

วารสารวิชาการ

เทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรม

มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม



JOURNAL OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY AND ENGINEERING

Pibulsongkram Rajabhat University

การศึกษาพื้นผิวฟิล์มบางอินเดียมทึบออกไซด์บนแผ่นซิลิกอนจากแรงดันไฟฟ้าในการสปาร์ค
THE SURFACE STUDY OF INDIUM TIN OXIDE (ITO) THIN FILM ON SILICON WAFER WITH SPARKING VOLTAGE
การสร้างสร้งงานขึ้นบนปูนปลาสเตอร์ THE CREATION OF MOLDING ON PLASTER
DEVELOPMENT AND OPTIMIZATION OF BOOST CONVERTER CIRCUIT WITH SNUBBER TECHNIQUES
การพัฒนาและเพิ่มประสิทธิภาพของวงจรเพิ่มระดับแรงดันด้วยเทคนิคสับเบอร์
THE STUDY OF MOVING TIME OF PCB PUNCHING MACHINE FROM STEPPING MOTOR CONTROL BY MICROCONTROLLER
การศึกษาเวลาในการเคลื่อนที่ของเครื่องเจาะแผ่น PCB จากการควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์
การควบคุมฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าเพื่อเป็นทางเลือกในการก่อสร้างอาคารที่ปลอดภัยและประหยัด
HARMONICS CONTROL IN SINGLE-PHASE ELECTRICAL SYSTEMS FOR RESIDENTIAL BUILDINGS
WITH AN SHUNT ACTIVE POWER FILTERING MECHANISM FEASIBILITY STUDY OF ELECTRIC
GENERATION FROM WASTE WIND COOLED การจัดการห่วงโซ่อุปทานสำหรับผลิตภัณฑ์
เฟอร์นิเจอร์ไม้ อำเภอบางระกำ จังหวัดพิษณุโลก SUPPLY CHAIN MANAGEMENT FOR WOOD
FURNITURE PRODUCT IN BANGRAKUM DISTRICT PHITSANULOK การพัฒนาแบบชุดโต๊ะ
แบบประสงค์ จากไม้สักพาทาน THE DEVELOPMENT OF A MULTI-PURPOSE TABLE SET MODEL FROM TRANSPORTATION WOOD

ISSN 2697-5602 [Print]

ISSN 2697-5629 [Online]

WASTE WIND COOLED
OPTIMIZATION CREATION
MODEL
SNUBBER MANAGEMENT
INDIUM TIN OXIDE (ITO)

ELECTRIC GENERATION
MULTI-PURPOSE
PLASTER
THIN FILM
STEPPING MOTOR
MOLDING
FURNITURE
SINGLE-PHASE
TRANSPORTATION WOOD
RESIDENTIAL BUILDINGS
HARMONICS CONTROL
PCB PUNCHING
MICROCONTROLLER
FILTERING MECHANISM

INDUSTRIAL TECHNOLOGY

PIBULSONGKRAM RAJABHAT UNIVERSITY

ปีที่ 2 ฉบับที่ 2

พฤษภาคม - สิงหาคม

2563



ข้อกำหนดมาตรฐาน วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม

เพื่อให้วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม เป็นวารสารที่มีคุณภาพได้มาตรฐานทางกองบรรณาธิการจึงมีข้อกำหนดของวารสารดังต่อไปนี้

1. วัตถุประสงค์

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม เป็นวารสารที่มีวัตถุประสงค์เพื่อ ตีพิมพ์เผยแพร่บทความวิจัย บทความวิชาการ และบทความปริทรรศน์ที่มีคุณภาพโดยผ่านการพิจารณาจากคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ โดยมีเนื้อหาครอบคลุมเกี่ยวข้องกับงานวิจัยในสาขาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม วิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ นวัตกรรมและการออกแบบ รวมถึงงานวิจัยที่มีการบูรณาการศาสตร์ทางด้านวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรมในสาขาที่เกี่ยวข้อง อย่างไรก็ตามบทความที่ส่งเข้ามาเพื่อพิจารณาตีพิมพ์ในวารสารฯ จะต้องเป็นบทความที่ไม่เคยเผยแพร่ในวารสารหรือสิ่งพิมพ์ใดมาก่อน และจะต้องไม่อยู่ในระหว่างการพิจารณาตีพิมพ์ของวารสารหรือสิ่งพิมพ์อื่นๆ การละเมิดลิขสิทธิ์ถือเป็นความรับผิดชอบของผู้ส่งบทความโดยตรง

2. ครอบคลุมสาขาที่เกี่ยวข้อง

2.1 สาขาวิชาเทคโนโลยี เน้น เทคโนโลยีอุตสาหกรรมและนวัตกรรม ได้แก่ วิศวกรรมไฟฟ้า วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ วิศวกรรมคอมพิวเตอร์ วิศวกรรมพลังงาน / พลังงานทดแทน วิศวกรรมโยธา วิศวกรรมการผลิต วิศวกรรมเครื่องกล วิศวกรรมโลจิสติกส์ มาตรวิทยา วิศวกรรมซอฟต์แวร์ เทคโนโลยีเซรามิกส์ การบริหารจัดการอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี

2.2 สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ประยุกต์

2.3 สาขาวิชาที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีอุตสาหกรรม และวิศวกรรม

3. การพิจารณาบทความ

การ Peer - review คือ รูปแบบการพิจารณาบทความ เป็นแบบ "Double blind" เจ้าของบทความไม่ทราบผู้ทรงฯ ผู้ทรงฯไม่ทราบเจ้าของบทความ Review Policy ขอบเขต วัตถุประสงค์ของบทความจะต้องตรงกับวารสารวิชาการ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม กำหนด



การพิจารณาบทความ

1. การพิจารณาบทความ เลือกผู้ทรงคุณวุฒิจากกองบรรณาธิการตรงตามสาขาวิชาในการพิจารณา 2 คน ต่อ 1 บทความ
2. กรณีบทความมาจากบุคคลภายในมหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม กองบรรณาธิการพิจารณานำส่งบทความให้ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก 2 คน
3. กรณีบทความจากบุคลากรภายนอกมหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม กองบรรณาธิการพิจารณานำส่งบทความให้ผู้ทรงคุณวุฒิภายในและหรือภายนอก 2 คน
4. กรณีผู้ส่งบทความ แก้ไขไม่เป็นไปตามกำหนดเวลาที่กองบรรณาธิการแจ้ง กองบรรณาธิการขอสงวนสิทธิ์พิจารณา ยกเลิก กระบวนการเพื่อการตีพิมพ์

4. กำหนดออกเล่มวารสาร

กำหนดออกวารสาร: ปีละ 3 ฉบับ คือ ฉบับที่ 1 ระหว่างเดือน มกราคม – เมษายน ฉบับที่ 2 ระหว่างเดือน พฤษภาคม – สิงหาคม และ ฉบับที่ 3 ระหว่างเดือน กันยายน-ธันวาคม

5. คำแนะนำสำหรับผู้ส่งบทความเพื่อตีพิมพ์

5.1 วิธีส่งบทความ เจ้าของบทความสามารถศึกษาข้อมูลเพิ่มเติม และส่งต้นฉบับบทความ ในรูปแบบไฟล์ word และรูปแบบไฟล์ PDF ได้ที่ระบบออนไลน์ของวารสารวิชาการ <https://www.tci-thaijo.org/index.php/psru-jite>

หรือนำส่งเอกสารต้นฉบับ ได้ที่ กองบรรณาธิการวารสารวิชาการ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม 156 หมู่ 5 ตำบลพลายชุมพล อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก 65000 โทร/โทรสาร 055-267124

5.2 รูปแบบบทความที่ส่งกองบรรณาธิการเพื่อตีพิมพ์

บทบรรณาธิการ

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม (Industrial Technology and Engineering Pibulsongkram Rajabhat University) Print ISSN : 2697-5602, E-ISSN : 2697-5629 ฉบับนี้เป็นปีที่ 2 ฉบับที่ 2 มีเนื้อหาที่เน้นด้านทางด้านเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรม วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี โดยมีเนื้อหาครอบคลุมเกี่ยวข้องกับงานวิจัยในสาขาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม วิศวกรรมศาสตร์สาขาต่าง ๆ สำหรับเนื้อหาในฉบับนี้ ประกอบด้วย บทความวิจัย 8 บทความ โดยมีเนื้อหาประกอบด้วย สาขาวิศวกรรมพลังงาน จำนวน 2 บทความ สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จำนวน 2 บทความ สาขาวิศวกรรมโลหการ จำนวน 2 บทความ สาขาวิศวกรรมโยธา จำนวน 1 บทความ สาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ จำนวน 1 บทความ โดยบทความทั้งหมดได้ผ่านการประเมินโดยผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ (Peer Review) ในสาขานั้น ๆ เพื่อให้ได้ผลงานที่มีคุณภาพก่อนการตีพิมพ์ และสามารถดาวน์โหลดได้จากเว็บไซต์ <https://ph02.tcithaijo.org/index.php/psru-jite/issue/view/16550> ภายใต้ระบบ ThaiJo ของศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย

กองบรรณาธิการและคณะกรรมการจัดทำวารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม ขอขอบคุณผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาคุณภาพบทความ และผู้สนใจที่กรุณาช่วยกันสนับสนุนและให้ความไว้วางใจผลงานของวารสารฉบับนี้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งจากนักวิจัยที่ได้กรุณาเผยแพร่ผลงานในวารสารนี้ กองบรรณาธิการหวังเป็นอย่างยิ่งว่าจะได้รับเกียรติและความอนุเคราะห์จากท่านในโอกาสต่อไป



รองศาสตราจารย์ ดร.สนธิ ปิ่นสกุล
บรรณาธิการ

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
แนวทางการใช้จำนวนเต็มเกาส์เซียนกับวิทยาการเข้ารหัสลับอสมมาตร แบบคลาสสิกและแบบหลังควอนตัมวนารัตน์ จุฬพันธ์ทอง และ สุรเดช จิตประไพกุลศาล.....	1-12
การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายสารทำงานที่มีความ เหมาะสมสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ขนาดเล็กสมชาย เจียจิตต์สวัสดิ์ และสรวิศ สอนสารี.....	13-28
ศึกษาการทำงานของรถไฟฟ้าร่วมพลังงานแสงอาทิตย์อเนก ดัสกรณ, วัชรกร ใจตรง, เอกภูมิ บุญธรรม และมนตรี วงศ์ศิริวิทยา.....	29-36
การเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการตรวจสอบชิ้นส่วนรถยนต์ กรณีศึกษา โครงการรถยนต์ชิตชนู ภักดีวานิช และ สุชาชนิษฐ์ ทองพรหม.....	37-51
การพยากรณ์รังสีอาทิตย์ด้วยวิธีวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณเชิงเส้น: กรณีศึกษาอำเภอเมืองพิษณุโลก (ประเทศไทย)กิตติศักดิ์ คงสีไพร และสมพร เรื่องสินชันวานิช.....	52-58
การลดเวลาการจัดส่งพัสดุของบริษัท XYZ ด้วยวิธีการจำลอง สถานการณ์กรณีมีหลายจุดรับพัสดุและมีหลายโซนนำจ่ายเดชดำรง จิราพงษ์, รัฐชานนท์ หอมหวล, ณัฐพร ตั้งเจริญชัย, สุกฤษฎี เพชรสวัสดิ์, และธัชชัย เทพกรณ์.....	59-71
การศึกษาการพัฒนาคลังอัดประลัยของมอร์ตาร์ด้วยเถ้ากลบบัดสุรเชษฐ์ วรรณ.....	72-78
การประเมินความปลอดภัยทางถนนบนเส้นทางท่องเที่ยว กรณีศึกษา: ทางหลวงแผ่นดินหมายเลข 12 (จังหวัดพิษณุโลก - อำเภอหล่มสัก จังหวัดเพชรบูรณ์)ปรารณา ศิริสานต์, ภัทรพล พลูแสง, วริษฐา สายทองคำ และ อรุณานิ พรมาพงษ์.....	79-92



แนวทางการใช้จำนวนเต็มเกาส์เซียนกับวิทยาการเข้ารหัสลับอสมมาตร
แบบคลาสสิกและแบบหลังควอนตัม
AN OVERVIEW OF GAUSSIAN INTEGER APPROACHES FOR
CLASSICAL AND POST-QUANTUM ASYMMETRIC CRYPTOGRAPHY

วนารัตน์ จุฬพันธ์ทอง^{1*} และ สุรเดช จิตประไพกุลศล²

Wanarat Juraphanthong^{1*} and Suradet Jitprapaikulsarn²

¹สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม

อ.เมือง จ.พิษณุโลก ประเทศไทย 65000

²ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

อ.เมือง จ.พิษณุโลก ประเทศไทย 65000

¹Department of Computer Engineering, Faculty of Industrial Technology, Pibulsongkram Rajabhat University,
Muang Phitsanulok, Phitsanulok, Thailand 65000

²Department of Electrical and Computer Engineering, Faculty of Engineering,
Naresuan University, Muang Phitsanulok, Phitsanulok, Thailand 65000

* Corresponding author E-mail: wanaratj15@gr

วันที่เข้าระบบ 17 มิถุนายน 2563

วันที่แก้ไขบทความ 9 กรกฎาคม 2563

วันที่ตอบรับบทความ 9 กรกฎาคม 2563

บทคัดย่อ

วิทยาการเข้ารหัสลับอสมมาตร หรือวิทยาการเข้ารหัสลับกุญแจสาธารณะ เป็นมาตรการที่นิยมนำมาใช้ในการรักษาความมั่นคงของข้อมูล เนื่องจากเชื่อว่าการเข้ารหัสลับแบบนี้ยากต่อการถูกโจมตี แต่เมื่อมีการคิดค้นขั้นตอนวิธีการโจมตีที่ทำงานบนการประมวลผลควอนตัม ส่งผลให้การโจมตีการเข้ารหัสลับอสมมาตรแบบคลาสสิกไม่ใช่เรื่องยากอีกต่อไป จึงนำไปสู่การพัฒนาวิทยาการเข้ารหัสลับหลังควอนตัม การเข้ารหัสลับอสมมาตรแบบคลาสสิกและแบบหลังควอนตัมใช้เลขจำนวนเต็มมิตติเดียวเป็นพื้นฐาน การนำคุณลักษณะของจำนวนเต็มเกาส์เซียนซึ่งมีสองมิติมาช่วยเพิ่มความซับซ้อนเพื่อให้การเข้ารหัสลับทนทานต่อการโจมตีจึงเป็นหัวข้อหนึ่งที่น่าสนใจ ในบทความนี้จึงได้รวบรวมแนวคิดการนำจำนวนเต็มเกาส์เซียนมาใช้กับวิทยาการเข้ารหัสลับอสมมาตรทั้งแบบคลาสสิกและแบบหลังควอนตัม

คำสำคัญ: วิทยาการเข้ารหัสลับกุญแจสาธารณะ, วิทยาการเข้ารหัสลับอสมมาตร, วิทยาการเข้ารหัสลับหลังควอนตัม, จำนวนเต็มเกาส์เซียน

Abstract

Asymmetric cryptography or public key cryptography is a popular measure employed to keep information secure. For a long time, it was thought to be very difficult to attack; hence, highly secure. However, the advent of quantum-based attacking algorithms drastically reduces the difficulties of attacking. This leads to the development of the post-quantum cryptography. Classical and post-quantum asymmetric cryptography systems are based on one-dimension integer. The utilization of Gaussian integer, a two-dimension number system, to enhance the complexity in order to resist the attacks is therefore an interesting topic. In this paper, we have surveyed and summarized the various approaches in applying Gaussian integer with classical and post-quantum cryptography.

Keywords: Asymmetric cryptography, Public key cryptography, Post-quantum cryptography, Gaussian integer

1. บทนำ

ในอนาคตอันใกล้การประมวลผลควอนตัมอาจไม่เป็นเพียงแนวคิดอีกต่อไป เนื่องจากในหลายปีที่ผ่านมา บริษัทเทคโนโลยีทั่วโลกได้แข่งขันกันพัฒนาควอนตัมคอมพิวเตอร์และให้การสนับสนุนงานวิจัยเกี่ยวกับการประมวลผลควอนตัมอย่างต่อเนื่อง การมาถึงของการประมวลผลควอนตัมนี้ทำให้วิทยาการเข้ารหัสลับหลังควอนตัม (Post-quantum cryptography) ได้รับความสนใจจากนักวิจัยมากขึ้นเช่นกัน เนื่องมาจากวิทยาการเข้ารหัสลับอสมมาตร (Asymmetric Cryptography) ที่นิยมใช้ในปัจจุบันเช่น RSA (Rivest *et al.*, 1978) และ ElGamal (1985) มีจุดอ่อนที่เราสามารถใช้ขั้นตอนวิธี (Algorithm) ที่ทำงานบนการประมวลผลควอนตัมอย่างเช่น ขั้นตอนวิธีของ Shor (1997) มาโจมตีระบบให้สำเร็จภายในเวลาที่เป็นพหุนาม (Polynomial time) สถาบันแห่งชาติของมาตรฐานและเทคโนโลยี (NIST) ของสหรัฐอเมริกาจึงประกาศให้มีการนำเสนอวิทยาการเข้ารหัสลับหลังควอนตัมเพื่อนำมาคัดเลือกเป็นมาตรฐานการเข้ารหัสลับในปี ค.ศ. 2017 (Computer security division, 2017) คาดการณ์ว่าจะมีการประกาศผลระบบที่จะผ่านการคัดเลือกรอบที่ 3 ในราวกลางปี ค.ศ. 2020

วิทยาการเข้ารหัสลับส่วนใหญ่ตั้งอยู่บนฐานของจำนวนเต็มทั่วไปซึ่งมีมิติเดียว การนำจำนวนเต็มเกาส์เซียนที่มีสองมิติมาใช้ในการเข้ารหัสลับจึงเป็นแนวคิดหนึ่งที่มีนักวิจัยนำมาเพิ่มความซับซ้อนของการเข้ารหัสและถอดรหัส เพื่อให้การโจมตีวิทยาการเข้ารหัสลับนั้นทำได้ยากยิ่งขึ้น นอกจากนี้

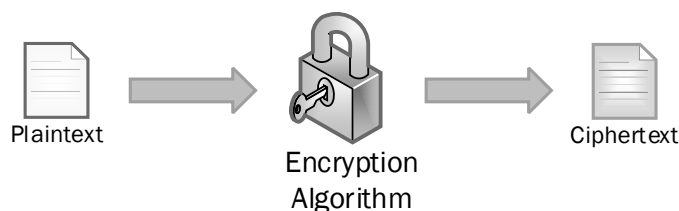
ยังมีงานวิจัยที่นำจำนวนเต็มเกาส์เซียนมาใช้ในการพัฒนาวิทยาการเข้ารหัสลับหลังควอนตัม ทำให้ระบบมีความทนทานต่อการโจมตีด้วยการประมวลผลควอนตัมมากขึ้น

ในบทความนี้ได้รวบรวมแนวความคิดการใช้ประโยชน์จากจำนวนเต็มเกาส์เซียนสำหรับวิทยาการเข้ารหัสลับอสมมาตรที่นิยมใช้ในปัจจุบันและวิทยาการเข้ารหัสลับหลังควอนตัมที่กำลังได้รับความสนใจ เพื่อเป็นแนวทางสำหรับนักวิจัยที่สนใจในการพัฒนาวิทยาการเข้ารหัสลับให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นและเพิ่มตัวเลือกของระบบที่จะนำไปใช้ป้องกันการโจมตีจากการประมวลผลควอนตัมในอนาคต โดยบทความแสดงวิทยาการเข้ารหัสลับอสมมาตรแบบคลาสสิกและแบบหลังควอนตัมโดยใช้ประโยชน์จากจำนวนเต็มเกาส์เซียน ซึ่งเป็นระบบจำนวนชนิดหนึ่งที่สามารถช่วยเพิ่มความซับซ้อนให้กับการโจมตีไปยังวิทยาการเข้ารหัสลับที่จะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

2. วิทยาการเข้ารหัสลับ (Cryptography)

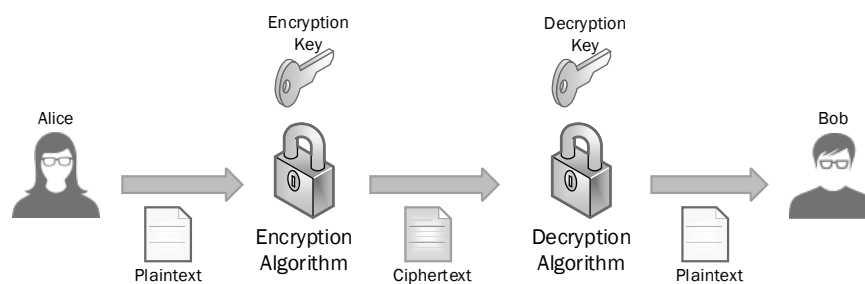
วิทยาการเข้ารหัสลับเป็นมาตรการความมั่นคงทางเทคนิคที่นำมาใช้ในการรักษาความน่าเชื่อถือและความมั่นคงของระบบสารสนเทศดังที่กล่าวถึงในโมเดล RMIA (Cherdantseva & Hilton, 2013) ซึ่งสามารถบรรจุเป้าหมายหลายข้อ ตัวอย่างเช่น การรักษาความลับ (Confidentiality) การรักษาความสมบูรณ์ (Integrity) การตรวจสอบความน่าเชื่อถือ (Authenticity) และในการป้องกันการปฏิเสธ (Non-repudiation) เป็นต้น โดยวิทยาการเข้ารหัสลับ แบ่งระบบออกเป็น 3 ประเภท ตามลักษณะของกุญแจที่ใช้ดังนี้

2.1 การเข้ารหัสแบบไม่ใช้กุญแจ (Unkeyed cryptography) คือระบบการเข้ารหัสที่ไม่ได้ใช้กุญแจ (Key) ดังภาพที่ 1 ซึ่งเป็นการเข้ารหัสข้อความให้เป็นข้อความลับด้วยวิธีการที่ยากหรือไม่สามารถถอดรหัสข้อความกลับได้ เช่น การเข้ารหัสแบบทางเดียว (One-way function) ฟังก์ชันแบบแฮช (Hashing function) ตัวอย่างมาตรฐานที่ใช้ระบบแบบไม่ใช้กุญแจ ได้แก่ MD5, SHA-1 และ CRC32 เป็นต้น



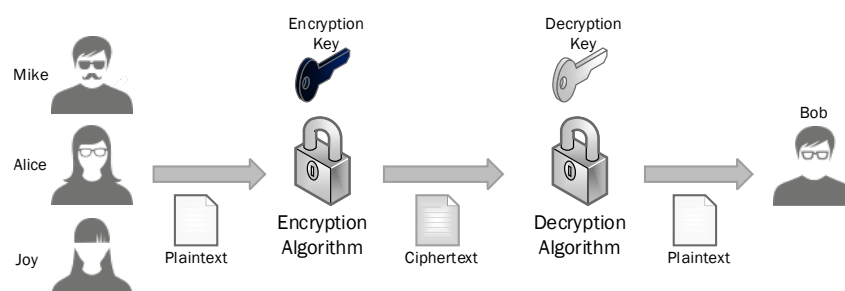
ภาพที่ 1 การเข้ารหัสแบบไม่ใช้กุญแจ

2.2 การเข้ารหัสลับสมมาตร (Symmetric cryptography) คือระบบการเข้ารหัสที่ใช้กุญแจลับ (Secret key) ในการเข้ารหัสข้อมูล ซึ่งจะใช้กุญแจดอกเดียวกันทั้งในการเข้ารหัสข้อความปกติให้เป็นข้อความลับ และถอดรหัสข้อความลับให้กลับเป็นข้อความปกติ ทำให้ผู้ที่ไม่มีกุญแจไม่สามารถเข้าใจข้อความลับได้ ดังภาพที่ 2 โดยตัวอย่างมาตรฐานที่ใช้ระบบแบบสมมาตร ได้แก่ DES, 3DES และ AES เป็นต้น



ภาพที่ 2 การเข้ารหัสลับสมมาตร

2.3 การเข้ารหัสลับอสมมาตร (Asymmetric cryptography) คือวิทยาการเข้ารหัสลับที่กุญแจในการเข้ารหัส และกุญแจในการถอดรหัสเป็นคนละดอกกัน โดยปกติแล้วผู้ที่จะเผยแพร่กุญแจที่ใช้ในการเข้ารหัสลับสู่สาธารณะ นั้นคือเป็นกุญแจสาธารณะ (Public key) และจะใช้กุญแจอีกดอกหนึ่งซึ่งเก็บเป็นความลับ นั้นคือเป็นกุญแจลับ (Private key) ในการถอดรหัสข้อความลับกลับเป็นข้อความเดิม ดังภาพที่ 3 ทำให้เรียกการเข้ารหัสลับแบบนี้อีกอย่างหนึ่งว่าการเข้ารหัสลับกุญแจสาธารณะ (Public key cryptography) ตัวอย่างมาตรฐานที่ใช้ระบบแบบอสมมาตร ได้แก่ DSS และ RSA เป็นต้น



ภาพที่ 3 การเข้ารหัสลับอสมมาตร

จากคุณลักษณะที่แตกต่างกันของวิทยาการเข้ารหัสลับทั้งสามประเภทข้างต้น ทำให้วิทยาการเข้ารหัสลับแบบไม่ใช้กุญแจมักจะนำไปใช้สำหรับการเข้ารหัสที่ไม่ต้องการการถอดรหัสกลับ เช่น การเข้ารหัส MD5 บันทึกรหัสผ่านสำหรับตรวจสอบการลงชื่อเข้าใช้ระบบ เป็นต้น ส่วนระบบแบบสมมาตร

และอสมมาตรมักจะนำไปใช้ในการแลกเปลี่ยนข้อมูลบนอินเทอร์เน็ตที่ต้องการเข้ารหัสและถอดรหัสข้อความกลับ เช่น การประยุกต์ใช้ในระบบลายเซ็นดิจิทัลเพื่อตรวจสอบตัวตนที่แท้จริงของผู้ส่งข้อความ เป็นต้น

นอกจากนี้ยังทำให้ระบบแต่ละประเภทมีข้อดีและข้อจำกัดแตกต่างกันไป ดังเช่น ระบบแบบไม่ใช้กุญแจและแบบสมมาตรมีข้อดีคือ ใช้เวลาในการเข้ารหัสหรือถอดรหัสข้อความน้อยกว่าระบบแบบอสมมาตร เนื่องจากใช้ขั้นตอนวิธีที่มีความซับซ้อนน้อยกว่า อย่างไรก็ตามข้อจำกัดของระบบแบบสมมาตรคือความยุ่งยากในการแลกเปลี่ยนกุญแจระหว่างกัน เนื่องจากต้องใช้กุญแจหลายคู่เมื่อจำเป็นต้องแลกเปลี่ยนข้อมูลกับผู้ใช้หลายกลุ่ม รวมถึงปัญหาในการรักษาความปลอดภัยของกุญแจเนื่องจากคู่กุญแจลับไม่อาจเปิดเผยให้ผู้อื่นรู้ได้ ส่วนระบบแบบอสมมาตรออกแบบมาเพื่อให้เผยแพร่กุญแจเข้ารหัสไปยังสาธารณะได้ ทำให้มีข้อดีคือขจัดปัญหาด้านความปลอดภัยระหว่างการแลกเปลี่ยนคู่กุญแจลับ และใช้กุญแจเพียงคู่เดียวเมื่อต้องการแลกเปลี่ยนข้อมูลกับผู้ใช้หลายกลุ่ม ดังสรุปในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ข้อดีของการเข้ารหัสลับแบบต่าง ๆ

ข้อดี	การเข้ารหัสลับ		
	ไม่ใช้กุญแจ	สมมาตร	อสมมาตร
1. ถอดรหัสข้อความกลับเป็นข้อความได้	✗	✓	✓
2. การเข้ารหัส/ถอดรหัสข้อมูลใช้เวลาสั้น	✓	✓	✗
3. ไม่มีการแลกเปลี่ยนกุญแจระหว่างผู้ใช้	✓	✗	✓

3. ระบบเข้ารหัสลับอสมมาตรแบบคลาสสิก

การเข้ารหัสลับอสมมาตรเป็นระบบการเข้ารหัสที่ใช้กุญแจแบบอสมมาตร กล่าวคือใช้คู่กุญแจในการเข้ารหัสและถอดรหัสคนละดอกกัน โดยสามารถเผยแพร่กุญแจเข้ารหัสไปยังสาธารณะได้ ดังที่กล่าวไปข้างต้น ซึ่งระบบออกแบบมาเพื่อขจัดปัญหาด้านความปลอดภัยระหว่างการแลกเปลี่ยนคู่กุญแจลับบนระบบแบบสมมาตรที่ไม่อาจเปิดเผยให้ผู้อื่นรู้ได้ อย่างไรก็ตามข้อจำกัดของระบบแบบอสมมาตรคือความซับซ้อนของขั้นตอนวิธีการเข้ารหัสและถอดรหัส ทำให้ที่ผ่านมาระบบมักจะนำไปใช้กับการเข้ารหัสเฉพาะข้อความสำคัญหรือเข้ารหัสกุญแจลับที่ต้องการแลกเปลี่ยนกันระหว่างผู้ใช้ โดยการเข้ารหัสลับอสมมาตรนั้น สามารถแบ่งประเภทโดยอาศัยพื้นฐานของปัญหา หรือสมมติฐานความยาก ที่กำหนดความซับซ้อนของระบบเพื่อป้องกันการถอดรหัสของผู้โจมตี ซึ่งการเข้ารหัสลับที่นิยมใช้ในปัจจุบัน ได้มีการใช้เลขจำนวนเต็มเกาส์เซียนมาปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบดังนี้

3.1 ปัญหาการแยกตัวประกอบจำนวนเต็ม (Integer factorization problem: IFP)

ตัวอย่างวิทยาการเข้ารหัสลับสมมาตรที่อยู่บนพื้นฐานปัญหานี้คือ ระบบการเข้ารหัส RSA นำเสนอโดย Rivest Shamir และ Adleman ที่อาศัยความยากในการแยกตัวประกอบของจำนวนเฉพาะ สร้างความซับซ้อนในการถอดรหัสข้อความ ต่อมา มีการปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบให้ดียิ่งขึ้นโดยการประยุกต์ใช้จำนวนเต็มเกาส์เซียน ดังเช่น Pradhan (2013) นำเสนอขั้นตอนวิธีโดยใช้จำนวนเต็มเกาส์เซียนแทนที่การใช้จำนวนเต็มบนระบบเข้ารหัสแบบ RSA ซึ่งผลจากการปรับเปลี่ยนตัวแปรนี้พบว่าช่วยให้ระบบมีความปลอดภัยมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับระบบเดิม เนื่องจากมีขอบเขตที่มากขึ้นในการสร้างข้อความเพื่อเข้ารหัส อีกทั้งยังเพิ่มจำนวนกุญแจให้เลือกใช้ได้มากขึ้น ทำให้ผู้โจมตีต้องใช้ความพยายามมากขึ้นในการถอดรหัสข้อความ และค้นหากุญแจ

3.2 ปัญหาลอการิทึมไม่ต่อเนื่อง (Discrete logarithm problem: DLP) ตัวอย่าง

วิทยาการเข้ารหัสลับสมมาตรที่อยู่บนพื้นฐานปัญหานี้คือ ระบบ ElGamal ที่อาศัยความยากในการแก้ปัญหาลอการิทึมไม่ต่อเนื่องสร้างความซับซ้อนในการถอดรหัสข้อความ ซึ่งระบบนี้มีผู้วิจัยนำจำนวนเต็มเกาส์เซียนมาปรับปรุงประสิทธิภาพเช่นกัน ดังเช่น Elkamchouchi *et al.* (2003) ได้นำเสนอเทคนิคใหม่ในการเข้ารหัสแบบสมมาตรโดยใช้การผสมผสานระหว่างระบบแบบ IFP และ DLP บนโดเมนของจำนวนเต็มเกาส์เซียน ซึ่งเทคนิคนี้ช่วยให้มีความปลอดภัยมากขึ้นและช่วยลดความซับซ้อนในการคำนวณเมื่อเปรียบเทียบกับระบบเข้ารหัสแบบ RSA และ ElGamal นอกจากนี้ Koval (2016) ได้นำเสนอขั้นตอนวิธีการยกกำลังจำนวนเต็มเกาส์เซียนสำหรับนำไปใช้ในระบบการเข้ารหัสแบบ DLP โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเต็มเกาส์เซียนและ Lucas sequences ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการประมวลผลเมื่อเปรียบเทียบกับขั้นตอนวิธีเดิมที่เป็นการยกกำลังจำนวนเต็ม

3.3 ปัญหาลอการิทึมไม่ต่อเนื่องเส้นโค้งเชิงวงรี (Elliptic curve discrete logarithm

problem: ECDLP) ตัวอย่างวิทยาการเข้ารหัสลับสมมาตรที่อยู่บนพื้นฐานปัญหานี้คือ ระบบ ECC (Miller, 1985) ซึ่งมีความซับซ้อนในการถอดรหัสข้อความของระบบอยู่บนพื้นฐานความยากในการแก้ปัญหาลอการิทึมไม่ต่อเนื่องเส้นโค้งเชิงวงรี ต่อมา Mohamed & Elkamchouchi (2009) ได้นำเสนอวิธีการเพื่อปรับปรุงระบบ ECC โดยใช้จำนวนเต็มเกาส์เซียนแทนที่จำนวนเต็มแบบเดิม จำนวนของจุดที่สามารถใช้ได้มากขึ้นบนเส้นโค้งเชิงวงรี ทำให้ระบบมีความปลอดภัยมากขึ้น อย่างไรก็ตามพบว่าการใช้กุญแจที่เป็นจำนวนเต็มเกาส์เซียนต้องใช้พื้นที่มากขึ้นในการจัดเก็บเช่นกัน

4. วิทยาการเข้ารหัสลับหลังควอนตัม

การเข้ารหัสลับที่ทนทานต่อการประมวลผลควอนตัมหรือที่นิยมเรียกว่าวิทยาการเข้ารหัสลับหลังควอนตัม (Post-quantum cryptography) ได้รับความสนใจจากนักวิจัยในไม่กี่ปีที่ผ่านมา เนื่องจากการพัฒนาอย่างต่อเนื่องของควอนตัมคอมพิวเตอร์ และขั้นตอนวิธีในการประมวลผล

ควอนตัมที่สามารถโจมตีวิทยาการเข้ารหัสลับที่นิยมใช้ในปัจจุบัน ซึ่งเป็นระบบบนพื้นฐานปัญหา IFP DLP และ ECDLP ที่กล่าวไปแล้วข้างต้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยการเข้ารหัสแบบอสมมาตรที่ทนทานต่อการประมวลผลควอนตัมนั้น สามารถแบ่งประเภทโดยอาศัยพื้นฐานของปัญหาหรือสมมติฐานความยาก ซึ่งในบทความนี้จะนำเสนอเฉพาะประเภทที่ได้รับความสนใจและเป็นระบบที่เข้าร่วมในการสร้างมาตรฐานสำหรับวิทยาการเข้ารหัสลับหลังควอนตัมของ NIST โดยพบว่าแต่ละระบบมีผู้วิจัยนำเสนอการปรับปรุงประสิทธิภาพด้วยวิธีการต่าง ๆ รวมถึงการใช้เลขจำนวนเต็มเกาส์เซียนดังนี้

4.1 ปัญหาสมการพหุนามหลายตัวแปรบนเซตจำกัด (Multivariate quadratic polynomial problem: MQP) เป็นวิทยาการเข้ารหัสลับประเภท Multivariate-based อยู่บนพื้นฐานความยากในการแก้ปัญหสมการพหุนามหลายตัวแปรบนเซตจำกัด จัดอยู่ในกลุ่มความซับซ้อนของปัญหา NP-hard ตัวอย่างของระบบคือ ระบบการเข้ารหัส Hidden field equation (HFE) นำเสนอโดย Patarin (1996) ซึ่งเป็นการสร้างกุญแจสาธารณะจากสมการพหุนามที่ยากต่อการอินเวอร์สหากไม่ทราบสมการพหุนามที่เป็นกุญแจลับ และ Rainbow (Ding & Schmidt, 2005) ซึ่งเป็นระบบลายเซ็นดิจิทัลที่ใช้คุณลักษณะของสมการพหุนามหลายตัวแปรเช่นกัน แต่เนื่องด้วยระบบมีข้อจำกัดคือความซับซ้อนในการคำนวณสมการพหุนามหลายตัวแปร การปรับปรุงระบบจึงเน้นไปที่ลดความซับซ้อนเพื่อให้การเข้ารหัสและถอดรหัสมีความรวดเร็ว เช่น การใช้ Groebner Basis เป็นต้น

4.2 ปัญหาเวกเตอร์ที่สั้นที่สุดบนแลตทิซ (Shortest vector problem: SVP) เป็นวิทยาการเข้ารหัสลับประเภท Lattice-based อยู่บนพื้นฐานความยากในการหาเวกเตอร์ที่สั้นที่สุดบนแลตทิซของกุญแจลับของระบบ ซึ่งอยู่ในกลุ่มความซับซ้อนของปัญหา NP-hard ตัวอย่างของระบบคือ ระบบการเข้ารหัส NTRU นำเสนอโดย Hoffstein *et al.* (1998) ซึ่งระบบ NTRU อยู่บนพื้นฐานของแลตทิซ โดยสมการพหุนามดีกรี $N-1$ ที่มีสัมประสิทธิ์เป็นจำนวนเต็มบนริง ดังสมการที่ 1

$$R = Z[x]/(x^N - 1) \quad (1)$$

การเพิ่มระดับความปลอดภัยของระบบสามารถทำได้หลายรูปแบบ ดังเช่น วิธีแรกคือการเปลี่ยนไปใช้สมการพหุนามสองตัวแปร (Caboara *et al.*, 2008) ซึ่งทำให้ยากขึ้นในการคาดเดากุญแจลับ วิธีที่สองคือการเพิ่มดีกรีของสมการพหุนาม อย่างไรก็ตามวิธีการนี้ทำให้ระบบต้องใช้เวลามากขึ้นในการคำนวณ นักวิจัยจึงพยายามแก้ปัญหาดังกล่าวโดยการปรับปรุงขั้นตอนวิธีการหาอินเวอร์สของสมการพหุนาม (Zhao & Su, 2011; Nyokabi *et al.*, 2017) และการใช้เมทริกซ์แทนสมการพหุนาม (Nayak *et al.*, 2012) เป็นต้น วิธีที่สามคือ การใช้สัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามเป็นจำนวนประเภทอื่นแทนที่จำนวนเต็ม ซึ่งมีการนำจำนวนเต็มเกาส์เซียนมาใช้ปรับปรุงระบบด้วย เช่น Nanda *et al.* (2015) ใช้จำนวนเต็มเกาส์เซียนและใช้การคำนวณบนเมทริกซ์แทนสมการพหุนามบน NTRU วิธีการนี้เพิ่มฟิลด์ในการสร้างกุญแจ ทำให้ผู้โจมตีต้องใช้ความพยายามมากขึ้นในการคาดเดากุญแจ

แม้จำนวนเต็มเกาส์เซียนทำให้ต้องคำนวณอย่างซับซ้อนมากขึ้น แต่การใช้เมทริกซ์ก็สามารถช่วยลดความซับซ้อนบนระบบลงได้ นอกจากจำนวนเต็มเกาส์เซียนแล้ว ยังมีการนำเสนอจำนวนประเภทอื่นเพื่อปรับปรุงระบบ NTRU เช่น การใช้จำนวน Kleinian (Thakur *et al.*, 2017) จำนวน Eisenstein (Jarvis & Nevins, 2015) จำนวน Quaternion (Bagheri *et al.*, 2017) และ จำนวน Octonion (Malekian & Zakerolhosseini, 2010; Bagheri & Sadeghi, 2015) เป็นต้น

4.3 ปัญหาชุดข้อมูลความผิดพลาดบนรหัสบล็อกเชิงเส้น (Syndrome decoding problem: SDP) เป็นระบบการเข้ารหัสประเภท Code-based ที่อยู่บนพื้นฐานความยากในการหาชุดข้อมูลความผิดพลาดบนรหัสบล็อกเชิงเส้น สมมติฐานความยากของระบบนี้อยู่ในกลุ่มความซับซ้อนของปัญหา NP-complete ข้อดีของระบบนี้คือการเข้ารหัสและถอดรหัสมีความรวดเร็ว ตัวอย่างของระบบคือ ระบบการเข้ารหัส McEliece (1978) โดยใช้รหัส Goppa เป็นรหัสเชิงเส้นแก้ไขข้อผิดพลาดสำหรับการเข้ารหัสและถอดรหัสบนระบบ สร้างจากสมการพหุนาม $g(x)$ ดีกรี t บนเซตจำกัด $GF(p)$ เนื่องจากระบบ McEliece มีข้อเสียเรื่องของขนาดของกุญแจที่มากกว่าระบบอื่น ดังนั้นการปรับปรุงระบบจึงให้ความสำคัญกับการเลือกใช้รหัสแบบอื่น ๆ เพื่อต้องการลดขนาดของกุญแจของระบบลง ซึ่งหมายถึงการทำให้ระบบมีระดับความปลอดภัยที่มากขึ้นเมื่อเทียบกับขนาดของกุญแจที่เท่ากัน โดยรหัสที่นำเสนอเป็นรหัสที่อยู่บนฐานของจำนวนเต็ม ยกตัวอย่างเช่น การใช้รหัส Reed-Muller (Sidel'nikov, 1994) รหัส Generalized Reed-Solomon (Niederreiter, 1986) รหัส LDPC (Monico *et al.*, 2000) QC-LDPC (Baldi *et al.*, 2008) รหัส MDPC และ QC-MDPC (Misoczki *et al.*, 2013) และสุดท้ายรหัส Polar (Shrestha & Kim, 2014; Hooshmand *et al.*, 2017) เป็นต้น

5. การใช้ประโยชน์จากจำนวนเต็มเกาส์เซียน

จากการรวบรวมแนวคิดของวิทยาการเข้ารหัสลับสมมาตรสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2 โดยพบว่าการใช้ประโยชน์จากจำนวนเต็มเกาส์เซียนบนวิทยาการเข้ารหัสลับแบบคลาสสิกทั้ง 3 ประเภท คือ IFP DLP และ ECDLP ซึ่งการใช้จำนวนเต็มเกาส์เซียนนี้ ได้เพิ่มประสิทธิภาพในด้านความปลอดภัยและด้านการประมวลผลของระบบ อย่างไรก็ตามด้วยข้อจำกัดของระบบแบบเดิมซึ่งสามารถถูกโจมตีด้วยขั้นตอนวิธีบนการประมวลผลคอนตัม ระบบที่ทนทานต่อการประมวลผลคอนตัมจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง ซึ่งนักวิจัยได้ให้ความสนใจ และพยายามปรับปรุงระบบ โดยพบว่าระบบประเภท MQP ยังไม่มีการนำเลขจำนวนเต็มเกาส์เซียนมาใช้ ส่วนระบบประเภท SVP นอกจากการนำจำนวนเต็มเกาส์เซียนมาใช้แล้ว ยังมีการนำเลขแบบอื่น ๆ มาใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพอีกด้วย สุดท้ายระบบประเภท SDP ผู้วิจัยส่วนมากเน้นไปที่การนำรหัสชนิดต่าง ๆ ซึ่งยังคงเป็นรหัสที่อยู่บนฐานของจำนวนเต็มแบบมิตติเดียว ยังไม่มีการนำรหัสที่ใช้จำนวนเต็มเกาส์เซียนมาใช้เช่นกัน

ตารางที่ 2 การใช้ประโยชน์จากเลขจำนวนเต็มเกาส์เซียนบนวิทยาการเข้ารหัสลับอสมมาตร

ประเภทของวิทยาการเข้ารหัสลับ	ตัวอย่างระบบ	ทนทานต่อควอนตัม	ใช้ประโยชน์จากเกาส์เซียน
IFP	RSA	✗	✓
DLP	Elgamal	✗	✓
ECDLP	ECC	✗	✓
MQP	HFE, Rainbow	✓	✗
SVP	NTRU	✓	✓
SDP	McEliece	✓	✗

6. สรุป

บทความนี้ชี้ให้เห็นว่า มีนักวิจัยได้ใช้ประโยชน์จากเลขจำนวนเต็มเกาส์เซียนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพทั้งด้านความปลอดภัย และด้านการประมวลผลของวิทยาการเข้ารหัสลับอสมมาตรในหลายวิธีการ โดยนำไปใช้กับระบบแบบคลาสสิกที่นิยมใช้งานอยู่ในปัจจุบันอย่างเช่นระบบ RSA Elgamal และ ECC ซึ่งเป็นระบบประเภท IFP DLP และ ECDLP ตามลำดับ และนำไปใช้กับบางระบบ บนระบบแบบทนทานต่อการประมวลผลควอนตัม ซึ่งเป็นระบบที่กำลังได้รับความสนใจ เช่น บนระบบ NTRU ซึ่งเป็นระบบประเภท SVP อย่างไรก็ตามพบว่ายังไม่มีงานวิจัยที่นำเสนอการใช้ประโยชน์จากจำนวนเต็มเกาส์เซียน บนระบบประเภท MQP และ SDP มากนัก ซึ่งเป็นแนวทางสำหรับการวิจัยและพัฒนาวิธีการเพื่อนำมาใช้ปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบสำหรับป้องกันการโจมตีที่เกิดขึ้นบนควอนตัมคอมพิวเตอร์ในอนาคต

7. เอกสารอ้างอิง

- Bagheri, K., & Sadeghi, M.-R. (2015). A new non-associative cryptosystem based on NTOW public key cryptosystem and octonions algebra. **ACM Communications in Computer Algebra**, 49(1), 13.
- Bagheri, K., Sadeghi, M.-R., & Panario, D. (2017). A non-commutative cryptosystem based on quaternion algebras. **Designs, Codes and Cryptography**, 86(10), 2345–2377.
- Baldi, M., Bodrato, M., & Chiaraluce, F. (2008). A new analysis of the McEliece cryptosystem based on QC-LDPC codes. **Security and Cryptography for Networks**, 246–262.

- Caboara, M., Caruso, F., & Traverso, C. (2008). Gröbner bases for public key cryptography. **Proceedings of the Twenty-First International Symposium on Symbolic and Algebraic Computation**, 315–324.
- Cherdantseva, Y., & Hilton, J. (2013). A reference model of Information assurance security. **2013 International Conference on Availability, Reliability and Security**, 546–555.
- Computer Security Division. (2017). **Post-quantum cyptography | CSRC. CSRC | NIST**. Retrieved from <https://csrc.nist.gov/projects/post-quantum-cryptography>
- Ding, J., & Schmidt, D. (2005). Rainbow, a new multivariable polynomial signature scheme. In J. Ioannidis, A. Keromytis, & M. Yung (Eds.), **Applied Cryptography and Network Security**, 164–175.
- Elgamal, T. (1985). A public key cryptosystem and a signature scheme based on discrete logarithms. **IEEE Transactions on Information Theory**, 31(4), 469–472.
- Elkamchouchi, H., Elshenawy, K., & Shaban, H. A. (2003). Two new public key techniques in the domain of Gaussian integers. **Radio Science Conference, 2003. NRSC 2003. Proceedings of the Twentieth National**, C17-1–8.
- Hoffstein, J., Pipher, J., & Silverman, J. H. (1998). NTRU: A ring-based public key cryptosystem. **Proceedings of the Third International Symposium on Algorithmic Number Theory**, 267–288.
- Hooshmand, R., Shooshtari, M. K., & Aref, M. R. (2017). PKC-PC: A variant of the McEliece public key cryptosystem based on polar codes. **Computing Research Repository (CoRR)**, 1712.07672, 1-11.
- Jarvis, K., & Nevins, M. (2015). ETRU: NTRU over the Eisenstein integers. **Designs, Codes and Cryptography**, 74(1), 219–242.
- Koval, A. (2016). Algorithm for gaussian integer exponentiation. **Information Technology: New Generations** (pp. 1075–1085). Springer.
- Malekian, E., & Zakerolhosseini, A. (2010). OTRU: A non-associative and high speed public key cryptosystem. **15th CSI International Symposium on Computer Architecture and Digital Systems**, 83–90.
- Mceliece, R. (1978). A public-key cryptosystem based on algebraic coding theory. **JPL DSN Progress Report**, 44.

- Miller, V. S. (1985). Use of elliptic curves in cryptography. **Advances in Cryptology - CRYPTO '85 Proceedings**, 417–426.
- Misoczki, R., Tillich, J. P., Sendrier, N., & Barreto, P. S. L. M. (2013). MDPC-McEliece: New McEliece variants from Moderate Density Parity-Check codes. **IEEE International Symposium on Information Theory**, 2069–2073.
- Mohamed, E., & Elkamchouchi, H. (2009). Elliptic curve cryptography over gaussian integers. **IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security**, 9, 413–416.
- Monico, C., Rosenthal, J., & Shokrollahi, A. (2000). Using low density parity check codes in the McEliece cryptosystem. **IEEE International Symposium on Information Theory**, 215.
- Nanda, A. K., Nayak, R., & Awasthi, L. K. (2015). NTRU with gaussian integer matrix. **International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering**, 5(2), 359–365.
- Nayak, R., Pradha, J., & Sastry, C. V. (2012). Evaluation of performance characteristics of polynomial based and Lattice based NRTU cryptosystem. **ACEEE International Journal on Network Security**, 3, 1–4.
- Niederreiter, H. (1986). Knapsack type cryptosystems and algebraic Coding theory. **Problems of Control and Information Theory**, 15(2), 157–166.
- Nyokabi, G. J., Salleh, M., & Mohamad, I. (2017). NTRU inverse polynomial algorithm based on circulant matrices using gauss-jordan elimination. **2017 6th ICT International Student Project Conference**, 1–5.
- Patarin, J. (1996). Hidden fields equations (HFE) and isomorphisms of polynomials (IP): Two new families of asymmetric algorithms. **Advances in Cryptology - EUROCRYPT**, 96, 33–48.
- Pradhan, S. (2013). A modified variant of RSA algorithm for gaussian integers. **International Journal of Information and Network Security**, 2.
- Rivest, R. L., Shamir, A., & Adleman, L. (1978). A method for obtaining digital signatures and public-key cryptosystems. **Communications of the ACM**, 21(2), 120–126.



- Shor, P. W. (1997). Polynomial-time algorithms for prime factorization and discrete logarithms on a quantum computer. **SIAM Journal on Computing**, 26(5), 1484–1509.
- Shrestha, S. R., & Kim, Y. S. (2014). New McEliece cryptosystem based on polar codes as a candidate for post-quantum cryptography. **2014 14th International Symposium on Communications and Information Technologies**, 368–372.
- Sidelnikov, V. M. (1994). A public-key cryptosystem based on binary Reed-Muller codes. **Discrete Mathematics and Applications**, 4(3), 191–208.
- Thakur, K., Tripathi, B. P., & Yadav, M. R. (2017). KTRU: NTRU over the Kleinian integers. **Journal of International Academy of Physical Sciences**, 20(3), 177–183.
- Zhao, N., & Su, S. (2011). An improvement and a new design of algorithms for seeking the inverse of an NTRU polynomial. **Seventh International Conference on Computational Intelligence and Security**, 891–895.



การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายสารทำงานที่มี
ความเหมาะสมสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าด้วย
วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ขนาดเล็ก
DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL MODELLING TO PREDICTION
OF AN APPROPRIATE WORKING FLUID FOR SMALL-SCALE
ORGANIC RANKINE CYCLE (ORC) POWER GENERATION

สมชาย เจียจิตต์สวัสดิ์¹ และ สรวิศ สอนสารี^{2*}

Somchai Jiajitsawat¹ and Sorawit Sonsaree^{2*}

¹หน่วยวิจัยพลังงานสะอาด คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อ.เมือง จ.พิษณุโลก ประเทศไทย 65000

²สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม

อ.เมือง จ.พิษณุโลก ประเทศไทย 65000

¹Energy Research and Promotion Center, Faculty of Science, Naresuan University,

Muang, Phitsanulok, Thailand, 65000

²Major of Mechanical Engineering, Faculty of Industrial Technology, Pibulsongkram Rajabhat University,

Muang, Phitsanulok, Thailand, 65000

*Corresponding author E-mail: sorawitsonsaree@gmail.com

วันที่รับระบบ 29 พฤษภาคม 2563

วันที่แก้ไขบทความ 14 สิงหาคม 2563

วันที่ตอบรับบทความ 29 สิงหาคม 2563

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์เพื่อใช้ในการทำนายความเหมาะสมของสารทำงานที่ใช้ในระบบ ในการศึกษาสารทำงานจำนวน 15 ชนิด ได้นำมาเปรียบเทียบสภาวะการทำงานภายใต้ตัวแปร คือ ประสิทธิภาพเชิงความร้อน ความดันสูงสุดในระบบ คุณภาพไอ อัตราการไหลเชิงมวล ปริมาณอัตราการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ระบบ ความเป็นพิษ การติดไฟ และศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อน ผลการศึกษาพบว่าแบบจำลองที่ได้ถูกพัฒนาสามารถนำมาใช้ในการทำนายการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ได้ เนื่องจากผลที่ได้จากการคำนวณด้วยแบบจำลองที่ได้ถูกพัฒนามีค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้จากบทความวิจัยที่ได้เคยถูกตีพิมพ์ โดยในส่วนของสารทำงานในระบบที่มีความเหมาะสมนั้นเมื่อพิจารณาในเรื่องของศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อน ความเป็นพิษ และการติดไฟ พบว่า R245ca, R365mfc, R245fa และ R1234ze เป็นสารทำงานที่มีความเหมาะสม เนื่องจากเมื่อเลือกใช้สารทำงานดังกล่าวจะช่วยให้อัตราการไหลเชิงมวล และความดันด้านเครื่องทำระเหยของระบบมีค่าต่ำ รวมถึงประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบมีค่าสูง

คำสำคัญ: แบบจำลองทางคณิตศาสตร์, วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์, สารทำงาน

Abstract

This research is the development of a mathematical model to predict an appropriate working fluid for small-scale Organic Rankine Cycle (ORC) power generation. In this study, 15 working fluids were compared. The indicators considered in this study consisted of thermal efficiency, the maximum pressure in the cycle, steam quality, mass flow rate, heat input to the system, toxicity, flammability, and Global Warming Potential (GWP). The results showed that the mathematical modeling of the ORC power generation developed in this study can be applied to estimate the power output of the system. This was because the variable value of mathematical modeling was not significantly different in comparison to the published data. As considered in terms of low-GWP, low-toxicity, and non-flammable; R245ca, R365mfc, R245fa, and R1234ze were suitable because they gave a low mass flow rate, low evaporating pressure, and high thermal efficiency.

Keywords: Mathematical modeling, Organic Rankine Cycle (ORC), Working fluids

1. บทนำ

วิกฤตการณ์พลังงานที่เกิดขึ้นในปัจจุบันทำให้ทุกประเทศหันมาให้ความสนใจพลังงานทดแทนที่ซึ่งถือว่าเป็นพลังงานพื้นฐานที่แต่ละประเทศสามารถใช้พึ่งพาตนเองได้ ประกอบกับการตระหนักในเรื่องของสภาวะโลกร้อน (Global warming) การเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศ (Climate change) และรวมถึงปัญหาหรือผลกระทบต่อการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลในการผลิตพลังงานในรูปแบบต่างๆ ไม่ว่าจะเป็น พลังงานความร้อน และ/หรือ พลังงานไฟฟ้า ประกอบกับการเปลี่ยนรูปพลังงานความร้อนที่อยู่ในรูปของอุณหภูมิต่ำ (Low-temperature) และอุณหภูมิปานกลาง (Medium-temperature) จะมีความสำคัญเป็นอย่างมากในการแก้ปัญหาทางด้านพลังงาน (Bao & Zhao, 2013) ที่ซึ่งจะทำให้การประยุกต์ใช้พลังงานในรูปแบบต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นพลังงานความร้อนเหลือทิ้ง (Waste heat) ในรูปของอุณหภูมิสูง (High-temperature) หรือแม้กระทั่งพลังงานความร้อนอุณหภูมิต่ำที่เคยถูกปล่อยทิ้งสู่สิ่งแวดล้อม หรือไม่เคยถูกนำมาใช้งาน จะถูกนำกลับมาใช้อีกครั้ง ทั้งนี้ก็เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพโดยรวมของระบบ และช่วยลดรายจ่ายที่เกิดขึ้นในกระบวนการต่างๆ

ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ขนาดเล็ก (Small-scale organic rankine cycle (ORC) power generation) เป็นเทคโนโลยีที่เหมาะสมแก่การนำมาประยุกต์ใช้งานร่วมกับแหล่งความร้อนจากพลังงานทดแทน และ/หรือ แหล่งความร้อนเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม (Dai *et al.*, 2019; Thuraija *et al.*, 2019) เป็นวัฏจักรที่อาศัยของไหลทำงานเพื่อช่วยในการถ่ายโอน

พลังงาน ระบบนี้จะเปลี่ยนพลังงานความร้อนที่ได้รับให้เป็นพลังงานกลโดยอาศัยความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างแหล่งให้ความร้อน (Heat source) และแหล่งระบายความร้อน (Heat sink) โดยที่ความร้อนจะถูกถ่ายเทจากแหล่งให้ความร้อนที่มีอุณหภูมิสูงไปยังแหล่งรับความร้อนที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า และความร้อนบางส่วนจะถูกเปลี่ยนไปเป็นงาน โดยสิ่งสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพโดยรวมของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ คือ คุณภาพของแหล่งความร้อน ทั้งที่เป็นในส่วนของคุณภูมิของแหล่งความร้อน และปริมาณของแหล่งความร้อน นอกจากนี้ปัจจัยสำคัญอีกอย่างหนึ่งที่จะต้องพิจารณา คือ สารทำงานที่จะต้องมีความเหมาะสมทั้งในแง่ของประสิทธิภาพ และในเรื่องของสิ่งแวดล้อม (Kolasiński, 2020; Liang & Yu, 2019) ดังจะเห็นได้จากงานวิจัยต่างๆ ที่ผ่านมามี อภิวัฒน์ ยิ้มประเสริฐ และนัฐพร ไชยญาติ (อภิวัฒน์ ยิ้มประเสริฐ และนัฐพร ไชยญาติ, 2558) ประเมินประสิทธิภาพวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ในการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทางเลือกในประเทศไทย ได้แก่ พลังงานความร้อนใต้พิภพ พลังงานแสงอาทิตย์ และพลังงานขยะ โดยในงานวิจัยได้ดำเนินการทดสอบวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ขนาด 20 kW_e ที่ใช้ R245fa เป็นสารทำงานในระบบ ผลการศึกษาพบว่า ประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของแหล่งให้ความร้อนที่ป้อนให้กับระบบ โดยระบบจะมีประสิทธิภาพประมาณร้อยละ 8 เมื่อแหล่งความร้อน (น้ำร้อน) มีอุณหภูมิประมาณ 100°C (Gao *et al.*, 2015) ศึกษาวิธีการเลือกสารทำงานที่มีความเหมาะสมสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงดันอินทรีย์จากพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ โดยในการศึกษาสารทำงาน 9 ชนิด ได้ถูกนำมาใช้เปรียบเทียบภายใต้อุณหภูมิและความดันที่เข้ากักกัน ผลการศึกษาพบว่า ค่าความร้อนแฝง (Latent heat) อุณหภูมิวิกฤต (Critical temperature) ค่าความจุความร้อนจำเพาะของของเหลว (Liquid heat capacity) และค่าความจุความร้อนจำเพาะของแก๊ส (Gas heat capacity) ส่งผลต่อประสิทธิภาพของระบบ (Guo *et al.*, 2010) ได้ดำเนินการวิเคราะห์พลังงาน (Energy) และเอ็กเซอร์จี (Exergy) ของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานความร้อนใต้พิภพ (Geothermal energy) ในรูปของอุณหภูมิต่ำด้วยวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ โดยในการศึกษาสารทำงานจำนวน 26 ชนิด ได้ถูกนำมาเปรียบเทียบ ผลการศึกษาพบว่า R245fa เป็นสารทำงานที่เหมาะสมที่สุด รองลงมา คือ R134a, R142b, R600a และ R236fa ตามลำดับ (He *et al.*, 2014) ได้ศึกษาสารทำงานที่เหมาะสมกับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงดันอินทรีย์แบบอุณหภูมิวิกฤต พบว่าในการเลือกสารทำงานจะต้องเลือกสารทำงานที่มีค่าความร้อนจำเพาะในสถานะของเหลวสูง และค่าความร้อนแฝงต่ำ (Tchanche *et al.*, 2009) สารทำงานจำนวน 20 ชนิด ได้ถูกเปรียบเทียบภายใต้ตัวแปรต่างๆ ดังนี้ ประสิทธิภาพ (Efficiencies) อัตราการไหลเชิงปริมาตร (Volume flow rate) อัตราการไหลเชิงมวล (Mass flow rate) อัตราส่วนความดัน (Pressure ratio) ความเป็นพิษ (Toxicity) การติดไฟ (Flammability) ระดับการทำลายโอโซน (Ozone depletion potential – ODP) และศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อน (Global warming potential – GWP) ผลการศึกษาพบว่า

R134a เป็นสารทำงานที่เหมาะสมกับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ขนาดเล็กมากที่สุด นอกจากนี้ผลที่ได้จากการศึกษายังพบว่า สารทำงานที่มีความเหมาะสม แต่จะต้องระมัดระวังเรื่องของความปลอดภัยและการติดไฟประกอบไปด้วย R152a, R600a, R600 และ R290 (Long *et al.*, 2014) การพิจารณาสารทำงานที่เหมาะสมกับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ที่ผลิตไฟฟ้าจากการนำความร้อนเหลือทิ้งกลับมาใช้นั้น จะต้องพิจารณาจากอุณหภูมิของแหล่งความร้อนที่ป้อนเข้าสู่เครื่องทำระเหย (Evaporation) โดยสารทำงานที่มีความเหมาะสมจะต้องมีค่าอุณหภูมิจุดวิกฤตที่ต่ำ แต่จะต้องสูงกว่าอุณหภูมิของแหล่งความร้อนที่ป้อนเข้าสู่เครื่องทำระเหย (Evaporator) (Yadav & Sircar, 2019) ได้พิจารณาสารทำงานที่เหมาะสมกับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ที่เหมาะสมกับแหล่งความร้อนอุณหภูมิประมาณ 75 – 80 °C โดยสารทำงานประกอบไปด้วย R600, R600a, R134a และ R245fa ได้ถูกนำมาเปรียบเทียบ ผลการศึกษาพบว่า R245fa เป็นสารทำงานที่มีความเหมาะสมที่สุด

จากงานวิจัยข้างต้นจะเห็นได้ว่าปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ คือ สารทำงานในระบบ ทั้งนี้ถึงแม้ว่าจะมีงานวิจัยจำนวนมากที่ได้ดำเนินการศึกษาสารทำงานที่มีความเหมาะสมสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่เลือกสารทำงานสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ขนาดเล็กจากแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำนั้นยังคงมีไม่มาก ดังนั้นจึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 2.1 เพื่อพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงดันอินทรีย์
- 2.2 เพื่อเลือกสารทำงานที่มีความเหมาะสมสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงดันอินทรีย์

3. วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ เพื่อใช้ในการเลือกสารทำงานภายในระบบที่มีความเหมาะสมสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ขนาดเล็ก โดยส่วนประกอบต่างๆ ของระบบ รวมถึงข้อมูลที่เกี่ยวข้องในการดำเนินการวิจัยสามารถแสดงได้ดังนี้

- 3.1 ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ขนาดเล็ก (Small-scale organic rankine cycle (SORC) power plant) แสดงดังภาพที่ 1 และแผนภูมิอุณหภูมิและเอนโทรปีของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์แสดงดังภาพที่ 2 โดยมีหลักการทำงานดังนี้ สารทำงานที่อุณหภูมิต่ำที่สถานะที่ 2 ถูกเพิ่มอุณหภูมิจากแหล่งความร้อนที่มีอุณหภูมิสูงผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน จากนั้นสาร

ทำงานจะเปลี่ยนสถานะจากของเหลวไปเป็นไอที่ความดันสูงที่สภาวะ 3 สารทำงานที่มีสถานะเป็นไอจะผ่านเข้ากังหันเพื่อหมุนกังหันผลิตไฟฟ้า จากนั้นสารทำงานอุณหภูมิต่ำที่สภาวะ 4 จะถูกถ่ายเทความร้อนทิ้งผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนโดยหอผึ่งเย็นก่อนจะเริ่มกระบวนการใหม่ต่อไป โดยสมการที่ใช้ในการคำนวณหาประสิทธิภาพของระบบฯ (Thawonngamyingsakul & Kiatsirirot, 2012) แสดงได้ดังนี้

งานที่เกิดจากปั๊ม (Pump) ($\dot{W}_{Pump,ORC}$)

$$\dot{W}_{Pump,ORC} = \frac{\dot{m}_{r,ORC} v_1 (P_2 - P_1)}{\eta_{Pump,ORC}} \quad (1)$$

$$\dot{W}_{Pump,ORC} = \dot{m}_{r,ORC} v_1 (h_{2a} - h_1) \quad (2)$$

$$h_{2a} = \frac{v_1 (P_2 - P_1)}{\eta_{Pump,ORC}} + h_1 \quad (3)$$

ประสิทธิภาพปั๊ม (Pump efficiency)

$$\eta_{Pump,ORC} = \frac{P_2 - P_1}{h_{2a} - h_1} \quad (4)$$

อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านเครื่องทำระเหย (Evaporator) ($\dot{Q}_{Evap,ORC}$)

$$\dot{Q}_{Evap,ORC} = \dot{m}_{r,ORC} (h_3 - h_{2,a}) \quad (5)$$

งานที่เกิดจากกังหัน (Turbine) ($\dot{W}_{Tur}$)

$$\dot{W}_{Tur} = \dot{m}_{r,ORC} (h_3 - h_4) \eta_{Tur} \quad (6)$$

ประสิทธิภาพของกังหัน (Turbine efficiency)

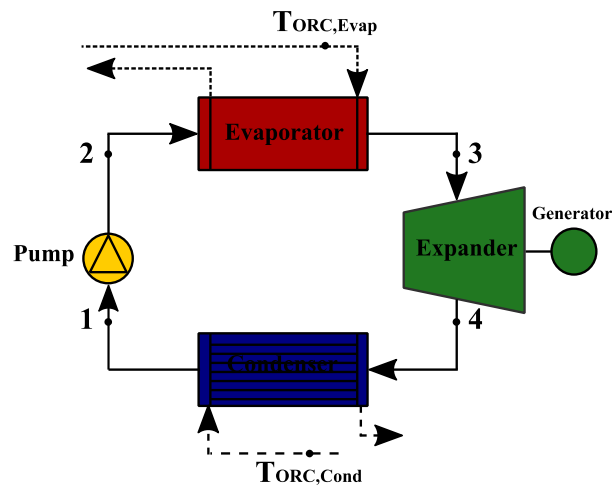
$$\eta_{Tur} = \frac{h_3 - h_{4a}}{h_3 - h_4} \quad (7)$$

อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านเครื่องควบแน่น (Condenser) ($\dot{Q}_{Cond,ORC}$)

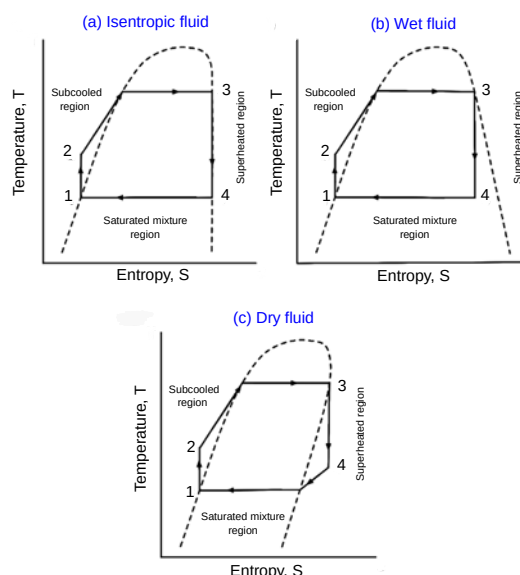
$$\dot{Q}_{Cond,ORC} = \dot{m}_{r,ORC} (h_{4a} - h_1) \quad (8)$$

ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบฯ (Thermal efficiency) ($\eta_{th,ORC}$)

$$\eta_{th,ORC} = \frac{\dot{W}_{Tur} - \dot{W}_{Pump,ORC}}{\dot{Q}_{Evap,ORC}} \quad (9)$$



ภาพที่ 1 รูปร่างง่ายของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ (ORC)



ภาพที่ 2 แผนภาพอุณหภูมิและเอนโทรปีของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ (T-s diagram)

(Mago *et al.*, 2008; Pei *et al.*, 2010)

3.2 ตัวแปรที่ใช้ในการเปรียบเทียบการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ ประกอบไปด้วย ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Thermal efficiency) ความดันสูงสุดในระบบ (Maximum pressure in the cycle) คุณภาพไอน้ำ (Steam quality) อัตราการไหลเชิงมวล (Mass flow rate) และปริมาณของอัตราความร้อนที่ถ่ายเทเข้าสู่ระบบ (Heat input)

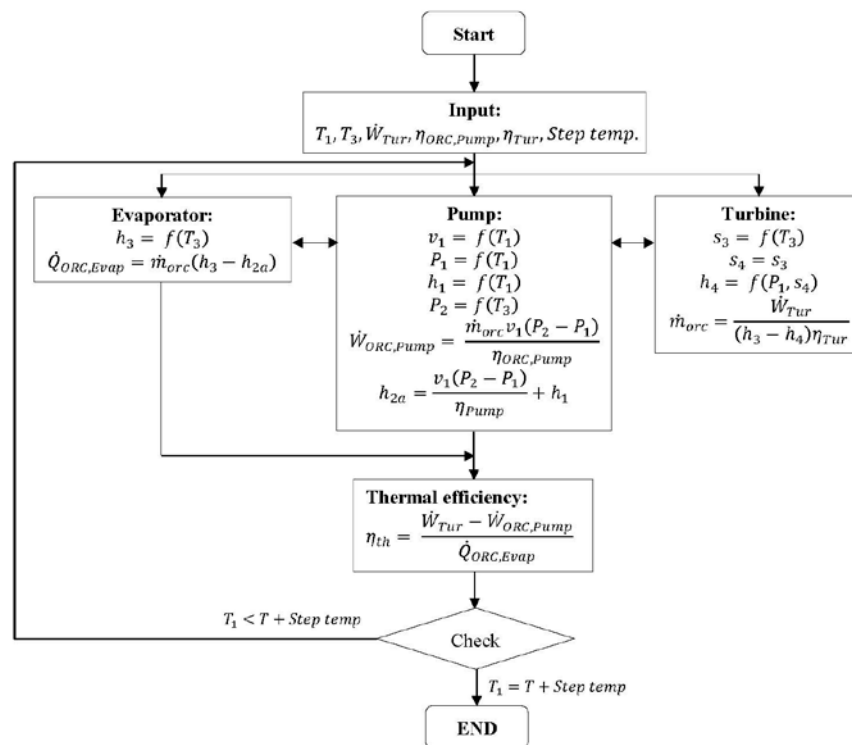
3.3 สถานะการทำงานของระบบฯ จะให้ความสนใจไปที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำที่สามารถนำระบบดังกล่าวมาประยุกต์ใช้ในการผลิตไฟฟ้าชุมชนที่มีขนาดเล็กได้ นอกจากนี้ในการคำนวณของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะไม่คิดความดันลดของอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบฯ เช่น เครื่อง

ทำระเหย (Evaporator) เครื่องควบแน่น (Condenser) อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนภายใน (IHE) และท่อ ยกเว้น ปั๊ม (Pump) และกังหัน (Turbine) โดยกำหนดสภาวะที่ใช้ในการคำนวณของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ซึ่งพัฒนามาจากสมการที่ใช้ในการคำนวณหาประสิทธิภาพของระบบฯ (หัวข้อที่ 3.1) แสดงดังภาพที่ 3 และภาพที่ 4 ดังนี้

- (1) อุณหภูมิเครื่องควบแน่น ($T_{ORC,Cond}$) เท่ากับ $35\text{ }^{\circ}\text{C}$
- (2) อุณหภูมิเครื่องทำระเหย ($T_{ORC,Evap}$) เท่ากับ $60\text{ ถึง }100\text{ }^{\circ}\text{C}$
- (3) ประสิทธิภาพไอเซนทรอปิกของปั๊ม ($\eta_{Pump,isen}$) และกังหัน ($\eta_{Tur,isen}$) เท่ากับ $80\text{ และ }85\%$ ตามลำดับ
- (4) งานที่ผลิตได้จากกังหัน ($\dot{W}_{Tur}$) เท่ากับ 60 kW_{th}
- (5) สารทำงานจำนวน 15 ชนิด แสดงดังตารางที่ 1
- (6) คุณสมบัติของสารทำงานในระบบอ้างอิงจาก REFPROP NIST7.0 (NIST, 2000)

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของสารทำงาน (Brown *et al.*, 2009; Fukuda, Kondou *et al.*, 2014; Li *et al.*, 2016; Nasir and Kim, 2016)

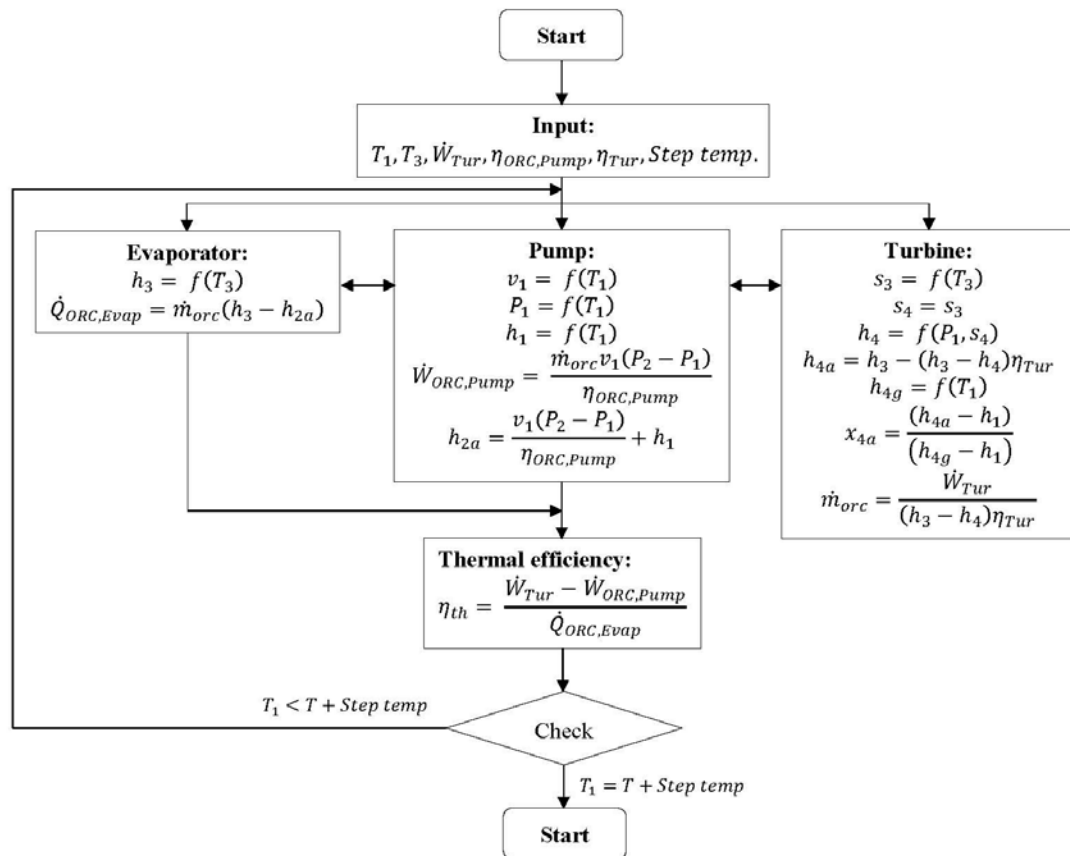
Working fluid	Chemical formula	Molar mass	Critical temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Critical pressure (MPa)	ODP	GWP	Toxicity	Flammability
Ammonia	NH_3	17.03	132.25	11.33	0.00	0.0	High	High
R22	CHClF_2	86.84	96.14	4.99	0.03	1780.0	Non	Non
R113	$\text{C}_2\text{F}_3\text{Cl}_3$	187.40	214.06	3.39	1.00	6130.0	Low	Non
R123	CHCl_2CF_3	152.93	183.68	3.66	0.02	77.0	High	Non
R134a	CH_2FCF_3	102.03	101.06	4.06	0.00	1430.0	Non	Non
R227ea	C_3HF_7	170.03	101.75	2.93	0.00	3220.0	Low	Non
R236fa	$\text{C}_3\text{H}_2\text{F}_6$	152.04	124.92	3.20	0.00	9810.0	Low	Non
R245ca	$\text{C}_3\text{F}_5\text{H}_3$	134.05	174.42	3.93	0.00	693.0	-	-
R245fa	$\text{C}_3\text{F}_3\text{H}_5$	134.05	154.01	3.65	0.00	820.0	Low	Non
R365mfc	$\text{C}_4\text{F}_5\text{H}_5$	148.08	186.85	3.27	0.00	890.0	Non	Non
R1234yf	$\text{C}_3\text{F}_4\text{H}_2$	114.04	94.70	3.38	0.00	4.0	Non	Mildly
R1234ze	$\text{C}_3\text{F}_4\text{H}_2$	114.04	109.37	3.64	0.00	<1.0	Non	Non
R1234zez	$\text{C}_3\text{F}_4\text{H}_2$	114.04	150.12	3.53	0.00	<10.0	-	-
RC318	C_4F_8	200.03	115.23	2.78	0.00	10300.0	Low	Non
Trans-butene	C_4H_8	56.11	101.75	2.93	-	-	-	Extremely



ภาพที่ 3 แผนผังขั้นตอนการคำนวณของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
(กรณีการทำงานแบบแห้ง)

4. ผลการวิจัย

4.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ถูกพัฒนา แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ที่ได้ถูกพัฒนาในการศึกษาในงานวิจัยนี้ได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Saleh *et al.* (2007) ที่ซึ่งเป็นบทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารที่ได้รับการยอมรับ หรืออาจกล่าวได้ว่าสามารถใช้ข้อมูลหรือผลการวิจัยมาอ้างอิงได้เนื่องจากมีความน่าเชื่อถือ โดยข้อมูลสภาวะการทำงานแสดงดังตารางที่ 2 และผลเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของแบบจำลองที่ได้ถูกพัฒนาแสดงดังตารางที่ 3 ผลการศึกษาพบว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ถูกพัฒนาสามารถคำนวณประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ภายใต้สภาวะการทำงานเดียวกันได้เท่ากับ 13.06% ในขณะที่งานวิจัยของ Saleh *et al.* (2007) ได้เท่ากับ 13.07% หรือคิดเป็นร้อยละความแตกต่างได้ประมาณ 0.08 ดังจะเห็นได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ถูกพัฒนาสามารถนำมาใช้ในการทำนายการทำงานจากระบบผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ที่สภาวะการทำงานต่างๆ ได้



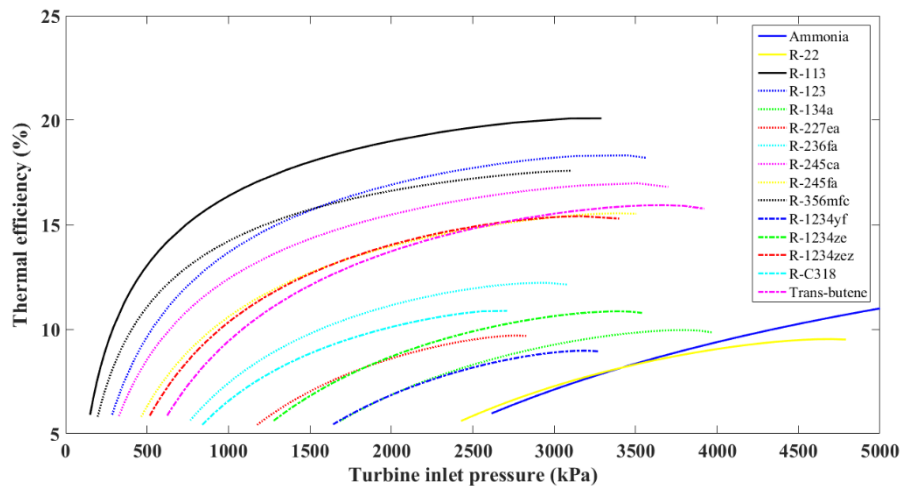
ภาพที่ 4 แผนผังขั้นตอนการคำนวณของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
(กรณีสารทำงานแบบเปียกและแบบไอเซนโทรปิก)

ตารางที่ 2 สภาวะการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ที่ใช้ในการสอบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ถูกพัฒนา

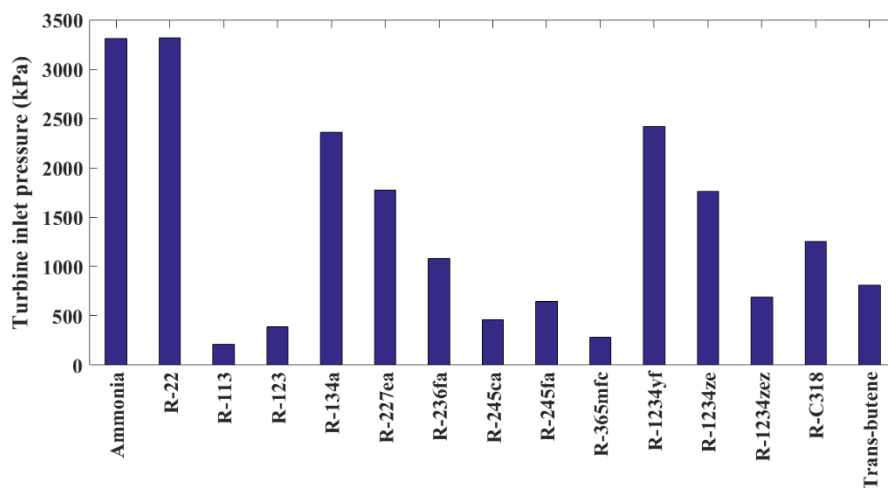
งานวิจัย	สารทำงาน	η_{Pump} (%)	$\eta_{Tur,th}$ (%)	$T_{Tur,i}$ (°C)	T_{Amb} (°C)
Saleh และคณะ	R245fa	65.0	85.0	68.0 – 100.0	30.0

ตารางที่ 3 ผลเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงความร้อนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ (ORC) ที่ได้ถูกพัฒนาและผลงานวิจัยของ Saleh *et al.* (2007) ที่ได้ถูกตีพิมพ์

สารทำงาน	งานวิจัย	งานที่ศึกษา	ร้อยละความแตกต่าง (%)
R245fa	13.07	13.06	0.08



ภาพที่ 5 ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (%) ของระบบฯ เมื่อความดันของสารทำงานด้านขาเข้ากังหันเพิ่มสูงขึ้น

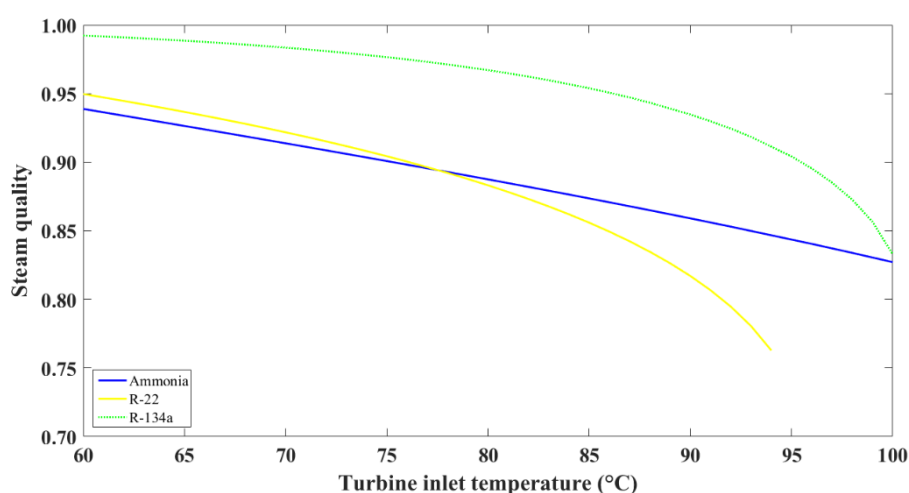


ภาพที่ 6 ความดันของสารทำงานด้านเครื่องทำระเหย (kPa) เมื่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบฯ มีค่าเท่ากับ 8%

4.2 ความดันสูงสุดในระบบ (Maximum cycle pressure) ความดันที่เกิดขึ้นในเครื่องทำระเหยถือเป็นความดันที่สูงที่สุดของสารทำงานที่เกิดขึ้น กล่าวคือ ถ้าความดันที่เกิดขึ้นในเครื่องทำระเหยมีค่าสูงนั้นหมายถึงคอยล์ (Coil) ของเครื่องทำระเหยจะต้องมีขนาดใหญ่ ประกอบกับค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการสร้างเครื่องทำระเหยนั้นต้องมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย ผลการศึกษาแสดงดังภาพที่ 5 และภาพที่ 6 พบว่า ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงดันอินทรีย์จะมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุด และความดันสูงสุดในระบบต่ำสุด เมื่อระบบใช้สารทำงาน R113 รองลงมาคือ R365mfc, R123, R245ca,

R245fa, R1234zez, Trans-butene, R-236fa, RC318, R1234ze, R227ea, R134a, R1234yf, Ammonia (R717) และ R22 ตามลำดับ

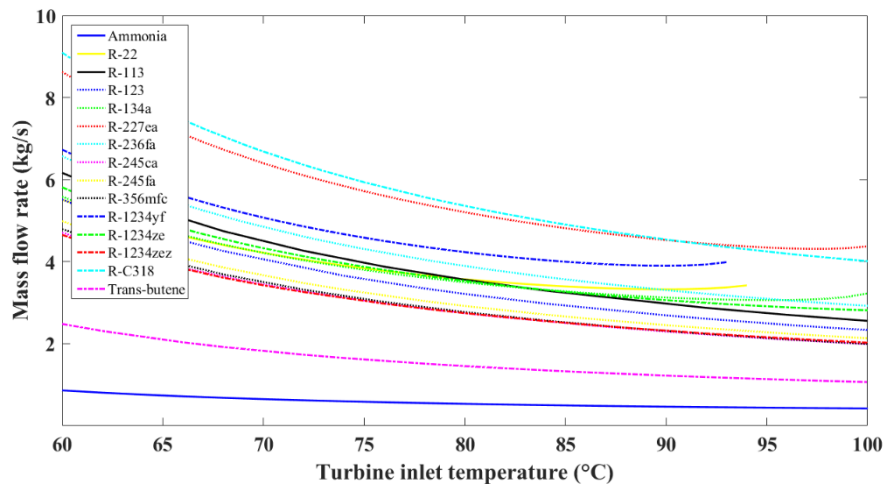
4.3 คุณภาพไอ (Steam quality) เมื่อคุณภาพไอของสารทำงานที่ออกจากกังหันมีคุณภาพต่ำ (สัดส่วนของของเหลวมีค่ามากกว่าสัดส่วนของไอ) จะส่งผลให้กังหันเกิดความเสียหาย คือ ใบของกังหันจะเกิดการกัดกร่อน ส่งผลให้มีค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการซ่อมบำรุงเพิ่มสูงขึ้นซึ่งเป็นเรื่องที่ไม่ต้องการ ดังนั้นในกระบวนการทำงานหากสารทำงานใดมีคุณภาพไอสูงนั้นหมายถึงสารทำงานนั้นๆ เป็นสารทำงานที่มีความเหมาะสม คุณภาพไอของสารทำงานบางส่วนแสดงดังภาพที่ 7 พบว่า คุณภาพไอของสารทำงานมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิของสารทำงานที่เข้ากังหันเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้เมื่อให้ความสนใจไปที่อุณหภูมิของสารทำงานที่เข้ากังหัน 95 °C คุณภาพไอของสารทำงาน R22 จะมีค่าต่ำที่สุด รองลงมาคือ Ammonia (R717) และ R134a ตามลำดับ



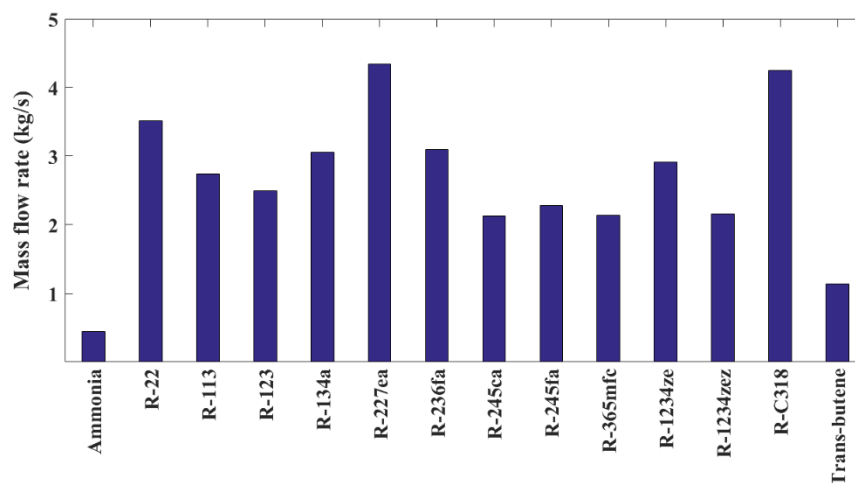
ภาพที่ 7 คุณภาพไอของสารทำงานแบบเปียก (Wet) และไอเซนโทรปิก (Isentropic) เมื่ออุณหภูมิของสารทำงานที่เข้ากังหันเปลี่ยนแปลงจาก 60 ถึง 100 °C

4.4 อัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงาน (Mass flow rate of working fluid) ปริมาณของอัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงานจะส่งผลต่ออุปกรณ์ของระบบ กล่าวคือ ถ้าปริมาณของอัตราการไหลเชิงมวลมีปริมาณมาก อุปกรณ์ต่างๆ ที่ถูกใช้ในระบบจะต้องมีขนาดใหญ่ตามไปด้วย หรืออาจกล่าวได้ว่าค่าใช้จ่ายเริ่มต้นในการสร้างระบบก็จะสูงขึ้น ผลการศึกษาแสดงดังภาพที่ 8 พบว่า อัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงานมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเมื่ออุณหภูมิของสารทำงานที่เข้ากังหันมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้เมื่อกำหนดให้อุณหภูมิของสารทำงานที่เข้ากังหันมีอุณหภูมิ 95 °C สารทำงานที่มีอัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงานต่ำที่สุด คือ Ammonia (R717) รองลงมาคือ Trans-butene, R245ca, R365mfc, R1234zez, R245fa, R123, R1234ze, R236fa, R22, RC318 และ R227ea

(แสดงดังภาพที่ 9) นอกจากนี้ในการศึกษายังพบว่า ที่อุณหภูมิของสารทำงานอุณหภูมิเดียวกัน R1234yf เป็นสารทำงานที่ไม่มีความเหมาะสมเนื่องจากที่อุณหภูมิดังกล่าวระบบไม่สามารถทำงานได้



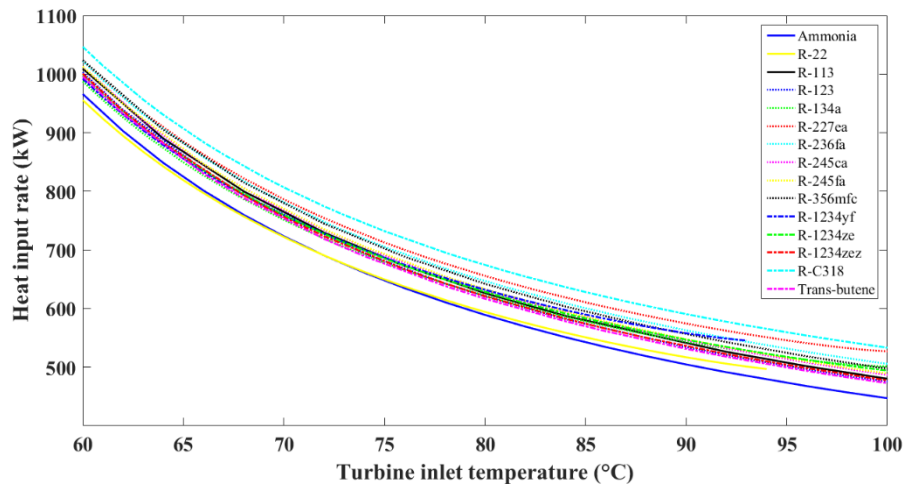
ภาพที่ 8 อัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงาน (kg/s) ของระบบฯ
เมื่ออุณหภูมิของสารทำงานที่เข้ากังหันเปลี่ยนแปลงจาก 60 ถึง 100 °C



ภาพที่ 9 อัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงาน (kg/s) ของระบบฯ
เมื่ออุณหภูมิของสารทำงานที่เข้ากังหันเท่ากับ 95 °C

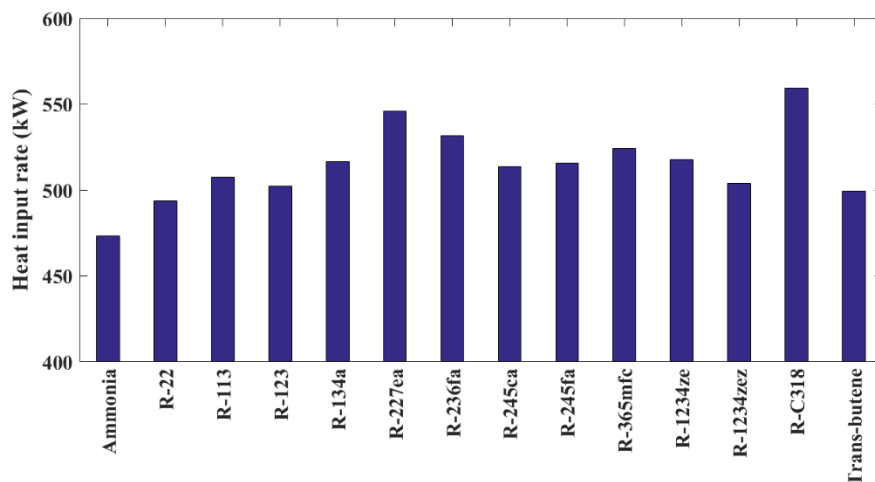
4.5 อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านเครื่องทำระเหย (Heat input rate to the evaporator)
ผลการศึกษาดังภาพที่ 10 พบว่า อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านเครื่องทำระเหยจะมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิของสารทำงานที่เข้ากังหันเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้เมื่อกำหนดให้อุณหภูมิของสารทำงานที่เข้ากังหันมีอุณหภูมิ 95 °C สารทำงานที่มีอัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงานต่ำที่สุด คือ Ammonia

(R717) รองลงมาคือ R22, Trans-butene, R123, R1234zez, R113, R245ca, R245fa, R134a, R1234ze, R365mfc, R236fa, R227ea และ RC318 ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 11



ภาพที่ 10 อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านเครื่องทำระเหย

เมื่ออุณหภูมิของสารทำงานที่เข้ากังหันเปลี่ยนแปลงจาก 60 ถึง 100 °C



ภาพที่ 11 อัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงาน (kg/s) ของระบบฯ

เมื่ออุณหภูมิของสารทำงานที่เข้ากังหันเท่ากับ 95 °C

5. สรุปผลและการอภิปรายผล

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงดันต่ำ เพื่อใช้ในการทำนายความเหมาะสมของสารทำงานที่ใช้ในระบบ โดยในการศึกษาสารทำงาน 15 ชนิด ที่เป็นสารบริสุทธิ์ และสารผสมได้ถูกนำมาเปรียบเทียบภายใต้ตัวแปรต่างๆ คือ ประสิทธิภาพเชิงความ

ร้อน, ความดันสูงสุดในระบบ, คุณภาพไอ, อัตราการไหลเชิงมวล และปริมาณของอัตราการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ระบบ ผลการศึกษาสามารถสรุปและอภิปรายผลได้ดังนี้

5.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่ได้ดำเนินการพัฒนา พบว่า แบบจำลองที่ได้ถูกพัฒนาสามารถนำมาใช้ในการทำนายการทำงานของระบบได้ กล่าวคือ ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบที่ได้จากแบบจำลองที่ได้ถูกพัฒนาจะมีค่าเท่ากับ 13.06% ในขณะที่ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบที่ได้จากงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์มีค่าเท่ากับ 13.07% หรือคิดเป็นร้อยละของความแตกต่างของผลที่ได้เท่ากับร้อยละ 0.08

5.2 สารทำงานที่มีความเหมาะสมสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงดันอินทรีย์

(1) เมื่อกำหนดให้อุณหภูมิของสารทำงานเข้ากังหันมีอุณหภูมิประมาณ 95 °C R1234yf เป็นสารทำงานที่ไม่เหมาะสม เนื่องจากสารทำงานไม่สามารถทำงานที่อุณหภูมิดังกล่าวได้

(2) เมื่อพิจารณาคุณภาพไอของสารทำงานในระบบ พบว่า Ammonia (R717), R22 และ R134a เป็นสารทำงานที่ไม่มีความเหมาะสมเนื่องจากที่สภาวะการทำงานต่างๆ สารดังกล่าวมีคุณภาพไอที่ค่อนข้างต่ำ ซึ่งจะส่งผลให้ใบพัดของกังหันเกิดการชำรุดเสียหายได้

(3) จากผลการพิจารณาที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น เมื่อพิจารณาปริมาณของอัตราการไหลเชิงมวล ความดันที่เครื่องระเหย และประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบ พบว่า R365mfc, R245cd, Trans-butene, R113, R123, R245fa และ R1234zez เป็นสารทำงานที่มีความเหมาะสมเนื่องจากมีปริมาณของอัตราการไหลเชิงมวล และความดันที่เกิดขึ้นที่เครื่องระเหยต่ำ และมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่สูง

(4) แต่อย่างไรก็ตามในการเลือกสารทำงานในระบบจำเป็นต้องพิจารณาสารทำงานที่มีระดับความเป็นพิษ ระดับการทำลายโอโซน (ODP) และศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อน (GWP) ที่ต่ำ ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากปัจจัยที่ได้กล่าวไปแล้วจะพบว่า R245ca, R365mfc, R245fa และ R1234zez เป็นสารทำงานที่มีความเหมาะสมในการนำมาประยุกต์ใช้กับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ขนาดเล็ก

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณหน่วยวิจัยพลังงานสะอาด คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร และสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม สำหรับสถานที่ดำเนินงานวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

- อภิวัฒน์ ยิ้มประเสริฐ และณัฐพร ไชยญาติ. (2558). โรงไฟฟ้าพลังงานทดแทนจากวัฏจักรแรงดันสารอินทรีย์ในประเทศไทย. การถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อนและกระบวนการ (ครั้งที่ 14), ฮอไรวันวิลเลจแอนดรีสอร์ท และสวนพฤกษศาสตร์ทีชิล, เชียงใหม่.
- Bao, J., & Zhao, L. (2013). A review of working fluid and expander selections for organic Rankine cycle. **Renewable and sustainable energy reviews**, 24, 325-342.
- Brown, J. S., Zilio, C., & Cavallini, A. (2009). The fluorinated olefin R-1234ze (Z) as a high-temperature heat pumping refrigerant. **International Journal of Refrigeration**, 32(6), 1412-1422.
- Dai, X., Shi, L., & Qian, W. (2019). Review of the working fluid thermal stability for organic rankine cycles. **Journal of Thermal Science**, 28(4), 597-607.
- Fukuda, S., Kondou, C., Takata, N., & Koyama, S. (2014). Low GWP refrigerants R1234ze (E) and R1234ze (Z) for high temperature heat pumps. **International Journal of Refrigeration**, 40, 161-173.
- Gao, W., Li, H., Xu, G., & Quan, Y. (2015). Working fluid selection and preliminary design of a solar organic Rankine cycle system. **Environmental Progress & Sustainable Energy**, 34(2), 619-626.
- Guo, T., Wang, H., & Zhang, S. (2010). **Fluid selection for a low-temperature geothermal Organic Rankine Cycle by energy and exergy**. Paper presented at the 2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference.
- He, C., Liu, C., Zhou, M., Xie, H., Xu, X., & Wu, S. (2014). A new selection principle of working fluids for subcritical organic Rankine cycle coupling with different heat sources. **Energy**, 68, 283-291.
- Kolasiński, Piotr. (2020). The method of the working fluid selection for Organic Rankine cycle (ORC) systems employing volumetric expanders. **Energies**, 13(3), 573.
- Li, J., Alvi, J. Z., Pei, G., Ji, J., Li, P., & Fu, H. (2016). Effect of working fluids on the performance of a novel direct vapor generation solar organic Rankine cycle system. **Applied Thermal Engineering**, 98, 786-797.
- Liang, Y., & Yu, Z. (2019). Working fluid selection for a combined system based on coupling of organic Rankine cycle and air source heat pump cycle. **Energy Procedia**, 158, 1485-1490.

- Long, R., Bao, Y.J., Huang, X.M., & Liu, W. (2014). Exergy analysis and working fluid selection of organic Rankine cycle for low grade waste heat recovery. **Energy**, 73, 475-483.
- Mago, P. J., Chamra, L. M., Srinivasan, K., & Somayaji, C. (2008). An examination of regenerative organic Rankine cycles using dry fluids. **Applied Thermal Engineering**, 28(8-9), 998-1007.
- Nasir, M. T., & Kim, K.C. (2016). Working fluids selection and parametric optimization of an Organic Rankine Cycle coupled Vapor Compression Cycle (ORC-VCC) for air conditioning using low grade heat. **Energy and Buildings**, 129, 378-395.
- NIST. (2000). REFPROP Version 7.0, **Thermodynamic properties of refrigerants and refrigerant mixtures software**.
- Pei, G., Li, J., & Ji, J. (2010). Analysis of low temperature solar thermal electric generation using regenerative Organic Rankine Cycle. **Applied Thermal Engineering**, 30(8-9), 998-1004.
- Saleh, B., Koglbauer, G., Wendland, M., & Fischer, J. (2007). Working fluids for low-temperature organic Rankine cycles. **Energy**, 32(7), 1210-1221.
- Tchanche, B. F., Papadakis, G., Lambrinos, G., & Frangoudakis, A. (2009). Fluid selection for a low-temperature solar organic Rankine cycle. **Applied Thermal Engineering**, 29(11-12), 2468-2476.
- Thawonngamyingsakul, C., & Kiatsiriroat, T. (2012). Potential of a solar organic rankine cycle with evacuated-tube solar collectors as heat source for power generation in Thailand. **Energy Science and Technology**, 4(2), 25-35.
- Thurairaja, K., Wijewardane, A., Jayasekara, S., & Ranasinghe, C. (2019). Working fluid selection and performance evaluation of ORC. **Energy Procedia**, 156, 244-248.
- Yadav, K., & Sircar, A. (2019). Selection of working fluid for low enthalpy heat source Organic Rankine Cycle in Dholera, Gujarat, India. **Case Studies in Thermal Engineering**, 16, 100553.

ศึกษาการทำงานของรถไฟฟ้าร่วมพลังงานแสงอาทิตย์

A STUDY OF THE MINI TRUCK DRIVER BY ELECTRIC MOTOR AND SOLAR CELL

อเนก ดัสกรณ์¹, วชิรากร ใจตรง², เอกภูมิ บุญธรรม² และ มนตรี วงศ์ศิริวิทยา^{2*}

Anek Dassakorn¹, Wacharakron Jaitong², Eakpoom Boonthum²

and Montree Wongsiriwittaya^{2*}

¹ ภาควิชาเทคโนโลยียานยนต์ วิทยาลัยเทคนิคกาฬสินธุ์ อ.เมือง จ.กาฬสินธุ์ ประเทศไทย 46000

² สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม อ.เมือง จ.พิษณุโลก 65000

¹ Department of Automotive Technology, Kalasin Technical College, Muang Kalasin, Kalasin, Thailand, 46000

² Department of Mechanical Engineering, Faculty of Industrial Technology, Pibulsongkram Rajabhat University, Muang Phitsanulok, Phitsanulok, Thailand, 65000

*Corresponding author E-mail: Montree.W@yahoo.com

วันที่เข้าระบบ 15 กรกฎาคม 2563

วันที่แก้ไขบทความ 1 สิงหาคม 2563

วันที่ตอบรับบทความ 29 สิงหาคม 2563

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อออกแบบ และสร้างรถบรรทุก 3 ล้อ ขนาด 3 ที่นั่ง ขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ โดยมีขนาด 115×245×160 เซนติเมตร และใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีกำลังไฟฟ้าขนาด 48 โวลต์ 750 วัตต์ และความเร็รรอบ 2900 รอบต่อนาที เป็นต้นกำลังในการขับเคลื่อนโดยมีแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 310 วัตต์ 37.6 โวลต์ 8.27 แอมแปร์ จำนวน 1 แผง ต่อเข้ากับแหล่งประจุไฟฟ้าเสริมให้แก่แบตเตอรี่ 12 โวลต์ 45 แอมแปร์ ชั่วโมง จำนวน 4 ลูก ต่อแบบอนุกรมเพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานสำหรับขนาดมอเตอร์ขณะการขับเคลื่อน ซึ่งงานวิจัยนี้ทำการทดลองที่ความเร็ว 20, 30 และ 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมงเทียบระยะทางการวิ่งรถแบบไม่บรรทุก ซึ่งได้แบ่งการทดลองเป็น 2 ส่วน พบว่า (1) การขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ได้ระยะทางเป็น 86.73 ± 1.8 , 81.44 ± 2.1 และ 76.30 ± 2.3 กิโลเมตรตามลำดับความเร็ว และหลังจากได้ทดลองขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้าร่วมกับโซล่าเซลล์ได้ระยะทางเพิ่มขึ้นมาประมาณ 8 ถึง 10 กิโลเมตร (2) ค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ต่อความเร็วระยะทางเมื่อเทียบกับการใช้แบตเตอรี่และขับเคลื่อนร่วมกับโซล่าเซลล์ พบว่ามีอัตราการใช้กระแสไม่แตกต่างกันอยู่ที่ 5, 8 และ 14 แอมแปร์ ตามลำดับความเร็วระยะทาง

คำสำคัญ: โซล่าเซลล์, มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง, พลังงานแสงอาทิตย์

Abstract

The purpose of this research is to design and build a 3-wheel mini truck with 3 seats, powered by electricity from batteries together with solar power whose dimension is 115 x 245 x 160 cm. A DC motor with a power of 48 volts, 750 watts and 2900 revolutions per minute is used as the driving power with a 310 Watts 37.6 Volt 8.27 Ampere solar panel connected to the electric source for supplementary to 4 batteries of 12 volts, 45 ampere per hour which are used as a power source for motor control while driving. This research was conducted at speeds of 20, 30 and 40 kilometers per hour compared to the driving distance of unloaded vehicles. The experiment was divided into 2 parts, and it was found that (1) the distances of electric propulsion from batteries were 86.73, 81.44 and 76.30 km according to the ordinal speeds, respectively. After experimenting with electric driving with solar cells, the distances were increased by about 8 to 10 kilometers. (2) When the current value of electricity used per distance speed distance was compared with that of using a battery and driven with solar cells, it was found that the current rate was not different at 5, 8 and 14 amperes according to their distance speeds, respectively.

Keywords: Solar cell, DC motor, Solar power

1. บทนำ

การเดินทางเป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างยิ่งของมนุษย์ และปัจจุบันยังมีการพัฒนายานพาหนะสำหรับใช้อำนวยความสะดวกโดยเทคโนโลยีต่างๆ เพื่อตอบการเพิ่มขึ้นของมนุษย์ที่มีมากขึ้น จึงเป็นเหตุผลให้ความต้องการในการใช้ยานพาหนะมีมากขึ้นตามไปด้วย (Husain *et al.*, 2018) และยานพาหนะในปัจจุบันโดยส่วนใหญ่จะเป็น รถยนต์ และรถมอเตอร์ไซด์ ซึ่งส่วนมากใช้น้ำมันเชื้อเพลิงทั้งสิ้น แต่การใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลนั้นก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมตามมา จึงต้องมีการคิดค้นและพัฒนาการใช้พลังงานทดแทนเพื่อนำมาใช้แทนเชื้อเพลิงฟอสซิล (Diouf & Avis, 2019; Rizzo, 2010) คือรถไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ร่วมพลังงานแสงอาทิตย์

การพัฒนารถไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งปัจจุบันจะมีปัจจัยหลักอยู่ 3 อย่างด้วยกัน คือ ส่วนแรกเป็นแบตเตอรี่ของรถไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ โดยต้องมีการออกแบบให้สามารถใช้งานที่ยาวนานขึ้น ส่วนที่สองระบบส่งกำลังได้ออกแบบและสร้างเพลาส่งกำลังล้อให้เหมาะสมกับชุดขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าและระบบเบรก ส่วนที่สามระบบบังคับเลี้ยวได้ต้องมีการออกแบบและ

ปรับให้มุมบังคับเลี้ยวล้อหน้าด้านใดด้านหนึ่งมากเกินไป ในขณะรถเคลื่อนที่ และการที่จะใช้งานรถไฟฟ้าร่วมโซล่าเซลล์ได้นั้นต้องประกอบด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ (Rizzo, 2010)

พลังงานแสงอาทิตย์เกิดจากการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ที่ส่องลงมาในรูปของแสงแดด ประกอบด้วยพลังงานแสงและพลังงานความร้อน โดยพลังงานทั้งสองส่วนนี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายด้าน และสามารถนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับรถไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ได้ ซึ่งตรงกับเป้าหมายของประเทศไทยที่จะอนุรักษ์การใช้พลังงานและชะลอการใช้เชื้อเพลิงจากฟอสซิล (Cross & Murray, 2018) เพื่อลดปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากอุตสาหกรรมขนส่ง (Binz & Anadon, 2018) และได้ส่งเสริมยานยนต์ไฟฟ้าให้มีการอนุรักษ์พลังงานในภาคขนส่งและบริการเติมประจุไฟฟ้าให้กับรถยนต์ไฟฟ้า (Secinaro *et al.*, 2020) ซึ่งเป็นการส่งเสริมอุตสาหกรรมการผลิตพลังงานสะอาด ลดก๊าซไอเสียจากเครื่องยนต์ และยังลดการใช้พลังงานโดยรวมของประเทศไทย

ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีแนวคิดการสร้างรถสามล้อบรรทุกับเคลื่อนด้วยไฟฟ้าต้นแบบที่ใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ร่วมโซล่าเซลล์เป็นยานพาหนะที่ปราศจากไอเสีย (Tiano *et al.*, 2018) และสามารถทำการควบคุมการขับที่ได้ง่าย คล่องแคล่ว ไม่มีเสียงรบกวน บำรุงรักษาง่ายกว่า เพื่อตอบโจทย์การชะลอใช้พลังงานจากฟอสซิลให้มากขึ้น โดยได้ศึกษาความเหมาะสมในการใช้งานความเร็วต่อระยะทางของรถบรรทุกขนาดเล็กที่ขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้าร่วมโซล่าเซลล์ โดยใช้วัสดุที่หาได้ง่ายตามท้องตลาด และสามารถซ่อมบำรุงรักษาได้ง่าย อุปกรณ์น้อย และประหยัด

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 2.1 เพื่อพัฒนารถขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้าจากแบตเตอรี่และโซล่าเซลล์
- 2.2 เพื่อศึกษาความเหมาะสมของระยะทางต่อการใช้พลังงานไฟฟ้าร่วมโซล่าเซลล์

3. วิธีดำเนินการวิจัย

วิจัยนี้เป็นการทดลอง และวิจัยเพื่อนำมาวางแผนรูปแบบการพัฒนาบรรทุกับเคลื่อนด้วยไฟฟ้าให้มีความเหมาะสมในการใช้งานเพื่อมุ่งหาสมรรถนะของรถบรรทุกับเคลื่อนด้วยไฟฟ้า ดังนั้นเพื่อให้การวิจัยครั้งนี้บรรลุวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ ผู้วิจัยจึงได้กำหนดวิธีดำเนินการวิจัยดังต่อไปนี้

3.1 ขั้นตอนการออกแบบรถไฟฟ้าที่ใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ร่วมโซล่าเซลล์ 3.1.1. ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับรถยนต์ไฟฟ้า และรถสามล้อไฟฟ้าร่วมโซล่าเซลล์ เพื่อนำมาเป็นแนวทางในการออกแบบรถไฟฟ้าที่ใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ร่วมโซล่าเซลล์และศึกษาลักษณะขนาดและชนิดของมอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ในการขับเคลื่อน ขนาด และชนิด ของแบตเตอรี่ และการควบคุมความเร็วของมอเตอร์

3.1.2. ศึกษารายละเอียด และออกแบบเบื้องต้นและปรับปรุง ออกแบบรายละเอียด และทำการสร้างรถไฟฟ้าที่ใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ร่วมโซล่าเซลล์

3.1.3. ทดสอบและเก็บผลการทดสอบ และวิเคราะห์ผลการทดสอบและปรับปรุงแก้ไข

3.2 การออกแบบและการติดตั้งอุปกรณ์

3.2.1 ชุดควบคุม และระบบส่งกำลังจากมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (Brushless DC motor gear) กำลังไฟฟ้า 48 โวลต์ 750 วัตต์ ที่ความเร็วรอบ 2900 รอบต่อนาที ร่วมกับชุดเกียร์ที่มีอัตราทด 6:1 ต่อเข้ากับเพลาเป็นตัวส่งกำลังไปยังล้อ

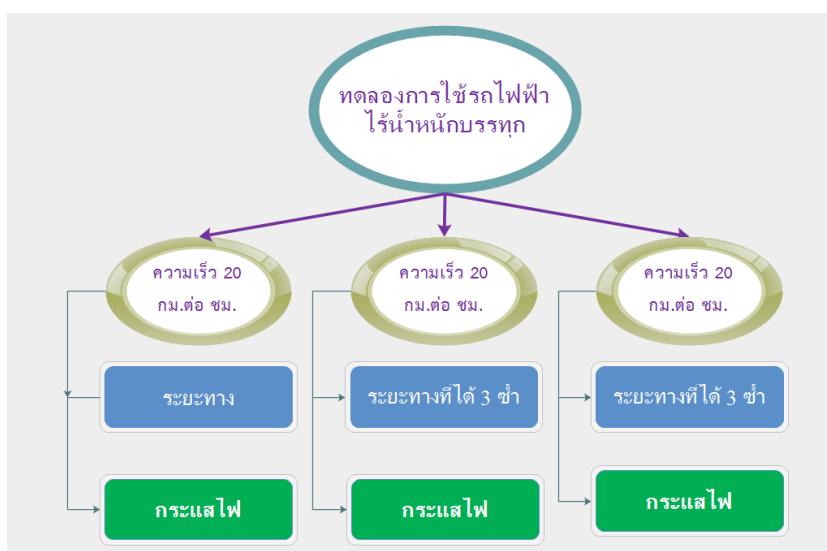
3.2.2 แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ามี 2 ส่วนได้แก่

3.2.2.1 กำลังงานไฟฟ้าที่ส่งไปยังระบบส่งกำลังของรถไฟฟ้า โดยอาศัยกำลังงานไฟฟ้าจากแผงโซล่าเซลล์ชนิดแบบผสม (Poly crystalline) 310 วัตต์ 37.6 โวลต์ 8.27 แอมแปร์ จำนวน 1 แผง ต่อเข้ากับ

3.2.2.2 แบตเตอรี่ 12 โวลต์ 45 แอมแปร์ชั่วโมง จำนวน 4 ลูก

3.3 ออกแบบแผนการทดลอง

ผู้วิจัยได้วางแผนการทดลองโดยได้แบ่งการทดลองเป็น 2 ส่วน ได้แก่ (1) กำหนดให้รถมีอัตราความเร็วที่ 20 30 และ 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง โดยกำหนดให้รถใช้น้ำหนักบรรทุก จากนั้นจะทำการวัดระยะทางที่วิ่งได้ และรวมกับกระแสไฟที่ใช้ของแต่ละการทดลอง ซึ่งการทดลองนี้ได้ทำการทดลองใช้แบตเตอรี่ และแบตเตอรี่ร่วมกับโซล่าเซลล์ ดังแสดงภาพที่ 1



ภาพที่ 1 แผนการทดลองความเหมาะสมการใช้รถไฟฟ้าร่วมกับโซล่าเซลล์

3.4 วิธีการทดลอง

การทดลองสมรรถนะโดยการขับเคลื่อนด้วยกำลังงานของแบตเตอรี่ที่ความเร็ว 20 30 และ 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ที่น้ำหนักตัวรถ 120 กิโลกรัม น้ำหนักผู้ทดลอง 60 กิโลกรัม น้ำหนักรวม 180 กิโลกรัม โดยได้ทำการทดลองการเดินระยะทางที่รถสามารถวิ่งได้จริงซึ่งการทดลองนี้มีอยู่ 2 ส่วนด้วยกัน คือ การทดลองขับเคลื่อนรถโดยใช้แบตเตอรี่อย่างเดียว และการทดลองใช้แบตเตอรี่ร่วมกับโซล่าเซลล์ เพื่อหาสมรรถนะรถไฟฟ้าของระยะทางที่ได้และกระแสที่ใช้ในแต่ละความเร็ว

3.4.1 การทดลองขับเคลื่อนรถไฟฟ้าเพื่อหาระยะทางที่ได้เทียบกับความเร็ว โดยทำการทดลองที่มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงครามที่ระยะ 5 กิโลเมตร ซึ่งการทดลองนี้ได้ทำการชาร์ตแบตเตอรี่เต็มแล้ว หลังจากนั้นนำมาขับเคลื่อนที่ความเร็วดังกล่าว และใช้จนกว่าแบตเตอรี่จะหมดและจดบันทึกค่าของระยะทางที่ได้ และทำการทดลอง 3 ซ้ำ แสดงภาพที่ 1

3.4.2 การทดลองการใช้กระแสของมอเตอร์ขณะขับเคลื่อนของแต่ละความเร็ว ซึ่งการทดลองนี้เหมือนข้อ (3.4.1) และทดลองช่วงเวลา 8.00 ถึง 16.00 น. ของเดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2561 โดยการทดลองนี้ในขณะขับเคลื่อนที่ความเร็วต่างๆ ผู้วิจัยยังทำการบันทึกข้อมูลการใช้กระแสของมอเตอร์ขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้า และนำไปสรุปอัตราการใช้กระแสต่อความเร็วที่ทดลอง

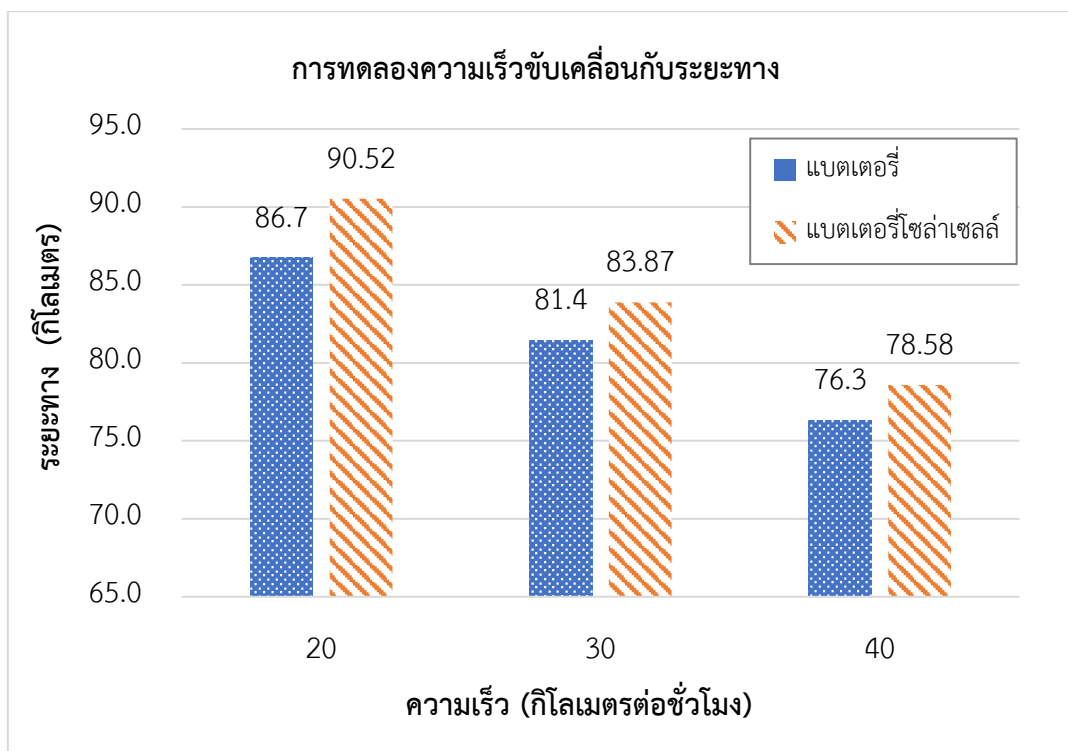
4. ผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้แบ่งการทดลองสมรรถนะของรถไฟฟ้าเป็น 2 ส่วน คือ (1) การทดลองวิ่งระยะทางที่ความเร็ว 20 30 และ 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เพื่อหาระยะทางที่วิ่งได้ต่อการชาร์ตแบตเตอรี่และใช้ร่วมกับโซล่าเซลล์ (2) การใช้กระแสของมอเตอร์ขณะขับเคลื่อนของแต่ละความเร็ว

4.1 การทดลองวิ่งระยะทางที่ความเร็ว 20 30 และ 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

ผู้วิจัยทำการทดลองหาสมรรถนะของรถขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ และร่วมกับโซล่าเซลล์จากพลังงานแสงอาทิตย์ จากผลการทดลองขับเคลื่อนด้วยแบตเตอรี่โดยไม่บรรทุกที่การทดลอง 3 ซ้ำ ที่ความเร็ว 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมง รถไฟฟ้าสามารถวิ่งได้ค่าเฉลี่ยระยะทาง 86.73 กิโลเมตร ต่อมาที่ความเร็ว 30 กิโลเมตรต่อชั่วโมง รถไฟฟ้าสามารถวิ่งได้ค่าเฉลี่ยระยะทาง 81.44 กิโลเมตร การทดลองใช้ความเร็ว 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง รถไฟฟ้าสามารถวิ่งได้ค่าเฉลี่ยระยะทาง 76.30 กิโลเมตร เมื่อเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าที่ความเร็วการทดลองครั้งนี้สามารถเพิ่มระยะทางถึงร้อยละ 10 (นภัทร และคณะ, 2559)

การทดลองรถไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ร่วมกับโซล่าเซลล์จากพลังงานแสงอาทิตย์ พบว่าเมื่อต่อระบบไฟฟ้าร่วมกับโซล่าเซลล์ที่ ความเร็ว 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมงสามารถขับเคลื่อนได้ระยะทางเพิ่มขึ้นประมาณ 4 กิโลเมตร แสดงดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 การทดลองความเร็วเทียบกับระยะทางโดยการขับรถด้วยแบตเตอรี่โดยไม่บรรจุทุก

4.2 การใช้กระแสของมอเตอร์ขณะขับเคลื่อนของแต่ละความเร็ว

การเปรียบเทียบการสิ้นเปลืองกระแสระหว่างรถไฟฟ้าขับด้วยแบตเตอรี่ และรถไฟฟ้าขับด้วยแบตเตอรี่ร่วมโซลาร์เซลล์ แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงอัตราสิ้นเปลืองกระแสของมอเตอร์ขณะขับเคลื่อนของแต่ละความเร็ว

ความเร็ว (km/h)	การสิ้นเปลืองกระแส (แอมแปร์) (รถไฟฟ้าขับด้วยแบตเตอรี่)	การสิ้นเปลืองกระแส (แอมแปร์) (รถไฟฟ้าขับด้วยแบตเตอรี่ร่วมโซลาร์เซลล์)
20	6.00	4.90
30	8.07	7.80
40	14.80	14.4

ผลการทดลองเมื่อเปรียบเทียบที่ความเร็ว 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมง รถไฟฟ้าขับด้วยแบตเตอรี่ และรถไฟฟ้าขับด้วยแบตเตอรี่ร่วมโซลาร์เซลล์ ทราบว่าการใช้แบตเตอรี่ร่วมโซลาร์เซลล์ มีผลต่างของอัตราสิ้นเปลืองกระแสอยู่ที่ 1.10 แอมแปร์ ต่อมาที่ความเร็ว 30 กิโลเมตรต่อชั่วโมง รถไฟฟ้าขับด้วยแบตเตอรี่ และรถไฟฟ้าขับด้วยแบตเตอรี่ร่วมโซลาร์เซลล์ ทราบว่าการใช้แบตเตอรี่ร่วมโซลาร์เซลล์ มี

ผลต่างของอัตราสิ้นเปลืองกระแสอยู่ที่ 0.27 แอมแปร์ และที่ความเร็ว 30 กิโลเมตรต่อชั่วโมง รถไฟฟ้าขับเคลื่อนด้วยแบตเตอรี่ และรถไฟฟ้าขับเคลื่อนด้วยแบตเตอรี่ร่วมโซล่าเซลล์ ทราบว่าการใช้แบตเตอรี่ร่วมโซล่าเซลล์ มีผลต่างของอัตราสิ้นเปลืองกระแสอยู่ที่ 0.40 แอมแปร์

5. สรุปผลและการอภิปรายผล

5.1 สรุปผลตามวัตถุประสงค์

รถบรรทุก 3 ล้อ ขนาด 3 ที่นั่ง ขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ และใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีกำลังไฟฟ้าขนาด 48 โวลต์ 750 วัตต์ และความเร็วรอบ 2900 รอบต่อนาที ร่วมแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 310 วัตต์ 37.6 โวลต์ 8.27 แอมแปร์ จำนวน 1 แผง และเก็บไฟฟ้าโดยแบตเตอรี่ 12 โวลต์ 45 แอมแปร์ชั่วโมง จำนวน 4 ลูก ต่อแบบอนุกรม ซึ่งงานวิจัยนี้ทำการทดลองที่ความเร็ว 20, 30 และ 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมงเทียบระยะทางการวิ่งรถแบบไม่บรรทุก ได้การทดลองแบ่งเป็น 2 ส่วน พบว่า

5.1.1 การขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้าจากแบตเตอรี่เพียงอย่างเดียวได้ระยะทางเป็น 86.73 ± 1.8 , 81.44 ± 2.1 และ 76.30 ± 2.3 กิโลเมตรตามลำดับความเร็ว และหลังจากได้ทดลองขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้าร่วมกับโซล่าเซลล์ได้ระยะทางเพิ่มขึ้นมาประมาณ 2, 3 และ 4 กิโลเมตรตามลำดับความเร็ว

5.1.2 ค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ต่อความเร็วระยะทางเมื่อเทียบกับการใช้แบตเตอรี่และขับเคลื่อนร่วมกับโซล่าเซลล์ พบว่ามีอัตราการใช้กระแสไม่แตกต่างกันอยู่ที่ 4.90, 7.80 และ 14.40 แอมแปร์ตามลำดับความเร็วระยะทาง

การทดลองขับรถไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ร่วมกับโซล่าเซลล์จากพลังงานแสงอาทิตย์ เมื่อต่อระบบไฟฟ้าร่วมกับโซล่าเซลล์ที่ ความเร็ว 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมงสามารถขับวิ่งได้ระยะทางเป็น 90.52 กิโลเมตร โดยผลการทดลองเทียบกับการใช้พลังงานจากแบตเตอรี่สามารถเพิ่มขึ้นประมาณ 4 กิโลเมตร และอัตราการสิ้นเปลืองกระแสแบตเตอรี่ลดลงถึง 1.10 แอมแปร์ ซึ่งเป็นผลการทดลองระยะทางและอัตราการสิ้นเปลืองกระแสที่ดีที่สุด พบว่าการใช้รถไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ร่วมกับโซล่าเซลล์สามารถเพิ่มระยะทางและลดอัตราการสิ้นเปลืองกระแสได้

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ภาควิชาเทคโนโลยียานยนต์ วิทยาลัยเทคนิคกาฬสินธุ์ ที่ให้ใช้สถานที่ทำงานวิจัยและบุคลากรที่คอยให้คำปรึกษามาตลอด และขอขอบพระคุณ สาขาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม ที่ให้ความอนุเคราะห์ อุปกรณ์เครื่องมือ และสถานที่ในการทำวิจัยนี้สำเร็จได้ด้วยดี

7. เอกสารอ้างอิง

- นภัทร วัจนเทพินทร์, สามารถ ทัดเกษ, กิตตินันท์ พลอยรัตน์ และปัญญา กล้าเดช. (2559). การพัฒนารถไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ต้นแบบสำหรับการแข่งขัน. **วารสารวิชาการและวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร**, 10(2), 54-65.
- Binz, C., & Anadon, L. D. (2018). Unrelated diversification in latecomer contexts: Emergence of the Chinese solar photovoltaics industry. **Environmental Innovation and Societal Transitions**, 28, 14-34.
doi: <https://doi.org/10.1016/j.eist.2018.03.005>
- Cross, J., & Murray, D. (2018). The afterlives of solar power: Waste and repair off the grid in Kenya. **Energy Research & Social Science**, 44, 100-109.
doi: <https://doi.org/10.1016/j.erss.2018.04.034>
- Diouf, B., & Avis, C. (2019). The potential of Li-ion batteries in ECOWAS solar home systems. **Journal of Energy Storage**, 22, 295-301.
doi: <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.02.021>
- Husain, A. A. F., Hasan, W. Z. W., Shafie, S., Hamidon, M. N., & Pandey, S. S. (2018). A review of transparent solar photovoltaic technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 94, 779-791.
doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.06.031>
- Rizzo, G. (2010). Automotive applications of solar energy. **IFAC Proceedings Volumes**, 43(7), 174-185. doi:<https://doi.org/10.3182/20100712-3-DE-2013.00199>
- Secinaro, S., Brescia, V., Calandra, D., & Biancone, P. (2020). Employing bibliometric analysis to identify suitable business models for electric cars. **Journal of Cleaner Production**, 264, 121503.
Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121503>
- Tiano, F. A., Rizzo, G., De Feo, G., & Landolfi, S. (2018). Converting a conventional car into a hybrid solar vehicle: a LCA approach. **IFAC-PapersOnLine**, 51(31), 188-194. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.10.035>

การเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการตรวจสอบชิ้นส่วนรถยนต์ กรณีศึกษา โครงรถยนต์

INSPECTION PROCESS IMPROVEMENT FOR AUTOMOTIVE PARTS: A CASE STUDY OF CHASIS

ชิตษณุ ภักดีวานิช^{1*} และ สุชาชนิษฐ์ ทองพรหม¹

Chitsanu Pakdeewanich^{1*} and Suchakanit Thongprom¹

¹ภาควิชาการบริหารอุตสาหกรรมการผลิตและบริการ คณะพัฒนาธุรกิจและอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ เขต บางซื่อ กรุงเทพฯ ประเทศไทย 10800

¹Department of Manufacturing and Service Industry Management, Faculty of Business and Industrial Development,
King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bang Sue, Bangkok, Thailand, 10800

*Corresponding author E-mail: chitsanu.p@bid.kmutnb.ac.th

วันที่เข้ารับ 17 พฤษภาคม 2563

วันที่แก้ไขบทความ 11 กันยายน 2563

วันที่ตอบรับบทความ 12 กันยายน 2563

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการตรวจสอบชิ้นส่วนรถยนต์กรณีศึกษา โครงรถยนต์ แผนภาพสเปกตรัมที่จัดทำขึ้นใช้ในการนำเสนอเส้นทางการเคลื่อนที่ของพนักงานตรวจสอบ แผนภูมิแกงปลาแสดงเหตุและผลของการทำงานที่ใช้ระยะทางมากเกินไปจนเป็น จากการศึกษาวิเคราะห์กระบวนการตรวจสอบชิ้นส่วนรถยนต์ก่อนการปรับปรุง พบว่า พนักงานเดินตรวจสอบรอบโครงรถยนต์เป็นระยะทางทั้งสิ้น 87 เมตร และใช้เวลา 21.80 นาที อุปกรณ์การทำงานบางอย่างอยู่ในตำแหน่งที่ไม่เหมาะสม ผู้วิจัยจึงนำโปรแกรมสเก็ตอัพ (SketchUp) มาประยุกต์ใช้ในการออกแบบกล่องจัดเก็บอุปกรณ์การทำงาน และจัดตำแหน่งการวางอุปกรณ์ให้ใกล้กับพื้นที่ใช้งาน เพื่อลดระยะการเดินของพนักงาน ตัวล้อโครงรถยนต์ถูกเปลี่ยนให้เหมาะสมต่อการใช้งาน ผลการวิจัยพบว่า พนักงานเดินตรวจสอบรอบโครงรถยนต์เป็นระยะทางทั้งสิ้น 38.50 เมตร หรือลดลงคิดเป็นร้อยละ 55.75 มีการใช้เวลา 21.30 นาที หรือลดลงคิดเป็นร้อยละ 2.29 และปริมาณพนักงานลดลงร้อยละ 33.33

คำสำคัญ: การปรับปรุงกระบวนการ, แผนภาพสเปกตรัม, โปรแกรมสเก็ตอัพ

Abstract

The objective of this research is to increase the efficiency of inspection process for automotive parts: a case study of chassis. The Spaghetti Chart was adopted to present routing of workers. Fish bone diagram showed causes and effect of unnecessary distances in inspection process. Based on analyzing of current inspection process, it showed that total walking distance of inspection process was 87 meters and there was 21.80 minutes for this process. Some equipment was misplaced. To place the equipment properly, we designed suitable containers by using Sketch up and located them near working area to reduce walking distance of workers. Also, Chassis' holder was changed to suit its function. The results showed that total walking distance of inspection process became 38.50 meters, or it was reduced by 55.75%. The total time was also reduced to 21.30 minutes or by 2.29% and the percentage of employee reduction was 33.33.

Keywords: Process improvement, Spaghetti chart, Sketch up software

1. บทนำ

อุตสาหกรรมยานยนต์เป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมใหญ่ที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากกับภาคธุรกิจของโลก รวมถึงภาคธุรกิจของประเทศไทย เนื่องจากอุตสาหกรรมยานยนต์ได้ก่อให้เกิดการขับเคลื่อนเศรษฐกิจหลากหลายภาคส่วน อาทิเช่น การสร้างงาน การสร้างรายได้ การผลิต การส่งออกชิ้นส่วนรถยนต์ และการดึงดูดนักลงทุนจากต่างประเทศเข้ามาลงทุนภายในประเทศไทย อุตสาหกรรมยานยนต์ได้เข้ามามีบทบาทในประเทศไทยจากการนำเข้ารถยนต์ทั้งคันจากยุโรปและญี่ปุ่น ส่งผลให้มูลค่าการนำเข้าสินค้าจากต่างประเทศสูงเกินความจำเป็น ก่อให้เกิดนโยบายส่งเสริมการลงทุนผลิตรถยนต์ภายในประเทศ เพื่อลดการนำเข้ารถยนต์ทั้งคันจากต่างประเทศ ด้วยการกำหนดให้มีการตั้งโรงงานประกอบรถยนต์ขึ้นในประเทศไทยและให้สิทธิประโยชน์โดยการลดอัตราภาษีอากรนำเข้าของชิ้นส่วนครบชุดสมบูรณ์ (Complete- Knocked Down: CKD) และการนำเข้าชิ้นส่วนและอุปกรณ์ (Parts) เพื่อเข้ามาประกอบภายในประเทศให้ต่ำกว่าภาษีอากรการนำเข้ารถยนต์ทั้งคัน

จากข้อมูลโครงสร้างการผลิตรถยนต์ของไทยปี พ.ศ. 2562 พบว่า ร้อยละ 52 ของโครงสร้างการผลิตรถยนต์เป็นการส่งออก ในช่วง 2 – 3 ปีที่ผ่านมา การส่งออกรถยนต์หดตัวลง เพราะแนวโน้มของการผลิตรถยนต์เปลี่ยนแปลงไป (อรรถสิทธิ์, 2562) ซึ่งส่งผลกระทบต่อโรงงานประกอบรถยนต์ในประเทศไทยอย่างชัดเจน ดังนั้นการควบคุมต้นทุนในการผลิตจึงเป็นส่วนสำคัญอย่างยิ่ง ในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ เป็นส่วนที่มีต้นทุนที่สูง เพื่อควบคุมต้นทุนด้านนี้ การเพิ่ม

ประสิทธิภาพ หรือการปรับปรุงกระบวนการอย่างต่อเนื่อง จึงเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับโรงงานประกอบชิ้นส่วนรถยนต์ จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่า มีงานวิจัยมากมายที่มีวัตถุประสงค์เพื่อการปรับปรุงกระบวนการผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ หรือเพื่อการเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ อาทิ การเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ ประเภทฝาปิดกล่องใส่ของ ซึ่งมีการปรับปรุงขั้นตอนการผลิต เพื่อลดความสูญเปล่า จากผลการวิจัยพบว่า รอบเวลาในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์พลาสติกลดลง คิดเป็นร้อยละ 11.61 (จารุวรรณ, 2558) การประยุกต์ใช้เทคนิคซีอาร์เอส (ECRS Technique) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการปั๊มขึ้นรูปโลหะ มีการออกแบบแม่พิมพ์และกระบวนการผลิตใหม่ด้วยเทคนิคซีอาร์เอส ส่งผลให้ขั้นตอนและจำนวนเครื่องจักรลดลง คิดเป็นร้อยละ 42.8 (อำนาจ และศิลปชัย, 2562) นอกจากนี้มีการนำเครื่องมือทางวิศวกรรมอุตสาหกรรมมาประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงการผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ นั่นคือ การจำแนกความสูญเปล่าตามหลักการลดความสูญเปล่า 7 ประการ (7 Wastes) การวิเคราะห์หาสาเหตุของแต่ละปัญหาด้วยการใช้แผนผังก้างปลา และการปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานด้วยเทคนิคซีอาร์เอส จากการประยุกต์ใช้เครื่องมือดังกล่าว ส่งผลให้รอบเวลาในสถานงานลดลง คิดเป็นร้อยละ 13.55 (อมรรัตน์, ณัฐพล และศิริพงษ์, 2561)

นอกจากนี้ การออกแบบอุปกรณ์ยึดจับชิ้นงาน หรือการออกแบบอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ช่วยในการผลิต สามารถช่วยเหลือนักงานให้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น อาทิ ณ จังหวัดภูเก็ต มีการปรับปรุงการทำงานเพื่อลดปัญหาทางการยศาสตร์ในกระบวนการนึ่งก้อนเชื้อเห็ด มีการวิเคราะห์ท่าทางการทำงานในกระบวนการนึ่งก้อนเชื้อเห็ด พบว่า การทำงานมีความเสี่ยงสูง และมีปัญหาทางการยศาสตร์ ต้องได้รับการปรับปรุงโดยทันที ในการแก้ปัญหานี้ มีการออกแบบอุปกรณ์ช่วยในการทำงาน คือ ฝาคกรอบเตานึ่งก้อนเชื้อเห็ด โดยหลังจากการออกแบบ มีการประเมินภาวะทางการยศาสตร์ ซึ่งให้ผลประเมินที่ดี รวมทั้งมีการประเมินความพึงพอใจ ซึ่งให้ผลลัพธ์ที่ดีขึ้นจากเดิม คิดเป็นร้อยละ 8.1 (จารุวรรณ, กิตติศักดิ์ และอนันต์, 2562) การแก้ปัญหาด้านความปลอดภัย การออกแบบอุปกรณ์สำหรับพนักงาน ก็สามารถป้องกันการเกิดอุบัติเหตุได้เช่นกัน อาทิ การออกแบบอุปกรณ์สำหรับอาสาสมัครกู้ภัยจราจร เพื่อป้องกันการเกิดอุบัติเหตุซ้ำซ้อน มีการศึกษาข้อมูลจากอาสาสมัครกู้ภัยจราจร งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และนำข้อมูลดังกล่าวมาวิเคราะห์เพื่อให้ได้ปัจจัยที่มีผลต่อการออกแบบอุปกรณ์ มีการทดลองแบบร่างด้วยโปรแกรม สเก็ตอัป (Sketchup) และขึ้นรูปสามมิติ เพื่อนำไปใช้งานจริง โดยไม่เปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการทำงานของอาสาสมัคร ผลการประเมินต่อรูปแบบอุปกรณ์เพื่อป้องกันการเกิดอุบัติเหตุ สำหรับอาสาสมัครกู้ภัยจราจร อยู่ในระดับดีมาก (สมบุญยา และธนสิทธิ์, 2562)

จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้น ผู้วิจัยเล็งเห็นถึงความสำคัญของการเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการด้วยเครื่องมือต่าง ๆ ดังนั้นในการเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการตรวจสอบชิ้นส่วน

รณนต์ กรณศึกษา โครงรณนต์ ผู้วิจัยจึงประยุกต์ใช้แผนภาพสเปกตรัมการเกิดดีคาร์ท แผนภาพกังปลา หลักการการยศาสตร์ และโปรแกรมสเก็ตอัพ (Sketchup) โดยเริ่มจากการศึกษาการทำงาน กระบวนการตรวจสอบชิ้นส่วนรณนต์ เพื่อบันทึกข้อมูลด้านเวลาและระยะการเดินทางของ พนักงาน นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ปัญหาและออกแบบแนวทางการแก้ไข พร้อมทั้งออกแบบอุปกรณ์ ที่ช่วยในการทำงานง่ายขึ้น รวมทั้งเปรียบเทียบผลการทำงานก่อนและหลังการปรับปรุง

2. ทฤษฎีและเครื่องมือที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการตรวจสอบชิ้นส่วนรณนต์ กรณศึกษา โครง รณนต์ ผู้วิจัยได้ศึกษาทฤษฎีและเครื่องมือที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

1. การศึกษาการทำงาน (Work study) หรือที่รู้จักกันในชื่อเดิมว่า “การศึกษาการเคลื่อนไหว และเวลา (Motion and time study)” เป็นหลักการที่ใช้กันมาอย่างยาวนาน การศึกษาการทำงานได้ถูก กล่าวถึงมากมายในหลายงานวิจัย วัตถุประสงค์ของการศึกษาการทำงาน เป็นการพัฒนารูปแบบ การทำงานที่ดีกว่า หรือการออกแบบวิธีการทำงาน เพื่อนำทรัพยากรต่าง ๆ มาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด (สุขุม, 2559: ออนไลน์)

2. แผนภาพสเปกตรัมการเกิดดีคาร์ท (Spaghetti diagram) เป็นการแสดงภาพโดยใช้เส้นการไหลอย่าง ต่อเนื่อง เพื่อติดตามเส้นทางของรายการ หรือกิจกรรมผ่านกระบวนการ ช่วยให้ระบุความซ้ำซ้อนใน กระบวนการทำงาน แสดงเส้นการไหลที่ไม่จำเป็น สิ่งสำคัญในการสร้างแผนภาพสเปกตรัมการเกิดดีคาร์ท คือ ต้องนำเสนอเส้นทางการไหลที่ไม่สามารถควบคุมได้ เพื่อนำมาหาข้อบกพร่องในกระบวนการและ ดำเนินการแก้ไขให้ถูกต้องต่อไป

3. แผนภูมิกังปลา หรือแผนภูมิแสดงเหตุและผล เกิดขึ้นเมื่อ ค.ศ. 1943 โดยศาสตราจารย์คา โอริ อิชิกาวา (Professor Kaoru Ishikawa) ได้ใช้แผนภูมินี้ในการอธิบายความสัมพันธ์ของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อคุณภาพในการผลิตแก้ววิศวกรจาก บริษัท คาวาซากิสตีลเวิร์ค จำกัด ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ ระหว่างเหตุและผลของประเด็นปัญหา สำนักมาตรฐานอุตสาหกรรมแห่งญี่ปุ่น (JIS) ได้นิยาม ความหมายของแผนภูมิแสดงเหตุและผล ไว้ว่า เป็นแผนภูมิที่แสดงความสัมพันธ์อย่างมีระบบระหว่าง ผลที่แน่นอนประการหนึ่งกับสาเหตุต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง (กิตติศักดิ์, 2550)

4. สเก็ตอัพ ซอฟต์แวร์ในการออกแบบและพัฒนาวัตถุ 3 มิติ เป็นโปรแกรมที่สร้างขึ้นภายใต้ แนวคิดในการรวมเอาข้อดีจากการสร้างต้นแบบด้วยการใช้ดินสอเขียน ใช้น้ำยาในการลบกระดาด และใช้สื่อดิจิทัลผสมผสานการใช้งานเข้าด้วยกันอย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้เกิดความยืดหยุ่นในการ ทำงาน อีกทั้งยังมีอินเตอร์เฟซที่ใช้งานง่ายไม่ซับซ้อนเป็นโปรแกรมออกแบบที่มีความสามารถในการ เปลี่ยนภาพวาดโครงร่างให้กลายเป็นภาพงานจำลอง 3 มิติ (ปิยวุฒิ และพลวัชร, 2555)

3. การศึกษากระบวนการตรวจสอบโครงรถยนต์

ก่อนการผลิตรถยนต์ทุกครั้ง โครงรถยนต์จะถูกทำความสะอาดและตรวจสอบคุณภาพของโครงรถยนต์ และบันทึกข้อมูลหลังตรวจสอบ โดยกระบวนการตรวจสอบโครงรถยนต์ในงานวิจัยครั้งนี้ มีทั้งหมด 8 ขั้นตอน และใช้พนักงานทั้งสิ้น 3 คน แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 หน้าที่ความรับผิดชอบของพนักงานแต่ละคน

รายละเอียดงาน	พนักงานผู้รับผิดชอบ	เวลา (นาที)
1. ลากโครงรถยนต์มายังพื้นที่ตรวจสอบ	พนักงานคนที่ 2	2
2. สแกนข้อมูลโครงรถยนต์เข้าสู่ระบบ	พนักงานคนที่ 1	2
3. เช็ดทำความสะอาดโครงรถยนต์	พนักงานคนที่ 1 และ 2	3.20
4. ตรวจสอบคุณภาพโครงรถยนต์ด้านซ้าย ด้านขวา และด้านใน	พนักงานคนที่ 1 และ 2	5.15
5. ตรวจสอบคุณภาพโครงรถยนต์ที่หลังคาตามแนว เทปที่แปะไว้	พนักงานคนที่ 1 และ 2	3.15
6. แขนป้ายสถานะที่โครงรถยนต์หลังตรวจสอบ	พนักงานคนที่ 1	0.30
7. เดินตรวจสอบรอบคันรถ และลงบันทึกรายละเอียดที่ตรวจสอบในใบบันทึกงาน (Job Card)	พนักงานคนที่ 3	4
8. ลากโครงรถยนต์ที่ตรวจสอบเสร็จไปพื้นที่จัดเก็บ	พนักงานคนที่ 3	2
รวม		21.8

จากข้อมูลดังกล่าว พนักงานแต่ละคนมีหน้าที่แตกต่างกัน แต่มีบางขั้นตอนที่มีการทำงานร่วมกัน คือ พนักงานคนที่ 1 และ 2 เช็ดทำความสะอาดโครงรถยนต์ ตรวจสอบคุณภาพโครงรถยนต์ ผู้วิจัยจึงจัดทำแผนภูมิกระบวนการไหล จำแนกตามพนักงาน ดังภาพที่ 1 2 และ 3 รวมทั้งมีการจับเวลาและระยะทางในการเดินตรวจสอบของพนักงานทั้ง 3 คนอีกด้วย



Flow Process Chart								
Chart No.1		Summary						
Sheet No.1								
SKD Receiving Inspection (พนักงานคนที่ 1)		Activity	Present	Propose	Saving			
		Operation ○	3					
กิจกรรม: การตรวจสอบคุณภาพ (โครงรถยนต์)		Transport ➡	5					
		Delay D	-					
		Inspection □	2					
		Storage ▽	-					
		Distance (M.)	32					
		Time (Minute)	13.80					
Description	Time (Minute)	DIST.(M.)	Symbol					
			○	➡	D	□		▽
สแกนบาร์โค้ด และลงรายละเอียดของโครงรถยนต์ในใบงาน (Job Card) ที่โต๊ะ	2	-	●					
เดินไปหยิบอุปกรณ์ทำความสะอาด	0.1	5.5		➡				
เช็ดทำความสะอาดโครงรถยนต์	3	-	●					
เดินไปเก็บอุปกรณ์ทำความสะอาด	0.1	5.5		➡				
เดินไปหยิบอุปกรณ์ตรวจเช็คโครงรถยนต์และสีของโครงรถยนต์	0.15	8		➡				
ตรวจสอบคุณภาพโครงรถยนต์ด้านขวา และด้านใน	5	-				■		
ตรวจสอบคุณภาพโครงรถยนต์ตามแนวเทปด้านขวา	3	-				■		
เดินไปเก็บอุปกรณ์ตรวจเช็คโครงรถยนต์	0.15	8		➡				
เดินไปหยิบป้ายระบุสถานะโครงรถยนต์	0.1	5		➡				
แขวนป้ายระบุสถานะที่โครงรถยนต์	0.2	-	●					
รวม	13.8	32	3	5	-	2	-	

ภาพที่ 1 แผนภูมิกระบวนการไหลแสดงกระบวนการตรวจสอบ
โครงรถยนต์ของพนักงานคนที่ 1



Flow Process Chart								
Chart No.2		Summary						
Sheet No.2								
SKD Receiving Inspection (พนักงานคนที่ 2)		Activity	Present	Propose	Saving			
กิจกรรม: การตรวจสอบคุณภาพ (โครงรถยนต์)		Operation ○	1					
		Transport ➡	5					
		Delay □	-					
		Inspection □	2					
		Storage ▽	-					
		Distance (M.)	37					
		Time (Minute)	13.60					
Description	Time (Minute)	DIST.(M.)	Symbol					
			○	➡	□	□	▽	
ลากโครงรถยนต์เข้ามายังพื้นที่ตรวจสอบ	2	7		➡				
เดินไปหยิบอุปกรณ์ทำความสะอาด	0.1	5		➡				
เช็ดทำความสะอาดโครงรถยนต์	3	-	●					
เดินไปเก็บอุปกรณ์ทำความสะอาด	0.1	5		➡				
เดินไปหยิบอุปกรณ์ตรวจโครงรถยนต์และสีของโครงรถยนต์	0.2	10		➡				
ตรวจสอบโครงรถยนต์ด้านซ้าย และด้านหลัง	5	-				■		
ตรวจสอบโครงรถยนต์ด้านซ้ายตามแนวเทพ	3	-				■		
เดินไปเก็บอุปกรณ์ตรวจสอบโครงรถยนต์	0.2	10		➡				
รวม	13.6	37	1	5	-	2	-	

ภาพที่ 2 แผนภูมิกระบวนการไหลแสดงกระบวนการตรวจสอบ
โครงรถยนต์ของพนักงานคนที่ 2

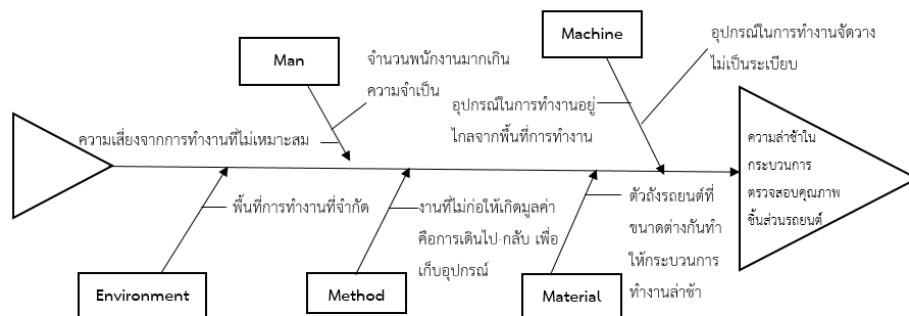
Flow Process Chart								
Chart No.3		Summary						
Sheet No.3								
SKD Receiving Inspection (พนักงานคนที่ 3)		Activity	Present	Propose	Saving			
กิจกรรม: การตรวจสอบคุณภาพ (โครงรถยนต์)		Operation ○	1					
		Transport ➡	1					
		Delay D	-					
		Inspection □	1					
		Storage ▽	1					
		Distrance (M.)	18					
		Time (Minute)	6.00					
Description	Time (Minute)	DIST.(M.)	Symbol					
เดินตรวจสอบรอบคันรถ	2	9	○	➡	D	□	▽	
บันทึกรายงานในใบบันทึกงาน (Job Card)	2	-	●			■		
ลากโครงรถยนต์ที่ตรวจสอบเสร็จไปพื้นที่จัดเก็บ	1.5	9		➡				
จัดเก็บโครงรถยนต์ในพื้นที่จัดเก็บ	0.5	-					▽	
รวม	6	18	1	1	-	1	1	

ภาพที่ 3 แผนภูมิกระบวนการไหลแสดงกระบวนการตรวจสอบ
โครงรถยนต์ของพนักงานคนที่ 3

จากข้อมูลดังกล่าว พบว่า พนักงานคนที่ 1 ใช้เวลา 13.80 นาที และมีระยะการเดิน 32 เมตร พนักงานคนที่ 2 ใช้เวลา 13.60 นาที มีระยะการเดิน 37 เมตร พนักงานคนที่ 3 ใช้เวลา 6 นาที มีระยะการเดิน 18 เมตร แต่การคิดเวลาทั้งหมดของกระบวนการตรวจสอบโครงรถยนต์ไม่สามารถนำมา รวมกันได้โดยตรง เนื่องจากการทำงานของพนักงานคนที่ 1 และ 2 ทำงานพร้อมกันในการเช็คท่า ความสะอาดโครงรถยนต์ และตรวจสอบโครงรถยนต์ ดังนั้นเวลาการตรวจสอบโครงรถยนต์รวมทั้งสิ้น เท่ากับ 21.80 นาที และมีระยะการเดินของพนักงานทั้งสามคนรวมกันเท่ากับ 87 เมตร

4. การวิเคราะห์ปัญหาและการออกแบบแนวทางการแก้ไข

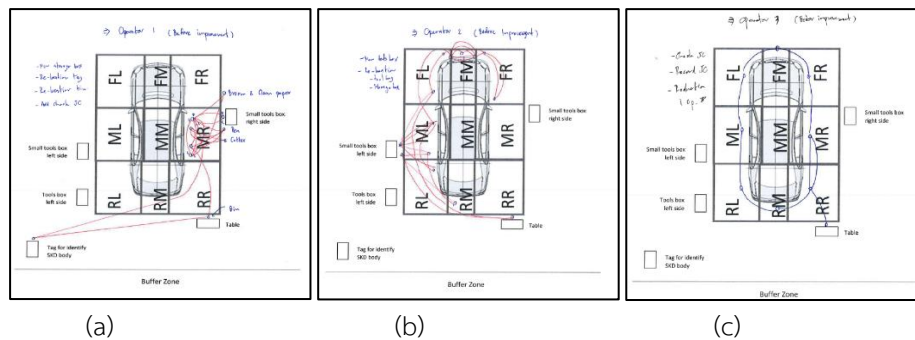
จากการศึกษากระบวนการตรวจสอบโครงรถยนต์ พบว่า พนักงานมีการเดินรวมกันมากกว่า 15 ครั้ง ใช้ระยะการเดินทั้งหมด 87 เมตร ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของความสูญเสียเปล่าในการทำงาน และส่งผล ต่อความล่าช้าในกระบวนการตรวจสอบโครงรถยนต์ อีกทั้งพนักงานคนที่ 3 ต้องรอคอยพนักงานคนที่ 1 และ 2 ตรวจสอบโครงรถยนต์จนเสร็จ พนักงานคนที่ 3 จึงเดินตรวจสอบรอบโครงรถยนต์อีกครั้ง ก่อนนำส่งพื้นที่จัดเก็บ ส่งผลให้พนักงานคนที่ 3 เกิดการรอคอยในการทำงาน ผู้วิจัยได้นำเสนอการ วิเคราะห์ความล่าช้าในกระบวนการตรวจสอบโครงรถยนต์ด้วยแผนภูมิแกงปลาที่ 4



ภาพที่ 4 แผนภูมิแกงปลาแสดงการวิเคราะห์สาเหตุของ

ความล่าช้าในกระบวนการตรวจสอบ

จากการวิเคราะห์สาเหตุของความล่าช้าในกระบวนการตรวจสอบโครงรถยนต์ มีสาเหตุหลัก คือ การเดินไปเดินมา เพราะการวางอุปกรณ์สำหรับการทำงานอยู่ไกลจากพื้นที่การตรวจสอบการ ทำงาน ผู้วิจัยจึงนำแผนภาพสเปกตรัมการเดินไปประยุกต์ใช้ในการอธิบายการเดินตรวจสอบโครง รถยนต์ของพนักงานทั้ง 3 คน ดังภาพที่ 5



(a)

(b)

(c)

ภาพที่ 5 แผนภาพspaเกิดดีชาร์ทแสดงการเดินของ

(a) พนักงานคนที่ 1 (b) พนักงานคนที่ 2 และ (c) พนักงานคนที่ 3

จากการวิเคราะห์ลักษณะการเดินของพนักงานทั้ง 3 คน พบว่า มีการเดินไป และเดินกลับที่ตำแหน่งเดิมหลายครั้ง การจัดเก็บอุปกรณ์ในการตรวจสอบอยู่ห่างจากพื้นที่ตรวจสอบโครงรถยนต์ และปริมาณงานของพนักงานทั้ง 3 คน มีสัดส่วนที่ไม่เหมาะสม

นอกจากนี้ ผู้วิจัยได้ตรวจสอบตำแหน่งการจัดเก็บอุปกรณ์สำหรับกระบวนการตรวจสอบโครงรถยนต์ และปัจจัยอื่นๆ ที่อยู่ในพื้นที่การตรวจสอบโครงรถยนต์ พบว่า มีการจัดเก็บอุปกรณ์ที่ยุ่งยากต่อการใช้งาน อุปกรณ์ยึดจับโครงรถยนต์ไม่เหมาะสมต่อการใช้งาน พนักงานต้องก้มลงไปล็อกโครงรถยนต์ด้วยมือ ส่งผลเสียต่อพนักงานทางกายภาพ และป้ายบอกสถานะโครงรถยนต์ที่ตรวจสอบแล้ว มีเพียงสถานะเดียว คือ พร้อมส่งสายการผลิต แต่สถานะการตรวจสอบมีทั้งสิ้น 4 สถานะ ได้แก่ ชิ้นส่วนบกพร่อง รถรอส่งซ่อมสี รถทดสอบรอยร้าว และพร้อมส่งสายการผลิต ภาพที่ 6 แสดงปัญหาสภาพแวดล้อมของพื้นที่การตรวจสอบโครงรถยนต์



(a)



(b)

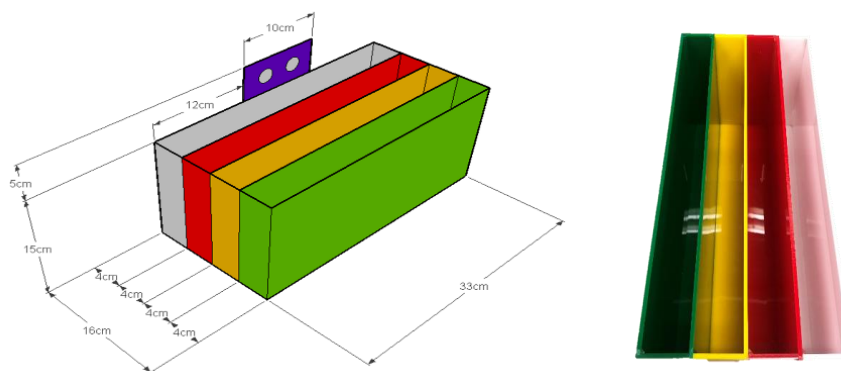


(c)

ภาพที่ 6 แสดงปัญหาต่าง ๆ ได้แก่ (a) การจัดเก็บอุปกรณ์ที่ไม่เป็นระเบียบ

(b) ตัวล็อกโครงรถยนต์ด้วยมือ และ (c) ป้ายบอกสถานะที่มีเพียงสถานะเดียว

แสดงสถานะของโครงรถยนต์ที่ต้องส่งซ่อมสี และช่องสีขาว สำหรับป้ายสีขาวที่แสดงสถานะของโครงรถยนต์ที่บกพร่อง ภาพที่ 8 (a) แสดงการออกแบบกล่องจัดเก็บป้ายบอกสถานะที่แบ่งประเภทตามสี และภาพที่ 8 (b) แสดงลักษณะกล่องจริงที่ใช้ในการจัดเก็บป้ายบอกสถานะ



ภาพที่ 8 แสดงการออกแบบกล่องจัดเก็บป้ายบอกสถานะ

(a) แบบจำลอง และ (b) กล่องจริง

3) การเปลี่ยนตัวล็อคโครงรถยนต์ จากภาพที่ 6 (a) แสดงตัวล็อคโครงรถยนต์ที่พนักงานต้องก้มลงใช้มือดันตัวล็อคโครงรถยนต์ เพื่อยึดโครงรถยนต์ให้อยู่กับที่ ซึ่งการเคลื่อนไหวของพนักงานนั้นส่งผลเสียต่อร่างกาย โดยทั่วไปแล้ว การออกแบบอุปกรณ์ควรต้องช่วยให้พนักงานทำงานได้สะดวกและไม่ฝืนร่างกายของมนุษย์ ดังนั้นการเปลี่ยนตัวล็อคโครงรถยนต์ที่อยู่บริเวณพื้น จึงควรมีลักษณะที่ใช้เท้าเหยียบ ภาพที่ 9 แสดงตัวล็อคโครงรถยนต์ที่ใช้เท้าเหยียบ



ภาพที่ 9 ตัวล็อคโครงรถยนต์ที่ใช้เท้าเหยียบ

นอกจากการเปลี่ยนตำแหน่งการวางอุปกรณ์ ออกแบบกล่องจัดเก็บอุปกรณ์ ออกแบบกล่องจัดเก็บป้ายสถานะ และเปลี่ยนตัวล็อคโครงรถยนต์แล้ว ผู้วิจัยได้กระจายงานของพนักงานคนที่ 3

ให้แก่พนักงานคนที่ 1 และ 2 เพราะสัดส่วนของพนักงานคนที่ 3 มีจำนวนน้อยเกินไป และต้องรอพนักงานคนที่ 1 และ 2 เสร็จก่อน จึงจะเริ่มทำงานของตนเอง เมื่อสิ้นสุดการออกแบบการแก้ไข ปัญหา ผู้วิจัยได้บันทึกข้อมูล และดำเนินการเปรียบเทียบในหัวข้อลำดับถัดไป

5. สรุปผลการปรับปรุงกระบวนการตรวจสอบโครงรถยนต์

จากการปรับปรุงกระบวนการตรวจสอบโครงรถยนต์ ด้วยการปรับตำแหน่งการวางอุปกรณ์ ตรวจสอบโครงรถยนต์ให้อยู่ใกล้ตำแหน่งการใช้งาน การออกแบบกล่องจัดเก็บอุปกรณ์ การออกแบบกล่องจัดเก็บป้ายบอกสถานะ เปลี่ยนตัวล็อคโครงรถยนต์ให้เป็นไปตามหลักกายศาสตร์ และกระจายงานของพนักงานคนที่ 3 ให้แก่พนักงานคนที่ 1 และ 2 พบว่า เวลารวมของพนักงานลดลงจากเดิม 21.80 นาที เหลือ 21.30 นาที หรือลดลงคิดเป็นร้อยละ 2.29 ซึ่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวส่งผลกระทบท่อระยะเวลาที่ใช้ในการเดินหีบอุปกรณ์เป็นหลัก จึงทำให้เวลาลดลงเพียงเล็กน้อย เพราะกระบวนการอื่นๆ ไม่มีการเปลี่ยนแปลง ข้อมูลเวลาก่อนและหลังปรับปรุงแสดงดังตารางที่ 2

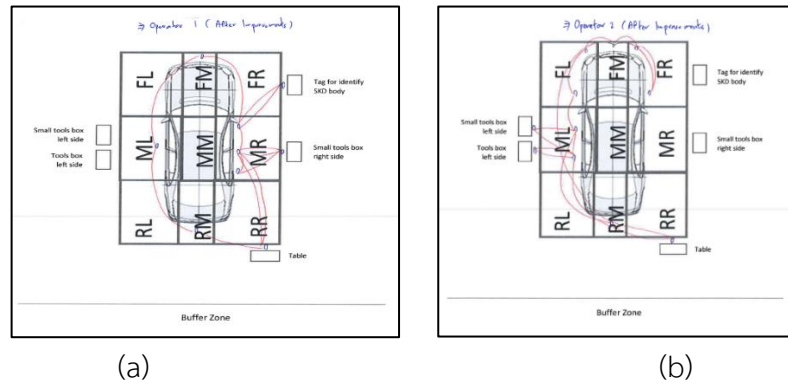
ตารางที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบเวลาก่อนและหลังการปรับปรุง

รายละเอียดงาน	เวลา (นาที)	
	ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง
1. ลากโครงรถยนต์มายังพื้นที่ตรวจสอบ	2	2
2. สแกนข้อมูลโครงรถยนต์เข้าสู่ระบบ	2	2
3. เช็ดทำความสะอาดโครงรถยนต์	3.20	3.04
4. ตรวจสอบคุณภาพโครงรถยนต์ด้านซ้าย ด้านขวา และด้านใน	5.15	5.02
5. ตรวจสอบคุณภาพโครงรถยนต์ที่หลังคาตามแนวเทปที่ปะไว้	3.15	3.02
6. แขนป้ายสถานะที่โครงรถยนต์หลังตรวจสอบ	0.30	0.22
7. เดินตรวจสอบรอบคันรถ และลงบันทึกรายละเอียดที่ตรวจสอบในใบบันทึกงาน (Job Card)	4	4
8. ลากโครงรถยนต์ที่ตรวจสอบเสร็จไปพื้นที่จัดเก็บ	2	2

ทั้งนี้ การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งอาจส่งผลกระทบท่อเวลาเพียง 0.5 นาที แต่ระยะการเดินมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งภาพที่ 10 แสดงลักษณะการเดินตรวจสอบโครงรถยนต์ของพนักงานคนที่ 1 และ 2 ซึ่งมีระยะทางการเดินของพนักงานทั้งสองคนหลังการปรับปรุงรวมกัน ทั้งสิ้น 38.5 เมตร หรือลดลงคิดเป็นร้อยละ 55.75

อย่างไรก็ตาม พนักงานคนที่ 1 และ 2 ได้รับงานจากพนักงานคนที่ 3 ทำให้จำนวนพนักงานในกระบวนการตรวจสอบโครงรถยนต์ลดลง 1 คน หรือคิดเป็นร้อยละ 33.33 ซึ่งผู้วิจัยได้จัดทำแผนภูมิ

กระบวนการไหล เพื่อเปรียบเทียบกระบวนการทำงานก่อนและหลังการปรับปรุง ของพนักงานคนที่ 1 และ 2 ดังภาพที่ 11 และ 12



ภาพที่ 10 แผนภาพสเปกตรัมการเดินทำงานของ
(a) พนักงานคนที่ 1 (b) พนักงานคนที่ 2

Flow Process Chart							
Chart No.1		Summary					
Sheet No.1							
SKD Receiving Inspection (พนักงานคนที่ 1)		Activity	Present	Propose	Saving		
		Operation 	3	3	0		
กิจกรรม: การตรวจสอบคุณภาพ (โครงรถยนต์)		Transport 	5	6	+1		
		Delay 	-	1	+1		
		Inspection 	2	2	0		
		Storage 	-	1	+1		
		Distance (M.)	32	16.5	-15.5		
		Time (Minute)	13.80	19.3	+5.50		
Description	Time (Minute)	DIST.(M.)	Symbol				
							
สแกนบาร์โค้ด และลงรายละเอียดของโครงรถยนต์ในใบงาน (Job Card) ที่โต๊ะ	2	-					
เดินไปหยิบอุปกรณ์ทำความสะอาด	0.02	1.5					
เช็ดทำความสะอาดโครงรถยนต์	3	-					
เดินไปเก็บอุปกรณ์ทำความสะอาด	0.02	1.5					
เดินไปหยิบอุปกรณ์ตรวจเช็คโครงรถยนต์และสีของโครงรถยนต์	0.02	1.5					
ตรวจสอบคุณภาพโครงรถยนต์ด้านขวา และด้านใน	5	-					
ตรวจสอบคุณภาพโครงรถยนต์ตามแนวเบาะด้านขวา	3	-					
เดินไปเก็บอุปกรณ์ตรวจเช็คโครงรถยนต์	0.02	1.5					
เดินไปหยิบป้ายระบุสถานะโครงรถยนต์	0.02	1.5					
แขวนป้ายระบุสถานะที่โครงรถยนต์	0.2	-					
รอพนักงานคนที่ 2 ตรวจโครงรถยนต์และบันทึกข้อมูล	4	-					
ลากโครงรถยนต์ออกจากพื้นที่ตรวจสอบ	1.5	9					
จัดเก็บโครงรถยนต์ในพื้นที่จัดเก็บ	0.5	-					
รวม	19.3	16.5	3	6	1	2	1

ภาพที่ 11 แผนภูมิกระบวนการไหลแสดงกระบวนการตรวจสอบ
โครงรถยนต์ของพนักงานคนที่ 1 (หลังปรับปรุง)

Flow Process Chart							
Chart No.2		Summary					
Sheet No.2							
SKD Receiving Inspection (พนักงานคนที่ 2)		Activity	Present	Propose	Saving		
กิจกรรม: การตรวจสอบคุณภาพ (โครงรถยนต์)		Operation ○	1	2	+1		
		Transport ➡	5	5	0		
		Delay D	-	-	-		
		Inspection □	2	3	+1		
		Storage ▽	-	-	-		
		Distance (M.)	37	22	-15		
		Time (Minute)	13.60	17.08	+3.48		
Description	Time (Minute)	DIST.(M.)	Symbol				
			○	➡	D	□	▽
ลากโครงรถยนต์เข้ามายังพื้นที่ตรวจสอบ	2	7		➡			
เดินไปหยิบอุปกรณ์ทำความสะอาด	0.02	1.5		➡			
เช็ดทำความสะอาดโครงรถยนต์	3	-	●				
เดินไปเก็บอุปกรณ์ทำความสะอาด	0.02	1.5		➡			
เดินไปหยิบอุปกรณ์ตรวจโครงรถยนต์และสีของโครงรถยนต์	0.02	1.5		➡			
ตรวจสอบโครงรถยนต์ด้านซ้าย และด้านหลัง	5	-			■		
ตรวจสอบโครงรถยนต์ด้านซ้ายตามแนวทแยง	3	-			■		
เดินไปเก็บอุปกรณ์ตรวจสอบโครงรถยนต์	0.02	1.5		➡			
เดินตรวจสอบรอบคันรถ	2	9			■		
บันทึกการตรวจการตรวจสอบ	2	-	●				
รวม	17.08	22	2	5	-	3	-

ภาพที่ 12 แผนภูมิกระบวนการไหลแสดงกระบวนการตรวจสอบโครงรถยนต์
ของพนักงานคนที่ 2 (หลังปรับปรุง)

การวิจัยครั้งนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อประสิทธิภาพในกระบวนการตรวจสอบชิ้นส่วนรถยนต์
กรณีศึกษา โครงรถยนต์ จากการวิเคราะห์กระบวนการตรวจสอบชิ้นส่วนรถยนต์ด้วยแผนภูมิแกงปลา
พบว่า การจัดวางตำแหน่งของอุปกรณ์อยู่ไกลจากพื้นที่การใช้งาน มีป้ายบอกสถานะไม่ครบตาม
ประเภท และตัวล็อกโครงรถยนต์มีลักษณะที่ไม่เอื้ออำนวยต่อท่าทางในการทำงานของพนักงาน ผู้วิจัย
จึงออกแบบแนวทางการแก้ไข และบันทึกข้อมูลหลังการปรับปรุงด้วยการใช้แผนภาพสเปกตรัม
และแผนภูมิกระบวนการไหล ผลการวิจัยพบว่า เวลาการทำงานลดลง ระยะการเดินตรวจสอบลดลง
และจำนวนพนักงานในกระบวนการตรวจสอบลดลง

ในการศึกษาครั้งต่อไป การวิเคราะห์ลักษณะการตรวจสอบโครงรถยนต์ และการศึกษางานย่อย
ของการกระบวนการตรวจสอบโครงรถยนต์เป็นส่วนสำคัญในการปรับปรุงกระบวนการ การวิเคราะห์
ประเภทโครงรถยนต์ที่บกพร่อง และไม่สามารถนำส่งเข้ากระบวนการผลิต ควรถูกนำมาศึกษาสำหรับ
การวิจัยครั้งต่อไป

6. เอกสารอ้างอิง

- กิตติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ. (2550). **หลักการควบคุมคุณภาพ**. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
- จารุวรรณ พรหมเงิน, กิตติศักดิ์ จิตตเกื้อ และอนันต์ สันติอมรทัต. (2562). การปรับปรุงการทำงานเพื่อลดปัญหาทางการยศาสตร์ในกระบวนการนึ่งก้อนเชื้อเห็ด กรณีศึกษา ศูนย์เรียนรู้การผลิตเห็ดอินทรีย์ จังหวัดภูเก็ต. **วารสารวิชาการคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง**. 12(1), 14-26.
- จารุวรรณ ทองใส. (2558). การเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ ประเภทฝาปิดกล่องใส่ของ. **วารสารวิชาการศรีปทุม**. ปีที่ 11 (ฉบับที่ 3). ชลบุรี. มหาวิทยาลัยศรีปทุม.
- ธานินทร์ ศิลปนาฏ. (2553). **การปรับปรุงกระบวนการซ่อมแซมแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์**. (วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต), กรุงเทพมหานคร, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ปิยะวุฒิ แดนวงตร และพลวัชร พรหมดวง. (2555). **การประยุกต์ใช้งานโปรแกรม Sketch Up สร้างแบบจำลองโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก (คสล.) เสมือนจริง เพื่อการจัดการงานก่อสร้าง (สำหรับบ้านพักอาศัยสองชั้น)**. การประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ครั้งที่ 1, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์, นครปฐม.
- สมบุญยา บุญยรัตนพันธุ์ และธนสิทธิ์ จันทะรี. (2562). การออกแบบอุปกรณ์สำหรับอาสาสมัครกู้ภัยจราจร เพื่อป้องกันการเกิดอุบัติเหตุซ้ำซ้อน. **วารสารวิจัยการออกแบบแห่งเอเชีย**. 2(1)
- สุขุม มั่นคง. (2559). **การศึกษาการเคลื่อนไหวและเวลาของพนักงาน**. ค้นจาก <http://motionth.blogspot.com/2016/01/blog-post.html>
- อมรรัตน์ ปิ่นชัยมูล, ณัฐพล ศิริรักษ์ และศิริพงษ์ ลือชัย. (2561). การปรับปรุงสายการผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ด้วยเครื่องมือทางวิศวกรรมอุตสาหกรรม. **วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม**. 14(3), 93-105.
- อรรถสิทธิ์ แจ่มฟ้า. (2562). **อุตสาหกรรมยานยนต์**. ค้นจาก https://www.gsbresearch.or.th/wp-content/uploads/2019/10/IN_car_10_62_detail-1.pdf
- อำนาจ อมฤก และศิลาชัย วัฒนเสย. (2562). การเพิ่มประสิทธิภาพโดยวิศวกรรมคอนเคอร์เร้นท์และเทคนิคอีซีอาร์เอส: กรณีศึกษาอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนขนาดเล็กของยานยนต์. **วารสารข่าวงานวิศวกรรมอุตสาหกรรมไทย**, 5(1), 21-27.



การพยากรณ์รังสีอาทิตย์ด้วยวิธีวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณเชิงเส้น:
กรณีศึกษาอำเภอเมืองพิษณุโลก (ประเทศไทย)

PREDICTION OF SOLAR RADIATION BY MULTIPLE LINEAR
REGRESSION ANALYSIS: A CASE STUDY OF MUEANG
PHITSANULOK DISTRICT (THAILAND)

กิตติศักดิ์ คงสีไพร^{1*} และ สมพร เรืองสินชันวานิช²

Kittisak Khongseeprai^{1*} and Somporn Ruangsinchaiwanich²

¹คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม อ.เมือง จ.พิษณุโลก ประเทศไทย 65000

²คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อ.เมือง จ.พิษณุโลก ประเทศไทย 65000

¹Faculty of Industrial Technology, Pibulsongkram Rajabhat University,
Muang Phitsanulok, Phitsanulok, Thailand, 65000

²Faculty of Engineering, Naresuan University, Muang Phitsanulok, Phitsanulok, Thailand, 65000

* Corresponding author E-mail: Kittisak_nat@hotmail.com

วันที่เข้ารับ 3 กรกฎาคม 2563

วันที่แก้ไขบทความ 14 ตุลาคม 2563

วันที่ตอบรับบทความ 15 ตุลาคม 2563

บทคัดย่อ

บทความวิจัยเรื่องนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการพยากรณ์ค่ารังสีอาทิตย์แบบรายปักษ์ในเขตพื้นที่อำเภอเมืองพิษณุโลก จากการสร้างสมการพยากรณ์ด้วยวิธีการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ โดยใช้ตัวแปรอิสระที่ประกอบด้วย อุณหภูมิอากาศสูงสุด และอุณหภูมิอากาศเฉลี่ยในเวลากลางวัน ซึ่งเป็นข้อมูลที่ได้จากเว็บไซต์อุตุนิยมวิทยาทั่วไป ทั้งนี้ข้อมูลจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ข้อมูลส่วนแรกในช่วงเดือนมกราคม พ.ศ. 2555 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2557 จำนวน 72 ข้อมูล จะใช้สำหรับการสร้างสมการพยากรณ์ด้วยวิธีการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ และข้อมูลส่วนที่ 2 ในช่วงเดือนมกราคม พ.ศ. 2558 ถึงเดือนกันยายน พ.ศ. 2560 จำนวน 63 ข้อมูล จะใช้สำหรับการทดสอบผลการพยากรณ์ที่ได้จากสมการพยากรณ์ โดยสถิติที่ใช้ในการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้คือค่าเฉลี่ยของร้อยละความผิดพลาดสัมบูรณ์ และผลจากการศึกษาพบว่า ค่าเฉลี่ยของร้อยละความผิดพลาดสัมบูรณ์ของการพยากรณ์ค่ารังสีอาทิตย์แบบรายปักษ์เมื่อเปรียบเทียบกับค่ารังสีอาทิตย์ที่ได้จากการวัดจริงอยู่ที่ 6.134 เปอร์เซ็นต์

คำสำคัญ : การพยากรณ์, รังสีอาทิตย์, การถดถอยพหุคูณ

Abstract

This research article aims to study the prediction of the bi-weekly solar radiation in Muang Phitsanulok district by constructing predictive equations by multiple linear regression analysis using independent variables consisting of maximum air temperature and average daytime air temperature. The information can be obtained from general meteorological websites. The information is divided into 2 parts. The first part, 72 pieces of information, was collected from January 2012 to December 2014. It was used to construct predictive equations by multiple linear regression analysis. The second part, 63 pieces of information, was collected from January 2015 to September 2017. It was used to test the prediction results obtained from the predictive equation. The statistics used in this study were the mean absolute percentage error (MAPE). The results of the study showed that MAPE is 6.134%.

Keywords: Solar radiation, Prediction, Multiple linear regression

1. บทนำ

พลังงานหมุนเวียนคือพลังงานที่ได้มาจากพลังงานที่ต่อเนื่องและเกิดซ้ำๆ ในสิ่งแวดล้อม แหล่งของพลังงานหมุนเวียน คือ แหล่งพลังงานที่เกิดขึ้นอยู่ต่อเนื่องไม่หมดไป ทั้งนี้พลังงานจากแสงอาทิตย์ถือได้ว่าเป็นพลังงานหมุนเวียนหรือพลังงานทดแทนอีกประเภทหนึ่งที่สามารถใช้ได้ตลอด และจัดเป็นพลังงานสะอาด ปราศจากมลพิษ ซึ่งในหลายพื้นที่ของประเทศต่างๆ ทั่วโลกต่างนำพลังงานแสงอาทิตย์ไปใช้ประโยชน์กันมากขึ้นโดยเฉพาะการนำพลังงานแสงอาทิตย์ไปใช้ในการผลิตพลังงานไฟฟ้าสำหรับประเทศไทยซึ่งตั้งอยู่ในเขตเส้นศูนย์สูตรทำให้ได้รับแสงอาทิตย์อย่างต่อเนื่องและคงที่ตลอดทั้งปี โดยความเข้มรังสีรวมของดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อปีของพื้นที่ทั่วประเทศอยู่ที่ $18 \text{ MJ/m}^2/\text{day}$ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, กระทรวงพลังงาน, ม.ป.ป.) อย่างไรก็ตามรังสีดวงอาทิตย์นอกจากจะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามตำแหน่งและทางเดินของดวงอาทิตย์ตามเวลาในรอบปีแล้วยังขึ้นอยู่กับภูมิประเทศของแต่ละพื้นที่อีกด้วย ดังนั้นในการพิจารณาและตัดสินใจในการหาพื้นที่ตั้งโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่เหมาะสม จะต้องพิจารณาถึงศักยภาพความเข้มรังสีรวมของดวงอาทิตย์ในพื้นที่นั้นๆ ด้วย

ทั้งนี้ข้อมูลความเข้มรังสีดวงอาทิตย์โดยทั่วไปจะได้จากการติดตั้งเครื่องวัดตามตำแหน่งต่างๆ ครอบคลุมพื้นที่ที่ต้องการศึกษา และทำการเก็บข้อมูลต่อเนื่องหลายปีเพื่อให้ได้ข้อมูลที่เป็นตัวแทนทางสถิติของพื้นที่นั้นๆ แต่เนื่องจากวิธีการเก็บข้อมูลดังกล่าวต้องใช้งบประมาณในการเข้าพื้นที่ติดตั้งและการซ่อมบำรุงดูแลรักษา ทำให้มีวิธีการที่จะหาข้อมูลความเข้มรังสีดวงอาทิตย์อีกหลายๆ วิธี อาทิเช่น



การพยากรณ์หาค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ด้วยวิธี Genetic Algorithm (GA) โดยใช้ข้อมูลของอุณหภูมิเป็นฐาน (Meenal *et al.*, 2017) การพยากรณ์หาค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์รายวันด้วยวิธีผสมผสานระหว่าง Wavelet Transform (WT) กับ Gaussian Process Regression (GPR) (Huang *et al.*, 2016) การพยากรณ์หาค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์รายวันด้วยวิธี Curve-Fitting (Pareek *et al.*, 2015) เป็นต้น

ในบทความวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการพยากรณ์ค่ารังสีอาทิตย์ด้วยวิธีการอื่นที่น่าสนใจด้วยการสร้างสมการพยากรณ์ด้วยวิธีการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ โดยใช้ตัวแปรอิสระที่ประกอบด้วยอุณหภูมิอากาศสูงสุด (T_{max}) และอุณหภูมิอากาศเฉลี่ยในเวลากลางวัน (T_{avg}) เพื่อนำไปใช้พยากรณ์ค่ารังสีอาทิตย์แบบรายปักษ์ (I_{Solar}) ในเขตพื้นที่อำเภอเมืองพิษณุโลก เนื่องจากข้อมูลเหล่านี้มีความสัมพันธ์ทางสถิติกับค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ (เสริม จันทร์ฉาย, 2557) อีกทั้งข้อมูลดังกล่าวนี้สามารถหาได้จากเว็บไซต์ของสถานีอุตุนิยมวิทยาทั่วไป ทำให้ไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการติดตั้งเครื่องมือวัดความเข้มรังสีอาทิตย์

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาหาค่ารังสีดวงอาทิตย์จากการพยากรณ์ด้วยวิธีการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณเชิงเส้น

3. ข้อมูลที่ใช้ศึกษา

การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้เป็นการศึกษาในเขตพื้นที่อำเภอเมืองพิษณุโลก (ประเทศไทย) ตั้งอยู่ที่พิกัด $16^{\circ}49'29''N$, $100^{\circ}15'34''E$ ซึ่งเป็นเขตพื้นที่ราบ ทั้งนี้ข้อมูลอุณหภูมิอากาศสูงสุด และอุณหภูมิอากาศเฉลี่ยในเวลากลางวันที่ได้มาจากเว็บไซต์ (Worldweatheronline, n.d.) และข้อมูลความเข้มรังสีอาทิตย์ได้มาจากศาสตราจารย์ ดร.เสริม จันทร์ฉาย ซึ่งร่วมมือกับกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานสังกัดกระทรวงพลังงาน ในการเก็บข้อมูลรังสีอาทิตย์ทั่วประเทศด้วยวิธีการใช้เครื่องมือวัดรังสีรวมแบบเทอร์โมโพล (Serm Janjai, n.d.) ทั้งนี้ข้อมูลจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ข้อมูลส่วนแรกในช่วงเดือนมกราคม พ.ศ. 2555 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2557 จำนวน 72 ข้อมูล จะใช้สำหรับการสร้างสมการพยากรณ์ด้วยวิธีการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ และข้อมูลส่วนที่ 2 ในช่วงเดือนมกราคม พ.ศ. 2558 ถึงเดือนกันยายน พ.ศ. 2560 จำนวน 63 ข้อมูล จะใช้สำหรับการทดสอบผลการพยากรณ์ที่ได้จากสมการพยากรณ์

4. วิธีการสร้างสมการถดถอยพหุคูณเชิงเส้น (Multiple linear regression)

การวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณเชิงเส้น เป็นการศึกษาความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างตัวแปรอิสระ คือ อุณหภูมิอากาศสูงสุด และอุณหภูมิอากาศเฉลี่ยในเวลากลางวัน กับตัวแปรตามหรือตัวแปรที่ต้องการพยากรณ์ คือ ค่ารังสีอาทิตย์ โดยเขียนความสัมพันธ์ในรูปแบบของสมการได้ดังนี้ (Seekeawseaw, 2012)

$$I_{Solar} = b_0 + b_1 T_{max} + b_2 T_{min} + \varepsilon \quad (1)$$

เมื่อ I_{Solar} คือ ค่ารังสีดวงอาทิตย์ ($\text{MJ}/\text{m}^2/\text{day}$), T_{max} คือ อุณหภูมิอากาศสูงสุด ($^{\circ}\text{C}$), T_{avg} คือ อุณหภูมิอากาศเฉลี่ยในเวลากลางวัน ($^{\circ}\text{C}$), b_0 คือ ค่าคงที่ (Constant) ของสมการถดถอย, b_1, b_2 คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression coefficient) ของตัวแปรอิสระแต่ละตัว, และ ε คือ ค่าความผิดพลาดของสมการซึ่งมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ เป็นการกระจายแบบปกติ (Normal distribution) และมีค่าความแปรปรวนอยู่ค่าหนึ่ง เมื่อใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least squares method) จะได้สมการความสัมพันธ์ดังนี้

$$\begin{aligned} nb_0 + b_1 \sum_{i=1}^n T_{max(i)} + b_2 \sum_{i=1}^n T_{avg(i)} &= \sum_{i=1}^n I_{Solar(i)} \\ b_0 \sum_{i=1}^n T_{max(i)} + b_1 \sum_{i=1}^n T_{max(i)}^2 + b_2 \sum_{i=1}^n T_{max(i)} T_{avg(i)} &= \sum_{i=1}^n T_{max(i)} I_{Solar(i)} \\ b_0 \sum_{i=1}^n T_{avg(i)} + b_1 \sum_{i=1}^n T_{avg(i)} T_{max(i)} + b_2 \sum_{i=1}^n T_{avg(i)}^2 &= \sum_{i=1}^n T_{avg(i)} I_{Solar(i)} \end{aligned} \quad (2)$$

เมื่อ n คือ จำนวนข้อมูลของตัวแปร และจากสมการที่ 2 สามารถแก้สมการเพื่อหาค่า b_0, b_1 และ b_2 โดยเขียนให้อยู่ในรูปเมทริกซ์ได้สมการใหม่ดังนี้

$$\begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^n T_{max(i)} & \sum_{i=1}^n T_{avg(i)} \\ \sum_{i=1}^n T_{max(i)} & \sum_{i=1}^n T_{max(i)}^2 & \sum_{i=1}^n T_{max(i)} T_{avg(i)} \\ \sum_{i=1}^n T_{avg(i)} & \sum_{i=1}^n T_{avg(i)} T_{max(i)} & \sum_{i=1}^n T_{avg(i)}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n I_{Solar(i)} \\ \sum_{i=1}^n T_{max(i)} I_{Solar(i)} \\ \sum_{i=1}^n T_{avg(i)} I_{Solar(i)} \end{bmatrix} \quad (3)$$

5. สถิติที่ใช้ในการศึกษา

สถิติที่ใช้ในการศึกษาค้างนี้ คือ ค่าเฉลี่ยร้อยละความผิดพลาดสัมบูรณ์ (Mean Absolute Percentage Error: MAPE) ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum \left| \frac{\text{Actual Values} - \text{Predict Values}}{\text{Actual Values}} \right| \times 100 \quad (4)$$

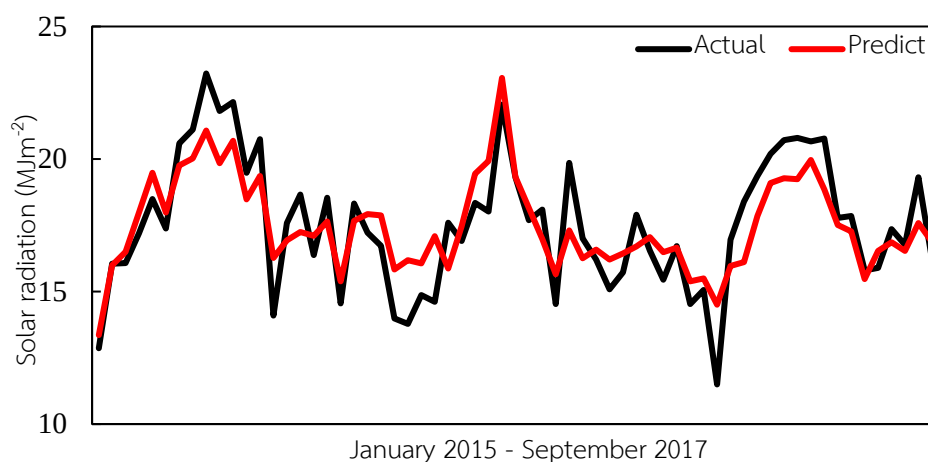
6. ผลการวิจัย

ผลจากการสร้างสมการพยากรณ์ด้วยวิธีการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณเชิงเส้นด้วยตัวแปรอิสระที่ประกอบด้วยอุณหภูมิอากาศสูงสุด ($T_{\max}$) และอุณหภูมิอากาศเฉลี่ยในเวลากลางวัน (T_{avg}) เพื่อนำไปใช้พยากรณ์ค่ารังสีอาทิตย์แบบรายปี (I_{Solar}) สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$I_{\text{Solar}} = -10.095 + 0.843T_{\max} - 0.017T_{\text{avg}} \quad (5)$$

และจากสมการ 5 ที่ได้จากวิธีการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณเชิงเส้นเมื่อนำไปหาค่าเฉลี่ยร้อยละความผิดพลาดสัมบูรณ์โดยการเปรียบเทียบกับค่ารังสีอาทิตย์แบบรายปีที่ได้จากการวัดจริงในช่วงเดือนมกราคม พ.ศ. 2558 ถึงเดือนกันยายน พ.ศ. 2560 จำนวน 63 ข้อมูล พบว่า มีค่าเฉลี่ยร้อยละความผิดพลาดสัมบูรณ์อยู่ที่ 6.134 เปอร์เซ็นต์

ทั้งนี้ผลที่ได้จากการพยากรณ์ค่ารังสีอาทิตย์แบบรายปีในเขตพื้นที่อำเภอเมืองพิษณุโลกเมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวัดจริงจะแสดงไว้ในภาพ 1 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่ารังสีอาทิตย์ที่ได้จากการพยากรณ์ด้วยวิธีการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณเชิงเส้นในแต่ละจุดบนกราฟมีค่าใกล้เคียงกับค่ารังสีอาทิตย์ที่ได้จากการวัดจริง



ภาพที่ 1 การเปรียบเทียบค่ารังสีอาทิตย์แบบรายปีที่ได้จากการพยากรณ์
เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวัดจริง

7. สรุปผลและการอภิปรายผล

จากการศึกษาในครั้งนี้จะเห็นได้ว่าการพยากรณ์ค่ารังสีดวงอาทิตย์แบบรายปักษ์ด้วยวิธีการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณเชิงเส้น โดยอาศัยข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยาที่ประกอบด้วยอุณหภูมิอากาศสูงสุดและอุณหภูมิอากาศเฉลี่ยในเวลากลางวันก็สามารถคาดคะเนค่ารังสีอาทิตย์ได้เช่นเดียวกับวิธีการอื่นๆ ที่นักวิชาการทั่วโลกต่างนิยมใช้กัน โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่ต่างกันมากนักเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอื่นที่นักวิชาการทั่วโลกนำเสนอ ทั้งนี้ก็อาจเนื่องจากความสัมพันธ์ระหว่างค่ารังสีอาทิตย์กับอุณหภูมิอากาศสูงสุดและอุณหภูมิอากาศเฉลี่ยในเวลากลางวันมีสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ค่อนข้างสูงซึ่งมันย่อมส่งผลให้การพยากรณ์ในครั้งนี้เกิดความคลาดเคลื่อนน้อยมาก และด้วยเหตุนี้เองการพยากรณ์ค่ารังสีอาทิตย์ด้วยวิธีการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณเชิงเส้นจึงเป็นอีกวิธีการหนึ่งที่จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์ความคุ้มค่าในการก่อสร้างโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ต่อไป

8. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร.เสริม จันทรฉาย สำหรับข้อมูลรังสีอาทิตย์ในพื้นที่อำเภอเมืองจังหวัดพิษณุโลก

9. เอกสารอ้างอิง

- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, กระทรวงพลังงาน. (ม.ป.ป.). **คู่มือการพัฒนาและการลงทุนผลิตพลังงานทดแทน ชุดที่ 2 พลังงานแสงอาทิตย์**. ค้นจาก https://www.dede.go.th/article_attach/h_solar.pdf
- เสริม จันทรฉาย. (2557). **รังสีอาทิตย์**. นครปฐม: เพชรเกษมการพิมพ์.
- Huang, C., Zhang, Z., & Bensoussan, A., (2016, November). **Forecasting of daily global solar radiation using wavelet transform-coupled gaussian process regression: Case study in Spain**. Innovative Smart Grid Technologies 2016 Asian Conference, University of Melbourne, Australia.
- Janjai, S., (n.d.). **Global radiation at Phitsanulok [CD]**. Department of Physics, Faculty of Science, Silpakorn University.
- Meenal, R., & Selvakumar, A.I., (2017, February). **Temperature based model for predicting global solar radiation using genetic algorithm (GA)**. International Conference on Innovations in Electrical, Electronics, Instrumentation and Media Technology, Karunya University, India.



- Pareek, A. & Gidwani, L., (2015, October). **Measured data of daily global solar irradiation using curve-fitting methods**. International Conference on Energy Systems and Application, Dr. D. Y. Patil Institute of Technology, Pune, India.
- Seekeawseaw, C. (2012). **Step of multiple linear regression**. Retrieved from <https://sites.google.com/site/mystatistics01/regression-correlation-analysis/multiple-linear-regression-step>.
- Worldweatheronline. (n.d.). **Phitsanulok historical weather**. Retrieved from <https://www.worldweatheronline.com/phitsanulok-weather-history/phitsanulok/th.aspx>

การลดเวลาการจัดส่งพัสดุของบริษัท XYZ ด้วยวิธีการจำลองสถานการณ์
กรณีมีหลายจุดรับพัสดุและมีหลายโซนนำจ่าย
REDUCTION OF PARCEL SERVICE TIME FOR AN XYZ COMPANY
USING A SIMULATION METHOD: IN CASE OF MULTIPLE PARCEL
LOCATIONS AND MULTIPLE DELIVERY ZONES

เดชดำรง จีราพงษ์¹, รัฐชานนท์ หอมหวล¹, ณัฐพร ตั้งเจริญชัย¹,
สุกฤษฎี เพชรสวัสดิ์¹, และ ธัชชัย เทพภรณ์^{1*}

Dechdumrong Jiraphong¹, Ratchanon Homhuan¹, Nattaporn Tungcharoenchai¹,
Sukrit Phetsawat¹, and Thatchai Thepphakorn^{1*}

¹คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม อ.เมือง จ.พิษณุโลก ประเทศไทย 65000

¹Faculty of Industrial Technology, Pibulsongkram Rajabhat University,
Muang Phitsanulok, Phitsanulok, Thailand, 65000

* Corresponding author E-mail: thatchai.t@psru.ac.th

วันที่เข้าระบบ 1 กันยายน 2563

วันที่แก้ไขบทความ 15 ตุลาคม 2563

วันที่ตอบรับบทความ 15 ตุลาคม 2563

บทคัดย่อ

การศึกษาวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดเวลาการให้บริการจัดส่งพัสดุของบริษัท XYZ ด้วยวิธีการจำลองสถานการณ์ เนื่องจากในแต่ละวันบริษัทจัดส่งพัสดุ XYZ ประสบปัญหาความล่าช้าในการนำจ่ายพัสดุไปยังลูกค้า ผู้วิจัยได้รวบรวมข้อมูลปัญหาทั้งหมดและทำการสร้างแบบจำลองสถานการณ์โดยใช้โปรแกรม ARENA โดยแบบจำลองสถานการณ์นี้จะพิจารณาพัสดุที่เข้ามาจากหลายสถานที่ประกอบด้วย ศูนย์กระจายพัสดุ จุดรับพัสดุของลูกค้ารายใหญ่ภายนอกบริษัท และจุดรับพัสดุที่หน้าเคาน์เตอร์ของบริษัท XYZ หลังจากกระบวนการคัดแยกพัสดุ พสดุทั้งหมดจะถูกนำไปยังไปยังผู้รับพัสดุหลายโซนประกอบด้วยโซน DB1 โซน DB2 และโซน DB3 ด้วยรถจักรยานยนต์และรถยนต์ หลังจากสร้างแบบจำลองแล้วจะทำการตรวจสอบความถูกต้องแบบจำลองทั้งในส่วนข้อมูลนำเข้า (Input data) และเวลาเฉลี่ยที่พัสดุอยู่ในระบบ (Cycle time) ก่อนทำการทดลอง โดยผลการทดลองพบว่า การเพิ่มพนักงานในแผนกคัดแยกพัสดุเพิ่มอีก 2 คน สามารถปรับปรุงเวลา Cycle time คิดเป็นร้อยละการปรับปรุงเท่ากับ 2.58 นอกจากนี้จำนวนครั้งในการนำจ่ายที่ล่าช้าลดลงเหลือเพียง 1.16 ครั้ง/วัน หรือคิดเป็นร้อยละจากการปรับปรุงเท่ากับ 77.6

คำสำคัญ: การจำลองสถานการณ์, การจัดส่งพัสดุ, การตรวจสอบความถูกต้องแบบจำลอง, การปรับปรุงการให้บริการ

Abstract

The aim of this research was to reduce a parcel delivery time for an XYZ company using a simulation method due to lack of an express delivery service for customers every day. The essential problem data of an XYZ company were collected for simulation modeling by using ARENA software. The parcels in this model were from numerous locations including a parcel distribution center, contractual customers, and a counter service at an XYZ company. After classifying process, all parcels were delivered to the customers in various zones including DB1, DB2, and DB3 by motorcycles or trucks. Input data and cycle time of the developed model were validated and verified before conducting the experiments. Experimental results indicated that the cycle time after increasing two workers in the classification process can be improved by 2.58%. Moreover, the average number of times for late parcel delivery to customers also decreased to be 1.16 times per day, or 77.6% of improvement.

Keywords: Simulation, Parcel delivery, Model validation, Service improvement

1. บทนำ

ธุรกิจธุรกิจการขนส่งพัสดุในประเทศไทยจัดเป็นอุตสาหกรรมทางด้านการให้บริการหรืออำนวยความสะดวกให้กับประชาชนรูปแบบหนึ่งที่มีความเกี่ยวข้องกับระบบโลจิสติกส์ของประเทศเป็นอย่างมาก เพราะในปัจจุบันเฉพาะธุรกิจการขนส่งพัสดุภายในประเทศมีการแข่งขันค่อนข้างสูงและมีการให้บริการตามความต้องการของลูกค้าที่หลากหลาย จึงทำให้เกิดบริษัทขนส่งหรือจัดส่งพัสดุต่างๆ มากมายในปัจจุบัน เช่น Kerry Express, NiM Express เป็นต้น โดยบริษัทต่างๆ ก็พยายามหาวิธีการเพื่อบริหารจัดการระบบโลจิสติกส์ให้เกิดประสิทธิภาพมากที่สุด ทั้งในด้านการลดต้นทุนการขนส่ง การลดเวลาในการขนส่ง ในขณะที่ระดับการให้บริการนั้นต้องสร้างความพึงพอใจแก่ลูกค้าให้มากที่สุด

บริษัทจัดส่งพัสดุ XYZ เป็นบริษัทที่ให้บริการจัดส่งพัสดुकับลูกค้าหลากหลายรูปแบบ ทั้งการให้บริการจัดส่งพัสดุในประเทศไทยและการจัดส่งพัสดุระหว่างประเทศ อย่างไรก็ตามบริษัทจัดส่งพัสดุดังกล่าวยังมีปัญหาทางด้านการให้บริการแก่ลูกค้า เช่น ปัญหาความล่าช้าในการขนส่งพัสดุให้กับลูกค้าในแต่ละวัน ปัญหาความล่าช้าในการคัดแยกพัสดุในแต่ละวัน ส่งผลให้การนำจ่ายพัสดุให้กับลูกค้าล่าช้าตามไปด้วย จนนำไปสู่การร้องเรียนจากลูกค้าเพิ่มมากขึ้น รวมถึงการสูญเสียลูกค้าไปสู่คู่แข่งรายอื่นๆ ได้ในอนาคต นอกจากนี้การศึกษาค้นคว้าและทดลองค้นหาแนวทางการปรับปรุงกระบวนการจัดส่งพัสดุโดยไม่กระทบต่อระบบจริงขององค์กรนั้นจัดเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่น่าสนใจในปัจจุบัน

การจำลองสถานการณ์ (Simulation) เป็นกระบวนการออกแบบจำลอง (Model) ของระบบจริง (Real system) แล้วดำเนินการทดลองเพื่อให้เรียนรู้พฤติกรรมของระบบงานจริง ภายใต้ข้อกำหนดต่างๆ ที่วางไว้ เพื่อประเมินผลการดำเนินงานของระบบและวิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองก่อนนำไปใช้แก้ไขปัญหาในสถานการณ์จริงต่อไป (รุ่งรัตน์ ภิรัชเพ็ญ, 2553) การจำลองสถานการณ์มีข้อดีหลายประการ สามารถใช้กับระบบที่มีความซับซ้อนและไม่สามารถหาความสัมพันธ์โดยสมการเชิงอนุพันธ์ทางคณิตศาสตร์ หรือสูตรทางคณิตศาสตร์ที่มีอยู่ได้ สามารถทำนายอนาคตของระบบได้ โดยใช้เวลาน้อยลงในการประมวลผลผลลัพธ์ของแบบจำลอง สามารถใช้แบบจำลองกับระบบที่ไม่สามารถทดลองบนสถานการณ์จริงได้ (รุ่งรัตน์ ภิรัชเพ็ญ, 2553) จากงานวิจัยที่ผ่านมา ณัฐรดี และคณะ (2561) ได้ทำการสร้างแบบจำลองสถานการณ์โดยพิจารณาจากการรับพัสดุจากศูนย์กระจายสินค้าเพียงจุดเดียวมายังบริษัทจัดส่งพัสดุ ทำการคัดแยกและออกนํ้าจ่ายไปยังลูกค้า เพื่อลดระยะเวลาในการนํ้าจ่ายพัสดุให้น้อยลง โดยพบว่าเมื่อเพิ่มพนักงานในระบบส่งผลให้การจัดส่งพัสดुरวดเร็วขึ้น

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงต้องการแก้ปัญหาปัญหาความล่าช้าในการขนส่งพัสดุให้กับลูกค้าและความล่าช้าในการคัดแยกพัสดุล่าช้าในแต่ละวันของบริษัทจัดส่งพัสดุ XYZ ด้วยวิธีการจำลองสถานการณ์ ในกรณีที่มีการขนส่งพัสดุจากศูนย์กระจายพัสดุ (Input1) และจุดรับพัสดุนอกบริษัท (Input2) มายังบริษัทจัดส่งพัสดุ XYZ รวมถึงจุดรับพัสดุที่หน้าเคาน์เตอร์ของบริษัท (Input3) และมีโซนนํ้าจ่ายประกอบด้วย DB1 โซน DB2 และโซน DB3

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อลดระยะเวลาในกระบวนการทำงาน (Cycle time) และลดจำนวนครั้งการปล่อยงานนํ้าจ่ายพัสดุล่าช้าของบริษัทจัดส่งพัสดุ XYZ

3. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วิมลวรรณ ปัทมรัตน์ (2545) ได้ทำการวิเคราะห์ระบบแถวคอยในการให้บริการลูกค้าของทำการไปรษณีย์โทรเลข โดยการเปรียบเทียบระบบการให้บริการลูกค้าของทำการไปรษณีย์ระหว่างระบบเดิมกับระบบใหม่ โดยระบบใหม่มี 3 ระบบคือ ระบบ ที่ 1 มีจำนวนผู้ให้บริการ 7 หน่วย ระบบที่ 2 มีจำนวนผู้ให้บริการ 8 หน่วย และระบบที่ 3 มีจำนวนผู้ให้บริการ 9 หน่วย โดยผู้ให้บริการทั้งหมดมีการแจกแจงเวลาในการให้บริการแบบแกมมา จากการสร้างโปรแกรมจำลองแบบเพื่อหาประสิทธิภาพและเปรียบเทียบการทำงานของทั้งระบบเดิมและระบบใหม่ โดยพิจารณาอัตราการเข้ารับบริการเฉลี่ย 3 อัตราพบว่า การทำงานของระบบใหม่มีประสิทธิภาพที่ดีกว่าระบบเดิม

สรวิศ รัตนพิไชย (2550) ปรับปรุงกระบวนการจัดซื้อจัดหาพัสดุโดยใช้แบบจำลองสถานการณ์กรณีศึกษาการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคไฟฟ้า ปัญหาคือ ระยะเวลาในการดำเนินการจัดซื้อที่นานถึง 7 ถึง 8 เดือน ทำให้การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคนั้นมีพัสดุคงคลังมูลค่าสูงกว่า 6,000 ล้านบาท โดยใช้เทคนิคการสร้างแบบจำลองสถานการณ์ ด้วยโปรแกรม ARENA มาเป็นเครื่องมือในการหาแนวทางปรับปรุงกระบวนการจัดซื้อ เพื่อลดระยะเวลาการดำเนินการลง จากผลการวิจัยพบว่า สามารถลดระยะเวลาดำเนินการจัดซื้อจัดหาลงได้ถึงร้อยละ 24.49 และการนำสัญญาณระยะยาวมาใช้จะสามารถลดระยะเวลาดำเนินการจัดซื้อจัดหารวมได้ถึงร้อยละ 74.92 ซึ่งจะทำให้มูลค่าพัสดุคงคลังลดลงได้ถึงร้อยละ 58.06

ณัฐยา คงอุดมเกียรติ (2555) ต้องการที่จะลดปริมาณวัตถุดิบคงคลังโดยระบบการผลิตแบบดึง จึงได้ทำการจำลองสถานการณ์เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวขึ้นมาพบว่า สามารถลดจำนวนชิ้นงานลงได้ร้อยละ 56.64 เทียบกับการส่งมอบในปัจจุบันของโรงงานคิดเป็นจำนวนเงินเฉลี่ย 157,374.86 บาทต่อเดือน และในการปรับรอบการส่งมอบของระบบการผลิตแบบดึงให้เร็วที่สุดที่เป็นไปได้คือ 1 วันต่อ 1 รอบการส่งมอบ

วลัยลักษณ์ อัครธีรวงศ์ (2556) ปรับปรุงกระบวนการลดความเสี่ยงจากการเสียหายของชิ้นงานด้วยการจำลองสถานการณ์ โดยแบบจำลองสถานการณ์ที่พัฒนาขึ้นจะมีจำนวนชิ้นงานที่ผลิตได้ต่อวันไม่แตกต่างกันมากนัก หากคำนึงถึงเรื่องความเสี่ยงแล้วนั้น แบบจำลองสถานการณ์ที่พัฒนาขึ้นสามารถช่วยลดความเสี่ยงจากการเสียหายของชิ้นงานที่อาจเกิดการแตกหักของชิ้นงานที่เกิดจากการขนย้ายระหว่างชั้นได้ และเป็นการลดความสูญเสียเปล่า (Waste) จากการขนส่ง (Transportation) และการเคลื่อนไหวที่ไม่จำเป็นลง

ณัฐฐิกา เสวกะ (2557) ปรับปรุงประสิทธิภาพการให้บริการผู้ป่วยด้วยการจำลองสถานการณ์กรณีศึกษาแผนกอายุรกรรมโรงพยาบาลรัฐบาลให้บริการครอบคลุมผู้ป่วยใน 3 จังหวัด จึงทำให้มีจำนวนผู้ป่วยเข้ารับบริการในแต่ละวันเป็นจำนวนมาก งานวิจัยนี้จึงได้สร้างแบบจำลองสถานการณ์ของการให้บริการ นำเสนอแนวทางในการลดระยะเวลาการรอคอย ผลจากการวิจัยพบว่า การลดช่องให้บริการที่สถานีทำบัตรจากเดิม 4 ช่องเหลือ 3 ช่องให้บริการ และเพิ่มช่องให้บริการที่สถานีคัดกรองจากเดิม 1 ช่องเป็น 2 ช่องให้บริการ สามารถลดเวลารอคอยเหลือเพียง 1 ชั่วโมง 28 นาที จากเวลารอคอยเฉลี่ยของผู้ป่วยเดิมที่ 2 ชั่วโมง 57 นาที และโรงพยาบาลไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายด้านการจัดจ้างพนักงานเพิ่มเติม

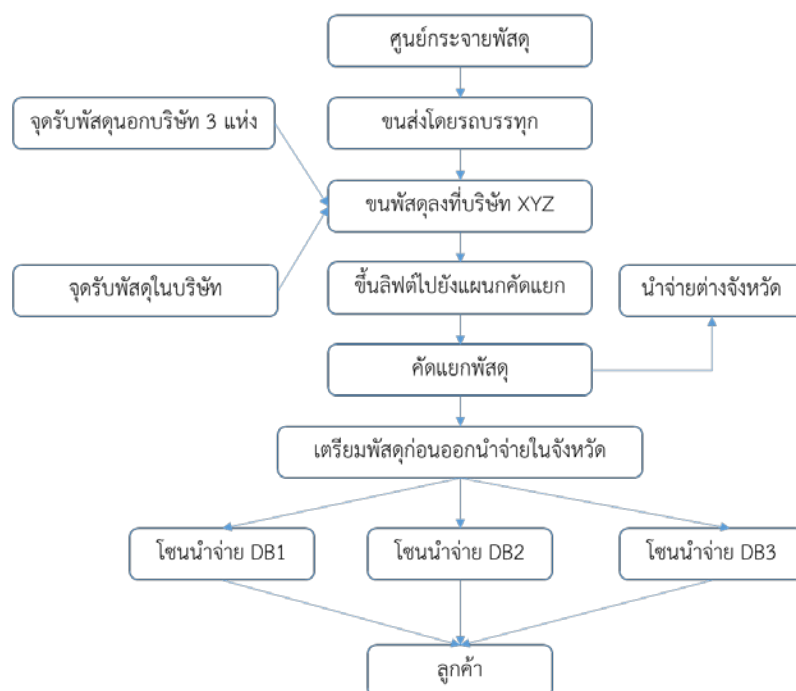
4. วิธีดำเนินการวิจัย

กระบวนการดำเนินการวิจัยจะเริ่มต้นจากการเก็บรวบรวมข้อมูล โดยระยะเวลาในการเก็บข้อมูลทั้งหมด 30 วัน ทั้งข้อมูลแบบปฐมภูมิ (Primary data) เช่น เวลาการเดินทางของรถขนส่ง

จากศูนย์กระจายพัสดุมายังบริษัท เวลาการขนส่งขึ้นลงก่อนและหลังกระบวนการคัดแยก เป็นต้น และข้อมูลแบบทุติยภูมิ (Secondary data) เช่น เวลาการออกนํ้าจ่ายพัสดุ เวลาการเสร็จสิ้นการนํ้าจ่ายพัสดุ เส้นทางและโซนนํ้าจ่ายพัสดุ เป็นต้น รวมถึงการเก็บข้อมูลรูปแบบกระบวนการทำงานของบริษัทจัดส่งพัสดุ XYZ จากนั้นทำการออกแบบและสร้างแบบจำลองสถานการณ์ของบริษัทจัดส่งพัสดุ XYZ โดยในส่วนของอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ประกอบด้วย คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล โปรแกรม Microsoft Excel และโปรแกรม ARENA เวอร์ชัน 15

4.1 ศึกษาข้อมูลและรูปแบบการทำงานของบริษัทจัดส่งพัสดุ XYZ

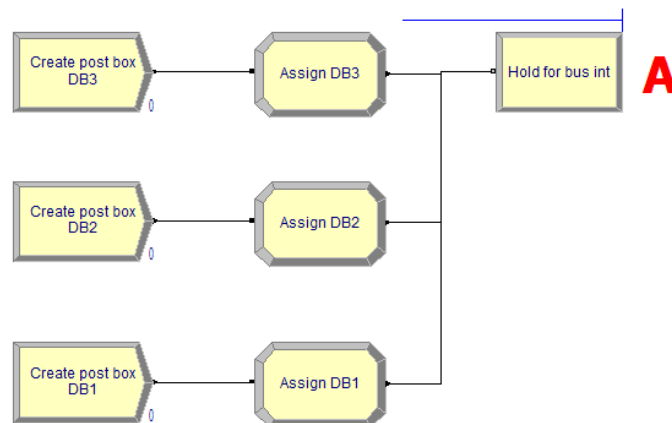
การออกแบบจำลองกระบวนการขนส่งพัสดุจะเป็นไปตามขั้นตอนที่ได้เก็บข้อมูลจริงจากบริษัทจัดส่งพัสดุ XYZ พสดุทั้งหมดที่เข้าสู่กระบวนการจำลองสถานการณ์จะประกอบด้วยข้อมูลนำเข้า 3 ส่วน โดยส่วนแรกจะเป็นการขนส่งพัสดุโดยใช้รถบรรทุกที่ใช้ในการขนส่งเริ่มต้นจากศูนย์กระจายพัสดุไปยังบริษัทจัดส่งพัสดุ XYZ สำหรับส่วนที่สองเป็นการขนส่งพัสดุจากสถานประกอบการภายนอกบริษัทจำนวน 3 แห่งที่มีจำนวนพัสดุนานมากที่สุด 3 อันดับแรกโดยบริษัทจะเป็นผู้นำรถยนต์ไปรับพัสดุทั้ง 3 แห่ง โดยวิ่งรถวันละเที่ยว และส่วนสุดท้ายจะเป็นพัสดุที่ถูกคํ้าเข้ามาใช้บริการที่หน้าเคาน์เตอร์ของบริษัท จากนั้นพัสดุทั้งหมดจะถูกขนย้ายไปยังแผนกคัดแยกบนชั้น 2 และทำการคัดแยกพัสดุตามโซน DB1 DB2 และ DB3 ก่อนทำการจัดส่งพัสดุไปยังลูกค้าในเขตรับผิดชอบต่อไป แสดงดังภาพที่ 1



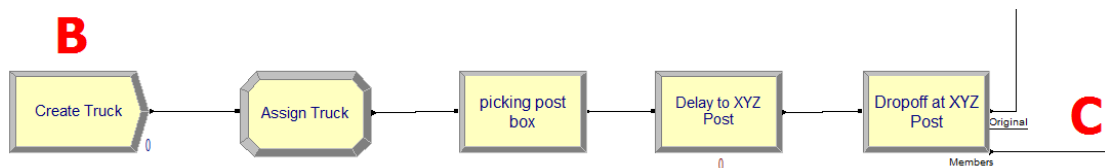
ภาพที่ 1 ผังการไหลของแบบจำลองกระบวนการขนส่งพัสดุของบริษัท XYZ

4.2 การสร้างแบบจำลองสถานการณ์

เริ่มต้นการสร้างพัสดุหรือวัตถุดิบเข้ามาในแบบจำลองแสดงดังภาพที่ 2 เมื่อพัสดุเข้ามาในระบบ จะทำการกำหนดให้รถบรรทุก 6 ล้อจำนวน 1 คันมารับพัสดุในรอบนั้น (จุด A) โดยจะจำลองเวลาเริ่มต้นของระบบในการมารับพัสดุที่เวลาประมาณ 01.00 น. สำหรับเวลาที่รถบรรทุกใช้ในการขนส่งจะใช้ข้อมูลดิบที่เก็บรวบรวมมาทำการวิเคราะห์ด้วย Input analyzer เพื่อกำหนดการแจกแจงที่เหมาะสมซึ่งจะได้ค่าเวลามากำหนดในส่วนของเวลาที่ใช้ในการขนส่งของรถบรรทุก แสดงดังภาพที่ 3 การกำหนดข้อมูลเวลาการเดินทางของรถบรรทุกในส่วนนี้จะมีผลโดยตรงต่อความล่าช้าในการออกจำหน่ายด้วย

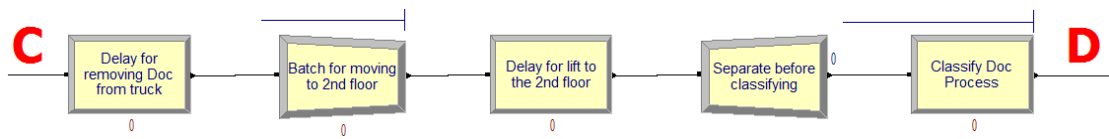


ภาพที่ 2 การจำลองพัสดุเริ่มต้นจากศูนย์กระจายพัสดุไปยังบริษัทจัดส่งพัสดุ XYZ



ภาพที่ 3 จำลองการขนส่งพัสดุจากศูนย์กระจายพัสดุมายังบริษัท XYZ ด้วยรถบรรทุก

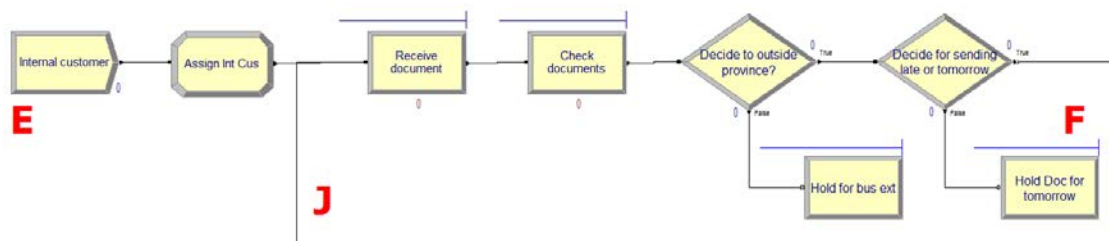
เมื่อรถบรรทุกทำการขนส่งพัสดุจากจากศูนย์กระจายพัสดุมายังบริษัท XYZ แล้ว (จุด B ไปยังจุด C) พสดุทั้งหมดจะถูกขนลงจากรถบรรทุก จากนั้นคนใส่รถเข็นขนขึ้นลิฟต์ชั้น 2 และย้ายไปทำการคัดแยกยังแผนกบนชั้น 2 ของบริษัท (จุด C ไปยังจุด D) ซึ่งจะมีผู้คัดแยกโดยมีอัตรากำลัง 15 คนทำการคัดแยกแสดงดังภาพที่ 4



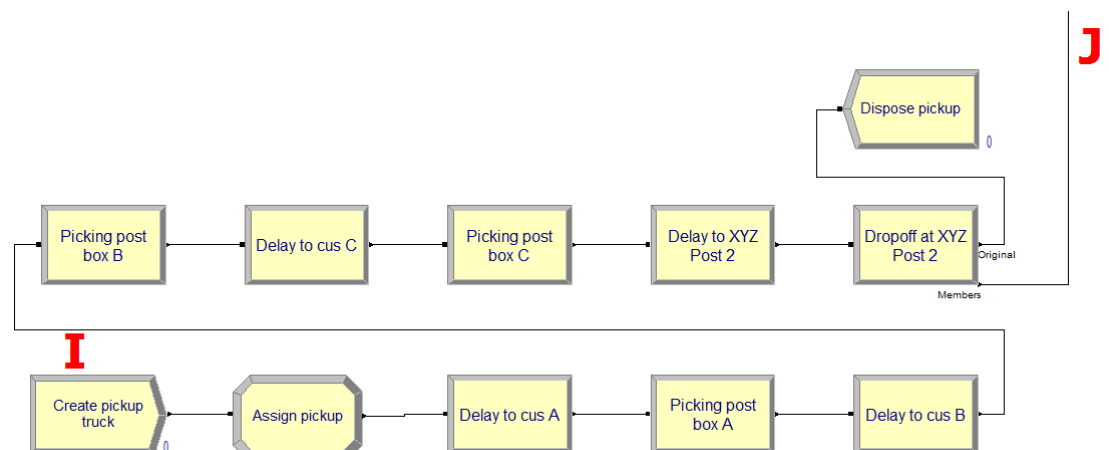
ภาพที่ 4 แบบจำลองสถานการณ์ส่วนของการคัดแยกพัสดุก่อนนำจ่าย

นอกจากนี้ยังมีการเข้ามาของพัสดุน้ำเคาน์เตอร์ของแต่ละวันของบริษัทด้วย โดยเฉลี่ยแล้วจะมีพัสดุประมาณ 500-600 ชิ้น เริ่มตั้งแต่เวลา 08.00 น. จนถึงเวลา 17.00 น. และจัดเตรียมพัสดุไว้เพื่อรอจ่ายวันถัดไปหรือนำจ่ายต่างจังหวัด (จุด E ไปยังจุด F) แสดงดังภาพที่ 5

ยิ่งไปกว่านั้นพัสดุนำเข้าส่วนสุดท้ายที่บริษัท XYZ ออกไปรับพัสดุจากภายนอกบริษัทจำนวน 3 แห่งก็จะถูกสร้างแบบจำลองขึ้นมาตามกระบวนการก่อนเข้าสู่กระบวนการคัดแยกของชั้น 1 ต่อไป (จุด I ไปยังจุด J) แสดงดังภาพที่ 6



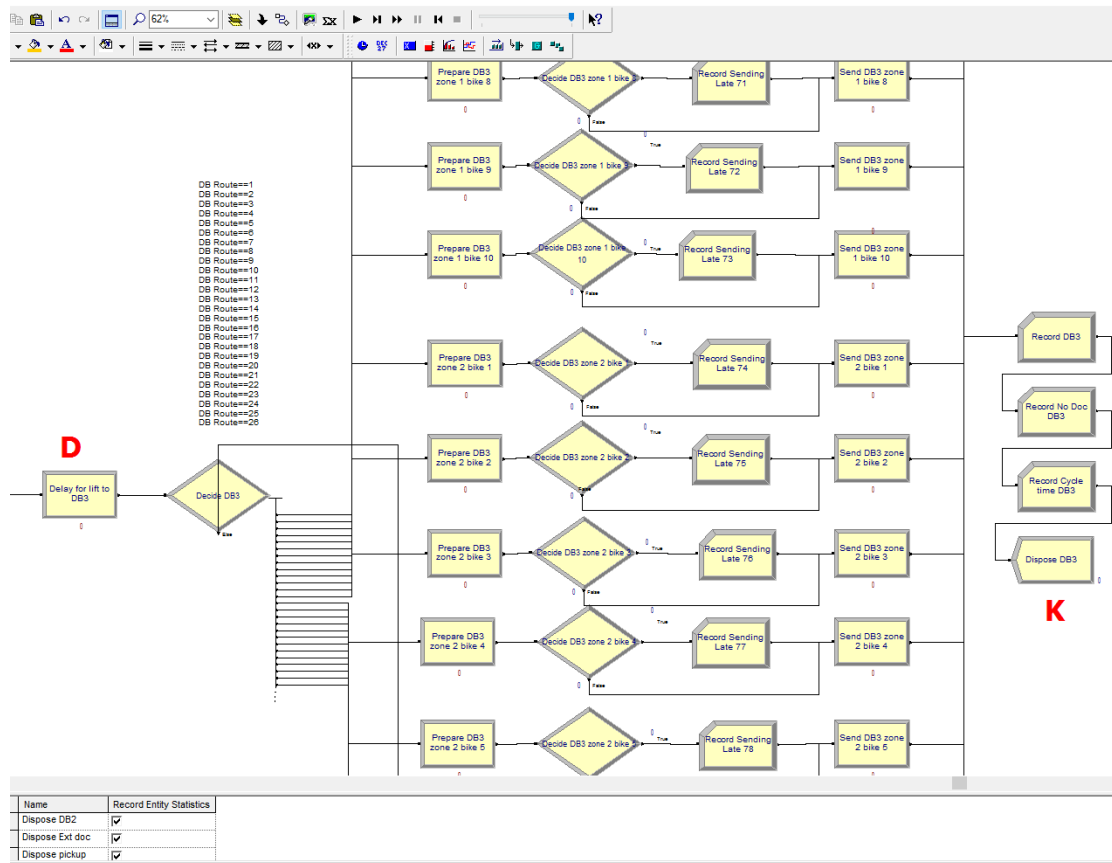
ภาพที่ 5 การจำลองพัสดุเริ่มต้นจากหน้าเคาน์เตอร์ของบริษัท XYZ



ภาพที่ 6 การจำลองพัสดุเริ่มต้นจากพัสดุจากสถานประกอบการภายนอกบริษัทจำนวน 3 แห่ง

หลังจากทำการคัดแยกเสร็จสิ้นแล้วจะทำการไปขนพัสดุจากชั้น 2 ลงมายังชั้นล่าง เพื่อทำการจัดเรียงของชั้นรถตามด้านจ่ายที่รับผิดชอบโดยพนักงานแต่ละคนก่อนออกนำจ่าย ในงานวิจัยนี้จะพิจารณาการจัดส่งพัสดุในโซน DB1 DB2 และ DB3 ซึ่งแต่ละด้านจ่ายของแต่ละโซนจะมีจำนวน

จำนวนพนักงานและพาหนะสำหรับนำจ่ายไม่เท่ากันในแต่ละเส้นทางขึ้นอยู่กับปริมาณพัสดุนำจ่าย การกำหนดจำนวนพนักงานนำจ่ายในแต่ละโซนจะพิจารณาจากปริมาณพัสดุ เส้นทาง และเวลาโดยเฉลี่ยที่ใช้ในการนำจ่ายของพนักงานในการกำหนดจำนวนดังกล่าว ยกตัวอย่างกระบวนการออกนำจ่ายพัสดุในโซน DB3 (จากจุด D ไปยังลูกค้าจุด K) แสดงดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 ตัวอย่างแบบจำลองสถานการณ์ส่วนของการนำจ่ายพัสดุให้กับลูกค้าโซน DB3

เมื่อพนักงานนำจ่ายทุกคนส่งพัสดุลบหมดแล้วจะทำการจบการทำงานของแบบจำลอง และ จะทำการเก็บเวลาเฉลี่ยของพัสดุทั้งหมด (Cycle time) ที่ใช้ในระบบตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงสิ้นสุดการรัน รวมถึงทำการนับจำนวนครั้งที่พนักงานนำจ่ายออกนำจ่ายพัสดุลบซ้ำ ซึ่งงานวิจัยนี้หากพนักงานนำจ่าย คนใดออกนำจ่ายช้ากว่า 11.00 น. จะนับเป็น 1 ครั้งที่ออกนำจ่ายล่าช้าของวันนั้นๆ

5. ผลการวิจัย

การทดลองสำหรับงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วย 2 ขั้นตอนคือ กระบวนการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองในส่วนข้อมูลนำเข้าและกระบวนการปรับปรุงการให้บริการทั้งในส่วนของการ

ลดเวลาของพัสดุที่อยู่ในระบบและการลดจำนวนครั้งในการออกนำจ่ายพัสดุให้กับลูกค้าล่าช้า โดยในแต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.1 การตรวจสอบข้อมูลนำเข้า (Input data)

เพื่อให้แบบจำลองที่ได้พัฒนาขึ้นมีความถูกต้องและเหมือนกับระบบจริงทุกประการ การตรวจสอบข้อมูลนำเข้าของแบบจำลองให้เหมือนกับข้อมูลนำเข้าระบบจริงจึงเป็นอีกแนวทางที่สามารถทำได้ก่อนจะนำแบบจำลองไปทำการทดลองต่อไป ผลจากการทำการวิเคราะห์แจกแจงข้อมูลนำเข้า (Input analyzer) แผนก DB1 แผนก DB2 และแผนก DB3 ปรากฏว่าเมื่อมีการแจกแจง DB1 เป็นแบบ $21.5+28*BETA(0.879,0.988)$ ส่วนแผนก DB2 เป็นแบบ $238+255*BETA(0.598,0.467)$ และแผนก DB3 เป็นแบบ NORM (511,141) จากนั้นนำการแจกแจงที่ได้มากำหนดในโปรแกรมและจะทำการรันการทดลองจำนวน 30 ครั้ง (Replication) เพื่อหาค่าเฉลี่ยที่สามารถใช้เป็นตัวแทนของประชากรได้ในทางสถิติ เนื่องจากวิธีการจำลองสถานการณ์จัดอยู่ในกลุ่มของวิธีการค้นหาค่าตอบแบบประมาณค่า โดยผลลัพธ์จากการรัน 30 ครั้งปรากฏว่าได้ให้ค่าเฉลี่ยจำนวนขึ้นงานกับพัสดุของแผนก DB1 เป็น 941.33 ขึ้น แผนก DB2 เป็น 13,322.33 ขึ้น แผนก DB3 เป็น 12,409.03 ขึ้น แสดงดังภาพที่ 8 ซึ่งเมื่อเทียบกับข้อมูลจริงแล้วนั้นยังได้ค่าไม่สมจริง ดังนั้นเราได้ทำการปรับค่าโมเดลใหม่

Unnamed Project

Replications: 30 Time Units: Minutes

User Specified

Tally

Interval	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
Record Cycle time DB1	426.39	5.81	386.36	451.44	259.77	617
Record Cycle time DB2	786.93	9.86	713.63	840.60	484.19	1044
Record Cycle time DB3	1008.92	15.48	936.16	1085.34	196.18	1437

Counter

Count	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average
Record DB1	28.0000	.00	28.0000	28.0000
Record DB2	35.0000	.00	35.0000	35.0000
Record DB3	25.1000	.47	23.0000	27.0000
Record No Doc DB1	941.33	16.09	821.00	1015.00
Record No Doc DB2	13322.33	190.33	11889.00	14410.00
Record No Doc DB3	12409.03	337.12	10912.00	14352.00
Record Sending Late	0.00	.00	0.00	0.00

ภาพที่ 8 แสดงรายงานค่าทางสถิติที่เกี่ยวข้องกับข้อมูลนำเข้าก่อนการตรวจสอบแบบจำลอง



ในการปรับเปลี่ยนค่าของโซน DB1 DB2 และ DB3 จากการแจกแจงทำการวิเคราะห์ข้อมูลนำเข้าระบบ (Input data) ปรากฏว่า DB1 มีการแจกแจงเป็น $21.5+29.94*BETA(0.879,0.988)$ DB2 เป็น $238+255.95*BETA(0.598,0.467)$ และ DB3 เป็น $NORM(510.55, 65)$ พบว่าผลลัพธ์จากการรัน 30 ครั้งแล้ว ปรากฏว่าได้ให้ค่าเฉลี่ยจำนวนชิ้นงานกับพัสดุของ DB1 เป็น 966.13 ชิ้น DB2 เป็น 13,340.10 ชิ้น และ DB3 เป็น 13,808.17 ชิ้น ซึ่งเมื่อเทียบกับข้อมูลจริงแล้วนั้นค่าสมจริงแล้วดังภาพที่ 9

Unnamed Project

Replications: 30Time Units: Minutes

User Specified

Tally

Interval	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
Record Cycle time DB1	434.44	6.16	392.20	460.76	259.84	635
Record Cycle time DB2	787.87	9.90	714.30	841.74	484.20	1046
Record Cycle time DB3	1042.00	7.91	1000.25	1080.79	656.51	1398

Counter

Count	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average
Record DB1	28.0000	.00	28.0000	28.0000
Record DB2	35.0000	.00	35.0000	35.0000
Record DB3	26.9667	.07	26.0000	27.0000
Record No Doc DB1	966.13	17.03	837.00	1046.00
Record No Doc DB2	13340.10	190.83	11904.00	14430.00
Record No Doc DB3	13808.17	114.70	13260.00	14403.00
Record Sending Late	0.00	.00	0.00	0.00

ภาพที่ 9 แสดงรายงานค่าทางสถิติที่เกี่ยวข้องกับข้อมูลนำเข้าหลังการตรวจสอบแบบจำลอง

5.2 การปรับปรุงระบบการให้บริการของบริษัท XYZ

เนื่องจากเวลาเฉลี่ยที่พัสดุอยู่ในระบบ (Cycle time) เดิมโซน DB1 DB2 และ DB3 นั้นมีค่าเท่ากับ 765 นาที 842.45 นาที และ 826.83 นาที ซึ่งเป็นเวลาที่ลูกค้าได้รับพัสดุยังล่าช้าในปัจจุบัน เมื่อทำการวิเคราะห์คอขวดของระบบนี้แล้วจะพบว่ากระบวนการคัดแยกเป็นสาเหตุสำคัญที่ส่งผลให้ Cycle time มีความล่าช้าอันเนื่องมาจากระบบเดิมมีจำนวนอัตรากำลังคน 15 คนเท่านั้นในการคัดแยก ดังนั้นในการทดลองนี้จึงได้นำแบบจำลองสถานการณ์ที่ได้ผ่านการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองจากการทดลองก่อนหน้านี้ มาทำการเพิ่มจำนวนอัตรากำลังคนเข้าไปในส่วนของการกระบวนการคัดแยกพัสดุในระบบ ผลการทดลองหลังจากเพิ่มพนักงานในกระบวนการคัดแยกระหว่าง

15-20 คน และในแต่ละกรณีจะทำการรันซ้ำ 30 ครั้ง ปรากฏว่าเวลาที่ใช้ในระบบลดลงไปจากเดิม แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การปรับปรุงระบบจำนวนคนคัดแยกการให้บริการของบริษัท XYZ

ระบบ	จำนวนพนักงาน คัดแยก	Cycle Time (นาทื)			ร้อยละการปรับปรุง		
		DB1	DB2	DB3	DB1	DB2	DB3
เดิม	15	765.00	842.45	826.83	0%	0%	0%
กรณี 1	16	761.17	838.76	823.31	0.50%	0.44%	0.43%
กรณี 2	17	757.83	835.54	820.06	0.94%	0.82%	0.82%
กรณี 3	18	754.75	832.34	817.05	1.34%	1.20%	1.18%
กรณี 4	20	746.61	827.71	812.42	2.40%	1.75%	1.74%

จากตารางที่ 1 สามารถอธิบายผลการทดลองได้ดังต่อไปนี้ ระบบเดิม มีจำนวนคนในคัดแยก 15 คน เวลาที่ใช้ในระบบ Cycle time อยู่ที่ DB1 765.00 นาที่ DB2 842.45 นาที่ และ DB3 826.83 นาที่ สำหรับกรณีที่ 1 เพิ่มจำนวนคนที่คัดแยก 16 คน เวลาที่ใช้ในระบบ Cycle Time อยู่ที่ DB1 761.17 นาที่ DB2 838.76 นาที่ DB3 823.31 นาที่ ทำให้เวลาที่ใช้ในระบบลดลงไปพอสมควรจากของเดิม กรณีที่ 2 เพิ่มจำนวนคนที่คัดแยก 17 คน เวลาที่ใช้ในระบบ Cycle time อยู่ที่ DB1 757.83 นาที่ DB2 835.54 นาที่ DB3 820.06 นาที่ กรณีที่ 3 เพิ่มจำนวนคนที่คัดแยก 18 คน เวลาที่ใช้ในระบบ Cycle time อยู่ที่ DB1 754.75 นาที่ DB2 832.34 นาที่ DB3 817.05 นาที่ ทำให้เวลาที่ใช้ในระบบลดลงไปบางส่วน กรณีที่ 4 เพิ่มจำนวนคนที่คัดแยก 20 คน เวลาที่ใช้ในระบบ Cycle time อยู่ที่ DB1 746.61 นาที่ DB2 827.71 นาที่ DB3 812.42 นาที่ ทำให้เวลาที่ใช้ในระบบลดลงไปพอสมควร ซึ่งจะเห็นได้ว่า เมื่อเพิ่มจำนวนพนักงานคัดแยกในกระบวนการคัดแยกจะทำให้เวลา Cycle time หรือเวลาในการจัดส่งพัสดุให้กับลูกค้ามีความรวดเร็วมากขึ้น อย่างไรก็ตามการเพิ่มจำนวนพนักงานคัดแยกมากขึ้นย่อมส่งผลต่อค่าใช้จ่ายของสถานประกอบการตามไปด้วย

5.3 การลดจำนวนครั้งที่ล่าช้าของการออกนำจ่าย

การทดลองนี้มีเป้าหมายเพื่อลดจำนวนครั้งที่ล่าช้าของพนักงานออกนำจ่ายของบริษัทจัดส่งพัสดุ โดยกระบวนการออกนำจ่ายในแต่ละวันจะแบ่งออกเป็นโซน DB1 DB2 และ DB3 โดยโซน DB1 มีรถออกนำจ่าย 28 คัน/วัน โซน DB2 มีรถออกนำจ่าย 35 คัน/วัน และ DB3 มีรถออกนำจ่าย 27 คัน/วัน โดยบริษัทมีนโยบายว่าถ้าพนักงานนำจ่ายหรือรถนำจ่ายคันใดออกนำจ่ายจากบริษัทช้ากว่า

11.00 น. ให้ถือว่านับเป็น 1 ครั้งของการออกนํ้าจ่ายล่าช้า ซึ่งจะเห็นได้ว่าระบบเดิมนั้นจะมีจำนวนความล่าช้าทั้งหมดโดยเฉลี่ย 5.18 ครั้ง/วัน ซึ่งมีความล่าช้าในการออกนํ้าจ่ายอยู่มาก

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้พิจารณาการเพิ่มจำนวนคนที่คัดแยกจากเดิม 15 คนเป็น 17 คน แล้วทำการรันระบบใหม่ 30 ครั้ง และวิเคราะห์ผลข้อมูลปรากฏว่า จำนวนครั้งที่พนักงานออกนํ้าจ่ายล่าช้าเหลือเพียง 1.16 ครั้ง/วันโดยเฉลี่ย ซึ่งทำให้เห็นว่าสามารถลดจำนวนครั้งการนํ้าจ่ายที่ล่าช้าซึ่งคิดเป็นร้อยละ 77.6 ทำให้พนักงานสามารถออกนํ้าจ่ายพัสดุให้กับลูกค้าได้เร็วขึ้น

อย่างไรก็ตามในส่วนของการกำหนดการเพิ่มพนักงานในกระบวนการคัดแยกจำนวน 2 คนนั้น บริษัทกรณีศึกษาอาจทำได้โดย เช่น ปรับเปลี่ยนโยกย้ายพนักงานที่มีภาระงานน้อยมายังแผนกคัดแยกเพิ่มเติม เป็นต้น ซึ่งจะเห็นได้ว่าเป็นอีกแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพในการนํ้าจ่ายพัสดุให้กับลูกค้าโดยไม่กระทบต่อค่าใช้จ่ายที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มบุคลากร สำหรับการจ้างพนักงานคัดแยกเพิ่มเติมอาจเป็นวิธีที่เหมาะสมในกรณีที่บริษัทมีงบประมาณที่เพียงพอและพนักงานที่มีอยู่นั้นมีภาระงานที่เหมาะสมอยู่แล้ว ในขณะที่แนวทางการคงจำนวนพนักงานเดิมไว้แต่ปรับปรุงกระบวนการคัดแยกให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น จัดเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่น่าสนใจและสามารถศึกษาต่อยอดเพิ่มเติมในงานวิจัยต่อไปได้

6. สรุปผลและการอภิปรายผล

บริษัทจัดส่งพัสดุ XYZ ในแต่ละวันประสบปัญหาความล่าช้าในกระบวนการนํ้าจ่ายพัสดุไปยังลูกค้าประกอบกับธุรกิจการให้บริการจัดส่งพัสดุมิแนวโน้มการแข่งขันที่สูงมากขึ้นในปัจจุบัน การศึกษาวิจัยครั้งนี้จึงมีเป้าหมายเพื่อปรับปรุงกระบวนการให้บริการของบริษัทจัดส่งพัสดุ XYZ ด้วยวิธีการจำลองสถานการณ์ ผู้วิจัยได้รวบรวมข้อมูลปัญหาทั้งหมดของบริษัทจัดส่งพัสดุ XYZ มาทำการสร้างแบบจำลองสถานการณ์โดยใช้โปรแกรม ARENA โดยทำการจำลองระบบตั้งแต่กระบวนการขนส่งพัสดุจากศูนย์กระจายพัสดุและจุดรับพัสดุภายนอกบริษัท มายังบริษัทจัดส่งพัสดุ XYZ รวมถึงยังมีจุดรับพัสดุที่หน้าเคาน์เตอร์ของบริษัท จากนั้นพัสดุทั้งหมดจะเข้าสู่กระบวนการคัดแยกพัสดุก่อนขนส่งพัสดุนํ้าจ่ายไปยังด้านจ่ายของโซน DB1 โซน DB2 และโซน DB3 เพื่อทำการออกนํ้าจ่ายพัสดุไปยังลูกค้า จากนั้นได้ทำการตรวจสอบความถูกต้องแบบจำลองทั้งในส่วนข้อมูลนำเข้า (Input data) และเวลาเฉลี่ยที่พัสดุอยู่ในระบบ (Cycle time) ผลการทดลองในแต่ละการทดลองถูกกำหนดให้มีการรันซ้ำ (Replication) ทั้งหมด 30 ครั้ง พบว่าการเพิ่มพนักงานในแผนกคัดแยกพัสดุจาก 15 คนเป็น 17 คน สามารถลดเวลา Cycle time คิดเป็นการปรับปรุงสูงสุดอยู่ที่ร้อยละ 2.4 ในบางโซนนํ้าจ่าย นอกจากนี้จำนวนครั้งในการนํ้าจ่ายที่ล่าช้าโดยเฉลี่ย ลดลงเหลือเพียง 1.16 ครั้ง/วัน จากเดิม 5.18 ครั้ง/วัน หรือคิดเป็นการปรับปรุงเท่ากับร้อยละ 77.6 ซึ่งทำให้การนํ้าจ่ายพัสดุลูกค้าได้เร็วขึ้น

7. เอกสารอ้างอิง

- รุ่งรัตน์ ภิษฐ์เพ็ญ. (2553). **คู่มือสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม ARENA**. บ.ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด.
- ณัฐรดี สิทธิเขตการ, สัตติยา แก้วเกิด, จีระพงศ์ จันทาหอม, ณัฐพร ตั้งเจริญชัย, สุกฤษฎ์ เพชรสวัสดิ์, และธัชชัย เทพกรณ์. (2562). **การปรับปรุงกระบวนการให้บริการของบริษัทจัดส่งพัสดุด้วยวิธีการจำลองสถานการณ์กรณีศึกษา บริษัทจัดส่งพัสดุ ABC จังหวัดพิษณุโลก**. การประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยราชภัฏภูเก็ต ครั้งที่ 12, ภูเก็ต.
- วิมลวรรณ ปัทมรัตน์. (2545). **การวิเคราะห์ระบบแถวคอยในการให้บริการลูกค้าของที่ทำกาการไปรษณีย์โทรเลข**. (วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต). มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- สรวิศ รัตนพิไชย. (2550). **การปรับปรุงกระบวนการจัดซื้อจัดหาพัสดุโดยใช้แบบจำลองสถานการณ์กรณีศึกษาการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคไฟฟ้า**. (วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต). มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ.
- ณัฐชยา คงอุดมเกียรติ, เจริญชัย โขมพัตรกรณ์, ช่อแก้ว จตุรานนท์ และธีรเดช วุฒิพรพันธ์. (2555). **การลดปริมาณวัตถุดิบคงคลังโดยระบบการผลิตแบบดึงและการจำลองสถานการณ์**. **วารสารบริหารธุรกิจเทคโนโลยีมหานคร**, 9(2), 95-116.
- วลัยลักษณ์ อัครีรวงศ์. (2556). **การปรับปรุงกระบวนการทางธุรกิจด้วยการจำลองสถานการณ์**. **วารสารธุรกิจปริทัศน์**, 5(1), 7-24.
- ณัฐริกา เสวกะ. (2557). **การปรับปรุงประสิทธิภาพการให้บริการผู้ป่วยด้วยการจำลองสถานการณ์กรณีศึกษาแผนกอายุรกรรมโรงพยาบาลรัฐบาลปัจจุบันโรงพยาบาลรัฐบาลสาขาวิชาการจัดการอุตสาหกรรม**. (วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต). มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, กรุงเทพฯ.

การศึกษาการพัฒนา กำลังอัดประลัยของมอร์ตาร์ด้วยเถ้าแกลบสด A STUDY OF COMPRESSIVE STRENGTH OF MOTAR MIXED WITH GROUND RICE HUK ASH

สุรเชษฐ์ วรรณนา^{1*}

Surachet Wanna^{1*}

¹คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม อ.เมือง จ.พิษณุโลก ประเทศไทย 65000

¹Faculty of Industrial Technology, Pibulsongkram Rajabhat University,

Mueang Phitsanulok, Phitsanulok, Thailand, 65000

*Corresponding author E-mail: w.surachet24@psru.ac.th

วันที่เข้ารับ 19 สิงหาคม 2563

วันที่แก้ไขบทความ 20 ตุลาคม 2563

วันที่ตอบรับบทความ 20 ตุลาคม 2563

บทคัดย่อ

งานวิจัยครั้งนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาการพัฒนา กำลังอัดประลัยของก้อนตัวอย่างมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของเถ้าแกลบ โดยนำมาบด 2 ขนาดคือ บด 2 ชั่วโมงและ 4 ชั่วโมงตามลำดับ โดยมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 25 และ 50 ก้อนตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ใช้ในการทดลองใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65 จากผลการวิจัยพบว่าที่ก้อนตัวอย่างมอร์ตาร์ที่อายุ 90 วัน การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบบด 4 ชั่วโมงร้อยละ 25 (M70RHA-4-25) ให้ค่ากำลังอัดประลัยสูงสุดเท่ากับ 298.88 กก.ต่อตร.ซม. และก้อนตัวอย่างมอร์ตาร์ (M50RHA-4-50) ค่ากำลังอัดประลัยน้อยที่สุดเท่ากับ 257.06 กก.ต่อตร.ซม. นอกจากนี้พบว่าการแทนที่ร้อยละ 25 ของเถ้าแกลบบดที่ 2 ชั่วโมงและ 4 ชั่วโมงสามารถผ่านข้อกำหนดการใช้วัสดุปอซโซลานตามมาตรฐาน ASTM C 618 แต่การแทนที่ร้อยละ 50 ของเถ้าแกลบบดที่ 2 ชั่วโมงและ 4 ชั่วโมงไม่สามารถผ่านข้อกำหนดการใช้วัสดุปอซโซลานตามมาตรฐาน ASTM C 618

คำสำคัญ: ก้อนตัวอย่างมอร์ตาร์, การพัฒนา กำลังอัดประลัย, เถ้าแกลบสด, วัสดุปอซโซลาน

Abstract

This research aims to study the compressive strength development of motor mixed with ground rice husk ash. There are two grindings: 2-hour grinding and 4-hour grinding. Cement was replaced by 25% and 50%. Mortars were cast by using w/b 0.65. The results showed that the 90-day mortar with 25% cement replacement with ground rice husk ash for 4 hours (M70RHA-4-25) showed the highest compressive strength, 298.88 ksc. On the other hand, the mortar, M50RHA-4-50, showed the lowest compressive strength, 257.06 ksc. In this study, it was also found that the replacement by 25% with 2-hour and 4-hour ground rice husk ash could be under the regulations of Pozzolana materials according to ASTM C 618 standard. However, the replacement by 50% with 2-hour and 4-hour ground rice husk ash could not be under the regulations of Pozzolana materials according to ASTM C 618 standard.

Keywords: Mortars, Compressive strength, Rice husk ash, Pozzolana

1. บทนำ

ปัจจุบันวงการอุตสาหกรรมคอนกรีตได้ตื่นตัวในเรื่องการนำวัสดุปอซโซลานมาใช้ประโยชน์ในงานคอนกรีตโดยเฉพาะอย่างการนำเถ้าลอย (Pulverized Fuel Ash ; PFA) ตะกรันเหล็ก (Ground Granular Blast Furnace Slag ; GGBS) ผงฝุ่นซิลิกา (Microsilica ; MS หรือ Silica Fume ; SF) การใช้วัสดุปอซโซลานนี้สามารถทำให้คอนกรีตมีคุณภาพที่ดีขึ้นหลายด้าน ได้แก่ การทนทานต่อสภาวะแวดล้อมที่เป็นกรด (Aydin *et al.*, 2007) สภาวะแวดล้อมที่เป็นซัลเฟต (Sirisawat, 2014) การลดการหดตัว (บวร มณีรัตน์, 2559) และการพัฒนากำลังอัดในระยะยาว เป็นต้น (ปีติสานต์ กร้ามาตร, 2553) ด้วยเหตุนี้เองทำให้วัสดุปอซโซลานแต่ละประเภทมีราคาสูงขึ้นมาก ทั้ง ๆ ที่เมื่อก่อนเป็นวัสดุเหลือใช้ที่ไม่มีความต้องการ แต่อย่างไรก็ดีวัสดุปอซโซลานอีกชนิดหนึ่ง ได้แก่ เถ้าแกลบ (Rice Husk Ash ; RHA) ยังคงเป็นวัสดุปอซโซลานที่ยังไม่มีราคาและยังเป็นวัสดุเหลือใช้ที่ไม่ต้องการของวงการผลิตอิฐมอญเถ้าแกลบมี 2 ชนิด ได้แก่เถ้าแกลบดำและเถ้าแกลบขาว ซึ่งเถ้าแกลบทั้ง 2 ชนิดนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของแกลบที่นำมาเป็นเชื้อเพลิงในการเผา (ชีเถ้าแกลบ, 2014) ในงานวิจัยครั้งนี้จะทำการทดลองเกี่ยวกับประสิทธิภาพของการนำเถ้าแกลบขาวมาใช้ในงานคอนกรีต เพื่อจะเป็นใช้เป็นข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการพัฒนางานคอนกรีตต่อไปในอนาคต

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

ศึกษาการพัฒนากำลังอัดประลัยของมอร์ตาร์ด้วยเถ้าแกลบบดที่อายุ 7 28 และ 90 วัน

3. วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

3.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐานมาตรฐาน มอก. 15 หรือ ASTM C150

3.1.2 แก้วแลบ เป็นวัสดุที่เหลือใช้การเผาในอุตสาหกรรมอิฐมอญในจังหวัดพิจิตร ซึ่งในการทดลองได้ทำการบดให้มีขนาดเล็กลงโดยทำการบด 2 ขนาดคือบดเป็นเวลา 2 ชั่วโมง และ 4 ชั่วโมง โดยใช้เครื่องบดที่มีมอเตอร์ความเร็วรอบที่ 800 รอบ/นาที

3.1.3 ทรายเป็นทรายหยาบแม่น้ำที่มีอยู่ในจังหวัดพิษณุโลกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2-4 มิลลิเมตร โดยการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 30 มีค่าโมดูลัสความละเอียดของทราย 2.60

3.1.4 น้ำที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำประปาที่มีความสะอาด

3.2 วิธีการทดลอง

ทำการหล่อก้อนตัวอย่างมอร์ตาร์ขนาด 50x50x50 มิลลิเมตร โดยใช้แก้วแลบบด 2 ชั่วโมง และ 4 ชั่วโมง แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 25 และร้อยละ 50 ตามลำดับ อัตราส่วนในต่อวัสดุประสาน (w/b) ที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้เท่ากับ 0.65 และอัตราส่วนวัสดุประสานต่อ มวลรวมละเอียด(ทราย) เท่ากับ 1:1.75 เพื่อทำการทดสอบกำลังอัดตามมาตรฐาน ASTM C 109 (American Society for Testing and Materials, 2008) ที่อายุ 7 28 และ 90 วัน ตามลำดับ

3.3 ส่วนผสมที่ใช้ในการทดลอง

การทดลองครั้งนี้จะใช้ส่วนผสมทั้งหมด 5 ส่วนผสม ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงส่วนผสมของก้อนตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง

ลำดับ	ส่วนผสม	อัตราส่วน ส่วนผสมน้ำต่อ วัสดุ	อัตราส่วนผสมโดยปริมาตร			
			ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1	แก้วแลบบด 2 ชั่วโมง	แก้วแลบบด 4 ชั่วโมง	ทราย
1	M100	0.65	1.00	0.00	0.00	1.75
2	M70RHA-2-25	0.65	0.75	0.25	-	1.75
3	M70RHA-4-25	0.65	0.75	0.25	-	1.75
4	M50RHA-2-50	0.65	0.50	-	0.50	1.75
5	M50RHA-4-50	0.65	0.50	-	0.50	1.75

หมายเหตุ: RHA-2-25 หมายถึง ก้อนตัวอย่างมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยซีเมนต์
แก้วแลบบด 2 ชั่วโมงในอัตราส่วนร้อยละ 25



RHA-2-50 หมายถึง ก้อนตัวอย่างมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยซีเมนต์
แกลบบด 2 ชั่วโมงในอัตราส่วนร้อยละ 50

RHA-4-25 หมายถึง ก้อนตัวอย่างมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยซีเมนต์
แกลบบด 4 ชั่วโมงในอัตราส่วนร้อยละ 25

RHA-4-50 หมายถึง ก้อนตัวอย่างมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยซีเมนต์
แกลบบด 4 ชั่วโมงในอัตราส่วนร้อยละ 50

4. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

4.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบของก้อนตัวอย่างมอร์ตาร์

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และแกลบ
แกลบบดแสดงในตารางที่ 2 โดยวิธี X-ray Fluorescence (XRF) พบว่าแกลบบดมีองค์ประกอบ
หลักคือ SiO_2 ปริมาณร้อยละ 91.6 ส่วนองค์ประกอบรองคือ Al_2O_3 Fe_2O_3 และ CaO ปริมาณร้อยละ
0.4 0.6 และ 0.8 ตามลำดับ ซึ่งจากปริมาณของ SiO_2 Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ของแกลบบดถูก
จัดเป็น วัสดุปอซโซลานคลาส N เนื่องจากมีองค์ประกอบหลักทางเคมีเข้าเกณฑ์ตามมาตรฐาน ASTM
C618 กล่าวคือ สารประกอบ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ รวมกันแล้วมีค่าร้อยละ 93.4 มากกว่าร้อยละ
70 และมีค่า SO_3 เท่ากับ 2.2 ซึ่งไม่เกินร้อยละ 4 LOI มีค่าร้อยละ 3.4 ซึ่งไม่เกินร้อยละ 10 ซึ่งไม่เกิน
ตาม ค่าที่มาตรฐานกำหนดไว้

ตารางที่ 2 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน

องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ ประสาน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1	แกลบบด
SiO_2	19.7	91.6
Al_2O_3	5.19	0.4
Fe_2O_3	3.34	0.6
CaO	64.8	0.8
MgO	1.2	0.2
Na_2O	0.16	-
K_2O	0.44	3.0
SO_3	2.54	2.2
Free lime	0.87	-
LOI	2.1	2.2
Specific gravity	3.15	-



4.2 การรับกำลังอัดประลัยของก้อนตัวอย่างมอร์ตาร์

หลังจากการบ่มก้อนตัวอย่างมอร์ตาร์เป็นระยะเวลา 7 28 และ 90 วัน ก้อนตัวอย่างมอร์ตาร์ถูกนำไปทดสอบการรับกำลังอัดประลัยตามมาตรฐาน ASTM C109 ซึ่งมีค่าดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน

ส่วนผสม Mix proportion	ร้อยละการแทนที่ ในปูนซีเมนต์ปอร์ต แลนด์ประเภทที่ 1 (RH/C ratio)	กำลังอัดประลัย (กก./ตร.ม.) (ksc)		
		7 วัน	28 วัน	90 วัน
M100	0	214.40	248.21	262.05
M70RHA-2-25	50	176.00	213.47	267.42
M70RHA-4-25	25	197.53	223.66	298.88
M50RHA-2-50	25	107.13	178.25	248.18
M50RHA-4-50	50	145.80	195.58	257.06

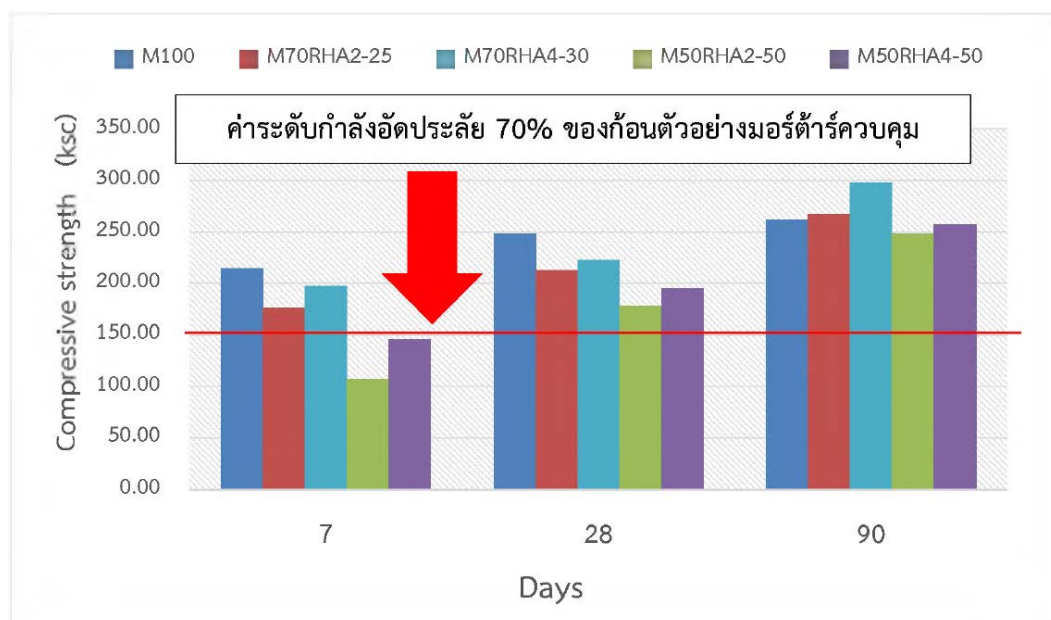
จากตารางที่ 3 พบว่าค่ากำลังอัดประลัยที่อายุ 7 วัน ก้อนตัวอย่างมอร์ตาร์ควบคุมมีค่ากำลังอัดประลัยสูงที่สุดคือ มีค่าเท่ากับ 214.40 กก.ต่อตร.ซม. ตามด้วยก้อนตัวอย่างมอร์ตาร์ M70RHA-4-25 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 197.53 กก.ต่อตร.ซม. ต่อด้วยก้อนตัวอย่างมอร์ตาร์ M70RHA-2-25 มีค่ากำลังอัดประลัยเท่ากับ 176.00 กก.ต่อตร.ซม. และก้อนตัวอย่างมอร์ตาร์ M50RHA-4-50 เท่ากับ 145.80 ส่วนก้อนตัวอย่างมอร์ตาร์ M50RHA-2-50 มีค่ากำลังอัดประลัยต่ำที่สุดมีค่าเท่ากับ 107.13 กก.ต่อตร.ซม. ที่อายุ 28 วัน ก้อนตัวอย่างมอร์ตาร์ควบคุม (M100) ยังคงมีค่ากำลังอัดประลัยสูงที่สุดคือมีค่าเท่ากับ 248.2 กก.ต่อตร.ซม.และติดตามด้วยก้อนตัวอย่างมอร์ตาร์ M70RHA-4-25 M70RHA-2-25 และ M50RHA-4-50 ที่มีค่ากำลังอัดประลัย เท่ากับ 223.66 กก.ต่อตร.ซม. 213.47 กก.ต่อตร.ซม. และ 195.58 กก.ต่อตร.ซม. ตามลำดับ ส่วนก้อนตัวอย่างมอร์ตาร์ M50RHA-2-50 ยังคงมีค่ากำลังอัดประลัยต่ำสุด คือ มีค่าเท่ากับ 178.25 กก.ต่อตร.ซม. อย่างไรก็ตามการบ่ม 90 วัน ก้อนตัวอย่างมอร์ตาร์ M70RHA-4-25 มีค่ากำลังอัดประลัยสูงที่สุด คือ เท่ากับ 298.88 กก.ต่อตร.ซม. ตามด้วยก้อนตัวอย่าง M70RHA-2-25 ซึ่งมีค่ากำลังอัดประลัยเท่ากับ 267.42 กก.ต่อตร.ซม. ค่ากำลังอัดประลัยของก้อนตัวอย่างมอร์ตาร์ควบคุม (M100) มีค่าเท่ากับ 262.05 กก.ต่อตร.ซม. ซึ่งมีค่ามากกว่ากำลังอัดประลัยของก้อนตัวอย่างมอร์ตาร์ M50RHA-4-50 และ M50RHA-2-50 ที่มีค่ากำลังอัดประลัยเท่ากับ 257.06 กก.ต่อตร.ซม.และ 248.18 กก.ต่อตร.ซม. ตามลำดับ

จากผลทดสอบจะเห็นได้ว่าผลจากการบดซีเมนต์แล้วกลบมีผลต่อค่ากำลังอัดประลัย ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคของซีเมนต์กลบที่มีขนาดเล็กมากสามารถแทรกเข้าไปในช่องว่างของก้อนตัวอย่าง

มอร์ตาร์ได้ดีทำให้เกิดการอัดแน่นของอนุภาคและลดช่องว่างในมอร์ตาร์ส่งผลให้ก้อนตัวอย่างที่แทนที่ด้วยซีเมนต์ที่บด 4 ชั่วโมงมีกำลังอัดประลัยที่สูงกว่าก้อนตัวอย่างมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยซีเมนต์ที่บด 2 ชั่วโมง ในขณะเดียวกันการเพิ่มปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซีเมนต์ที่บดในปริมาณที่เพิ่มขึ้นคือ อัตราส่วนร้อยละ 50 เป็นการแทนที่ส่วนผสมมากเกินไป ส่งผลให้กำลังอัดต่ำลงเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันขึ้นอยู่กับปูนซีเมนต์ ซึ่งการที่ซีเมนต์สามารถพัฒนาให้ก้อนตัวอย่างมอร์ตาร์นั้นมีค่ากำลังสูงขึ้นที่ระยะ 90 วัน นั้นเป็นเพราะปฏิกิริยาปอซโซลานิกของซีเมนต์ที่บดซึ่งสามารถได้ดังสมการที่ 1



อย่างไรก็ตามมาตรฐาน ASTM C618 ได้กำหนดไว้ว่าในการนำวัสดุปอซโซลานมาใช้นั้นค่ากำลังอัดประลัยของก้อนตัวอย่างที่มีการแทนที่ด้วยวัสดุปอซโซลานที่อายุ 7 วัน จะต้องมีความมากกว่าค่ากำลังอัดประลัย 70 เปอร์เซ็นต์ของก้อนตัวอย่างควบคุม จึงจะถือว่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานในการนำค่าแสดงกำลังอัดประลัยของก้อนตัวอย่างมอร์ตาร์ได้แสดงดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 แสดงค่ากำลังอัดประลัยของก้อนตัวอย่างแต่ละส่วนผสม

ภาพที่ 1 แสดงค่าการเปรียบเทียบกำลังอัดของก้อนตัวอย่างตามข้อกำหนดมาตรฐาน ASTM C618 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าก้อนตัวอย่างมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยซีเมนต์ที่บด 2 ชั่วโมงและ 4 ชั่วโมง



ในอัตราร้อยละ 25 สามารถผ่านข้อกำหนดตามมาตรฐาน ASTM C618 แต่ก้อนตัวอย่างมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยเถ้าแกลบ 2 ชั่วโมงและ 4 ชั่วโมง ในอัตราร้อยละ 50 ไม่ผ่านข้อกำหนดตามมาตรฐาน ASTM C 618

5. สรุปผลการทดลอง

5.1 เถ้าแกลบสามารถพัฒนากำลังอัดประลัยของก้อนตัวอย่างมอร์ตาร์ได้เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเถ้าแกลบ

5.2 การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบไม่ควรเกินร้อยละ 50 เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของก้อนตัวอย่างมอร์ตาร์ยังคงต้องการปริมาณ C_3S และ C_2S จากปูนซีเมนต์เพื่อใช้ในการผลิตแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($CaOH_2$) ในการพัฒนากำลังอัดประลัยในช่วงต้น

5.3 ค่าความละเอียดของเถ้าแกลบมีผลต่อกำลังอัดประลัยของก้อนตัวอย่างมอร์ตาร์อย่างมีนัยสำคัญ

6. เอกสารอ้างอิง

- ชีเถ้าแกลบ. (2014). แกลบ แกลบดำ ชีเถ้าแกลบ วิธีทำแกลบดำและประโยชน์แกลบดำ. ค้นจาก <http://www.puechkaset.com>
- บวร มณีรัตน์. (2559). ผลกระทบของชนิดเถ้าลอยต่อความคงทนของคอนกรีตผสมเถ้าลอย. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ). มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, ปทุมธานี.
- ปิติศานต์ กร้ามาตร (2553). คุณสมบัติเบื้องต้นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงฝุ่นหินปูน. โครงการเสริมสร้างความเข้มแข็งทางวิชาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, ปทุมธานี.
- Aydin, S., Yazıcı, H., Yiğiter, H., & Baradan, B. (2007). Sulfuric acid resistance of high-volume fly ash concrete. *Building and Environment*, 42(2), 717-721.
- Sirisawat, I. (2014). *Sulfate resisting concrete using various types of binder*. (Doctoral dissertation). Thammasat University, Bangkok.

การประเมินความปลอดภัยทางถนนบนเส้นทางท่องเที่ยว
กรณีศึกษา: ทางหลวงแผ่นดินหมายเลข 12
(จังหวัดพิษณุโลก - อำเภอหล่มสัก จังหวัดเพชรบูรณ์)
ROAD SAFETY ASSESSMENT ON TOURIST ROUTE: A CASE STUDY
OF NATIONAL HIGHWAY NO.12 (PHITSANULOK PROVINCE-
LOM SAK DISTRICT, PHETCHABUN PROVINCE)

บุญพล มีไชโย¹ และ ดอนยาริต์ เสถียรสุวจะ^{2*}

Boonphol Meechaiyo¹ and Donyarit Settasuwacha^{2*}

¹คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อ.เมือง จ.พิษณุโลก ประเทศไทย 65000

²คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม อ.เมือง จ.พิษณุโลก ประเทศไทย 65000

¹Faculty of Engineering, Naresuan University, Muang Phitsanulok, Phitsanulok, Thailand, 65000

²Faculty of Industrial Technology, Pibulsongkram Rajabhat University,

Muang Phitsanulok, Phitsanulok, Thailand, 65000

*Corresponding author E-mail: donyarit@psru.ac.th

วันที่เข้าระบบ 31 สิงหาคม 2563

วันที่แก้ไขบทความ 22 ตุลาคม 2563

วันที่ตอบรับบทความ 22 ตุลาคม 2563

บทคัดย่อ

การเกิดอุบัติเหตุทางถนนเป็นปัญหาสำคัญที่ส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อประเทศทั้งในด้านเศรษฐกิจ สังคม และคุณภาพชีวิตมาเป็นเวลาช้านาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งปัญหาปัญหาการเกิดอุบัติเหตุบนเส้นทางท่องเที่ยวที่เป็นภาพลักษณ์ด้านลบต่อธุรกิจในพื้นที่และชื่อเสียงของประเทศไทย งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสถิติการเกิดอุบัติเหตุบนเส้นทางท่องเที่ยว ทางหลวงแผ่นดินหมายเลข 12 ช่วง จังหวัดพิษณุโลก - อำเภอหล่มสัก จังหวัดเพชรบูรณ์ และระบุปัจจัยเสี่ยงที่อาจนำไปสู่การเกิดอุบัติเหตุทางถนนที่ได้จากกระบวนการตรวจสอบความปลอดภัยทางถนนในจุดที่เคยเกิดอุบัติเหตุและยังไม่เคยเกิดอุบัติเหตุมาก่อน จำนวน 8 จุด ผลการศึกษาพบว่าทั้ง 4 จุดที่เคยเกิดอุบัติเหตุ และอีก 4 จุดที่ไม่เคยเกิดอุบัติเหตุมาก่อนมีปัจจัยเสี่ยงและความบกพร่องที่คล้ายคลึงกัน เช่น ลักษณะทางกายภาพของถนน ป้ายจราจรถูกสิ่งบดบัง หมุดสะท้อนแสงบนถนนเสื่อมสภาพ ผิวทางชำรุดขรุขระ ไฟฟ้าแสงสว่างไม่เพียงพอ และอุปกรณ์อำนวยความสะดวกทางความปลอดภัยข้างทางมีความเสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุ ซึ่งเป็นความเสี่ยงในการท่องเที่ยวในประเทศไทยที่ต้องได้รับการแก้ไขอย่างเร่งด่วน

คำสำคัญ : การประเมินความปลอดภัยทางถนน, เส้นทางท่องเที่ยว, ความปลอดภัยทางถนน

Abstract

Road accidents have been a significant problem that has caused damage to the country in terms of economy, society and quality of life for a long time. Especially, the problem of accidents on tourist routes has been a negative image to businesses in the area and reputation of Thailand. The objectives of this research are to study the statistics of accidents on tourist routes, National Highway No. 12, Phitsanulok Province – Khao Kho District, Phetchabun Province and to identify the risk factors possibly leading to road accidents. The data were gained the road safety audit process on the road where the accident occurred and where no accidents occurred, and there were 8 points to be studied. The results showed that the four with previous accidents and the other four points without any accidental history had similar risk factors and defects such as the physical characteristics of the road, obstructed traffic sign, deteriorated reflective road studs, damaged road surface, poor electric lighting and risky roadside safety equipment. These are the risks of traveling in Thailand that need to be resolved urgently.

Keyword: Road safety assessment, Tourist route, Road safety

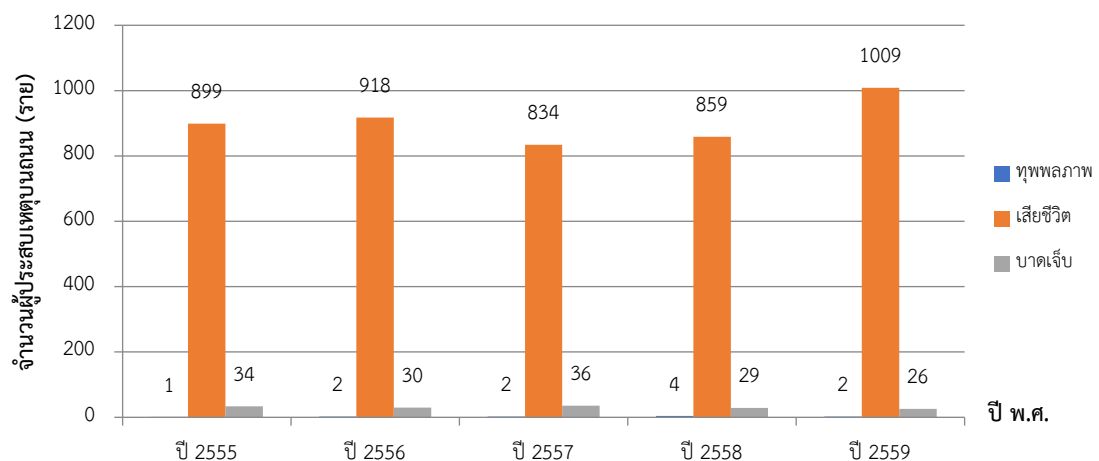
1. บทนำ

ในแต่ละปีหลายประเทศทั่วโลกต้องสูญเสียทรัพย์สินและทรัพยากรบุคคลที่มีคุณค่าจากสาเหตุการเกิดอุบัติเหตุทางถนน โดยยิ่งเมื่อเกิดขึ้นกับประเทศด้อยพัฒนาหรือกำลังพัฒนาปัญหาดังกล่าวย่อมส่งผลกระทบต่อสภาพเศรษฐกิจ สังคม คุณภาพชีวิตของประชาชนทั้งทางตรงและทางอ้อม (Alles & Stafford, 1997) ด้วยเหตุนี้องค์การสหประชาชาติจึงได้มอบให้สหพันธรัฐรัสเซียเป็นเจ้าภาพจัดการประชุมผู้บริหารระดับสูงเรื่อง “ความปลอดภัยทางถนน” (First Global Ministerial Conference on Road Safety :Time for action) ณ กรุงมอสโก ประเทศสหพันธรัฐรัสเซีย เมื่อวันที่ 19 – 20 พฤศจิกายน ปี พ.ศ. 2552 โดยเชิญผู้แทนระดับสูงของประเทศต่าง ๆ เข้าร่วมและรับรองเจตนารมณ์ปฏิญญามอสโก ซึ่งประกาศในปี พ.ศ. 2554 – 2563 เป็นทศวรรษแห่งความปลอดภัยทางถนน พร้อมทั้งให้กำหนดเป้าหมายลดการสูญเสียชีวิต ในระดับที่ทำนายให้เหมาะสมกับปัญหาอุบัติเหตุทางถนนของแต่ละประเทศเมื่อสิ้นสุดทศวรรษ เพื่อให้หน่วยงานที่มีหน้าที่รับผิดชอบมีความพร้อมในการปฏิบัติการกิจที่ได้รับมอบหมายให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น WHO, 2004)

การเกิดอุบัติเหตุจากการเดินทางท่องเที่ยวเป็นสาเหตุของการเกิดอุบัติเหตุที่ส่งผลกระทบต่อภาพลักษณ์ของประเทศและชื่อเสียงด้านการท่องเที่ยวในประเทศไทย โดยสถานที่ท่องเที่ยวที่ได้รับ

ความนิยมและมีความต้องการในการเดินทางท่องเที่ยวใกล้กับจังหวัดพิษณุโลก ได้แก่ อำเภอเขาค้อ จังหวัดเพชรบูรณ์ ซึ่งมีทางหลวงแผ่นดินหมายเลข 12 เป็นเส้นทางหลักที่นักท่องเที่ยวหรือผู้ที่ต้องการในการเดินทาง จากปัญหาที่เกิดขึ้นสอดคล้องกับข้อมูลการเกิดอุบัติเหตุทางถนนโดยบริษัทกลาง ผู้ประกันภัย ซึ่งจากข้อมูล พบว่า จังหวัดพิษณุโลกและจังหวัดเพชรบูรณ์ มีความสูญเสียต่อชีวิตและทรัพย์สินเป็นจำนวนมากในแต่ละปี ซึ่งสาเหตุการเสียชีวิตมาจากการเกิดอุบัติเหตุทางถนนจำนวนมาก จากข้อมูลสถิติอุบัติเหตุทางจราจร 5 ปีย้อนหลังปีที่ผ่านมา ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2555 ถึงปี พ.ศ. 2559 พบว่า มีจำนวนการเกิดอุบัติเหตุรวม 3,862 ครั้ง ดังแสดงในภาพที่ 1 โดยสามารถจำแนกตามจังหวัด ได้แก่ จังหวัดพิษณุโลกมีอุบัติเหตุทางถนน 1,980 ครั้ง และจังหวัดเพชรบูรณ์มีอุบัติเหตุทางถนน 1,882 ครั้ง (ThaiRSC, 2019)

จากปัญหาที่เกิดขึ้น ผู้วิจัยจึงเล็งเห็นถึงความสำคัญในการแก้ไขปัญหาอันเกิดขึ้นจากปัจจัยที่อาจส่งผลนำไปสู่การเกิดอุบัติเหตุ โดยการนำกระบวนการตรวจสอบความปลอดภัยทางถนน หรือ Road Safety Audit (RSA) มาประยุกต์ใช้ในการดำเนินการตรวจสอบความปลอดภัยทางถนนบนเส้นทางท่องเที่ยวทางหลวงแผ่นดินหลายเลข 12 ช่วง จังหวัดพิษณุโลก – อำเภอหล่มสัก จังหวัดเพชรบูรณ์ ซึ่งเป็นวิธีการแก้ปัญหาในเชิงรุก (Proactive approach) ที่ช่วยให้มองเห็น “อันตราย” และดำเนินการแก้ไข ก่อนที่สิ่งอันตรายดังกล่าวจะนำไปสู่การเกิดอุบัติเหตุ การเสียชีวิตหรือบาดเจ็บ ซึ่งเป็นการป้องกันปัญหามากกว่าการตามแก้ไขปัญหา (Department of Highways, 2006)



ภาพที่ 1 สถิติการเกิดอุบัติเหตุทางถนนจังหวัดพิษณุโลกและจังหวัดเพชรบูรณ์ ปี 2555 – 2559
(Thai RSC, 2019)

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

2.1 เพื่อศึกษาสถิติการเกิดอุบัติเหตุบนเส้นทางท่องเที่ยวทางหลวงแผ่นดินหมายเลข 12 ช่วง จ.พิษณุโลก - อ.หล่มสัก จ.เพชรบูรณ์

2.2 เพื่อค้นหาและระบุปัจจัยเสี่ยงทางถนนที่อาจนำไปสู่การเกิดอุบัติเหตุด้วยเทคนิคการตรวจสอบความปลอดภัยทางถนน

3. วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษาความปลอดภัยทางถนนโดยเฉพาะเส้นทางท่องเที่ยวที่ขึ้นชื่อตลอดทั้งปีกับแนวคิดการจัดการการขนส่งเพื่อให้เกิดระบบขนส่งที่ยั่งยืน (Qureshi & Lu, 2007; Richardson, 2005) โดยการกำหนดมาตรการเพื่อยกระดับความปลอดภัยทางถนนแก่ผู้ใช้รถใช้ถนนทุกประเภท ซึ่งจากการศึกษาปัจจัยของการเกิดอุบัติเหตุทางถนนในต่างประเทศ (Roads and Traffic Authority of New South Wales, 2011) พบว่ามีจำนวน 28% เกี่ยวข้องกับปัจจัยทางด้านถนนและสิ่งแวดล้อม การศึกษาวิจัยนี้ มุ่งเน้นศึกษาสถิติการเกิดอุบัติเหตุและค้นหาและระบุปัจจัยเสี่ยงทางถนนที่อาจนำไปสู่การเกิดอุบัติเหตุด้วยเทคนิคการตรวจสอบความปลอดภัยทางถนน บนเส้นทางท่องเที่ยวทางหลวงแผ่นดินหมายเลข 12 ช่วงจังหวัดพิษณุโลก – อำเภอหล่มสัก จังหวัดเพชรบูรณ์ โดยการนำกระบวนการด้านการตรวจสอบความปลอดภัยทางถนน สำหรับถนนที่เปิดให้บริการแล้ว ของกรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม (Department of Highways, 2005) มาประยุกต์ใช้ ซึ่งวิธีการดังกล่าวต้องอาศัยความเชี่ยวชาญจากผู้ตรวจสอบที่ผ่านการอบรมเฉพาะด้าน เนื่องจากต้องมีการวิเคราะห์ประเด็นด้านความปลอดภัยทั้งด้านวิศวกรรมการทาง วิศวกรรมจราจร และวิศวกรรมความปลอดภัยทางถนนมาวิเคราะห์และพิจารณาถึงปัจจัยที่อาจส่งผลทำให้เกิดอุบัติเหตุที่นำไปสู่การเกิดอุบัติเหตุและความรุนแรงแก่ทั้งคนและทรัพย์สินได้



ภาพที่ 2 กรอบการดำเนินงานวิจัย

การศึกษาลักษณะทางกายภาพของเส้นทางของพื้นที่ศึกษาเพื่อระบุตำแหน่งในการตรวจสอบความปลอดภัยทางถนน ขั้นตอนถนนที่เปิดให้บริการแล้ว ผู้วิจัยได้วางแผนและกำหนดจุดในการสำรวจเส้นทางจากสี่แยกอินโดจีน อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก ถึงสี่แยกพ่อขุนผาเมือง อำเภอหล่มสัก จังหวัดเพชรบูรณ์ เป็นระยะทาง 125 กิโลเมตร โดยได้คัดเลือกตำแหน่งในการเก็บข้อมูลจากการพิจารณานิยามของจุดอันตราย (Black spot) กล่าวคือ บริเวณบนโครงข่ายถนนที่มีอุบัติเหตุเกิดขึ้นบ่อยครั้ง และหรือมีความเสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุสูง มีความเสี่ยงต่อการบาดเจ็บจากอุบัติเหตุ ซึ่งเป็นจุดที่ควรได้รับการปรับปรุงแก้ไข เนื่องจากการที่อุบัติเหตุเกิดขึ้นที่จุดเดียวกันหลาย ๆ ครั้ง และหากมีลักษณะการเกิดอุบัติเหตุที่คล้ายกัน มีความเป็นไปได้ ที่จะมีสาเหตุหนึ่งจากความบกพร่องของถนน และสภาพแวดล้อม

สำหรับข้อมูลการเกิดอุบัติเหตุบนเส้นทางศึกษา ผู้วิจัยได้ใช้ข้อมูลการเกิดอุบัติเหตุย้อนหลัง 3 ปี (พ.ศ. 2559 – พ.ศ. 2561) โดยการนำข้อมูลการเกิดอุบัติเหตุทางถนนของบริษัทกลางผู้ประสภภัย ซึ่งเป็นฐานข้อมูลการเกิดอุบัติเหตุทางถนนกลางที่มีความน่าเชื่อถือและความแม่นยำซึ่งทำการเก็บข้อมูลแบบเรียลไทม์ประกอบไปด้วยข้อมูล ผู้บาดเจ็บ (หมุดสีเขียว) และผู้เสียชีวิต (หมุดสีแดง) พร้อมกับการระบุพิกัดตำแหน่งการเกิดอุบัติเหตุทางถนนในจุดเกิดเหตุรัศมีที่ต้องการในเว็บไซต์ของบริษัทกลางผู้ประสภภัย (ThaiRSC, 2019) ด้วยโปรแกรม Google Map และ Google Street View ดังแสดงในภาพที่ 3



ภาพที่ 3 โปรแกรมประยุกต์แผนที่จุดเกิดในรัศมีต้องการของบริษัทกลางผู้ประสภภัย

(ThaiRSC, 2019)

เมื่อพิจารณาข้อมูลการเกิดอุบัติเหตุที่ได้กล่าวข้างต้นแล้ว ผู้วิจัยจึงวิเคราะห์ค่าวิกฤตในการกำหนดบริเวณอันตรายซึ่งประกอบด้วย 2 ค่าขึ้นอยู่กับพื้นที่นั้น ๆ ได้แก่ ค่ากำหนดบริเวณทางแยกอันตราย และค่ากำหนดบริเวณอันตรายตามจำนวนครั้งในการเกิดอุบัติเหตุ ดังแสดงในตารางที่ 1 และ 2 (Department of Highways, 2003) โดยในส่วนนี้ซึ่งผู้วิจัยได้คัดเลือกตำแหน่งในการตรวจสอบความปลอดภัยทางถนนที่มีลักษณะต่างกันเช่น ทางตรง ทางโค้ง และทางแยก ในบริเวณที่เคยเกิดอุบัติเหตุทางถนนมาก่อน และยังไม่เคยเกิดอุบัติเหตุ ซึ่งสามารถเรียงลำดับจากค่ากำหนดบริเวณอันตรายรวมทั้งหมดจำนวน 8 จุด ดังแสดงในภาพที่ 4

ตารางที่ 1 ค่ากำหนดบริเวณทางแยกอันตราย (Department of Highway, 2003)

บริเวณทางแยก	ค่ากำหนดบริเวณทางแยกอันตราย
ทางสามแยก	เกิดอุบัติเหตุมากกว่า 5 ครั้ง
ทางสี่แยก	เกิดอุบัติเหตุมากกว่า 6 ครั้ง
ทางห้าแยก	เกิดอุบัติเหตุมากกว่า 4 ครั้ง
ทางแยกอื่น ๆ	เกิดอุบัติเหตุมากกว่า 5 ครั้ง

หมายเหตุ บริเวณทางแยกครอบคลุมถึงระยะ 100 เมตรของทุกขาของทางแยก

ตารางที่ 2 ค่ากำหนดบริเวณอันตราย (Department of Highway, 2003)

บริเวณ	ค่ากำหนดบริเวณอันตราย
ทางตรง	เกิดอุบัติเหตุมากกว่า 4 ครั้ง
ทางโค้ง	เกิดอุบัติเหตุมากกว่า 3 ครั้ง
สะพาน	เกิดอุบัติเหตุมากกว่า 4 ครั้ง

หมายเหตุ บริเวณทางโค้งคำนึงถึงระยะทางตอนเข้าโค้งและออกจากโค้งข้างละ 50 เมตร

บริเวณสะพานคำนึงถึงระยะก่อนถึงเชิงลาดของสะพานข้างละ 15 เมตร

การตรวจสอบความปลอดภัยทางถนน เป็นวิธีการแก้ปัญหาในเชิงรุก (Proactive approach) ซึ่งเป็นวิธีการที่ช่วยให้มองเห็น “อันตราย” และดำเนินการแก้ไข ก่อนที่สิ่งอันตรายดังกล่าวจะนำไปสู่การเกิดอุบัติเหตุ การเสียชีวิตหรือบาดเจ็บ ซึ่งเป็นการป้องกันปัญหามากกว่าการตามแก้ปัญหา สอดคล้องกับสถาบันการทางและการขนส่งในสหราชอาณาจักร (Institution of Highways and Transportation, 1996) อธิบายการตรวจสอบความปลอดภัยทางถนนว่า คือ วิธีการที่เป็นทางการสำหรับใช้ในการประเมินศักยภาพในการเกิดอุบัติเหตุและความปลอดภัยในการใช้งาน

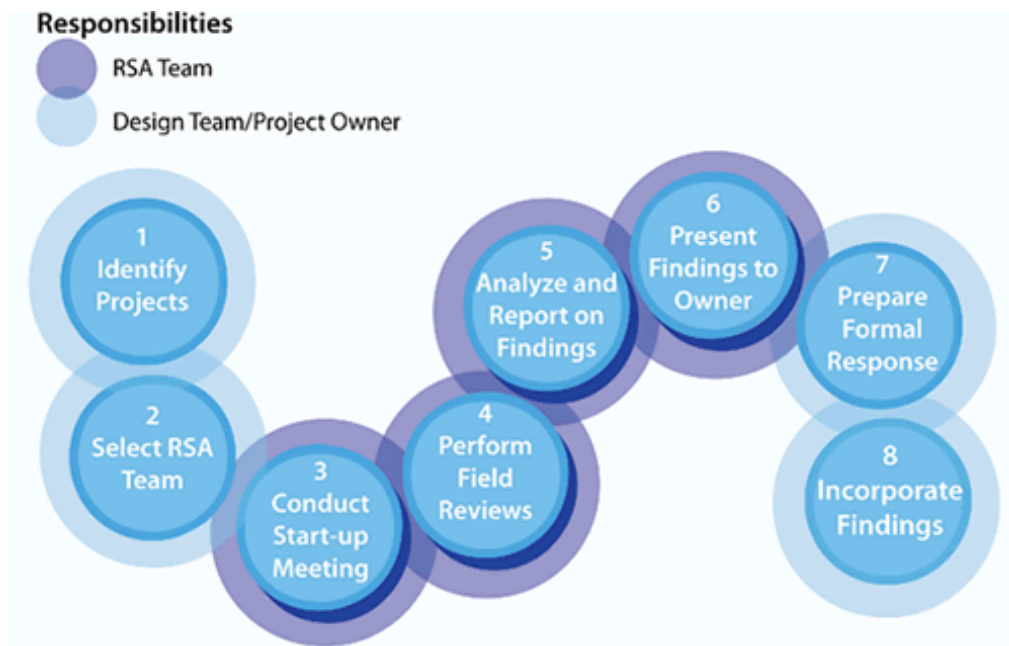
ของโครงการก่อสร้างถนนใหม่ โครงการปรับปรุงและบำรุงรักษาถนนที่มีอยู่ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง การตรวจสอบความปลอดภัยทางถนน (Austroads, 2002) หมายถึง การตรวจสอบอย่างเป็นทางการของโครงการด้านถนนหรือด้านการจราจรในอนาคตหรือถนนที่มีอยู่ โดยผู้ตรวจสอบอิสระที่ทรงคุณวุฒิ ซึ่งจะรายงานถึงศักยภาพในการเกิดอุบัติเหตุ และความปลอดภัยในการใช้งานของโครงการหรือถนนดังกล่าว



ภาพที่ 4 ตำแหน่งการตรวจสอบความปลอดภัยทางถนนในการศึกษา

(Google Map, 2019)

ในการดำเนินผู้วิจัยได้นำกระบวนการในการตรวจสอบความปลอดภัยทางถนน ขั้นตอนถนนที่เปิดให้บริการแล้วมาใช้โดยทีมตรวจสอบมีหน้าที่ในการพิจารณาทบทวนพื้นที่ ค้นหาความบกพร่องที่อาจก่อให้เกิดอุบัติเหตุทางถนน วิเคราะห์ระดับความเสี่ยง และเขียนรายงานการแก้ไขปัญหาที่แสดงขั้นตอนที่ 3 – 6 ในรูปที่ 5 ส่วนการวิเคราะห์การประเมินความเสี่ยง (Risk assessment matrix) ผู้วิจัยได้ใช้ตารางการประเมินความเสี่ยงจากรายงาน Road Safety Audits Procedures for Abu Dhabi City Internal Roads ในปี 2019 ของ Municipality of Abu Dhabi City โดยประเมินระดับความรุนแรงและความถี่ที่เกิดขึ้นในรูปแบบของคะแนน ซึ่งสามารถจำแนกคะแนนความเสี่ยงของจุดที่ทำกรประเมินออกเป็น 3 ระดับ ได้แก่ 1) ระดับความเสี่ยง 1 – 3 เป็นความเสี่ยง “น้อย” 2) ระดับความเสี่ยง 4 – 6 เป็นความเสี่ยง “ปานกลาง” และ 3) ระดับความเสี่ยงมากกว่า 6 เป็นความเสี่ยง “สูง” ดังแสดงในตารางที่ 3



ภาพที่ 5 ตำแหน่งการตรวจสอบความปลอดภัยทางถนนในการศึกษา
(Nabors *et al.*, 2013)

ตารางที่ 3 การประเมินคะแนนความเสี่ยง

ความถี่ ความรุนแรง	มากกว่า 1 ครั้ง/ปี (บ่อยมาก) คะแนน 4	ระหว่าง 1-3 ปี (บ่อย) คะแนน 3	ระหว่าง 3-7 ปี (นาน ๆ ครั้ง) คะแนน 2	ระหว่าง 7-20 ปี (ไม่ก่อให้เกิด) คะแนน 1
รุนแรงมาก คะแนน 4	16	12	8	4
รุนแรง คะแนน 3	12	9	6	3
เล็กน้อย คะแนน 2	8	6	4	2
น้อยมาก คะแนน 1	4	3	2	1

หมายเหตุ – สีเขียว คะแนน 1 – 3 ความเสี่ยงน้อย

– สีเหลือง คะแนน 4 – 6 ความเสี่ยงปานกลาง

– สีแดง คะแนนสูงกว่า 6 ความเสี่ยงสูง

ที่มา: ดัดแปลงจาก Municipality of Abu Dhabi City, 2019

4. ผลการวิจัย

จากการตรวจสอบความปลอดภัยบนท้องถนน ในขั้นตอนถนนที่เปิดให้บริการแล้ว ทั้งกลางวัน กลางคืน ทั้งหมด 8 จุด พบว่า ประเด็นปัญหาส่วนใหญ่เกิดขึ้นจากความบกพร่องของเครื่องหมายจราจรและนำทาง สภาพอันตรายข้างทางไฟฟ้าแสงสว่าง และคนเดินเท้า คนเดินข้ามถนน คนขี่จักรยาน เป็นต้น ดังในตารางที่ 4 โดยจุดที่ตรวจพบปัญหามากที่สุด ได้แก่ กม.44 + 400 กม.47 + 500 และแยกสี่อากหาง ซึ่งสอดคล้องกับจุดเสี่ยงอันตรายที่มีระดับความเสี่ยง 2 จุด (กม. 47+500 และแยกสี่อากหาง) ดังตารางที่ 5 และตารางที่ 6

ตารางที่ 4 ตัวอย่างประเด็นที่พบจากการตรวจสอบความปลอดภัยทางถนน

	
เครื่องหมายจราจรชำรุด	พื้นถนนชำรุด
	
เครื่องหมายจราจรชำรุด	เครื่องหมายนำทางไม่เพียงพอ

ตารางที่ 4 ตัวอย่างประเด็นที่พบจากการตรวจสอบความปลอดภัยทางถนน (ต่อ)

	
ไฟฟ้าแสงสว่างไม่เพียงพอ	เครื่องหมายนำทางชำรุด

ตารางที่ 5 จุดบกพร่องทางถนนที่อาจส่งผลให้เกิดอุบัติเหตุทางถนนบนเส้นทางท่องเที่ยว

ประเด็น	จุดที่สำรวจ							
	กม. 42+400	กม. 44+400	กม. 47+500	กม. 50+000	แยก สี่ ทาง	แยก บ้าน แยง	แยก แคมป์ สน	แยก พ้อขุน ฯ
แนวทางและ ความกว้างของ ถนน								
ลักษณะทั่วไป ของทางร่วม ทางแยก								
ป้ายจราจร								
เครื่องหมาย จราจรและ เครื่องหมายนำ ทาง								

ตารางที่ 5 จุดบกพร่องทางถนนที่อาจส่งผลให้เกิดอุบัติเหตุทางถนนบนเส้นทางท่องเที่ยว (ต่อ)

ประเด็น	จุดที่สำรวจ							
	กม. 42+400	กม. 44+400	กม. 47+500	กม. 50+000	แยก เสือ กลาง ทาง	แยก บ้าน แยง	แยก แคมป์ สน	แยก พ้อขุน ฯ
สภาพอันตราย ข้างทาง								
พื้นถนน								
ไฟฟ้าแสงสว่าง								
คนเดินเท้า คน เดินข้ามถนน คนขี่จักรยาน								
ทางเชื่อม								
ระยะการ มองเห็น								
การจอดรถและ หยุดรถประจำ ทาง								

หมายเหตุ หมายถึง ได้มาตรฐาน
 หมายถึง ไม่ได้มาตรฐาน



ตารางที่ 6 การประเมินระดับจุดเสี่ยง

จุดที่ทำการศึกษา	ระดับจุดเสี่ยง
จุดที่ 1 กม. 42 + 400	ต่ำ
จุดที่ 2 กม. 44 + 400	ปานกลาง
จุดที่ 3 กม. 47 + 500	สูง
จุดที่ 4 กม. 50 + 000	ต่ำ
จุดที่ 5 แยกสี่อกลากหาง	สูง
จุดที่ 6 แยกบ้านแยง	ปานกลาง
จุดที่ 7 แยกแคมป์สน	ปานกลาง
จุดที่ 8 แยกพ่อขุนผาเมือง	ปานกลาง

5. สรุปผลและการอภิปรายผล

การตรวจสอบความปลอดภัยทางถนนสามารถทำให้ทราบถึงปัจจัยเสี่ยงที่อาจนำไปสู่การเกิดอุบัติเหตุทางถนน จากการเปรียบเทียบตำแหน่งการเกิดอุบัติเหตุและยังไม่เกิดอุบัติเหตุ พบว่า ปัจจัยที่ค้นพบมีความคล้ายคลึงกัน เช่น ลักษณะทางกายภาพของถนน ป้ายจราจรถูกสิ่งบดบัง หมุดสะท้อนแสงบนถนนเสื่อมสภาพ ผิวทางชำรุดขรุขระ ไฟฟ้าแสงสว่างไม่เพียงพอ และอุปกรณ์อำนวยความสะดวกความปลอดภัยข้างทางมีความเสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุ โดยจากจุดที่พบข้อบกพร่อง 3 จุด กม.44 + 400, กม.47 + 500 และแยกสี่อกลากหาง นำไปสู่จุดเสี่ยงอันตรายที่ต้องทำการแก้ไขอย่างเร่งด่วนที่มีระดับความเสี่ยงสูง ได้แก่ กม. 47+500 และแยกสี่อกลากหาง ซึ่งเป็นความเสี่ยงในการเดินทางท่องเที่ยว

สำหรับข้อเสนอแนะและการนำไปใช้ประโยชน์ของงานวิจัย สามารถพิจารณาได้เป็น 2 ส่วนด้วยกัน ได้แก่ 1) การตรวจสอบความปลอดภัยทางถนนเป็นแนวทางการดำเนินงานเชิงรุกที่หน่วยงานภูมิภาคที่มีหน้าที่รับผิดชอบด้านงานถนนและอำนวยความสะดวกปลอดภัยต้องมีการดำเนินการตรวจสอบในสายทางของตนเองเป็นระยะ เนื่องจากอาจมีความบกพร่องที่เกิดขึ้นโดยสภาพแวดล้อมตามธรรมชาติหรือชำรุดเสียหายจากการกระทำโดยไม่เจตนาซึ่งอาจมีผลก่อให้เกิดอุบัติเหตุทางถนนตามมา จึงควรมีการป้องกันการเกิดอุบัติเหตุดีกว่าตามแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น 2) การประเมินคะแนนความเสี่ยงเป็นเครื่องมือทางวิศวกรรมอย่างง่ายที่ช่วยให้หน่วยงานในพื้นที่นำความถี่ในการเกิดอุบัติเหตุทางถนนมา

พิจารณาลำดับความสำคัญก่อนหลังในการแก้ไขปัญหาจุดเสี่ยงจุดอันตราย โดยเลือกจุดที่มีความเสี่ยงสูงในการดำเนินการแก้ไขปัญหาก่อน ซึ่งอาจใช้งบประมาณในการแก้ไขปัญหานี้ไม่มาก และไม่ต้องรอกงบประมาณจากส่วนการในการแก้ไขทั้งหมด

การติดตั้งป้ายจำกัดความเร็ว การติดตั้งอุปกรณ์ชะลอความเร็ว การติดตั้งสัญญาณไฟกระพริบ การตัดต้นไม้และกำจัดวัชพืชที่ปกคลุมระยะการมองเห็นที่ปลอดภัยมักถูกมองข้ามในหลายพื้นที่ ทางผู้วิจัยจึงเสนอให้ผู้มีส่วนรับผิดชอบและเกี่ยวข้องคอยดูแลปัญหาในพื้นที่อย่างสม่ำเสมอเพื่อลดจำนวนการเกิดอุบัติเหตุทางถนนและยกระดับความปลอดภัยในการเดินทางบนเส้นทางท่องเที่ยวให้นักท่องเที่ยวเดินทางอย่างปลอดภัยซึ่งเป็นผลดีต่อทั้งเศรษฐกิจและสังคม ตลอดจนภาพลักษณ์ที่ดีของประเทศในสายตาโลก

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่ได้สนับสนุนงบประมาณในการทำวิจัย และขอขอบคุณผู้อำนวยการศูนย์สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม ที่เล็งเห็นถึงความสำคัญของงานวิจัยด้านความปลอดภัยทางถนน ท้ายที่สุดขอขอบคุณคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรมที่อนุญาตให้ใช้วัสดุและอุปกรณ์ในการเก็บข้อมูลภาคสนามตลอดจนสถานที่ทำงานวิจัยในครั้งนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- Austroads. (2002). **Road safety audit guide** (2nd Ed). Austroads, Melbourne, Australia.
- Department of Highways. (2003). **Black spot analysis**. Bureau of Highway Safety, Bangkok, Thailand.
- Department of Highways. (2005). **Road safety audit manual: Existing roads stage**. Bureau of Highway Safety, Bangkok, Thailand.
- Department of Highways. (2006). **Road safety audit**. Ministry of Transport, Bangkok, Thailand.
- Florio A.E., & Alles, G.T.S. (1997). **Safety education**. New York: Mc Graw-Hill.
- Institution of Highways and Transportation. (1996). **Guidelines for the safety audit of highways**. United Kingdom.
- Municipality of Abu Dhabi City. (2011). **Road safety audits procedures for Abu Dhabi city internal roads**. Internal Roads and Infrastructure Directorate, United Arab Emirates.



- Nabors, D., & Soika, J. (2013). **Road safety audit case studies: Using three-dimensional design visualization in the road safety audit process.**
- Qureshi, I.A., & Lu, H. (2007). Urban transport and sustainable transport strategies: A case study of Karachi, Pakistan. **Tsinghua Science and Technology**, 12, 309–317.
- Roads and Traffic Authority of New South Wales. (2011). **Guidelines for road safety audit practices.** Transport & Road Traffic Authority, New South Wales, Australia.
- Steg, L., & Robert, G. (2005). Sustainable transportation and quality of life. **Journal of Transport Geography**, 13, 59-69.
- Thai RSC. (2019). **Accident Locations in Specified Range.** Retrieved from <http://www.thairsc.com>.
- World Health Organization. (2004). **World report on road traffic injury prevention,** Geneva, Switzerland.



จริยธรรมในการตีพิมพ์

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม มีความมุ่งมั่นที่จะรักษามาตรฐานด้านจริยธรรมในการตีพิมพ์สูงสุด ดังนั้นทุกฝ่ายที่เกี่ยวข้องจะต้องปฏิบัติตามหลักการและมาตรฐานด้านจริยธรรมในการตีพิมพ์อย่างเคร่งครัด

บทบาทหน้าที่ของบรรณาธิการ

1. บรรณาธิการมีหน้าที่พิจารณาและตรวจสอบบทความที่ส่งมาเพื่อ เข้ารับการพิจารณาตีพิมพ์กับวารสารทุกบทความ โดยพิจารณาเนื้อหาบทความที่สอดคล้องกับเป้าหมายและขอบเขตของวารสาร รวมถึงการตรวจสอบคุณภาพบทความในกระบวนการประเมินและคุณภาพบทความก่อนการตีพิมพ์
2. บรรณาธิการต้องใช้เหตุผลทางวิชาการในการพิจารณาบทความทุกครั้งโดยปราศจากอคติที่มีต่อบทความและผู้นิพนธ์ในด้านเชื้อชาติ เพศ ศาสนา วัฒนธรรม การเมือง และสังกัดของผู้นิพนธ์
3. บรรณาธิการต้องไม่มีส่วนได้ส่วนเสียกับผู้นิพนธ์หรือผู้ทรงคุณวุฒิไม่นำบทความหรือวารสารไปใช้ประโยชน์ในเชิงธุรกิจหรือนำไปเป็นผลงานทางวิชาการของตนเอง
4. บรรณาธิการต้องไม่แก้ไขหรือเปลี่ยนแปลงเนื้อหาบทความและผลประโยชน์ของผู้ทรงคุณวุฒิ รวมถึงไม่ปิดกั้นหรือแทรกแซงข้อมูลที่ใช้แลกเปลี่ยนระหว่างผู้ทรงคุณวุฒิและผู้นิพนธ์
5. บรรณาธิการต้องปฏิบัติตามกระบวนการและขั้นตอนต่าง ๆ ของวารสารอย่างเคร่งครัด
6. บรรณาธิการต้องรักษามาตรฐานของวารสาร รวมถึงพัฒนาวารสารให้มีคุณภาพและมีความทันสมัยเสมอ

บทบาทหน้าที่ของผู้นิพนธ์

1. ผลงานของผู้นิพนธ์ต้องเป็นผลงานที่ไม่เคยตีพิมพ์หรือเผยแพร่ที่ไหนมาก่อน และไม่อยู่ระหว่างการเสนอ เพื่อพิจารณาเผยแพร่ในวารสารฉบับอื่น
2. ผู้นิพนธ์ต้องไม่คัดลอกผลงานของผู้อื่น และต้องมีการอ้างอิงทุกครั้งเมื่อนำผลงานของผู้อื่นมาเสนอหรืออ้างอิงในเนื้อหาบทความของตนเอง
3. ข้อมูลที่นำเสนอในผลงาน ต้องเป็นข้อเท็จจริงที่เกิดจากการศึกษาวิจัย ผู้นิพนธ์ต้องไม่บิดเบือน ปลอมแปลง หรือนำเสนอข้อมูลอันเป็นเท็จ
4. ผู้นิพนธ์พึงกระทำตามขั้นตอนของวารสาร เพื่อเป็นการรับรองคุณภาพของเนื้อหาที่ได้นำมาตีพิมพ์เผยแพร่โดยตระหนักว่าผลงานวิชาการต่าง ๆ ในวารสารมีวัตถุประสงค์และมาตรฐานที่แตกต่างกัน



5. หากผลงานทางวิชาการของผู้นิพนธ์เกี่ยวข้องกับมนุษย์ และสัตว์ทดลอง ต้องเป็นผลงานที่ได้ดำเนินการตามหลักจริยธรรม ปฏิบัติตามกฎหมายและข้อบังคับที่เกี่ยวข้องอย่างเคร่งครัด และต้องได้รับการรับรองจากคณะกรรมการจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์ และสัตว์ทดลอง
6. ผู้นิพนธ์ต้องเขียนบทความวิชาการหรือบทความวิจัยให้ถูกต้องตามรูปแบบที่กำหนดไว้ใน “คำแนะนำผู้เขียน”
7. ชื่อผู้นิพนธ์ที่ปรากฏในบทความต้องเป็นผู้ที่มีส่วนในผลงานวิชาการนี้จริง

บทบาทหน้าที่ของผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ

1. ผู้ทรงคุณวุฒิต้องคำนึงถึงคุณภาพบทความเป็นหลัก พิจารณาบทความภายใต้หลักการและเหตุผลทางวิชาการโดยปราศจากอคติหรือความคิดเห็นส่วนตัว และไม่มีส่วนได้ส่วนเสียกับผู้นิพนธ์
2. ผู้ทรงคุณวุฒิต้องไม่แสวงหาประโยชน์จากผลงานทางวิชาการที่ตนเองได้ทำการประเมิน
3. ผู้ทรงคุณวุฒิต้องตระหนักว่าตนเองมีความรู้ความเข้าใจในเนื้อหาของผลงานวิชาการที่รับประเมินอย่างแท้จริง
4. หากผู้ทรงคุณวุฒิตรวจสอบพบว่าบทความที่รับประเมิน เป็นบทความที่คัดลอกผลงานชิ้นอื่น ๆ ผู้ทรงคุณวุฒิต้องแจ้งให้บรรณาธิการทราบทันที
5. ผู้ทรงคุณวุฒิต้องรักษาระยะเวลาประเมินตามกรอบเวลาประเมินที่กำหนด รวมถึงไม่เปิดเผยข้อมูลของบทความให้ผู้ที่ไม่มีส่วนเกี่ยวข้องได้รับรู้

กองบรรณาธิการวารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรม

มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม