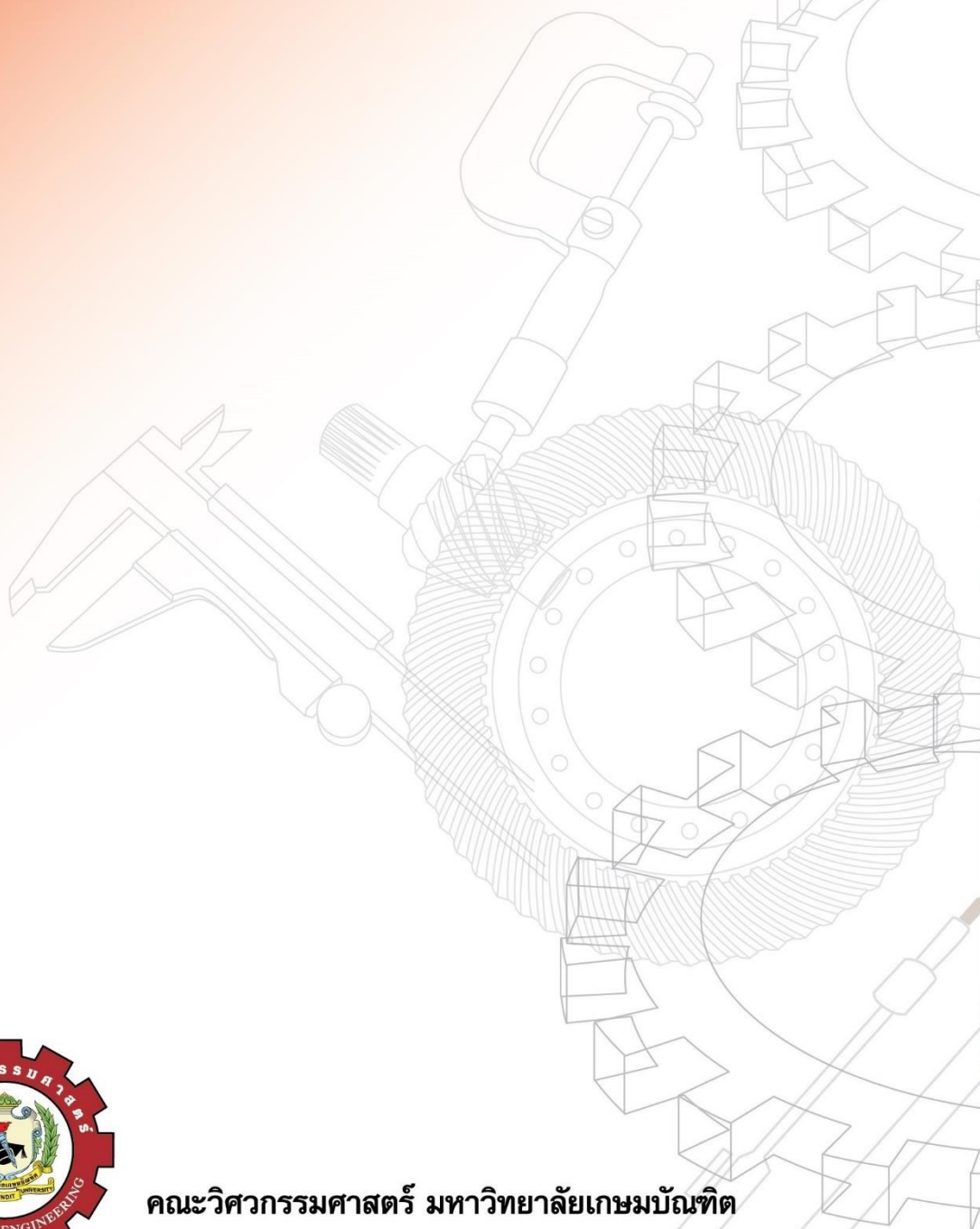


วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต

ISSN 2286-668X

KASEM BUNDIT

Engineering Journal



คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต

ปีที่ 11 ฉบับที่ 2 พฤษภาคม - สิงหาคม 2564

Vol.11 No.2 May - August 2021

วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต

ปีที่ 11 ฉบับที่ 2 พฤษภาคม-สิงหาคม 2564

Kasem Bundit Engineering Journal (KBEJ)

Volume 11 No.2 May-August 2021

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

- เพื่อเป็นเอกสารเผยแพร่งานวิจัยของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
- เพื่อเป็นแหล่งเผยแพร่งานวิจัยและพัฒนา 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
- เป็นบทความที่ไม่ได้อยู่ในระหว่างการพิจารณาของสื่อสิ่งพิมพ์อื่นๆ
- เป็นบทความที่ไม่ละเมิดลิขสิทธิ์ของผู้อื่น เนื้อหาในบทความไม่ได้ลอกเลียนหรือคัดลอกมาจากผลงานวิจัยของผู้อื่นหรือจากบทความอื่นโดยไม่ได้รับอนุญาต หรือปราศจากการอ้างอิงที่เหมาะสม
- ผู้เขียนได้แก้ไขบทความตามข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ (Peer Reviewer) หรือกองบรรณาธิการแล้ว
- บทความในลักษณะอื่นๆ นอกเหนือจากรายละเอียดข้างต้นจะได้รับการพิจารณาจากกองบรรณาธิการเป็นกรณีเฉพาะ

การประเมินบทความ

การประเมินบทความที่ดีมีพลังในวิศวกรรมสารเกษมบัณฑิตมีรายละเอียดดังนี้

- บทความทุกฉบับจะได้รับการอ่านและตรวจสอบโดยผู้ทรงคุณวุฒิที่มีความเชี่ยวชาญเฉพาะในสาขาวิชานั้นๆ จำนวนไม่น้อยกว่า 2 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

บรรณาธิการ:

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

รองบรรณาธิการ:

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

กองบรรณาธิการ:

ศ.ดร.โกสินทร์ จำนงไทย	ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศ.ดร.โจเซฟ เคดาร์	สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีและ นวัตกรรม มหาวิทยาลัยกรุงเทพธนบุรี
ศ.ดร.ต่อกุล กาญจนาลัย	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ศ.ดร.ปราโมทย์ เฉชะอำไพ	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Prof. Dr.Belkacem Zeghamati	Laboratoire de Mathematiques et Physique des Systeme- Groupe de Mecanique Energetique, Universite de Perpignan, France
รศ.ดร.จิราณัฐ เสี่ยมศักดิ์	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รศ.ดร.บุญเลิศ สือเจีย	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
รศ.ดร.พิภพ สุนทรสมัย	ที่ปรึกษาคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
รศ.ดร.มนตรี ศิริปรัชญานันท์	ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ
รศ.ดร.ยุทธชัย บรรเทงจิตร	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระ จอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.รัตติกร วรากุลศิริพันธ์	คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

รศ.ดร.วิทยา ทิพย์สุวรรณพร	สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.เวทิน ปิยรัตน์	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์
รศ.ดร.สมิตร ส่งพิริยกิจ	ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.อิทธิพงศ์ ชัยสาพันธ์	บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
รศ.ศันสนีย์ สุภาภา	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผศ.ดร.มนตรี คำเงิน	ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
อ.ดร.ชาญยุทธ กฤตสุนันท์กุล	ภาควิชาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร
อ.ดร.ชาญวิทย์ อุดมศักดิ์กุล	สำนักงานสภานโยบายการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรมแห่งชาติ
อ.ดร.วศิน มหัตนรินทร์กุล	วิศวกร ที่ปรึกษาโรงงาน อาจารย์พิเศษ ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ผู้ช่วยกองบรรณาธิการ:

รศ.วิญญู แสงสินกสิกิจ	อ.ดร.ศักดิ์ชาย รักการ
ผศ.อนุชิต เจริญ	อ.ธีรยุทธ จันท์แจ่ม
ผศ.ดร.หนึ่งฤทัย ทิมย้ายงาม	ผศ.วรกร เกิดทรัพย์
อ.ดร.ประภาส ผ่องสนาม	อ.อุบลรัตน์ วาริชวัฒนะ

ฝ่ายเลขานุการ:

คุณยุพิน ไชยโคตร	คุณกรศิริ จันท์สุขเจริญจินดา
คุณรุ่งนภาพร ภูธรธราช	

บทบรรณาธิการ

ในช่วง 4 เดือนที่ผ่านมา (พฤษภาคม-สิงหาคม) ประเทศไทยได้ประสบกับปัญหาการแพร่ระบาดของไวรัสโคโรนา 2019 (COVID-19) อย่างรุนแรง ซึ่งแม้ว่าจะการดำเนินการมาตรการอย่างเข้มข้นในพื้นที่สีแดง 29 จังหวัด แต่จำนวนผู้ติดเชื้อรายใหม่ก็ยังมีจำนวนเพิ่มขึ้น จนสูงที่สุดเมื่อวันที่ 17 สิงหาคม พ.ศ. 2564 โดยมีจำนวนสูงถึง 21,784 คน ซึ่ง ณ ปัจจุบัน (30 สิงหาคม พ.ศ. 2564) ก็ยังมีจำนวนผู้ติดเชื้อรายใหม่สูงถึง 15,972 คน เสียชีวิตกว่า 256 คน ขณะที่รัฐบาลได้ตั้งเป้าหมายการวัคซีนให้ครอบคลุมประชากร 50 ล้านคน หรือคิดเป็น 70% ของจำนวนประชากรทั้งประเทศภายในวันที่ 13 ตุลาคม พ.ศ. 2564

อนึ่ง จากประกาศ ก.พ.อ. วันที่ 26 เมษายน พ.ศ. 2564 เรื่อง หลักเกณฑ์และวิธีการพิจารณาแต่งตั้งบุคคลให้ดำรงตำแหน่ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ รองศาสตราจารย์ และศาสตราจารย์ (ฉบับที่ 4) พ.ศ. 2564 ที่ได้กำหนดให้... “ผลงานทางวิชาการต้องได้รับการเผยแพร่ในวารสารวิชาการระดับชาติ ซึ่งวารสารวิชาการระดับชาติต้องเป็นวารสารวิชาการที่มีคุณภาพและเป็นที่ยอมรับในวงวิชาการในสาขาวิชานั้นๆ หรือสาขาวิชาที่เกี่ยวข้อง โดยวารสารวิชาการนั้นต้องมีการตีพิมพ์อย่างต่อเนื่องสม่ำเสมอเป็นระยะเวลาอย่างน้อย 3 ปี และมีการตรวจสอบคุณภาพของบทความโดยผู้ทรงคุณวุฒิตรวจสอบบทความ (peer reviewer) ซึ่งเป็นบุคคลภายนอกจากหลากหลายสถาบัน อย่างน้อย 3 คน ทั้งนี้ วารสารวิชาการนั้นอาจเผยแพร่เป็นรูปเล่มสิ่งพิมพ์ หรือเป็นสื่ออิเล็กทรอนิกส์ ที่มีกำหนดการเผยแพร่อย่างแน่นอนชัดเจน” ...นั้น

ทางกองบรรณาธิการขอเรียนว่า “วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต” เป็นวารสารที่ได้เผยแพร่ทั้งแบบรูปเล่มสิ่งพิมพ์และแบบสื่ออิเล็กทรอนิกส์ในระดับชาติมาต่อเนื่องสม่ำเสมอเข้าสู่ปีที่ 11 ปี โดยปัจจุบันมีกำหนดการเผยแพร่ทุก 4 เดือน (3 ฉบับต่อปี) อีกทั้งยังได้เรียนเชิญผู้ทรงคุณวุฒิภายนอกจำนวน 3 ท่าน ในการพิจารณาบทความนับตั้งแต่วันที่ได้ประกาศในราชกิจจานุเบกษาข้างต้นแล้ว

ในการนี้ ทางกองบรรณาธิการขอยืนยันว่า กองบรรณาธิการยังคงมุ่งมั่นในการปรับปรุงการดำเนินงานของวารสารอย่างต่อเนื่อง ตลอดจนพัฒนาและยกระดับคุณภาพด้านวิชาการและวิจัย เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดต่อนักวิชาการ นักวิจัย ผู้เขียน และผู้อ่านทุกท่าน

สุดท้ายนี้ ทางกองบรรณาธิการใคร่ขอขอบพระคุณทุกท่านสำหรับการสนับสนุนการดำเนินงานของวารสารฯ เป็นอย่างดีเสมอมา และขออำนาจสิ่งศักดิ์สิทธิ์ทั้งหลายในสากลโลก โปรดดลบันดาลให้ทุกท่านมีสุขภาพแข็งแรง สามารถสร้างสรรค์ผลงานวิจัยและวิชาการอันเป็นประโยชน์ต่อสังคมสืบไป

รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยฤทธิ์ สัตยาประเสริฐ
บรรณาธิการวิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต

บทความวิชาการ (Academic Article)

REVIEW OF FLUTTER SUPPRESSION USING MODERN CONTROL THEORY

Nipon Boonkumkrong and Sinchai Chinvorarat

1

บทความวิจัย (Research Article)

การพัฒนาโปรแกรมสำหรับออกแบบผิวทางถนนคอนกรีตด้วยภาษาไพทอน

**DEVELOPMENT OF A PROGRAM FOR DESIGNING CONCRETE PAVEMENT
USING PYTHON PROGRAMMING LANGUAGE**

วิรัช หิรัญ และ จิตาภรณ์ พ่อนบุตรดี

27

**ACCESSIBILITY ANALYSIS FOR NAKHON RATCHASIMA LIGHT RAIL
TRANSIT STATION**

Pawitchaya Phuengkoksung, Siradol Siridhara and Somsiri Siewwuttanagul

53

การศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานในฟาร์มสุกร

A STUDY FOR ENHANCING ENERGY EFFICIENCY IN PIG FARM

ภวิศ เวียงนาค และ ศักดิ์ชาย รักการ

75

REVIEW OF FLUTTER SUPPRESSION USING MODERN CONTROL THEORY

Nipon Boonkumkrong¹ and Sinchai Chinvorarat²

¹Lecturer, Department of Mechanical engineering, Faculty of Engineering,
Kasem Bundit University, 1761 Pattanakarn Road, Suanluang, Bangkok 10250, Thailand,
nipon413@hotmail.com

²Lecturer, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King
Mongkut's University of Technology, North Bangkok,
1518 Pracharat 1 Road, Wongsawang, Bangsue, Bangkok 10800, Thailand,
sinchai.c@eng.kmutnb.ac.th

ABSTRACT

Aeroelasticity is the study of the mutual interaction that takes place among aerodynamic, elastic, and inertia forces acting on aircraft structures exposed to an airstream. Aircraft structures are not completely rigid and aeroelastic phenomena arising when structural deformations induce changes in aerodynamic forces. The aeroelastic phenomena include flutter, divergence, control reversal or effectiveness, etc. This paper presents the investigations of flutter suppression control scheme with modern control theory. These techniques are important for the designs of modern aircraft. The flutter is now a part of aircraft certification and flight envelope expansion.

KEYWORDS: Aeroelasticity, Flutter suppression, Modern control Theory

1. Introduction

Aeroelasticity is the study of the mutual interaction between aerodynamic forces, elastic forces, and inertia forces. The field of study can be demonstrated clearly by the classical Collar's aeroelastic triangle [1], as shown in Figure 1.

In the history of aviation, Samuel Langley's aircraft, the so-called Aerodromes [2], Figure 2, was a tandem-wing design with an aft-mounted tail. Langley's design was to provide the aircraft with structural stability, independent of the pilot's effort. The aerodrome was launched

from a houseboat-mounted catapult. However, the Aerodrome quickly dove into the Potomac River, with no flight being achieved.

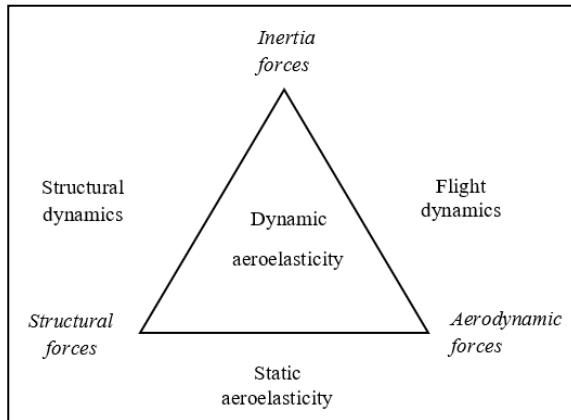


Figure 1 Collar's aeroelastic triangle

As understanding of aeroelastic effects progressed, the notion will grow that the Aerodrome's failure was due to wing torsional divergence. In 1914, Langley's Aerodrome was modified by Curtis and flew successfully [2].

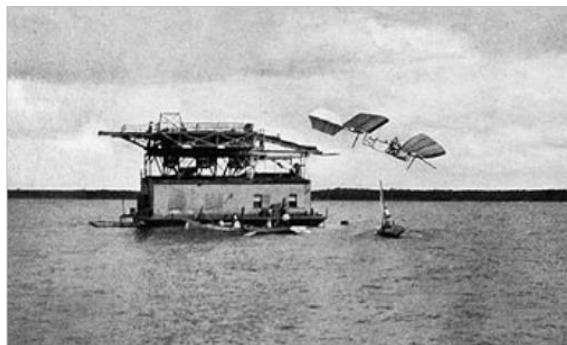


Figure 2 Langley's Aerodrome during the test

On December 17, 1903, nine days after the Aerodrome's failure, the Wright brothers flew their bi-plane aircraft successfully [2] (Figure 3).

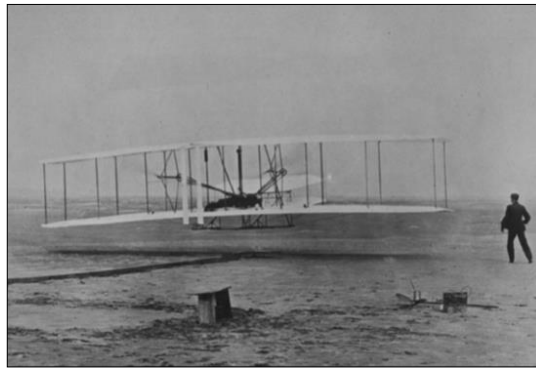


Figure 3 Wright Brother's Bi-plane aircraft

Fokker D-8 had a great performance but suffered from wing failures in steep dives. Early monoplanes had insufficient torsional stiffness resulting in wing flutter, wing aileron flutter, and loss of aileron effectiveness. The solution found was to increase the torsional stiffness, and mass balancing [2].

The first recorded flutter incident involved Hadley Page's O/400 bomber Bi-plane in 1915 with 'violent oscillations' of the tail flutter problem [2] (fuselage torsion coupled with elevators).

In 1959, Braniff International Airways Flight 542, a Lockheed L-188 Electra disintegrated in mid-air approximately 6.1 km southeast of Buffalo, Texas. The accident was caused by cycles of reverse bending or flutter [3].

In 2006, the second prototype of Grob G180 SPn, a low-wing twin-engined composite corporate jet was destroyed and the pilot was killed after the aircraft crashed due to flutter in the elevators and tail-plane [4].

The first formal flutter test was carried out by Von Schlippe in 1935 in Germany. His approach was to vibrate the aircraft at resonant frequencies at progressively higher speeds and plot amplitude as a function of airspeed (Figure 4). The above idea was applied to many German aircrafts until a Junkers JU 90 fluttered and crashed during flight tests in 1938 [5].

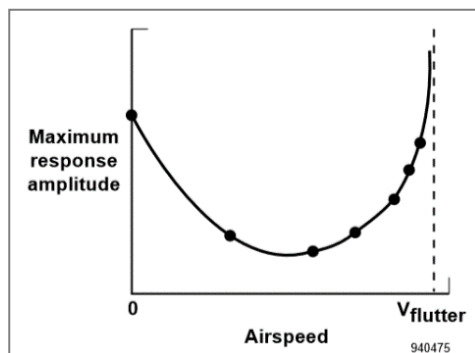


Figure 4 Von Schlippe's Flutter test method

2. Flutter behavior and mathematical model

In understanding the flutter phenomenon, let us consider a cantilevered wing mounted in a wind tunnel with a small angle of attack. At first, there is no flow in the wind tunnel and then if the wing model is disturbed, the oscillation occurs and then is damped out gradually. Then, the flow is increased gradually, the rate of damping of the oscillation of the wing first increases. When the flow speed is further increased, a point is reached at which the damping decreases rapidly and a self-sustained oscillation is maintained with a steady amplitude. At this point, the airfoil structure starts to extract the energy from the airstream and this flow speed is called the critical flutter speed. Above this critical speed, flutter begins to occur [2].

In the analysis of flutter, for the first step, the equation of motion of the structure will be formulated by using the Finite element method (FEM). Then, the integration of aerodynamic forces acting on the surface into the equation of motion to become the aeroelastic equation, and subsequently, the solution for flutter is solved from this equation. The mathematical model of the wing must be able to yield natural frequencies and normal mode shapes up to the frequency range of interest, typically 0 - 40 Hz for a large aircraft and 0 - 60 Hz for a small aircraft [2]. In structural mechanics, the equation of motion is of the form [2,6]

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} = 0, \quad (1)$$

where $\mathbf{M}$ and $\mathbf{K}$ is the $N \times N$ mass and stiffness matrices respectively and $\mathbf{x}$ is the $N \times 1$ vector of structural displacement/rotation. To reduce the number of equations, the equation (1) has to be transformed to modal coordinates using the following transformation

$$\mathbf{x} = \Phi \mathbf{q}, \quad (2)$$

where $\Phi = [\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n]$ is the modal matrix and $\mathbf{q}$ is the $n \times 1$ vector of generalized coordinates. The equation (2) is substituted into equation (1) and because of the orthogonality property, pre-multiplied the result by Φ^T then the equation becomes

$$\mathbf{A} \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{E} \mathbf{q} = 0, \quad (3)$$

where $\mathbf{A} = \Phi^T \mathbf{M} \Phi$ and $\mathbf{E} = \Phi^T \mathbf{K} \Phi$ are the diagonal $n \times n$ generalized mass and stiffness matrices respectively. Thus, the N finite element equations of motion have been reduced to a smaller set of n .

The next step of estimating of flutter behavior of the wing is to introduce the aerodynamic forces into the equation of motion (3). The aerodynamic forces are obtained in the frequency domain by calculating them from the oscillatory motion of the airfoil at different frequencies. The modal generalized unsteady air load is generated by specifying the Mach number and the range of the so-called reduced frequency.

The reduced frequency [6] is defined as

$$k = \frac{\omega c}{V}, \quad (4)$$

where is ω circular frequency (rad/s), V is the true airspeed, and c is the reference chord (Figure 5).

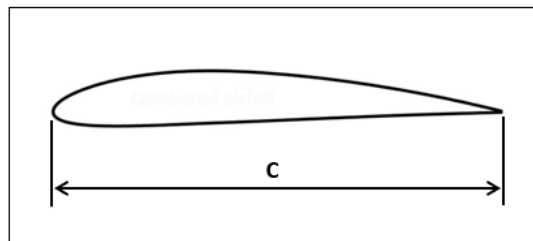


Figure 5 Reference chord

In aeroelastic systems, there are the interactions between the structure and aerodynamical forces, so in an analysis, the aerodynamic forces will be added to the structural equation (3) to become a classical form of flutter equation [4] which is expressed in generalized coordinates, $\mathbf{q}$ as follows [6],

$$\mathbf{A}\ddot{\mathbf{q}} + (\rho V \mathbf{B} + \mathbf{D})\dot{\mathbf{q}} + (\rho V^2 \mathbf{C} + \mathbf{E})\mathbf{q} = 0, \quad (5)$$

where ρ is the density and $\mathbf{B}$ and $\mathbf{C}$ are the aerodynamic damping and aerodynamic stiffness matrices, respectively. $\mathbf{D}$ and $\mathbf{E}$ are the structural damping and structural stiffness matrices, respectively. For $\mathbf{B}$ and $\mathbf{C}$, in comparison with $\mathbf{D}$ and $\mathbf{E}$, a difference is that the aerodynamic damping and aerodynamic stiffness matrices are non-symmetric, so there is coupling between modes which is a key element of the flutter instability [4]. Note that $\mathbf{B}$ and $\mathbf{C}$ are function of reduced frequency, k . The structural damping matrix, $\mathbf{D}$ can be estimated by measurement during the ground vibration testing (GVT). Equation (5) is one of the most important equations in flutter analysis and describes the fundamental interaction between the flexible structure and the aerodynamic forces.

The equation (5) can be solved by assuming a solution of the form [6]

$$\mathbf{q}(t) = \mathbf{q}_0 e^{\lambda t} \quad (6)$$

where $\mathbf{q}_0$ is the amplitude vector and λ is the complex eigenvalue which is an exponent that shows stability.

Substituting equation (6) into equation (5) and rearranging the terms, yielding

$$[\lambda^2 \mathbf{A} + \lambda(\rho V \mathbf{B} + \mathbf{D}) + (\rho V^2 \mathbf{C} + \mathbf{E})]\mathbf{q}_0 = 0. \quad (7)$$

Equation (7) is an eigenvalue problem. If the real part of the complex variable λ is negative, the system becomes stable. When the real part is zero, the system has a sustained motion and flutter starts to occur and the system becomes unstable if it is positive.

However, if the variable λ is real, then the root is non-oscillating, and if it is positive real, the system becomes statically unstable, that is the case of the divergence phenomenon.

The review in this paper covers historical development, basics of flutter, modern control schemes and techniques, system identification, piezoelectric actuation, and smart materials, experiments, and testing and the presentation will be arranged in chronological order as much as possible.

3. Historical development and basics of flutter

Aeroelasticity covers many disciplines and it is now recognized as a multi-disciplinary subject. Subjects such as aerodynamics, flight dynamics, structural dynamics, mechanical vibrations, computational fluid dynamics (CFD), control, and stability now combine to form close links with each other particularly when it is in design and testing processes. This was not the case towards the 1940s. It has increasingly been the case since the 1960s and today subjects that were once regarded as independent from each other have become closely linked [7].

Garrick and Reed III [8], in their review paper on aircraft flutter, present problems arising in these areas and how they were attacked by aviation's pioneers and their successors. This paper gives a short history of aircraft flutter, with emphasis on the conceptual developments, from the early days of flight to about the mid-1950s.

Rose and Jinu [9], in this review article, the contributions of researchers in the field of Active Flutter Suppression (AFS) over the years were investigated. The research area is constantly revealing possibilities and modifications in AFS techniques. AFS using sensors, microdevices, and smart materials is a main focus in the future.

Battoo [7] presented the paper in 1997 that gave the introduction of aeroelasticity to readers who may not be familiar with this field. The paper covers four main sections includes reviewing papers in the field, publications, a list of references and a list of useful technical journals, a brief note about software, and useful worldwide websites. This is the paper recommended for a newcomer.

Panda and Venkatasubramani [2], this paper gives an introduction of static and dynamic aeroelasticity problems aiming for the readers to get an idea about the subject. The paper covers the general aeroelastic phenomena including divergence and aileron reversal. This paper also covers the study of flutter, the mathematical model, and its solution.

In the paper of Kamakofi and Shyy [10], the authors reviewed the recent advancements in the field of fluid-structure interaction, with specific attention to aeroelastic applications.

Several techniques were reviewed in this paper. The flutter predictions performed on an AGARD 445.6 wing at different Mach numbers were chosen to highlight the advancement in computational and modeling issues.

Livne [11], his paper presented an in-depth overview of more than 50 years of research and development in the active flutter suppression (AFS) area. Key historical developments and the current state of the art in all relevant disciplines were surveyed. Technology and research needs were identified. A full list of the bibliography contains references that cover all areas of AFS technology. The work would contribute to the preservation of the experience and knowledge in this area.

In the next section, control methodologies that are used for flutter control, including the applications of piezoelectric and smart material and research papers on experiments and testing will be presented. This investigation will give the reader the ideas of the control schemes that were applied to control the flutter of the aircraft or the part of it.

4. Modern Control Theory

In this section, some techniques in flutter suppression are reviewed. Modern control schemes applied in this field are such as Positive position feedback (PPF), Linear parameter-varying (LPV) control, adaptive control, Linear Quadratic Gaussian (LQG), H-Infinity control, etc. Some of the control methods are explained briefly for the reader to obtain some ideas in the next few paragraphs.

Positive position feedback (PPF) is used to add damping to the unstable flutter mode. The control system consists of two equations i.e. the structural equation and the compensator, respectively as follows [12],

$$\ddot{\xi} + 2\zeta\omega\xi + \omega^2\xi = g\omega^2\eta, \quad (8)$$

$$\ddot{\eta} + 2\zeta_f\omega_f\dot{\eta} + \omega_f^2\eta = \omega_f^2\xi, \quad (9)$$

where ξ is the modal coordinate, η is the filter coordinate, ω and ω_f are the structural and filter frequencies, respectively, and ζ and ζ_f are the structural and filter damping ratios, respectively. The function of the compensator is to add a high damping ratio into the system.

This method is not sensitive to spillover in a reduced-order model i.e. the unmodeled higher modes will not be excited.

For the Linear parameter-varying [13] (LPV) control, in the past, a gain scheduling was widely used in aviation, but for scheduling multivariable controllers, it can be a very tedious and time-consuming task. For the LPV techniques, it provides a more systematic design for gain scheduled multivariable controllers. For the LPV methodology, the system is expressed as follows

$$\dot{\mathbf{x}} = f(\mathbf{x}(t), \mathbf{p}(t), \dot{\mathbf{p}}(t), \mathbf{u}(t)), \quad (10)$$

where $\mathbf{x}$ is the state of the system, $\mathbf{p}$ is the exogenous variable whose evolution is not understood or complicated to model, but is measurable in real-time using a sensor. The state and output equations can be expressed, respectively in matrix form as follows

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}(\mathbf{p}(t))\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}(\mathbf{p}(t))\mathbf{u}(t), \quad (11)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}(\mathbf{p}(t))\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}(\mathbf{p}(t))\mathbf{u}(t), \quad (12)$$

where $\mathbf{A}$ is the system matrix, $\mathbf{B}$ is the control matrix, $\mathbf{C}$ is the output matrix and, $\mathbf{D}$ is the feedforward matrix. To control this kind of system, control schemes such as single quadratic Lyapunov function, parameter-dependent quadratic Lyapunov function, etc. can be applied.

Linear quadratic Gaussian (LQG) [14] control system contains a linear quadratic regulator (LQR) together with a Kalman filter state estimator. It is the most fundamental optimal control problem. The system is driven by additive white Gaussian noises. The dynamic system can be represented as follows,

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}(t)\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}(t)\mathbf{u}(t) + \mathbf{v}(t), \quad (13)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}(t)\mathbf{x}(t) + \mathbf{w}(t), \quad (14)$$

where $\mathbf{x}$ is the vector of state variables, $\mathbf{u}$ is the vector of control inputs, $\mathbf{y}$ is the measured outputs, $\mathbf{v}(t)$ is the white Gaussian noise and $\mathbf{w}(t)$ is the white Gaussian measurement noise. The LQG controller that solves the LQG control problem is specified by

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}}(t) = \mathbf{A}(t)\hat{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{B}(t)\mathbf{u}(t) + \mathbf{L}(t)[\mathbf{y}(t) - \mathbf{C}(t)\hat{\mathbf{x}}(t)], \quad \hat{\mathbf{x}}(0) = E[\mathbf{x}(0)] \quad (15)$$

$$\mathbf{u}(t) = -\mathbf{K}(t)\hat{\mathbf{x}}(t), \quad (16)$$

where $\mathbf{L}(t)$ is the Kalman gain of the Kalman filter, $\hat{\mathbf{x}}(t)$ is the estimates of the state $\mathbf{x}(t)$ and E denotes the expected value. The matrices can be found using two matrix Riccati differential equations i.e. the linear quadratic estimation (LQE) and the linear quadratic regulator (LQR).

For the other control schemes or methodologies used in the flutter control problem, the reader can find in many control texts or documentations that are widely available.

In 1982, 1985, 1986 Moore et al [15,16], Chakravarty and Moore [17], presented an adaptive approach to flutter mode suppression. Adaptive flutter suppression schemes offered the 180° effective phase margins at the flutter frequency. The design approach combined the linear quadratic Gaussian (LQG) and adaptive synthesis techniques to achieve a robust control law with good performance.

Horikawa and Dowell [18], their paper presented an elementary explanation of wing flutter suppression with active feedback control using a root locus method. A study was done on a typical section airfoil with pure gain feedback. Information was obtained for various kinds of the feedback signal.

Juang and Phan [19], in 1994, presented the identification problem of a system operating in a closed loop with a feedback controller. The system was excited by a known excitation and the resulting response and the feedback are measured. Markov parameters of an observer are computed. The results are demonstrated by an example using wind tunnel aircraft flutter test data (Figure6).

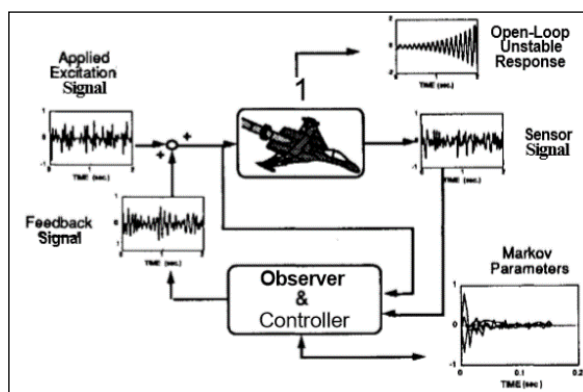


Figure 6 Identified control system from experimental data

The results from a joint Volvo Aero and Saab Aerospace research project were presented by Norlander et al [20]. A LQG and a parametric LQ controller have been designed. A wind tunnel model has been tested and evaluated and showed that flutter could be avoided using active control and the parametric LQ techniques were suitable for the design of high-performance low order controllers.

Choi et al [21], the paper presented the LQG algorithm for flutter suppression flutter of an aeroelastic wing. A state-space model for aerodynamic forces was modeled using the autoregressive moving average identification method. A combined state estimator and a linear quadratic regulator were designed. Figure 7 shows the block diagram of the aeroservoelastic model, where h, α, δ_E and u are heave, pitch, control surface displacement, and control command, respectively. Simulation results showed the effectiveness of the controller.

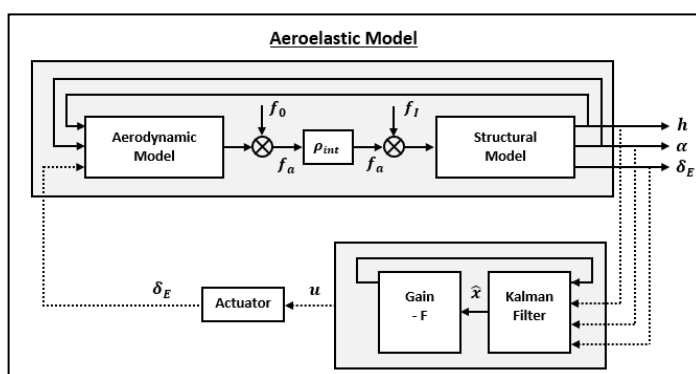


Figure 7 The block diagram of the aeroservoelastic model

Moosavi et al [22] developed a procedure based on the Galerkin method to predict the flutter speed and frequency. An eigenvalue problem with non-symmetric matrix coefficients was derived. If free stream velocity increases up to a certain velocity, the real parts of eigenvalues have negative signs. Further increasing of velocity causes the real parts to become positive, which indicates the occurrence of flutter.

Mevel et al [23] presented a covariance-driven subspace identification method for output-only observations. The method was applied to the in-flight situation. A simulator was built using the identified modal parameters. Experiments were made with the use of SCILAB.

In 2007, McEver et al [24], their research used the technique of Q parameterization to identify an unstable model of an airfoil above its flutter boundary. A nominal controller and a new-designed controller using the Evans root-locus technique were compared. From wind tunnel tests, the controller increased the flutter boundary by 30%, and the redesigned controller increased by 52%.

Lum and Lai [25] presented a correlation approach for the identification of a Hammerstein model of unsteady aerodynamics using CFD data. From a numerical example of the AGARD 445.6 wing, it showed that the method could accurately approximate the linear aerodynamic response.

Mahmoodi et al [26], in this paper, a Positive Position Feedback controller was modified. A new modified PPF controller separated the damping and stiffness controls. Experimental results showed that the new controller was able to provide good vibration suppression and could be used to control more than one natural frequency simultaneously.

In 2014, Wenmin et al [27], in their study, a MIMO time-delay feedback controller was designed to actively suppress the flutter. The model used was a multiple-actuated-wing (MAW) wind tunnel model. Firstly, the LQG controller was designed, but because of the time delay in the control loop, the stability margin was not guaranteed. This was compensated by the first-order Pade approximation. The experiments showed that this controller could expand the flutter boundary effectively.

Feixin et al [28], the equivalent linearization method (ELM) was modified to investigate the nonlinear flutter system with cubic damping. The frequency of limit cycle oscillation (LCO) was chosen as an active increment to produce bifurcation charts. Numerical examples showed that this modification made the ELM much more efficient and the LCOs obtained were in good agreement with numerical solutions.

In 2015, Nguyen et al [29] presented an adaptive control approach of an adaptive aeroelastic wing with a variable camber continuous trailing edge flap design. The control was based on the optimal control modification method augmented to a LQG optimal control design. Simulation results showed that this adaptive control design was effective in suppressing the flutter.

Singh [30], in this paper, flutter suppression was done by partial-pole placement using active state feedback with a single time delay in the control loop. A numerical example showed that poles associated with a targeted flutter mode could be stabilized without affecting the other aeroelastic modes.

Visser et al [31], his paper compared four LPV identification methods i.e. local, global, and glocal, for flutter prediction and modeling. Important properties of the methods were highlighted and simulations were performed to compare the performance, using a bending-torsion flutter model from the literature. Results showed that a trade-off between bias and variance exists for the local and global method, after which a glocal method can further improve performance.

Huang et al [32], in his study, a delayed controller was designed for active flutter suppression of the 3-D wing model. In the first step of design, a short time delay was artificially introduced into the control loop to get a set of delay-free state-space equations. For the second step, using the theory of optimal control, the control law was synthesized. In the experimental results in the wind tunnel, the critical flutter speed was effectively increased from 36.5 m/s to 39 m/s.

Theis et al [33], in 2016, presented the design of a controller for active flutter suppression on an unmanned aircraft. The aircraft is modeled as a grey box. An H_∞ -norm optimal controller is designed to increase structural damping and suppress flutter. Robustness tests for clearance in the absence of a high-fidelity nonlinear model is also developed.

Liu et al [34] presented a LQG-based model predictive control (MPC) method to suppress the gust loads of aircraft. Light detection and ranging (LIDAR) systems were used to get information of the turbulence. The method used both the infinite prediction horizon and infinite control horizon. The advantages of the proposed method were that the stability property was improved and the number of online optimized control variables was reduced.

Al-Hajja and Al-Jiboory [35] proposed a novel technique of linear parameter varying (LPV) modeling, where the smart airfoil has a groove along its chord with a moving mass. The position of the moving mass and the free stream airspeed were considered as the scheduling parameters in the study. LPV gain-scheduling controller guaranteed with H_∞ performance. The simulations showed the effectiveness of the proposed method.

Liuet al [36] applied a Sliding Mode Control (SMC) scheme to design an active controller. Numerical results indicated that the given SMC methodology was effective to suppress the vibration of a two-degree-of-freedom viscoelastic airfoil model.

The development in the field of flutter suppression, smart material has motivated many researchers to work with. The smart structure can be defined as the structure that can sense external disturbance and respond to that with active control in real-time to maintain the mission required. Smart structures consist of active devices and processor networks. The active devices are sensors and actuators either embedded or attached to a structure. In the field of flutter suppression, piezoelectric materials are widely used. A material that, when subjected to mechanical loading, will produce an electric charge and is said to have piezoelectric properties. Piezoelectric materials can be produced from ceramics and polymers by applying a large electrical field across the material.

Fanson et al [12], in 1990, a new technique called Positive Position Feedback (PPF) for vibration suppression in large space structures was investigated in the laboratory.

In this method, piezoelectric materials were used for actuators and sensors to simulate a piezoelectric active member. The first six bending modes of a cantilever beam were controlled. The modal damping ratios were increased by a factor of 2 to 130.

Heeg [37], the research was to study the capabilities of piezoelectric actuators for suppressing flutter. An aeroservoelastic model was constructed using FEM, laminated plate theory, and aeroelastic analysis tools. The converse piezoelectric effect was utilized to actuate a structure by applying a voltage. Command signals exerted control over the damping and stiffness properties. The results showed that small, carefully placed actuating plates can be used effectively to control aeroelastic response.

Meyer et al, in 1996 and 1998 [38, 39], proposed the paper presenting the positive position feedback (PPF) control and linear-quadratic Gaussian (LQG) control for vibration suppression of a flexible structure. Experiments were conducted using piezoceramics as an

actuator. PPF control is effective in providing high damping for a certain mode. LQG control provided damping to all modes; however, except for high damping for a specific mode.

In 2000, Giurgiutiu [40] has reviewed the application of active materials induced-strain actuation to counteract aeroelastic and vibration effects in helicopter rotor blades and fixed-wing aircraft. For fixed-wing aircraft, an active flutter control, buffet suppression, gust load alleviation, and sonic fatigue reduction were discussed. Directions for further work were also presented.

Suleman and Costal [41], in 2004, an adaptive aeroelastic flight vehicle demonstrator concept was designed and tested. Piezoelectric actuators were used. The results of Closed-loop buffet attenuation, gust response alleviation, and flutter suppression were presented.

Kawai [42], an element of piezoceramics (PZT) was used in this study to control flutter. The wing model was a rectangular aluminum plate having one element of PZT attached on its one side which was the so-called control of the one-sided effect. The proportional control was used for flutter control. The conclusion was that even a single element of PZT was confirmed to be effective to control flutter.

Ardelean et al [43], in this research, a new V-stack piezoelectric actuator was designed. A typical wing was constructed and tested in the wind tunnel. Positive position feedback (PPF) control was used to add damping to the unstable flutter mode. With this method, the flutter speed was increased by more than 30%.

Makihara et al [44] studied the suppression of flutter of a cantilevered plate wing employing the finite element method and the quasi-steady aerodynamic theory. The use of smart circuits composed of piezoelectric materials and electric devices, (Figure8).

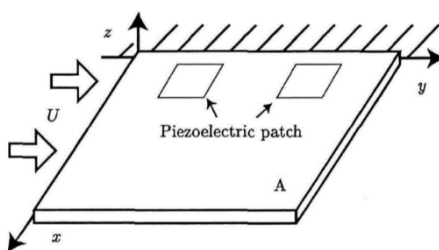


Figure 8 Plate wing with piezoelectric patches

Two approaches were presented; an energy-recycling semi-active approach which is referred to as a state-switching damper (Figure9) and a negative capacitance approach, which increased the wing's stiffness (Figure10). The critical dynamic pressure drastically increased as much as 24 % with the control using a negative capacitor.

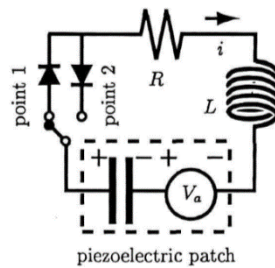


Figure 9 Energy-recycling semi-active approach

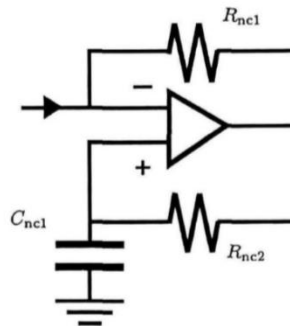


Figure 10 Negative capacitance approach

Han et al [45], his paper presented a numerical and experimental investigation on active flutter suppression (AFS) of a sweptback cantilevered lifting surface using piezoelectric (PZT) actuation, (Figure11). A FEM, a panel aerodynamic method, and the minimum state-space realization were used in formulated the equation of motion in state-space form. H_2 and μ -synthesized control laws were used in the flutter suppression. The μ -synthesized controller showed an improved behavior over a wide flow speed range. The performance was evaluated in the wind tunnel testing.

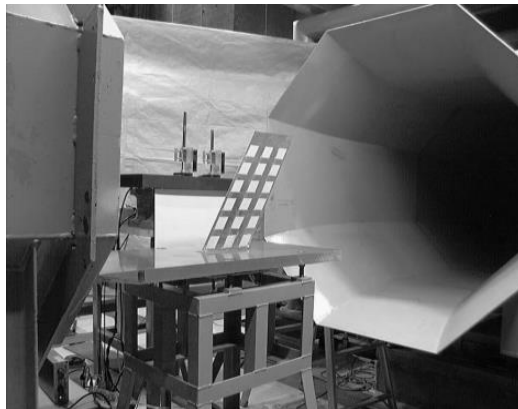


Figure 11 The experimental setup.

In 2006, Li et al [46], in the paper, a single piezoceramic element (PZT) was introduced to the wing model and tested in a wind tunnel for active flutter suppression. For the wing modeling, FEM analysis was used and aerodynamics were calculated using the doublet point method. A proportional control and the LQG were used as a control laws. The LQG control law was able to control the flutter successfully.

Raja and Upadhyaya [47], in their work, the wing model was constructed to have a bending–torsion flutter. The control surface was actuated by a flexure-hinged PZT stack mechanism acting as an aerodynamic effector. The wing response was measured by sensors, which are used to generate the feedback control to vibrate the control surface in antiphase motion with respect to the main surface. The flutter envelope was expanded by around 20%.

Munteanu [48], her work is the investigating of the capabilities of piezoelectric actuators used as active vibration control devices for wing. The equations of motion were formulated using ANSYS FEM structural modelling. The robust LQG/LQG synthesis was used. Numerical simulations were presented to show the efficacy of the piezo actuators.

Papatheou et al [49] in 2012, in their paper, the receptance method was used for flutter suppression. With this method, structural mass, damping and stiffness including aeroelastic damping, and stiffness were unnecessary, only vibration measurements were required. Two piezo-stacks in a ‘V’ configuration were used as an actuator. Preliminary experimental results were presented.

In 2016, Tsushima and Su [50], presented active and passive flutter suppression for flexible wings using piezoelectric transduction. The structural dynamic equations were coupled with an unsteady aerodynamic formulation. An active piezoelectric control and energy harvesting from wing vibrations were integrated. A LQG controller was developed for the active control of wing limit-cycle oscillations. The controller was effective for flutter suppression.

In 2020, in the paper of Adsadi and Farsadi [51], the thin-wall wing-engine system using composite piezoelectric actuation was investigated. In active control, LQG scheme was used as an active control algorithm. At the same time, in passive control, the effect of fiber angle orientation of composite wing was studied. The effect of the locations of the engine on the wing was also examined.

The clearance process for new aircraft-related aeroelastic issues during the design and certification phases, besides the success of the numerical modeling implementation such as Computational Fluid Dynamics (CFD), it has to be confirmed by testing i.e. ground vibration test, wind tunnel test, structural coupling test, and flight flutter test. These tests give the necessary information for the validation of the mathematical models used. Research papers on experiments and testing from the 1990s until to date are reviewed.

In 1990, Rickett [52], reported the results of NASA conducting wind-tunnel experiments to understand the aeroelastic characteristics of flight vehicles. Reviews of facilities, measurement techniques include past experimental programs. Needs for future experimental R&D programs were described.

Kehoe [5] in his paper of 1995, reviews the flight flutter test techniques developed over the last several decades. Structural excitation, instrumentation, data processing, and identification algorithm were described. Comments for future developments were also presented.

Brenner et al [53], NASA Dryden Flight Research Center conducted research to improve the flight flutter test process. The effort included excitation mechanism, techniques for signal processing, stability and identification, and flutter prediction. The investigation using data from the F/A-18 Systems Research Aircraft

Cooper [54] reviewed the current flight flutter testing, so the certification procedure could be improved (Figure12). The relevant technologies were also considered. Suggestions were made for speeding up the test and reducing the cost.

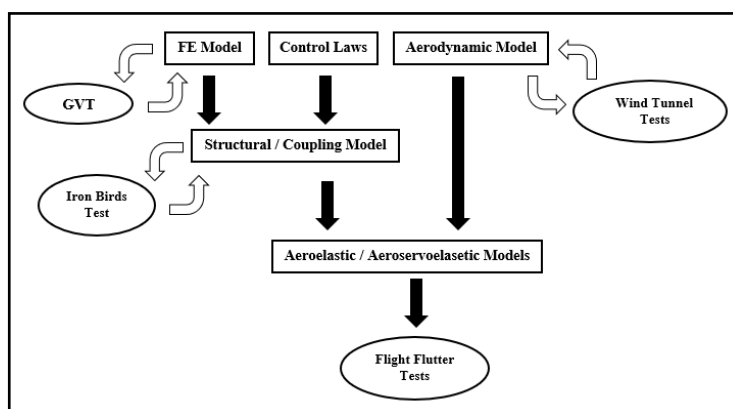


Figure 12 Aircraft Certification Procedure.

CFD requires validation for complicated flow problems, Qin [55] in his paper gave some examples to demonstrate how CFD may be used in a reversed way to help wind tunnels meet the challenges for both better understanding of flow physics and CFD validations.

In 2007, Marqui Junior et al [56], having developed a flexible mount system. The dimensions were determined by FEA and verified with an aeroelastic model. An identification algorithm, ERA, was used to determine modes shape and frequencies. The flutter behavior was demonstrated by FRF and obtained by a V-g-f plot. Mode coupling, damping, and oscillatory behaviors characterizing the flutter were studied.

In 2012, Sundresan et al [57], in their paper, flutter suppression techniques were investigated. Various testing techniques available were discussed. Optimization techniques and the fluid and structure interaction were reported. MSC Software and FE method were also discussed.

Papatheouet al [58], in 2013, presented an experimental study for the implementation of the method of receptances to control flutter. It was demonstrated experimentally that an increase in the flutter margin was increased by separating the frequencies of the heave and pitch modes.

Jiang et al [59], his paper provided an airworthiness inspection experience for civil aircraft flight flutter test. All key techniques for flutter stability verification were briefed.

Tang and Dowell [60] in 2016, presented examples of experimental model designs, wind tunnel tests, and correlation with a new theory. Their paper also provided new insights

into nonlinear aeroelastic phenomena, flutter, limit cycle oscillation (LCO), and gust response.

5. Conclusions

This review paper gives some ideas to the reader about the modern control schemes for flutter suppression. These techniques play an important role in the design of modern aircraft.

The paper begins with some important events concerning flutter problems in the past until now. Mathematical fundamentals for flutter analysis are briefly presented. The flutter equation incorporates the aerodynamic forces into the structural equation and is expressed in generalized coordinates.

The review starts with the papers on historical developments in the field of a flutter from the early days until the present day. The control techniques in the field of flutter suppression are given in the subsequent section. Modern control schemes can be used for flutter suppression with varying successes. Control methods of many researches, such as Linear quadratic Gaussian algorithm, the proportional control, System Identification technique, Positive Position Feedback controller, pole placement method, etc. were presented.

Researches on piezoelectric and smart material as actuators and sensors are very active and promising area. This material can be used with adaptive control schemes which are suitable for the unpredictable environment around the aircraft.

The success of the clearance process for a new aircraft-related aeroelastic issue during the design and certification phases is a combination of numerical modeling and Computational Fluid Dynamics (CFD) and also confirmed by testing i.e. ground vibration test, wind tunnel test, structural coupling test, and even flight flutter test. These tests give the necessary information for the validation of the mathematical models used.

At present and future research, the control methodologies that employed the concepts of the active flutter suppression (AFS) is a promising area. It can sense or detect the changing flight conditions or disturbances and respond accordingly and properly which provides a powerful and effective solution to flutter problems.

And for the not-so-distant future, an ideal concept for flutter suppression is a morphing aircraft i.e. the aircraft can smoothly adapt the external shape to changing flight conditions or mission requirements. These concepts are based on the belief that new smart material

will soon offer the required characteristics to create such structures e.g., the wing aspect ratio or wing area can be changed for different flight conditions. The research papers on this concept are widely available but beyond the scope of this article.

Acknowledgement

The Authors thank the department of mechanical engineering, faculty of engineering, Kasem Bundit university for all the supports.

References

- [1] Collar AR. The expanding domain of aeroelasticity. The Aeronautical Journal 1946;50: 613-36.
- [2] Panda C, Venkatasubramani SRP. Aeroelasticity - In general and flutter phenomenon. Proceedings of 2009 Second International Conference on Emerging Trends in Engineering & Technology; 2009 Dec. 16-18, Nagpur, India.
- [3] Wikipedia. Braniff Flight 542 [Internet] 2021 [cited 2021 March 8]. Available from: https://en.wikipedia.org/wiki/Braniff_Flight_542
- [4] Wikipedia. Crash of a BROB G180 spn in Mindelheim-Mattsies: 1 Killed. [Internet] 2021 [cited 2021 March 8]. Available from: <https://www.baaa-acro.com/crash/crash-grob-g180-spn-mindelheim-mattsies-1-killed>
- [5] Kehoe MW. A Historical overview of flight flutter testing. California: NASA, Scientific and Technical Information Program; 1995. Technical Memorandum 4720.
- [6] Wright JR, Cooper JE. Introduction to aircraft aeroelasticity and loads. 2nd edition. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd; 2015.
- [7] Battoo RS. A Beginners guide to literature in the field of aeroelasticity. Cranfield: College of Aeronautics, Cranfield University; 1997. COA Report no. 9712.
- [8] Garrick IE, Reed III WH. Historical development of aircraft flutter. Journal of Aircraft 1981;18(11):897-912.
- [9] Rose J BR, Jinu GR. A Study on aeroelastic flutter suppression and its control measures - past and future. International Journal of Engineering and Technology (IJET) 2014;6(2): 960-73.
- [10] Kamakoti R, Shyy W. Fluid-structure interaction for aeroelastic applications. Progress in Aerospace Sciences 2004;40:535-58.

- [11] Livne E. Aircraft active flutter suppression: state of the art and technology maturation needs. *Journal of Aircraft* 2018;55(1):410-50.
- [12] Fanson JL, Caughey TK. Positive position feedback control for large space structures. *AIAA Journal* 1990;28(4):717-24.
- [13] Balas GJ. Linear, parameter-varying control and its application to aerospace systems. *Proceedings of 23rd International congress of aeronautical sciences*; 2002 Sept 8-13, Toronto, Canada.
- [14] Burns RS. *Advanced control engineering*, 1st edition. Oxford: Butterworth-Heinemann, Linacre house; 2001.
- [15] Moore JB, Hotz AF, Gangsaas D. Adaptive flutter suppression as a supplement to LQG based aircraft control. *IFAC Identification and System Parameter Estimation* 1982. 1359-64.
- [16] Moore JB, Chakravarty A, Gangsaas D. Adaptive flutter suppression. *IFAC Identification and System Parameter Estimation* 1985; 345-9.
- [17] Chakravarty A, Moore JB. Aircraft flutter suppression via adaptive LQG control. *Proceedings of American Control Conference*; 1986 June 18-20, Seattle, USA p. 488-93.
- [18] Horikawa H, Dowell EH. An elementary explanation of the flutter Mechanism with active feedback controls. *Journal of Aircraft* 1979;16(4):225-32.
- [19] Juang JN, Phan M. Identification of system, observer, and controller from closed-loop experimental data. *Journal of guidance, control and dynamics* 1994;17(1):91-6.
- [20] Norlander T, Nilsson BO, Ring D, Jahansson U. A Study on active flutter detection and control. *Proceedings of the IEEE National Aerospace & Electronics Conference*; 2000 Oct 12; Dayton, OH, USA.
- [21] Choi SB, Xu H, Mirmirani MD. LQG control of a CFD-based aeroelastic wing Model. *Proceedings of the 42nd IEEE Conference on Decision and Control*; 2003 December; Maui, Hawaii, USA.
- [22] Moosavi MR, Oskoue ARN, Khelil A. Flutter of subsonic wing. *Thin-Walled Structure* 2005;43:617-27.
- [23] Mevel L, Goursat M, Benveniste A, Basseville M. Aircraft flutter test design using identification and simulation: a SCILAB toolbox. *Proceedings of 2005 IEEE Conference on Control Applications*; 2005 Aug 28-31, Toronto, ON, Canada.

- [24] McEver MA, Ardelean EV, Cole DG, Clark RL. Active control and closed-loop identification of flutter instability in typical section airfoil. Journal of guidance, control and dynamics 2007;30(3):733-40.
- [25] Lum KY, Lai KL. Identification of a Hammerstein model for wing flutter analysis using CFD data and correlation method. Proceedings of the 2010 American Control Conference; 2010 June 30, Baltimore, MD, USA.
- [26] Mahmoodi SN, Aagaah MR, Ahmadian M. Active vibration control of aerospace structures using a modified positive position feedback method. Proceedings of 2009 American Control Conference; 2009 June 10-12, St. Louis, MO, USA.
- [27] Wenmin Q, Rui H, Haiyan H, Yonghui Z. Active flutter suppression of a multiple-actuated-wing wind tunnel model. Chinese Journal of Aeronautics 2014;27(6):1451-60.
- [28] Feixin C, Jike L, Yanmao C. Flutter analysis of an airfoil with nonlinear damping using equivalent linearization. Chinese Journal of Aeronautics 2014;27(1):59-64.
- [29] Nguyen NT, Swei S, Ting E. Adaptive linear quadratic Gaussian optimal control Modification for flutter suppression of adaptive wing. Proceedings of AIAA Infotech @ Aerospace; 2015 Jan 5-9, Kissimmee, Florida, USA.
- [30] Singh KV. Active aeroelastic control with time delay for targeted flutter modes. Aerospace science and technology 2015;43:281-8.
- [31] Visser M, Navalkar ST, van Wingerden JW. LPV Model identification for flutter prediction: a comparison of methods. IFAC-Papers Online 2015;48(26):121-6.
- [32] Huang R, Qian W, Hu H, Zhao Y. Design of active flutter suppression and wind-tunnel tests of a wing model involving a control delay. Journal of Fluids and structure 2015;55:409-27.
- [33] Theis J, Pfifer H, Seiler P. Robust control design for active flutter suppression. Proceedings of AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference; 2016 Jan 4-8, San Diego, California, USA.
- [34] Liu X, Sun Q, Cooper JE. LQG based model predictive control for gust load alleviation. Aerospace Science and Technology 2017;71:499-509.
- [35] Al-Hajjar AMH, Al-Jiboory AK. LPV Modeling and control for active flutter suppression of a smart airfoil. Proceedings of AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference; 2018 Jan 8-12, Kissimmee, Florida, USA.

- [36] Liu Q, Xu Y, Kurths J. Active vibration suppression of a novel airfoil model with fractional order viscoelastic constitutive relationship. *Journal of Sound and vibration* 2018;432: 50-64.
- [37] Heeg J. Analytical and experimental investigation of flutter suppression by piezoelectric actuation. Virginia: NASA; 1993. Technical Paper 3241.
- [38] Meyer JL, Harrington WB, Agrawal BN, Song G. Application of piezoceramics to vibration suppression of a spacecraft flexible appendage. *Proceedings of AIAA Guidance, Navigation and Control Conference*; 1996 July 29-31, San Diego, CA, USA
- [39] Meyer JL, Harrington WB, Agrawal BN, Song G. Vibration suppression of a spacecraft flexible appendage using smart Material. *Smart Materials and Structures* 1998;7:95-104.
- [40] Giurgiutiu V. Active-materials induced-strain actuation for aeroelastic vibration control. *The Shock and Vibration Digest* 2000;32 (5):355-68.
- [41] Suleman A, Costa AP. Adaptive control of an aeroelastic flight vehicle using piezoelectric actuators. *Computers & Structures* 2004;82:1303-14.
- [42] Kawai N. Flutter control of wind tunnel model using a single element of Piezoceramic actuator. *Proceedings of 24th International congress of the Aeronautical Sciences*; 2004 Aug 29, Yokohama, Japan.
- [43] Ardelean EV, McEver MA, Cole DG, Clark RL. Active flutter control with v-stack piezoelectric flap actuator. *Journal of Aircraft* 2006;43(2):482-6.
- [44] Makiyara K, Onoda J, Minesugi K. Flutter suppression of cantilevered plate wing using piezoelectric materials. *KSAS International journal* 2006;7(2):1-16.
- [45] Han JH, Tani J, Qiu J. Active flutter suppression of a lifting surface using piezoelectric actuation and modern control theory. *Journal of sound and vibration* 2006;291:706-22.
- [46] Li L, Yu S, Kawai N, Matsushita H. Active flutter suppression control using piezo-ceramic actuators, intelligent control and automation. *Proceedings of 2006 6th World Congress on Intelligent Control and Automation*; 2006 June 21-23, Dalian, China.
- [47] Raja S, Upadhyaya AR. Active control of wing flutter using piezo actuated surface. *Journal of Aircraft* 2007;44(1):71-80.
- [48] Munteanu E. Piezo smart composite wing with LQG/LTR control. *Proceedings of 2008 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*; 2008 June 30 - July 2, Cambridge, UK.

- [49] Papatheou E, Wei X, Jiffri S, Prandina M, Tehrani MG, Bode S. Flutter control using vibration test data: theory, rig design and preliminary results. Proceedings of International Seminar on Modal Analysis (ISMA2012); 2012 Sept 17-19, Leuven, Belgium.
- [50] Tsushima N, Su W. Passive and active piezoelectric effects on flutter suppression of highly flexible wings. Proceedings of First International Symposium on Flutter and its Application; 2016 May 15-17, Minato-ku, Tokyo, Japan, p. 67-76
- [51] Asadi D, Farsadi T. Active flutter control of thin-walled wing-engine system using piezoelectric actuators. Aerospace Science and Technology 2020;102:1-22.
- [52] Ricketts RH. Experimental aeroelasticity - history, status and future in brief. Proceedings of 31st Structures, Structural Dynamics and Materials Conference; 1990 April 2 - April 4, Long Beach, CA, USA.
- [53] Brenner MJ, Lind RC, Voracek DF. Overview of recent flight flutter testing research at NASA Dryden. Dryden: NASA; 1997. NASA Technical Memorandum 4792.
- [54] Cooper JE. Towards faster and safer flight flutter testing. Proceedings of Symposium on Reduction of Military Vehicle Acquisition time and Cost through advanced Modelling and Virtual Simulation; 2002 April 22-25, Paris, France.
- [55] Qin N. CFD for better understanding of wind tunnel tests. Proceedings of 1st Symposium on Integrating CFD and Experiments in Aerodynamics; 2003 Sept, Glasgow, UK.
- [56] Marqui Junior CD, Rebolho DC, Belo EM, Marques FD, Tsunaki RH. Design of an experimental flutter mount system. J. Braz. Soc. Mech. Sci. & Eng. 2007; 29(3):246-52.
- [57] Sundresan M, Joseph DR, Karthick R, Joe JCSS. Review of aeroelasticity testing technology. Procedia Engineering 2012;38:2297-311.
- [58] Papatheou E, Tantaroudas ND, Ronch AD. Active control for flutter suppression: an experimental investigation. Proceedings of International Forum on Aeroelasticity and Structural Dynamics (IFASD); 2013 Jun 24 – 27, United Kingdom.
- [59] Jiang X, Fei Y, Ji L. Overview of recent flutter test key techniques for modern civil aircraft inspection airworthiness. Int. J. Mech. Eng. Autom. 2015;2(5):216-25.
- [60] Tang D, Dowell EH. Experimental aeroelastic models design and wind tunnel testing for correlation with new theory. Aerospace 2016;3(2):1-25.

Author's Profile

Mr Nipon Boonkumkrong, received the B.S. and M.S. degrees in Mechanical engineering from KMUTNB in 1983 and 1992, respectively. Now he works as lecturer in the department of mechanical engineering, KBU. and is currently working toward the Ph.D. degree in Mechanical Engineering, Srinakharinwirot university. His research interests include aeroelasticity, backstepping boundary control and passivity-based boundary control.



Associate Professor Dr. Sinchai Chinvorarat, received the Ph.D. degree in mechanical engineering in 1999 from the Old Dominion University, USA. He is an Associate professor in the Department of Mechanical and Aerospace Engineering at KMUTNB. His research interests include thermal conversion process, aeronautics, system identification and control engineering.

Article History:

Received: November 24, 2020

Revised: June 8, 2021

Accepted: June 11, 2021

การพัฒนาโปรแกรมสำหรับออกแบบผิวทางถนนคอนกรีต
ด้วยภาษาไพทอน

DEVELOPMENT OF A PROGRAM FOR DESIGNING CONCRETE
PAVEMENT USING PYTHON PROGRAMMING LANGUAGE

วิรัช หิรัญ¹ และ จิตาภรณ์ พอบุดดี²

^{1,2}อาจารย์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร
59/5 หมู่ 1 ตำบลเชียงเครือ อำเภอเมือง จังหวัดสกลนคร 47000,

¹wirach.hi@ku.th, ²titaporn.pob@ku.th

Wirach Hirun¹ and Titaporn Pobutdee²

^{1,2}Lecturer, Kasetsart University, Chalermphrakiat Sakon Nakhon Province Campus
59/5 Village no.1 Chiangkrua Subdistrict, Muang District, Sakon Nakhon 47000, Thailand,

¹wirach.hi@ku.th, ²titaporn.pob@ku.th

บทคัดย่อ

ถนนคอนกรีตสามารถรองรับปริมาณจราจรได้สูงและมีอายุการใช้งานยาวนาน อย่างไรก็ตาม ถนนคอนกรีตมีค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างค่อนข้างสูง ดังนั้น การออกแบบจึงต้องมีความละเอียดและถูกต้อง แต่เนื่องจากวิธีการออกแบบถนนคอนกรีตพัฒนาขึ้นมาเป็นเวลานาน ดังนั้น วิธีการออกแบบจึงใช้การอ่านค่าจากกราฟการออกแบบในการคำนวณ ซึ่งการนำค่าประมาณจากกราฟการออกแบบไปใช้ในการคำนวณอาจมีความผิดพลาดได้ การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาโปรแกรมสำหรับออกแบบผิวทางคอนกรีตด้วยภาษาไพทอน โดยพัฒนาส่วนติดต่อกับผู้ใช้ด้วยกราฟฟิกทำให้ง่ายต่อการใช้งาน นอกจากนี้ยังใช้การหาค่าจากสมการแทนการอ่านค่าจากกราฟการออกแบบทำให้ได้ผลการคำนวณที่แม่นยำกว่า ผลการทดสอบการใช้งานของโปรแกรมเมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการประมาณค่าจากกราฟการออกแบบ พบว่าผลการวิเคราะห์ที่หาค่าที่ยอมรับให้เนื่องจากความล้ามีค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เท่ากับ 3.62 ส่วนการวิเคราะห์การสึกกร่อนมีค่าเท่ากับ 1.24 ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการออกแบบด้วยโปรแกรมจะให้ผลการวิเคราะห์ที่แม่นยำกว่าการประมาณค่าจากกราฟการออกแบบ

คำสำคัญ: ผิวทางคอนกรีต, การออกแบบผิวทาง, การออกแบบถนน

ABSTRACT

Concrete pavement can carry high traffic volume and provides long service life. Concrete pavement is costly to construct, therefore designing must be precise and accurate. However, the concrete pavement design method has been developed for a long time. Therefore, the design charts were employed in the calculations. For the reason, the approximated value from the design chart was used in the calculation, which may have errors. The purpose of this research is to develop a program for designing concrete pavement using the PYTHON language. The user interfaces were developed to accommodate the user with a graphic interface. Moreover, the program solves the equation for the result, instead of design chart reading, which provides more accurate calculation results. The result of comparing the result of the program against the result of the design chart indicated that the mean percentage absolute error (MAPE) of allowable repeat load of fatigue analysis is 3.62 while the allowable repeat load of erosion analysis gathers the value 1.24. The developed program provides more accurate calculation results than the approximated value from the design chart.

KEYWORDS: Concrete pavement, Pavement design, Road design

1. บทนำ

ในปัจจุบันมีการก่อสร้างถนนคอนกรีตในทุกพื้นที่ของประเทศไทยเนื่องจากมีความแข็งแรงและรองรับปริมาณจราจรได้มาก ทั้งนี้การพัฒนาวิธีการออกแบบถนนคอนกรีตถูกพัฒนาขึ้นในราวทศวรรษที่ 70 โดยในช่วงเวลาที่พัฒนาวิธีการออกแบบขึ้น คอมพิวเตอร์ในสมัยนั้นยังไม่มีประสิทธิภาพเท่าที่ควร รวมทั้งการใช้งานยังมีความยุ่งยากและยังไม่แพร่หลาย ดังนั้น เพื่อให้การออกแบบทำได้ง่ายขึ้น ผู้พัฒนาวิธีการออกแบบจึงได้พัฒนากาแฟการออกแบบสำหรับอ่านค่าเพื่อลดเวลาในการคำนวณ โดยผู้ออกแบบสามารถอ่านค่าการคำนวณได้จากกราฟการออกแบบ อย่างไรก็ตาม ค่าที่ได้เป็นค่าประมาณซึ่งอาจเกิดการคลาดเคลื่อนได้ และเนื่องจากในปัจจุบันปริมาณจราจรได้เพิ่มขึ้นจากเดิมมาก ดังนั้น การประมาณค่าจากกราฟการออกแบบอาจทำให้ค่าที่ประมาณคลาดเคลื่อนไปมาก ประกอบกับในปัจจุบันคอมพิวเตอร์ซึ่งเป็นเครื่องมือที่คำนวณได้อย่างแม่นยำและมีประสิทธิภาพสูงรวมทั้งถูกใช้งานอย่างแพร่หลาย ดังนั้น การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการออกแบบผิวทางถนนคอนกรีตจะช่วยลดความผิดพลาดในการออกแบบลงได้

วิธีการของ Portland Cement Association (PCA) ได้เริ่มต้นพัฒนาและจัดทำคู่มือการออกแบบความหนาของถนนในปี ค.ศ.1951 และมีการปรับปรุงเป็นฉบับปี 1984 ทั้งนี้วิธีการ PCA เป็นวิธีการออกแบบความหนาของถนนคอนกรีตซึ่งมีพื้นฐานมาจากทฤษฎีโครงสร้างชั้นทาง

พื้นฐานและการทดลองพฤติกรรมของถนนคอนกรีต คุ่มี้อยู่ PCA (1984) แบ่งขั้นตอนการออกแบบความหนาของพื้นทางคอนกรีตออกเป็น 2 กรณี โดยแบ่งวิธีการวิเคราะห์เป็น 2 กรณี ได้แก่ กรณีที่ 1 มีข้อมูลน้ำหนักลงเพลลา (Axle-load data available) และ กรณีที่ 2 ไม่มีข้อมูลน้ำหนักลงเพลลา (Axle-load data not available) อย่างไรก็ตาม เนื่องจากวิธีการถูกพัฒนาขึ้นมาเป็นเวลานาน โดยในช่วงเวลานั้นปริมาณจราจรและน้ำหนักบรรทุกยังไม่สูงเช่นในปัจจุบัน ดังนั้น การนำมาประยุกต์ใช้สำหรับออกแบบถนนจึงต้องพิจารณาให้เหมาะสมกับสภาพถนนและสภาพการจราจรที่ออกแบบ โดยเฉพาะเมื่อปริมาณจราจรสูงสุดเกิน 5-10 ล้าน ESALs เนื่องจากทำให้ค่าจำนวนเที่ยวสูงเกินกว่ากราฟการออกแบบ (Nomograph) อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาวิธีการออกแบบสมัยใหม่ เช่น วิธีการ M-E PDG ของ AASHTO ซึ่งใช้หลักการกลศาสตร์-เชิงประสพการณ์ (Mechanistic-Empirical) โดยหลักการนี้จะเกี่ยวข้องกับการคำนวณเพื่อหาค่าความเค้น ความเครียดและการเสียรูป เพื่อใช้สำหรับประเมินความเสียหายของผิวทาง [1] ทำให้สามารถออกแบบผิวทางได้หลายรูปแบบ รองรับประเภทวัสดุ ปริมาณจราจร และสภาพอากาศที่แตกต่างกัน รวมทั้งมีการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อให้สามารถคำนวณได้อย่างสะดวกสบาย แต่ราคาของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ดังกล่าวมีราคาสูงถึง 8,200 เหรียญสหรัฐ หรือประมาณ 250,000 บาทต่อปีสำหรับการใช้งาน 1 ผู้ใช้งาน ด้วยราคาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของ AASHTO ทำให้การจัดหาโปรแกรมสำหรับนำมาใช้ออกแบบถนนคอนกรีตสำหรับหน่วยงานขนาดเล็ก เช่น เทศบาล องค์การบริหารส่วนตำบลเป็นไปได้ยาก นอกจากนี้การออกแบบด้วยวิธี PCA ยังเป็นวิธีการที่กรมทางหลวงนำเสนอไว้ในคู่มือการออกแบบและวิเคราะห์โครงสร้างชั้นทางซึ่งจัดทำขึ้นโดยสำนักงานวิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง และนำเสนอในคู่มือการออกแบบโครงสร้างชั้นทางถนนลาดยางและถนนคอนกรีตในเว็บไซต์ การจัดการความรู้ กรมทางหลวง <http://km.doh.go.th/> ดังนั้น จึงกล่าวได้ว่าวิธี PCA เป็นวิธีการที่ได้รับการยอมรับของหน่วยงานระดับประเทศ

ภาษาไพทอนเป็นซอฟต์แวร์เสรี (Open source software) ที่รองรับการเขียนโปรแกรมทั้งโปรแกรมเชิงโครงสร้างและการเขียนโปรแกรมเชิงวัตถุ และด้วยคุณสมบัติความเป็นซอฟต์แวร์เสรีทำให้มีการพัฒนาโดยนักพัฒนาจากทั่วโลกช่วยกันพัฒนาให้ไพทอนมีความสามารถสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้ในปัจจุบันมีไลบรารีมาตรฐานจำนวนมาก เช่น โครงสร้างข้อมูลแบบซับซ้อน ไลบรารีสำหรับคณิตศาสตร์ รวมทั้งไลบรารีสำหรับสร้างอินเทอร์เน็ตเฟส ซึ่งส่งผลให้สามารถพัฒนาโปรแกรมที่มีส่วนติดต่อกับผู้ใช้ที่มีความสวยงามและง่ายต่อการใช้งาน จึงทำให้โปรแกรมที่พัฒนาโดยภาษาไพทอนมีความเป็นมิตรต่อผู้ใช้

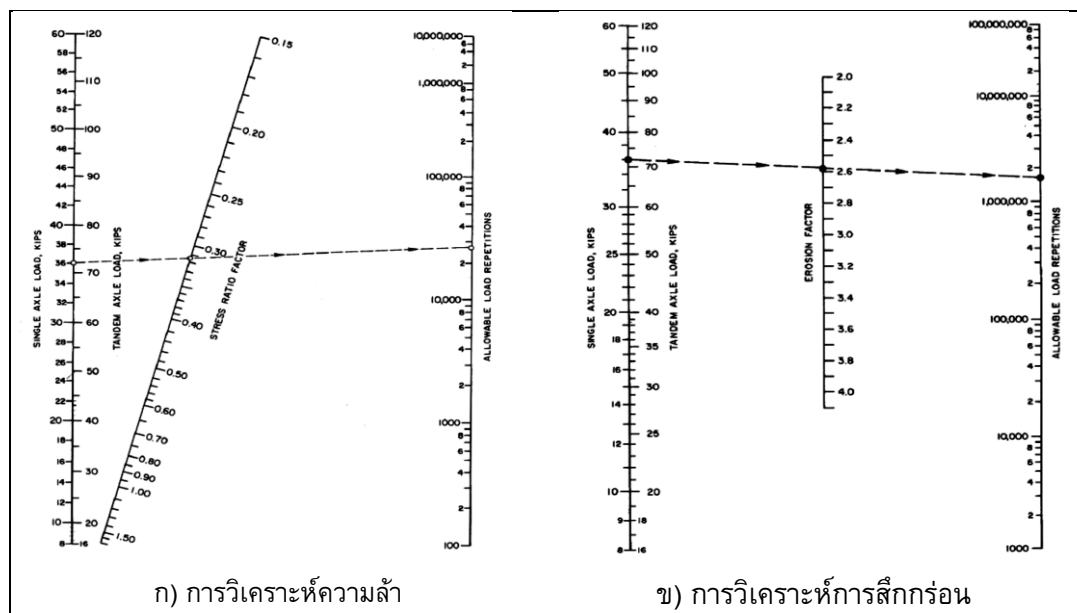
งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการออกแบบผิวทางคอนกรีตตามวิธีการของ Portland Cement Association (PCA) ด้วยภาษาไพทอน 3.8 โดย

โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นจะช่วยลดเวลาและลดความผิดพลาดในการคำนวณออกแบบผิวทางถนนคอนกรีต

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 หลักการออกแบบถนนคอนกรีตด้วยวิธี PCA

Portland Cement Association [2] ได้นำเสนอหลักการออกแบบถนนคอนกรีตโดยพัฒนาจากทฤษฎีโครงสร้างชั้นทางพื้นฐาน ร่วมกับผลการทดลองพฤติกรรมของถนนคอนกรีต โดยปัจจัยหลักที่มีผลต่อความหนาของถนนคอนกรีต ประกอบด้วย กำลังของดินฐานราก ความแข็งแรงของคอนกรีต และปริมาณและน้ำหนักการจราจร นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่นที่เกี่ยวข้อง ประกอบด้วย รูปแบบของรอยต่อ ไหล่ทาง และชนิดของชั้นรองพื้นทาง ทั้งนี้ วิธี Portland Cement Association (PCA) พิจารณาว่าความเสียหายของถนนคอนกรีตเกิดจาก 2 สาเหตุหลัก คือ 1) การเกิดความล้า (Fatigue) เนื่องจากการแอ่นตัวของแผ่นคอนกรีตซึ่งรับแรงกระทำจากน้ำหนักยานพาหนะ และ 2) การเกิดการสึกกร่อน (Erosion) ของชั้นดินเดิมหรือชั้นรองพื้นทาง เนื่องจากการเกิดการแอ่นตัวเข้าไปเข้ามาของคอนกรีตบริเวณรอยต่อหรือรอยแตก และได้พัฒนา Nomograph สำหรับการออกแบบประกอบด้วย Nomograph สำหรับการวิเคราะห์ความล้า (Fatigue) และ Nomograph สำหรับการวิเคราะห์การสึกกร่อน (Erosion) ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 Nomograph สำหรับการวิเคราะห์ด้วยวิธี PCA [2]

ทั้งนี้สำหรับวิธี PCA ค่าที่แสดงใน Nomograph และตารางการออกแบบไม่ได้ให้ความหนาของผลลัพธ์โดยตรง แต่เป็นพารามิเตอร์ระดับกลาง เช่น อัตราส่วนความเค้นปัจจัยการสึกกร่อนและการเกิดซ้ำที่ยอมให้ โดยผู้ออกแบบต้องคำนวณความเสียหายทั้งหมดสำหรับการวิเคราะห์ความล้าและการสึกกร่อน [3]

เมื่อพิจารณา Nomograph สำหรับการวิเคราะห์ความล้า (Fatigue) จะพบว่าจำนวนเทียวยที่ยอมให้เป็นค่าที่อยู่ในสเกลลอจการิทึม ซึ่งเมื่อค่าของจำนวนเทียวยสูงสุดที่ยอมให้มากขึ้นระยะห่างระหว่างค่าบนกราฟจะลดลง โดยเฉพาะช่วง 10^6 เทียวย – 10^7 เทียวย การประมาณค่าจากกราฟไม่สามารถประมาณค่าได้ละเอียดกว่าช่วงละ 10^6 เทียวยได้ และเมื่อพิจารณา Nomograph สำหรับการวิเคราะห์การสึกกร่อน (Erosion) จะพบว่ามัลักษณะเช่นเดียวกัน โดยเฉพาะช่วง 10^7 เทียวย – 10^8 เทียวย การประมาณค่าจากกราฟไม่สามารถประมาณค่าได้ละเอียดกว่าช่วงละ 10^7 เทียวยได้ ทั้งนี้การประมาณค่าจากกราฟดังกล่าวนี้เป็นค่าสำคัญในการนำไปใช้ในการออกแบบความหนาของผิวทางถนนคอนกรีต การประมาณค่าที่มีความละเอียดน้อยจะส่งผลต่อการคำนวณ นอกจากนี้ในปัจจุบันปริมาณจราจรและน้ำหนักบรรทุกทุกสำหรับใช้ในการออกแบบเพิ่มขึ้นอย่างมาก ดังนั้นค่าประมาณจึงอยู่ในช่วงปริมาณจราจรสูง ซึ่งมีโอกาสในการประมาณค่าได้ไม่ตรงกับค่าจริง

2.1.1 การวิเคราะห์การเกิดความล้า (Fatigue)

การวิเคราะห์การเกิดความล้าในผิวจราจรคอนกรีตของวิธี Portland Cement Association (PCA) พิจารณาผลเนื่องจากน้ำหนักของยานพาหนะ 2 ประเภท ได้แก่ รถบรรทุกเพลาดียว และรถบรรทุกเพลาคู่ ในรูปของค่าความเค้นที่เกิดขึ้นบนผิวจราจรคอนกรีตที่ความหนาต่าง ๆ ที่วางบนชั้นรองพื้นทางที่มีคุณสมบัติต่างกัน โดย Nomograph สำหรับการวิเคราะห์ความล้าของ Portland Cement Association (PCA) พัฒนาจากชุดสมการในการหาวิเคราะห์ความล้า [4] โดยค่าความเค้นหาได้จากสมการที่ (1)

$$\sigma_{eq} = \frac{6M_e}{h^2} f_1 * f_2 * f_3 * f_4 \quad (1)$$

โดยที่ σ_{eq} หมายถึง ค่าความเค้น

h หมายถึง ความหนาของแผ่นคอนกรีต

M_e หมายถึง โมเมนต์ที่เกิดขึ้นในผิวคอนกรีต

$f_1 - f_4$ หมายถึง ค่าแฟกเตอร์

ค่าโมเมนต์ที่เกิดขึ้นในผิวคอนกรีต (M_e) แยกพิจารณาออกเป็น 2 กรณีคือ 1) ผิวคอนกรีตมีไหล่ทาง และ 2) ผิวจราจรคอนกรีตไม่มีไหล่ทาง โดยค่าโมเมนต์ที่เกิดขึ้นสำหรับรถบรรทุกทุกเพลาดียว และเพลาคู่หาได้จากสมการที่ (2) ถึงสมการที่ (5)

กรณี เพลาดียว/ไม่มีไหล่ทาง

$$M_e = -1600 + 2525 * \log(l) + 24.42 * l + 0.204 * l^2 \quad (2)$$

กรณี เพลาคู่/ไม่มีไหล่ทาง

$$M_e = 3029 - 2966.8 * \log(l) + 133.69 * l - 0.0632 * l^2 \quad (3)$$

กรณี เพลาดียว/มีไหล่ทาง

$$M_e = (-970.4 + 1202.6 * \log(l) + ((53.587 * l)) * (0.8742 + 0.01088 * k^{0.447})) \quad (4)$$

กรณี เพลาคู่/มีไหล่ทาง

$$M_e = 2005.4 - 980.9 * \log(l) + 99.008 * l * (0.8742 + 0.01088 * k^{0.447}) \quad (5)$$

โดยที่ l หมายถึง radius of relative stiffness of the slab-subgrade system

k หมายถึง modulus of subgrade reaction

สำหรับสัมประสิทธิ์ f_1 เป็นค่าแฟกเตอร์สำหรับน้ำหนักเพลาดียวและพื้นที่สัมผัสของล้อ f_2 เป็นค่าแฟกเตอร์สำหรับไหล่ทาง f_3 เป็นค่าแฟกเตอร์สำหรับผลของรถบรรทุกต่อขอบของถนน และ f_4 เป็นแฟกเตอร์สำหรับความแปรผันของกำลังของคอนกรีต โดยค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าวหาได้จากสมการที่ (6) ถึงสมการที่ (9)

กรณีเพลาดียว

$$f_1 = (24 / SAL)^{0.06} * (SAL / 18) \quad (6)$$

กรณีเพลาคู่

$$f_1 = (48 / TAL)^{0.06} * (TAL / 36) \quad (7)$$

กรณีไม่มีไหล่ทาง

$$f_2 = 0.892 + h/85.71 - h^2/3000 \quad f_2 = 1 \quad (8)$$

กรณีมีไหล่ทาง

$$f_3 = 0.894 \quad \text{และ} \quad f_4 = 1/[1.235*(1-CV)] \quad (9)$$

โดยที่ SAL หมายถึง น้ำหนักบรรทุกทุกเพลาดียวที่พิจารณา

TAL หมายถึง น้ำหนักบรรทุกทุกเพลาคู่ที่พิจารณา

H หมายถึง ความหนาของแผ่นคอนกรีต

CV หมายถึง สัมประสิทธิ์ของความแปรผัน

การพิจารณาจำนวนเที่ยวสูงสุดที่ยอมให้สำหรับบรรทุกที่น้ำหนักใด ๆ (N_f) พิจารณาจากค่าความเค้นที่เกิดขึ้นบนผิวจราจรคอนกรีต โดยพิจารณาระดับความเค้นเป็น 3 ระดับคือ 1) ค่าความเค้นมากกว่าหรือเท่ากับ 0.55 2) ค่าความเค้นอยู่ระหว่าง 0.45 ถึง 0.55 และ 3) ค่าความเค้นน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.45 แสดงว่าจำนวนเที่ยวไม่จำกัดซึ่งหมายความว่าความเค้นที่เกิดขึ้นไม่ทำให้เกิดความล้า ทั้งนี้จำนวนเที่ยวสูงสุดที่ยอมให้หาได้จากสมการที่ (10) ถึงสมการที่ (12)

สำหรับกรณี $\sigma_{eq} / S_c \geq 0.55$

$$\log(N_f) = 11.737 - 12.077 * (\sigma_{eq} / S_c) \quad (10)$$

สำหรับกรณี $0.45 < \sigma_{eq} / S_c < 0.55$

$$N_f = \left(\frac{4.2577}{\sigma_{eq} / S_c - 0.4325} \right)^{3.268} \quad (11)$$

สำหรับกรณี $\sigma_{eq} / S_c \leq 0.45$

$$N_f = Unlimited \quad (12)$$

2.1.2 การวิเคราะห์การเกิดการสึกกร่อน (Erosion)

การวิเคราะห์การเกิดการสึกกร่อนในผิวจราจรคอนกรีตของวิธี Portland Cement Association (PCA) พิจารณาความเสียหายเนื่องจากการอัดทะลัก การสึกกร่อนของชั้นฐานราก และการเสียหายของรอยต่อ โดยการวิเคราะห์พิจารณาในกรณีการโก่งที่ส่งผลต่อการสึกกร่อนคือ กรณีที่ล้อรถอยู่ตรงรอยต่อใกล้กับมุมของแผ่นคอนกรีต ทั้งนี้จะพิจารณาผลที่เกิดกับแผ่นคอนกรีต ในกรณีถนนมีไหล่ทางคอนกรีตและถนนที่ไม่มีไหล่ทางคอนกรีต โดย Nomograph สำหรับการวิเคราะห์การเกิดการสึกกร่อนของ Portland Cement Association (PCA) พัฒนาจากชุดสมการ ในการวิเคราะห์ความสึกกร่อน [4] โดยการโก่งสามารถหาได้จากสมการที่ (13)

$$\delta_{eq} = \frac{P_c}{k} f_5 * f_6 * f_7 \quad (13)$$

โดยที่ δ_{eq} หมายถึง ค่าการโก่งตัวของแผ่นคอนกรีต

P_c หมายถึง แรงดันที่ผิวรอยต่อของแผ่นคอนกรีตและฐานรองรับ

k หมายถึง modulus of subgrade reaction

$f_5 - f_7$ หมายถึง ค่าแฟกเตอร์

การวิเคราะห์หาแรงดันที่ผิวรอยต่อของแผ่นคอนกรีตและฐานรองรับ (P_c) ได้แบ่ง การวิเคราะห์ออกเป็น 8 กรณี โดยพิจารณาจากการมีไหล่ทางหรือไม่มีไหล่ทาง และการมีเสริม เหล็กเดี่ยวที่รอยต่อหรือไม่มีการเสริมเหล็กเดี่ยวที่รอยต่อ สำหรับการวิเคราะห์หาแรงดันสำหรับ รถบรรทุกเพลาดียว และเพลาคู่หาได้จากสมการที่ (14) ถึงสมการที่ (21)

กรณี เพลาดียว / ไม่มีไหล่ทางคอนกรีต / ไม่มีเหล็กเดี่ยว

$$P_c = 1.571 + (46.127/l) + (4372.7/l^2) - (22886/l^3) \quad (14)$$

กรณี เพลาคู่ / ไม่มีไหล่ทางคอนกรีต / ไม่มีเหล็กเดี่ยว

$$P_c = 1.847 + (213.68/l) - (1260.8/l^2) + (22989/l^3) \quad (15)$$

กรณี เพลาดียว / มีไหล่ทางคอนกรีต / ไม่มีเหล็กเดี่ยว

$$P_c = 0.578 + (65.108/l) + (1130.6/l^2) - (5245.8/l^3) \quad (16)$$

กรณี เพลาคู่ / มีไหล่ทางคอนกรีต / ไม่มีเหล็กเดือย

$$P_c = 1.47 + (102.2/l) - (1072/l^2) + (14451/l^3) \quad (17)$$

กรณี เพลาเดี่ยว / ไม่มีไหล่ทางคอนกรีต / มีเหล็กเดือย

$$P_c = -0.319 + (128.85/l) + (1105.8/l^2) + (3269.1/l^3) \quad (18)$$

กรณี เพลาคู่ / ไม่มีไหล่ทางคอนกรีต / มีเหล็กเดือย

$$P_c = 1.258 + (97.491/l) + (1484.1/l^2) - (180/l^3) \quad (19)$$

กรณี เพลาเดี่ยว / มีไหล่ทางคอนกรีต / มีเหล็กเดือย

$$P_c = 0.018 + (72.99/l) + (323.1/l^2) + (1620/l^3) \quad (20)$$

กรณี เพลาคู่ / มีไหล่ทางคอนกรีต / มีเหล็กเดือย

$$P_c = 0.0345 + (146.25/l) - (2385.6/l^2) + (23848/l^3) \quad (21)$$

สำหรับสัมประสิทธิ์ f_5 เป็นค่าแฟกเตอร์สำหรับน้ำหนักเพลลา f_6 เป็นค่าแฟกเตอร์สำหรับแผ่นคอนกรีตที่ไม่มีเหล็กเดือยที่รอยต่อ f_7 เป็นค่าแฟกเตอร์สำหรับกรณีที่มีลอร์อยู่ตรงรอยต่อใกล้กับมุมของแผ่นคอนกรีต โดยค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าวหาได้จากสมการที่ (22) ถึงสมการที่ (28)

กรณี เพลาเดี่ยว

$$f_5 = SAL / 18 \quad (22)$$

กรณี เพลาคู่

$$f_5 = TAL / 36 \quad (23)$$

กรณี ไม่มีเหล็กเดือย / ไม่มีไหล่ทางคอนกรีต

$$f_6 = 0.95 \quad (24)$$

กรณี ไม่มีเหล็กเดือย / มีไหล่ทางคอนกรีต

$$f_6 = 1.001 - \left(0.26363 - \frac{k}{3034.5} \right)^2 \quad (25)$$

กรณีมีเหล็กเดือย

$$f_6 = 1 \quad (26)$$

กรณีไม่มีไหล่ทาง

$$f_7 = 0.896 \quad (27)$$

กรณีมีไหล่ทาง

$$f_7 = 1 \quad (28)$$

การพิจารณาจำนวนเที่ยวสูงสุดที่ยอมให้สำหรับรถบรรทุกที่น้ำหนักใด ๆ พิจารณาจากค่ากำลังที่ทำให้เกิดการโก่งตัว P ค่าแฟกเตอร์ และค่าแฟกเตอร์ C_1 และแฟกเตอร์ C_2 ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ (29) ถึงสมการที่ (32)

$$P = 268.7 \left(\frac{P_c^2}{h * k^{0.73}} p_c \right) \text{ หรือ } P = 268.7 \left(\frac{\delta_{eq}^2 k^{1.27}}{h} \right) \quad (29)$$

$$C_1 = 1 - \left(\frac{k}{2000} * \frac{4}{h} \right)^2 \quad (30)$$

โดยที่ $C_2 = 0.06$ สำหรับกรณีไม่มีไหล่ทาง และ $C_2 = 0.94$ สำหรับกรณีมีไหล่ทาง

กรณี $C_1 * P > 9$

$$\log N_e = 14.524 - 6.777 * (C_1 * P - 9)^{0.103} \quad (31)$$

กรณี $C_1 * P \leq 9$

$$N_e = Unlimited \quad (32)$$

2.2 ค่าพารามิเตอร์สำหรับวิเคราะห์ด้วยวิธี PCA

2.2.1 คุณสมบัติของวัสดุ

พารามิเตอร์เกี่ยวกับคุณสมบัติของคอนกรีตสำหรับการวิเคราะห์ตามวิธี PCA ใช้ค่ากำลังรับแรงดัด (Flexural Strength) ที่อายุ 28 วันคอนกรีต อย่างไรก็ตาม กรมทางหลวงเสนอว่า ในทางปฏิบัติจะควบคุมคุณสมบัติคอนกรีตที่ค่ากำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) ซึ่งทดสอบได้สะดวกกว่า [5] โดยความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและค่ากำลังรับแรงดัดเป็นไปตามสมการที่ (33)

$$f_f = 0.75 \sqrt{f'_c} \quad (33)$$

โดยที่ f_f = กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตที่ 28 วัน

f'_c = กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ 28 วัน

การพิจารณาเลือกใช้ค่า modulus of subgrade reaction (k) ของการก่อสร้างถนนคอนกรีตในประเทศไทย ประกอบด้วย ชั้นรองพื้นทางเหนือชั้น Subgrade การกำหนดค่า modulus of subgrade reaction (k) ต้องคำนึงถึงผลกระทบของชั้นรองพื้นทางที่เพิ่มขึ้นด้วย โดยค่าที่ใช้ออกแบบจะต้องเป็นค่ารวมของทั้งสองชั้น [2] ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่า k ที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีชั้นรองพื้นทางอยู่เหนือดิน Subgrade [2]

ค่า k ของ Subgrade (pci)	ค่า k เมื่อมีชั้นรองพื้นทางดินลูกรัง Untreated subbase (pci)				ค่า k เมื่อมีชั้นรองพื้นทางดินซีเมนต์ Cement-Treated subbase (pci)			
	4 นิ้ว	6 นิ้ว	9 นิ้ว	12 นิ้ว	4 นิ้ว	6 นิ้ว	9 นิ้ว	12 นิ้ว
50	65	75	85	110	170	230	310	390
100	130	140	160	190	280	400	520	640
200	220	230	270	320	470	640	830	-
300	320	330	370	430	-	-	-	-

2.2.2 ข้อกำหนดเกี่ยวกับผิวทาง

กรมทางหลวงกำหนดค่า Load Safety Factor เท่ากับ 1.2 สำหรับถนนพิเศษระหว่างเมือง (Motorway) และทางหลวงหลายช่องจราจรที่ต้องรองรับการจราจรของรถหนักจำนวนมากโดยไม่มีการหยุดชะงัก และต้องการคุณภาพการบริการ (Serviceability) สูงตลอดอายุการใช้งานโดยเสียค่าบำรุงรักษาต่ำ กำหนดค่า Load Safety Factor เท่ากับ 1.1 สำหรับถนนพิเศษระหว่างเมือง (Motorway) และทางหลวงสายหลักที่ต้องรองรับปริมาณการจราจรของรถหนักจำนวนปานกลาง และกำหนดค่า Load Safety Factor เท่ากับ 1.0 สำหรับถนนที่ต้องรองรับปริมาณการจราจรของรถหนักจำนวนน้อย [5]

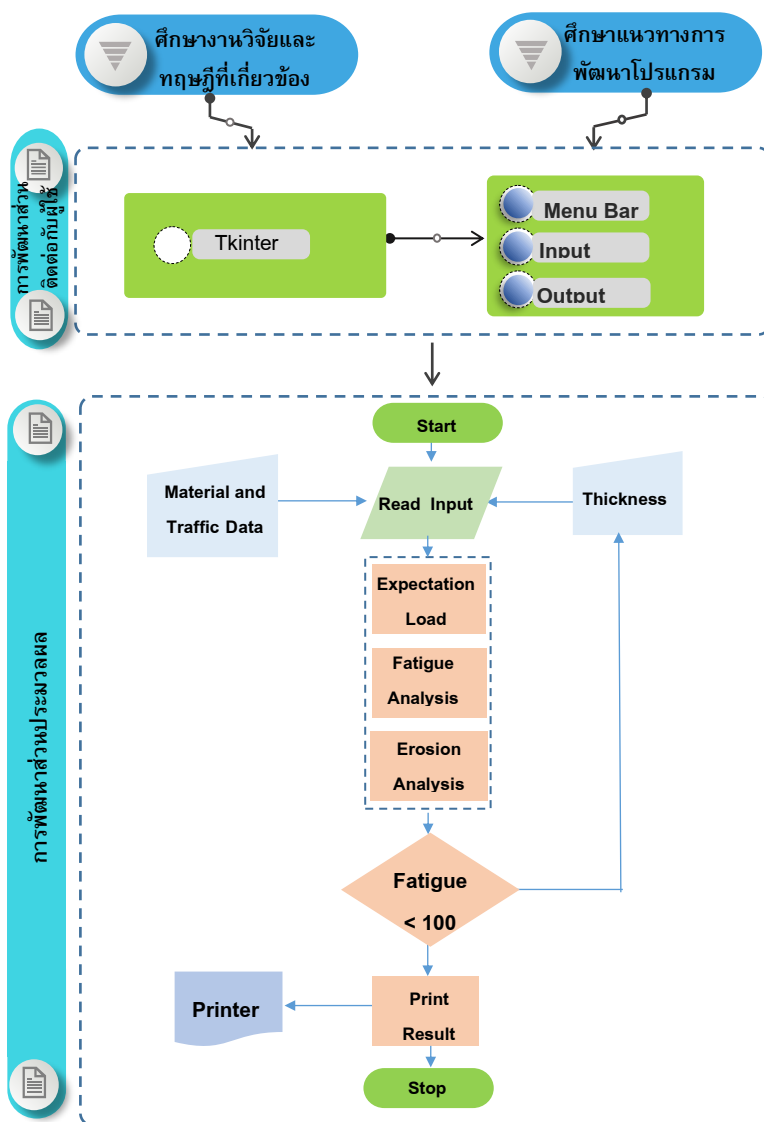
3. การดำเนินการวิจัย

3.1 การออกแบบโครงสร้างของโปรแกรม

การออกแบบผิวทางถนนคอนกรีตมีขั้นตอนในการวิเคราะห์ที่ค่อนข้างซับซ้อนและใช้ข้อมูลทั้งด้านจราจร และข้อมูลคุณสมบัติของวัสดุ ดังนั้น การออกแบบโปรแกรมจึงต้องทำการออกแบบโปรแกรมให้ผู้ใช้สามารถใช้งานได้ง่าย รวมทั้งควรมีการรวบรวมข้อมูลที่จำเป็นต้องใช้ในการออกแบบเพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถเลือกใช้ได้อย่างง่าย นอกจากนี้การออกแบบด้วยวิธี Portland Cement Association (PCA) ใช้วิธีการเลือกหน้าตัดแล้วจึงพิจารณาผลการวิเคราะห์ว่าเหมาะสมหรือไม่ ดังนั้นจึงมีลักษณะเป็นการออกแบบแบบลองผิดลองถูก (Trial and error) ซึ่งในบางครั้งอาจต้องใช้เวลานาน ดังนั้น โปรแกรมคอมพิวเตอร์จึงมีส่วนสำคัญในการลดเวลาในกระบวนการวนซ้ำนี้ เพื่อให้การออกแบบทำได้รวดเร็วยิ่งขึ้น

การพัฒนาโปรแกรมส่วนติดต่อกับผู้ใช้ ใช้การอินเทอร์เฟซแบบกราฟฟิกโดยผู้ใช้งานติดต่อกับโปรแกรมผ่านส่วนที่เป็นกราฟฟิกโดยใช้เมาส์คลิกเพื่อสั่งงาน แทนการใช้คอมพิวเตอร์ไค์บอร์ด ซึ่งยุ่งยากและต้องเรียนรู้การใช้งาน [6] การใช้อินเทอร์เฟซแบบกราฟฟิกเป็นวิธีการที่ทำให้โปรแกรมที่

พัฒนาขึ้นใช้งานได้ง่าย และภาษาสำหรับการพัฒนาโปรแกรมส่วนใหญ่สนับสนุนการพัฒนาโปรแกรมที่มีอินเตอร์เฟซแบบกราฟฟิก สำหรับโปรแกรม Python ซึ่งเป็นโปรแกรมประเภทซอฟต์แวร์เสรีจึงได้รับการสนับสนุนโมดูลสำหรับพัฒนาไว้หลายโมดูลซึ่งแต่ละโมดูลมีลักษณะการใช้งานและความสามารถที่แตกต่างกัน สำหรับงานวิจัยนี้เลือกใช้ Tkinter ซึ่งเป็นโมดูลที่ได้รวบรวมฟังก์ชันต่าง ๆ ให้นำมาใช้สร้างคอมพิวเตอร์ได้อย่างหลากหลาย [7] รวมทั้งไพทอนเลือกใช้สำหรับการพัฒนากราฟฟิกบนไพทอนเป็นหลัก มีการใช้งานกันแพร่หลาย ทำงานได้รวดเร็ว โดยส่วนติดต่อผู้ใช้แบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ

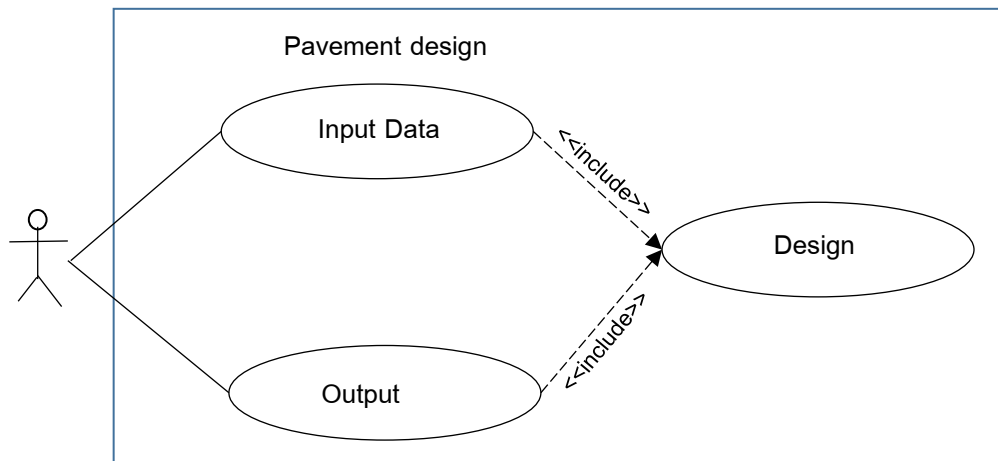


รูปที่ 2 ขั้นตอนการดำเนินงานพัฒนาโปรแกรม

3.2 การออกแบบการทำงานของโปรแกรม

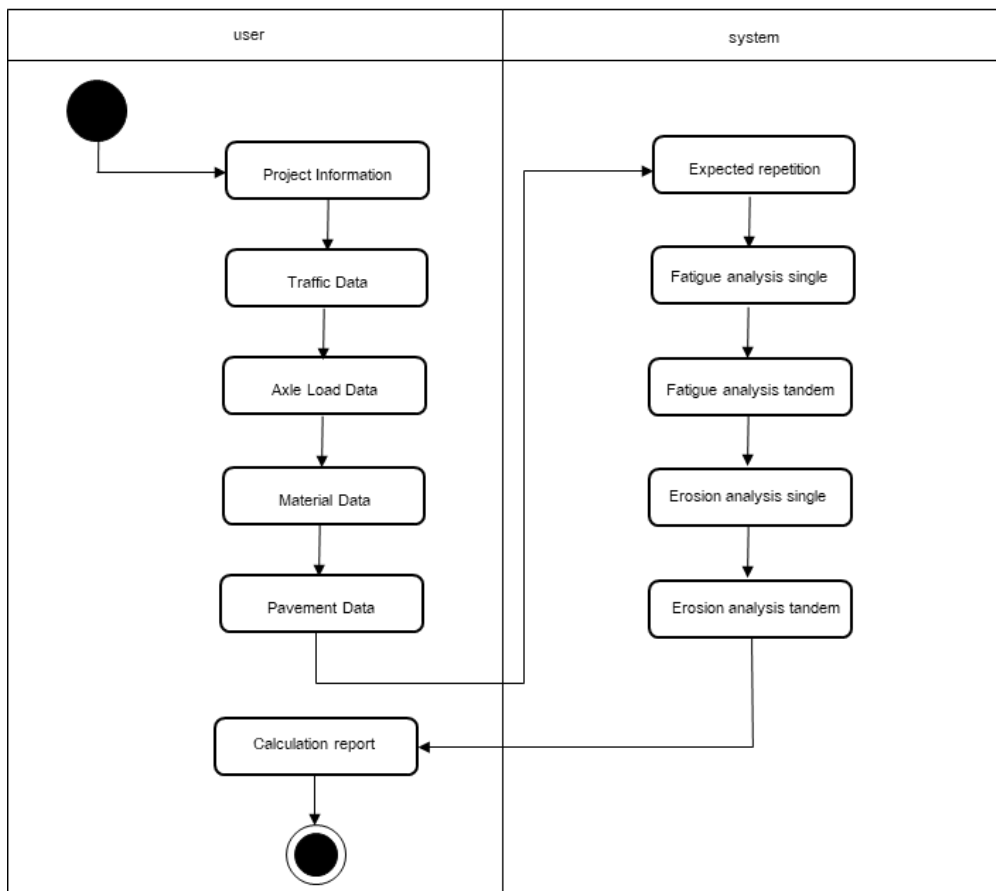
การออกแบบการทำงานของโปรแกรมสำหรับออกแบบผิวถนนคอนกรีตตามวิธี PCA (1984) มีขั้นตอนดังนี้ 1) Use Case Diagram แสดงรายละเอียดการกำหนดฟังก์ชันของผู้ใช้งาน 2) Activity Diagram แสดงรายละเอียดฟังก์ชัน การทำงานของโปรแกรม 3) E-R Diagram แสดงรายละเอียดโครงสร้างแสดงความสัมพันธ์ของข้อมูล 4) Data Dictionary แสดงรายละเอียดพจนานุกรมข้อมูล และ 5) User Interface แสดงรายละเอียดส่วนติดต่อกับผู้ใช้งาน โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) การวิเคราะห์ระบบงาน Use case diagram โดย Actor ได้แก่ ผู้ใช้ และ use case ประกอบด้วย (1) การนำเข้าข้อมูล ได้แก่ ข้อมูลด้านการจราจร ข้อมูลวัสดุ ข้อมูลผิวทาง (2) การคำนวณ และ (3) การรายงานผลการคำนวณ ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 Use case diagram ของโปรแกรม

2) Activity Diagram แสดงรายละเอียดฟังก์ชัน การทำงานของโปรแกรม ดังแสดงในรูปที่ 4 โดยเมื่อผู้ใช้งานเรียกใช้โปรแกรมสามารถเลือกเมนูได้ 5 เมนูเพื่อทำการป้อนข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบ ได้แก่ (1) Project information (2) Material data (3) Pavement data (4) Traffic data และ (5) Axle load data โดยข้อมูลจะส่งเข้าสู่ระบบเพื่อทำการประมวลผล 3 ส่วน ได้แก่ (1) Expected repetition (2) Fatigue analysis และ (3) Erosion analysis เมื่อประมวลผลเสร็จจะสร้าง Calculation report เพื่อแสดงผลการคำนวณออกแบบ



รูปที่ 4 Activity diagram ของโปรแกรม

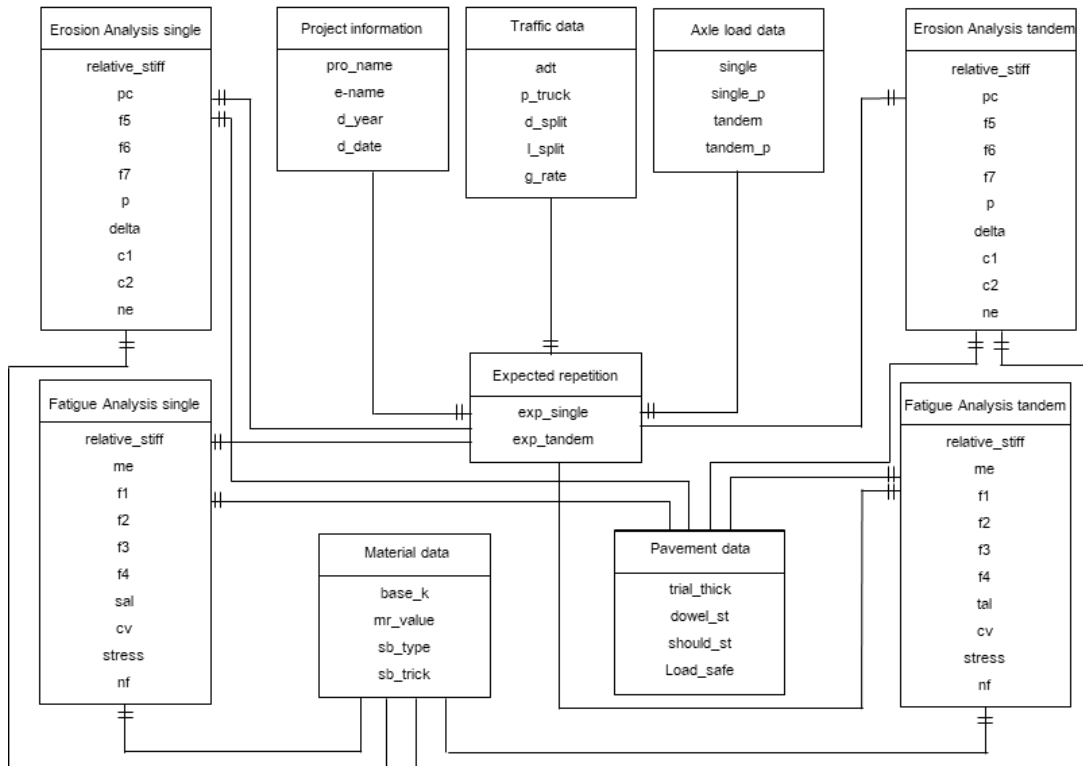
3) E-R Diagram แสดงรายละเอียดโครงสร้างแสดงความสัมพันธ์ของข้อมูลในส่วนต่าง ๆ ของโปรแกรม ดังแสดงในรูปที่ 5

4) Data Dictionary แสดงรายละเอียดพจนานุกรมข้อมูล จำนวน 10 กลุ่มข้อมูล มีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 2

5) การพัฒนาส่วนติดต่อกับผู้ใช้

การพัฒนาโปรแกรมในส่วนติดต่อกับผู้ใช้ (user interface) มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ใช้งานได้ง่าย และเนื่องจากการออกแบบถนนคอนกรีตด้วยวิธี PCA มีลักษณะเป็นการออกแบบแบบลองผิดลองถูก (Trial and error) ส่งผลให้การใช้งานโปรแกรมจึงต้องมีการป้อนค่าใหม่หลายครั้ง ดังนั้นการออกแบบโปรแกรมในส่วนติดต่อกับผู้ใช้จึงได้แบ่งส่วนติดต่อกับผู้ใช้เป็น 2 ลักษณะคือ (1) ส่วนเมนู (Menu) และ (2) ส่วนปุ่มกด (Button) โดยในส่วนของเมนูจะเป็นส่วนที่เรียกใช้สำหรับ

การสั่งงานที่ไม่บ่อยครั้งมากนัก ในขณะที่ส่วนของปุ่มกดจะเป็นส่วนที่มีการใช้งานหลายครั้งในขณะทำการวิเคราะห์



รูปที่ 5 E-R Diagram ของโปรแกรม

ตารางที่ 2 รายละเอียดและประเภทของข้อมูลในโมดูล

โมดูล	ชื่อ	ชนิด	คำอธิบาย
project information	pro_name	string	ชื่อโครงการ
	e_name	string	ชื่อวิศวกรผู้ออกแบบ
	d_year	integer	อายุการออกแบบ
	d_date	string	วันที่ออกแบบ
Traffic data	adt	integer	ปริมาณจราจร
	p_truck	float	สัดส่วนรถบรรทุก
	d_split	float	สัดส่วนการกระจายปริมาณจราจรต่อทิศทาง

ตารางที่ 2 รายละเอียดและประเภทของข้อมูลในโมดูล (ต่อ)

โมดูล	ชื่อ	ชนิด	คำอธิบาย
Traffic data	l_split	float	สัดส่วนการกระจายปริมาณจราจรต่อช่องทาง
	g_rate	float	อัตราการเพิ่มของปริมาณจราจร
Axle load data	single	list	น้ำหนักบรรทุกทุกเพลาดียว
	single_p	list	สัดส่วนบรรทุกทุกเพลาดียวในการจราจร
	tandem	list	น้ำหนักบรรทุกทุกเพลาคู่
	tandem_p	list	สัดส่วนบรรทุกทุกเพลาคู่ในการจราจร
Material data	base_k	float	โมดูลัสของชั้นดินเดิม
	mr_value	float	ค่าโมดูลัสแตกร้าวของคอนกรีต
	sb_type	string	ชนิดวัสดุของชั้นรองพื้นทาง
	sb_thick	float	ความหนาของชั้นรองพื้นทาง
Pavement data	trail_thick	float	ความหนาผิวทางที่ออกแบบ
	dowel_st	string	สถานะของเหล็กเดือย
	should_st	string	สถานะของไหล่ทาง
	load_safe	float	ค่า Load Safety Factor
Expected repetition	exp_single	list	จำนวนเที่ยวของรถบรรทุกเพลาดียวตลอดอายุการออกแบบ
	exp_tandem	list	จำนวนเที่ยวของรถบรรทุกเพลาคู่ตลอดอายุการออกแบบ
Erosion analysis single และ tandem	relative_stiff	float	radius of relative stiffness of the slab-subgrade system
	pc	float	แรงดันที่ผิวรอยต่อของแผ่นคอนกรีตและฐานรองรับ
	f5	float	ค่าแฟกเตอร์สำหรับน้ำหนักเพลาดียว
	f6	float	ค่าแฟกเตอร์สำหรับแผ่นคอนกรีตที่ไม่มีเหล็กเดือยที่รอยต่อ
	f7	float	ค่าแฟกเตอร์สำหรับกรณีล้อรถอยู่ตรงรอยต่อใกล้กับมุมของแผ่นคอนกรีต
	p	float	ค่ากำลังที่ทำให้เกิดการโก่งตัว
	delta	float	ค่าการโก่งตัวของแผ่นคอนกรีต
	c1	float	ค่าแฟกเตอร์
	c2	float	ค่าแฟกเตอร์
	ne	list	จำนวนเที่ยวที่ยอมให้

ตารางที่ 2 รายละเอียดและประเภทของข้อมูลในโมดูล (ต่อ)

โมดูล	ชื่อ	ชนิด	คำอธิบาย
Fatigue analysis single และ tandem	relative_stiff	float	radius of relative stiffness of the slab-subgrade system
	me	float	ค่าโมเมนต์ที่เกิดขึ้นในผิวคอนกรีต
	f1	float	ค่าแฟกเตอร์สำหรับน้ำหนักเพลลาและพื้นที่สัมผัสของล้อ
	f2	float	ค่าแฟกเตอร์สำหรับไหล่ทาง
	f3	float	ค่าแฟกเตอร์สำหรับผลของรถบรรทุกต่อขอบของถนน
	f4	float	แฟกเตอร์สำหรับความแปรผันของกำลังของคอนกรีต
	sal	float	น้ำหนักเพลลาบรรทุกทุกเพลลาเดี่ยว
	tal	float	น้ำหนักเพลลาบรรทุกทุกเพลลาคู่
	cv	float	สัมประสิทธิ์ของความแปรผัน
	stress	float	ค่าความเค้น
	nf	list	จำนวนเที่ยวที่ยอมให้

3.3 การตรวจสอบโปรแกรม

การทดสอบโปรแกรม โดยการให้ทำการวิเคราะห์ห่อแบบโดยใช้กราฟการออกแบบและทำการเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณโดยโปรแกรม ทำการเปรียบเทียบโดยใช้ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (Mean absolute percent error: MAPE) ดังสมการสมการที่ (34)

$$MAPE = \frac{\sum_{i=1}^n \left| \frac{e_i}{z_i} \right|}{N} \times 100 \quad (34)$$

โดยที่ e_i = ความแตกต่างของค่าที่ได้จากการอ่านกราฟและค่าที่ได้จากโปรแกรม

z_i = ค่าที่ได้จากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น

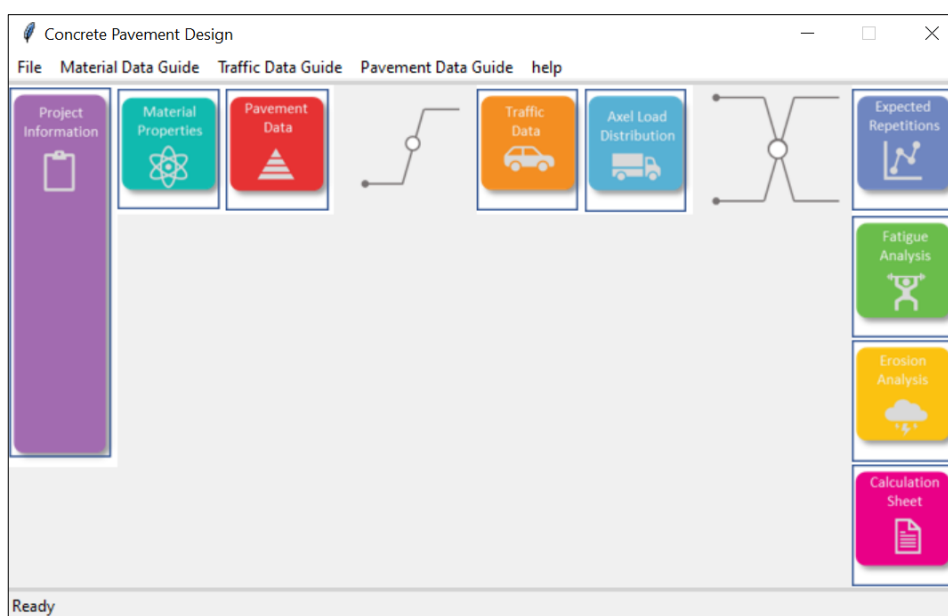
N = จำนวนข้อมูลทั้งหมดที่นำมาเปรียบเทียบ

4. ผลการวิจัย

โปรแกรมออกแบบผิวทางถนนคอนกรีตตามวิธีการของ PCA โดยใช้ภาษาไพทอนในการพัฒนา โดยใช้ไลบรารี Tkinter ในการพัฒนาส่วนติดต่อกับผู้ใช้ ดังแสดงในรูปที่ 6 ซึ่งผู้ใช้งานสามารถดำเนินการในส่วนที่เกี่ยวข้องกับ 1) การป้อนข้อมูลและการบันทึกข้อมูล 2) การแสดงข้อมูล และ 3) การสร้างรายงาน โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1 การเพิ่ม/ลบ ข้อมูล การป้อนข้อมูลและการบันทึกข้อมูล

การเพิ่ม/ลบ ข้อมูล การป้อนข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบผิวทางถนนคอนกรีตด้วยวิธี PCA มีข้อมูลที่เกี่ยวข้อง 5 ส่วน ได้แก่ 1) ข้อมูลเกี่ยวกับโครงการ 2) ข้อมูลวัสดุ 3) ข้อมูลเกี่ยวกับผิวทาง 4) ข้อมูลปริมาณจราจร และ 5) ข้อมูลการกระจายน้ำหนักบรรทุกของรถบรรทุก โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 6 หน้าจอหลักของโปรแกรม

1) ข้อมูลเกี่ยวกับโครงการ ได้แก่ ชื่อโครงการ ชื่อวิศวกร อายุการออกแบบ และวันที่ทำการคำนวณ โดยเลือกใช้ Widgets ชนิด Entry ในการนำเข้าข้อมูล โดยใช้ปุ่ม Project Information

2) ข้อมูลวัสดุ ได้แก่ ค่า modulus of subgrade reaction (k) ค่ากำลังรับแรงดัด (Flexural Strength) ของคอนกรีต ข้อมูลชนิดและความหนาของชั้นรองพื้นทาง โดยเลือกใช้ Widgets ชนิด Entry ในการนำเข้าข้อมูล โดยใช้ปุ่ม Material Data

3) ข้อมูลเกี่ยวกับผิวทาง ได้แก่ ความหนาของผิวทาง ข้อมูลเหล็กเสริมที่รอยต่อ ไหล่ทาง และ Load Safety Factor โดยเลือกใช้ Widgets ชนิด Radio button และ Combo box โดยใช้ปุ่ม Pavement Data

4) ข้อมูลปริมาณจราจร ได้แก่ ปริมาณจราจร (ADT) สัดส่วนรถบรรทุก การกระจายตามทิศทางการจราจร การกระจายตามช่องทางทางจราจร และ อัตราการเพิ่มของปริมาณจราจร โดยเลือกใช้ Widgets ชนิด Entry ในการนำเข้าข้อมูล โดยใช้ปุ่ม Traffic Data

5) ข้อมูลการกระจายน้ำหนักบรรทุกของรถบรรทุก แบ่งเป็นรถบรรทุกเพลาดียว และรถบรรทุกเพลาคู่ โดยเลือกใช้ Widgets ชนิด Entry ในการนำเข้าข้อมูล โดยใช้ปุ่ม Axle Load Distribution

ทั้งนี้การเพิ่ม/ลบ ข้อมูล การป้อนข้อมูล ผู้ใช้ดำเนินการโดยการใช้เมาส์กรอกช่องของข้อมูลซึ่งเป็น Widgets ชนิด Entry เพื่กรอกข้อมูลที่เกี่ยวข้องทั้ง 5 รายการ ส่วนการบันทึกข้อมูลการบันทึกข้อมูลผู้ใช้สามารถกดปุ่ม Save ในหน้าต่างของข้อมูลแต่ละรายการ ดังแสดงในรูปที่ 7

The screenshot displays five overlapping windows for data entry:

- Project Information:** Fields for Project Name (Project X), Engineer (Rata Eng), Design Year (20), and Date (20 DEC 2030). Buttons: Save, Close.
- Traffic Data:** Fields for Average Daily Traffic, ADT (1000), Proportion of Truck % (10), Directional Distribution % (50), Lane Distribution % (30), and Annual Growth rate % (1). Buttons: Save, Close.
- Pavement Data:** Fields for Trial Thickness (10 Inch), Dowel Joint (Yes/No), Concrete Shoulder (Yes/No), and Load Safety Factor (1.2). Buttons: Save, Close.
- Axle Load Data:** A table for Single Axle Load and Tandem Axle Load. Buttons: Save, Close.
- Material Properties:** Fields for Sub grade K (130 PCI), Sub base Type (Laterite), Modulus of Rupture (650 PSI), and Sub base Thickness (6 Inch). Buttons: Save, Close.

Single Axle Load		Tandem Axle Load	
Axle Load (Kips)	Axle/100	Axle Load (Kips)	Axle/100
30	5	52	5
28	10	48	10
26	15	44	15
24	20	40	20
22	25	36	25
20	30	32	30
18	35	28	35
16	40	24	40
14	45	20	45
12	50	16	50

รูปที่ 7 การนำเข้าและการบันทึกข้อมูล

4.2 การแสดงข้อมูล

การแสดงผลการคำนวณ เป็นการรายงานผลการคำนวณตามวิธีการออกแบบผิวทางตามวิธี PCA ซึ่งได้แบ่งผลการวิเคราะห์ออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ 1) จำนวนเที่ยวของรถบรรทุกประเภทต่าง ๆ ที่ผ่านโครงการตลอดอายุการออกแบบ 2) ผลการวิเคราะห์ความล้า และ 3) ผลการวิเคราะห์ความสึกกร่อน ดังแสดงในรูปที่ 8 และมีรายละเอียดดังนี้

Expected load						Fatigue Analysis Result					
Single Axle Load			Tandem Axle Load			Single Axle Load			Tandem Axle Load		
Axle Load (Kips)	Axle/100	Expected Rep	Axle Load (Kips)	Axle/100	Expected Rep	Axle Load (Kips)	Equivalent Stress	Stress Ratio	Axle Load (Kips)	Equivalent Stress	Stress Ratio
30	5	543478	52	5	543478	30	366.41	0.564	52	301.67	0.464
28	10	1086957	48	10	1086957	28	343.41	0.528	48	279.8	0.43
26	15	1630435	44	15	1630435	26	320.3	0.493	44	257.83	0.397
24	20	2173914	40	20	2173914	24	297.08	0.457	40	235.73	0.363
22	25	2717393	36	25	2717393	22	273.75	0.421	36	213.51	0.328
20	30	3260871	32	30	3260871	20	250.29	0.385	32	191.13	0.294
18	35	3804350	28	35	3804350	18	226.69	0.349	28	168.58	0.259
16	40	4347828	24	40	4347828	16	202.93	0.312	24	145.84	0.224
14	45	4891307	20	45	4891307	14	178.99	0.275	20	122.87	0.189
12	50	5434786	16	50	5434786	12	154.85	0.238	16	99.62	0.153

Erosion Analysis Result					
Single Axle Load			Tandem Axle Load		
Axle Load (Kips)	Power	Erosion Factor	Axle Load (Kips)	Power	Erosion Factor
30	32.6	4.433	52	39.16	4.593
28	28.4	4.313	48	33.37	4.454
26	24.49	4.185	44	28.04	4.302
24	20.86	4.046	40	23.17	4.137
22	17.53	3.895	36	18.77	3.954
20	14.49	3.729	32	14.83	3.749
18	11.74	3.546	28	11.35	3.517
16	9.27	3.341	24	8.34	3.249
14	7.1	3.109	20	5.79	2.933
12	5.22	2.842	16	3.71	2.545

รูปที่ 8 การแสดงผลการวิเคราะห์ของโปรแกรม

การแสดงผลข้อมูล ผู้ใช้ดำเนินการโดยการคลิกที่ปุ่ม ได้แก่ Expected Repetition Fatigue Analysis และ Erosion Analysis โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

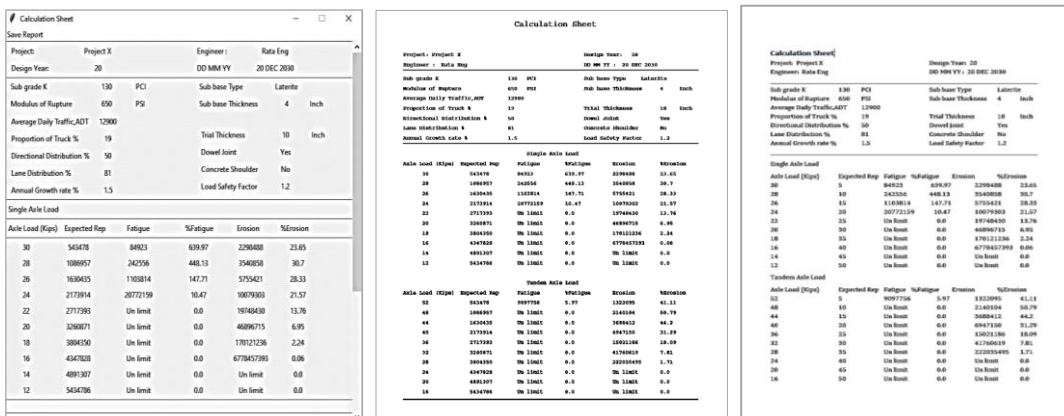
1) ปุ่ม Expected Repetition สำหรับเรียกดูผลการวิเคราะห์จำนวนเที่ยวที่เกิดขึ้นของรถบรรทุกประเภทต่าง ๆ ที่ได้กรอกข้อมูลไว้ โดยเลือกใช้ Widgets ชนิด Frame สำหรับการจัดตำแหน่งข้อมูลและตาราง และใช้ Widgets ชนิด Label ในการนำเสนอข้อมูล

2) ปุ่ม Fatigue Analysis สำหรับเรียกดูผลการวิเคราะห์ความล้าที่เกิดขึ้นของรถประเภทต่าง ๆ ได้แก่ ค่า equivalent stress และค่า stress ration สำหรับรถประเภทต่าง ๆ ทั้งชนิดเพลาดียวและเพลาคู่ โดยเลือกใช้ Widgets ชนิด Frame สำหรับการจัดตำแหน่งข้อมูลและตาราง และใช้ Widgets ชนิด Label ในการนำเสนอข้อมูล

3) ปุ่ม Erosion Analysis สำหรับเรียกดูผลการวิเคราะห์ความสึกกร่อนที่เกิดขึ้นของรถประเภทต่าง ๆ ได้แก่ ค่า Power และ Erosion Factor โดยเลือกใช้ Widgets ชนิด Frame สำหรับการจัดตำแหน่งข้อมูลและตาราง และใช้ Widgets ชนิด Label ในการนำเสนอข้อมูล

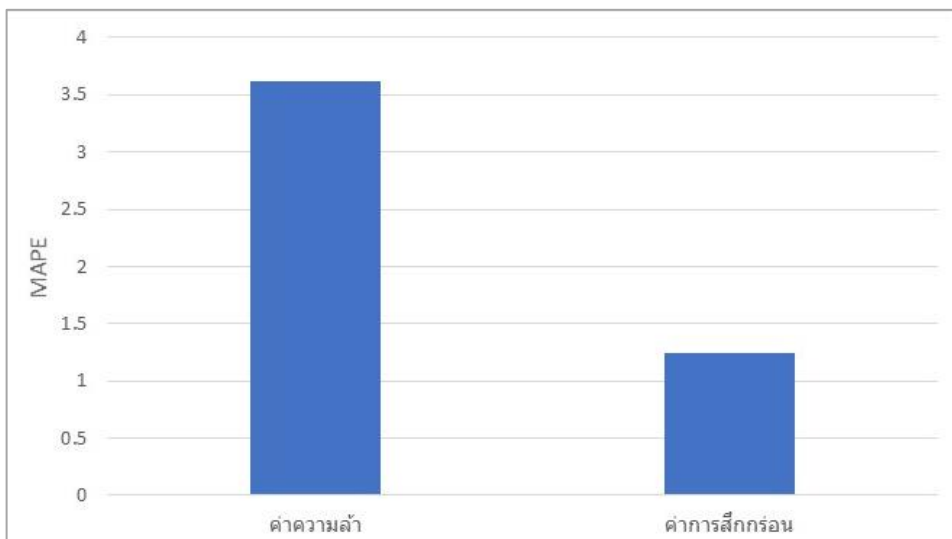
4.3 การสร้างรายงาน การเรียกดูและแสดงผล และการบันทึกผล

ผลการคำนวณ ได้แก่ จำนวนเที่ยวที่ยอมให้ ทั้งในกรณีการวิเคราะห์ความล้าและการวิเคราะห์การสึกกร่อน โดยเลือกใช้ Widgets ชนิด Canvas และ ชนิด Frame สำหรับการจัดตำแหน่งข้อมูลและตาราง เลือกใช้ Widgets ชนิด Scrollbar สำหรับเลื่อนหน้าแสดงผล และใช้ Widgets ชนิด Label ในการนำเสนอข้อมูล โดยใช้ปุ่ม Calculation Sheet โดยรายงานจะแสดงผลผ่านทางหน้าจอ รวมทั้งรายงานที่จัดทำขึ้นสามารถบันทึกผลในรูปแบบ pdf ซึ่งพัฒนาโมดูลการจัดเก็บโดยใช้ไลบรารี reportlab และเอกสาร words ซึ่งพัฒนาโมดูลการจัดเก็บโดยใช้ไลบรารี docx ดังแสดงในรูปที่ 9 การเรียกดูและแสดงผลการคำนวณสามารถใช้โปรแกรมในการเรียกใช้งานไฟล์ pdf เช่น acrobat reader ได้โดยตรง ส่วนรายงานในรูปแบบเอกสาร words สามารถเรียกใช้งานได้โดยใช้โปรแกรม ms words หรือ google docs ดังแสดงในรูปที่ 9



4.4 การตรวจสอบการทำงานของโปรแกรม

หลังจากการพัฒนาโปรแกรมเสร็จสิ้นเรียบร้อยแล้ว จึงได้ดำเนินการทดสอบและปรับแก้โปรแกรม โดยป้องกันข้อผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นในระหว่างการออกแบบและการเขียนโปรแกรม โดยได้ดำเนินการทดสอบโปรแกรมโดยใช้ค่าที่คำนวณในเอกสารของ PCA โดยใช้ข้อมูลตามตัวอย่างทดสอบการคำนวณของโปรแกรม ผลการทดสอบพบว่าผลการคำนวณที่แสดงในคู่มือของ PCA เป็นการประมาณค่าจากกราฟสำหรับการออกแบบ ดังนั้น ค่าที่ได้จึงเป็นค่าประมาณในขณะที่ค่าที่คำนวณได้จากโปรแกรมเป็นค่าได้จากการแทนค่าในสมการต่าง ๆ โดยค่า MAPE กรณีการวิเคราะห์ความล้มเหลวเท่ากับ 3.62 ส่วนการวิเคราะห์การสึกกร่อนมีค่าเท่ากับ 1.24 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการประมาณค่าจากกราฟมีค่าคลาดเคลื่อนไปจากค่าจริง ดังแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 10 ผลการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากโปรแกรมและคู่มือ PCA

สำหรับโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับโปรแกรมที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบผิวทางคอนกรีต เช่น โปรแกรม RPD ที่พัฒนาขึ้นจาก AASHTO supplemental guide [8] มีความแตกต่างในหลักการที่ใช้ในการออกแบบ รวมทั้งวิธีการในการพัฒนาซอฟต์แวร์โดยโปรแกรม RPD พัฒนาขึ้นโดยใช้การทำงานของ Macro ในโปรแกรม MS Excel ดังนั้น การใช้งานโปรแกรม RPD ต้องมีโปรแกรม MS Excel ในขณะที่โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้เป็นโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นจากภาษา PYTHON จึงสามารถทำงานได้โดยไม่ต้องมีโปรแกรมประยุกต์อื่น สำหรับโปรแกรม PCA WIN [4] ซึ่งเป็นโปรแกรมการออกแบบถนนคอนกรีตที่พัฒนาขึ้นเมื่อปี ค.ศ.2001 ซึ่งในขณะนั้นระบบปฏิบัติการคอมพิวเตอร์ที่ใช้อยู่ส่วนใหญ่เป็น Windows XP หรือรุ่นก่อนหน้านั้น การ

ทำงานของโปรแกรมจึงอยู่ในสภาพแวดล้อม 32 บิต ในขณะที่ Windows 10 ทำงานในสภาพแวดล้อม 64 บิต นอกจากนี้การแสดงผลของโปรแกรม PCA WIN ไม่สามารถสร้างรายงานในรูปแบบ pdf และ เอกสาร words ซึ่งเอกสารทั้งสองประเภทนี้เป็นรูปแบบเอกสารที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ดังนั้น โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นจึงมีข้อได้เปรียบกว่า PCA WIN ในเรื่องของการจัดทำรายงาน โดยผู้ใช้สามารถนำรายงานในรูปเอกสาร words ไปจัดทำรายการคำนวณได้โดยสะดวก

5. สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาและพัฒนาโปรแกรมสำหรับการออกแบบผิวทางคอนกรีตและนำไปทดสอบการใช้งาน พบว่าโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นสามารถที่จะทำการออกแบบผิวทางคอนกรีต ตามหลักการของวิธี Portland Cement Association (PCA) โดยโปรแกรมนี้พัฒนาขึ้นจากภาษาไพทอนซึ่งสามารถสร้างส่วนติดต่อกับผู้ใช้ด้วยรูปแบบกราฟฟิกในการป้อนข้อมูลและการแสดงผลของโปรแกรมจะมีลักษณะเป็นตารางซึ่งทำให้สะดวกในการใช้งาน และผลการทดสอบโปรแกรมพบว่ามีประสิทธิภาพในการคำนวณผลที่ดีและให้ค่าผลลัพธ์ที่มีความแม่นยำกว่าการประมาณค่าจากกราฟที่ใช้สำหรับออกแบบ

โปรแกรมสำหรับการออกแบบผิวทางคอนกรีตที่พัฒนาขึ้นอ้างอิงวิธีการออกแบบที่พัฒนาขึ้นมาเป็นเวลานาน ดังนั้น จึงมีข้อจำกัดในการนำมาใช้งานสำหรับถนนที่มีปริมาณจราจรสูง เช่น ถนนมอเตอร์เวย์ ถนนสายประธาน ซึ่งอยู่ภายใต้ความรับผิดชอบของกรมทางหลวง ทั้งนี้หน่วยงานระดับประเทศ เช่น กรมทางหลวงสามารถจัดหาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการออกแบบ ซึ่งมีราคาสูงมาใช้งานได้โดยไม่ติดปัญหาเรื่องงบประมาณ อย่างไรก็ตาม สำหรับถนนคอนกรีตที่รองรับปริมาณจราจรไม่สูงมากนัก เช่น ถนนในความรับผิดชอบขององค์การบริหารส่วนท้องถิ่น การจัดหาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่มีราคาสูงถึงปีละ 250,000 บาท สำหรับการออกแบบถนนในความรับผิดชอบเป็นไปได้อย่างยาก สำหรับโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นเป็นโปรแกรมต้นแบบจึงยังไม่ครอบคลุมวิธีการออกแบบที่มีการพัฒนาขึ้นมาในปัจจุบัน อย่างไรก็ตาม ในอนาคตผู้วิจัยจะมีการพัฒนาเพิ่มเติมโมดูลเพื่อเพิ่มความสามารถในการออกแบบของโปรแกรม เช่น การออกแบบด้วยวิธี AASHTO ปี ค.ศ. 1993 หรือ ปี ค.ศ. 2008 ซึ่งเป็นวิธีการที่กรมทางหลวงระบุไว้ในรายการข้อกำหนดสำหรับจ้างที่ปรึกษาในงานออกแบบของกรมทางหลวง หากการดำเนินการพัฒนาเพิ่มเติมวิธีการนั้น ๆ ไม่ติดปัญหาเรื่องลิขสิทธิ์

เอกสารอ้างอิง

- [1] AASHTO. Mechanistic-empirical pavement design guide. Washington D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2008.
- [2] Portland Cement Association. Thickness design for concrete highway and street pavements. Illinois, USA: Portland Cement Association, 1984.
- [3] Jenjiwattanukul T, Sano K. Pavement thickness design thresholds of having doweled joints and concrete shoulders. Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, 2011.
- [4] Lee Y, Carpenter SH. PCAWIN Program for jointed concrete pavement design, Tamkang Journal of Science and Engineering 2001;4(4):293-300.
- [5] Bureau of Road Research and Development. Manual of design and analysis of pavement structure. Bangkok, Thailand: Department of Highways, Bangkok, 2013. (In Thai)
- [6] Uprasitwong P. Principles of programming in PYTHON language. Bangkok, Thailand: S. Asia Press (1989); 2021. (In Thai)
- [7] Thearmontree S. PYTHON programming language guide. Nonthaburi, Thailand: ICD Premier; 2010. (In Thai)
- [8] FHWA. Long-term pavement performance project [Internet]. 2006 [cited 2021 June 11]. Available from: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/ltp/ppt/rig2.ppt>.

ประวัติผู้เขียนบทความ



รศ.ดร.วิรัช หิรัญ ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร เลขที่ 59/5 หมู่ 1 ถนน วปรอ.366 ตำบลเชียงเครือ อำเภอเมือง จังหวัดสกลนคร 47000 โทรศัพท์ 0-4272-5033 อีเมล: wirach.hi@ku.th

งานวิจัยที่สนใจ: การวางแผนการขนส่ง, วิศวกรรมจราจร, การออกแบบทางหลวง, การออกแบบผิวทาง.



ผศ.จิตาภรณ์ พอบุตรดี ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะ
วิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขต
เฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร เลขที่ 59/5 หมู่ 1 ถนน วปรอ.366 ตำบล
เซียงเครือ อำเภอเมือง จังหวัดสกลนคร 47000 โทรศัพท์ 0-4272-5033
อีเมล: titaporn.pob@ku.th

งานวิจัยที่สนใจ: การจัดการงานก่อสร้าง, ประเมินราคางานก่อสร้าง, การ
ออกแบบทางหลวง, การออกแบบผิวทาง

Article History:

Received: March 23, 2021

Revised: August 25, 2021

Accepted: August 25, 2021

ACCESSIBILITY ANALYSIS FOR NAKHON RATCHASIMA LIGHT RAIL TRANSIT STATION

Pawitchaya Phuengkoksung¹, Siradol Siridhara² and Somsiri Siewwuttanagul³

¹Master Student, The Cluster of Logistics and Rail Engineering, Faculty of Engineering,
Mahidol University, 25/25 Phuttamonthon 4 Rd, Salaya, Phuttamonthon, Nakhon Pathom
73170 Thailand, pawitchaya21@gmail.com

^{2,3}Lecturer, The Cluster of Logistics and Rail Engineering, Faculty of Engineering,
Mahidol University, 25/25 Phuttamonthon 4 Rd, Salaya, Phuttamonthon, Nakhon Pathom
73170 Thailand, ²siradol@gmail.com, ³somsiri.sie@mahidol.ac.th

ABSTRACT

Nakhon Ratchasima Municipality has planned to develop and reform the basic infrastructure and transportation by constructing the Light Rail Transit (LRT) as an alternative public transport system. Moreover, are development to facilitate for public transport connections and the walkway safety are also included in the development plan. This present research aimed to identify catchment areas around LRT stations by referring to acceptable walking distances to LRT stations as follows - 324 meters, 400 meters, 500 meters, 648 meters, 800 meters, and 960 meters. These walking distances were used with Circular Buffer and Network Analyst Service Area techniques in order to calculate for the proportions of LRT accessibility. Employing ArcGIS 10.4 program for desktop to analyze spatial data, this research found that the areas around LRT stations in the urban area of Nakhon Ratchasima had higher accessibility level than the suburbs. The data indicated that the areas around the stations located in the urban area were suitable for pedestrian network development. In order to develop mass transit system within the area of Nakhon Ratchasima Municipality, it was suggested that feeder system in the suburbs should also be developed with less proportion of LRT accessibility than the urban area for users' convenience. It was expected that the more accessible the LRT stations was, the more job opportunities and residential space would be available.

KEYWORDS: Accessibility, Geographic Information System, Light Rail Transit, Spatial Analysis, Nakhon Ratchasima

1. Introduction

The urban area of Nakhon Ratchasima has been recognized as the high potential area for developing the connecting spot to the high-speed rail in the future. To prepare for the increasing need of travel, public transportation system in the area is required to be improved. Given this, Traffic Management and Public Transport Development master plan in Nakhon Ratchasima urban areas was studied in order to reform the basic infrastructure and transportation in the province. As a result, Light Rail Transit (LRT) is the project approved for offering an alternative public transportation choice in the province. The areas for public transport connections are also expected to be developed for the more effective transportation system. According to the strategy of Area Development [1], the development of feeder system helps expand catchment areas of LRT to cover all areas and enable users living far from stations to travel seamlessly to their destination without using their personal vehicles. The project emphasizes pedestrian safety and convenience. This concept agrees with Calthorpe's [2] notion that the goals of area development consist of accessibility, convenience of public transport users, and compact city. Such the compact city could create new pedestrians; therefore, the area development is considered to be the preparation for the city growth [3]. Similar to the notion of Transit Oriented Development (TOD), mixed-used communities, in which people are able to walk to the center of the high-speed rail system, are recommended to reduce users' dependence on personal vehicles and save more energy [4].

This current research aimed to identify catchment areas around LRT stations by referring to acceptable walking distances to LRT stations as follows - 324 meters, 400 meters, 500 meters, 648 meters, 800 meters, and 960 meters. These walking distances established the coverage areas around LRT stations. They could be viewed as indicators which could be divided into in two forms of distances: Euclidean distance and network distance. By calculating the proportion from the walking distances and area sizes, station accessibility was evaluated. In addition, a geographic information system (GIS), was used as an instrument for analyzing spatial data.

2. Previous Work

2.1 Transit Oriented Development (TOD)

Transit Oriented Development (TOD) is an integrated urban areas designed for maximizing the use of public areas with easy walking and cycling connections and convenient public transit service to the rest of the city [5]. The Next America Metropolis defines that Transit-Oriented Development (TOD) is mixed land use such as residential areas, commercial areas, or places in which people can be access to the central transit by walking to their workplaces [2]. This agrees with another work on assessing the social and economic effects of transportation projects [6] which found that the improvement of walkway was the key factor for enhancing better communities. The areas where TOD is promoted is considered as the center of mass transit and located near public transport stations within 10 minute walk or 500-800 meters from the stations [7, 8]. Factors influencing physical environmental development of TOD areas affect the number of public transportation users and help reduce dependence on personal vehicles. Furthermore, the improvement of transportation route conditions helps increase the use of a bicycle [9].

2.2 Typology of Transit Oriented Development (TOD)

TOD can be divided into different ways [2]. Types of TOD can be differentiated by locations and public transport connections. The term Urban TOD is defined as the TOD located on main transportation networks or the TOD that connects to urban public transportation systems. This type of TOD is collaboratively developed with business zones and high residential density zones. Different from Urban TOD, Neighborhood TOD is located in lower density areas. This type of TOD is located on Feeder public transport networks [8]. Also, Transit Oriented Development can be divided according to types of stations (Node) and areas around the stations (Place). Node indicates the main roles of areas. These areas are comparatively important because they connect to public transport networks. On the contrary, place demonstrates the roles of areas for various activities. It is necessary that the development of areas around stations or stops should balance the roles of node and Place in order to optimize the use of areas. Developing transit-oriented development (TOD) typologies is an effective strategy for urban sustainability [10]. The comparative analysis of TOD typologies, in terms of extending 'node-place' model, involves increasing dimension on

node–functionality–place. This model was applied to five cities in China. It was found that all five cities adopted similar spatial pattern. This study contributed to planners and policymakers in performing strategic town planning.

2.3 Accessibility

The main role of transportation system is to offer convenient accessibility between people and business and to facilitate exchanges of product information and services [11]. The accessibility is an essential element of transportation. It exhibits the agility of product or information transportation [12]. According to article about classifying sky train stations by building use and accessibility In Bangkok, the use of high-density buildings and the accessibility to the areas around stations from the feeder transportation system were correlated with the number of sky train users [13]. Hence, these factors have become the significant factors for its catchment area development concept (TOD) [2]. The research investigating the measurement of land usage accessibility development [14] underscored that passenger behaviors depend on their accessibility to areas and forms of land usage [15].

2.4 Measuring Accessibility

Accessibility is the measure of the capacity of a location. Basic infrastructure management has become the key for accessibility which helps indicate spatial inequality [12]. Accessibility to many types of facilities has been widely recognized in the field of sustainable city planning [16]. The public transit accessibility to educational facilities was evaluated in India using spatial techniques [16]. The study compared Euclidean and network distance, also known as detour indices. Descriptive statistics and regression analysis were two main tools for evaluation. The analysis identified local obstacles and network problems which have impacts on the public transit accessibility [17]. Accessibility to amenities, services, and facilities (ASF) from public transit was measured by employing two types of spatial distance accessibility measures. In the early stage, the Euclidean distance was compared using Google API along with other mobile applications. After that the study focused on network distances using Open Street Map (OSM). At the second stage, Indicators (Euclidean vs. network) helped identify the local barriers and problems with network access that affect the actual network distance. This also helped policymakers identify gaps in public transit

coverage and accessibility to the ASF. Detour Index reveals the relationship between transport networks and straight distance. The higher the Detour Index value is, the more transport networks inclined toward straight distance [18]. The efficiency of transport networks can be measured by the Detour Index. That is, transport networks will have more spatial efficiency when the Detour Index is close to one [19]. Two types of distances, namely Euclidean and network distances, are compared from the station to a fixed destination.

$$DI = \frac{D(S)}{D(T)} \quad (1)$$

where D(S) and D(T) refer to Euclidean and network distances respectively.

Accessibility measurement using the Circular Buffer method considers all areas around the targeted spot based on distance selected for studying. Network Analyst Service Area can also be adopted to identify geographical environment around the targeted spot and distance selected for studying. A public transport research in Denmark borrowed detour index to show catchment areas by using proportion analysis between Circular Buffer and Network Analyst Service Area. Detour Index (DI) is equal to length of the route divided by the geographical distance between the origin and the end [20]. This technique helps measure accessibility. If the proportion is close to 1, it indicates good accessibility.

2.5 Walkability

Walkability is significant for planning highly effective cities. A walkability research in Italy explored techniques for measuring the quality of walkway and walkability toward the railway station. The research considered key factors influencing walkability in urban areas [21]. Other studies about analysis of transit service areas using by GIS, it was reported that walking distances to reach public transit, bus stops and railway stations, from starting points are 550 meters and 1,200 meters respectively [22]. Sangsila [23] studied pedestrians' behaviors in using Bangkok Mass Transit System skytrain at a distance of 500 meters. It was found that pedestrians were less likely to use public transit every 100 meters father from stations. People preferred walking at a distance of 200-300 meters according to studies of Sakdasak [24] and also investigate catchment areas around Talad Bang Yai station. He highlighted

that areas in Bang Yai were appropriate for undertaking TOD because rail users were able to reach the station within 5-10 minutes or 500 meters. The 500 meter radius determined according to studied Sangsila [23, 24] conformed to a study in Nakhon Ratchasima urban areas which was included in the Area Development Plan for Integrating Public Transportation Connections. Moreover, Kho-oomklang [25] studied about acceptable walking distance to reach the public transit system in Nakhon Ratchasima Municipality by applying Price Sensitivity Meter (PSM) in her research. Her research revealed that the longest walking distance that passengers would decide to walk to the LRT stations was between 324 – 648 meters in normal climate. Duncan et al [26] studied about inspected the accuracy of Walk Score and Transit Score by using the data gathered from GIS and divided the ranges of road networks into 400 meters and 800 meters. The correlation analysis reported significant values for bus stops and subway which related to Walking Score at a distance of 400 meters and Transit Score at a distance of 800 meters. Thus, it could be concluded that Walk Score is the accurate indicator for measuring walkability. Similar to research of Carr et al [27] studied was, the accuracy and the reliability of Walk Score used for estimating walkable access to facilities were testified. The results confirmed that Walk Score was a reliable and accurate measurement for estimating walkable access to facilities. Walk Score could be one convenient option for researchers who would like to investigate a relationship between walkable access to facilities. Transport for London [28] highlighted transportation and public transit connectivity dealing with Public Transport Access Level (PTAL) that it was a measurement for public transit system connectivity in London which related to walkability. The measurement referred to the distance to the nearest station, waiting time and service frequency, and the nearness of the main railway station. To measure accessibility, a Point of Interest (POI) and Service Access Points (SAP) needed to be determined. The average walking speed reported in Transport for was 4.8 kilometers per hour. The walking time to reach the nearest bust terminal was within 8 minutes or 640 meters. The walking time to the railway station reported was 12 minutes or 960 meters.

3. Materials and Methods

3.1 Area of Studies

The area of Nakhon Ratchasima Municipality, Muang district, Nakhon Ratchasima has an area around 37.5 square kilometers.

Nakhon Ratchasima LRT network consists of two phases as shown in figure 1. Phase 1 comprises the orange and green lines. The orange line runs through the economic growth area with the entertainment area, the hospital, and the old town for a total distance of 9.81 kilometers with 19 stations. The green line runs from a large market of the municipality through and the city's main railway station. This route provides access to government offices, schools, and Suranaree monument, with a distance of 11.17 kilometers and 20 stations. Phase 2 includes the purple line which connects Nakhon Ratchasima Bus Terminal with large shopping centers. This line is 7.14 kilometers long and contains 17 stations [1].

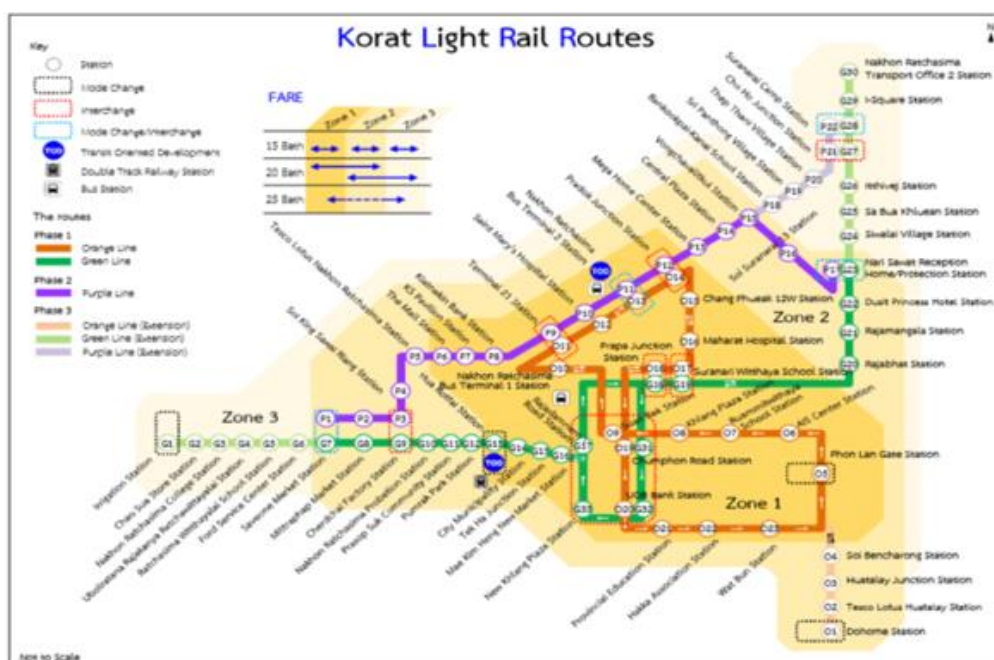


Figure 1 The light rail transit (LRT) station [1]

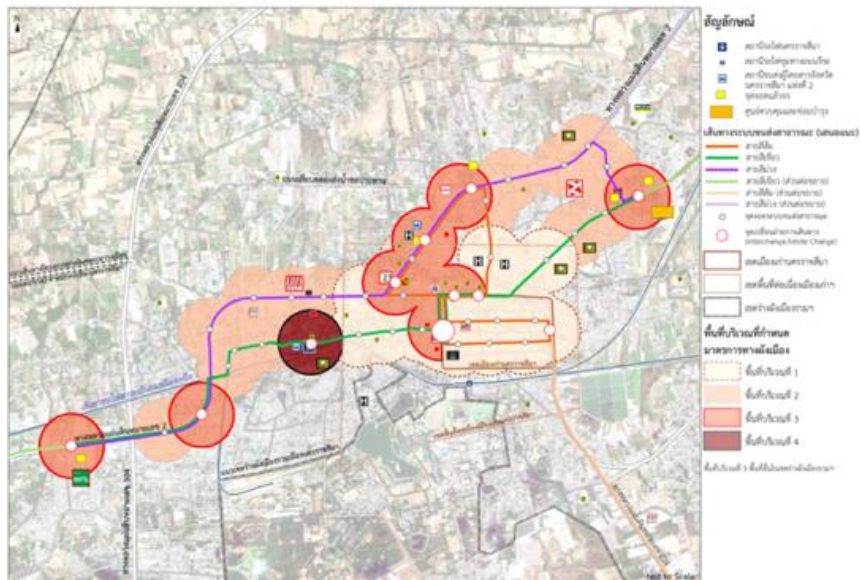


Figure 2 Area classification [1]

The study project of Traffic Management and Public Transport Development in Nakhon Ratchasima urban areas identified the area development along with the construction of LRT routes. The development can be divided into 4 areas: (1) the old town areas around LRT stations and the continuous areas; (2) the areas outside the old town and continuous areas; (3) the areas around LRT stations which are expected to be LRT interchanges and transport mode change; and (4) the areas around stations at the Transit Oriented Development (TOD) zones.

3.2 Data collection instruments

The ArcGIS 10.4.1 program for Desktop was employed for saving digital data and determining Universal Transverse Mercator (UTM). The mapping control followed Indian 1975 reference. Therefore, the coordinate systems on the map used in this research were Indian 1975/UTM Zone 47 and Indian 1975/UTM Zone 48 [29].

3.3 Data analysis and interpretation

3.3.1 Point data layers of 19 orange-line stations, 20 green-line stations, and 17 purple-line stations were created by ArcGIS 10.4.1 program for Desktop as shown in figure 3 in order to analyze Circular Buffer and calculate area sizes based on Euclidean Distance within 324 meters, 400 meters, 500 meters, 648 meters, 800 meters, and 960 meters.

3.3.2 To create Polygon data of 19 orange-line stations, 20 green-line stations, and 17 purple-line stations, the researcher used GIS Application together with Network Analysis [30] and Service Area at of distances of 324 meters, 400 meters, 500 meters, 648 meters, 800 meters and 960 meters. The buffer distance is taken as the service area distance. The area sizes were calculated by adopting Network Distance.

3.3.3 The Euclidean Distance and Network Distance data were used for analyzing proportion.

3.3.4 Then, the GIS application is used for analysis via Inverse Distance Weighted (IDW) method. The proportions values are taken with the IDW. The methods mentioned above are Interpolate a raster surface from points.

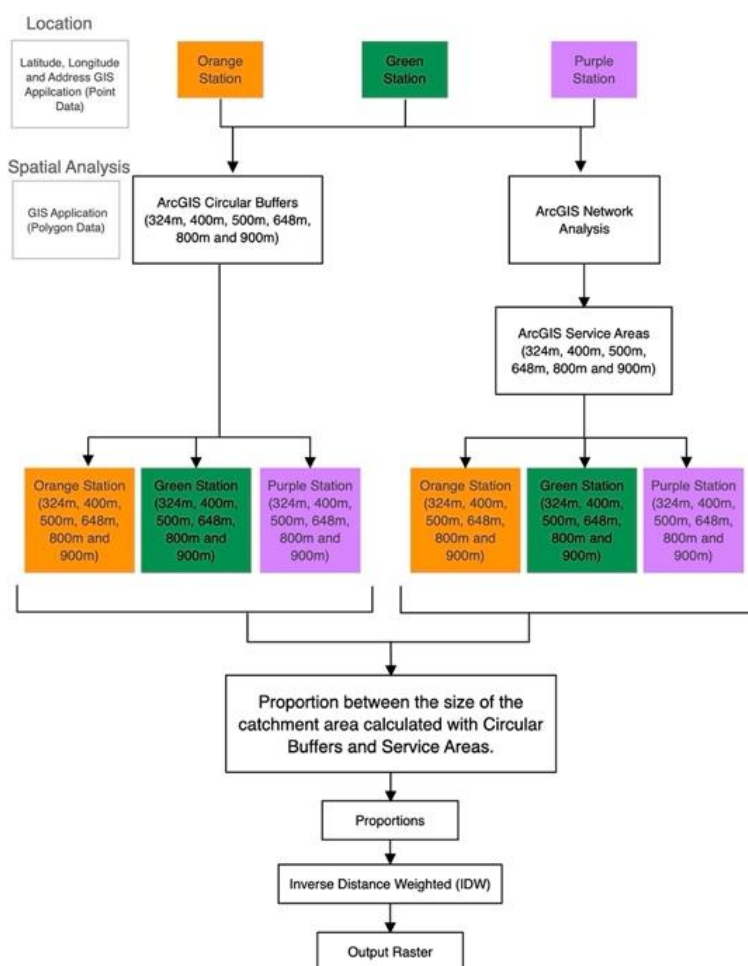


Figure 3 Method adopted in ArcGIS 10.4.1 for Desktop

4. Results

After calculating IDW and Euclidean-Network distance proportions were calculated and compared among stations and transit lines. Shown in figure 4 to figure 14 and table conclude the key indicators findings of the analysis.

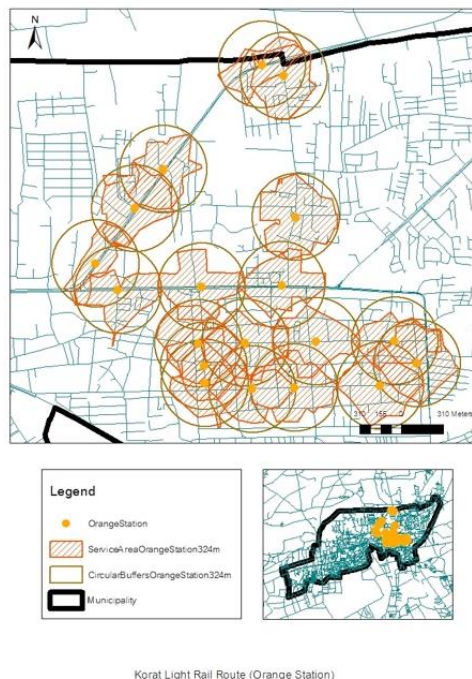


Figure 4 The result generated from ArcGIS 10.4.1 for Desktop is Catchment area of Korat Light Rail Route (Orange Station) in Nakhon Ratchasima Municipality. Circular Buffer Approach and Service Area Approach.

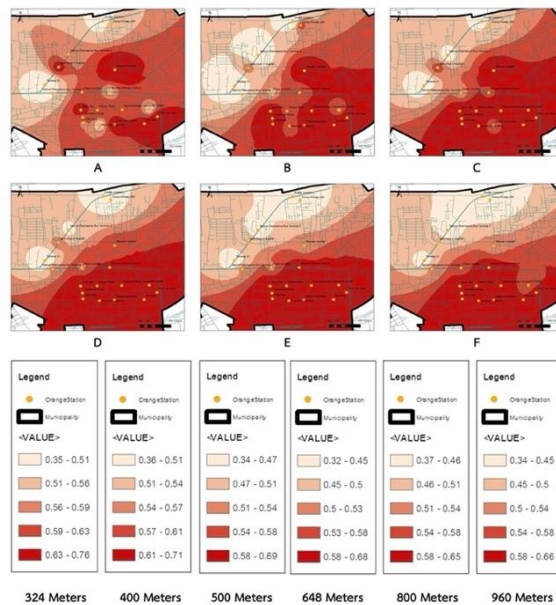


Figure 5 Inverse Distance Weighted (IDW) of Orange Stations: picture A 324 meters, picture B 400 meters, picture C 500 meters, picture D 648 meters, picture E 800 meters, and picture F 960 meters.

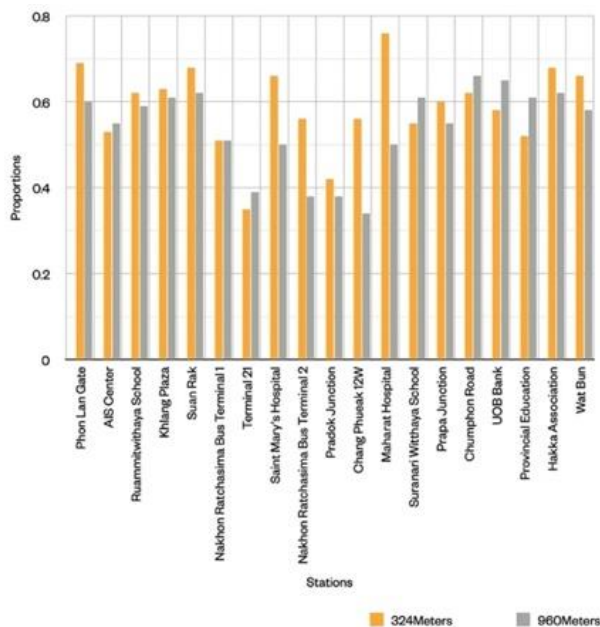


Figure 6 Proportion around LRT stations (Orange line) at distances of 324 meters and 960 meters.

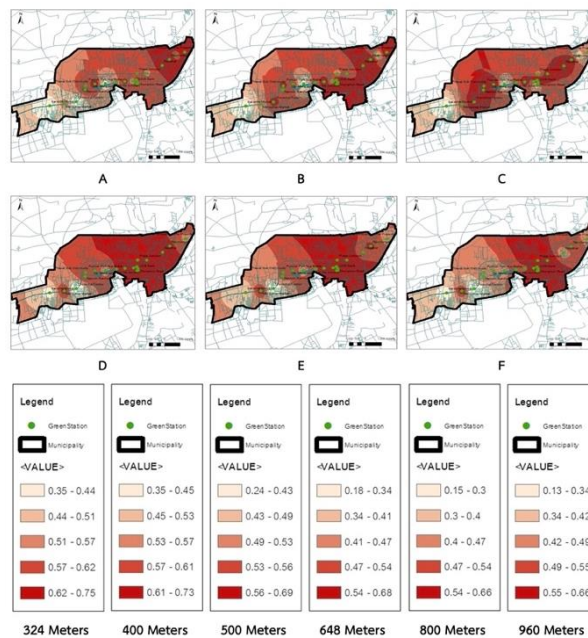


Figure 7 Inverse Distance Weighted (IDW) of Green Stations: picture A 324 meters, picture B 400 meters, picture C 500 meters, picture D 648 meters, picture E 800 meters, and picture F 960 meters.

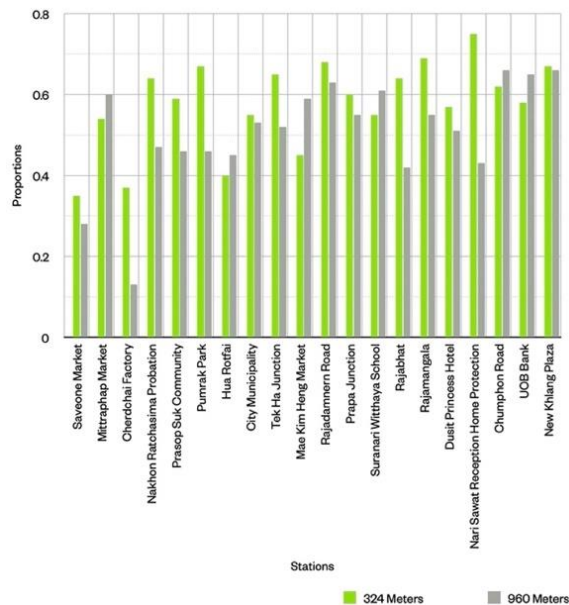


Figure 8 The proportion around green-line LRT stations at distances of 324 meters and 960 meters.

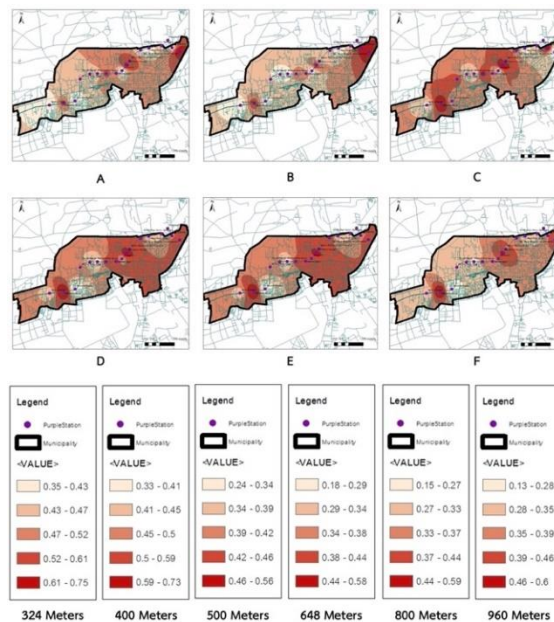


Figure 9 Inverse Distance Weighted (IDW) of Purple Stations: picture A 324 meters, picture B 400 meters, picture C 500 meters, picture D 648 meters, picture E 800 meters, and picture F 960 meters.

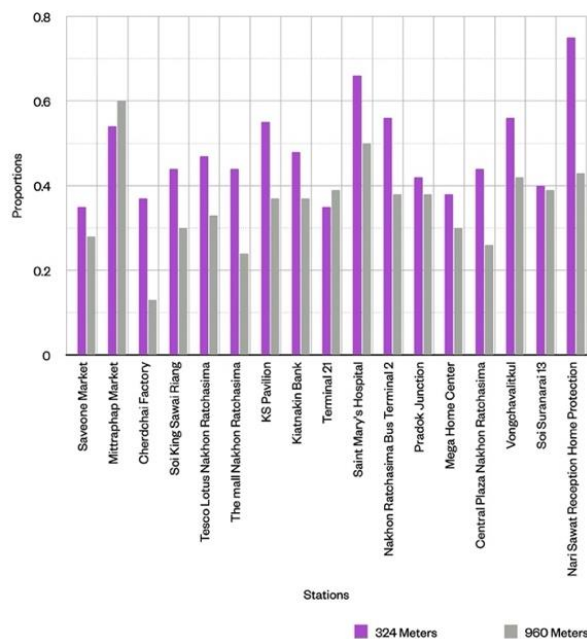


Figure 10 Proportion around LRT stations (Purple line) at distances of 324 meters and 960 meters.

Table 1 The Range of Proportion of catchment area around Korat Light rail Transit Stations.

Light rail Transit	Average	S.D.	Maximum	Minimum
Orange Line	0.56	0.10	0.76 (Maharat Hospital station)	0.32 (Terminal 21 station)
Green Line	0.54	0.12	0.75 (Nari Sawat Station)	0.13 (Cherdchai Factory station)
Purple Line	0.41	0.11	0.75 (Nari Sawat Station)	0.13 (Cherdchai Factory station)

These stations were selected to represent the accessibility of various area types such as urban, suburbs, central business districts (CBD), and Transit-Oriented Development (TOD). The CBD areas were located near 7 orange-line and green-line stations, while a few presented for purple line. The urban area had the highest average proportion of accessibility. The suburban area had far less accessibility than the urban area. Finally, the results show the proportion of the catchment area for each station, which was expected to become a TOD, as shown in figure 11-14.

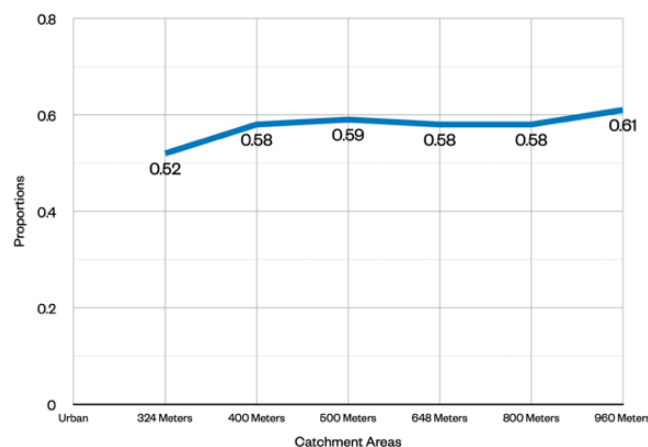


Figure 11 Proportion of the urban area: Provincial Education station (orange line)

The average proportion was 0.57 (S.D.=0.09). The highest proportion was 0.76 and the lowest proportion was 0.32.

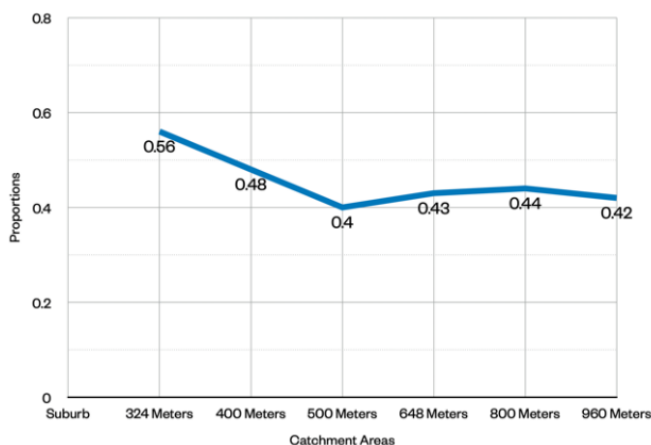


Figure 12 Proportion of the suburban area: Vongchavalitkul station (purple line)

The average proportion was 0.44 (S.D.=0.13). The highest proportion was 0.75 and the lowest proportion was 0.13.

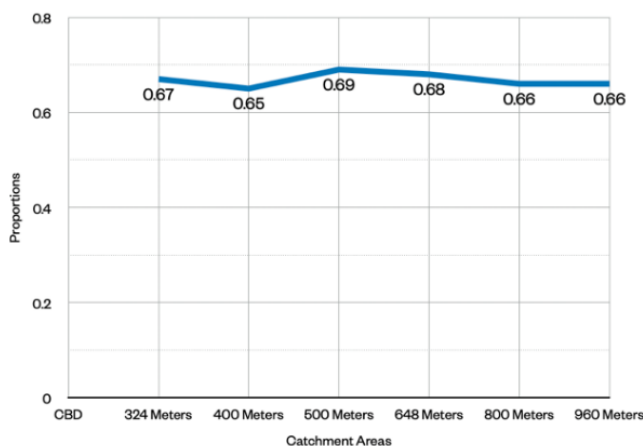


Figure 13 Proportion Central Business District: New Khlang Plaza station (green line)

The average proportion was 0.65 (S.D.=0.03). The highest proportion was 0.71 and the lowest proportion was 0.58.

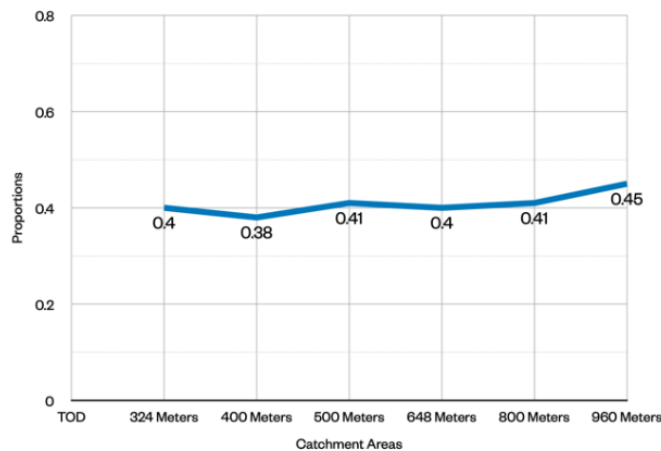


Figure 14 Proportion Transit Oriented Development (TOD): Hua Rotfai station (green line)

The average proportion was 0.43 (S.D.=0.05). The highest proportion was 0.56 and the lowest proportion was 0.38.

5. Discussion and Conclusion

The accumulated evidence indicated that the analogy of distance types show that Cartesian distances (Euclidean and Manhattan distances) are strongly correlated with more precise network distances [31]. In 2017 Suber [32] studied public transportation accessibility impact. The findings indicated that accessibility measures for educational facilities are largely concentrated on the number of facilities within certain metres or minutes to the closest service. These distances are calculated based on several types (1) Euclidean distance, (2) Manhattan distance (3) Network distance and (4) Minkowski distance method [31]. Furthermore, revealed show that Euclidean (near) distance and network distance are reasonable in context to accessibility measures [33]. This study aimed to conduct general last mile mode choice behavior for Nakhon Ratchasima's potential LRT users with no specific origins and destinations.

The method used in this current research helped measure area accessibility which could be easily applied in the actual areas. The spatial analysis around LRT station at distances of 324 meters, 400 meters, 500 meters, 648 meters, 800 meters, and 960 meters within the area of Nakhon Ratchasima Municipality was undertaken by ArcGIS 10.4 for Desktop. The

author uses the official shapefile from Nakhon Ratchasima Municipality and the school of remote sensing, institute of science, Suranaree university of technology. Both of them use Universal Transverse Mercator (UTM) system, Indian 1975/UTM Zone 47 and Indian 1975/UTM Zone 48 most importantly, in 2017 Jirakajohnkool wrote in ArcGIS desktop 10.5 that Thailand commonly uses Universal Transverse Mercator (UTM). The above system is accurate in terms of shape, area, distance, and direction most close to reality [30]. The accessibility to the areas around the LRT stations in Nakhon Ratchasima Municipality can be concluded as follows.

1) The urban areas had higher average proportion than the suburban areas. This is because the urban area had road networks around LRT stations or 68 % of Grid Network. The characteristics of roads in the area are connected. Moreover, there are numerous local streets which help support the area accessibility. It is also the Central Business District (CBD) the urban area had the highest average proportion of accessibility. Given this, quality walkway as well as slope ramps for disabilities can be further developed along with the LRT system. Facilities and environment should also be improved. More streetlights and a security camera system should be installed to create reliable services for users. This could urge service users to walk to the public transit instead of using personal vehicles.

In the urban area, several lines of minibus stop at almost every LRT station. This indicates that the feeder system within the area is efficient enough to support public transport users in the future. However, the feeder system still needs to be further developed in some stations, such as City Municipality station, Provincial Education station, and Hakka Association station, because there is only one line of minivans stops at those stations. In the future, when the LRT system operates, there will be higher demand of travel in those areas. This could lead to inadequate public transport services in the areas. Hence, in those stations, an increase in the number of minibuses should be adopted as those stations are in the old town area with dense communities, however, based upon future demand.

2) The suburban area has Linear-Network roads around stations. This type of roads cuts through communities and separates into local streets. Mittraphap Road or Highway 2 passes through 17 stations and Transit Oriented Development (TOD) zones which is Nakhon Ratchasima Bus Terminal². This is the spot for public transport mode change for all modes of public transport services: category 1-4. Moreover, Suranarai road or highway 205 passes through 4 stations and communities with 6 stations. 1 of 6 stations, Hua Rodfai station, is

the Transit Oriented Development (TOD) spot connecting both high-speed and double track railway projects. It is possible that there will be higher demand of transportation in the future. The average proportion of accessibility in the suburban area is less than the proportion in the urban area because the main intercity highway is in the suburban. The areas around stations are far from communities and has low population density. Therefore, the walkway development might not be necessary in some stations because service users are not able to walk to these LRT stations. The priority should be given to the feeder system development which better supports the service users. This could lead to the accessibility to job opportunities, residential areas, or basic infrastructure. More importantly, to create eco-friendly communities, the areas around Nakhon Ratchasima Bus Terminal2 and Hua Rodfai stations need to be developed according to the principles of Transit Oriented Development (TOD). To reduce the use of personal cars, walking and cycling should also be promoted. This is recognized as the effective public transport development for the increasing urban area accessibility. Also, the measurement for Compact City planning needs to be promoted with various kinds of activities. Eventually, it will become the center attracting more people with convenient public transport connectivity.

The development of the feeder system in the suburban area is profoundly significant because of the low accessibility of the stations especially outside the CBD area. It is also necessary to improve public transportation modes in this area to support public transport users.

The suburban area consists of a number of residential zones, communities, and economic activities in Nakhon Ratchasima. It is suggested that the feeder system station that should be developed for Chang Phueak 12W station. This is because there are numerous communities in this area with only one line of minibus available. Additionally, it is necessary to provide the users with paratransit to fill the gaps where public transport cannot successfully operate.

6 Recommendations

6.1 The study of accessibility to catchment areas around LRT stations can be further developed and improved for planning traffic policy in the future.

6.2 In the future, the development of area accessibility to LRT stations will increase users' demand for public transportation. This could help reduce traffic density resulting from the use of personal cars.

6.3 The study of area accessibility is useful for selecting appropriate LRT stations which will be suitable for developing quality walkway in the future.

6.4 The study of area accessibility helps develop connectivity of all kinds of transportation in order to create seamless travel.

Acknowledgement

My sincere gratitude goes to Cluster of Logistics and Rail Engineering, Faculty of Engineering, Mahidol University

References

- [1] Office of Transport and traffic policy and planning. The study of traffic management and public transport development master plan in Nakhon Ratchasima urban areas 2017. (In Thai)
- [2] Calthorpe P, Poticha S. The next American metropolis ecology, community, and the American dream. New York, USA: Princeton Architectural Press; 1993.
- [3] Carlton I. Histories of transit-oriented development perspectives on the development of the TOD concept real estate and transit, urban and social movements, concept protagonist [Working paper]. California, United States; 2009.
- [4] Transit oriented development institute [Internet]. [cited 2021 Jan 20]. Available from: <http://www.tod.org>.
- [5] TOD standard. Institute for transportation & development policy [Internet]. 2017 [cited 2021 Jan 20]. Available from: <https://www.itdp.org/2017/06/23/tod-standard/>.
- [6] Forkenbrock DJ, Benshoff S, Weisbrod GE. Assessing the social and economic effects of transportation projects. Transportation research board 2001.
- [7] Belzer D, Autler G, Espinosa J, Feigon S, Ohland G. The transit-oriented development drama and its actors. The new transit town best practices in transit-oriented development. Transportation research board 2004;43.

- [8] Bertolini L. Spatial development patterns and public transport the application of an analytical model in the Netherlands. *Planning practice and research* 1999;14(2):199-210.
- [9] Higgins CD, Kanaroglou PS. A latent class method for classifying and evaluating the performance of station area transit-oriented development in the Toronto region. *Journal of transport geography* 2016;52:61-72.
- [10] Su S, Zhang H, Wang M, Weng M, Kang M. Transit-oriented development (TOD) typologies around metro station areas in urban China: a comparative analysis of five typical megacities for planning implications. *Journal of transport geography* 2021;90:102939.
- [11] Miller EJ. Accessibility measurement and application in transportation planning. *Taylor & Francis Journals* 2018;38(5):551-5.
- [12] Rodrigue JP. The geography of transport systems. 5th ed. London, UK: Routledge Taylor & Francis; 2020.
- [13] Khwanfai W. Classifying skytrain stations by building use and accessibility a case study of Sukhumvit line and Silom line. *Academic journal of architecture* 2019;69:33-46. (In Thai)
- [14] Geurs KT, Wee BV. Accessibility evaluation of land-use and transport strategies review and research directions. *Journal of transport geography* 2004;12(2):127-40.
- [15] Sarkar PP, Mallikarjuna C. Effect of land use on travel behaviour a case study of Agartala city. *Procedia-Social and Behavioral Sciences* 2013;104:533-42.
- [16] Yenisetty PT, Bahadure P. Spatial accessibility measures to educational facilities from public transit: a case of Indian cities. *Smart and Sustainable Built Environment*. 2021;10(2):258-73.
- [17] Yenisetty PT, Bahadure P. Measuring Accessibility to Various ASFs from Public Transit using Spatial Distance Measures in Indian Cities. *ISPRS International journal of geo-information* 2020;9(7):446.
- [18] Meeder M. Detour factors in pedestrian networks [Master thesis spatial development and infrastructure systems]. Zurich, Switzerland: ETH Zurich; 2015.
- [19] Levinson D, El-Geneidy A. The minimum circuitry frontier and the journey to work. *Regional science and urban economics* 2009;39(6):732-38.

- [20] Landex A, Hansen S. Examining the potential travellers in catchment areas for public transport. in ESRI user conference; 2006.
- [21] Gabriele DO, Marco M. A GIS-based method for evaluating the walkability of a pedestrian environment and prioritised investments. Journal of Transport Geography 2020;82:102555.
- [22] O'Neill W, Ramsey D, Chou J. Analysis of transit service areas using geographic information systems. Transportation research record. Journal of the transportation research board 1992;1364:131-9.
- [23] Sangsila S. The pedestrain behavior of community around mass rapid transit station [independent study]. Bangkok, Thailand: Silpakorn University; 2012. (In Thai)
- [24] Sakdasak P. Development alternatives for Bang Yai District affected by the rail mass transit system [independent study]. Bangkok, Thailand: Silpakorn University; 2014. (In Thai)
- [25] Kho-oomklang S. A study of acceptable walking distance to access public transport [thesis]. Nakhon Ratchasima, Thailand: Suranaree university of technology; 2017. (In Thai)
- [26] Duncan DT, Aldstadt J, Whalen J, Melly SJ. Validation of walk scores and transit scores for estimating neighborhood walkability and transit availability a small-area analysis. Geojournal 2013;78(2):407-16.
- [27] Carr LJ, Dunsiger SI, Marcus BH. Validation of walk score for estimating access to walkable amenities. British journal of sports medicine 2011;45(14):1144-8.
- [28] Transport for London. The planning for walking toolkit, tools to support the development of public realm design briefs in London; 2020.
- [29] School of remote sensing. Institute of science Suranaree university of technology; 2016.
- [30] Jirakajohnkool S. ArcGIS desktop 10.5. Bangkok, Thailand: A.P. graphic design and print; 2017.
- [31] Apparicio P, Abdelmajid M, Riva M, Shearmur R. Comparing alternative approaches to measuring the geographical accessibility of urban health services: Distance types and aggregation-error issues. International journal of health geographics. 2008;7(1):1-14.
- [32] Suber BA. Public transportation accessibility impacts of the Tucson modern streetcar [thesis]. California, USA: University of Southern California; 2016.
- [33] Apparicio P, Gelb J, Dubé A-S, Kingham S, Gauvin L, Robitaille É. The approaches to measuring the potential spatial access to urban health services revisited: distance types and aggregation-error issues. International journal of health geographics. 2017;16(1):1-24.

Author's Profile

Pawitchaya Phuengkoksung, received the bachelor degree in Transportation Engineering and Logistics from Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand. Currently, she is graduate student at The Cluster of Logistics and Rail Engineering, logistics and supply chain program, Faculty of Engineering, Mahidol University, Nakhon Pathom, Thailand. E-mail: pawitchaya21@gmail.com



Siradol Siridhara, Dr., has 25 years professional experience in traffic engineering and transport planning. He has involved in many aspects of transportation engineering and feasibility studies including railway engineering, transportation planning, project feasibility studies, and traffic impact assessment. He spent two years of his professional career in the United States. His primary work involved traffic studies, accident studies, feasibility studies, transit operations studies, transportation modeling, and traffic operations analysis. He continued his transportation engineering career in Thailand for eight years before taking a lecturer position at Suranaree University of Technology. He later moved to Mahidol University where he is in charge of Chair of Railway Transport Engineering Curriculum. E-mail: siradol@gmail.com

**Somsiri Siewwuttanagul (Ph.D.)**

Education background: Urban Spatial Information Systems

Research interests: Transit-Oriented Development and pedestrian accessibility analyses. E-mail: somsiri.sie@mahidol.ac.th

Article History:

Received: May 27, 2021

Revised: August 26, 2021

Accepted: August 30, 2021

การศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานในฟาร์มสุกร A STUDY FOR ENHANCING ENERGY EFFICIENCY IN PIG FARM

ภวิศ เวียงนาค¹ และ ศักดิ์ชัย รักการ²

¹นักศึกษา, หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการงานวิศวกรรม
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต 1761 ถนนพัฒนาการ เขตสวนหลวง แขวงสวนหลวง
กรุงเทพมหานคร 10250, phawit23@gmail.com

²อาจารย์, หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการงานวิศวกรรม
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต 1761 ถนนพัฒนาการ แขวงสวนหลวง เขตสวนหลวง
กรุงเทพฯ 10250, sakchai.rak@kbu.ac.th

Phawit Wiangnak¹ and Sakchai Rakkan²

¹Student, Graduate School, Master of Engineering Program in Engineering Management
Kasem Bundit University, 1761 Phatthanakan 37 Alley, Suan Luang, Bangkok 10250, Thailand,
phawit23@gmail.com

²Lecturer, Graduate School, Master of Engineering Program in Engineering Management
Kasem Bundit University, 1761 Phatthanakan 37 Alley, Suan Luang, Bangkok 10250, Thailand,
sakchai.rak@kbu.ac.th

บทคัดย่อ

การศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานในฟาร์มสุกร มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาศักยภาพการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานในฟาร์มสุกร โดยใช้หลักการทางเศรษฐศาสตร์ในการวิเคราะห์ความคุ้มค่าของการลงทุนในมาตรการต่างๆ ในการศึกษาจะใช้ข้อมูลการสำรวจฟาร์มสุกรจากกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน จำนวนฟาร์มตัวอย่างทั้งสิ้น 33 ฟาร์ม มีผลการศึกษาพบว่ามอเตอร์พัดลมมีสัดส่วนการใช้พลังงานมากที่สุดทำให้มีศักยภาพในการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานสูงสุด ในการศึกษาได้แบ่งมาตรการการแก้ปัญหาออกเป็น 2 มาตรการ มีผลการศึกษาทั้ง 2 มาตรการดังนี้ (1) มาตรการการเปลี่ยนมาใช้มอเตอร์ประสิทธิภาพสูง ผู้ศึกษาได้คำนวณศักยภาพผลประหยัดที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนอุปกรณ์มอเตอร์ไฟฟ้าแบบธรรมดาเป็นมอเตอร์ประสิทธิภาพสูง ตามตารางเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างมอเตอร์ธรรมดา กับมอเตอร์ประสิทธิภาพสูง ได้ผลประหยัดเฉลี่ยอยู่ที่ ร้อยละ 7.6 ต่อปี โดยผลประหยัดที่เกิดขึ้นจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับจำนวนชั่วโมงในการทำงานต่อปี และภาระโหลดที่มอเตอร์ได้รับ เมื่อวิเคราะห์

ความคุ้มค่าในการลงทุนโดยอ้างอิงราคากลางของมอเตอร์ประสิทธิภาพสูง พบว่าในระยะเวลา 10 ปี ได้ผลลัพธ์คือ ฟาร์มขนาดใหญ่และฟาร์มขนาดกลางมีความคุ้มค่าในการลงทุน (2) มาตรการการใช้ระบบปรับอากาศแบบระเหยอัตโนมัติ ผู้ศึกษาได้คำนวณศักยภาพผลประหยัดที่เกิดขึ้นจากการติดตั้งระบบปรับอากาศแบบระเหยอัตโนมัติในฟาร์ม ได้ผลลัพธ์คือสามารถลดการใช้พลังงานของมอเตอร์ขับเคลื่อนได้ร้อยละ 20 เมื่อวิเคราะห์ความคุ้มค่าในการลงทุนโดยอ้างอิงราคากลางของระบบปรับอากาศแบบระเหยอัตโนมัติ พบว่าในระยะเวลา 10 ปี ฟาร์มขนาดใหญ่มีความคุ้มค่าต่อการลงทุนทั้งหมด ปัจจัยที่ส่งผลต่อความคุ้มค่าคือ กำลังขับรวมของมอเตอร์

คำสำคัญ: การเพิ่มประสิทธิภาพ, การใช้พลังงาน, ฟาร์มสุกร

ABSTRACT

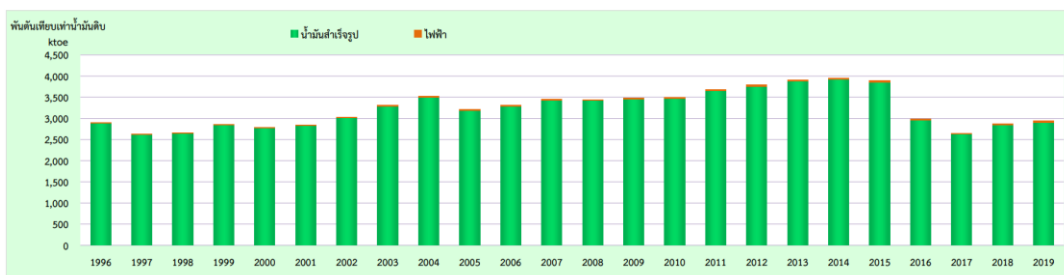
The objectives of a study for enhancing energy efficiency in pig farm were to enhance performance by using Economic principles for analysis worth of investment many methods. In this study, survey data in pig farm from 33 sample farms of Department of Alternative Energy Development and Efficiency. Studies have shown that fan motors have the highest percentage of energy consumption causing the most potential to increase energy efficiency consumption. The study had 2 methods to solve the problem. The results of the study of 2 methods had (1) Switching to high efficiency motors method. The researcher has calculated the potential and saving energy arising of replacing standard electric motors with high efficiency motors. According to the comparison table, standard electric motor and high efficiency motor had an average saving of 7.6% per year. Saving energy was depend on the number of hours worked per year and the load that the motor receives. When analyzing the investment by referring to high efficiency motor price standard for 10 years, the result is large farms and medium farms are the worth investment. (2) Using of evaporative air conditioning systems method. The researcher has calculated the potential and saving energy arising of installing evaporative air conditioning systems. Can reduce energy consumption 20% of the motor. When analyzing the investment by referring to evaporative air conditioning system price standard for 10 years, the result is large farms are the worth of the whole investment. The factors that affect the value are total motor power.

KEYWORDS: Increasing efficiency, Energy Consumption, Pig Farm

1. บทนำ

ฟาร์มเลี้ยงสัตว์ เป็นเกษตรกรรมที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจของประเทศไทย มีความเกี่ยวข้องกับประชากรจำนวนมากในประเทศ การใช้พลังงานภาคเกษตรกรรมถือเป็นปัจจัยการผลิตหลักประการหนึ่ง ในขณะที่เกษตรกรส่วนใหญ่ยังขาดความรู้และเทคโนโลยีที่จะนำมาใช้บริหารจัดการการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ รวมทั้งการใช้เครื่องจักรอุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพต่ำ แม้จะพบว่าในปัจจุบันได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีเครื่องจักร วัสดุอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่มีความก้าวหน้าไปมาก ซึ่งรวมถึงระบบการบริหารจัดการการผลิตในฟาร์มประเภทต่าง ๆ ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการผลิตและสามารถลดการใช้พลังงานลงได้มาก เพื่อดำเนินงานให้สอดคล้องกับแผนอนุรักษ์พลังงาน แนวทางการขับเคลื่อนประเทศไทยสู่ความมั่นคง มั่งคั่ง และยั่งยืน Thailand 4.0 การบ่มเพาะผู้ประกอบการและพัฒนาเครือข่ายวิสาหกิจที่ขับเคลื่อนด้วยนวัตกรรม การพัฒนาเกษตรกรที่ทันสมัย

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานได้สำรวจการใช้พลังงานในขั้นสุดท้ายของภาคเกษตรกรรม ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2539 ถึง พ.ศ. 2562 [1] ได้ผลดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แนวโน้มการใช้พลังงานในภาคเกษตรกรรมตั้งแต่ปี พ.ศ. 2539 ถึง พ.ศ. 2562

เมื่อพิจารณาการใช้พลังงานขั้นสุดท้ายในช่วงปี พ.ศ. 2539 ถึง พ.ศ. 2558 พบว่า ภาคเกษตรกรรม มีการใช้พลังงานขั้นสุดท้ายเพิ่มสูงขึ้นเฉลี่ย 62.5 % และชะลอในช่วงปี พ.ศ. 2559 ถึง ปัจจุบัน เนื่องจากเกิดวิกฤตภัยแล้งหนัก ทำให้มีการเลี้ยงที่ลดลง เห็นได้ชัดว่าเมื่อต้องการผลผลิตเพิ่มขึ้นต้องใช้พลังงานมากขึ้น ซึ่งฟาร์มเลี้ยงสัตว์ อาทิ ฟาร์มสัตว์ปีก ฟาร์มสุกร ฟาร์มโค ฟาร์มเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ หรือฟาร์มเลี้ยงสัตว์ประเภทอื่นๆ ยังมีศักยภาพการลดการใช้พลังงานได้อีกมาก และเพื่อสอดคล้องกับนโยบายประเทศไทย 4.0 ที่ต้องการปรับเปลี่ยนโครงสร้างเศรษฐกิจแบบเดิมไปสู่การเป็นเศรษฐกิจที่ขับเคลื่อนด้วยนวัตกรรม และการเพิ่มการบริหารจัดการและเทคโนโลยีเข้าไป โดยการปรับเปลี่ยนมาใช้เครื่องจักรอุปกรณ์ประสิทธิภาพสูง และใช้เทคโนโลยีควบคุมและบริหารจัดการฟาร์มอัตโนมัติ

ในการศึกษานี้ ผู้ศึกษาได้เลือกที่จะศึกษาศักยภาพการลดการใช้พลังงานฟาร์มสุกร ซึ่งเป็นฟาร์มมีการใช้พลังงานที่สูง โดยมีผลที่คาดว่าจะคือ เป็นความรู้และแนวทางให้เกษตรกร สามารถไปปรับใช้กับฟาร์มสุกรของตนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน สามารถลดต้นทุน และมีกำไรเพิ่มขึ้น

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

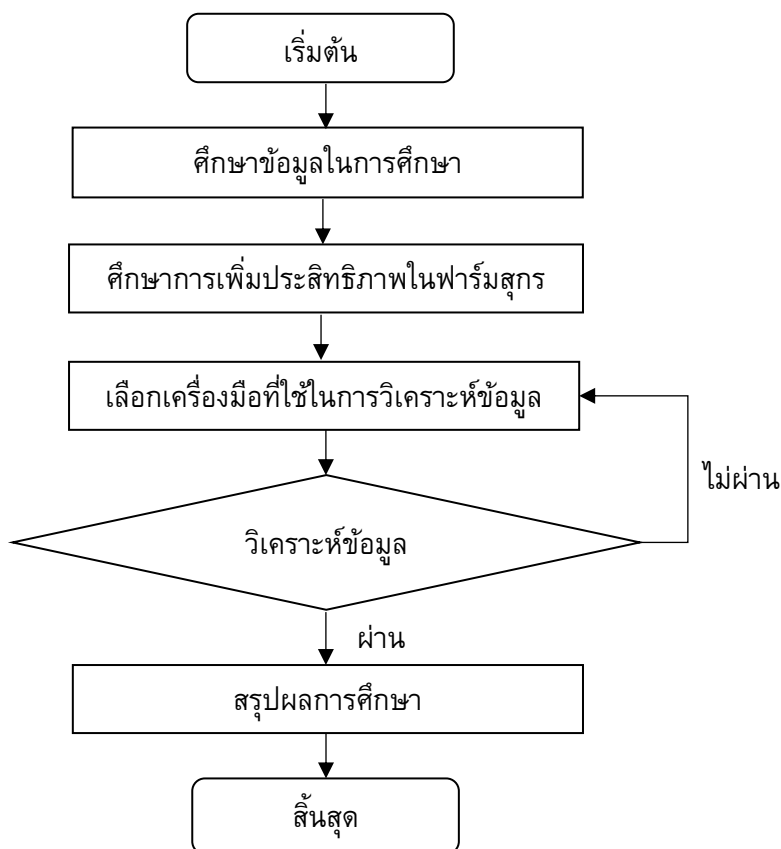
การศึกษาที่ผ่านมา เรื่องการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานในฟาร์ม มีประเด็นสำคัญของงานวิจัยต่างๆ ที่มุ่งให้ความสนใจ คือ มอเตอร์ประสิทธิภาพสูง และ การใช้ระบบปรับอากาศแบบระเหยในฟาร์ม

ด้านการศึกษามอเตอร์ประสิทธิภาพสูง ในปี พ.ศ. 2558 Sawetsakulanon [2] ศึกษาการลดต้นทุนการผลิต เพิ่มศักยภาพการแข่งขัน รองรับประชาคมอาเซียน ด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบประสิทธิภาพสูง พบว่านอกจากการประหยัดพลังงานแล้ว มอเตอร์ประสิทธิภาพสูงยังมีข้อดีอื่น ๆ อีกคือ เกิดความร้อนจากการทำงานน้อยกว่า อายุการใช้งานของฉนวนและลูกปืนยาวนานขึ้น การสั่นสะเทือนน้อยกว่า มีเสียงรบกวนน้อย และค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (Power Factor) ที่สูงขึ้น ทำให้มอเตอร์ประสิทธิภาพสูงมีความทนทานและอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่ามอเตอร์มาตรฐาน ปี พ.ศ. 2556 บริษัท อัลติเมท คอมเมอร์เชียล จำกัด [3] ศึกษาการเปรียบเทียบค่าไฟฟ้าระหว่างมอเตอร์ธรรมดา กับ มอเตอร์ประสิทธิภาพสูง ที่การใช้งานวันละ 24 ชั่วโมง และใช้งานที่โหลด 100% พบว่า การเปลี่ยนมอเตอร์ประสิทธิภาพสูงทดแทนมอเตอร์เก่า สามารถประหยัดพลังงานเฉลี่ย 16% มีระยะเวลาคืนทุนเฉลี่ย 10 เดือน

ด้านการศึกษาการใช้ระบบปรับอากาศแบบระเหยในฟาร์ม ในปี พ.ศ. 2557 Yimchang [4] ศึกษาระบบทำความเย็นแบบระเหย พบว่า ระบบทำความเย็นแบบระเหยมีราคาถูกกว่าการใช้ระบบคอมเพรสเซอร์ในเครื่องปรับอากาศประมาณ 10 เท่า

3. วิธีการศึกษา

การศึกษานี้ มีเป้าหมายในการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานในฟาร์มสุกร ซึ่งเป็นการวิเคราะห์หาศักยภาพผลประหยัดที่เกิดขึ้นจากมาตรการการเพิ่มประสิทธิภาพต่าง ๆ ในฟาร์มสุกรที่ผู้ทำการศึกษาได้วิเคราะห์มา โดยผู้ศึกษาได้กำหนดวิธีการดำเนินการศึกษา ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ขั้นตอนดำเนินการศึกษา

จากข้อมูลการสำรวจการใช้พลังงานในฟาร์มสุกรของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน จำนวนทั้งสิ้น 33 ฟาร์ม [5] สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงข้อมูลสัดส่วนการใช้พลังงานไฟฟ้าในแต่ละระบบของการเลี้ยงสุกร

ขนาดของฟาร์ม	ประเภทสุกร	สัดส่วนการใช้ไฟฟ้าในแต่ละระบบ (%)				
		ระบบน้ำดี	ระบบแสงสว่าง	ระบบผลิตอาหาร	การเลี้ยง (โรงเรือน)	ระบบจัดการของเสีย
เล็ก	สุกรขุน	4.11	2.26	-	90.31	3.32
	สุกรพันธุ์	6.70	8.35	-	84.95	-
กลาง	สุกรขุน	7.83	2.58	10.73	77.65	1.21
ใหญ่	สุกรขุน	1.66	1.32	-	95.94	1.08
	สุกรพันธุ์	29.85	9.72	14.92	44.02	1.49

จากตารางที่ 1 จะเห็นว่า ระบบการเลี้ยง (โรงเรือน) มีสัดส่วนการใช้ไฟฟ้าที่มากที่สุด มีเครื่องจักรอุปกรณ์หลักที่เกี่ยวข้อง คือ ปั๊มน้ำ พัดลมระบายอากาศ ชุดสายพานอาหาร ซึ่งใช้อุปกรณ์ต้นกำลังหลัก คือมอเตอร์ไฟฟ้า และจากการศึกษาพบว่ามีสัดส่วนการใช้พลังงานมากที่สุดเท่ากับ 71.14 %

3.1 แนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานในฟาร์มสุกร

การที่ฟาร์มสุกรมีการใช้มอเตอร์ไฟฟ้าในสัดส่วนที่มากที่สุด ดังนั้นการเปลี่ยนมอเตอร์ไฟฟ้าเป็นมอเตอร์ประสิทธิภาพสูงจะสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานได้และหากรวมกับการใช้เทคโนโลยีในการบริหารจัดการฟาร์มที่ดีก็จะทำให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น ดังนั้นผู้ศึกษาจึงได้แบ่งมาตรการการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานในฟาร์มสุกรออกเป็น 2 มาตรการ ดังนี้

- 1) การเปลี่ยนมาใช้มอเตอร์ประสิทธิภาพสูง
- 2) การใช้ระบบปรับอากาศแบบระเหยอัตโนมัติ

ซึ่งในแต่ละมาตรการจะวิเคราะห์ด้านเศรษฐศาสตร์ เพื่อเป็นตัวชี้วัดในการประกอบการพิจารณาการตัดสินใจลงทุนในมาตรการต่างๆ

3.2 การวิเคราะห์ข้อมูล มาตรการการเปลี่ยนมาใช้มอเตอร์ประสิทธิภาพสูง

มาตรการการเปลี่ยนมาใช้มอเตอร์ประสิทธิภาพสูง จะคำนวณศักยภาพการประหยัดพลังงานจากการเปลี่ยนจากมอเตอร์ไฟฟ้าธรรมดาเป็นมอเตอร์ประสิทธิภาพสูง โดยอ้างอิงการใช้พลังงานของมอเตอร์จากตัวอย่างฟาร์มสุกรทั้ง 33 ฟาร์ม และคำนวณการใช้พลังงานของมอเตอร์ประสิทธิภาพสูงจาก ตารางเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างมอเตอร์ธรรมดากับมอเตอร์ประสิทธิภาพสูง [6] ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างมอเตอร์ธรรมดากับมอเตอร์ประสิทธิภาพสูง

กำลังของมอเตอร์		มอเตอร์ธรรมดา	มอเตอร์ประสิทธิภาพสูง
HP	kW		
1	0.75	75.2	82.5
1.5	1.1	77	84
2	1.5	78.5	84
3	2.2	81.5	87.5

การเปลี่ยนมาใช้มอเตอร์ประสิทธิภาพสูง สามารถคำนวณหาผลประหยัดได้โดยตัวแปรที่ต้องทราบ คือ ขนาดของมอเตอร์ที่ใช้ จำนวนมอเตอร์ที่ใช้ ชั่วโมงการทำงานต่อปี และภาระโหลดมอเตอร์ที่ใช้ โดยสามารถคำนวณชั่วโมงการทำงานของมอเตอร์ต่อปีได้ ดังสมการที่ 1

$$\text{ชั่วโมงการทำงานต่อปี} = \text{ชั่วโมงการทำงานต่อวัน} \times \text{วันที่ใช้งานต่อปี} \quad (1)$$

และสามารถคำนวณหาผลประหยัดได้ ดังสมการที่ 2

$$\text{ผลประหยัด} = \text{กิโลวัตต์ที่ลดลง} \times \text{ชั่วโมงการทำงานตลอดปี} \quad (2)$$

โดย กิโลวัตต์ที่ลดลง = ขนาดของมอเตอร์ x ภาระโหลด x $\left(\frac{100}{\text{ประสิทธิภาพมอเตอร์เก่า}} - \frac{100}{\text{ประสิทธิภาพมอเตอร์ใหม่}} \right)$

สำหรับการวิเคราะห์หาความคุ้มค่าในการลงทุน มีตัวแปรที่ต้องทราบคือราคาต้นทุนในการเปลี่ยนอุปกรณ์ และค่าใช้จ่ายการซ่อมบำรุงต่อปี โดยได้อ้างอิงราคาต้นทุนในการเปลี่ยนมอเตอร์ประสิทธิภาพสูงจากตารางราคากลางของมอเตอร์ประสิทธิภาพสูง [7] ดังตารางที่ 3 และค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงมอเตอร์จะเท่ากับ 1,300 บาทต่อตัวต่อปี

ตารางที่ 3 ราคากลางของมอเตอร์ประสิทธิภาพสูง

ลำดับ	ขนาดมอเตอร์		กรอบราคาเครื่องรวมอุปกรณ์ประกอบและภาษีมูลค่าเพิ่ม (บาท)	
	แรงม้า (HP)	กำลังไฟฟ้า (kW)	ชนิด 2 ขั้ว	ชนิด 4 ขั้ว
1	<1.5	<1.12	6,000	6,600
2	1.5 - 2	1.12 - 1.49	6,700	7,800
3	2 - 3	1.49 - 2.24	8,100	8,500
4	3 - 4	2.24 - 2.98	8,900	9,600

3.3 การวิเคราะห์ข้อมูล มาตรการการใช้ระบบปรับอากาศแบบระเหยอัตโนมัติ

อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเลี้ยงสุกรคือ 29 °C และความชื้นที่เหมาะสมกับการเลี้ยงคือไม่เกิน 85%RH มาตรการการใช้ระบบปรับอากาศแบบระเหยอัตโนมัติ จะต้องติดตั้งตู้ควบคุมและเซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้นไว้ที่บริเวณกลางโรงเรือน ซึ่งอุณหภูมิที่ตั้งไว้ที่ตู้ควบคุมจะเท่ากับ 29 °C เมื่ออุณหภูมิในโรงเรือนสูงเกิน 29 °C ตู้ควบคุมจะสั่งเปิดการทำงานพัดลมระบายอากาศทุกตัว เมื่ออุณหภูมิลดลง 1 °C ตู้ควบคุมจะสั่งตัดการทำงานของพัดลมระบายอากาศลง 20% ของ

จำนวนพัดลมระบายอากาศทั้งหมด เมื่ออุณหภูมิลดลงอีก 1°C ตู้ควบคุมก็จะสั่งตัดการทำงานของพัดลมระบายอากาศลงอีก 20% เช่นเดียวกันกับความชื้น เมื่อโรงเรือนความชื้นต่ำกว่า 75%RH ตู้ควบคุมจะสั่งเปิดการทำงานของปั้มน้ำคูลิ่งแพด แต่เมื่อโรงเรือนมีความชื้นสูงเกิน 85%RH ตู้ควบคุมจะสั่งปิดการทำงานของปั้มน้ำคูลิ่งแพด การติดตั้งระบบปรับอากาศแบบระเหยอัตโนมัติในโรงเรือน สามารถลดการใช้พลังงานลงได้ ร้อยละ 20 [8] สำหรับการวิเคราะห์หาความคุ้มค่าในการลงทุน มีตัวแปรที่ต้องทราบคือราคาต้นทุนในการติดตั้งอุปกรณ์ และรายได้จากการขายซาก โดยได้อ้างอิงราคากลางในการติดตั้งอุปกรณ์ปรับความเร็วรอบมอเตอร์ ดังตารางที่ 4 ค่าติดตั้งชุดควบคุมระบบปรับอากาศแบบระเหยอัตโนมัติ ราคา 112,500 บาทต่อฟาร์ม และรายได้จากการขายซากอุปกรณ์เท่ากับร้อยละ 20 ของราคาต้นทุนอุปกรณ์

ตารางที่ 4 ราคากลางของชุดอุปกรณ์ปรับความเร็วรอบมอเตอร์

ขนาดพิกัด กิโลวัตต์ (kW)	กรอปราคาเครื่องรวมอุปกรณ์ประกอบและ ภาษีมูลค่าเพิ่ม (บาท/kW)	ค่าติดตั้ง
<5	13,900	คิดเป็น 20% ของกรอปราคารวมทั้งหมด
<11	12,800	
<22	11,800	
<30	10,700	คิดเป็น 15% ของกรอปราคารวมทั้งหมด
37-55	8,600	
75-110	6,400	

4. ผลการวิจัย

จากข้อมูลการสำรวจการใช้พลังงานในฟาร์มสุกรของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน จำนวนทั้งสิ้น 33 ฟาร์ม ผู้ศึกษาได้คำนวณหาศักยภาพผลประหยัดคำนวณหาความคุ้มค่าในการลงทุน และวิเคราะห์ผลที่ได้ของมาตรการการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานทั้ง 2 มาตรการ มีผลการศึกษาดังนี้

4.1 มาตรการการเปลี่ยนมาใช้มอเตอร์ประสิทธิภาพสูง

สามารถคำนวณหาศักยภาพผลประหยัดจากการเปลี่ยนมาใช้มอเตอร์ประสิทธิภาพสูงได้ดังตารางที่ 5 และสามารถคำนวณหาความคุ้มค่าในการลงทุนที่ระยะเวลา 10 ปี ใช้อัตราคิดลดเท่ากับร้อยละ 8 ได้ดังตารางที่ 6 โดยมีหลักเกณฑ์ในการพิจารณาความคุ้มค่าในลงทุนคือ ฟาร์มที่มีค่า NPV เป็นบวก มีค่า IRR มากกว่าร้อยละ 8 และค่า B/C ratio มากกว่า 1

ตารางที่ 5 ศักยภาพผลประหยัดของแต่ละฟาร์มตัวอย่างเมื่อเปลี่ยนมาใช้มอเตอร์ประสิทธิภาพสูง

ขนาดฟาร์ม	ตัวอย่างฟาร์มที่	ประเภทของฟาร์ม		ขนาดมอเตอร์ (kW)	จำนวนพัดลมท้ายเล้า (ตัว)	ชั่วโมงการใช้งานต่อวัน	วันใช้งานต่อปี	ภาระโหลด	ผลประหยัดต่อปี (kWh)	ค่าไฟฟ้าที่ประหยัดได้ต่อปี (บาท)
		ระบบปิด	ระบบเปิด							
เล็ก	1	✓		0.75	6	24	340	0.65	2,808.45	11,233.81
	2	✓		0.75	6	24	255	0.8	2,592.42	10,369.67
	3		✓							
	4		✓							
	5	✓		0.75	4	24	300	0.5	1,270.79	5,083.17
	6	✓		1.1	4	24	300	0.7	2,400.00	9,600.00
	7	✓		1.1	2	24	80	0.8	365.71	1,462.86
	8	✓		1.1	2	24	80	0.9	411.43	1,645.71
	9	✓		1.1	6	24	150	0.9	2,314.29	9,257.14
	10	✓		1.1	6	24	200	0.9	3,085.71	12,342.86
	11	✓		0.75	6	12	300	0.5	953.09	3,812.38
	12	✓		0.75	4	14	300	0.75	1,111.94	4,447.78
	13	✓		0.75	6	8	300	0.5	635.40	2,541.59
	14	✓		1.5	2	24	300	0.85	1,531.39	6,125.57
	15	✓		1.5	2	24	300	0.85	1,531.39	6,125.57
กลาง	16		✓							
	17	✓		0.75	64	16	365	0.8	26,387.31	105,549.25
	18	✓		0.75	5	24	365	0.8	3,092.26	12,369.05
	19	✓		0.75	6	24	365	0.8	3,710.72	14,842.86
	20	✓		0.75	5	24	300	0.5	1,588.49	6,353.97
	21	✓		0.75	8	24	365	0.8	4,947.62	19,790.48
	22		✓							
	23	✓		1.1	6	24	300	0.95	4,885.71	19,542.86
ใหญ่	24	✓		0.75	80	24	300	0.5	25,415.86	101,663.44
	25	✓		0.75	49	24	365	0.8	30,304.18	121,216.71
	26	✓		1.5	128	12	365	0.8	55,740.91	222,963.65
	27	✓		0.75	121	24	250	0.5	32,034.57	128,138.30
	28	✓		0.75	104	24	365	0.6	48,239.30	192,957.21

ตารางที่ 5 ศักยภาพผลประหยัดของแต่ละฟาร์มตัวอย่างเมื่อเปลี่ยนมาใช้มอเตอร์ประสิทธิภาพสูง (ต่อ)

ขนาดฟาร์ม	ตัวอย่างฟาร์มที่	ประเภทของฟาร์ม		ขนาดมอเตอร์ (kW)	จำนวนพัลลัมทำยเล้า (ตัว)	ชั่วโมงการใช้งานต่อวัน	วันใช้งานต่อปี	ภาระโหลด	ผลประหยัดต่อปี (kWh)	ค่าไฟฟ้าที่ประหยัดได้ต่อปี (บาท)
		ระบบปิด	ระบบเปิด							
ใหญ่	29	✓		1.1	280	24	300	0.95	228,000.00	912,000.00
	30	✓		1.1	420	24	335	0.9	361,800.00	1,447,200.00
	31	✓		0.75	104	24	365	0.8	64,319.07	257,276.29
	32	✓		1.1	96	18	365	0.85	58,020.78	232,083.12
	33	✓		2.2	940	21	350	0.6	697,560.74	2,790,242.94

หมายเหตุ: ค่าไฟฟ้าคิดที่หน่วยละ 4 บาท

ตารางที่ 6 ผลการคำนวณเพื่อหาความคุ้มค่าในการลงทุน

ขนาดฟาร์ม	ตัวอย่างฟาร์มที่	ประเภทของฟาร์ม		ค่าไฟฟ้าที่ประหยัดได้ต่อปี (บาท)	ต้นทุนการเปลี่ยนมอเตอร์ประสิทธิภาพสูง (บาท)	ค่าใช้จ่ายในการดูแลรักษา (บาท/ปี)	NPV	IRR	B/C ratio	Payback period
		ระบบปิด	ระบบเปิด							
เล็ก	1	✓		11,234	39,600	7,800	-16,558.85	2%	0.58	11 ปี 6 เดือน
	2	✓		10,370	39,600	7,800	-22,357.30	-1%	0.44	15 ปี 5 เดือน
	3		✓							
	4		✓							
	5	✓		5,083	26,400	5,200	-27,183.92	-100%	-0.03	หาค่าไม่ได้
	6	✓		9,600	31,200	5,200	-1,675.64	7%	0.95	7 ปี 2 เดือน
	7	✓		1,463	15,600	2,600	-23,230.32	-100%	-0.49	หาค่าไม่ได้
	8	✓		1,646	15,600	2,600	-22,003.33	-100%	-0.41	หาค่าไม่ได้
	9	✓		9,257	46,800	7,800	-37,022.45	-8%	0.21	32 ปี 2 เดือน
	10	✓		12,343	46,800	7,800	-16,317.06	3%	0.65	10 ปี 4 เดือน
	11	✓		3,812	39,600	7,800	-66,357.26	-100%	-0.68	หาค่าไม่ได้
	12	✓		4,448	26,400	5,200	-31,447.49	-100%	-0.19	หาค่าไม่ได้
	13	✓		2,542	39,600	7,800	-74,884.39	-100%	-0.89	หาค่าไม่ได้
	14	✓		6,126	17,000	2,600	6,656.85	12%	1.39	4 ปี 10 เดือน
	15	✓		6,126	17,000	2,600	6,656.85	12%	1.39	4 ปี 10 เดือน

ตารางที่ 6 ผลการคำนวณเพื่อหาความคุ้มค่าในการลงทุน (ต่อ)

ขนาดฟาร์ม	ตัวอย่างฟาร์มที่	ประเภทของฟาร์มระบบปิดระบบเปิด	ค่าไฟฟ้าที่ประหยัดได้ต่อปี (บาท)	ต้นทุนการเปลี่ยนมอเตอร์ประสิทธิภาพสูง (บาท)	ค่าใช้จ่ายในการดูแลรักษา (บาท/ปี)	NPV	IRR	B/C ratio	Payback period
	16	✓							
	17	✓	105,549	422,400	83,200	-272,434.74	-3%	0.36	18 ปี 11 เดือน
	18	✓	12,369	33,000	6,500	6,381.82	10%	1.19	5 ปี 8 เดือน
	19	✓	14,843	39,600	7,800	7,658.18	10%	1.19	5 ปี 8 เดือน
กลาง	20	✓	6,354	33,000	6,500	-33,979.91	-100%	-0.03	หาค่าไม่ได้
	21	✓	19,790	52,800	10,400	10,210.91	10%	1.19	5 ปี 8 เดือน
	22	✓							
	23	✓	19,543	46,800	7,800	31,995.53	14%	1.68	4 ปี
	24	✓	101,663	528,000	104,000	-543,678.49	-100%	-0.03	หาค่าไม่ได้
	25	✓	121,217	323,400	63,700	62,541.82	10%	1.19	5 ปี 8 เดือน
	26	✓	222,964	1,088,000	166,400	-708,453.28	-3%	0.35	19 ปี 3 เดือน
	27	✓	128,138	798,600	157,300	-994,277.40	-100%	-0.25	หาค่าไม่ได้
	28	✓	192,957	686,400	135,200	-298,844.39	2%	0.56	11 ปี 11 เดือน
ใหญ่	29	✓	912,000	2,184,000	364,000	1,493,124.61	14%	1.68	4 ปี
	30	✓	1,447,200	3,276,000	546,000	2,771,125.36	15%	1.85	3 ปี 8 เดือน
	31	✓	257,276	686,400	135,200	132,741.82	10%	1.19	5 ปี 8 เดือน
	32	✓	232,083	748,800	124,800	-28,921.55	7.6%	0.96	7 ปี
	33	✓	2,790,243	7,990,000	1,222,000	2,533,037.81	11%	1.32	5 ปี 2 เดือน

จากตารางที่ 6 ฟาร์มขนาดเล็กมีความคุ้มค่าในการลงทุน 2 ฟาร์ม ฟาร์มขนาดกลางมีความคุ้มค่าในการลงทุน 4 ฟาร์ม และฟาร์มขนาดใหญ่มีความคุ้มค่าในการลงทุน 5 ฟาร์ม

4.2 มาตรการการใช้ระบบปรับอากาศแบบระเหยอัตโนมัติ

สามารถคำนวณหาศักยภาพผลประหยัดจากการติดตั้งระบบปรับอากาศแบบระเหยอัตโนมัติ ได้ดังตารางที่ 7 และสามารถคำนวณหาความคุ้มค่าในการลงทุนที่ระยะเวลา 10 ปี ใช้อัตราคิดลดเท่ากับ ร้อยละ 8 ได้ดังตารางที่ 8 โดยมีหลักเกณฑ์ในการพิจารณาความคุ้มค่าในลงทุนคือ ฟาร์มที่มีค่า NPV เป็นบวก มีค่า IRR มากกว่าร้อยละ 8 และค่า B/C ratio มากกว่า 1

ตารางที่ 7 ศักยภาพผลประหยัดของแต่ละฟาร์มตัวอย่างเมื่อติดตั้งระบบปรับอากาศแบบ
ระเหยอัตโนมัติ

ขนาด ฟาร์ม	ตัวอย่าง ฟาร์มที่	ประเภทของ ฟาร์ม		ขนาด มอเตอร์ (kW)	จำนวน พัดลม ท้ายเล้า (ตัว)	ชั่วโมง การใช้ งานต่อ วัน	วันใช้ งานต่อปี	ภาระ โหลด	ผลประหยัด ต่อปี (kWh)	ค่าไฟฟ้าที่ ประหยัดได้ ต่อปี (บาท)
		ระบบ ปิด	ระบบ เปิด							
เล็ก	1	✓		0.75	6	24	340	0.65	6,347.87	25,391.49
	2	✓		0.75	6	24	255	0.8	5,859.57	23,438.30
	3		✓							
	4		✓							
	5	✓		0.75	4	24	300	0.5	2,872.34	11,489.36
	6	✓		1.1	4	24	300	0.7	5,760.00	23,040.00
	7	✓		1.1	2	24	80	0.8	877.71	3,510.86
	8	✓		1.1	2	24	80	0.9	987.43	3,949.71
	9	✓		1.1	6	24	150	0.9	5,554.29	22,217.14
	10	✓		1.1	6	24	200	0.9	7,405.71	29,622.86
	11	✓		0.75	6	12	300	0.5	2,154.26	8,617.02
	12	✓		0.75	4	14	300	0.75	2,513.30	10,053.19
	13	✓		0.75	6	8	300	0.5	1,436.17	5,744.68
	14	✓		1.5	2	24	300	0.85	4,677.71	18,710.83
	15	✓		1.5	2	24	300	0.85	4,677.71	18,710.83
กลาง	16		✓							
	17	✓		0.75	64	16	365	0.8	59,642.55	238,570.21
	18	✓		0.75	5	24	365	0.8	6,989.36	27,957.45
	19	✓		0.75	6	24	365	0.8	8,387.23	33,548.94
	20	✓		0.75	5	24	300	0.5	3,590.43	14,361.70
	21	✓		0.75	8	24	365	0.8	11,182.98	44,731.91
	22		✓							
	23	✓		1.1	6	24	300	0.95	11,725.71	46,902.86
ใหญ่	24	✓		0.75	80	24	300	0.5	57,446.81	229,787.23
	25	✓		0.75	49	24	365	0.8	68,495.74	273,982.98
	26	✓		1.5	128	12	365	0.8	170,263.15	681,052.62
	27	✓		0.75	121	24	250	0.5	72,406.91	289,627.66
	28	✓		0.75	104	24	365	0.6	109,034.04	436,136.17

ตารางที่ 7 ศักยภาพผลประหยัดของแต่ละฟาร์มตัวอย่างเมื่อติดตั้งระบบปรับอากาศแบบ
ระเหยอัตโนมัติ (ต่อ)

ขนาดฟาร์ม	ตัวอย่างฟาร์มที่	ประเภทของฟาร์ม		ขนาดมอเตอร์ (kW)	จำนวนพัดลม ท้ายเล้า (ตัว)	ชั่วโมงการใช้ งานต่อวัน	วันใช้ งานต่อปี	ภาระ โหลด	ผลประหยัด ต่อปี (kWh)	ค่าไฟฟ้าที่ ประหยัดได้ ต่อปี (บาท)
		ระบบปิด	ระบบเปิด							
ใหญ่	29	✓		1.1	280	24	300	0.95	547,200.00	2,188,800.00
	30	✓		1.1	420	24	335	0.9	868,320.00	3,473,280.00
	31	✓		0.75	104	24	365	0.8	145,378.72	581,514.89
	32	✓		1.1	96	18	365	0.85	139,249.87	556,999.48
	33	✓		2.2	940	21	350	0.6	2,034,552.15	8,138,208.59

หมายเหตุ: ค่าไฟฟ้าคิดที่หน่วยละ 4 บาท

ตารางที่ 8 ผลการคำนวณเพื่อหาความคุ้มค่าในการลงทุน

ขนาดฟาร์ม	ตัวอย่างฟาร์มที่	ประเภทของฟาร์ม		กำลังมอเตอร์รวม (kW)	ค่าไฟฟ้าที่ประหยัดได้ต่อปี (บาท)	ราคาประมาณการติดตั้ง (บาท)	ราคาซาก (บาท)	NPV	IRR	B/C ratio	Payback period
เล็ก	1	✓		4.5	25,391	187,560	37,512	-127,737.7	1.7%	0.5	7 ปี 5 เดือน
	2	✓		4.5	23,443.8	187,560	37,512	-139,612.9	0.9%	0.5	8 ปี
	3		✓								
	4		✓								
	5	✓		3.0	11,489	162,540	32,508	-174,627.9	-4.7%	0.3	14 ปี 2 เดือน
	6	✓		4.4	23,040	185,892	37,178	-139,525.6	0.8%	0.5	8 ปี 2 เดือน
	7	✓		2.2	3,511	149,196	29,839	-203,065.3	- 14.6%	0.1	42 ปี 6 เดือน
	8	✓		2.2	3,950	149,196	29,839	-200,397.1	- 13.6%	0.1	37 ปี 10 เดือน
	9	✓		6.6	22,217	213,876	42,775	-186,620.3	-1.0%	0.4	9 ปี 8 เดือน
	10	✓		6.6	29,623	213,876	42,775	-141,594.2	1.9%	0.6	7 ปี 3 เดือน

ตารางที่ 8 ผลการคำนวณเพื่อหาความคุ้มค่าในการลงทุน (ต่อ)

ขนาดฟาร์ม	ตัวอย่างฟาร์มที่	ประเภทของฟาร์มระบบปิดระบบเปิด	กำลังมอเตอร์รวม (kW)	ค่าไฟฟ้าที่ประหยัดได้ต่อปี (บาท)	ราคาประมาณการติดตั้ง (บาท)	ราคาซาก (บาท)	NPV	IRR	B/C ratio	Payback period
เล็ก	11	✓	4.5	8,617	187,560	37,512	-229,725.0	-8.7%	0.2	21 ปี 10 เดือน
	12	✓	3.0	10,053	162,540	32,508	-183,359.7	-6.0%	0.3	16 ปี 3 เดือน
	13	✓	4.5	5,745	187,560	37,512	-247,188.5	-12.4%	0.1	32 ปี 8 เดือน
	14	✓	3.0	18,711	162,540	32,508	-130,722.0	0.0%	0.5	8 ปี 9 เดือน
	15	✓	3.0	18,711	162,540	32,508	-130,722.0	0.0%	0.5	8 ปี 9 เดือน
กลาง	16	✓								
	17	✓	48.0	238,570	587,220	117,444	567,227.3	13.5%	1.6	2 ปี 6 เดือน
	18	✓	3.8	27,957	175,050	35,010	-93,320.1	3.4%	0.6	6 ปี 4 เดือน
	19	✓	4.5	33,549	187,560	37,512	-78,141.1	4.6%	0.7	5 ปี 8 เดือน
	20	✓	3.8	14,362	175,050	35,010	-175,981.1	-3.3%	0.3	12 ปี 3 เดือน
	21	✓	6.0	44,732	204,660	40,932	-35,870.3	6.7%	0.9	4 ปี 8 เดือน
	22	✓								
	23	✓	6.6	46,903	213,876	42,775	-36,533.3	6.7%	0.9	4 ปี 8 เดือน
ใหญ่	24	✓	60.0	229,787	554,100	110,820	563,644.5	13.7%	1.7	2 ปี 5 เดือน
	25	✓	36.8	273,983	475,958	95,192	949,887.7	17.5%	2.3	1 ปี 9 เดือน
	26	✓	192.0	681,053	1,525,620	305,124	1,846,000.3	14.6%	1.8	2 ปี 3 เดือน
	27	✓	90.8	289,628	780,420	156,084	587,053.0	12.5%	1.5	2 ปี 9 เดือน
	28	✓	78.0	436,136	686,580	137,316	1,618,959.9	18.7%	2.6	1 ปี 8 เดือน
	29	✓	308.0	2,188,800	2,379,380	475,876	9,728,800.5	23.2%	3.7	1 ปี 2 เดือน

ตารางที่ 8 ผลการคำนวณเพื่อหาความคุ้มค่าในการลงทุน (ต่อ)

ขนาดฟาร์ม	ตัวอย่างฟาร์มที่	ประเภทของฟาร์มระบบปิดระบบเปิด	กำลังมอเตอร์รวม (kW)	ค่าไฟฟ้าที่ประหยัดได้ต่อปี (บาท)	ราคาประมาณการติดตั้ง (บาท)	ราคาซาก (บาท)	NPV	IRR	B/C ratio	Payback period
ใหญ่	30	✓	462.0	3,473,280	3,512,820	702,564	15,833,478.0	24.0%	4.0	1 ปี
	31	✓	78.0	581,515	686,580	137,316	2,502,849.8	22.1%	3.4	1 ปี 3 เดือน
	32	✓	105.6	556,999	889,716	177,943	2,048,254.1	18.5%	2.5	1 ปี 8 เดือน
	33	✓	2,068.0	8,138,209	15,332,980	3,066,596	26,416,707.6	16.6%	2.1	1 ปี 11 เดือน

จากตารางที่ 8 ฟาร์มขนาดเล็กไม่มีความคุ้มค่าในการลงทุนเลย ฟาร์มขนาดกลางมีความคุ้มค่าในการลงทุน 2 ฟาร์ม และฟาร์มขนาดใหญ่มีความคุ้มค่าในการลงทุนทั้งหมด

4.3 การวิเคราะห์ความคุ้มค่าในการลงทุนของผลการวิจัย

4.3.1 มาตรการการเปลี่ยนมาใช้มอเตอร์ประสิทธิภาพสูง

จากผลการคำนวณเพื่อหาความคุ้มค่าในการลงทุนได้ผลลัพธ์ที่เหมือนกัน คือ ฟาร์มขนาดเล็กมีความคุ้มค่าต่อการลงทุนเพียง 2 ตัวอย่างฟาร์ม ฟาร์มขนาดกลางมีความคุ้มค่าต่อการลงทุนเพียง 4 ฟาร์ม ส่วนฟาร์มขนาดใหญ่มีความคุ้มค่าต่อการลงทุน 5 ฟาร์ม จากผลที่ได้เมื่อนำมาพิจารณาแล้วจะพบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อความคุ้มค่า คือ จำนวนชั่วโมงการทำงานต่อปี และภาระโหลดที่ใช้ คือ ยังมีจำนวนชั่วโมงการทำงานต่อปีที่มากและใช้ภาระโหลดที่สูง ผลประหยัดยิ่งมากตามไปด้วย ซึ่งเห็นได้ชัดว่าฟาร์มขนาดใหญ่มีการออกแบบฟาร์มที่ดีกว่าจึงทำให้มีการใช้มอเตอร์อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่า เมื่อวิเคราะห์ฟาร์มตัวอย่างที่ไม่มีความคุ้มค่าในการลงทุนพบว่า ฟาร์มตัวอย่างที่ไม่มีความคุ้มค่าในการลงทุนนั้น มีผลประหยัดที่ต่ำเกินไป และเมื่อพิจารณาจากผลประหยัดที่ต่ำเกินไป พบว่า ฟาร์มตัวอย่างนั้นมีการใช้งานมอเตอร์หรือมีภาระโหลดที่น้อยเกินไปจึงทำให้เกิดผลประหยัดที่น้อย ผู้ศึกษาจึงได้แนะนำให้คำนวณค่าชั่วโมงการทำงานต่อปีที่และภาระโหลดของมอเตอร์มาทดลองปรับค่าที่จะสามารถทำให้การลงทุนเกิดความคุ้มค่า สามารถแบ่งได้ตามกำลังของมอเตอร์ดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 เงื่อนไขการใช้งานมอเตอร์ที่จะทำให้การลงทุนมีความคุ้มค่า

ขนาดมอเตอร์ (kW)	เงื่อนไขที่ 1		เงื่อนไขที่ 2
	ชั่วโมงการทำงานต่อปี	ภาระโหลด	ชั่วโมงการทำงานต่อปี x ภาระโหลด
0.75	7,200	0.90	6,480
1.10	6,900	0.75	5,175
1.50	6,900	0.75	5,175
2.20	5,100	0.75	3,825

จากตารางที่ 9 การลงทุนเปลี่ยนมอเตอร์ธรรมดาเป็นมอเตอร์ประสิทธิภาพสูงต้องผ่านเงื่อนไขการใช้งานมอเตอร์อย่างน้อย 1 เงื่อนไข จึงจะทำให้การลงทุนนั้นมีความคุ้มค่า

4.3.2 มาตรการการใช้ระบบปรับอากาศแบบระเหยอัตโนมัติ

จากผลการการคำนวณเพื่อหาความคุ้มค่าในการลงทุนได้ผลลัพธ์ที่เหมือนกัน คือ ฟาร์มขนาดเล็กไม่คุ้มค่าต่อการลงทุน ฟาร์มขนาดกลางมีความคุ้มค่าต่อการลงทุนเพียง 2 ฟาร์ม ส่วนฟาร์มขนาดใหญ่มีความคุ้มค่าต่อการลงทุนทั้งหมด จากผลที่ได้เมื่อนำมาพิจารณาแล้วจะได้ว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อความคุ้มค่า คือ กำลังขั้วรวมของมอเตอร์ คือ ยิ่งมีจำนวนมอเตอร์ที่มาก ผลประหยัดยิ่งมากตามไปด้วย ซึ่งเห็นได้ชัดว่าฟาร์มขนาดใหญ่มีกำลังขั้วรวมของมอเตอร์ที่มากจึงทำให้มีการใช้ระบบปรับอากาศแบบระเหยอัตโนมัติมีผลประหยัดที่มากตามไปด้วย เมื่อวิเคราะห์ฟาร์มตัวอย่างที่ไม่มีความคุ้มค่าในการลงทุน เห็นว่าฟาร์มตัวอย่างที่ไม่มีความคุ้มค่าในการลงทุนนั้น มีจำนวนกำลังรวมของมอเตอร์น้อยเกินไปซึ่งหมายถึงมอเตอร์พัดลมมีจำนวนน้อยเกินไป ทำให้ผลประหยัดที่เกิดขึ้นมีไม่มากพอ ผู้ศึกษาจึงได้สุ่มนำค่าจำนวนของมอเตอร์ที่จะสามารถทำให้การลงทุนเกิดความคุ้มค่า ได้ตั้งตารางที่ 10

ตารางที่ 10 จำนวนมอเตอร์พัดลมและกำลังรวมมอเตอร์ขั้นต่ำที่จะทำให้การลงทุนมีความคุ้มค่า

ขนาดมอเตอร์ (kW)	จำนวนมอเตอร์พัดลม	กำลังรวมมอเตอร์ (kW)
0.75	12	9.0
1.10	9	9.9
1.50	7	10.5
2.20	5	11.0

จากตารางที่ 10 การลงทุนต้นทุนติดตั้งระบบปรับอากาศแบบประหยัดอัตโนมัติ ฟาร์มต้องติดตั้งมอเตอร์พัดลมอย่างน้อยตามตารางนี้ จึงจะทำให้การลงทุนนั้นมีความคุ้มค่า

5. สรุป

การศึกษาการใช้พลังงานในฟาร์มสุกร พบว่าการใช้พลังงานที่ระบบการเลี้ยง (โรงเรือน) มีค่ามากที่สุด และมอเตอร์ขับเคลื่อนพัดลมระบายอากาศมีส่วนการใช้พลังงานที่มากที่สุด ผู้ศึกษาจึงได้แบ่งมาตรการศึกษาศักยภาพการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน ออกเป็น 2 มาตรการ มาตรการแรกจะเป็นการคำนวณผลประหยัดที่เกิดขึ้นในการเปลี่ยนมาใช้มอเตอร์ประสิทธิภาพสูงในแต่ละขนาดของฟาร์มตัวอย่างทั้ง 33 ฟาร์ม พบว่าเกิดผลประหยัดขึ้นทุกปี โดยจะผลประหยัดจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับจำนวนมอเตอร์พัดลมและจำนวนชั่วโมงในการทำงานต่อปี ซึ่งผลการวิเคราะห์ความคุ้มค่าในการลงทุนตามหลักเศรษฐศาสตร์ พบว่าปัจจัยที่จะทำให้เกิดความคุ้มค่าในการลงทุนคือ ต้องมีการใช้งานมอเตอร์ตามเงื่อนไขอย่างใดอย่างหนึ่งดังนี้

มอเตอร์ขนาด 0.75 kW เงื่อนไขที่ 1 มอเตอร์มีชั่วโมงการทำงานต่อปีอย่างน้อย 7,200 ชั่วโมง และมีภาระโหลดอย่างน้อย 90% เงื่อนไขที่ 2 มีผลคูณของชั่วโมงการทำงานต่อปีของมอเตอร์กับภาระโหลดอย่างน้อย 6,480 ชั่วโมง

มอเตอร์ขนาด 1.1 และ 1.5 kW เงื่อนไขที่ 1 มอเตอร์มีชั่วโมงการทำงานต่อปีอย่างน้อย 6,900 ชั่วโมง และมีภาระโหลดอย่างน้อย 75% เงื่อนไขที่ 2 มีผลคูณของชั่วโมงการทำงานต่อปีของมอเตอร์กับภาระโหลดอย่างน้อย 5,175 ชั่วโมง

มอเตอร์ขนาด 2.2 kW เงื่อนไขที่ 1 มอเตอร์มีชั่วโมงการทำงานต่อปีอย่างน้อย 5,100 ชั่วโมง และมีภาระโหลดอย่างน้อย 75% เงื่อนไขที่ 2 มีผลคูณของชั่วโมงการทำงานต่อปีของมอเตอร์กับภาระโหลดอย่างน้อย 3,825 ชั่วโมง

ซึ่งฟาร์มตัวอย่างที่มีความคุ้มค่าในการลงทุนในมาตรการนี้ เพราะมีการออกแบบโรงเรือนให้ใช้งานมอเตอร์พัดลมระบายอากาศได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นฟาร์มขนาดใหญ่และฟาร์มขนาดกลาง ฟาร์มที่มีความคุ้มค่าในการลงทุนมีระยะเวลาคืนทุนเฉลี่ยอยู่ที่ 5 ปี และฟาร์มที่ไม่คุ้มค่าในการลงทุนมีระยะเวลาคืนทุนเฉลี่ยอยู่ที่ 13.5 ปี มาตรการที่ 2 จะเป็นการคำนวณผลประหยัดที่เกิดขึ้นจากการติดตั้งระบบปรับอากาศแบบประหยัดอัตโนมัติ ซึ่งเป็นการนำเอาเทคโนโลยีสมัยใหม่มาใช้กับฟาร์มสุกร คือ การนำเอาอุปกรณ์ปรับความเร็วรอบมอเตอร์ (VSD) กับเซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้นมาผสมผสานใช้ร่วมกัน เพื่อให้บรรยากาศในโรงเรือนมีความเหมาะสมกับสุกรที่สุด ผลที่ได้คือ สามารถลดการใช้พลังงานของมอเตอร์ขับเคลื่อนเพิ่มขึ้นอีก 20% สำหรับผลการวิเคราะห์ความคุ้มค่าในการลงทุนตามหลักเศรษฐศาสตร์ พบว่า ฟาร์มขนาดเล็กไม่คุ้มค่าต่อการลงทุน ฟาร์มขนาดกลางมีความคุ้มค่าต่อการลงทุนเพียง 2 ฟาร์ม ส่วนฟาร์มขนาดใหญ่มีความคุ้มค่าต่อการลงทุนทั้งหมด หมายความว่า ปัจจัยที่ส่งผลต่อความคุ้มค่า คือ กำลังขั้วรวม

ของมอเตอร์ ซึ่งหมายถึงจำนวนมอเตอร์ ยิ่งฟาร์มมีจำนวนมอเตอร์ที่มาก ผลประหยัดที่เกิดขึ้นก็จะมากตามไปด้วย โดยจำนวนมอเตอร์ขั้นต่ำที่ติดตั้งในฟาร์มที่จะทำให้การลงทุนในมาตรการการใช้ระบบปรับอากาศแบบระเหยอัตโนมัติเกิดความคุ้มค่า มีดังนี้

ฟาร์มที่ติดตั้งมอเตอร์ขนาด 0.75 kW ต้องติดตั้งมอเตอร์พัดลมอย่างน้อย 12 ตัว คิดเป็นกำลังรวมมอเตอร์เท่ากับ 9 kW

ฟาร์มที่ติดตั้งมอเตอร์ขนาด 1.1 kW ต้องติดตั้งมอเตอร์พัดลมอย่างน้อย 9 ตัว คิดเป็นกำลังรวมมอเตอร์เท่ากับ 9.9 kW

ฟาร์มที่ติดตั้งมอเตอร์ขนาด 1.5 kW ต้องติดตั้งมอเตอร์พัดลมอย่างน้อย 7 ตัว คิดเป็นกำลังรวมมอเตอร์เท่ากับ 10.5 kW

ฟาร์มที่ติดตั้งมอเตอร์ขนาด 2.2 kW ต้องติดตั้งมอเตอร์พัดลมอย่างน้อย 5 ตัว คิดเป็นกำลังรวมมอเตอร์เท่ากับ 11 kW

จะเห็นได้ว่าฟาร์มขนาดใหญ่มีกำลังขับรวมของมอเตอร์ที่มากจึงทำให้การใช้ระบบปรับอากาศแบบระเหยอัตโนมัติมีผลประหยัดที่มากและคุ้มค่าตามไปด้วย ฟาร์มที่มีความคุ้มค่าในการลงทุนมีระยะเวลาคืนทุนเฉลี่ยอยู่ที่ 1.8 ปี และฟาร์มที่ไม่คุ้มค่าในการลงทุนมีระยะเวลาคืนทุนเฉลี่ยอยู่ที่ 19.9 ปี

6. อภิปรายผล

จากผลการศึกษาการใช้พลังงานในฟาร์มสุกร ในมาตรการการเปลี่ยนมาใช้มอเตอร์ประสิทธิภาพสูง พบว่า การเปลี่ยนมาใช้มอเตอร์ประสิทธิภาพสูง ทำให้เกิดผลประหยัดเฉลี่ย 7.6 % มีระยะเวลาคืนทุนเฉลี่ยอยู่ที่ 5 ปี สำหรับฟาร์มที่คุ้มค่าในการลงทุน และ 13.5 ปี สำหรับฟาร์มที่ไม่คุ้มค่าในการลงทุน ซึ่งน้อยกว่าการศึกษาของ บริษัท อัลติเมท คอมเมอร์เชียล จำกัด ที่มีผลการศึกษาการเปลี่ยนมาใช้มอเตอร์ประสิทธิภาพสูง สามารถประหยัดพลังงานเฉลี่ย 16% มีระยะเวลาคืนทุนเฉลี่ย 10 เดือน

กิตติกรรมประกาศ

การศึกษากการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานในฟาร์มสุกรฉบับนี้ สำเร็จสมบูรณ์ได้ด้วย ความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างสูงยิ่งจาก ดร. ศักดิ์ชาย รักการ อาจารย์ที่ปรึกษางานวิจัยนี้ ที่ได้กรุณาสละเวลาในการให้คำแนะนำ และแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ รวมถึงข้อคิดเห็นอันเป็นประโยชน์

นอกจากนี้ต้องขอขอบคุณ กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลต่าง ๆ ในการศึกษาค้นคว้าด้วยตนเองนี้เป็นอย่างดี

References

- [1] Department of Alternative Energy Development and Efficiency. Thailand Energy Balance Report 2019. Bangkok, Thailand: Ministry of Energy; 2020. (In Thai)
- [2] Sawetsakulanon P. Production cost reduction and increasing competitiveness for support ASEAN Community with high efficiency induction motor [internet]. 2015 [cited 2020 May 6]. Available from: <https://www.mut.ac.th/research-detail-54>. (In Thai)
- [3] Ultimate Commercial Co., Ltd. Electricity bill comparison between standard motor and high efficiency motor [internet]. 2013 [cited 2020 May 6]. Available from: <http://www.ultimatecommercial.co.th/เปรียบเทียบค่าไฟ-ระหว่า/>. (In Thai)
- [4] Yimchang C. Let's get to know the evaporative cooling system. Science and Technology Nakhon Sawan Rajabhat University Journal 2009;1(1):51-8. (In Thai)
- [5] Department of Alternative Energy Development and Efficiency. A study of information and formulate a plan to promote technology and innovation in energy efficiency of agriculture project (Final report). Bangkok, Thailand: Ministry of Energy; 2020. (In Thai)
- [6] Department of Alternative Energy Development and Efficiency. Textbook for training responsible persons for energy in electricity [internet]. n.d. [cited 2020 May 6]. Available from: http://www2.dede.go.th/bhrd/old/Download/file_handbook/Pre_Elec/Elec_5.pdf. (In Thai)
- [7] Department of Alternative Energy Development and Efficiency. Standard price of high-performance equipment and Features required to detail the specifications of a high-performance device. Bangkok, Thailand: Ministry of Energy; 2018. (In Thai)
- [8] Phongsapipat S. Greenhouse evap system with growing animals in the tropics [internet]. 2015 [cited 2020 May 11]. Available from: <https://www.evap-cooling.com/16807297/> โรงเรือนระบบ-evap-กับการเลี้ยงสัตว์ในเขตร้อนชื้น. (In Thai)

ประวัติผู้เขียนบทความ



ภวิศ เวียงหาด นักศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา
การจัดการงานวิศวกรรม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
1761 ถนนพัฒนาการ แขวงสวนหลวง เขตสวนหลวง กรุงเทพฯ 10250
หมายเลขโทรศัพท์ 083-2070988 E-Mail: phawit23@gmail.com



ศักดิ์ชาย รักการ ปัจจุบันดำรงตำแหน่งผู้อำนวยการหลักสูตรวิศวกรรม
ศาสตรมหาบัณฑิต สาขาการจัดการงานวิศวกรรม มหาวิทยาลัยเกษม
บัณฑิต 1761 ถนนพัฒนาการ แขวงสวนหลวง เขตสวนหลวง กรุงเทพฯ
10250 หมายเลขโทรศัพท์ 089-7816187 E-Mail: sakchai.rak@kbu.ac.th

Article History:

Received: March 6, 2021

Revised: August 30, 2021

Accepted: August 30, 2021

ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต:

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 Zeghamti	Laboratoire de Mathematiques et Physique des Systeme- Groupe de Mecanique Energetique, Universite de Perpignan, France
รศ.ดร.กมลวัลย์ ลือประเสริฐ	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ
รศ.ดร.กอบชัย เดชหาญ	ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.กัณวรัช พลูปราชนม์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์
รศ.ดร.จิรานุช เส่งี่ยมศักดิ์	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รศ.ดร.ชูสิทธิ์ ประดับเพชร	สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา
รศ.ดร.ณกร อินทร์พยุง	คณะโลจิสติกส์ มหาวิทยาลัยบูรพา
รศ.ดร.ณฐา คุปตะเจียร	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี ราชมงคลธัญบุรี
รศ.ดร.ดนุพล ตันนโยภาส	ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รศ.ดร.ทวีพล ชื้อสัตย์	ภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.ธนู จุยฉาย	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
รศ.ดร.ธีรศิลป์ ทุมวิภาต	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือวัดและอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.นคร ภู่วโรคม	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

รศ.ดร.นิตย์ เพ็ชรรักษ์	รองอธิการบดี สายงานวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยธุรกิจ บัณฑิตย
รศ.ดร.เนตรนภิส ตันเต็มทรัพย์	สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รศ.ดร.บุญเลิศ สือเจย	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
รศ.ดร.บุญวัฒน์ อัฐชู	สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.ประยูร สุรินทร์	สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน
รศ.ดร.ปราโมทย์ ศรีน้อย	สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
รศ.ดร.พรฤดี เนติโสภาคกุล	คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.พานิช วุฒิพฤษ	ภาควิชาครุศาสตร์โยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ
รศ.ดร.พาสีทธิ์ หล่อธีรพงศ์	บัณฑิตวิทยาลัยการจัดการและนวัตกรรม มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.พิภพ สุนทรสมัย	ที่ปรึกษาคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
รศ.ดร.พิศิษฐ์ โภคารัตน์กุล	สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
รศ.ดร.ไพโรจน์ สิงหนัดกิจ	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รศ.ดร.พุศกิต์ ชิวสุวิทย์	ภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.ภัทรมน จงประดิษฐ์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี
รศ.ดร.มนตรี ศิริปรัชญานันท์	ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ
รศ.ดร.ยุทธชัย บรรเทงจิต	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ
รศ.ดร.รัตติกว วรากุลศิริพันธ์	คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
รศ.ดร.วรพจน์ กริสุระเดช	คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.วิทยา ทิพย์สุวรรณพร	สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.เวทิน ปิยรัตน์	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์

รศ.ดร.สมศักดิ์ มิตะธา	ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.สมิตร ส่งพิริยะกิจ	ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.เสรี เศวตเศรณี	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ.ดร.สุทัศน์ ลีลาทวีวัฒน์	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี
รศ.ดร.สุนิติ สุภาพ	ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัย ศรีนครินทรวิโรฒ
รศ.ดร.สุรพล บุญลือ	ภาควิชาเทคโนโลยีและสื่อสารการศึกษา มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.อดิศักดิ์ กาญจนหุทัย	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยรังสิต
รศ.ดร.อรันดร จิตต์โสภักตร์	ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.อิทธิพงศ์ ชัยสายนธ์	บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเอเซียอาคเนย์
รศ.ดร.อำพล การุณสุนทวงษ์	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี
รศ.เรวัฒน์ เหล่าไพบูลย์	ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
รศ.วัชรินทร์ วิทยกุล	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขต บางเขน
รศ.วิญญู แสงสนิทกิจ	สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
รศ.ศันสนีย์ สุภาภา	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยา เขตบางเขน
รศ.เอนก ศิริพานิชกร	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี
ผศ.ดร.กรกช ทวีสิน	สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยรามคำแหง
ผศ.ดร.กิตติพงศ์ อัครสกุล	ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผศ.ดร.กฤษณาทอง ทองศรี	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี ราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.เชมพัฒน์ ตันติวัฒนกุล	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ผศ.ดร.จักร จันทลักษณ์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.จารุวรรณ เกษมทรัพย์	สาขาวิชาการจัดการงานวิศวกรรม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
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.ดวงพร กาศาสบี	สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อมและความปลอดภัย มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม
ผศ.ดร.ติกะ บุญนาค	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์
ผศ.ดร.นิพนธ์ วรรณโสภาคย์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผศ.ดร.ปรรัตน์ ศุภมิตรโยธิน	โปรแกรมวิทยาศาตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
ผศ.ดร.ปรีดา ไชยมหาวัน	สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยพะเยา
ผศ.ดร.ภาณุวัฒน์ จ้อยกลัด	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผศ.ดร.มนตรี คำเงิน	ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผศ.ดร.มณูญ มาศนิยม	ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ผศ.ดร.รัฐภูมิ ภูแท่นคุณ	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยสยาม
ผศ.ดร.วรากร ศรีเชวงทรัพย์	สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
ผศ.ดร.วัชร เพียรสุภาพ	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผศ.ดร.วัชรินทร์ ดงบัง	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยบูรพา
ผศ.ดร.วิชัย รุ่งเรืองอนันต์	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.วินัย ไจกล้ำ	คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ผศ.ดร.วิรัตน์ จอมขวา	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.สนิท วงษา	ภาควิชาครุศาสตร์โยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.สมบุญ เจริญวิไลศิริ	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.สมโพธิ อยู่ไว	สาขาวิชาวิศวกรรมเทคนิคธรณี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.สมศักดิ์ มินคร	คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา
ผศ.ดร.สรุข บุญศิริพันธ์	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผศ.ดร.สิตางค์ ฟิลย์หล้า	ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผศ.ดร.สิทธิพงษ์ เพิ่มพิทักษ์	คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผศ.ดร.สิริพร โรจนนันต์	ภาควิชาเทคโนโลยีวัสดุ มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.สิรวงศ์ กลั่นคำสอน	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา
ผศ.ดร.สมล แสงเฮง พิสิษฐ์สังฆการ	ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการเผาไหม้และพลังงานทางเลือก ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องต้นกำลัง วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.สุรัตน์ อาริรัตน์	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผศ.ดร.อรกมล วงษ์อภิสิทธิ์	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ผศ.กานติส สุตสาคร	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผศ.จิรเมธา สังข์เกษม	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
ผศ.นราธิป แสงชัย	ศูนย์แห่งความเป็นเลิศเฉพาะทางด้าน การวิจัยและพัฒนา อุตสาหกรรมเครื่องเรือน วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.วรรณะ ประภาภรณ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
ผศ.วรากร เกิดทรัพย์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
ผศ.สหรัตน์ วงษ์ศรีษะ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ผศ.สาริต รุ่งฤดีสมบัติกิจ	สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัย เกษมบัณฑิต
ผศ.สุชาติ เหลืองประเสริฐ	ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผศ.อุษณีย์ ระหา	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง
ผศ.อนุชิต เจริญ	สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
อ.ดร.กฤษชัย วิถีพานิช	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์
อ.ดร.กิตติศักดิ์ วิธินันทกิจดี	สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ตะวันออก วิทยาเขตบางพระ
อ.ดร.คมพันธ์ ชมสมุทร	สาขาวิชาวิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี ราชมงคลพระนคร
อ.ดร.ฉัตรเพชร ยศพล	สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
อ.ดร.ชัยพันธ์ ขำญาติ	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยา เขตบางเขน
อ.ดร.ชัยรัตน์ ตั้งดวงดี	ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี
อ.ดร.ชาติ ฤทธิ์หิรัญ	สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
อ.ดร.ชาญยุทธ กฤตสุนันท์กุล	ภาควิชาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัย นเรศวร
อ.ดร.ชาญวิทย์ อุดมศักดิ์กุล	สำนักงานสภานโยบายการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและ นวัตกรรมแห่งชาติ
อ.ดร.ชานินทร์ ศรีสุวรรณนา	ภาควิชาสถิติประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ ทหารลาดกระบัง
อ.ดร.ณัฐกรณ์ เจริญธรรม	สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่ง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
อ.ดร.ณัฐวุฒิ ธนศรีสถิต	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ
อ.ดร.ตันติกร พิษฐ์พิบูล	คณะกรรมการจัดการโลจิสติกส์และการคมนาคมขนส่ง สถาบันการ จัดการปัญญาภิวัฒน์
อ.ดร.บุญเลิศ วงศ์เจริญแสงศิริ	สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์
อ.ดร.ปริญญ์ บุญนิษฐ	สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อ.ดร.ปริญญา บุญมาเลิศ	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต

อ.ดร.ประภาส ผ่องสนาม	สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
อ.ดร.พิชญุตม์ จรัสบำรุงโรจน์	สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
อ.ดร.ภักดิ์วัฒน์ แสนเจริญ	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
อ.ดร.วาทัญญู รอดประพัฒน์	สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ตะวันออก
อ.ดร.วศิน มหัตนรินทร์กุล	ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าพระนครเหนือ
อ.ดร.วิทยา พวงสมบัติ	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล รัตนโกสินทร์
อ.ดร.ศรินรัตน์ วงษ์ลี	กลุ่มวิจัยและพัฒนาชีวเคมี สถาบันเทคโนโลยีชีวเคมี แห่งชาติ (องค์การมหาชน)
อ.ดร.ศักดิ์ชาย รักการ	สาขาวิชาการจัดการงานวิศวกรรม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัย เกษมบัณฑิต
อ.ดร.ศิริดล ศิริธร	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล
อ.ดร.สำเร็จ เนตรภู	บริษัท เอส. เอช. เค. เอ็นจิเนียริ่ง จำกัด
อ.ดร.สุวรรณี สายสิน	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิม พระเกียรติ
อ.ดร.อดิเทพ ศรีคงศรี	สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
อ.ดร.อภิชาติ บัวกล้า	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา
อ.ดร.อนันต์ เดอร์ชิง	ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญ
อ.ดร.เอกชัย อยู่ประเสริฐชัย	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี
ดร.พุทธิพงศ์ เหล่ารัตนวัฒนา	สำนักก่อสร้างสะพาน กรมทางหลวงชนบท
ดร.อัศคพัฒน์ สว่างสุริย์	วิศวกรโยธาเชี่ยวชาญ สำนักวิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง
อ.จิรวัดณ์ ปลั่งใหม่	สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัย เกษมบัณฑิต
อ.ณัฐนันท์ รัตนไชย	คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ธัญบุรี
อ.นิตยา จันทรเรือง มหาผล	เลขาธิการสภาวิศวกร, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต

อ.นิติมา อัจฉริยะโพธา

ศูนย์บริการทางการศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
ธนบุรี วิทยาเขตราชบุรี

อ.สมเดช อังคะวะระ

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
โดยมุ่งเน้นผลิตบัณฑิตวิศวกรนักปฏิบัติที่มีนั้คงและยั่งยืน”**

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