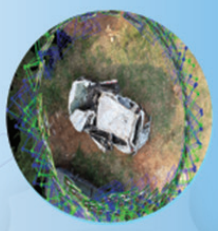
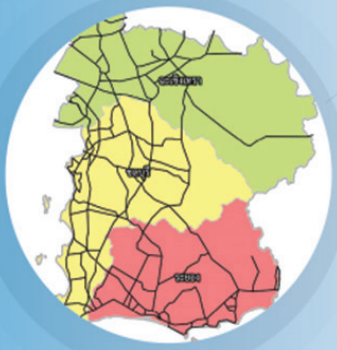
วารสาร มทร.อีสาน

ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ISSN 2672-9369 (Online)

ปีที่ 15 ฉบับที่ 2 พฤษภาคม - สิงหาคม 2565





วารสาร มทร.อีสาน ได้รับการประเมินคุณภาพให้อยู่ในฐานข้อมูลของ
ศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (TCI) กลุ่มที่ 2

RMUTI

วารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
RMUTI JOURNAL Science and Technology

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

Rajamangala University of Technology Isan (RMUTI)

วัตถุประสงค์

1. เพื่อเป็นสื่อกลางในการแลกเปลี่ยนองค์ความรู้ด้านวิชาการ ด้านงานวิจัย และสิ่งประดิษฐ์ระหว่างนักวิชาการ และนักวิจัยกับผู้ที่สนใจทั่วไป
2. เพื่อเผยแพร่ผลงานทางวิชาการ ผลงานวิจัย และสิ่งประดิษฐ์ของนักวิชาการและนักวิจัยสู่สาธารณชน

หลักเกณฑ์การส่งบทความ

วารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี เน้นบทความทางด้าน Physical Sciences ในสาขาวิชา Chemistry, Engineering, Materials Science, Environmental Science และ Mathematics บทความทุกบทความจะต้องผ่านการพิจารณาโดยผู้ทรงคุณวุฒิที่เชี่ยวชาญอย่างน้อย 3 ท่าน แบบผู้ทรงคุณวุฒิและผู้แต่งไม่ทราบชื่อกันและกัน (double-blind review)

เจ้าของ

สถาบันวิจัยและพัฒนา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
744 ถ.สุรนารายณ์ ต.ในเมือง อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000
โทรศัพท์ 0 - 4423 - 3063 โทรสาร 0 - 4423 - 3064
E-mail : rmuti.journal@gmail.com

พิมพ์เผยแพร่ปีละ 3 ฉบับ

ฉบับที่ 1 ประจำเดือนมกราคม - เดือนเมษายน
ฉบับที่ 2 ประจำเดือนพฤษภาคม - เดือนสิงหาคม
ฉบับที่ 3 ประจำเดือนกันยายน - เดือนธันวาคม
ทั้งนี้ ตั้งแต่ ปีที่ 8 ฉบับที่ 1 ประจำเดือนมกราคม - เดือนเมษายน 2558 เป็นต้นไป
ยกเลิกการตีพิมพ์รูปเล่มตั้งแต่ปีที่ 12 ฉบับที่ 1 ประจำเดือนมกราคม - เดือนเมษายน 2562 เป็นต้นไป เผยแพร่ออนไลน์เท่านั้น

วารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
RMUTI JOURNAL Science and Technology

กองบรรณาธิการ (ต่อ)

รองศาสตราจารย์ ดร.มนัส	ชัยจันทร์	มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์
รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภชัย	สิงห์ยะบุศย์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รองศาสตราจารย์ ดร.สรายุธ	เดชะปัญญา	มหาวิทยาลัยบูรพา
รองศาสตราจารย์ ดร.สมพงษ์	ดุลย์จินดาชบาพร	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.สมพร	ไชยะ	จังหวัดฉะเชิงเทรา
รองศาสตราจารย์ ดร.สิทธิชัย	แสงอาทิตย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รองศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์	อัศวสุขี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
รองศาสตราจารย์ กาญจนา	ตันสุวรรณรัตน์	จังหวัดนครราชสีมา
รองศาสตราจารย์ อุดมศักดิ์	สาริบุตร	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไกรสิทธิ	วสุเพ็ญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักษดา	ธำรงวุฒิ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ศักดิ์	โยธา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัฐพล	สมนา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศศิพันธ์	วงศ์สุทธาวาส	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุจิตรา	อุ่นเรือน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ดร.จารุพงษ์	บรรเทา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ดร.ชาคริต	นวลฉิมพลี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ดร.เยาวพา	ความหมั่น	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ดร.สุกัญญา	คำหล้า	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ดร.เดือนเพ็ญ	วงค์สอน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

บรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.ธนากร	ภูเงินขำ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

ฝ่ายจัดการและธุรการ

นางสาววลีรักษ์	ศรีศิลป์ไชย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

สารบัญ

บทความวิจัย

Table of Contents

สมบัติเชิงกลของเถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตผสมกากดินล้างและซิลิกาฟูม

Mechanical Properties of Fly Ash Geopolymer Concrete Incorporating Clay Residue and Silica Fume

แสงสุรีย์ พังแดง[1] สมพร งามทวี[2] ธวัชชัย โทอินทร์[3*] สกลวรรณ ห่านจิตสุวรรณ์[4] และธนากร ภูเงินขำ[2]

Saengsuree Pangdaeng[1] Somporn Ngamtavee[2] Tawatchai Tho-in[3*] Sakonwan Hanjitsuwan[4] and Tanakorn Phoo-ngernkham[2]

Received: *August 18, 2021;* ***Revised:*** *November 28, 2021;* ***Accepted:*** *November 28, 2021*

บทคัดย่อ

บทความนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกลของเถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตผสมกากดินล้างและซิลิกาฟูม โดยใช้สัดส่วนของเถ้าลอยแคลเซียมสูงต่อกากดินล้างต่อซิลิกาฟูมเท่ากับ 100:0:0 90:10:0 90:5:5 80:20:0 80:15:5 80:10:10 70:30:0 70:25:5 70:20:10 และ 70:15:15 ตามลำดับ งานวิจัยนี้ใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นเท่ากับ 10 โมลาร์ เป็นสารละลายด่างในส่วนผสม โดยทำการทดสอบระยะเวลาการก่อตัว กำลังอัด โมดูลัสยืดหยุ่นและอัตราส่วนปัวซองของเถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตผสมกากดินล้างและซิลิกาฟูม ผลการทดสอบพบว่า การใช้กากดินล้างแทนที่เถ้าลอยแคลเซียมสูงสำหรับการผลิตเถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตช่วยชะลอระยะเวลาการก่อตัวได้ กำลังอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นของเถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณการใช้กากดินล้างและซิลิกาฟูม สามารถใช้กากดินล้างผสมเถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์คอนกรีตได้ถึงร้อยละ 10 ผสม โดยไม่ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลง

คำสำคัญ : เถ้าลอยจีโอพอลิเมอร์คอนกรีต; กากดินล้าง; ซิลิกาฟูม; สมบัติเชิงกล

[1] *คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครพนม*

[2] *คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน*

[3] *คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น*

[4] *คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง*

[1] *Faculty of Engineering, Nakhon Phanom University*

[2] *Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Isan*

[3] *Faculty of Technical Education, Rajamangala University of Technology Isan, Khonkaen Campus*

[4] *Faculty of Industrial Technology, Lampang Rajabhat University*

[*] *Corresponding Author, Tel. 09 0979 5296, E - mail: tawatchai.to@rmuti.ac.th*

Abstract

The purpose of this paper was to investigate the mechanical properties of fly ash (FA) geopolymer concrete incorporating clay residue (CR), and silica fume (SF). The FA: CR: SF ratios were 100:0:0, 90:10:0, 90:5:5, 80:20:0, 80:15:5, 80:10:10, 70:30:0, 70:25:5, 70:20:10, and 70:15:15, respectively. Alkaline solutions of sodium silicate and 10 molar sodium hydroxide were employed as activators. The setting time, compressive strength, elasticity modulus, and Poisson's ratio of FA geopolymer concrete were studied. According to the test results, replacing CR for FA in the production of FA geopolymer concrete could result in a delay in its setting time. Compressive strength and elastic modulus of FA geopolymer concrete decreased with an increase in both CR and SF. It can be concluded that FA geopolymer concrete with 10 % CR did not negatively affect the compressive strength.

Keywords: Fly Ash Geopolymer Concrete; Clay Residue; Silica Fume; Mechanical Properties

บทนำ

ปัญหาสิ่งแวดล้อมที่มีผลมาจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ที่มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศปริมาณมาก และปัญหาการกำจัดของเสียจากกระบวนการอุตสาหกรรม ทำให้เกิดแรงกระตุ้นในการวิจัยและพัฒนาที่จะลดปัญหาดังกล่าวที่เพิ่มมากขึ้น ในปัจจุบันมีงานวิจัยที่จะนำวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมมาผลิตเป็นวัสดุใหม่มากขึ้น โดยใช้เป็นวัสดุประสานแทนปูนซีเมนต์หรือลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ให้น้อยลง หนึ่งในนั้นคือวัสดุอัลคาไล [1] - [2]

วัสดุอัลคาไลสามารถสังเคราะห์ได้จากวัตถุดิบที่มีส่วนประกอบของซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) นำมาทำปฏิกิริยากับสารละลายที่เป็นด่าง เช่น สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายโซเดียมซิลิเกต ทำให้เกิดปฏิกิริยาและเกิดการแข็งตัวและสามารถรับกำลังได้ วัสดุตั้งต้นที่นิยมใช้ในการผลิต ได้แก่ เถ้าลอย เถ้าแกลบ เถ้าปาล์มน้ำมัน และเถ้าชานอ้อย เป็นต้น [1] - [2] ในประเทศไทยนิยมใช้เถ้าลอยจากโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง องค์ประกอบหลักทางเคมีของเถ้าลอยประกอบด้วย ซิลิกา อะลูมินา และแคลเซียมที่มีปริมาณสูงเป็นหลัก จากรายงานวิจัยพบว่า เถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมสูงมีความเหมาะสมในการใช้เป็นวัสดุตั้งต้นในการผลิตวัสดุจีโอโพลิเมอร์ [3] อย่างไรก็ตามการใช้เถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมสูงเป็นวัสดุตั้งต้นในการผลิตคอนกรีตยังคงต้องมีการปรับปรุงสมบัติเชิงกลให้ดียิ่งขึ้น ดังนั้น กระบวนการผลิตจึงจำเป็นต้องใช้วัตถุดิบเสริมที่มีองค์ประกอบของซิลิกาเข้ามาทำปฏิกิริยาร่วมกับเถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมสูง เพื่อให้ได้ผลผลิตแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งสารประกอบนี้มีสมบัติในการยึดประสานมากขึ้นภายในระบบของวัสดุอัลคาไล

จากงานวิจัยที่ผ่านมาการใช้ซิลิกาฟูมหรือไมโครซิลิกาที่มีปริมาณของซิลิกามากกว่าร้อยละ 90 ผสมในคอนกรีตทำให้สมบัติเชิงกลของคอนกรีตดีขึ้น เนื่องมาจากซิลิกาฟูมมีความละเอียดสูงมากทำให้สามารถลดค่าความพรุนและเพิ่มปริมาณของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตได้มากขึ้น [4] นอกจากนั้นวัสดุอีกหนึ่งชนิดที่มีปริมาณของซิลิกาสูง คือ กากดินล้าง ซึ่งจากข้อมูลกระบวนการผลิตเซรามิก วัตถุดิบที่ใช้จะเป็นดินขาวซึ่งมีปริมาณของซิลิกามากกว่าร้อยละ 45 [5] การล้างแร่ดินขาวแต่ละครั้งจะเหลือปริมาณกากดินขาวมากประมาณร้อยละ 50 - 70 โดยน้ำหนักของแร่ดินที่นำมาล้าง ซึ่งเป็นปริมาณที่มากสำหรับปริมาณของกากดินขาวทุกโรงงานในจังหวัดลำปาง จึงน่าจะเป็นแหล่งให้ซิลิกาที่น่าสนใจสำหรับการผลิตคอนกรีต นอกจากนี้การเข้าใจถึงพฤติกรรมของวัสดุที่ใช้ในงานก่อสร้าง ก็จะทำให้สามารถพัฒนาวัสดุชนิดใหม่ให้มีศักยภาพสามารถใช้งานได้

ISSN 2672-9369 (Online)

อย่างเต็มประสิทธิภาพ [6] ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากำลังอัด โมดูลัสยืดหยุ่น อัตราส่วนปัวซอง และระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตที่มีการแข็งตัวเร็วจากเถ้าลอยแคลเซียมสูงผสมกากดินล้างและซิลิกาฟูม ซึ่งผลการทดสอบที่ได้รับช่วยให้เข้าใจถึงพฤติกรรมของคอนกรีตที่มีการแข็งตัวเร็วจากเถ้าลอยแคลเซียมสูงผสมกากดินล้างและซิลิกาฟูมและเป็นแนวทางเบื้องต้นในการพัฒนาคอนกรีตที่มีการก่อตัวเร็วใช้เป็นวัสดุซ่อมแซมต่อไปในอนาคต

วิธีดำเนินงานวิจัย

1. **วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ**

เถ้าลอยแคลเซียมสูง (FA) จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ และกากดินล้าง (CR) จากกระบวนการผลิตเซรามิก จังหวัดลำปาง และซิลิกาฟูม (SF) มีองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยแคลเซียมสูง กากดินล้าง และซิลิกาฟูม ดังตารางที่ 1 จะเห็นว่าเถ้าลอยประกอบด้วย ซิลิกา (SiO_2) อะลูมินา (Al_2O_3) เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นหลัก ซึ่งปริมาณผลรวมของ SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 60.92 และ CaO เท่ากับร้อยละ 25.79 เถ้าลอยที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้จึงจัดอยู่ในเถ้าลอยประเภท Class C ตามมาตรฐาน ASTM C618 [7] กากดินล้างและซิลิกาฟูมประกอบด้วย ซิลิกาเป็นหลัก โดยเถ้าลอยแคลเซียมสูง (FA) และกากดินล้าง (CR) ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.65 และ 2.32 ขณะที่เถ้าลอยแคลเซียมสูง (FA) และกากดินล้าง (CR) และซิลิกาฟูมมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 15.5 ไมครอน 18.3 ไมครอน และ 150 นาโนเมตร ตามลำดับ ส่วนมวลรวมละเอียดใช้ทรายแม่น้ำ (RS) และมวลรวมหยาบใช้หินปูนย่อยขนาด 3/8 นิ้ว (CA) โดยมวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.56 และ 2.68 และมวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบมีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.40 และ 6.04

สารละลายด่างที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา คือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 โมลาร์ (NH) และสารละลายโซเดียมซิลิเกต (NS) ที่มีองค์ประกอบทางเคมีของ Na_2O เท่ากับร้อยละ 12.37 SiO_2 เท่ากับร้อยละ 29.94 และ H_2O เท่ากับร้อยละ 57.69 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยแคลเซียมสูง กากดินล้าง และซิลิกาฟูม

Chemical Compositions	FA (%)	CR (%)	SF (%)
SiO_2	31.32	77.48	92.00
Al_2O_3	13.96	9.74	0.70
Fe_2O_3	15.64	2.43	1.20
CaO	25.79	0.54	0.20
MgO	2.94	0.02	0.20
Na_2O	2.83	0.01	0.40
K_2O	2.93	5.61	0.10
SO_3	3.29	1.01	-

ตารางที่ 2 อัตราส่วนผสมของคอนกรีต (kg/m^3)

Symbol	FA	CR	SF	NH	NS	RS	CA	SP
100FA0CR0SF	427	-	-	118	118	489	1201	4.3
90FA10CR0SF	385	43	-	118	118	490	1202	4.3

ตารางที่ 2 อัตราส่วนผสมของคอนกรีต (kg/m^3) (ต่อ)

Symbol	FA	CR	SF	NH	NS	RS	CA	SP
90FA5CR5SF	385	21	21	118	118	489	1199	4.3
80FA20CR0SF	342	85	-	118	118	491	1204	4.3
80FA15CR5SF	342	64	21	118	118	489	1201	4.3
80FA10CR10SF	342	43	43	118	118	488	1198	4.3
70FA30CR0SF	299	128	-	118	118	491	1206	4.3
70FA25CR5SF	299	107	21	118	118	490	1203	4.3
70FA20CR10SF	299	85	85	118	118	489	1199	4.3
70FA15CR15SF	299	64	64	118	118	488	1196	4.3

2. อัตราส่วนผสมและเตรียมตัวอย่าง

อัตราส่วนผสมของคอนกรีตที่แสดงในตารางที่ 2 โดยใช้สัดส่วนของเถ้าลอยแคลเซียมสูงต่อกากดินล้างต่อซิลิกาฟูมเท่ากับ 100:0:0 90:10:0 90:5:5 80:20:0 80:15:5 80:10:10 70:30:0 70:25:5 70:20:10 และ 70:15:15 ตามลำดับ ในการผสมคอนกรีตใช้อัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55 อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NS/NH) เท่ากับ 1.0 และใช้สารพลาสติกไซเซอร์ (SP) ร้อยละ 1 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน

ขั้นตอนการผสมคอนกรีตประกอบด้วย การผสมเถ้าลอยแคลเซียมสูง กากดินล้างและซิลิกาฟูมให้เข้ากัน จากนั้นเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10 โมลาร์ ผสมเป็นเวลา 1 นาที เติมมวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบผสมเป็นเวลา 1 นาที และเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกต และสารพลาสติกไซเซอร์ผสมอีกครั้งให้เข้ากันประมาณ 1 นาที การเตรียมตัวอย่างคอนกรีตที่มีการแข็งตัวเร็วดังรูปที่ 1

(ก) การบรรจุคอนกรีต

(ข) ลักษณะการบ่มคอนกรีตที่อุณหภูมิห้อง

รูปที่ 1 วิธีเตรียมตัวอย่างคอนกรีตที่มีการแข็งตัวเร็ว

3. เตรียมตัวอย่างและการทดสอบ

หลังจากกระบวนการผสมเสร็จแล้ว ทำการเทลงแบบหล่อทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 100 มิลลิเมตร สูงเท่ากับ 200 มิลลิเมตร และกระทุ้งตามมาตรฐาน ASTM C39 [8] แล้วทำการห่อด้วยฟิล์มพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นของตัวอย่าง และเก็บไว้ที่ห้องควบคุมอุณหภูมิเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส และถอดแบบเมื่อครบ 24 ชั่วโมงหลังจากการเทตัวอย่างลงแบบ จากนั้นทำการห่อด้วยฟิล์มพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นอีกครั้ง ดังรูปที่ 1(ข) และเก็บตัวอย่างไว้ที่ห้องควบคุมอุณหภูมิเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส จนครบอายุการทดสอบตัวอย่างที่อายุการบ่มเท่ากับ 7 วัน โดยผลการทดสอบใช้ค่าเฉลี่ยจากการทดสอบจำนวน 3 ตัวอย่าง

ISSN 2672-9369 (Online)

รูปที่ 2 การทดสอบกำลังอัด โมดูลัสยืดหยุ่นและอัตราส่วนปัวซองของคอนกรีตที่มีการแข็งตัวเร็ว

การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่มีการแข็งตัวเร็ววิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM C39 [8] ส่วนค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและอัตราส่วนปัวซองดำเนินการทดสอบและวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM C469 [9] ดังรูปที่ 2 สำหรับการวิเคราะห์ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นหาได้จากสมการที่ (1) และอัตราส่วนปัวซองหาได้จากสมการที่ (2)

$$E = \frac{S_2 - S_1}{\varepsilon_2 - 0.00005} \tag{1}$$

$$\mu = \frac{\varepsilon_{t2} - \varepsilon_{t1}}{\varepsilon_2 - 0.00005} \tag{2}$$

เมื่อ

E	หมายถึง	โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต (GPa)
S_2	หมายถึง	ความเค้นอัดของคอนกรีตที่ร้อยละ 40 ของกำลังอัดประลัย (MPa)
S_1	หมายถึง	ค่าความเค้นอัดที่เกิดความเครียดเท่ากับ 0.00005 (MPa)
ε_2	หมายถึง	ค่าความเครียดที่ทำให้เกิดความเค้นเท่ากับ S_2
μ	หมายถึง	ค่าอัตราส่วนปัวซองของคอนกรีต
ε_{t2}	หมายถึง	ค่าความเครียดด้านข้างที่ตำแหน่งกึ่งกลางตัวอย่างคอนกรีตเมื่อมีความเค้นเท่ากับ S_2
ε_{t1}	หมายถึง	ค่าความเครียดด้านข้างที่ตำแหน่งกึ่งกลางตัวอย่างคอนกรีตเมื่อมีความเค้นเท่ากับ S_1

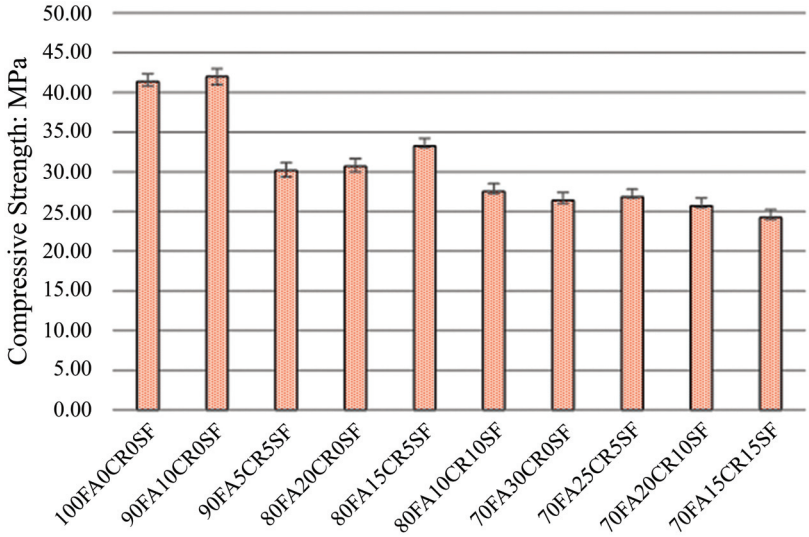
ผลการทดลองและวิจารณ์

1. **กำลังอัด**

ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่มีการแข็งตัวเร็วจากเถ้าลอยแคลเซียมสูงแทนที่ด้วยกากดินล้างและซิลิกาฟูม ดังรูปที่ 3 พบว่า การใช้กากดินล้างและซิลิกาฟูมแทนที่เถ้าลอยแคลเซียมสูงส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาในระบบของการผลิตคอนกรีตจากการใช้กากดินล้างและซิลิกาฟูมในส่วนผสมเกินปริมาณที่เหมาะสมต่อการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีต อีกทั้งซิลิกาจากกากดินล้างเป็นซิลิกาที่ไม่มีความว่องไวมากเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับซิลิกาจากเถ้าลอย ส่งผลให้การทำปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอไรเซชั่นเพื่อให้ได้ผลผลิตโซเดียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (NASH) หรือ

จีโอโพลิเมอร์เจลน้อยกว่า [10] แต่อย่างไรก็ตามองค์ประกอบของซิลิกาจากกากดินล้างและซิลิกาฟูมจะช่วยการทำปฏิกิริยาในช่วงอายุปลายทำนองเดียวกับปฏิกิริยาปอซโซลานของระบบซีเมนต์ปกติ [11] ซึ่งผลการทดสอบตามรูปที่ 3 เป็นการทดสอบของคอนกรีตที่มีการแข็งตัวเร็วที่อายุเพียง 7 วัน ซึ่งเป็นไปได้ว่ากำลังอัดช่วงต้นของการใช้กากดินล้างและซิลิกาฟูมในส่วนผสมของคอนกรีตจากเถ้าลอยแคลเซียมสูงจะช้ากว่าเมื่อพิจารณาการใช้เถ้าลอยแคลเซียมสูงในส่วนผสมเพียงอย่างเดียว ดังนั้น ควรต้องมีการศึกษากำลังอัดของคอนกรีตจากเถ้าลอยแคลเซียมสูงผสมกากดินล้างและซิลิกาฟูมในอายุปลายเพิ่มเติม

นอกจากนี้รูปที่ 3 ยังพบว่า กำลังอัดของคอนกรีตจากเถ้าลอยแคลเซียมสูงผสมกากดินล้างร้อยละ 10 (ส่วนผสม 90FA10CR0SF) มีค่าใกล้เคียงกับตัวอย่างควบคุม โดยมีค่ากำลังอัดสูงถึง 42.0 เมกะปาสคาล เมื่อเทียบกับส่วนผสมควบคุม (ส่วนผสม 100FA0CR0SF) ที่ให้ค่ากำลังอัดเท่ากับ 41.2 เมกะปาสคาล อาจเป็นไปได้ว่าปริมาณการแทนที่ด้วยกากดินล้างที่ร้อยละ 10 เป็นปริมาณที่เหมาะสมต่อการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีต



รูปที่ 3 กำลังอัดของคอนกรีตที่มีการแข็งตัวเร็วที่อายุ 7 วัน

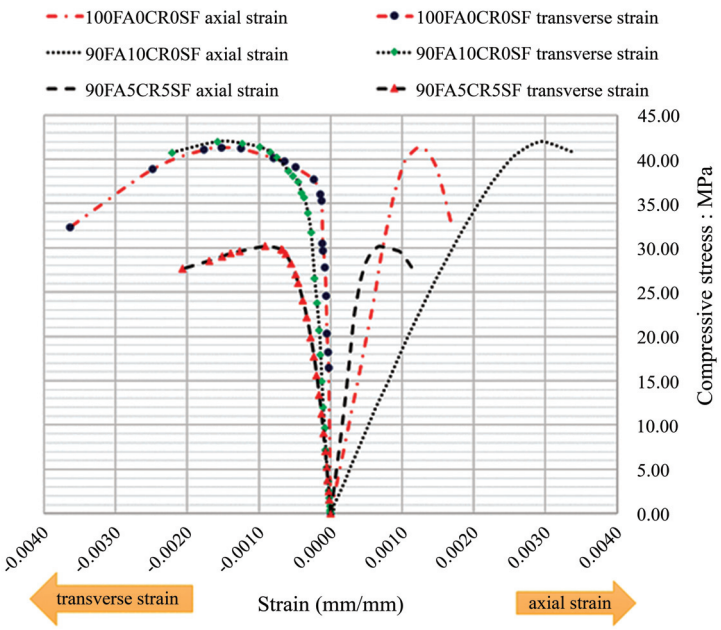
ตารางที่ 3 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและอัตราส่วนปัวซองของคอนกรีตที่มีการแข็งตัวเร็วที่อายุ 7 วัน

Symbol	Modulus of Elasticity (GPa)	Poisson′s ratio
100FA0CR0SF	34.4	0.26
90FA10CR0SF	30.9	0.28
90FA5CR5SF	22.5	0.20
80FA20CR0SF	25.0	0.25
80FA15CR5SF	15.0	0.23
80FA10CR10SF	7.6	0.33
70FA30CR0SF	19.3	0.26
70FA25CR5SF	16.0	0.25
70FA20CR10SF	14.8	0.18
70FA15CR15SF	15.7	0.21

ISSN 2672-9369 (Online)

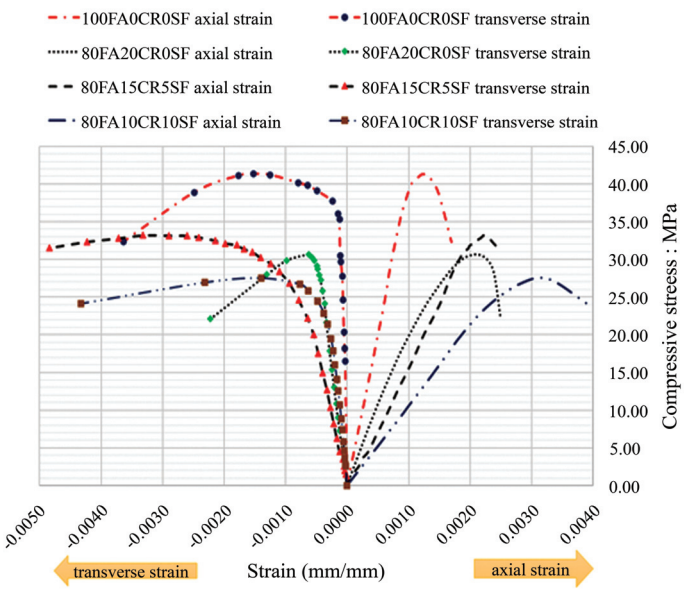
2. ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและอัตราส่วนปัวซอง

ผลการทดสอบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและอัตราส่วนปัวซองของคอนกรีตที่มีการแข็งตัวเร็วจากเถ้าลอยแคลเซียมสูงแทนที่ด้วยกากดินล้างและซิลิกาฟูมดังตารางที่ 3 พบว่า การใช้กากดินล้างและซิลิกาฟูมแทนที่เถ้าลอยแคลเซียมสูงส่งผลให้โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตมีแนวโน้มลดลง ซึ่งผลการทดสอบสอดคล้องกับกำลังอัดของคอนกรีตจากเถ้าลอยแคลเซียมสูง (รูปที่ 3) และความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตจากเถ้าลอยแคลเซียมสูงแทนที่ด้วยกากดินล้างและซิลิกาฟูม (รูปที่ 4 – 6) ซึ่งการแทนที่ด้วยกากดินล้างและซิลิกาฟูมในเถ้าลอยแคลเซียมสูงเพื่อคอนกรีตที่มีการแข็งตัวเร็วพบว่า เส้นความชันมีแนวโน้มลดลงซึ่งการที่ความชันลดลงและความเครียดเพิ่มขึ้นแสดงถึงคอนกรีตจะมีความเหนียวมากขึ้นและเป็นข้อดีของโครงสร้างคอนกรีต



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตที่มีการแข็งตัวเร็วจากเถ้าลอยแคลเซียมสูงแทนที่ด้วยกากดินล้างและซิลิกาฟูม (ร้อยละ 10) ที่อายุ 7 วัน

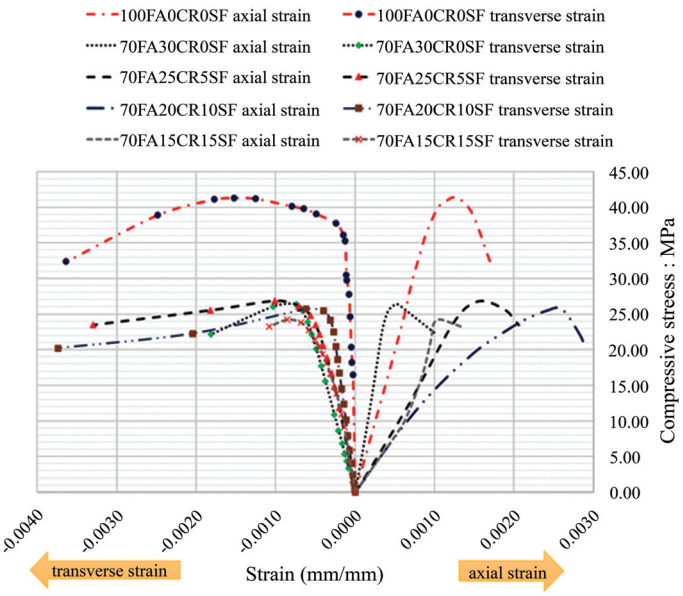
ส่วนผลการทดสอบอัตราส่วนปัวซองของคอนกรีตที่มีการแข็งตัวเร็วจากเถ้าลอยแคลเซียมสูงแทนที่ด้วยกากดินล้างและซิลิกาฟูมพบว่า กราฟมีลักษณะเป็นไปในทิศทางเดียวกับความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต จากตารางที่ 3 จะเห็นได้ว่า การใช้กากดินล้างและซิลิกาฟูมทำให้อัตราส่วนปัวซองของคอนกรีตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น อาจเนื่องจากปริมาณที่เพิ่มขึ้นของกากดินล้างทำให้เนื้อคอนกรีตมีความไม่เป็นเนื้อเดียวกันเพิ่มขึ้น จึงอาจส่งผลต่อพฤติกรรมการเสียรูปร่างของคอนกรีต ซึ่งโดยปกติคอนกรีตกำลังสูงจะมีค่าอัตราส่วนปัวซองระหว่าง 0.20 – 0.25 [12] และจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าลอยแคลเซียมสูงมีค่าอัตราส่วนปัวซองระหว่าง 0.21 – 0.31 [13] ส่วนคอนกรีตปกติจะมีอัตราส่วนปัวซองระหว่าง 0.11 – 0.21 [6], [11] จากผลการทดสอบดังตารางที่ 3 จะเห็นได้ว่า ส่วนผสมที่มีค่ามากกว่า 0.31 อาจหมายถึงคอนกรีตมีพฤติกรรมการเสียรูปร่างแบบบวมตัวหรือขยายตัวด้านข้างมากซึ่งสอดคล้องกับค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตที่กราฟจะมีลักษณะคว่ำเป็นอย่างมาก



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตที่มีการแข็งตัวเร็วจากเถ้าลอยแคลเซียมสูงแทนที่ด้วยกากดินล้างและซิลิกาฟูม (ร้อยละ 20) ที่อายุ 7 วัน

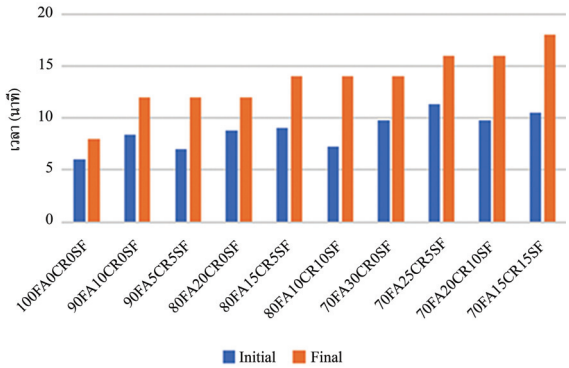
3. ระยะเวลาการก่อตัว

ผลการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตที่มีการแข็งตัวเร็วจากเถ้าลอยแคลเซียมสูงแทนที่ด้วยกากดินล้างและซิลิกาฟูมดังรูปที่ 7 พบว่า ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นของคอนกรีตอยู่ในช่วง 6 - 11 นาที และระยะเวลาการก่อตัวเริ่มปลายของคอนกรีตอยู่ในช่วง 8 - 18 นาที เมื่อพิจารณาปัจจัยของการใช้กากดินล้างและซิลิกาฟูมต่อระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตพบว่า การใช้กากดินล้างและซิลิกาแทนที่เถ้าลอยแคลเซียมสูงสำหรับการผลิตคอนกรีตช่วยชะลอระยะเวลาการก่อตัวได้ อาจเนื่องจากการใช้กากดินล้างและซิลิกาฟูมช่วยเพิ่มอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาในระบบของคอนกรีตที่มีการแข็งตัวเร็ว ซึ่งโดยปกติแล้วอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ระยะเวลาการก่อตัวของวัสดุอัลคาไลเพิ่มขึ้น [10]



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตที่มีการแข็งตัวเร็วจากเถ้าลอยแคลเซียมสูงแทนที่ด้วยกากดินล้างและซิลิกาฟูม (ร้อยละ 30) ที่อายุ 7 วัน

ISSN 2672-9369 (Online)



รูปที่ 7 ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและก่อตัวเริ่มปลายของคอนกรีตที่มีการแข็งตัวเร็ว

สรุปผล

1. การใช้กากดินล้างและซิลิกาฟูมแทนที่เถ้าลอยแคลเซียมสูงส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตมีแนวโน้มลดลงส่วนผสม เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณสารตั้งต้นที่มีความสามารถในการทำปฏิกิริยาต่ำ
2. กำลังอัดของคอนกรีตที่มีการแข็งตัวเร็วผสมกากดินล้างร้อยละ 10 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยสามารถให้ค่ากำลังอัดสูงถึง 42.0 เมกะปาสคาล เมื่อเทียบกับส่วนผสมควบคุมที่ให้ค่ากำลังอัดเท่ากับ 41.2 เมกะปาสคาล ที่อายุการบ่ม 7 วัน
3. การใช้กากดินล้างและซิลิกาฟูมแทนที่เถ้าลอยแคลเซียมสูงส่งผลให้โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่มีการแข็งตัวเร็วมีแนวโน้มลดลง แต่ในทางตรงกันข้ามอัตราส่วนปัวซองของคอนกรีตที่มีการแข็งตัวเร็วมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณที่เพิ่มขึ้นของกากดินล้างส่งผลให้คอนกรีตมีความไม่เป็นเนื้อเดียวกันเพิ่มขึ้น จึงส่งผลต่อพฤติกรรมการเสียรูปร่างแบบบวมตัวหรือขยายตัวด้านข้างมาก
4. โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่มีการแข็งตัวเร็วมีค่าระหว่าง 7.6 - 34.4 จิกะปาสคาล ส่วนอัตราส่วนปัวซองของคอนกรีตที่มีการแข็งตัวเร็วมีค่าระหว่าง 0.18 - 0.33

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณหน่วยวิจัยเทคโนโลยีวัสดุก่อสร้างอย่างยั่งยืน สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา ที่อนุเคราะห์วัสดุและเครื่องมือในการดำเนินงานวิจัย

References

[1] Davidovits, J. (1991). Geopolymers: Inorganic Polymeric New Materials. **Journal of Thermal Analysis**. Vol. 37, pp. 1633-1656. DOI: 10.1007/BF01912193

[2] Chindaprasirt, P. and Rattanasak, U. (2010). Utilization of Blended Fluidized Bed Combustion (FBC) Ash and Pulverized Coal Combustion (PCC) Fly Ash in Geopolymer. **Waste Management**. Vol. 30, Issue 4, pp. 667-672. DOI: 10.1016/j.wasman.2009.09.040

[3] Pangdaeng, S., Phoo-ngernkham, T., Sata, V., and Chindaprasirt, P. (2014). Influence of Curing Conditions on Properties of High Calcium Fly Ash Geopolymer Containing Portland Cement as Additive. **Materials and Design**. Vol. 53, pp. 269-274. DOI: 10.1016/j.matdes.2013.07.018

[4] Abrams, D. A. (1918). **Design of Concrete Mixtures**. Lewis Institute, Chicago

[5] Chindaprasirt, P. and Jaturapitakkul, C. (2012). **Cement Pozzolan and Concrete**. Thailand Concrete Association, Bangkok

[6] Thumrongvut, J., Seangatith, S., and Kumlue, K. (2013). Tests on Structural Behaviors of Precast Partially-Prestressed Concrete Beam's Joints. **RMUTI JOURNAL**. Vol. 6, No. 2, pp. 15-30. (in Thai)

[7] ASTM C618-15. (2015). **Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete**. Annual Book of ASTM Standard. Vol.04.02.

[8] ASTM C39. (2001). **Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens**. Annual Book of ASTM Standard. Vol.04.02.

[9] ASTM C469. (2002). **Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression**. Annual Book of ASTM Standard. Vol.02.01.

[10] Chindaprasirt, P., De Silva, P., Sagoe-Crenstil, K., and Hanjitsuwan, S. (2012). Effect of SiO_2 and Al_2O_3 on the Setting and Hardening of High Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Systems. **Journal of Materials Science**. Vol. 47, No. 12, pp. 4876-4883. DOI: 10.1007/s10853-012-6353-y

[11] Kroehong, W., Sinsiri, T., Jaturapitakkul, C., and Chindaprasirt, P. (2011). Effect of Palm Oil Fuel Ash Fineness on the Microstructure of Blended Cement Paste. **Construction and Building Materials**. Vol. 25, Issue 11, pp. 4095-4104. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.04.062

[12] Sofi, M., van Deventer, J. S. J., Mendis, P. A., and Lukey, G. C. (2007). Engineering Properties of Inorganic Polymer Concretes (IPCs). **Cement and Concrete Research**. Vol. 37, Issue 2, pp. 251-257. DOI: 10.1016/j.cemconres.2006.10.008

[13] Phoo-ngernkham, T., Phiangphimai, C., Damrongwiriyanupap, N., Hanjitsuwan, S., Thumrongvut, J., and Chindaprasirt, P. (2018). A Mix Design Procedure for Alkali-Activated High-Calcium Fly Ash Concrete Cured at Ambient Temperature. **Advances in Materials Science and Engineering**. Vol. 2018, pp. 1-13. DOI: 10.1155/2018/2460403

ISSN 2672-9369 (Online)

การศึกษาขนาดที่เหมาะสมของระบบผลิตน้ำร้อนจากปั๊มความร้อนเสริมด้วยการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์: กรณีศึกษาโรงแรมไก่นครนครหลวงเวียงจันทน์ ประเทศลาว

An Optimization Study of Hot Water Generation from Solar PV/T Boosted Heat Pump; Case Study of Kai Nakorn Hotel, Vientiane Capital, Laos PDR

Piyaphone Mungkhaly[1] สราวุธ พลวงษ์ศรี[1] และสุลักษณา มงคล[1*]
Piyaphone Mungkhaly[1] Sarawut Polvongsri[1] and Sulaksana Mongkon[1*]

Received: *March 22, 2022;* ***Revised:*** *May 10, 2022;* ***Accepted:*** *May 12, 2022*

บทคัดย่อ

โรงแรมไก่นคร ประเทศลาว มีการใช้น้ำร้อน 2,000 ลิตรต่อวันที่อุณหภูมิประมาณ 60 - 65 ^{o}C โดยใช้ขดลวดไฟฟ้าขนาด 20 กิโลวัตต์ ใช้พลังงานไฟฟ้า 95.54 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อวัน ซึ่งสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าเป็นจำนวนมาก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาขนาดระบบผลิตน้ำร้อนจากปั๊มความร้อนเสริมด้วยการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar PV/T Boosted Heat Pump) ที่เหมาะสมกับการใช้น้ำร้อนในโรงแรมไก่นคร โดยงานส่วนแรกทำการศึกษาและทดสอบสมรรถนะทางด้านไฟฟ้าและความร้อนของแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar PV/T) ขนาด 330 วัตต์ ตามมาตรฐานการทดสอบ เพื่อสร้างสมการทำนายสมรรถนะของแผง จากการศึกษาพบว่า สมรรถนะทางความร้อนของแผง Solar PV/T มีค่า $F_R(\tau\alpha)_e$ และค่า F_RU_L เท่ากับ 0.4018 และ 10.466 วัตต์ต่อตารางเมตร•องศาเซลเซียส ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของแผง Solar PV/T มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 16 % และได้สมการทำนายสมรรถนะของระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump การศึกษาส่วนที่สองจะใช้สมการที่ได้จากส่วนที่ 1 มาทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อออกแบบระบบและวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์เพื่อเลือกขนาดที่เหมาะสมของระบบเพื่อทดแทนการใช้ระบบเดิมที่มีการใช้ขดลวดไฟฟ้าขนาด 20 กิโลวัตต์ ผลิตน้ำร้อน

[1] *วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่*
[1] *School of Renewable Energy, Maejo University Chiangmai*
[*] *Corresponding Author, Tel. 08 1907 4067, E - mail: s_mongkon@hotmail.com*

อุณหภูมิ 60 – 65 °C จำนวน 2,000 ลิตรต่อวัน จากการศึกษาพบว่า ระบบทำน้ำร้อนที่ใช้แผง Solar PV/T ขนาด 330 วัตต์ จำนวน 12 แผง ร่วมกับปั๊มความร้อนขนาด 17.8 กิโลวัตต์ เหมาะสมที่สุด การใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานลดลง 28,072.71 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อปี หรือคิดเป็นค่าไฟฟ้าที่ประหยัดได้เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้งานขดลวดไฟฟ้าเท่ากับ 84,779.58 บาทต่อปี ใช้เงินลงทุน 604,180 บาท และมีระยะเวลาคืนทุนเท่ากับ 7.13 ปี

คำสำคัญ : สมรรถนะ; แผงผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์; น้ำร้อน; ปั๊มความร้อน; ระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับปั๊มความร้อน

Abstract

Kai Nakorn Hotel, Laos PDR has a demand for hot water with a temperature of 60 - 65 °C and an amount of 2,000 L/day for consumption. In the hot water production, a 20 kW heater coil was used resulting to 95.54 kWh/day of electricity consumption, which is a high energy use. Therefore, this research aimed to study an optimum size of the hot water production system from Solar PV/T Boosted Heat Pump for hot water use in the Kai Nakorn Hotel in order to reduce the amount of electricity consumption. The first part was testing the electrical and thermal performance of the Solar PV/T following Standard testing to simulate a performance prediction equation of a 330 W_p Solar PV/T. The results revealed that the thermal performance of Solar PV/T panels obtained $F_R(\tau\alpha)_e$ and F_RU_L equal to 0.4018 and 10.466 W/m^2•°C, respectively. The averaged power generation efficiency of solar PV/T panel was 16 % and an empirical equation for prediction performance of hot water generation with Solar PV/T Boosted Heat Pump was obtained. In the second part of the study, the equations that were obtained from the first part of the study were used to create a mathematical model to design an optimized system and analyze the cost-effectiveness for choosing the appropriate size of the hot water use in hotel. The conventional hot water production system used an electric heater of 20 kW to produce 2,000 L/day hot water at a temperature of 60 - 65 °C. The results showed that the optimized system used 330 W_p solar PV/T with 12 panels together with a 17.8 kW_{th} heat pump. The electricity consumption was able to reduce by 28,072.71 kWh/year, or equivalent to the electricity costs of 86,952.84 Baht/year. The investment was 604,180 Baht and the payback period was 7.13 years.

Keywords: Performance; Solar Panel; Hot Water; Heat Pump; Solar PV/T Boosted Heat Pump

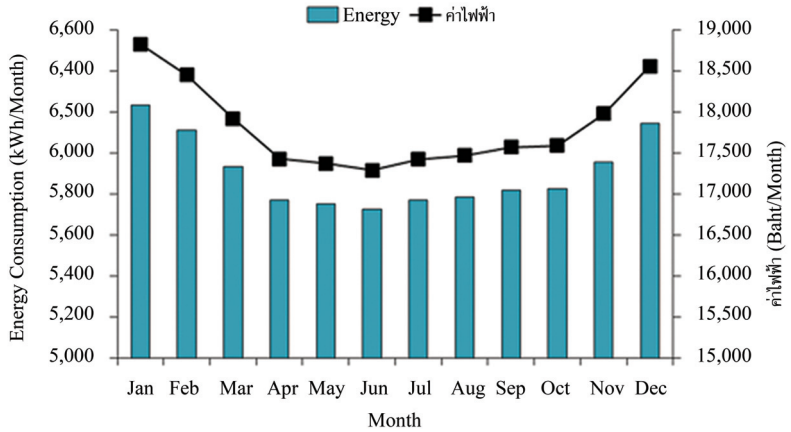
บทนำ

ปัจจุบันมีความต้องการใช้น้ำร้อนเพิ่มขึ้นทั้งในบ้านที่อยู่อาศัย โรงแรม โรงพยาบาล รวมทั้งภาคอุตสาหกรรมต่าง ๆ การผลิตน้ำร้อนเดิมนิยมใช้เครื่องทำน้ำร้อนแบบขดลวดไฟฟ้าเนื่องจากมีราคาถูก หาซื้อง่ายและมีการติดตั้งไม่ซับซ้อน แต่การใช้ขดลวดทำให้มีการใช้พลังงานไฟฟ้าในปริมาณมากทำให้ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานสูงตามไปด้วย ในการลดค่าใช้จ่ายในส่วนการผลิตน้ำร้อนมีหลากหลายวิธี เช่น การใช้ระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ [1] การใช้ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ [2] การใช้ปั๊มความร้อนในการผลิตน้ำร้อน [3] เป็นต้น โดยการเลือกใช้จะขึ้นอยู่กับหลาย ๆ ปัจจัยทั้งด้านต้นทุน และความเสถียรในการผลิตน้ำร้อนโดยเฉพาะกรณีใช้ระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์นั้น ปัญหาที่พบคือ ในวันที่ท้องฟ้ามีเมฆบังหรือวันที่มีฝนตกจะไม่สามารถผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ได้ตามที่ต้องการ จึงมีงานวิจัยมากมายที่ศึกษาการแก้ปัญหาดังกล่าว เช่น การใช้ระบบ

ISSN 2672-9369 (Online)

ผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับปั๊มความร้อน [4] ซึ่งก็สามารถลดปริมาณพลังงานไฟฟ้าลงไปได้ในระดับหนึ่ง นอกจากเทคโนโลยีข้างต้นแล้วยังมีอีกเทคโนโลยีที่สามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานลงได้เป็นจำนวนมาก เช่น การใช้เทคโนโลยีที่นำแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตไฟฟ้ามาติดตั้งระบบระบายความร้อนด้วยน้ำเข้าไปด้านหลังแผงทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนจากแผงไปสู่น้ำทำให้น้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้น ส่วนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ก็จะมีอุณหภูมิแผงลดลงช่วยให้สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้น [5] สามารถผลิตได้ทั้งพลังงานไฟฟ้าและน้ำร้อนช่วยลดการใช้พลังงานไฟฟ้า และช่วยลดปริมาณแก๊สเรือนกระจกและเชื้อเพลิงฟอสซิลอื่น ๆ ซึ่งเทคโนโลยีดังกล่าวเรียกว่า แผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar PV/T) [6] นอกจากนี้ยังมีการใช้ปั๊มความร้อนในการผลิตน้ำร้อนที่พบว่า ใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำกว่าขดลวดความร้อนประมาณ 2 - 3 เท่า [3] และยังมีหลายงานวิจัยที่มีการนำเอาปั๊มความร้อนและแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ [7] - [8] มาทำงานร่วมกันเรียกว่า ระบบผลิตน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อนเสริมด้วยการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ โดยระบบดังกล่าวถูกพัฒนามาจากระบบผลิตน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อนเสริมด้วยตัวเก็บรังสีอาทิตย์ [9] ที่มีรูปแบบการทำงานของระบบคือ ใช้ความร้อนที่ได้จากพลังงานแสงอาทิตย์ไปเป็นแหล่งความร้อนให้กับปั๊มความร้อน และเป็นการเพิ่มสมรรถนะให้ปั๊มความร้อนอีกด้วย งานวิจัยของ [10] ได้จำลองระบบผลิตน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อนเสริมพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ในโรงฆ่าสัตว์ขนาดเล็ก โดยใช้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์จำนวน 1 - 5 แผง ปริมาณน้ำในถังเก็บน้ำร้อนคือ 300 - 1,200 ลิตร ปั๊มความร้อนใช้สารทำงานแบบผสม R22 20 % R124 57 % และ R152a 23 % เป็นสารทำงานพบว่าระบบสามารถผลิตน้ำร้อนได้สูงสุดที่ 60 ^{o}C และมีค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะอยู่ระหว่าง 4.1 - 4.6 [11] ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำงานร่วมกับปั๊มความร้อน ทำการติดตั้งท่อที่บรรจุสารทำงานไว้ด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีขนาด 4.59 ตารางเมตร โดยใช้ปั๊มความร้อนขนาด 2.12 กิโลวัตต์ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (COP) มีค่าประมาณ 3.8 - 8.4 ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 13.7 % และทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลอง

โรงแรมไก่นครในนครหลวงเวียงจันทน์ ขนาดจำนวนห้องพัก 30 ห้อง จากข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าข้อมูลจากบิลค่าไฟฟ้าของโรงแรมย้อนหลังตั้งแต่เดือนมกราคม - ธันวาคม ปี พ.ศ. 2563 ดังรูปที่ 1 พบว่าเดือนมกราคมมีการใช้พลังงานไฟฟ้าที่สูงที่สุด 6,235 กิโลวัตต์ชั่วโมง ส่วนเดือนมิถุนายนมีการใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำสุด 5,725 กิโลวัตต์ชั่วโมง โดยตลอดปี พ.ศ. 2563 มีการใช้พลังงานไฟฟ้าประมาณ 70,823 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อปี คิดเป็นค่าไฟฟ้า 213,885.46 บาทต่อปี



รูปที่ 1 ข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าในปี พ.ศ. 2563

เมื่อแยกเป็นการใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบพบว่า มีการใช้พลังงานไฟฟ้าในการผลิตน้ำร้อนมากที่สุด 2,961.74 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อเดือน หรือ 34,812.10 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อปี คิดเป็น 49.15 % รองลงมาเป็นเครื่องปรับอากาศใช้พลังงานไฟฟ้าประมาณ 2,276.96 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อเดือน หรือ 27,323.51 กิโลวัตต์

ชั่วโมงต่อปี คิดเป็น 38.58 % และส่วนอื่น ๆ ใช้พลังงานไฟฟ้าประมาณ 8,687.39 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อปี คิดเป็น 12.27 % ซึ่งจากข้อมูลจะพบว่ามีการใช้พลังงานในการผลิตน้ำร้อนค่อนข้างสูงเนื่องจากมีการใช้ขดลวดไฟฟ้าขนาด 20 กิโลวัตต์ เพื่อผลิตน้ำร้อนปริมาณ 2,000 ลิตรต่อวัน ที่อุณหภูมิประมาณ 60 - 65 ^{o}C สำหรับใช้ในการอุปโภค โดยค่าใช้จ่ายส่วนนี้ทำให้ต้นทุนของโรงแรมสูงตามไปด้วย ดังนั้นโรงแรมจึงมีความต้องการนำเทคโนโลยีด้านพลังงานทดแทนเข้ามาช่วยแก้ปัญหาดังกล่าว และจากงานวิจัยต่าง ๆ ที่ได้กล่าวมาข้างต้น ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะศึกษาโดยใช้ข้อมูลจากการทดสอบสมรรถนะของระบบร่วมกับการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อประเมินขนาดของระบบผลิตน้ำร้อนจากปั๊มความร้อนเสริมด้วยการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar PV/T Boosted Heat Pump) ที่เหมาะสมกับปริมาณความต้องการน้ำร้อนของโรงแรม โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดการใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบผลิตน้ำร้อนของโรงแรมไก่นครในนครหลวงเวียงจันทน์

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการทดสอบอุปกรณ์ในระบบเพื่อสร้างสมการทำนายสมรรถนะแล้วนำสมการที่ได้ไปใช้ในการออกแบบระบบผลิตน้ำร้อนจากปั๊มความร้อนเสริมด้วยการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar PV/T Boosted Heat Pump) โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อลดการใช้พลังงานไฟฟ้าของโรงแรม โดยมีรายละเอียดและขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยหลัก ๆ 2 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1 ทำการทดสอบและสร้างสมการทำนายสมรรถนะแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ขนาด 300 W_p พื้นที่แผง 1.88 m^2 โดยทำการวิเคราะห์ข้อมูลด้านต่าง ๆ ทั้งในด้านประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าและสมรรถนะเชิงความร้อน ซึ่งทดสอบตามมาตรฐานของการทดสอบ ASHRAE STANDARD 93-2003 ณ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่ ปรับอัตราการไหลต่อพื้นที่ของน้ำที่ผ่านแผง 0.02 กิโลกรัมต่อวินาที•ตารางเมตรควบคุมอุณหภูมิน้ำเข้าแผงตั้งแต่ 35 - 65 ^{o}C โดยเพิ่มขึ้นทีละ 5 ^{o}C เก็บข้อมูลอุณหภูมิน้ำเข้าและออกจากแผง Solar PV/T อุณหภูมิอากาศแวดล้อม ค่ารังสีอาทิตย์เพื่อคำนวณสมรรถนะทางความร้อนและไฟฟ้าของแผง Solar PV/T ตามสมการที่ (1) - (2) โดยมีรายละเอียดระบบที่ใช้ในการทดสอบดังรูปที่ 2

$$\eta_{Coll} = \dot{m}C_P\left(T_{f,o} - T_{f,i}\right) = F_R(\tau\alpha)_e - \frac{F_R U_L\left(T_{f,i} - T_a\right)}{I_T} \tag{1}$$

เมื่อ

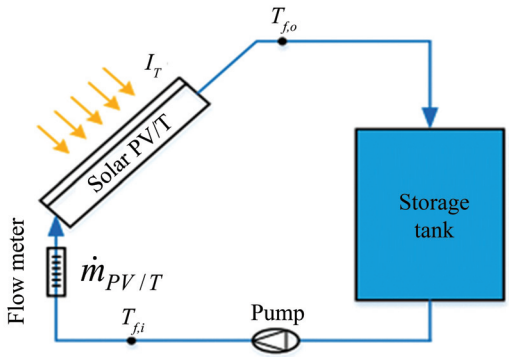
η_{Coll}	คือ	ประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์
$\dot{m}$	คือ	อัตราการไหลเชิงมวลของของไหล (กิโลกรัมต่อวินาที)
C_P	คือ	ความจุความร้อนจำเพาะของของไหล (กิโลจูลต่อกิโลกรัม•องศาเซลเซียส)
$T_{f,o}$	คือ	อุณหภูมิของไหลขาออกตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (องศาเซลเซียส)
$T_{f,i}$	คือ	อุณหภูมิของไหลขาเข้าตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (องศาเซลเซียส)
$(\tau\alpha)_e$	คือ	ผลคูณประสิทธิผลของค่าส่งผ่านและดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์
U_L	คือ	สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนรวมของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (วัตต์ต่อตารางเมตร•องศาเคลวิน)
F_R	คือ	ค่าแฟกเตอร์การดึงความร้อน (Heat Removal Factor)
I_T	คือ	ค่ารังสีอาทิตย์ที่ตกลงบนระนาบตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (วัตต์ต่อตารางเมตร)

$$\eta_{e,PV/T} = \frac{P_{PV/T}}{A_{PV} I_T} \tag{2}$$

ISSN 2672-9369 (Online)

เมื่อ

$\eta_{e,PV/T}$ คือ ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของแผง Solar PV/T (เปอร์เซ็นต์)
$P_{PV/T}$ คือ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผง Solar PV/T (วัตต์)
A_{PV} คือ พื้นที่ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (ตารางเมตร)



รูปที่ 2 ระบบที่ใช้ในการทดสอบสมรรถนะของแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

นอกจากนี้ทำการทดสอบปั๊มความร้อนเพื่อสร้างสมการทำนายค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานของปั๊มความร้อน (EER) และกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเครื่องอัดความดัน (P_{Comp}) ของปั๊มความร้อนจากงานวิจัย [12] โดยในการทดสอบใช้ปั๊มความร้อนขนาด 17.8 กิโลวัตต์ ใช้สารทำงาน R134a เพื่อนำไปออกแบบในขั้นตอนต่อไป

ส่วนที่ 2 ใช้สมการสมรรถนะของระบบและอุปกรณ์จากส่วนที่ 1 นำมาหาขนาดของระบบผลิตน้ำร้อนจากปั๊มความร้อนเสริมด้วยการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar PV/T Boosted Heat Pump) ที่เหมาะสมโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยจะใช้ข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าและน้ำร้อนรวมถึงใช้ค่ารังสีอาทิตย์และอุณหภูมิแวดล้อมที่นครหลวงเวียงจันทน์ เพื่อมาวิเคราะห์พลังงานไฟฟ้าที่สามารถลดลงได้เมื่อเปรียบเทียบกับระบบเดิมและผลความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์จะทำการวิเคราะห์ตามสมการที่ (3) - (5) โดยระบบที่ใช้ในการศึกษาดังรูปที่ 3 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์จะป้อนให้กับอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบโดยผ่านอินเวอร์เตอร์ ซึ่งถ้าหากกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากพลังงานแสงอาทิตย์ไม่เพียงพอก็จะมีการดึงไฟฟ้าจากระบบสายส่งพื้นฐานเข้ามาช่วยในการป้อนพลังงานไฟฟ้าให้แก่ระบบดังกล่าว

$$\text{ระยะเวลาคืนทุน} = \frac{\text{มูลค่าในการลงทุนรวม}}{\text{ผลตอบแทนสุทธิสะสมรายปี}} \tag{3}$$

มูลค่าปัจจุบันสุทธิ คำนวณจากสมการที่ (4)

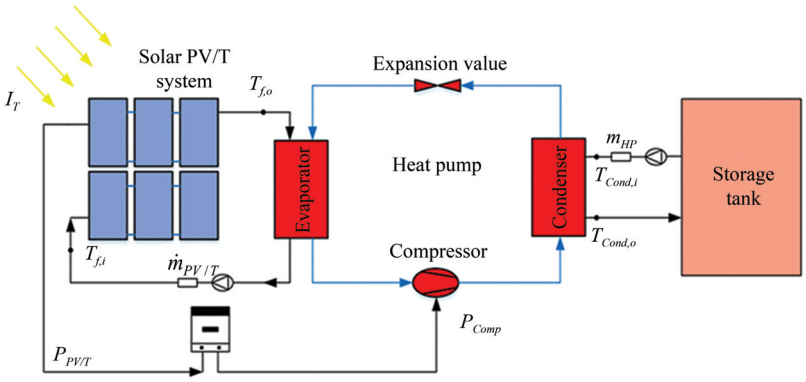
$$NPV = \sum_{n=1}^{N} \frac{R_n - C_n}{(1+i)^n} - TIC \tag{4}$$

เมื่อ

R_n คือ ผลตอบแทนในปีที่ n (บาท)
C_n คือ ค่าใช้จ่ายในปีที่ n (บาท)
N คือ ระยะเวลาของโครงการ
i คือ อัตราส่วนลด (เปอร์เซ็นต์)
TIC คือ เงินลงทุนทั้งหมด ณ เวลาปัจจุบัน (บาท)

อัตราผลตอบแทนการลงทุน (Internal Rate of Return: IRR) คือค่า i ที่ทำให้ NPV = 0 คำนวณจากสมการที่ (5)

$$\sum_{n=1}^{N} \frac{R_n - C_n}{(1+i)^n} - TIC = 0 \tag{5}$$



รูปที่ 3 ระบบผลิตน้ำร้อนจากปั๊มความร้อนเสริมด้วยการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

ผลการวิจัย

สมรรถนะทางไฟฟ้าและความร้อนของแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

การทดสอบสมรรถนะทางด้านความร้อนของแผง Solar PV/T ทดสอบตามมาตรฐาน ASHREA STANDARD 93-2003 โดยทำการควบคุมอัตราการไหลของน้ำผ่านแผงตามมาตรฐานการทดสอบที่ 0.02 กิโลกรัมต่อวินาที•ตารางเมตร ผลการทดสอบดังรูปที่ 4 ซึ่งเมื่ออุณหภูมิน้ำที่เข้าแผง Solar PV/T สูงขึ้นจะส่งผลทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของแผงลดลงเนื่องจากมีการสูญเสียความร้อนสู่สิ่งแวดล้อมมากขึ้น สมรรถนะของแผง Solar PV/T มีค่า $F_R(\tau\alpha)_e$ = 0.4018 และ F_RU_L = 10.466 วัตต์ต่อตารางเมตร•องศาเซลเซียส ซึ่งทำให้ได้สมการทำนายอัตราการถ่ายเทความร้อนของแผง Solar PV/T ดังสมการที่ (6)

$$Q_{PV/T} = A_{PV/T}\,[(0.4018\ I_T) - (10.466\ (T_{f,i} - T_a))] \tag{6}$$

จากรูปที่ 5 แสดงกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของแผง Solar PV/T ขนาดกำลังการผลิต 330 วัตต์ ตั้งแต่เวลา 09.00 - 16.00 น. กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้มีค่าเปลี่ยนไปตามค่ารังสีอาทิตย์ โดยมีค่าสูงสุดที่ 235.40 วัตต์ ในช่วงเวลา 12.15 น. และมีค่าเฉลี่ย 186.60 วัตต์ คิดเป็นประสิทธิภาพทางไฟฟ้าเฉลี่ย 16 % และเมื่อพิจารณาประสิทธิภาพรวมของแผง Solar PV/T ตลอดทั้งวันพบว่ามีค่าเฉลี่ย 53.30 %

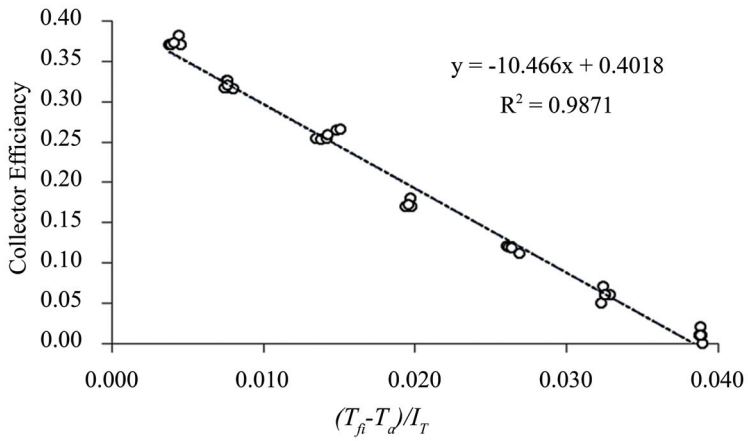
จากรูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแผง ค่ารังสีอาทิตย์ และกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้พบว่าเมื่อค่ารังสีอาทิตย์เพิ่มขึ้นจะสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากขึ้น จากการพิจารณาเส้นแนวโน้มความสัมพันธ์จะพบว่าอุณหภูมิแผงเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ โดยที่อุณหภูมิแผงจะขึ้นกับความร้อนสะสมที่ได้จากค่ารังสีอาทิตย์ อุณหภูมิแวดล้อม และอุณหภูมิน้ำที่เข้ามาระบายความร้อนของแผง Solar PV/T ดังนั้น ในการทำนายกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของ Solar PV/T ก่อนอื่นต้องทราบอุณหภูมิแผง ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (7)

$$T_{PV/T,Sim} = 1.0234 \text{ x } (I_T^{0.09286}) \text{ x } (T_a^{-0.17333}) \text{ x } (T_{f,i}^{1.0357}) \tag{7}$$

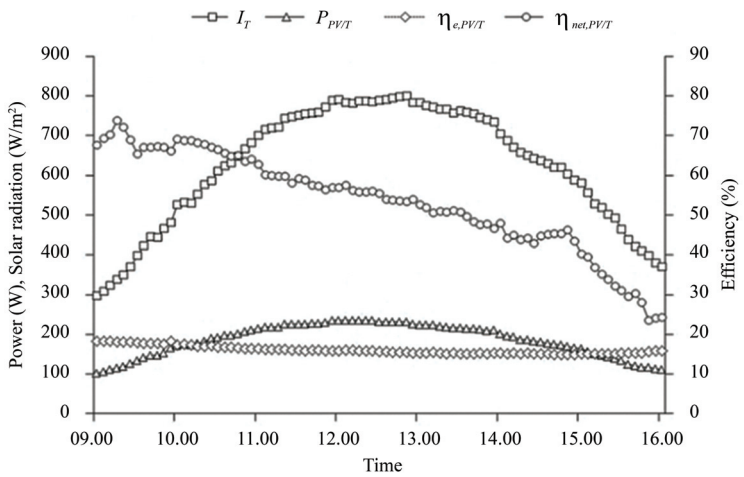
ISSN 2672-9369 (Online)

การทำนายผลกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของแผง Solar PV/T สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (8)

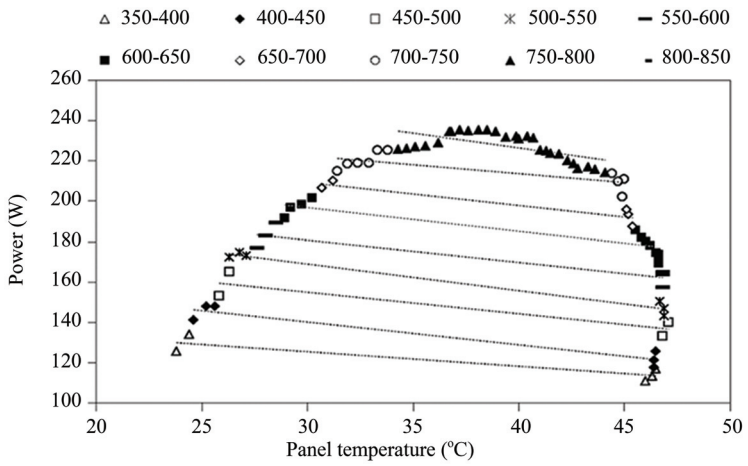
$$P_{PV/T,Sim} = 1.170 \times (I_T^{0.99252}) \times (T_a^{-0.15381}) \times (T_{f,i}^{0.17826}) \times (T_{PV/T}^{-0.38333}) \quad (8)$$



รูปที่ 4 สมรรถนะเชิงความร้อนของแผง Solar PV/T



รูปที่ 5 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าและประสิทธิภาพรวมของแผง Solar PV/T

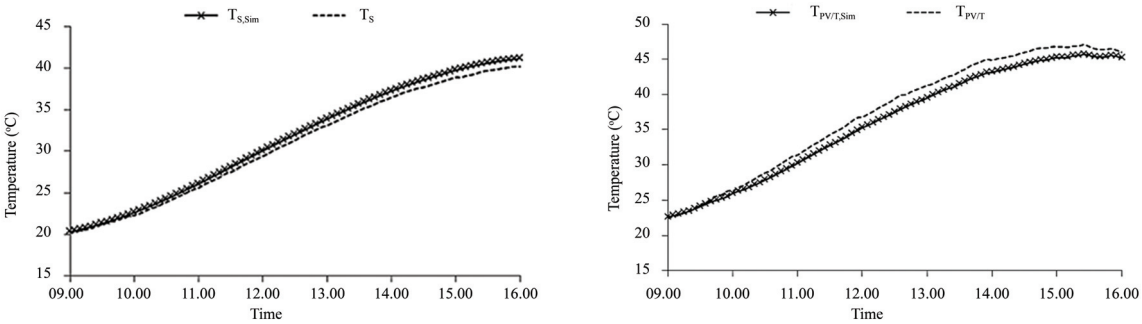


รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแผงกับกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ในแต่ละช่วงของค่ารังสีอาทิตย์

โดยเมื่อนำสมการที่ (6) - (8) คำนวณเพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองพบว่า มีค่าที่ใกล้เคียงกันและไปในทิศทางเดียวกัน โดยที่อุณหภูมิน้ำร้อนในถังจากการทดลองมีความคลาดเคลื่อนจากสมการตามสมการที่ (6) 1.85 เปอร์เซ็นต์ ในส่วนอุณหภูมิแผงและกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ สมการที่ (7) - (8) พบว่ามีความคลาดเคลื่อน 3.33 และ 2.37 เปอร์เซ็นต์ ดังรูปที่ 7 และในส่วนสมการทำนายค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานของปั๊มความร้อน (EER) และกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเครื่องอัดความดัน (P_{Comp}) ของปั๊มความร้อนจากงานวิจัย [12] สามารถหาได้จากสมการที่ (9) - (10)

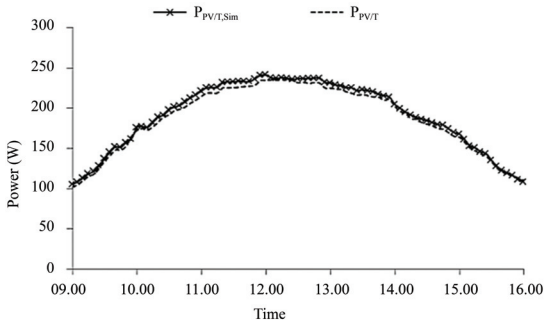
$$EER = 81.8378 \times (I_T^{0.016628}) \times (T_a^{0.19456}) \times (T_{f,o}^{-0.30281}) \times (T_S^{-0.77417}) \quad (9)$$

$$P_{Comp} = 267.31 \times (T_{f,o}^{0.20834}) \times (T_S^{0.56875}) \times (EER_{HP}^{-0.11192}) \quad (10)$$



(ก) อุณหภูมิน้ำในถังที่ได้จากการทดลองและจากการทำนาย

(ข) อุณหภูมิแผงที่ได้จากการทดลองและจากการทำนาย



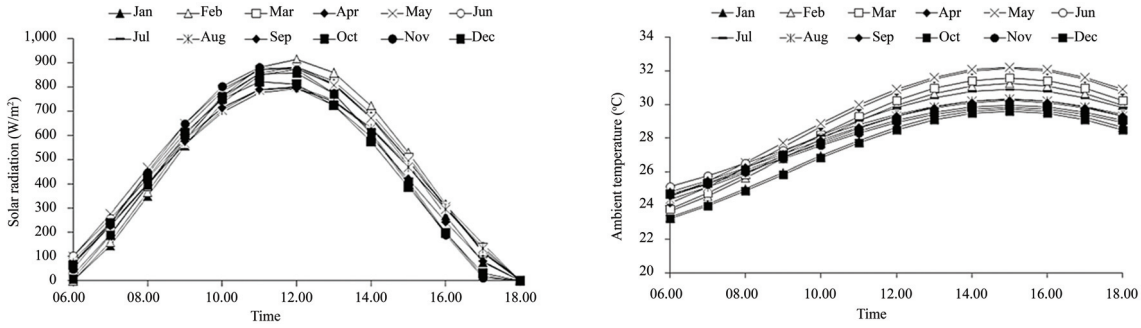
(ค) กำลังไฟฟ้าจากผลการทดลองและจากการทำนาย

รูปที่ 7 อุณหภูมิน้ำในถังอุณหภูมิแผงและกำลังไฟฟ้าที่ได้จากสมการทำนายและจากการทดลอง

ขนาดของระบบผลิตน้ำร้อนจากปั๊มความร้อนเสริมด้วยการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar PV/T Boosted Heat Pump) ที่เหมาะสมโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในการทำนายขนาดของระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump ที่เหมาะสมโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะใช้ค่ารังสีอาทิตย์และอุณหภูมิแวดล้อมของนครหลวงเวียงจันทน์ [13] ดังรูปที่ 8

ISSN 2672-9369 (Online)

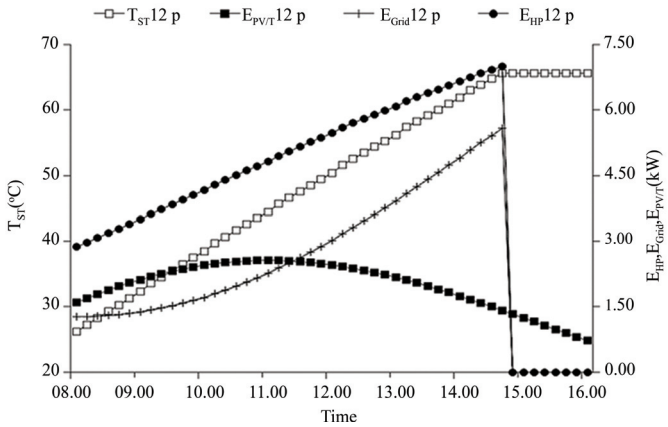


(ก) ค่ารังสีอาทิตย์ (ข) อุณหภูมิแวดล้อม

รูปที่ 8 ค่ารังสีอาทิตย์และอุณหภูมิแวดล้อมรายเดือนของนครหลวงเวียงจันทน์ ประเทศลาว

จากการตรวจวัดการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบขดลวดไฟฟ้าของโรงแรม พบว่ามีการใช้พลังงาน 95.54 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อวัน จากข้อมูลการผลิตน้ำร้อนของโรงแรมที่มีความต้องการใช้น้ำร้อนปริมาณ 2,000 ลิตรต่อวัน เพื่อผลิตน้ำร้อนอุณหภูมิตั้งแต่ 20 - 65 °C จากการคำนวณจะต้องใช้ปั๊มความร้อนขนาดอย่างน้อย 17.45 กิโลวัตต์ ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงเลือกใช้ปั๊มขนาด 17.8 กิโลวัตต์ ที่ใช้สารทำงาน R134a ที่มีขายตามท้องตลาดมาใช้ และใช้แผง Solar PV/T ขนาดกำลังการผลิต 330 วัตต์ต่อแผง ในการจำลองทางคณิตศาสตร์ระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump ได้ทำการปรับจำนวนแผง Solar PV/T ตั้งแต่จำนวน 10 12 14 และ 16 แผง โดยค่ารังสีอาทิตย์และอุณหภูมิแวดล้อมของนครหลวงเวียงจันทน์เดือนกันยายน เนื่องจากเป็นเดือนที่มีค่ารังสีอาทิตย์เฉลี่ยต่ำสุด ซึ่งพบว่าโรงแรมแห่งนี้มีการใช้น้ำร้อนส่วนมากในช่วงเวลา 07.00 - 08.00 น. และ 18.00 - 19.00 น. ดังนั้นในการทำนายด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะกำหนดให้ระบบทำงาน 08.00 - 16.00 น. โดยใช้อุณหภูมิน้ำในถังเริ่มต้นตามอุณหภูมิแวดล้อมในช่วงเวลานั้น ๆ เพื่อผลิตน้ำร้อนให้ได้อุณหภูมิที่ 65 °C และเพียงพอต่อการใช้น้ำในทั้ง 2 ช่วงเวลาดังกล่าว

จากรูปที่ 9 เป็นตัวอย่างผลการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump กรณีใช้แผง Solar PV/T จำนวน 12 แผง และปั๊มความร้อนขนาด 17.8 กิโลวัตต์ พบว่าในช่วงระบบเริ่มทำงานในเวลา 08.00 น. อุณหภูมิน้ำร้อนในถัง 26.2 °C ปั๊มความร้อนมีความต้องการกำลังไฟฟ้า 2.87 กิโลวัตต์ และจะมีความต้องการเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามอุณหภูมิน้ำร้อนในถังเก็บน้ำร้อนที่เพิ่มขึ้น จนเมื่อระบบสามารถผลิตน้ำร้อนได้ 65 °C เมื่อเวลา 14.40 น. ปั๊มความร้อนมีความต้องการกำลังไฟฟ้า 7.00 กิโลวัตต์ โดยใช้เวลาทำงานของระบบในการผลิตน้ำร้อน 6.66 ชั่วโมง คิดเป็นพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ 34.25 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อวัน ในขณะที่เมื่อพิจารณากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผง Solar PV/T จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่ารังสีอาทิตย์ โดยสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด 2.56 กิโลวัตต์ ที่เวลา 11.00 น. ซึ่งกรณีใช้แผง Solar PV/T จำนวน 12 แผง ทำให้ปั๊มความร้อนมีค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะอยู่ระหว่าง 1.74 - 4.95 เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ [14] และ [12] ดังตารางที่ 1 พบว่า มีค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะที่ใกล้เคียงกัน โดยในงานวิจัยของ [14] ระบบเดิมที่ใช้อากาศจ่ายให้ส่วนทำระเหยของปั๊มความร้อน (Air Source Heat Pump) มีค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะอยู่ระหว่าง 2.6 - 4.4 ในขณะที่เมื่อใช้น้ำร้อนที่ได้จากตัวเก็บรังสีอาทิตย์จ่ายให้ส่วนทำระเหยของปั๊มความร้อน (Solar Boosted Heat Pump) ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะเพิ่มขึ้นประมาณ 10 - 11 % โดยมีค่าระหว่าง 2.5 - 5.0 ซึ่งเปอร์เซ็นต์ที่เพิ่มขึ้นของค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะก็ใกล้เคียงกับงานวิจัยนี้ เพียงแต่ในงานวิจัยนี้ระบบเป็น Solar PV/T Heat Pump ซึ่งนอกจากจะทำให้สัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อนเพิ่มขึ้นแล้วแผง Solar PV/T ยังสามารถผลิตไฟฟ้าจ่ายให้กับปั๊มความร้อน ทำให้มีการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานลดลงประมาณ 80.50 % เมื่อเปรียบเทียบกับระบบที่ใช้ขดลวดไฟฟ้า ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับงานวิจัยของ [12] ที่ใช้แผง Solar PV/T Boosted Heat Pump



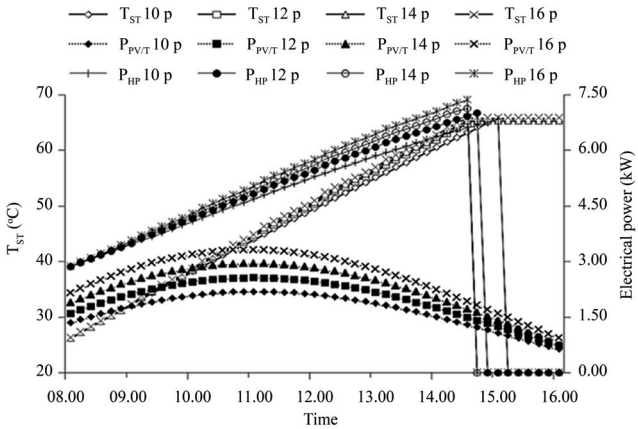
รูปที่ 9 ผลการจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่ใช้แผง Solar PV/T จำนวน 12 แผง

ตารางที่ 1 รายละเอียดข้อมูลในการเปรียบเทียบกับงานวิจัย

งานวิจัย	Air Source Heat Pump		Solar Boosted Heat Pump			COP เพิ่มขึ้น
	สารทำงาน	COP	สารทำงาน	ระบบที่ใช้	COP	%
[14]	-	2.6 - 4.4	-	Solar Collector Boosted Heat Pump	2.5 - 5.0	10 - 11
[7]	R134a	2.79 - 4.09	R134a	Solar PV/T Boosted Heat Pump	2.79 - 4.37	6 - 7
งานวิจัยนี้	R134a	2.79 - 4.09	R134a	Solar PV/T Boosted Heat Pump	1.74 - 4.90	11 - 12

เมื่อพิจารณาจำนวนแผงทั้งกรณี 10 12 14 และ 16 แผง พบว่าทุกกรณีสามารถผลิตน้ำร้อนที่ 65 ºC ได้ แต่จะใช้เวลาต่างกันส่งผลทำให้มีการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานแตกต่างกันไปด้วย โดยระบบที่ใช้จำนวนแผง Solar PV/T จำนวน 16 แผง ใช้เวลาในการทำงานน้อยสุด 6.50 ชั่วโมงต่อวัน รองลงมาเป็นจำนวน 14 12 และ 10 แผง ใช้เวลาในการทำงาน 6.50 6.66 และ 7.0 ชั่วโมงต่อวัน ตามลำดับ โดยทุกกรณีกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผง Solar PV/T จะแปรผันโดยตรงกับจำนวนแผง Solar PV/T โดยระบบที่ใช้แผง Solar PV/T จำนวน 16 แผง สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้มากที่สุด 18.86 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อวัน รองลงมาเป็นจำนวน 14 12 และ 10 แผง สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ 16.75 14.84 และ 12.97 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อวัน ตามลำดับ ดังรูปที่ 10 ในขณะที่ปั๊มความร้อนทำงานจะใช้พลังงานไฟฟ้าจากสองแหล่ง คือ พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผง Solar PV/T และระบบไฟฟ้าพื้นฐาน พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จะช่วยลดการใช้พลังงานจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานนั้นจะเปลี่ยนแปลงไปตามจำนวนแผง ระบบที่ใช้แผง Solar PV/T จำนวน 16 แผง ใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานน้อยที่สุด 15.71 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อวัน รองลงมาเป็นจำนวน 14 12 และ 10 แผง ใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน 17.08 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อวัน 19.41 และ 22.45 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อวัน

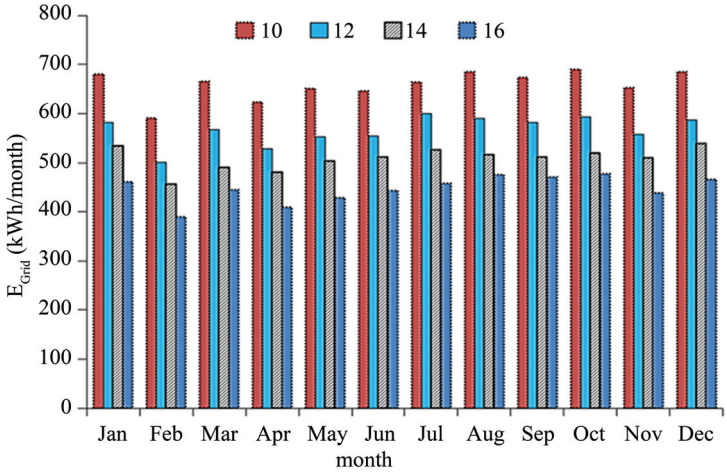
ISSN 2672-9369 (Online)



รูปที่ 10 อุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อน กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ และกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่ปั๊มความร้อน

ดังนั้น จากข้อมูลแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถสรุปได้ว่า ขนาดของระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump ที่เหมาะสมจะประกอบด้วย ปั๊มความร้อนขนาด 17.8 กิโลวัตต์ ใช้สารทำงาน R134a เสริมด้วยแผง Solar PV/T จำนวน 12 แผง ต่อขนานกันเพื่อถ่ายเทความร้อนให้แก่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ใช้ถังเก็บน้ำร้อนขนาด 2,000 ลิตร

เมื่อใช้ข้อมูลค่ารังสีอาทิตย์ตลอดทั้งปีมาคำนวณหาพลังงานไฟฟ้าที่ใช้เข้าในระบบพบว่า เดือนกรกฎาคมเป็นเดือนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานสูงสุด 599.23 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อเดือน สำหรับเดือนกุมภาพันธ์เป็นเดือนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานต่ำสุด 501.76 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อเดือน ดังรูปที่ 11 กรณีจำนวนแผง Solar PV/T เพิ่มขึ้นจะใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานน้อยลง โดยพบว่า ระบบที่ใช้แผง Solar PV/T จำนวน 16 แผงใช้ไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานน้อยลงมากที่สุด 5,364.21 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อปี รองลงมาเป็นจำนวน 14 12 และ 10 แผง ใช้ไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน 6,113.79 6,799.39 และ 7,903.42 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อปี ตามลำดับ เมื่อนำเอาค่าเหล่านี้ไปวิเคราะห์รวมกับเงินลงทุนสร้างระบบ ดังตารางที่ 2 เพื่อหาระยะคืนทุนโดยพบว่า ในกรณีแผง Solar PV/T จำนวน 12 แผง มีระยะเวลาคืนทุนสั้นที่สุด 7.13 ปี ลำดับถัดไปคือ จำนวน 10 14 และ 16 แผง มีระยะคืนทุน 7.15 7.48 และ 7.86 ปี ตามลำดับ



รูปที่ 11 พลังงานไฟฟ้าที่ใช้จากระบบไฟฟ้าพื้นฐานในแต่ละเดือน

ตารางที่ 2 มูลค่าเงินลงทุนและพลังงานที่ประหยัดได้ของระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump

รายละเอียด	ขดลวดไฟฟ้า	Solar PV/T Boosted Heat Pump			
		จำนวนแผง			
		10	12	14	16
พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อปี)	34,872.10	7,903.42	6,799.39	6,113.79	5,364.21
พลังงานไฟฟ้าที่ประหยัดได้ (กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อปี)		26,968.68	28,072.71	28,758.31	29,507.89
คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ที่ประหยัดได้ (เปอร์เซ็นต์)		77.34	80.50	82.47	84.62
คิดเป็นค่าไฟฟ้าที่ประหยัดได้ (บาทต่อปี)		81,445.41	84,779.58	86,850.10	89,113.83
เงินลงทุน (บาท)		582,000	604,180	649,460	700,740
Solar PV/T (บาท)		200,000	220,000	240,000	260,000
Heat Pump			240,000		
ระยะเวลาคืนทุน (ปี)		7.15	7.13	7.48	7.86
NPV (บาท)		104,613.55	110,541.78	82,717.00	50,521.04
IRR		10.37	11.30	10.86	9.89

* ค่าไฟฟ้าประมาณ 3.02 บาท/หน่วย

* คิดอัตราดอกเบี้ย 8.25 % (ธนาคารการค้าต่างประเทศลาว, 2565)

อภิปรายผลการวิจัยและสรุป

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาขนาดที่เหมาะสมของระบบผลิตน้ำร้อนจากปั๊มความร้อนเสริมด้วยการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar PV/T Boosted Heat Pump) โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ร่วมกับการทดสอบสมรรถนะของอุปกรณ์ในระบบดังกล่าว จากการศึกษาสามารถสรุปผลได้ดังนี้

ส่วนที่ 1 เป็นการทดสอบสมรรถนะทางไฟฟ้าและความร้อนของแผงผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ พบว่าในการทดสอบสมรรถนะทางความร้อนของแผง Solar PV/T มีค่า $F_R(\tau\alpha)_e = 0.4018$ และ $F_RU_L = 10.466$ วัตต์ต่อตารางเมตร•องศาเซลเซียส ในขณะเมื่อทดสอบประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าของแผง Solar PV/T มีค่า 16 % และสามารถสร้างสมการเพื่อใช้ในการทำนายอุณหภูมิแผงและกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของแผง Solar PV/T ดังสมการที่ (11) - (12)

สมการทำนายอุณหภูมิแผง Solar PV/T ดังสมการที่ (11)

$$T_{PV/T,Sim} = 1.0234 \text{ x } (I_T^{0.09286}) \text{ x } (T_a^{-0.17333}) \text{ x } (T_{f,i}^{1.0357}) \quad (11)$$

สมการทำนายผลกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของแผง Solar PV/T ดังสมการที่ (12)

$$P_{PV/T,Sim} = 1.170 \text{ x } (I_T^{0.99252}) \text{ x } (T_a^{-0.15381}) \text{ x } (T_{f,i}^{0.17826}) \text{ x } (T_{PV/T}^{-0.38333}) \quad (12)$$

ISSN 2672-9369 (Online)

ส่วนที่ 2 เมื่อได้สมรรถนะและสมการที่ใช้ในการทำนายแล้วจะใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อเลือกระบบที่เหมาะสมกับการใช้งาน โดยมีการปรับเปลี่ยนจำนวนแผง Solar PV/T ตั้งแต่ 10 12 14 และ 16 แผง เพื่อเลือกจำนวนที่เหมาะสมโดยพิจารณาทั้งปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้จากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน สมรรถนะของระบบ และความคุ้มค่าในการลงทุน โดยพบว่า ระบบ Solar PV/T Boosted Heat Pump ที่เหมาะสมกับการใช้ผลิตน้ำร้อนของโรงแรมไก่นคร จะใช้ปั๊มความร้อนขนาด 17.8 กิโลวัตต์ ใช้สารทำงาน R134a และใช้แผง Solar PV/T จำนวน 12 แผง ซึ่งทำให้ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อน มีค่าอยู่ระหว่าง 1.74 - 4.90 ทำให้สามารถลดพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิตน้ำร้อนเมื่อเปรียบเทียบกับระบบเดิมที่ใช้ขดลวดไฟฟ้าลงได้ 28,072.71 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อปี คิดเป็นค่าใช้จ่ายที่ลดลง 84,779.58 บาทต่อปี โดยลงทุนทั้งสิ้น 604,180 บาท มีระยะเวลาคืนทุน 7.13 ปี

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณโครงการผลิตและพัฒนาศักยภาพบัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทนในกลุ่มประเทศอาเซียนสำหรับนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาจากวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ในการสนับสนุนทุนและค่าใช้จ่ายในการศึกษา รวมทั้งขอขอบคุณหน่วยวิจัยด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อมอัจฉริยะ (SEEU) ที่ให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือในทุกด้าน และขอขอบคุณโรงแรมไก่นคร นครหลวงเวียงจันทน์ ประเทศลาว ที่เอื้อเฟื้อให้ข้อมูลในการศึกษาครั้งนี้

References

[1] Sonsaree, S., Asaoka, T., Jiajitsawat, S., Aguiree, H., and Tanaka, K. (2017). VCHP-ORC Power Generation from Low-Grade Industrial Waste Heat Combined with Solar Water Heating System: Power Generation and CO_2 Emission in Industrial Estate of Thailand. **Cogent Engineering**. Vol. 4, Issue 1, p. 1359397. DOI: 10.1080/23311916.2017.1359397

[2] Suwanasang, N. and Tongsopit, S. (2015). An Assessment of the Technical and Economic Potential of Rooftop Solar Systems on Chulalongkorn University's Buildings. **Journal of Energy Research**. Vol. 12, No. 2, pp. 59-74. (in Thai)

[3] Ministry of Energy (2009). **Technology of Using Heat Pumps for Heating**. Bangkok: In-depth Technology Demonstration Project for Energy Conservation. Department of Alternative Energy Development and Efficiency. (in Thai)

[4] Sun, X., Dai, Y., Novakovic, V., Wu, J., and Wang, R. (2015). Performance Comparison of Direct Expansion Solar-Assisted Heat Pump and Conventional Air Source Heat Pump for Domestic Hot Water. **Energy Procedia**. Vol. 70, pp. 394-401. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.02.140

[5] Herrando, M., Ramos, A., Zabalza, L., and Markides, C. N. (2019). A Comprehensive Assessment of Alternative Absorber-Exchanger Designs for Hybrid PV/T-Water Collectors. **Appilied Energy**. Vol. 235, pp. 1583-1602. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.11.024

[6] Huide, F., Xuxin, Z., Lei, M., Tao, Z., Qixing, W., and Hongyuan, S. (2017). A Comparative Study on Three Types of Solar Utilization Technologies for Buildings: Photovoltaic, Solar Thermal and Hybrid Photovoltaic/Thermal Systems. **Energy Conversion and Management**. Vol. 140, pp. 1-13. DOI: 10.1016/j.enconman.2017.02.059

[7] Chanthaseng, S. and Mongkon, S. (2021). Experimental Performance of Hot Water Production by Solar PV/T Boosted Heat Pump System for Electricpower Costs Reduction in a Slaughterhouse. **Engineering Journal Chiang Mai University**. Vol. 28, No. 1, pp. 110-126. (in Thai)

[8] Wanchupela, N. and Polvongsri, S. (2021). Size and Type Optimization of Solar Photovoltaic Thermal Hybrid Assisted Heat Pump in Slaughterhouse. **Engineering Journal Chiang Mai University**. Vol. 28, No. 1, pp. 127-140. (in Thai)

[9] Chanthaboune, V. and Kiatsiriroat, T. (2007). Performance Testing of a Solar Assisted Heat Pump Water by using an Unglazed Flat-plate Solar Collector as an Evaporator. In **Conference on Thermal Energy and Mass Transfer in Thermal Devices**. Chiang Mai University, Chiang Mai Province. 15-16 Mar, Amora Chiang Mai, 2550. (in Thai)

[10] Chaichana, C., Kiatsiriroat, T., and Nuntaphan, A. (2010). Comparison of Conventional Flat-Plate Solar Collector and Solar Boosted Heat Pump Using Unglazed Collector for Hot Water Production in Small Slaughterhouse. **Heat Transfer Engineering**. Vol. 31, Issue 5, pp. 419-429. DOI: 10.1080/01457630903375475

[11] Jie, J., Keliang, L., Tin-tai, C., Gang, P., Wei, H., and Hanfeng, H. (2008). Performance Analysis of a Photovoltaic Heat Pump. **Applied Energy**. Vol. 85, Issue 8, pp. 680-693. DOI: 10.1016/j.apenergy.2008.01.003

[12] Saysana Chanthaseng. (2021). **Energy Cost Reduction of Slaughterhouse with Hot Water Generation from Solar Photovoltaic Thermal Hybrid Booted Heat Pump**. Thesis, Master of Engineering in Renewable Energy Engineering, School of Renewable Energy, Maejo University. (in Thai)

[13] NASA POWER Data Access Viewer. (2020). **Solar Radiation and Ambient Temperature**. Access (17 May 2021). Available (https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/?fbclid=IwAR21o8oBtosEget Yzfm0HfWGFM3G6XfJ_t1nFLLBFNv-ito6j6mN_iYavkk).

[14] Anderson, T. N., Morrison, G. L., and Behnia, M. (2003). **An Experimental Evaluation of an Air Source and a Solar Boosted Heat Pump Water Heater**. Destination Renewables - ANZSES

ISSN 2672-9369 (Online)

พฤติกรรมการรับแรงดัดของคานไม้ยางพาราหน้าตัดประกอบเสริมแรงด้วยเส้นไฟเบอร์

Bending Behavior of Composited Rubber-Wood Beam Reinforced with Fiber Rods

อภิสิทธิ์ ชูช่วยคำ[1*] นันทชัย ชูศิลป์[1] และมนัส อนุศิริ[1]

Apisit Chuchaycom[1*] Nuntachai Chusilp[1] and Manat Anusiri[1]

Received: *March 20, 2022;* ***Revised:*** *June 8, 2022;* ***Accepted:*** *June 8, 2022*

บทคัดย่อ

ไม้เป็นวัสดุชนิดหนึ่งที่ได้รับความนิยมและได้รับการยอมรับกันอย่างแพร่หลายทั้งในส่วนของโครงสร้างรับน้ำหนักและโครงสร้างไม้รับน้ำหนัก การนำไม้ยางพารามาใช้งานโดยตรงอาจจะไม่สามารถใช้เป็นโครงสร้างรับน้ำหนักได้การเสริมกำลังด้วยเส้นไฟเบอร์เป็นอีกหนึ่งแนวทางที่สามารถทำให้โครงสร้างรับน้ำหนักได้ดีขึ้น อย่างไรก็ตามการใช้วัสดุเส้นไฟเบอร์ยังคงอยู่ในวงจำกัด พบงานวิจัยที่เกี่ยวข้องไม่เพียงพอที่จะนำไปประเมินพฤติกรรมและความสามารถในการรับแรงของโครงสร้างงานวิจัยนี้ขอนำเสนอการประเมินพฤติกรรมและความสามารถในการรับแรงของโครงสร้าง คุณสมบัติการรับแรงดัดของคานด้วยรูปแบบของการเสริมกำลังด้วยเส้นเบอร์ในตำแหน่งที่แตกต่างกันพร้อมกับการนำเสนอการวิเคราะห์ความเค้นที่จุดปฏิภาคความเค้นที่จุดแตกร้าว โมดูลัสยืดหยุ่นและหน่วยแรงเฉือนสูงสุด เพื่อใช้ในการประเมินค่ากำลังรับโมเมนต์ดัดสูงสุด ผลการทดสอบได้วิเคราะห์นำไปสู่ความเข้าใจพฤติกรรมตลอดจนการประเมินประสิทธิภาพการรับน้ำหนักต่อไป

คำสำคัญ : คานไม้ยางพารา; เส้นไฟเบอร์; ค่ากำลังรับโมเมนต์ดัดสูงสุด

[1] *คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย สงขลา*

[1] *Bachelor of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Songkhla*

[*] *Corresponding Author, Tel. 09 8670 3329, E - mail: apisit.chuchaycom12@gmail.com*

Abstract

Wood is one of the most popular and widely accepted materials for both load-bearing and load-bearing structures. The direct use of rubber wood as a load-bearing structure might not be employed hence reinforcement with fiber is a way to improve the structure. However, the use of fiber materials is still limited. Insufficient relevant research was found to assess the behavior and load carrying capacity of structures. Therefore, this study aimed to present an assessment of the behavior and load carrying capacity of structures. Bending properties of beams with fiber reinforcement patterns in different positions with stress analysis at rupture point stress interactions were presented. Maximum elastic modulus and shear unit were used in estimating the maximum bending moment strength. The results of the tests were analyzed leading to an understanding of the behavior as well as further assessment of the loading efficiency.

Keywords: Rubber Wood; Fiber Rods; Maximum Moment Capacity

บทนำ

ไม้เป็นวัสดุชนิดหนึ่งที่ได้รับความนิยมและยอมรับในส่วนของโครงสร้างรับน้ำหนัก ปัจจุบันไม้ชนิดสำคัญและมีขนาดใหญ่สามารถหาได้ยาก จึงทำให้เหลือไม้อยู่เพียงไม่กี่พันธุ์ที่สามารถนำมาใช้ [1] และด้วยภาวะเศรษฐกิจโลกในปัจจุบันมีการใช้ยางพาราน้อยลงในหลาย ๆ ประเทศ จึงทำให้ราคายางตกต่ำตามลงไปด้วยและยังมีแนวโน้มที่จะคงสภาวะต่ำลง ในการช่วยกระตุ้นและแก้ปัญหาราคายางตกต่ำ [2] ในเชิงพาณิชย์จึงได้มีการนำไม้ยางไปใช้ในงานวิศวกรรมเนื่องจากคุณสมบัติที่ทนทาน [3] ประเภทไม้ที่นำไปใช้จะเป็นไม้เนื้ออ่อน - ปานกลาง [4] โดยเฉพาะโครงสร้างหลัก (Primary) และโครงสร้างรอง (Secondary) อาทิเช่น เสา คาน พื้น โครงสร้างหลังคา ราวกันตก เป็นต้น [5] ได้ทำการทดสอบพันธุ์ไม้ยางพาราจำนวน 4 พันธุ์ ที่มีอายุ 14 ปี จากผลการทดสอบพบว่าการรับน้ำหนักของพันธุ์ PB 235 เป็นพันธุ์ที่รับน้ำหนักได้ดีที่สุด รองลงมาคือ พันธุ์ RRIM 600 พันธุ์ BPM 24 และพันธุ์ RRIM 521 แต่อย่างไรก็ตามอาจจะมีการแปรผันตามปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ อายุ พื้นที่เพาะปลูก เป็นต้น [6] ได้ทำการศึกษาพัฒนาและประเมินค่าคุณสมบัติเชิงกลของคานไม้ยางพาราประกอบลามิเนตเสริมกำลังวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วสำหรับการก่อสร้างขนาดเล็กและที่พักอาศัย โดยมีการทดสอบการดัดของคานแบบแรงกระทำ 3 และ 4 จุด จากผลของการทดสอบคานประกอบที่ไม่มีการเสริมเกิดการวิบัติใกล้แนวรอยต่อในด้านรับแรงดึงและคานประกอบที่เสริมเกิดการวิบัติในคานด้านรับแรงดึงและแยกชั้น ประสิทธิภาพของรอยต่อสามารถปรับปรุงได้โดยการเพิ่มความยาวของรอยต่อ [7] จึงทำให้พบว่ากำลังดึงของคานจะเพิ่มขึ้นโดยตรงตามความยาวและอัตราส่วนปริมาตรของเส้นใย

เส้นไฟเบอร์กลาสเสริมพอลิเมอร์ (Glass Fiber Reinforced Polymer: GFRP) เป็นวัสดุที่ประกอบทรายซิลิกาหินปูนกรดโฟลิคโดยใช้อุณหภูมิ 1,260 ^{o}C ในการหลอมละลาย เมื่ออุณหภูมิเย็นตัวจึงนำไปทำทดสอบการดึงเพื่อเพิ่มความแข็งแรง [8] เส้นใยที่ผลิตจากแก้วเป็นวัสดุที่โดดเด่นสำหรับพอลิเมอร์คอมโพสิตทางวิศวกรรม ได้แก่ ทนทานต่อการกัดกร่อน เป็นฉนวนไฟฟ้า สามารถตัดง่าย ทนทานต่อแรงดึงสูงกว่าเหล็ก 1 - 2 เท่า มีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นคงที่ น้ำหนักน้อยกว่าเหล็กถึง 4 เท่า และมีค่าสัมประสิทธิ์การยืดตัวใกล้เคียงกับคอนกรีต รายละเอียดดังตารางที่ 1 [9] - [11]

ISSN 2672-9369 (Online)

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบคุณสมบัติเส้นไฟเบอร์กลาสเสริมพอลิเมอร์ (GFRP)

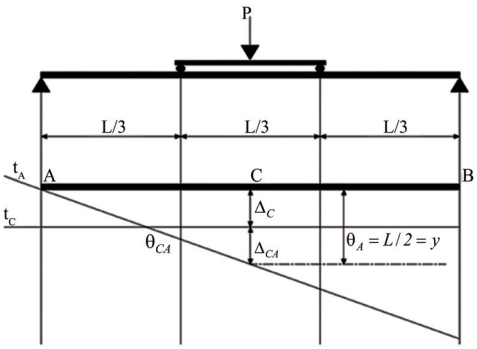
ขนาดทั่วไป (mm)	ขนาดทั่วไป (in)	เส้นผ่าศูนย์กลาง (mm)	กำลังดึง (N/mm^2)	โมดูลัสความยืดหยุ่น (N/mm^2)
6	#2	6.35	840	43000
9	#3	9.53	750	43000
12	#4	12.7	685	43000

วัสดุประสานเป็นวัสดุที่จะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการรับน้ำหนักบรรทุกของคานไม้ยางพาราประกอบ โดยมีคุณสมบัติการยึดเหนี่ยวผิวหน้าของวัสดุสองชิ้นให้สามารถยึดติดกันโดยมีความแข็งแรงของวัสดุที่เชื่อมยึดกันเพียงพอต่อการนำไปใช้งาน โดยเฉพาะการถ่ายแรงเฉือน นอกจากนี้วัสดุประสานยังมีความจำเป็นในการใช้เป็นสารเชื่อมยึดประกอบเครื่องใช้ในสำนักงาน เครื่องเรือน อุปกรณ์เฟอร์นิเจอร์ วัสดุตกแต่งบ้าน เป็นต้น [12]

Nadir, Y., Nagarajan, P., Ameen, M., and Arif, M. M. พบว่า การรับแรงดัดและความแข็งแรงของคานไม้ยางพาราเสริมพอลิเมอร์เสริมใยแก้ว (CFRP) และเสริมโพสิตพอลิเมอร์เสริมใยแก้ว (GFRP) โดยใช้กาวเป็นตัวผสาน ผลลัพธ์ที่ได้ GFRP รับแรงดัดได้ร้อยละ 36.91 - 40 และ CFRP รับแรงดัดได้ร้อยละ 45.86 - 50.62 แสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์เสริมใยแก้ว (CFRP) มีประสิทธิภาพในการรับแรงดัดได้ผลดีกว่า [13] Lssa, C. and Kmeid, Z. พบว่า คุณสมบัติการรับแรงดัดของคานไม้ประกอบชนิดไม่เสริมเละเสริมเส้นใย CFRP ผลของการทดสอบที่ได้แสดงให้เห็นว่า คานไม้ประกอบที่เสริมช่วยให้การวิบัติแบบเปราะกลายเป็นแบบเหนียว และยังสามารถรับน้ำหนักได้มากขึ้น [14]

การทดสอบคุณสมบัติของไม้ยางพารา เส้นไฟเบอร์ และวัสดุประสาน ทดสอบคุณสมบัติดังนี้ [15] ทดสอบโดยใช้มาตรฐานในการหาความถ่วงจำเพาะและความชื้นของไม้ (ASTM D2395) กำลังต้านทานแรงอัดในแนวตั้งฉากเสี้ยนไม้ (ASTM D143-94) กำลังต้านทานแรงอัดในแนวขนานเสี้ยนของไม้ (ASTM D143-94) การต้านทานแรงดัดของไม้ (ASTM D143-94) กำลังต้านแรงเฉือนในแนวขนานเสี้ยนของไม้ (ASTM D143-94) แรงดึงของเส้นไฟเบอร์ (ASTM A617)

ทฤษฎีแรงดัดของคานรับน้ำหนักบรรทุกจะเกิดการกระจายสม่ำเสมอและเกิดการแอ่นตัวที่เรียกว่า การโก่งตัวโดยทันที (Instantaneous Deflection) [16] ซึ่งเป็นฟังก์ชันของช่วงความยาวคานจุดรองรับ เช่น แบบหมุนได้ในคานช่วงเดียวยึดบางส่วนในคานต่อเนื่องหรือยึดรั้งเต็มในคานต่อเนื่องชนิดน้ำหนักบรรทุกเส้นแบบกระทำเป็นจุดหรือแบบกระจายสติฟเนส EI ของคานเสริมแรง จะสามารถคำนวณการโก่งตัวที่มีค่ามากที่สุดดังสมการที่ (1) - (3) ซึ่งเป็นที่มาของสมการที่ (4) และการรับน้ำหนักที่มีแรงกระทำพอยท์โหลด 2 จุด สามารถทำได้โดยทฤษฎี Moment Area รายละเอียดดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 การโก่งตัวสูงสุด

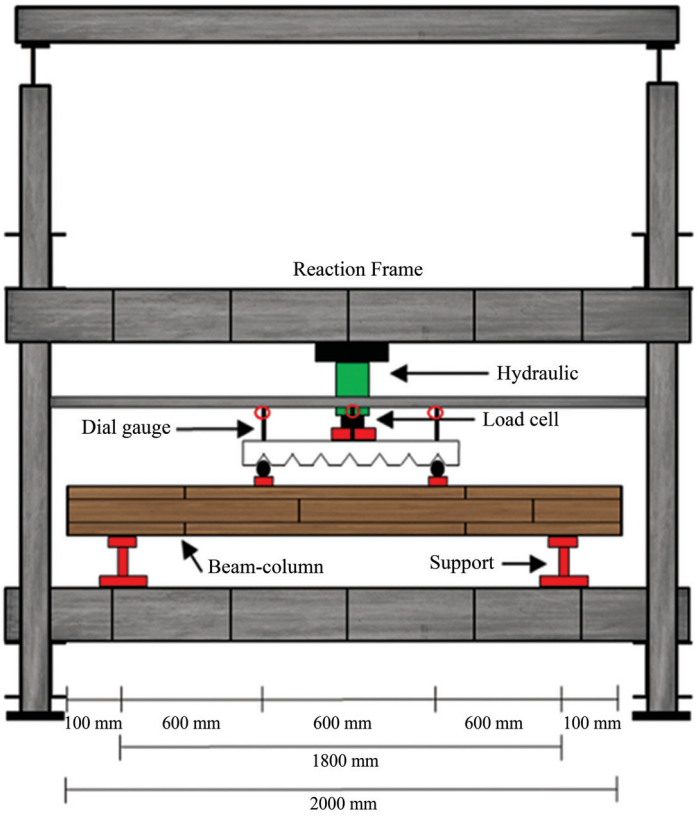
$$\theta_A = \theta_{A/C} = \left(\frac{1}{2}\times\frac{L}{3}\times\frac{PL}{6EI}\right)+\left(\frac{1}{2}\times\frac{L}{3}\times\frac{PL}{6EI}\right) \tag{1}$$

$$t_{C/A} = \left[\frac{1}{2}\times\frac{L}{3}\times\frac{PL}{6EI}\times\left(\left(\frac{1}{3}\times\frac{L}{3}\right)+\frac{L}{6}\right)\right]+\left(\frac{PL^2}{36EI}\times\frac{L}{12}\right) \tag{2}$$

$$\Delta_C = \frac{13PL^3}{1296EI} \tag{3}$$

$$\Delta_{MAX} = \Delta_C = \frac{13PL^3}{1296EI} \tag{4}$$

พฤติกรรมการแอ่นตัวเมื่อมีแรงภายนอกมากระทำต่อโครงสร้างและโครงสร้างเกิดการแอ่นตัว ค่าการแอ่นตัวจะมีความสำคัญในการออกแบบโครงสร้าง วิศวกรผู้คำนวณออกแบบโครงสร้างจะต้องออกแบบให้โครงสร้างนั้นให้สามารถต้านทานแรงภายในที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนของโครงสร้างเนื่องจากแรงภายนอกที่มากระทำ นอกจากนั้นจะต้องทำการตรวจสอบด้วยว่าการแอ่นตัวที่เกิดขึ้นมีการแอ่นตัวมากน้อยเพียงใด ถ้ามีการแอ่นตัวมากอาจจะทำให้วัสดุแตกเสียหายได้ อีกทั้งอาจทำให้ผู้ใช้โครงสร้างนั้น ๆ เกิดความไม่สบายใจถึงแม้ว่าโครงสร้างดังกล่าวจะไม่วิบัติ พฤติกรรมการแอ่นตัวของคานชิ้นตัวอย่างคำนวณหาค่าการแอ่นตัวที่เกิดขึ้นในคานช่วงเดียว โดยจะให้น้ำหนัก P ที่กระทำบนคานตรงกลางคานที่จุดระยะ L/3 [17] รายละเอียดดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 คานช่วงเดียวรับน้ำหนัก 4 จุด [17]

ISSN 2672-9369 (Online)

วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อการศึกษาพฤติกรรมการรับแรงดัดของคานไม้ยางพาราหน้าตัดประกอบเสริมแรงด้วยเส้นไฟเบอร์ในตำแหน่งต่าง ๆ ของหน้าตัดคาน

2. เพื่อการศึกษาการวิบัติของคานไม้ยางพาราหน้าตัดประกอบเสริมแรงด้วยเส้นไฟเบอร์ในตำแหน่งต่าง ๆ ของหน้าตัดคาน

วิธีการดำเนินการวิจัย

1. **ไม้ยางพารา**

ในงานวิจัยนี้ใช้การทดสอบตัวอย่างของคานไม้ประเภท RRIM 600 เป็นไม้ที่ผ่านการอาบน้ำยาและอบแห้ง ขนาดที่นำมาใช้ในการทดสอบ กว้าง 50 มิลลิเมตร ลึก 25 มิลลิเมตร ยาว 1,000 มิลลิเมตร

2. **เส้นไฟเบอร์กลาส**

เส้นไฟเบอร์กลาสสำหรับงานวิจัยเลือกใช้เส้นไฟเบอร์กลาสเสริมพอลิเมอร์ (GFRP) ขนาด 6 มิลลิเมตร รายละเอียดดังรูปที่ 3

รูปที่ 3 เส้นไฟเบอร์กลาสเสริมพอลิเมอร์

3. **วัสดุยึดประสาน**

สำหรับงานวิจัยนี้เลือกวัสดุยึดประสานระหว่างไม้กับไม้และวัสดุยึดประสานระหว่างไม้กับเส้นไฟเบอร์ (GFRP) โดยเลือกใช้กาวประเภท ฟอร์มาลดีไฮด์ กาวผงร็อควู๊ด (Rock Wood Powder Glue)

4. **คานไม้ยางพาราประกอบ**

การประกอบชิ้นงานสำหรับการทดสอบเพื่อหาค่ากำลังรับน้ำหนักด้วยการทดสอบ 4 จุด นำมาประกอบกันโดยออกแบบให้จุดต่อของท่อนล่างสุดเป็นการเข้าไม้แบบปากร่องหางเหยี่ยว (Dovetail Wood Joint) และเซาะร่องท่อนไม้เพื่อเสริมเส้นไฟเบอร์ กำหนดรูปแบบจุดต่อและตำแหน่งของการเสริมเส้นไฟเบอร์ในแต่ละรูปแบบโดยใช้กาวผงร็อควู๊ดในการประสาน ผสมกาวร็อควู๊ด 2 ส่วน กับน้ำ 1 ส่วน โดยน้ำหนัก ค่อย ๆ เติมน้ำทีละน้อยคนให้เข้ากัน ใช้ทาลงบนวัสดุที่ต้องการเชื่อมเพียงด้านเดียวในอัตราส่วน 120 - 180 กรัม ต่อพื้นผิว 1 ตารางเมตร ประกบเข้าด้วยกันแล้วอัดด้วยปากกาจับยึดงานที่แรงอัด : 30,408 กิโลกรัม : ตารางเมตร ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส จะใช้เวลา 4 ชั่วโมง แล้วทำการศึกษาพฤติกรรมการรับแรงดัดและการวิบัติของคานไม้ยางพาราหน้าตัดประกอบเสริมแรงด้วยเส้นไฟเบอร์ในตำแหน่งต่าง ๆ ของหน้าตัดคานโดยมีการประกอบทิ้งไว้ 24 ชั่วโมงแล้วมาถอดออก รายละเอียดดังรูปที่ 4

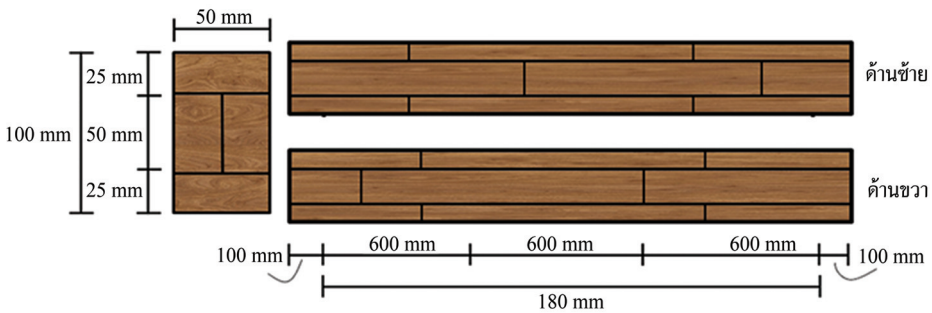
รูปที่ 4 การประกอบคานไม้ยางพารา

5. ตำแหน่งการเสริมเส้นไฟเบอร์กลาสในคานไม้ยางพารา

รูปแบบการเสริมเส้นไฟเบอร์ในคานไม้ยางพารา ได้มีการกำหนดสัญลักษณ์ขึ้นมาเพื่อแยกลักษณะหน้าตัดและตำแหน่งโดยมีรูปแบบข้อกำหนดสัญลักษณ์ดังนี้ P_CF_ โดยที่ P คือ ตำแหน่งการเสริมเส้นไฟเบอร์ (P0 คือ ไม่เสริมเส้นไฟเบอร์ P1 คือ เสริมเส้นไฟเบอร์ในตำแหน่งผิวล่าง P2 คือ เสริมเส้นไฟเบอร์ในตำแหน่งผิวบนและผิวล่าง P3 คือ เสริมเส้นไฟเบอร์ในตำแหน่งผิวล่างสุด) CF คือ จำนวนเส้นไฟเบอร์เสริมกำลัง (CF0 คือ ไม่เสริมเส้นไฟเบอร์ CF1 คือ เสริมเส้นไฟเบอร์จำนวน 1 เส้น CF2 คือ เสริมเส้นไฟเบอร์จำนวน 2 เส้น) โดยมีการเสริมเส้นไฟเบอร์ได้ รายละเอียดดังตารางที่ 2 และรูปที่ 5

ตารางที่ 2 ตำแหน่งการเสริมเส้นไฟเบอร์ในคานไม้ยางพาราหน้าตัดประกอบ

คาน	การเสริมเส้นไฟเบอร์ (P)				จำนวนเส้นไฟเบอร์ (CF)
	ไม่เสริม (P0)	ผิวบน (P1)	ผิวล่าง (P2)	ผิวล่างสุด (P3)	
P0-CF0		/			0
P1-CF1			/		1
P1,2-CF2		/	/		2
P1-CF2			/		2
P3-CF1				/	1

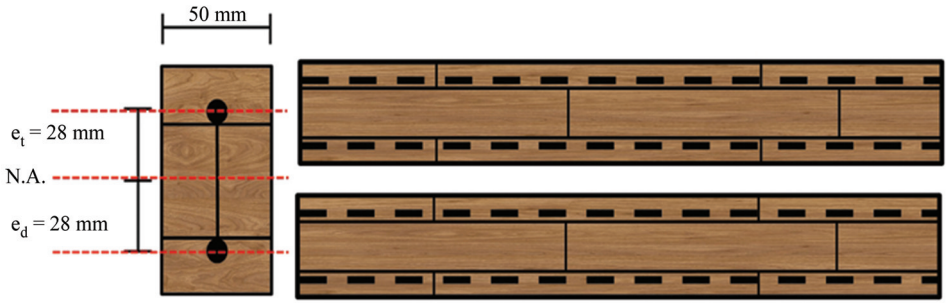


(ก) คานไม้ยางแบบไม่เสริมเส้นไฟเบอร์ (P0-CF0)

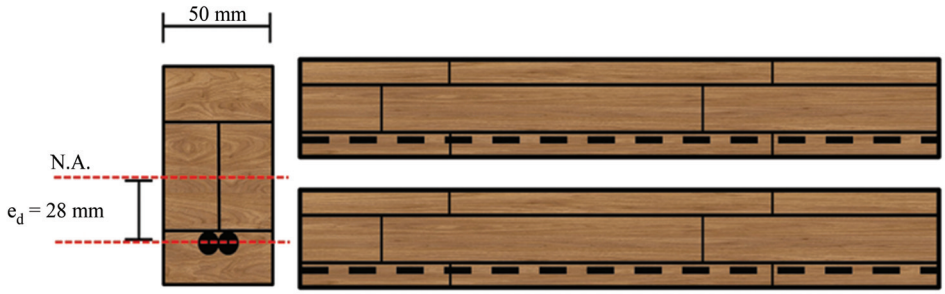
รูปที่ 5 ตำแหน่งการเสริมเส้นไฟเบอร์ในคานไม้ยางพารา

ISSN 2672-9369 (Online)

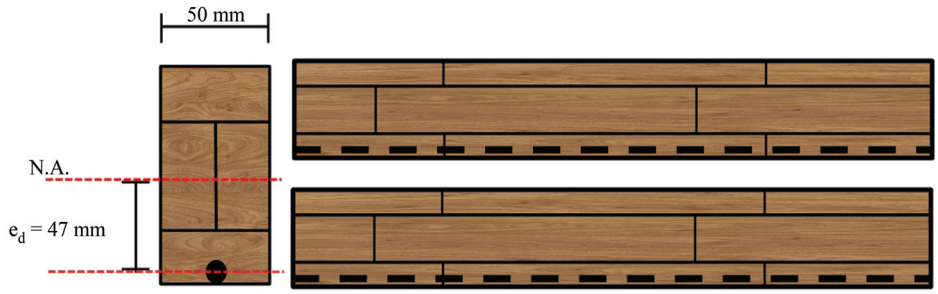
(ข) ตำแหน่งการเสริมเส้นไฟเบอร์ (P1-CF1)



(ค) ตำแหน่งการเสริมเส้นไฟเบอร์ (P1,2-CF2)



(ง) ตำแหน่งการเสริมเส้นไฟเบอร์ (P1-CF2)



(จ) ตำแหน่งการเสริมเส้นไฟเบอร์ (P3-CF1)

Beam cross-section, | Connection point, - - - - Fiber

รูปที่ 5 ตำแหน่งการเสริมเส้นไฟเบอร์ในคานไม้ยางพารา (ต่อ)

ผลการวิจัย

1. ผลการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของไม้ยางพารา

ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของไม้ยางพารา RRIM600 มีค่าโมดูลัสการแตกหักและโมดูลัสความยืดหยุ่นสูงสุด ใกล้เคียงกับไม้เนื้อแข็ง การโก่งตัวของไม้ที่รับน้ำหนักมีแนวฉากกับแนวแกน การทดสอบเป็นไปตามมาตรฐานการทดสอบ (ASTM D 143) [18] โดยตัวอย่างของไม้ที่นำมาทดสอบมีความชื้นอยู่ระหว่างร้อยละ 10 – 14 และไม่มีตำหนิในเนื้อไม้ จึงทำให้ผลการทดสอบจากงานวิจัยดังกล่าวมีคุณสมบัติไม้ยางพาราสามารถนำไปประเมินวิเคราะห์การทดสอบคานไม้ได้ รายละเอียดดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของไม้ยางพารา [6], [19] – [20]

ผลการทดสอบ	ไม้ยางพารา [ผู้วิจัย]	ไม้ยางพารา [6]	ไม้ยางพารา [19]	ไม้ยางพารา [20]
Natural Specific Gravity	0.72	-	0.62	0.67
Dry Specific Gravity	0.66	0.56	-	0.55
Moisture Content, %	9.09	10.40	16.10	16.06
Compression Parallel to Grain (N/mm^2)	45.34	44.35	51.51	10.95
Compression Perpendicular to Grain (N/mm^2)	13.54	19.92	18.02	5.40
Modulus of Rupture (N/mm^2)	85.45	86.99	110.39	62.21
Modulus of Elasticity (N/mm^2)	4,886.47	8,273.20	10,458	7,160.89
Shear Parallel to Grain (N/mm^2)	11.75	17.28	20.65	17.28

2. ผลการทดสอบการรับกำลังต้านแรงเฉือนของวัสดุประสาน

จากการทดสอบคุณสมบัติการรับกำลังต้านแรงเฉือนของวัสดุประสานมีค่าความแข็งแรงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) น้อยกว่าค่าการทดสอบการรับแรงเฉือนของไม้ (Shear Parallet to Gain) ค่าของผลการทดสอบ รายละเอียดดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบคุณสมบัติวัสดุยึดประสาน

Specimen	Shear Area (mm^2)	P_{max} (N)	Ultimate Shearing (N/mm^2)
วัสดุยึดประสาน	2,570.31	47,300.00	9.21

3. ผลการทดสอบกำลังรับการต้านแรงดึงของไฟเบอร์กลาส

ในการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของเส้นไฟเบอร์กลาสและผลของการทดสอบคุณสมบัติการรับกำลังต้านแรงดึงของเส้นไฟเบอร์กลาส ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการทดสอบทั้งหมดจะเป็นข้อมูลที่จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์ต่อไป รายละเอียดดังตารางที่ 5

ISSN 2672-9369 (Online)

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบคุณสมบัติกำลังต้านทานแรงดึงของเส้นไฟเบอร์กลาส

Specimen	Proportional Limit (N/mm^2)	Yield Strength 0.1 % Offset (N/mm^2)	Tensile Strength (N/mm^2)	Modulus of Elasticity (N/mm^2)
เส้นไฟเบอร์กลาส	25,500	26,500	29,900	10,975

4. ผลการทดสอบการรับกำลังต้านแรงดึงของคานไม้ยางพาราหน้าตัดประกอบเสริมเส้นไฟเบอร์

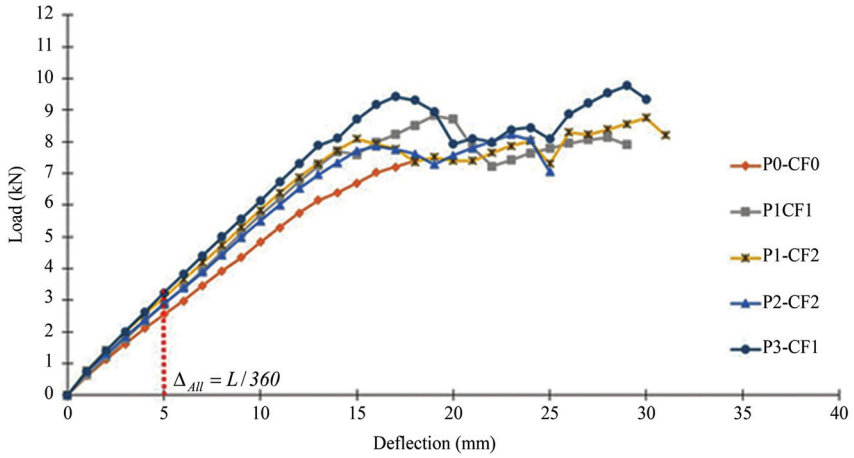
ผลของการทดสอบเบื้องต้นของไม้ยางพาราจะได้ค่าความเครียดของไม้ ความเครียดของไฟเบอร์ โมดูลัสของไม้และไฟเบอร์ นำค่าที่ได้มาออกแบบการรับกำลังต้านแรงดึง รายละเอียดดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 การออกแบบคานไม้ยางพาราหน้าตัดประกอบ เสริมเส้นไฟเบอร์กลาสรับกำลังต้านแรงดึง

Specimen	**ES (N/mm^2)**	**EW (N/mm^2)**	**n (N/mm^2)**	**I (m^4)**	**M_{max} (N/m)**	**P_{max} (N/m)**	**Δ_{max} (mm)**
P0-CF0	10,975	4,886.47	2.25	4.167×10^{-6}	0.0144	2.013	5
P1-CF1	10,975	4,886.47	2.25	5.297×10^{-6}	0.0145	5.758	5
P2-CF2	10,975	4,886.47	2.25	6.427×10^{-6}	0.0145	6.986	5
P1,2-CF2	10,975	4,886.47	2.25	6.427×10^{-6}	0.0145	6.986	5
P3-CF1	10,975	4,886.47	2.25	5.297×10^{-6}	0.0145	5.758	5

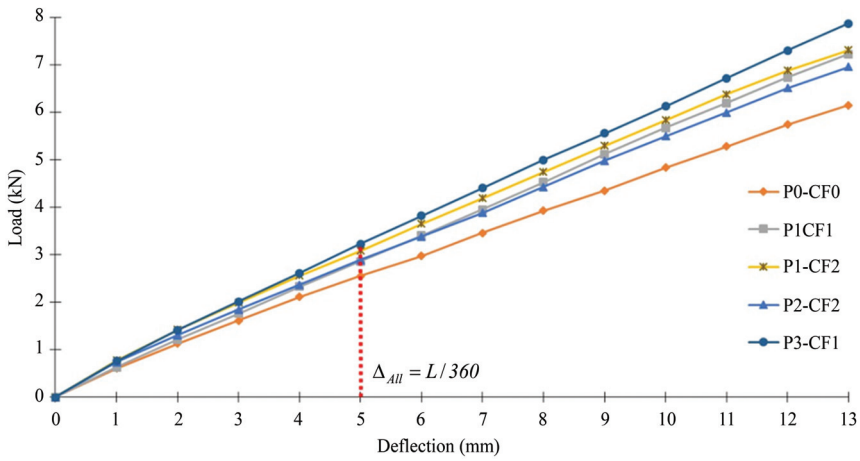
5. ความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกกับการโก่งตัว

ผลการทดสอบกำลังการรับน้ำหนักของคานไม้ยางพาราพบว่า การเสริมเส้นไฟเบอร์ของ P3-CF1 จะรับน้ำหนักเฉลี่ยสูงสุดได้ 9.78 kN ซึ่งมากกว่าเฉลี่ยร้อยละ 32.16 เมื่อเทียบกับคานที่ไม่มีการเสริมเส้นไฟเบอร์ P0-CF0 การเสริมเส้นไฟเบอร์ของ P1-CF1 จะรับน้ำหนักเฉลี่ยสูงสุดได้ 8.82 kN ซึ่งมากกว่าเฉลี่ยร้อยละ 19.20 เมื่อเทียบกับคานที่ไม่มีการเสริมเส้นไฟเบอร์ P0-CF0 การเสริมเส้นไฟเบอร์ของ P1-CF2 จะรับน้ำหนักเฉลี่ยสูงสุดได้ 8.76 kN ซึ่งมากกว่าเฉลี่ยร้อยละ 18.38 เมื่อเทียบกับคานที่ไม่มีการเสริมเส้นไฟเบอร์ (P0-CF0) การเสริมเส้นไฟเบอร์ของ P2-CF2 จะรับน้ำหนักเฉลี่ยสูงสุดได้ 8.23 kN ซึ่งมากกว่าเฉลี่ยร้อยละ 11.22 เมื่อเทียบกับคานที่ไม่มีการเสริมเส้นไฟเบอร์ P0-CF รายละเอียดดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับระยะแอ่นตัว

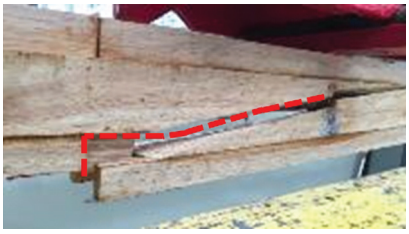
ผลการทดสอบของคานไม้ที่ระยะการเปลี่ยนแปลงการเสียรูปที่พบว่า การเสริมเส้นไฟเบอร์ของตัวอย่าง P3-CF1 มีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 25 ส่วนตัวอย่าง P1-CF2 มีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 16.67 และตัวอย่าง P1-CF1, P2-CF2 มีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 10 เมื่อเทียบกับคานไม้ยางพาราที่ไม่มีการเสริมเส้นไฟเบอร์ P0-CF0 และพบว่าการเสริมเส้นไฟเบอร์ของตัวอย่าง P1-CF1 มีค่าเทียบเท่ากับการเสริมเส้นไฟเบอร์ของตัวอย่าง P2-CF2 รายละเอียดดังรูปที่ 7



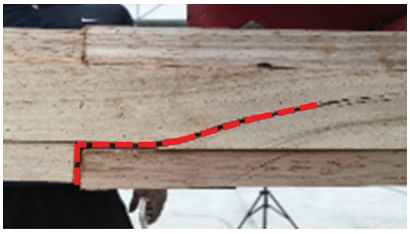
รูปที่ 7 การทดสอบน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวที่ $\Delta_{All} = L/360$

6. **ลักษณะการวิบัติของคานไม้**

ผลการทดสอบสังเกตพบว่า มีลักษณะการวิบัติบริเวณรอยต่อของท่อนไม้และวิบัติตามแนวเสี้ยนของไม้ตำแหน่งการเสริมเส้นกำลังด้วยเส้นไฟเบอร์และจุดต่อมีผลโดยตรงต่อการโก่งตัว และความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกภายใต้แรงดัดแบบ 4 จุด โดยคานไม้ยางพาราประกอบมีลักษณะการแตกร้าวและลักษณะของการวิบัติคล้ายคลึงกันในแต่ละรูปแบบเมื่อคานไม้ยางพาราประกอบรับน้ำหนักบรรทุกที่มีค่าความเครียดใกล้ถึงจุดความเครียดปฏิภาคพบว่า ท้องคานที่มีการรับแรงดึงจะเริ่มมีการแตกร้าวในส่วนการรับแรงดึงและจากลักษณะการวิบัติของคานไม้ยางพาราประกอบเสริมกำลังด้วยเส้นไฟเบอร์พบว่าการรับน้ำหนักบรรทุกของนั้นเพิ่มขึ้นตามรูปแบบตำแหน่งของการเสริมเส้นไฟเบอร์ รายละเอียดดังรูปที่ 8



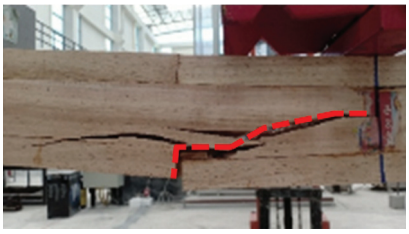
(ก) การวิบัติของคาน (P0-CF0)



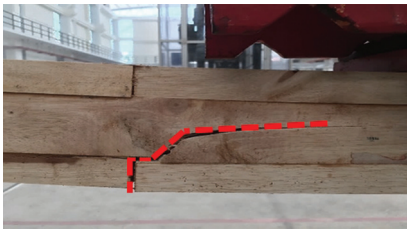
(ข) การวิบัติของคาน (P1-CF1)

รูปที่ 8 ลักษณะการวิบัติของคานไม้

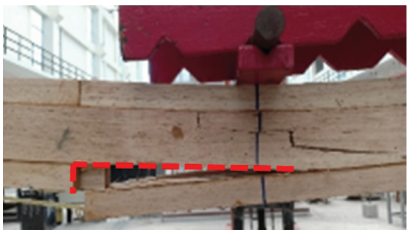
ISSN 2672-9369 (Online)



(ค) การวิบัติของคาน (P2-CF2)



(ง) การวิบัติของคาน (P1,2-CF2)



(จ) การวิบัติของคาน (P3-CF1)

รูปที่ 8 ลักษณะการวิบัติของคานไม้ (ต่อ)

การอภิปรายผล

จากการออกแบบโครงสร้างสำหรับการรับน้ำหนักบรรทุกของไม้ยางพาราประกอบและเสริมกำลังด้วยเส้นไฟเบอร์ที่ตำแหน่งผิวล่างสุด P3-CF2 จะสามารถรับกำลังต้านทานแรงดัดเพิ่มขึ้นร้อยละ 25 ในช่วงการโก่งตัว L/360 และกำลังต้านทานแรงดัดมีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 32.16 ซึ่งมีค่ามากที่สุดเมื่อเทียบกับคานไม้ยางพาราหน้าตัดประกอบที่ไม่เสริมกำลังด้วยเส้นไฟเบอร์

การเสริมกำลังด้วยเส้นไฟเบอร์ที่ตำแหน่งผิวล่างจำนวน 1 เส้น P1-CF1 มีผลให้คานไม้ยางพาราสามารถรับกำลังเพิ่มขึ้นร้อยละ 19.20 และการเสริมกำลังด้วยเส้นไฟเบอร์ที่ตำแหน่งผิวล่างจำนวน 2 เส้น P1-CF2 มีผลให้คานไม้ยางพาราสามารถรับกำลังเพิ่มขึ้นร้อยละ 18.38 เมื่อเทียบความแตกต่างระหว่างการเสริมเส้นไฟเบอร์จำนวน 1 เส้น และจำนวน 2 เส้น ในตำแหน่งผิวล่างของคานไม้ยางพาราเท่ากับร้อยละ 4.46

การเสริมกำลังด้วยเส้นไฟเบอร์ที่ตำแหน่งผิวล่างและตำแหน่งผิวบนจำนวนอย่างละ 1 เส้น P1,2-CF2 มีผลให้คานไม้ยางพาราสามารถรับกำลังเพิ่มขึ้นร้อยละ 11.22 เมื่อเทียบ P0-CF0 ที่ไม่มีการเสริมแรงด้วยเส้นไฟเบอร์พบว่าการเสริมแรงด้วยเส้นไฟเบอร์ในตำแหน่งผิวบนไม่มีผลต่อการรับกำลังของคานไม้ยางพารา

บทสรุป

ผลการศึกษาการประกอบคานไม้ยางพาราที่เสริมกำลังด้วยเส้นไฟเบอร์ด้วยการทดสอบความต้านทานแรงดัดแบบ 4 จุด นั้นพบว่าความเค้นที่จุดปฏิภาค ความเค้นที่จุดแตกร้าว โมดูลัสยืดหยุ่นและหน่วยแรงเฉือนสูงสุดมีเพียงพอต่อการนำไปใช้งานสำหรับโครงสร้างที่รับน้ำหนักไม่มากนักและกำลังต้านทานแรงดัดนั้นจะมีค่าสูงขึ้นตามรูปแบบของการเสริมกำลังที่ตำแหน่งชั้นผิวล่างสุดของคาน P3-CF2 จากผลการทดสอบบริเวณตำแหน่งชั้นผิวล่างสุดจะให้กำลังรับน้ำหนักสูงสุดซึ่งเป็นรูปแบบที่เหมาะสมที่สุด มีความเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานเป็นโครงสร้าง อย่างไรก็ตามยังมีปัจจัยอีกมากที่อาจจะส่งผลต่อกำลังโดยอาทิเช่น การเตรียมตัวอย่างท่อนไม้ได้ขนาดไม่ผิดรูป ประกอบด้วย การอัดแรง การเลือกวัสดุประสานและการเลือกวัสดุเสริมกำลัง เป็นต้น

ข้อเสนอแนะ

จากข้อมูลผลการทดสอบนี้ยังสามารถพัฒนารูปแบบการประกอบชิ้นงานของคานไม้ยางพาราที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการรับน้ำหนักบรรทุกด้วยการเพิ่มวัสดุเสริมแรงหรือเปลี่ยนชนิดของวัสดุผสานที่สามารถรับประสานระหว่างหน้าพื้นผิวสัมผัสได้อย่างดีขึ้นเนื่องจากวิธีการประกอบไม้ยางพารา วัสดุที่ใช้ในการเสริมแรงและวัสดุประสาน หรือออกแบบจุดต่อแบบอื่น มีผลต่อการรับกำลังแรงดึงของคานไม้ยางพารา

กิตติกรรมประกาศ

บทความฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีด้วยความช่วยเหลือและการสนับสนุนเป็นอย่างดียิ่งจากทีมงานอาจารย์สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย นักศึกษาในสาขาวิชาวิศวกรรมโยธาที่ช่วยงานทดสอบจนงานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดี

References

[1] Jarusombat, S., Weenin, T., and Piam-arun, A. (2009). **Innovation for Wood Utilization**. Department of Products Faculty of Forestry Kasetsart University

[2] Rodbumrung, A., Suttiwattana, P., Netiworaruksa, B., Nakaravarayut, K., and Thongsanitgarn, P. (2020). A Study on Mechanical Properties of Fiberglass Mixed with Latex and Natural Fibers. **Udon Thani Rajabhat University Journal of Sciences and Technology**. Vol. 8, No. 2, pp. 133-144

[3] National Economic and Social Development Council. (2021). **Total Products in Thailand in the 3rd**. National Accounts Division. Access (20 December 2021). Available (https://www.nesdc.go.th)

[4] Plastics Institute of Thailand. (2019). **Report of Thai Rubber and Rubber Wood Products Industry**. Bankok: Information Communication Cemter and Office of the Permanent Secretary, Ministry of Commerce

[5] Seangatith, S. (2012). **Development of Design Equations for Pultruded-Fiber Reinforced Plastic Having C-Section Under Flexurewith Simple and Fixed Supports**. Faculty of Engineering, Suranaree University of Technology. (in Thai)

[6] Phumichai, T., Sungsing, K., Riyapan, J., and Phumichai, C. (2015). Chemical and Mechanical Properties in *Hevea brasiliensis*. **Thai Agricultural Research Journal**. Vol. 33, No. 2, pp. 144-158

[7] Prachasaree, W., Samakrattakit, A., and Thongruang, W. (2010). **Performance Evaluation of FRR Reinforced Para-Wood Glued Laminate (Glulam) Beam Under Flexure**. **Research and Development Journal**. Vol. 21, No. 1, pp. 7-16

[8] Spaun, F. D. (1981). Reinforcement of Wood with Fiberglass. **Forest Products Journal**. Vol. 13, No. 6, pp. 26-33

[9] Mangsamong, W. and Kodae, H. (2018). **Study of Flexural Behavior of Laminated Rubber Wood Beam Reinforced with Glass Fiber Reinforced Ploy**. Degree of Bachelor Civil Engineering, Faculty of Engineering, Princess of Naradhiwas University

ISSN 2672-9369 (Online)

[10] Sivadee. (2020). **TECH FOCUS USP Laser Fast Manufacturing of CFRP Parts**. Fraunhofer Institute for Laser Technology. Access (20 April 2020). Available (http://toolmakers.co/production-cfrp-withlaser-usp)

[11] Bank. (2010). **The Pultex Pulteusion Design Manual of Standard and Custom Fiber Reinforced Polymer**. Strutural Profiles Pennsylvania.

[12] Urapeepatanapong, C. (1989). Production and Utilization of Rubber Wood in Thailand: II. Wood Utilization and Economic Aspects. **Thai Journal of Forestry (Thailand)**. Vol. 8, No. 3, pp. 257-268

[13] Nadir, Y., Nagarajan, P., Ameen, M., and Arif, M. M. (2016). Flexural Stiffness and Strength Enhancement of Horizontally Glued Laminated Wood Beams with GFRP and CFRP Composite Sheets. **Construction and Building Materials**. Vol. 112, pp. 547-555. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.133

[14] Lssa, C. and Kmeid, Z. (2005). Advanced Wood Engineering: Glulam Beam. **Construction and Building Materials**. Vol. 19, Issue 2, pp. 99-106. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2004.05.013

[15] Astm International D143-94. (2000). **Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber**. West Conshohocken: Barr Harbor Drive, 2000

[16] Sirisak, P. (2011). **Mechanics**. (Annual Report 3). Bangkok: Med Sai Printing

[17] Hibbeler, R.c. (2011). **Mechanics of Materials Eight Edition United states of America**. The United States: Pearson Prentice Hall

[18] American Society of Testing Materials ASTM D143. (2000). **Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber**. Drive, 2000

[19] Sangsing, K., Phaenchana, P., Chaipanich, P., and Na Ranong, N. (2008). **Studies on Wood Production Lumber Recovery Quality and Wood Property of 4 Recommended Rubber Clones**. Eds. pp. 30-32 Surat Thani: Department of Agriculture

[20] Thongkhaw, T. (2019). **Failure Behavior of Beam-Column Connections in Hybrid Rubber Wood-Steel Structure**. Master's Thesis Department of Civil Engineering Civil Engineering Rajamangala University of Technology Srivijaya

สมบัติของเส้นด้ายรวมและเส้นด้ายเชือกจากเส้นใยบัวหลวง (*Nelumbo nucifera* Gaertn.) แบบ Z on Z

Properties of Ply and Cord Yarns from Sacred Lotus Fibers (*Nelumbo nucifera* Gaertn.) Classified as Z on Z Twist

ณธษา พันธ์บัว[1*]

Nathasar Punbua[1*]

Received: *February 2, 2022;* ***Revised:*** *June 2, 2022;* ***Accepted:*** *June 7, 2022*

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติของเส้นด้ายรวมและเส้นด้ายเชือกจากเส้นใยบัวหลวงแบบ Z on Z และเปรียบเทียบผลของชนิดก้านบัวและจำนวนของเส้นด้ายที่มีต่อสมบัติของเส้นด้ายด้านขนาด ความแข็งแรงต่อแรงดึงขาด และการยืดตัว วางแผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลโดยใช้การทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Factorial Experiment in Completely Randomized Design) เส้นใยได้จากน้ำยางภายในก้านดอกและก้านใบของบัวหลวงพันธุ์สัตตบุษย์โดยวิธีการดึงยืด ปั่นเป็นเส้นด้ายรวมแบบ 2 ply และ 3 ply และปั่นเป็นเส้นด้ายเชือกแบบ 2-2 ply, 2-3 ply, 3-2 ply และ 3-3 ply ทดสอบสมบัติของเส้นด้ายด้วยมาตรฐานการทดสอบ ASTM ผลการวิจัยพบว่า เส้นด้ายรวมด้านความแข็งแรงต่อแรงดึงขาดมีค่าระหว่าง 5.446 - 6.090 g/tex เส้นด้ายรวมจากก้านดอกแบบ 2 ply มีค่าสูงสุด ด้านขนาดของเส้นด้ายมีขนาดเฉลี่ยระหว่าง 224.878 - 270.550 tex ด้านการยืดตัวก่อนขาดมีค่าการยืดตัวระหว่าง 3.351 - 4.182 % เส้นด้ายรวมจากก้านใบแบบ 3 ply มีค่าสูงสุด เส้นด้ายเชือกมีขนาดเฉลี่ยระหว่าง 456.514 - 972.144 tex และมีค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงขาดเท่ากับ 2.227 - 3.994 g/tex เส้นด้ายเชือกจากก้านใบแบบ 3-3 ply มีค่าสูงที่สุด ด้านการยืดตัวมีค่า 8.098 - 9.266 % เส้นด้ายเชือกจากก้านดอกแบบ 2-3 ply มีค่าสูงที่สุด ปัจจัยที่มีผลต่อเส้นด้ายรวมพบว่า ชนิดของก้านบัวมีผลต่อขนาด ($P \leqslant 0.05$) และจำนวนของเส้นด้ายมีผลต่อขนาดและการยืดตัว ($P \leqslant 0.01$) ปัจจัยที่มีผลต่อเส้นด้ายเชือก พบว่าชนิดของก้านบัวมีผลต่อขนาด ($P \leqslant 0.01$) จำนวนของเส้นด้ายมีผลต่อขนาด ความแข็งแรงต่อแรงดึงขาดและการยืดตัว ($P \leqslant 0.01$) ปฏิสัมพันธ์ระหว่างชนิดของก้านบัวและจำนวนของเส้นด้ายไม่มีผลต่อสมบัติของด้ายรวมและด้ายเชือก

คำสำคัญ : เส้นด้ายรวม; เส้นด้ายเชือก; เส้นใยธรรมชาติ; บัวหลวง

[1] *คณะศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง กรุงเทพ*

[1] *Faculty of Education, Ramkhamhaeng University, Bangkok*

[*] *Corresponding Author, Tel. 0 2310 8331, E - mail: nathasar.jj@gmail.com*

ISSN 2672-9369 (Online)

Abstract

The objectives of this research were to study the physical properties of lotus ply yarns and cord yarns classified as Z on Z twist. The comparison of types of lotus stalk, the amounts of yarn affecting the yarn number, tenacity and elongation were studied. The experimental design used was factorial experiment in CRD. The preparation process of lotus fiber was done by stretching method from the milky latex inside the stalk of lotus using flower stalks and leaf stalks. The ply yarns spun in 2 ply and 3 ply and the cord yarns spun in 2-2 ply, 2-3 ply, 3-2 ply, and 3-3 ply. The yarns were tested for physical properties according to ASTM. The results were as follows: the ply yarns had values of tenacity obtained ranged from 5.446 - 6.090 g/tex. The 2 ply yarn of flower stalks had the highest tenacity. The yarn number obtained was 224.878 - 270.550 tex. The values of elongation obtained ranged from 3.351 - 4.182 %. The 3 ply yarn of leaf stalks had the highest the yarn number and elongation. The cord yarns had the yarn number obtained at 456.514 - 972.144 tex. The values of tenacity obtained ranged from 2.227 - 3.994 g/tex. The 3-3 ply yarn of leaf stalks had the highest yarn number and tenacity. The values of elongation obtained were between 8.098 - 9.266 %. The 2-3 ply yarn of flower stalks had the highest elongation. Ply yarns revealed that the type of the lotus stalk significantly affected the yarn number at 0.05 level. The amount of yarn significantly affected yarn number and elongation at 0.01 level. Cord yarns showed that the type of the lotus stalk significantly affected yarn number at 0.01 level. The amount of yarn significantly affected yarn number, tenacity and elongation at 0.01 level. In contrast, interaction between the types of the lotus stalk and the amounts of yarn did not statistically affect the properties of ply and cord yarns.

Keywords: Ply Yarn; Cord Yarn; Natural Fiber; Lotus

บทนำ

บัวหลวงเป็นพืชที่มีมานานถึง 135 ล้านปีมาแล้ว กระจายอยู่ในทวีปใหญ่ ๆ ทั่วโลกคือ ทวีปเอเชีย ทวีปออสเตรเลีย ทวีปอเมริกาเหนือและทวีปแอฟริกาใต้ บัวหลวงจัดเป็นพืชน้ำที่เป็นไม้ล้มลุก อยู่ในวงศ์ Nelumbonaceae สกุลนีลัมโบ (Nelumbo) จัดเป็นประเภทปทุมชาติ (Lotus) บัวหลวงพื้นเมือง (*Nelumbo nucifera* Gaertn.) มีถิ่นกำเนิดในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ สำหรับในเมืองไทยนั้นบัวหลวงจัดเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของไทย ซึ่งมีการปลูกหลายพื้นที่ในประเทศไทยตั้งแต่ภาคเหนือไปจนถึงภาคใต้ เช่น จังหวัดพะเยา พิษณุโลก พิจิตร นครสวรรค์ นครปฐม ปทุมธานี นครสวรรค์ อุดรธานี และพัทลุง [1] ส่วนต่าง ๆ ของบัวหลวงสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย ดอกบัวนำไปใช้ในการบูชาพระหรือจัดตกแต่งสถานที่ ฝักบัวและไหลบัวสามารถนำไปบริโภคเป็นอาหารหรือนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อาหาร ส่วนของเหง้าบัวใช้เป็นสมุนไพร กลีบดอกบัวนิยมนำไปประกอบอาหารและทำชา นอกจากนี้ยังสามารถใช้ประโยชน์ของบัวในด้านสิ่งทอและเครื่องนุ่งห่มได้อีกด้วย [2] จากการศึกษาค่าโมดูลัสของเส้นใยบัวพบว่ามีค่าเท่ากับ 146.81 cN/dTex ซึ่งขนาดของโมดูลัสเริ่มต้นจะบ่งชี้ถึงความง่ายในการเสียรูปของเส้นใยภายใต้น้ำหนักที่น้อย และสะท้อนถึงความแข็งแกร่งของเส้นใย ค่าความแข็งแรงต่อการดึงขาดเท่ากับ 3.44 cN/dTex ซึ่งมีค่าสูงกว่าฝ้าย ขนแกะและไหม และมีค่าใกล้เคียงกับรามีมีค่าการยืดตัวเท่ากับ 2.75 % ซึ่งมีค่าต่ำกว่าฝ้าย ขนแกะและไหม [3] ลักษณะลำต้นของบัวหลวงจะมีเหง้า ไหล หรือหัวฝังอยู่ในดินโคลนใต้ผิวน้ำ ใบเป็นใบเดี่ยวรูปเกือบกลมขนาดใหญ่มีสีเขียว และแผ่นใบจะชูเหนือน้ำ ก้านใบรูปร่าง

เกือบกลม อวบ แข็ง มีสีเขียวแต่ส่วนที่อยู่ใต้น้ำสีจะจางลง และมีหนามขนาดเล็กสีน้ำตาลกระจายตัวทั่วไป ถ้าตัดตามขวางจะเห็นเป็นช่องจำนวน 4 - 5 ช่อง ดอกบัวหลวงพันธุ์สัตตบุษย์ มีกลีบดอกเล็ก ๆ สีขาวซ้อนกัน ลักษณะของก้านดอกจะคล้ายก้านใบ มีสีเขียวอ่อนจนถึงเหลือง แข็งเล็กน้อย ภาคตัดตามขวางจะเห็นเป็นช่องขนาดใหญ่ 7 - 8 ช่อง บริเวณเนื้อเยื่อชั้นนอก (Cortex) ของก้านใบบัวและก้านดอกบัว ประกอบด้วยเซลล์สเคลอเรนไคมา (Sclerenchyma) เป็นที่สะสมของน้ำยางสีขาวคล้ายน้ำนม (Milky Latex) เมื่อสัมผัสอากาศจะกลายเป็นสีคล้ำและเหนียวติดกันเป็นเส้นใย เรียกว่า ใยบัว เนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชั่น (Oxidation) [4] ซึ่งสามารถนำไปผลิตเป็นเส้นด้ายและผืนผ้าได้ ผ้าใยบัวมีสมบัติคล้ายกับผ้าลินินผสมกับผ้าไหม แต่มีจุดเด่นตรงที่เนื้อบางเบาสวมใส่สบายและระบายความร้อนได้ดี โดยในยามที่อากาศเย็นเมื่อสวมใส่ผ้าใยบัวจะอุ่น และในยามที่อากาศร้อนเมื่อสวมใส่จะรู้สึกเย็นสบาย เนื้อผ้าไม่ยับง่าย [5] การผลิตเส้นด้ายจากใยบัวในปัจจุบันพบว่ายังมีปัญหาเรื่องต้นทุนการผลิตที่สูง และกรรมวิธีที่สิ้นเปลืองเวลา จึงนิยมผลิตเส้นด้ายใยบัวผสมกับเส้นใยชนิดอื่นโดยใช้สัดส่วนของเส้นใยบัวเพียงร้อยละ 15 จากการศึกษาสมบัติเส้นด้ายใยบัวหลวงที่ได้จากก้านบัวด้วยวิธีการหมักและลอกเส้นใยออกเพื่อนำไปปั่น แม้ว่าจะได้ปริมาณของเส้นใยจำนวนมากและประหยัดเวลามากกว่าแต่ยังไม่มีสมบัติเหมาะสมในการผลิตเป็นเสื้อผ้า โดยพบว่าเส้นด้ายที่ได้มีลักษณะที่เป็นเส้นด้ายขนาดใหญ่ (522.65 - 828.10 tex) ความสม่ำเสมอต่ำ (Below Grade D) รวมถึงมีค่าความแข็งแรงและการยืดตัวไม่สูงมากนัก (1.700 - 3.020 g/tex และ 1.390 - 2.098 %) [6]

ดังนั้น งานวิจัยนี้มีแนวคิดในการศึกษาสมบัติของเส้นด้ายจากใยบัวหลวงที่ได้จากวิธีการดึงยืดน้ำยางด้านขนาด ความแข็งแรงของเส้นด้ายหรือที่เรียกว่า ความคงทนของเส้นด้าย เป็นการสะท้อนคุณภาพของเส้นด้ายและการยืดตัวของเส้นด้ายซึ่งเป็นสมบัติที่จำเป็นในการผลิตเส้นด้ายให้เหมาะสมสำหรับการผลิตเป็นผืนผ้าและสิ่งทออื่น ๆ การศึกษาสมบัติให้ตรงกับความต้องการและเหมาะสมต่อการใช้งานมีความจำเป็นอย่างยิ่งเพื่อตอบสนองต่อความต้องการของผู้บริโภค และเพื่อให้สอดคล้องกับอุตสาหกรรมสิ่งทอในปัจจุบันที่ได้ให้ความสำคัญกับการพัฒนาสิ่งทอ โดยเฉพาะเส้นใยจากวัสดุทางธรรมชาติที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม (Eco-Friendly Fibers) และการพัฒนาเส้นใยจากผลผลิตทางการเกษตรและขยะเหลือใช้จากการเกษตร เพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าและเป็นการสร้างโอกาสใหม่ตามแนวทางของทฤษฎีการนำของเหลือใช้กลับมาสร้างประโยชน์ใหม่ (Upcycling) และการใช้ประโยชน์ของทรัพยากรธรรมชาติให้คุ้มค่า เพื่อลดจำนวนการใช้ทรัพยากรธรรมชาติและส่งเสริมให้เกิดความยั่งยืน (Sustainable Design) [7] อีกทั้งช่วยลดปัญหาภาวะโลกร้อน ซึ่งเป็นวิกฤตการณ์ที่ทั่วโลกให้ความสำคัญ เนื่องจากมีการทำนาบัวในหลายพื้นที่ของประเทศไทย ทำให้มีเศษวัสดุเหลือใช้จากก้านบัวที่ต้องกำจัดทิ้งเป็นจำนวนมาก ซึ่งในปัจจุบันยังไม่มีการนำก้านบัวเหลือทิ้งมาแปรรูปให้เกิดประโยชน์มากนัก สำหรับวิธีการกำจัดคือ เผาทำลาย ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพอากาศ ปัจจุบันประเทศไทยมีสัดส่วนการกระจายตัวของ PM2.5 ที่มีความเข้มข้นมากกว่า 25 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตรขึ้นไป ครอบคลุมพื้นที่คิดเป็นร้อยละ 93 ของพื้นที่ประเทศ [8] ส่งผลกระทบต่อโดยตรงต่อสิ่งแวดล้อมและก่อให้เกิดภาวะเรือนกระจกและเกิดภาวะโลกร้อน รวมถึงการเกิดการละลายของน้ำแข็งขั้วโลก จากการรายงานของ [9] พบว่าถ้ามีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มมากขึ้นเป็น 2 เท่าจากปัจจุบัน ภายในปี ค.ศ. 2100 อุณหภูมิเฉลี่ยของโลกจะสูงขึ้นถึง 4.4 องศาเซลเซียส ซึ่งจะส่งผลกระทบร้ายแรงต่อโลก อีกทั้งกระทรวงพลังงานของประเทศไทยได้วางแผนพลังงานทดแทน 15 ปี (พ.ศ. 2551 - 2565) ขึ้น โดยตั้งเป้าที่จะลดก๊าซเรือนกระจกร้อยละ 20 ถึงร้อยละ 25 ภายในปี ค.ศ. 2030 [10]

การวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้นำวัสดุทางการเกษตรที่เหลือใช้จากก้านของบัวหลวง นำมาผลิตเป็นเส้นด้ายและปั่นเป็นเส้นด้ายควบเพื่อลดปัญหาที่มักเกิดกับด้ายเดี่ยว คือ เมื่อนำไปใช้ในกระบวนการทอ เส้นด้ายจะไม่สามารถทนแรงเสียดสีได้ นอกจากนี้ยังเป็นการส่งเสริมให้ใช้ภูมิปัญญาชาวบ้านเพื่อใช้ประโยชน์จากทรัพยากรในท้องถิ่นให้เกิดประโยชน์ได้อย่างยั่งยืน โดยมีวัตถุประสงค์ของงานวิจัยเพื่อศึกษาสมบัติของเส้นด้ายรวมและเส้นด้ายเชือกจากเส้นใยบัวหลวงแบบ Z on Z และเปรียบเทียบผลของชนิดก้านบัวและจำนวนของเส้นด้ายที่มีต่อสมบัติของเส้นด้ายด้านขนาด ความแข็งแรงต่อแรงดึงขาด และการยืดตัว วางแผนการทดลองแบบ Factorial Experiment in Completely Randomized Design (CRD) โดยทำการทดลอง 3 ซ้ำ ปัจจัยที่ศึกษามี

ISSN 2672-9369 (Online)

2 ปัจจัย คือ ชนิดของก้านบัว ได้แก่ ก้านดอกบัวและก้านใบบัวจากบัวหลวงพันธุ์สัตตบุษย์ และจำนวนของเส้นด้ายที่ใช้ในการปั่น ได้แก่ 2 ply และ 3 ply สำหรับเส้นด้ายรวม และ 2-2 ply, 2-3 ply, 3-2 ply และ 3-3 ply สำหรับเส้นด้ายเชือก

วิธีดำเนินการวิจัย

1. วิธีการเตรียมเส้นด้ายจากใยบัวหลวง

เส้นด้ายที่ใช้ในการทดลอง ได้จากเส้นใยที่เกิดจากน้ำยางสีขาว (Milky Latex) ในส่วนของเซลล์สเคลอเรนไคมา (Sclerenchyma) ภายในก้านบัวหลวงพันธุ์สัตตบุษย์อายุ 4 เดือน จากนาบัว จังหวัดอุดรธานี ดังรูปที่ 1 โดยมีขนาดของลำต้นที่ปลายโคนประมาณ 2 - 3 เซนติเมตร ส่วนความยาวจะคัดที่มากกว่า 100 เซนติเมตร โดยนำก้านบัวจากก้านดอกและก้านใบที่มีความยาว 80 - 90 เซนติเมตร ดังรูปที่ 2(ก) แบ่งเป็นท่อนท่อนละ 10 เซนติเมตร จำนวน 5 ท่อน เพื่อทำการดึงยืดน้ำยาง ใช้มีดควั่นก้านบัวเพื่อให้เป็นร่องและง่ายต่อการหัก จากนั้นทำการหักก้านบัวและดึงก้านบัวออกจากกันด้วยระยะห่าง 50 เซนติเมตร เพื่อให้น้ำยางสัมผัสอากาศและเปลี่ยนเป็นเส้นใย ดังรูปที่ 2(ข) จากนั้นทำการบิดเส้นใยที่ได้จากน้ำยางที่ออกมาจากก้านบัว จากนั้นใช้มือปั่นเส้นใยให้รวมตัวกันโดยปั่นให้น้ำยางสัมผัสบนไม้กระดานขนาด 40 x 100 x 5 เซนติเมตร ทำต่อไปเรื่อย ๆ จนได้เส้นด้ายเดี่ยวยาวต่อกันไป ดังรูปที่ 3

2. วิธีการปั่นเส้นด้ายรวมและเส้นด้ายเชือกจากเส้นใยบัวหลวง

หลังจากที่ได้เส้นด้ายเดี่ยวที่เกิดจากการปั่นจากน้ำยางแล้ว นำเส้นด้ายมาทำการค้นเครือเส้นด้ายบนหลักเฝือเพื่อเตรียมปั่น ดังรูปที่ 4(ก) ทำการปั่นด้วยมือโดยใช้เครื่องปั่นด้ายที่พัฒนาโดยชาวบ้านชุมชนบ้านดู่ จังหวัดนครราชสีมา โดยใช้ความเร็วในการปั่น 100 รอบต่อนาที ปั่นทิศทางทวนเข็มนาฬิกา (Z-Twist) ซึ่งเป็นวิธีการปั่นที่นิยมใช้กับเส้นใยธรรมชาติจากเซลลูโลส ดังรูปที่ 4(ข) ทำการปั่นเป็นเส้นด้ายรวมแบบ 2 ply และ 3 ply สำหรับเส้นด้ายเชือกทำการปั่นแบบ 2-2 ply, 2-3 ply, 3-2 ply และ 3-3 ply จะได้เส้นด้ายรวมและเส้นด้ายเชือกจากเส้นใยบัวหลวง ดังรูปที่ 5

3. การทดสอบเส้นด้าย

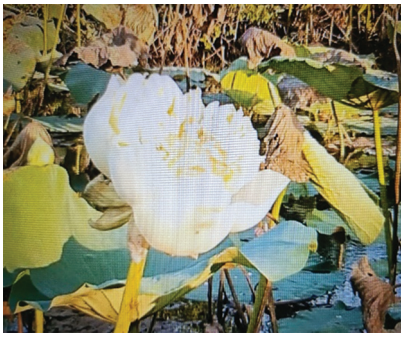
นำเส้นด้ายไปทดสอบหาขนาดด้วยมาตรฐาน ASTM D1059 - 01 Standard Test Method for Yarn Number Based on Short-Length Specimens (ASTM) ทดสอบความแข็งแรงเส้นด้ายและการยืดตัวของเส้นด้ายด้วยเครื่อง Instron Tensile ดังรูปที่ 6 ตามมาตรฐาน ASTM D 2256-02 Standard Test Method for Tensile Properties of Yarn by the Single - Strand Method (ASTM International, 2010) โดยกำหนดค่าการทดลองดังนี้

- Rate of Displacement: 300 mm/min
- Test Length: 250 mm
- Testing Configuration: Configuration A, Straight Specimen
- Testing Condition: Conditioned Testing at 21±1 ^{o}C, 65±2 % RH

ทำการทดลองซ้ำให้ครบจำนวน 24 สิ่งทดลอง สำหรับเส้นด้ายรวม และจำนวน 48 สิ่งทดลอง สำหรับเส้นด้ายเชือก โดยทดสอบชิ้นงานละ 10 เส้นด้าย

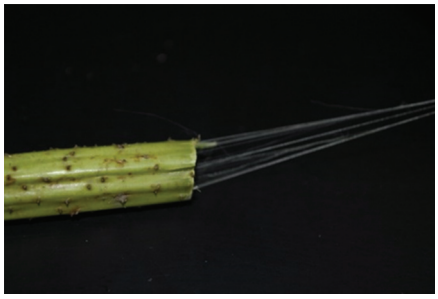
4. การวิเคราะห์ข้อมูล

นำเส้นด้ายรวมและเส้นด้ายเชือกจากเส้นใยบัวหลวงแบบ Z on Z มาวิเคราะห์หาค่าความแปรปรวนโดยใช้ค่าสถิติวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และจำแนกเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยสมบัติทางกายภาพของเส้นด้ายรวมและเส้นด้ายเชือกโดยวิธี Least Significant Difference (LSD)



รูปที่ 1 บัวหลวงพันธุ์สัตตบุษย์

(ก) ก้านบัวหลวงพันธุ์สัตตบุษย์



(ข) น้ำยางภายในก้านบัว

รูปที่ 2 ลักษณะของก้านบัว

รูปที่ 3 เส้นด้ายเดี่ยวจากเส้นใยบัว

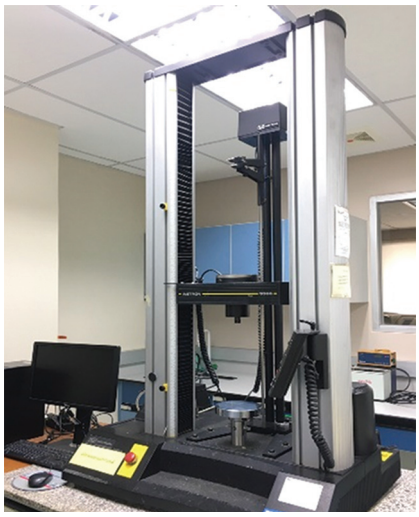
(ก) ค้นเครือเส้นด้ายบนหลักเฝือ

(ข) การปั่นเส้นด้าย

รูปที่ 4 การปั่นเส้นด้ายจากเส้นใยบัว

ISSN 2672-9369 (Online)

รูปที่ 5 เส้นด้ายรวมและเส้นด้ายเชือกจากเส้นใยบัวหลวง



รูปที่ 6 เครื่อง Instron Tensile

ผลการทดลองและวิจารณ์

1. สมบัติของเส้นด้ายรวม ด้านขนาด ความแข็งแรงต่อแรงดึงขาดและการยืดตัวก่อนขาด

(ก) เส้นด้ายรวมแบบ 2 ply

(ข) เส้นด้ายรวมแบบ 3 ply

รูปที่ 7 ลักษณะของเส้นด้ายรวม

จากรูปที่ 7 เส้นด้ายรวมแบบ 2 ply เกิดจากเส้นด้ายเดี่ยวจำนวน 2 เส้น บิดเกลียวกันในทิศทาง Z มีลักษณะเส้นด้ายไม่ใหญ่มากและไม่สม่ำเสมอ และเส้นด้ายรวมแบบ 3 ply ซึ่งเกิดจากเส้นด้ายเดี่ยวจำนวน 3 เส้นบิดเกลียวในทิศทาง Z มีลักษณะเส้นด้ายไม่ใหญ่มากและไม่สม่ำเสมอ โดยจะมีขนาดใหญ่กว่าเส้นด้ายรวมแบบ 2 ply

ตารางที่ 1 ค่าเฉลี่ยขนาด (tex) ของเส้นด้ายรวม

ชนิดของก้านบัว	จำนวนเส้นด้าย (ply)	สมบัติของเส้นด้าย		
		ขนาด (tex)	ความแข็งแรงต่อแรงดึงขาด (g/tex)	การยืดตัวก่อนขาด (%)
ก้านดอก	2 ply	224.878	6.090	3.427
ก้านดอก	3 ply	264.300	5.846	4.094
ก้านใบ	2 ply	232.156	5.446	3.351
ก้านใบ	3 ply	270.500	6.014	4.182

จากตารางที่ 1 พบว่าค่าเฉลี่ยขนาดของเส้นด้ายรวมที่ได้จากก้านดอกและก้านใบ โดยการปั่นแบบ 2 ply และ 3 ply มีค่าเฉลี่ยขนาดแตกต่างกันไม่มากนัก โดยมีค่าเฉลี่ยระหว่าง 224.878 - 270.550 tex เส้นด้ายรวมจากก้านดอกมีค่าเฉลี่ยขนาดต่ำกว่าเส้นด้ายรวมจากก้านใบ และเส้นด้ายรวมที่ปั่นแบบ 2 ply มีค่าเฉลี่ยขนาดต่ำกว่าแบบ 3 ply เส้นด้ายรวมที่มีค่าเฉลี่ยขนาดต่ำที่สุด ได้แก่ เส้นด้ายรวมจากก้านดอกแบบ 2 ply ในขณะที่เส้นด้ายรวมที่มีค่าเฉลี่ยขนาดสูงสุด ได้แก่ เส้นด้ายรวมจากก้านใบแบบ 3 ply ซึ่งจัดเป็นด้ายขนาดใหญ่ [11]

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนค่าเฉลี่ยขนาดของเส้นด้ายรวมที่ชนิดของก้านบัวและจำนวนเส้นด้ายต่างกัน พบว่าชนิดของก้านบัวมีผลต่อขนาดของเส้นด้ายรวม ($P \leqslant 0.05$) เส้นด้ายรวมที่ได้จากก้านใบมีค่าเฉลี่ยสูงกว่าเส้นด้ายรวมที่ได้จากก้านดอก (251.33 tex และ 244.590 tex) และจำนวนของเส้นด้ายที่ใช้ในการปั่นมีผลต่อขนาดของเส้นด้ายรวม ($P \leqslant 0.01$) โดยเส้นด้ายรวมแบบ 3 ply มีค่าเฉลี่ยสูงกว่าเส้นด้ายรวมแบบ 2 ply (267.400 tex และ 228.517 tex) ส่วนปฏิสัมพันธ์ระหว่างชนิดของก้านบัวและจำนวนของเส้นด้ายที่ใช้ในการปั่นไม่มีผลต่อขนาดของเส้นด้ายรวม

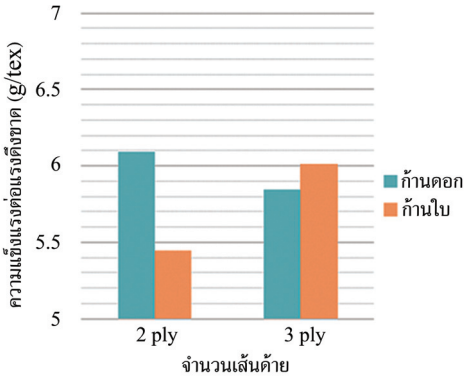
ด้านความแข็งแรงต่อแรงดึงขาด พบว่าค่าเฉลี่ยความแข็งแรงของเส้นด้ายรวมที่ได้จากก้านดอกและก้านใบ โดยการปั่นแบบ 2 ply และ 3 ply มีค่าเฉลี่ยระหว่าง 5.446 - 6.090 g/tex ซึ่งแตกต่างกันเล็กน้อย โดยเส้นด้ายรวมจากก้านดอกมีค่าเฉลี่ยความแข็งแรงสูงกว่าเส้นด้ายรวมจากก้านใบเล็กน้อย และเส้นด้ายรวมที่ปั่นแบบ 2 ply มีค่าเฉลี่ยความแข็งแรงต่ำกว่าแบบ 3 ply เส้นด้ายรวมที่มีค่าเฉลี่ยความแข็งแรงต่ำที่สุด ได้แก่ เส้นด้ายรวมจากก้านใบแบบ 2 ply ในขณะที่เส้นด้ายรวมที่มีค่าเฉลี่ยความแข็งแรงสูงสุด ได้แก่ เส้นด้ายรวมจากก้านดอกแบบ 2 ply

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนค่าเฉลี่ยความแข็งแรงต่อแรงดึงขาดของเส้นด้ายรวมที่ชนิดของก้านบัวและจำนวนเส้นด้ายต่างกัน พบว่าชนิดของก้านบัว จำนวนของเส้นด้ายที่ใช้ในการปั่น ไม่มีผลต่อความแข็งแรงของเส้นด้ายรวมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยความแข็งแรงต่อการดึงขาดของเส้นด้ายรวมและชนิดก้านบัวพบว่าความแข็งแรงของเส้นด้ายที่ได้จากก้านดอกจะลดลง เมื่อจำนวนเส้นด้ายที่ใช้ในการปั่นเพิ่มขึ้น ในขณะที่เส้นด้ายที่ได้จากก้านใบจะมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 8 ทั้งนี้ปฏิสัมพันธ์ระหว่างชนิดของก้านบัวและจำนวนของเส้นด้ายที่ใช้ในการปั่นไม่มีผลต่อความแข็งแรงต่อแรงดึงขาดของเส้นด้ายรวมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

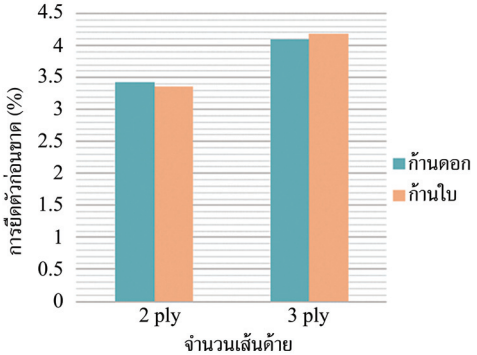
ด้านการยืดตัวก่อนขาดพบว่าค่าเฉลี่ยการยืดตัวของเส้นด้ายรวมที่ได้จากก้านดอกและก้านใบ โดยการปั่นแบบ 2 ply และ 3 ply มีค่าเฉลี่ยแตกต่างกัน โดยเส้นด้ายรวมจากก้านดอกและก้านใบมีค่าเฉลี่ยการยืดตัวใกล้เคียงกันมาก (3.761 % และ 3.767 %) เส้นด้ายรวมที่ปั่นแบบ 2 ply มีค่าเฉลี่ยการยืดตัวต่ำกว่าแบบ 3 ply เส้นด้ายรวมที่มีค่าเฉลี่ยการยืดตัวต่ำที่สุด ได้แก่ เส้นด้ายรวมจากก้านใบแบบ 2 ply ในขณะที่เส้นด้ายรวมที่มีค่าเฉลี่ยการยืดตัวสูงสุด ได้แก่ เส้นด้ายรวมจากก้านใบแบบ 3 ply

ISSN 2672-9369 (Online)

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนค่าเฉลี่ยการยืดตัวของเส้นด้ายรวมที่ชนิดของก้านบัวและจำนวนเส้นด้ายต่างกัน พบว่าจำนวนของเส้นด้ายที่ใช้ในการปั่นมีผลต่อการยืดตัวของเส้นด้ายรวม ($P \leqslant 0.01$) เส้นด้ายรวมแบบ 3 ply มีค่าเฉลี่ยสูงกว่าเส้นด้ายรวมแบบ 2 ply (4.138 % และ 3.389 %) ส่วนชนิดของก้านบัวไม่มีผลต่อการยืดตัวของเส้นด้ายรวมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยการยืดตัวของเส้นด้ายรวมและชนิดก้านบัวพบว่าการยืดตัวของเส้นด้ายที่ได้จากก้านดอกและก้านใบจะมีค่าการยืดตัวที่สูงขึ้น เมื่อจำนวนเส้นด้ายที่ใช้ในการปั่นเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 9 ทั้งนี้ปฏิสัมพันธ์ระหว่างชนิดของก้านบัวและจำนวนของเส้นด้ายที่ใช้ในการปั่นไม่มีผลต่อการยืดตัวของเส้นด้ายรวมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ



รูปที่ 8 ค่าเฉลี่ยความแข็งแรงต่อแรงดึงขาดของเส้นด้ายรวม



รูปที่ 9 ค่าเฉลี่ยการยืดตัวก่อนขาดของเส้นด้ายรวม

การศึกษาสมบัติของเส้นด้ายรวม พบว่าด้านขนาดของเส้นด้ายรวม เส้นด้าย 2 ply มีค่าต่ำกว่าเส้นด้าย 3 ply กล่าวคือเส้นด้าย 2 ply เบอร์ต่ำกว่าเส้นด้าย 3 ply เนื่องจากเส้นด้าย 2 ply มีจำนวนเส้นด้ายเดี่ยวที่ใช้ในการปั่นจำนวน 2 เส้น ซึ่งน้อยกว่าเส้นด้าย 3 ply ที่ใช้จำนวนเส้นด้ายเดี่ยวในการปั่นจำนวนสูงกว่าคือ 3 เส้น จึงทำให้มีขนาดเล็กกว่า และเมื่อดูลักษณะปรากฏของเส้นด้ายพบว่า เส้นด้าย 2 ply มีขนาดเล็กกว่าเส้นด้าย 3 ply ซึ่งเป็นตามที่ [12] กล่าวว่าเส้นด้ายที่มีค่าเท็กซ์สูง จะมีขนาดใหญ่กว่าเส้นด้ายที่มีเท็กซ์ต่ำกว่า ชนิดของก้านดอกและก้านใบบัวมีผลต่อขนาดของเส้นด้าย เส้นด้ายจากก้านใบจะมีค่าเฉลี่ยขนาดสูงกว่าก้านดอก ทั้งนี้อาจเป็นเพราะลักษณะภายในของก้านดอกและก้านใบที่มีจำนวนช่องว่างแตกต่างกัน ทำให้เซลล์สะสมปริมาณน้ำยางไม่เท่ากัน เมื่อนำมาทำเป็นเส้นใยจึงได้ปริมาณเส้นใยไม่เท่ากัน และส่งผลต่อการปั่นเป็นเส้นด้าย จำนวนของเส้นด้ายที่ใช้ในการปั่นมีผลต่อขนาดของเส้นด้าย โดยเส้นด้ายรวมแบบ 3 ply มีค่าเฉลี่ยสูงกว่าเส้นด้ายรวมแบบ 2 ply เมื่อพิจารณาด้านความแข็งแรงต่อแรงดึงขาดของเส้นด้ายรวม พบว่าถึงแม้ว่าเส้นด้าย 2 ply และ 3 ply ที่ได้จากก้านดอกและก้านใบบัวจะมีขนาดต่างกัน แต่ไม่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรง โดยมีค่าใกล้เคียงกับเส้นด้ายฝ้ายที่นิยมใช้ในการผลิตผ้ายกเดนิมนคร [13] ดังนั้นจึงสามารถนำเส้นด้ายจากใยบัว ไปใช้

ในการผลิตผ้าทอพื้นเมืองได้ ในขณะที่จำนวนของเส้นด้ายในการปั่น มีผลต่อต่อค่าการยืดตัวก่อนขาดของเส้นด้ายรวม เส้นด้าย 3 ply จะมีค่าการยืดตัวสูงกว่า 2 ply ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.138 % โดยมีค่าสูงกว่าเส้นใยบัวที่ยังไม่ได้ทำการปั่นเป็นเส้นด้ายที่มีค่าเฉลี่ยการยืดตัวเท่ากับ 1.88 - 4.07 % [14] ทั้งนี้เมื่อพิจารณาด้านขนาด ความแข็งแรงและการยืดตัวของเส้นด้ายรวมแล้ว พบว่าเส้นด้ายรวมจากใยบัวหลวงที่ได้จากก้านดอกและก้านใบสามารถนำไปทำเป็นผลิตภัณฑ์เครื่องนุ่งห่มและเคหะสิ่งทอต่าง ๆ ได้ เช่น เครื่องแต่งกาย ผ้าพันคอ ผ้าคลุมไหล่ ปลอกหมอนอิง และผ้าปูโต๊ะ

2. สมบัติของเส้นด้ายเชือก ด้านขนาด ความแข็งแรงต่อแรงดึงขาดและการยืดตัวก่อนขาด

(ก) เส้นด้ายเชือก 2-2 ply

(ข) เส้นด้ายเชือก 2-3 ply

(ค) เส้นด้ายเชือก 3-2 ply

(ง) เส้นด้ายเชือก 3-3 ply

รูปที่ 10 ลักษณะของเส้นด้ายเชือก

จากรูปที่ 10 เส้นด้ายเชือกแบบ 2-2 ply เกิดจากเส้นด้ายรวม 2 ply จำนวน 2 เส้นบิดเกลียวกัน มีลักษณะเส้นด้ายเล็กที่สุดและไม่สม่ำเสมอ ด้ายเชือกแบบ 2-3 ply เกิดจากเส้นด้ายรวม 3 ply จำนวน 2 เส้นบิดเกลียวกัน มีลักษณะเส้นด้ายค่อนข้างใหญ่และไม่สม่ำเสมอ ด้ายเชือกแบบ 3-2 ply เกิดจากเส้นด้ายรวม 2 ply จำนวน 3เส้นบิดเกลียวกัน มีลักษณะเส้นด้ายค่อนข้างใหญ่และไม่สม่ำเสมอ และมีขนาดใกล้เคียงกับเส้นด้ายเชือกแบบ 2-3 ply และด้ายเชือกแบบ 3-3 ply เกิดจากเส้นด้ายรวม 3 ply จำนวน 3 เส้นบิดเกลียวกัน มีลักษณะเส้นด้ายใหญ่ที่สุดและไม่สม่ำเสมอ ทั้งนี้เนื่องจากผลิตเส้นด้ายด้วยวิธีการปั่นด้วยมือ (Hand-Made) [15] ได้กล่าวไว้ว่าความไม่สม่ำเสมอและความไม่สมบูรณ์ของเส้นด้าย อาจกำหนดได้จากการเปลี่ยนแปลงในเส้นด้ายซึ่งเกิดขึ้นได้จากกระบวนการผลิต

จากตารางที่ 2 พบว่าค่าเฉลี่ยขนาดของเส้นด้ายเชือกที่ได้จากก้านดอกและก้านใบโดยการปั่นแบบ 2-2 ply 2-3 ply 3-2 ply และ 3-3 ply มีค่าเฉลี่ยขนาดแตกต่างกันมาก โดยมีค่าเฉลี่ยระหว่าง 465.514 - 972.144 tex เส้นด้ายเชือกที่มีค่าเฉลี่ยขนาดสูงสุด ได้แก่ เส้นด้ายเชือกจากก้านใบแบบ 3-3 ply ส่วนเส้นด้ายเชือกที่มีค่าเฉลี่ยขนาดต่ำสุด ได้แก่ เส้นด้ายเชือกจากก้านดอกแบบ 2-2 ply

ISSN 2672-9369 (Online)

ตารางที่ 2 ค่าเฉลี่ยขนาด ความแข็งแรงต่อแรงดึงขาด และการยืดตัวก่อนขาดของเส้นด้ายเชือก

ชนิดของก้านบัว	จำนวนเส้นด้าย (ply)	สมบัติของเส้นด้าย		
		ขนาด (tex)	ความแข็งแรงต่อแรงดึงขาด (g/tex)	การยืดตัวก่อนขาด (%)
ก้านดอก	2-2 ply	465.514	2.227	8.309
ก้านดอก	2-3 ply	740.911	2.478	9.266
ก้านดอก	3-2 ply	609.056	3.640	8.796
ก้านดอก	3-3 ply	968.522	3.936	9.224
ก้านใบ	2-2 ply	483.844	2.260	8.098
ก้านใบ	2-3 ply	748.711	2.576	9.249
ก้านใบ	3-2 ply	624.978	3.672	8.921
ก้านใบ	3-3 ply	972.144	3.994	9.122

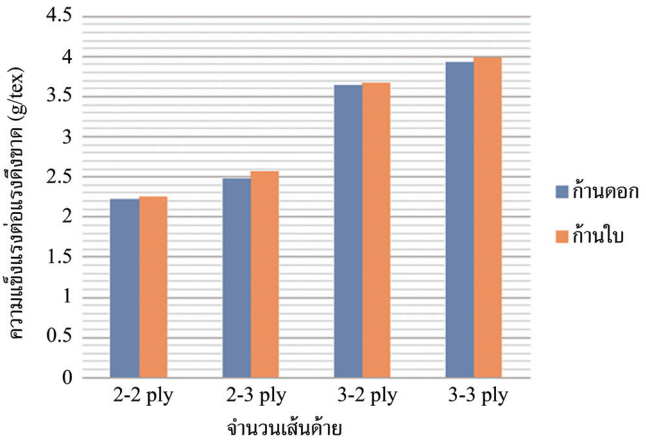
ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนค่าเฉลี่ยขนาดของเส้นด้ายเชือกที่ชนิดของก้านบัวและจำนวนเส้นด้ายต่างกัน พบว่าชนิดของก้านบัวมีผลต่อขนาดของเส้นด้ายเชือก ($P \leqslant 0.01$) เส้นด้ายเชือกที่ได้จากก้านใบมีค่าเฉลี่ยสูงกว่าเส้นด้ายเชือกที่ได้จากก้านดอก (707.419 tex และ 696.001 tex) และจำนวนเส้นด้ายที่ใช้ในการปั่นมีผลต่อขนาดของเส้นด้ายเชือก ($P \leqslant 0.01$) เส้นด้ายเชือกแบบ 3-3 ply มีค่าเฉลี่ยสูงกว่าเส้นด้ายเชือกแบบ 2-3 ply 3-2 ply และ 2-2 ply ตามลำดับ (970.330 tex, 744.811 tex, 617.017 tex และ 474.697 tex ตามลำดับ) ส่วนปฏิสัมพันธ์ระหว่างชนิดของก้านบัวและจำนวนของเส้นด้ายที่ใช้ในการปั่นไม่มีผลต่อขนาดของเส้นด้ายเชือกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ด้านความแข็งแรงต่อแรงดึงขาดพบว่า ค่าเฉลี่ยความแข็งแรงของเส้นด้ายเชือกจากก้านดอกบัวและก้านใบบัว โดยการปั่นแบบ 2-2 ply 2-3 ply 3-2 ply และ 3-3 ply มีค่าเฉลี่ยความแข็งแรงแตกต่างกันค่อนข้างมาก โดยมีค่าเฉลี่ยความแข็งแรงอยู่ระหว่าง 2.227 - 3.994 g/tex เส้นด้ายเชือกที่มีค่าเฉลี่ยความแข็งแรงต่ำที่สุด ได้แก่ เส้นด้ายเชือกจากก้านดอกแบบ 2-2 ply ในขณะที่เส้นด้ายเชือกที่มีค่าเฉลี่ยความแข็งแรงสูงสุด ได้แก่ เส้นด้ายเชือกจากก้านใบแบบ 3-3 ply

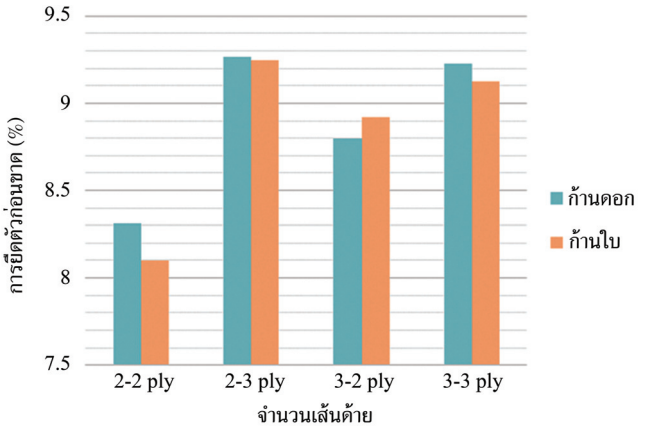
ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนค่าเฉลี่ยความแข็งแรงต่อแรงดึงขาดของเส้นด้ายเชือกที่ชนิดของก้านบัวและจำนวนเส้นด้ายต่างกัน พบว่าจำนวนเส้นด้ายที่ใช้ในการปั่นมีผลต่อความแข็งแรงของเส้นด้ายเชือก ($P \leqslant 0.01$) เส้นด้ายเชือกแบบ 3-3 ply มีค่าเฉลี่ยสูงกว่าเส้นด้ายเชือกแบบ 3-2 ply 2-3 ply และ 2-2 ply ตามลำดับ (3.965 g/tex, 3.656 g/tex, 2.527 g/tex และ 2.243 g/tex ตามลำดับ) ส่วนชนิดของก้านบัวไม่มีผลต่อความแข็งแรงต่อแรงดึงขาดของเส้นด้ายเชือกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยความแข็งแรงต่อการดึงขาดของเส้นด้ายเชือกและชนิดก้านบัว พบว่าความแข็งแรงของเส้นด้ายที่ได้จากก้านดอกและก้านใบจะเพิ่มขึ้น เมื่อจำนวนเส้นด้ายที่ใช้ในการปั่นเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 11 ทั้งนี้ปฏิสัมพันธ์ระหว่างชนิดของก้านบัวและจำนวนของเส้นด้ายที่ใช้ในการปั่นไม่มีผลต่อความแข็งแรงต่อแรงดึงขาดของเส้นด้ายเชือกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ด้านการยืดตัวก่อนขาดพบว่า ค่าเฉลี่ยความแข็งแรงของเส้นด้ายเชือกจากก้านดอกบัวและก้านใบบัว โดยการปั่นแบบ 2-2 ply 2-3 ply 3-2 ply และ 3-3 ply มีค่าเฉลี่ยการยืดตัวไม่แตกต่างกันมากนัก โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 8.098 - 9.266 % เส้นด้ายเชือกที่มีค่าเฉลี่ยการยืดตัวต่ำที่สุด ได้แก่ เส้นด้ายเชือกจากก้านใบแบบ 2-2 ply ในขณะที่เส้นด้ายเชือกที่มีค่าเฉลี่ยการยืดตัวสูงสุด ได้แก่ เส้นด้ายเชือกจากก้านดอกแบบ 2-3 ply

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนค่าเฉลี่ยการยืดตัวของเส้นด้ายเชือกที่ชนิดของก้านบัวและจำนวนเส้นด้ายต่างกัน พบว่าจำนวนเส้นด้ายที่ใช้ในการปั่นมีผลต่อความแข็งแรงของเส้นด้ายเชือก ($P \leqslant 0.01$) เส้นด้ายเชือกแบบ 2-3 ply มีค่าเฉลี่ยสูงกว่าเส้นด้ายเชือกแบบ 3-3 ply 3-2 ply และ 2-2 ply ตามลำดับ (9.257 %, 9.173 %, 8.858 % และ 8.203 % ตามลำดับ) ส่วนชนิดของก้านบัวไม่มีผลต่อการยืดตัวของเส้นด้ายเชือกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยการยืดตัวของเส้นด้ายเชือกและชนิดก้านบัวพบว่าค่าการยืดตัวของเส้นด้ายที่ได้จากก้านดอกและก้านใบจะมีการเปลี่ยนแปลง เมื่อจำนวนเส้นด้ายที่ใช้ในการปั่นไม่เท่ากัน ดังรูปที่ 12 ทั้งนี้ปฏิสัมพันธ์ระหว่างชนิดของก้านบัวและจำนวนของเส้นด้ายที่ใช้ในการปั่นไม่มีผลต่อความแข็งแรงของเส้นด้ายเชือกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ทั้งนี้ปฏิสัมพันธ์ระหว่างชนิดของก้านบัวและจำนวนของเส้นด้ายที่ใช้ในการปั่นไม่มีผลต่อการยืดตัวของเส้นด้ายเชือกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ



รูปที่ 11 ค่าเฉลี่ยความแข็งแรงต่อแรงดึงขาดของเส้นด้ายเชือก



รูปที่ 12 ค่าเฉลี่ยการยืดตัวก่อนขาดของเส้นด้ายเชือก

การศึกษาสมบัติของเส้นด้ายเชือก พบว่าด้านขนาดของเส้นด้ายเชือก ค่าเฉลี่ยขนาดของเส้นด้ายที่ได้จากก้านดอกและก้านใบ โดยการปั่นแบบ 2-2 ply มีค่าต่ำที่สุดรองลงมาคือ เส้นด้าย 3-2 ply และเส้นด้าย 2-3 ply ในขณะที่เส้นด้าย 3-3 ply มีค่าสูงที่สุด กล่าวคือ เส้นด้าย 2-2 ply เบอร์ต่ำกว่าเส้นด้าย 3-2 ply เส้นด้าย 2-3 ply และเส้นด้าย 3-3 ply ตามลำดับ เนื่องจากเส้นด้าย 2-2 ply มีจำนวนเส้นด้ายรวม 2 ply ที่ใช้ในการปั่นจำนวน 2 เส้น ซึ่งน้อยกว่าเส้นด้าย 3-2 ply ที่ใช้จำนวนเส้นด้ายรวม 2 ply ในการปั่นจำนวนสูงกว่าคือ 3 เส้น เส้นด้าย 2-3 ply ใช้จำนวนเส้นด้ายรวม 3 ply ในการปั่นจำนวน 2 เส้น และเส้นด้าย 3-3 ply ใช้จำนวนเส้นด้ายรวม 3 ply ในการปั่นจำนวน 3 เส้น และเมื่อดูลักษณะปรากฏของเส้นด้ายพบว่าเส้นด้าย

ISSN 2672-9369 (Online)

2-2 ply มีขนาดเล็กที่สุด และเล็กกว่าเส้นด้าย 3-3 ply อย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่เส้นด้าย 3-2 ply และเส้นด้าย 2-3 ply มีขนาดใกล้เคียงกัน โดยเส้นด้ายเชือกทั้ง 4 แบบ จัดเป็นเส้นด้ายขนาดใหญ่ (Heavy Yarn) [16] กล่าวไว้ว่า เส้นด้ายที่มีขนาดใหญ่จะมีขนาดตั้งแต่ 30 - 60 เท็กซ์ เส้นด้ายขนาดกลางมีขนาดตั้งแต่ 11 - 20 เท็กซ์ และเส้นด้ายขนาดเล็กมีขนาดตั้งแต่ 6 - 19 เท็กซ์ ชนิดของก้านบัวจากดอกและใบ มีผลต่อขนาดของเส้นด้ายเชือก ผลการศึกษาเป็นไปในทิศทางเดียวกับผลการศึกษาขนาดของเส้นด้ายรวม เมื่อพิจารณาด้านความแข็งแรงต่อแรงดึงขาดของเส้นด้ายเชือก พบว่าเส้นด้ายที่มีขนาดใหญ่ ได้แก่ เส้นด้าย 3-3 ply จะมีค่าความแข็งแรงสูงที่สุด และเส้นด้ายขนาดเล็กสุด ได้แก่ เส้นด้าย 2-2 ply มีค่าความแข็งแรงต่ำที่สุด โดยมีค่าสูงกว่าสมบัติของเส้นใยบัวหลวงที่ได้จากการหมักน้ำเปล่าเพื่อลอกเส้นใยและนำไปปั่นเป็นเส้นด้าย ซึ่งมีลักษณะที่เป็นเส้นด้ายขนาดใหญ่ มีค่าความแข็งแรงระหว่าง 1.700 - 3.020 g/tex และการยืดตัว 1.390 - 2.098 % [6] และสูงกว่าสมบัติของเส้นด้ายจากบัวหลวงที่ได้จากการต้มในสารละลายโซดาไฟเข้มข้น 2 % เวลา 20 นาที ซึ่งมีค่าความแข็งแรง 1.420 g/tex และการยืดตัว 2.85 % [17] ทั้งนี้เส้นด้ายเชือกทุกแบบเหมาะที่จะนำไปทำผลิตภัณฑ์สิ่งทอที่ไม่ต้องการความแข็งแรงสูงมาก ได้แก่ เครื่องตกแต่งร่างกายและเคหะสิ่งทอประเภทใช้สำหรับตกแต่ง เช่น หมวก ผ้าคลุมไหล่ และผ้าปูรองสิ่งของต่าง ๆ เป็นต้น เมื่อพิจารณาด้านการยืดตัวก่อนขาดของเส้นด้ายเชือก พบว่าค่าการยืดตัวของเส้นด้ายที่ได้จากก้านดอกและก้านใบ โดยการปั่นแบบ 3-3 ply มีค่าสูงที่สุด รองลงมาคือ เส้นด้าย 3-2 ply และเส้นด้าย 2-3 ply ในขณะที่เส้นด้าย 2-2 ply มีค่าต่ำที่สุด จะเห็นได้ว่าเมื่อนำเส้นใยมาปั่นเป็นเส้นด้ายจะส่งผลให้สมบัติบางประการเปลี่ยนแปลงไปและส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพสิ่งทอ และเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นด้ายผักตบชวาผสมเรยอน สัดส่วน 20:80 ที่ผ่านกระบวนการทำความสะอาดด้วยการฟอกและสางด้วยเครื่อง Carding สำหรับนำไปผลิตในระบบโรงงานอุตสาหกรรมได้นั้น พบว่าจะมีค่าเฉลี่ยความเหนียวต่ำกว่าเส้นด้ายจากใยบัวหลวงและมีค่าการยืดตัวก่อนใกล้เคียงกัน [18] ดังนั้นการศึกษาสมบัติทางกายภาพของเส้นด้ายจากเส้นใยบัวหลวง จึงสามารถเพิ่มโอกาสหรือต่อยอดให้กับกลุ่มผู้ผลิตผ้า เพื่อส่งเสริมการใช้งานเส้นด้ายบัวหลวงเข้าสู่ระบบโรงงานอุตสาหกรรมและเครื่องนุ่งห่ม หรือทำเป็นเคหะสิ่งทอ และให้สอดคล้องกับทิศทางการพัฒนาเส้นด้ายจากใยบัวหลวงซึ่งเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมเพื่อให้เกิดความยั่งยืนต่อไป [19] - [20]

สรุปผลการศึกษา

เส้นด้ายรวมที่มีขนาดและการยืดตัวก่อนขาดสูงที่สุด ได้แก่ เส้นด้ายรวมจากก้านใบแบบ 3 ply ปัจจัยเรื่องชนิดของก้าน และจำนวนของเส้นด้ายมีผลต่อขนาด ($P \leqslant 0.05$ และ $P \leqslant 0.01$) โดยเส้นด้ายรวมที่ได้จากก้านใบมีค่าเฉลี่ยสูงกว่าที่ได้จากก้านดอก ปัจจัยเรื่อง จำนวนของเส้นด้ายมีผลต่อการยืดตัว ($P \leqslant 0.01$) โดยจำนวนของเส้นด้ายที่ใช้ในการปั่นมากจะมีค่าการยืดตัวสูงกว่า ด้านความแข็งแรงต่อแรงดึงขาดสูงที่สุด ได้แก่ เส้นด้ายรวมจากก้านดอกแบบ 2 ply ปัจจัยเรื่องชนิดของก้าน และจำนวนของเส้นด้ายไม่มีผลต่อความแข็งแรง เส้นด้ายเชือกที่มีขนาดและความแข็งแรงต่อแรงดึงขาดสูงที่สุด ได้แก่ เส้นด้ายเชือกจากก้านใบแบบ 3-3 ply ปัจจัยเรื่องชนิดของก้านและจำนวนของเส้นด้ายมีผลต่อขนาด ($P \leqslant 0.01$) โดยเส้นด้ายเชือกที่ได้จากก้านใบมีค่าเฉลี่ยสูงกว่าที่ได้จากก้านดอก ปัจจัยเรื่อง จำนวนของเส้นด้ายมีผลต่อความแข็งแรง ($P \leqslant 0.01$) โดยจำนวนของเส้นด้ายที่ใช้ในการปั่นมากจะมีค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงขาดสูงกว่า ด้านการยืดตัวก่อนขาดสูงที่สุด ได้แก่ เส้นด้ายเชือกจากก้านดอกแบบ 2-3 ply ปัจจัยเรื่องจำนวนของเส้นด้ายมีผลต่อการยืดตัว ($P \leqslant 0.01$) ส่วนปฏิสัมพันธ์ระหว่างชนิดของก้านบัวและจำนวนของเส้นด้ายไม่มีผลต่อสมบัติของด้ายรวมและด้ายเชือก เส้นด้ายจากใยบัวหลวงเหมาะกับการนำไปผลิตเป็นผืนผ้า ผลิตภัณฑ์เคหะสิ่งทอ หรือเครื่องประดับตกแต่ง เป็นต้น ทั้งนี้ ในการวิจัยครั้งต่อไปสามารถศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับสมบัติของเส้นด้ายด้านอื่น ๆ เช่น ความสม่ำเสมอ การยืดหยุ่น และความคงทนต่อการใช้งาน และสามารถนำเส้นด้ายผลิตเป็นผืนผ้าเพื่อทดสอบหาสมบัติของผ้าจากเส้นด้ายใยบัวหลวงต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ขอขอบพระคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยรามคำแหง ที่ได้สนับสนุนทุนการวิจัย และขอขอบพระคุณความอนุเคราะห์และความช่วยเหลือจาก กลุ่มปลูกบัว ตำบลเชียงพิณ อำเภอเมือง จังหวัดอุดรธานี ที่ให้ความรู้ในการทำนาบัว และกลุ่มหัตถกรรมผ้าไหมบ้านดู่ ตำบลเมืองปัก อำเภอปักธงชัย จังหวัดนครราชสีมา ที่อนุเคราะห์เครื่องมือในการปั่นเส้นด้าย

References

[1] Karnjanakul, S. (2008). **Lotus1**. Bangkok: Setthasilp Printing

[2] Suwannaro, T. (2016). **Growing Lotus Ornament**. Access (24 August 2021). Available (http://www.eto.ku.ac.th/neweto/e-book/plant/flower/nabua.pdf)

[3] Chen, D. S., Gan, Y. J., and Yuan, X. H. (2012). Structure and Properties of Lotus Fibers. **Advanced Materials Research**. Vol. 476-478, No. 1, pp. 1948-1954. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.476-478.1948

[4] Puthmee, T., Pougsombat, S., Tommol, W., and Janbang, N. (2015). Effects of Pulsing Solution and Stalks Length on Vase Life of 'Suttabhud' Lotus. In **Proceeding of 14th National Horticultural Congress 2015**. pp. 457-462

[5] Gupta, N. (2020). The Spiritual Power of Lotus Fabric. **IOSR Journal of Humanities and Social Science (IOSR-JHSS)**. Vol. 25, Issue 7, pp. 11-15

[6] Punbua, N., Piromthamsiri, K., and Kraisuwan, S. (2018). Physical Properties of Sacred Lotus (*Nelumbo nucifera* Gaertn.) Spun Yarn: The Effects of Cultivars and Stem Parts. **Thai Agriculture Research Journal**. Vol. 36, No. 1, pp. 44-55. (in Thai)

[7] Sachidhanandham, A. (2019). Sustainable Textiles From Lotus. **Asian Textile Journal**. Vol. 28, No. 10, pp. 56-59

[8] Greenpeace. (2020). **Greenpeace's City Rankings for PM2.5 in Thailand**. Access (5 October 2021). Available (https://www.greenpeace.org/thailand/press/19362/world-air-quality-repor-2020/)

[9] United Nation. (2021). **AR6 Climate Change 2021: The Physical Science Basis**. Access (4 August 2021). Available (https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Full_Report.pdf)

[10] Ministry of Energy. (2015). **Alternative Energy Development Plan (AEDP2015)**. Bangkok: Ministry of Energy

[11] Department of Homeland Security. (2011). **Classification of Fibers and Yarns Under the HTSUS**. Access (12 June 2020). Available (https://www.cbp.gov/sites/default/files/assets/documents/2020-Feb/icp005r2_3.pdf)

[12] Lord, P. R. (2003). **Handbook of Yarn Production Technology, Science and Economics**. Cambridge: Woodhead Publishing Ltd, and CRC Press LLC.

[13] Chunchiyakarn, J., Chonsakorn, S., and Momgkholrattanasit, R. (2018). Physical Properties of Yok Denim Nakhon Fabric. **RMUTI Journal Science and Tecnology**. Vol. 11, No. 3, pp. 130-143. (in Thai)

ISSN 2672-9369 (Online)

[14] Rungruangkitkrai, N. (2012). Lotus Weaving, Myanmar. **Colourway**. Vol. 18, Issue 101, pp. 46-48

[15] Hattayananont, A., Soyraya, B., and Theeramongkol, P. (2013). **Development of Textile in SLUB Yarn Fabric from Textile Material Waste**. Faculty of Home Economics, Rajamangala University of Technology Phra Nakorn

[16] Teeraprasert, S. (2014). **Material Testing**. Access (31 January 2021). Available (http://www.textiles.rmutk.ac.th/images/textiles_raw_material_control/textile_raw_material_control.pdf)

[17] Phuphan, A., Rithnim, M., Sawanaoprn, S., and Maud-ew, C. (2009). **The Exploration of the Separation of Fiber Method From Nelumbo Nucifera Gaertn (Lotus) Leaf Stalk and Examining the Development of Lotus Fiber into Thread**. Access (27 May 2022). Available (http://www.research.rumutt/archives/ 5670)

[18] Chonsakorn, S., Momgkholrattanasit, R., and Sriworadejpisan, S. (2017). The Development of Water Hyacinth Fiber to Creative Textile Products. **Colourway**. Vol. 21, No. 123, pp. 39-41

[19] Patil, K. (2019). Lotus Fiber: A New Facet in Textile and Fashion. **International Journal of Humanities and Social Science Invention (IJHSSI)**. Vol. 7, Issue. 12, pp. 71-75

[20] Win, S. (2020). Study on Lotus Fiber Production in Sunn Ye Inn, Sintgaing Township. **Banmaw University Research Journal**. Vol. 11, No. 1, pp. 344-350

การพัฒนาระบบควบคุมสภาพแวดล้อมภายในโรงเรือนเพาะปลูกสำหรับครัวเรือน

Development of Environmental Control System within a Greenhouse for Households

กันญา โกสุมภ์[1*] กฤษตกานต์ พุทธชาติ[1] กวิน วุฒิสิงห์ชัย[1] ถิรวุฒิ ดีบาง[1] วิศรุต คำพิมาย[1] วิศรุต คมพรมราช[1] อรุณรัก ลี้สมบัติ[1] วิรัตน์ หวังเชื่อนกลาง[1] และเด่น คอกพิมาย[1]

Kanya Kosum[1*] Krittakran Phuttachart[1] Kawin Wutthisingchai[1] Thirawut Deebang[1] Witsarut Khamphimai[1] Wissarut Komprommarat[1] Arunruck Leesombut[1] Virat Wangkuanklang[1] and Den Kogphimai[1]

Received: *April 24, 2022;* ***Revised:*** *June 24, 2022;* ***Accepted:*** *June 24, 2022*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการออกแบบและทดสอบความสามารถในการทำงานของระบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ระบบควบคุมการให้น้ำและปุ๋ยกับดินภายในโรงเรือนเพาะปลูกแบบหลังคาโค้ง กว้าง 1.5 ม. ยาว 2 ม. สูง 2.6 ม. โดยใช้หลักการของระบบความดันลบร่วมกับการพ่นละอองน้ำแบบอัตโนมัติ ซึ่งมีบอร์ด Arduino เป็นอุปกรณ์ควบคุมการทำงานของเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ เซ็นเซอร์วัดความชื้นในดิน และเซ็นเซอร์วัดความเข้มข้นปุ๋ยในดินภายในโรงเรือนเพาะปลูก โดยสามารถควบคุมการทำงานของระบบได้ทั้งในระยะใกล้ที่ตู้ควบคุมข้างโรงเรือนเพาะปลูก หรือระยะไกลผ่านแอปพลิเคชันบนโทรศัพท์สมาร์ทโฟนพบว่า ระบบควบคุมสภาพแวดล้อมภายในโรงเรือนทั้งหมดสามารถทำงานได้ตามที่ผู้ใช้งานตั้งค่า โดยระบบควบคุมอุณหภูมิมีการใช้พลังงานไฟฟ้าและน้ำสูงสุดคือ ร้อยละ 40 ระบบควบคุมการให้ปุ๋ยกับดินร้อยละ 34 ระบบควบคุมการให้น้ำกับดินร้อยละ 20 และระบบควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศร้อยละ 6 และระบบควบคุมอุณหภูมิสามารถลดอุณหภูมิภายในโรงเรือนให้ต่ำกว่าอุณหภูมิภายนอกโรงเรือนสูงสุด 5 ^{o}C

คำสำคัญ : โรงเรือนเพาะปลูก; อินเทอร์เน็ตเพื่อสรรพสิ่ง; การควบคุมสภาพแวดล้อม; Arduino

[1] *คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา*

[1] *Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Isan, Nakhon Ratchasima*

[*] *Corresponding Author, Tel. 09 7343 1107, E - mail: kk_changnoi@yahoo.com*

ISSN 2672-9369 (Online)

Abstract

The objective of this research was to design and test the operability of air, temperature, and humidity control system and water and fertilizer control system for the soil within a curved roof greenhouse that was 1.5 m wide, 2 m long, 2.6 m high by using the principle of negative pressure system together with automatic water spraying. There was an Arduino board that controlled the operation of temperature sensors, air humidity sensors, soil moisture sensors and fertilizer concentration sensors inside the greenhouse. The system could be controlled both imminently at the control cabinet next to the greenhouse and remotely via an application on a smartphone. It was found that all the environmental control systems in the greenhouse were able to operate according to the user's settings. The temperature control system had the highest use of electricity and water at 40 %, the soil fertilization control system at 34 %, the soil irrigation control system at 20 %, and the air humidity control system at 6 %. Moreover, the temperature control system could reduce the temperature inside the greenhouse by up to 5 ^{o}C.

Keywords: Greenhouse; IoT; Environment Control; Arduino

ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันปัญหาด้านสุขภาพของมนุษย์ส่วนหนึ่งมาจากการบริโภคอาหารที่มีการปนเปื้อนของสารพิษ ซึ่งผักเป็นอาหารที่คนไทยนิยมนำมารับประทานกันมากเนื่องจากมีคุณค่าทางอาหาร ทั้งวิตามินและแร่ธาตุต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อร่างกายสูง และผักคืออาหารที่มีการปนเปื้อนของสารพิษ เพราะค่านิยมในการบริโภคผักนั้นมักจะเลือกบริโภคผักที่สวยงามไม่มีร่องรอยการทำลายของหนอนและแมลงศัตรูพืช ดังนั้นการปนเปื้อนของสารพิษจึงเป็นผลมาจากการที่เกษตรกรผู้ปลูกต้องใช้สารเคมีในการป้องกันและกำจัดแมลง และเชื้อโรคต่าง ๆ ที่จะมาทำลายผัก เพราะหากปล่อยตามธรรมชาติไม่มีการป้องกันก็จะทำให้ผักถูกทำลายจากแมลง และเชื้อโรคต่าง ๆ เหล่านั้น ทำให้ผักที่ได้มีปริมาณน้อยและไม่งามตรงตามความต้องการของผู้บริโภค จึงมีเกษตรกรบางส่วนที่มีทุนในการผลิตเปลี่ยนไปปลูกผักปลอดสารพิษ หรือผักปลอดภัยจากสารพิษนั้นคือ ผลผลิตพืชผักที่ไม่มีสารเคมีป้องกันและกำจัดศัตรูพืชตกค้างอยู่ หรือมีตกค้างอยู่ไม่เกินระดับมาตรฐานที่กระทรวงสาธารณสุขกำหนดไว้ ในประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 163 พ.ศ. 2538 ลงวันที่ 28 เมษายน 2538 เรื่อง อาหารที่มีสารพิษตกค้าง [1] แต่การปลูกผักปลอดสารพิษในประเทศไทยนั้นส่วนใหญ่จะปลูกบนพื้นที่สูงของภาคเหนือ [2] อีกด้วยการปลูกผักปลอดสารพิษนั้นเกษตรกรผู้ปลูกต้องมีทุน มีความเข้าใจ และมีเวลาในการดูแลเพื่อให้ได้ผลผลิตที่ดีที่มีคุณภาพตรงตามความต้องการของผู้บริโภค จึงเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ไม่เป็นที่นิยมปลูกเพื่อรับประทานในครัวเรือน ประกอบกับวิถีชีวิตของครอบครัวในปัจจุบันที่เป็นครอบครัวขนาดเล็กที่มีความเร่งรีบในการทำงานประจำและไม่มีพื้นที่ที่เหมาะต่อการทำเป็นแปลงเพาะปลูก แต่เพื่อสุขภาพที่ดีจึงต้องยอมซื้อผักปลอดสารพิษที่มีราคาแพงกว่าผักที่ปลูกด้วยวิธีการทั่วไปเพื่อบริโภค ประกอบกับสถานการณ์ปัจจุบันที่มีการแพร่ระบาดของเชื้อไวรัสโคโรนา (COVID-19) ทำให้การเดินทางเลือกซื้อผักปลอดสารพิษที่ตลาดหรือซุปเปอร์มาร์เก็ตนั้นไม่สะดวกเช่นที่ผ่านมา

การปลูกผักในโรงเรือนเพาะปลูกเป็นวิธีการผสมผสานในการควบคุมศัตรูพืชของการปลูกผักปลอดสารพิษ โดยโรงเรือนเพาะปลูกคือ โครงสร้างที่ประกอบขึ้นด้วยวัตถุหลายประเภท พร้อมทั้งมีวัสดุโปร่งแสงทำหน้าที่เป็นหลังคาปกคลุมเพื่อลดปริมาณแสงแดดที่ส่งผ่านเข้าไปในโรงเรือนเพาะปลูก ด้วยลักษณะดังกล่าวทำให้สามารถ

ลดโอกาสเสี่ยงในการปนเปื้อนเชื้อโรค แมลงศัตรูพืช และยังสามารถควบคุมปัจจัยเรื่องสภาพแวดล้อมให้เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของพืชได้ และด้วยปัจจุบันมนุษย์เริ่มคุ้นเคยกับเทคโนโลยีที่สามารถควบคุมสิ่งของต่าง ๆ จากที่ใด ๆ ไม่ว่าระยะจะไกลหรือใกล้ เช่น การปิด-เปิดไฟส่องสว่างที่บ้านพักจากที่ทำงาน ซึ่งนั่นคือ เทคโนโลยีเพื่อทุกสรรพสิ่ง (IoT) ที่หมายถึง เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตที่เชื่อมต่ออุปกรณ์กับเครื่องมือต่าง ๆ เข้าไว้ด้วยกัน โดย IoT มีความจำเป็นต้องทำงานร่วมกับอุปกรณ์ประเภท RFID และ Sensors ซึ่งเปรียบเสมือนการเติมสมองให้กับอุปกรณ์ต่าง ๆ และสิ่งที่จำเป็นคือ การเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตเพื่อให้อุปกรณ์สามารถรับส่งข้อมูลถึงกันได้ [3] เมื่อมีการนำเทคโนโลยีมาประยุกต์ใช้กับการเกษตรจึงเป็นที่มาของสมาร์ทฟาร์ม ที่เป็นรูปแบบการทำเกษตรแบบใหม่ที่จะทำให้การทำการเกษตรมีภูมิคุ้มกันต่อสภาพภูมิอากาศที่เปลี่ยนแปลงไป โดยการนำข้อมูลของภูมิอากาศมาใช้ในการบริหารจัดการ ดูแลพื้นที่เพาะปลูก เพื่อให้สอดคล้องกับสภาพอากาศที่เกิดขึ้นรวมถึงการเตรียมพร้อมรับมือกับสภาพอากาศที่จะเปลี่ยนแปลง มีรายงานจากการวิจัยการออกแบบตัวต้นแบบระบบโรงเรือนอัจฉริยะเพื่อส่งเสริมความสะดวกสบายให้กับผู้สูงอายุโดยใช้ IoT ที่พบว่าการออกแบบตัวต้นแบบที่ประกอบด้วยโมดูลอุณหภูมิ โมดูลความชื้น โมดูลวัดความชื้นในดิน โมดูลพัดลม โมดูลปั๊มน้ำ โดยใช้ NETPIE ที่เป็นแพลตฟอร์มให้บริการผ่านเทคโนโลยีคลาวด์สำหรับเชื่อมต่อสื่อสารในรูปแบบอินเทอร์เน็ตเพื่อทุกสรรพสิ่งนั้นสามารถนำตัวต้นแบบระบบโรงเรือนอัจฉริยะโดยใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตเพื่อทุกสรรพสิ่งได้ไปประยุกต์ใช้เพื่อส่งเสริมความสะดวกสบายให้กับผู้สูงอายุอย่างเหมาะสม [4] และการออกแบบระบบสมาร์ทฟาร์มโดยใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งสำหรับฟาร์มมะนาวด้วย IoT มีเซ็นเซอร์วัดค่าข้อมูลของฟาร์มมะนาวโดยการกำหนดค่าอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ ความชื้นและความเป็นกรด-ด่างในดินพบว่า การออกแบบแผนผังการเชื่อมต่ออุปกรณ์ IoT (Node MCU) กับ Arduino Board และระบบเซ็นเซอร์พร้อมกับการพัฒนา Application สำหรับเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ IoT สามารถใช้งานร่วมกับอุปกรณ์โมบายโฟน Application ต่าง ๆ โดยสามารถรองรับการใช้งานได้ทั้งระบบปฏิบัติการ IOS และ Android และสามารถแสดงข้อมูลตามค่ามาตรฐานได้ [5] ส่วนการออกแบบระบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสำหรับโรงเรือนเพาะเห็ดด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยใช้น้ำในการพ่นหมอกเพื่อลดอุณหภูมิและเพิ่มความชื้นเมื่อทดสอบระบบควบคุมพบว่า ระบบสามารถทำงานตามเงื่อนไขที่ออกแบบไว้ และสามารถควบคุมอุณหภูมิภายในโรงเรือนอยู่ระหว่าง 25 - 35 ^{o}C ความชื้นสัมพัทธ์อยู่ที่ร้อยละ 80 - 85 ได้ผลผลิตเฉลี่ยมากกว่าแบบโรงเรือนทั่วไป [6] หรือการศึกษาระบบควบคุมสภาพแวดล้อมให้เหมาะสมต่อการปลูกผักสลัดบนระบบไฮโดรโปนิกส์แบบ NFT โดยพัฒนาในรูปแบบใช้ระบบผังตัวเข้ามาควบคุม มีการออกแบบระบบให้ครอบคลุมกับสภาพแวดล้อมที่พืชต้องการแบ่งระบบออกเป็น 4 ส่วนย่อย คือ ระบบควบคุมอุณหภูมิ ระบบควบคุมความชื้น ระบบพรางแสง และระบบเก็บข้อมูลพบว่า ระบบสามารถใช้งานได้ทุกระบบย่อยมีการทำงานอย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพ [7] และการทดสอบประสิทธิภาพของระบบพ่นหมอกสำหรับลดอุณหภูมิอากาศภายในโรงเรือนของหมู่บ้านอวาราในประเทศอิสราเอล โดยใช้วิธีในการคำนวณอัตราการไหลของน้ำสำหรับใช้ในการพ่นหมอก และอัตราการไหลของอากาศสำหรับระบายอากาศแล้วเปรียบเทียบกับระบบ Evaporative Pad ที่พบว่า ระบบพ่นหมอกมีประสิทธิภาพในการกระจายตัวของอุณหภูมิและความชื้นในโรงเรือนได้สม่ำเสมอมากกว่าระบบ Evaporative Pad [8]

เนื่องจากสภาวการณ์เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของโลก [9] และลักษณะของภูมิประเทศเป็นตัวแปรที่จะส่งผลต่อลักษณะของภูมิอากาศ ดังนั้นแต่ละพื้นที่ที่ทำการเพาะปลูกจะมีสภาวะอากาศที่แตกต่างกันไปด้วย และจากผลของการศึกษางานวิจัยข้างต้นพบว่า เป็นระบบที่ใช้เพื่อควบคุมพืชชนิดใดชนิดหนึ่ง และระบบใหญ่ที่มีต้นทุนสูง จึงอาจจะไม่เหมาะสมกับการลงทุนสำหรับการปลูกพืชผักสวนครัวเพื่อบริโภคในครัวเรือน และพื้นที่ว่างของบ้านที่อยู่ในชุมชนเมือง ดังนั้นคณะผู้จัดทำจึงได้ทำการออกแบบและพัฒนาระบบควบคุมสภาพแวดล้อมภายในโรงเรือนเพาะปลูกขนาดเล็กสำหรับครัวเรือน ให้มีการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศภายในโรงเรือนเพาะปลูก ควบคุมการให้น้ำและปุ๋ยกับดินปลูกภายในโรงเรือนเพาะปลูกให้อยู่ในสภาวะที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืชผักสวนครัว โดยที่ผู้ใช้งานสามารถควบคุมการทำงานของระบบต่าง ๆ ที่พัฒนาขึ้นผ่านแอปพลิเคชันบนโทรศัพท์มือถือด้วยเทคโนโลยี IoT ที่ได้รับความนิยมนำมาประยุกต์ใช้กับชีวิตประจำวัน

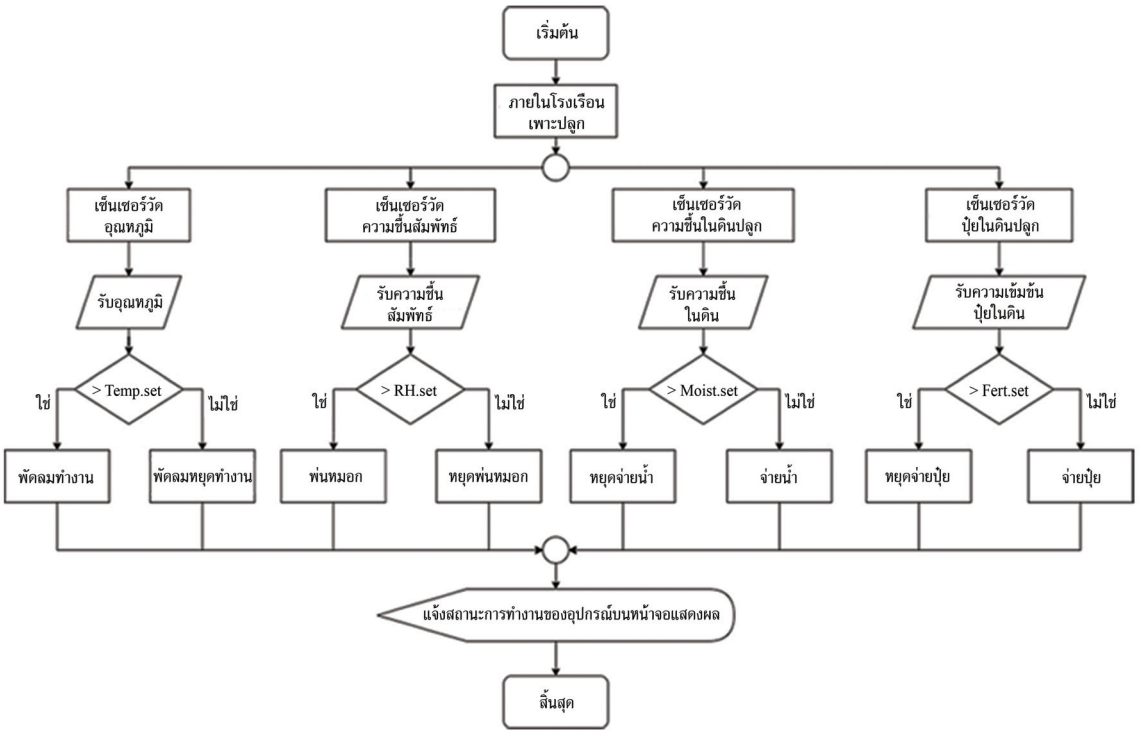
ISSN 2672-9369 (Online)

ของมนุษย์ในปัจจุบัน ภายใต้ขอบเขตคือ ระบบควบคุมที่ออกแบบไม่มีความซับซ้อน อุปกรณ์ต่าง ๆ ที่นำมาใช้ต่อวงจรเป็นอุปกรณ์พื้นฐานที่มีขายตามร้านอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทั่วไป มีราคาย่อมเยา เพื่อให้ตรงกับวัตถุประสงค์เพื่อใช้งานในครัวเรือน เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถดูแลรักษาและซ่อมบำรุงเองได้

วิธีการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้ คณะผู้จัดทำได้มุ่งเน้นที่การออกแบบและพัฒนาการทำงานของระบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในโรงเรือนเพาะปลูก ระบบควบคุมการให้น้ำและปุ๋ยในดิน ดังรูปที่ 1 และแบ่งการศึกษาเป็น 4 ส่วน คือ 1) การออกแบบระบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศภายในโรงเรือนเพาะปลูก 2) การออกแบบระบบควบคุมการให้น้ำและปุ๋ยในดินภายในโรงเรือนเพาะปลูก 3) การออกแบบและสร้างโรงเรือนเพาะปลูกสำหรับครัวเรือน และ 4) การทดสอบความสามารถในการทำงานของระบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ ระบบควบคุมการให้น้ำและปุ๋ยในดิน ดังรายละเอียดต่อไปนี้

เมื่อสภาวะอากาศโดยทั่วไปของประเทศไทยจัดอยู่ในเขตร้อนชื้นที่พบว่า ฤดูร้อนอุณหภูมิภายในโรงเรือนสูงเกินความต้องการของพืช เนื่องจากมีการสะสมความร้อนภายในโรงเรือนแต่ไม่มีการระบายอากาศออกสู่ภายนอก ทำให้เกิดผลกระทบต่อการเจริญเติบโต จึงจำเป็นต้องมีการนำพัดลมมาช่วยในระบายอากาศภายในโรงเรือน แต่ถ้ามีการระบายอากาศมากเกินไปจะทำให้พืชมีอัตราการหายใจมากขึ้น คายน้ำเพิ่มขึ้น ทำให้ความชื้นที่ต้นพืชลดลง ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืช [10] ดังนั้น คณะผู้วิจัยจึงได้นำแผ่นทำความเย็นเข้ามาติดตั้งเพื่อทำงานร่วมกับพัดลม โดยอาศัยหลักการ Negative Pressure System คือให้พัดลมทำหน้าที่ดูดอากาศจากภายในโรงเรือนออกนอกโรงเรือน แล้วอากาศจากภายนอกที่จะไหลเข้ามาแทนที่ภายในโรงเรือนต้องผ่านแผ่นทำความเย็น ทำให้อากาศเย็นลง [11] และมีหัวพ่นหมอกมาทำหน้าที่ในการเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในโรงเรือนเพาะปลูก [12] โดยสมการที่ (1) และ (2) สำหรับการคำนวณหาขนาดและจำนวนพัดลมดูดอากาศ สมการที่ (3) สำหรับการคำนวณหาความสามารถในการลดอุณหภูมิของแผ่นทำความเย็นเมื่อทราบประสิทธิภาพ และสมการที่ (4) สำหรับการคำนวณหาขนาดของปั๊มที่ต้องใช้ในระบบ



รูปที่ 1 แผนผังการทำงานของระบบควบคุมสภาพแวดล้อมภายในโรงเรือนเพาะปลูก

$$CFM = V \times 35.28 \times ACH \times \frac{1}{60} \tag{1}$$

$$Fan = V / CFM \tag{2}$$

เมื่อ

CFM = ความสามารถในการดูดอากาศของพัดลม
V = ปริมาตรของโรงเรือนเพาะปลูก
ACH = จำนวนครั้งของการเปลี่ยนปริมาตรอากาศต่อชั่วโมง
Fan = จำนวนพัดลมดูดอากาศ

$$Temp_{final} = \left(Temp_{dry} - Temp_{wet}\right) \times \left(\eta_{pad} / 100\right) \tag{3}$$

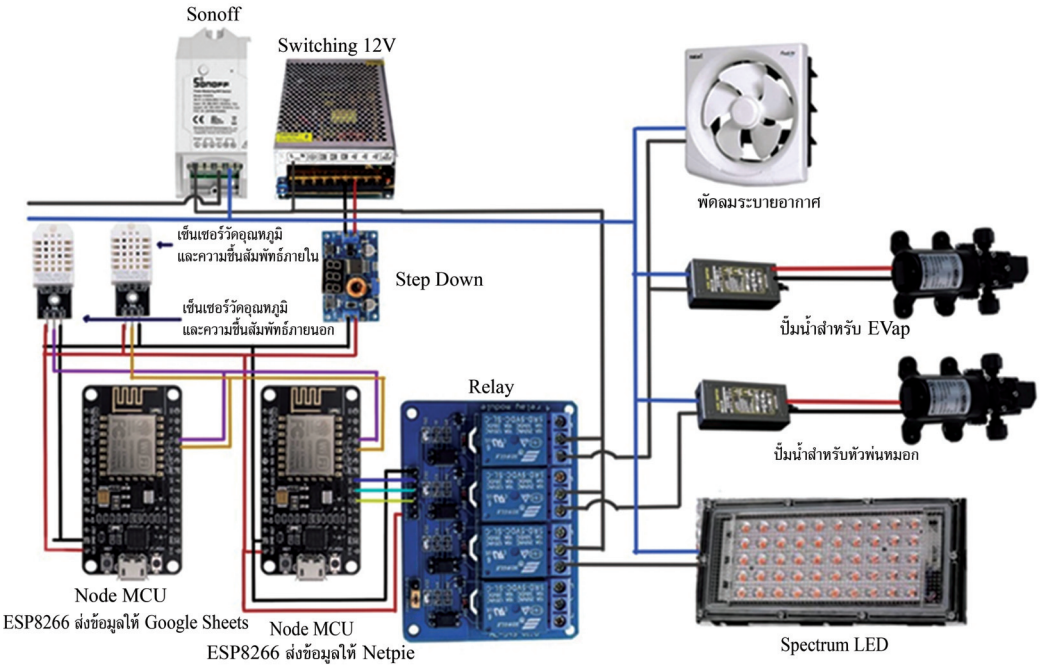
เมื่อ

$Temp_{final}$ = อุณหภูมิอากาศที่ลดลง
$Temp_{dry}$ = อุณหภูมิกระเปาะแห้ง
$Temp_{wet}$ = อุณหภูมิกระเปาะเปียก
η_{pad} = ประสิทธิภาพของแผ่นทำความเย็น

$$Bhp = Whp / \eta_p \tag{4}$$

เมื่อ

Bhp = กำลังม้าต้นกำลังของปั๊ม
Whp = แรงม้าทางทฤษฎี
η_p = ประสิทธิภาพของปั๊ม

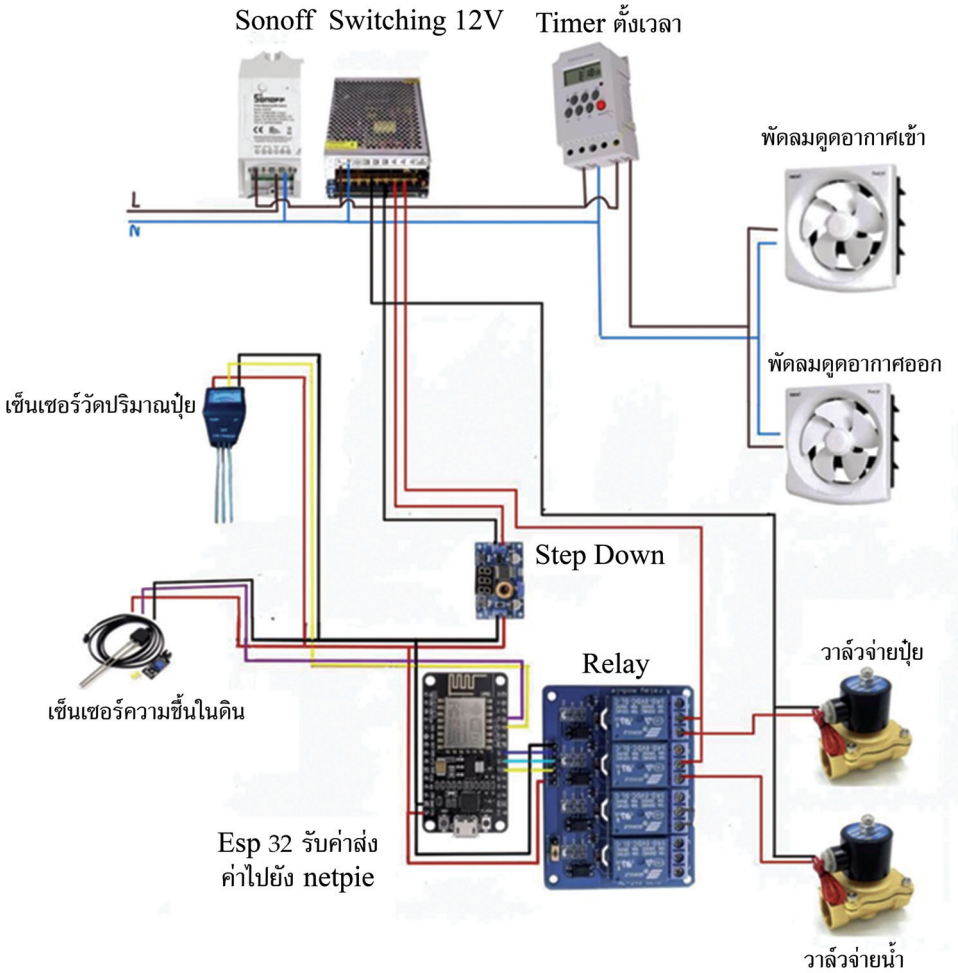


รูปที่ 2 วงจรระบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศภายในโรงเรือนเพาะปลูก

ISSN 2672-9369 (Online)

1. การออกแบบการทำงานของระบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในโรงเรือนเพาะปลูก

จากรูปที่ 2 โดยโปรแกรมจะรับค่าอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ และความเข้มแสงโดยตรงจากผู้ใช้งานพร้อมทั้งอ่านค่าจากเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ และเซ็นเซอร์แสง ซึ่งค่าที่รับจากเซ็นเซอร์จะถูกนำไปใช้ในการควบคุมในระบบอัตโนมัติ โดยระบบจะทำการตรวจสอบเงื่อนไขต่าง ๆ ที่อ่านได้จากเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ และเซ็นเซอร์แสง โดยแต่ละเงื่อนไขที่ควบคุมการทำงานของอุปกรณ์แต่ละตัว คือ พัดลมระบายอากาศเพื่อลดอุณหภูมิ สายพ่นละอองหมอกเพื่อเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ และหลอดไฟเพื่อเพิ่มความสว่าง โดยอุปกรณ์ต่าง ๆ เหล่านี้จะเชื่อมต่ออยู่กับรีเลย์ เมื่อตรวจสอบเงื่อนไขแล้วเสร็จจะมี Node MCU (บอร์ดคอนโทรลเลอร์) [13] ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของอุปกรณ์และเชื่อมต่อสัญญาณ Wi-Fi เพื่อนำค่าที่วัดได้และสถานะของอุปกรณ์ไปแสดงผลที่แอปพลิเคชันบนสมาร์ทโฟน หรือคอมพิวเตอร์ของผู้ใช้งาน ทั้งนี้ผู้ใช้งานสามารถปิดการทำงานของระบบอัตโนมัติ และควบคุมโดยตรงผ่านแอปพลิเคชันบนสมาร์ทโฟนหรือคอมพิวเตอร์ได้ โดยที่หน้าจอบนแอปพลิเคชันที่แสดงผลการทำงานของระบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศภายในโรงเรือนเพาะปลูกดังรูปที่ 4(ก) โดยที่เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีความสามารถวัดอุณหภูมิในช่วง -40 ºC ถึง 80 ºC และความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศที่ 0 ถึง 100 %RH



รูปที่ 3 วงจรระบบควบคุมการให้น้ำและปุ๋ยในดินภายในโรงเรือนเพาะปลูก

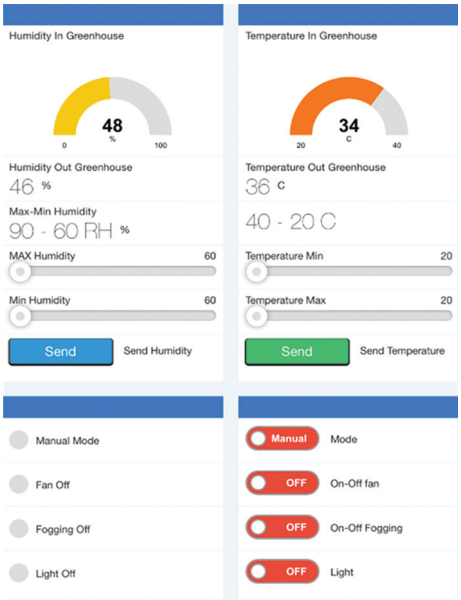
2. การออกแบบการทำงานของระบบควบคุมการให้น้ำและปุ๋ยกับดินปลูกภายในโรงเรือนเพาะปลูก

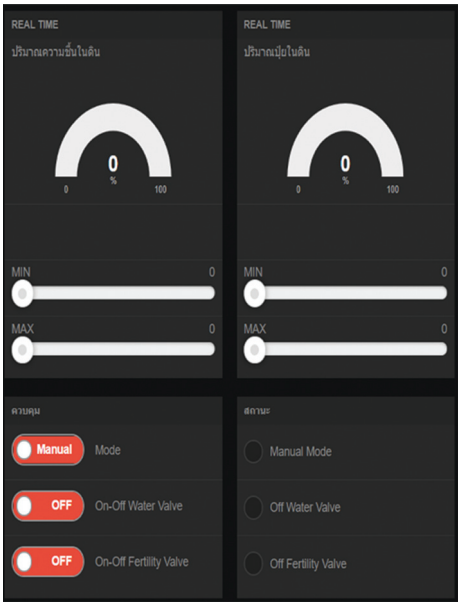
จากรูปที่ 3 เซ็นเซอร์ตรวจจับความชื้นในดินจะทำการส่งค่าความชื้นที่วัดได้ไปยังบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อส่งสัญญาณให้กับรีเลย์เพื่อเปิดระบบน้ำในกรณีที่ความชื้นของดินภายในโรงเรือนเพาะปลูก

ต่ำกว่าค่าในช่วงที่กำหนดไว้ (การกำหนดค่าความชื้นและปุ๋ยในดินจะกำหนดเป็นช่วง เช่น 45 - 50 %) เพื่อเพิ่มความชื้นในดินให้สูงขึ้นจนถึงค่าความชื้นมากสุดที่กำหนดไว้ จึงส่งสัญญาณย้อนกลับไปเพื่อตัดระบบให้ปิดน้ำ และสำหรับระบบควบคุมปริมาณปุ๋ยในดินนั้นจะมีเซ็นเซอร์ตรวจวัดปริมาณปุ๋ยว่าอยู่ในช่วงที่กำหนดไว้หรือไม่ หากปริมาณปุ๋ยมีค่าต่ำกว่าช่วงที่กำหนดไมโครคอนโทรลเลอร์จะส่งสัญญาณไปยังรีเลย์เพื่อเปิดวาล์วจ่ายปุ๋ยให้กับดินจนถึงค่าที่กำหนดไว้จึงจะส่งสัญญาณย้อนกลับไปอีกครั้งเพื่อปิดวาล์วจ่ายปุ๋ย ซึ่งการแสดงผลและการควบคุมการทำงานของระบบควบคุมการให้น้ำและปุ๋ยในดินภายในโรงเรือนเพาะปลูกจะแสดงผ่านหน้าจอดังรูปที่ 4(ข) โดยที่เซ็นเซอร์วัดความชื้นในดิน และเซ็นเซอร์วัดปริมาณปุ๋ยในดินที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีความสามารถวัดความชื้นในดินในช่วง 0 - 90 % ที่ช่วงอุณหภูมิ 20 - 50 ^{o}C และเซ็นเซอร์วัดปริมาณปุ๋ยมีความสามารถวัดปุ๋ย NPK ในช่วง N = 50 - 200 ppm, P = 4 - 14 ppm และ K = 50 - 200 ppm

3. การออกแบบและสร้างโรงเรือนเพาะปลูก

คณะผู้วิจัยเลือกแบบหลังคาโค้งที่เหมาะสำหรับการใช้ระบบ Evaporation ช่วยในการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นภายในโรงเรือน [14] และออกแบบให้เป็นโรงเรือนขนาดเล็กที่สามารถวางไว้บนพื้นที่ว่างข้างบ้าน จึงมีความกว้าง 1.5 เมตร ความยาว 2 เมตร ความสูง 2.6 เมตร มีเหล็กท่อกลมขนาด 6 หุน เป็นเหล็กโครงสร้าง คลุมด้วย Polyethylene หนา 0.15 มิลลิเมตร ภายโรงเรือนประกอบด้วย พัดลมระบายอากาศ 2 จุด (ที่ด้านบนของประตูทางเข้าของโรงเรือนและด้านหลังของโรงเรือน) หัวพ่นหมอก 4 หัว (ที่มุมทั้ง 4 ของโรงเรือน) แผงระเหย 1 แผง (ที่ด้านหลังของโรงเรือน) ชุดการให้น้ำและปุ๋ย 1 ชุด (ที่กระบะปลูกภายในโรงเรือน) ตู้ควบคุมระบบภายในโรงเรือน 2 ตู้ (ที่ด้านซ้ายภายนอกของโรงเรือน) ดังแสดงในรูปที่ 5(ก) และ (ข)





(ก) ระบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ (ข) ระบบควบคุมการให้น้ำและปุ๋ย

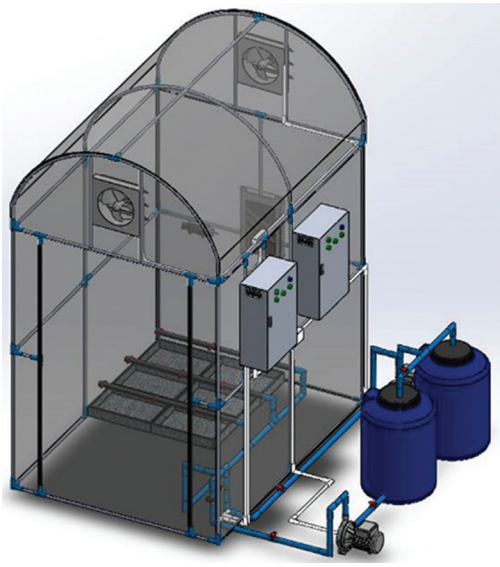
รูปที่ 4 หน้าจอควบคุมและแสดงการทำงานของระบบควบคุมสภาพแวดล้อมภายในโรงเรือนเพาะปลูก

4. การทดสอบความสามารถในการทำงานของระบบควบคุมสภาพแวดล้อมภายในโรงเรือนเพาะปลูก

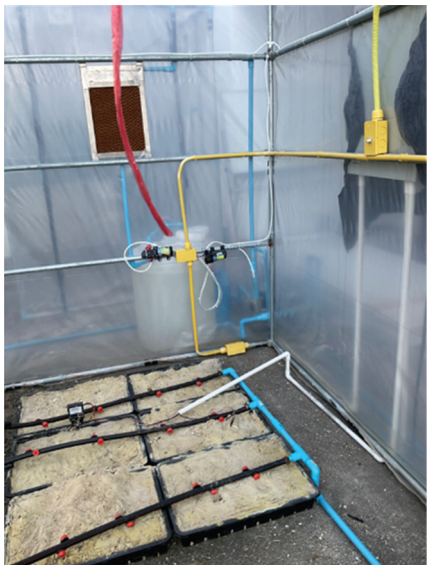
โดยเตรียมโรงเรือนเพาะปลูกและทดสอบการทำงานของเซ็นเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ เซ็นเซอร์ตรวจวัดความชื้นในดิน เซ็นเซอร์ตรวจวัดปุ๋ยในดิน และทดสอบการทำงานแอปพลิเคชันควบคุมเซ็นเซอร์ให้อยู่ในสภาพที่พร้อมสำหรับการทำงาน จึงเริ่มการทดสอบโดยทำการตั้งค่าอุณหภูมิของอากาศภายในโรงเรือนเพาะปลูก ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศภายในโรงเรือนเพาะปลูก ความชื้นและปริมาณปุ๋ยในดินภายในโรงเรือนเพาะปลูกที่หน้าจอควบคุมในแอปพลิเคชันบนสมาร์ทโฟน หรือคอมพิวเตอร์ พร้อมทั้งเปิดระบบการทำงาน

ISSN 2672-9369 (Online)

เพื่อให้อุปกรณ์ต่าง ๆ ได้ทำงานต่อเนื่องตั้งแต่เวลา 09.30 - 16.30 น. โดยกำหนดค่าเริ่มต้นของอุณหภูมิภายในโรงเรือนเพาะปลูกที่ 29 - 30 °C และความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศภายในโรงเรือนเพาะที่ 70 - 80 %RH [15] ในทุกการทดสอบ และเปลี่ยนแปลงความชื้นในดิน 3 ระดับ ปริมาณความเข้มข้นของปุ๋ยในดิน 3 ระดับ ทำการทดสอบระดับละ 3 ซ้ำ เพื่อนำผลการตรวจวัดของเซ็นเซอร์ทุกตัวที่ระบบได้ทำการบันทึกไว้บนคลาวด์มาวาดกราฟด้วยโปรแกรม SciDaVis เพื่อวิเคราะห์ผลการทำงานของระบบควบคุมสภาพแวดล้อมภายในโรงเรือนเพาะปลูก



(ก) โรงเรือนเพาะปลูก



(ข) ภายในโรงเรือนเพาะปลูก

รูปที่ 5 โรงเรือนเพาะปลูก

ผลการทดสอบและการอภิปรายผล

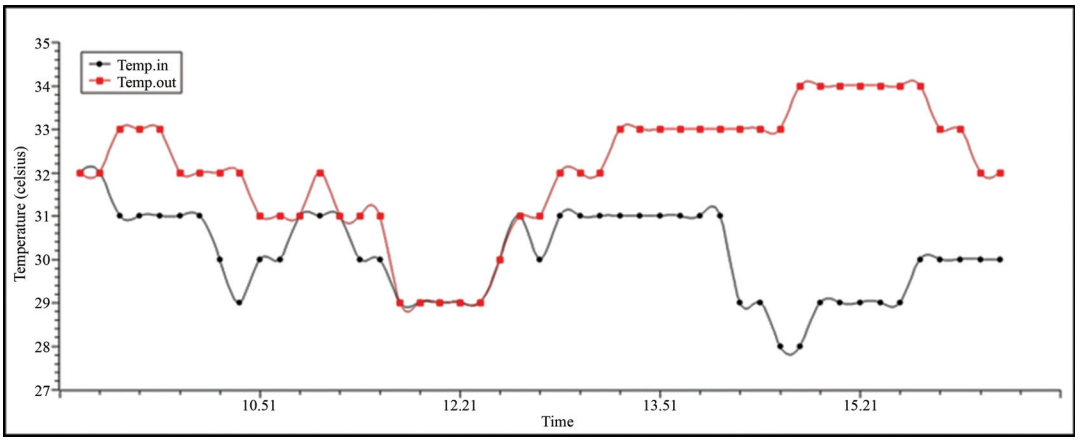
จากการดำเนินการทดสอบการทำงานของระบบควบคุมสภาพแวดล้อมภายในโรงเรือนเพาะปลูกเกิดขึ้นในช่วงที่มีพายุฤดูร้อน จึงมีสภาพอากาศที่แปรปรวน เช่น ฝนตกช่วงเช้า ระหว่างวันมีการตกและหยุดเป็นช่วง ๆ มีลมพัดแรง และมีอากาศที่อบอ้าวในบางช่วงเวลา

การทดสอบที่ 1 กำหนดค่าเริ่มต้นของสภาพแวดล้อมภายในโรงเรือนให้มีอุณหภูมิ 29 - 31 °C ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ 70 - 80 %RH [16] ความชื้นในดินร้อยละ 48 ถึงร้อยละ 57 และปริมาณความเข้มข้นของปุ๋ยที่ร้อยละ 51 - 59 รายละเอียดดังแสดงในรูปที่ 6

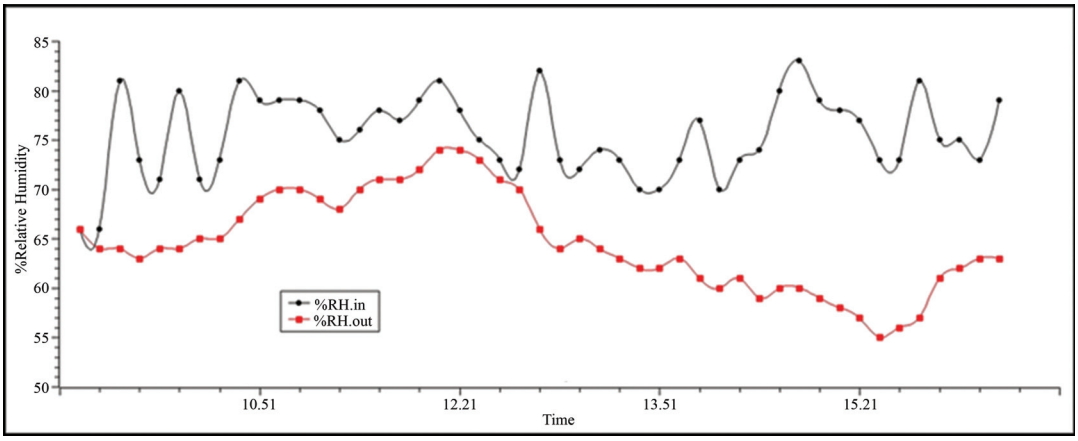
จากรูปที่ 6(ก) เส้นสีดำ แสดงถึงค่าอุณหภูมิภายในโรงเรือน และเส้นสีแดง แสดงถึงค่าอุณหภูมิภายนอกโรงเรือน เริ่มการทดสอบที่อุณหภูมิภายในและภายนอกเท่ากับ 32 °C โดยการทำงานของระบบคือถ้าอุณหภูมิภายในโรงเรือนเพาะปลูกสูงกว่าช่วงของอุณหภูมิที่กำหนดไว้ พัดลมและแผงระเหยจะเริ่มการทำงานตามหน้าที่คือ พัดลมทั้ง 2 ตัวจะทำหน้าที่ดูดอากาศร้อนภายในโรงเรือนออกสู่ภายนอกโรงเรือน เพราะการระบายอากาศภายในโรงเรือนระบบปิดจะต้องอาศัยการทำงานของพัดลมเป็นหลัก เพื่อทำหน้าที่ในการดูดอากาศเย็นเข้าไปทดแทนความร้อนที่อยู่ภายในโรงเรือน [16] เมื่ออากาศภายในลดลง จะมีการรักษาสมดุลของอากาศภายในโรงเรือนด้วยการถ่ายเทอากาศภายนอกเข้ามาภายในโรงเรือนผ่านทางแผงระเหยเพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำที่อยู่ภายในแผงระเหย ทำให้อากาศที่ผ่านเข้ามาภายในโรงเรือนมีอุณหภูมิต่ำลงจนถึงค่าอุณหภูมิต่ำสุดที่กำหนดไว้ พัดลมและแผงระเหยจึงจะหยุดการทำงาน และจะเริ่มทำงานอีกครั้งเมื่ออุณหภูมิภายในโรงเรือนสูงกว่าค่าอุณหภูมิสูงสุดที่กำหนดไว้ โดยอุณหภูมิภายนอกโรงเรือนจะมีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตั้งแต่เวลา 12.40 น. ไปจนถึงเวลา 15.50 น. อุณหภูมิจึงเริ่มลดลง ส่วนอุณหภูมิภายในโรงเรือนจะเริ่มลดลงอย่างต่อเนื่อง

จนถึงค่าต่ำสุดที่กำหนดไว้ที่เวลา 10.45 น. และเมื่ออุณหภูมิภายในโรงเรือนสูงขึ้นถึงค่าสูงสุดที่กำหนดไว้ระบบจึงกลับมาทำงานอีกครั้งที่เวลา 13.30 น. ตลอดระยะเวลาของการทดสอบนี้ตั้งแต่เวลา 09.30 - 16.30 น. พบว่า พัดลมและแผงระเหยมีการทำงานทั้งหมด 2 ครั้ง รวมเป็นเวลา 2 ชั่วโมง 25 นาที มีการใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งหมด 0.13 หน่วย และปริมาณน้ำที่จ่ายเข้าไปในระบบ 0.44 ลบ.ม.

จากรูปที่ 6(ข) เส้นสีดำคือ ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศภายในโรงเรือน และเส้นสีแดงคือ ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศภายนอกโรงเรือน เมื่อเริ่มต้นการทดสอบความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศภายในและภายนอกโรงเรือนเพาะปลูกมีค่าเท่ากับ 66 %RH ซึ่งต่ำกว่าค่าความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศที่กำหนดไว้ ดังนั้นปั๊มน้ำจึงเริ่มจ่ายน้ำไปยังหัวพ่นหมอกให้จ่ายละอองน้ำภายในโรงเรือนเพื่อเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศภายในโรงเรือนจนกระทั่งเซ็นเซอร์ตรวจจับค่าความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศได้เท่ากับ 80 %RH จึงหยุดการทำงาน และจะเริ่มทำงานอีกครั้งเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศภายในโรงเรือนต่ำกว่า 70 %RH ที่กำหนดไว้ ซึ่งระบบควบคุมสามารถสั่งให้หัวพ่นหมอกจ่ายละอองน้ำภายในโรงเรือนทำงานได้ตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ [17] พบว่า ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศภายนอกเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงเวลา 12.30 น. และเริ่มลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงเวลา 15.48 น. จากนั้นความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศได้เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนสิ้นสุดการทดสอบ ส่วนความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศภายในโรงเรือนจะมีการเพิ่มขึ้นและลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงค่าความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศสูงสุดที่ตั้งไว้จึงหยุดการพ่นหมอก ตลอดการทดสอบนี้มีการพ่นหมอกทั้งหมด 9 ครั้ง รวมระยะเวลาทั้งสิ้น 118 นาที มีการใช้พลังงานทั้งหมด 0.05 หน่วย และปริมาณน้ำที่จ่ายเข้าไปในระบบ 0.06 ลบ.ม.



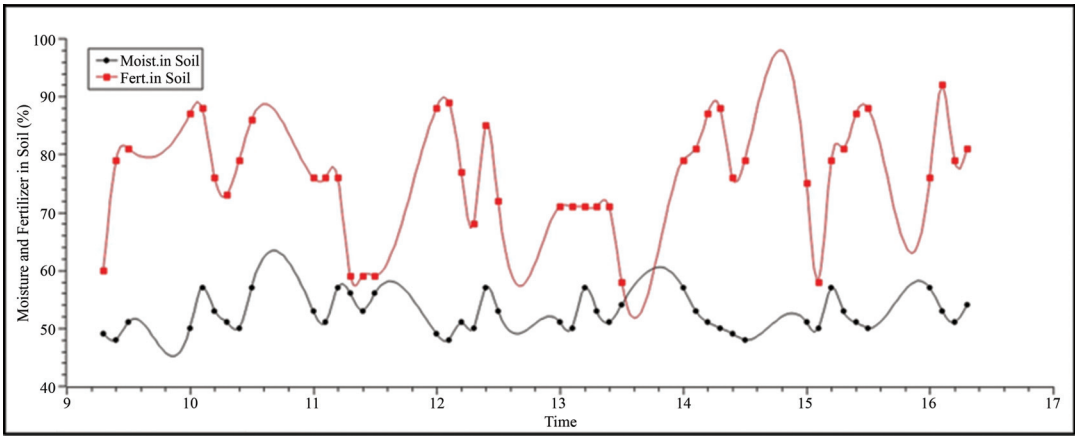
(ก) ระบบควบคุมอุณหภูมิ



(ข) ระบบควบคุมความชื้นสัมพัทธ์

รูปที่ 6 การทำงานของระบบควบคุมสภาพแวดล้อมภายในโรงเรือนเพาะปลูก การทดสอบที่ 1

ISSN 2672-9369 (Online)



(ค) ระบบควบคุมการให้น้ำและปุ๋ย

รูปที่ 6 การทำงานของระบบควบคุมสภาพแวดล้อมภายในโรงเรือนเพาะปลูก การทดสอบที่ 1 (ต่อ)

จากรูปที่ 6(ค) เส้นสีดำคือ ความชื้นในดินปลูกภายในโรงเรือน และเส้นสีแดงคือ ปริมาณความเข้มข้นของปุ๋ยในดินปลูกภายในโรงเรือน เมื่อเริ่มการทดสอบดินมีความชื้นร้อยละ 49 และมีปริมาณความเข้มข้นของปุ๋ยร้อยละ 51 พบว่าเมื่อเซ็นเซอร์ความชื้นในดินตรวจจับค่าได้ที่ร้อยละ 49 ระบบจึงเปิดวาล์วน้ำเพื่อเพิ่มปริมาณความชื้นในดินจนถึงร้อยละ 57 ที่เวลา 10.00 น. ระบบหยุดการจ่ายน้ำ และระบบการจ่ายน้ำเริ่มทำงานอีกครั้งเมื่อความชื้นในดินต่ำกว่าร้อยละ 49 และปริมาณความเข้มข้นของปุ๋ยในดิน พบว่าเซ็นเซอร์ปุ๋ยตรวจจับค่าความเข้มข้นของปุ๋ยในดินได้ร้อยละ 51 จึงส่งสัญญาณเพื่อสั่งให้เปิดวาล์วน้ำปุ๋ยจนกระทั่งปริมาณความเข้มข้นของปุ๋ยในดินจนถึงร้อยละ 57 และระบบจะเริ่มทำงานอีกครั้งเมื่อค่าปุ๋ยต่ำกว่าร้อยละ 51 ตลอดระยะเวลาของการทดสอบ 7 ชั่วโมง ระบบควบคุมการให้น้ำและปุ๋ยในดินมีการทำงานทั้งหมด 3 ครั้ง รวมเวลาในการทำงาน 60 นาที มีการใช้พลังงานทั้งหมด 0.37 หน่วย และมีปริมาณน้ำและปุ๋ยเข้าไปในระบบ 152.6 ลิตร

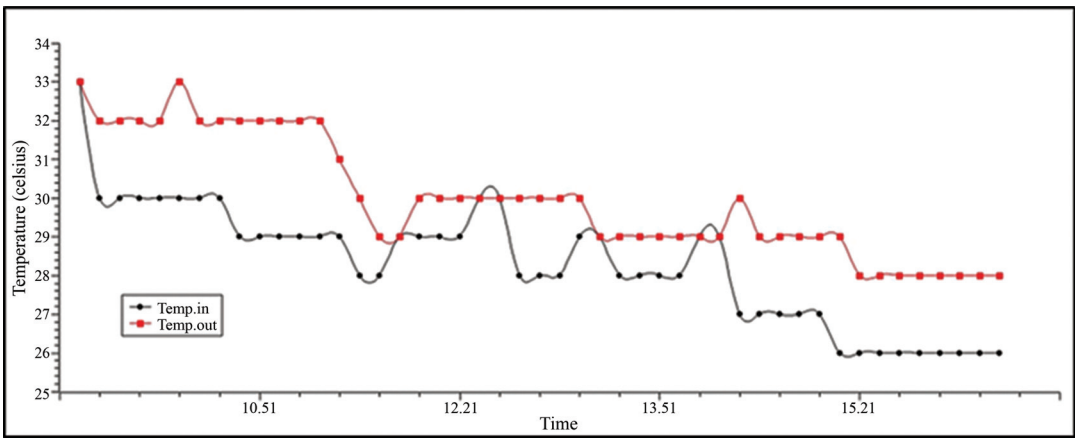
การทดสอบที่ 2 กำหนดค่าเริ่มต้นของสภาพแวดล้อมภายในโรงเรือนให้มีอุณหภูมิ 29 - 31 °C ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ 70 - 80 %RH ความชื้นในดินร้อยละ 48 - 59 และปริมาณความเข้มข้นของปุ๋ยที่ร้อยละ 58 - 97 รายละเอียดดังแสดงในรูปที่ 7

จากรูปที่ 7(ก) เส้นสีดำ แสดงถึงค่าอุณหภูมิภายในโรงเรือน และเส้นสีแดง แสดงถึงค่าอุณหภูมิภายนอกโรงเรือน เมื่อเริ่มการทำงานอุณหภูมิภายในและภายนอกเท่ากันที่ 33 °C จากนั้นอุณหภูมิภายนอกลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงสิ้นสุดการทดสอบครั้งที่สอง เนื่องจากภายในวันที่ทำการทดสอบมีเมฆและฝนตก อุณหภูมิภายในนั้นเริ่มลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงค่าต่ำสุดที่ตั้งไว้ที่เวลา 11.30 น. ตลอดเวลาของการทดสอบพบว่า พัดลมและแผงระเหย มีการทำงานทั้งหมด 1 ครั้ง เป็นเวลา 2 ชั่วโมง มีการใช้พลังทั้งหมด 0.11 หน่วย และปริมาณน้ำที่จ่ายเข้าไปในระบบ 0.36 ลบ.ม

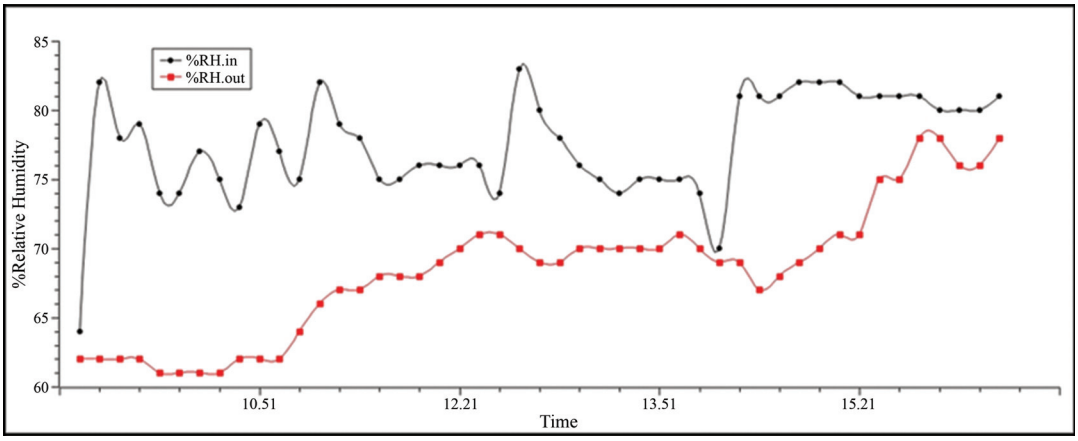
จากรูปที่ 7(ข) เส้นสีดำคือ ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศภายในโรงเรือน และเส้นสีแดงคือ ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศภายนอกโรงเรือน เมื่อเริ่มการทดสอบความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศภายในโรงเรือนเพาะปลูกมีค่าเท่ากับ 64 %RH และภายนอกมีค่าเท่ากับ 62 %RH โดยความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศภายนอกเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนสิ้นสุดการทดสอบ เนื่องจากสภาพอากาศภายนอกในช่วงเวลานั้นมีเมฆและฝนตก ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศภายในโรงเรือนนั้นจะมีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงค่าความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศสูงสุดที่ตั้งไว้จึงหยุดการพ่นหมอก ตลอดการทดสอบนี้มีการพ่นหมอกทั้งหมด 6 ครั้ง รวมเป็นระยะเวลา 72 นาที มีการใช้พลังทั้งหมด 0.03 หน่วย และปริมาณน้ำที่จ่ายเข้าไปในระบบ 0.04 ลบ.ม

จากรูปที่ 7(ค) เส้นสีดำคือ ความชื้นในดินปลูกภายในโรงเรือน และเส้นสีแดงคือ ปริมาณความเข้มข้นของปุ๋ยในดินปลูกภายในโรงเรือน ก่อนการทดสอบดินมีความชื้นร้อยละ 51 และมีปริมาณความเข้มข้นของปุ๋ย

ร้อยละ 98 เมื่อเริ่มการทำงานของระบบเซ็นเซอร์ตรวจจับค่าความชื้นในดินได้ร้อยละ 51 จึงมีการส่งสัญญาณให้เปิดวาล์วน้ำเพื่อเพิ่มปริมาณความชื้นในดินจนถึงร้อยละ 59 จึงหยุดการจ่ายน้ำ และระบบจะทำการจ่ายน้ำอีกครั้งเมื่อความชื้นในดินต่ำกว่าร้อยละ 48 และปริมาณความเข้มข้นของปุ๋ยพบว่า เซ็นเซอร์ตรวจจับค่าความเข้มข้นของปุ๋ยในดินได้ร้อยละ 98 จึงส่งสัญญาณให้ปิดวาล์วน้ำปุ๋ยจนกว่าปริมาณปุ๋ยในดินลดลงต่ำกว่าร้อยละ 59 ระบบจึงจะเปิดวาล์วจ่ายปุ๋ยน้ำจนถึงร้อยละ 98 ระบบจึงหยุดทำงานตลอดเวลาการทดสอบ 7 ชั่วโมง พบว่าวาล์วจ่ายน้ำมีการทำงานทั้งหมด 9 ครั้ง รวมระยะเวลาในการทำงาน 90 นาที วาล์วจ่ายน้ำปุ๋ยมีการทำงานทั้งหมด 3 ครั้ง รวมระยะเวลาในการทำงาน 30 นาที มีการใช้พลังงานทั้งหมด 0.37 หน่วย และมีปริมาณน้ำและปุ๋ยเข้าไปในระบบ 152.6 ลิตร



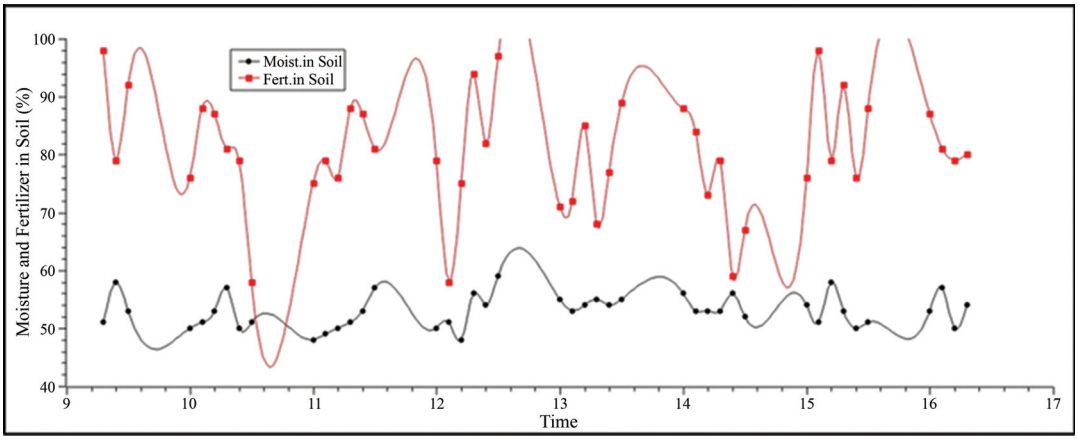
(ก) ระบบควบคุมอุณหภูมิ



(ข) ระบบควบคุมความชื้นสัมพัทธ์

รูปที่ 7 การทำงานของระบบควบคุมสภาพแวดล้อมภายในโรงเรือนเพาะปลูก การทดสอบที่ 2

ISSN 2672-9369 (Online)



(ค) ระบบควบคุมการให้น้ำและปุ๋ย

รูปที่ 7 การทำงานของระบบควบคุมสภาพแวดล้อมภายในโรงเรือนเพาะปลูก การทดสอบที่ 2 (ต่อ)

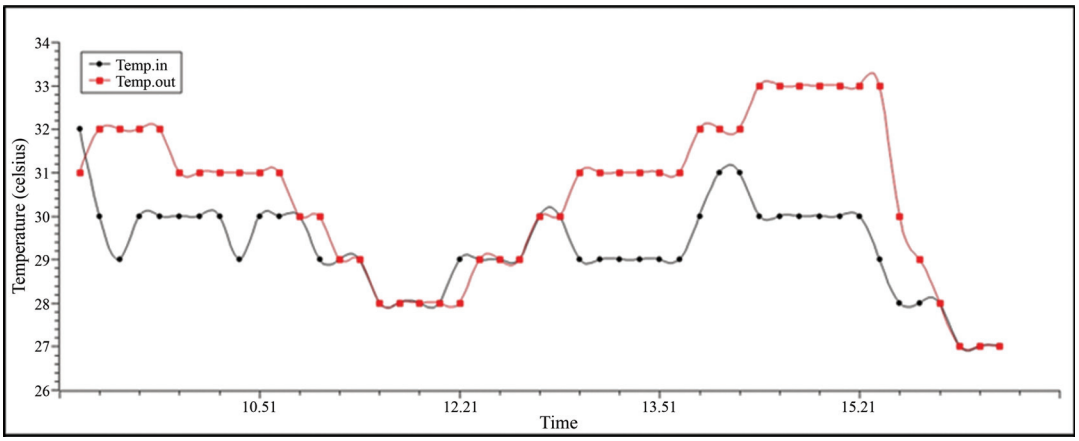
การทดสอบที่ 3 กำหนดค่าเริ่มต้นของสภาพแวดล้อมภายในโรงเรือนให้มีอุณหภูมิ 29 - 31 °C ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ 70 - 80 %RH ความชื้นในดินร้อยละ 48 - 54 และปริมาณความเข้มข้นของปุ๋ยที่ร้อยละ 58 - 98 รายละเอียดดังแสดงในรูปที่ 8

จากรูปที่ 8(ก) เส้นสีดำ แสดงถึงค่าอุณหภูมิภายในโรงเรือน และเส้นสีแดง แสดงถึงค่าอุณหภูมิภายนอกโรงเรือน เมื่อเริ่มการทำงานของระบบอุณหภูมิภายในมีค่าเท่ากับ 32 °C และอุณหภูมิภายนอกมีค่าเท่ากับ 31 °C โดยอุณหภูมิภายนอกเพิ่มขึ้นและลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงเวลา 11.45 น. เนื่องจากฝนตก และอุณหภูมิเพิ่มขึ้นอีกครั้งอย่างต่อเนื่องจนถึงเวลา 13.35 น. เนื่องจากอากาศภายนอกร้อนอบอ้าวแล้วลดลงอีกครั้งจนสิ้นสุดการทดสอบครั้งที่ 3 เพราะเป็นช่วงเย็นที่มีลมพัดผ่านบริเวณที่ทำการทดสอบ อุณหภูมิภายในนั้นจะเริ่มลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงค่าต่ำสุดที่ตั้งไว้ที่เวลา 10.39 น. ตลอดระยะเวลาการทดสอบนี้ ตั้งแต่เวลา 09.30 - 16.30 น. พบว่าพัดลมและแผงระเหย มีการทำงานทั้งหมด 2 ครั้ง รวมเป็นเวลา 2 ชั่วโมง 19 นาที มีการใช้พลังงานทั้งหมด 0.12 หน่วย และปริมาณน้ำที่จ่ายเข้าไปในระบบ 0.42 ลบ.ม.

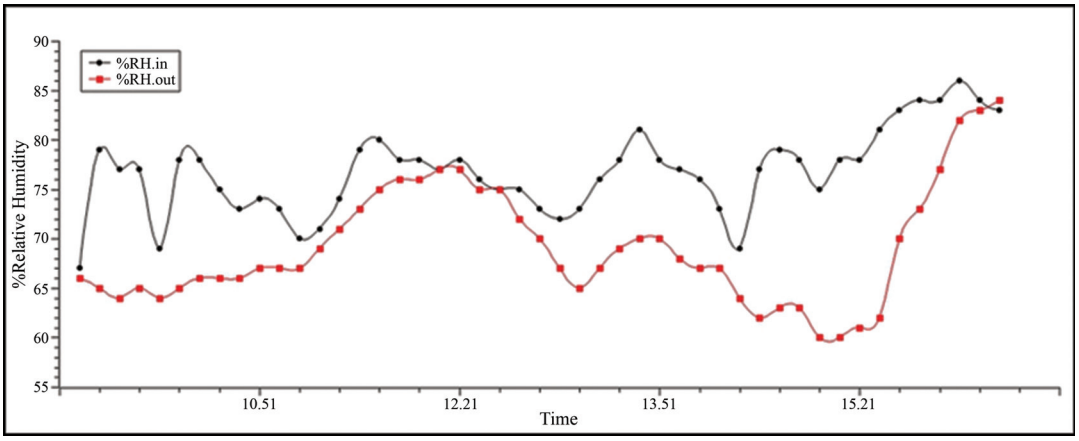
จากรูปที่ 8(ข) เส้นสีดำคือ ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศภายในโรงเรือน และเส้นสีแดงคือ ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศภายนอกโรงเรือน เมื่อเริ่มการทดสอบความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศภายในโรงเรือนเพาะปลูกมีค่าเท่ากับ 65 %RH และภายนอกมีค่าเท่ากับ 64 %RH โดยความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศภายนอกเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงเวลา 12.15 น. เนื่องจากสภาพอากาศภายนอกในช่วงเวลานั้นมีเมฆมากและฝนตก จากนั้นความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศภายนอกลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงเวลา 15.15 น. เนื่องจากอากาศร้อนและลมแรง จากนั้นความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศได้เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนสิ้นสุดการทดลองครั้งที่ 3 เพราะมีฝนตก ในส่วนของความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศภายในโรงเรือนนั้น จะมีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงค่าความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศสูงสุดที่ตั้งไว้จะหยุดการพ่นหมอก ตลอดการทดสอบมีการพ่นหมอกทั้งหมด 6 ครั้ง รวมเป็นระยะเวลาทั้งสิ้น 98 นาที มีการใช้พลังทั้งหมด 0.04 หน่วย และปริมาณน้ำที่จ่ายเข้าไปในระบบ 0.05 ลบ.ม.

จากรูปที่ 8(ค) เส้นสีดำคือ ความชื้นในดินปลูกภายในโรงเรือน และเส้นสีแดงคือ ปริมาณความเข้มข้นของปุ๋ยในดินปลูกภายในโรงเรือน ก่อนการทดสอบดินมีความชื้นร้อยละ 54 และมีปริมาณความเข้มข้นของปุ๋ยร้อยละ 80 เมื่อเริ่มทดสอบการทำงานของระบบ เซ็นเซอร์ตรวจจับค่าความชื้นในดินได้ร้อยละ 54 จึงส่งสัญญาณให้เปิดวาล์วน้ำเพื่อเพิ่มปริมาณความชื้นในดินจนถึงร้อยละ 57 ระบบหยุดการจ่ายน้ำ และเริ่มการจ่ายน้ำอีกครั้งเมื่อความชื้นในดินต่ำกว่าร้อยละ 50 และปริมาณความเข้มข้นของปุ๋ยนั้น เซ็นเซอร์ตรวจจับค่าความเข้มข้นของปุ๋ยในดินได้ร้อยละ 80 จึงส่งสัญญาณให้เปิดวาล์วน้ำปุ๋ยจนถึงร้อยละ 98 จึงสั่งให้ปิดวาล์วน้ำปุ๋ย และจะเริ่มทำงานอีกครั้งเมื่อค่าต่ำกว่าร้อยละ 58 ตลอดเวลาการทดสอบ 7 ชั่วโมง พบว่าวาล์วจ่ายน้ำมีการทำงานทั้งหมด 3 ครั้ง

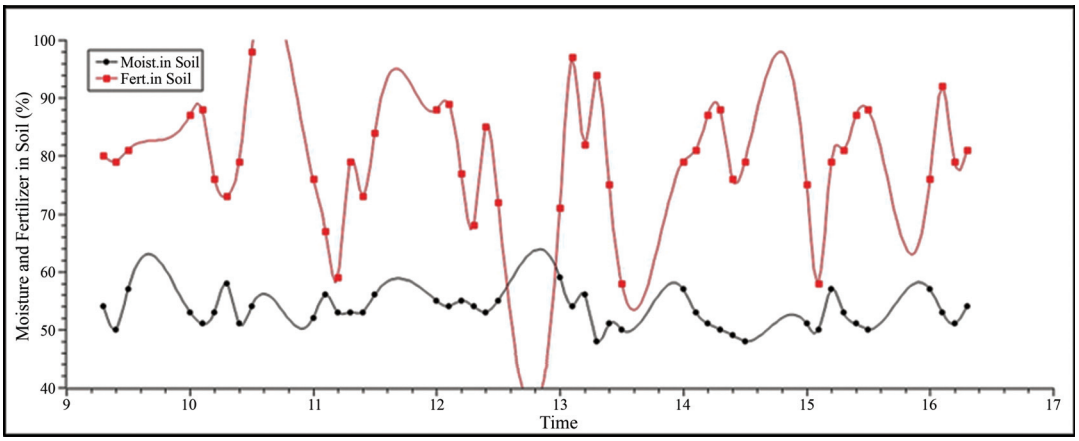
รวมระยะเวลาในการทำงาน 40 นาที วาล์วจ่ายน้ำปุ๋ยมีการทำงานทั้งหมด 3 ครั้ง รวมระยะเวลาในการทำงาน 30 นาที มีการใช้พลังงานทั้งหมด 0.62 หน่วย และมีปริมาณน้ำและปุ๋ยเข้าไปในระบบ 89.1 ลิตร



(ก) ระบบควบคุมอุณหภูมิ



(ข) ระบบควบคุมความชื้นสัมพัทธ์



(ค) ระบบควบคุมการให้น้ำและปุ๋ย

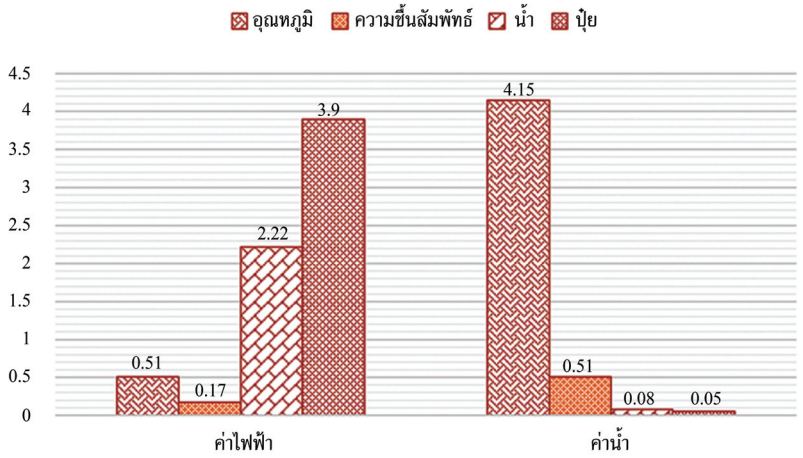
รูปที่ 8 การทำงานของระบบควบคุมแวดล้อมภายในโรงเรือนเพาะปลูก การทดสอบที่ 3

โดยผลของอุณหภูมิภายในโรงเรือนที่ได้จากการบันทึกข้อมูลบนคลาวด์ของทั้ง 3 การทดสอบนั้นพบว่า ชุดควบคุมอุณหภูมิของระบบที่ได้ทำการออกแบบและสร้างในงานวิจัยนี้มีความสามารถในการควบคุมให้

ISSN 2672-9369 (Online)

อุณหภูมิภายในโรงเรือนอยู่ในช่วงที่กำหนดคือ 29 - 31 °C เพราะสัมพันธ์กับช่วงของเวลาในการหยุดหรือเริ่มทำงานของอุปกรณ์ของชุดควบคุมอุณหภูมิแต่ที่มีค่าของอุณหภูมิในบางช่วงเวลาจากรูปที่ 6(ก) 7(ก) และ 8(ก) ที่ต่ำกว่า 29 °C หรือสูงกว่า 31 °C นั้น เป็นผลสืบเนื่องมาจากการทำงานของอุปกรณ์ในอีก 3 ชุดควบคุมที่ยังทำงานอยู่ และด้วยธรรมชาติของการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ยังคงดำเนินต่อไปถึงแม้อุปกรณ์ต่าง ๆ จะหยุดทำงาน ซึ่งอุณหภูมิจะยังคงเพิ่มขึ้นหรือลดลงต่อไปอีกโดยจะขึ้นอยู่กับปริมาณความร้อนที่เกิดจากพืชและความสว่างของแสงจากหลอดไฟภายในโรงเรือนเพาะปลูก และสภาพแวดล้อมภายในและภายนอกโรงเรือน โดยประเด็นนี้ยังเป็นโจทย์ที่คณะผู้วิจัยจะได้ดำเนินการศึกษาเพื่อพัฒนาการทำงานของระบบควบคุมในลำดับต่อไป

ตลอดการทดสอบการทำงานของระบบควบคุมสภาพแวดล้อมภายในโรงเรือนเพาะปลูกนั้น พบว่า ระบบควบคุมการทำงานทั้งหมดคือ ระบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ ระบบควบคุมการให้น้ำและปุ๋ยในดิน สามารถทำงานได้ตามเงื่อนไขที่คณะผู้วิจัยกำหนดไว้ ซึ่งระยะเวลาและจำนวนครั้งในการทำงานของทุกระบบควบคุมสภาพแวดล้อมภายในโรงเรือนจะมีความแตกต่างกันไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยของสภาพอากาศภายนอกโรงเรือนเพาะปลูกที่มีความแปรปรวน และปัจจัยภายในโรงเรือนเพาะปลูก เพราะเมื่อมีการจ่ายน้ำให้กับดินปลูกที่อยู่ภายในโรงเรือนจะส่งผลให้ความเข้มข้นของปุ๋ยที่มีอยู่ในดินลดลง หากลดลงต่ำกว่าเงื่อนไขที่คณะผู้วิจัยกำหนดไว้ระบบควบคุมการให้ปุ๋ยในดินจะเริ่มทำงาน หรือเมื่อจ่ายปุ๋ยน้ำเข้าไปในดินก็จะเพิ่มความชื้นในดินให้สูงขึ้นเช่นกันซึ่งจะส่งผลต่อระยะเวลาและจำนวนครั้งในการทำงานของระบบความคุมการให้น้ำในดิน และเมื่อดินปลูกที่อยู่ที่พื้นของโรงเรือนมีความชื้นก็ส่งผลให้อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศภายในโรงเรือนเพาะปลูกเปลี่ยนไป ซึ่งจะทำให้ระยะเวลาและจำนวนครั้งในการทำงานของระบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศเช่นกัน และยังมีปัจจัยหลายส่วนที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพการลดอุณหภูมิของโรงเรือน เช่น สถานที่ทำการทดลอง ซึ่งมีอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศแตกต่างกันในแต่ละช่วงเวลาที่ทำการทดลองมีผลต่ออุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ [18] ดังนั้นปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าและน้ำที่แสดงในรูปที่ 9 จึงเป็นเพียงค่าเฉลี่ยจากการทดสอบทั้งหมดเท่านั้น



รูปที่ 9 ค่าใช้จ่ายเฉลี่ยจากการใช้พลังงานไฟฟ้าและน้ำของระบบควบคุมสภาพแวดล้อมภายในโรงเรือนเพาะปลูก

ผลจากการบันทึกค่าพลังงานไฟฟ้าและน้ำที่สูญเสียจากการทำงานของระบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ ระบบควบคุมการให้น้ำและปุ๋ยในดินภายในโรงเรือนเพาะปลูกในขณะทำการทดสอบ คณะผู้วิจัยได้แปลงเป็นค่าเงินบาทต่อชั่วโมงทำงานของระบบที่แสดงดังรูปที่ 8 โดยพิจารณาที่ค่าของพลังงานไฟฟ้าพบว่า ระบบควบคุมการให้ปุ๋ยในดินมีการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงสุดเฉลี่ย 3.9 บาทต่อชั่วโมง รองลงมาคือ ระบบควบคุมการให้น้ำในดินเฉลี่ย 2.22 บาทต่อชั่วโมง ระบบควบคุมอุณหภูมิเฉลี่ย 0.51 บาทต่อชั่วโมง และสุดท้ายคือ ระบบควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศเฉลี่ย 0.17 บาทต่อชั่วโมง และเมื่อพิจารณาที่ค่าของปริมาณ

การใช้น้ำพบว่า ระบบควบคุมอุณหภูมิมีการใช้น้ำภายในระบบสูงสุดเฉลี่ย 4.15 บาทต่อชั่วโมง ระบบควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศเฉลี่ย 0.51 บาทต่อชั่วโมง ระบบควบคุมการให้น้ำในดินเฉลี่ย 0.08 บาทต่อชั่วโมง และระบบควบคุมปุ๋ยในดินเฉลี่ย 0.05 บาทต่อชั่วโมง ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาจากค่าใช้จ่ายรวมที่เกิดจากการใช้พลังงานไฟฟ้าและน้ำของระบบควบคุมสภาพแวดล้อมภายในโรงเรือนเพาะปลูกพบว่า ระบบควบคุมอุณหภูมิภายในโรงเรือนค่าใช้จ่ายรวมสูงถึง 4.66 บาท หรือร้อยละ 40 ของค่าใช้จ่ายทั้งหมด รองลงมาคือ ระบบควบคุมปุ๋ยในดินมีค่าใช้จ่ายรวมที่ 3.95 บาท หรือร้อยละ 34 ของค่าใช้จ่ายทั้งหมด ตามด้วยระบบควบคุมการให้น้ำในดินมีค่าใช้จ่ายรวมสูงถึง 2.3 บาท หรือร้อยละ 20 ของค่าใช้จ่ายทั้งหมด และสุดท้ายคือ ระบบควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศค่าใช้จ่ายรวมที่ 0.68 บาท หรือร้อยละ 6 ของค่าใช้จ่ายทั้งหมด

สรุปผล

จากการศึกษา ออกแบบ และสร้างระบบควบคุมสภาพแวดล้อมภายในโรงเรือนเพาะปลูกสำหรับครัวเรือนด้วยระบบ IoT ที่ประกอบด้วย ระบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ ระบบควบคุมการให้น้ำและปุ๋ยในดิน โดยระบบควบคุมสภาพแวดล้อมภายในโรงเรือนเพาะปลูกถูกควบคุมด้วย Node MCU ซึ่งรับข้อมูลจากเซ็นเซอร์อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความชื้นและปุ๋ยในดิน แล้วส่งข้อมูลไปแสดงผลยัง NETPIE จากนั้นผู้ใช้งานสามารถป้อนข้อมูลส่งกลับมาควบคุมยัง Node MCU ซึ่งผู้ใช้งานสามารถควบคุมการทำงานของระบบควบคุมสภาพแวดล้อมภายในโรงเรือนได้จากทางไกลผ่านอินเทอร์เน็ตได้

ผลการออกแบบและทดสอบการทำงานของระบบควบคุมสภาพแวดล้อมภายในโรงเรือนเพาะปลูกทั้งหมดพบว่า ระบบควบคุมสภาพแวดล้อมภายในโรงเรือนเพาะปลูกทั้งหมดสามารถควบคุมการทำงานได้ทั้งในแบบการควบคุมด้วยมือ และแบบอัตโนมัติ สามารถทำงานเพื่อรักษาสภาพแวดล้อมภายในโรงเรือนให้ตรงตามผู้ใช้งานตั้งค่า สามารถเริ่มและหยุดการทำงานได้ตรงตามเงื่อนไขที่ผู้ใช้งานกำหนดได้ โดยระบบควบคุมอุณหภูมิภายในโรงเรือนมีการใช้พลังงานไฟฟ้าและน้ำสูงสุดคือ ร้อยละ 40 ระบบควบคุมปุ๋ยในดินปลูกภายในโรงเรือนร้อยละ 34 ระบบควบคุมการให้น้ำในดินปลูกภายในโรงเรือน ร้อยละ 20 และระบบควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศภายในโรงเรือนร้อยละ 6 และชุดควบคุมนี้สามารถลดอุณหภูมิภายในโรงเรือนให้ต่ำกว่าอุณหภูมิภายนอกโรงเรือนได้สูงสุด 5 ^{o}C

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากคณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ประจำปีงบประมาณ 2564 สัญญาเลขที่ NKR2564INC003

References

[1] Office of Promotion and Training, Kasetsart University. (2022). **Growing Vegetables is Safe from Toxins**. Access (16 April 2022). Available (https://www.eto.ku.ac.th/neweto/e-book/plant/herb_gar/save_veg.pdf)

[2] Sae-lim, S. (2003). **Cultivation Natural Ventilation in Greenhouse**. M. Energy and Materials, King Mongkut's University of Technology

[3] Kor Charoen, R. P. (2017). Wireless Technologies for Internet of Things. **NBTC Journal**. Vol. 1, No. 1, pp. 268–287

ISSN 2672-9369 (Online)

[4] Viboonpanich, R. (2017). **Research Report the Development of Plant Caring System for Elderly to Encourage Convenience with the Internet of Things (IoTs) Technology**. North Bangkok University

[5] Sri-Amnuay, B., Prangsorn, S., Piticharoenporn, W., and Sihanam, P. (2019). The Design of the Smart Farm System Using the Internet of Things Technology for Lime Farms in Phetchaburi Province. In **Proceeding of the 6th National Conference Nakhon Ratchasima College**. Nakhon Ratchasima: Nakhon Ratchasima College. pp. 808-816

[6] Singjaroen, B. and Sakaew, S. (2016). Temperature and Humidity Control System in Mushroom Greenhouse. In **Proceeding of the 1st National Conference of Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi**. Phra Nakhon Si Ayutthaya: Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi, pp. 176-183.

[7] Sanksaera, W., Klinkasorn, T., and Mathulaprangsan, S. (2015). **Environment Control System for Lettuce Plant in NFT Hydroponic System**. B. Eng, Kasetsart University Kamphaeng Saen Campus

[8] Arbel, A., Yekutieli, O., and Barak, M. (1999). Performance of a Fog System for Cooling Greenhouses. **Journal of Agricultural Engineering Research**. Vol. 72, Issue 2, pp. 129-136. DOI: 10.1006/jaer.1998.0351

[9] Jirapongsatornkul, N., Ratanaporn, O., Praekthong, P., and Uthenaphan, K. (2018). Effect of Diurnal Temperature Change on Growth and Pir Toxin Production of *Vibrio parahaemolyticus* Causing Acute Hepatopancreatic Necrosis Disease (AHPND). **RMUTI JOURNAL Science and Technology**. Vol. 11, No. 3, pp. 70-88

[10] Wisesook, O. (2014). Study of Flow Pattern and Temperature Distribution of Air Inside Cultivable Greenhouse. **Journal of Energy and Environment Technology**. Vol. 1, No. 2, pp. 35-45

[11] Chaichinda, N. (2020). **Positive Pressure Room vs Negative Pressure Room**. Access (20 April 2022). Available (https://dsense.co.th/ดูบทความ-77470-positive-pressure-room-vs-negative-pressure-room.html)

[12] Learning Center for Earth Science and Astronomy. (2020). **Humidity**. Access (20 April 2022). Available (http://www.lesa.biz/earth/atmosphere/humidity)

[13] Boonpeng, P., Jaisin, C., and Yingkayun, K. (2020). *Chlorella* sp. Cultivation Using Carbon Dioxide Concentration Control System. **RMUTI JOURNAL Science and Technology**. Vol. 13, No. 2, pp. 18-38

[14] Noisapung, J. and Sixpanna, A. (2019). The Low Heated Greenhouse for Organic Agriculture. In **Proceeding of the 33rd Conference on Mechanical Engineering Network of Thailand**. Mahasarakham: Faculty of Engineering, Mahasarakham University, pp. 669-677

[15] Chaoumead, A. and Phangkeio, D. (2019). Soil Moisture Control System for Melon Cultivation in Greenhouse. **Rajamangala University of Technology Srivijaya Research Journal**. Vol. 11, No. 2, pp. 269-278

[16] Phornrawee, B. (2003). **Broiler Farming in a Closed System**. Economic Animals, Bangkok

[17] Naamhomchan, T. and Sereipattananon, A. (2014). PLC-Based Automatic Control System of Temperature and Relative Humidity in Soilless Culture Greenhouse with an Evaporative Cooling System and Fogging System. **EAU Heritage Journal Science and Technology**. Vol. 8, No. 1, pp. 98-111

[18] Pongpanich, N., Chayaprasert, W., Sanchatjate, P., Moonmangmee, I., and SangpetchSong, K. (2015). Development and Testing of Evaporative Cooling Systems for Temperature and Relative Humidity in Greenhouses. In **Proceeding of the 16th TSAE National Conference and 8th TSAE International Conference**. Bangkok: BITEC Exhibition and Convention Center, pp. 361-365

ISSN 2672-9369 (Online)

การวิเคราะห์เชิงทางทฤษฎีเกี่ยวกับคุณสมบัติการกำบังรังสีไอออไนซ์ของโลหะผสมทังสเตนเป็นหลักที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบฟิวชัน

Theoretical Analysis of Ionizing Radiation Shielding Properties of Tungsten Based Alloy Used in Fusion Nuclear Reactor

กิตติศักดิ์ ศรีวงค์ษา[1*] พันธ์ศักดิ์ กล่ำกล่อมจิตร[2] ภูผา เทียนสมบูรณ์[2] ศุภวิชญ์ เลี่ยมนาค[2] ธนโชติ คำคล้าย[2] และสุนันทศักดิ์ ระวังวงศ์[3]

Kittisak Sriwongsa[1*] Punsak Glumglomchit[2] Phupa Tiensomboon[2] Suppawit Liamnark[2] Thanachot Kamkhlay[2] and Sunantasak Ravangvong[3]

Received: *May 21, 2022;* ***Revised:*** *July 5, 2022;* ***Accepted:*** *July 5, 2022*

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาคุณสมบัติการกำบังรังสี นิวตรอนพลังงานสูง และรังสีไอออไนซ์ประเภทที่มีประจุไฟฟ้า (อนุภาคโปรตอน และแอลฟา) ของโลหะผสมทังสเตนจำนวน 6 ตัวอย่าง ได้แก่ MT-17C MT-17F MT-175 MT-18C MT-18F และ MT-185 โดยคุณสมบัติการกำบังรังสีที่พิจารณาคือ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล (Mass Attenuation Coefficient: μ_m) เลขอะตอมยังผล (Effective Atomic Number: Z_{eff}) ค่าความหนาครึ่งค่า (Half Value Layer: HVL) และระยะทางอิสระเฉลี่ย (Mean Free Path: MFP) ซึ่งค่าเหล่านี้ถูกคำนวณด้วยโปรแกรม Phy-X/PSD ที่ช่วงพลังงาน 10^{-3} ถึง 10^{5} เมกกะอิเล็กตรอนโวลต์ ในขณะที่การกำบังนิวตรอนพลังงานสูงได้พิจารณาค่า Fast Neutron Removal Cross Sections: Σ_R ที่คำนวณด้วยทฤษฎีความหนาแน่นย่อย และรังสีไอออไนซ์ประเภทที่มีประจุไฟฟ้า (อนุภาคโปรตอน และแอลฟา) ได้ศึกษาในช่วงพลังงาน 0.1 ถึง 15 เมกกะอิเล็กตรอนโวลต์ ด้วยโปรแกรม SRIM รุ่น 2013 ซึ่งค่าที่นำมาวิเคราะห์ คืออำนาจศักย์หยุดยั้งมวลรวม (Mass Stopping Power: MSP) และค่าช่วงคาดการณ์เฉลี่ย (Project Ranged: PR) ผลการศึกษาพบว่า โลหะผสมทังสเตน MT-185 มีคุณสมบัติการกำบังรังสี นิวตรอนพลังงานสูง และรังสีไอออไนซ์ประเภทที่มีประจุไฟฟ้า (อนุภาคโปรตอน และแอลฟา) ดีที่สุด

คำสำคัญ : การกำบังรังสี; นิวตรอนพลังงานสูง; รังสีไอออไนซ์; โลหะผสมทังสเตน

[1] *คณะศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร นครปฐม*
[2] *โรงเรียนหัวหินวิทยาลัย ประจวบคีรีขันธ์*
[3] *คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี*
[1] *Faculty of Education, Silpakorn University, Nakhon Pathom*
[2] *Huahinvitthayalai School, Prachuapkhirikhan*
[3] *Faculty of Science and Technology, Phetchaburi Rajabhat University*
[*] *Corresponding Author, Tel. 08 5215 8754, E - mail: sunantasak.rav@mail.pbru.ac.th*

Abstract

The aim of this research was to study the radiation, fast neutron and charge particles of ionizing radiation (protons and alpha particles) shielding properties of tungsten-based alloys for 6 samples, namely MT-17C, MT-17F, MT-175, MT-18C, MT-18F, and MT-185. The radiation shielding properties were discussed based on mass attenuation coefficient (μ_m), effective atomic number (Z_{eff}), half value layer (HVL) and mean free path (MFP) values. These values were calculated using Phy-X/PSD program at energy ranging between 10^{-3} - 10^{5} MeV. Fast neutron shielding properties were explained by fast neutron removal cross sections (Σ_R) which were determined using partial density. For charge, particles of ionizing radiation (protons and alpha particles) were simulated using SRIM program, version 2013, at energy ranging between 0.1 - 15 MeV. The parameters analyzed were mass stopping power (MSP) and project ranged (PR). The results revealed that MT-185 tungsten-based alloy had an excellent radiation, fast neutron and charge particles of ionizing radiation (protons and alpha particles) shielding properties.

Keywords: Radiation Shielding; Fast Neutron; Ionizing Radiation; Tungsten-Based Alloys

บทนำ

การตระหนักถึงความสำคัญด้านเศรษฐกิจและระบบนิเวศวิทยาด้านการประยุกต์ใช้พลังงานไฟฟ้า แม้จะมีโศกนาฏกรรมที่เชอร์โนบิลและฟุกุชิมะ แต่มนุษยชาติยังให้ความสำคัญกับการพัฒนาพลังงานนิวเคลียร์เพื่อนำมาผลิตเป็นกระแสไฟฟ้าเป็นลำดับแรก เนื่องจากยังไม่มีพลังงานไฟฟ้าที่ถูกกว่าและบริสุทธิ์ต่อระบบนิเวศวิทยา พลังงานนิวเคลียร์ช่วยให้เข้าถึงพลังงานสะอาด มีอัตราในการผลิตที่คงที่ และราคาไม่แพง บรรเทาผลกระทบด้านลบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ เป็นส่วนสำคัญของการผสมผสานพลังงานของโลกและการใช้งาน คาดว่าพลังงานนิวเคลียร์จะเติบโตในทศวรรษหน้า [1] ด้วยการขยายแหล่งพลังงานหมุนเวียนและการเปลี่ยนเชื้อเพลิงจากถ่านหินเป็นก๊าซ การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานนิวเคลียร์ที่สูงขึ้นมีส่วนทำให้การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ทั่วโลกอยู่ที่ 33 จิกะตัน ในปี ค.ศ. 2019 [2] เนื่องจากการผลิตพลังงานในปัจจุบันคิดเป็น 66 % ของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั่วโลก พลังงานนิวเคลียร์ถือเป็นทรัพยากรที่สำคัญในการจัดการก๊าซเรือนกระจกในชั้นบรรยากาศและสภาพอากาศที่เกี่ยวข้อง เห็นได้ชัดว่าพลังงานนิวเคลียร์มีอัตราการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ต่ำ ซึ่งเป็นแหล่งผลิตพลังงานไฟฟ้ามีบทบาทสำคัญในการเปลี่ยนผ่านไปสู่พลังงานสะอาด ในปี พ.ศ. 2561 พลังงานนิวเคลียร์ผลิตไฟฟ้ามากกว่า 11 เปอร์เซ็นต์ของโลก ในคณะกรรมการระหว่างรัฐบาลว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Intergovernmental Panel on Climate Change; IPCC) แสดงให้เห็นว่าการใช้พลังงานนิวเคลียร์มีอัตราเพิ่มขึ้นมากกว่าสองถึงสามเท่าในปัจจุบัน [3]

เมื่อปลายปี พ.ศ. 2560 จำนวนเครื่องปฏิกรณ์พลังงานนิวเคลียร์ที่ใช้งานมีจำนวนทั้งหมด 448 เครื่อง มีกำลังการผลิตทั่วโลกที่ 392 จิกะวัตต์ ซึ่งเพิ่มขึ้นประมาณ 1.2 จิกะวัตต์ ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2559 [2] ปัจจุบัน 30 ประเทศใช้พลังงานนิวเคลียร์ และ 28 ประเทศกำลังพิจารณา วางแผน หรือทำงานอย่างเร่งด่วนเพื่อจัดตั้งโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ในประเทศ ข้อดีของพลังงานนิวเคลียร์ในแง่ของสภาพอากาศ การลดการเปลี่ยนแปลง ความมั่นคงด้านพลังงาน สิ่งแวดล้อมและนโยบายด้านเศรษฐกิจและสังคมเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้หลาย ๆ ประเทศให้ความสนใจที่จะใช้พลังงานนิวเคลียร์เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า

ISSN 2672-9369 (Online)

วิศวกรรมวัสดุด้านพลังงานนิวเคลียร์มีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งต่อโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ วัสดุโครงสร้างและวัสดุหุ้มเชื้อเพลิงเป็นตัวกำหนดการทำงานที่ปลอดภัยและประหยัดของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ เป็นที่รู้กันว่าวัสดุโครงสร้างและวัสดุหุ้มเชื้อเพลิงจะได้รับความเสียหายจากการฉายรังสีและอุณหภูมิที่สูงซึ่งจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างระดับจุลภาค สมบัติเชิงกล และแม้กระทั่งขนาดภายนอกของส่วนประกอบโครงสร้าง [4] - [5] ข้อจำกัดหนึ่งของกระบวนการในการเผาไหม้เชื้อเพลิงนิวเคลียร์ในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ คือ ความต้านทานการแผ่รังสีของวัสดุสำหรับหุ้มและท่อของส่วนประกอบย่อยของเชื้อเพลิง ความเสียหายของวัสดุโครงสร้างและวัสดุหุ้มเชื้อเพลิงที่เกิดจากการฉายรังสีในระดับจุลภาคและมหภาคเกิดจากอันตรกิริยาระหว่างรังสีกับอะตอม ความเข้มของปริมาณรังสี แหล่งกำเนิดรังสี ฯลฯ [5] - [6] การพัฒนาวัสดุที่ทนต่อรังสีจึงเป็นส่วนสำคัญของพลังงานนิวเคลียร์สมัยใหม่ และเป็นเป้าหมายทางวิทยาศาสตร์หรือทางเทคนิคที่สำคัญมาก ความทนทานต่อรังสีและการเผาไหม้ที่สูงเป็นความท้าทายทางวิทยาศาสตร์ที่มีผลกระทบทางเทคโนโลยีที่น่าสนใจ ทังสเตน (W) เป็นสารตั้งต้นสำหรับส่วนประกอบที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบฟิวชัน เนื่องจากมีจุดหลอมเหลวที่สูง (3695 K) และมีการนำความร้อนที่สูง [7] - [8] ทังสเตนเป็นโลหะทนไฟใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมที่มักจะอยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูง และสิ่งนี้เกิดขึ้นจากจุดหลอมเหลวสูง การนำความร้อนที่ดี และมีความแข็งสูงที่อุณหภูมิสูง [9] การใช้ทังสเตนและโลหะผสมทังสเตนสำหรับไดเวอร์เทอร์ที่ระบายความร้อนด้วยฮีเลียมและป้องกันอันตรกิริยาที่จะเกิดขึ้นจากฮีเลียมไอออนในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ได้มีการศึกษาและตรวจสอบมาหลายปีแล้ว [10] - [17] คุณสมบัติของทังสเตนและโลหะผสมทังสเตนในเครื่องปฏิกรณ์ฟิวชันถูกนำมาวิเคราะห์ถึงการใช้งานและความปลอดภัย [18] แต่ปัจจัยหนึ่งที่ยังไม่ได้ถูกนำมาวิเคราะห์และกล่าวถึง คือ คุณสมบัติการกำบังรังสีไอออไนซ์ประเภทที่มีประจุไฟฟ้าและไม่มีประจุไฟฟ้าของโลหะผสมทังสเตน เมื่อนำโลหะผสมทังสเตนไปประยุกต์ใช้งานจริงในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์จำเป็นอย่างยิ่งที่ควรศึกษาถึงคุณสมบัติด้านการกำบังรังสีทั้งสองประเภท เนื่องจากรังสีทั้งสองจะเข้าไปทำอันตรกิริยาภายในอะตอมของโลหะผสมทังสเตน (สร้างความเสียหายระดับจุลภาค)

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาคุณสมบัติการกำบังรังสีไอออไนซ์ 2 ประเภท คือ ประเภทที่ไม่มีประจุไฟฟ้าและประเภทที่มีประจุไฟฟ้า ซึ่งเป็นผลลัพธ์ที่ได้จากเหตุการณ์เกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์แบบฟิวชันเนื่องจากทริเทียม (Tritium) กับดิวเทอเรียม (Deuterium) โลหะผสมทังสเตนเป็นหลัก (Tungsten-Based Alloys) จะถูกนำมาวิเคราะห์ถึงคุณสมบัติการกำบังรังสีแกมมา นิวตรอนพลังงานสูง อนุภาคโปรตอน และแอลฟา โดยรังสีไอออไนซ์ประเภทที่ไม่มีประจุไฟฟ้า (รังสีแกมมา) ซึ่งเป็นผลที่ได้จากการที่นิวตรอนทำอันตรกิริยากับวัสดุโลหะผสมทังสเตนจะถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Phy-X/PSD ที่ช่วงพลังงาน 10^{-3} ถึง 10^{5} เมกกะอิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งเป็นช่วงพลังงานที่มากพอที่จะนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านอื่น ๆ พารามิเตอร์หลัก ได้แก่ สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล (Mass Attenuation Coefficient: μ_m) เลขอะตอมยังผล (Effective Atomic Number: Z_{eff}) ค่าความหนาครึ่งค่า (Half Value Layer: HVL) และระยะทางอิสระเฉลี่ย (Mean Free Path: MFP) นิวตรอนพลังงานสูงดำเนินการโดยใช้ทฤษฎีความหนาแน่นย่อย รังสีไอออไนซ์ประเภทที่มีประจุไฟฟ้า (อนุภาคโปรตอน และแอลฟา) จะนำมาวิเคราะห์ที่ช่วงพลังงาน 0.1 ถึง 15 เมกกะอิเล็กตรอนโวลต์ โดยช่วงพลังงานดังกล่าวเป็นผลลัพธ์ที่ได้จากการเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์แบบฟิวชันในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ [19] - [22] พารามิเตอร์ต่าง ๆ จะถูกนำมาวิเคราะห์โดยโปรแกรม SRIM รุ่น 2013 ซึ่งพารามิเตอร์ที่นำมาวิเคราะห์ในครั้งนี้ ได้แก่ อำนาจศักย์หยุดยั้งเชิงมวล (Mass Stopping Power: MSP) และค่าช่วงคาดการณ์เฉลี่ย (Project Ranged: PR) โดยตัวอย่างวัสดุที่เป็นโลหะผสมทังสเตนเป็นหลัก (Tungsten-Based Alloys) ที่นำมาวิเคราะห์ ได้แก่ MT-17C, MT-17F, MT-175, MT-18C, MT-18F และ MT-185

วิธีการศึกษา

1. **คุณสมบัติด้านการกำบังรังสีก่อไอออไนซ์ชนิดที่ไม่มีประจุไฟฟ้า**

การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ด้านการกำบังรังสี ได้แก่ การหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล (Mass Attenuation Coefficient: μ_m) สามารถคำนวณได้โดยการใช้ซอฟต์แวร์ Phy-X/PSD ซึ่งจะบอกถึงโอกาสของอัตราการเกิดอันตรกิริยาของโฟตอนต่อตัวกลางทั้งแบบอันตรกิริยารวมและอันตรกิริยาย่อยของแต่ละธาตุและสามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลได้ตาม "กฎการผสม (Mixture rule)" จากสมการที่ (1) [23]:

$$\mu_m = \sum w_i (\mu_m)_i \tag{1}$$

เมื่อ

w_i แทนสัดส่วนโดยน้ำหนักของแต่ละธาตุ

$(\mu_m)_i$ แทนสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของแต่ละธาตุ

ค่า $(\mu_m)_i$ สามารถนำไปหาภาคตัดขวางเชิงอะตอม (Atom Cross-Section: σ_a) และภาคตัดขวางเชิงอิเล็กตรอน (Electron Cross-Section: σ_{el}) ได้จากสมการที่ (2) และ (3) [23]:

$$\sigma_a = \frac{1}{N_A} \sum f_i A_i (\mu_m)_i \tag{2}$$

$$\sigma_{el} = \frac{1}{N_A} \sum \frac{f_i A_i}{Z_i} (\mu_m)_i \tag{3}$$

เมื่อ

N_A แทนเลขอาโวกาโดร

f_i แทนสัดส่วนจำนวนอะตอม

A_i แทนมวลอะตอมของแต่ละธาตุ

Z_i แทนเลขอะตอมของแต่ละธาตุ

เลขอะตอมยังผล (Effective Atomic Number: Z_{eff}) สามารถหาได้จากสมการที่ (4) [23]:

$$Z_{eff} = \frac{\sigma_a}{\sigma_{el}} \tag{4}$$

ค่าความหนาครึ่งค่า (Half Value Layer: HVL) คือ ความหนาของวัสดุที่ลดความเข้มของรังสีแกมมาลง 50 % และค่าเส้นทางอิสระเฉลี่ย (Mean Free Path: MFP) จะเปลี่ยนตามระยะทางเชิงเส้นและเป็นระยะทางเฉลี่ยที่รังสีแกมมาผ่านตัวอย่างวัสดุก่อนที่จะเกิดอันตรกิริยากับวัสดุซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ (5) และ (6) [24]:

$$HVL = \frac{0.693}{\mu} \tag{5}$$

ISSN 2672-9369 (Online)

$$MFP = \frac{1}{\mu} \tag{6}$$

โดย μ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น หาได้จาก $\mu = \mu_m \rho$ และ ρ คือ ความหนาแน่นของวัสดุตัวกลาง

2. **คุณสมบัติด้านการกำบังนิวตรอนพลังงานสูง**

ความน่าจะเป็นของอันตรกิริยาระหว่างนิวตรอนกับตัวกลางสามารถอภิปรายกันในภาคตัดขวางของการกำจัดที่มีประสิทธิผลจุลภาค (Macroscopic Effective Removal Cross-Section) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (7) [24]:

$$\sum_R = \sum_i w_i \left(\frac{\Sigma_R}{\rho} \right)_i \tag{7}$$

โดย $\left(\frac{\Sigma_R}{\rho} \right)_i$ (cm^2/g) และ w_i คือ ภาพตัดขวางการกำจัดมวลขององค์ประกอบแต่ละธาตุและความหนาแน่นย่อย (g/cm^3) ตามลำดับ

3. **คุณสมบัติด้านการกำบังรังสีก่อไอออไนซ์ชนิดที่มีประจุไฟฟ้า**

อัตราการสูญเสียพลังงาน dE/dx ของรังสีก่อไอออไนซ์ประเภทที่มีประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านโลหะผสมเอนโทรปีสูง $W_xTaTiVCr$ ถูกกำหนดโดยอันตรกิริยาของคูลอมบ์ที่ถูกป้องกัน (Screened Coulomb Interactions) กับอะตอมและอิเล็กตรอนของโลหะผสมเอนโทรปีสูง $W_xTaTiVCr$ กลไกในการสูญเสียพลังงานที่เกิดขึ้นจะแบ่งออกเป็น 2 แบบ ได้แก่ 1) การชนนิวเคลียส ซึ่งพลังงานจะถูกส่งผ่านในลักษณะการเคลื่อนที่เชิงเส้นหรือเปลี่ยนที่ (Translatory Motion) ไปยังอะตอมของโลหะผสมทังสเตนเป็นฐานโดยรวม และ 2) การชนกันทางอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งเกิดจากอนุภาคที่เคลื่อนที่ได้กระตุ้นหรือปล่อยอิเล็กตรอนของอะตอมออกมา อัตราการสูญเสียพลังงาน dE/dx หรืออำนาจศักย์หยุดยั้งมวลรวม สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (8) [23]:

$$\frac{dE}{dx} = \left. \frac{dE}{dx} \right|_n + \left. \frac{dE}{dx} \right|_e \tag{8}$$

โดย $-\left. \frac{dE}{dx} \right|_n$ และ $-\left. \frac{dE}{dx} \right|_e$ คือ อัตราการสูญเสียพลังงานที่เกิดจากการหยุดแบบนิวเคลียร์ และอัตราการสูญเสียพลังงานที่เกิดจากการหยุดแบบอิเล็กทรอนิกส์ ตามลำดับ

รังสีก่อไอออไนซ์ชนิดที่มีประจุไฟฟ้าที่ทะลุผ่านเข้าไปในตัวกลางจะมีทิศทางการเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางแบบสุ่ม โดยสูญเสียพลังงานจากการหยุดด้วยนิวเคลียร์และอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากปริมาณการฝังมักจะสูงกว่า 1,012 ไอออนต่อตารางเมตร เส้นทางการทะลุผ่านของรังสีก่อไอออไนซ์ชนิดที่มีประจุไฟฟ้าจึงสามารถคาดการณ์ได้โดยใช้วิธีการทางสถิติ ความลึกเฉลี่ยของรังสีก่อไอออไนซ์ชนิดที่มีประจุไฟฟ้าที่ทะลุผ่านเข้าไปในตัวกลางเรียกว่า ช่วงที่คาดการณ์เฉลี่ย (Projected Range: PR) ซึ่งสัมพันธ์กับช่วง R ที่เป็นระยะทางจริงที่รังสีก่อไอออไนซ์ชนิดที่มีประจุไฟฟ้าทะลุผ่านเข้าไปในตัวกลางจนหยุดนิ่ง จะอยู่ระหว่าง 10 นาโนเมตรถึง 1 ไมโครเมตร สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (9) [23]:

$$PR \cong \frac{R}{1+\left(M_2/3M_1\right)} \tag{9}$$

โดย M_2 คือ มวลของเป้าหมาย

อำนาจศักย์หยุดยั้งรวมและช่วงที่คาดการณ์เฉลี่ย สามารถคำนวณได้โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ The Stopping and Ion Ranges in Matter (SRIM; http://www.srim.org)

ผลการศึกษา

โลหะผสมทังสเตนที่ใช้ในการศึกษาสมบัติการกำบังรังสีไอออไนซ์ชนิดที่ไม่มีประจุไฟฟ้าและมีประจุไฟฟ้า ซึ่งองค์ประกอบสัดส่วนทางเคมีแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สัดส่วนองค์ประกอบทางเคมี (โมลเปอร์เซ็นต์) ของตัวอย่างโลหะผสมทังสเตน

Code	Mol (%)				Density (g/cm^3)
	W (74)	Ni (28)	Cu (29)	Fe (26)	
MT-17C	90.00	6.00	4.00	-	17.00
MT-17F	90.00	7.00	-	3.00	17.00
MT-175	92.50	5.25	-	2.25	17.50
MT-18C	95.00	3.50	1.50	-	18.00
MT-18F	95.00	3.50	-	1.50	18.00
MT-185	97.00	2.10	-	0.90	18.50

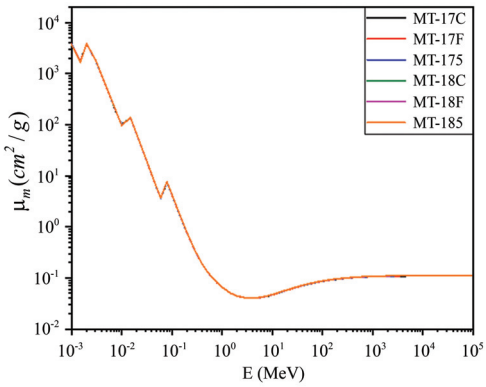
1. **คุณสมบัติด้านการกำบังรังสีก่อไอออไนซ์ชนิดที่ไม่มีประจุไฟฟ้า**

ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล (μ_m) ของโลหะผสมทังสเตนที่คำนวณได้จากโปรแกรม Phy-X/PSD ที่ช่วงพลังงานโฟตอน 10^{-3} - 10^{5} เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ แสดงดังรูปที่ 1 ซึ่งปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric Effect: PE) การกระเจิงแบบคอมป์ตัน (Compton Scattering: CS) และการผลิตคู่ (Pair Production: PP) เป็นอันตรกิริยาหลักที่ใช้อธิบายค่า μ_m ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยการแบ่งช่วงพลังงานของโฟตอนเป็น 3 ช่วง คือช่วงพลังงานต่ำ (น้อยกว่า 0.4 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์) ช่วงพลังงานปานกลาง (ระหว่าง 0.4 - 3 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์) และช่วงพลังงานสูง (มากกว่า 3 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์) ที่ช่วงพลังงานต่ำค่า μ_m ลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อพลังงานโฟตอนเพิ่มขึ้นซึ่งปรากฏการณ์ PE แปรผกผันกับพลังงานโฟตอน ($E^{-3.5}$) และที่ช่วงนี้ลักษณะกราฟมีรอยหยักไม่ต่อเนื่องซึ่งเกิดจากพลังงานในช่วงนั้นตกอยู่ในชั้นขอบการดูดกลืน (Absorption Edge) ของธาตุต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 2 ช่วงพลังงานปานกลางค่า μ_m เพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ ซึ่ง CS เป็นอันตรกิริยาหลัก และค่า μ_m แปรผกผันกับพลังงาน (αE^{-1}) จากนั้นค่า μ_m ค่อนข้างจะคงที่ ซึ่ง PP เป็นอันตรกิริยาหลัก โดยค่า μ_m จะแปรผันตรงกับ log E อีกทั้งตัวอย่างโลหะผสมทังสเตน MT-185 มีค่า μ_m สูงสุดในบรรดาตัวอย่างโลหะผสมทังสเตนทั้งหมด เนื่องจากตัวอย่างโลหะผสมทังสเตนนี้มีความหนาแน่นมากที่สุดและมีส่วนผสมของทังสเตน (W) ซึ่งมีเลขอะตอมสูงที่สุด (74) เป็นผลทำให้โอกาสการเกิดอันตรกิริยาระหว่างโฟตอนกับวัสดุมากที่สุดนำมาซึ่งกำบังรังสีได้ดีที่สุด [23]

ISSN 2672-9369 (Online)

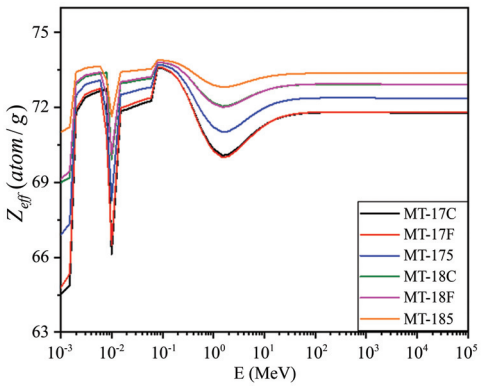
ตารางที่ 2 ชั้นขอบเขตการดูดกลืนพลังงาน (Absorption Edge) (keV)

ธาตุ	เลขอะตอม	M5	M4	M3	M2	M1	L3	L2	L1	K
Fe	26									7.11
Ni	28								1.01	8.33
Cu	29								1.10	8.98
W	74	1.81	1.87	2.28	2.58	2.82	1.02	1.15	1.21	69.53



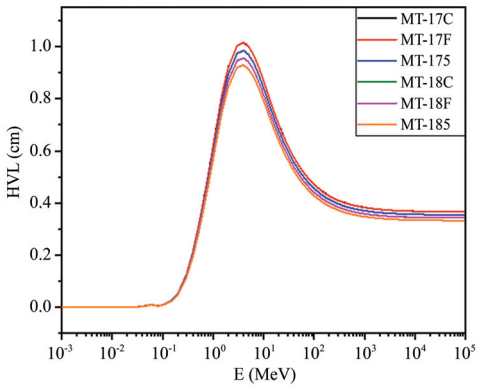
รูปที่ 1 สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของตัวอย่างโลหะผสมทังสเตนที่ช่วงพลังงาน 10^{-3} - 10^{5} เมกะอิเล็กตรอนโวลต์

เมื่อพิจารณารูปที่ 2 แสดงค่าเลขอะตอมยังผล (Z_{eff}) ของโลหะผสมทังสเตนที่ช่วงพลังงาน 10^{-3} - 10^{5} เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ โดยค่านี้แสดงถึงคุณลักษณะของโอกาสของการเกิดอันตรกิริยาระหว่างวัสดุตัวกลางและรังสี ถ้าค่านี้สูงหมายความว่าวัสดุนั้นมีโอกาสของการเกิดอันตรกิริยาที่สูงทำให้มีความสามารถกำบังรังสีได้ดีตามไปด้วย ค่า Z_{eff} จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของโลหะผสมทังสเตน จากรูปจะเห็นได้ว่าตัวอย่างโลหะผสมทังสเตน MT-185 มีค่า Z_{eff} สูงที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับค่า μ_m นอกจากนี้กราฟยังมีค่าสูงสุดไม่เกินค่าเลขอะตอมของธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลัก คือ ทังสเตนที่มีเลขอะตอม 74 อีกด้วย [23]

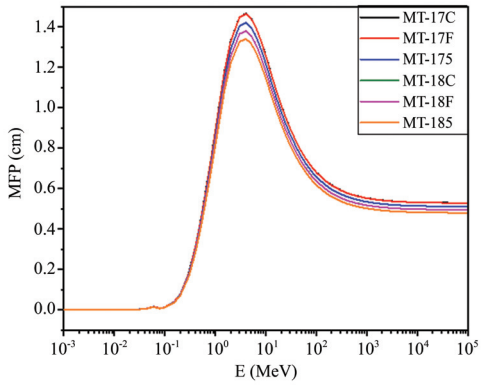


รูปที่ 2 เลขอะตอมยังผลของตัวอย่างโลหะผสมทังสเตนที่ช่วงพลังงาน 10^{-3} - 10^{5} เมกะอิเล็กตรอนโวลต์

ความหนาครึ่งค่า (Half Value Layer: HVL) และระยะทางอิสระเฉลี่ย (Mean Free Path: MFP) ของโลหะผสมทังสเตนที่ระดับพลังงานในช่วง 10^{-3} - 10^{5} เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ดังรูปที่ 3 และ 4 พบว่าตัวอย่างโลหะผสมทังสเตน MT-185 มีค่าต่ำกว่าโลหะผสมทังสเตนตัวอย่างอื่น ๆ นั่นแสดงว่าโลหะผสมทังสเตนตัวอย่างนี้มีคุณสมบัติการกำบังรังสีดีกว่าตัวอย่างอื่น ๆ ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้เป็นวัสดุกำบังรังสีได้ [24]



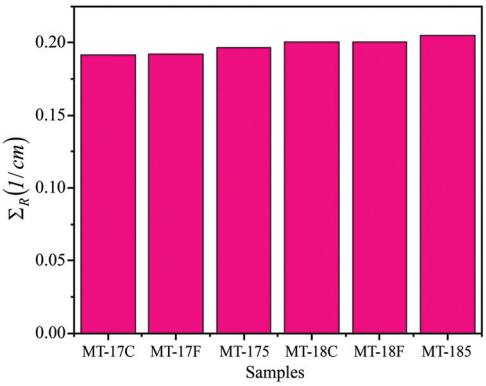
รูปที่ 3 ค่าความหนาครึ่งค่าของตัวอย่างโลหะผสมทังสเตนที่ช่วงพลังงาน 10^{-3} - 10^{5} เมกะอิเล็กตรอนโวลต์



รูปที่ 4 ระยะทางอิสระเฉลี่ยของตัวอย่างโลหะผสมทังสเตนที่ช่วงพลังงาน 10^{-3} - 10^{5} เมกะอิเล็กตรอนโวลต์

2. คุณสมบัติด้านการกำบังนิวตรอนพลังงานสูง

การกำบังนิวตรอนพลังงานสูง (Fast Neutron Removal Cross Sections: Σ_R) ของโลหะผสมทังสเตน ดังรูปที่ 5 พบว่าค่า Σ_R ของตัวอย่างโลหะผสมทังสเตน MT-185 มีค่าสูงที่สุดซึ่งเป็นผลมาจากในตัวอย่างนี้มีองค์ประกอบของธาตุทังสเตน (W) มากที่สุด และนั่นแสดงว่าตัวอย่างโลหะผสมทังสเตน MT-185 นี้มีคุณสมบัติในการกำบังนิวตรอนพลังงานสูงดีที่สุด [24]



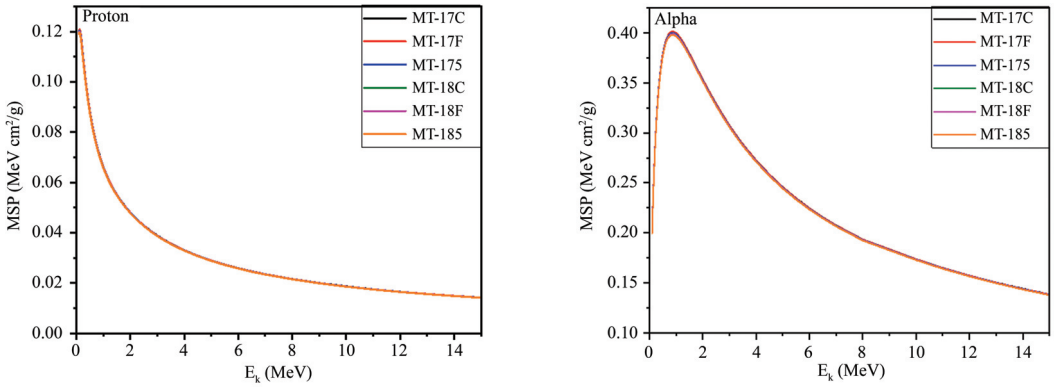
รูปที่ 5 การกำบังนิวตรอนพลังงานสูงของโลหะผสมทังสเตน

3. คุณสมบัติด้านการกำบังรังสีก่อไอออไนซ์ชนิดที่มีประจุไฟฟ้า

เมื่ออนุภาคที่มีประจุไฟฟ้า เช่น โปรตอนและแอลฟา ผ่านเข้าไปในวัสดุ จะเกิดการชนกับนิวเคลียสและอิเล็กตรอนในตัวอย่างวัสดุนั้น ๆ โดยการชนนี้อนุภาคจะสูญเสียพลังงานจลน์ (Energy kinetic: E_k)

ISSN 2672-9369 (Online)

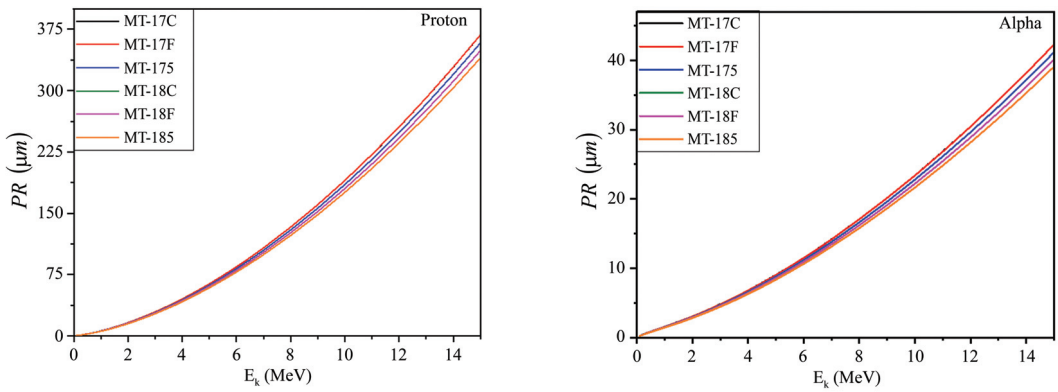
ทั้งหมดในวัสดุ เรียกว่า อำนาจศักย์หยุดยั้งเชิงมวล (Mass Stopping Powers: MSP) ซึ่งการสูญเสียพลังงานนั้นขึ้นอยู่กับพลังงาน มวล และเลขอะตอมของอนุภาค รวมทั้งมวลเลขอะตอม และความหนาแน่นของวัสดุ การคำนวณหาค่า MSP ของอนุภาคโปรตอน และแอลฟา ของตัวอย่างโลหะผสมทังสเตนที่พลังงาน 0.1 - 15 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ดังรูปที่ 6 พบว่า ค่า MSP ของอนุภาคแอลฟาสูงกว่าของอนุภาคโปรตอน เนื่องจากอนุภาคโปรตอนมีประจุไฟฟ้าที่น้อยกว่าแต่มีความเร็วมากกว่าอนุภาคแอลฟา ซึ่งค่า MSP แปรผันตรงกับปริมาณประจุไฟฟ้า แต่แปรผกผันกับกำลังสองของความเร็ว และตัวอย่างโลหะผสมทังสเตน MT-185 มีค่าต่ำสุด [25]



(ก) อำนาจศักย์หยุดยั้งเชิงมวล Proton (ข) อำนาจศักย์หยุดยั้งเชิงมวล Alpha

รูปที่ 6 อำนาจศักย์หยุดยั้งเชิงมวลของอนุภาคโปรตอนและแอลฟาที่พลังงาน 0.1 - 15 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์

เมื่ออนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าผ่านเข้าไปภายในวัสดุก่อนสูญเสีย E_k ทั้งหมด ซึ่งการคาดการณ์อนุภาคที่เคลื่อนที่ช้าลงอย่างต่อเนื่องนั้น เรียกว่า ช่วงที่คาดการณ์เฉลี่ยของอนุภาค (Projected Range: PR) ซึ่งเป็นค่าที่สำคัญเกี่ยวกับการกำบังอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าซึ่งถ้าค่านี้ต่ำบอกได้ว่ามีความสามารถการกำบังอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าได้ดี ค่า PR ของอนุภาคโปรตอนและแอลฟาในตัวอย่างโลหะผสมทังสเตน ดังรูปที่ 7 พบว่า โลหะผสมทังสเตน MT-185 มีค่า PR ต่ำที่สุด แสดงว่าตัวอย่างนี้มีความสามารถการกำบังอนุภาคโปรตอนและแอลฟาได้ดีที่สุด เพราะว่าเกิดการดูดกลืนอนุภาคโปรตอนและแอลฟาได้ดีกว่าตัวอย่างโลหะผสมทังสเตนตัวอื่น ๆ [23]



(ก) ช่วงคาดการณ์เฉลี่ยของ Proton (ข) ช่วงคาดการณ์เฉลี่ยของ Alpha

รูปที่ 7 ช่วงคาดการณ์เฉลี่ยของอนุภาคโปรตอนและแอลฟาที่พลังงาน 0.1 - 15 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์

สรุป

การศึกษาสมบัติการกำบังรังสีของโลหะผสมทังสเตนจำนวน 6 ตัวอย่าง ได้แก่ MT-17C, MT-17F, MT-175, MT-18C, MT-18F และ MT-185 โดยพารามิเตอร์ที่พิจารณาคือ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล

(Mass Attenuation Coefficient: μ_m) เลขอะตอมยังผล (Effective Atomic Number: Z_{eff}) ค่าความหนาครึ่งค่า (Half Value Layer: HVL) และระยะทางอิสระเฉลี่ย (Mean Free Path: MFP) ด้วยโปรแกรม Phy-X/PSD ที่ช่วงพลังงาน 10^{-3} ถึง 10^{5} เมกกะอิเล็กตรอนโวลต์ ผลการศึกษาพบว่า โลหะผสมทังสเตน MT-185 มีคุณสมบัติการกำบังรังสีดีที่สุด ในขณะที่การกำบังนิวตรอนพลังงานสูง (Fast Neutron Removal Cross Sections: Σ_R) ที่คำนวณด้วยทฤษฎีความหนาแน่นย่อย พบว่าโลหะผสมทังสเตน MT-185 มีการกำบังดีที่สุด และรังสีไอออไนซ์ประเภทที่มีประจุไฟฟ้า (อนุภาคโปรตอน: H^{+} และแอลฟา: He^{4+}) ที่ศึกษาในช่วงพลังงาน 0.1 ถึง 15 เมกกะอิเล็กตรอนโวลต์ ด้วยโปรแกรม SRIM รุ่น 2013 ซึ่งค่าที่นำมาวิเคราะห์ คือ อำนาจศักย์หยุดยั้งมวลรวม (Mass Stopping Power: MSP) และค่าช่วงคาดการณ์เฉลี่ย (Project Ranged: PR) พบว่าโลหะผสมทังสเตน MT-185 มีคุณสมบัติการกำบังรังสีไอออไนซ์ประเภทที่มีประจุไฟฟ้าได้ดีที่สุด

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยศิลปากร สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และ Thailand Science Research and Innovation (TSRI) ที่สนับสนุนงานวิจัยนี้

References

[1] Chu, S. and Majumdar, A. (2012). Opportunities and Challenges for a Sustainable Energy Future. **Nature**. Vol. 488, Issue 7411, pp. 294-303. DOI: 10.1038/nature11475

[2] IAEA, International Atomic Energy Agency. (2018). **Nuclear Technology Review**. Vienna, Austria

[3] The Intergovernmental Panel on Climate Change. (2001). **Future Work Program of the IPCC**. Geneva, Switzerland

[4] A Course of Lectures Nuclear Energy Delivered by Specialists of the National Atomic Energy Generating Company Energy Atom. (2019). **The Odessa National Polytechnic University**. Odessa, Ukraine

[5] Was, G. S. (2007). **Fundamentals of Radiation Materials Science: Metals and Alloys**. Springer, Berlin

[6] Voyevodin, V. N. and Neklyudov, I. M. (2006). **Evolution of the Structure-Phase State and Radiation Resistance of Structural Materials**. Kiev, Naukova Dumka (in Russian)

[7] Bolt, H., Barabash, V., Krauss, W., Linke, J., Neu, R., Suzuki, S., Yoshida, N., and ASDEX Upgrade Team. (2004). Materials for the Plasma-Facing Components of Fusion Reactors. **Journal of Nuclear Materials**. Vol. 329-333, Part A, pp. 66-73. DOI: 10.1016/j. jnucmat.2004.04.005

[8] Rieth, M., Doerner, R., Hasegawa, A., Ueda, Y., and Wirtz, M. (2019). Behavior of Tungsten Under Irradiation and Plasma Interaction. **Journal of Nuclear Materials**. Vol. 519, pp. 334-368. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2019.03.035

[9] Neu, R., Riesch, J., Coenen, J. W., Brinkmann, J., Calvo, A., Elgeti, S., García-Rosales, C., Greuner, H., Hoeschen, T., Holzner, G., Klein, F., Koch, F., Linsmeier, C., Litnovsky, A., Wegener, T., Wurster, S., and You, F. H. (2016). Advanced Tungsten Materials for Plasma-Facing Components of DEMO and Fusion Power Plants. **Fusion Engineering and Design**. Vol. 109-111, Part A, pp. 1046-1053. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2016.01.027

ISSN 2672-9369 (Online)

[10] Pamela, J., Bécoulet, A., Borba, D., Boutard, J., Horton, L., and Maisonnier, D. (2009). Efficiency and Availability Driven R&D Issues for DEMO. **Fusion Engineering and Design**. Vol. 84, Issues 2-6, pp. 194-204. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2009.02.028

[11] Maisonnier, D., Campbell, D., Cook, I., Di Pace, L., Giancarli, L., Hayward, J., Li Puma, A., Medrano, M., Norajitra, P., Roccella, M., Sardain, P., Tran, M. Q., and Ward, D. (2007). Power Plant Conceptual Studies in Europe. **Nuclear Fusion**. Vol. 47, Issue 11, pp. 1524-1532. DOI: 10.1088/0029-5515/47/11/014

[12] Norajitra, P., Abdel-Khalik, S. I., Giancarli, L. M., Ihli, T., Janeschitz, G., Malang, S., Mazul, I. V., and Sardain, P. (2008). Divertor Conceptual Designs for a Fusion Power Plant. **Fusion Engineering and Design**. Vol. 83, Issues 7-9, pp. 893-902. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2008.05.022

[13] Janeschitz, G. (2001). Plasma-Wall Interaction Issues in ITER. **Journal of Nuclear Materials**. Vol. 290-293, pp. 1-11. DOI: 10.1016/S0022-3115(00)00623-1

[14] Bolt, H., Barabash, V., Federici, G., Linke, J., Loarte, A., Roth, J., and Sato, K. (2002). Plasma Facing and High Heat Flux Materials - Needs for ITER and Beyond. **Journal of Nuclear Materials**. Vol. 307-311, Part 1, pp. 43-52. DOI: 10.1016/S0022-3115(02)01175-3

[15] Wittlich, K., Hirai, T., Compan, J., Klimov, N., Linke, J., Loarte, A., Merola, M., Pintsuk, G., Podkovyrov, V., Singheiser, L., and Zhitlukhin, A. (2009). Damage Structure in Divertor Armor Materials Exposed to Multiple ITER Relevant ELM Loads. **Fusion Engineering and Design**. Vol. 84, Issues 7-11, pp. 1982-1986. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2008.11.049

[16] Hirai, T., Pintsuk, G., Linke, J., and Batilliot, M. (2009). Cracking Failure Study of ITER-Reference Tungsten Grade Under Single Pulse Thermal Shock Loads at Elevated Temperatures. **Journal of Nuclear Materials**. Vol. 390-391, pp. 751-754. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2009.01.313

[17] Roth, J., Tsitrone, E., Loarte, A., Loarer, T., Counsell, G., Neu, R., Philipps, V., Brezinsek, S., Lehnen, M., Coad, P., Grisolia, C., Schmid, K., Krieger, K., Kallenbach, A., Lipschultz, B., Doerner, R., Causey, R., Alimov, V., Shu, W., Ogorodnikova, O., Kirschner, A., Federici, G., Kukushkin, A., and EFDA PW1 Task Force, ITER PWI Team, Fusion for Energy, 1TPA SOL/D1V. (2009). Recent Analysis of Key Plasma Wall Interactions issues for ITER. **Journal of Nuclear Materials**. Vol. 390-391, pp. 1-9. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2009.01.037

[18] Rieth, M., Boutard, J. L., Dudarev, S. L., Ahlgren, T., Antusch, S., Baluc, N., Barthe, M. F., Becquart, C. S., Ciupinski, L., Correia, J. B., Domain, C., Fikar, J., Fortuna, E., Fu, C. C., Gaganidze, E., Galán, T. L., García-Rosales, C., Gludovatz, B., Greuner, H., Heinola, K., Holstein, N., Juslin, N., Koch, F., Krauss, W., Kurzydlowski, K. J., Linke, J., Linsmeier, C., Luzginova, N., Maier, H., Martinez, M. S., Missiaen, J. M., Muhammed, M., Muñoz, A., Muzyk, M., Nordlund, K., Nguyen-Mann, D., Norajitra, P., Opschoor, J., Pintsuk, G., Pippan, R., Ritz, G., Romaner, L., Rupp, D., Scháublin, R., Schlosser, J., Uytdenhouwen, I., Van der Laan, J. G., Veleva, L., Ventelon, L., Wahlberg, S., Willaime, F., Wurster, S., and Yar, M. A. (2011). Review on the EFDA Programme on Tungsten Materials Technology and Science. **Journal of Nuclear Materials**. Vol. 417, Issues 1-3, pp. 463-467. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2011.01.075

[19] Causey, R. A. (2002). Hydrogen Isotope Retention and Recycling in Fusion Reactor Plasma-Facing Components. **Journal of Nuclear Materials**. Vol. 300, Issues 2-3, pp. 91-117. DOI: 10.1016/S0022-3115(01)00732-2

[20] Moak, C. D. (1953). A Study of the H^3 + He^3 Reactions. **Physical Review Journal Archive**. Vol. 92, Issue 2, p. 383. DOI: 10.1103/PhysRev.92.383

[21] Kühn, B. and Schlenk, B. (1963). Winkelverteilungen für die reaction He^3 + T. **Nuclear Physics**. Vol. 48, pp. 353-360. DOI: 10.1016/0029-5582(63)90174-3

[22] Nocken, U., Quast, U., Richter, A., and Schrieder, G. (1973). The Reaction $^3H(^3He, d)^4He$ at very low energies: energy dependent violations of the Barshay-Temmerisospin theorem and highly excited states in ^6Li. **Nuclear Physics A**. Vol. 213, Issue 1, pp. 97-106. DOI: 10.1016/0375-9474(73)90184-X

[23] Sriwongsa, K., Glumglomchit, P., Limkiatcherdchoo, R., Kinchokawat, A., Tantiwatcharakultorn, I., Ravangvong, S., and Khobkham, C. (2021). Simulation of Gd_2O_3-TeO_2-B_2O_3 Glass System to Investigate the Ionizing Radiation Shielding Properties. **Rajamangala University of Technology Krungthep**. Vol. 15, Issue 12, pp. 70-83. (in Thai)

[24] Sriwongsa, K., Glumglomchit, P., Wananuraksakul, T., Pimprakhon, A., Hanchana, T., and Ravangvong, S. (2020). Simulation of Shielding Parameters of Some High Entropy Alloys Containing Energies for Gamma Ray and Fast Neutron. **Research Journal Rajamangala University of Technology Thanyaburi**. Vol. 19, Issue 2, pp. 97-105. (in Thai)

[25] Ravangvong, S., Glumglomchit, P., Proprsserd, P., Keawkrid, T., Thiantanakorn, T., Khobkham, C., and Sriwongsa, K. (2022). The Study of Damage Caused by Proton and Alpha Particles on the Surface of Alloys Used as Structures in Nuclear Reactors. **RMUTI JOURNAL Science and Technology**. Vol. 15, No. 1, pp. 38-47

ISSN 2672-9369 (Online)

แผนการสุ่มตัวอย่างเพื่อการยอมรับแบบกลุ่มภายใต้การแจกแจงเพาว์เวอร์ลินเลย์และการประยุกต์กับข้อมูลช่วงชีวิต

Group Acceptance Sampling Plan Based on Power Lindley Distribution and Application for Lifetime Data

กนิษฐา ยิ้มนาค[1*] กรรณิการ์ ยิ้มนาค[2] และศุภณัฐ แก้วอำไพ[3]

Kanittha Yimnak[1*] Kannika Yimnak[2] and Supanut Kaewumpai[3]

Received: *May 25, 2022;* ***Revised:*** *July 11, 2022;* ***Accepted:*** *July 12, 2022*

บทคัดย่อ

ในบทความวิจัยนี้นำเสนอแผนการสุ่มตัวอย่างเพื่อการยอมรับแบบกลุ่ม (GASP) สำหรับข้อมูลอายุการใช้งานของสินค้าหรือผลิตภัณฑ์ เมื่อกำหนดให้อายุการใช้งานมีการแจกแจงเพาเวอร์ลินเลย์ (PLD) โดยจะนำเสนอจำนวนกลุ่มที่น้อยที่สุด ฟังก์ชันลักษณะเฉพาะดำเนินการ ค่าอัตราส่วน μ/μ_0 ที่มีค่าน้อยที่สุดเมื่อกำหนดค่าความเสี่ยงของผู้ผลิต $\alpha = 0.05$ ภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ สำหรับแผนการสุ่มตัวอย่างที่พัฒนาขึ้น การประยุกต์กับข้อมูลจริง ผลการศึกษาพบว่า แผนการสุ่มตัวอย่างที่พัฒนาขึ้นมานั้นมีประสิทธิภาพในการตัดสินใจที่จะยอมรับหรือปฏิเสธลอทสินค้า นอกจากนี้แผนการสุ่มตัวอย่างเพื่อการยอมรับแบบกลุ่มที่นำเสนอนี้ให้จำนวนกลุ่มสำหรับการทดสอบค่อนข้างน้อยกว่า เมื่อค่าคงที่ a มีค่ามากขึ้น

คำสำคัญ : แผนการสุ่มตัวอย่างเพื่อการยอมรับแบบกลุ่ม; การแจกแจงเพาเวอร์ลินเลย์; ความเสี่ยงของผู้ผลิต

[1] *คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี*
[2] *สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช*
[3] *คณะบริหารธุรกิจและเศรษฐศาสตร์ มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญ*
[1] *Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology Thanyaburi*
[2] *School of Science and Technology, Sukhothai Thammathirat Open University*
[3] *Matin de Tours School of Management and Economics, Assumption University*
[*] *Corresponding Author, Tel. 0 2549 4137-8, E - mail: kanittha_y@rmutt.ac.th*

Abstract

A group acceptance sampling plan (GASP) for product lifetime data based on power Lindley distribution (PLD) was proposed along with the minimum group sizes, operating characteristic function values, the minimum ratios μ/μ_0 for the producer's risk α = 0.05 under different conditions. In addition, the proposed GASP was applied to an actual data. The results showed that the proposed GASP could efficiently determine whether to accept or reject the product. In addition, the presented group acceptance sampling plan provided a minimum sample size for testing the product quality with a higher specified number or the greater a.

Keywords: Group Acceptance Sampling Plan; Power Lindley Distribution; Producer's Risk

บทนำ

กระบวนการตรวจสอบคุณภาพของสินค้าหรือผลิตภัณฑ์ เป็นสิ่งที่ทางผู้ผลิตและผู้บริโภคให้ความสำคัญที่จะตัดสินใจยอมรับหรือปฏิเสธสินค้า แผนการสุ่มตัวอย่างเพื่อการยอมรับ (Acceptance Sampling Plan) เป็นวิธีการกำหนดขนาดตัวอย่างขั้นต่ำสำหรับการทดสอบสินค้า หลาย ๆ โรงงานผลิตมักนิยมใช้แผนการสุ่มตัวอย่างเชิงเดียว (Single Acceptance Sampling Plan) เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายต่อการปฏิบัติโดยแผนการสุ่มตัวอย่างเพื่อการยอมรับแบบเชิงเดียว เป็นการตรวจสอบคุณภาพของสินค้าหรือผลิตภัณฑ์รายการเดียว ในขณะที่ในแผนการสุ่มตัวอย่างเพื่อการยอมรับแบบกลุ่ม (Group Acceptance Sampling Plan: GASP) เป็นการตรวจสอบรายการสินค้า หลายรายการตามจำนวนที่ผู้ทดสอบสามารถทดสอบได้ สิ่งนี้สะท้อนให้เห็นว่า GASP มีข้อได้เปรียบแผนการสุ่มตัวอย่างทั่วไป เนื่องจากสามารถลดเวลาและค่าใช้จ่ายในการทดสอบได้อย่างมาก สิ่งสำคัญที่ทำให้แผนการสุ่มตัวอย่างเพื่อการยอมรับ มีประสิทธิภาพมากขึ้นคือ การกำหนดการแจกแจงข้อมูลอายุการใช้งานของสินค้าให้สอดคล้องกับข้อมูลจริง ซึ่งได้เคยมีนักวิจัยหลาย ๆ ท่านได้นำเสนอการพัฒนาแผนการสุ่มตัวอย่างเพื่อการยอมรับดังกล่าวภายใต้การแจกแจงแบบต่าง ๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับแผนการสุ่มตัวอย่าง เช่น Srinivasa, R. G. [1] นำเสนอแผนการสุ่มตัวอย่างแบบกลุ่มโดยใช้การแจกแจงเลขชี้กำลังนัยทั่วไป (Generalized Exponential Distribution) และ Aslam, M., Ahmad, M., and Mughal, A. R. [2] นำเสนอแผนการสุ่มตัวอย่างแบบกลุ่มโดยใช้การแจกแจงเพลโตนัยทั่วไป (Generalized Pareto Distribution) เป็นต้น ซึ่งการแจกแจงดังกล่าวช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้กับแผนการสุ่มตัวอย่างเพื่อการยอมรับหรือปฏิเสธลอทสินค้า

สำหรับการแจกแจงลินเลย์ซึ่งนำเสนอโดย Lindley, D. V. [3] เป็นการแจกแจงที่นิยมนำมาอธิบายการแจกแจงของอายุการใช้งานของสินค้าหรือผลิตภัณฑ์เนื่องจากตัวแบบไม่ซับซ้อนและเป็นที่นิยมในการอธิบายข้อมูลช่วงชีวิต (Lifetime Data) ซึ่งต่อมา Shanker, R. and Mishra, A. [4] - [5] ได้พัฒนาการแจกแจงลินเลย์สองพารามิเตอร์ และการแจกแจงเสมือนลินเลย์สองพารามิเตอร์ (Two-Parameter Quasi Lindley Distribution) โดยมีการเพิ่มพารามิเตอร์บ่งขนาด θ (Scale Parameter) และพารามิเตอร์บ่งรูปร่าง α (Shape Parameter) ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น (Probability Density Function: PDF) และฟังก์ชันการแจกแจงสะสม (Cumulative Distribution Function: CDF) ของการแจกแจงลินเลย์สองพารามิเตอร์ดังสมการที่ (1) และ (2)

$$f(x;\alpha,\theta)=\frac{\theta^2}{\theta+\alpha}(1+\alpha x)e^{-\theta x} \tag{1}$$

ISSN 2672-9369 (Online)

$$F(x;\alpha,\theta)=1-\frac{\theta+\alpha+\alpha\,\theta\,x}{\theta+\alpha}\,e^{-\theta\,x} \tag{2}$$

ถัดมา Ghitany, M. E., Al-Mutairi, D. K., Balakrishnan, N., and Al-Enezi, L. J. [6] ได้นำเสนอการแปลงการแจกแจงลินเลย์ในรูปแบบเลขยกกำลัง $X=T^{\frac{1}{\beta}}$ โดยใช้ชื่อใหม่ว่าการแจกแจงเพาว์เวอร์ลินเลย์ (Power Lindley Distribution: PLD) การแปลงในรูปดังกล่าวทำให้การแจกแจงที่พัฒนาขึ้นมีความสอดคล้องและใกล้เคียงกับข้อมูลอายุการใช้งานที่เป็นข้อมูลจริงมากยิ่งขึ้น อีกทั้ง PLD เมื่อมีการปรับค่าพารามิเตอร์เป็นค่าต่าง ๆ จะทำให้การแจกแจงดังกล่าวสามารถมีรูปร่างได้หลายแบบ PDF และ CDF ของการแจกแจงดังกล่าวดังสมการที่ (3) และ (4)

ในงานวิจัยครั้งนี้จึงนำเสนอแผนการสุ่มตัวอย่างเพื่อการยอมรับแบบกลุ่ม เมื่อกำหนดให้อายุการใช้งานของสินค้าหรือผลิตภัณฑ์มีการแจกแจงเพาว์เวอร์ลินเลย์และทำการศึกษาภายใต้การทดสอบอายุการใช้งานที่มีการตัดปลาย (Truncated Life Test) โดยจะทำการศึกษาจำนวนกลุ่มน้อยที่สุด ค่าฟังก์ชันลักษณะเฉพาะดำเนินการ (Operating Characteristic Function) ค่า μ/μ_0 น้อยที่สุดสำหรับการยอมรับลอทสินค้า การประยุกต์กับข้อมูลจริงที่เป็นรถเข็นไฟฟ้าที่ใช้สำหรับการขนส่งสินค้าในโรงงาน พร้อมการอภิปรายผลที่ได้

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1. การแจกแจงเพาว์เวอร์ลินเลย์ (Power Lindley Distribution: PLD) และคุณสมบัติทางสถิติบางประการ

ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น (Probability Density Function: PDF) และฟังก์ชันการแจกแจงสะสม (Cumulative Distribution Function: CDF) ของการแจกแจงเพาว์เวอร์ลินเลย์ดังสมการที่ (3) และ (4) [6] - [8]

$$f(x;\theta,\beta)=\frac{\theta^2\beta\left(1+x^{\beta}\right)}{\theta+1}x^{\beta-1}e^{-\theta\,x^{\beta}} \qquad ;x>0,\theta,\beta>0 \tag{3}$$

$$F(x;\theta,\beta)=1-\left(1+\frac{\theta\,x^{\beta}}{\theta+1}\right)e^{-\theta\,x^{\beta}} \qquad ;x>0,\theta,\beta>0 \tag{4}$$

เมื่อ

θ คือ พารามิเตอร์บ่งขนาด (Scale Parameter)

β คือ พารามิเตอร์บ่งรูปร่าง (Shape Parameter)

ฟังก์ชันพิบัติ (Hazard Function: $H(x)$) ของ PLD คือฟังก์ชันที่แสดงค่าอัตราส่วนระหว่าง PDF และฟังก์ชันการรอดชีพ (Survival Function: $S(x)$) หรือ $\frac{f(x)}{S(x)}$ โดยที่ $S(x)=1-F(x)$ ดังสมการที่ (5)

$$H(x;\theta,\beta)=\frac{\theta^2\beta\left(1+x^{\beta}\right)}{\left(\theta\,x^{\beta}+\theta+1\right)}x^{\beta-1} \qquad ;x>0,\theta,\beta>0 \tag{5}$$

โมเมนท์รอบที่ r ของการแจกแจงดังกล่าวเขียนแสดงดังสมการที่ (6)

$$M_r(x) = E(x^r) = \int_0^\infty x^r \left(\frac{\theta^2 \beta (1 + x^\beta)}{\theta + 1} x^{\beta - 1} e^{-\theta x^\beta} \right) dx \tag{6}$$

จากสมการที่ (6) ค่าเฉลี่ย (Mean) หรือ $E(x)$ ของ PLD ดังสมการที่ (7)

$$\mu = E(x) = \frac{\Gamma\left(\frac{1}{\beta}\right)[\beta(\theta + 1) + 1]}{\beta^2 (\theta + 1) \theta^{\frac{1}{\beta}}} \tag{7}$$

2. แผนการสุ่มตัวอย่างเพื่อการยอมรับแบบกลุ่ม (Group Acceptance Sampling Plan: GASP) ภายใต้การทดสอบอายุการใช้งานตัดปลาย (Truncated Life Test) ของสินค้าหรือผลิตภัณฑ์ เมื่อกำหนดให้อายุการใช้งานของสินค้าหรือผลิตภัณฑ์มีการแจกแจงเพาว์เวอร์ลินเลย์

กำหนดให้ μ คือ ค่าเฉลี่ยของอายุการใช้งานที่แท้จริงของสินค้าหรือผลิตภัณฑ์ และ μ_0 คือ ค่าเฉลี่ยของอายุการใช้งานของสินค้าหรือผลิตภัณฑ์ที่คาดการณ์ไว้ ภายใต้ PLD GASP คือ แผนการสุ่มตัวอย่างเพื่อการยอมรับซึ่งจะพิจารณาทั้งค่าความเสี่ยงของผู้ผลิต (Procedure's Risk) และค่าความเสี่ยงของผู้บริโภค (Consumer's Risk) ซึ่งจะแทนด้วยสัญลักษณ์ α และ λ โดยที่ $\lambda = 1 - P$ เมื่อ P คือ ค่าความเชื่อมั่นของผู้บริโภค ซึ่งการทดสอบสมมติฐานงานวิจัยจะดำเนินการภายใต้สมมติฐาน $H_0 : \mu \geq \mu_0$ และ $H_1 : \mu < \mu_0$ หาก H_0 เป็นจริง แสดงว่าลอทสินค้าหรือผลิตภัณฑ์นั้นดีและพร้อมส่งต่อให้แก่ผู้บริโภคหรือส่งต่อไปยังแผนกอื่น แต่หาก H_1 เป็นจริง แสดงว่าลอทสินค้าหรือผลิตภัณฑ์นั้นอาจไม่ได้คุณภาพไม่พร้อมส่งต่อ ซึ่ง GASP ดำเนินการทดสอบภายใต้การทดสอบอายุการใช้งานตัดปลาย (Truncated Life Test) ซึ่งการยอมรับลอทสินค้า จะยอมรับลอทสินค้าเมื่อสินค้านั้นเป็นสินค้าที่ดี กล่าวคือ มีจำนวนสินค้าที่ชำรุดหรือเสื่อมสภาพก่อนเวลาที่กำหนดไม่เกินเกณฑ์ที่กำหนดไว้ สิ่งที่ต้องพิจารณาในการวิเคราะห์ GASP คือความเสี่ยงของผู้ผลิตหรือโอกาสที่ลอทสินค้าดีจะถูกปฏิเสธ (Type I error หรือ α) และความเสี่ยงของผู้บริโภคหรือโอกาสที่จะยอมรับลอทสินค้าทั้ง ๆ ที่ลอทสินค้านั้นมีสินค้าไม่ได้มาตรฐานปะปนอยู่ (Type II error หรือ λ) ซึ่ง GASP สรุปเป็นขั้นตอนได้ดังนี้ [2]

ขั้นที่ 1 กำหนดจำนวนกลุ่มสินค้า g

ขั้นที่ 2 สุ่มสินค้าจำนวน gr รายการจากลอทสินค้า เมื่อ r คือ ขนาดกลุ่มสินค้า สำหรับการทดสอบอายุการใช้งาน ดังนั้น ขนาดตัวอย่าง (n) ของสินค้าที่จะนำมาทดสอบคือ $n = gr$ (ถ้า $r = 1$ แผนการสุ่มตัวอย่างดังกล่าวจะกลายเป็นแผนการสุ่มตัวอย่างเชิงเดียว)

ขั้นที่ 3 กำหนดให้ c คือ จำนวนสินค้าชำรุดหรือเสื่อมสภาพก่อนเวลาที่กำหนดที่ยอมรับได้สำหรับทุกกลุ่มภายใต้ขอบเขตระยะเวลาที่กำหนดไว้ (t_0)

ขั้นที่ 4 ดำเนินการทดสอบอายุการใช้งานของสินค้าแต่ละกลุ่ม หากจำนวนสินค้าที่ชำรุดหรือเสื่อมสภาพก่อนกำหนดมีจำนวนน้อยกว่าหรือเท่ากับ c ในทุก ๆ กลุ่มภายใต้ขอบเขตของระยะเวลาที่กำหนดไว้ (t_0) ก็จะยอมรับลอทสินค้า

กำหนดให้ p แทนความน่าจะเป็นความล้มเหลวหรือการชำรุด/การเสื่อมสภาพของสินค้า และให้ I แทนตัวแปรสุ่มของจำนวนสินค้าที่ชำรุด/เสื่อมสภาพ ค่าความน่าจะเป็นในการยอมรับลอทสินค้า $(L(p))$ ดังสมการที่ (8)

$$L(p) = P(I \leq c) = \sum_{i=0}^{c} P(I = i) \tag{8}$$

ISSN 2672-9369 (Online)

ความน่าจะเป็นในการยอมรับลอทสินค้าสำหรับ GASP แสดงดังสมการที่ (9)

$$L(p)=\left[\sum_{i=0}^{c}\binom{r}{i}p^{i}(1-p)^{r-i}\right]^{g} \tag{9}$$

เมื่อ $p = F(t)$ ซึ่งแสดงดังสมการที่ (10) เมื่อกำหนดให้รายการสินค้าในแต่ละกลุ่มที่ชำรุดหรือเสื่อมสภาพก่อนเวลาที่กำหนด (t_0) คือ $t_0 = \mathrm{a}\,\mu_0$ เมื่อ a คือ ค่าคงที่สัดส่วนของเวลา ดังนั้น $F(t)$ สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (10)

$$p=F(t)=1-\left(1+\frac{\theta U^{\beta}}{\theta+1}\right)e^{-\theta U^{\beta}} \tag{10}$$

เมื่อ $U=\left(\dfrac{\mathrm{a}}{\dfrac{\mu}{\mu_0}}\right)\left(\dfrac{\Gamma\left(\dfrac{1}{\beta}\right)\left[\beta(\theta+1)+1\right]}{\beta^{2}(\theta+1)\theta^{\frac{1}{\beta}}}\right)$

สำหรับการวิเคราะห์ GASP ใช้วิธีการลดขนาด (Minimize) ค่าความเสี่ยงของผู้ผลิตและผู้บริโภค (α,λ)

โดยกำหนดให้ p_1 คือ ความน่าจะเป็นของความล้มเหลว (Failure Probability) ที่สอดคล้องกับความเสี่ยงของผู้ผลิต $p_1=F_T\left(\dfrac{t_0}{\mu_0},k_1=\dfrac{\mu}{\mu_0}\right)$

p_2 คือ ความน่าจะเป็นของความล้มเหลว (Failure Probability) ที่สอดคล้องกับความเสี่ยงของผู้บริโภค $p_2=F_T\left(\dfrac{t_0}{\mu_0},k_2=1\right)$

การคำนวณ GASP ดำเนินการภายใต้อสมการที่ (11) และ (12)

$$L(p_1)=\left[\sum_{i=0}^{c}\binom{r}{i}p_1^{i}(1-p_1)^{r-i}\right]^{g}\geq 1-\alpha \tag{11}$$

$$L(p_2)=\left[\sum_{i=0}^{c}\binom{r}{i}p_2^{i}(1-p_2)^{r-i}\right]^{g}\leq \lambda \tag{12}$$

โดยขนาดกลุ่มน้อยที่สุดสำหรับ GASP คำนวณได้จากอสมการที่ (12) ค่าอัตราส่วน μ/μ_0 น้อยที่สุด คำนวณได้ดังอสมการที่ (11) และค่าความน่าจะเป็นในการยอมรับลอทสินค้าหรือที่เรียกว่า ฟังก์ชันลักษณะเฉพาะดำเนินการ (OCF) คำนวณได้ดังสมการที่ (13)

$$OC(p_2)=P\left(Acceplaning\ \ a\ \ lot\,\middle|\,\mu<\mu_0\right)=\left[\sum_{i=0}^{c}\binom{r}{i}p_2^{i}(1-p_2)^{r-i}\right]^{g} \tag{13}$$

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

สำหรับผลการวิจัยจะนำเสนอ จำนวนกลุ่มน้อยที่สุด (g) ค่า OCF และค่าอัตราส่วน μ/μ_0 ที่น้อยที่สุด เมื่อกำหนดค่าความเสี่ยงของผู้ผลิตเป็น (α) มีค่าเท่ากับ 0.05 และกำหนดให้อายุการใช้งานของสินค้าหรือผลิตภัณฑ์มีการแจกแจงเพาว์เวอร์ลินเลย์ที่มีพารามิเตอร์ $\theta = 3$ และ $\beta = 1$ ผลการวิเคราะห์ข้อมูลดังตารางที่ 1 - 3 สำหรับตารางที่ 1 นำเสนอ GASP โดยกำหนดให้ค่าคงที่สัดส่วนของเวลาเป็นจำนวนจริงบวก a = 0.7 0.8 1.0 1.2 1.5 และ 2.0 [2] กำหนดให้ความเสี่ยงของผู้ซื้อหรือผู้บริโภคเป็น $\lambda = 1 - P$ โดยกำหนดค่าของ λ อ้างอิงตาม [1] และ [2] ดังนี้ λ = 0.25 0.10 0.05 และ 0.01 จากตารางที่ 1 อธิบายได้ว่าจำนวนของกลุ่มน้อยที่สุด (g) สำหรับแผนการสุ่มตัวอย่างที่นำเสนอจะลดลงเมื่อ ค่าคงที่ a เพิ่มขึ้น แต่หากมีการเพิ่มขนาดกลุ่มสินค้าสำหรับการทดสอบ (r) และจำนวนสินค้าชำรุดหรือเสื่อมสภาพก่อนเวลาที่กำหนดที่ยอมรับได้ (c) สำหรับทุกกลุ่มภายใต้ระยะเวลาที่กำหนด (t_0) ก็จะต้องมีการใช้จำนวนกลุ่มน้อยที่สุด (g) เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 2 แสดงค่า OCF ของ GASP เมื่อกำหนด $\theta = 3$ และ $\beta = 1$ และแสดงผลการคำนวณเฉพาะ กรณี $r = 4$ และ $c = 2$ โดยอ้างอิงผลจากตารางที่ 1 ซึ่งเห็นได้ว่าค่า OCF เพิ่มขึ้นและมีค่าเข้าใกล้ 1 เมื่ออัตราส่วน μ/μ_0 เพิ่มขึ้น แต่จะมีค่าลดลงเมื่อ a เพิ่มขึ้น ตารางที่ 3 แสดงค่าอัตราส่วนต่ำที่สุดของค่าเฉลี่ยอายุการใช้งานของสินค้าหรือผลิตภัณฑ์ที่แท้จริงต่อค่าเฉลี่ยอายุการใช้งานของสินค้าหรือผลิตภัณฑ์ที่คาดการณ์ (μ/μ_0) จากตารางที่ 3 แสดงเห็นว่า μ/μ_0 มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ a เพิ่มขึ้น และมีค่าลดลงเมื่อค่า r และ c เพิ่มขึ้น

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากตารางที่ 1 - 3 สอดคล้องกับงานวิจัยของ Srinivasa, R. G. [1] ที่นำเสนอแผนการสุ่มตัวอย่างแบบกลุ่มบนพื้นฐานการแจกแจงเลขชี้กำลังทั่วไป และ Aslam, M., Ahmad, M., and Mughal, A. R. [2] ที่มีการนำเสนอแผนการสุ่มตัวอย่างแบบกลุ่มโดยใช้การแจกแจงเพลโตในรูปทั่วไปซึ่งมีรูปแบบการนำเสนอ และผลการวิเคราะห์ข้อมูลในรูปแบบใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตาม แผนการสุ่มตัวอย่าง GASP ภายใต้ PLD จะให้จำนวนกลุ่มสำหรับการทดสอบค่อนข้างน้อยกว่า [1] และ [2] เมื่อ a มากขึ้น

การประยุกต์กับข้อมูลจริง

GASP แผนการสุ่มตัวอย่างที่พัฒนานี้นำมาประยุกต์กับข้อมูลจริงซึ่งเป็นข้อมูลอายุการใช้งาน (หน่วย:เดือน) ของรถเข็นไฟฟ้าที่ใช้สำหรับการขนส่งสินค้าในโรงงานขนาดใหญ่ จำนวน 20 คัน รายละเอียดของข้อมูลดังนี้ 0.9 1.5 2.3 3.2 3.9 5 6.2 7.5 8.3 10.4 11.1 12.6 15 16.3 19.3 22.6 24.8 31.538.1 53 (ข้อมูลอ้างอิงมาจาก [9] - [11]) เมื่อกำหนดให้ข้อมูลอายุการใช้งานดังกล่าวมีการแจกแจง PLD ซึ่งการคำนวณค่าพารามิเตอร์ θ และ β และการตรวจสอบความเหมาะสมของตัวแบบดำเนินการดังนี้

1. **การประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีภาวะน่าจะเป็นสูงสุด (Maximum Likelihood Estimation)**
   ฟังก์ชันภาวะน่าจะเป็น (Likelihood Function) ของ PLD ดังสมการที่ (14)

$$L\left(t\middle|\theta,\beta\right) = \prod_{i=1}^{n}\left[\frac{\theta^2\beta\left(1+t^{\beta}\right)}{\theta+1}t^{\beta-1}e^{-\theta t^{\beta}}\right], \tag{14}$$

เมื่อกำหนดให้ $x_1, x_2, ..., x_n$ เป็นค่าสังเกตตัวอย่างสุ่มขนาด n จาก PLD ฟังก์ชันล็อกภาวะน่าจะเป็น (Log-Likelihood Function: Log(L) หรือ LL) แสดงดังสมการที่ (12)

$$LL\left(t\middle|\theta,\beta\right) = n\log\left(\frac{\theta^2\beta}{\theta+1}\right) + \sum_{i=1}^{n}\log\left(1+t_i^{\beta}\right) + \left(\beta-1\right)\sum_{i=1}^{n}\log\left(t_i\right) - \theta\sum_{i=1}^{n}t_i^{\beta} \tag{15}$$

ISSN 2672-9369 (Online)

ค่าประมาณพารามิเตอร์ θ และ β คำนวณได้จาก $\frac{\partial LL}{\partial \theta}=0$ และ $\frac{\partial LL}{\partial \beta}=0$ การหาคำตอบของสมการดังกล่าวโดยใช้ระเบียบวิธีนิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson) [12]

2. การทดสอบความเหมาะสมของตัวแบบ

ในงานวิจัยในครั้งนี้ จะใช้เกณฑ์ข้อสนเทศของอาไคเคะ (Akaike Information Criterion: AIC) และการทดสอบโคลโมโกรอฟ-สไมร์นอฟ (Kolmogorov-Smirnov: KS) ในการทดสอบประสิทธิภาพการประมาณค่าพารามิเตอร์ของ PLD สูตรการคำนวณดังสมการที่ (16) และ (17)

$$AIC=-2\log(L)+2p \tag{16}$$

$$KS=\sup_{x}\left|F_n(x)-F_0(x)\right| \tag{17}$$

เมื่อ

$F_n(x)$ คือ ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของตัวอย่าง

$F_0(x)$ คือ ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของประชากรที่คาดไว้

n คือ จำนวนตัวอย่าง

p คือ จำนวนพารามิเตอร์

ผลการประมาณค่าพารามิเตอร์ การตรวจสอบประสิทธิภาพของการแจกแจงดังตารางที่ 4 ซึ่งจากตารางที่ 4 พบว่าข้อมูลอายุการใช้งานของรถเข็นไฟฟ้าที่ใช้สำหรับการขนส่งสินค้ามีการแจกแจงสอดคล้องกับ PLD เนื่องจากมีค่าสถิติทดสอบ KS = 0.0553 และ P-value > 0.05

ตารางที่ 1 จำนวนกลุ่มน้อยที่สุด (g) สำหรับ GASP เมื่อกำหนดให้อายุการใช้งานของสินค้ามีการแจกแจงแบบ PLD ด้วยค่า $\theta=3$ และ $\beta=1$ และกำหนดค่า λ r และ c ที่แตกต่างกัน

λ	r	c	a					
			0.7	0.8	1	1.2	1.5	2
0.25	2	0	2	2	1	1	1	1
	3	1	5	3	2	1	1	1
	4	2	9	5	2	1	1	1
	5	3	20	10	3	2	1	1
	6	4	45	18	5	2	1	1
	7	5	105	34	7	3	1	1
0.10	2	0	3	2	2	1	1	1
	3	1	7	4	3	2	1	1
	4	2	15	8	4	2	1	1
	5	3	33	15	5	3	1	1
	6	4	75	29	8	3	2	1
	7	5	174	56	11	4	2	1

ตารางที่ 1 จำนวนกลุ่มน้อยที่สุด (g) สำหรับ GASP เมื่อกำหนดให้อายุการใช้งานของสินค้ามีการแจกแจงแบบ PLD ด้วยค่า $\theta = 3$ และ $\beta = 1$ และกำหนดค่า λ r และ c ที่แตกต่างกัน (ต่อ)

λ	r	c	a					
			0.7	0.8	1	1.2	1.5	2
0.05	2	0	4	3	2	2	1	1
	3	1	8	6	3	2	1	1
	4	2	19	11	5	3	2	1
	5	3	42	20	7	3	2	1
	6	4	97	38	10	4	2	1
	7	5	226	73	15	5	2	1
0.01	2	0	5	4	3	2	2	1
	3	1	13	8	5	3	2	1
	4	2	29	16	7	4	2	1
	5	3	65	30	10	5	2	1
	6	4	149	58	15	6	3	1
	7	5	347	112	22	8	3	1

ตารางที่ 2 ค่า OCF สำหรับ GASP เมื่อกำหนดให้อายุการใช้งานของสินค้ามีการแจกแจงแบบ PLD ด้วยค่า $\theta = 3$ และ $\beta = 1$ ($r = 4, c = 2$) และกำหนดค่า λ g a และ μ / μ_0 ที่แตกต่างกัน

λ	g	a	μ / μ_0					
			2	4	6	8	10	12
0.25	9	0.7	0.9579	0.9992	0.9999	1.0000	1.0000	1.0000
	5	0.8	0.9515	0.9990	0.9999	1.0000	1.0000	1.0000
	2	1	0.9376	0.9986	0.9999	1.0000	1.0000	1.0000
	1	1.2	0.9232	0.9980	0.9998	1.0000	1.0000	1.0000
	1	1.5	0.7995	0.9930	0.9993	0.9999	1.0000	1.0000
	1	2	0.4830	0.9683	0.9964	0.9993	0.9998	0.9999
0.10	15	0.7	0.9307	0.9987	0.9999	1.0000	1.0000	1.0000
	8	0.8	0.9236	0.9984	0.9999	1.0000	1.0000	1.0000
	4	1	0.8790	0.9972	0.9997	1.0000	1.0000	1.0000
	2	1.2	0.8523	0.9960	0.9996	0.9999	1.0000	1.0000
	1	1.5	0.7995	0.9930	0.9993	0.9999	1.0000	1.0000
	1	2	0.4830	0.9683	0.9964	0.9993	0.9998	0.9999
0.05	19	0.7	0.9131	0.9983	0.9998	1.0000	1.0000	1.0000
	11	0.8	0.8964	0.9979	0.9998	1.0000	1.0000	1.0000
	5	1	0.8511	0.9964	0.9997	0.9999	1.0000	1.0000
	3	1.2	0.7869	0.9940	0.9994	0.9999	1.0000	1.0000
	2	1.5	0.6392	0.9861	0.9986	0.9997	0.9999	1.0000
	1	2	0.4830	0.9683	0.9964	0.9993	0.9998	0.9999

ISSN 2672-9369 (Online)

ตารางที่ 2 ค่า OCF สำหรับ GASP เมื่อกำหนดให้อายุการใช้งานของสินค้ามีการแจกแจงแบบ PLD ด้วยค่า $\theta = 3$ และ $\beta = 1$ ($r = 4, c = 2$) และกำหนดค่า λ g a และ μ / μ_0 ที่แตกต่างกัน (ต่อ)

λ	g	a	μ / μ_0					
			2	4	6	8	10	12
0.01	29	0.7	0.8704	0.9974	0.9998	1.0000	1.0000	1.0000
	16	0.8	0.8530	0.9969	0.9997	0.9999	1.0000	1.0000
	7	1	0.7980	0.9950	0.9995	0.9999	1.0000	1.0000
	4	1.2	0.7264	0.9920	0.9992	0.9999	1.0000	1.0000
	2	1.5	0.6392	0.9861	0.9986	0.9997	0.9999	1.0000
	1	2	0.4830	0.9683	0.9964	0.9993	0.9998	0.9999

ตารางที่ 3 ค่า μ / μ_0 น้อยที่สุด สำหรับ GASP เมื่อกำหนดให้อายุการใช้งานของสินค้ามีการแจกแจงแบบ PLD ด้วยค่า $\theta = 3$ และ $\beta = 1$ และกำหนดค่าความเสี่ยงของผู้ผลิต $\alpha = 0.05$

λ	r	c	a					
			0.7	0.8	1	1.2	1.5	2
0.25	2	0	5.9874	6.8427	6.0503	7.2604	9.0755	12.1006
	3	1	2.7406	2.7390	3.0742	3.0586	3.8232	5.0976
	4	2	1.9377	1.9884	2.0908	2.1892	2.7366	3.6487
	5	3	1.6559	1.7156	1.7960	2.0249	2.2659	3.0212
	6	4	1.5005	1.5422	1.6501	1.7591	1.9992	2.6656
	7	5	1.4056	1.4381	1.5256	1.6661	1.8254	2.4339
0.10	2	0	7.3322	6.8427	8.5534	7.2604	9.0755	12.1006
	3	1	2.9914	2.9545	3.4238	3.6890	3.8232	5.0976
	4	2	2.1245	2.1676	2.3845	2.5089	2.7366	3.6487
	5	3	1.7750	1.8175	1.9389	2.1552	2.2659	3.0212
	6	4	1.5899	1.6305	1.7490	1.8554	2.1989	2.6656
	7	5	1.4752	1.5111	1.6010	1.7213	1.9867	2.4339
0.05	2	0	8.4659	8.3796	8.5534	10.2641	9.0755	12.1006
	3	1	3.0967	3.2845	3.4238	3.6890	3.8232	5.0976
	4	2	2.2160	2.2964	2.4855	2.7108	3.1361	3.6487
	5	3	1.8348	1.8924	2.0369	2.1552	2.5312	3.0212
	6	4	1.6363	1.6820	1.7971	1.9252	2.1989	2.6656
	7	5	1.5122	1.5508	1.6538	1.7646	1.9867	2.4339
0.01	2	0	9.4649	9.6754	10.4745	10.2641	12.8301	12.1006
	3	1	3.5096	3.5391	3.9152	4.1085	4.6113	5.0976
	4	2	2.3883	2.4562	2.6442	2.8613	3.1361	3.6487
	5	3	1.9472	2.0021	2.1445	2.3266	2.5312	3.0212
	6	4	1.7162	1.7651	1.8866	2.0257	2.3192	2.6656
	7	5	1.5744	1.6165	1.7203	1.8572	2.0827	2.4339

ตารางที่ 4 การประมาณค่าพารามิเตอร์ ค่า AIC และการทดสอบ KS ของข้อมูลจริง

พารามิเตอร์	ค่าประมาณพารามิเตอร์	KS (P-value)	AIC
θ	0.2083	0.0553	151.34
β	0.8288	(0.9999994)	

ตารางที่ 5 จำนวนกลุ่มน้อยที่สุด (g) และค่า μ/μ_0 เมื่อกำหนดให้อายุการใช้งานของสินค้ามีการแจกแจงแบบ PLD $\lambda = 0.25$ และค่า a r c ที่แตกต่างกัน

r	c	จำนวนกลุ่มน้อยที่สุด g						ค่า μ/μ_0 น้อยที่สุดเมื่อ $\alpha = 0.05$					
		a						a					
		0.7	0.8	1	1.2	1.5	2	0.7	0.8	1	1.2	1.5	2
2	0	2	2	1	1	1	1	0.7786	0.8899	0.8386	1.0063	1.2579	1.6772
3	1	5	3	2	1	1	1	0.8348	0.8308	0.9239	0.8917	1.1146	1.4861
4	2	13	6	2	1	1	1	0.8817	0.8660	0.8422	0.8361	1.0452	1.3935

ตารางที่ 6 ค่า OCF สำหรับ GASP เมื่อกำหนดให้อายุการใช้งานของสินค้ามีการแจกแจงแบบ PLD $\lambda = 0.25$ (r = 4, c = 2) และค่า a g μ/μ_0 ที่แตกต่างกัน

a	g	μ/μ_0					
		2	4	6	8	10	12
0.7	13	0.9833	0.9998	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
0.8	6	0.9811	0.9998	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
1	2	0.9724	0.9997	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
1.2	1	0.9560	0.9995	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
1.5	1	0.8447	0.9979	0.9999	1.0000	1.0000	1.0000
2	1	0.4850	0.9861	0.9991	0.9999	1.0000	1.0000

ตารางที่ 5 แสดงจำนวนกลุ่มน้อยที่สุด (g) ค่า μ/μ_0 น้อยที่สุดเมื่อกำหนด $\alpha = 0.05$ และกำหนดให้อายุการใช้งานของสินค้ามีการแจกแจงแบบ PLD $\lambda = 0.25$ และค่า a r c ที่แตกต่างกัน ซึ่งจะเห็นได้ว่าจำนวนกลุ่มน้อยที่สุด แปรผันตามค่า r และ c แต่แปรผกผันกับค่า a ส่วนค่า μ/μ_0 น้อยที่สุด จะเพิ่มขึ้นเมื่อค่า a เพิ่มขึ้น แต่จะลดลงเมื่อค่า r และ c เพิ่มขึ้น ส่วนตารางที่ 6 แสดงค่า OCF สำหรับ GASP เมื่อกำหนดให้อายุการใช้งานของสินค้ามีการแจกแจงแบบ PLD $\lambda = 0.25$ ค่า a g และค่า μ/μ_0 แตกต่างกัน ซึ่งพบว่าค่า OCF มีค่าเข้าใกล้ 1 เมื่อค่า μ/μ_0 ที่น้อยที่สุดมีค่าเพิ่มขึ้น ตัวอย่างการตีความจากผลการวิเคราะห์ข้อมูลเมื่อพิจารณาจากตารางที่ 6 กล่าวคือเมื่อกำหนด $\mu/\mu_0 = 4$ $\lambda = 0.25$ a $= 0.8$ $\alpha = 0.05$ และ $(g, r, c) = (6, 4, 2)$ อธิบายได้ว่า หากค่าเฉลี่ยของอายุการใช้งานที่แท้จริงของสินค้า (μ) เท่ากับ 4,000 เดือน ค่าเฉลี่ยของอายุการใช้งานของสินค้าที่คาดการณ์ไว้ (μ_0) เท่ากับ 1,000 เดือนขอบเขตระยะเวลาที่กำหนด (t_0) เท่ากับ 800 เดือน จะต้องสุ่มสินค้ามาจำนวน 4 ชิ้นจากแต่ละกลุ่มหรือแต่ละเครื่องจักรผลิตจำนวน 6 กลุ่ม ลอทสินค้านั้น ๆ จะถูกปฏิเสธเมื่อจำนวนสินค้าที่ชำรุดหรือเสื่อมสภาพก่อนระยะเวลาที่กำหนด (t_0) มีจำนวนเกินกว่า 2 ชิ้น ภายใต้ขอบเขตของระยะเวลาที่กำหนด $t_0 = [1,800]$ (หน่วย:เดือน)

ISSN 2672-9369 (Online)

สรุปผลการวิจัย

บทความวิจัยนี้เป็นการออกแบบแผนการสุ่มตัวอย่างแบบกลุ่ม (GASP) โดยกำหนดให้การแจกแจงของอายุการใช้งานของสินค้าหรือผลิตภัณฑ์มีการแจกแจงเพาเวอร์ลินเลย์ (PLD) มีการนำเสนอจำนวนกลุ่มที่น้อยที่สุด *(g)* และค่าอัตราส่วน μ / μ_0 ที่มีค่าน้อยที่สุดสำหรับค่าความเสี่ยงของผู้ผลิต เมื่อขนาดกลุ่มสำหรับการทดสอบ *(r)* และจำนวนสินค้าที่ชำรุดหรือเสื่อมสภาพที่ยอมรับได้ *(c)* สำหรับทุกกลุ่มภายใต้ระยะเวลาที่กำหนด (t_0) ที่แตกต่างกัน โดยนำเสนอในรูปแบบตาราง นอกจากนี้ยังมีการนำเสนอค่า OCF เมื่อกำหนดค่า μ / μ_0 แตกต่างกัน ในกรณีที่ $r = 4$ และ $c = 2$ ตลอดจนมีการนำเสนอการประยุกต์ใช้กับข้อมูลจริง แผนการสุ่มตัวอย่างที่พัฒนาขึ้นมานั้นมีประสิทธิภาพในการตัดสินใจที่จะยอมรับหรือปฏิเสธลอทสินค้า

References

[1] Srinivasa, R. G. (2009). A Group Acceptance Sampling Plans for Lifetimes Following a Generalized Exponential Distribution. **Economic Quality Control**. Vol. 24, No. 1, pp. 75-85

[2] Aslam, M., Ahmad, M., and Mughal, A. R. (2010). Group Acceptance Sampling Plan for Lifetime Data Using Generalized Pareto Distribution. **Pakistan Journal of Commerce and Social Sciences**. Vol. 4, No. 2, pp. 185-193

[3] Lindley, D. V. (1958). Fiducial Distributions and Bayes' Theorem. **Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)**. Vol. 20, No. 1, pp. 102-107. DOI: 10.1111/j.2517-6161.1958.tb00278.x

[4] Shanker, R. and Mishra, A. (2013a). A Two Parameter Lindley Distribution. **Statistics in Transition New Series**.Vol. 14, No. 1, pp. 45-56

[5] Shanker, R. and Mishra, A. (2013b). A Quasi Lindley Distribution. **African Journal of Mathematics and Computer Science Research**. Vol. 6, No. 4, pp. 64-71. DOI: 10.5897/AJMCSR12.067

[6] Ghitany, M. E., Al-Mutairi, D. K., Balakrishnan, N., and Al-Enezi, L. J. (2013). Power Lindley Distribution and Associated Inference. **Computational Statistics & Data Analysis**. Vol. 64, pp. 20-33. DOI: 10.1016/j.csda.2013.02.026

[7] Khalleefah, M., Ostrovska, S., and Turan, M. (2019). Power Lindley Distribution and Software Metrics. **arXiv:1907.00668v1 [math.ST]**. DOI: 10.48550/arXiv.1907.00668

[8] Rather, A. A. and Ozel, G. (2020). The Weighted Power Lindley Distribution with Applications on the Life Time Data. **Pakistan Journal of Statistics and Operation Research**. Vol. 16, No. 2, pp. 225-237. DOI: 10.18187/pjsor.v16i2.2931

[9] Zimmer, W. J., Keats, J. B., and Wang, F. K. (1998).The Burr XII Distribution in Reliability Analysis. **Journal of Quality Technology**. Vol. 30, Issue 4, pp. 386-394. DOI: 10.1080/00224065.1998.11979874

[10] Gui, W. and Aslam, M. (2017). Acceptance Sampling Plans Based on Truncated Life Tests for Weighted Exponential Distribution. **Communications in Statistics - Simulation and Computation**. Vol. 46, Issue 3, pp. 2138-2151. DOI: 10.1080/03610918.2015.1037593

[11] Lio, Y. L., Tsai, T. -R., and Wu, S. -J. (2010). Acceptance Sampling Plans from Truncated Life Tests Based on the Burr Type XII Percentiles. **Journal of the Chinese Institute of Industrial Engineers**. Vol. 27, Issue 4, pp. 270-280. DOI:10.1080/10170661003791029

[12] Gupta, L. P., Gupta, R. C., and Lvin, S. J. (1998). Numerical Methods for the Maximum Likelihood Estimation of Weibull Parameters. **Journal of Statistical Computation and Simulation**. Vol. 62, Issue 1-2, pp. 1-7. DOI: 10.1080/00949659808811921

ISSN 2672-9369 (Online)

การคาดการณ์จำนวนพนักงานขับรถบรรทุกบนโครงข่ายถนนในระเบียงเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออกของประเทศไทย โดยใช้แบบจำลองการตัดสินใจแบบต่อเนื่อง 4 ขั้นตอน

Forecasting Number of Truck Drivers on Road Network in Eastern Economic Corridor of Thailand by Using 4-Steps Sequential Decision Models

อภิชาต บัวกล้า[1] ชัยวัฒน์ แสงศรีจันทร์[1] และเจษฎา โพธิ์จันทร์[2*]

Apichat Buakla[1] Chaiwat Sangsrichan[1] and Jessada Pochan[2*]

Received: *June 7, 2022;* ***Revised:*** *July 20, 2022;* ***Accepted:*** *July 20, 2022*

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอแนวทางการคาดการณ์จำนวนพนักงานขับรถบรรทุกบนโครงข่ายถนนในระเบียงเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออก (EEC) ของประเทศไทยจากแบบจำลองการคาดการณ์ปริมาณการขนส่งสินค้าที่ถูกพัฒนาขึ้นตามหลักวิชาการของวิศวกรรมจราจรและขนส่งโดยใช้แบบจำลองการตัดสินใจแบบต่อเนื่อง 4 ขั้นตอน โดยแบ่งวิธีดำเนินการออกเป็น 4 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ 1) การรวบรวมข้อมูลเพื่อการพัฒนาแบบจำลอง 2) การพัฒนาแบบจำลอง 3) การปรับเทียบแบบจำลอง และ 4) การประยุกต์ใช้แบบจำลอง โดยผลการศึกษาพบว่าผลการคาดการณ์การขนส่งสินค้าที่ได้จากแบบจำลองการตัดสินใจแบบต่อเนื่อง 4 ขั้นตอนในกรณีมีและไม่มีการพัฒนา EEC มีความแตกต่างกัน ในกรณีมีการพัฒนา EEC ปริมาณสินค้ารวมในทุกรูปแบบการขนส่ง (ทางถนน รถไฟ น้ำ อากาศ) จะอยู่ที่ประมาณ 3,217.43 พันตัน/วัน ในปี พ.ศ. 2594 ส่วนใหญ่เป็นการขนส่งทางถนนประมาณร้อยละ 97.98 และรูปแบบอื่น ๆ เพียงร้อยละ 2.02 เท่านั้น โดยรถบรรทุกขนาดเล็ก 4 ล้อ มีสัดส่วนมากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 63.58 รองลงมาคือ รถบรรทุกขนาดกลาง 6 ล้อ รถบรรทุกพ่วง รถบรรทุก 10 ล้อ และรถบรรทุกกึ่งพ่วง คิดเป็นร้อยละ 12.09 8.70 8.02 และ 7.61 ตามลำดับ นอกจากนี้จำนวนพนักงานขับรถบรรทุกจะมีเพิ่มขึ้นจาก 52,791 คน (พ.ศ. 2564) เป็น 74,153 คน ในปี พ.ศ. 2594 ซึ่งเพิ่มขึ้นจากกรณีไม่มีการพัฒนา EEC ประมาณ 2,227 คน

คำสำคัญ : การคาดการณ์จำนวนพนักงานขับรถบรรทุก; แบบจำลองการตัดสินใจแบบต่อเนื่อง 4 ขั้นตอน; ระเบียงเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออก

[1] *คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา*

[2] *คณะโลจิสติกส์และดิจิทัลซัพพลายเชน มหาวิทยาลัยนเรศวร*

[1] *School of Engineering, University of Phayao*

[2] *Faculty of Logistics and Digital Supply Chain, Naresuan University*

[*] *Corresponding Author, Tel. 08 7531 7788, E - mail: jessadapo@nu.ac.th*

Abstract

This article proposes an approach to forecasting the number of truck drivers on the road network in the Eastern Economic Corridor (EEC) of Thailand. The forecasting model of freight transportation was developed according to the academic principles of traffic and transportation engineering by 4-step sequential decision model. The method was divided into four steps: 1) collecting data for model development, 2) developing the model, 3) calibrating the model, and 4) applying the model. The results revealed that the freight forecasting outcomes obtained from the 4-steps sequential decision models differed between the cases with and without the EEC development. In the case of the EEC development, the total cargo volume in all modes of transportation (road, railway, water, air) was forecasted approximately at 3,217.43 thousand tons/day in 2051. Most of them were road transport, about 97.98 % with other modes accounting for 2.02 % only. The 4-wheeler mini truck had the largest share, about 63.58 %, followed by 6-wheel medium trucks, trailers, 10-wheel trucks, and semi-trailers, which accounted for 12.09, 8.70, 8.02, and 7.61 %, respectively. Furthermore, the number of truck drivers was forecasted to increase from 52,791 persons (2021) to 74,153 persons in 2051, which was high compared to the case without EEC development of about 2,227 persons.

Keywords: Forecasting the Number of Truck Drivers; 4-Steps Sequential Decision Models; Eastern Economic Corridor

บทนำ

จากรายงานสรุปความต้องการกำลังคนใน 10 อุตสาหกรรมส่งเสริมและโครงสร้างพื้นฐาน ในเขตพัฒนาพิเศษภาคตะวันออก (EEC) ระหว่างปี พ.ศ. 2562 - 2566 โดยสำนักงานคณะกรรมการนโยบายเขตพัฒนาพิเศษภาคตะวันออก (สกพอ.) [1] ระบุว่าอุตสาหกรรมโลจิสติกส์ต้องการกำลังคนรวมทั้งสิ้น 109,910 คน แต่เมื่อพิจารณาในรายละเอียดแล้วพบว่า จำนวนดังกล่าวเป็นวิชาชีพที่ปฏิบัติงานเฉพาะในส่วนของคลังสินค้าหรือจัดการโลจิสติกส์ภายในองค์กรเท่านั้น โดยไม่รวมถึงจำนวนพนักงานขับรถขนส่งสินค้า/วัสดุ ซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญในการเชื่อมโยงระบบโลจิสติกส์ของ EEC ให้สมบูรณ์ เพราะถึงแม้ว่าในพื้นที่ EEC จะมีการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานทางรางเพิ่มมากขึ้น แต่การขนส่งทางรางยังไม่สามารถตอบสนองความต้องการขนส่งในลักษณะ Door to Door ได้ และถึงแม้ในอนาคตเทคโนโลยีรถยนต์ไร้คนขับกำลังพัฒนาอยู่ในขณะนี้ แต่ในการนำมาใช้ยังมีประเด็นที่ต้องพัฒนาเพื่อหาข้อสรุปอีกมาก ดังนั้นการพัฒนาพื้นที่ EEC จึงจำเป็นจะต้องพิจารณากำลังคนในวิชาชีพพนักงานขับรถขนส่งสินค้า/วัสดุ เพื่อเตรียมความพร้อมรับการเกิดขึ้นของอุตสาหกรรมต่าง ๆ ใน EEC เนื่องจากกิจกรรมที่หลากหลายใน EEC ส่งผลให้มีความต้องการพนักงานขับรถหลากหลายประเภท เช่น รถบรรทุกพ่วงเพื่อขนส่งตู้คอนเทนเนอร์จากท่าเรือไปยังลูกค้าในต่างจังหวัด รถบรรทุกหกล้อเพื่อขนส่งสินค้าจากโรงงานไปยังลูกค้า รถบรรทุกวัตถุอันตรายจากแหล่งผลิตไปยังผู้ใช้งาน รถกระบะเพื่อขนส่งวัสดุเชื่อมโยงโซ่อุปทานของผลิตภัณฑ์ภายใน EEC และจากที่กล่าวมาข้างต้น ภาครัฐและเอกชนจึงควรร่วมกันสนับสนุนการพัฒนากำลังคน (พนักงานขับรถบรรทุก) เพื่อรองรับระบบโลจิสติกส์ภายใน EEC ที่กำลังจะเกิดขึ้น

ISSN 2672-9369 (Online)

การทบทวนวรรณกรรม

การคาดการณ์ข้อมูลที่เกี่ยวกับสถานการณ์หรือแนวโน้มที่จะเกิดขึ้นในอนาคตถูกใช้เป็นเครื่องมือวิเคราะห์ข้อมูลประกอบการตัดสินใจในการวางแผนหรือการเตรียมการด้านต่าง ๆ อาทิเช่น ด้านทรัพยากรบุคคล [2] ด้านกำลังการผลิต [3] ด้านการจัดการโซ่อุปทาน [4] และด้านการขนส่งและจราจร [5] อย่างไรก็ตามภายใต้ความไม่แน่นอนต่าง ๆ ที่จะเกิดขึ้น จึงมีความจำเป็นที่จะต้องทราบถึงความเป็นไปในอนาคต โดยอาศัยเทคนิคการคาดการณ์ต่าง ๆ เพื่อให้เกิดความถูกต้องและแม่นยำของข้อมูลที่ใช้ในการตัดสินใจ การพัฒนาแบบจำลองด้านการจราจรและขนส่งมีวัตถุประสงค์เพื่อจำลองสถานการณ์การเดินทางในพื้นที่ศึกษาสำหรับการวิเคราะห์และคาดการณ์พฤติกรรมการเดินทางทั้งในปีปัจจุบันและปีอนาคต โดยอาศัยข้อมูลปริมาณการเดินทางทั้งในอดีตและปัจจุบัน รวมถึงข้อมูลการคาดการณ์เจริญเติบโตทางเศรษฐกิจและสังคม ตลอดจนแผนงานพัฒนาโครงการในพื้นที่ศึกษา เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาใช้ในการพัฒนาแบบจำลองความต้องการเดินทาง ซึ่งโดยทั่วไปแบบจำลองความต้องการเดินทางสามารถพัฒนาโดยมีโครงสร้างในการจำลองการตัดสินใจของผู้เดินทางที่แตกต่างกันได้ 2 รูปแบบ คือ จำลองการตัดสินใจพร้อมกันทุกขั้นตอน และจำลองการตัดสินใจแบบเป็นขั้นตอนต่อเนื่องกัน โดยแบบจำลองความต้องการเดินทางในปัจจุบันนิยมใช้วิธีการจำลองการตัดสินใจของผู้เดินทางแบบเป็นขั้นตอนต่อเนื่องกัน ซึ่งสามารถพัฒนาได้ใน 2 รูปแบบ คือ แบบจำลองที่พิจารณาพฤติกรรมผู้เดินทางรายคนหรือรู้จักกันในชื่อ “Activity-Base Model” [6] และแบบจำลองที่พิจารณาพฤติกรรมรวมของผู้เดินทางหรือแบบจำลองการตัดสินใจแบบต่อเนื่อง 4 ขั้นตอน ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ได้รับการยอมรับและนิยมใช้เพื่อการวางแผนด้านการจราจรทั้งในประเทศ และต่างประเทศ [7] – [12]

วิธีการดำเนินการวิจัย

บทความนี้เป็นการคาดการณ์จำนวนพนักงานขับรถบรรทุกบนโครงข่ายถนนในระเบียงเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออก (EEC) ของประเทศไทยจากแบบจำลองการคาดการณ์ปริมาณการขนส่งสินค้าที่ถูกพัฒนาขึ้นตามหลักวิชาการของวิศวกรรมจราจรและขนส่งโดยใช้แบบจำลองการตัดสินใจแบบต่อเนื่อง 4 ขั้นตอน โดยแบ่งวิธีดำเนินการวิจัยออกเป็น 4 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ 1) การรวบรวมข้อมูลเพื่อการพัฒนาแบบจำลอง 2) การพัฒนาแบบจำลอง 3) การปรับเทียบแบบจำลอง 4) การประยุกต์ใช้แบบจำลอง ดังรูปที่ 1

1. **การรวบรวมข้อมูลเพื่อการพัฒนาแบบจำลอง**

การรวบรวมข้อมูลปฐมภูมิ จะประกอบด้วย การสำรวจจุดต้นทาง-ปลายทาง ณ สถานีน้ำมันตามเส้นทางสายหลักด้วยแบบสอบถาม (Origin-Destination Surveys, OD-Survey) และข้อมูลทุติยภูมิจะประกอบด้วย ข้อมูลพื้นฐานทั่วไป ปริมาณจราจรโดยเฉลี่ยต่อวันตลอดปี (Annual Average Daily Traffic, AADT) และข้อมูลการขนส่งสินค้าของหน่วยงานภาครัฐที่เกี่ยวข้อง และแผนพัฒนาโครงการในอนาคตที่ใช้ปรับปรุงฐานข้อมูลในแบบจำลองโครงข่าย

2. **การพัฒนาแบบจำลอง**

การพัฒนาแบบจำลองการตัดสินใจแบบต่อเนื่อง 4 ขั้นตอน (4-Steps Sequential Decision Models) สำหรับการศึกษานี้ได้ถูกพัฒนาขึ้นตามหลักวิชาการของวิศวกรรมจราจรและขนส่งที่อ้างอิงตามแบบจำลองด้านการจราจรและขนส่งระดับประเทศ (National Model: NAM) ของสำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร (สนข.) ซึ่งประกอบด้วย 4 แบบจำลองย่อย ได้แก่ 1) แบบจำลองการเกิดการเดินทาง (Trip Generation Model) 2) แบบจำลองการกระจายการเดินทาง (Trip Distribution Model) 3) แบบจำลองการเลือกรูปแบบการเดินทาง (Mode Choice Model) และ 4) แบบจำลองการแจกแจงการเดินทาง (Trip Assignment Model) โดยในแต่ละแบบจำลองย่อยจะถูกพัฒนาโดยใช้เทคนิควิธีที่แตกต่างกัน ได้แก่

วิธีวิเคราะห์ความถดถอย (Regression Analysis) วิธีความโน้มถ่วงแบบข้อจำกัดสองทาง (Doubly Constraint Gravity Model) วิธีการวิเคราะห์อรรถประโยชน์ (Utility) หรือแบบจำลองโลจิต (Logit Model) และวิธีสมดุลของผู้เดินทาง (User Equilibrium) ตามลำดับ

โดยเหตุผลในการเลือกแบบจำลองการตัดสินใจแบบต่อเนื่อง 4 ขั้นตอน ได้แก่ 1) แบบจำลองการเกิดการเดินทาง: เป็นวิธีการที่สะดวกในการปรับแก้และสามารถตรวจสอบเปรียบเทียบอัตราการเดินทางที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรที่ใช้สร้างความสัมพันธ์ได้อย่างมีเหตุผลและน่าเชื่อถือ 2) แบบจำลองการกระจายการเดินทาง: เป็นวิธีที่ทำให้คุณลักษณะการเดินทางมีการเปลี่ยนแปลงไปตามค่าที่วัดเป็นความต้านทาน (เวลา, ระยะทาง) ในการเดินทาง ซึ่งจะสะท้อนพฤติกรรมการเดินทางในปีอนาคตได้ดีกว่าวิธีความเติบโตที่มีคุณลักษณะการเดินทางในปีอนาคตไม่แตกต่างจากปีปัจจุบัน 3) แบบจำลองการเลือกรูปแบบการเดินทาง: เป็นทฤษฎีที่นิยมใช้และได้รับการยอมรับในวงวิชาการสำหรับการวิเคราะห์พฤติกรรมการตัดสินใจเลือกรูปแบบการเดินทาง คือ แบบจำลองโลจิต (Logit Model) ซึ่งเป็นการพิจารณาอรรถประโยชน์ (Utility) ของผู้เดินทางที่ได้รับจากแต่ละทางเลือกในการเดินทางซึ่งส่งผลให้เกิดการตัดสินใจเลือกรูปแบบในการเดินทางที่ผู้เดินทางคิดว่าจะได้รับอรรถประโยชน์สูงสุด และ 4) แบบจำลองการแจกแจงการเดินทาง: เป็นวิธีที่ทำให้เวลาการเดินทาง (หรือ ค่าใช้จ่าย) บนเส้นทางต่าง ๆ ระหว่างคู่โซนเดียวกันให้อยู่ในสภาพสมดุล และจะให้ลักษณะคำตอบเป็นค่าที่แท้จริง (Exact Solution) ในขณะที่วิธีอื่น ๆ เช่น วิธี Incremental จะให้ลักษณะคำตอบเป็นค่าประมาณที่ใกล้เคียงกับค่าที่แท้จริง (Approximate Solution)

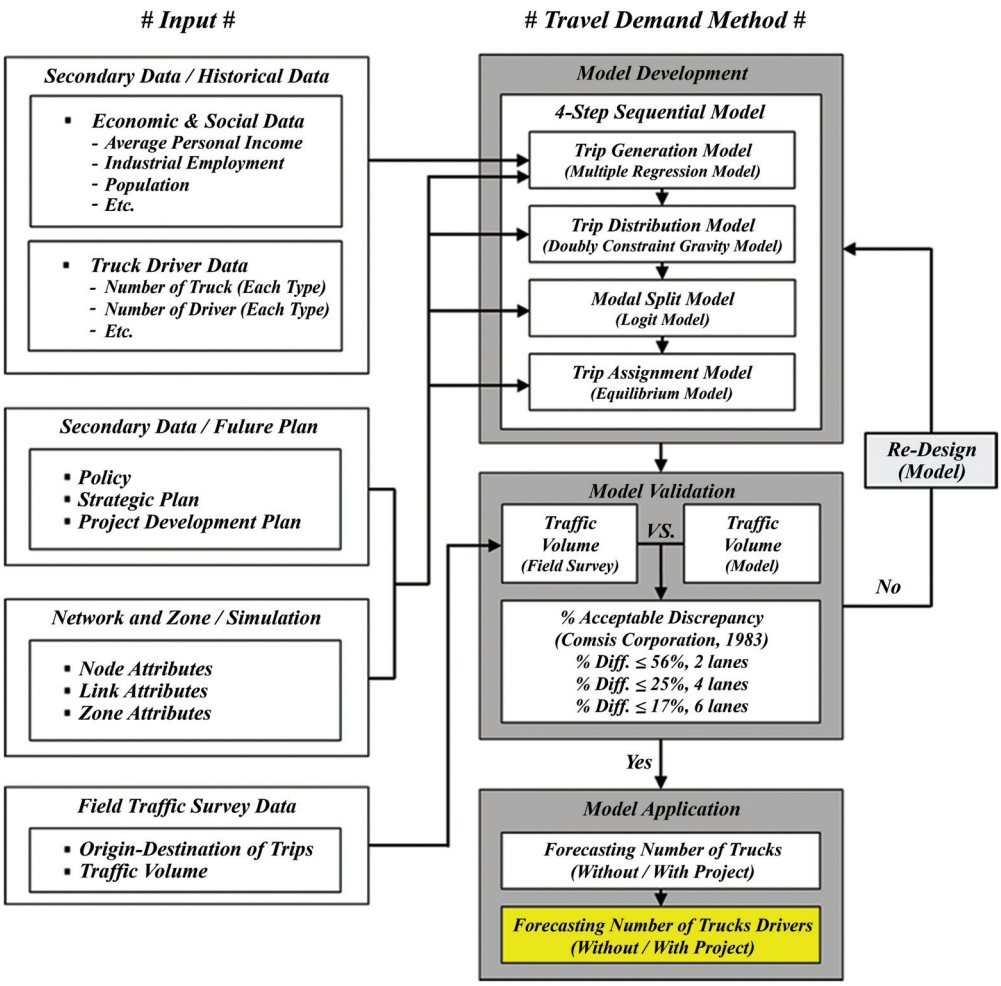
3. การปรับเทียบแบบจำลอง

การปรับเทียบแบบจำลองเป็นการปรับเทียบและตรวจสอบความถูกต้อง น่าเชื่อถือ ก่อนการนำแบบจำลองที่พัฒนาไปประยุกต์ใช้ หรือที่เรียกว่า การปรับเทียบแบบจำลองด้านการจราจร (Model Calibration) โดยขั้นตอนการปรับเทียบแบบจำลองระดับประเทศ (NAM) ซึ่งความถูกต้องของแบบจำลองจะตรวจสอบจากปริมาณการจราจรที่แจกแจงบนโครงข่ายถนนในปีปัจจุบัน (Predicted) เทียบกับปริมาณการจราจรจริงในปัจจุบันที่ได้จากการรวบรวมข้อมูลการจราจรและขนส่งของพื้นที่ศึกษา (Observed) โดยพิจารณาจากความคลาดเคลื่อนที่ยอมให้ได้ ดังตารางที่ 1

4. การประยุกต์ใช้แบบจำลอง

การประยุกต์ใช้แบบจำลองนี้เป็นการนำแบบจำลองการตัดสินใจแบบต่อเนื่อง 4 ขั้นตอนที่ถูกพัฒนาขึ้นและผ่านการปรับเทียบแบบจำลองแล้วมาประยุกต์ใช้เพื่อคาดการณ์ปริมาณการเดินทาง สภาพการจราจร และระดับการให้บริการในปีอนาคต โดยมีกรอบของการวิเคราะห์ปีแรกคือปี พ.ศ. 2564 และกรอบเวลาของการวิเคราะห์ในปีอนาคตทุก ๆ 10 ปี ไปจนถึง 30 ปี ประกอบด้วย ปีฐาน (พ.ศ. 2562) ปีแรกของการวิเคราะห์ (พ.ศ. 2564) 10 ปีถัดไป (พ.ศ. 2574) 20 ปีถัดไป (พ.ศ. 2584) และ 30 ปีถัดไป (พ.ศ. 2594) โดยทำการวิเคราะห์ทั้งการเดินทางของคนและสินค้าใน 2 กรณี ได้แก่ กรณีไม่มีการพัฒนาในพื้นที่ (Without Project) และกรณีมีการพัฒนาในพื้นที่ (With Project) และการคาดการณ์ปริมาณพนักงานขับรถบรรทุกในพื้นที่ศึกษาต่อไป และสำหรับการตั้งสมมติฐานเพื่อแสดงให้เห็นว่าจะมีการเพิ่มขึ้นของปริมาณสินค้าในอนาคต กรณีมีการพัฒนา EEC จะเป็นการประยุกต์ใช้แบบจำลอง โดยการปรับแต่งแบบจำลองโครงข่ายและเพิ่มเติมโครงข่ายให้เป็นไปตามเงื่อนไขและแผนต่าง ๆ ของภาครัฐ ดังตารางที่ 2

ISSN 2672-9369 (Online)



รูปที่ 1 กรอบแนวคิดการคาดการณ์จำนวนพนักงานขับรถบรรทุกฯ โดยแบบจำลองการตัดสินใจแบบต่อเนื่อง 4 ขั้นตอน

ตารางที่ 1 ความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ในการแจกแจงการเดินทาง [13]

สิ่งอำนวยความสะดวก	จำนวนช่องจราจร	ช่วงปริมาณจราจรเฉลี่ยรายวัน (พันคัน/วัน)	% ความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้
ทางด่วน	8	80 - 105	13.00
	6	55 - 80	18.00
	4	30 - 55	28.00
ถนนสายหลัก	8 แบ่งทิศทาง	37 - 47	13.00
	6 แบ่งทิศทาง	27 - 37	17.00
	4 แบ่งทิศทาง	16 - 27	25.00
	4 ไม่แบ่งทิศทาง	8 - 18	34.00
	2 ไม่แบ่งทิศทาง	2 - 8	56.00
	4 เดินรถทางเดียว	18 - 24	13.00
	3 เดินรถทางเดียว	13 - 18	17.00
	2 เดินรถทางเดียว	8 - 13	25.00

ตารางที่ 2 แผนพัฒนาโครงการในอนาคตที่ใช้ปรับปรุงฐานข้อมูลในแบบจำลองโครงข่าย [14]

ลำดับที่	รายชื่อโครงการ	ปีเปิดดำเนินการ	ปี พ.ศ.			
			2564	2574	2584	2594
1	โครงการพัฒนา Logistics Hub: Dry Port	2569		•	•	•
2	โครงการรถไฟความเร็วสูงเชื่อม 3 ท่าอากาศยาน (ดอนเมือง-สุวรรณภูมิ-อู่ตะเภา)	2566		•	•	•
3	โครงการพัฒนาท่าเรือแหลมฉบัง (ระยะที่ 3)	2568		•	•	•
4	โครงการพัฒนารถไฟขนส่งสินค้าเชื่อมท่าเรือหลัก 3 แห่ง: รถไฟขนส่งสินค้าและท่าบก	2569		•	•	•
5	โครงการพัฒนาท่าอากาศยานนานาชาติอู่ตะเภา	2566		•	•	•
6	โครงการทางหลวงพิเศษระหว่างเมืองหมายเลข 7 (ช่วงพัทยา-มาบตาพุด)	2563	•	•	•	•

ผลการศึกษา

ผลการศึกษาสำหรับการศึกษานี้ได้แบ่งออกเป็น 4 ส่วนหลักซึ่งสอดคล้องตามวิธีดำเนินการวิจัย ประกอบด้วย 1) ผลการรวบรวมข้อมูล 2) ผลการพัฒนาแบบจำลอง 3) ผลการปรับเทียบแบบจำลอง และ 4) ผลการประยุกต์ใช้แบบจำลอง โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. **ผลการรวบรวมข้อมูล**

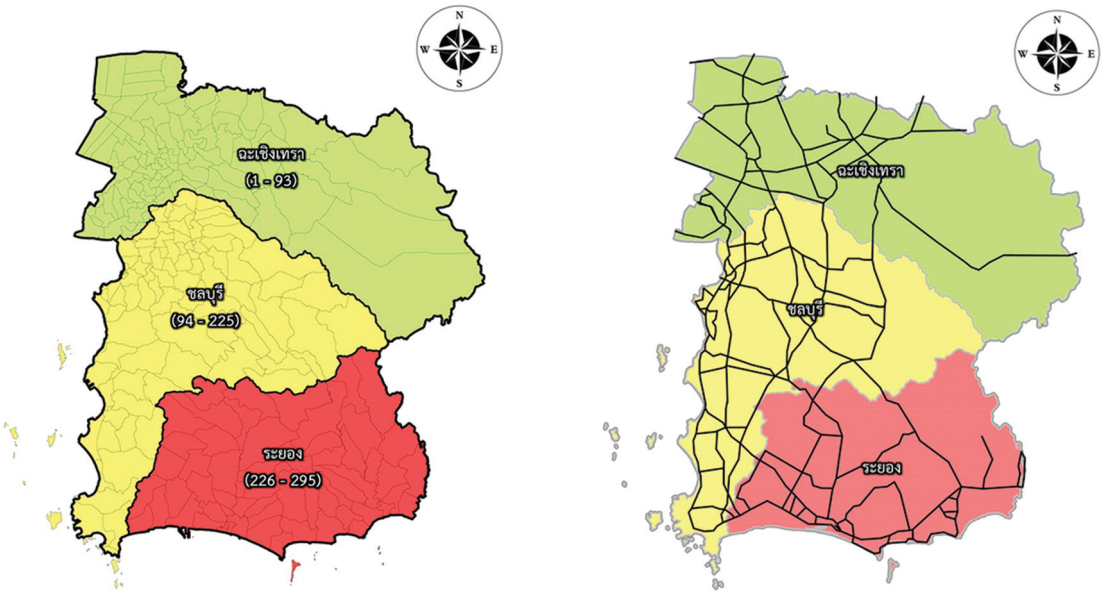
จากการรวบรวมข้อมูลปฐมภูมิที่ประกอบด้วย การสำรวจจุดต้นทาง-ปลายทาง ณ สถานีน้ำมันตามเส้นทางสายหลักด้วยแบบสอบถาม (OD-Survey) และข้อมูลทุติยภูมิที่ประกอบด้วย ปริมาณจราจรโดยเฉลี่ยต่อวันตลอดปี (AADT) และข้อมูลการขนส่งสินค้าของหน่วยงานภาครัฐที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ กรมทางหลวง [15] และสำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร (สนข.) [16] พบว่า ในปี พ.ศ. 2559 สภาพการจราจรบนทางหลวงแผ่นดินในพื้นที่จังหวัดชลบุรี ฉะเชิงเทรา และระยอง บนโครงข่ายเชื่อมโยงที่สำคัญ มีปริมาณจราจรบนถนนสุขุมวิทสูงถึง 61,869 คัน/วัน (ช่วงศรีราชา-พัทยา) โดยสัดส่วนยานพาหนะหนัก หรือรถบรรทุกขนาดใหญ่สูงถึงร้อยละ 56 (ช่วงคลองด่าน-บางปะกง) สำหรับทางหลวงพิเศษระหว่างเมืองหมายเลข 7 มีปริมาณจราจรสูงถึง 72,821 คัน/วัน (ช่วงทางแยกต่างระดับหนองขาม-ท่าเรือแหลมฉบัง) และมีสัดส่วนรถบรรทุกขนาดใหญ่สูงถึงร้อยละ 52 (ช่วงทางแยกต่างระดับหนองขาม-ท่าเรือแหลมฉบัง) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าพื้นที่นี้ได้มีการพัฒนาระบบโครงข่ายถนนได้ครอบคลุมพื้นที่สำคัญ เช่น พื้นที่นิคมอุตสาหกรรม ท่าเรือ และท่าอากาศยาน เป็นต้น โดยในปี พ.ศ. 2560 มีปริมาณการขนส่งสินค้าในพื้นที่รวม 2,160.38 พันตันต่อวัน คิดเป็นร้อยละประมาณ 66.62 ของการขนส่งทั้งประเทศ แบ่งเป็นการขนส่งทางถนนคิดเป็นร้อยละ 98.05 รองลงมาคือ ทางรถไฟและทางน้ำคิดเป็นร้อยละ 1.16 และร้อยละ 0.79 นอกจากนี้ผลการศึกษาข้อมูลการขนส่งในอนาคต ในช่วงปี พ.ศ. 2574 - 2594 ยังพบว่า เมื่อมีการพัฒนากิจกรรมทางเศรษฐกิจตามโครงการพัฒนาเขตพัฒนาพิเศษภาคตะวันออก ประกอบด้วย การพัฒนาเมืองใหม่ การพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานคมนาคม

ISSN 2672-9369 (Online)

ที่สำคัญ อาทิ รถไฟความเร็วสูง ท่าอากาศยานอู่ตะเภา ศูนย์ซ่อมบำรุงอากาศยาน ท่าเรือแหลมฉบังขั้นที่ 3 ท่าเรือมาบตะพุด ระยะที่ 3 และการขยายตัวทางเศรษฐกิจจากการลงทุนของภาคเอกชน ซึ่งจะเพิ่มอัตราการเติบโตทางเศรษฐกิจในพื้นที่ศึกษา

2. ผลการพัฒนาแบบจำลอง

การศึกษานี้ได้แบ่งพื้นที่ย่อยที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้านการจราจรและขนส่งในพื้นที่ศึกษา โดยอาศัยแนวเขตการปกครองระดับตำบลที่สามารถนำข้อมูลทางด้านเศรษฐกิจและสังคมของพื้นที่ มาใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมการเดินทางได้ ซึ่งในการแบ่งพื้นที่ย่อยดังกล่าวจะสอดคล้องกับระบบพื้นที่ในการวิเคราะห์จุดต้นทาง-ปลายทางของผู้ใช้รถบนทางหลวง โดยแบ่งพื้นที่ย่อยภายในพื้นที่ศึกษา (Internal Zone) ออกเป็น 295 พื้นที่ย่อย เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณการเดินทางจากแต่ละหน่วยพื้นที่ย่อย (1 - 295) ครอบคลุมพื้นที่ 3 จังหวัด ประกอบด้วย จังหวัดฉะเชิงเทรา (1 - 93) ชลบุรี (94 - 225) และระยอง (226 - 295) ดังรูปที่ 2(ก) และได้จัดทำโครงข่ายถนนในแบบจำลองจากข้อมูลโครงข่ายถนนที่รวบรวมได้ โดยนำข้อมูลมาจัดแบ่งโครงข่ายถนนเป็นส่วน ๆ เรียกว่า ส่วนเชื่อมโยง หรือ Link และมีจุดแบ่ง หรือจุดเชื่อมต่อเรียกว่า Node ในแต่ละ Link จะมีรายละเอียดทางด้านกายภาพของถนนและการจราจรที่สำคัญ (Link Attribute) เช่น ระยะทาง จำนวนช่องจราจร ความจุปริมาณจราจร ความเร็วของยานพาหนะและเวลาในการเดินทาง โดย Link เหล่านี้จะเชื่อมต่อไปยังศูนย์กลาง (Centroid) ของพื้นที่ย่อยต่าง ๆ ซึ่งเป็นจุดกำเนิดของการเดินทาง (Trip Generation) และมีการดึงดูดการเดินทางระหว่างพื้นที่ย่อยเหล่านั้น ดังรูปที่ 2(ข)



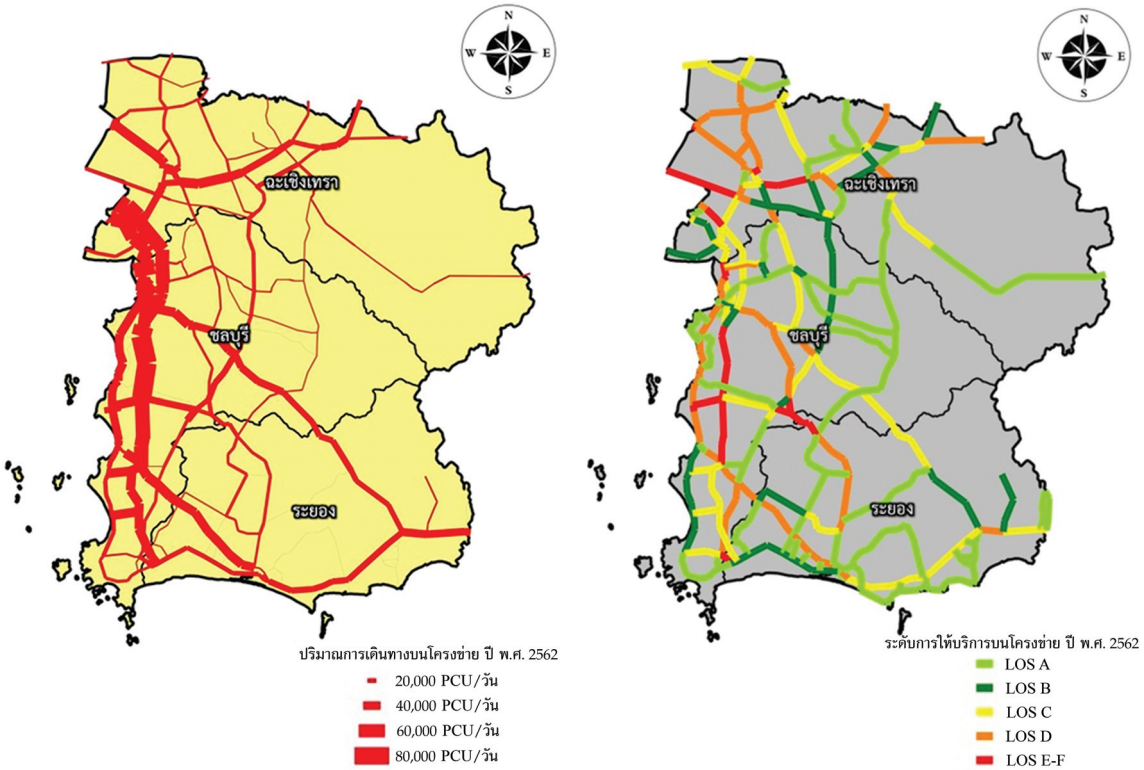
(ก) การแบ่งพื้นที่ย่อยของพื้นที่ศึกษา (ข) โครงข่ายถนนในแบบจำลองของพื้นที่ศึกษา

รูปที่ 2 การแบ่งพื้นที่ย่อยและโครงข่ายถนนในแบบจำลองของพื้นที่ศึกษา

3. ผลการปรับเทียบแบบจำลอง

การศึกษานี้ได้นำแบบจำลองที่ถูกพัฒนาขึ้นมาทำการปรับเทียบแบบจำลองก่อนนำไปประยุกต์ใช้กับสถานการณ์ในอนาคต โดยนำข้อมูลด้านการจราจรและขนส่งที่ได้จากการรวบรวม ณ ปีฐาน พ.ศ. 2562 (ปีที่มีสถานการณ์ปกติก่อนเกิด COVID-19) มาเปรียบเทียบกับปริมาณจราจร (Volume) บนถนนสายสำคัญ สภาพการจราจร (Flow Diagram) และระดับการให้บริการ (LOS Diagram) ที่ได้จากแบบจำลอง (รูปที่ 3) ซึ่งผลการปรับเทียบแบบจำลองพบว่า แบบจำลองสามารถจำลองพฤติกรรมการเดินทางของโครงข่ายในระดับที่ยอมรับได้ตามเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ระหว่างผลสำรวจกับข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองที่มีการระบุ

ว่าถนนขนาด 2 4 และ 6 ช่องจราจร สามารถคลาดเคลื่อนได้ไม่เกิน 56 25 และ 17 % ตามลำดับ [13] โดยแบบจำลองที่ถูกพัฒนาขึ้นมีความคลาดเคลื่อนอยู่ระหว่าง 0.44 - 12.78 % ซึ่งทำให้เชื่อมั่นได้ว่าแบบจำลองดังกล่าวสามารถนำไปใช้ในการคาดการณ์ปริมาณจราจรในปีอนาคตต่อไปได้อย่างเหมาะสม



(ก) ด้านสภาพการจราจร (Flow Diagram) (ข) ด้านระดับการให้บริการ (LOS Diagram)

รูปที่ 3 ผลการปรับเทียบแบบจำลองด้าน ณ ปีฐาน พ.ศ. 2562

4. ผลการประยุกต์ใช้แบบจำลอง

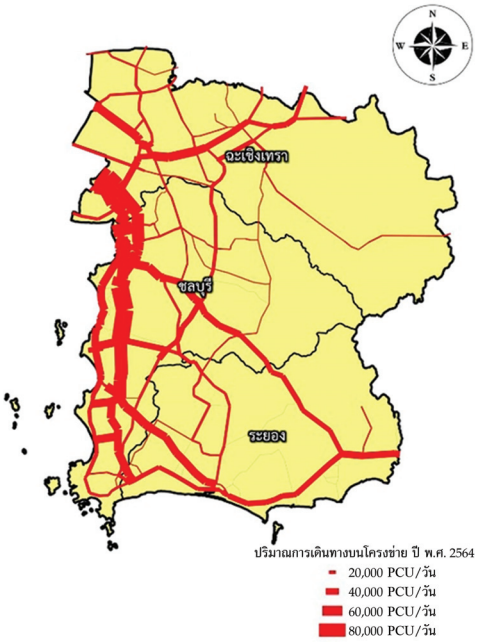
การศึกษานี้ได้นำแบบจำลองการตัดสินใจแบบต่อเนื่อง 4 ขั้นตอนที่ถูกพัฒนาขึ้นและผ่านการปรับเทียบแบบจำลองแล้วมาประยุกต์ใช้เพื่อคาดการณ์ปริมาณการเดินทาง สภาพการจราจร และระดับการให้บริการในปีอนาคต โดยมีกรอบของการวิเคราะห์ปีแรกคือ ปี พ.ศ. 2564 และกรอบเวลาของการวิเคราะห์ในปีอนาคตทุก ๆ 10 ปี ไปจนถึง 30 ปี ประกอบด้วย ปีฐาน (พ.ศ. 2562) ปีแรกของการวิเคราะห์ (พ.ศ. 2564) 10 ปีถัดไป (พ.ศ. 2574) 20 ปีถัดไป (พ.ศ. 2584) และ 30 ปีถัดไป (พ.ศ. 2594) โดยทำการวิเคราะห์ทั้งการเดินทางของคนและสินค้าใน 2 กรณี ได้แก่ กรณีไม่มีการพัฒนาในพื้นที่ (Without Project) และกรณีมีการพัฒนาในพื้นที่ (With Project) โดยผลลัพธ์กรณีมีการพัฒนาในพื้นที่ ดังรูปที่ 4 และ 5

นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์คาดการณ์ปริมาณการขนส่งสินค้าของพื้นที่ศึกษาในอนาคตพบว่า กรณีไม่มีการพัฒนา EEC ในปี พ.ศ. 2564 มีปริมาณการขนส่งสินค้ารวม 2,360.76 พันตัน/วัน และเพิ่มขึ้นเป็น 2,685.36 2,923.91 และ 3,217.43 พันตัน/วัน ในปี พ.ศ. 2574 2584 และ 2594 ตามลำดับ ด้วยอัตราการขยายตัวเฉลี่ยร้อยละ 1.0373 ต่อปี จากปีแรกของการวิเคราะห์ (พ.ศ. 2564) โดยเมื่อมีการพัฒนา EEC พบว่า มีปริมาณการขนส่งเพิ่มขึ้นเป็น 2,736.05 3,110.43 และ 3,591.99 พันตัน/วัน ในปี พ.ศ. 2574 2584 และ 2594 ตามลำดับ ด้วยอัตราการขยายตัวเฉลี่ยร้อยละ 1.4076 ต่อปี ซึ่งเพิ่มขึ้นจากกรณีไม่มีการพัฒนา EEC คิดเป็นร้อยละ 1.8876 6.3791 และ 11.6414 ตามลำดับ ดังตารางที่ 3

ส่วนผลการวิเคราะห์คาดการณ์ปริมาณการขนส่งสินค้าทางถนน (ตารางที่ 4) พบว่า รูปแบบการขนส่งสินค้าในพื้นที่ศึกษา ส่วนใหญ่เป็นการขนส่งทางถนนประมาณร้อยละ 97.98 และรูปแบบอื่น ๆ เพียงร้อยละ

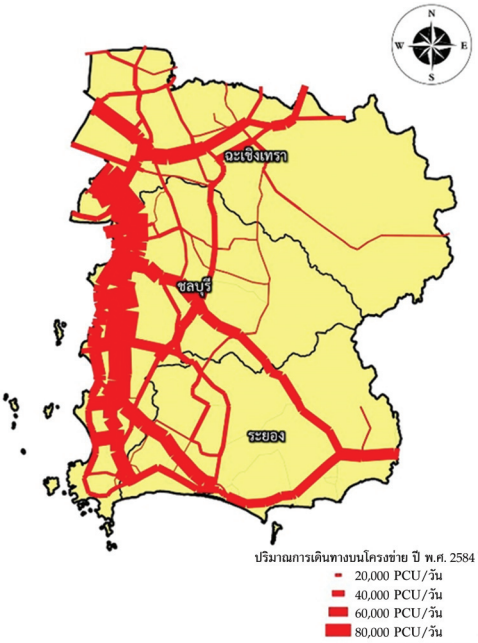
ISSN 2672-9369 (Online)

2.02 เท่านั้น โดยจากการวิเคราะห์คาดการณ์ปริมาณการขนส่งสินค้า (แยกตามประเภทของรถบรรทุก) ของพื้นที่ศึกษาในอนาคตพบว่า รถบรรทุกเล็ก 4 ล้อ มีสัดส่วนการขนส่งมากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 63.58 และรองลงมาคือ รถบรรทุกกลาง 6 ล้อ รถบรรทุกพ่วง รถบรรทุก 10 ล้อ รถบรรทุกกึ่งพ่วง คิดเป็นร้อยละ 12.09 8.70 8.02 และ 7.61 ตามลำดับ

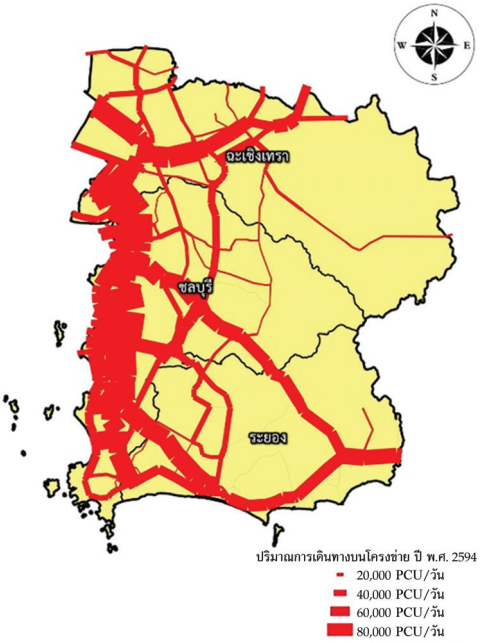


(ก) พ.ศ. 2564 (ปีแรก)

(ข) พ.ศ. 2574 (10 ปี)

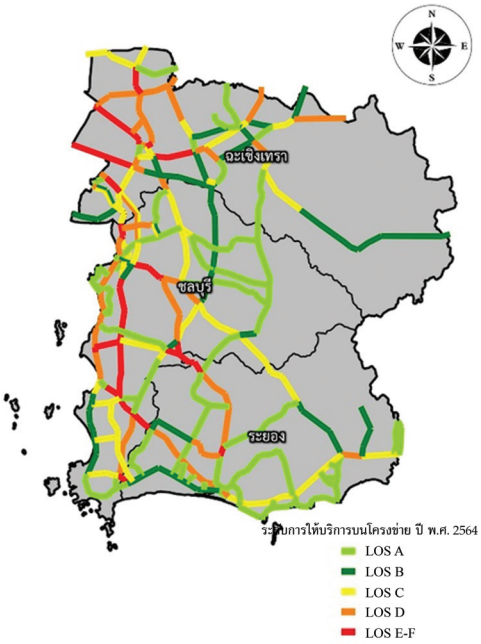


(ค) พ.ศ. 2584 (20 ปี)

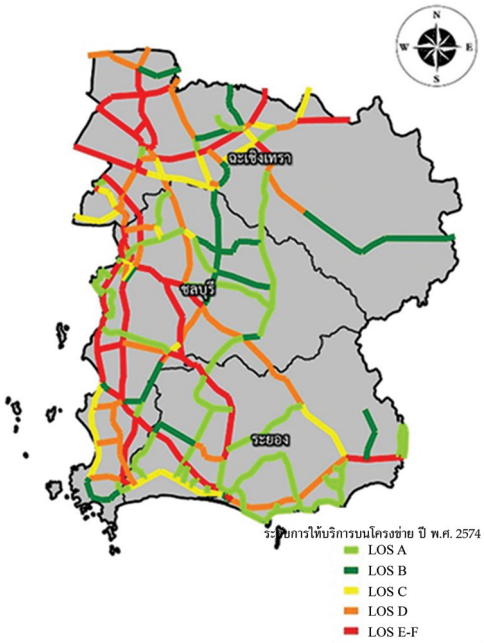


(ง) พ.ศ. 2594 (30 ปี)

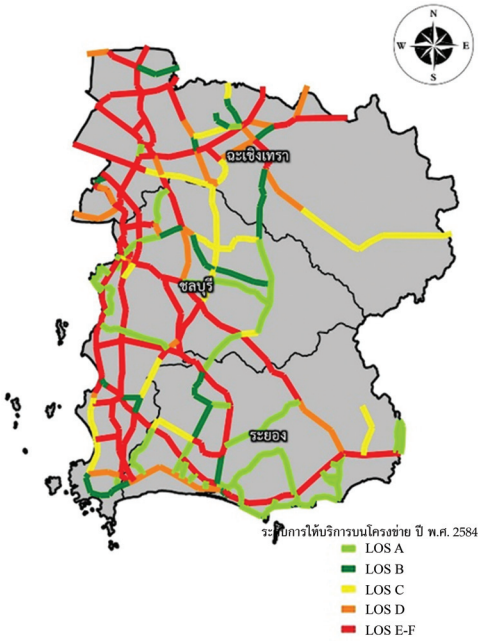
รูปที่ 4 ผลการวิเคราะห์คาดการณ์สภาพการจราจร ปี พ.ศ. 2564 (ปีแรก) - พ.ศ. 2594 (30 ปี)



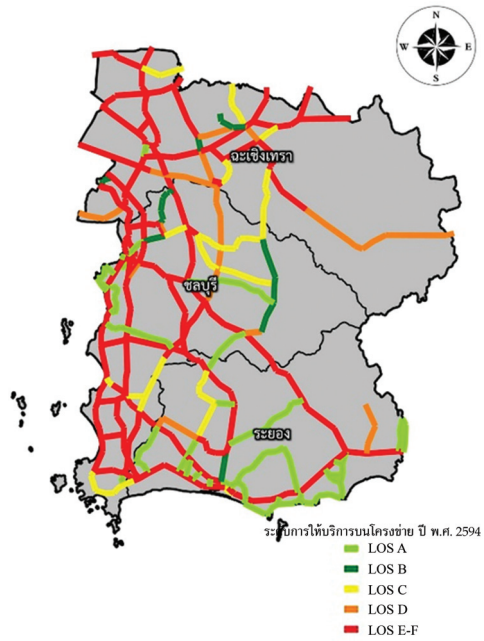
(ก) พ.ศ. 2564 (ปีแรก)



(ข) พ.ศ. 2574 (10 ปี)



(ค) พ.ศ. 2584 (20 ปี)



(ง) พ.ศ. 2594 (30 ปี)

รูปที่ 5 ผลการวิเคราะห์คาดการณ์ระดับการให้บริการ ปี พ.ศ. 2564 (ปีแรก) - พ.ศ. 2594 (30 ปี)

ISSN 2672-9369 (Online)

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์คาดการณ์ปริมาณการขนส่งสินค้าในพื้นที่ศึกษา

รูปแบบการขนส่ง	กรณีไม่มีการพัฒนา EEC (พันตัน/วัน)				กรณีมีการพัฒนา EEC (พันตัน/วัน)			
	พ.ศ. 2564	พ.ศ. 2574	พ.ศ. 2584	พ.ศ. 2594	พ.ศ. 2564	พ.ศ. 2574	พ.ศ. 2584	พ.ศ. 2594
ทางถนน	2,313.16	2,631.22	2,864.96	3,152.57	2,313.94	2,647.20	2,916.58	3,250.22
ทางรถไฟ	29.59	33.66	36.65	40.33	29.60	67.42	170.56	316.23
ทางน้ำ	18.00	20.48	22.29	24.53	18.09	21.44	23.29	25.54
ทางอากาศ	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
รวม	2,360.76	2,685.36	2,923.91	3,217.43	2,361.63	2,736.05	3,110.43	3,591.99

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์คาดการณ์ปริมาณการขนส่งสินค้าทางถนน (ประเภทรถบรรทุก)

ประเภทรถบรรทุก	กรณีไม่มีการพัฒนา EEC (พันตัน/วัน)				กรณีมีการพัฒนา EEC (พันตัน/วัน)			
	พ.ศ. 2564	พ.ศ. 2574	พ.ศ. 2584	พ.ศ. 2594	พ.ศ. 2564	พ.ศ. 2574	พ.ศ. 2584	พ.ศ. 2594
4 ล้อ	1,470.76	1,672.99	1,821.60	2,004.47	1,471.25	1,683.14	1,854.42	2,066.56
6 ล้อ	279.57	318.01	346.26	381.02	279.66	319.94	352.49	392.82
10 ล้อ	185.59	211.10	229.86	252.93	185.65	212.39	234.00	260.77
พ่วง	201.20	228.87	249.20	274.22	201.27	230.26	253.69	282.71
กึ่งพ่วง	176.05	200.26	218.04	239.93	176.11	201.47	221.97	247.37
รวม	2,313.16	2,631.22	2,864.96	3,152.57	2,313.94	2,647.20	2,916.58	3,250.22

อย่างไรก็ตามผลที่ได้จากการวิเคราะห์คาดการณ์สภาพการจราจรและระดับการให้บริการด้วยแบบจำลองการตัดสินใจแบบต่อเนื่อง 4 ขั้นตอน (4-Steps Sequential Decision Models) ยังสามารถนำมาวิเคราะห์คาดการณ์ปริมาณพนักงานขับรถบรรทุกในพื้นที่ศึกษา โดยใช้ผลการวิเคราะห์คาดการณ์ 3 ส่วนประกอบด้วย 1) ปริมาณการขนส่งสินค้าทางถนนที่แยกตามประเภทรถบรรทุกของกรมทางหลวง 2) พิกัดน้ำหนักบรรทุกของกรมทางหลวง และ 3) จำนวนเที่ยวการเดินทางของรถบรรทุก (Trip Rate) ที่ได้จากแบบจำลองและการคาดการณ์ปริมาณพนักงานขับรถบรรทุกสำหรับการขนส่งข้ามพื้นที่จะไม่ได้นับรวมกับปริมาณพนักงานขับรถบรรทุกที่อยู่ในแต่ละพื้นที่ย่อย ซึ่งผลการวิเคราะห์คาดการณ์ฯ พบว่า กรณีไม่มีการพัฒนา EEC มีจำนวนพนักงานขับรถบรรทุกในพื้นที่ศึกษาเท่ากับ 52,775 60,032 65,364 และ 71,926 คน ในปี พ.ศ. 2564 2574 2584 และ พ.ศ. 2594 ตามลำดับ ด้วยอัตราการขยายตัวเฉลี่ยร้อยละ 1.0373 ต่อปี โดยเมื่อมีการพัฒนา EEC พบว่า มีจำนวนพนักงานขับรถบรรทุกเพิ่มขึ้นเป็น 52,791 60,394 66,541 และ 74,153 คน ในปี พ.ศ. 2564 2574 2584 และ พ.ศ. 2594 ตามลำดับ ด้วยอัตราการขยายตัวเฉลี่ยร้อยละ 1.1391 ต่อปี ซึ่งเพิ่มขึ้นจากกรณีไม่มีการพัฒนา EEC เท่ากับ 16 362 1,177 และ 2,227 คน หรือคิดเป็นร้อยละ 0.0303 0.6030 1.8007 และ 3.0962 ตามลำดับ ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ผลการคาดการณ์ปริมาณพนักงานขับรถบรรทุกในพื้นที่ศึกษา

พนักงานขับรถบรรทุก	กรณีไม่มีการพัฒนา EEC (คน)				กรณีมีการพัฒนา EEC (คน)			
	พ.ศ. 2564	พ.ศ. 2574	พ.ศ. 2584	พ.ศ. 2594	พ.ศ. 2564	พ.ศ. 2574	พ.ศ. 2584	พ.ศ. 2594
4 ล้อ	37,577	42,744	46,541	51,213	37,589	43,003	47,379	52,799
6 ล้อ	4,602	5,235	5,700	6,272	4,603	5,266	5,802	6,466
10 ล้อ	3,453	3,928	4,276	4,706	3,454	3,951	4,353	4,851
พ่วง	3,945	4,487	4,886	5,376	3,946	4,514	4,974	5,543
กึ่งพ่วง	3,198	3,638	3,961	4,359	3,199	3,660	4,033	4,494
รวม	52,775	60,032	65,364	71,926	52,791	60,394	66,541	74,153

อภิปรายผลการศึกษา

ผลการคาดการณ์ของแบบจำลองการตัดสินใจแบบต่อเนื่อง 4 ขั้นตอนในงานวิจัยนี้ ได้มีความสอดคล้องกับการศึกษาอื่น ๆ คือ ผลการคาดการณ์ปริมาณการขนส่งสินค้าในพื้นที่ EEC ในอนาคต จะมีปริมาณการขนส่งสินค้ารวมทุกรูปแบบ (ทั้งทางถนน รถไฟ น้ำ อากาศ) ในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน แต่สำหรับงานวิจัยครั้งนี้ได้แสดงถึงผลคาดการณ์ปริมาณการขนส่งสินค้าในพื้นที่ EEC ในอนาคต โดยจำแนกตามรูปแบบการขนส่งสินค้าทางถนนตามประเภทรถบรรทุก ทั้งขนาด 4 6 10 ล้อ, พ่วง และกึ่งพ่วง และแสดงผลคาดการณ์ปริมาณพนักงานขับรถบรรทุก ในกรณีไม่มี/มีการพัฒนา EEC อีกด้วย

สรุปผลการศึกษา

การคาดการณ์จำนวนพนักงานขับรถบรรทุกบนโครงข่ายถนนในระเบียงเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออกของประเทศไทย โดยใช้แบบจำลองการตัดสินใจแบบต่อเนื่อง 4 ขั้นตอนที่ได้ดำเนินการตามขั้นตอน ได้แก่ 1) การจัดทำการแบ่งพื้นที่ย่อย 2) การจัดทำโครงข่ายถนนในแบบจำลอง 3) แบบจำลองการตัดสินใจแบบต่อเนื่อง 4 ขั้นตอน และ 4) การปรับเทียบแบบจำลอง สามารถสรุปได้ว่า แบบจำลองฯ สามารถจำลองพฤติกรรมการเดินทางของโครงข่ายนี้อยู่ในระดับที่ยอมรับได้ระหว่างผลสำรวจกับข้อมูลที่ได้จากแบบจำลอง ที่มีการระบุว่าถนนขนาด 2 4 และ 6 ช่องจราจร สามารถคลาดเคลื่อนได้ไม่เกิน 56 25 และ 17 % ตามลำดับ โดยแบบจำลองที่ถูกพัฒนาขึ้นมีความคลาดเคลื่อนอยู่ระหว่าง 0.44 - 12.78 % ซึ่งทำให้เชื่อมั่นได้ว่าแบบจำลองดังกล่าวสามารถนำไปใช้ในการคาดการณ์ปริมาณจราจรในปีอนาคตต่อไปได้อย่างเหมาะสม โดยสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการคาดการณ์สภาพการจราจรและระดับการให้บริการในอนาคตตามกรอบระยะเวลาการวิเคราะห์ได้ และสามารถนำแบบจำลองนี้ไปใช้ในการคาดการณ์ปริมาณการขนส่งสินค้าและจำนวนพนักงานขับรถบรรทุกเพิ่มขึ้นในอนาคตได้ ซึ่งผลการคาดการณ์ปริมาณการขนส่งสินค้ารวมทุกรูปแบบ (ทางถนน รถไฟ น้ำ อากาศ) ของพื้นที่ศึกษาในอนาคตพบว่า กรณีไม่มีการพัฒนา EEC มีปริมาณการขนส่งสินค้าเท่ากับ 2,360.76 2,685.36 2,923.91 และ 3,217.43 พันตัน/วัน ในปี พ.ศ. 2564 2574 2584 และ พ.ศ. 2594 ตามลำดับ ด้วยอัตราการขยายตัวเฉลี่ยร้อยละ 1.0373 ต่อปี แต่เมื่อมีการพัฒนา EEC พบว่า จะมีปริมาณการขนส่งเพิ่มขึ้นเป็น 2,736.05 3,110.43 และ 3,591.99 พันตัน/วัน ในปี พ.ศ. 2574 2584 และ พ.ศ. 2594 ตามลำดับ ด้วยอัตราการขยายตัวเฉลี่ยร้อยละ 1.4076 ต่อปี ซึ่งเพิ่มขึ้นจากกรณีไม่มีการพัฒนา EEC คิดเป็นร้อยละ 1.8876 6.3791 และ 11.6414 ตามลำดับ ส่วนผลการคาดการณ์ปริมาณการขนส่งสินค้าทางถนนพบว่า รูปแบบการขนส่งสินค้าในพื้นที่ศึกษา ส่วนใหญ่เป็นการขนส่งทางถนนประมาณร้อยละ 97.98 และรูปแบบอื่น ๆ เพียงร้อยละ 2.02 เท่านั้น โดยจากการวิเคราะห์คาดการณ์ปริมาณการขนส่งสินค้า (แยกตามประเภทของรถบรรทุก) ของพื้นที่ศึกษาในอนาคตพบว่า รถบรรทุกเล็ก 4 ล้อ มีสัดส่วนการขนส่งมากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 63.58 และรองลงมาคือ รถบรรทุกกลาง 6 ล้อ รถบรรทุกพ่วง รถบรรทุก 10 ล้อ รถบรรทุกกึ่งพ่วง คิดเป็นร้อยละ 12.09 8.70 8.02 และ 7.61 ตามลำดับ และผลการคาดการณ์จำนวนพนักงานขับรถบรรทุกบนโครงข่ายถนนในระเบียงเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออกของประเทศไทยพบว่า กรณีไม่มีการพัฒนา EEC มีจำนวนพนักงานขับรถบรรทุกในพื้นที่ศึกษาเท่ากับ 52,775 60,032 65,364 และ 71,926 คน ในปี พ.ศ. 2564 2574 2584 และ พ.ศ. 2594 ตามลำดับ ด้วยอัตราการขยายตัวเฉลี่ยร้อยละ 1.0373 ต่อปี แต่เมื่อมีการพัฒนา EEC พบว่า จะมีจำนวนพนักงานขับรถบรรทุกเพิ่มขึ้นเป็น 52,791 60,394 66,541 และ 74,153 คน ในปี พ.ศ. 2564 2574 2584 และ พ.ศ. 2594 ตามลำดับ ด้วยอัตราการขยายตัวเฉลี่ยร้อยละ 1.1391 ต่อปี ซึ่งเพิ่มขึ้นจากกรณีไม่มีการพัฒนา EEC เท่ากับ 16 362 1,177 และ 2,227 คน หรือคิดเป็นร้อยละ 0.0303 0.6030 1.8007 และ 3.0962 ตามลำดับ

ISSN 2672-9369 (Online)

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัย ขอกราบขอบพระคุณ แหล่งทุนวิจัยจาก "โครงการยกระดับวิชาชีพพนักงานขับรถขนส่งสินค้าและวัสดุเพื่อรองรับระบบโลจิสติกส์ใน EEC ระยะที่ 1" มหาวิทยาลัยพะเยา ที่ได้ให้การสนับสนุนการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ และขอขอบพระคุณหน่วยงานต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง ที่ให้ความอนุเคราะห์ในด้านข้อมูลและคำปรึกษา เพื่อให้งานวิจัยในครั้งนี้ประสบความสำเร็จได้ด้วยดี

References

[1] The Eastern Economic Corridor Office. (2020). **Progress Report on the Development of the Eastern Special Development Zone**. Access (10 January 2021). Available (https://www.eeco.or.th/th/filedownload/1681/f8c7120357518db49151f435d3eb3061.pdf)

[2] Mukundan, S. (2017). Analytics in HR A Snapshot View. **International Journal of Engineering Technology, Management and Applied Sciences**. Vol. 5, Issue 7, pp. 597-601

[3] Taha, A. H. (2017). **Operations Research An Introduction, Tenth Edition**. Malaysia: Pearson Education

[4] Bowersox, D. J., Closs, D. J., and Cooper, M. B. (2009). **Supply Chain Logistics Management**. New York: McGraw-Hill/Irwin

[5] Hutchinson, B. G. (1974). **Principles of Urban Transport Systems Planning**. Washington, D.C.: Scripta

[6] Yagi, S. and Mohammadian, A. K. (2010). An Activity-Based Microsimulation Model of Travel Demand in the Jakarta Metropolitan Area. **Journal of Choice Modelling**. Vol. 3, No. 1, pp. 32-57

[7] Office of Transport and Traffic Policy and planning. (2018). **Travel Demand Survey**. Bangkok: Office of Transport and Traffic Policy and Planning

[8] Kaewwichian, P. and Tanwanichkul, L. (2018). Method of Trip-Chaining and Tour Formation for Travel Demand Model Development. **RMUTI JOURNAL Science and Technology**. Vol. 11, No. 1, pp. 57-68

[9] Meechaiyo, B. and Sangsrichan, C. (2019). Developing Transportation System Strategic Plan for Sustainable Community Development: Naresuan University Case Study. **Naresuan University Engineering Journal**. Vol. 14, Issue 2, pp. 1-13

[10] Ortúzar, J. D. and Willumsen, L. G. (1990). **Modeling Transport**. New York: John Wiley & Sons

[11] Brustlin, V. H. (2007). **Transportation Demand Management Plan**. Verginia: University of Verginia

[12] Steinhoff, M. and Harpring, J. (2008). **Transportation and Sustainability on the Indiana University**. Bloomington: Bloomington Campus, Indiana University

[13] Comsis Corporation. (1983). **UTPS Highway Network Development Guide**. Washington, D.C.: US Department of Transportation, Federal Highway Administration

[14] The Eastern Economic Corridor Office. (2018). **Infrastructure Development Action Plan Support the development of the Eastern Special Development Zone**. Access (20 January 2021). Available (https://www.eeco.or.th/web-upload/filecenter/untitled%20folder/EEC009.pdf)

[15] Department of Highways. (2016). **Average Annual Daily Traffic on Highways**. Bangkok: Department of Highways

[16] Office of Transport and Traffic Policy and Planning. (2017). **A Study of Logistics Network System to Support the Development of the Special Economic Zone (Super Cluster) and the Country's Trade Gateway**. Bangkok: Office of Transport and Traffic Policy and planning

ISSN 2672-9369 (Online)

เปรียบเทียบกำแพงกันดินจากอิฐประสานแบบก่อครึ่งแผ่นจุดต่อแห้งเสริมแรงด้วยวัสดุ GFRP และเหล็กสตัดเกลียว

Comparison of Retaining Walls from Half-Panel Interlocking Bricks with Dry Joints Reinforced with GFRP Material and Stud Steel

อัตพล บุบพิ[1] ปราชญ์ อมรภิญโญ[1*] และจารึก ถีระวงษ์[2]

Attaphol Bubpi[1] Prach Amornpinyo[1*] and Jaruek Teerawong[2]

Received: *June 30, 2022;* ***Revised:*** *July 26, 2022;* ***Accepted:*** *July 27, 2022*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการเปรียบเทียบแบบจำลองกำแพงกันดินอิฐประสานแบบก่อครึ่งแผ่นจุดต่อแห้งเสริมแรงด้วยวัสดุ GFRP และเหล็กสตัดเกลียว เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเคลื่อนตัวในแนวราบของกำแพงกันดิน โดยกำแพงกันดินมีความสูง 1.60 เมตร กว้าง 2.00 เมตร เสริมแรงด้วยวัสดุ GFRP และเหล็กสตัดเกลียวให้แรงอัดที่ 10 20 และ 30 ปอนด์ มีการจำลองให้แรงดันดินด้านข้างผ่านการทรุดตัวของทรายภายในโมลเหล็กและมีการวัดค่าการเคลื่อนที่ในแนวราบของกำแพงกันดิน ผลการทดสอบกำแพงกันดินอิฐประสานแบบก่อครึ่งแผ่นจุดต่อแห้งเสริมแรงด้วยวัสดุ GFRP มีค่าการเคลื่อนตัวในแนวราบสูงสุดที่ 4.87 3.82 และ 3.25 มิลลิเมตร ตามลำดับ และผลการทดสอบกำแพงกันดินอิฐประสานเสริมแรงด้วยเหล็กสตัดเกลียว มีค่าการเคลื่อนตัวในแนวราบสูงสุดที่ 7.05 5.40 และ 4.74 มิลลิเมตร ตามลำดับ และผลการเปรียบเทียบการเสริมแรงด้วยวัสดุ GFRP มีการเคลื่อนที่ในแนวราบน้อยกว่าแบบเสริมแรงด้วยเหล็กสตัดเกลียว 30.92 29.26 และ 31.33 % ตามลำดับ

คำสำคัญ : กำแพงกันดิน; GFRP; จุดต่อแห้ง

[1] *คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น*

[2] *คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น*

[1] *Faculty of Techmical Education, Rajamangala University of Technology Isan, Khonkaen Campus*

[2] *Department of Civil Engineering, Khon Kaen University*

[*] *Corresponding Author, Tel. 08 9419 5555, E - mail: prach.am@rmuti.ac.th*

Abstract

This research aimed to compare a half-panel interlocking brick retaining wall model reinforced with GFRP material against one reinforced with steel stud. To study the behavior of horizontal movement of the retaining walls, a model with the size of 1.60 meter height and 2.00 meter width was reinforced with GFRP material and steel stud of compressive strength of 10, 20, and 30 lbs. Lateral soil pressure was applied and it transmitted the settlement of sand in the steel model after which its horizontal displacement was considered. The test results of the half-panel interlocking bricks with dry junction reinforced with GFRP material had the highest horizontal displacement values of 4.87, 3.82, and 3.25 millimeters, respectively, and showed higher values than those of steel stud reinforced samples by 4.74, 5.40, and 7.05 millimeter, respectively. The GFRP reinforced material showed less horizontal movement compared to those of reinforced with steel stud by 30.92, 29.26, and 31.33 %, respectively.

Keywords: Retaining Wall; GFRP; Dry Joint Masonry

บทนำ

การก่อสร้างอาคารบ้านเรือน หรือสิ่งปลูกสร้างต่าง ๆ ในปัจจุบัน มักพบการถมดินที่สูงขึ้น เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาน้ำท่วมขัง หรือเพื่อความสวยงาม และสิ่งที่ตามมาคือ ปัญหาการพังทลายของดินหรือการสไลด์ของดินที่ถมใหม่อยู่เสมอ ดังนั้นวิศวกรผู้ออกแบบควรคำนึงถึง ความแข็งแรงของกำแพงกันดิน (Retaining Walls) ซึ่งถือเป็นรูปแบบโครงสร้างที่ต้องได้รับการออกแบบให้มีความทนทานเป็นพิเศษ กำแพงกันดินสามารถจำแนกออกเป็น 5 ชนิด [1]

1. Gravity Wall นิยมนำมาก่อสร้างในงานกันดินสำหรับจัดภูมิทัศน์ งานกันดินตามริมตลิ่ง หรือบริเวณเชิงเขา เพื่อป้องกันดินสไลด์ และดินถล่ม
2. Piling Wall กำแพงกันดินชนิดนี้ส่วนใหญ่จะใช้เป็นเหล็กชีทไพล์ เหมาะกับการป้องกันดินสไลด์ตามแนวตลิ่ง และงานฐานรากชั้นใต้ดินของอาคารขนาดใหญ่
3. Cantilever Wall คล้ายกันกับ Gravity Wall แต่มีความแตกต่างกันที่ ต้องเพิ่มคานด้านล่างให้ยื่นเข้าไปในดินของฝั่งที่มีระดับสูงกว่า จึงจะสามารถรับแรงดันได้ดี และมีความมั่นคงแข็งแรงกว่า Gravity Wall
4. Anchored Wall ความพิเศษของลักษณะการก่อสร้างกำแพงดินชนิดนี้จะอยู่ที่มีการใช้สมอช่วยในการยึดกำแพง เพื่อเพิ่มแรงต้านให้กับกำแพง
5. Diaphragm Wall เป็นระบบที่ใช้คอนกรีตหล่อในที่ คล้ายคลึงการทำเสาเข็มเจาะระบบเปียก โดยเหมาะสำหรับกับงานฐานรากชั้นใต้ดินของอาคารขนาดใหญ่

โครงสร้างกำแพงกันดิน มีจุดประสงค์หลักสร้างขึ้นเพื่อต้านทานแรงดันด้านข้างของมวลดิน หรือการไหล เช่น โคลน และน้ำ เมื่อมีการก่อสร้างหรือสภาพธรรมชาติที่เปลี่ยนแปลงไป แล้วทำให้เกิดระดับดินหรือน้ำที่ต่างกัน เพื่อป้องกันการเคลื่อนตัวของโครงสร้างดินถม และยังเพื่อความมั่นคงให้โครงสร้างต่าง ๆ ที่อยู่บริเวณใกล้เคียง นอกจากนี้แล้วชนิดของดินที่อยู่บริเวณโดยรอบกำแพงกันดิน หรือแม้แต่ความแข็งแรงของโครงสร้างที่อยู่ใต้กำแพงกันดิน ส่งผลต่อการเคลื่อนตัวในของกำแพงกันดินที่แตกต่างกัน [2] - [4]

โครงสร้างกันดินหรือกำแพงกันดิน ส่วนใหญ่แล้วเป็นกำแพงกันดินโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก เพื่อความมั่นคงและแข็งแรงทนทานต่อการใช้งาน แต่มีกำแพงกันดินอีกหลากหลายรูปแบบที่น่าสนใจ เช่น

ISSN 2672-9369 (Online)

กำแพงกันดินคอนกรีตที่ถูกเสริมแรงด้วยวัสดุอื่น ๆ [5] - [8] กำแพงกันดินแบบแห้ง (Dry Joint Retaining Walls) ที่ใช้วัสดุที่แตกต่างกัน [9] - [13] ซึ่งในอดีตการทำกำแพงกันดินแบบแห้งนิยมก่อด้วยหินแห้ง (Dry Stone Masonry) เป็นการวางหินซ้อนทับกันโดยไม่ใช้ปูน ชนิดของหินที่ใช้จะแตกต่างกันออกไป ซึ่งอิฐบล็อกประสานเป็นวัสดุอีกชนิดหนึ่ง ที่น่าสนใจในการนำมาทำกำแพงกันดินแบบแห้ง เนื่องจากสามารถผลิตขึ้นในชุมชนและยังมีมาตรฐาน มผช. 602-2547 [14] เป็นตัวควบคุมคุณภาพ และสามารถหาได้ง่ายในแต่ละท้องถิ่น อีกทั้งยังเป็นการส่งเสริมการใช้วัสดุของชุมชนในงานวิศวกรรม ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะศึกษาถึงพฤติกรรมของกำแพงกันดินแบบแห้ง โดยใช้อิฐบล็อกประสาน

GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer) เป็นผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ใส่วัสดุอื่นเพื่อเสริมความแข็งแรงมีวัสดุมากกว่า 2 ชนิด ประสานกัน วัสดุที่นำมาเสริมแรงให้พลาสติกคือ ใยแก้ว ซึ่งมีลักษณะอ่อนนุ่มแต่เหนียว ทนความร้อนสูง โดยมีคุณสมบัติ ดังนี้

1. ไม่เป็นสนิม และทนต่อการกัดกร่อน
2. ทนความร้อนได้ดีมาก สามารถทนอุณหภูมิตั้งแต่ -30 ถึง +120 ขึ้นอยู่กับชนิดของเรซิ่นที่เลือกใช้
3. น้ำหนักเบา ด้วยน้ำหนักที่เบากว่าเหล็กถึง 4 เท่า ทำให้สะดวกต่อการยก ช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายในการประกอบและติดตั้ง
4. โครงสร้างแข็งแรงให้ตัวได้
5. ไม่เน่าเปื่อยหรือผุกร่อนทนทุกสภาวะสิ่งแวดล้อมคงรูปเดิมได้ดี ไม่มีการหด
6. ผิวเรียบเนียนทำให้แรงเสียดทานต่ำ
7. เป็นฉนวนไฟฟ้าและไม่นำความร้อน

ในด้านการเสริมกำลังของกำแพงกันดิน โดยทั่วไปนิยมเสริมด้วยเหล็ก แต่ในปัจจุบันมีการค้นคว้าเพื่อเพิ่มทางเลือกในการเสริมกำลัง โดยการใช้วัสดุ GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer) แทนการเสริมเหล็กที่ถูกใช้อย่างแพร่หลายและเป็นระยะเวลายาวนาน เนื่องจากวัสดุ GFRP มีความสามารถในการทนทานต่อแรงกัดกร่อนของคลอไรด์ กล่าวคือ ไม่เป็นสนิม และมีความต้านทานแรงดึงสูงกว่าเหล็กเสริม อย่างไรก็ตามวัสดุ GFRP มีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นต่ำและพฤติกรรมเปราะกว่าเหล็กเสริมธรรมดา [15] - [19] ดังนั้นจึงมีความน่าสนใจในการศึกษาความแตกต่างของพฤติกรรมการเสริมแรงด้วยวัสดุ GFRP และเหล็กสตัดเกลียวในกำแพงกันดิน

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาในเรื่องพฤติกรรมการเคลื่อนตัวในแนวราบของกำแพงกันดินจากอิฐประสานแบบครึ่งแผ่นมีเสริมแรงด้วยวัสดุ GFRP และเหล็กสตัดเกลียว โดยที่กำแพงขนาดความสูง 1.60 เมตร กว้าง 2.00 เมตร เสริมแรงด้วยวัสดุ GFRP และเหล็กสตัดเกลียวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร จำนวน 16 เส้น โดยให้แรงที่ 10 20 และ 30 ปอนด์ ซึ่งมีแผนการดำเนินงานดังรูปที่ 1

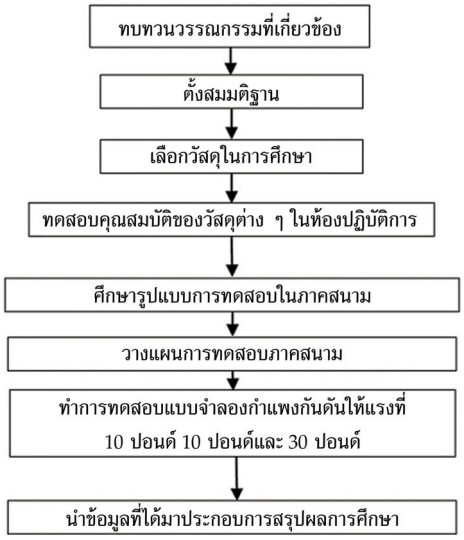
วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ มีคุณสมบัติดังนี้

1. อิฐประสาน

อิฐประสานมาตรฐาน มผช. 602-2547 มีขนาดกว้างxยาวxสูง เท่ากับ 12.5x25x10 เซนติเมตร น้ำหนักต่อก้อนประมาณ 5.1 กิโลกรัม กำลังต้านทานแรงอัดได้ค่า 8.05 เมกะปาสคาล ดังรูปที่ 2

2. ทราย

ทรายมาตรฐาน ASTM C136-06 [20] มีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ FM = 1.78 มีหน่วยน้ำหนักเท่ากับ 1,495 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ดังรูปที่ 3



รูปที่ 1 แผนภาพขั้นตอนในการดำเนินงาน

รูปที่ 2 อิฐประสาน

รูปที่ 3 ทราย

3. **วัสดุ GFRP**

วัสดุ GFRP มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร หาคุณสมบัติโดยการนำมาทดสอบกำลังต้านทานแรงดึง โดยผลการทดสอบได้ ดังตารางที่ 1

ISSN 2672-9369 (Online)

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบกำลังดึงของวัสดุ GFRP

รายการ	ตัวอย่าง			ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	
พื้นที่หน้าตัด (cm^2)	1.13	1.13	1.13	1.13
Yield Stress (ksc)	7,665	7,997	7,952	7,871
Ultimater Stress (ksc)	9,046	9,833	9,584	9,488
Elongation	52 %	52 %	52 %	52.7 %

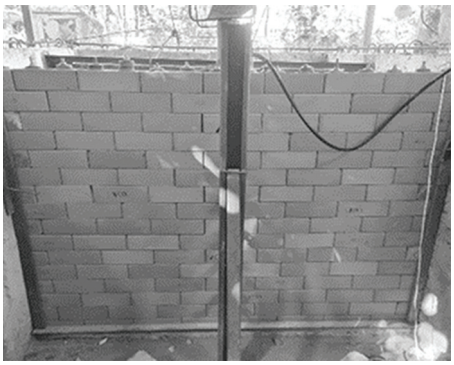
4. **เหล็กสตัดเกลียว**

เหล็กสตัดเกลียวมาตรฐาน ASTM A193-B16. [21] มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร หาคุณสมบัติ โดยการนำมาทดสอบกำลังต้านทานแรงดึง โดยผลการทดสอบได้ ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบกำลังดึงของเหล็กสตัดเกลียว

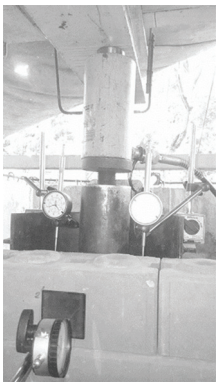
รายการ	ตัวอย่าง			ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	
พื้นที่หน้าตัด (cm^2)	1.13	1.13	1.13	1.13
Yield Stress (ksc)	3,185	3,097	3,008	3,096
Ultimater Stress (ksc)	4,469	4,424	4,433	4,442
Elongation	25 %	25 %	30 %	26.6 %

ทำการทดสอบแบบจำลองกำแพงกันดินขนาดความสูง 1.60 เมตร กว้าง 2.00 เมตร ดังรูปที่ 4(ก) โดยการให้แรงเสริมกำลังเข้าไปในโครงสร้าง GFRP และเหล็กสตัดเกลียวที่ 10 20 และ 30 ปอนด์ ทำการทดสอบโดยควบคุมการทรุดตัวของทรายถมด้านหลังกำแพงและควบคุมการทรุดตัวของทรายในแนวดิ่งทุก ๆ 1 มิลลิเมตร จนทรายถมทรุดตัวสูงสุดที่ 25 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 4(ข) ระหว่างนั้นมีการวัดค่าการเคลื่อนที่ในแนวราบของกำแพงกันดิน โดยใช้ Dial Gauge จำนวน 7 ตำแหน่ง เพื่อดูแนวโน้มพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของโครงสร้าง ดังรูปที่ 4(ค) ทำการบันทึกการเคลื่อนที่ในแนวราบกำแพงกันดินที่เสริมโครงสร้างภายในด้วยวัสดุ GFRP และเหล็กสตัดเกลียว เพื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมการเคลื่อนตัวในกรณีที่ใช้วัสดุเสริมแรงที่แตกต่างกัน



(ก) กำแพงก่ออิฐประสาน

รูปที่ 4 การติดตั้งตัวอย่างการทดสอบ



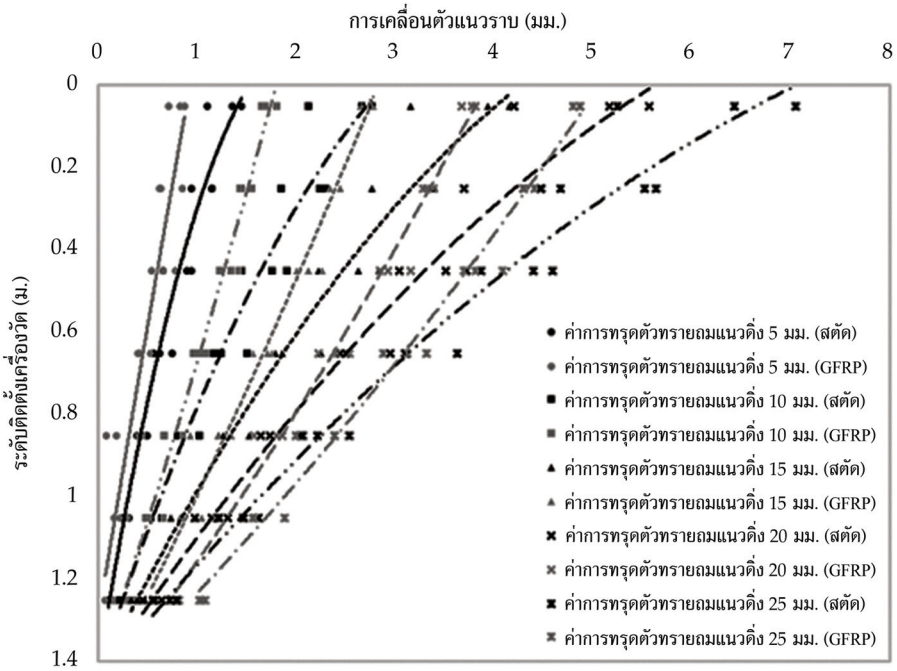
(ข) การติดตั้ง Dial Gauge ควบคุมการทรุดตัวของทรายถมในแนวดิ่ง

(ค) การติดตั้ง Dial Gauge ในแนวราบ 7 ตัว

รูปที่ 4 การติดตั้งตัวอย่างการทดสอบ (ต่อ)

ผลการทดลองและวิจารณ์

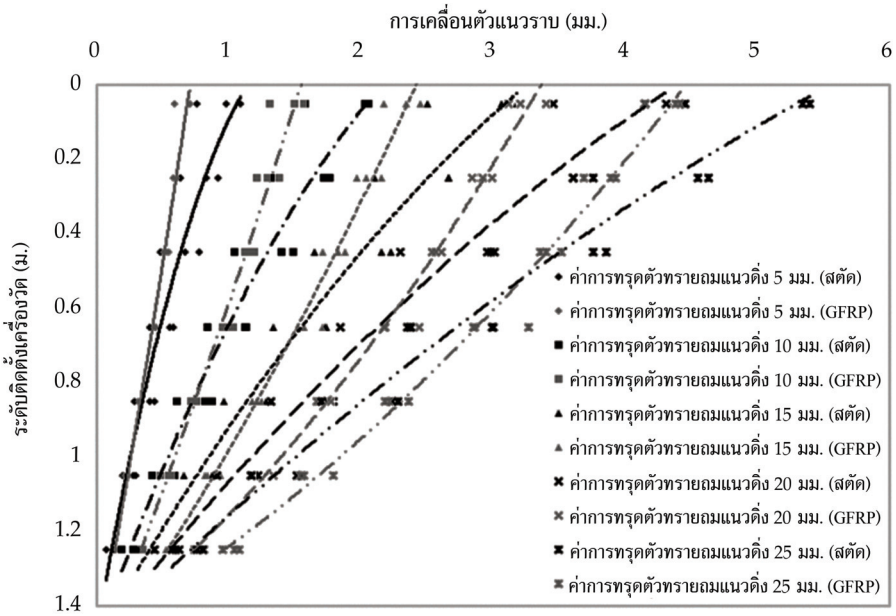
การทดสอบแบบจำลองกำแพงกันดินอิฐประสานเสริมแรงด้วยวัสดุ GFRP และเหล็กสตัดเกลียว โดยที่กำแพงมีความสูง 1.60 เมตร กว้าง 2.00 เมตร เสริมแรงด้วยวัสดุ GFRP และเหล็กสตัดเกลียวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร จำนวน 16 เส้น โดยให้แรงที่ 10 20 และ 30 ปอนด์ ได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 กราฟเปรียบเทียบการเคลื่อนที่ในแนวราบของกำแพงกันดินอิฐประสานเสริมแรงด้วยวัสดุ GFRP และเหล็กสตัดเกลียวให้แรงที่ 10 ปอนด์

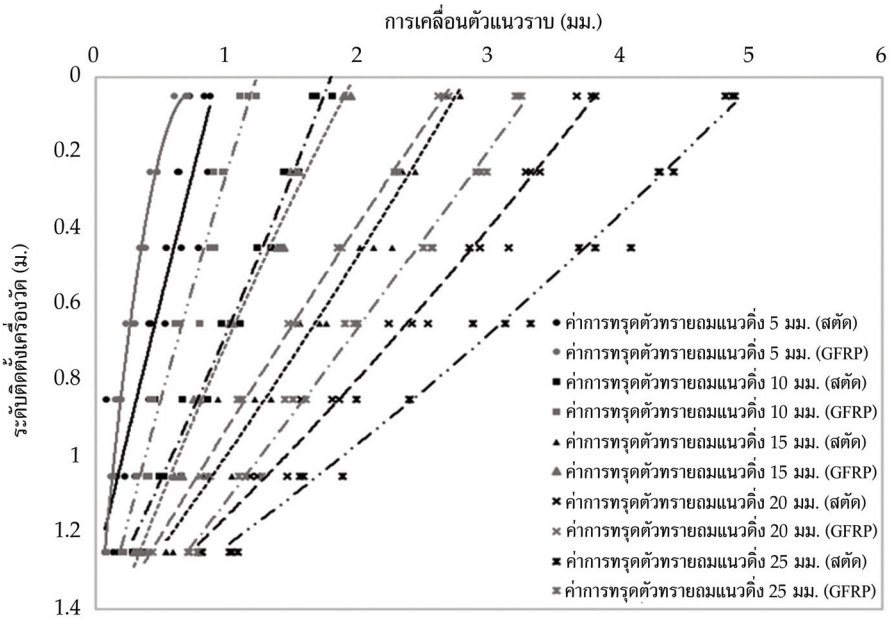
จากรูปที่ 9 กราฟเปรียบเทียบการเคลื่อนที่ในแนวราบของกำแพงกันดินอิฐประสานเสริมแรงด้วยวัสดุ GFRP และเหล็กสตัดเกลียวให้แรงที่ 10 ปอนด์ การเสริมแรงด้วยวัสดุ GFRP มีการเคลื่อนที่ในแนวราบสูงสุดที่ 4.87 มิลลิเมตร การเสริมแรงด้วยเหล็กสตัดเกลียวมีการเคลื่อนที่ในแนวราบสูงสุดที่ 7.05 มิลลิเมตร เมื่อนำมาเปรียบเทียบจะเห็นได้ว่ามีค่าการเคลื่อนตัวต่างกันที่ 2.18 มิลลิเมตร

ISSN 2672-9369 (Online)



รูปที่ 10 กราฟเปรียบเทียบการเคลื่อนที่ในแนวราบของกำแพงกันดินอิฐประสานเสริมแรงด้วยวัสดุ GFRP และเหล็กสตัดเกลียวให้แรงที่ 20 ปอนด์

จากรูปที่ 10 กราฟเปรียบเทียบการเคลื่อนที่ในแนวราบของกำแพงกันดินอิฐประสานเสริมแรงด้วยวัสดุ GFRP และเหล็กสตัดเกลียวให้แรงที่ 20 ปอนด์ การเสริมแรงด้วยวัสดุ GFRP มีการเคลื่อนที่ในแนวราบสูงสุดที่ 3.82 มิลลิเมตร การเสริมแรงด้วยเหล็กสตัดเกลียวมีการเคลื่อนที่ในแนวราบสูงสุดที่ 5.40 มิลลิเมตร เมื่อนำมาเปรียบเทียบจะเห็นได้ว่ามีค่าการเคลื่อนตัวต่างกันที่ 1.58 มิลลิเมตร



รูปที่ 11 กราฟเปรียบเทียบการเคลื่อนที่ในแนวราบของกำแพงกันดินอิฐประสานเสริมแรงด้วยวัสดุ GFRP และเหล็กสตัดเกลียวให้แรงที่ 30 ปอนด์

จากรูปที่ 11 กราฟเปรียบเทียบการเคลื่อนที่ในแนวราบของกำแพงกันดินอิฐประสานเสริมแรงด้วยวัสดุ GFRP และเหล็กสตัดเกลียวให้แรงที่ 30 ปอนด์ การเสริมแรงด้วยวัสดุ GFRP มีการเคลื่อนที่ในแนวราบสูงสุดที่ 3.25 มิลลิเมตร การเสริมแรงด้วยเหล็กสตัดมีการเคลื่อนที่ในแนวราบสูงสุดที่ 4.74 มิลลิเมตร เมื่อนำมาเปรียบเทียบจะเห็นได้ว่ามีค่าการเคลื่อนตัวต่างกันที่ 1.49 มิลลิเมตร

การศึกษากำแพงกันดินที่ทำการทดสอบ เป็นลักษณะของคานยื่น โดยตัวโครงสร้างของกำแพงต้องมีระยะการโก่งตัวไม่เกิน L/360 [22] ซึ่งผลการคำนวณมีค่าเท่ากับ 4.44 มิลลิเมตร ซึ่งผลการศึกษาอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมให้ เมื่อพิจารณาจากผลการทดสอบทั้ง 3 รูปแบบที่เสริมด้วยวัสดุ GFRP และเหล็กสตัดเกลียวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร จำนวน 16 เส้นมีการเสริมแรงที่ 10 20 และ 30 ปอนด์ ผลการทดสอบที่ผ่านเกณฑ์และเหมาะกับการนำไปใช้งาน คือ กำแพงกันดินที่เสริมด้วยวัสดุ GFRP และเสริมแรงที่ 20 และ 30 ปอนด์ เพราะมีค่าการเคลื่อนตัวในแนวราบน้อยกว่าเกณฑ์ที่ยอมให้

ทางด้านการพิจารณาการเลือกเสริมแรงที่ 10 20 และ 30 ปอนด์ เนื่องจากเป็นแรงอัดที่เหมาะสมสำหรับกำแพงกันดินก่ออิฐประสานครึ่งแผ่น ถ้าแรงอัดที่กระทำมีค่าสูงเกินไปจะทำให้กำแพงกันดินก่ออิฐประสานครึ่งแผ่นแตกร้าว

ข้อพิจารณาเพิ่มเติมในการเลือกใช้วัสดุ GFRP คือ มีค่ายืดหยุ่นสูงกว่าเหล็ก ซึ่งส่งผลต่อการกำลังต้านทานแรงเฉือนได้ดี เมื่อเทียบกับเหล็กเสริมทั่วไปและการเสียรูปที่ไม่ถาวรสูงสุดถึง 80 % ส่วนการเสียรูปจริงมีเพียง 20 % นั้นเกิดความเสียหายเนื่องจากแรงเฉือน อีกทั้งวัสดุ GFRP ยังมีความสามารถในการทนทานต่อแรงกัดกร่อนของคลอไรด์ ไม่เป็นสนิม และมีความต้านทานแรงดึงสูงกว่าเหล็ก ดังนั้นวัสดุ GFRP จึงเป็นวัสดุทางเลือกที่น่าสนใจในโครงสร้างกำแพงกันดิน

อย่างไรก็ตาม การใช้วัสดุเสริมกำลังในกำแพงกันดินแบบจุดต่อแห้ง จะส่งผลให้กำแพงกันดินแบบจุดต่อแห้งสามารถต้านทานการเคลื่อนที่ในแนวราบได้ดีกว่า การไม่เสริมกำลังในกำแพงกันดินแบบจุดต่อแห้ง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Pongsagorn, P., Tanakrit, B., and Attaphol, B. [23] ที่ศึกษาถึงผลของการเสริมเหล็กเส้นเข้าไปในกำแพงกันดินแบบแห้งโดยใช้อิฐบล็อกนาโน และการเพิ่มกำลังรับแรงอัดเข้าไปในวัสดุเสริมในโครงสร้างกำแพงแบบจุดต่อแห้ง ยังส่งผลต่อพฤติกรรมการเคลื่อนตัวในแนวราบอีกด้วย

ด้านงบประมาณในการก่อสร้างวัสดุ GFRP ขนาด 12 มิลลิเมตร ราคาประมาณ 24 บาทต่อเมตร ส่วนราคาเหล็กสตัดเกลียวขนาด 12 มิลลิเมตร ราคาประมาณ 100 บาทต่อเมตร จะเห็นได้ว่าด้านความคุ้มทุนทางด้านเศรษฐศาสตร์การใช้เลือกวัสดุ GFRP ในการเสริมแรงในกำแพงกันดินจากอิฐประสานแบบก่อครึ่งแผ่นจุดต่อแห้ง นอกจากจะมีความสามารถในการต้านทานแรงที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ในแนวราบได้ดีกว่าการเสริมแรงด้วยเหล็กสตัดเกลียวแล้ว ยังได้เปรียบเรื่องของความคุ้มทุนทางด้านเศรษฐศาสตร์ด้วย

สรุปและอภิปรายผล

จากการทดสอบภาคสนามแบบจำลองกำแพงกันดินอิฐประสานเสริมกำลังด้วยวัสดุ GFRP และเหล็กสตัดเกลียวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร จำนวน 16 เส้น ได้ผลการทดสอบดังนี้

1. แบบให้แรงที่ 10 ปอนด์ การเสริมแรงด้วยวัสดุ GFRP มีการเคลื่อนที่ในแนวราบสูงสุดที่ 4.87 มิลลิเมตร การเสริมแรงด้วยเหล็กสตัดเกลียวมีการเคลื่อนที่ในแนวราบสูงสุดที่ 7.05 มิลลิเมตร เมื่อนำมาเปรียบเทียบจะเห็นได้ว่าการเสริมแรงด้วยวัสดุ GFRP มีการเคลื่อนที่ในแนวราบน้อยกว่าแบบเสริมแรงด้วยเหล็กสตัดเกลียว 30.92 %

2. แบบให้แรงที่ 20 ปอนด์ การเสริมแรงด้วยวัสดุ GFRP มีการเคลื่อนที่ในแนวราบสูงสุดที่ 3.82 มิลลิเมตร การเสริมแรงด้วยเหล็กสตัดเกลียวมีการเคลื่อนที่ในแนวราบสูงสุดที่ 5.40 มิลลิเมตร เมื่อนำมาเปรียบเทียบจะเห็นได้ว่าการเสริมแรงด้วยวัสดุ GFRP มีการเคลื่อนที่ในแนวราบน้อยกว่าแบบเสริมแรงด้วยเหล็กสตัดเกลียว 29.26 %

ISSN 2672-9369 (Online)

3. แบบให้แรงที่ 30 ปอนด์ การเสริมแรงด้วยวัสดุ GFRP มีการเคลื่อนที่ในแนวราบสูงสุดที่ 3.25 มิลลิเมตร การเสริมแรงด้วยเหล็กสตัดเกลียวมีการเคลื่อนที่ในแนวราบสูงสุดที่ 4.74 มิลลิเมตร เมื่อนำมาเปรียบเทียบจะเห็นได้ว่าการเสริมแรงด้วยวัสดุ GFRP มีการเคลื่อนที่ในแนวราบน้อยกว่าแบบเสริมแรงด้วยเหล็กสตัดเกลียว 31.33 %

จากผลการทดสอบทั้ง 3 รูปแบบที่ศึกษาจะเห็นได้ว่า โครงสร้างกำแพงกันดินอิฐประสานแบบจุดต่อแห้งเสริมกำลังด้วย GFRP มีค่าการเคลื่อนตัวในแนวราบน้อยกว่าโครงสร้างกำแพงกันดินอิฐประสานแบบจุดต่อแห้งเสริมกำลังด้วยเหล็กสตัดเกลียวอยู่ที่ 30.50 %

เมื่อนำวัสดุ GFRP มาใช้ในการเสริมแรงในโครงสร้างของกำแพงกันดินจะมีค่าการเคลื่อนที่ของกำแพงกันดินในแนวราบน้อยกว่าการเสริมแรงด้วยเหล็กสตัดเกลียว อีกทั้งวัสดุ GFRP ยังมีความสามารถในการทนทานต่อแรงกัดกร่อนของคลอไรด์ ไม่เป็นสนิม และมีความต้านทานแรงดึงสูงกว่าเหล็ก ดังนั้นวัสดุ GFRP จึงเป็นวัสดุทางเลือกที่น่าสนใจในโครงสร้างกำแพงกันดิน

ข้อเสนอแนะในการต่อยอดงานวิจัยในอนาคต เนื่องจากปัจจุบันมีวัสดุ FRP หลายประเภทที่ถูกใช้นำมาเป็นทางเลือกในการเสริมแรงในงานคอนกรีตเสริมเหล็ก ยกตัวอย่าง เช่น Aramid Fiber Reinforced Polymer (AFRP), Basalt Fiber Reinforced Polymer (BFRP), Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) และ Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) จึงมีความน่าสนใจที่จะนำวัสดุทางเลือกเหล่านี้มาทำการศึกษาพฤติกรรมการรับแรงในรูปแบบต่าง ๆ

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ สาขาครุศาสตร์อุตสาหกรรมโยธา คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น ที่ให้ความช่วยเหลือในการทำวิจัยฉบับนี้

References

[1] Suksan, H. (2552). **Foundation Engineering**. Krongchang Printing Co., Ltd.

[2] Prongmanee, N. and Noulmanee, A. (2020). Properties of Chiang Khruea Lateritic Soil and Their Applications in Civil Engineering. **RMUTI Journal Science and Technology**. Vol. 13, No. 3, pp. 14-30 (in Thai)

[3] Rahmaninezhad, S. M. and Han, J. (2021). Lateral Facing Deflections of Geosynthetic-Reinforced Retaining Walls Under Footing Loading. **Transportation Geotechnics**. Vol. 30, p. 100594. DOI: 10.1016/J.TRGEO.2021.100594

[4] Gao, J., Liu, L., Zhang, Y., and Xie, X. (2022). Deformation Mechanism and Soil Evolution Analysis Based on Different Types Geogrid Reinforced Foundation. **Construction and Building Materials**. Vol. 331, p. 127322. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127322

[5] Li, L. H., Yu, C. D., Xiao, H. L., Feng, W. Q., Ma, Q., and Yin, J. H. (2020). Experimental Study on the Reinforced Fly Ash and Sand Retaining Wall Under Static Load. **Construction and Building Materials**. Vol. 248, p. 118678. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118678

[6] Arefnia, A., Dehghanbanadaki, A., and Kassim, K. A. (2021). Sustainable Implementation of Recycled Tire-Derived Aggregate as a Lightweight Backfill for Retaining Walls. **KSCE Journal of Civil Engineering**. Vol. 25, No. 11, pp. 4196-4206. DOI: 10.1007/s12205-021-0218-3

[7] Wang, J. Q., Zhang, L. L., Tang, Y., and Huang, S. B. (2021). Influence of Reinforcement-Arrangements on Dynamic Response of Geogrid-Reinforced Foundation Under Repeated Loading. **Construction and Building Materials**. Vol. 274, p. 122093. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.122093

[8] Liu, S., Fan, K., and Xu, Si. (2021). Field Study of a Retaining Wall Constructed with Clay-Filled Soilbags. **Geotextiles and Geomembranes.** Vol. 47, Issue 1, pp. 87-94. DOI: 10.1016/j.geotexmem.2018.11.001

[9] Villemus, B., Morel, J. C., and Boutin, C. (2007). Experimental Assessment of Dry Stone Retaining Wall Stability on a Rigid Foundation. **Engineering Structures**. Vol. 29, No. 9, pp. 2124-2132

[10] Colas, A. S., Morel, J. C., and Garnier, D. (2010). Full-Scale Field Trials to Assess Dry-Stone Retaining Wall Stability. **Engineering Structures**. Vol. 32, Issue 5, pp. 1215-1222

[11] Mundell, C., McCombie, P., Ms, A., Harkness, J., Walker, P., and Mieaust, C. (2010). Behaviour of Drystone Retaining Structures. In **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings**. Vol. 163, Issue 1, pp. 3-12. DOI: 10.1680/stbu.2009.163.1.3

[12] Colas, A. S. (2013). **Productivity Model Design of Dry Joint Fastening Structures**. Doctorate of Dissertation Universite Gustave Eiffel

[13] Hanjitsuwan, S., Tho-in, T., and Phoo-ngernkham, T. (2021). Influence of NaOH Concentration and Sand to Binder Ratio on Hybrid Cement Mortar for Filled Materials in Notched Concrete Beam. **RMUTI Journal Science and Technology**. Vol. 15, No. 1, pp. 1-10 (in Thai)

[14] MSU 602/2547. (2004). **Community Product Standard**. Thai Industrial Standards Institute

[15] Nanni, A. (2003). North American Design Guidelines for Concrete Reinforcement and Strengthening Using FRP: Principles, Applications and Unresolved Issues. **Construction and Building Materials**. Vol. 17, Issue 6-7, pp. 439-446. DOI: 10.1016/S0950-0618(03)00042-4

[16] Hamzeh, L., Hassanein, A., and Galal, K. (2020). Numerical Study on the Seismic Response of GFRP and Steel Reinforced Masonry Shear Walls with Boundary Elements. **Structures**. Vol. 28, pp. 1946-1964

[17] Ceroni, F., Cuzzilla, R., and Pecce, M. (2016). Assessment of Performance of Steel and GFRP Bars as Injected Anchors in Masonry Walls. **Construction and Building Materials**. Vol. 123, pp. 78-98

[18] Ketkan, W. and Khamphala, A. (2010). A Model of Maximum Pullout Force of Bearing Reinforcement Stabilized on Compacted Sandy Soil. **RMUTI Journal**. Vol. 3, No. 1, pp. 1-9 (in Thai)

[19] Thumrongvut, J., Seangatith, S., and Kumlue, K. (2013). Tests on Structural Behaviors of Precast Partially-Prestressed Concrete Beam's Joints. **RMUTI Journal**. Vol. 6, No. 2, pp. 15-30 (in Thai)

[20] ASTM C136-06. (2015). **Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates**. Annual Book of ASTM Standard. Vol.04.02.

ISSN 2672-9369 (Online)

[21] ASTM A193 Grade B16. (2015). **A Grade Specification for Low Alloy Chromium-Molybdenum-Vanadium Steel**. Annual Book of ASTM Standard. Vol.04.02.

[22] ACI 318-19. (2019). **Building Code Requirements for Reinforced Concrete**. American Concrete Institute

[23] Pongsagorn, P., Tanakrit, B., and Attaphol, B. (2019). Strength and Behaviors of Dry-Joint Retaining Nano-Block. **International Journal of Geomate**. Vol. 16, No. 54, pp. 42-48

การสร้างคู่แฝดดิจิทัลจากการรังวัดด้วยภาพถ่ายจากโดรนเพื่อการตรวจสอบอุบัติเหตุทางจราจร

Reconstruction of Digital Twin for Traffic Accident Investigation Using Drone Photogrammetry

วสุ พลสาย[1] ชาติชาย ไวยสุระสิงห์[1*] พนกฤษณ คลังบุญครอง[1] และชุติมา ไวยสุระสิงห์[2]

Wasu Polsai[1] Chattichai Waisurasingha[1*] Pongrid Klungboonkrong[1] and Chutima Waisurasingha[2]

Received: *July 5, 2022;* ***Revised:*** *August 4, 2022;* ***Accepted:*** *August 4, 2022*

บทคัดย่อ

งานศึกษาวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์ใช้การสำรวจด้วยภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับในการบันทึกความเสียหายที่เกิดขึ้นกับยานพาหนะประเภทรถยนต์ขนาดเล็กภายหลังจากการเกิดอุบัติเหตุในรูปแบบของแบบจำลองสามมิติ และเพื่อวินิจฉัยเปรียบเทียบความสมบูรณ์แบบ (Completeness) ของแบบจำลองสามมิติที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยการสำรวจด้วยภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับที่ได้จากประมวลผลด้วยวิธีกึ่งอัตโนมัติและวิธีอัตโนมัติ โดยอาศัยความเหตุจากผู้เชี่ยวชาญด้านการสำรวจด้วยภาพถ่ายและสารสนเทศ ทั้งนี้เพราะการสำรวจด้วยภาพถ่ายในการสร้างแบบจำลองสามมิติเพื่อการย้อนรอยจำลองฉากทัศน์ที่เกิดขึ้นจริงของการเกิดอุบัติเหตุเพื่อประโยชน์ในการสืบสวนในโลกยุคสารสนเทศ เพื่อบันทึกความเสียหายที่เกิดขึ้นจริงต่อยานพาหนะอย่างครบถ้วนในรายละเอียด อีกทั้งการบันทึกภาพเหตุการณ์ในมิติการการย้อนรอยทางอุบัติเหตุที่เกิดขึ้นจึงผ่านการประยุกต์ใช้การสำรวจด้วยภาพถ่ายจึงนับเป็นนวัตกรรมชิ้นสำคัญที่ช่วยให้เกิดความมั่นใจในการเก็บหลักฐานพยานรูปแบบดิจิทัล งานศึกษาวิจัยได้มีการวินิจฉัยเปรียบเทียบความสมบูรณ์แบบผ่านการประมวลผลด้วยซอฟต์แวร์แบบรหัสเปิด ซอฟต์แวร์ราคาถูก ซอฟต์แวร์แบบมืออาชีพ และซอฟต์แวร์แบบเมฆินทร์ โดยผลลัพธ์สะท้อนให้เห็นถึงความสมบูรณ์แบบของผลลัพธ์ของซอฟต์แวร์แต่ละแบบและความถูกต้องเชิงตำแหน่งที่ได้จากการประมวลผลด้วยซอฟต์แวร์แบบมืออาชีพที่อยู่ในระดับที่ยอมรับได้

คำสำคัญ : ความสมบูรณ์แบบ; แบบจำลองสามมิติ; การวิเคราะห์แบบสำรวจ

[1] *คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น*

[2] *คณะศิลปศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง*

[1] *Faculty of Engineering, Khon Khon University*

[2] *Faculty of Liberal Arts, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang*

[*] *Corresponding Author, Tel. 08 9712 8325, E - mail: fcecws@kku.ac.th*

ISSN 2672-9369 (Online)

Abstract

The purpose of this study was to apply UAV imaging surveys to record the damage inflicted to light-vehicles following an accident in the form of a 3D model, and to compare the completeness of the three-dimensional model obtained by visual survey analysis of unmanned aerial vehicles processed by semi-automatic and automated methods based on the experts in field of photogrammetric surveying. This is because the photogrammetric surveying could be used to fully reconstruct the accident scene in terms of the vehicle details . In addition, the recorded events in the dimension of accident reconstruction could be used to realize the accident details. Therefore, this is an important innovation that could help to ensure the archiving of digital evidence. The study examined comparative integrity through open-source, low-cost, professional, and cloud-processing software. The results reflected how well each software performed. The positional accuracy obtained by professional software processing was at an acceptable level.

Keywords: Completeness; 3D Model; Survey Analysis

ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

โลกในยุคปัจจุบันกำลังอยู่ในยุคที่เรียกว่า ยุคเทคโนโลยีป่วนโลก (Disruptive Technological Era) ซึ่งเป็นยุคที่มีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างรวดเร็วในมิติของเทคโนโลยีดิจิทัล หนึ่งในนั้นคือ เทคโนโลยีคู่เสมือนดิจิทัล (Digital Twin Technology) ที่นับเป็นหนึ่งในแนวคิดสำคัญของทิศทางการพัฒนาประเทศผ่านแนวคิดในการทำสำเนาหรือแบบจำลองของสิ่งต่าง ๆ ทางกายภาพให้อยู่ในรูปแบบดิจิทัล ซึ่งต้องมีการเชื่อมต่อระหว่างวัตถุจริงและวัตถุดิจิทัลผ่านการใช้ระบบเซ็นเซอร์ที่คอยเก็บข้อมูลทางกายภาพในรูปแบบทันทีทันใด (Real-Time Data Capturing) ที่เสมือนการย้ายวัตถุในโลกกายภาพให้อยู่ในโลกเสมือนดิจิทัล แบบจำลองสามมิติเชิงเลข (3D Digital Model) ได้เข้ามามีบทบาทและเป็นเครื่องมือชิ้นสำคัญในการช่วยบันทึกฉากทัศน์ที่เกิดขึ้นจริง (Real Scenario) ของเหตุการณ์ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นบนโลก และมีส่วนสำคัญอย่างยิ่งต่อการเข้าประเมินความเสียหายอันเกิดขึ้นจากอุบัติเหตุบนท้องถนน ผ่านการใช้เทคโนโลยีการสำรวจด้วยภาพถ่ายระยะใกล้ (Close-Range Photogrammetry) ซึ่งตามนิยามแล้วจะเป็นการสำรวจด้วยภาพถ่ายที่ระยะใกล้กว่า 300 เมตร [1] โดยที่ข้อมูลภาพถ่ายเป็นได้ทั้งรูปแบบการถ่ายภาพบนพื้นดิน หรือภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากอากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial Vehicle: UAV) ทั้งนี้เพราะอุบัติเหตุคือ เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นโดยที่ไม่ได้ทันคาดคิด ไม่ว่าจะเป็นทั้งรถจักรยานยนต์ รถยนต์ ล้วนแล้วแต่เกิดอุบัติเหตุได้ทั้งสิ้น ซึ่งอุบัติเหตุต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นล้วนส่งผลกระทบต่อทรัพย์สิน ร่างกาย และจิตใจของผู้ประสบอุบัติเหตุ โดยสาเหตุที่ทำให้เกิดอุบัติเหตุ ประกอบด้วย 3 ปัจจัยหลัก ดังนี้ 1) ปัจจัยมนุษย์ (Human Factor) การตัดสินใจของผู้ขับขี่ที่มีผลต่อพฤติกรรมในระหว่างการขับขี่ 2) ปัจจัยถนนและสิ่งแวดล้อม (Road and Environment Factor) ในกรณีนี้ไม่มีสัญญาณไฟจราจรและเครื่องหมายจราจรไม่ชัดเจน และ 3) ปัจจัยด้านยานพาหนะ (The Vehicle Factor) ปัจจัยด้านยานพาหนะโดยเฉพาะอย่างยิ่งความบกพร่องทางรถยนต์ที่ไม่ได้ถูกตรวจสอบอย่างละเอียด [2]

ภายหลังจากการเกิดอุบัติเหตุทางจราจร การเข้าดำเนินการตรวจสอบสถานที่เกิดอุบัติเหตุเพื่อที่จะดำเนินการบันทึกแผนภาพการเกิดอุบัติเหตุสำหรับใช้เป็นหลักฐานในการสืบสวนอุบัติเหตุ และตรวจสอบอุบัติเหตุที่เกิดขึ้น โดยการศึกษาที่ผ่านมาในอดีตที่เกี่ยวข้องกับการใช้เทคโนโลยีการสำรวจด้วยภาพถ่ายระยะใกล้เข้ามาใช้เป็นเครื่องมือในการตรวจสอบและประเมินสถานการณ์การเกิดอุบัติเหตุที่เด่นชัดคือ การศึกษาของ [2]

ที่ได้แสดงให้เห็นถึงแนวทางในการประยุกต์ใช้การสำรวจด้วยภาพถ่ายระยะใกล้เพื่อทำการสร้างแบบจำลองสามมิติเพื่อการย้อนรอยจำลองฉากทัศน์ที่เกิดขึ้นจริงของการเกิดอุบัติเหตุเพื่อประโยชน์ในการสืบสวนในโลกยุคสารสนเทศ เพื่อบันทึกความเสียหายที่เกิดขึ้นจริงต่อยานพาหนะอย่างครบถ้วนในรายละเอียด โดยมีการทำงานควบคู่กับเครื่องมืออื่นในการตรวจสอบอุบัติเหตุ เช่น Total Station เทปวัดระยะ GPS และวิธีการรังวัดแบบต่าง ๆ ดังนั้น การบันทึกภาพเหตุการณ์ในมิติการการย้อนรอยทางอุบัติเหตุที่เกิดขึ้น ผ่านการประยุกต์ใช้การสำรวจด้วยภาพถ่ายจึงนับเป็นนวัตกรรมชิ้นสำคัญที่ช่วยให้เกิดความมั่นใจในการเก็บหลักฐานพยานรูปแบบดิจิทัล อย่างไรก็ตาม เครื่องมือเหล่านี้มีข้อบกพร่องในตัวเอง เช่น ค่าคาดเคลื่อนจากการรังวัด ค่าใช้จ่ายที่สูง ความคุ้มค่า การที่จะต้องใช้แรงงานคนเป็นจำนวนมาก และเวลาในการตรวจสอบพื้นที่ นอกจากนี้ยังไม่สามารถกลับมาตรวจสอบพื้นที่ที่เกิดอุบัติเหตุได้อีกครั้ง เมื่อข้อมูลบางอย่างขาดหายไป [3] ทั้งนี้เพราะมุมมองที่ได้จากภาพถ่ายภาคพื้นดินอาจจะทำให้เกิดความบกพร่องในการเก็บรายละเอียดข้อมูลการเกิดอุบัติเหตุ

แนวคิดการประยุกต์ใช้ศาสตร์ทางด้านการสำรวจด้วยภาพถ่ายระยะใกล้ร่วมกับการประยุกต์ใช้อากาศยานไร้คนขับ (UAV) จึงนับเป็นอีกหนึ่งแนวทางที่น่าสนใจอย่างยิ่ง ในการนำมาประยุกต์ใช้เพื่อดำเนินการสำรวจและเก็บข้อมูลที่เกี่ยวข้องภายหลังจากการเกิดอุบัติเหตุ ด้วยความคาดหวังที่จะเก็บข้อมูล ณ สถานที่เกิดเหตุให้เป็นไปอย่างรวดเร็ว ถูกต้อง และแม่นยำที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ดังนั้น [4] จึงได้ทดลองทำการเก็บข้อมูลและเปรียบเทียบการสำรวจด้วยภาพถ่ายระยะใกล้ร่วมกับการประยุกต์ใช้อากาศยานไร้คนขับ (UAV) เพื่อแสดงให้เหตุถึงบทบาทที่ควรจะเป็นในการใช้ร่วมกับอุปกรณ์ในการรังวัดต่าง ๆ และทำการประเมินความถูกต้องของแบบจำลองสามมิติในรูปแบบของความถูกต้องในเชิงตำแหน่ง ซึ่งเป็นการประเมินความถูกต้องในเชิงปริมาณซึ่งพบว่า อยู่ในเกณฑ์ที่น่าสนใจ อย่างไรก็ตามค่าความถูกต้องเหล่านี้อาจจะไม่มีประโยชน์ต่อการเก็บหลักฐานเพื่อการสืบสวน หากแบบจำลองสามมิติแสดงถึงความไม่ครบถ้วนในรายละเอียด ซึ่งสะท้อนถึงคุณภาพของงานโดยเหตุนี้เอง ผู้วิจัยจึงมุ่งเป้าไปที่การศึกษาความครบถ้วนในมิติของรายละเอียดที่ได้จากการประมวลผลโดยใช้เทคนิคการประมวลผลแบบต่าง ๆ ผ่านการใช้ซอฟต์แวร์ที่หลากหลาย ซึ่งประกอบด้วยซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ กึ่งพาณิชย์ และรหัสเปิด

วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อประยุกต์ใช้การสำรวจด้วยภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับในการบันทึกความเสียหายที่เกิดขึ้นกับยานพาหนะประเภทรถยนต์ขนาดเล็กภายหลังจากการเกิดอุบัติเหตุในรูปแบบของแบบจำลองสามมิติ
2. เพื่อวินิจฉัยเปรียบเทียบความสมบูรณ์แบบ (Completeness) ของแบบจำลองสามมิติที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยการสำรวจด้วยภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับที่ได้จากประมวลผลด้วยวิธีกึ่งอัตโนมัติและวิธีอัตโนมัติ โดยอาศัยความเหตุจากผู้เชี่ยวชาญด้านการสำรวจด้วยภาพถ่ายและสารสนเทศ

ความสำคัญของพื้นที่ศึกษาวิจัย

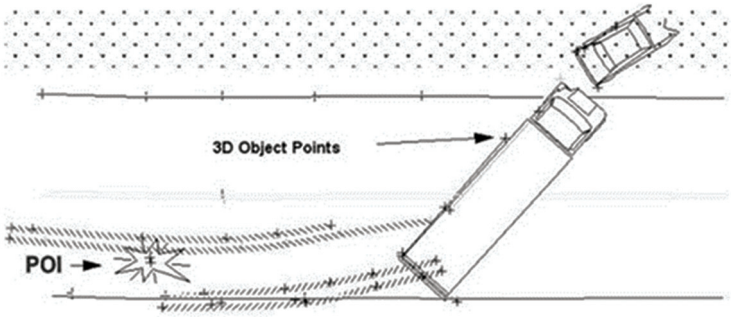
ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้เลือกใช้กรณีศึกษาซึ่งเป็นอุบัติเหตุที่เกิดขึ้นจริง ณ อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น เมื่อวันที่ 15 กุมภาพันธ์ 2564 เวลาประมาณ 04.34 น. เกิดอุบัติเหตุรถยนต์ยี่ห้อซูซูกิ รุ่น Swift เสียหลักชนต้นไม้บริเวณข้างทาง ภายในมหาวิทยาลัยขอนแก่น เมื่อรถยนต์คันดังกล่าวเข้ามาในพื้นที่ประตูสีฐานขาเข้า ดังรูปที่ 1 และขับตรงมาด้วยความเร็วสูง เมื่อมาถึงจุดเกิดเหตุซึ่งเป็นบริเวณทางแยก และขณะนั้นมีรถกระบะเปิดไฟเลี้ยวขวาและกำลังจะเลี้ยวขวาเข้าไปยังโรงเรียนสาธิตศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น คนขับรถยนต์เก๋งเปิดไฟแซงขวาเพื่อที่จะแซงรถกระบะ เมื่อเห็นว่ารถกระบะกำลังจะเลี้ยวขวาทำให้ต้องหักรถออกมาทางด้านซ้ายอย่างกระทันหัน ทำให้รถยนต์เก๋งเสียหลักออกนอกผิวจราจรและชนต้นไม้ ทำให้บริเวณด้านข้างและด้านบนของตัวรถได้รับความเสียหายอย่างหนัก จนเป็นสาเหตุที่ทำให้มีผู้เสียชีวิตจำนวน 3 ราย และบาดเจ็บ 1 ราย [5]

ISSN 2672-9369 (Online)

รูปที่ 1 ภาพถ่ายทางอากาศ บริเวณจุดเกิดเหตุพื้นที่ประตูสีฐานขาเข้าของมหาวิทยาลัยขอนแก่น

ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

การย้อนรอยอุบัติเหตุด้วยการสำรวจด้วยภาพถ่าย [2] แสดงให้เห็นถึงแนวทางในการพัฒนาเพื่อปรับปรุงการบังคับใช้การสำรวจด้วยภาพถ่ายระยะใกล้และกล้องดิจิทัลระดับผู้บริโภคในการย้อนรอยอุบัติเหตุและนิติวิทยาศาสตร์ โดยได้กล่าวถึงความสำคัญของการย้อนรอยอุบัติเหตุ (Accident Reconstruction: AR) ในมิติของการสร้างแบบจำลองสามมิติขึ้นมาใหม่ (3-Dimensional Reconstruction) ผ่านการใช้หลักฐานพยานภาพถ่ายที่เป็นรูปแบบ 2 มิติ ทั้งนี้ [2] ได้มีการนำเอาที่เป็นภาพอุบัติเหตุการชนกันของรถบรรทุกขนาดใหญ่หรือที่เรียกกันว่า รถเทรลเลอร์ ชนกับรถเก๋ง ผ่านการถ่ายภาพภาคพื้นดิน 2 มิติ และมีการประมวลผลภาพถ่ายซึ่งได้ให้ผลลัพธ์ออกมาเป็นการย้อนรอยอุบัติเหตุ ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ผลลัพธ์ของการสำรวจด้วยภาพถ่ายในการย้อนรอยอุบัติเหตุ ดัดแปลงจาก [2]

การศึกษาของ [2] ถือเป็นแนวทางเริ่มต้นในการสำรวจด้วยภาพถ่าย ในการสำรวจรังวัดงานทางด้านอุบัติเหตุบนท้องถนน ซึ่งมีส่วนสำคัญในการนำไปใช้เพื่อประโยชน์ในการสืบสวน ซึ่งในเวลาต่อมาการสำรวจด้วยภาพถ่ายได้มีการผสมผสานเข้ากับการถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับ โดยการศึกษาของ [6] ได้กล่าวถึงการค้นคว้าเกี่ยวกับ UAV และงาน Photogrammetry โดยศึกษาด้านการวิวัฒนาการของอากาศยานไร้คนขับรวมถึงประเภทและส่วนประกอบของอากาศยานไร้คนขับ ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับงานสำรวจ เช่น การทำแผนที่ เป็นต้น และการวิเคราะห์หาข้อดีและข้อเสียของอากาศยานไร้คนขับ ได้มีการศึกษาในต่างประเทศโดย [3] ได้ศึกษาการจัดทำแผนภาพการเกิดอุบัติเหตุอย่างรวดเร็ว โดยใช้เทปวัดระยะ และอากาศยานไร้คนขับ (UAV: Unmanned Aerial Vehicle) เข้ามาช่วยในการเก็บข้อมูล เพื่อวิเคราะห์อุบัติเหตุในแบบต่าง ๆ โดยได้ทำการเปรียบเทียบความคุ้มค่า ข้อจำกัดในด้านต่าง ๆ ของอุปกรณ์ในการรังวัด ซึ่งการศึกษาของ [7] ศึกษาการใช้เทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับมาประยุกต์ใช้กับการสำรวจขั้นสูง โดยใช้กล้อง Total Station

เข้ามาใช้ในการรังวัด ร่วมกับอากาศยานไร้คนขับ (UAV: Unmanned Aerial Vehicle) เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้องและแม่นยำ ผลการศึกษาเทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับสามารถใช้ในการสำรวจอุบัติเหตุได้อย่างดี แต่ก็มีข้อจำกัดในตัวเอง ตัวอย่างสำคัญของการศึกษาในอดีตที่เป็นการใช้ UAV กับการสำรวจด้วยภาพถ่ายในการย้อนรอยอุบัติเหตุของ [4] โดยได้ทำการประยุกต์ใช้การสำรวจด้วยภาพถ่ายจาก UAV ในการสร้างแบบจำลองสามมิติของรถยนต์ที่เกิดอุบัติเหตุ ซึ่งมีการวางแผนการถ่ายภาพแบบ Double Grid Flight Path ซึ่งมีการนำไปวิเคราะห์ผลลัพธ์ผ่านการนำแบบจำลองสามมิติของรถยนต์ที่เกิดอุบัติเหตุไปประยุกต์ใช้ในโปรแกรมสร้างแบบจำลองสามมิติ Blender และให้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 3

(ก) แบบจำลองความเสียหายทั้งคัน

(ข) การวิเคราะห์ความเสียหายเฉพาะส่วน

รูปที่ 3 การนำแบบจำลองสามมิติของรถยนต์ที่เกิดอุบัติเหตุไปประยุกต์ใช้ในโปรแกรมสร้างแบบจำลองสามมิติ Blender ดัดแปลงจาก [4]

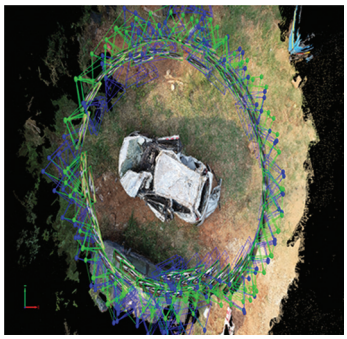
วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในงานศึกษาครั้งนี้ได้ออกแบบวิธีการดำเนินงานวิจัยดังรูปที่ 4 โดยแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 การเก็บข้อมูลภาคสนาม ส่วนที่ 2 การประมวลผลด้วยซอฟต์แวร์แบบต่าง ๆ และส่วนที่ 3 การประเมินความครบถ้วนของแบบจำลองสามมิติ

1. **การเก็บข้อมูลภาพถ่ายจากภาคสนาม**

ในการเก็บข้อมูลภาพถ่ายสำหรับการศึกษาครั้งนี้ ได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลักดังนี้

1.1 การเก็บข้อมูลภาพถ่ายภาคอากาศ ผู้วิจัยได้มีการดำเนินการเริ่มต้นจากการออกแบบโครงข่ายการถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับที่เป็นการบินวนเป็นรูปวงกลม (Circular Grid) รอบรถยนต์ที่เกิดเหตุดังรูปที่ 4



(ก) การบินถ่ายภาพด้วย UAV แบบรูปวงกลม

(ข) ภาพถ่ายภาคพื้นดินรอบคัน

รูปที่ 4 มุมมองการถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับและมุมมองการถ่ายภาพด้วยกล้องโทรศัพท์

ISSN 2672-9369 (Online)

1.2 การเก็บข้อมูลภาพถ่ายภาคพื้นดิน ซึ่งได้มีการออกแบบโครงข่ายการถ่ายภาพด้วยกล้องโทรศัพท์ โดยวางแผนให้มีการเดินถ่ายภาพรอบรถยนต์

2. การประมวลผลด้วยซอฟต์แวร์แบบต่าง ๆ ซึ่งประกอบด้วย

2.1 ซอฟต์แวร์กลุ่มมืออาชีพ ประกอบด้วย Pix4D Mapper, 3DF Zephyr และ Reality Capture

2.1.1 Pix4D Mapper เป็นซอฟต์แวร์เฉพาะสำหรับการทำแผนที่โดยใช้โดรน เป็นซอฟต์แวร์ระดับมืออาชีพที่จะเปลี่ยนภาพให้เป็นแผนที่ 2 มิติ และแบบจำลอง 3 มิติ ที่มีการอ้างอิงทางภูมิศาสตร์ที่แม่นยำด้วยเทคโนโลยีการสร้างใหม่แบบดิจิทัลขั้นสูงเป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์อย่างยิ่งหากต้องการแสดงภาพโครงการสามารถเรนเดอร์โปรเจ็กต์และทำงานกับพื้นผิวได้ เป็นซอฟต์แวร์ที่ดีสำหรับภาพถ่ายทางอากาศ และสำหรับภาพระยะใกล้ด้วย

2.1.2 3DF Zephyr เป็นซอฟต์แวร์ที่มีเวอร์ชันฟรีที่สร้างขึ้นเป็นพิเศษสำหรับผู้เริ่มต้นใช้งานและใช้งานส่วนตัว โดยอาจเป็นทางออกที่ดีที่สุดหากเพิ่งเริ่มต้นด้วยกระบวนการ 3D และต้องการเรียนรู้ด้วยซอฟต์แวร์ที่ยอดเยี่ยม 3DF Zephyr เวอร์ชันฟรีนี้มีเครื่องมือสร้าง 3D และเครื่องมือแก้ไขพื้นฐานทั้งหมดที่จำเป็นสำหรับมือใหม่

2.1.3 Reality Capture เป็นซอฟต์แวร์ที่ใช้งานง่ายด้วยอินเทอร์เฟซผู้ใช้ที่ยอดเยี่ยมและเป็นมิตร และนำเสนอทุกสิ่งที่คุณต้องการสำหรับโฟโตแกรมเมทรี Reality Capture อ้างว่าเร็วกว่าโซลูชันโฟโตแกรมเมทรีอื่น ๆ ถึง 10 เท่าด้วยเวอร์ชันใหม่ล่าสุด โปรแกรมนี้มีคุณภาพและความเร็วที่ยอดเยี่ยมสามารถคำนวณเมชและพื้นผิว และช่วยให้ทำงานกับไฟล์รูปแบบต่าง ๆ ได้มากมาย มันจะช่วยให้การทำงานเกี่ยวกับการอ้างอิงทางภูมิศาสตร์ ฉากความเป็นจริง การฉายภาพออร์โธกราฟิกโดยใช้ภาพและการสแกนด้วยเลเซอร์นอกจากนี้ยังสามารถทำงานบนวัตถุขนาดเล็กในขณะที่ใช้ซอฟต์แวร์ที่สมบูรณ์นี้

2.2 ซอฟต์แวร์กลุ่มรหัสเปิด คือ โปรแกรม Meshroom ที่เป็นซอฟต์แวร์โอเพ่นซอร์สฟรีที่นำเสนอโดย AliceVision ซึ่งเป็นเฟรมเวิร์คคอมพิวเตอร์วิชั่นเชิงภาพถ่าย ซอฟต์แวร์สร้างใหม่ 3 มิตินี้ใช้งานง่าย ช่วยให้เรียกใช้ไปป์ไลน์ Photogrammetric ทั้งหมดได้ เพียงแค่ใส่รูปภาพแล้วซอฟต์แวร์จะสร้างโมเดล 3 มิติ และเมชที่มีพื้นผิวโดยอัตโนมัติ โดยใช้การเชื่อมโมดูลแบบโยงท่อ (Pipeline Connect) ระหว่างแบบโหนดถึงโหนด (Node to Node)

2.3 ซอฟต์แวร์ประมวลผลเมฆินทร์ คือ Pix4D Cloud ซอฟต์แวร์การประมวลผลภาพค่ายเดียวกันกับ Pix4D Mapper แต่เป็นการประมวลผลในระดับคลาวน์

3. **การประเมินความครบถ้วนของแบบจำลองสามมิติ**

การวิเคราะห์ถึงความสมบูรณ์แบบของแบบจำลองสามมิติในรูปแบบของการประเมินในเชิงตัวเลขเป็นเรื่องที่ดำเนินการได้ยากมาก เนื่องจากเป็นผลการประเมินมีรายละเอียดเมื่อเทียบกับภาพจริงแตกต่างกันในมุมมองต่าง ๆ ยิ่งไปกว่านั้น หากนำผลลัพธ์มาวิเคราะห์โปรแกรมด้านสามมิติจะให้ผลลัพธ์ที่แตกต่างจากที่ควรจะเป็นค่อนข้างมาก โดยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงได้อาศัยการประเมินผ่านสายตาของผู้เชี่ยวชาญ (Visual Expert) ที่ประกอบด้วย ผู้เชี่ยวชาญด้านการสำรวจด้วยภาพถ่ายและสารสนเทศ ระดับปริญญาเอก 2 คน ระดับปริญญาโท 2 คน และระดับปริญญาตรี 2 คน ซึ่งมีเกณฑ์การประเมินคือ 1) ความคุ้มค่าของซอฟต์แวร์ประมวลผล 2) ระยะเวลาการประมวลผล และ 3) ความสมบูรณ์แบบของโมเดลสามมิติ

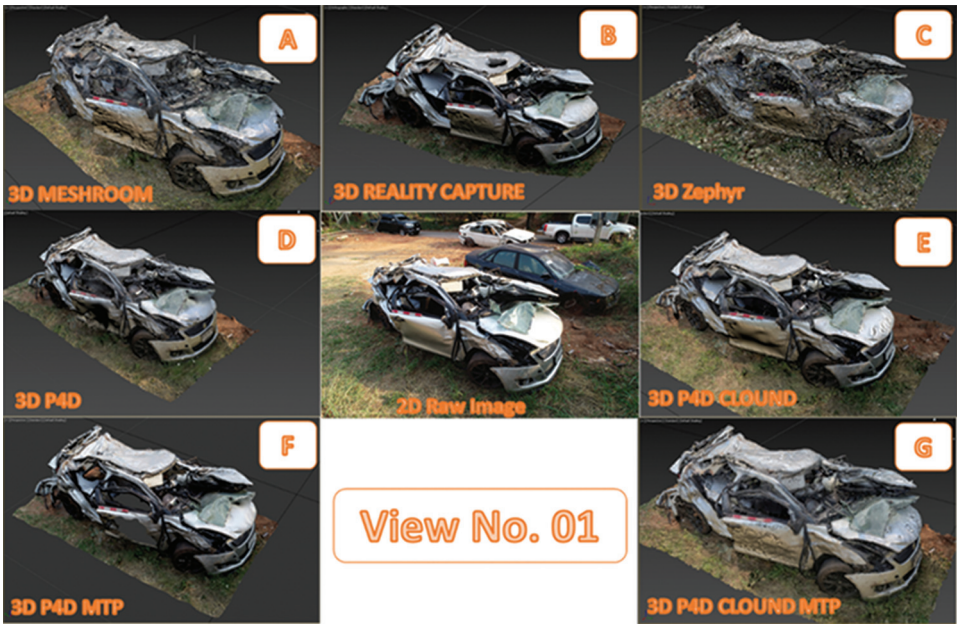
ผลการศึกษาและอภิปรายผล

การศึกษาวิจัยนี้ได้ดำเนินการประเมินความครบถ้วนสมบูรณ์ ผู้วิจัยได้ใช้หลักการของการประเมินคุณภาพของข้อมูลเชิงปริภูมิ กล่าวคือ ในการศึกษาวิจัยนี้จะประเมินคุณภาพของแบบจำลองสามมิติโดยอาศัยกรอบแนวคิดตามมาตรฐาน ISO19113 โดยนำองค์ประกอบด้านความครบถ้วน (Completeness) ของข้อมูลมาปรับใช้ [1]

ซึ่งข้อมูลอ้างอิงที่ใช้ในการเปรียบเทียบคือ การใช้ภาพถ่าย 2 มิติ มาวิเคราะห์ถึงส่วนที่เกิน (Commission) และส่วนที่ขาดของข้อมูล (Omission) โดยการวิเคราะห์เปรียบเทียบในรูปแบบการศึกษาของ [8] ที่แสดงถึงแนวทางการเปรียบเทียบข้อมูล 2 มิติ กับข้อมูล 3 มิติ ซึ่งประสบความสำเร็จในการผสมผสานข้อมูล 3 มิติ โดยทั้งผู้วิจัยได้เลือกการประมวลผลด้วยโปรแกรมแบบต่าง ๆ ผลลัพธ์การเปรียบเทียบในแต่ละกรณีของแต่ละมุมมองได้แสดงไว้ โดยแยกเป็น 7 กรณีดังนี้

I. กรณี A เป็นการประมวลผลภาพด้วยโปรแกรม Meshroom
II. กรณี B เป็นการประมวลผลภาพด้วยโปรแกรม Reality Capture
III. กรณี C เป็นการประมวลผลภาพด้วยโปรแกรม 3DS Zephyr
IV. กรณี D เป็นการประมวลผลภาพด้วยโปรแกรม Pix4D
V. กรณี E เป็นการประมวลผลภาพด้วยโปรแกรม Pix4D Cloud
VI. กรณี F เป็นการประมวลผลภาพด้วยโปรแกรม Pix4D แบบเติม Manual Tie Point (MTP)
VII. กรณี G เป็นการประมวลผลภาพด้วยโปรแกรม Pix4D Cloud แบบเติม Manual Tie Point

โดยแต่ละมุมมอง แสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 การประมวลผลด้วยโปรแกรมแบบต่าง ๆ และการประเมินความครบถ้วนของแบบจำลองสามมิติ

การวิเคราะห์ถึงความสมบูรณ์แบบของแบบจำลองสามมิติในรูปแบบของการประเมินในเชิงตัวเลขเป็นเรื่องที่ดำเนินการได้ยากมาก เนื่องจากเป็นการประเมินมีรายละเอียดเมื่อเทียบกับภาพจริงแตกต่างกันในมุมมองต่าง ๆ ยิ่งไปกว่านั้น หากนำผลลัพธ์มาวิเคราะห์โปรแกรมด้านสามมิติจะให้ผลลัพธ์ที่แตกต่างจากที่ควรจะเป็นค่อนข้างมาก โดยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงได้อาศัยการประเมินผ่านสายตาของผู้เชี่ยวชาญ (Visual Expert) ที่ประกอบด้วยผู้เชี่ยวชาญด้านการสำรวจด้วยภาพถ่ายและสารสนเทศ ระดับปริญญาเอก 2 คน ระดับปริญญาโท 2 คน และระดับปริญญาตรี 2 คน ซึ่งมีเกณฑ์การประเมินคือ 1) ความคุ้มค่าของซอฟต์แวร์ประมวลผล 2) ระยะเวลาการประมวลผล และ 3) ความสมบูรณ์แบบของโมเดลสามมิติ

แบบจำลองสามมิติที่ได้จากแต่ละโปรแกรมจะมีคุณภาพที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ดำเนินการทดลองภายใต้ภาพชุดเดียวกัน สามารถเรียงลำดับผลการวิเคราะห์คุณภาพได้ดังนี้

I. กรณี B เป็นการประมวลผลภาพด้วยโปรแกรม Reality Capture
II. กรณี E เป็นการประมวลผลภาพด้วยโปรแกรม Pix4D Cloud

ISSN 2672-9369 (Online)

III. กรณี D เป็นการประมวลผลภาพด้วยโปรแกรม Pix4D
IV. กรณี F เป็นการประมวลผลภาพด้วยโปรแกรม Pix4D แบบเติม Manual Tie Point
V. กรณี G เป็นการประมวลผลภาพด้วยโปรแกรม Pix4D Cloud แบบเติม Manual Tie Point [MTP]
VI. กรณี A เป็นการประมวลผลภาพด้วยโปรแกรม Meshroom
VII. กรณี C เป็นการประมวลผลภาพด้วยโปรแกรม 3DS Zephyr

โดยจะเห็นว่า การประเมินความครบถ้วนของแบบจำลองสามมิติเป็นสิ่งที่จำเป็นต้องทำ ซึ่งสอดคล้องกับข้อเสนอของ [4] ยิ่งไปกว่านั้น MTP มีส่วนสำคัญในการปรับปรุงคุณภาพของแบบจำลองสามมิติ การประมวลผลในแต่ละส่วนของแบบจำลองจะให้ความครบถ้วนที่ไม่เหมือนกัน ที่เป็นดังนี้เพราะการออกแบบโครงข่ายการถ่ายภาพและขั้นตอนการปฏิบัติงานในการสอบสวนยังไม่สมบูรณ์ดีพอ ซึ่งการศึกษาในอนาคตถึงคู่มือการปฏิบัติงานในการบินถ่ายภาพระหว่างการสอบสวนอุบัติเหตุ จึงเป็นเรื่องที่น่าสนใจ อันจะนำมาซึ่งผลลัพธ์ที่ดีและมีคุณภาพ

การตรวจสอบความถูกต้องในการวัดระยะจริงและโมเดลสามมิติ

เนื่องจากภายหลังจากการดำเนินคดีของอุบัติเหตุ เจ้าของรถที่เกิดเหตุได้มีการขายซากรถไปเรียบร้อยแล้ว แต่ผู้วิจัยมีความประสงค์ที่จะประเมินความถูกต้องของการวิเคราะห์ความถูกต้องเชิงตำแหน่ง จึงได้ทำการเปรียบเทียบตำแหน่งการวัดระยะจริงจากรถยนต์รุ่นเดียวกันที่ยังไม่เกิดอุบัติเหตุกับระยะบนแบบจำลองสามมิติ โดยได้เลือกเอาบริเวณที่รถที่เกิดอุบัติเหตุจะไม่มีการเปลี่ยนขนาด ดังรูปที่ 6

(ก) การวัดขนาดบนรถยนต์ที่ไม่ได้รับความเสียหาย (ข) การวัดขนาดบนรถยนต์ในแบบจำลอง

รูปที่ 6 ตำแหน่งการวัดระยะรถจริงและภาพขวาแสดงการวัดระยะจากโมเดลสามมิติ

จากการตรวจสอบความถูกต้องเชิงตำแหน่งแบบสัมพันธ์ ได้ใช้ระยะจุดตรวจสอบทั้งหมด 31 ระยะ ได้วิเคราะห์ความต่างระหว่างระยะ แสดงถึงความคลาดเคลื่อนจากการวัดระยะได้ 0.43 เซนติเมตร

สรุปผลการวิจัย

แบบจำลองสามมิติที่ได้จากแต่ละโปรแกรมจะมีคุณภาพที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ดำเนินการทดลองภายใต้ภาพชุดเดียวกัน โดยการประมวลผลภาพด้วยโปรแกรมแบบมืออาชีพจะให้ความครบถ้วนที่ดีที่สุด ทั้งนี้การประเมินความครบถ้วน

ของแบบจำลองสามมิติเป็นสิ่งที่จำเป็นต้องทำ ขณะที่การใช้ซอฟต์แวร์แบบรหัสเปิดยังให้ผลลัพธ์ในระดับที่ยังไม่เป็นที่น่าพอใจ อีกทั้งยังมีข้อค้นพบว่า การใช้หมายจุดด้วยมือ (Manual Tie Point) มีส่วนสำคัญการปรับปรุงคุณภาพของแบบจำลองสามมิติ อีกทั้ง การประมวลผลในแต่ละส่วนของแบบจำลองจะให้ความครบถ้วนที่ไม่เหมือนกัน ที่เป็นดังนี้เพราะการออกแบบโครงข่ายการถ่ายภาพและขั้นตอนการปฏิบัติงานในการสอบสวนยังไม่สมบูรณ์ดีพอ นอกจากนี้ผู้วิจัยยังได้มีการเสริมโดยการนำเอาผลลัพธ์จากโปรแกรม Pix4D มาวิเคราะห์ความถูกต้องเชิงตำแหน่งแบบสัมพัทธ์ ซึ่งพบว่า มีค่าความคลาดเคลื่อน RMSE อยู่ที่ 4.3 มิลลิเมตร ซึ่งมีความเพียงพอที่จะเป็นคู่แฝดดิจิทัลสำหรับการสืบสวนในเชิงอุบัติเหตุได้เป็นอย่างดี

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่อนุเคราะห์วัสดุและเครื่องมือในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้

References

[1] Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S., and Boehm, J. (2020). **Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging**. De Gruyter STEM, 2019. DOI: 10.1515/9783110607253

[2] Fraser, C. S. (2006). Accident Reconstruction via Digital Close-range Photogrammetry. **ASPRS 2006 Annual Conference Reno**. Nevada, May 1-5, 2006. Nevada, USA.

[3] Su, S., Liu, W., Li, K., Yang, G., Feng, C. F., Ming, J., Liu, G., Liu, S., and Yin, Z. (2016). Developing an Unmanned Aerial Vehicle-Based Rapid Mapping System for Traffic Accident Investigation. **Australian Journal of Forensic Sciences**. Vol. 48, Issue 4, pp. 454-468. DOI: 10.1080/00450618.2015.1073787

[4] Almeshal, A. M., Almazrouee, A. I., Alenizi, M. R., and Alhajeri, S. N. (2020). Forecasting the Spread of COVID-19 in Kuwait Using Compartmental and Logistic Regression Models. **Applied Sciences**. Vol. 10, Issue 10, p. 3402. DOI: 10.3390/app10103402

[5] Thairath. (2021). **A Car Crashed Into a Tree in Khon Kaen University, 2 off Nong Namon, deputy Miss Thailand, year 2019, serious**. Access (15 April 2021). Available (https://www.thairath.co.th/news/crime/2033315)

[6] Waisurasingha, C. (2020). **Photogrammetry**. Se-education

[7] Stáňa, I., Tokař, S., Bucsuházy, K., and Bilík, M. (2017). Comparison of Utilization of Conventional and Advanced Methods for Traffic Accidents Scene Documentation in the Czech Republic. **Procedia Engineering**. Vol. 187, pp. 471-476. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.04.402

[8] Galeazzi, F., Di Giuseppantonio Di Franco, P., and Matthews, J. L. (2015). Comparing 2D Pictures with 3D Replicas for the Digital Preservation and Analysis of Tangible Heritage. **Museum Management and Curatorship**. Vol. 30, Issue 5, pp. 462-483. DOI: 10.1080/09647775.2015.1042515

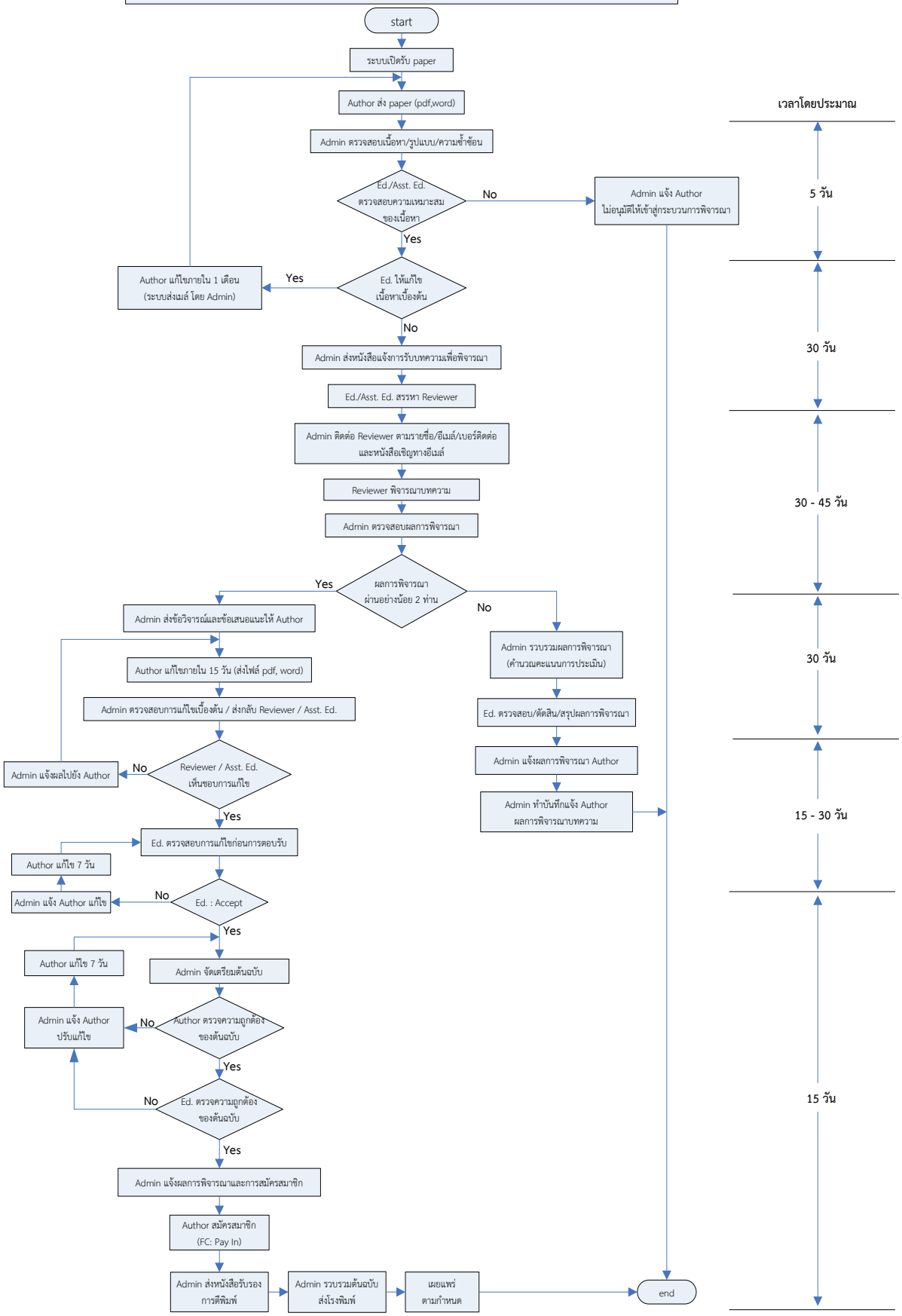
ISSN 2672-9369 (Online)

คำแนะนำสำหรับผู้เขียน

RMUTI

ราชมงคลอีสาน

ผังการดำเนินงานวารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี



วารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
RMUTI JOURNAL Science and Technology

1. ประเภทของบทความที่ตีพิมพ์

1.1 บทความวิจัย (**Research article**) เป็นบทความที่ได้จากงานวิจัย

1.2 บทความวิชาการ (**Academic article**) เป็นบทความที่มีลักษณะดังนี้

1. เป็นบทความจากการทบทวนเอกสาร ซึ่งเป็นผลมาจากการวิจัยหลาย ๆ ครั้ง ถือเป็นบทความที่มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง
2. เป็นบทความนำเสนอกระบวนการในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ การทดสอบภาคสนาม รวมไปถึงเทคนิคการวิเคราะห์ใหม่ ๆ
3. เป็นบทความที่มาจากประสบการณ์ หรือความชำนาญของผู้เขียน
4. เป็นบทความเกี่ยวกับนโยบายด้านต่าง ๆ ของหน่วยงาน

2. รูปแบบการพิมพ์บทความ

การตั้งค่าหน้ากระดาษ

- **ระยะขอบ**

  ขอบบน (Top Margin) 2.5 ซม. ขอบล่าง (Bottom Margin) 2.5 ซม.

  ขอบขวา (Right Margin) 2.5 ซม. ขอบซ้าย (Left Margin) 2.5 ซม.
- **ระยะห่างบรรทัด** 1 เท่า
- **รูปแบบตัวอักษร** บทความภาษาไทยใช้ TH SarabunPSK

  บทความภาษาอังกฤษใช้ Times New Roman
- **การย่อหน้า** 7 ตัวอักษร พิมพ์ตัวที่ 8
- **จำนวนหน้า 12 หน้า แต่ไม่ควรเกิน 15 หน้า**
- **ชื่อบทความ** ภาษาไทย ขนาดตัวอักษร 24 ตัวหนา

  ภาษาอังกฤษ ขนาดตัวอักษร 20 ตัวหนา
- **ชื่อผู้เขียน** ภาษาไทย ขนาดตัวอักษร 18 และจัดชิดซ้าย

  ภาษาอังกฤษ ขนาดตัวอักษร 14 และจัดชิดซ้าย
- **ตัวเลขยก (ต่อท้ายนามสกุล)** ขนาดตัวอักษร 18
- **ที่อยู่** ภาษาไทย ขนาดตัวอักษร 14

  ภาษาอังกฤษ และภาษาอังกฤษ 10
- **ชื่อหัวเรื่องหลักในบทความ เช่น "บทคัดย่อ" "คำสำคัญ" "วิธีดำเนินการ" "ผลการวิจัย" "สรุปผลการวิจัย" "กิตติกรรมประกาศ" "เอกสารอ้างอิง"** จัดชิดซ้ายหน้ากระดาษ

  กรณีบทความภาษาไทย ขนาดตัวอักษร 20 ตัวหนา

  กรณีบทความภาษาอังกฤษ ขนาดตัวอักษร 16 ตัวหนา
- **ชื่อหัวเรื่องรอง** จัดชิดซ้ายหน้ากระดาษ

  กรณีบทความภาษาไทย ขนาดตัวอักษร 16 ตัวหนา

  กรณีบทความภาษาอังกฤษ ขนาดตัวอักษร 12 ตัวหนา
- **เนื้อหาในส่วนต่าง ๆ และคำสำคัญ**

  กรณีบทความภาษาไทย ขนาดตัวอักษร 16

  กรณีบทความภาษาอังกฤษ ขนาดตัวอักษร 12
- **ชื่อตาราง**

  กรณีบทความภาษาไทย ข้อความ "**ตารางที่ x**" ใช้ขนาดตัวอักษร 16 ตัวหนา วางด้านบนชิดซ้ายหน้ากระดาษ ตามด้วยชื่อตารางที่เป็นตัวอักษรขนาด 16 ไม่หนา

กรณีบทความภาษาอังกฤษ ข้อความ "**Table x**" ใช้ขนาดตัวอักษร 12 ตัวหนา วางด้านบนชิดซ้ายหน้ากระดาษ ตามด้วยชื่อตารางที่เป็นตัวอักษรขนาด 12 ไม่หนา

- **ชื่อรูปภาพ**

กรณีบทความภาษาไทย ข้อความ "**รูปที่ x**" ใช้ขนาดตัวอักษร 16 ตัวหนา วางด้านล่างจัดชิดซ้ายหน้ากระดาษ ตามด้วยคำชื่อรูปที่เป็นตัวอักษรขนาด 16 ไม่หนา

กรณีบทความภาษาอังกฤษ ข้อความ "**Figure x**" ใช้ขนาดตัวอักษร 12 ตัวหนา วางด้านล่างจัดชิดซ้ายหน้ากระดาษ ตามด้วยคำชื่อรูปที่เป็นตัวอักษรขนาด 12 ไม่หนา

3. ส่วนประกอบของบทความแต่ละประเภท

3.1 **บทความวิจัย** จะประกอบไปด้วย

ก. ส่วนปก

1. **ชื่อบทความ (Title)** ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ควรกระทัดรัด ไม่ยาวเกินไป บทความภาษาไทยชื่อเรื่องต้องมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ บทความภาษาอังกฤษชื่อเรื่องไม่ต้องมีภาษาไทย

2. **ชื่อผู้เขียน (Authors)** ชื่อเต็ม – นามสกุลเต็ม ของผู้เขียนทุกคน โดยให้รายละเอียดต้นสังกัดของผู้เขียนไว้ที่บรรทัดล่างสุดของหน้าแรก พร้อมทั้งระบุชื่อผู้เขียนประสานงาน (Corresponding Author) ด้วยการระบุเบอร์โทรศัพท์ และ E-mail Address ที่สามารถติดต่อได้ และให้ใส่เครื่องหมายดอกจันทร์ตัวยกกำกับไว้ต่อท้ายนามสกุลและตัวเลขยก ให้เขียนไว้ต่อท้ายนามสกุล เพื่อระบุที่อยู่ของผู้เขียน

3. **บทคัดย่อ (Abstract)** ควรสั้น ตรงประเด็น ครอบคลุมสาระสำคัญของการศึกษา ประกอบไปด้วยเนื้อหา ได้แก่ วัตถุประสงค์ วิธีการ ผลการวิจัย และการอภิปรายผล เป็นต้น โดยเขียนลงใน 1 ย่อหน้า ถ้าบทความเป็นภาษาไทย จะต้องมีบทคัดย่อภาษาไทย 1 ย่อหน้า และภาษาอังกฤษ 1 ย่อหน้า โดยให้ภาษาไทยขึ้นก่อน เนื้อความในบทคัดย่อภาษาไทยและภาษาอังกฤษต้องมีความหมายเดียวกัน <u>ความยาวของบทคัดย่อภาษาอังกฤษ กำหนดให้มีความยาวได้ไม่เกิน 300 คำ</u>

4. **คำสำคัญ (Key Words)** เป็นการกำหนดคำสำคัญที่สามารถไปใช้เป็นคำสืบค้นในระบบฐานข้อมูล หากเป็นบทความภาษาไทยต้องมีคำสำคัญ 2 ภาษา คือภาษาไทยและภาษาอังกฤษที่มีความหมายตรงกัน ส่วนกรณีของบทความภาษาอังกฤษให้มีเพียงคำสำคัญในรูปแบบภาษาอังกฤษเท่านั้น จำนวนคำสำคัญที่กำหนดให้มีคำสำคัญได้อย่างน้อย 3 คำ แต่ไม่เกิน 5 คำ

****หมายเหตุ : <u>เนื้อหาส่วนปกจะต้องเขียนให้อยู่ในกระดาษจำนวน 1 หน้า เท่านั้น</u>**

ข. ส่วนเนื้อหา

1. **บทนำ (Introduction)** เพื่ออธิบายถึงความสำคัญของปัญหา และวัตถุประสงค์ของการวิจัย รวมถึงการทบทวนวรรณกรรม และเอกสารที่เกี่ยวข้อง

2. **วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ (Materials and Methods) / วิธีดำเนินการวิจัย (Research Methodology)** อธิบายเครื่องมือและวิธีการดำเนินการวิจัยให้ชัดเจน

3. **ผลการวิจัย (Results)** เสนอผลการทดลองอย่างชัดเจน ตรงประเด็น ควรมีรูปภาพและ/หรือตารางประกอบการอธิบายผลในตารางและรูปภาพ ต้องไม่ซ้ำซ้อนกัน รูปภาพและตารางของบทความที่เป็นภาษาไทยให้บรรยายเป็นภาษาไทย รูปภาพและตารางของบทความที่เป็นภาษาอังกฤษ ให้บรรยายเป็นภาษาอังกฤษ

4. **การอภิปรายผล (Discussion)** เป็นการอภิปรายผลการวิจัย เพื่อให้ผู้อ่านมีความเห็นคล้อยตามเพื่อเปรียบเทียบกับผลการวิจัยของผู้อื่น พร้อมทั้งเสนอแนวทางที่จะนำไปใช้ประโยชน์ผลการวิจัยและการอภิปรายผล (Results and Discussion) อาจนำมาเขียนตอนเดียวกันได้

5. **บทสรุป (Conclusion)** สรุปประเด็น และสาระสำคัญของการวิจัย

6. **กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgements)** เพื่อแสดงความขอบคุณแก่ผู้ให้ความช่วยเหลือในการวิจัย อาจมีหรือไม่มีก็ได้

7. **เอกสารอ้างอิง (References)** เป็นรายการเอกสารที่ถูกอ้างไว้ในส่วนของเนื้อเรื่อง เพื่อใช้เป็นหลักในการค้นคว้าวิจัย จำนวนเอกสารที่นำมาอ้างอิงตอนท้ายต้องมีจำนวนตรงกับที่ถูกอ้างอิงไว้ในส่วนของเนื้อเรื่องที่ปรากฏในบทความเท่านั้น การจัดเรียงให้เรียงตามลำดับการอ้างอิงในเนื้อหาโดยให้ยึดถือรูปแบบการเขียนเอกสารอ้างอิงตามที่ทางวารสาร มทร.อีสาน กำหนด และต้องเขียนในรูปแบบภาษาอังกฤษเท่านั้น

3.2 **บทความวิชาการ** จะประกอบไปด้วย

ก. **ส่วนปก**

มีส่วนประกอบเหมือนบทความวิจัย และเขียนให้อยู่ในกระดาษ จำนวน 1 หน้า เท่านั้น

ข. **ส่วนเนื้อหา**

1. **บทนำ (Introduction)** เป็นส่วนของที่มาของมูลเหตุของการเขียนบทความ

2. **วิธีการศึกษา/วิธีดำเนินการ (Method)** (ถ้ามี) เป็นการอธิบายวิธีการศึกษา หรือการดำเนินการตามประเภทของบทความวิชาการ

3. **ผลการศึกษา/ผลการดำเนินการ (Results)** เป็นการเสนอผลอย่างชัดเจน ตามประเด็นโดยลำดับตามหัวข้อที่ศึกษาหรือดำเนินการ

4. **สรุป (Conclusion)** สรุปประเด็น และสาระสำคัญที่ได้จากการศึกษา

5. **เอกสารอ้างอิง (References)** ใช้รูปแบบที่วารสารกำหนด รายการการอ้างอิงต้องเขียนในรูปแบบภาษาอังกฤษเท่านั้น

4. การอ้างอิงเอกสารในเนื้อเรื่องของบทความ (In-text Citations)

การอ้างอิงเอกสารในเนื้อเรื่องใช้รูปแบบ IEEE **ระบบตัวเลข (Numerical System)** เท่านั้น โดยรายการอ้างอิงเอกสารให้จัดชิดซ้ายหน้ากระดาษ หมายเลขลำดับของเอกสารอ้างอิงในเครื่องหมายเล็บกรอบสี่เหลี่ยม ตัวอย่างเช่น [1] เป็นต้น หากเป็นการอ้างอิงเอกสารหลายฉบับในเวลาเดียวกัน ให้ใส่หมายเลขอ้างอิงเรียงตามลำดับจากน้อยไปหามาก เช่น [1] - [3] หรือ [1] - [2], [5] เป็นต้น

การเขียนรายการเอกสารอ้างอิง (Reference List)

1) **หนังสือ**

[X] ผู้แต่ง. (ปีที่พิมพ์). **ชื่อหนังสือ**. ครั้งที่พิมพ์(ถ้ามี). เมืองที่พิมพ์: สำนักพิมพ์

ตัวอย่างเช่น

[1] Herren, Ray V. (1994). **The Science of Animal Agriculture**. Albany, N.Y.: Delmar Publishers

2) **หนังสือแปล**

[X] ผู้แต่ง. (ปีที่พิมพ์). **ชื่อเรื่องของหนังสือแปล** แปลจาก(ชื่อเรื่องในภาษาเดิม). โดย ชื่อผู้แปล. ครั้งที่พิมพ์(ถ้ามี). เมืองที่พิมพ์: สำนักพิมพ์

ตัวอย่างเช่น

[2] Grmek, Mirko D. (1990). **History of AIDS : Emerging and Origin of a Modern Pandemic**. Translated by Russell C. Maulitz, and Jacalyn Duffin. Princeton, N.J.: University Press

3) **บทความหรือบทในหนังสือ**

[X] ผู้เขียนบทความ. (ปีที่พิมพ์). ชื่อบทความ. **ชื่อเรื่อง**. ชื่อบรรณาธิการหรือผู้รวบรวม(ถ้ามี). หน้า เลขหน้า. สถานที่พิมพ์: สำนักพิมพ์

ตัวอย่างเช่น

[3] McTaggart, J. M. E. (1993). The Unreality of Time. **Philosophy of Time**. Robin Le Poidevin, and Murray MacBeath, eds. pp. 23-34. Oxford: Oxford University Press

4) **บทความในหนังสือรายงานประชุมทางวิชาการ/สัมมนาทางวิชาการ**

[X] ผู้เขียนบทความ. (ปีที่พิมพ์). ชื่อบทความ. ชื่อบรรณาธิการ(ถ้ามี). **ชื่อเรื่องรายงานการประชุม**. หน้า เลขหน้า. สถานที่พิมพ์: สำนักพิมพ์

ตัวอย่างเช่น

[4] Beales, P. F. (1980). The Status of Malaria in Southeast Asia. **Proceedings of the Third Asian Congress of Pediatrics**. Aree Valyasevi, and Vidhaya Mekanandha, eds. pp. 52-58. Bangkok: Bangkok Medical Publisher

5) **วารสาร**

[X] ผู้เขียนบทความ. (ปีที่พิมพ์). ชื่อบทความ. **ชื่อวารสาร**. ปีที่. , ฉบับที่. , หน้า เลขหน้า. (in Thai)/DOI:

ตัวอย่างเช่น

[5] Vitsanusat, A. and Phachirarat, S. (2015). Measurement of Radon in Drinking Water at Amphur Meaung, Khonkhaen Province with Ionization chamber. **RMUTI Journal Science and Technology**. Vol. 8, No. 2, pp. 12-20

6) **บทความในหนังสือพิมพ์**

[X] ชื่อผู้เขียน. (ปี. วัน. เดือน). ชื่อบทความ. ใน **ชื่อหนังสือพิมพ์**. หน้า เลขหน้า

ตัวอย่างเช่น

[6] Vitit Muntarbhorn. (1994. 21. March). **The Sale of Children as a Global Dilemma**. Bangkok Post. p. 4

7) **บทความในสารานุกรม**

[X] ชื่อผู้เขียนบทความ. (ปีที่พิมพ์). ชื่อบทความ. ใน. **ชื่อสารานุกรม**. เล่มที่ : หน้า เลขหน้า-เลขหน้า

ตัวอย่างเช่น

[7] Morrow, Blaine Victor. (1993). Standards for CD-Rom Retrieval. **Encyclopedia of Library and Information Science**. Vol. 51, pp. 380-389

8) **วิทยานิพนธ์**

[X] ผู้เขียนวิทยานิพนธ์. (ปีที่พิมพ์). **ชื่อวิทยานิพนธ์**. ระดับวิทยานิพนธ์ ชื่อสาขา คณะ มหาวิทยาลัย

ตัวอย่างเช่น

[8] Phillips, O. C., Jr. (1962). **The Indfluence of Ovidd on Lucan's Bellum Civil**. Ph.D. Dissertation University of Chicago

9) **สื่ออิเล็กโทรนิกส์ (สื่ออิเล็กโทรนิกส์) : www**

[X] ผู้เขียน. ปี. **ชื่อบทความ**. ชื่อวารสารหรือนิตยสาร. ปีที่(เดือนหรือฉบับที่): เลขหน้า(ถ้ามี). เข้าถึงเมื่อ (วัน เดือน ปีที่ค้นข้อมูล). เข้าถึงได้จาก (ที่อยู่ของบทความหรือสื่ออิเล็กทรอนิกส์ URL)

ตัวอย่างเช่น

[9] Department of the Environment and Heritage. (1999). **Guide to Department and Agency Libraries**. Access (17 November 2000). Available (http://www.erin.gov.au/library/guide.html)

10) **ผู้แต่งเป็นหน่วยงาน**

[X] ชื่อหน่วยงาน. (ปีที่พิมพ์). **ชื่อหนังสือ** เล่มที่(ถ้ามี). ครั้งที่พิมพ์(ถ้ามี). เมืองที่พิมพ์: สำนักพิมพ์

ตัวอย่างเช่น

[10] Prince of Songkla University. (2009). **Annual Report 2008**. Songkhla: Prince of Songkla University

11) **มีเฉพาะชื่อบรรณาธิการเป็นผู้รวบรวม**

[X] ชื่อบรรณาธิการ หรือผู้รวบรวม หรือผู้เรียบเรียง. (ปีที่พิมพ์.) **ชื่อหนังสือ**. เล่มที่ (ถ้ามี) ครั้งที่พิมพ์(ถ้ามี) เมืองที่พิมพ์: สำนักพิมพ์

ตัวอย่างเช่น

[11] Rueangwit Limpanat. (2000). **Local - India**. Chonburi: Department of History Faculty of Humanities And social science Burapa university

5. รูปแบบการใส่รูปภาพในเนื้อหาบทความ

1) ชื่อรูปภาพ**ห้าม**ขึ้นต้นด้วยคำว่า “แสดง”

2) รูปภาพที่แสดงต้องมีคำอธิบายอยู่ในเนื้อหาบทความที่มีการระบุถึงรูปภาพนั้น ๆ

3) คำอธิบายรูปภาพ ให้เขียนไว้ใต้รูปภาพแต่ละรูปภาพ โดยจัดรูปภาพไว้กึ่งกลางหน้ากระดาษ และคำอธิบายจัดชิดซ้ายหน้ากระดาษ

4) ไฟล์ของรูปภาพต้องเป็นไฟล์ที่มีนามสกุล .jpg, .png, .tiff หรือ .eps เท่านั้น ความละเอียดไม่ต่ำกว่า 300 dpi

5) ลายเส้นที่ปรากฏบนรูปภาพต้องมีความคมชัด กรณีที่เป็นรูปกราฟ ต้องระบุชื่อแกนต่าง ๆ ให้ครบถ้วน

6) กรณีที่มีรูปภาพย่อย ควรจัดให้รูปภาพย่อยทั้งหมดอยู่ในหน้าเดียวกัน สำหรับบทความภาษาไทย ให้เขียนคำบรรยายใต้ชื่อรูปย่อยแต่ละรูป และกำหนดลำดับของรูปภาพด้วยตัวอักษร ตัวอย่างเช่น

(ก) รูปย่อยที่ 1 (ข) รูปย่อยที่ 2

รูปที่ 1 ตัวอย่างการเขียนคำอธิบายรูปภาพ

สำหรับบทความภาษาอังกฤษ ให้ใช้อักษร (a), (b),… แทนการกำหนดรูปภาพย่อย

7) การเว้นระยะบรรทัด ก่อนรูปภาพ ให้เว้น 1 บรรทัด และหลังจากชื่อรูปภาพ ให้เว้น 1 บรรทัด

8) การใช้ภาพสี อาจทำให้เกิดความสวยงาม แต่ให้คำนึงถึงการสื่อความหมายกรณีที่มีการจัดพิมพ์เอกสารแบบขาวดำเพื่อให้ผู้อ่านสามารถเข้าใจได้ กรณีที่เป็นกราฟควรกำหนดลักษณะเส้นที่แตกต่างกัน เพื่อให้สามารถเข้าใจได้เมื่อมีการจัดพิมพ์แบบขาว - ดำ

9) ขนาดของรูปต้องไม่ใหญ่เกินกว่าความกว้างของหน้ากระดาษที่กำหนดไว้

10) หากเป็นการคัดลอกรูปภาพมาจากที่อื่น ผู้เขียนควรมีการอ้างอิงแหล่งที่มาให้ถูกต้อง

6. รูปแบบการใส่ตารางในเนื้อหาบทความ

1) ชื่อตาราง**ห้าม**ขึ้นต้นด้วยคำว่า “แสดง”

2) ตารางที่แสดงต้องมีคำอธิบายอยู่ในเนื้อหาบทความที่มีการระบุถึงตารางนั้น ๆ

3) คำอธิบายตาราง ให้เขียนไว้ด้านบนของตาราง โดยจัดคำอธิบายไว้ชิดขอบด้านซ้ายของหน้ากระดาษ และตารางอยู่กึ่งกลางหน้ากระดาษ ควรจัดเนื้อหาตารางให้อยู่บนหน้าเดียวกัน กรณีที่ตารางมีความยาวเกินหน้ากระดาษ ให้ใส่ชื่อตาราง “**ตารางที่** x ……” ไว้ที่ด้านบนของตารางในหน้าแรก และใส่ชื่อตาราง “**ตารางที่** x …… (ต่อ)” ไว้ที่ด้านบนของตารางในหน้าถัดไป

4) ขนาดของตารางต้องไม่ใหญ่เกินกว่าความกว้างของหน้ากระดาษที่กำหนดไว้

5) การเว้นระยะบรรทัด ก่อนชื่อตาราง ให้เว้น 1 บรรทัด และหลังสิ้นสุดตาราง ให้เว้น 1 บรรทัด

6) การกำหนดเส้นขอบตาราง ให้กำหนดเฉพาะเส้นด้านบน และด้านล่างของบรรทัด ดังตัวอย่าง

ตารางที่ 1 ตัวอย่างการนำเสนอตาราง

Table Head	**Table Column Head**	
	Subhead (unit)	**Subhead (unit)**
xxx	123	456
xxx	321	654

7. **รูปแบบการใส่สมการในเนื้อหาบทความ**

1) จัดตำแหน่งของสมการไว้กึ่งกลางหน้ากระดาษ
2) พิมพ์สมการด้วยโปรแกรม MathType โดยใช้รูปแบบตัวอักษร Times New Roman ขนาด 11
3) ระบุเลขลำดับสมการโดยเขียนไว้ในวงเล็บ จัดตำแหน่งเลขสมการชิดขวาของหน้ากระดาษ เช่น

$$y = ax + b \tag{1}$$

4) ทุกสมการต้องมีการอ้างถึงในเนื้อหา ให้ระบุเลขและเขียนไว้ในวงเล็บ เช่นเดียวกับที่ปรากฏในสมการ
5) การเว้นระยะบรรทัด ก่อนสมการ ให้เว้น 1 บรรทัด และหลังสมการ ให้เว้น 1 บรรทัด

8. **การดำเนินงานของกองบรรณาธิการ**

1) ทุกบทความที่ส่งเข้าวารสาร ต้องส่งผ่านระบบออนไลน์ที่ https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/rmutijo/index โดยดำเนินการสมัครสมาชิก และชำระค่าสมาชิกจำนวน 1,000 บาท ซึ่งจะมีอายุสมาชิก 1 ปี

2) บทความที่ถูกส่งเข้ามายังระบบ กองบรรณาธิการจะพิจารณาบทความเบื้องต้นเกี่ยวกับความถูกต้องของรูปแบบทั่วไป **บทความที่ไม่ดำเนินการตามรูปแบบที่กำหนดจะไม่รับเข้าสู่กระบวนการพิจารณา**โดยผู้ทรงคุณวุฒิ และจะส่งกลับเพื่อทำการแก้ไข ดังนั้น เพื่อให้เกิดความรวดเร็วในเข้าสู่กระบวนการพิจารณาผล ผู้เขียนควรดำเนินการจัดทำวารสารให้ถูกต้องตามรูปแบบที่กำหนดอย่างเคร่งครัด

3) เมื่อบทความผ่านการพิจารณาให้ตีพิมพ์ลงในวารสาร และผู้เขียนได้ดำเนินการจัดเตรียมเอกสารต่าง ๆ อย่างถูกต้อง ครบถ้วนตามข้อกำหนดของวารสารเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ผู้เขียนจะได้รับหนังสือรับรองการตีพิมพ์บทความเพื่อเป็นการยืนยัน

4) หากทางวารสารตรวจพบว่าบทความที่ถูกส่งเข้ามามีการคัดลอก หรือเผยแพร่ในที่อื่น ๆ ก่อนหน้า หรือมีการดำเนินการใด ๆ อันเป็นการกระทำที่ผิดจรรยาบรรณของนักวิจัย ทางวารสารจะดำเนินการทำหนงสือแจ้งไปยังหน่วยงานต้นสังกัด และระงับการพิจารณาและรับบทความจากผู้เขียนบทความนั้นเป็นระยะเวลาอย่างน้อย 5 ปี

หมายเลขสมาชิก
……..
(สำหรับเจ้าหน้าที่)

แบบฟอร์มการส่งบทความ

วารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

วันที่ ……

ข้าพเจ้า (นาย/นาง/นางสาว) ……..

ระดับการศึกษาสูงสุด …… ตำแหน่งทางวิชาการ ……..

หน่วยงาน ……..

ที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้สะดวก……

โทรศัพท์……โทรสาร……โมบาย……

e-mail……

ขอส่ง ☐ บทความวิจัย ☐ บทความวิชาการ

สาขาของบทความ (กรุณาเลือก)

☐ Chemistry ☐ Engineering ☐ Materials Science

☐ Environmental Science ☐ Mathematics

ชื่อบทความ (ภาษาไทย) ……..

……

……

(ภาษาอังกฤษ) ……..

……

……

ชื่อผู้เขียนร่วม (พร้อมคำนำหน้าชื่อ)

1. ……
2. ……
3. ……
4. ……
5. ……

ขอเสนอชื่อผู้ทรงคุณวุฒิที่มีความเชี่ยวชาญในสาขาที่เกี่ยวข้อง

1. ชื่อ-สกุล……..…….ตำแหน่งทางวิชาการ……

คุณวุฒิ……สาขาที่เชี่ยวชาญ……..

หน่วยงานที่สังกัด……

ที่อยู่สำหรับส่งเอกสาร……..……..

……..

หมายเลขโทรศัพท์…….Email……..…….

2. ชื่อ-สกุล……..…….ตำแหน่งทางวิชาการ……

คุณวุฒิ……สาขาที่เชี่ยวชาญ……..

หน่วยงานที่สังกัด……..……..……..

ที่อยู่สำหรับส่งเอกสาร……..……..

……..

หมายเลขโทรศัพท์…….Email……..…….

หมายเหตุ

1. ผู้ทรงคุณวุฒิต้องมีตำแหน่งทางวิชาการ ระดับ ผศ. ขึ้นไป หรือจบการศึกษาระดับปริญญาเอก และต้องไม่สังกัดหน่วยงานเดียวกับผู้ประพันธ์

2. กองบรรณาธิการขอสงวนสิทธิ์ในการเป็นผู้พิจารณาคัดเลือกผู้ทรงคุณวุฒิเพื่อพิจารณาผลงานทางวิชาการ

3. เจ้าของบทความที่ผ่านการพิจารณาให้ตีพิมพ์ลงในวารสาร จะต้องสมัครสมาชิกวารสาร มทร.อีสาน อย่างน้อย 1 ปี เพื่อเป็นการยืนยันการตีพิมพ์บทความลงในวารสาร

ข้าพเจ้าได้รับทราบและยินดีปฏิบัติตามเงื่อนไขและข้อกำหนดต่าง ๆ ในแบบฟอร์มแนบท้าย ซึ่งมีรายละเอียดอยู่ใน "คำแนะนำผู้เขียน" ที่ทางกองบรรณาธิการ วารสาร มทร.อีสาน ได้กำหนดขึ้น และยินดีให้กองบรรณาธิการมีสิทธิ์ที่จะไม่รับพิจารณา หากไม่จัดรูปแบบตามที่กำหนด ยินยอมให้มีสิทธิ์ในการเลือกสรรหาผู้กลั่นกรองโดยอิสระเพื่อพิจารณาต้นฉบับที่ข้าพเจ้า (และผู้แต่งร่วม) ส่งมา ยินยอมให้กองบรรณาธิการสามารถตรวจแก้ไขต้นฉบับดังกล่าวได้ตามที่เห็นสมควร และข้าพเจ้า "ขอรับรองว่า บทความนี้ไม่เคยลงตีพิมพ์ในวารสารใดมาก่อน ไม่อยู่ระหว่างการพิจารณาจากวารสารอื่น และยินยอมว่าบทความที่ตีพิมพ์ลงในวารสารวิชาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ถือเป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน"

หากข้าพเจ้ามีความประสงค์ในการขอยกเลิกการพิจารณาบทความหลังจากวันที่ได้รับหนังสือยืนยันการรับบทความ **ข้าพเจ้ายินดีรับผิดชอบค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานที่มหาวิทยาลัยฯ ดำเนินการตามกระบวนของวารสาร มทร.อีสาน ตามที่จ่ายจริง**

ลงชื่อ…….

(…….)

หนังสือรับรองการตีพิมพ์บทความ
วารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

ขอรับรองว่าบทความ.....

เรื่อง .....
.....
โดย .....
.....

ได้ผ่านการประเมินจากคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ
และตีพิมพ์ในวารสาร มทร.อีสาน
ปีที่..... ฉบับที่.....(.....-..... พ.ศ.....)

(.....)
บรรณาธิการ วารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

ใบสมัครสมาชิก
วารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

หมายเลขสมาชิก

……..

(สำหรับเจ้าหน้าที่)

วันที่สมัคร……

ข้าพเจ้า (นาย/นาง/นางสาว)……

ที่อยู่ ……

……โทรศัพท์……

ออกใบเสร็จในนาม ชื่อ……

ที่อยู่……

มีความประสงค์เป็นสมาชิก

☐ วารสารวิชาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน (1 ปี มี 3 ฉบับ 1,000 บาท)

โดย ☐ สมัครเป็นสมาชิกใหม่ จำนวน …….. ปี เริ่มตั้งแต่ปีที่ …… ฉบับที่ ……..

☐ ต่ออายุสมาชิก จำนวน …….. ปี เริ่มตั้งแต่ปีที่ …… ฉบับที่ ……..

พร้อมกันนี้ได้ส่งค่าสมาชิก จำนวน…….บาท

(ตัวอักษร)…….

ซึ่งได้ชำระเงินผ่านทางบัญชีกองทุนสนับสนุนการวิจัย ธนาคารกรุงไทย สาขาม.เทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา ชื่อบัญชี “กองทุนสนับสนุนการวิจัย มทร.อีสาน” บัญชีออมทรัพย์ เลขที่ 980-9-74231-2

หมายเหตุ กรุณาส่งหลักฐานการจ่ายเงินและใบสมัครสมาชิก มายังสถาบันวิจัยและพัฒนาที่ E-mail : rmuti.journal@gmail.com พร้อมเขียนชื่อ-นามสกุล ให้ชัดเจน การสมัครสมาชิกจะมีผลสมบูรณ์เมื่อทางวารสารได้มีการตรวจสอบเอกสารต่าง ๆ อย่างถูกต้องแล้วเท่านั้น

ลงชื่อ…….ผู้สมัคร

(……)

หนังสือยืนยันการถอนบทความ
วารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

ข้าพเจ้า (นาย/นาง/นางสาว).....

สังกัดหน่วยงาน .....

มีความประสงค์ขอถอนการพิจารณาบทความเรื่อง.....

.....

.....

ที่ได้ส่งเข้ามายังวารสาร มทร.อีสาน เมื่อวันที่ ..... และยินยอมรับผิดชอบค่าใช้จ่ายในการดำเนินการตามกระบวนการของวารสาร มทร.อีสาน เป็นจำนวนเงิน ..... บาท (.....) โดยชำระเงินผ่านทางบัญชีกองทุนสนับสนุนการวิจัยธนาคารกรุงไทย สาขาม.เทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา ชื่อบัญชี "กองทุนสนับสนุนการวิจัย มทร.อีสาน" บัญชีออมทรัพย์ เลขที่ 980-9-74231-2

หมายเหตุ กรุณาส่งหลักฐานการชำระเงินและหนังสือยืนยันการถอนบทความ มายังสถาบันวิจัยและพัฒนาที่ E-mail : rmuti.journal@gmail.com พร้อมเขียนชื่อ-นามสกุล ให้ชัดเจน ข้อมูลการชำระเงินจะมีผลสมบูรณ์ เมื่อทางวารสารได้มีการตรวจสอบเอกสารต่าง ๆ อย่างถูกต้องแล้วเท่านั้น

ลงชื่อ.....ผู้ถอนบทความ

(.....)

RMUTI

ราชมงคลอีสาน

RMUTI JOURNAL

Science and Technology

Vol.15 No.2 May - August 2022

Institute of Research and Development
Rajamangala University of Technology Isan
744 Suranarai Road, Meuang, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand
Tel. (66) 4423 3063 Fax. (66) 4423 3064
E-mail : rmuti.journal@gmail.com http://ird.rmuti.ac.th/2015