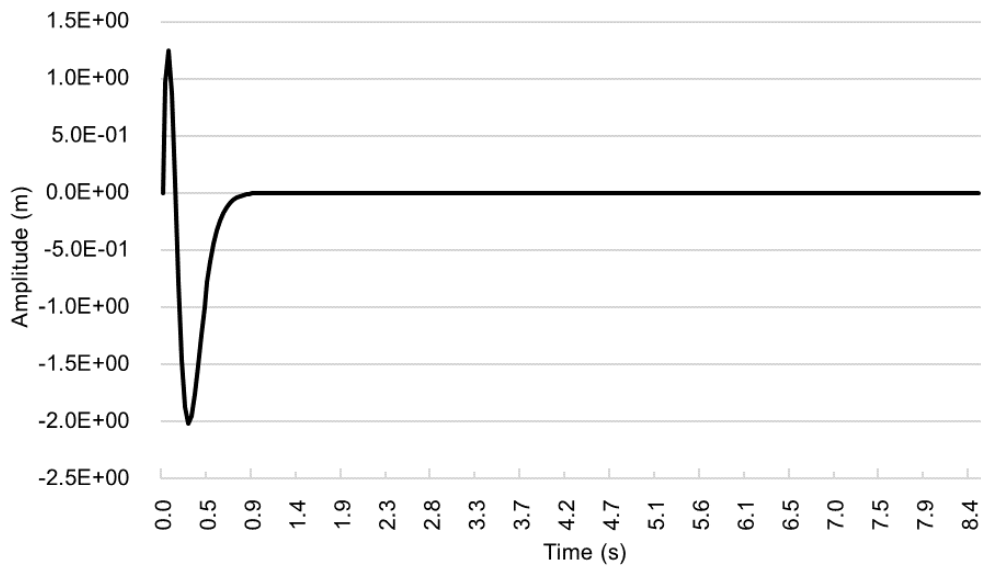
เวลาโดยใช้สมการ (19) จะพบว่าความผิดพลาดจากการคำนวณที่ค่าความหน่วงน้อยจะมีความผิดพลาดน้อยกว่าระบบที่มีค่าความหน่วงเกิน แต่ในทางกลับกันถ้าใช้การคำนวณหาค่า β และ γ ในโดเมนความถี่ด้วยสมการ (27) ความผิดพลาดจากการคำนวณ ระบบที่มีตัวหน่วงน้อยจะมีความผิดพลาดมากกว่าระบบที่มีค่าความหน่วงเกิน ดังแสดงในรูปที่ 10 แต่อย่างไรก็ตามความผิดพลาดสูงสุดของการคำนวณทั้งสองวิธีก็มีย่าน้อยมากในระดับ $9 \times 10^{-10} \%$ ซึ่งถือว่าน้อยมากจนเป็นที่ยอมรับได้



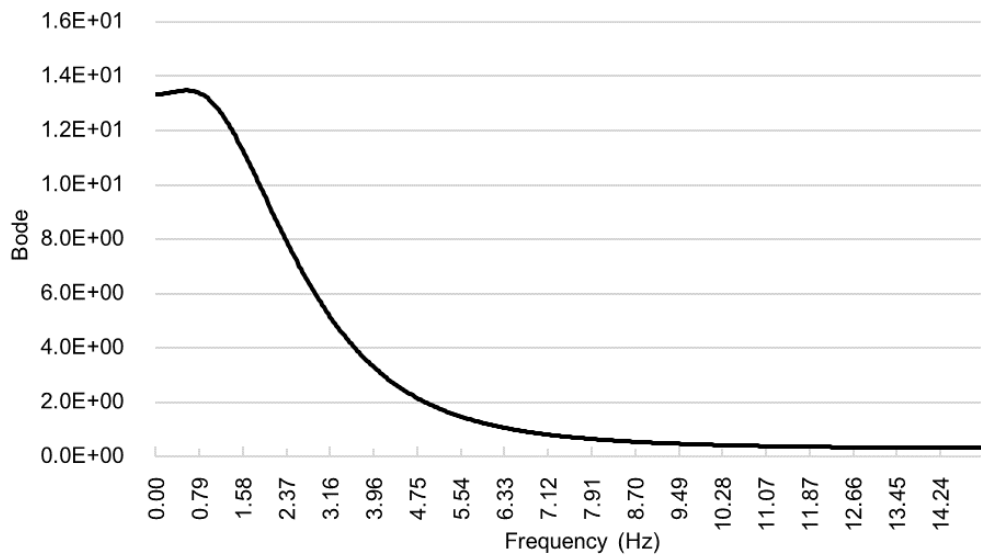
รูปที่ 5 สัญญาณออกของระบบในโดเมนเวลา ที่ $\zeta = 0.0005$



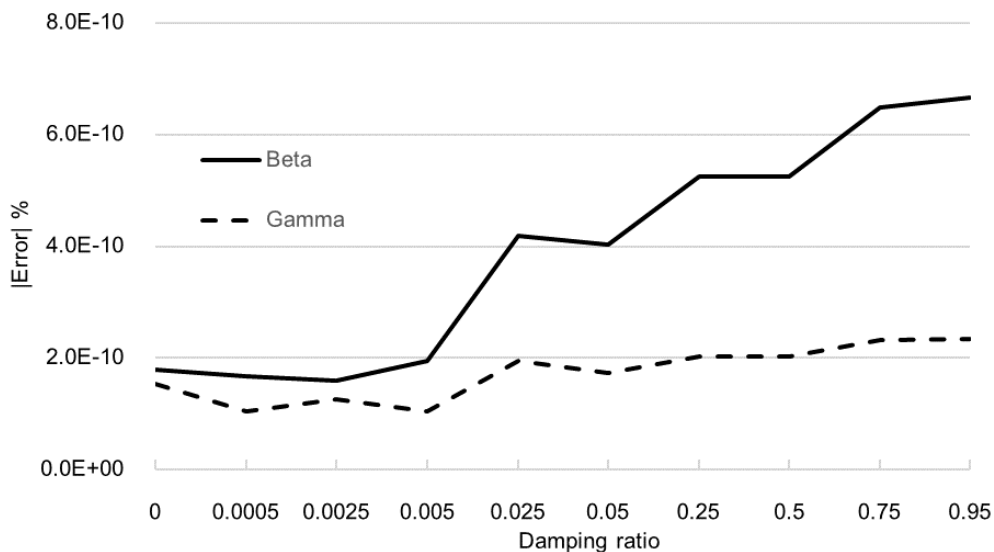
รูปที่ 6 สัญญาณออกของระบบในโดเมนความถี่ ที่ $\zeta = 0.0005$



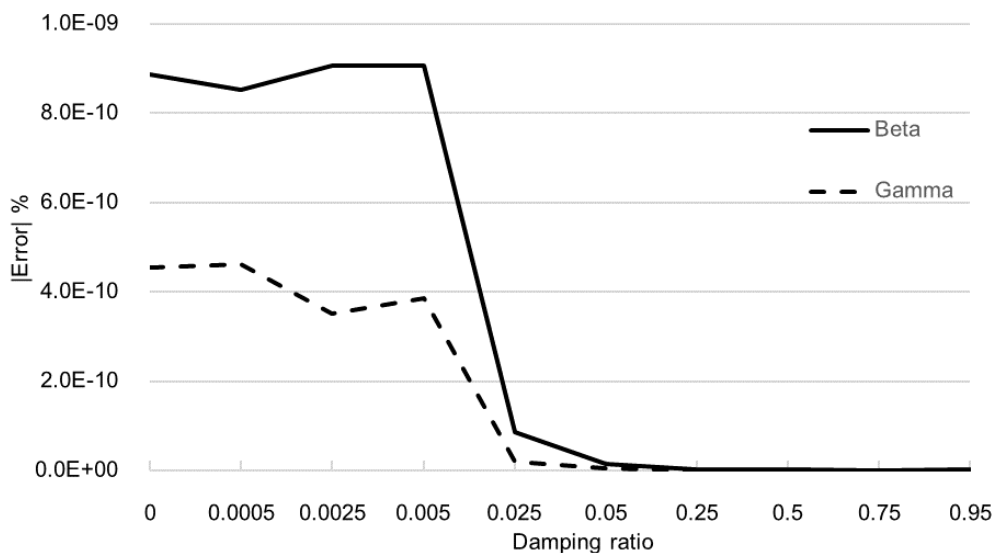
รูปที่ 7 สัญญาณออกของระบบในโดเมนเวลา ที่ $\zeta = 0.95$



รูปที่ 8 สัญญาณออกของระบบในโดเมนความถี่ ที่ $\zeta = 0.95$



รูปที่ 9 ความผิดพลาดจากการคำนวณ β และ γ ในโดเมนเวลา



รูปที่ 10 ความผิดพลาดจากการคำนวณ β และ γ ในโดเมนความถี่

5. สรุป

จากการทดสอบพบว่าค่าความหน่วงไม่ว่าจะเป็นการหน่วงเกิน (Over Damping) หรือการหน่วงน้อย (Under Damping) ไม่มีผลทำให้การคำนวณมีความผิดพลาดแต่ประการใด แต่ในทางปฏิบัติสัญญาณรบกวนอาจส่งผลต่อความผิดพลาดของการคำนวณได้ ดังนั้นจึงขอแนะนำ

ว่าถ้าพบวาระบบมีการหน่วงเกิน ก็ควรใช้การคำนวณในโดเมนความถี่ แต่ถ้าพบว่าสัญญาณที่วัดได้มีการหน่วงน้อย ซึ่งสามารถสังเกตได้จากตำแหน่งความถี่ธรรมชาติของฟังก์ชันถ่ายโอนที่แสดงในรูปของโบด (Bode plot) ก็สามารถใช้การคำนวณในโดเมนเวลาได้ ซึ่งจะใช้เวลาในการคำนวณได้น้อยกว่า เนื่องจากโดยปกติแล้วการวัดสัญญาณจะทำในโดเมนเวลาอยู่แล้ว ถ้าต้องการคำนวณในโดเมนความถี่จะต้องใช้การแปลงฟูริเยร์เพื่อแปลงสัญญาณให้เป็นโดเมนความถี่เสียก่อน จึงจะสามารถทำการคำนวณตามสมการ (26) ได้ ทำให้การคำนวณในโดเมนความถี่ใช้เวลามากกว่า สำหรับการแปลงฟูริเยร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นการแปลงฟูริเยร์แบบตรง (Direct Fourier Transform) สำหรับการแปลงแบบเทอมแท้จริงให้เป็นเทอมเชิงซ้อน (Real to Complex) และการแปลงฟูริเยร์ผกผัน (Inverse Fourier Transform) สำหรับการแปลงแบบเทอมเชิงซ้อนเป็นเทอมแท้จริง (Complex to Real) ซึ่งพบว่าการคำนวณในโดเมนเวลามีความเร็วกว่าการคำนวณในโดเมนความถี่อยู่ประมาณ 10%

References

- [1] Boonmalert P, Chouychai T. Nonlinear parameter extraction of SDOF viscous damping system. Kasem Bundit Engineering Journal 2020;10(1):81-92. (In Thai).
- [2] Dong S, Tang Z, Yang X, Wu M, Zhang J, Zhu T, et al. Nonlinear spring-mass-damper modeling and parameter estimation of train frontal crash using CLGAN model. Shock and Vibration 2020;2020:9536915. doi:10.1155/2020/9536915.
- [3] Peeters B, Auweraer H, Guillaume P, Leuridan J. The PolyMAX frequency-domain method: a new standard for modal parameter estimation?. Shock and Vibration 2004;11:395-409.
- [4] Xie D, Xu M, Dai H, Chen T. New look at nonlinear aerodynamics in analysis of hypersonic panel flutter. Mathematical Problems in Engineering 2017;2017:6707092. doi:10.1155/2017/6707092.
- [5] Schetzen M. The Volterra & Wiener theory of nonlinear systems. New York: John Wiley & Sons; 1980.
- [6] Semidor-Signoret C. Comportements de hauts polymeres a grande vitesse de deformation, identification d'effet non lineares. [These de 3eme. Cycle en mecanique physique]. Bordeaux, France: Universite de Bordeaux I; 1981.
- [7] Chapra SC, Canale RP. Numerical methods for engineering. 7th ed. New York: McGraw-Hill Book; 2015.

ประวัติผู้เขียนบทความ

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



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

Article History:

Received: September 25, 2023

Revised: February 7, 2024

Accepted: February 26, 2024

พฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีส่วนผสมของเศษยาง
จากยางรถยนต์รีไซเคิล

BEHAVIORS OF REINFORCED CONCRETE BEAMS CONTAINING
CRUMB RUBBER FROM RECYCLED TIRES

ปริญญากันบัว¹ ลาวลย์ ชันเกษตร^{2*} อธิธิ พลิตศิริ³ และ ณัฐวุฒิ อินทบุตร⁴
^{1,2,3,4}อาจารย์, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ศูนย์สุพรรณบุรี 450 ถนนสุพรรณบุรี-ชัยนาท,
ตำบลย่านยาว อำเภอสามชุก จังหวัดสุพรรณบุรี 72130,
¹prachya.k@rmutsb.ac.th, ^{2*}lawan.k@rmutsb.ac.th, ³itthi.w@rmutsb.ac.th,
⁴nuttawut.i@rmutsb.ac.th

Prachya Kanbua¹, Lawan Kankaset^{2*}, Itthi Plitsiri³ and Nuttawut Intaboot⁴
^{1,2,3,4}Lecturer, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Architecture,
Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi, Suphanburi Center,
450 Moo 6 Suphanburi- Chainat rd., Yanyaw, Samchook, Suphanburi 72130, Thailand,
¹prachya.k@rmutsb.ac.th, ^{2*}lawan.k@rmutsb.ac.th, ³itthi.w@rmutsb.ac.th,
⁴nuttawut.i@rmutsb.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับโมเมนต์ดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ทำจากคอนกรีตผสมเศษยางรถยนต์ โดยทำการทดสอบคานจำนวน 15 ตัวอย่าง คานตัวอย่างกว้าง 15 เซนติเมตร ลึก 25 เซนติเมตร ยาว 2.4 เมตร จากสัดส่วนผสม 5 ส่วนผสม โดยใช้เศษยางรถยนต์บดแทนที่มวลรวมละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก จากการทดสอบคานมีพฤติกรรมเชิงเส้นสองช่วง (bi-linear) ก่อนเป็นไรเชิงเส้น (non-linear) จนกระทั่งวิบัติ โดยเกิดรอยร้าวแรกที่ร้อยละ 23-27 ของแรงกระทำสูงสุดและเข้าสู่ช่วงที่สองจนถึงแรงสูงสุด หลังจากนั้นคานจะไม่สามารถรับแรงเพิ่มได้จนกระทั่งวิบัติ จากการศึกษาพบว่า การเพิ่มปริมาณของเศษยางรถยนต์ไม่ส่งผลต่อพฤติกรรมการวิบัติของคาน แต่ส่งผลในแง่ของกำลังรับโมเมนต์ดัด ดังนั้นสมการคำนวณโมเมนต์ดัดระบุตามทฤษฎียังสามารถใช้กับคานประเภทนี้ได้ แต่สมการคำนวณโมเมนต์แตกร้าวใช้ได้สำหรับคานที่ใช้เศษยางรถยนต์แทนที่มวลรวมละเอียดไม่เกินร้อยละ 5 เท่านั้น ในส่วนของคานที่มีปริมาณแทนที่ของเศษยางรถยนต์ตั้งแต่ร้อยละ 10 ถึง 20 ค่าโมเมนต์

แตกร้าวที่ทดสอบได้จะเหลือเพียงร้อยละ 80 ของค่าที่คำนวณได้จากสมการ ค่าการแอ่นตัวสูงสุด และการดูดซับพลังงานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของเศษยางรถยนต์ที่ใช้แทนที่มวลรวมละเอียด

คำสำคัญ: คอนกรีตผสมเศษยาง, โมเมนต์ดัดของคาน, คอนกรีตเสริมเหล็ก

ABSTRACT

The objective of this research were study on the flexural behaviors of reinforced concrete beams made of concrete mixed with crumb rubber by testing 15 samples of beams. The beams sample had 15 centimeters wide, 25 centimeters depth and length of 2.4 meters from mixture of 5 ingredients, using crumb rubber as fine aggregate replacement in ratio of 5, 10, 15 and 20 percent by weight. According to the test, the beams behaved in two linear phases (bilinear) before non-linear until failure, the first crack occurred at 23-27 percent of the maximum load and entered the second phase until reaching the maximum load. After that, the beams were unable to support additional weight until failure. The study also reserved that to Increase amount of crumb rubber did not affect failure behavior of the beams but affect in flexural strength. The equation for calculating the Nominal moment can also be used for this type of beams, but the equation for calculating the cracking moment can only be used for beams that use crumb rubber in place of fine aggregate not exceeding 5%. For the beams with crumb rubber replacements from 10% to 20%, the cracking moment tested were only 80% of the value calculated from the equation. The maximum deflection and energy absorption tend to increase with amount of crumb rubber used to replace fine aggregate.

KEYWORDS: crumb rubber concrete (CRC), flexural strength of beams, reinforced concrete

1. บทนำ

หลาย ๆ ประเทศมีปัญหาเรื่องมลพิษทางสิ่งแวดล้อม หนึ่งในนั้นเกิดจากการเผาทำลายขยะที่มาจากอุตสาหกรรมยานยนต์คือ “ยางรถยนต์” เนื่องจากยางรถยนต์ที่เสื่อมสภาพจากการใช้งานแล้วถือเป็นของเสียชนิดหนึ่งที่ยากต่อการกำจัดทิ้ง โดยยางรถยนต์เก่าเป็นวัสดุที่ไม่สามารถถูกย่อยสลายตามธรรมชาติได้ เนื่องจากความทนทานที่เกิดจากสมบัติทางเคมีที่ถูกปรุงแต่งในการผลิตและการผลิตยางรถยนต์ที่มีวิวัฒนาการอย่างต่อเนื่อง เช่น การใช้สารเคมีและสารพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ ไปผสมกับยางธรรมชาติเพื่อปรับปรุงคุณภาพของยางให้มีความทนทานและความยืดหยุ่นมากขึ้น แต่สมบัติที่ถูกปรับปรุงให้ดีขึ้นนี้ทำให้การกำจัดยางรถยนต์ที่หมดอายุการใช้งานยากขึ้น ในต่างประเทศมีการศึกษาการแปรรูปยางเก่าให้ เป็นเม็ดเล็ก ๆ เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ เช่น ในงาน

ทำถนนแอสฟัลท์ [1] หรือทำวัสดุกันซึม โดยพบว่าวัสดุยางรถยนต์เก่าเหล่านั้นสามารถนำมาใช้ใหม่ได้ในอัตราส่วนที่ค่อนข้างสูง ยกตัวอย่างเช่น วัสดุยางสามารถย่อยเป็นชิ้นเล็ก ๆ และนำไปหลอมใหม่เพื่อใช้งานถนนลาดยางได้ โดยพบว่าเมื่อยางเก่าเมื่อผ่านการย่อยสลายเป็นเม็ดเล็ก ๆ และนำมาผสมกับวัสดุแอสฟัลท์ จะได้วัสดุทำผิวถนนที่เรียกว่า แอสฟัลท์ยาง (Asphalt-Rubber) [2] สามารถยึดตัวได้สูงก่อนวิบัติ ดูดซับพลังงานและแรงได้มาก เพิ่มความเหนียว ลดรอยร้าวและมีอายุการใช้งานนานกว่าปรกติ นอกจากนี้ยังมีความหนาที่ลดลงจากถนนแอสฟัลท์แบบเดิมช่วยประหยัดทั้งค่าวัสดุและแรงงาน หรือนำยางรถยนต์มาบดเป็นเม็ดเล็กๆ ผสมลงในคอนกรีตทำเป็นอิฐบล็อกคอนกรีต [3] และบล็อกปูถนน [4]

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะนำยางรถยนต์เก่ามาบดเป็นเม็ดยางแทนที่ทราย เพื่อเป็นส่วนผสมในการผลิตคอนกรีตหล่อขึ้นรูปเป็นคานคอนกรีตที่มีสมมุติฐานว่าคานจะสามารถแอ่นตัวได้มากกว่าคานคอนกรีตทั่วไปก่อนวิบัติ [1, 5, 6] ดูดซับพลังงานได้มากขึ้น [7-10] และน้ำหนักเบาลง [11-12] และเนื่องจากความสามารถในการยึดตัวได้ดีอาจทำให้คานสามารถต้านทานการแตกร้าวได้ดีกว่าคอนกรีตปรกติทั่วไป [13] มีหลากหลายงานวิจัยที่บอกว่าการผสมเศษยางรถยนต์บดลงในคอนกรีตจะส่งผลให้กำลังรับแรงอัด [14-17] และโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตลดลง [18-20] แต่อย่างไรก็ตามสมบัติทางกลของคอนกรีตผสมเศษยางรถยนต์บดก็ยังใกล้เคียงกับคอนกรีตปรกติทั่วไปที่กำลังอัดประลัยเท่ากัน [21] จึงทำให้การใส่เศษยางรถยนต์บดลงในคอนกรีตเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่จะช่วยลดการเผาทิ้งยางรถยนต์เก่าได้ซึ่งเป็นการรีไซเคิลยางรถยนต์เก่าได้อย่างยั่งยืน

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

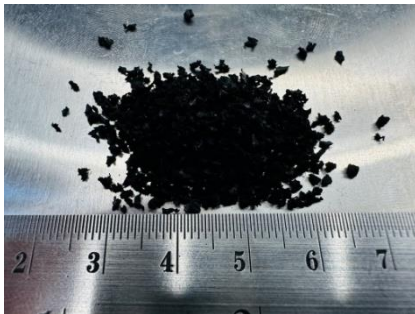
- 2.1 เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงดัดของคานคอนกรีตผสมเศษยางรถยนต์
- 2.2 เพื่อเปรียบเทียบโมเมนต์ดัดที่ได้จากการทดสอบกับสมการทำนายโมเมนต์ดัดระบุ
- 2.3 เพื่อส่งเสริมให้นำวัสดุที่ยากต่อการกำจัดมารีไซเคิลเพื่อลดมลพิษจากการเผาทิ้งยางรถยนต์

3. วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

ส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษานี้ประกอบด้วย อัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 [22] ต่อทรายและหิน เป็น 1:2:4 โดยน้ำหนัก มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักเท่ากับ 0.55 และปริมาณของเศษยางรถยนต์บดร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 20 ดังรูปที่ 1 ใส่แทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 5, 10, 15, 20 ของน้ำหนักทราย และมีสัญลักษณ์ที่ใช้เรียกคือ XXCon55 โดย XX คือปริมาณร้อยละของเศษยางรถยนต์บดละเอียด โดยมี Con55 เป็นคอนกรีตควบคุม

ดังตารางที่ 1 และสมบัติพื้นฐานของหิน ทราย และเศษยางรถยนต์บดละเอียด ได้แก่ ความหนาแน่น ความถ่วงจำเพาะ การดูดซึมน้ำ และโมดูลัสความละเอียด มีค่าดังตารางที่ 2 และสมบัติทางกลดังตารางที่ 3 [23]



(ก) เศษยางรถยนต์บด



(ข) การกระจายตัวของเศษยางในคอนกรีต

รูปที่ 1 เศษยางรถยนต์บดและการกระจายตัวของเศษยางรถยนต์ในคอนกรีต

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมของคอนกรีตผสมเศษยางรถยนต์ [23]

Symbol	Cement (kg/m ³)	Sand (kg/m ³)	Gravel (kg/m ³)	Crumb rubber tires (kg/m ³)	Water (kg/m ³)
Con55	282	676	1288	0	155
5Con55	282	642	1288	34	155
10Con55	282	608	1288	68	155
15Con55	282	574	1288	101	155
20Con55	282	540	1288	135	155

ตารางที่ 2 สมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย [23]

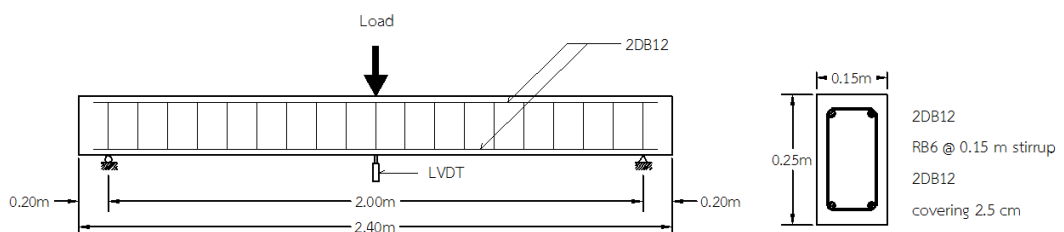
Aggregate	Bulk density (kg/m ³)	Relative density	Water absorption (%)	Fineness modulus
Sand	1678.85	2.65	1.85	3.00
Stone	1600.20	2.60	1.00	6.03
Crumb rubber	589.80	0.89	1.70	2.62

ตารางที่ 3 สมบัติทางกลของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย [23]

Symbol	Compressive Strength (ksc)	Splitting Tensile Strength (ksc)	Modulus of Elasticity (ksc)	Modulus of Rupture (ksc)	Density (kg/m ³)
Con55	220	35	207100	39.10	2375
5Con55	175	24	88500	32.79	2316
10Con55	142	18	55000	29.75	2256
15Con55	124	16	51300	28.67	2197
20Con55	101	13	47800	28.18	2115

3.2 วิธีการทดสอบ

คานคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบมีความกว้าง 0.15 เมตร ลึก 0.25 เมตร ยาว 2.40 เมตร เสริมเหล็กเกรด SD40 มีความต้านทานแรงดึงที่จุดคราก 4000 ksc จำนวน 4 เส้น (เหล็กบน 2 เส้นและเหล็กล่าง 2 เส้น) เสริมเหล็กผูกตั้ง (Stirrup) RB6 ที่ระยะเรียง (Spacing) 0.15 เมตร เพื่อรับแรงเฉือน และทดสอบที่อายุการบ่มคอนกรีต 28 วัน ตัวอย่างทดสอบคานจะทดสอบโดยใช้แรงกระทำแบบสามจุด (Three Point Loading) มีระยะห่างระหว่างจุดรองรับ 2.00 เมตร อัตราส่วนความยาวต่อความลึก (L/d) เท่ากับ 8 จัดอยู่ในคานประเภทยาวปานกลางทำให้ผลกระทบของแรงเฉือนน้อยกว่าผลของแรงดัด และมีการออกแบบเหล็กผูกตั้งเพื่อใช้ในการรับแรงเฉือนตลอดช่วงคานเพื่อป้องกันการวิบัติด้วยแรงเฉือน ดังนั้นคานจะวิบัติโดยแรงดัด (Flexural Failure) [24] ทำการวัดการแอ่นตัวที่จุดกึ่งกลางของความยาวด้วย LVDT (Linear Variable Displacement Transducer) ดังรูปที่ 2 จำนวนตัวอย่างทดสอบ 3 ตัวอย่างต่อ 1 สัดส่วนผสม รวมทั้งสิ้น 15 ตัวอย่างทดสอบ ระหว่างการทดสอบแรงกระทำและการแอ่นตัวจะถูกบันทึกโดย Data logger และสังเกตพฤติกรรมการแตกร้าวภายใต้แรงกระทำตลอดการทดสอบ ดังรูปที่ 3



รูปที่ 2 รายละเอียดของหน้าตัดและการติดตั้งตัวอย่างทดสอบ



รูปที่ 3 การทดสอบตัวอย่างคานคอนกรีตเสริมเหล็กผสมเศษยางรถยนต์

จากการติดตั้งตัวอย่างทดสอบข้างต้นสามารถคำนวณโมเมนต์ดัดสูงสุดของคานที่เกิดขึ้นได้จากสมการที่ 1 [25] ดังนี้

$$M_{\max} = \frac{P_{\max} L}{4} \quad (1)$$

เมื่อ $M_{\max}$ คือ โมเมนต์ดัดสูงสุด

$P_{\max}$ คือ แรงกระทำสูงสุด

L คือ ความยาวของคาน (วัดจากระยะห่างของจุดรองรับ)

จากหน้าตัดของตัวอย่างทดสอบคานดังรูปที่ 2 จะสามารถคำนวณโมเมนต์ดัดระบุของหน้าตัดตามมาตรฐาน ACI 318-19 ซึ่งเป็นค่าตามทฤษฎีได้จากสมการที่ 2 [25]

$$M_n = A_s f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad (2)$$

เมื่อ M_n คือ โมเมนต์ดัดระบุ

A_s คือ พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมรับแรงดึง

f_y คือ กำลังครากของเหล็กเสริมรับแรงดึง

d คือ ความลึกประสิทธิภาพ

a คือ ความลึกของกล่องความเค้นอัด (Stress Box)

การคำนวณโมเมนต์แตกร้าว (Cracking Moment) ของหน้าตัดสามารถคำนวณได้ตามมาตรฐานของ ACI 318-19 [26]

$$M_{cr} = \frac{f_r I_g}{y_t} \quad (3)$$

เมื่อ M_{cr} คือ โมเมนต์แตกร้าวของหน้าตัด

f_r คือ โมดูลัสแตกหักของคอนกรีต

I_g คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดของคอนกรีตล้วนรอบแกนสะเทิน

y_t คือ ระยะจากแกนสะเทินของหน้าตัดรวมไปยังผิวด้านรับแรงดึง

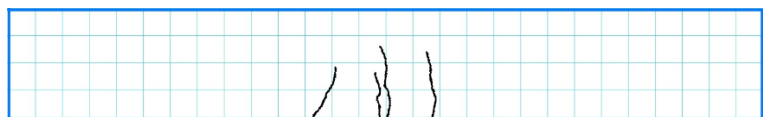
4. ผลและอภิปรายผลการวิจัย

4.1 รอยร้าวและการวิบัติของคาน

เมื่อคานถูกแรงกระทำคานจะเกิดโมเมนต์ดัดและเริ่มมีรอยร้าวที่กึ่งกลางคานเมื่อโมเมนต์ดัดถึงค่าโมเมนต์แตกร้าว โดยรอยร้าวจะเริ่มจากด้านล่างของคาน ซึ่งเป็นส่วนที่คอนกรีตมีหน่วยแรงดึงสูงที่สุดของหน้าตัด เมื่อแรงกระทำเพิ่มขึ้นรอยร้าวจะกว้างขึ้นและแผ่ขยายยาวขึ้นไปซึ่งเห็นได้จากผิวด้านข้างของคาน หลังจากนั้นเหล็กเสริมจะเกิดการครากและรอยร้าวจะขยายไปจนถึงสุดด้านบนของคาน จนกระทั่งคานเกิดการวิบัติ โดยสามารถลากแนวการวิบัติได้ดังรูปที่ 4-8



(4a)

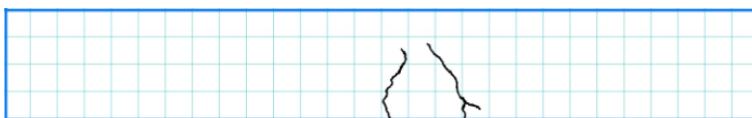


(4b)

รูปที่ 4 ตัวอย่างรอยแตกร้าวของคาน Con55



(5a)



(5b)

รูปที่ 5 ตัวอย่างรอยแตกร้าวของคาน 5Con55



(6a)

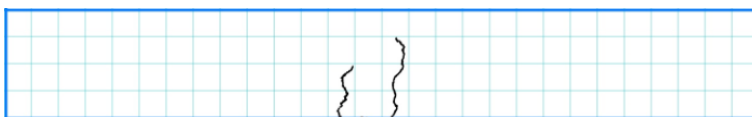


(6b)

รูปที่ 6 ตัวอย่างรอยแตกร้าวของคาน 10Con55



(7a)



(7b)

รูปที่ 7 ตัวอย่างรอยแตกร้าวของคาน 15Con55



(8a)



(8b)

รูปที่ 8 ตัวอย่างรอยแตกร้าวของคาน 20Con55

จากรูปที่ 4-8 จะเห็นรอยร้าวเริ่มจากบริเวณกึ่งกลางของคานมีลักษณะเป็นแนวตั้ง ซึ่งเป็นรอยร้าวที่เกิดจากหน่วยแรงดัด (Flexural Crack) [25] ที่ทำให้เกิดหน่วยแรงดึงสูงสุดที่ผิวล่างของคาน และไม่มีรอยร้าวทแยงที่เกิดจากหน่วยแรงเฉือน แสดงว่าเศษยางรถยนต์ที่เพิ่มเข้าไปเป็นส่วนผสมในคานคอนกรีตไม่ได้ส่งผลต่อพฤติกรรมการวิบัติของคาน

4.2 โมเมนต์ดัดสูงสุดและโมเมนต์แตกร้าว

จากการทดสอบได้ค่าแรงกระทำสูงสุดและแรงกระทำเมื่อคานแตกร้าวเฉลี่ยจาก 3 ตัวอย่าง นำมาคำนวณโมเมนต์ดัดสูงสุดและโมเมนต์แตกร้าวจากสมการที่ 1 ได้ดังตารางที่ 4 จะเห็นได้ว่าค่าโมเมนต์แตกร้าวของคานสัดส่วนผสม 5con55 เท่ากับโมเมนต์แตกร้าวของคอนกรีตควบคุมซึ่งเท่ากับ 0.70 แต่เมื่อผสมเศษยางรถยนต์แทนที่มวลรวมละเอียดเพิ่มขึ้นร้อยละ 10, 15 และ 20 (10con55, 15con55 และ 20con55 ตามลำดับ) จะทำให้ค่าโมเมนต์แตกร้าวมีค่าลดลงเหลือเพียง 0.55 ส่วนค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดของคานจะมีค่าลดลงตามปริมาณที่เพิ่มขึ้นของเศษยางรถยนต์ โดยสาเหตุที่ทำให้โมเมนต์ดัดสูงสุดของคานลดลงเกิดจากการก้ำกึ่งอัดประลัยและค่าโมดูลัสแตกหักของคอนกรีตที่ลดลงเมื่อทำการเพิ่มปริมาณเศษยางรถยนต์ [14-17]

ตารางที่ 4 แรงกระทำสูงสุดและกำลังรับโมเมนต์ดัดของคานที่ได้จากการทดสอบ

Symbol	Experimental Cracking Load P_{cre} (ton)	Maximum Load P_{max} (ton)	Experimental Cracking Moment M_{cre} (ton-m)	Maximum Moment M_{max} (ton-m)
Con55	1.40	5.70	0.70	2.85
5Con55	1.39	5.19	0.70	2.59
10Con55	1.10	4.80	0.55	2.40
15Con55	1.10	4.49	0.55	2.25
20Con55	1.09	4.18	0.55	2.05

4.3 เปรียบเทียบโมเมนต์ดัดของคาน

โมเมนต์ดัดสูงสุดของตัวอย่างคานคอนกรีตเสริมเหล็กผสมเศษยางรถยนต์ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับโมเมนต์ดัดระบุของหน้าตัดที่ได้จากทฤษฎีในสมการที่ 2 ค่าที่ทดสอบได้มีสัดส่วนความแตกต่างกับทฤษฎีอยู่ระหว่าง 1.23 – 1.55 โดยคำนวณจากกำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสม

เศษยางรถยนต์ในตารางที่ 3 และไม่คิดสัดส่วนความปลอดภัย (Safety Factor) เนื่องจากโมเมนต์ดัดสูงสุดจากการทดสอบมีค่าสูงกว่าโมเมนต์ดัดระบุ แสดงให้เห็นว่าสมการที่ใช้คำนวณโมเมนต์ดัดระบุของหน้าตัดยังสามารถใช้ออกแบบคานคอนกรีตประเภทนี้ได้โดยไม่วิบัติ ส่วนของค่าโมเมนต์แตกร้าวที่ได้จากการทดสอบเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากทฤษฎีในสมการที่ 3 มีสัดส่วนความแตกต่างกับทฤษฎีอยู่ระหว่าง 0.79 – 1.03 ดังตารางที่ 5 จะเห็นได้ว่าค่าโมเมนต์แตกร้าวที่คำนวณได้จากทฤษฎีไม่สามารถใช้ทำนายโมเมนต์แตกร้าวของคานคอนกรีตที่ผสมเศษยางรถยนต์แทนที่มวลรวมละเอียดในอัตราส่วนเกินร้อยละ 5 ได้ เนื่องจากโมเมนต์แตกร้าวจากการทดสอบได้ค่าประมาณร้อยละ 80 ของโมเมนต์แตกร้าวตามทฤษฎี (น้อยกว่าทฤษฎีอยู่ประมาณร้อยละ 20) จึงไม่แนะนำให้ใช้สมการโมเมนต์แตกร้าวจากทฤษฎีมาคำนวณคานคอนกรีตที่ผสมเศษยางรถยนต์แทนที่มวลรวมละเอียดในอัตราส่วนเกินร้อยละ 5 เพราะคานจะเกิดรอยร้าวก่อนถึงค่าที่คำนวณออกแบบไว้

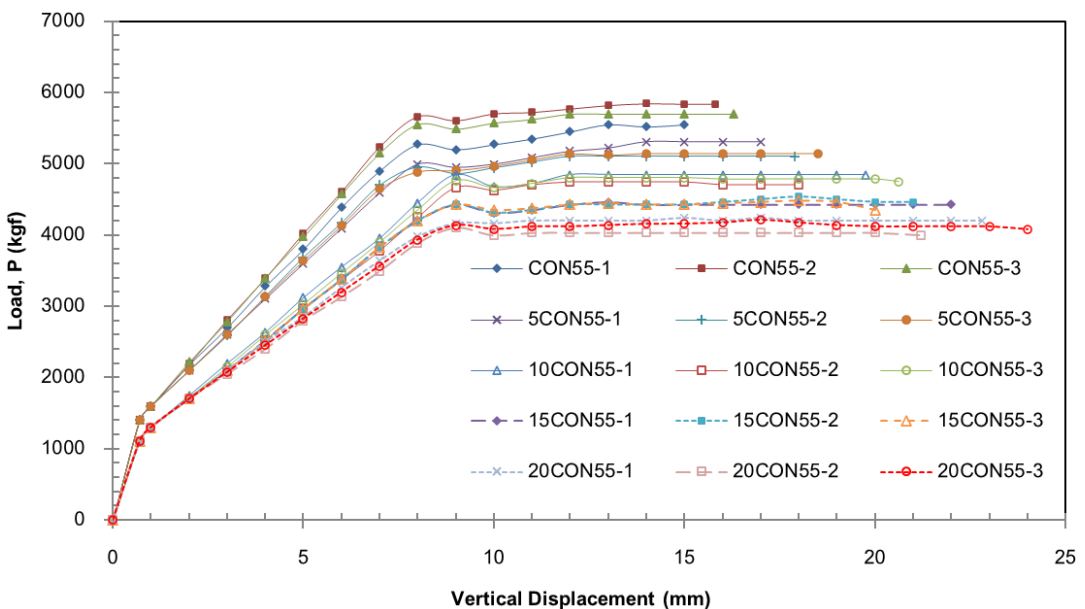
ตารางที่ 5 เปรียบเทียบกำลังรับโมเมนต์ดัดของคาน

Symbol	Exp. Cracking Moment M_{cre} (ton-m)	Theoretical Cracking Moment M_{cr} (ton-m)	M_{cre}/M_{cr}	Maximum Moment M_{max} (ton-m)	Nominal Moment M_n (ton-m)	M_{max}/M_n
Con55	0.70	0.70	1.00	2.85	1.84	1.55
5Con55	0.70	0.68	1.03	2.59	1.80	1.44
10Con55	0.55	0.70	0.79	2.40	1.76	1.36
15Con55	0.55	0.69	0.80	2.25	1.72	1.31
20Con55	0.55	0.69	0.80	2.05	1.66	1.23

4.4 แรงกระทำและการแอ่นตัวของคาน

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการแอ่นตัวสูงสุดที่กึ่งกลางของคาน ดังรูปที่ 9 จะเห็นได้ว่าคานมีพฤติกรรมเชิงเส้นสองช่วง โดยที่ช่วงแรกเป็นช่วงที่คานเริ่มรับแรงกระทำและยังไม่มีแตกร้าว คานจะมีพฤติกรรมเป็นเส้นตรงจนกระทั่งคานเกิดรอยร้าวแรก (First Crack) ที่ร้อยละ 23-27 ของแรงกระทำสูงสุด ที่ตำแหน่งกึ่งกลางคานด้านล่างซึ่งเป็นตำแหน่งที่คอนกรีตเกิดหน่วยแรงดึง (ด้านล่างของแกนสะเทิน) ความชันของกราฟจะลดลงและเข้าสู่พฤติกรรมที่เป็น

เส้นตรงช่วงที่สอง โดยช่วงที่สองนี้คานจะเกิดการแตกร้าวในส่วนของคอนกรีตที่รับแรงดึงเพิ่มขึ้น รอยแตกร้าวจะขยายตัวและมีจำนวนเพิ่มมากขึ้น จนกระทั่งเหล็กเสริมเกิดการคราก จากนั้น ความชันของกราฟจะลดลงอย่างรวดเร็วและกราฟจะถึงจุดที่คานรับกำลังได้สูงสุด หลังจากนั้น คานจะไม่สามารถรับกำลังเพิ่มขึ้นได้อีกแต่การแอ่นตัวจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งถึงจุดวิบัติ โดย ค่าการแอ่นตัวสูงสุดของตัวอย่างคานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเศษยางรถยนต์ สังเกตได้จากกราฟมีเส้นในแนวนอนที่ยาวขึ้นโดยคอนกรีตควบคุมจะมีค่าการแอ่นตัวสูงสุดเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 15 มิลลิเมตร และค่าการแอ่นตัวสูงสุดเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเป็น 17, 19, 21 และ 23 มิลลิเมตร ของคานตัวอย่าง 5con55, 10con55, 15con55 และ 20con55 ตามลำดับ



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการแอ่นตัวที่กึ่งกลางของคาน

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการแอ่นตัวที่กึ่งกลางของคานในรูปที่ 9 สามารถหาค่าการดูดซับพลังงาน (Energy Absorption) ได้จากพื้นที่ใต้กราฟ โดยคำนวณจาก จุดเริ่มต้นของกราฟที่แรงกระทำและการแอ่นตัวที่กึ่งกลางของคานเป็นศูนย์จนกระทั่งตัวอย่าง ทดสอบคานวิบัติ (จุดสิ้นสุดของเส้นกราฟ) [27] ซึ่งจะเห็นได้ว่าการเพิ่มปริมาณเศษยางรถยนต์ ส่งผลให้คานมีแนวโน้มของการดูดซับพลังงานที่มากขึ้น ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ความสามารถในการดูดซับพลังงานของคาน

Symbol	Energy Absorption (kg-m)	Symbol	Energy Absorption (kg-m)
Con55-1	63.38	15Con55-1	81.67
Con55-2	71.74	15Con55-2	77.54
Con55-3	73.45	15Con55-3	72.96
5Con55-1	70.85	20Con55-1	81.48
5Con55-2	74.56	20Con55-2	72.08
5Con55-3	77.80	20Con55-3	85.20
10Con55-1	77.26		
10Con55-2	66.83		
10Con55-3	80.53		

5. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

จากการทดสอบโดยการนำเศษยางรถยนต์มาเป็นส่วนผสมในการผลิตคานคอนกรีตเสริมเหล็กสามารถสรุปได้ดังนี้ การใส่เศษยางรถยนต์แทนที่มวลรวมละเอียดในอัตราส่วนไม่เกินร้อยละ 20 โดยน้ำหนักไม่ส่งผลต่อลักษณะการวิบัติของคานคอนกรีตเสริมเหล็กแต่ส่งผลในแง่ของโมเมนต์ดัดสูงสุด โดยค่าโมเมนต์แตกร้าวและโมเมนต์ดัดสูงสุดจะมีค่าลดลงตามปริมาณเศษยางรถยนต์ที่เพิ่มขึ้น และค่าโมเมนต์ดัดระบุสามารถใช้สมการคำนวณตามทฤษฎีการออกแบบด้วยวิธีกำลังได้ เพราะโมเมนต์ดัดระบุที่ตามทฤษฎีจะให้ค่าที่น้อยกว่าโมเมนต์ดัดสูงสุดที่คานสามารถรับได้จึงไม่ทำให้เกิดการวิบัติ แต่หากต้องการคำนวณค่าโมเมนต์แตกร้าวของคานคอนกรีตที่มีส่วนผสมของเศษยางรถยนต์แทนที่มวลรวมละเอียดเกินร้อยละ 5 ควรลดกำลังที่ได้จากการคำนวณลงประมาณร้อยละ 80 และการใส่เศษยางรถยนต์ช่วยเพิ่มความสามารถในการแอ่นตัวสูงสุดก่อนเกิดการวิบัติ และเพิ่มความสามารถในการดูดซับพลังงานของคานได้ ดังนั้นเพื่อให้พฤติกรรมการวิบัติของคานเปลี่ยนและยังคงใช้สมการคำนวณโมเมนต์แตกร้าวและโมเมนต์ดัดระบุตามทฤษฎีได้ ผู้แต่งจึงเห็นว่าไม่ควรใส่เศษยางรถยนต์แทนที่มวลรวมละเอียดในอัตราส่วนที่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนักที่ใช้เป็นส่วนผสมของคานคอนกรีต ทั้งนี้การใส่เศษยางรถยนต์เข้าไปในคอนกรีตเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถช่วยลดการเผาทิ้งยางรถยนต์เก่าได้ ในงานวิจัยครั้งต่อไปอาจใช้ยางเป็นสารเติมแต่ง (additive) ผสมเพิ่มซึ่งอาจมีผลดีต่อการไหลหรือบดละเอียดขึ้นเพื่อช่วยเรื่องเติมเต็มช่องว่างของมวลรวมได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ที่เป็นผู้ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัยในครั้งนี้ รหัสโครงการ R65205035 ชื่อเรื่อง นวัตกรรมคานคอนกรีตผสมเศษยางรถยนต์รีไซเคิล งบกองทุนส่งเสริมงานวิจัย ประจำปีงบประมาณ 2565 ทำให้งานวิจัยมีงบประมาณในการทดสอบจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

References

- [1] Shu X, Huang B. Recycling of waste tire rubber in asphalt and Portland cement concrete: an overview. *Construction and Building Materials* 2013;67:217-24.
- [2] Moreno-Navarro F, Sol-Sánchez M, Rubio-Gámez MC, Segarra-Martínez M. The use of additives for the improvement of the mechanical behavior of high modulus asphalt mixes. *Construction and Building Materials* 2014;70:65-70.
- [3] Intaboot N, Kanbua P. Investigation of concrete blocks mixed with recycled crumb rubber: A case study in Thailand. *Engineering and Applied Science Research* 2021;49(3):413-24.
- [4] Vudjung C, Thiakthum S. Paving blocks for the elderly: a study of the preparation of concrete mixed with crumb rubber and bonded rubber. *Kasem Bundit Engineering Journal* 2021;11(3):90-109. (In Thai)
- [5] Khaloo AR, Dehestani M, Rahmatabadi P. Mechanical properties of concrete containing a high volume of tire-rubber particles. *Waste Manage* 2008;28(12):2472-82.
- [6] Pacheco-Torgal F, Ding Y, Jalali S. Properties and durability of concrete containing polymeric wastes (tyre rubber and polyethylene terephthalate bottles): an overview. *Construction and Building Materials* 2012;30:714-24.
- [7] Al-Tayeb MM, Bakar BHA, Ismail H, Akil HM. Impact resistance of concrete with partial replacements of sand and cement by waste rubber. *Polymer-Plastics Technology and Engineering* 2012;51(12):1230-36.
- [8] Liu F, Chen G, Li L, Guo Y. Study of impact performance of rubber reinforced concrete. *Construction and Building Materials* 2012;36:604-16.
- [9] Grinys A, Sivilevicius H, Pupeikis D, Ivanauskas E. Fracture of concrete containing crumb rubber. *Journal of Civil Engineering and Management* 2013;19(3):447-55.

- [10] Cheng Z, Shi Z. Vibration attenuation properties of periodic rubber concrete panels. *Construction and Building Materials* 2014;50:257-65.
- [11] Aiello MA, Leuzzi F. Waste tyre rubberized concrete: properties at fresh and hardened state. *Waste Manage* 2010;30(8-9):1696-704.
- [12] Wang HY, Chen BT, Wu YW. A study of the fresh properties of controlled low-strength rubber lightweight aggregate concrete (CLSRLC). *Construction and Building Materials* 2013;41:526-31.
- [13] Guo HM, Zhu H. Study on the structural properties of steel reinforced CRC beam-cracking resistance. *Advanced Materials Research* 2011;374-377:775-80.
- [14] Ghaly AM, Cahill JD Iv, Correlation of strength, rubber content, and water to cement ratio in rubberized concrete. *Canadian Journal of Civil Engineering* 2011;32(6):1075-81.
- [15] Mohammed BS. Structural behavior and m-k value of composite slab utilizing concrete containing crumb rubber. *Construction and Building Materials* 2010;24(7):1214-21.
- [16] Issa CA, Salem G. Utilization of recycled crumb rubber as fine aggregates in concrete mix design. *Construction and Building Materials* 2013;42:48-52.
- [17] Al-Tayeb MM, Bakar BHA, Akil HM, Ismail H. Experimental and numerical investigations of the influence of reducing cement by adding waste powder rubber on the impact behaviour of concrete. *Computers and Concrete* 2013;11(1):63-73.
- [18] Sukontasukkul P, Tiamlom K. Expansion under water and drying shrinkage of rubberized concrete mixed with crumb rubber with different size. *Construction and Building Materials* 2012;29:520-26.
- [19] Onuaguluchi O, Panesar DK. Hardened properties of concrete mixtures containing pre-coated crumb rubber and silica fume. *Journal of Cleaner Production* 2014;82:125-31.
- [20] Holmes N, Dunne K, O'Donnell J. Longitudinal shear resistance of composite slabs containing crumb rubber in concrete toppings. *Construction and Building Materials* 2014;55:365-78.
- [21] Mendis ASM, Al-Deen S, Ashraf M. Behavior of similar strength Crumbed Rubber Concrete (CRC) mixes with different mix proportions. *Construction and Building Materials* 2017;137:354-66.
- [22] American society for testing and materials. ASTM C150 Specification for portland cement. Annual book of ASTM standard Vol. 4.01. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International; 2005.

- [23] Phohirun S, Kanbua P, Intaboot N. Properties of concrete mixed with recycled crumb rubber-tires. RMUTI Journal Science and Technology 2023;16(1):28-37. (in Thai)
- [24] Seo S, Choi K, Kwon Y, Lee K. Flexural strength of RC beam strengthened by partially de-bonded near surface-mounted FRP strip. International Journal of Concrete Structures and Materials 2016;10(2):149-61.
- [25] Jiravacharadet M. Reinforced concrete design (strength design method). Nakhon Ratchasima: Suranaree University of Technology; 2014.
- [26] ACI Committee 318. ACI 318-19: Building code requirements for structural concrete. Farmington Hills, Michigan, USA: American Concrete Institute; 2019.
- [27] Sukontasukkul P, Chaikaew C. Properties of concrete pedestrian block mixed with crumb rubber. Construction and Building Materials 2006;20(7):450-57.

ประวัติผู้เขียนบทความ



ปรัชญา กำนบัว ตำแหน่งอาจารย์ประจำหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ศูนย์สุพรรณบุรี เลขที่ 450 ถ.สุพรรณบุรี - ชัยนาท ต.ย่านยาว อ.สามชุก จ.สุพรรณบุรี 72130 โทรศัพท์ 086-8774155 E-mail: prachya.k@rmutsb.ac.th



ลาวัลย์ ชันเกษตร ตำแหน่งอาจารย์ประจำหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ศูนย์สุพรรณบุรี เลขที่ 450 ถ.สุพรรณบุรี - ชัยนาท ต.ย่านยาว อ.สามชุก จ.สุพรรณบุรี 72130 โทรศัพท์ 063-3626515 E-mail: lawan.k@rmutsb.ac.th



ดร.อิทธิ พลิตศิริ ตำแหน่งอาจารย์ประจำหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ศูนย์สุพรรณบุรี เลขที่ 450 ถ.สุพรรณบุรี - ชัยนาท ต.ย่านยาว อ.สามชุก จ.สุพรรณบุรี 72130 โทรศัพท์ 080-9992491 E-mail: itthi.w@rmutsb.ac.th



รศ.ดร.ณัฐวุฒิ อินทบุตร ตำแหน่งอาจารย์ประจำหลักสูตรวิศวกรรม
ศาสตรบัณฑิตและมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ศูนย์สุพรรณบุรี เลขที่ 450 ถ.สุพรรณบุรี - ชัยนาท ต.ย่านยาว อ.สามชุก
จ.สุพรรณบุรี 72130 โทรศัพท์ 089-9109781 E-mail: nuttawut.i@mutsb.ac.th

Article History:

Received: September 5, 2023

Revised: March 5, 2024

Accepted: March 7, 2024

**การปรับปรุงวิธีการทำงานในการตอกก้อนอินเสิร์ต
สำหรับชิ้นส่วนชุดเฟืองเกียร์: กรณีศึกษาในบริษัทฉีดขึ้นรูปอะลูมิเนียม
METHOD IMPROVEMENT IN PUNCH INSERT FOR PART CASE GEAR:
A CASE STUDY IN AN ALUMINIUM DIE CASTING COMPANY**

จิรวัดน์ วรวิชัย¹ กิตติ วิโรจรัตนภาพิศา² อุทกฤษฎ์ ธนทรัพย์ทวี³ และ อารุณี วงษ์ขาว⁴
^{1,2,3}อาจารย์, สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล
ล้านนา ตาก, 41/1 ถนนพหลโยธิน ตำบลไม้แก่น อำเภอมือง จังหวัดตาก 63000,
¹chirawat-w@hotmail.com, ²kibuya@gmail.com, ³t.ukrit@edu.rmutl.ac.th
⁴อาจารย์, สาขาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี
ราชมงคลล้านนา ตาก, 41/1 ถนนพหลโยธิน ตำบลไม้แก่น อำเภอมือง จังหวัดตาก 63000,
r_poo@rmutl.ac.th

Chirawat Woarawichai¹, Kitti Wirotrattanaphaphisan², Ukrit Thanasuptawee³,
and Arunee Wongkhao⁴
^{1,2,3}Lecturer, Department of Industrial Engineering, Rajamangala University of Technology
Lanna Tak, 41/1 Moo 7 Paholayothin Road, Tambon Mai Ngam, Amphur Muang,
Tak, Thailand 63000,
¹chirawat-w@hotmail.com, ²kibuya@gmail.com, ³t.ukrit@edu.rmutl.ac.th
⁴Lecturer, Department of Science, Rajamangala University of Technology Lanna Tak,
41/1 Moo 7 Paholayothin Road, Tambon Mai Ngam, Amphur Muang, Tak, Thailand 63000,
r_poo@rmutl.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงวิธีการทำงานในการตอกก้อนอินเสิร์ต สำหรับชิ้นส่วนชุดเฟืองเกียร์หลังการฉีดขึ้นรูปอะลูมิเนียม โดยการใช้แผนผังแสดงเหตุและผล ช่วยในการวิเคราะห์ปัญหาชิ้นงานที่มีก้อนอินเสิร์ตไม่ได้ถูกตอกออกมา พบว่าสาเหตุหลักเกิดจากวิธีการตอกก้อนอินเสิร์ต แบบเดิมเกิดความผิดพลาดมีชิ้นงานที่ไม่ได้ถูกตอกก้อนอินเสิร์ตออก มีผลทำให้เกิดความเสียหายกับเครื่องมือของบริษัทของลูกค้าที่ทำการกัดชิ้นงานต่อ ดังนั้นงานวิจัยจึงมุ่งเน้นที่จะทำการปรับปรุงวิธีการทำงานใหม่ โดยการออกแบบและสร้างเครื่องตอกก้อนอินเสิร์ตออกจากชิ้นส่วนชุดเฟืองเกียร์ รวมทั้งสามารถตรวจสอบชิ้นงานไปพร้อมกัน ซึ่งสามารถทำให้ชิ้นงานที่มี

ก่อนอินเสิร์ตอยู่ได้ถูกเอาออกหมดทุกชิ้น และลดขั้นตอนการทำงานจากเดิม ก่อนการปรับปรุงทั้งหมด 9 ขั้นตอน โดยหลังการปรับปรุงเหลือขั้นตอนการทำงานทั้งหมด 8 ขั้นตอน ทำให้สามารถลดขั้นตอนการทำงานได้ 1 ขั้นตอน และเวลาในการทำงานจากเดิม ก่อนการปรับปรุงใช้เวลา 68.4 วินาทีต่อชิ้น หลังการปรับปรุงใช้เวลา 58.3 วินาทีต่อชิ้น ทำให้สามารถลดเวลาในการทำงานลงได้ 10.1 วินาทีต่อชิ้น คิดเป็น 14.76%

คำสำคัญ: การตอกก่อนอินเสิร์ต, การฉีดขึ้นรูปอะลูมิเนียม, การปรับปรุงวิธีการทำงาน

ABSTRACT

The objective of this research is to improve working methods of punch insert for part case gear after aluminum molding injection. The cause and effect diagram were used to define root cause of the proposed problems. It was found that the sub-cause was caused by the original method of knocking out the insert. There was a workpiece that had not been knocked out resulting in damage to the customer's tools if continue to machine the workpiece. Therefore, the new improved method of working was done by designing and setting up a method to punch the insert from the workpiece in the propeller assembly process as well as being able to check the workpiece simultaneously. These allow all workpieces with punch inserts to be removed. This can reduce a working step from 9 steps to 8 steps. Working time before improvement was 68.4 seconds per piece, after improvement was 58.3 seconds per piece, which is reduced to 10.1 seconds per piece, accounted for 14.76%.

KEYWORDS: Punch Insert, Aluminum Die Casting, Method Improvement

1. บทนำ

การผลิตชิ้นงานจากวัสดุอะลูมิเนียม (Aluminum) เป็นอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ที่มีความสำคัญทางระบบเศรษฐกิจของประเทศ ข้อดีของการผลิตชิ้นส่วนด้วยวัสดุอะลูมิเนียมเนื่องจากสามารถกำหนดรูปทรงที่มีความสลับซับซ้อนได้มีความเที่ยงตรงทางด้านรูปร่างสูง และความแข็งแรงสูง กระบวนการฉีดขึ้นรูปอะลูมิเนียมด้วยเครื่องจักรแรงดันสูง (High Pressure Die Casting: HPDC) [1] คือกระบวนการที่โลหะหลอมละลายถูกอัดฉีดเข้าไปในแม่พิมพ์ด้วยแรงดันสูง ได้มีการพัฒนาจากกระบวนการหล่อโลหะของไทยสมัยก่อนมีการพัฒนามาอย่างต่อเนื่อง โดยใช้เทคโนโลยีที่มีความทันสมัยมีประสิทธิภาพ การผลิตจึงมีความสะดวกรวดเร็วได้ปริมาณมากใช้เวลาน้อยลงและได้ชิ้นงานตรงตามมาตรฐาน

บริษัทกรณีศึกษา เป็นบริษัทผู้ผลิตชิ้นงานโดยใช้เทคโนโลยีการหล่อฉีดอะลูมิเนียม (Die Casting Aluminum) เช่น ชิ้นส่วนยานยนต์และชิ้นส่วนเครื่องจักรกลต่าง ๆ นับว่าเป็นอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ที่มีมูลค่าทางการผลิตและการตลาดสูง ดังนั้นในการผลิตจะต้องมีการควบคุมระบบการผลิต เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพตามมาตรฐานหรือข้อกำหนดของลูกค้า โดยผู้ประกอบการจะต้องอาศัยเทคโนโลยีที่ทันสมัย รวมถึงนวัตกรรมต่าง ๆ ที่สามารถนำมาปรับปรุงประยุกต์ใช้กับวิธีการทำงานในปัจจุบัน โดยไม่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการผลิต เป็นการเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์ให้ตรงต่อความต้องการของลูกค้าและมีคุณภาพที่สูงกว่าคู่แข่งอื่น โดยในปัจจุบันทางบริษัทได้ทำการผลิตชิ้นส่วนชุดเฟืองเกียร์ (Case Gear) ซึ่งเป็นชิ้นส่วนที่ติดตั้งอยู่บริเวณทางเรือและใบพัดให้กับทางบริษัทของลูกค้าแห่งหนึ่ง

จากการศึกษาข้อมูลเบื้องต้น พบว่าในกระบวนการผลิตการหล่อฉีดอะลูมิเนียมชิ้นส่วนชุดเฟืองเกียร์ พบปัญหาชิ้นงานที่มีก้อนอินเสิร์ต (Insert) ไม่ได้ถูกตอกออกมา จำนวน 1 ชิ้น หลุดรอดไปยังบริษัทของลูกค้าที่ทำการกัด (Milling) ชิ้นงานต่อ มีผลทำให้เกิดความเสียหายกับเครื่องมือตัด (Cutting Tools) เนื่องจากเกิดการกระทบกันของก้อนอินเสิร์ต ทำให้เครื่องมือตัดเกิดความเสียหาย 3 ชิ้น คือ 1) เครื่องมือคว้านหยาบ (Rough Boring Tool) 2) เครื่องมือคว้านละเอียด (Fine Boring Tool) และ 3) มีดปาดหน้า (Back Face) โดยมีการเรียกเก็บค่าเสียหายกับทางบริษัทกรณีศึกษาเป็นเงินจำนวนมากถึง 300,000 บาทต่อครั้ง อีกทั้งยังทำให้กระบวนการผลิตเกิดความล่าช้าตามมา

ด้วยเหตุนี้จึงเป็นมูลเหตุจูงใจให้ทางคณะผู้วิจัย ดำเนินการศึกษาวิธีการทำงานในการตอกก้อนอินเสิร์ตของชิ้นส่วนชุดเฟืองเกียร์ เพื่อป้องกันความผิดพลาดของชิ้นงานที่ไม่ได้ถูกตอกก้อนอินเสิร์ตออกหลุดรอดไปยังบริษัทของลูกค้า และลดเวลาในกระบวนการผลิต โดยการประยุกต์ใช้เครื่องมือทางวิศวกรรมอุตสาหการ ได้แก่ แผนผังแสดงเหตุและผล (Cause and Effect Diagram) แผนภูมิกระบวนการไหล (Flow Process Chart) และหลักการ ECRS มาใช้วิเคราะห์แก้ปัญหา

2. วัตถุประสงค์

- 2.1 เพื่อปรับปรุงวิธีการทำงานในการตอกก้อนอินเสิร์ตสำหรับชิ้นส่วนชุดเฟืองเกียร์
- 2.2 เพื่อป้องกันความผิดพลาดชิ้นงานที่ไม่ได้ถูกตอกก้อนอินเสิร์ตออก
- 2.3 เพื่อลดเวลาในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนชุดเฟืองเกียร์

3. ขอบเขตของการวิจัย

- 3.1 เก็บข้อมูลในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนชุดเฟืองเกียร์
- 3.2 ศึกษาหาวิธีการปรับปรุงวิธีการทำงานในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนชุดเฟืองเกียร์ โดยทำการเปรียบเทียบผลก่อน และหลังการปรับปรุง

4. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในงานวิจัยนี้ได้นำเครื่องมือทางวิศวกรรมอุตสาหกรรมต่าง ๆ มาประยุกต์ใช้ในการดำเนินงานเพื่อวิเคราะห์และแก้ไขปัญหา รวมทั้งศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

4.1 ทฤษฎี

4.1.1 แผนภูมิกระบวนการไหล (Flow Process Chart)

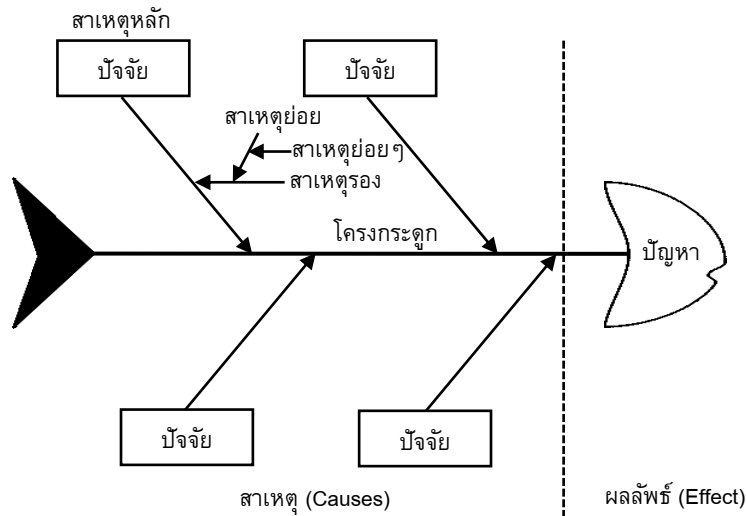
แผนภูมิกระบวนการไหล เป็นแผนภูมิที่ใช้บันทึกวิเคราะห์ขั้นตอนการไหล (Flow) ของคน วัสดุและเครื่องจักร โดยแสดงเป็นสัญลักษณ์มาตรฐาน 5 ตัว [2] ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สัญลักษณ์ที่ใช้บันทึกและคำจำกัดความโดยย่อ ของแผนภูมิกระบวนการไหล

สัญลักษณ์	ชื่อเรียก	คำจำกัดความโดยย่อ
	การปฏิบัติงาน (Operation)	- การเปลี่ยนคุณสมบัติทางเคมี หรือฟิสิกส์ของวัตถุ - การประกอบชิ้นส่วน หรือการถอดส่วนประกอบออก
	การตรวจสอบ (Inspection)	- ตรวจสอบคุณลักษณะของวัตถุ - ตรวจสอบคุณภาพหรือปริมาณ
	การเคลื่อนย้าย (Transportation)	- การเคลื่อนวัตถุจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง - พนักงานกำลังเดิน
	การรอคอย (Delay)	- การเก็บวัสดุชั่วคราวระหว่างการปฏิบัติงาน - การคอยเพื่องานขั้นตอนต่อไปเริ่มต้น
	การเก็บ (Storage)	การเก็บวัสดุ ชิ้นส่วน หรือผลิตภัณฑ์ไว้ในสถานที่ถาวรซึ่งต้องอาศัยคำสั่งในการเคลื่อนย้าย

4.1.2 แผนผังแสดงเหตุและผล (Cause and Effect Diagram)

แผนผังแสดงเหตุและผล หรือแผนผังก้างปลา (Fishbone Diagram) จะแสดงถึงความสัมพันธ์ของสาเหตุ (Causes) ที่ทำให้เกิดผล (Effect) โครงสร้างประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนโครงกระดูก ซึ่งรวบรวมปัจจัยอันเป็นสาเหตุหลัก สาเหตุรอง สาเหตุย่อย และสาเหตุย่อย ๆ ของปัญหา โดยส่วนหัวปลาที่เป็นที่สรุปของสาเหตุที่กลายเป็นปัญหา [3] ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ตัวอย่างแผนผังแสดงเหตุและผล

4.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Woarawichai et al [4] ทำการปรับปรุงวิธีการทำงานในการบรรจุชิ้นงานขึ้นรูปพลาสติก โดยใช้ฝังกังปลาในการค้นหาสาเหตุและวิเคราะห์ปัญหาจากการศึกษา พบว่าปัญหาในการผลิตเกิดขึ้นในขั้นตอนการบรรจุชิ้นงานที่ใช้เวลานานในการผลิตมีผลทำให้ผลผลิตต่ำ โดยสาเหตุหลักที่นำมาแก้ไข คือพนักงานไม่มีวิธีการทำงานใหม่ และอุปกรณ์ช่วยในการทำงาน ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการปรับปรุงวิธีการทำงานใหม่ โดยใช้แผนภูมิกระบวนการไหล และใช้หลักการปรับปรุงงานด้วยการทำให้ง่ายขึ้น โดยการทดลองออกแบบและสร้างโต๊ะบรรจุชิ้นงานช่วยในการทำงานของพนักงาน ผลการทดลองของการใช้โต๊ะบรรจุชิ้นงาน พบว่าก่อนการปรับปรุงเวลาเฉลี่ย 67.7 วินาที/กล่อง หลังการปรับปรุงเวลาเฉลี่ย 46.0 วินาที/กล่อง ลดลง 21.7 วินาที/กล่อง คิดเป็น 32%

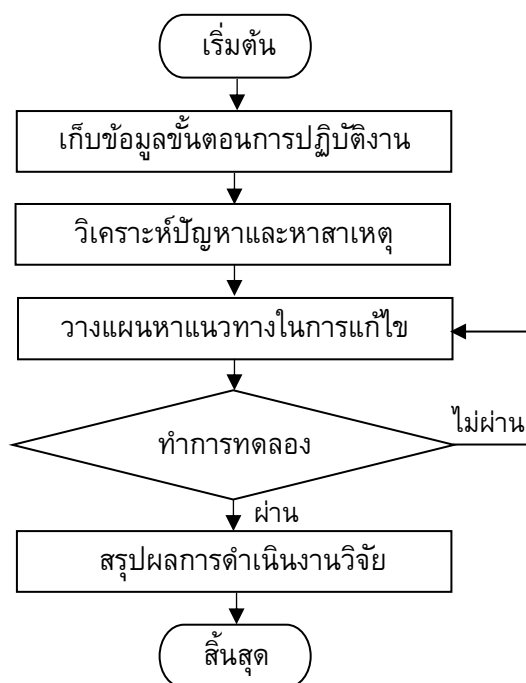
Jaichomphu and Jewpanya [5] ทำการลดเวลาสูญเสียในกระบวนการผลิตทางเสื่อเรือด้วยวิธีการจัดขึ้นรูปอะลูมิเนียม พบปัญหาที่เกิดขึ้นงานอะลูมิเนียมติดแม่พิมพ์บ่อย ทำให้เกิดเวลาสูญเสียในกระบวนการผลิตและมีค่าต้นทุนที่สูงขึ้น ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นด้วยแผนภูมิแก๊งปลาพบว่า ระยะห่างระหว่างท่อพ่นน้ำยากับแม่พิมพ์ในบางจุดไม่เหมาะสม ทำให้จุดพ่นน้ำยาไม่ตรงตำแหน่ง จากนั้นทำการลดความสูญเสียไปด้วยหลักการ ECRS ทำการติดตั้งทดลองชุดหัวพ่นน้ำยาที่สร้างขึ้นใหม่ และดำเนินการปรับระยะห่างระหว่างท่อพ่นน้ำยากับแม่พิมพ์ จากผลการเก็บข้อมูลในการตั้งระยะห่างระหว่างท่อพ่นน้ำยากับแม่พิมพ์ พบว่าระยะเฉลี่ย 75-80 มิลลิเมตรเป็นระยะที่ดีที่สุดเพราะไม่พบเวลาสูญเสียของชิ้นงานทางเสื่อเรือ ส่งผลให้สามารถลดเวลาสูญเสีย

ชิ้นงานอะลูมิเนียมตีพิมพ์เฉลี่ย อยู่ที่ 625 นาฬิกา/เดือน คิดเป็นจำนวนชิ้นงาน 408 ชิ้น/เดือน หรือเป็นจำนวนเงิน 260,000 บาท/เดือน

Pinchaimoon and Luechai [6] ทำการปรับปรุงวิธีการทำงานและลดเวลาสูญเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต ผลิตภัณฑ์ไรซ์แครกเกอร์ จากการศึกษาปัญหาเบื้องต้นพบว่า มีกิจกรรมที่ไม่ก่อให้เกิดมูลค่าเพิ่ม ในขั้นตอนการบรรจุและขั้นตอนการชั่งน้ำหนัก คือ ความสูญเสียเนื่องจากการเคลื่อนไหวมากเกินไป การรอคอยระหว่างกระบวนการ และการขนย้าย จึงทำการประยุกต์ใช้แนวคิดไคเซ็นเพื่อลดความสูญเสียโดยพยายามขจัด และลดงานที่ไม่ก่อให้เกิดมูลค่าเพิ่ม ทำการวิเคราะห์หาสาเหตุที่แท้จริงของปัญหาโดยใช้เทคนิค Why-Why Analysis จากนั้นทำการปรับปรุงวิธีการทำงานโดยใช้หลักการ ECRS ผลจากการปรับปรุงพบว่า ความสูญเสียต่าง ๆ ที่กล่าวมานั้นลดลง รอบเวลาในการทำงานของขั้นตอนการบรรจุและขั้นตอนการชั่งน้ำหนักจากเดิม 30.23 นาที/ตะกร้า ลดลงเหลือ 23.27 นาที/ตะกร้า คิดเป็นประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นร้อยละ 23.02 และกำลังการผลิตเพิ่มขึ้นจากเดิม 400 กล่อง/วัน เป็น 450 กล่อง/วัน

5. วิธีการดำเนินงาน

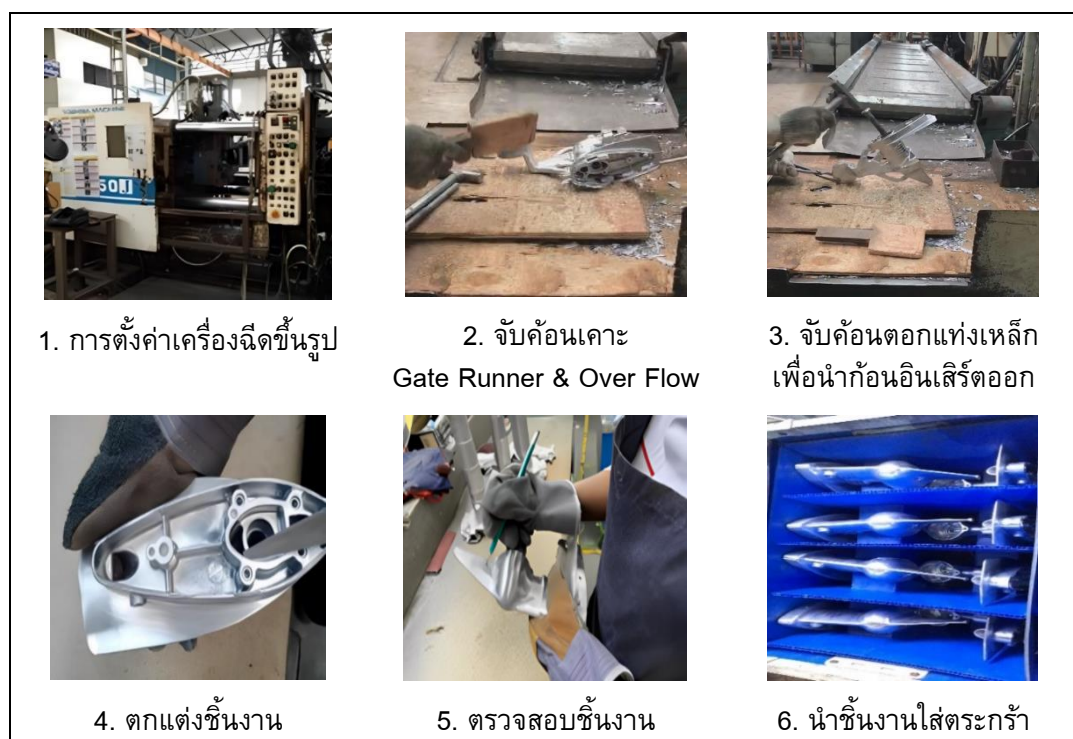
วิธีการดำเนินงานในครั้งนี้ มีขั้นตอนการดำเนินงาน ดังแสดงในรูปที่ 2 ดังนี้



รูปที่ 2 ขั้นตอนการดำเนินงาน

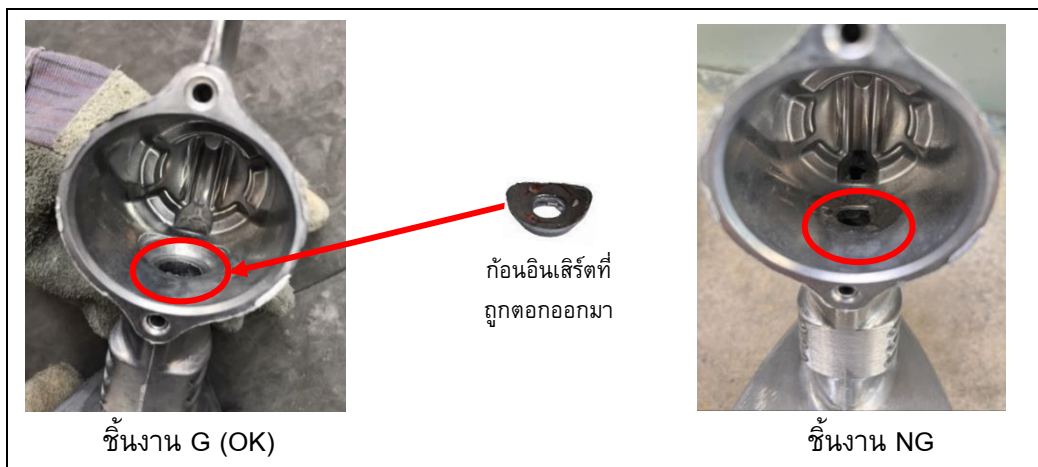
5.1 เก็บข้อมูลขั้นตอนการปฏิบัติงาน

คณะผู้วิจัยได้เก็บข้อมูลกระบวนการผลิตการหล่อฉีดอะลูมิเนียมของชิ้นส่วนชุดเฟืองเกียร์ ซึ่งเป็นชิ้นส่วนที่ติดตั้งอยู่บริเวณหางเรือและใบพัด โดยมีขั้นตอนการผลิตตั้งแต่ การตั้งค่าเครื่องฉีดขึ้นรูป จับค้อนเคาะระบายน้ำล้นโลหะส่วนเกินออกและทางเข้าของน้ำโลหะออกจากชิ้นงาน (Gate Runner & Over Flow) จับค้อนตอกแท่งเหล็กเพื่อนำก้อนอินเสิร์ตตอก ตกแต่งชิ้นงาน ตรวจสอบชิ้นงาน และนำชิ้นงานใส่ตระกร้า ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 ขั้นตอนการหล่อฉีดอะลูมิเนียมของชิ้นส่วนชุดเฟืองเกียร์

จากการศึกษาข้อมูลขั้นตอนการหล่อฉีดอะลูมิเนียมของชิ้นส่วนชุดเฟืองเกียร์ ในขั้นตอนการตรวจสอบชิ้นงานจะมีลักษณะของชิ้นงานที่ดี (Good: G) คือชิ้นงานที่ตอกก้อนอินเสิร์ตออกแล้วสาเหตุที่ต้องทำการตอกก้อนอินเสิร์ตออกจากชิ้นงาน เพราะจุดนี้แม่พิมพ์ฉีดอะลูมิเนียม (Mold) ไม่มีตัวแทรก (Insert) ภายในชิ้นงาน เลยต้องใช้ก้อนอินเสิร์ตนี้เป็นตัวแทรก (Insert) เพื่อให้ชิ้นงานได้รูปร่างตามที่ต้องการ กับชิ้นงานที่ไม่ดี (No Good: NG) คือชิ้นงานที่ยังไม่ได้ตอกก้อนอินเสิร์ตออก ที่พบในขั้นตอนตรวจสอบชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 4



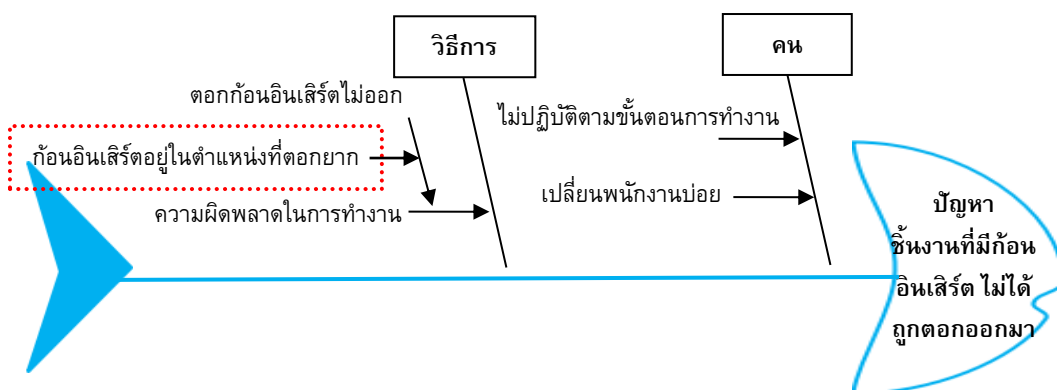
รูปที่ 4 ชั้นส่วนชุดเฟืองเกียร์ ของชั้นงาน G (OK) กับ NG

5.2 วิเคราะห์ปัญหาและหาสาเหตุ

เมื่อดำเนินการเก็บข้อมูลขั้นตอนกระบวนการผลิตชิ้นส่วนชุดเฟืองเกียร์ (Case Gear) จากนั้นทำการวิเคราะห์ปัญหาและหาสาเหตุดังนี้

5.2.1 วิเคราะห์ปัญหาโดยแผนผังแสดงเหตุและผล

จากการวิเคราะห์ปัญหาในกระบวนการผลิตของชั้นงาน Case Gear โดยแผนผังแสดงเหตุและผล ซึ่งพบว่าปัญหาเกิดขึ้นจากสาเหตุ 2 ประการ คือ คน กับวิธีการ ที่ทำให้เกิดปัญหาชั้นงานที่มีก่อนอินเสิร์ตไม่ได้ถูกตอกออกมา ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 การวิเคราะห์ด้วยแผนผังแสดงเหตุและผล

จากการศึกษาขั้นตอนการปฏิบัติงานและวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหา ด้วยแผนผังแสดงเหตุและผล ใต้ระดมสมอง (Brainstorming) เพื่อทำการค้นหาสาเหตุที่เป็นไปได้ทั้งหมด โดยเลือกแก้ปัญหาที่วิธีการ ซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่สามารถนำมาแก้ไขปัญหาได้ โดยสาเหตุรองคือความผิดพลาดในการทำงาน มีสาเหตุย่อยเกิดจากการตอกก้อนอินเลอร์ไม่ออก และสาเหตุย่อย ๆ เกิดจากก้อนอินเลอร์อยู่ในตำแหน่งที่ตอกยาก

5.2.2 วิเคราะห์ปัญหาโดยใช้แผนภูมิกระบวนการไหล

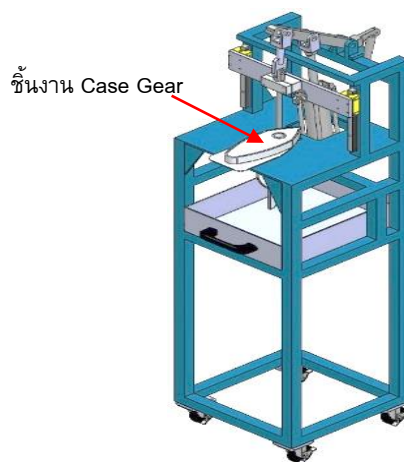
จากการวิเคราะห์ขั้นตอนกระบวนการผลิตการหล่อฉีดอะลูมิเนียมของชิ้นส่วนชุดเฟืองเกียร์ (ก่อนปรับปรุง) พบว่ามีขั้นตอนการทำงานหลายขั้นตอน ดังแสดงในรูปที่ 6

แผนภูมิกระบวนการไหล		☒ คน	☐ วัสดุ	☐ เครื่องจักร			
แผนภูมิหมายเลข : 01	สรุปผล						
	สัญลักษณ์	ปัจจุบัน	เสนอ	ลดลง			
กรรมวิธี : กระบวนการผลิต ชิ้นงาน Case Gear หลังการฉีด ขึ้นรูป จำนวน 1 ชิ้น	การปฏิบัติงาน ○	7					
	การเคลื่อนย้าย ➡	-					
	การรอคอย D	-					
☒ วิธีการเดิม ☐ วิธีการใหม่	การตรวจสอบ □	1					
ตำแหน่งที่ตั้ง : Die Casting	การเก็บพัก ▽	1					
ผู้บันทึก : ยุทธพิชัย เมืองวงษ์ษา	เวลา (วินาที)	68.4					
รายการ	เวลา (วินาที)	สัญลักษณ์					หมายเหตุ
		○	➡	D	□	▽	
1. ใช้คีมจับชิ้นงาน	5.8	●					
2. วางชิ้นงานบนโต๊ะเคาะงาน	5.3	●					
3. จับค้อนเคาะ Gate Runner & Over Flow	15.8	●					
4. จับชิ้นงานตั้งขึ้นและนำแท่งเหล็กใส่ในชิ้นงาน	6.3	●					
5. จับค้อนตอกแท่งเหล็ก เพื่อนำก้อนอินเลิร์ตออก	10.8	●					
6. ตกแต่งชิ้นงาน	7.8	●					
7. ตรวจสอบชิ้นงาน	5.3				●		
8. นำชิ้นงานวางลงในตะกร้าเก็บชิ้นงาน	5.7	●					
9. จัดเก็บชิ้นงาน	5.6					●	

รูปที่ 6 แผนภูมิกระบวนการไหลกระบวนการผลิตของชิ้นงาน Case Gear (ก่อนปรับปรุง)

5.3 วางแผนหาแนวทางในการแก้ไข

วางแผนหาแนวทางในการแก้ไขทำการปรับปรุงและพัฒนาวิธีการทำงานใหม่ โดยใช้หลักการ ECRS จะใช้ S (Simplify) [7-8] เป็นการออกแบบและสร้างเครื่องตอกก่อนอินเสิร์ตออกจากชิ้นงาน Case Gear จำนวน 1 ชุด เพื่อช่วยลดความผิดพลาดในการตอกก่อนอินเสิร์ต เนื่องจากพนักงานเข้าใจว่าชิ้นงานได้ถูกตอกก่อนอินเสิร์ตออกแล้ว แต่ที่จริงยังไม่ถูกตอกออก เพราะก่อนอินเสิร์ตอยู่ในตำแหน่งที่ตอกและตรวจสอบยาก โดยในการดำเนินงานได้ออกแบบเครื่องตอกก่อนอินเสิร์ต ดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 การออกแบบเครื่องตอกก่อนอินเสิร์ต

หลักการทำงานของเครื่องตอกก่อนอินเสิร์ตออกจากชิ้นงาน Case Gear จะสามารถทำงานได้นั้น ต้องมีการต่อระบบนิวเมติกส์ (Pneumatics System) โดยจะมีท่อลมสำหรับต่อเข้าเครื่องโดยใช้แรงดันลม 6 บาร์ และแป้นที่เหยียบสำหรับสั่งงานให้เครื่องทำงาน ซึ่งเครื่องจะทำการตอกก่อนอินเสิร์ตโดยใช้กระบอกลมนิวเมติกส์ (Pneumatic Cylinder) มีเส้นผ่าศูนย์กลางกระบอก (Bore Size) 40 มิลลิเมตร ในการส่งกำลังในการตอกทำให้ก่อนอินเสิร์ตหลุดออกจากชิ้นงาน Case Gear หลังจากที่ได้ทำการออกแบบเครื่องตอกก่อนอินเสิร์ตออกจากชิ้นงาน Case Gear แล้ว ต่อจากนั้นได้ดำเนินการสร้างเครื่องตอกก่อนอินเสิร์ตออกจากชิ้นงาน Case Gear ดังแสดงในรูปที่ 8

วิธีการใช้งานเครื่องตอกก่อนอินเสิร์ต มีขั้นตอนหลักดังนี้

- 1) พนักงานหยิบชิ้นงาน Case Gear จำนวน 1 ชิ้น ใส่เครื่องให้ตรงตำแหน่ง
- 2) พนักงานใช้เท้าควบคุมโดยเหยียบ 1 ครั้ง เพื่อให้เครื่องตอกก่อนอินเสิร์ตออกจากชิ้นงาน
- 3) พนักงานหยิบชิ้นงาน Case Gear ที่ตอกก่อนอินเสิร์ตเสร็จแล้วออกจากเครื่อง



รูปที่ 8 เครื่องตอกก้อนอินเสิร์ตที่สร้างเสร็จ

5.4 ทำการทดลอง

เริ่มทำการทดลองเครื่องตอกก้อนอินเสิร์ต ในการทดลองการทำงานของเครื่อง ดังตารางที่ 2 และทำการหาจำนวนรอบในการจับเวลาที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 2 ผลการเก็บข้อมูลการทำงานของเครื่องตอกก้อนอินเสิร์ต โดยใช้ชั้นงานจำนวน 10 ชั้น

จำนวน ชั้นงาน	การทำงานของเครื่องตอกก้อนอินเสิร์ต		จำนวนการตอก (ครั้ง)	เวลาในการตอก (วินาที)
	ตอกไม่ออก	ตอกออก		
1	-	✓	1	6.3
2	-	✓	1	7.4
3	-	✓	1	6.2
4	-	✓	1	7.3
5	-	✓	1	7.4
6	-	✓	1	6.5
7	-	✓	1	7.2
8	-	✓	1	7.4
9	-	✓	1	6.9
10	-	✓	1	7.8
รวม				70.4
เวลาที่ใช้ในการตอกก้อนอินเสิร์ตเฉลี่ย				7.0

ตารางที่ 3 ผลการเก็บข้อมูลของเวลาที่ใช้ในการตอกก้อนอินเสิร์ต

รอบที่	เวลาที่จับได้ (วินาที)	
	X	X ²
1	6.3	39.7
2	7.4	54.8
3	6.2	38.4
4	7.3	53.3
5	7.4	54.8
6	6.5	42.3
7	7.2	51.8
8	7.4	54.8
9	6.9	47.6
10	7.8	60.8
	$\Sigma x = 70.4$	$\Sigma x^2 = 498.2$

จากสมการที่ 1 เป็นการหาค่าจำนวนรอบในการจับเวลา [9]

$$N = \left[\frac{40n}{\Sigma x} \sqrt{\frac{\Sigma x^2 - (\Sigma x)^2 / n}{n-1}} \right]^2 \quad (1)$$

กำหนดให้ X คือ ค่าเวลาที่อ่านได้

n คือ จำนวนรอบที่ทดลองจับเวลาเบื้องต้น

N คือ จำนวนรอบที่ต้องจับเวลา หรือขนาดของตัวอย่าง

แทนค่าในสมการที่ 1

$$N = \left[\frac{40(10)}{70.4} \sqrt{\frac{498.2 - (70.4)^2 / 10}{10-1}} \right]^2 = 9.41 \approx 9 \text{ รอบ}$$

สรุปได้ว่า จากผลการคำนวณได้ประมาณเท่ากับ 9 รอบ แต่ได้จับเวลาการทดลองไปแล้ว 10 รอบ ทำให้ไม่ต้องไปจับเวลามาเพิ่มอีก เนื่องจากข้อมูลเพียงพอตามเงื่อนไขที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และความผิดพลาดไม่เกิน $\pm 5\%$

6. ผลการทดลอง

6.1 ผลการวิเคราะห์จากแผนภูมิกระบวนการไหล

ผลจากการออกแบบและสร้างเครื่องตอกก่อนอินเสิร์ตวิธีการใหม่ (หลังปรับปรุง) จากการวิเคราะห์จากแผนภูมิกระบวนการไหล พบว่ามีการทำงานที่เร็วขึ้น พนักงานเกิดความเมื่อยล้า น้อยลงเพราะไม่ต้องใช้แรงตอกก่อนอินเสิร์ต โดยสามารถลดขั้นตอนการทำงานและลดเวลาได้ ดังแสดงในรูปที่ 9

จากการปรับปรุงวิธีการทำงานในการตอกก่อนอินเสิร์ตออกจากชิ้นงาน Case Gear สามารถลดเวลาสูญเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต และมีผลทำให้ผลผลิตเพิ่มขึ้น ดังตารางที่ 4

แผนภูมิกระบวนการไหล		☒ คน	☐ วัสดุ	☐ เครื่องจักร			
แผนภูมิหมายเลข : 02	สรุปผล						
	สัญลักษณ์	ปัจจุบัน	เสนอ	ลดลง			
กรรมวิธี : กระบวนการผลิตชิ้นงาน Case Gear หลังการฉีดขึ้นรูป จำนวน 1 ชิ้น	การปฏิบัติงาน ○	7	6	1			
	การเคลื่อนย้าย ➡	-	-	-			
	การรอคอย □	-	-	-			
☐ วิธีการเดิม ☒ วิธีการใหม่	การตรวจสอบ □	1	1	-			
ตำแหน่งที่ตั้ง : Die Casting	การเก็บพัก ▽	1	1	-			
ผู้บันทึก : ยุทธพิชัย เมืองวงษ์ษา	เวลา (วินาที)	68.4	58.3	10.1			
รายการ	เวลา (วินาที)	สัญลักษณ์					หมายเหตุ
		○	➡	□	▽		
1. ใช้คีมจับชิ้นงาน	5.8	●					
2. วางชิ้นงานบนโต๊ะเคาะงาน	5.3	●					
3. จับค้อนเคาะ Gate Runner & Over Flow	15.8	●					
4. ใส่ชิ้นงานและใช้เท้าควบคุมให้เครื่องตอกก่อนอินเสิร์ตทำงาน	7.0	●					
5. ตกแต่งชิ้นงาน	7.8	●					
6. ตรวจสอบชิ้นงาน	5.3			●			
7. นำชิ้นงานวางลงในตะกร้าเก็บชิ้นงาน	5.7	●					
8. จัดเก็บชิ้นงาน	5.6				●		

รูปที่ 9 แผนภูมิกระบวนการไหลของกระบวนการผลิตชิ้นงาน Case Gear (หลังปรับปรุง)

ตารางที่ 4 ผลผลิตของการผลิตชิ้นงาน Case Gear (ก่อนและหลังการปรับปรุง)

รายละเอียด	ก่อนการปรับปรุง	หลังการปรับปรุง	ผลต่าง
1. ขั้นตอนการทำงาน	9 ขั้นตอน	8 ขั้นตอน	ลดลง 1 ขั้นตอน
2. เวลาการผลิต	68.4 วินาทีต่อชิ้น	58.3 วินาทีต่อชิ้น	ลดลง 10.1 วินาทีต่อชิ้น
3. ผลผลิตต่อชั่วโมง	3,600 / 68.4 = 53 ชิ้นต่อวัน	3,600 / 58.3 = 62 ชิ้นต่อวัน	เพิ่มขึ้น 9 ชิ้นต่อชั่วโมง
4. ผลผลิตต่อวัน	7.5 x 53 = 398 ชิ้นต่อวัน	7.5 x 62 = 465 ชิ้นต่อวัน	เพิ่มขึ้น 67 ชิ้นต่อวัน

6.2 การหาจุดคุ้มทุน

การหาจุดคุ้มทุนของการสร้างเครื่องตอกก้านอินเลิร์ตออกจากชิ้นงาน Case Gear ในขั้นตอนกระบวนการผลิตการหล่อฉีดอะลูมิเนียมของชิ้นงาน Case Gear (วิธีการใหม่) เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการตัดสินใจถึงความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ของจำนวนการผลิต ดังนี้

จากสมการที่ 2 เป็นการหาค่าจุดคุ้มทุน [10]

$$N^* = \frac{F}{(p-v)} \quad (2)$$

กำหนดให้ N^* คือ จำนวนการผลิตที่จุดคุ้มทุน

F คือ ต้นทุนคงที่

v คือ ต้นทุนแปรผันต่อชิ้น

p คือ ราคาขายต่อชิ้น

โดยที่

ต้นทุนคงที่ = 30,000 บาท

ต้นทุนแปรผัน = 75 บาทต่อชิ้น

ราคาขาย = 165 บาทต่อชิ้น

แทนค่าในสมการที่ 2

$$N^* = \frac{30,000}{(165 - 75)} = 333 \text{ ชิ้น}$$

ดังนั้น จำนวนการผลิตที่คุ้มทุน เท่ากับ 333 ชิ้น

7. สรุปผลการทดลอง

7.1 จากการดำเนินงานวิจัย การออกแบบและสร้างเครื่องตอกก้อนอินเสิร์ทชิ้นงาน Case Gear โดยทำการทดลองใช้แรงดันลมที่ 6 บาร์ และจากการสุ่มตัวอย่างชิ้นงานมาจำนวน 10 ชิ้น เพื่อใช้ในการทดลองเพื่อหาเวลาเฉลี่ยของเครื่องตอกก้อนอินเสิร์ทของชิ้นงาน Case Gear พบว่าเครื่องตอกก้อนอินเสิร์ทสามารถตอกก้อนอินเสิร์ทออกจากชิ้นงานได้ตรงตำแหน่ง เวลาเฉลี่ยในการตอกก้อนอินเสิร์ท เท่ากับ 7.0 วินาที

7.2 ผลการปรับปรุงวิธีการทำงานด้วยหลักการ ECRS คือ การทำให้ง่ายขึ้น (S: Simplify) โดยการออกแบบและสร้างเครื่องตอกก้อนอินเสิร์ทออกจากชิ้นงาน Case Gear รวมทั้งสามารถตรวจสอบชิ้นงานไปพร้อมกัน และแผนภูมิกระบวนการไหลของกระบวนการผลิตชิ้นงาน Case Gear หลังการฉีดขึ้นรูปก่อนปรับปรุง พบว่ามีขั้นตอนการทำงานทั้งหมด 9 ขั้นตอน มีเวลาในการทำงาน 68.4 วินาทีต่อชิ้น ผลจากการปรับปรุงวิธีการทำงานหลังปรับปรุงพบว่า มีขั้นตอนการทำงานลดลงเหลือ 8 ขั้นตอน มีเวลาในการทำงาน 58.3 วินาทีต่อชิ้น ลดลง 10.1 วินาทีต่อชิ้น คิดเป็น 14.76% (คิดจากร้อยละที่ลดลง คือ $(68.4 - 58.3) / 68.4 \times 100 = 14.76\%$) ส่งผลทำให้ผลผลิตเพิ่มขึ้นจาก 398 ชิ้นต่อวัน เป็น 465 ชิ้นต่อวัน เพิ่มขึ้น 67 ชิ้นต่อวัน คิดเป็น 16.83% (คิดจากร้อยละที่เพิ่มขึ้น คือ $(465 - 398) / 398 \times 100 = 16.83\%$) ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลงานวิจัยเรื่อง Work method improvement in plastic part packaging: a case study of motorcycle part production company พบว่า การทดลองออกแบบและสร้างโต๊ะบรรจุชิ้นงานช่วยในการทำงานของพนักงาน ก่อนการปรับปรุงเวลาเฉลี่ย 67.7 วินาที/กล่อง หลังการปรับปรุงเวลาเฉลี่ย 46.0 วินาที/กล่อง ลดลง 21.7 วินาที/กล่อง คิดเป็น 32% [4]

8. ข้อเสนอแนะ

แนวทางการวิจัยต่อไปในอนาคต เนื่องจากเครื่องตอกก้อนอินเสิร์ทสำหรับชิ้นส่วนชุดเฟืองเกียร์ ที่ได้ทำการออกแบบและพัฒนาสามารถใช้งานได้เฉพาะกับชิ้นงานนี้เท่านั้น ควรพัฒนาขยายผลปรับปรุงให้เครื่องตอกก้อนอินเสิร์ท สามารถใช้ร่วมกับชิ้นงานอื่นได้ด้วย

References

- [1] Sawangwong C, Puajindanetr S. Reduction of defect of shrinkage in high pressure die casting process. IE Network Conference; 2012 Oct 17-19; Phetchaburi, Thailand. p.1159-62. (In Thai)
- [2] Kanjanapanyakorn R. Industrial work study. Bangkok, Thailand: Top Publisher; 2009. (In Thai)

- [3] Pipatpanyanugul K. Quality control. Bangkok, Thailand: Top Publisher; 2014. (In Thai)
- [4] Woarawichai C, Jaichomphu P, Chailungkarn T, Kanchanaruangrong N. Work method improvement in plastic part packaging: a case study of motorcycle part production company. Kasem Bundit Engineering Journal 2020;10(2):148-64. (In Thai)
- [5] Jaichomphu P, Jewpanya P. Production time loss reduction in boat rudder production process: a case study of bangkok diecasting and injection co., ltd. Science and Technology Nakhon Sawan Rajabhat University Journal. 2021;13(8):99-110. (In Thai)
- [6] Pinchaimoon P, Lueachai S. Kaizen concept for improvement work method in rice cracker process. Thai Industrial Engineering Network Journal 2020;6(1):1-7. (In Thai)
- [7] Rijiravanich V. Work study principles and case study. Bangkok, Thailand: Chulalongkorn University Publisher; 2010. (In Thai)
- [8] Sitticharoen W. Work study. Bangkok, Thailand: Odeon Store Publisher; 2004. (In Thai)
- [9] Barnes RM. Motion and time study: design and measurement of work. 7th ed. New York: John Wiley & Sons; 1980.
- [10] Yaemphuan P. Engineering economy. Bangkok, Thailand: Se-Education Publisher; 2013. (In Thai)

ประวัติผู้เขียนบทความ



จิรวัฒน์ วรวิชัย อาจารย์ประจำหลักสูตรคณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก โทรศัพท์ 055-515900 E-mail: chirawat-w@hotmail.com

Interested Field: Productivity Improvement and Quality Control



กิตติ วิโรจรัตนภาพิศา อาจารย์ประจำหลักสูตรคณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก โทรศัพท์ 055-515900 E-mail: kibuya@gmail.com

Interested Field: Productivity Improvement and Design of Experiments



อุกฤษฏ์ รัตนทรัพย์ทวี อาจารย์ประจำหลักสูตรคณะวิศวกรรมศาสตร์
สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก
โทรศัพท์ 055-515900 E-mail: t.ukrit@edu.rmutl.ac.th

Interested Field: Productivity Improvement and Design of Experiments



อารุณี วงษ์ขาว อาจารย์ประจำหลักสูตรคณะวิทยาศาสตร์และ
เทคโนโลยีการเกษตร สาขาสาขาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี
ราชมงคลล้านนา ตาก โทรศัพท์ 055-515900 E-mail: r_poo@rmutl.ac.th

Interested Field: Statistics

Article History:

Received: December 2, 2023

Revised: March 27, 2024

Accepted: March 29, 2024

การประมาณขนาดหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในระบบจำหน่ายเชิงเศรษฐศาสตร์
ให้เหมาะสมกับโหลดและลดกำลังไฟฟ้าสูญเสีย

**ESTIMATING THE ECONOMICALLY OPTIMAL SIZE OF DISTRIBUTION
TRANSFORMER TO SUITABLE THE LOAD AND REDUCE ELECTRICAL
POWER LOSSES**

บุญเลิศ สือเฉย

อาจารย์, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
19/1 ถนนเพชรเกษม เขตหนองแขม กรุงเทพมหานคร 10160, tdler@hotmai.com

Boonlert Suechoey

Lecturer, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering,
Southeast Asia University, 19/1 Phetkasem Road, Nongkhaem, Bangkok 10160, Thailand,
tdler@hotmai.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ นำเสนอการประมาณขนาดหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในระบบจำหน่ายเชิงเศรษฐศาสตร์ให้เหมาะสมกับโหลดเพื่อลดกำลังไฟฟ้าสูญเสีย ด้วยการนำค่าพลังงานสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้ารวมกับราคาของหม้อแปลงไฟฟ้ามาคำนวณค่าใช้จ่าย พารามิเตอร์ในการวิเคราะห์ประกอบด้วยราคาเริ่มต้นของหม้อแปลง อายุการใช้งาน อัตราดอกเบี้ย ค่าเสื่อมราคา ค่าความสูญเสียของหม้อแปลง และอัตราค่าพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วย มาทำการวิเคราะห์หาค่าราคาของหม้อแปลงไฟฟ้า (Cost to Own Transformer; COT) ที่พิกัดหม้อแปลงขนาดต่างๆ กัน โดยกำหนดให้หม้อแปลงจ่ายโหลดเท่ากัน ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดตัวอย่างการวิเคราะห์ให้หม้อแปลงจ่ายโหลด 350 kVA และทำการเปรียบเทียบหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในระบบจำหน่ายตามมาตรฐานของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (PEA) จำนวน 3 ขนาด คือ 400 kVA 500 kVA และ 630 kVA ผลจากการวิจัยพบว่าหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 630 kVA มี COT ต่ำสุด ผลจากงานวิจัยนี้ สามารถใช้เป็นแนวทางในการเลือกขนาดของหม้อแปลงให้มีความเหมาะสมกับโหลด ช่วยในการตัดสินใจที่จะเลือกหม้อแปลงเพื่อโหลดในอนาคต ช่วยประหยัดเงินลงทุนและยังช่วยลดค่าพลังงานสูญเสียได้เป็นอย่างดี

คำสำคัญ: ค่าราคาของหม้อแปลงไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าสูญเสีย ค่าเสื่อมราคา

ABSTRACT

This research presents an economic estimation of the transformer size suitable for the distribution system to match the load and reduce power losses. It calculates the cost by combining the energy loss of the transformer with the transformer price. The parameter for the analyzation includes the initial price of transformer, the service life, the interest rate, the depreciation, the loss rate of transformer and the electricity energy rate per unit. The analyzation will calculate the cost to own transformer (COT) by varying the transformer capacities while keeping the load constant. In this research, the load for analysis is set at 350 kVA and a comparison is made among three transformer follow to PEA standard size: 400 kVA, 500 kVA and 630 kVA. The research finding indicate that the 630 kVA transformer has the lowest COT. The results of this study can serve as a guideline for selecting an appropriate transformer size for the load, help in deciding to choose a transformer to future load, help saving investment costs and effectively reduce energy expenses.

KEYWORDS: cost to own transformer (COT), power losses, depreciation

1. บทนำ

จากประเด็นปัญหาวิกฤตการณ์ต้นทุนเชื้อเพลิงพลังงานมีความผันผวน ซึ่งส่งผลกระทบต่อภาคส่วนต่างๆ เช่นภาคการผลิต ภาคขนส่ง ภาคอุตสาหกรรม เป็นต้น [1] หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญในระบบไฟฟ้าและภาคอุตสาหกรรม หม้อแปลงไฟฟ้าจะมีค่าพลังงานสูญเสียประกอบด้วยค่าความสูญเสียขณะไม่มีโหลดและขณะจ่ายโหลด หากสามารถลดค่าพลังงานสูญเสียของหม้อแปลงลงได้ก็จะทำให้ลดค่าใช้จ่ายเรื่องอัตราค่าไฟฟ้าลง ทำให้ผู้ประกอบการสามารถลดต้นทุนในการผลิตได้ ในการเลือกขนาดหม้อแปลงไฟฟ้าให้เหมาะสมกับโหลดเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีส่วนสำคัญที่จะช่วยลดพลังงานสูญเสีย งานวิจัยของ Sitiprom et al [2] ทำการเลือกหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีการจ่ายโหลดที่พิกัดทำให้ไม่มีการเผื่อโหลดที่อาจจะเพิ่มขึ้น งานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอแนวทางในการเลือกให้หม้อแปลงไฟฟ้าให้มีขนาดที่เหมาะสมกับโหลด มีต้นทุนต่ำ ลดค่าพลังงานสูญเสีย โดยการคำนวณราคาของหม้อแปลงไฟฟ้า (COT) ซึ่งเป็นต้นทุนของภาคการผลิต ในงานวิจัยนี้ ได้นำราคาเริ่มต้นของหม้อแปลง อายุการใช้งาน อัตราดอกเบี้ย ค่าเสื่อมราคาค่าความสูญเสียของหม้อแปลง และอัตราค่าพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วย มาทำการวิเคราะห์หาค่าราคาของหม้อแปลงไฟฟ้า (Cost to Own Transformer; COT) [3] หาประสิทธิภาพในการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้าที่หม้อแปลงขนาดต่างๆ กัน โดยกำหนดให้หม้อแปลงจ่ายโหลดเท่ากัน แล้วทำการเลือกให้หม้อแปลงที่มีขนาดเหมาะสมที่สุด ผลจากงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางใน

การเลือกใช้หม้อแปลงให้เกิดประโยชน์สูงสุด ลดต้นทุนการผลิต และช่วยลดค่าพลังงานสูญเสียได้เป็นอย่างดี

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง [3]

พลังงานสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าประกอบด้วยค่าความสูญเสียขณะไม่มีโหลดและขณะจ่ายโหลด ค่าความสูญเสียหากมีค่ามากทำให้ประสิทธิภาพในการจ่ายโหลดลดลง สำหรับประสิทธิภาพสูงสุดของหม้อแปลงเกิดขึ้นเมื่อค่าความสูญเสียขณะไม่มีโหลดเท่ากับขณะจ่ายโหลด ประสิทธิภาพสูงสุดของหม้อแปลงสามารถพิจารณาจากเปอร์เซ็นต์ในการจ่ายโหลด ดังสมการที่ 1

$$\%Load = 100 \sqrt{\frac{No\ load\ loss}{load\ loss}} \quad (1)$$

ในการพิจารณาเลือกหาขนาดที่เหมาะสมของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในระบบจำหน่ายเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด มีค่าพลังงานสูญเสียต่ำและมีต้นทุนต่ำ จึงต้องทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบในเชิงเศรษฐศาสตร์ โดยการวิเคราะห์นี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการพิจารณาเลือกใช้หม้อแปลงจำหน่าย โดยมีพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ประกอบด้วย ค่าราคาของหม้อแปลง (Cost to Own Transformer; COT) ดังสมการที่ 2 และ 3

$$COT = C + C \frac{FC}{100} PW + L_c (C_d + T_c \times C_e) PW + L_w D^2 (C_d + T_w \times C_e) PW \quad (2)$$

โดยที่

- C คือ ราคาเริ่มต้นของหม้อแปลง (บาท)
- FC คือ ค่าเสื่อมราคา (%)
- I คือ อัตราดอกเบี้ย (%)
- N คือ ช่วงอายุการใช้งานของหม้อแปลง (ปี)
- PW คือ ตัวประกอบค่าเงินต้นปัจจุบัน (Present - Worth Factor)
- L_c คือ ค่าความสูญเสียขณะไม่มีโหลด (kW)
- L_w คือ ค่าความสูญเสียขณะมีโหลด (kW)
- T_c คือ จำนวนชั่วโมงต่อปีที่หม้อแปลงจ่ายพลังงาน
- T_w คือ จำนวนชั่วโมงต่อปีที่หม้อแปลงจ่ายโหลดคงที่
- C_e คือ ค่าพลังงานไฟฟ้า (บาทต่อหน่วย)

C_d คือ ค่าความต้องการพลังไฟฟ้า (บาทต่อกิโลวัตต์ต่อปี)

D คือ จำนวนโหลดที่หม้อแปลงจ่าย (โหลดที่จ่ายต่อโหลดที่พิกัด)

กำหนดให้ K_c และ K_w คือค่าคงที่ในการวิเคราะห์ จะได้ค่าราคาหม้อแปลง (COT) ดังสมการ

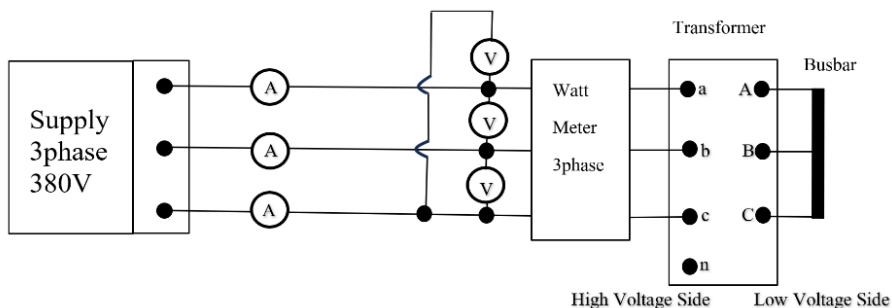
$$COT = C + PW \left(C \frac{FC}{100} + K_c L_c + K_w L_w \right) \quad (3)$$

โดยที่ $K_c = C_d + T_c C_e$ และ $K_w = D^2 (C_d + T_w C_e)$

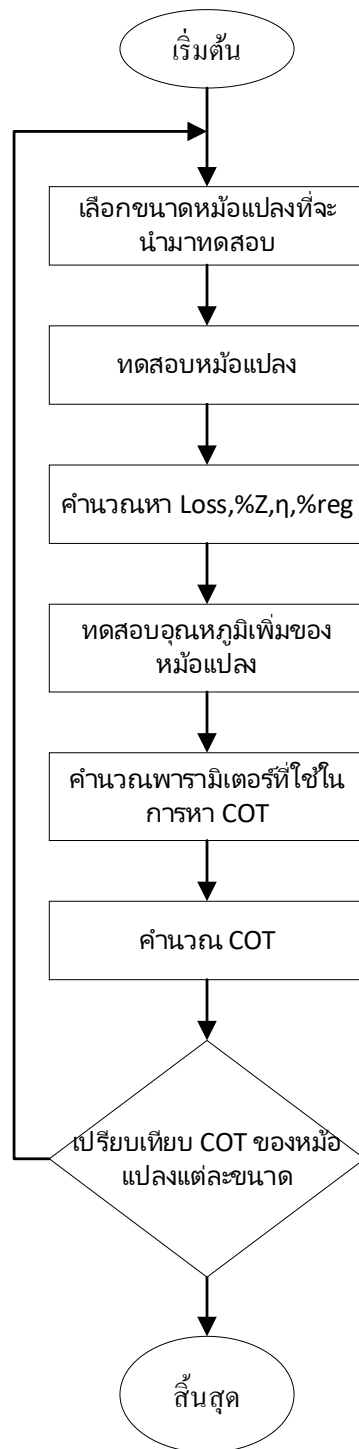
สำหรับอัตราดอกเบี้ย (I) และช่วงอายุการใช้งานของหม้อแปลง (N) เป็นพารามิเตอร์ที่นำไปใช้เลือกค่าตัวประกอบค่าเงินต้นปัจจุบัน (PW) [4]

3. ขั้นตอนการทดสอบ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการกำหนดตัวอย่างการจ่ายโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้าของการวิเคราะห์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมขนาดกลาง [5] ที่มีการใช้งานจำนวนมากในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้า โดยกำหนดตัวอย่างให้หม้อแปลงจ่ายโหลด 350 kVA แล้วทำการเลือกหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในระบบจำหน่ายตามข้อกำหนดใหม่ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค 3 เฟส 50 Hz 22000-416/240 V Dyn11 พิกัดขนาด 400 kVA 500 kVA และ 630 kVA [6] มาทำการทดสอบหาค่าความสูญเสียขณะไม่มีโหลด และขณะจ่ายโหลดตั้งแต่ 10% ถึง 140% โดยวิธีการลัดวงจร [7-9], ตามมาตรฐาน IEC [9] กำหนดให้หม้อแปลงสามารถจ่ายโหลดเกินพิกัดได้ไม่เกิน 140% ระยะเวลาไม่เกิน 3 ชั่วโมง วงจรการทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 1 ขั้นตอนของการทำงานวิจัยแสดงดังรูปที่ 2 และรูปที่ 3 แสดงตัวอย่างการทดสอบหม้อแปลงในห้องปฏิบัติการทดสอบ



รูปที่ 1 วงจรการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าขณะจ่ายโหลดโดยวิธีลัดวงจร



รูปที่ 2 ขั้นตอนของการทำงานวิจัย



รูปที่ 3 ตัวอย่างการทดสอบหม้อแปลงในห้องปฏิบัติการทดสอบ

4. ผลการวิจัย

ผลการทดสอบหาค่าความสูญเสียของหม้อแปลงที่พิกัดโหลดขนาด 400 kVA ขนาด 500 kVA และขนาด 630 kVA แสดงดังตารางที่ 1 ผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า 400 kVA ขณะจ่ายโหลดที่ 10% ถึง 140% แสดงดังตารางที่ 2 ผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า 500 kVA ขณะจ่ายโหลดที่ 10% ถึง 140% แสดงดังตารางที่ 3 และผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า 630 kVA ขณะจ่ายโหลดที่ 10% ถึง 140% แสดงดังตารางที่ 4 สำหรับผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันด้านบน (Top Oil Temperature Rise) ของหม้อแปลง 400 kVA, 500 kVA และ 630 kVA แสดงดังรูปที่ 4 รูปที่ 5 และ รูปที่ 6 ตามลำดับ [8, 9]

ตารางที่ 1 คุณสมบัติและผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าที่พิกัดโหลด

คุณสมบัติหม้อแปลงไฟฟ้า	400 kVA	500 kVA	630 kVA
High voltage (V)	22000	22000	22000
Low Voltage (V)	416/240	416/240	416/240
HV. Current (A)	10.50	13.12	16.53
LV. current (A)	555.16	693.95	874.35
Vector Group	Dyn 11	Dyn 11	Dyn 11
No Load Loss (W)	509.20	592.70	668.10
Load Loss (W)	3821.00	4582.20	5563.80
Total Loss (W)	4330.20	5174.90	6231.90

ตารางที่ 1 คุณสมบัติและผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าที่พิกัดโหลด (ต่อ)

คุณสมบัติหม้อแปลงไฟฟ้า	400 kVA	500 kVA	630 kVA
Short circuit impedance (%)	4.08	6.48	6.10
Voltage regulation (%)	1.04	1.12	1.06
Efficiency (%)	98.90	98.98	99.02
HV. Winding temp. rise (°C)	51.30	52.50	51.80
LV. Winding temp. rise (°C)	52.10	51.10	52.80
Top oil temp. rise (°C)	43.50	42.00	44.00

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า 400 kVA ขณะจ่ายโหลดที่ 10% ถึง 140%

% Load	HV. Current (A)	Load Loss (W)
10	1.05	38.21
20	2.10	152.84
30	3.15	343.89
40	4.20	611.36
50	5.25	955.25
60	6.30	1375.56
70	7.35	1872.29
80	8.40	2445.44
90	9.45	3095.01
100	10.50	3821.00
110	11.55	4623.41
120	12.60	5502.24
130	13.65	6457.49
140	14.70	7489.16

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า 500 kVA ขณะจ่ายโหลดที่ 10% ถึง 140%

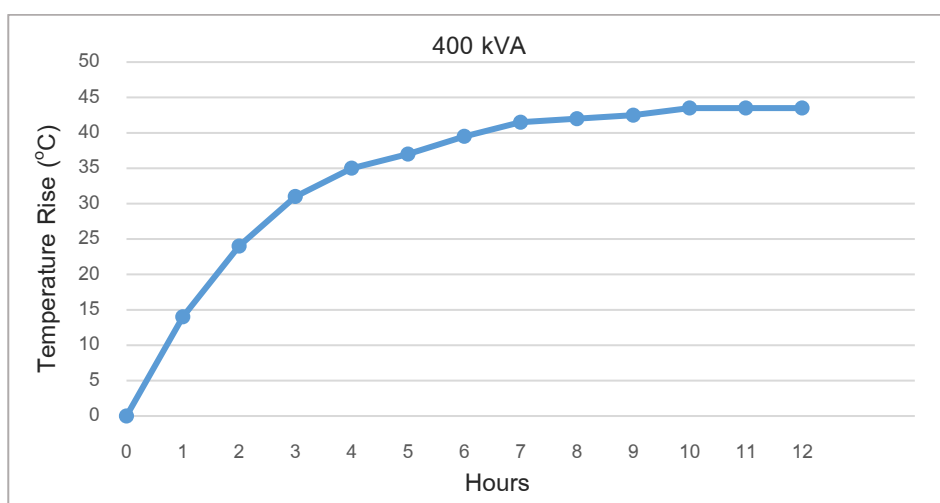
% Load (%)	HV. Current (A)	Load Loss (W)
10	1.31	45.82
20	2.62	183.29
30	3.94	412.40
40	5.25	733.15
50	6.56	1145.55
60	7.87	1649.59
70	9.19	2245.28
80	10.50	2932.61
90	11.81	3711.58
100	13.12	4582.20
110	14.43	5544.46
120	15.75	6598.37
130	17.06	7743.92
140	18.37	8981.11

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า 630 kVA ขณะจ่ายโหลดที่ 10% ถึง 140%

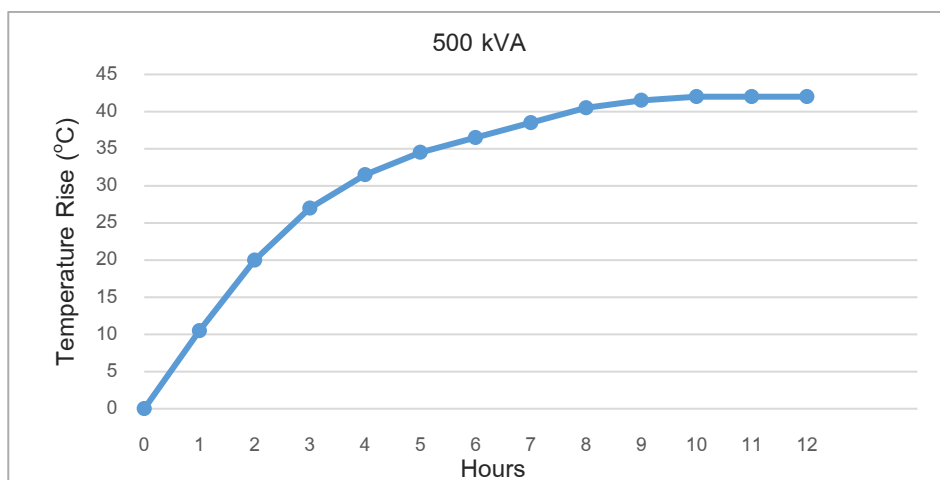
% Load	HV. Current (A)	Load Loss (W)
10	1.65	55.64
20	3.31	222.55
30	4.96	500.74
40	6.61	890.21
50	8.27	1390.95
60	9.92	2002.97
70	11.57	2726.26
80	13.23	3560.83
90	14.88	4506.68

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า 630 kVA ขณะจ่ายโหลดที่ 10% ถึง 140% (ต่อ)

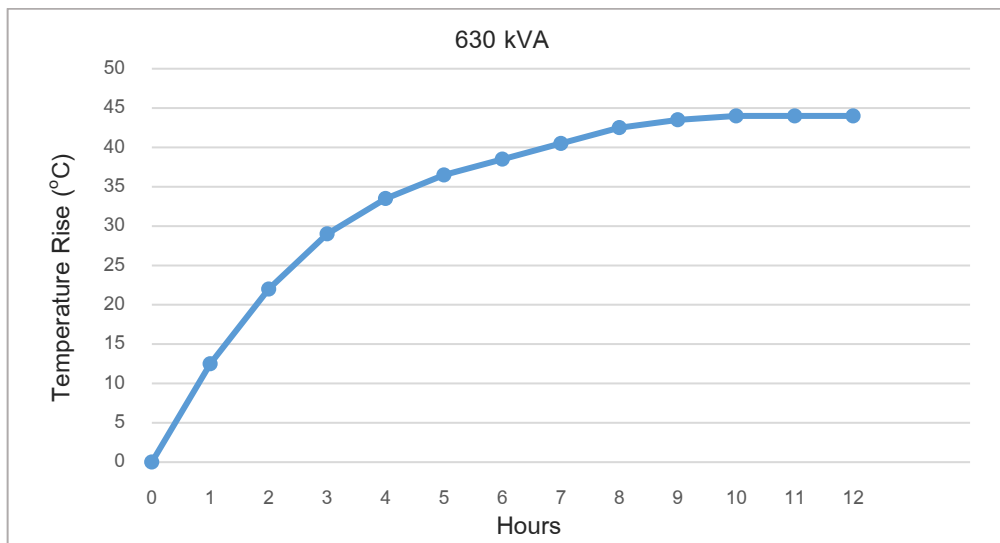
% Load	HV. Current (A)	Load Loss (W)
100	16.53	5563.80
110	18.19	6732.20
120	19.84	8011.87
130	21.49	9402.82
140	23.15	10905.05



รูปที่ 4 ผลทดสอบอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันด้านบนที่พิกัดโหลดหม้อแปลงไฟฟ้า 400 kVA

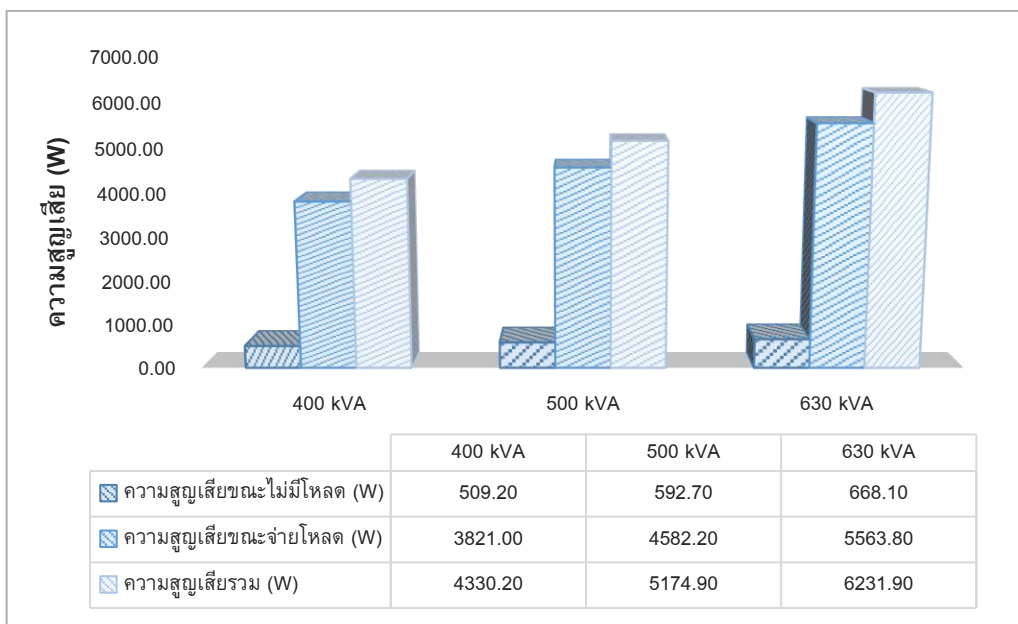


รูปที่ 5 ผลทดสอบอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันด้านบนที่พิกัดโหลดหม้อแปลงไฟฟ้า 500 kVA

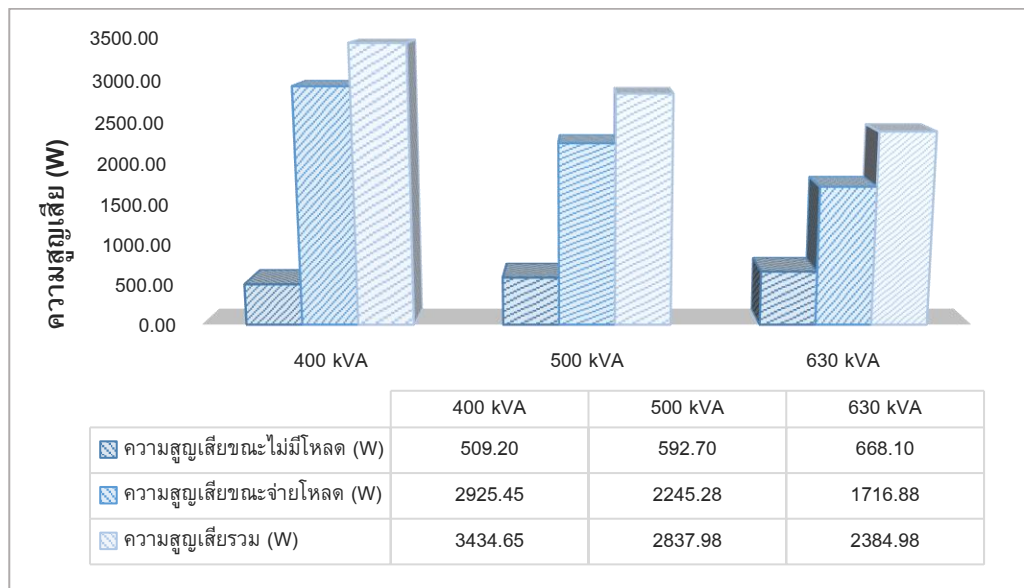


รูปที่ 6 ผลทดสอบอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันด้านบดที่พิกัดโหลดหม้อแปลงไฟฟ้า 630 kVA

การเปรียบเทียบค่าความสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะจ่ายโหลดที่พิกัด แสดงได้ดังรูปที่ 7 สำหรับรูปที่ 8 เป็นการเปรียบเทียบค่าความสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะจ่ายโหลด 350 kVA เท่ากันของหม้อแปลงทั้งสามขนาด และตารางที่ 5 แสดงผลการคำนวณหาค่าราคาของหม้อแปลง (COT) เมื่อจ่ายโหลด 350 kVA เท่ากันของหม้อแปลงทั้งสามขนาด [1, 3, 10]



รูปที่ 7 เปรียบเทียบค่าความสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าจ่ายโหลดที่พิกัด



รูปที่ 8 เปรียบเทียบค่าความสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าจ่ายโหลด 350 kVA

ตารางที่ 5 ผลการคำนวณหาค่าราคาของหม้อแปลง (COT) เมื่อจ่ายโหลด 350 kVA

พารามิเตอร์	400 kVA	500 kVA	630 kVA
ราคาเริ่มต้นของหม้อแปลง (บาท)	550000	590000	630000
ค่าเสื่อมราคา(%)	8.00	8.00	8.00
อัตราดอกเบี้ย (%)	10.00	10.00	10.00
ช่วงอายุการใช้งานของหม้อแปลง (ปี)	15	15	15
ตัวประกอบค่าเงินต้นปัจจุบัน	7.606	7.606	7.606
ค่าความสูญเสียขณะไม่มีโหลด (kW)	509.20	592.70	668.10
ค่าความสูญเสียขณะจ่ายโหลด (kW)	3821.00	4582.20	5563.80
จำนวนชั่วโมงต่อปีที่หม้อแปลงจ่ายโหลด	8760	8760	8760
จำนวนชั่วโมงต่อปีที่หม้อแปลงจ่ายโหลดคงที่	8000	8000	8000
ค่าพลังงานไฟฟ้า (บาทต่อหน่วย)	3.1471	3.1471	3.1471
ค่าความต้องการพลังไฟฟ้า (บาทต่อกิโลวัตต์ต่อปี)	2355.12	2355.12	2355.12
จำนวนโหลดที่หม้อแปลงจ่าย (โหลดที่จ่ายต่อโหลดที่พิกัด)	0.87	0.70	0.55
COT (บาท)	1,740,091.16	1,659,982.90	1,631,846.29

5. อภิปรายผลการวิจัย

จากผลการทดสอบสามารถอภิปรายได้ดังนี้

1) จากตารางที่ 2-4 เมื่อหม้อแปลงไฟฟ้ามีโหลดเพิ่มขึ้นค่าความสูญเสียขณะจ่ายโหลดของหม้อแปลงมีค่าเพิ่มสูงขึ้นมากตามไปด้วย ดังนั้นสามารถนำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบเป็นแนวทางสำหรับการวางแผนการจ่ายโหลดหรือเลือกขนาดหม้อแปลงให้เหมาะสมกับโหลด จะช่วยลดค่าพลังงานสูญเสียและค่าใช้จ่ายลงได้

2) จากรูปที่ 4-6 ผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มของหม้อแปลงจะมีค่าแปรตามโหลดที่จ่ายของหม้อแปลง กล่าวคือเมื่อโหลดเพิ่มสูงขึ้น อุณหภูมิของหม้อแปลงก็เพิ่มสูงขึ้นด้วย อุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้ฉนวนและส่วนประกอบอื่นๆ ของหม้อแปลงมีอายุการใช้งานสั้นลงและเสื่อมสภาพเร็วขึ้น

3) จากตารางที่ 5 เมื่อพิจารณาค่าราคาของหม้อแปลงไฟฟ้า (COT) พบว่าหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 400 kVA มีค่าสูงสุด รองลงมาเป็น 500 kVA และ 630 kVA ตามลำดับ พารามิเตอร์และข้อมูลต่างๆ ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ สามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามสภาวะการณ์ และสามารถนำแนวทางจากงานวิจัยนี้ไปใช้ในการเลือกขนาดหม้อแปลงให้เหมาะสมกับโหลดที่ใช้ได้เป็นอย่างดี

4) รูปที่ 8 ทำการเปรียบเทียบค่าความสูญเสียขณะไม่มีโหลด ขณะจ่ายโหลด และค่าความสูญเสียรวมของหม้อแปลงขนาด 400 kVA 500 kVA และ 630 kVA เมื่อจ่ายโหลดเท่ากัน 350 kVA หม้อแปลงขนาด 630 kVA มีเปอร์เซ็นต์การจ่ายโหลดต่ำสุด และมีค่าความสูญเสียขณะจ่ายโหลดน้อยกว่าหม้อแปลงขนาด 400 kVA และ 500 kVA การจ่ายโหลดของหม้อแปลงที่ต่ำกว่าปกติทำให้ความสูญเสียขณะจ่ายโหลดมีค่าลดลง ดังผลการทดสอบหม้อแปลงในตารางที่ 2-4 การคำนวณหาความสูญเสียที่เปอร์เซ็นต์ต่างๆ ขณะจ่ายโหลดสามารถหาได้ดังสมการที่ 4 [3]

$$L_{\%Load} = (\%Load)^2 \times Loss_{Rated} \quad (4)$$

โดยที่

$L_{\%Load}$ คือ ความสูญเสียขณะจ่ายโหลดที่เปอร์เซ็นต์ต่างๆ ของหม้อแปลง (วัตต์)

$\%Load$ คือ เปอร์เซนต์การจ่ายโหลดของหม้อแปลง (%)

$Loss_{Rated}$ คือ ความสูญเสียขณะจ่ายโหลดที่ปกติของหม้อแปลง (วัตต์)

จากรูปที่ 8 ที่โหลดเท่ากัน การเลือกหม้อแปลงขนาดใหญ่จะมีเปอร์เซ็นต์การจ่ายโหลดต่ำกว่า ทำให้อุณหภูมิขณะใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้ามีค่าต่ำลงด้วย ซึ่งจะส่งผลให้ฉนวน อุปกรณ์ต่างๆ ของหม้อแปลงเสื่อมสภาพช้าลง ทำให้อายุการใช้งานเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย

6. สรุป

ขนาดหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในงานวิจัยเป็นประเภทกิจการขนาดกลางที่มีจำนวนการใช้งานมากในระบบอุตสาหกรรมและระบบจำหน่าย จากการผลการทดสอบค่าความสูญเสียของหม้อแปลงพบว่าที่โหลดเท่ากัน หม้อแปลงขนาดใหญ่มีเปอร์เซ็นต์การจ่ายโหลดต่ำกว่า ซึ่งส่งผลให้หม้อแปลงมีค่าความสูญเสียต่ำ อุณหภูมิขณะใช้งานต่ำกว่าปกติ เมื่อพิจารณาจากค่าราคาของหม้อแปลงไฟฟ้า (COT) จะเห็นว่าการเลือกหม้อแปลงขนาดใหญ่ทำให้มีค่าใช้จ่ายรวมถูกกว่า ถึงแม้ว่าราคาเริ่มต้นในการซื้อหม้อแปลงไฟฟ้ามีราคาสูงกว่า ดังนั้นจากงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าการเลือกขนาดหม้อแปลงไฟฟ้าที่เหมาะสมทำให้ช่วยลดค่าพลังงานสูญเสียลงได้ ยืดอายุการใช้งานให้ยาวนานมากขึ้น หม้อแปลงทำงานที่ประสิทธิภาพสูงขึ้น และยังมีค่าใช้จ่ายที่ต่ำกว่าด้วย งานวิจัยนี้จึงเป็นแนวทางในการช่วยตัดสินใจในการเลือกใช้หม้อแปลงไฟฟ้าให้เหมาะสมได้เป็นอย่างดี

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบริษัท ที.ดี.ทรานสฟอร์เมอร์ จำกัด และบริษัทพงษ์พิมานการไฟฟ้า จำกัด ที่สนับสนุนวัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือในการทำวิจัยจนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

References

- [1] Suechoey B, Siriporananon S, Wannaraj O. Impact analysis of a solar rooftop with batteries installed on the roof of an organic fertilizer plant. Kasem Bundit Engineering Journal 2022;12(2):51-66. (In Thai)
- [2] Sitiprom P, Suechoey B, Monprapatsorn A. Loss analysis of distribution transformer for optimum used. Proceedings of the 7th SAU National Interdisciplinary Conference; 2020 May 29-30; Bangkok, Thailand. p. 248-52. (In Thai)
- [3] Suechoey B. Design and use of distribution transformer. 8th ed. Bangkok: Southeast Asia University; 2020. (In Thai)
- [4] Rijiwanich W, Ploymeka C. Engineering economy. 12th ed. Bangkok: Chulalongkorn University; 2011. (In Thai)
- [5] Provincial Electricity Authority of Thailand (PEA). Rate of charge - Type 3 medium industry [Internet]. 2018 [cited 2018 Oct 1] Available from: https://www.pea.co.th/Portals/0/demand_response/Electricity%20Reconsider.pdf?ver=2018-10-01-155123-370. (In Thai)

- [6] Provincial Electricity Authority of Thailand (PEA). Three-phase transformer for 22 kV and 33 kV distribution systems with ability to withstand short circuit. Specification No. RTRN035/2561; 2018. (In Thai)
- [7] Suechoey B, Siriporananon S. Power losses analysis in 3 phase distribution transformer in normal load and overload condition using artificial neural networks technique. Srinakarinwirot University (Journal of Science and Technology) 2023;15 (29): 249768. (In Thai)
- [8] International Electrotechnical Commission. IEC60076-2. Power transformer part 2: Temperature rise for liquid-immersed transformers. Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission; 2011.
- [9] International Electrotechnical Commission. IEC60354. Loading guide for oil-immersed power transformer. Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission; 1991.
- [10] Franklin AC, Franklin DP. The J & P transformer book. 11th ed. London: Butterworth-Heinemann;1983.

ประวัติผู้เขียนบทความ



บุญเลิศ สือเจย ปัจจุบันดำรงตำแหน่งผู้อำนวยการหลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ 19/1 ถนนเพชรเกษม เขตหนองแขม กรุงเทพฯ 10160 เบอร์โทรศัพท์ 02-8074500 ต่อ 312 E-mail: tdlert@hotmail.com

Article History:

Received: December 25, 2023

Revised: March 29, 2024

Accepted: April 3, 2024

ผลกระทบของความชื้นต่อสมบัติทางกลของชิ้นงานในการพิมพ์ 3 มิติ ด้วยวัสดุไนลอน 6

EFFECTS OF MOISTURE ON MECHANICAL PROPERTIES OF 3D-PRINTED PART WITH NYLON 6

อุกฤษฏ์ ธนทรัพย์ทวี¹ มาโนช น้าฟู^{2*} และ กิตติ วิโรจรัตนภาพิศาล³

^{1,2,3}อาจารย์สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล
ล้านนา ตาก, 41/1 ถนนพหลโยธิน ตำบลไม้งาม อำเภอเมืองตาก จังหวัดตาก 63000

¹t.ukrit@edu.rmutl.ac.th, ²mnf.impe@gmail.com, ³kibuya@gmail.com

Ukrit Thanasuptawee¹, Manoch Numfu^{2*} and Kitti Wirotrattanaphaphisan³

^{1,2,3}Department of Industrial Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna Tak,
41/1 Paholayothin Road, Tambon Mai Ngam, Amphur Muang Tak, Tak, 63000, Thailand

¹t.ukrit@edu.rmutl.ac.th, ²mnf.impe@gmail.com, ³kibuya@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงผลกระทบของความชื้นที่ส่งผลต่อสมบัติทางกลของชิ้นงานพิมพ์ 3 มิติ จากวัสดุไนลอน 6 (PA6) โดยนำเส้นพลาสติกไนลอนป้อนวางไว้ในห้องทดลองที่บรรยากาศและอุณหภูมิห้องในระยะเวลาที่ต่างกัน 5 ช่วงเวลาก่อนการขึ้นรูป โดยระยะเวลาที่ป้อนวางไว้ในห้องทดลองนานขึ้นส่งผลทำให้เส้นพลาสติกมีปริมาณความชื้นในตัวเส้นพลาสติกที่สูงขึ้น [1] หลังจากนั้นเส้นพลาสติกไนลอนในแต่ละช่วงเวลาถูกนำมาพิมพ์ขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบสำหรับทดสอบความสามารถในการรับแรงดึงและความสามารถในการรับแรงกระแทกจากผลการทดลองพบว่า จำนวนระยะเวลาที่เส้นพลาสติกไนลอนถูกป้อนทิ้งไว้ในสภาวะบรรยากาศห้องมีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดและค่าความต้านทานแรงกระแทกของชิ้นงานทดสอบ เมื่อเพิ่มจำนวนระยะเวลาที่วัสดุถูกป้อนทิ้งไว้ในสภาวะบรรยากาศห้องจาก 7 วัน เป็น 35 วัน ทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดลดลงตามลำดับ รวมถึงค่าความต้านทานแรงกระแทกลดลงเช่นเดียวกัน นั้นแสดงว่าเมื่อเส้นพลาสติกไนลอนถูกป้อนทิ้งไว้ในสภาวะบรรยากาศห้องจาก 7 วัน เป็น 35 วัน ทำให้เส้นพลาสติกดูดซับความชื้นจนทำให้เส้นพลาสติกมีความชื้นสูงขึ้น มีผลทำให้สมบัติทางด้านความต้านทานแรงดึงลดลง 43.1% และความต้านทานแรงกระแทกของชิ้นงานลดลง 29.2% ตามลำดับ

คำสำคัญ: เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ, พลาสติกไนลอน 6, ความชื้น, สมบัติทางกล

ABSTRACT

This research studies the impact of moisture on the mechanical properties of 3D printed specimens from Nylon 6 (PA6). Nylon filaments were left in lab conditions for 5 different time periods prior to printing to absorb varied moisture levels. As the exposure time of the filaments in the lab atmosphere increased from 7 days to 35 days, higher amounts of moisture were absorbed by the nylon filaments [1]. After each exposure time period, the nylon filaments were printed to fabricate test specimens for evaluating tensile strength and impact resistance. The experimental results indicated that the exposure time of the filaments to ambient air affected the ultimate tensile strength and impact resistance of the test specimens. As the exposure time increased from 7 days to 35 days, the ultimate tensile strength and impact resistance progressively decreased. This suggests that as the nylon filaments were left in ambient lab conditions for longer periods, from 7 days to 35 days, they absorbed more moisture. The moisture absorption resulted in a 43.1% decrease in ultimate tensile strength, and a 29.2% decrease in impact resistance.

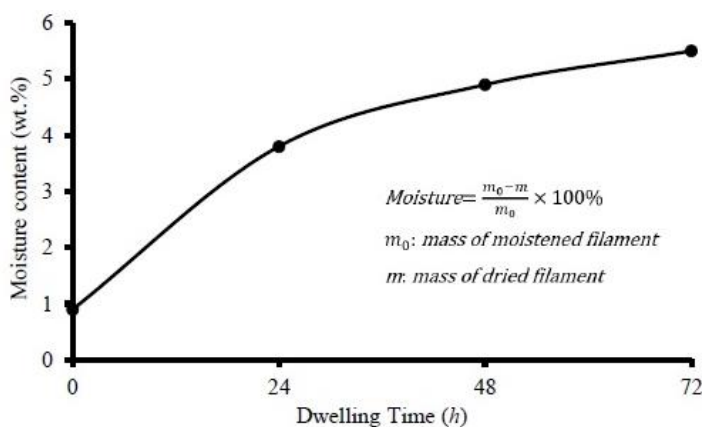
KEYWORDS: 3D Printing Technology, Nylon 6, Moisture, Mechanical Properties

1. บทนำ

เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ เป็นหนึ่งเทคโนโลยีในการผลิตแบบเพิ่มเนื้อวัสดุ (Additive Manufacturing, AM) ซึ่งในปัจจุบันมีการใช้อย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรม เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ยังสามารถเลือกวัสดุที่ใช้ผลิตชิ้นงานได้หลากหลาย [2] อีกทั้งยังมีเทคนิคในการผลิตที่หลากหลายอีกด้วย เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ที่มีอยู่ในปัจจุบัน ยกตัวอย่างเช่น เทคโนโลยี SLS (Selective Laser Sintering) เทคโนโลยี FDM (Fused Deposition Modeling) เทคโนโลยี SLA (Stereolithography) และเทคโนโลยี LOM (Laminated Object Manufacturing) เป็นต้น ซึ่งเทคโนโลยี FDM (Fused Deposition Modeling) เป็นหนึ่งเทคนิคที่มีการใช้กันอย่างแพร่หลาย อีกทั้งเทคโนโลยี FDM ยังเป็นเทคโนโลยีที่ใช้งานง่ายและมีสมบัติที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งทำให้เป็นเทคโนโลยีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายที่สุด [3] แต่อย่างไรก็ตามการใช้เทคโนโลยี FDM แบบระบบเปิดที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันนั้น ก็ยังมีปัญหาในเรื่องของความชื้นในตัวของเส้นพลาสติกซึ่งเส้นพลาสติกนั้นสามารถดูดซับความชื้นได้ หากจัดเก็บเส้นพลาสติกไม่ดีพอก็จะส่งผลทำให้เส้นพลาสติกเกิดความเสียหายจนอาจทำให้คุณภาพการพิมพ์ลดลงและเกิดปัญหาด้านประสิทธิภาพเชิงกลของชิ้นงาน 3 มิติ [4] อีกทั้งสภาพอากาศในประเทศไทยมีลักษณะที่เป็นอากาศร้อนชื้น โดย

เฉลี่ยจะมีความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยตลอดปี 73-75 เปอร์เซ็นต์ [5] ซึ่งสิ่งสำคัญสำหรับการพิมพ์ 3 มิติ ก็คือต้องทำให้วัสดุอยู่ในสภาพที่แห้งและความชื้นที่เหมาะสมอยู่เสมอ

วัสดุที่ใช้ในงานพิมพ์ 3 มิติ นั้นมีมากมายให้เลือกใช้หลายชนิดมาก อาทิเช่น เส้นพลาสติก PLA, ABS, PETG, FLEX (TPU), CPE, Nylon (PA), HIPS และ PVA เป็นต้น ซึ่งเส้นพลาสติกแต่ละประเภทก็จะให้สมบัติที่แตกต่างกัน การเลือกเส้นพลาสติกให้ถูกประเภทกับงานจะช่วยให้ชิ้นงานที่พิมพ์ออกมานั้นทำได้ตามสมบัติที่ต้องการ [6] ในส่วนของงานวิศวกรรมที่ต้องการความแข็งแรง คงทน เหนียว และทนความร้อน ผู้ใช้สามารถเลือกใช้วัสดุในลอนเพื่อนำมาพิมพ์ขึ้นรูปเป็นชิ้นงาน 3 มิติ เพื่อตอบโจทย์ความต้องการเหล่านี้ได้ ในขณะเดียวกันในลอนเป็นเส้นพลาสติกที่พิมพ์ยาก เพราะตัวในลอนนั้นดูดความชื้นจากในอากาศได้ดีจึงทำให้ขนาดและสมบัติทางกลของชิ้นงาน หลังจากการพิมพ์ด้วยเส้นในลอนที่มีความชื้นเปลี่ยนแปลงและมีขนาดความคลาดเคลื่อนไปจากไฟล์งาน 3 มิติต้นแบบ [7] ในขณะเดียวกันชิ้นงานทดสอบที่ได้จากการพิมพ์จากวัสดุในลอน สามารถดูดซับน้ำได้มากกว่าชิ้นงานทดสอบที่ได้จากการพิมพ์จากวัสดุ PLA [8] และได้มีงานวิจัยที่ศึกษาถึงความสัมพันธ์เปรียบเทียบระหว่างเวลาและความชื้นของในลอนที่ถูกแช่ทิ้งไว้ในตู้อบที่ควบคุมอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ที่ 80% เป็นระยะเวลาที่แตกต่างกันออกไป พบว่า เมื่อในลอนถูกแช่ทิ้งไว้ในตู้อบเป็นระยะเวลานานขึ้นทำให้ความชื้นในตัวเส้นในลอนเพิ่มขึ้น ด้วยเช่นกัน [1] ดังแสดงในรูปที่ 1 และหากนำเส้นพลาสติกในลอนที่มีความชื้นไปพิมพ์ขึ้นรูปชิ้นงาน ความร้อนจากหัวฉีดจะทำให้ความชื้นเดือดและระเหยระเบิดออกมาทำให้ชิ้นงานที่พิมพ์ออกมามีผิวขรุขระจากฟองอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 1 กราฟความชื้นเทียบกับระยะเวลาของในลอนที่ถูกแช่ทิ้งไว้ในตู้ความชื้น [1]



รูปที่ 2 เปรียบเทียบชิ้นงาน 3 มิติ ที่ขึ้นรูปจากเส้นพลาสติกที่มีความชื้นสูง (ก) ชิ้นงานที่ถูกขึ้นรูปจากเส้นพลาสติกที่มีความชื้นสูง (ข) ชิ้นงานที่ถูกขึ้นรูปจากเส้นพลาสติกที่มีความชื้นต่ำ

จากปัญหาเกี่ยวกับความชื้นที่เส้นวัสดุในลอนก่อนการขึ้นรูปด้วยการพิมพ์ 3 มิติ ทางคณะผู้วิจัยมีความสนใจที่จะทำการศึกษาเพิ่มเติมถึงผลกระทบของความชื้นที่มีผลต่อสมบัติทางกลของเส้นวัสดุในลอน 6 ที่มีความชื้นในช่วงเวลาของการสัมผัสกับสภาพแวดล้อมในช่วงเวลาที่ต่างกัน เพื่อเป็นแนวทางให้กับผู้ใช้ ในการตัดสินใจก่อนนำเส้นพลาสติกมาพิมพ์ขึ้นรูปชิ้นงาน 3 มิติ

2. วัสดุ อุปกรณ์ และกระบวนการวิจัย

2.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

ในการศึกษาครั้งนี้ใช้เส้นวัสดุในลอน 6 หรือ Polyamide 6 (PA6) ขนาด 1.75 มิลลิเมตรในการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 3 และเส้นวัสดุในลอนในสถานะแห้งมีสมบัติทางกลแสดงดังตารางที่ 1



รูปที่ 3 เส้นพลาสติกในลอน 6

ตารางที่ 1 สมบัติทางกลของเส้นวัสดุไนลอน 6 [9]

Property	Typical Value
Tensile strength	67.7 ± 4.7 MPa
Impact strength	13.34 ± 0.5 kJ/m ²

2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

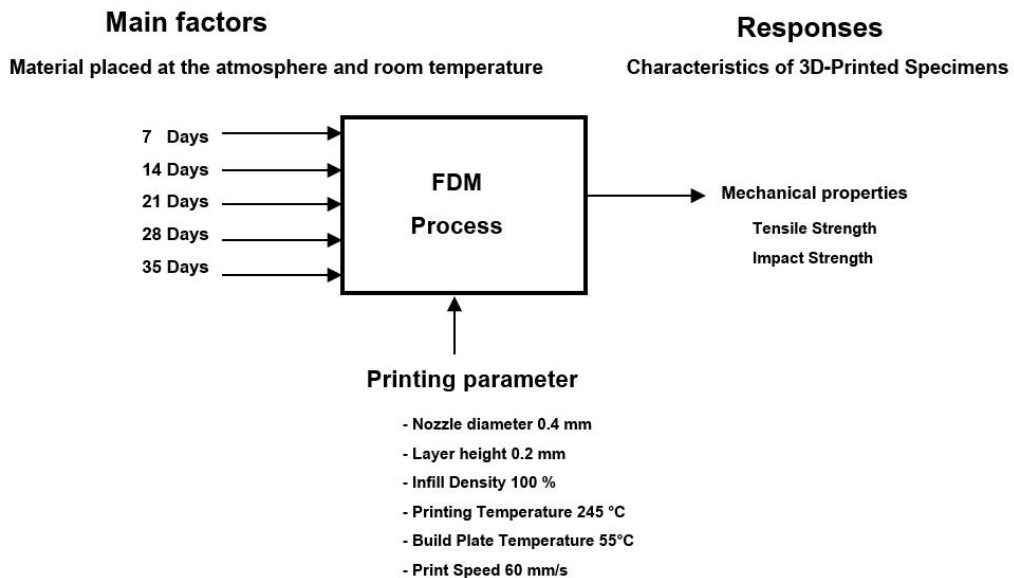
ใช้เครื่องพิมพ์ 3 มิติ FLASHFORGE รุ่น GUIDER IIs สามารถพิมพ์งานได้กว้าง 280 มม. ยาว 250 มม. และสูง 300 มม. หัวฉีดขนาด 0.4 มิลลิเมตร มีความเร็วในการฉีดสูงสุด 200 มิลลิเมตรต่อวินาที หัวฉีด Hi-Temp ทำความร้อนได้ 300 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 4 เพื่อใช้ในการสร้างชิ้นงานทดสอบ



รูปที่ 4 เครื่องพิมพ์ 3 มิติ FLASHFORGE

2.3 กระบวนการวิจัย

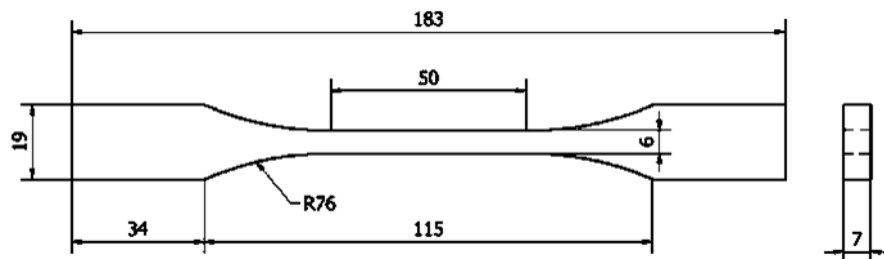
ในการทดลองเพื่อทำการศึกษาเพิ่มถึงผลกระทบของความชื้นที่มีผลต่อสมบัติทางกลของเส้นวัสดุไนลอนที่มีความชื้นในช่วงเวลาของการสัมผัสกับสภาพแวดล้อมในช่วงเวลาที่ต่างกัน และทำการพิมพ์ขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบเพื่อทดสอบสมบัติทางกลทางด้านความสามารถรับแรงดึง (Tensile Strength) และทดสอบสมบัติทางกลทางด้านความสามารถรับแรงกระแทก (Impact strength) ของชิ้นงานทดสอบที่ช่วงเวลาสัมผัสกับสภาพแวดล้อมในช่วงเวลาที่ต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 5



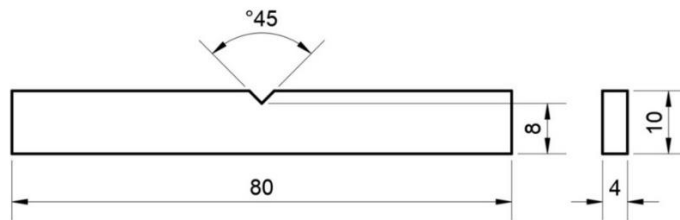
รูปที่ 5 ปัจจัยในการดำเนินงานวิจัย

2.3.1 การเตรียมวัสดุในการทดลอง

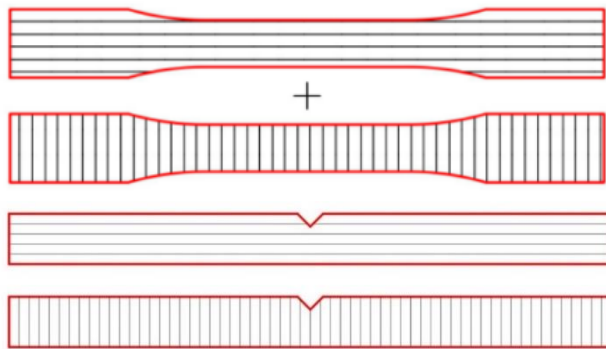
ม้วนวัสดุในลอนจะถูกวางไว้ในห้องทดลองที่บรรยากาศและอุณหภูมิห้องในระยะเวลาที่ต่างกันเพื่อให้วัสดุดูดซับความชื้นเข้าในตัวของวัสดุที่ปริมาณต่างกันตามช่วงเวลา [1] โดยกำหนดระยะเวลาไว้ 5 ช่วง คือ 7, 14, 21, 28 และ 35 วัน ซึ่งวัสดุในลอนที่ได้ในแต่ละช่วงจะถูกนำมาพิมพ์เป็นชิ้นงานทดสอบสำหรับทดสอบความสามารถในการรับแรงดึง (Tensile Strength) ตามมาตรฐาน ASTM D638-10 Type II [10] ดังแสดงในรูปที่ 6 และความสามารถในการรับแรงกระแทก (Impact Strength) รูปแบบ Charpy impact test ตามมาตรฐาน ISO 179-1/1eA [11] ดังแสดงในรูปที่ 7 โดยกำหนดทิศทางการพิมพ์ขึ้นรูป (Fill Pattern) ตามแนวยาวและขวางทำมุม 0° และ 90° ดังแสดงในรูปที่ 8 เนื่องจากการพิมพ์ขึ้นรูปในลักษณะดังกล่าวสามารถรับแรงดึงได้สูงสุด [12]



รูปที่ 6 มิติของชิ้นงานทดสอบความสามารถรับแรงดึง (Tensile Strength)



รูปที่ 7 มิติของชิ้นงานทดสอบความสามารถรับแรงกระแทก (Impact Strength)



รูปที่ 8 ทิศทางการพิมพ์ขึ้นรูป (Fill Pattern) ของชิ้นงานทดสอบ

2.3.2 การขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ

เส้นพลาสติกในลอนในแต่ละช่วงของระยะเวลาที่วางไว้ในห้องทดลองที่บรรยากาศและอุณหภูมิห้องที่ต่างกัน 5 ช่วงเวลา จะถูกนำมาขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบสำหรับการทดสอบสมบัติทางกลทางด้านความสามารถรับแรงดึงดังแสดงในรูปที่ 9 และชิ้นงานทดสอบสำหรับการทดสอบสมบัติทางกลทางด้านความสามารถรับแรงกระแทกดังแสดงในรูปที่ 10 ด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ FLASHFORGE รุ่น GUIDER IIs โดยใช้หัวพิมพ์ขนาด 0.4 มิลลิเมตร ความสูงในแต่ละชั้นของการพิมพ์ 0.2 มิลลิเมตร การเติมเนื้อภายในของชิ้นงานทดสอบแบบ 100% อุณหภูมิในการพิมพ์ 245 องศาเซลเซียส อุณหภูมิฐานพิมพ์ 55 องศาเซลเซียส และความเร็วในการพิมพ์ 60 มิลลิเมตรต่อวินาที ดังแสดงในตารางที่ 2



รูปที่ 9 ชิ้นงานทดสอบสำหรับการทดสอบความสามารถในการรับแรงดึง



รูปที่ 10 ชิ้นงานทดสอบสำหรับการทดสอบความสามารถในการรับแรงกระแทก

ตารางที่ 2 การกำหนดค่าการพิมพ์ชิ้นรูปชิ้นงานทดสอบ

Nozzle diameter [mm]	0.4
Layer height [mm]	0.2
Infill Density [%]	100
Printing Temperature [°C]	245
Build Plate Temperature [°C]	55
Print Speed [mm/s]	60

2.3.3 การทดสอบสมบัติทางกล (Mechanical Properties Testing)

สมบัติทางกลทางด้านความสามารถรับแรงดึง (Tensile Strength) จะถูกทำการทดสอบ โดยการทดสอบความสามารถรับแรงดึงถูกกำหนดตามมาตรฐาน ASTM D638 ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง Universal Testing Machine (UTM) โดยทำการติดตั้งชิ้นงานทดสอบให้ระยะห่างระหว่างหัวจับ 115 มิลลิเมตร และใช้หัวจับชิ้นงานทดสอบแรงดึงแบบ Wedge grip หนีบที่ระยะ 115 มิลลิเมตร และกำหนดความเร็วขณะดึง 50 มิลลิเมตรต่อนาที โดยค่าที่ได้จากเครื่องทดสอบเป็นค่าแรงดึงสูงสุด

ค่าแรงดึงสูงสุดจะถูกใช้นำมาหาค่า Ultimate Tensile Strength ดังสมการ (1) โดยพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานทดสอบมีขนาดความกว้าง 6 มิลลิเมตร และสูง 7 มิลลิเมตร

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

เมื่อ σ = Ultimate Tensile Strength

F = ค่าแรงดึงสูงสุดที่ได้จากเครื่องทดสอบแรงดึง

A = พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานทดสอบ

สมบัติทางกลทางด้านความสามารถรับแรงกระแทก (Impact Strength) จะถูกทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงกระแทกในรูปแบบ Charpy impact test ตามมาตรฐาน ISO 179-1 โดยติดตั้งชิ้นงานทดสอบในแนวนอนและใช้หัวตีกระแทกแบบ Charpy ที่มีน้ำหนักลูกตุ้ม 2 กิโลกรัม และความยาวของแขนยึดลูกตุ้มยาว 1 เมตร โดยกำหนดมุมเริ่มต้นของหัวตีที่ 160 องศา ข้อมูลที่ได้หลังการทดสอบคิดเป็นค่าพลังงานที่ใช้ในการตีกระแทก โดยคำนวณจากสมการที่ (2)

$$W = F \times L(\cos \beta - \cos \alpha) \quad (2)$$

เมื่อ W = ค่าพลังงานที่ใช้ในการตีกระแทก (นิวตันเมตร)

F = น้ำหนักของลูกตุ้ม (กิโลกรัม)

L = ความยาวของแขนลูกตุ้ม

α = มุมยกของลูกตุ้มเริ่มต้นก่อนกระแทก

β = มุมยกของลูกตุ้มสุดท้ายหลังกระแทก

2.3.4 สถิติในการศึกษาวิจัย

การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-Way ANOVA) โดยทดสอบสมมติฐานของปัจจัยหลักและผลกระทบจากความสัมพันธ์ร่วมของปัจจัยว่ามีอิทธิพลต่อค่าผลตอบหรือไม่ ที่ระดับนัยสำคัญที่ 0.05 โดยกำหนดสมมติฐานระยะเวลาที่วัสดุถูกปล่อยทิ้งไว้ในสภาวะบรรยากาศห้องที่แตกต่างกันจะมีผลกระทบต่อค่าความต้านทานแรงดึง และผลกระทบต่อความต้านทานแรงกระแทกหรือไม่

สมมติฐานของงานวิจัย

$$H_0 = \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu_5$$

$$H_1 = \mu_i \neq \mu_j \text{ อย่างน้อยที่สุดหนึ่งคู่}$$

การวิเคราะห์ผลทางสถิติของช่วงเวลาที่วัสดุถูกปล่อยทิ้งไว้ในสภาวะบรรยากาศห้องที่แตกต่างกัน 5 ระดับจะมีผลกระทบต่อความต้านทานแรงดึง ได้ตั้งข้อสมมติฐานไว้ ดังนี้

H_0 = ระยะเวลาที่วัสดุถูกปล่อยทิ้งไว้ในสภาวะบรรยากาศห้องทั้ง 5 ระดับไม่มีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึง

H_1 = ระยะเวลาที่วัสดุถูกปล่อยทิ้งไว้ในสภาวะบรรยากาศห้องทั้ง 5 ระดับมีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึง

การวิเคราะห์ผลทางสถิติของช่วงเวลาที่วัสดุถูกปล่อยทิ้งไว้ในสภาวะบรรยากาศห้องที่แตกต่างกัน 5 ระดับจะมีผลกระทบต่อความต้านทานแรงกระแทก ได้ตั้งข้อสมมติฐานไว้ ดังนี้

H_0 = ระยะเวลาที่วัสดุถูกปล่อยทิ้งไว้ในสภาวะบรรยากาศห้องทั้ง 5 ระดับไม่มีผลต่อค่าความต้านทานแรงกระแทก

H_1 = ระยะเวลาที่วัสดุถูกปล่อยทิ้งไว้ในสภาวะบรรยากาศห้องทั้ง 5 ระดับมีผลต่อค่าความต้านทานแรงกระแทก

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

3.1 สมบัติทางกลทางด้านความสามารถรับแรงดึง (Tensile Strength)

ผลการทดสอบความสามารถรับแรงดึงกระทำโดยอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D638-10 โดยการปล่อยวัสดุในลอนไว้ในบรรยากาศห้องทดลองที่อุณหภูมิห้องในระยะเวลาที่ต่างกัน 5 ช่วง ก่อนนำวัสดุมาเข้าสู่กระบวนการพิมพ์ขึ้นรูป ซึ่งผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าผลของระยะเวลาในการปล่อยวัสดุทิ้งไว้ในบรรยากาศห้องทดลองเป็นเวลานานก่อนนำมาพิมพ์ขึ้นรูปจะทำให้ชิ้นงานทดสอบมีลักษณะการเสียหายเหมือนกับวัสดุที่มีความเปราะ ส่วนวัสดุที่ถูกทิ้งไว้ในบรรยากาศห้องทดลองเป็นระยะเวลาที่สั้นกว่า ลักษณะการเสียหายจะเหมือนกับวัสดุที่มีความเหนียว ดังแสดงในรูปที่ 11 ซึ่งสอดคล้องกับผลของค่าการรับแรงดึงของชิ้นงานทดสอบดังแสดงในตารางที่ 3



รูปที่ 11 เปรียบเทียบลักษณะการเสียหายของชิ้นงานทดสอบจากแรงดึง (ด้านบน) ชิ้นงานทดสอบที่ขึ้นรูปจากเส้นพลาสติกที่ถูกทิ้งไว้ในบรรยากาศห้องทดลอง 7 วัน (ด้านล่าง) ชิ้นงานทดสอบที่ขึ้นรูปจากเส้นพลาสติกที่ถูกทิ้งไว้ในบรรยากาศห้องทดลอง 35 วัน

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบค่าการรับแรงดึงของชิ้นงานทดสอบ [หน่วย:นิวตัน]

ครั้งที่	ระยะเวลาที่วัสดุถูกปล่อยทิ้งไว้ในสภาวะบรรยากาศห้อง				
	7 วัน	14 วัน	21 วัน	28 วัน	35 วัน
1	2039.17	1636.67	1681.67	1388.33	1185.00
2	1993.33	1888.33	1645.00	1373.33	1160.00
3	1948.33	1757.50	1707.50	1375.83	1172.33
4	2170.00	1887.50	1709.17	1400.00	1186.22
5	2175.00	1761.67	1728.33	1395.83	1169.23
เฉลี่ย	2065.17	1786.33	1694.33	1386.67	1174.56

นำค่าการรับแรงดึงของชิ้นงานทดสอบมาหาค่าความเค้นแรงดึง โดยอ้างอิงจากสมการ (1) จะได้ค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) ดังตารางที่ 4

จากผลการทดลองตารางที่ 4 ข้อมูลค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดถูกวิเคราะห์ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนดังตารางที่ 5 จากค่า P-Value ที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ 0.000 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงว่าเรามีหลักฐานเพียงพอที่จะปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0) นั่นแสดงว่าจำนวนระยะเวลาที่วัสดุถูกปล่อยทิ้งไว้ในสภาวะบรรยากาศห้องมีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของวัสดุ โดยที่ได้ค่า $R\text{-sq}(\text{adj}) = 95.60$ แสดงว่ามีความแม่นยำสูง จากรูปที่ 12 พบว่าเมื่อเพิ่มจำนวนระยะเวลาที่วัสดุถูกปล่อยทิ้งไว้ในสภาวะบรรยากาศห้องจาก 7 วัน เป็น 35 วันส่งผลให้

ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดลดลงตามลำดับ โดยที่ระยะเวลา 7 วัน ให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดมากกว่าช่วงระยะเวลาอื่นที่ระดับความเชื่อมั่นทางสถิติ 95 %

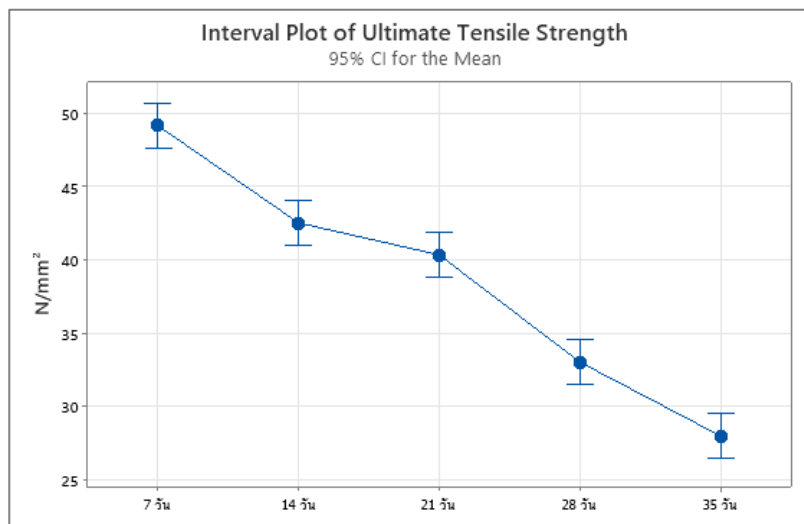
ตารางที่ 4 ค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด [หน่วย:นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร]

ครั้งที่	ระยะเวลาที่วัสดุถูกปล่อยทิ้งไว้ในสภาวะบรรยากาศห้อง				
	7 วัน	14 วัน	21 วัน	28 วัน	35 วัน
1	48.55	38.97	40.04	33.06	28.21
2	47.46	44.96	39.17	32.70	27.62
3	46.39	41.85	40.65	32.76	27.91
4	51.67	44.94	40.69	33.33	28.24
5	51.79	41.94	41.15	33.23	27.84
เฉลี่ย	49.17	42.53	40.34	33.02	27.97
Pooled StDev = 1.616					

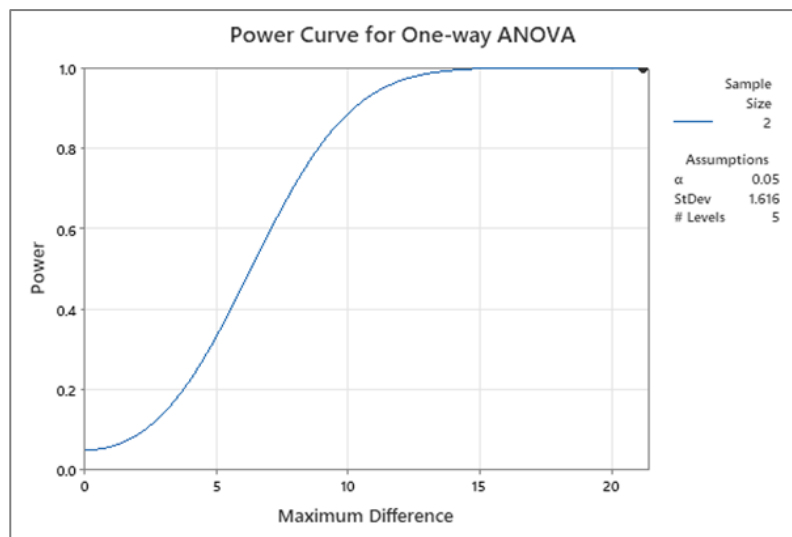
ตารางที่ 5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของแรงดึง

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F - value	P - value
humidity	4	2,421,094	605,273	131.28	0.000
Error	20	92,212	4,611		
Total	24	2,513,306			
R-sq = 96.33%, R-sq(adj) = 95.60%, R-sq(predict) = 94.27%					

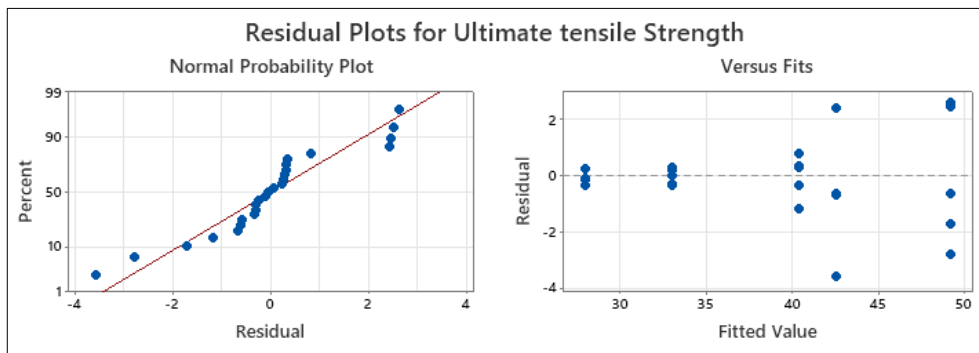
ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการมากลุ่มละ 5 ชิ้น ซึ่งมากกว่าการคำนวณจำนวนตัวอย่างที่คำนวณได้ 2 ตัวอย่างดังรูปที่ 13 ซึ่งหาได้จากการกำหนดค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานรวมจากข้อมูลทั้ง 5 กลุ่ม (Pooled StDev) = 1.616 และค่าส่วนต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของกลุ่มที่มากที่สุดและน้อยที่สุดเท่ากับ 21.2



รูปที่ 12 กราฟแสดงระยะเวลาของไนลอนที่ถูกปล่อยทิ้งไว้ในสภาวะบรรยากาศห้องเทียบ กับค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด



รูปที่ 13 ขนาดตัวอย่างที่เหมาะสมของการทดสอบค่าการรับแรงดึง



รูปที่ 14 ส่วนตกค้าง (Residual) ของข้อมูลสำหรับค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด

จากรูปที่ 14 การตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจงปกติ (Normal Probability Plot) แสดงให้เห็นว่าส่วนตกค้างจากผลการทดลองค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด ไม่แสดงสิ่งผิดปกติให้เห็น ซึ่งเห็นได้ว่าข้อมูลส่วนตกค้างของผลตอบมีการกระจายตัวแบบปกติ จุดของส่วนตกค้างบนกราฟเรียงตัวกันมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง ปกติ ในขณะที่ Versus Fits จุดกระจายตัวเท่า ๆ กันรอบค่า 0 และ Versus Order มีการกระจายตัวโดยไม่มีรูปแบบใด ๆ แสดงว่าข้อมูลเป็นไปตามข้อตกลงเบื้องต้นทางสถิติ

3.2 สมบัติทางกลทางด้านความสามารถรับแรงกระแทก (Impact Strength)

ผลการทดสอบความสามารถรับแรงกระแทกกระทำการทดสอบในรูปแบบ Charpy impact test ตามมาตรฐาน ISO 179-1 โดยการปล่อยวัสดุในलोंไว้ในบรรยากาศห้องทดลองที่อุณหภูมิห้อง ในระยะเวลาที่ต่างกัน 5 ช่วง ก่อนนำวัสดุมาเข้าสู่กระบวนการพิมพ์ขึ้นรูป ซึ่งผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าระยะเวลาในการปล่อยวัสดุทิ้งไว้ในบรรยากาศห้องทดลองเป็นเวลานานก่อนนำมาพิมพ์ขึ้นรูปจะทำให้ชิ้นงานทดสอบมีลักษณะแตกหักเป็นชั้นซึ่งเกิดจากการยึดติดกันที่ไม่สมบูรณ์ระหว่างชั้นในการขึ้นรูป ส่วนวัสดุที่ถูกทิ้งไว้ในบรรยากาศห้องทดลองเป็นระยะเวลาที่สั้นกว่า ลักษณะการแตกหักในแต่ละชั้นจะขาดเป็นแนวเส้นตรง ซึ่งบอกถึงการยึดติดของแต่ละชั้นที่ดีกว่า ดังแสดงในรูปที่ 15 ซึ่งสอดคล้องกับผลของค่าการรับแรงกระแทกของชิ้นงานทดสอบดังแสดงในตารางที่ 6



รูปที่ 15 เปรียบเทียบลักษณะการเสียหายของชิ้นงานทดสอบจากแรงกระแทก (ด้านบน) ชิ้นงานทดสอบที่ขึ้นรูปจากเส้นพลาสติกที่ถูกทิ้งไว้ในบรรยากาศห้องทดลอง 7 วัน (ด้านล่าง) ชิ้นงานทดสอบที่ขึ้นรูปจากเส้นพลาสติกที่ถูกทิ้งไว้ในบรรยากาศห้องทดลอง 35 วัน

ตารางที่ 6 ผลการทดสอบค่าการรับแรงกระแทกของชิ้นงานทดสอบ [หน่วย:นิวตันเมตร]

ครั้งที่	ระยะเวลาที่วัสดุถูกปล่อยทิ้งไว้ในสภาวะบรรยากาศห้อง				
	7 วัน	14 วัน	21 วัน	28 วัน	35 วัน
1	13.11	11.99	11.60	10.16	9.31
2	13.04	11.90	11.39	10.73	9.19
3	12.88	12.37	11.39	10.27	9.31
4	12.96	11.90	11.49	10.27	8.94
5	13.04	12.28	11.18	10.51	9.31
เฉลี่ย	13.01	12.09	11.41	10.39	9.21
Pooled StDev = 0.178					

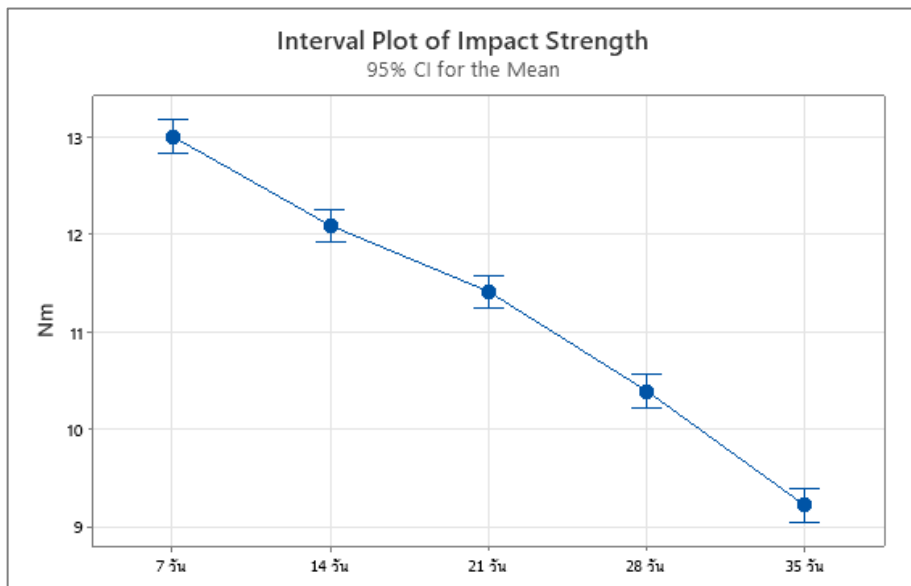
จากผลการทดลองตารางที่ 6 ข้อมูลค่าความต้านทานแรงกระแทก ถูกวิเคราะห์ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนดังตารางที่ 7 จากค่า P-Value ที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ 0.000 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงว่าเรามีหลักฐานเพียงพอที่จะปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0) นั้น แสดงว่าจำนวนระยะเวลาที่วัสดุถูกปล่อยทิ้งไว้ในสภาวะบรรยากาศห้องมีผลต่อค่าความต้านทานแรงกระแทกของวัสดุ โดยที่ได้ค่า $R\text{-sq}(\text{adj}) = 98.26$ แสดงว่ามีความแม่นยำสูง จากรูปที่ 16 พบว่าเมื่อเพิ่มจำนวนระยะเวลาที่วัสดุถูกปล่อยทิ้งไว้ในสภาวะบรรยากาศห้องจาก 7 วัน เป็น 35 วัน

ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงกระแทกลดลงตามลำดับ โดยที่ระยะเวลา 7 ให้ค่าความต้านทานแรงกระแทกมากกว่าช่วงระยะเวลาอื่นที่ระดับความเชื่อมั่นทางสถิติ 95 %

ตารางที่ 7 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของแรงกระแทก

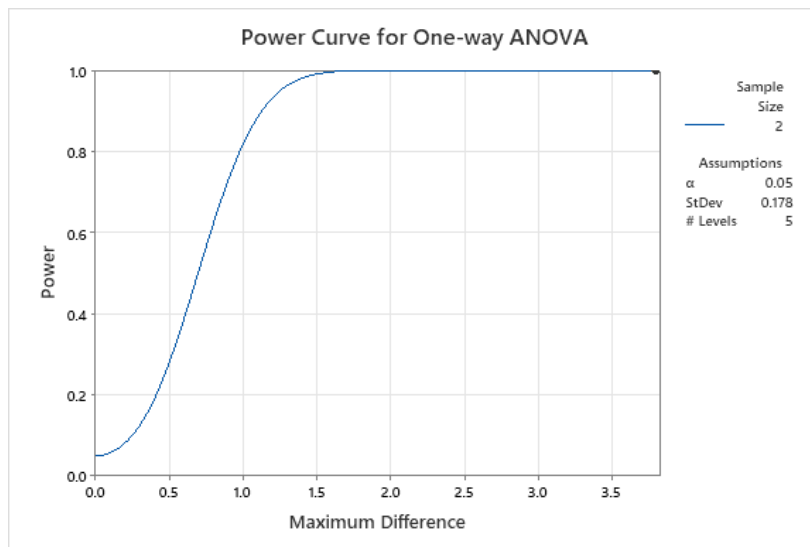
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F - value	P - value
humidity	4	43.5180	10.8795	340.54	0.000
Error	20	0.6390	0.0319		
Total	24	44.1570			

R-sq = 98.55%, R-sq(adj) = 98.26%, R-sq(predict) = 97.74%

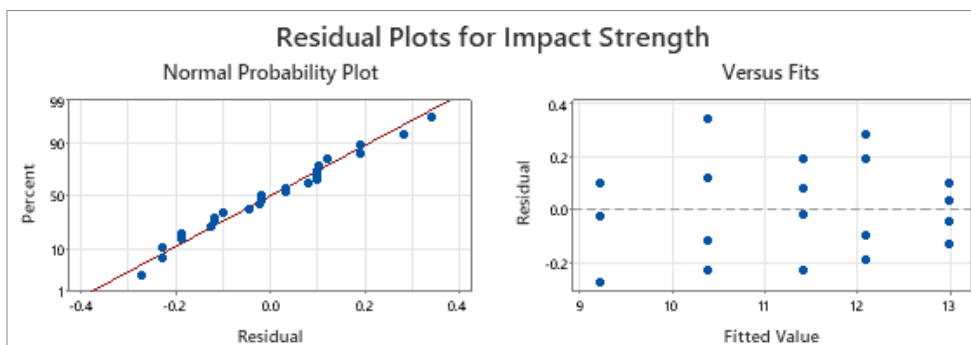


รูปที่ 16 กราฟแสดงระยะเวลาของไหล่อนที่ถูกปล่อยทิ้งไว้ในสภาวะบรรยากาศห้องเทียบกับค่าความต้านทานแรงกระแทก

ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการมากลุ่มละ 5 ชิ้น ซึ่งมากกว่าการคำนวณจำนวนตัวอย่างที่คำนวณได้ 2 ตัวอย่างดังรูปที่ 17 ซึ่งหาได้จากการกำหนดค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานรวมจากข้อมูลทั้ง 5 กลุ่ม (Pooled StDev) = 0.178 และค่าส่วนต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของกลุ่มที่มากที่สุดและน้อยที่สุดเท่ากับ 3.8



รูปที่ 17 ขนาดตัวอย่างที่เหมาะสมการทดสอบค่าการรับแรงกระแทก



รูปที่ 18 ส่วนตกค้าง (Residual) ของข้อมูลสำหรับค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด

จากรูปที่ 18 การตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจงปกติ (Normal Probability Plot) แสดงให้เห็นว่าส่วนตกค้างจากการทดลองค่าความต้านทานแรงกระแทกไม่แสดงสิ่งผิดปกติให้เห็น ซึ่งเห็นได้ว่าข้อมูลส่วนตกค้างของผลตอบมีการกระจายตัวแบบปกติ จุดของส่วนตกค้างบนกราฟเรียงตัวกันมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง ปกติ ในขณะที่ Versus Fits จุดกระจายตัวเท่า ๆ กันรอบค่า 0 และ Versus Order มีการกระจายตัวโดยไม่มีรูปแบบใด ๆ แสดงว่าข้อมูลเป็นไปตามข้อตกลงเบื้องต้นทางสถิติ

4. สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดลองพบว่าจำนวนระยะเวลาที่วัสดุถูกปล่อยทิ้งไว้ในสภาวะบรรยากาศห้องมีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของวัสดุ เมื่อเพิ่มจำนวนระยะเวลาที่วัสดุถูกปล่อยทิ้งไว้ในสภาวะบรรยากาศห้องจาก 7 วัน เป็น 35 วันส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดลดลงตามลำดับ โดยที่ระยะเวลา 7 วัน ให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดอยู่ที่ 49.17 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร ซึ่งมีค่ามากกว่าช่วงระยะเวลาอื่น และระยะเวลา 35 วัน ให้ค่าความต้านทานแรงดึงต่ำสุดอยู่ที่ 27.97 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร ในส่วนค่าความต้านทานแรงกระแทก พบว่าเมื่อเพิ่มจำนวนระยะเวลาที่วัสดุถูกปล่อยทิ้งไว้ในสภาวะบรรยากาศห้องจาก 7 วัน เป็น 35 วัน ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงกระแทกลดลงตามลำดับเช่นเดียวกัน ซึ่งที่ระยะเวลา 7 วัน ให้ค่าความต้านทานแรงกระแทกมากกว่าช่วงระยะเวลาอื่น โดยที่ระยะเวลา 7 วัน ให้ค่าความต้านทานแรงกระแทกสูงสุดอยู่ที่ 13.01 นิวตันเมตร ซึ่งมีค่ามากกว่าช่วงระยะเวลาอื่น และระยะเวลา 35 วัน ให้ค่าความต้านทานแรงกระแทกต่ำสุดอยู่ที่ 9.21 นิวตันเมตร นั้นแสดงว่าเมื่อเส้นพลาสติกในลอนถูกปล่อยทิ้งไว้ในสภาวะบรรยากาศห้องจาก 7 วัน เป็น 35 วัน ทำให้เส้นพลาสติกดูดซับความชื้นจนทำให้เส้นพลาสติกมีความชื้นสูงขึ้น [1] มีผลทำให้สมบัติทางด้านความต้านทานแรงดึงลดลง 43.1% และความต้านทานแรงกระแทกของชิ้นงานทดสอบลดลง 29.2% ตามลำดับ

5. ข้อเสนอแนะ

แนวทางการวิจัยต่อไปในอนาคต ควรศึกษาผลกระทบต่อลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานทดสอบเพิ่มเติม เช่น ความหยابผิวและค่าความคลาดเคลื่อนของขนาดชิ้นงาน และสามารถนำแนวทางการศึกษาวิจัยครั้งนี้ไปใช้ในการศึกษาเส้นวัสดุชนิดอื่น ๆ หรือเส้นพลาสติกในลอนเกรดที่ใกล้เคียงกัน

References

- [1] Haijun G, Michael R, Zezheng W, Lianjun W. Impact of moisture absorption on 3D printing nylon filament. Solid Freeform Fabrication 2022: Proceedings of the 33rd Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium – An Additive Manufacturing Conference; 2022 Jul 25-27; Austin, Texas USA. Austin: The University of Texas at Austin; 2022. p.16-22.

- [2] Jiang S, Liao G, Xu D, Liu F, Li W, Cheng Y, et al. Mechanical properties analysis of polyetherimide parts fabricated by fused deposition modeling. *High Perform Polymers* 2019;31(1):97-106.
- [3] El Magri A, El Mabrouk K, Vaudreuil S, Chibane H, Touhami ME. Optimization of printing parameters for improvement of mechanical and thermal performances of 3D printed poly (ether ketone) parts. *Journal of Applied Polymer Science* 2020;137(37):49087.
- [4] Valerga AP, Batista M, Salguero J, Girot F. Influence of PLA filament conditions on characteristics of FDM parts. *Materials*. 2018;11(8):1322.
- [5] Thai Meteorological Department. Climate of Thailand [Online]. 2022 [cited 2023 Mar 5]. Available from: <https://www.tmd.go.th/info>. (In Thai)
- [6] Nattawat. How to select 3D filament for 3D printer [Online]. 2018 [cited 2023 Mar 5]. Available from: <https://www.siamreprint.com/2020/01/how-to-select-3d-filament-for-3d-printer/#nylon-filament>. (In Thai)
- [7] Monson L, Braunwarth M, Extrand CW. Moisture absorption by various polyamides and their associated dimensional changes. *Journal of Applied Polymer Science* 2008;107: 355-63.
- [8] Banjo AD, Agrawal V, Auad ML, Celestine AN. Moisture-induced changes in the mechanical behavior of 3D printed polymers. *Composites Part C: Open Access* 2022;7: 100243.
- [9] Polymaker. Technical Data Sheet [Online]. 2023 [cited 2023 Mar 5]. Available from: <https://polymaker.com/product/polymide-pa6-cf/>
- [10] ASTM International. D638 – 10. Standard test method for tensile properties of plastics. [Online]. 2020 [cited 2023 Mar 5]. Available from: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4839427/mod_resource/content/4/D638.1207962-1.pdf
- [11] International Organization for Standardization. ISO 179-1:2000. Plastics - determination of charpy impact properties - part 1: non-instrumented impact test. Geneva, Switzerland: ISO; 2000.
- [12] Bonada J, Pastor M, Buj-Corral I. Influence of infill pattern on the elastic mechanical properties of fused filament fabrication (FFF) parts through experimental tests and numerical analyses. *Materials* 2021;14(18):5459.

ประวัติผู้เขียนบทความ



อุกฤษฏ์ ธนทรัพย์ทวี อาจารย์ประจำหลักสูตรคณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก โทรศัพท์ 055-515900 E-mail: t.ukrit@edu.rmutl.ac.th
Interested Field: Productivity Improvement and Design of Experiments



มานุษ นำฟู อาจารย์ประจำหลักสูตรคณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก โทรศัพท์ 083-8760479 E-mail: mnf.impe@gmail.com
Interested Field: Advanced Manufacturing Technology



กิตติ วิโรจรัตนภาพิศา อาจารย์ประจำหลักสูตรคณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก โทรศัพท์ 055-515900 E-mail: kibuya@gmail.com
Interested Field: Productivity Improvement and Design of Experiments

Article History:

Received: January 11, 2024

Revised: April 7, 2024

Accepted: April 19, 2024

ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต:

ศ.ดร.กัณวีร์ กนิษฐ์พงศ์	สาขาวิศวกรรมขนส่ง สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย
ศ.ดร.โกสินทร์ จำนงไทย	ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศ.ดร.โจเซฟ เคดารี	สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีและนวัตกรรม มหาวิทยาลัยกรุงเทพธนบุรี
ศ.ดร.ต่อกุล กาญจนาลัย	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ศ.ดร.ปราโมทย์ เดชะอำไพ	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศ.ดร.วัฒนวงศ์ รัตนวราห	สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่ง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ศ.ดร.สุวัฒนา จิตตลดาการ	ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
Prof. Dr. Belkacem Zeghamati	Laboratoire de Mathematiques et Physique des Systeme- Groupe de Mecanique Energetique, Universite de Perpignan, France
รศ.ดร.กมลวัลย์ ลือประเสริฐ	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ
รศ.ดร.กอบชัย เดชหาญ	ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.กัณวรัช พลุประชญ์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์
รศ.ดร.กิตติพงศ์ อัครกุล	ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รศ.ดร.จิรนุช เสงี่ยมศักดิ์	สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รศ.ดร.ชูสิทธิ์ ประดับเพ็ชร์	สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา
รศ.ดร.ชัยณรงค์ อธิสกุล	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี
รศ.ดร.ณกร อินทร์พยุง	คณะโลจิสติกส์ มหาวิทยาลัยบูรพา
รศ.ดร.ณฐา คุปต์ชัยชัย	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี ราชมงคลธัญบุรี
รศ.ดร.دنุพล ตันนโยภาส	ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รศ.ดร.ทวีพล ชื้อสัตย์	ภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

รศ.ดร.เทอดศักดิ์ ร่องวิริยะพานิช	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.ธนู จุญญา	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
รศ.ดร.ธีรศิลป์ ทุมวิภาต	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมื่อวัดและอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.นคร ภู่วโรคม	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
รศ.ดร.นิตย์ เพ็ชรรักษ์	รองอธิการบดี สายงานวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต
รศ.ดร.เนตรนภิส ดันเต็มทรัพย์	สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รศ.ดร.บวรโชค ผู้พัฒน์	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.บุญเลิศ สือเจย	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
รศ.ดร.บุญวัฒน์ อัฐชู	สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.ประยูร สุรินทร์	สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน
รศ.ดร.ปราโมทย์ ศรีน้อย	สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
รศ.ดร.ปรีดา ไชยมหาวัน	สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยพะเยา
รศ.ดร.พนิต ภูจินดา	ภาควิชาการวางแผนภาคและเมือง คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รศ.ดร.พรฤดี เนติโสภาคกุล	คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.พานิช วุฒิพฤษชัย	ภาควิชาครุศาสตร์โยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.พาสีทวี หล่อธีรพงศ์	บัณฑิตวิทยาลัยการจัดการและนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.พิภพ สุนทรสมัย	ที่ปรึกษาคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
รศ.ดร.พิศิษฐ์ โกคาร์ตันกุล	สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
รศ.ดร.ไพโรจน์ สิงห์นัดกิจ	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รศ.ดร.ฟูศักดิ์ 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 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.มนตรี ศิริปัญญานันท์	ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ
รศ.ดร.ยุทธชัย บรรเทึงจิต	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ
รศ.ดร.รัตติกร วรากุลศิริพันธ์	คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
รศ.ดร.ระพี กาญจนะ	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี ราชภัฏวชิรบุรี
รศ.ดร.วรรณ ข้างสว่าง	คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร
รศ.ดร.วรพจน์ กรีสระเดช	คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.วรากร ศรีเชวงทรัพย์	สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์และปัญญาประดิษฐ์ สถาบัน เทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
รศ.ดร.วัชร เพียรสุภาพ	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รศ.ดร.วิทยา ทิพย์สุวรรณพร	สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.เวคิน ปิยรัตน์	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์
รศ.ดร.สถาพร โอภาสานนท์	สาขาวิชาบริหารธุรกิจระหว่างประเทศ โลจิสติกส์และการขนส่ง มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รศ.ดร.สมใจ จันท์อุดม	สาขาวิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รศ.ดร.สมศักดิ์ มีตะถา	ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.สมิตร ส่งพิริยะกิจ	ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.สินชัย ชินวรรณต์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.เสรี เศวตเสรมณี	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

รศ.ดร.สุทัศน์ ลีลาทวิวัฒน์	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.สุนิติ สุภาพ	ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
รศ.ดร.สุรพล บุญลือ	ภาควิชาเทคโนโลยีและสื่อสารการศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.อดิศักดิ์ กาญจนหฤทัย	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยรังสิต
รศ.ดร.อรฉัตร จิตต์โสภาคย์	สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.อิทธิพงศ์ ชัยสายนท์	บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเอเซียอาคเนย์
รศ.ดร.อำพล การุณสุนทวงษ์	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.เรวัฒน์ เหล่าไพบูรณ์	ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
รศ.วัชรินทร์ วิทยกุล	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน
รศ.วิญญู แสงสนิทกิจ	สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
รศ.ศันสนีย์ สุภาภา	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน
รศ.เอนก ศิริพานิชกร	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.กรกช ทวีสิน	สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยรามคำแหง
ผศ.ดร.กฤษ สุจริตตั้งธรรม	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม
ผศ.ดร.กัมพล พรหมจระประวัตติ	สาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง
ผศ.ดร.กิตติ สถาพรประสาธน์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผศ.ดร.กิตติศักดิ์ วิธินันทกิตต์	สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตบางพระ
ผศ.ดร.กฤษณ ทองศรี	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.เชมพัฒน์ ตันติวัฒนกุล	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ผศ.ดร.จักร จันทลักษณ์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.จารุวรรณ เกษมทรัพย์	สาขาวิชาการจัดการงานวิศวกรรม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผศ.ดร.จิราพรรณ สุนทรโชติ	ภาควิชาคณิตศาสตร์และวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผศ.ดร.จิราวรรณ อุ้มเมตตาอารี	สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
ผศ.ดร.เจษฎา ชัยโณม	ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผศ.ดร.ฉัตร สุจินดา	ธุรกิจส่วนตัว
ผศ.ดร.ชลัท ทิพาการเกียรติ	สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ผศ.ดร.ชัยรัตน์ ชีระวัฒนสุข	ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.ชัยวัฒน์ นุ่มทอง	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา
ผศ.ดร.ชูชัย สุจิรวงศ์	ภาควิชาครุศาสตร์โยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.ณัฏวิภา เจริญไวยศิริ	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผศ.ดร.ณัฐพงศ์ พันธุ์น้อย	คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผศ.ดร.ณัฐพงศ์ มกระธัช	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.ดนัย เผ่าฤทธิรงค์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.ดวงพร กาชาสปี	สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อมและความปลอดภัย คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม
ผศ.ดร.ดาวุด ทองทา	ภาควิชาคณิตศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.ติกะ บุณนาค	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต
ผศ.ดร.ตรี วาทิก	สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะเกษตรและเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยนครพนม

ผศ.ดร.ทวีศักดิ์ ตะกระโทก
ผศ.ดร.นที ศรีสวัสดิ์

ผศ.ดร.นิพนธ์ วรรณโสภาคย์
ผศ.ดร.ปรรัตน์ ศุภมิตรโยธิน
ผศ.ดร.พงศกร บำรุงไทย

ผศ.ดร.พงษ์สัณฐ์ ประกฤตศรี

ผศ.ดร.พิพัฒน์พงศ์ วัฒนวันยู
ผศ.ดร.พิมพ์เพชร สระทองอ่อน
ผศ.ดร.มนทล นาวงษ์

ผศ.ดร.มนูญ มาศนิยม
ผศ.ดร.รัฐวุฒิ ฐันทนคุณ
ผศ.ดร.วรัญญะ วงษ์เสรี

ผศ.ดร.วัชรินทร์ ดงบัง

ผศ.ดร.วิชัย รุ่งเรืองอนันต์

ผศ.ดร.วินัย ใจกล้า

ผศ.ดร.วิรัตน์ จอมขวา

ผศ.ดร.ศิรดา ศิริธร
ผศ.ดร.สนิท วงษา

ผศ.ดร.สมบุญ เจริญวิไลศิริ

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยนเรศวร

ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งทอ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา

ภาควิทยาศาสตร์พื้นฐานและพลศึกษา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา

วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต

สาขาวิชาวิศวกรรมยานยนต์ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยสยาม

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงานและการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ วิทยาเขตระยอง

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

ภาควิชาครุศาสตร์โยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ผศ.ดร.สมโพธิ อยู่ไว	สาขาวิชาวิศวกรรมเทคนิคธรณี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.สมศักดิ์ มีนกร	คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา
ผศ.ดร.สโรช บุญศิริพันธ์	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผศ.ดร.สิตางค์ ฟิลัยหล้า	ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผศ.ดร.สิทธิพงษ์ เพิ่มพิทักษ์	คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผศ.ดร.สิริชัย จีรวงศ์นุสรณ์	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
รศ.ดร.สิริพร โรจนนันต์	สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.สิรางค์ กลั่นคำสอน	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา
ผศ.ดร.สุมล แซ่เฮง พิสิษฐ์สังฆการ	ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการเผาไหม้และพลังงานทางเลือก ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องต้นกำลัง วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.สุรัตน์ อาริรัตน์	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผศ.ดร.อรกมล วังอภิสิทธิ์	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ผศ.กัมปนาท ไชยเพชร	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและเมคคาทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยภาพสินธุ์
ผศ.กานติส สุดสาคร	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผศ.จิรเมธา สังข์เกษม	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผศ.นราธิป แสงชัย	ศูนย์แห่งความเป็นเลิศเฉพาะทางด้านการวิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมเครื่องเรือน วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.พรสิริ ชาติปรีชา	คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์
ผศ.วรรณะ ประภาภรณ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
ผศ.วรากร เกิดทรัพย์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผศ.สหรัตน์ วงษ์ศรีระ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ผศ.สาธิต รุ่งฤดีสมบัติกิจ	สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผศ.สุชาติ เหลืองประเสริฐ	ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผศ.อุษณีย์ ระหา	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง
ผศ.อนุชิต เจริญ	สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
อ.ดร.กฤษชัย วิถีพานิช	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์
อ.ดร.กฤษณ์ อภิญญาวิศิษฐ์	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล พระนคร
อ.ดร.คมพันธ์ ชมสมุทร	สาขาวิชาวิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี ราชมงคลพระนคร
อ.ดร.จักรภาพ วงศ์วิวัฒน์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี
อ.ดร.ฉัตรเพชร ยศพล	สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
อ.ดร.ชัยพันธ์ ขำญาติ	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยา เขตบางเขน
อ.ดร.ชัยรัตน์ ตั้งดวงดี	ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี
อ.ดร.ชาติ ฤทธิ์ธีรณ	สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
อ.ดร.ชาญยุทธ กฤตสุนันท์กุล	ภาควิชาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัย นเรศวร
อ.ดร.ชาญวิทย์ อุดมศักดิ์กุล	สำนักงานสภานโยบายการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและ นวัตกรรมแห่งชาติ
อ.ดร.ชานินทร์ ศรีสุวรรณภา	ภาควิชาสถิติประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ ทหารลาดกระบัง
อ.ดร.ณัฐกรณ์ เจริญธรรม	สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่ง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
อ.ดร.ณัฐภูมิ ธนศรีสถิต	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ
อ.ดร.ดุขุฎี สติระเศรษฐี	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยนเรศวร
อ.ดร.ตันติกร พิษณุพิบูล	คณะกรรมการโลจิสติกส์และการคมนาคมขนส่ง สถาบันการ จัดการปัญญาภิวัฒน์
อ.ดร.บุญเลิศ วงศ์เจริญแสงสิริ	สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์
อ.ดร.ปริญญ์ บุญเกษม	สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

อ.ดร.ปริญญา บุญมาเลิศ	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
อ.ดร.ประภาส ผ่องสนาม	สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล อีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
อ.ดร.ปรารภนา อินตะวิน	สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อ.ดร.พงศกร พรหมสวัสดิ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง
อ.ดร.พิชฌุฑม์ จรัสบำรุงโรจน์	สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
อ.ดร.ภักค์วัฒน์ แสนเจริญ	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
อ.ดร.ภาสินี ศิริประภา	คณะศิลปกรรมและสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
อ.ดร.วรศิริ เดอ กาเดอนต์	สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
อ.ดร.วาทัญญ รอดประพัฒน์	สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ตะวันออก
อ.ดร.วศิน มหัตนรินทร์กุล	ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าพระนครเหนือ
อ.ดร.วิทยา พวงสมบัติ	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล รัตนโกสินทร์
อ.ดร.ศรินทร์ต์ วงษ์ลี	กลุ่มวิจัยและพัฒนาชีวเคมีฯ สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์ แห่งชาติ (องค์การมหาชน)
อ.ดร.ศักดิ์ชาย รักการ	สาขาวิชาการจัดการงานวิศวกรรม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัย เกษมบัณฑิต
อ.ดร.สำเร็จ เนตรภู	บริษัท เอส. เอช. เค. เอ็นจิเนียริ่ง จำกัด
อ.ดร.สุวรรณีย์ สายสิน	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิม พระเกียรติ
อ.ดร.อติเทพ ศรีคงศรี	สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
อ.ดร.อภิชาติ บัวกล้า	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา
อ.ดร.อนันต์ เดอร์ชิง	ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญ
อ.ดร.เอกชัย อยู่ประเสริฐชัย	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี
ดร.พุทธิพงศ์ เหล็กรัตน์วัฒนา	สำนักก่อสร้างสะพาน กรมทางหลวงชนบท
ดร.อัศคพัฒน์ สว่างสุริย์	วิศวกรโยธาเชี่ยวชาญ สำนักวิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง

อ.จีรวัฒน์ ปลั่งไหม	สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัย เกษมบัณฑิต
อ.ณัฐนันท์ รัตนไชย	คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ธัญบุรี
อ.นิตยา จันทร์เรือง มหาผล	เลขาธิการสภาวิศวกร ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต
อ.นิติมา อัจฉริยะโพธา	ศูนย์บริการทางการศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี วิทยาเขตราชบุรี
อ.ว่าที่ ร.ต.สรวิชัย ดาแก้ว	คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
อ.สมเดช อิงคะวะระ	สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา



ปรัชญา ปณิธาน

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

เป้าหมาย และวัตถุประสงค์

1. ผลิตบัณฑิตทางวิศวกรรมศาสตร์ เพื่อแสวงหาเทคโนโลยีที่ทันสมัย อันนำไปสู่การพัฒนาตนเองทางเทคโนโลยีในการพัฒนาอุตสาหกรรมของประเทศ
2. ให้บริการวิชาการด้านวิศวกรรมศาสตร์แก่สังคม

วิสัยทัศน์

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

ผู้เขียนจะต้องจัดเตรียมบทความต้นฉบับที่พิมพ์ตามข้อกำหนดของรูปแบบวารสาร จำนวน 1 ชุด และผู้เขียนบทความกรอกข้อมูลใบนำส่งบทความ พร้อมสแกนใบนำส่งบทความและแนบไฟล์ต้นฉบับบทความ มาที่

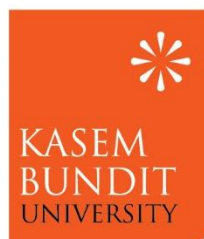
E-mail: engkasemjournal@kbu.ac.th

และสมัครสมาชิกพร้อมส่งบทความผ่านระบบ Online Journal System ได้ที่

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

ท่านที่สนใจสามารถดูรายละเอียดและดาวน์โหลดแบบฟอร์มต่างๆ หรือสอบถามเพิ่มเติม ได้ที่

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



www.kbu.ac.th

วิทยาเขตพัฒนาการ

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

วิทยาเขตร่มเกล้า

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