

# **Research on Modern science** and Utilizing Technological **Innovation Journal** RMUTI Journal (RMUTI Journal)





RMUTI Journal ได้รับการประเมินคุณภาพให้อยู่ในฐานข้อมูล ของศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (TCI) กลุ่มที่ 2

# วารสารงานวิจัยด้านวิทยาศาสตร์สมัยใหม่ และการใช้ประโยชน์นวัตกรรมเทคโนโลยี Research on Modern science and Utilizing Technological Innovation Journal (RMUTI Journal)

#### วัตถุประสงค์

 เพื่อเป็นสื่อกลางในการแลกเปลี่ยนองค์ความรู้ด้านวิชาการ ด้านงานวิจัย และสิ่งประดิษฐ์ระหว่าง นักวิชาการ และนักวิจัยกับผู้ที่สนใจทั่วไป

2. เพื่อเผยแพร่ผลงานทางวิชาการ ผลงานวิจัย และสิ่งประดิษฐ์ของนักวิชาการและนักวิจัยสู่สาธารณชน

#### หลักเกณฑ์การส่งบทความ

วารสาร RMUTI Journal เน้นรับบทความทางด้าน Physical Sciences ในสาขาวิชา Chemistry, Engineering, Materials Science, Environmental Science และ Mathematics

#### ประเภทของบทความที่ตีพิมพ์ บทความวิจัย และบทความวิชาการ

กระบวนการพิจารณาบทความ ใช้กระบวนการพิจารณาบทความโดยผู้ทรงคุณวุฒิที่มาจากหลากหลายหน่วยงาน จำนวน 3 ท่าน ต่อ 1 บทความ บทความทุกบทความจะต้องผ่านการพิจารณาโดยผู้ทรงคุณวุฒิที่เชี่ยวชาญ 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

#### ตีพิมพ์เผยแพร่ราย 4 เดือน ปีละ 3 ฉบับ

ฉบับที่ 1 ประจำเดือนมกราคม - เดือนเมษายน ฉบับที่ 2 ประจำเดือนพฤษภาคม - เดือนสิงหาคม ฉบับที่ 3 เดือนกันยายน - เดือนธันวาคม ชื่อวารสารใหม่เริ่มใช้ปีที่ 16 ฉบับที่ 3 (กันยายน - ธันวาคม) เป็นต้นไป

#### ลิขสิทธิ์

ต้นฉบับที่ได้รับการตีพิมพ์ ถือเป็นลิขสิทธิ์ของวารสาร RMUTI Journal และบทความในวารสารเป็น แนวคิดของผู้แต่ง มิใช่เป็นความคิดของคณะกรรมการจัดทำวารสาร และมิใช่เป็นความรับผิดชอบของ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

#### วารสารงานวิจัยด้านวิทยาศาสตร์สมัยใหม่ และการใช้ประโยชน์นวัตกรรมเทคโนโลยี Research on Modern science and Utilizing Technological Innovation Journal (RMUTI Journal)

ที่ปรึกษากองบรรณาธิการ รองศาสตราจารย์ ดร.โฆษิต ศรีภูธร อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน รองศาสตราจารย์ ดร.ศักดิ์ระวี ระวีกุล ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน รองศาสตราจารย์ ดร.วีรชัย พุทธวงศ์ ประธานหลักสูตรนิติวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

#### กองบรรณาธิการ

ศาสตราจารย์เกียรติคณ ดร พีระศักดิ์	ศรีนิเวศน์	 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ศาสตราจารย์ ดร กลเชษล์	เพียรทอง	มหาวิทยาลัยอบลราชธาบี
ศาสตราจารย์ ดร บรงค์ถทกิ์	สบบัติสบุภพ	มหาวิทยาลัยเทคโบโลยีพระจอมแกล้าธบบรี
ศาสตราจารย์ ดร ตะวับ	สขบ้อย	สภาบันเทคโบโลยีพระจอบเกล้าเจ้าคุณทหาร สถาบันเทคโบโลยีพระจอบเกล้าเจ้าคุณทหาร
		ลาดกระบัง
ศาสตราจารย์ ดร.ทวนทอง	จุฑาเกตุ	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ศาสตราจารย์ ดร.ปารเมศ	ชุติมา	ຈຸฬາລงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.เปี่ยมศักดิ์	เมนะเศวต	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.พิเชษฐ	ลิ้มสุวรรณ	้ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล	เหล่าสุวรรณ	้มหาวิทยาลัยหาดใหญ่
ศาสตราจารย์ ดร.เมธา	วรรณพัฒน์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ศาสตราจารย์ ดร.รัตติกร	ยิ้มนิรัญ	สถาบันวิทยสิริเมธี
ศาสตราจารย์ ดร.วินัย	ประลมพ์กาญจน์	มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์
ศาสตราจารย์ ดร.ศุภชัย	ปทุมนากุล	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ศาสตราจารย์ ดร.ส่ำเริง	จักรใจ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.สุชาติ	ລື່ມກຕັ້ญญ	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ศาสตราจารย์ ดร.ส <sup>ุ</sup> มชาติ	โสภณรณฤทธิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.สุทธวัฒน์	เบญจกุล	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ศาสตราจารย์ นาวาอากาศโท คร.สราวุฒิ	สุจิตจร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ศาสตราจารย์ คร.อรอนงค์	นัยวิกุล	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ คร.กนกอร	อินทราพิเชฐ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รองศาสตราจารย์ ดร.กนต์ธร	ชำนิประศาสน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รองศาสตราจารย์ คร.คงศักดิ์	ธาตุทอง	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.คณิต	มุกดาใส	มทาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.เจษฎา	ธารีบุญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร.จักรี	ศรีนนท์ฉัตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.ชนกพร	เผ่าศิริ	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ คร.ณัญธิวัฒน์	พลดี	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.ดริศ	สามารถ	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.นิรัช	สุดสังข์	มทาวิทยาลัยนเรศวร

รองศาสตราจารย์ ดร.ปราโมทย์ รองศาสตราจารย์ ดร.ปรีชา รองศาสตราจารย์ ดร.มนัส รองศาสตราจารย์ คร.วุฒิพล รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภชัย รองศาสตราจารย์ ดร.สมพงษ์ รองศาสตราจารย์ ดร.สมพร รองศาสตราจารย์ ดร.สิทธิชัย รองศาสตราจารย์ ดร.สรายุธ รองศาสตราจารย์ อดมศักดิ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นาถ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรภาพ รองศาสตราจารย์ ดร.เชิดศักดิ์ รองศาสตราจารย์ คร.บัณฑิต รองศาสตราจารย์ ดร.ปกิต รองศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไกรสิทธิ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คมเดช ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักษดา ผ้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิตติวัฒน์ ผ้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาคริต ผ้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เดือนเพ็ญ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัฐพล ผ้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รตินันท์ ผ้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รพีพงศ์ ผ้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศศิพันธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุจิตรา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อดิศักดิ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์อนุชา ดร.จารุพงษ์ ดร.เยาวพา ดร.รักชาติ ดร.วัชรินทร์ ดร.สุกัญญา

#### กองบรรณาธิการ (ต่อ)

แพงคำ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี วิทยาลัยเทคโนโลยีจิตรลดา กอเจริญ ชัยจันทร์ มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ สินธุนาวารัตน์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ สิงห์ยะบุศย์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ดลย์จินดาชบาพร มหาวิทยาลัยขอนแก่น ไทยะ จังหวัดฉะเชิงเทรา แสงอาทิตย์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เดชะปัญญา มหาวิทยาลัยบูรพา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร สาริบุตร ลาดกระบัง มหาวิทยาลัยนครพนม สขศีล แก้วสวัสดิ์วงศ์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ สขศิริพัฒนพงศ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน กฤตาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน กำบุญมา อัศวสุขี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วสเพ็ญ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ภาพัฒนบุรี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ธำรงวุฒิ นิธิกาญจนธาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นวลฉิมพลี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วงค์สอน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน สมนา เหลือมพล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน เปี่ยมสุวรรณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วงศ์สุทธาวาส มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน อ่นเรือน หารจริง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน กล่ำน้อย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน บรรเทา ความหมั่น มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน กลิ่นกล้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ชาติบุปผาพันธ์ คำหล้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

#### บรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ศักดิ์

โยธา

ศรีศิลป์ไชย

ฝ่ายจัดการและธุรการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

นางสาววลีรักษ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

#### สารบัญ Table of Contents

บทความวิจัย (Research Articles)	
The Development of Wine Using Mint Leaves Toward Consumer Acceptance	1
Adisorn Chotwaritkul, Sutthiluck Kwantrirat, and Natcharee Jirukkakul	
การศึกษาผลของน้ำหมักชีวภาพจากผักตบชวาต่อการงอกของเมล็ดพันธุ์ผักสลัด	12
The Effect of Water Hyacinth Bio-extract on the Germination of Lettuce Seeds	
นลินอร นุ้ยปลอด	
Nalin-on Nuiplot	
สมบัติของผ้าทอต่างโครงสร้างจากเส้นค้ายพอลิเอทิลินเทเรฟทาเลตรีไซเคิลสำหรับเก้าอี้พกพา	24
Woven Fabric Properties with Different Weave Designs Using Recycled PET Yarns for	
Portable Chair	
วิชุดา จันทร์ประภานนท์, บิณฑสันต์ ขวัญข้าว, ศิริวรรณ ดวงหิรัญ และธนะเกียรติ รวีวงค์	
Wichuda Chanprapanon, Bintasan Kwankhao, Siriwun Duanghirun, and Thanakiart Raweewong	
การศึกษาการทำแบบจำลองการระเหยสารด้วยเลเซอร์บนตะกั่วเทลลุไรด์	37
A Study of Laser Ablation Simulation on Lead Telluride	
ธนพล ขอบขำ, วรวิทย์ โกสลาทิพย์, นริส ประทินทอง และทัศวัลย์ คัมภีระพันธ์	
Tanaphon Khokham, Voravit Kosalathip, Naris Pratinthong, and Taswal Kumpeerpun	
ผลของเถ้าลอยไม้ยางพาราต่อสภาพนำความร้อนของแผ่นซีเมนต์ไฟเบอร์	51
Effect of Rubberwood Fly Ash on Thermal Conductivity of Cement Fiber Board	
จุฑามาศ ลักษณะกิจ, สมมาตร์ สวัสดิ์, วิศิษฏ์ศักดิ์ ทับยัง, นันทชัย ชูศิลป์, ถาวร เกื้อสกูล, ทวีศักดิ์ ทองขวัญ,	
นพคล คงเพชร, ธีระวัฒน์ เพชรคี และฐานวิทย์ แนมใส	
Chuthamat Laksanakit, Sommart Swasdi, Wisitsak Tabyang, Nuntachai Chusilp, Tavorn Kuasakul,	
Taweesak Thongkun, Nopadon Kongphet, Theerawat Petchdee, and Thanwit Naemsai	
ประสิทธิภาพแรงอัดในแนวแกนของเสาท่อเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้ากรอกคอนกรีตโดยใช้ปูนซีเมนต์	66
ไฮดรอลิกที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวคล้อม	
Axial Compression Performance of Rectangular ConcreteFilled Steel Tubular Columns	
Using Environmentally Friendly Hydraulic Cement	
ศักดิ์สิทธิ์ พันทวี, จักษดา ธำรงวุฒิ, จีรศักดิ์ สุพรมวัน, เชิดศักดิ์ สุขศิริพัฒนพงศ์, นำชัย จ้อยสูงเนิน และวาริน ชุบชุเ	นทด
Saksith Pantawee, Jaksada Thumrongvut, Jeerasak Supromwan, Cherdsak Suksiripattanapong,	
Namchai Joysoongnern, and Warin Chupkhunthod	
การศึกษาผนังอิฐก่อเสริมกำลังด้วยไม้ไผ่ภายใต้การทดสอบแบบค้อนเหวี่ยง	78
The Study of the Reinforced Masonry Walls with Bamboo under the Pendulum Test	
อนุชาติ ลื้อนันต์ศักดิ์ศิริ, ไพฑูรย์ นาแซง, วรวิทย์ โพธิ์จันทร์, วีระชัย หิรัญวัฒนเกษม, และเฉลิมศักดิ์ นามเชีย	เงใต้
Anuchat Leeanansaksiri, Phaithun Nasaeng, Worawit Projan, Weerachai Hirunwattanakasem, and	
Chalermsak Namchiangtai	
การหาค่าเหมาะสมที่สุดในการเคลือบผิวเข็นเซอร์เทอร์มิสเตอร์โดยใช้หลักการ DMAIC	90
Optimization in the Cotating Thermistor Sensors Using the Principle DMAIC	
บรรพจน์ มีสา และวีระพล ทับทิมคี	
Banpot Meesa and Weerapol Taptimdee	

### The Development of Wine Using Mint Leaves Toward Consumer Acceptance

#### Adisorn Chotwaritkul<sup>1</sup> Sutthiluck Kwantrirat<sup>1</sup> and Natcharee Jirukkakul<sup>1\*</sup>

Received: October 16, 2023; Revised: November 24, 2023; Accepted: November 30, 2023

#### Abstract

The objective of this study was to develop formulations and flavors of wine fermented with mint leaves to meet consumer preferences. The experiment was divided into two phases. In the first phase, suitable fermentation conditions for wine production were investigated. The experimental design was created using a Central Composite Design (CCD) from the Response Surface Methodology (RSM) software. Two independent variables were studied: sugar content (°Brix) and fresh mint leaves weight (g/600 ml). Two levels, low (-1) and high (+1), were defined for each factor using a two-level factorial design. A total of 14 experimental sets were conducted, and various parameters were measured every 3 days for 15 days. Sample 4, which used 75 g of fresh mint leaves and started with a sugar content of 22 °Brix, exhibited the highest alcohol content at 9.15 % and 10 °Brix. Sample 4 was therefore deemed suitable for further investigation in phase 2, which focused on studying the sensory acceptance of consumers towards wine fermented for 0 - 2 weeks and had its sugar content adjusted to 10, 12, 14, and 16 °Brix after 2 weeks of fermentation. The samples that underwent a 2-week fermentation period and had their sugar content adjusted to 12 °Brix showed the highest overall preference scores.

Keywords: Wine; Mint Leaves; Aged Wine

Faculty of Interdisciplinary Studies, Khon Kaen University, Nong Khai Campus

<sup>\*</sup> Corresponding Author, Tel. 08 9440 5466, E - mail: pnatch@kku.ac.th

#### Introduction

At present, the alcoholic beverage industry in Thailand is experiencing a slow growth. Alcoholic beverages with the highest consumption and market value are beer, accounting for 72.2 % of the total alcoholic beverage consumption, followed by spirits (25.9 %), and wine (1.0 %). It has been observed that although the wine consumption rate in Thailand is still relatively low, there is a continuous upward trend [1]. This has led to a significant number of wine products entering the market. While most foreign wines are produced from grapes, Thailand produces various types of wine mainly from different types of fruits. Only a small proportion of wines are made from herbs [2]. Surojanametakul, V. and Karuwanna, P. [3] produced herbal wine from herbal plants including mint, ginger, lemongrass, bael fruit and kaffir lime. Thailand imports a significant quantity of wine. Wine production, therefore, offers an alternative for processing and adding value to local products. The overall quality of herbal wine is determined by its clarity, color, aroma, and accepted taste. When physically examined using testing methods, each characteristic must score an average of at least 60 % from all testers, with no individual characteristic scoring less than 30 % of the maximum points. Adulteration with non-original ingredients and visible bubbles due to repeated fermentation are not allowed.

The Community Product Standard for Herbal Wine (MoPCh.31/2546) [4] defines herbal wine as a type of distilled alcoholic beverage that is produced by processing herbal ingredients. Herbal wine should have an alcohol content not exceeding 15 degrees per 100 milliliters by volume.

Mint, scientifically known as Mentha cordifolia Opiz, is a local herb commonly found in Thailand. It belongs to the Lamiales order of the Lamiaceae family. It is a low-growing plant with soft, short hairs covering all parts of the stem. The stem is square-shaped, with green-purple-brown coloration. The leaves are wide, oval-shaped, and have an opposite arrangement on the stem. They are smooth on the surface, have short stalks, rounded tips, and serrated edges and measure 1.5 - 2.5 cm in width and 2 - 3 cm in length. The flowers are arranged in clusters that arise from leaf axils. One of its distinctive features is its refreshing and cool aroma, attributed to the presence of menthol oil [5]. It has a taste similar to lemongrass, lime, and alcohol [6]. As a result, mint is used as an ingredient in various food products, such as ice cream and herbal hot and cold teas. It is also mixed with other herbs in dishes, fresh fruits, desserts, and wine [7]. Picard, M., Franc, C., Revel, G., and Marchand, S. [8] stated that mint contains important compounds, such as monoterpenes, which can influence the aroma of wine. The addition of mint to wine ingredients results in a minty aroma that enhances consumer preference. Martín-Garcia, A., Abarca-Rivas, C. Riu-Aumatell, M., and López-Tamames, E. [9] emphasized that aroma is a crucial qualitative parameter for wine. They identified more than 60 compounds from various chemical classes, including esters, alcohols, terpenes, furans, norisoprenoids, and fatty acids. Volatile evaluations over time revealed a significant relationship between furans and aging.

Herbal wine fermentation present various challenges, such as off-tastes, undesirable colors or odors, low alcohol content, and sweetness [7]. Therefore, the objective of this study

was to find the appropriate conditions for fermenting wine from mint leaves and stems to achieve the standard alcohol content of 7 - 15 degrees, which is the standard for industrial wine products [2]. Additionally, the study aims to enhance the value of mint and add uniqueness to Thai beverages.

#### **Materials and Methods**

#### 1. Studying the Suitable Conditions for Wine Fermentation

The Central Composite Design (CCD) experimental design from the Response Surface Methodology (RSM) was employed to study two independent variables: sugar content (°Brix) and the weight of fresh mint per 600 ml. Each parameter was defined at two levels (two-level factorial design): the lowest (high; -1) and the highest (low; +1) values, as shown in Table 1. The minimum sweetness level was set at 16 and the maximum at 22 °Brix, based on sweetness levels reported in wine fermentation [10]. This range was chosen to avoid excessive yeast growth and to consider cost-effectiveness.

The minimum weight of fresh mint was set at 25 g and the maximum at 75 g. These values were based on a 1:12 ratio (g/ml) of mint from a report published by Karuwanna, P. [7]. The total number of experimental sets to be conducted was calculated using Equation (1), resulting in a total of 14 experimental sets. The detailed experimental design is presented in Table 2.

Number of Experimental Sets (N) =  $2^n + (2 \times n) + 6$  .....(1)

Where

N = the number of experimental sets n = the number of independent variables

 Table 1
 The independent variables in the CCD for finding the suitable conditions for wine fermentation

Factor	Name	Coded Low (a-1)	Central (0)	Coded High (a+1)
А	Sugar content (°Brix)	16	19	22
В	Mint content (w/v)	25	50	75

The fresh mint leaves were sorted and cleaned before being weighed according to the experimental sets and blended with 400 ml of clean water. The sugar content was measured using a hand refractometer, and adjusted to the desired level for each experimental set by adding sugar, following the Pierce-Square method [11]. The pH was then adjusted to 3.4 - 3.5 using 0.1 NaOH and 0.1 M citric acid. Subsequently,  $(NH_4)_2HPO_4$  was added to achieve a concentration of 0.003 %, and the volume was adjusted with distilled water to reach 600 ml. The mixture was pasteurized at 100 °C for 5 min and poured into a fermentation tank. Dry yeast, Saccharomyces cerevisiae K1V-116 (1016-02), were prepared in a ratio of 0.3 g

per 1 liter of sample and added to the fermentation tank. The fermentation tank was sealed with an airlock and incubated at room temperature (25 - 30 °C) for 15 days. The parameters were then recorded throughout the fermentation process by collecting 5 ml samples on days 0, 3, 6, 9, 12, and 15. The sugar content, alcohol, acidity, and pH levels were analyzed to determine the optimal fermentation conditions for the next steps.

Treatment	Mint content (g/600 ml) or 4.16 - 12.5 % (w/v)	Sugar content (°Brix)
1	25	16
2	75	16
3	25	22
4	75	22
5	31	19
6	69	19
7	50	16.73
8	50	21.27
9	50	19
10	50	19
11	50	19
12	50	19
13	50	19
14	50	19

 Table 2
 The parameters designed using the CCD method within the RSM program

#### 2. Study of Wine Maturation at Different Times

The optimal conditions determined from the previous experiments were used. A clear solution was separated from the mixture, filtered through a fine white cloth. Wine sedimentation was settled by adding an 8 % bentonite solution at a rate of 6 ml per liter. The solution was then stored at temperatures ranging from 4 to 15 °C for 2 days. Afterward, the clear solution was separated and clarified using aseptic techniques, and then fine-filtered using a WHATMAN membrane filter Nylon 0.2 um, 47 mm in diameter. The clarified wine was then bottled, sealed, labeled, and matured at 15 °C for 0, 1, and 2 weeks. The wine samples from each week of maturation were tested for sensory acceptance by 30 consumers. Additionally, sugar content, alcohol, pH, and acidity levels were analyzed in 3 replicates of each sample at 0, 1, and 2 weeks.

#### 3. Parameter Analysis

The alcohol content (%) of the wine was estimated using chemical equations, and the results were expressed as a percentage (V/V). A graph illustrating the relationship between time and alcohol content was created.

Sugar content (°Brix) of the wine was analyzed using a hand refractometer, and the results were recorded. A graph illustrating the relationship between time and sugar content was created.

pH values were measured using a pH meter (Mettle brand, Five Easy model, United States), and the results were recorded. A graph illustrating the relationship between time and pH values was created.

Citric acid content in the wine was analyzed using a titration method with 0.1 N sodium hydroxide solution [12], and the results were recorded. A graph illustrating the relationship between time and acid content was created.

Sensory evaluation was performed on 30 general consumers, including university students and staff from Khon Kaen University, Nong Khai Campus. Consumer acceptance was assessed using a 9-Point Hedonic Scale, where 1 indicated 'dislike extremely' and 9 indicated 'like extremely.' The characteristics evaluated included appearance, color, odor, flavor and overall preference. The evaluations were conducted in a laboratory under white light.

#### 4. Statistical Analysis

The parameter values were expressed as means  $\pm$  standard deviations. Variance analysis was performed using Analysis of Variance (ANOVA) at a 95 % confidence level. Differences in means were analyzed using Duncan's Multiple Range test with the SPSS Windows Version 28 statistical software.

#### **Results and Discussion**

#### 1. Suitable Conditions for Wine Fermentation

The parameter values analysis, including sugar content (°Brix), alcohol content (%), acidity (g/100 ml), and pH in the 14 wine treatments during the fermentation process on days 0, 3, 6, 9, 12, and 15 are shown in Figure 1. An increase in alcohol content was observed from day 0 to day 7 in all experimental sets, after which the slope began to decrease from day 9 until day 15 (Figure 1(a)). This trend correlated with the sugar content, which continuously decreased from day 0 to day 7, after which the slope remained constant from day 9 until day 15, as depicted in Figure 1(b). The experimental set 4 had the highest alcohol content, which was 9.15 %, followed by experimental set 7, with an alcohol content of 8.15 %. Both of these sets had remaining sugar content of 7 and 3.15 °Brix, respectively. Meanwhile, the acidity in all experimental sets slightly decreased from 0.43 - 0.57 % to 0.27 - 0.37 % on day 15, as shown in Figure 1(c). This was consistent with the pH values, which remained relatively stable, ranging from 3.33 - 3.56 on day 1 and 2.96 - 3.65 on day 15, as illustrated in Figure 1(d). Both acidity and pH values were influenced by the raw materials and the fermentation process, with the latter being a significant factor in the production of herbal wines. The organic acids that may form during fermentation include succinic acid, lactic acid, citric acid, and pyruvic acid [13]. The acid content and pH values obtained were close to those reported in herbal wines, with acid levels typically ranging from 0.3 - 0.5 % and pH values in the range of 3.0 - 3.5 [7]. Based on the experimental results, experimental sets 4 and 7 were selected for sensory evaluation by 30 general consumers in order to identify the most suitable conditions for further study in phase 2.

5



(b) Changes in sugar content during fermentation

Figure 1 Sugar content, alcohol content, acidity, and pH values in the 14 wine treatments



(c) Changes in acidity during fermentation



#### (d) Changes in pH content during fermentation

Figure 1 Sugar content, alcohol content, acidity, and pH values in the 14 wine treatments (Cont.)

The sensory evaluation of the wine products from experimental set 4 (mint leaves 75 g, 22 °Brix) and experimental set 7 (mint leaves 50 g, 16.73 °Brix) is shown in Figure 2. The analysis using One-Way ANOVA (F-Test) at a 95 % confidence level showed that the experimental set 4 received significantly higher scores in terms of odor, sweetness, residual taste, and overall preference compared to experimental set 7 (p<0.05). This could be attributed to the higher alcohol content in the experimental set 4 compared to set 7. These two sets were palatable to the majority of consumers owing to a stronger and more distinct aroma. Based on these test results, experimental set 4 was selected as the suitable condition for further study.



Figure 2 Sensory Evaluation of Wines from Experimental Sets 4 and 7

#### 2. Wine Fermentation at Different Times

Fermentation of mint wine using the conditions from experimental set 4 (mint leaves 75 g and sugar content of 22 °Brix) was compared at different fermentation times and flavor refinement. The experiment was designed in three sets, including: 1) fermentation for 2 weeks followed by aging for 2 weeks, 2) fermentation for 2 weeks followed by aging for 1 week, and 3) fermentation for 2 weeks without aging. The results of various parameters, including alcohol content, acidity, and pH are shown in Table 3. No significant differences were observed in the parameters of all the experimental sets at a 95 % confidence level. Generally, sweetness decreased by approximately 1 - 3 °Brix per day as sugar was converted into alcohol [10]. However, the alcohol content obtained from all three experimental sets was relatively low compared to the initial fermentation experiment. This might have been due to the high and fluctuating temperatures during fermentation, which led to reduced yeast activity [10]. When alcohol content is low, the remaining sweetness tends to be relatively high. Nevertheless, the acidity and pH values for all three experimental sets remained within an appropriate range. In conclusion, the 2-week aging period did not significantly affect the 4 parameters. Wine aging is a process that benefits from a longer duration, as it involves chemical reactions between various substances such as acids, sugars, alcohol, esters, and phenolic compounds. It also involves the precipitation of proteins, microbial cells, and various suspended particles to clarify the wine, resulting in a clear wine with desirable taste, color, and aroma.

Set	Aging (week)	time	Sugar content (°Brix)	Alcohol content (%)	Acidity (g/100ml)	рН
А	2		$10.00 \pm 0.10$	$7.81{\pm}0.08$	$0.34{\pm}0.03$	$3.72{\pm}0.01$
В	1		10.33±0.23	7.85±0.15	$0.32{\pm}0.02$	$3.71 \pm 0.04$
С	0		10.13±0.12	7.90±0.13	$0.34 \pm 0.02$	$3.70 \pm 0.02$

**Table 3** Parameters of Wine fermentation at weeks 0, 1, and 2

Mean  $\pm$  Standard Deviation

The sensory evaluation of mint wine products was conducted using the experimental set A (2 weeks aging), with sugar levels adjusted to 12, 14, and 16 °Brix using spearmint syrup. This evaluation involved 6 samples with varying fermentation times and sugar adjustments, as depicted in Figure 3. It was observed that all samples differed significantly in terms of odor, sweetness, bitterness, residual taste, and overall preference, with statistical significance at a 95 % confidence level. However, there was no difference in color and clarity among the samples.

The overall preference scores showed that samples with a sugar adjustment of 12 °Brix received the highest scores for odor, sweetness, residual taste, and overall preference, compared to set C (samples with a 2-week fermentation time and no sugar adjustment) with 10 °Brix. The difference in overall preference scores was not statistically significant (p>0.05). In contrast, samples with no aging received the lowest overall preference scores, with statistical significance (p<0.05). Samples with a sugar adjustment of 16 °Brix received the highest scores for color, clarity, and odor, although there was no statistically significant difference compared to samples with a 12 °Brix sugar adjustment (p>0.05).

These results suggest that aged wine had better sensory characteristics compared to non-aged wine, even though there were no significant differences in their chemical and physical attributes. Sensory characteristics could be further improved by adjusting flavoring agents, taste, and sugar content. This aligns with research on wine consumption behavior and consumer attitudes towards homemade wine in the middle-market [14], which identified key factors in wine selection as cleanliness, sweetness, and the prominence of ingredient aromas. Longer aging processes also contribute to desired sensory attributes, as they involve various chemical reactions between substances such as oxygen increase on the surface, esters decay, and the precipitation of proteins, microbial cells, and various suspended particles, resulting in clear wine with a pleasant taste and aroma.



Figure 3 Sensory evaluation of wines with different aging and sugar adjustments

#### Conclusion

Set 4 (mint leaves 75 g, 22 °Brix) had the highest alcohol content in the first phase of the experiment, and consumers were also the most satisfied with its aroma and residual taste characteristics of set 4. Therefore, set 4 was deemed suitable for further study in phase 2, where it was observed that aging did not significantly affect alcohol content, sugar, pH, and acidity levels. However, consumers expressed greater satisfaction, particularly in the sample aged for 2 weeks with a sugar adjustment of 12 °Brix, which received the highest scores for aroma, sweetness, residual taste, and overall preference.

This study highlights the potential benefits of mint beyond its general use as a herb or food additive. It underscores the value addition potential of mint, particularly when further developed and enhanced. Such efforts can increase the value of mint leaves and promote the development of innovative products derived from mint.

#### Acknowledgements

The authors wish to express their gratitude to the Applied Science Department, Faculty of Interdisciplinary Studies, Khon Kaen University, Nong Khai Campus Thailand, for providing all the facilities.

#### References

- Vutikorn, S. (2021). COVID-19 scouge & restaurant closed but why Penfolds sell wine morethan 82%. Access (29 January 2023). Available (http://Brandage.com)
- [2] TISI. (2002). Thai Alcohol Beverage Standard. Thai Industrial Standards Institute Ministry of Industry Journal. Vol. 327, pp. 1-16
- [3] Surojanametakul, V. and Karuwanna, P. (2000). IFRPD research report 1996-1999. Wine Production from Herbal Plants. Kasetsart Univ., Bangkok (Thailand). Institute of Food Research and Product Development. pp. 1-11 (in Thai)
- [4] Thai Community Pproduct Standards. (2003). **Herbal Wine**. Thai Community Product Standards 31/2546. Thai Industrial Standards Institute Ministry of Industry. Bangkok Thailand (in Thai)
- [5] Tungsong. (2022). Mint. Access (29 January 2023). Available (http://tungsong.com) (in Thai)
- [6] Wikipedia. (2022). Mint. Access (29 January 2023). Available (http://wikipedia.com) (in Thai)
- [7] Karuwanna, P. (2001). Wine Production from Herb. Food. Vol. 31, No. 2, pp. 80-84 (in Thai)
- [8] Picard, M., Franc, C., Revel, G., and Marchand, S. (2018). Dual Solid-Phase and Stir Bar Sorptive Extraction Combined with Gas Chromatography-Mass Spectrometry Analysis Provides a Suitable tool for Assaying Limonene-Derived Mint Aroma Compounds in Red Wine. Analytica Chimica Acta. Vol. 1001, pp. 168-178. DOI: 10.1016/j.aca.2017.11.074
- [9] Martín-Garcia, A., Abarca-Rivas, C. Riu-Aumatell, M., and López-Tamames, E. (2023). Comparison of Volatile Compounds During Biological Ageing and Commercial Storage of Cava (Spanish Sparkling Wine): The role of lees. Heliyon. Vol. 9, Issue 8, e19306. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023. e19306

- [10] Ragole-Riverside, M. (2022). Measuring Brix in Fermentation. Access (18 September 2023). Available (https://winemakermag.com/wine-wizard/wine-wizard-3-3#:~:text=Typical%20starting %20degrees%20Brix%20would,(or%201.106%20specific%20gravity)).
- [11] RMUTSV. (2022). Sweetness of Fruit Juice Adjust by Piason Square. Access (29 January 2023). Available (http://agro-industry.rmutsv.ac.th/agro/alcoholic/unit4/pearson.htm)
- [12] Samuppito, J. (2022). Total acidity determination. Food analysis. Vol. 2022. pp. 1-3
- [13] Chidi, B. S., Bauer, F. F., and Rossouw, D. (2018). Organic Acid Metabolism and the Impact of Fermentation Practices on Wine Acidity: A Review. South African Journal of Enology and Viticulture. Vol. 39, No. 2, DOI: 10.21548/39-2-3164
- [14] Viboonpong, A., Sriboonjitta, S., Teerakul, N., Khantongthong, P., and Kramol, P. (2003). Wine Consumer Behavior and Attitude of Local Wine in Middle Market. Economics Journal. Vol. 7, No. 2, pp. 19-33

# การศึกษาผลของน้ำหมักชีวภาพจากผักตบชวาต่อการงอกของเมล็ดพันธุ์ ผักสลัด

# The Effect of Water Hyacinth Bio-extract on the Germination of Lettuce Seeds

นลินอร นุ้ยปลอด<sup>1\*</sup> Nalin-on Nuiplot<sup>1\*</sup>

Received: September 15, 2023; Revised: October 30, 2023; Accepted: November 2, 2023

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของน้ำหมักชีวภาพจากผักตบชวา (Eichhornia crassipes) ต่อการงอกของ เมล็ดพันธุ์ผักสลัด (Lactuca sativa) โดยนำเมล็ดพันธุ์แข่ในน้ำหมักชีวภาพเป็นระยะเวลาแตกต่างกัน คือ 6 9 และ 12 ชั่วโมง มีความแตกต่างของอัตราส่วนระหว่างน้ำหมักชีวภาพต่อน้ำกลั่น 4 อัตราส่วน คือ 1:250 1:500 1:750 และ 1:1000 โดยปริมาตร (v/v) จากนั้นนำเมล็ดพันธุ์ผักสลัดที่ผ่านการแช่น้ำหมักชีวภาพ ไปทดสอบการงอกของเมล็ดด้วยวิธี Top of paper และทดสอบการงอกในสภาพแปลง ผลการศึกษาพบว่า อัตราส่วนความเข้มข้น 1:750 โดยปริมาตร ที่ระยะเวลาในการแข่เมล็ด 9 ชั่วโมง ให้ร้อยละการงอกและดัชนี การงอกของเมล็ดสูงสุด คือ ร้อยละการงอกคิดเป็นร้อยละ 86.58 ทั้งการทดสอบการงอกของเมล็ดด้วยวิธี Top of paper และในสภาพแปลง และดัชนีการงอกด้วยวิธี Top of paper คิดเป็นร้อยละ 10.68 และดัชนี การงอกด้วยวิธีตรวจสอบในสภาพแปลง และคัชนีการงอกด้วยวิธี Top of paper คิดเป็นร้อยละ 10.68 และดัชนี การงอกก้วยวิธีตรวจสอบในสภาพแปลง และทัชนีการงอกด้วยวิธี Top of paper คิดเป็นร้อยละ 10.68 และดัชนี น้ำหมักชีวภาพจากผักตบชวาจึงเป็นแนวทางทนึ่งในการส่งเสริมการกระตุ้นการงอกของเมล็ดพันธุ์ผักสลัดได้ และยังเป็นอีกหนึ่งแนวทางในการกำจัดผักตบชวาเพื่อในการส่งเสริมการกระตุ้นการงอกของเมล็ดพันธุ์ผักสลัดได้

คำสำคัญ : น้ำหมักชีวภาพ; ผักตบชวา; การงอกของเมล็ด; ผักสลัด

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ในพระบรมราชูปถัมภ์ ปทุมธานี

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Valaya Alongkorn Rajabhat University under the Royal Patronage, Pathum Thani

<sup>\*</sup> Corresponding Author, Tel. 08 2246 6363, E - mail: nalin-on@vru.ac.th

#### Abstract

The objective of this research was to investigate the effect of water hyacinth bio-extract on the germination of lettuce seeds. Lettuce seeds were soaked in four ratios of bio-extract and distilled water: 1:250, 1:500, 1:750, and 1:1000 v/v. The soaking duration were 6, 9, and 12 hours. The germination test of the soaked lettuce seeds was performed using top of paper and field emergence methods. The results showed that the ratio of 1:750 v/v with a soaking duration 9 hours gave the highest results in both germination percentage and germination index. The germination percentage was 86.58% in both methods. The germination index by top of paper method and field emergence method were 10.68 % and 10.01 %, respectively (P<0.05). Therefore, the application of water hyacinth bio-extract could be a way to promote the germination of lettuce seeds. This could also be another way to get rid of water hyacinth and solve the water pollution problem.

Keywords: Bio-extract; Water Hyacinth; Germination of Seed; Lettuce

#### บทนำ

้ผักตบชวา (Eichhornia crassipes) เป็นพืชน้ำที่เจริญเติบโตและแพร่พันธุ์ได้รวดเร็ว โดยผักตบชวา 1 ต้น อาจขยายพันธ์ได้มากถึง 5,000 ต้น และเมล็ดของผักตบชวาสามารถมีชีวิตต่อไปได้อีก 15 ปี แม้อยู่ในหน้าแล้ง จนน้ำแท้งก็ตาม และยังสามารถขยายพันธุ์ได้ด้วยการแตกหน่อ ซึ่งผักตบชวา 2 ต้น สามารถแตกหน่อเติบโต เป็นต้นใหม่ได้อีก 30 ต้น ภายใน 20 วัน [1] ในประเทศไทยผักตบชวาถกจัดเป็นวัชพืชน้ำที่ต้องกำจัดเร่งด่วน เนื่องจากมีการสะสมหนาแน่นจนก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมและกีดขวางทางสัญจรและระบายน้ำ จนทำให้ เกิดอุทกภัยและน้ำท่วมขังอย่างมากในปัจจุบัน [2] จนเกิดผลกระทบในวงกว้างรวมไปถึงด้านเศรษฐกิจ สังคม ้ และนั้นทนาการ ซึ่งได้มีการออกพระราชบัญญัติสำหรับกำจัดผักตบชวา พ.ศ. 2456 ขึ้นเพื่อใช้ในการควบคม และกำจัดผักตบชวา มีหลายวิธีที่ถูกนำมาใช้ ทั้งโดยวิธีเชิงกล เช่น การใช้เรือกำจัด การใช้สารเคมีกำจัดวัชพืช พวกคลอโรฟีนอคซี และการใช้วิธีการทางชีวภาพ คือ การใช้แมลงมวนผักตบชวา [3] รวมถึงการส่งเสริม ให้ทางภาครัฐ เอกชน และหน่วยงานต่าง ๆ เข้ามาช่วยเหลือ เช่น นำไปผลิตของใช้แนวจักสาน เช่น กระเป๋า หมวก นำไปทำอาหารสัตว์ นำไปผสมในป๋ยดิน หรือนำไปผลิตเป็นถ่านชีวภาพ [4] ซึ่งวิธีดังกล่าวข้างต้น สามารถลดปริมาณผักตบชวาได้ แต่ก็มีต้นทุนสูง มีสารเคมีตกค้าง และยังมีปัญหาความหนาแน่นของผักตบชวา ้อย่อันเนื่องมาจากสินค้าที่นำผักตบชวาไปผลิตเริ่มมีปริมาณสงขึ้นมากกว่าความต้องการนำไปอปโภค ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาวิธีการการแปรรูปผักตบชวารูปแบบอื่น ประกอบกับประเทศไทยเป็นเมืองเกษตรกรรม ้ดังนั้นการนำผักตบชวาไปผลิตเป็นน้ำหมักชีวภาพเพื่อให้เป็นสารจากธรรมชาติที่ช่วยในการเพาะปลกพืชต่าง ๆ จึงน่าจะเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ช่วยกำจัดผักตบชวาได้

น้ำหมักชีวภาพ คือ ของเหลวที่ได้มาจากการย่อยสลายวัสดุเหลือใช้จากธรรมชาติในลักษณะสด โดยผ่านกิจกรรมการหมักของจุลินทรีย์ภายใต้สภาวะที่ไม่มีออกซิเจนเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งของเหลวที่เกิดขึ้นจะเป็น สารละลายเนื้อเดียว มีตะกอน สีน้ำตาลเข้ม มีกลิ่นฉุนของแอลกอฮอล์ มีค่า pH ระหว่าง 3 - 5 ประกอบด้วย สารอาหารหลายชนิด ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน กรดอะมิโน กรดอินทรีย์ กรดฮิวมิก เอนไซม์ วิตามิน ฮอร์โมน และแร่ธาตุ รวมไปถึงแอลกอฮอล์ คาร์บอนไดออกไซด์ และจุลินทรีย์ธรรมชาติ [5] ซึ่งจะช่วยเพิ่ม คุณภาพผลผลิตของพืช ในปัจจุบันมีการนำน้ำหมักชีวภาพมาใช้ประโยชน์ทางการเกษตรในหลายด้าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการผลิตพืช ซึ่งน้ำหมักชีวภาพจะช่วยปรับสภาพความเป็นกรด-ด่างในดิน และช่วยสร้าง ฮอร์โมนพืช ทั้งยังช่วยย่อยสลายอินทรีย์วัตถุในดิน [6] โดยหน่วยงานที่ถ่ายทอดองค์ความรู้ด้านการผลิตและ การใช้งานน้ำหมักชีวภาพ คือ กรมพัฒนาที่ดินในแต่ละจังหวัด ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อส่งเสริมเกษตรกรไทย ลดการใช้สารเคมี และสร้างการเรียนรู้แลกเปลี่ยนองค์ความรู้ระหว่างกัน พร้อมมอบปัจจัยการผลิต ถ่ายทอด องค์ความรู้ วิธีการนำไปใช้ ส่งเสริมให้มีการต่อยอดและนำไปใช้อย่างแพร่หลาย สร้างความเข้มแข็งและพึ่งพา ตนเองให้เกษตรกร และสร้างงานสร้างรายได้ให้กับชุมชนอีกด้วย [7]

จากประโยชน์ของน้ำหมักชีวภาพที่ได้กล่าวมาข้างต้น ผู้วิจัยได้เห็นถึงการนำมาใช้ประโยชน์ในด้าน การเกษตร จึงได้มีแนวคิดทำน้ำหมักชีวภาพจากผักตบชวาในพื้นที่ชุมชนตำบลกระแชง อำเภอบางไทร จังหวัด พระนครศรีอยุธยา ซึ่งมีปัญหาผักตบชวาหนาแน่น ก่อให้เกิดปัญหาต่าง ๆ ในแหล่งน้ำ ทั้งการคมนาคม การชลประทาน และการประมง แม้จะมีวิธีการการแปรฐปผักตบชวาไปเป็นกระเป๋าจักสาน ปุ๋ยดิน หรือถ่านชีวภาพ แต่ในพื้นที่ก็ยังประสบปัญหานี้อยู่ ทั้งในพื้นที่ชุมชนกระแชงนี้ยังมีการปลุกผักสลัด (Lactuca sativa) เพื่อการบริโภค ้และส่งเสริมเศรษฐกิจให้กับครัวเรือน เนื่องจากนอกจากจะมีคุณค่าทางอาหาร ยังทานดิบได้ ปลูกได้ทุกฤดู ใช้เวลาในการเพาะปลูกเพียง 45 - 60 วัน และเป็นผักที่มีความนิยมในตลาดปัจจุบัน [8] และมีกลุ่มที่รับซื้อ ้ผลผลิตผักสลัดในบริเวณใกล้เคียงพื้นที่ชมชนอีกด้วย อย่างไรก็ตาม การเตรียมความพร้อมในการเพาะปลก ้ผักสลัด นอกจากการเตรียมพื้นที่เพาะปลูก การดูแลรักษา และการเพิ่มผลผลิตแล้ว ยังต้องเตรียมความพร้อม ของเมล็ดพันธ์ก่อนนำไปปลกโดยเฉพาะเรื่องอัตราการงอก เนื่องจากความไม่งอกของเมล็ดพันธ์ผักสลัด เป็นปัญหาที่เกษตรกรในพื้นที่มักพบเช่นกัน นอกจากนี้ได้เคยมีรายงานถึงการนำน้ำหมักชีวภาพจากผักตบชวา มาใช้กระตุ้นการงอกของเมล็ดพันธุ์พริก [3] โดยพบว่าน้ำหมักชีวภาพจากผักตบชวาส่งผลต่ออัตราการงอก ของเมล็ดพันธุ์พริกจินดาแดง โดยการกระตุ้นการงอกของเมล็ดพริกได้ แต่ยังไม่เคยมีการรายงานถึงการนำมาใช้ กระตุ้นการงอกของเมล็ดพันธุ์ผักสลัดมาก่อน ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของน้ำหมักชีวภาพ จากผักตบชวาต่อการงอกของเมล็คพันธุ์ผักสลัด ซึ่งผลที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้ ผู้วิจัยคาดหวังว่าจะเป็น ้ข้อมูลเพิ่มเติมกับเกษตรกรซึ่งเป็นอาชีพทลักของประชาชนในชุมชนดังกล่าว ในเรื่องการทำน้ำหมักชีวภาพ ้จากผักตบชวาที่เป็นหนึ่งในปัญหาสำคัญภายในชมชน และสามารถนำน้ำหมักชีวภาพที่ได้ไปใช้กับเมล็ดพันธ์ ้ได้หลากหลาย และเพื่อส่งเสริมการนำข้อมูลในการศึกษาครั้งนี้ไปใช้กระตุ้นการงอกของเมล็ดพันธุ์ต่าง ๆ ในพื้นที่ชมชนอื่น ๆ อีกด้วย

#### วิธีดำเนินการวิจัย

1. วิธีการเตรียมน้ำหมักชีวภาพจากผักตบชวา [3]

ผักตบชวาที่ใช้ในการศึกษาได้มาจากแหล่งน้ำธรรมชาติในตำบลกระแชง อำเภอบางไทร จังหวัด พระนครศรีอยุธยา โดยนำผักตบชวามาล้างทำความสะอาด สะเด็ดน้ำ แล้วสับเป็นชิ้นเล็ก จากนั้นนำผักตบชวา ที่สับแล้วปริมาณ 3 กิโลกรัม คลุกเคล้าให้เข้ากันกับกากน้ำตาล 1 กิโลกรัม แล้วเติมน้ำสะอาด 3 ลิตร ผสมให้เข้ากันดีแล้วนำไปหมักในถังทึบแสง ปิดฝา ให้สนิทและหมักนาน 30 วัน ในที่ร่ม ห้ามโดนแสง เมื่อครบ ระยะเวลาหมัก ให้กรองแยกน้ำหมักชีวภาพไปใช้ในการทดสอบ การงอกของเมล็ดพันธุ์ผักสลัดต่อไป แผนภาพ วิธีการเตรียมน้ำหมักชีวภาพจากผักตบชวาดังรูปที่ 1 ทั้งนี้สังเกตลักษณะของน้ำหมักชีวภาพ ได้แก่ สี ตะกอน กลิ่น และวัดค่า pH เพื่อนำน้ำหมักชีวภาพที่ได้มาตรฐานไปใช้ในขั้นตอนต่อไป การศึกษาผลของน้ำหมักชีวภาพจากผักตบชวาต่อการงอกของเมล็ดพันธุ์ผักสลัด The Effect of Water Hyacinth Bio-extract on the Germination of Lettuce Seeds



รูปที่ 1 แผนภาพวิธีการเตรียมน้ำหมักชีวภาพจากผักตบชวา

#### 2. การทดสอบการงอกของเมล็ดพันธุ์ผักสลัดด้วยวิธี Top of paper

การทดลองในงานวิจัยนี้ที่เกี่ยวกับการจัดการเมล็ดพันธุ์ ผู้วิจัยได้ศึกษา Chapter 2 Sampling ทัวข้อ 2.2.12 Treated seeds ใน International Seed Testing Association [9] และปรับใช้โดยเคร่งครัด ในเรื่องวัดผลการทดลองหลัง treat (กระทำการ) เมล็ดพันธุ์ว่าต้องไม่กำจัดสิ่งที่ treat นั้น ๆ ออกไปก่อน การวัดผล ขั้นตอนแรกของการทดสอบการงอก คือ คัดเมล็ดพันธุ์ผักสลัดที่สมบูรณ์ก่อนนำไปปลุก โดยดัดแปลง ้จากวิธีการของ [10] คือ นำเมล็ดพันธุ์ผักสลัด เครื่องหมายการค้าเจียไต๋ที่มีอัตราการงอกร้อยละ 90 มาแข่น้ำ 5 นาที และคัดเฉพาะเมล็ดที่จมน้ำมาทำการทดลองต่อไป ทำการทดลองกลุ่มทดลองละ 3 ซ้ำ และประกอบด้วย 2 ปัจจัย ได้แก่ ปัจจัยที่ 1 คือ อัตราส่วนความเข้มข้นของน้ำหมักชีวภาพต่อน้ำกลั่นจำนวน 4 อัตราส่วน คือ 1:250 1:500 1:750 และ 1:1000 โดยปริมาตร และให้น้ำกลั่นเป็นกลุ่มควบคุม ในการเจือจางน้ำหมัก ้ชีวภาพด้วยน้ำกลั่นจะทำให้ค่าความเป็นกรดที่เกิดขึ้นจากการหมักในน้ำหมักชีวภาพมีค่าลดลง (pH สงขึ้น) เพื่อหาความเหมาะสมของอัตราส่วนความเข้มข้นน้ำหมักชีวภาพที่ผลิตขึ้น ก่อนนำไปใช้กับพืชโดยตรง [11] ้และปัจจัยที่ 2 คือ ระยะเวลาในการแช่เมล็คที่แตกต่างกัน 3 ระยะเวลา คือ 6 9 และ 12 ชั่วโมง นำเมล็คพันธ์ ผักสลัดมาแช่ในน้ำหมักชีวภาพจากผักตบชวาในแต่ละอัตราส่วน กลุ่มทคลองละ 100 เมล็ด โดยมีระยะเวลา ในการแช่เมล็ดของแต่ละกลุ่มทดลองที่แตกต่างกัน 3 ระยะเวลาดังกล่าวข้างต้น หลังจากครบกำหนดเวลาแล้ว ้นำเมล็ดพันธุ์ผักสลัดมาผึ่งลมให้สะเด็ดน้ำเป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อป้องกันเชื้อราและเพิ่มอัตราการงอก ก่อนนำไปปลูก [12] จากนั้นนำไปทดสอบการงอกด้วยวิธี Top of paper คือ วางเมล็ดพันธุ์ผักสลัดที่ผ่านการแช่ ้ในน้ำหมักชีวภาพจากผักตบชวาลงบนกระดาษทิชชูที่ซ้อนกัน 5 ชั้น รดน้ำให้ชุ่มช่วงเวลาเช้าเย็น ปิดฝากล่อง ที่วางกระดาษทิชชูเพื่อป้องกันการสูญเสียความชุ่มชื้น และสังเกตการงอกของเมล็ดภายในระยะเวลา 7 วัน ้บันทึกจำนวนเมล็ดพันธุ์ผักสลัดที่งอก จำนวนต้นกล้าที่งอกสมบูรณ์ และจำนวนต้นกล้าที่งอกไม่สมบูรณ์ เพื่อทดสอบว่าน้ำหมักชีวภาพมีความสัมพันธ์กับความสมบูรณ์ของต้นกล้าหรือไม่ คำนวณร้อยละการงอกและ ้ดัชนีการงอกของเมล็ด แผนภาพวิธีการทดสอบการงอกของเมล็ดพันธุ์ด้วยวิธี Top of paper ดังรูปที่ 2 แล้วจึงคัดเลือกอัตราส่วนความเข้มข้นของน้ำหมักชีวภาพจากผักตบชวา และระยะเวลาในการแช่เมล็ดที่มีการงอก ของเมล็ดสงสด เพื่อนำไปทดสอบการงอกในสภาพแปลงต่อไป

#### การทดสอบการงอกของเมล็ดพันธุ์ผักสลัดในสภาพแปลง

นำเมล็คพันธุ์ผักสลัดแซ่ในน้ำหมักชีวภาพจากผักตบชวาที่มีอัตราส่วนความเข้มข้นของน้ำหมัก ชีวภาพต่อน้ำกลั่นที่เหมาะสมที่สุด และมีระยะเวลาในการแซ่เมล็คที่เหมาะสมจากการทดสอบการงอกในการทดลอง ก่อนหน้า มาเพาะลงในถาดเพาะ 105 ซ่อง ที่ทำเป็นแปลงดินจำลองขนาดประมาณ 30 x 60 cm โดยเพาะเมล็ค พันธุ์ผักสลัดจำนวน 100 เมล็ด จัดเป็นชุดทดลอง และเมล็คพันธุ์ผักสลัดที่แซ่ในน้ำกลั่นจัดเป็นชุดควบคุม จากนั้นนำกระบะเพาะดังกล่าววางไว้ในบริเวณที่มีแสงแดค รดน้ำให้ชุ่ม ช่วงเวลาเช้าเย็น สังเกตการงอกของเมล็ค ภายในระยะเวลา 7 วัน ทำการทดลอง 3 ซ้ำ บันทึกจำนวนเมล็คพันธุ์ผักสลัดที่งอก จำนวนต้นกล้าที่งอกสมบูรณ์ และจำนวนต้นกล้าที่งอกไม่สมบูรณ์ เพื่อทดสอบว่าน้ำหมักชีวภาพมีความสัมพันธ์กับความสมบูรณ์ของต้นกล้า หรือไม่ โดยวิธีการจำแนกต้นกล้าที่งอกไม่สมบูรณ์ คือ ต้นกล้าที่ไม่มีส่วนประกอบราก ใบ ลำต้น ที่ครบถ้วน หรือสมบูรณ์ เช่น ไม่มีรากแก้ว ลำต้นมีรอยแตกหรือรอยแผลลึก ใบเลี้ยงไม่ครบถ้วน ใบเลี้ยงมีรอยซ้ำขนาดใหญ่ ยอดอ่อนขาดหายไปหรือแตกเป็นแฉก ยอดอ่อนบิดเป็นเกลียว ต้นกล้าหงิกงอ หรือต้นกล้าเน่าเสียหายรุนแรง [13] จากนั้นนำไปคำนวณร้อยละการงอกและดัชนีการงอกของเมล็ด สำหรับการวัดการเจริญของต้นกล้าทำได้ โดยการวัดความสูงของต้นกล้าทุกต้นที่เพาะได้ในแปลงจำลอง



รูปที่ 2 แผนภาพวิธีการทดสอบการงอกของเมล็ดพันธุ์ด้วยวิธี Top of paper

4. การคำนวณร้อยละการงอกของเมล็ด (Percentage of seed germination, %) และดัชนีการงอก ของเมล็ค (Seed germination index, GI)

ร้อยละการงอกของเมล็ด คำนวณจากสูตร

จากนั้น คำนวณทาค่าร้อยละของต้นกล้าที่งอกสมบูรณ์ และร้อยละของต้นกล้าที่งอกไม่สมบูรณ์ ร้อยละของต้นกล้าที่งอกสมบูรณ์ คำนวณจากสูตร

ร้อยละของต้นกล้าที่งอกไม่สมบูรณ์ คำนวณจากสูตร

ดัชนีการงอกของเมล็ด คำนวณตามวิธีของ AOSA [3] จากสูตร

#### โดยเมล็ดพันธุ์ที่มีค่าดัชนีการงอกสูง หมายถึง เมล็ดพันธุ์ที่มีความแข็งแรง ดัชนีการงอกเป็นการตรวจสอบความแข็งแรงของเมล็ดจากอัตราความเร็วในการงอกของเมล็ด

นำผลของทดลองที่ได้ไปวิเคราะห์ข้อมูลโดยวิธีวิเคราะห์ความแปรปรวน ตามแผนการทดลอง แบบ Completely Randomized Design (CRD)

#### ผลการวิจัย

จากการสังเกตและวัดคุณลักษณะของน้ำหมักชีวภาพจากผักตบชวา พบว่ามีสีน้ำตาลเข้มมีตะกอนสีน้ำตาลเข้ม กลิ่นหวานอมเปรี้ยวเล็กน้อย และมีค่า pH = 4.16 จึงนำน้ำหมักชีวภาพที่ได้ไปเจือจางในน้ำกลั่น เพื่อใช้ในการ ทดสอบขั้นต่อไป และวัดค่า pH หลังเจือจางอีกครั้งหนึ่ง ซึ่งค่าความเป็นกรดด่างหลังจากเจือจางด้วยน้ำกลั่น แล้วพบว่า ที่อัตราส่วนความเข้มข้น 1:250 1:500 1:750 และ 1:1000 มีค่า pH = 4.405.126.14 และ 6.03 ตามลำดับ

#### 1. ผลของการทดสอบการงอกของเมล็ดพันธุ์ผักสลัดด้วยวิธี Top of paper

การงอกของเมล็ดพันธุ์ผักสลัดที่แช่ในน้ำหมักชีวภาพจากผักตบชวาที่อัตราส่วนความเข้มข้นต่างกัน ให้ผลการทดลองแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.05)\* โดยเมล็ดพันธุ์ผักสลัดให้ร้อยละการงอกและ ดัชนีการงอกที่เพิ่มสูงขึ้น ความเข้มข้นจากมากไปน้อย (เจือจางน้อยไปมาก) เมื่อเทียบกับชุดควบคุม แต่ที่ความเข้มข้นน้อยที่สุด (เจือจางมากที่สุด) 1:1000 โดยปริมาตร ให้ร้อยละการงอกและดัชนีการงอกที่ลดลง น้อยกว่าที่ความเข้มข้น 1:750

การงอกของเมล็ดพันธุ์ผักสลัดที่แข่ในน้ำหมักชีวภาพจากผักตบชวาที่ระยะเวลาในการแข่ เมล็ดพันธุ์ต่างกัน ให้ผลการทดลองแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.05)\*\* และเมื่อพิจารณาที่ อัตราส่วนความเข้มข้น 1:750 โดยปริมาตร ระยะเวลาในการแข่ 9 ชั่วโมง ให้ร้อยละการงอกและดัชนีการงอก ของเมล็ดพันธุ์ผักสลัดสูงสุด คือ ร้อยละการงอกเท่ากับ 86.58 และดัชนีการงอกเท่ากับ 10.68 รองลงมา คือ ระยะเวลาการแข่ 6 ชั่วโมง ให้ร้อยละการงอกเท่ากับ 85.47 และดัชนีการงอกเท่ากับ 10.57 ผลการทดสอบ การงอกของเมล็คพันธุ์ผักสลัดด้วยวิธี Top of paper ดังตารางที่ 1 และรูปที่ 3 จากนั้นนำวิธีการใช้อัตราส่วน ความเข้มข้น 1:750 โดยปริมาตร และระยะเวลาในการแข่ 9 ชั่วโมง ไปทดสอบการงอกของเมล็ดพันธุ์ผักสลัด ในสภาพแปลงต่อไป

อัตราส่วน ( <b>V/V</b> )	ระยะเวลา (ชม.)	ร้อยละ การงอก	ร้อยละ ต้นที่งอกสมบูรณ์	ร้อยละ ต้นที่งอกไม่สมบูรณ์	ดัชนีการงอก
ชุดควบคุม		71.56±1.75	47.22±1.49	24.34±2.77	4.06±0.75
1:250		78.22±2.62	51.22±1.17	27.00±2.47	$5.65 \pm 0.03$
1:500	6	79.56±1.26	52.99±1.75	26.57±1.75	7.75±0.37
1:750		85.47±2.26**	52.99±1.75	32.48±1.75	10.57±0.12**
1:1000		77.22±1.92	48.22±1.60	29.00±1.75	7.49±0.39
ชุดควบคุม		71.56±1.75*	44.22±1.61	27.34±2.96	5.62±0.11
1:250		81.56±2.14	52.99±2.09	28.57±1.75	8.15±0.58
1:500	9	83.22±1.26	52.22±1.26	31.00±1.75	9.29±0.34
1:750		86.58±1.26*,**	55.22±1.92	31.36±1.75	10.68±0.16**
1:1000		78.22±1.26	59.56±1.28	$18.66 \pm 2.14$	8.29±0.67

ตารางที่ 1 ผลของการทดสอบการงอกของเมล็คพันธุ์ผักสลัดด้วยวิธี Top of paper

อัตราส่วน ( <b>V/V</b> )	ระยะเวลา (ชม.)	ร้อยละ การงอก	ร้อยละ ต้นที่งอกสมบูรณ์	ร้อยละ ต้นที่งอกไม่สมบูรณ์	ดัชนีการงอก
ชุดควบคุม		71.53±1.74	44.21±2.14	27.32±1.29	5.69±0.64
1:250		81.53±0.41	52.94±2.98	28.59±1.92	$9.45 \pm 0.18$
1:500	12	83.21±0.41	52.21±1.15	31.00±1.75	9.75±0.24
1:750		86.54±0.41**	55.21±1.81	31.33±1.92	10.67±0.33**
1:1000		78.21±1.26	59.53±1.17	18.68±1.26	8.82±0.01

	ב יני יצ אשי		
ตารางท 1	ผลของการทดสอบการงอกของเมลดพนธผกสลดดวยวธ '	Top of pape	r (ตอ)
			- (

\*, \*\* ระบุความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ในอิทธิพลอัตราส่วนความเข้มข้นและระยะเวลา (P<0.05)



(ก) 6 ชั่วโมง



(ข) 9 ชั่วโมง





(ค) 12 ชั่วโมง



#### 2. ผลของการทคสอบการงอกของเมล็ดพันธุ์ผักสลัดในสภาพแปลง

จากการทดสอบการงอกของเมล็ดพันธุ์ผักสลัดในสภาพแปลง โดยนำน้ำหมักชีวภาพในความเข้มข้น ที่มีอัตราส่วนต่อน้ำกลั่น 1:750 และระยะเวลา 9 ชั่วโมง ในการแข่เมล็ดพันธุ์ที่เหมาะสมซึ่งได้จากการทดสอบ การงอกด้วยวิธี Top of paper มาใช้ทดสอบการงอกในสภาพแปลงดินจำลอง พบว่าเมล็ดพันธุ์ผักสลัดที่แข่ ในน้ำหมักชีวภาพก่อนนำไปเพาะให้ร้อยละการงอกและดัชนีการงอกของเมล็ด (86.58 % และ 10.01) สูงกว่า ชุดควบคุม (56.99 % และ 5.58) อย่างมีนัยสำคัญ (P<0.05) ผลการทดสอบการงอกของเมล็ดพันธุ์ผักสลัด ในสภาพแปลง ดังตารางที่ 2 และรูปที่ 4

อัตราส่วน (V/V)	ระยะเวลา (ขม.)	ร้อยละ การงอก	ร้อยละ ต้นที่งอกสมบูรณ์	ร้อยละ ต้นที่งอกไม่สมบูรณ์	ดัชนีการงอก
ชุดควบคุม	9	56.99±3.09*	41.99±1.11	15.00±3.98	5.58±0.32*
1:750		86.58±2.62*	74.22±1.68	12.36±2.96	10.01±0.05*

ตารางที่ 2 ผลของการทดสอบการงอกของเมล็ดพันธุ์ผักสลัดในสภาพแปลง

 ระบุค่าความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ในอิทธิพลอัตราส่วนความเข้มข้นและ ระยะเวลาที่เหมาะสม (P<0.05)</li>

และเมื่อวัดการเจริญเติบโตของต้นกล้าโดยการวัดความสูงหลังจากทดสอบการงอกในสภาพแปลง ครบ 7 วัน พบว่า ความสูงของต้นกล้าที่แข่ในน้ำหมักชีวภาพที่มีความเข้มข้นอัตราส่วน 1:750 โดยปริมาตร เวลา 9 ชั่วโมง มีค่าเฉลี่ยความสูง 4.63±1.47 เซนติเมตร ซึ่งสูงกว่าชุดควบคุมที่มีค่าเฉลี่ยความสูง 3.16±1.61 เซนติเมตร โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.05) โดยตัวอย่างการงอก ของเมล็ดพันธุ์ผักสลัดทั้งในวิธีการทดสอบ Top of paper และวิธีการทดสอบในสภาพแปลง ดังรูปที่ 5



รูปที่ 4 ผลของการทดสอบการงอกของเมล็ดพันธุ์ผักสลัดในสภาพแปลง



(ก) 0 วัน



(ข) 4 วัน



(ค) 7 วัน



(ง) การทดสอบการงอกในสภาพแปลง รูปที่ 5 ตัวอย่างการงอกของเมล็ดพันธุ์ผักสลัดในการทดสอบการงอกด้วยวิธี Top of paper

#### การอภิปรายผล และบทสรุป

จากผลการศึกษาผลของการใช้น้ำหมักชีวภาพจากผักตบชวาต่อการงอกของเมล็ดพันธุ์ผักสลัด โดยการนำเมล็ดพันธุ์ มาแช่ในน้ำหมักชีวภาพที่มีอัตราส่วนความเข้มข้นระหว่างน้ำหมักชีวภาพต่อน้ำกลั่น 4 ความเข้มข้น คือ 1:250 1:500 1:750 และ 1:1000 โดยปริมาตร และมีระยะเวลาในการแช่เมล็ด 3 ระยะเวลาที่แตกต่างกันของแต่ละ ชุดทดลอง คือ 6 9 และ 12 ชั่วโมง มาทดสอบการงอกด้วยวิธี Top of paper และทดสอบการงอกใน สภาพแปลงพบว่า น้ำหมักชีวภาพที่ผลิตได้ มีความเป็นกรดด่างที่ pH = 4.16 ซึ่งเป็นค่าที่ไม่เหมาะสมต่อการนำ ไปใช้ประโยชน์ของพืชโดยตรง โดยปกติค่าความเป็นกรดด่างที่เหมาะสมกับพืชควรอยู่ในช่วง pH = 6 - 7 และ หากน้ำหมักชีวภาพที่มีค่าความเป็นกรดถึงกรดจัด (pH = 3.5 - 5.6) จะต้องเจือจางให้เหมาะสมก่อนนำไปใช้ กับพืชโดยตรง [10] ในงานวิจัยนี้จึงได้เจือจางน้ำหมักชีวภาพจากผักตบชวาด้วยน้ำกลั่น ซึ่งค่าความเป็นกรดค่าง หลังจากเจือจางด้วยน้ำกลั่นแล้ว พบว่ามีอัตราส่วนที่ 1:750 และ 1:1000 โดยปริมาตรที่มีค่า pH ที่เหมาะสม กับพืช คือ มีค่า pH = 6.14 และ 6.03

จากการศึกษาการงอกของเมล็ดพันธุ์ผักสลัดด้วยวิธีการทดสอบการงอกด้วยวิธี Top of paper ที่อัตราส่วนความเข้มข้นระหว่างน้ำหมักชีวภาพจากผักตบชวาต่อน้ำกลั่น 1:750 โดยปริมาตร เป็นอัตราส่วน ที่ทำให้เมล็ดพันธุ์ผักสลัดงอกได้ดีที่สุด และทุกระยะเวลาในการแข่เมล็ดพันธุ์ คือ 6 9 และ 12 ชั่วโมง ให้ร้อยละ การงอกและดัชนีการงอกที่สูงกว่าอัตราส่วนความเข้มข้นอื่น ทั้งนี้เนื่องจากสภาพกรดอ่อนที่สามารถช่วยย่อยสลาย เปลือกของเมล็ดพันธุ์ได้ ทำให้สารสำคัญในน้ำหมักชีวภาพจากผักตบชวาสามารถซีมเข้าลู่เมล็ดพันธุ์ได้ดีจนกระตุ้น ให้เกิดการงอกได้ดีตามมา ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ [3] และ [10] ที่ทำการแข่เมล็ดพันธุ์ได้ดีจนกระตุ้น ให้เกิดการงอกได้ดีตามมา ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ [3] และ [10] ที่ทำการแข่เมล็ดพันธุ์ได้ดีจนกระตุ้น ให้เกิดการงอกได้ดีตามมา ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ [3] และ [10] ที่ทำการแข่เมล็ดพันธุ์ของข้าวเหนียว เขี้ยวงูและเมล็ดพันธุ์พริกในน้ำหมักชีวภาพ ซึ่งพบว่าเมล็ดพันธุ์พืชที่แข่ในน้ำหมักชีวภาพมีอัตราการงอกที่ดีกว่า ชุดควบคุมที่ไม่ได้แข่เมล็ดในน้ำหมักชีวภาพก่อนการนำไปปลูก ทั้งนี้ระยะเวลา 9 ชั่วโมง ให้ร้อยละการงอก ที่สูงกว่าระยะเวลาอื่นในอัตราส่วนที่เท่ากัน คือ ร้อยละการงอกคิดเป็นร้อยละ 86.58 ทั้งการทดสอบการงอก ของเมล็ดด้วยวิธี Top of paper และในสภาพแปลงดัชนีการงอกค้วยวิธี Top of paper คิดเป็นร้อยละ 10.68 และดัชนีการงอกในสภาพแปลงคิดเป็นร้อยละ 10.01 เนื่องจากการได้รับสภาพกรดจากน้ำหมักชีวภาพที่เป็น กรดสูงเกินไปทรือได้รับสภาพกรดในระยะเวลาที่นานเกินไป จะทำให้เมล็ดได้รับสารสำคัญทรือฮอร์โมนพืช ที่อยู่ในน้ำหมักชีวภาพมากเกินไป จนสามารถยับยั้งการงอกของเมล็ดพันธุ์ได้ [14] ในขณะเดียวกันในอัตราส่วน ความเข้มข้นของน้ำหมักชีวภาพที่น้อยเกินไป (1:1000) ก็ทำให้เมล็ดพืชได้รับฮอร์โมนที่สำคัญได้น้อย จึงกระตุ้น การงอกได้น้อย

ในน้ำหมักซีวภาพจะมีส่วนประกอบฮอร์โมนพืชที่อยู่ในรูปที่พืชสามารถนำไปใช้งานได้ ได้แก่ จิบเบอเรลลิน ออกซิน และไซโทไคนิน ซึ่งฮอร์โมนพืชเหล่านี้สามารถส่งเสริมการเจริญของพืชและเร่งการงอกของเมล็ด [15] โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ฮอร์โมนจิบเบอเรลลินและออกซิน ซึ่งกระตุ้นให้เกิดกระบวนการงอกลำต้นและรากจากเมล็ด [16] - [17] ซึ่งชนิดและปริมาณของฮอร์โมนพืชที่พบในน้ำหมักชีวภาพจะขึ้นอยู่กับวัสดุที่นำมาหมัก [18] ดังนั้น น้ำหมักชีวภาพจากผักตบชวา ซึ่งเป็นน้ำหมักที่ได้จากพืชประเภทใบเด่น จึงน่าจะมีสารอาหารและฮอร์โมน ที่สำคัญต่อการเจริญของผักสลัดที่เป็นพืชประเภทใบเด่นเช่นกัน ซึ่งสอดคล้องกันกับผลการศึกษาของ [19] ซึ่งศึกษาผลของน้ำหมักชีวภาพต่อการเติบโตและคุณภาพของผักสลัดเบบี้เรดคอส โดยพบว่าน้ำหมักชีวภาพ ที่มีส่วนผสมจากผักและผลไม้ที่มีธาตุไนโตรเจนสูง มีผลทำให้ปริมาณคลอโรฟิลล์ในใบพืชเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ พืชมีใบเขียวและคุณภาพดียิ่งขึ้น และยังสอดคล้องกับการศึกษาของ [20] ที่ศึกษาผลของน้ำหมักชีวภาพต่อ การเจริญเติบโตของผักกวางตุ้งดอก โดยพบว่าน้ำหมักชีวภาพสูตรแหนแดงให้ผลดีต่อการเจริญของพืช

ยิ่งไปกว่านั้นจากการท<sup>ุ</sup>ดสอบการงอกในสภาพแปลง ยังสามารถสรุปได้ว่า น้ำหมักชีวภา<sup>พ</sup>จากผักตบชวา มีผลต่อการเจริญเติบโตของต้นกล้าผักสลัดอย่างมีนัยสำคัญ (P<0.05) เนื่องจากเมล็ดพันธุ์ผักสลัดที่แช่น้ำหมัก ชีวภาพจากผักตบชวามีความสูงของต้นกล้ามากกว่าเมล็ดพันธุ์ชุดควบคุมที่แช่ในน้ำกลั่นเพียงอย่างเดียว สอดคล้องกับการศึกษาของ [21] ที่พบว่า เมื่อแช่เมล็ดพริกขี้หนูสวนในน้ำหมักชีวภาพเป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง ให้น้ำหนักสดและต้นกล้าแห้งสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเทียบกับเมล็คพันธุ์ที่ไม่ได้แช่น้ำหมักชีวภาพ เมื่อทดสอบการงอกในสภาพแปลง 14 วัน ดังนั้นการใช้น้ำหมักชีวภาพจึงเป็นแนวทางในการกระตุ้นการงอก และส่งเสริมให้เมล็ดพันธุ์งอกได้ดีขึ้นอีกด้วย

อย่างไรก็ตามในการทดลองครั้งต่อไป ควรมีการทดลองด้วยอัตราส่วนความเข้มข้นของน้ำหมักชีวภาพ ต่อน้ำกลั่น ในสภาพแปลงที่เหมือนกันกับในการทดสอบการงอกด้วยวิธี Top of paper และควรมีรูปถ่ายการงอก ของเมล็ดพันธุ์ แสดงการงอกที่สมบูรณ์และไม่สมบูรณ์ ทั้งการทดสอบด้วยวิธี Top of paper และในสภาพแปลง และควรทดสอบในระดับแปลงจริง เพื่อให้ความสมบูรณ์ของการประยุกต์ใช้และการทดสอบในระดับที่ใกล้เคียง จริงมากยิ่งขึ้น ทั้งนี้ผลที่ได้จากในงานวิจัยนี้นอกจากจะนำไปใช้ในการเพิ่มอัตราการงอกและกระตุ้นการเจริญเติบโต ของผักสลัดอันเป็นพืชเศรษฐกิจของประเทศในปัจจุบัน ยังสามารถนำไปใช้กำจัดผักตบชวาและแก้ไขปัญหา สิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นจากผักตบชวาได้อีกแนวทางหนึ่ง

#### References

- University of Georgia. (2018). Common Water Hyacinth. Invasive. ORG: Center for Invasive Species and Ecosystem Health. Access (19 August 2023). Available (https://www.invasive.org/ browse/subinfo. cfm?sub=3020#references)
- [2] Siamrath Online. (2023). Department of Public Works has Appointed Committee 3 to Clearly Expedite the Integration of Eliminating Water Hyacinth and Opening Waterways for the Rainy Season in 2023. Access (19 August 2023). Available (https://siamrath.co.th/n/463988)
- Phonmat, S., Noichaisin, L., and Kitlertpornpiroat, R. (2023). Effect of Water Hyacinth Fermented Bio-Extracts on Germination of Chili (*Capsicum annuum* L). Science and Technology Nakhon Sawan Rajabhat University Journal. Vol. 15, No. 21, pp. 1-14 (in Thai)
- [4] Nuiplot, N. (2023). Effect of Bio-charcoal from Water Hyacinth (*Eichhornia crassipes*) Combined with Fertilizer Management on Yield in Lettuce (*Lactuca sativa*). Science and Technology Nakhon Sawan Rajabhat University Journal. Vol. 15, No. 21, pp. 15-26 (in Thai)
- [5] Chinsuk, A. (2014). Knowledge About Biological Fermentation. Training Documents for Sub-District Volunteer Soil Doctors, Fiscal Year 2015, Course on Developing Sub-district Volunteer Soil Doctors to Smart Farmers. 22 November 2014. Maha Sarakham: Maha Sarakham Land Development Station. [in Thai]
- [6] Wongsrisakulkaew, Y., Puthom, N., Thongkham, T., and Autta, P. (2018). Effect of Chemical Fertilizer and Bio-extract on Growth and Color of Lettuces (*Lactuca sativa*) cv. Red Cos and Red Batavia. Agricultural Science Journal. Vol. 49, No. 1 (Supplement), pp. 42-46 (in Thai)
- [7] Public Relations Department. (2023). Encourage Thai Farmers to Use Organic Fetilizers and Biological Fertilizers to Reduce Costs, Maintain Soil Health, Produce Safe Quality Products. Access (20 August 2023). Available (https://www.prd.go.th/th/content/category/detail/id/33/iid/192361)
- [8] Santimit, W., Paphaphuwaroj, N., and Jittreesap, S. (2019). Non Chemical Growing Technique for Lettuce in Soilless Substrates with Solid-vermicompost and Liquid-vermicompost Extract. Research report. Phra Nakhon Si Ayutthaya: Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi (in Thai)
- [9] International Seed Testing Association. (2016). Chapter 2 Sampling: International Rules for Seed Testing. Switzerland: Seed Science and Technology. pp. 2-2

- [10] Chanta, K., Pokyada, S., and Buayen, N. (2018). Effects of Bio-extract on the Germination of Rice Seed (Kiaw Ngu Glutinous Rice). Science and Technology Journal, Rajamangala University of Technology Thanyaburi. Vol. 8, No. 1, pp. 152-164 (in Thai)
- [11] Pibulsongkram Rajabhat University. (2012). Bio-extracts for Agriculture. Access (26 August 2023). Available (https://www.gotoknow.org/posts/302855)
- [12] Kumplee, S. and Dumrongkittikule, S. (2012). Effect of Fermented Fruit Juice on Chilli Seed Germination. Proceedings of the 9<sup>th</sup> Kasetsart University Kamphaeng Saen Campus Conference: Plants and Biotechnology, Animals and Veterinary, Education and Development Sciences on 6-7 December 2012. Nakhon Pathom: Kasetsart University Kamphaeng Saen Campus, pp. 2339-2346 (in Thai)
- [13] Duangpatra, J. (n.d.). Seed Germination Testing and Tools Used in Germination Testing. Documents from the Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, Kasetsart University, pp. 11-13. Access (24 October 2023). Available (https://kukr.lib.ku.ac.th/kukr\_es/covid19/search \_detail/dowload\_digital\_file/24940%0A%0A/22130)
- [14] Vijuksungsith, P., Sukcharoen, A., Verasan, J., Benjawan, L., and Boonprasert, R. (2013). Effect of Different Bio-extracts on the Growth of Chilli (*Capsicum annuum* L.). In Proceedings of the 10<sup>th</sup> Kasetsart University Kamphaeng Saen Campus Naltional Conference on 6-7 December 2013. Nakhon Pathom: Kasetsart University Kamphaeng Saen Campus, pp. 2164-2173
- [15] Tancho, A. (2013). Applied Natural Agriculture Textbook: Principles of Concepts, Techniques in Thailand. Chiang Mai: TRIO Publishing Advertising and Multimedia. p. 67 (in Thai)
- [16] Suwankhiri. (2004). Final Report: Liquid Bio-extract Fertilizer or Bio-extract and the Application of Effective Microbes (EM) (Agriculture and Environment). Chiang Mai: Agricultural System in Irrigation Project Area, Multiple Cropping Center, Faculty of Agriculture, Chiang Mai University
- [17] Hansuri, J. and Siri, B. (2018). Effects of Seed Coating with Mixed Plant Hormone for Seed Qualities Enhancement of Hybrid Cucumber. Khon Kaen Agriculture Journal. Vol. 46, No. 3, pp. 507-516 (in Thai)
- [18] Ruengviriyachai, C. (2009). Research Report: Plant Hormones in Bio-extract from Organic Chili. Khon Kaen: Khon Kaen University (in Thai)
- [19] Siri-in, J., Thiraworawong, T., and Boonme, N. (2021). Effects of Bio-extract on Growth and Quality of Baby Red Cos Lettuce (*Lactuca sativa* L.) Cultivated in Hydroponics System.
   Khon Kaen Agriculture Journal. Vol. 49, No. 2, pp. 304-311 (in Thai)
- [20] Jitaek, P., Charoenrak, P., Pimonrat, P., Supamattra, S., Tengthrong, A., and Watcharinrat, D. (2022). Effect of Bio-extracts on Growth of Flowering Bok Choy. In Proceedings of 60<sup>th</sup> Kasetsart University Annual Conference: Plants, Animals, Veterinary Medicine, Fisheries, Agricultural Extension and Home Economics on 21-23 February 2022. Bangkok: Kasetsart University, pp. 240-245 (in Thai)
- [21] Keoboua, B., Yangkhamman, P., Saritnum, O., and Watcharawetsaringkharn, S. (2020). Effect of Chitosan and Bio-extract in Seed Priming Process on Germination and Seedling Growth of Bird Chili Pepper. King Mongkut's Agricultural Journal. Vol. 38, No. 4, pp. 441-448 (in Thai)

## สมบัติของผ้าทอต่างโครงสร้างจากเส้นด้ายพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตรีไซเคิล สำหรับเก้าอี้พกพา

## **Woven Fabric Properties with Different Weave Designs Using Recycled PET Yarns for Portable Chairs**

วิชุดา จันทร์ประภานนท์<sup>1\*</sup> บิณฑสันต์ ขวัญข้าว<sup>1</sup> ศิริวรรณ ดวงหิรัญ<sup>1</sup> และธนะเกียรติ รวีวงค์<sup>1</sup> Wichuda Chanprapanon<sup>1\*</sup> Bintasan Kwankhao<sup>1</sup> Siriwun Duanghirun<sup>1</sup> and Thanakiart Raweewong<sup>1</sup>

Received: October 2, 2023; Revised: November 6, 2023; Accepted: November 8, 2023

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเส้นด้ายพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตรีไซเคิล (rPET) มาใช้ในงานสิ่งทอเทคนิค นอกเหนือจากในงานอุตสาหกรรมเครื่องนุ่งห่ม จึงเกิดแนวคิดนำเส้นด้าย rPET ทอเป็นผืนผ้าขึ้นรูปกับเก้าอี้พกพา สำทรับกิจกรรมกลางแจ้ง เริ่มจากการตีเกลียวเส้นด้าย rPET เบอร์ 300 ดีเนียร์ ที่ไม่ได้ผ่านการตีเกลียว จำนวน 1 เส้น และ 2 เส้น นั่นคือ rPET-1 และ rPET-2 จากนั้นทอผ้าทกตัวอย่างด้วยลายทอสามโครงสร้าง ได้แก่ ลายขัด ลายทแยง และลายขัดสานตะกร้า กำหนดใช้ rPET-2 เป็นเส้นด้ายยืนมีความทนาแน่น 50 เส้นต่อนิ้ว rPET-1 ทรือ rPET-2 เป็นเส้นด้ายพุ่งมีความทนาแน่น 40 เส้นต่อนิ้ว พบว่า การใช้ rPET-2 เป็นเส้นด้ายพุ่ง ทำให้ผ้าทอทุกโครงสร้างมีความแข็งแรงต่อแรงดึงและแรงฉีกขาดมากกว่าเส้นด้าย rPET-1 ผ้าทอลายขัด มีความแข็งแรงต่อแรงดึงมากที่สุด ขณะที่ผ้าทอลายทแยงมีความแข็งแรงต่อแรงฉีกขาดมากที่สุด ผ้าทอ สองโครงสร้างนี้ถูกเลือกนำไปใช้ในการขึ้นรูปเก้าอี้พกพาเพื่อเปรียบเทียบกับเก้าอี้พกพาในท้องตลาดจาก ผ้าพอลิเอสเตอร์พบว่า เมื่อได้รับแรงกด 150 กิโลกรัมแรง จำนวน 5 รอบ เก้าอี้พกพาที่ใช้ผ้ารองนั่ง จากผ้าทอลายขัดที่ใช้เส้นด้าย rPET-2 เป็นเส้นด้ายพุ่ง ทนทานที่สุด เนื่องจากไม่พบความเสียทายบนผ้ารองนั่ง และเทล็กไขว้ของเก้าอี้ รวมทั้งมีการยึดของผ้าน้อยที่สุด งานวิจัยนี้จึงยืนยันศักยภาพของ rPET สำหรับความทนทาน และความยั่งยืนของผ้ารองนั่งเก้าอี้พกพาสำหรับกิจกรรมกลางแจ้ง รวมทั้งแสดงถึงความเป็นไปได้ในการนำวัสดุ รีไซเคิลนี้ไปประยุกต์ใช้ในงานสิ่งทอเทคนิคในลักษณะคล้ายกันได้อีกด้วย

คำสำคัญ : พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตรีไซเคิล; ผ้าทอ; ขวดพลาสติก; การรีไซเคิล

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปทุมธานี

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathum Thani

<sup>\*</sup> Corresponding Author, Tel. 09 2453 3246, E - mail: wichuda.c@en.rmutt.ac.th

#### Abstract

This research aimed to explore the practical use of recycled polyethylene terephthalate yarn (rPET) in technical textiles, extending its application beyond the apparel industry. The specific objective was to produce woven fabrics from rPET yarn for the seats of portable chairs, which are commonly favored for outdoor events. Initially, the process involved twisting 300 denier rPET untwisted yarn into rPET-1 (single-yarn) and rPET-2 (two-ply yarn). Six woven fabrics were then manufactured in three different weave designs (plain, twill, and basket). The warp was rPET-1 at a density of 50 ends per inch, while the weft alternated between rPET-1 and rPET-2, each at 40 picks per inch. The results indicated that fabrics with rPET-2 as the weft exhibited superior tensile and tear strength compared to those employing rPET-1 as the weft. Plain fabrics demonstrated the highest tensile strength, while twill fabrics displayed the highest tear strength. Consequently, these two fabric types were selected to produce the portable chairs, in contrast to the conventional portable chairs constructed with polyester fabric. After subjecting the chairs to a compression test with a load of 150 kgf for 5 cycles, the chair with a plain fabric and rPET-2 as the weft proved the most durable. No damage was found on the seat or frame, and fabric stretching was minimal. In essence, this research underscores the potential of rPET in the durability and sustainability of outdoor seating solutions, while also demonstrating the feasibility of applying this recycled material in technical textile applications.

Keywords: Recycled polyethylene terephthalate; Woven fabric; Plastics bottle; Recycling

#### บทนำ

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา คำว่า "ความยั่งยืน" ได้รับความสนใจและมีความสำคัญในการออกแบบวัสดุต่าง ๆ มากขึ้น อันเป็นผลมาจากการตระหนักในด้านสิ่งแวดล้อมและผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่เริ่ม ปรากฏอย่างชัดเจน ทำให้อุตสาหกรรมการผลิตต่าง ๆ รวมทั้งอุตสาหกรรมสิ่งทอต่างมองหากระบวนการผลิต และนวัตกรรมที่สอดคล้องกับหลักการที่เกี่ยวข้องกับการคุ้มครองสิ่งแวดล้อมนี้ การนำเอาวัสดุรีไซเคิลมาใช้ เป็นส่วนหนึ่งของผลิตภัณฑ์จึงเป็นทางเลือกที่สนับสนุนความยั่งยืนของกระบวนการผลิต

พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตรีไซเคิล (Recycled Polyethylene Terephthalate, rPET) นับเป็นวัสดุรีไซเคิล ที่อุตสาหกรรมสิ่งทอนำมาใช้เป็นวัตถุดิบอย่างแพร่หลาย ทั้งในรูปแบบของเส้นใยสั้น (Staple Fibers) เส้นใยยาว (Filaments) หรือเส้นด้าย (Yarns) เกิดจากการนำขวดพลาสติกใส หรือที่เรียกว่า ขวดเพ็ท ที่ใช้แล้วซึ่งมีปริมาณ ที่ต้องกำจัดจำนวนมากกลับมาใช้ไหม่โดยผ่านกระบวนการรีไซเคิลด้วยวิธีต่าง ๆ ขวดพลาสติกใสดังกล่าวขึ้นรูป จากพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polyethylene Terephthalate, PET) จัดเป็นประเภทเทอร์โมพลาสติก ซึ่งมีสมบัติที่สามารถนำมาหลอมแล้วฉีดขึ้นรูปใหม่ได้ จึงเหมาะแก่การนำมาผ่านกระบวนการต่าง ๆ เพื่อนำกลับ มาใช้ใหม่ได้ [1] - [3] การรีไซเคิล PET ใช้กระบวนการเชิงกล (Mechanical Recycling) เป็นวิธีที่นิยมมากที่สุด ในบรรดากระบวนการต่าง ๆ [2] - [5] เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ง่าย ราคาถูก และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม [4] โดยเริ่มจากการทำความสะอาดขวดเพ็ท แล้วบดเป็นชิ้นขนาดเล็กก่อนนำมาให้ความร้อนจนหลอมละลาย และ ฉีดเส้นใยผ่านทัวฉีดออกมาเป็นเส้นใยยาว [1], [6], [7] จากนั้นสามารถนำมาตักเป็นเส้นใยสั้น หรืออาจปั่นเป็น เส้นด้ายหากต้องการนำไปใช้ผลิตผ้าทอหรือผ้าถัก ซึ่งขนาดของเส้นใยหรือเส้นด้ายแตกต่างกันไปตามลักษณะ การนำไปใช้งาน อีกทั้งการใช้เส้นใยหรือเส้นด้าย rPET นี้สามารถใช้เป็นวัตถุดิบ 100 % หรือนำไปผสมกับ วัสดุอื่นก็ได้ [7] เช่น การผสมเส้นใยฝ้ายกับ rPET ในอัตราส่วนต่าง ๆ เพื่อใช้เป็นเส้นด้ายสำหรับผ้าถัก [1] และการผสมเส้นใยฝ้ายกับ rPET เพื่อใช้เป็นเส้นด้ายสำหรับผ้าทอ [8] เป็นต้น

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผ้าจาก rPET เช่น การรีไซเคิลขวดพลาสติกมาฉีดขึ้นรูปเป็นเส้นใยยาว แล้วตัดให้เป็นเส้นใยสั้นเบอร์ 1.2 ดีเนียร์ ความยาว 38 มิลลิเมตร ตามด้วยกระบวนการปั่นด้าย เพื่อผลิต เป็นเส้นด้ายเบอร์ต่าง ๆ สำหรับผลิตภัณฑ์ผ้าถัก เมื่อทดสอบสมบัติของผ้าถักแบบชั้นเดียว (Single Jersey) พบว่า การใช้เส้นด้าย rPET ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม สามารถให้สมบัติที่เทียบเท่ากับการใช้เส้นด้าย PET ที่เป็นวัสดุตั้งเดิม [3] จากการเปรียบเทียบผ้าทอโครงสร้างลายซาติน (Satin) จากเส้นด้าย PET และเส้นด้าย rPET เบอร์ 125 ดีเนียร์ พบว่า สมบัติของผ้าทอจากการใช้เส้นด้ายทั้งสองชนิดไม่แตกต่างกัน แต่ภาคตัดขวาง ของเส้นใยในโครงสร้างเส้นด้ายทั้งสองชนิดกลับส่งผลกับสมบัติของผ้าทอ [6] เช่นเดียวกับอีกงานวิจัยที่พบว่า ผ้าทอและผ้าถักจากเส้นด้าย rPET เบอร์ 300 ดีเนียร์ มีความแข็งแรงที่ดีพอเมื่อเทียบกับการใช้เส้นด้าย PET เบอร์ 385 ดีเนียร์ทั้งความแข็งแรงต่อแรงดึง และความแข็งแรงต่อแรงฉีกขาด [4] อย่างไรก็ตาม ยังมีงานวิจัย ที่นำเอาเส้นใย rPET ไปใช้สำหรับผลิตผ้าไม่ทอ ซึ่งเป็นผ้าอีกประเภทหนึ่งที่ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอเช่นกัน มีการศึกษานำเส้นใยสั้น rPET เบอร์ 6 ดีเนียร์ และ 11 ดีเนียร์ มาผสมกับเส้นใย PET ที่เป็นวัสดุตั้งเดิม เพื่อผลิตเป็นผ้าไม่ทอสำหรับใช้เป็นพรมในรถยนต์ [9]

นอกจากผลิตภัณฑ์สิ่งทอในเชิงของเสื้อผ้าเครื่องนุ่งห่มนั้น ทางคณะผู้วิจัยต้องการขยายขอบเขตของ การนำเส้นด้าย rPET ไปใช้งานในลักษณะอื่น ๆ จึงศึกษาความเป็นไปได้ที่นำเอาเส้นด้าย rPET ผลิตเป็น ผ้ารองนั่งเก้าอี้พกพาซึ่งกำลังได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก โดยสามารถใช้ในงานกิจกรรมกลางแจ้ง ตั้งแต่ การดูเทศกาลดนตรี การแค้มปิ้ง จนถึงการปิกนิกในสวน การใช้วัสดุรีไซเคิลสำหรับเก้าอี้พกพาที่เป็นมิตรกับ สิ่งแวดล้อมนี้ จะเป็นการสร้างความยั่งยืนในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ ซึ่งอาจทำให้ผู้บริโภคที่ตระหนักเรื่อง สิ่งแวดล้อมนี้ จะเป็นการสร้างความยั่งยืนในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ ซึ่งอาจทำให้ผู้บริโภคที่ตระหนักเรื่อง สิ่งแวดล้อมใท้ความสนใจ อย่างไรก็ตาม สมบัติของผ้ามีความสัมพันธ์กับโครงสร้างเส้นด้ายและรูปแบบ การทอของผ้าที่แตกต่างกัน โดยเฉพาะสมบัติเชิงกลของผ้าต่อการรับน้ำหนักและแรงจากภายนอกมีความสำคัญ อย่างมากต่อการออกแบบ [10] ดังนั้น ขั้นตอนนี้เป็นสิ่งสำคัญในการทำให้วัสดุเหล่านี้เหมาะสมสำหรับ เก้าอี้พกพา จึงถือเป็นความท้าทายและโอกาสสำหรับอุตสาหกรรมสิ่งทออีกด้วย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการผลิตผ้าทอรูปแบบต่างกันจากเส้นด้าย rPET ที่นำไปผ่านกระบวนการ ตีเกลียวด้วยจำนวนแตกต่างกันเพื่อใช้สำหรับเป็นเส้นด้ายพุ่งและเส้นด้ายยืน จากนั้นเลือกตัวอย่างผ้าทอจากสมบัติ ด้านความแข็งแรงไปขึ้นรูปบนเก้าอี้พกพาและเปรียบเทียบความคงทนด้วยแรงกดกับเก้าอี้พกพาในท้องตลาด เพื่อแสดงความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ผ้าทอ rPET สำหรับงานสิ่งทอเทคนิคอื่นที่นอกเหนือไปจากผลิตภัณฑ์ สิ่งทอในเชิงของเสื้อผ้าเครื่องนุ่งห่ม

#### วิธีดำเนินการวิจัย

ในงานวิจัยนี้แบ่งวิธีดำเนินการวิจัยเป็น 5 ขั้นตอน ได้แก่ การเตรียมเส้นด้าย การเตรียมผ้าทอ การนำผ้าทอขึ้นรูป บนเก้าอี้พกพา การทดสอบสิ่งทอ และการทดสอบการรองรับน้ำหนักของเก้าอี้พกพา มีรายละเอียดดังนี้

#### 1. การเตรียมเส้นด้าย

เส้นด้ายพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตรีไซเคิลเบอร์ 300 คีเนียร์ (Denier, D) ได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท อินโดรามา โพลีเอสเตอร์ อินดัสตรี้ส์ จำกัด (มหาชน) มาทำการตีเกลียว Z ด้วยเครื่อง Two for one twister ที่บริษัท มาสเท็กซ์ จำกัด โดยกำหนดความเร็วรอบเครื่อง 4,530 รอบต่อนาที จำนวนเกลียว 4 เกลียวต่อนิ้ว โดยใช้เส้นด้าย 1 เส้น และเส้นด้าย 2 เส้น แทนสัญลักษณ์ rPET-1 และ rPET-2

#### 2. การเตรียมผ้าทอ

เริ่มต้นการทำงานด้วยการสืบด้ายยืนด้วยเครื่องสืบด้ายตัวอย่าง Mini warper (CCI SW550) ตามด้วยการทอผ้าด้วยเครื่องทอตัวอย่าง Evergreen Sampling Loom (CCI SL8900) ดังรูปที่ 1 ทั้งหมด 3 โครงสร้าง ได้แก่ โครงสร้างลายขัด (Plain Weave) โครงสร้างลายทแยง (Twill Weave) และโครงสร้าง ลายขัดดัดแปลงหรือลายขัดสานตะกร้า (Basket Weave) กำหนดใช้เส้นด้าย rPET-2 เป็นเส้นด้ายยืนมี ความหนาแน่น 50 เส้นต่อนิ้ว (End Per Inch, epi) และเส้นด้าย rPET-1 หรือ rPET-2 เป็นเส้นด้ายพุ่งมี ความหนาแน่น 40 เส้นต่อนิ้ว (Pick Per Inch, ppi) ในขั้นตอนนี้ได้ผ้าทอทั้งหมด 6 ตัวอย่างที่มีโครงสร้างผ้าทอ และเส้นด้ายพุ่งต่างกันดังตารางที่ 1

#	โครงสร้างผ้า	เส้นด้ายยืน	เส้นด้ายพุ่ง	สัญลักษณ์
1		rPET-2	rPET-1	Plain-1
2	ลายขัด	rPET-2	rPET-2	Plain-2
3		rPET-2	rPET-1	Twill-1
4	ລາຍทแยง	rPET-2	rPET-2	Twill-2
5		rPET-2	rPET-1	Basket-1
6	ลายขัดสานตะกร้า	rPET-2	rPET-2	Basket-2

ตารางที่ 1 สัญลักษณ์ผ้าทอ rPET





รูปที่ 1 เครื่องสืบด้ายตัวอย่าง และเครื่องทอตัวอย่าง



รูปที่ 2 ขนาดของผ้ารองนั่ง และขึ้นงานเก้าอี้พกพา

3. การนำผ้าทอขึ้นรูปบนเก้าอี้พกพา

เมื่อนำผ้าทอทั้งหก<sup>ู้</sup>ตัวอย่างไปผ่านการวิเคราะท์สมบัติความแข็งแรงแล้ว ตัวอย่างผ้าทอที่มีความแข็งแรง ที่ดีที่สุดถูกนำมาขึ้นรูปบนเก้าอี้พกพา ทำการตัดผ้าขนาด 24.2 x 42.5 เซนติเมตร และเย็บตะเข็บท่างจากขอบ 1 เซนติเมตร ดังรูปที่ 2 ด้วยเส้นด้ายไนลอน โดยใช้เครื่องจักรเย็บผ้าเข็มเดี่ยว (PFAFF 9063) แล้วประกอบ เข้ากับขึ้นงานเก้าอี้พกพา

4. การทดสอบสิ่งทอ

4.1 การทดสอบสมบัติของเส้นด้าย

นำเส้นด้ายมาทดสอบเบอร์ด้าย และความแข็งแรงต่อแรงดึง โดยการหาเบอร์ด้ายเป็นไป ตามมาตรฐาน ASTM D1059 ตัวอย่างละ 10 เส้น และความแข็งแรงต่อแรงดึงของเส้นด้ายทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D2256 ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine (Instron series 2701) ทำการทดสอบ 10 ขึ้นต่อตัวอย่าง

4.2 การทดสอบสมบัติของผ้าทอ

ผ้าทอทั้งหกตัวอย่างนำมาทดสอบน้ำหนักผ้าตามมาตรฐาน ASTM D3776 ด้วยเครื่องทดสอบ น้ำหนักผ้าแบบ Fabric Sample Cutter จำนวน 5 ชิ้นทดสอบ และความหนาของผ้าทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D1777 ด้วยเครื่องทดสอบความหนาของผ้า โดยวัดความหนาของผ้าตัวอย่างที่ตำแหน่งต่างกัน 5 ตำแหน่ง จำนวน 5 ชิ้นทดสอบ

การซึมผ่านของอากาศของผ้าทอทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D737 ด้วยเครื่อง Air Permeability Tester (SDL Atlas M021A) โดยใช้แรงดันที่ 125 Pa ขนาดของผ้าทอเป็นวงกลมมีพื้นที่ 38 ตารางเซนติเมตร ทำการทดสอบซ้ำตัวอย่างละ 5 ครั้ง

ความแข็งแรงของผ้าทอทำการทดสอบทั้งแรงดึงและแรงฉีกขาดของผ้าทอด้วยเครื่อง Universal Testing Machine (Instron series 2701) ที่ภาควิชาวิทยาการสิ่งทอ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ การทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึงเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D5034 โดยทดสอบ ตัวอย่างทั้งแนวเส้นด้ายพุ่งและแนวเส้นด้ายยืนด้านละ 10 ชิ้น และการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงฉีกขาด ของผ้าทอเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D2261 ทำการทดสอบตัวอย่างละ 5 ชิ้น ทั้งแนวเส้นด้ายยืนและ แนวเส้นด้ายพุ่ง

5. การทดสอบการรองรับน้ำหนักของเก้าอี้พกพา

การทดสอบการรองรับน้ำหนักของเก้าอี้พกพาจากผ้ารองนั่งที่เลือกมาจากผ้าทอตัวอย่าง มีจุดประสงค์เพื่อเปรียบเทียบความทนต่อแรงกดของเก้าอี้พกพาที่ใช้ผ้ารองจากการศึกษานี้กับเก้าอี้พกพา ในท้องตลาดจากผ้าพอลิเอสเตอร์ โดยประยุกต์ใช้การทดสอบแรงกดด้วยเครื่องทดสอบ Universal Testing Machine (Chun Yen CY-6040A12) ดังรูปที่ 3 ที่ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี โดยนำเก้าอี้พกพาไปวางกึ่งกลางเครื่องทดสอบ จากนั้นนำแผ่นเหล็กรองรับน้ำหนัก เส้นผ่านศูนย์กลาง 8 นิ้ว ทนา 1 นิ้ว น้ำหนัก 7.6 กิโลกรัม วางบนเก้าอี้พกพา แล้วเคลื่อนแท่งกดลงบน แผ่นเหล็กรองรับน้ำหนักด้วยแรงกด 150 kgf อัตราการกดคงที่ 10 มิลลิเมตรต่อนาที จากนั้นเคลื่อนแท่งกดขึ้น แล้วทำการกดซ้ำจำนวน 5 รอบต่อหนึ่งขึ้นทดสอบ ทดสอบซ้ำตัวอย่างละ 3 ขึ้นทดสอบ สังเกตการเปลี่ยนแปลง ของผ้ารองนั่งและโครงเก้าอี้ และบันทึกระยะยึดตัวของผ้า



#### รูปที่ 3 การทดสอบการรองรับน้ำหนักของผ้าทอบนเก้าอี้พกพา

#### ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

จากการตีเกลียวเส้นด้าย rPET เพื่อใช้เป็นเส้นด้ายยืนและเส้นด้ายพุ่งสำหรับผ้าทอทั้งหกตัวอย่าง จากนั้นนำไป ทดสอบสมบัติของผ้าทอเพื่อเลือกผ้าทอตัวอย่างไปขึ้นชิ้นงานบนเก้าอี้พกพา แล้วนำไปทดสอบการรองรับน้ำหนัก ของผ้าทอบนเก้าอี้พกพา ได้ผลการทดลองดังนี้

#### 1. ผลการทดสอบเส้นด้าย rPET

จากการนำเส้นค้าย rPET เบอร์ 300 D ไปตีเกลียวจำนวน 1 เส้น และ 2 เส้น นั่นคือ rPET-1 และ rPET-2 แล้วนำไปทดสอบสมบัติทางกายภาพได้ผลดังตารางที่ 2 พบว่า เมื่อนำเส้นค้าย rPET ไปตีเกลียว 1 เส้น มีผลต่อเบอร์ด้ายและแรงดึงขาดน้อยมาก เนื่องจากจำนวนเส้นด้ายยังคงเดิม และจำนวนเกลียวต่ำ จึงไม่ส่งผล กับสมบัติทางกายภาพของเส้นด้ายอย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่เส้นด้าย rPET-2 ซึ่งนำเส้นด้าย 2 เส้นไปตีเกลียว รวมเป็นเส้นเดียว ทำให้เบอร์ด้ายเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่า รวมทั้งมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นตามจำนวนของเส้นด้าย ซึ่งมีจำนวนเส้นใยยาวที่เพิ่มขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ พบว่า เส้นด้ายสองเส้นที่ตีเกลียวรวมกัน เป็นหนึ่งเส้นนั้นมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น [11] รวมทั้งขนาดของเส้นด้ายหรือเบอร์ด้ายที่สูงขึ้น ส่งผลให้ความแข็งแรง ของเส้นด้ายเพิ่มขึ้นเช่นกัน

เส้นด้าย	เมอร์ด้วย (D)	ความแข็งแรง	ของเส้นด้าย
	ען אני פרעי (D) —	แรงดึงขาด (kgf)	ระยะยึด (mm)
rPET	315.0 <u>+</u> 2.9	1,111.4 <u>+</u> 27.3	27.4 <u>+</u> 1.9
rPET-1	317.0 <u>+</u> 2.6	1,127.5 <u>+</u> 9.7	28.5 <u>+</u> 0.6
rPET-2	634.5 <u>+</u> 3.2	2,316.8 <u>+</u> 24.3	28.4 <u>+</u> 0.7

ตารางที่ 2 ผลของสมบัติเส้นด้าย rPET

#### 2. ผลการทดสอบผ้าทอ rPET

ผ้าทอทกตัวอย่างที่มีโครงสร้างต่างกันและชนิดของเส้นด้ายพุ่งต่างกันดังรูปที่ 4 จากการประเมิน ด้วยการสัมผัสพบว่า ผ้าทอลายขัดมีความแข็งกระด้างจากลักษณะการขัดกันของเส้นด้ายยืนและเส้นด้ายพุ่ง ผ้าทอลายทแยงมีความนุ่มและทนาขึ้น ส่วนผ้าทอลายขัดสานตะกร้ามีความนุ่มและหนาที่สุด

2.1 น้ำหนักและความหนาของผ้าทอ rPET

เมื่อเปรียบเทียบผ้าทอทั้งหกผืนดังตารางที่ 3 พบว่า โครงสร้างของลายผ้าไม่ส่งผลกับน้ำหนัก ของผ้า แต่ผ้าทอที่ใช้เส้นด้ายพุ่ง rPET-2 ทำให้น้ำหนักของผ้าทอทุกโครงสร้างเพิ่มขึ้นมากกว่าการใช้เส้นด้ายพุ่ง rPET-1 ประมาณร้อยละ 31 - 36 เนื่องจากน้ำหนักเท่าตัวของเส้นด้ายพุ่งที่ใช้ในการทอ

ผ้าทอโครงสร้างลายขัดสานตะกร้า ได้แก่ Basket-1 และ Basket-2 ที่ใช้เส้นด้ายพุ่ง rPET-1 และ rPET-2 มีความหนามากกว่าผ้าทอโครงสร้างอื่น ๆ เนื่องจากผ้าทอลายขัดสานตะกร้ามีการลอยของเส้นด้ายมาก จึงทำให้ผ้ามีความหนามากกว่าผ้าทอโครงสร้างอื่น ส่วนการใช้ rPET-1 และ rPET-2 เป็นเส้นด้ายพุ่งไม่ส่งผล กับความหนาของผ้าทอ



#### รูปที่ 4 ลักษณะผ้าทอ rPET

1	9/			
a _			a 1	. v
ตารางท 3	ผลการทดสอบนาหนก	ความหนา	และการชมผานอากา	ศของผาทอ

ตัวอย่าง	น้ำหนัก (g/m²)	ความหนา (mm)	การซึมผ่านอากาศ (cfm <sup>*</sup> )
Plain-1	207.2±5.0	0.39±0.09	6.77±0.48
Plain-2	274.6±4.3	$0.53 \pm 0.03$	$3.99 \pm 0.36$
Twill-1	217.6±2.2	0.51±0.01	40.28±1.73
Twill-2	296.8±4.2	0.52±0.01	34.30±5.21
Basket-1	218.4±2.6	0.72±0.02	107.40±5.52
Basket-2	287.2±12.9	$0.73 \pm 0.02$	50.89±3.94

\*cfm: cubic feet per minute

#### 2.2 การซึมผ่านของอากาศของผ้าทอ rPET

จากการทดสอบการซึมผ่านของอากาศของผ้าทอจากเส้นด้าย rPET มีวัตถุประสงค์ เพื่อเปรียบเทียบความแน่นของผืนผ้าแต่ละตัวอย่างดังตารางที่ 3 พบว่า โครงสร้างผ้าทอลายขัดสานตะกร้า มีการซึมผ่านอากาศมากที่สุด ทั้งการใช้เส้นด้ายพุ่ง rPET-1 และ rPET-2 เนื่องจากโครงสร้างของผ้าทอดังกล่าว มีการลอยของเส้นด้าย ทำให้มีช่องว่างที่อากาศผ่านได้มาก รองลงมาคือ โครงสร้างผ้าทอลายทแยง และ โครงสร้างผ้าทอลายขัด เมื่อเทียบการใช้เส้นด้ายพุ่ง ได้แก่ rPET-1 และ rPET-2 บนผ้าทอพบว่า ผ้าทอ ทุกโครงสร้างที่ใช้เส้นด้ายพุ่ง rPET-2 ยอมให้อากาศผ่านน้อยกว่าผ้าทอที่ใช้เส้นด้ายพุ่ง rPET-1 เนื่องจาก เส้นด้ายพุ่ง rPET-2 มีการควบเกลียวเส้นด้ายเป็น 2 เส้น ทำให้เส้นด้ายมีขนาดใหญ่ และมีความหนาแน่น ของผ้าทอมากกว่า ทำให้ขัดขวางการไหลผ่านของอากาศ สอดคล้องกับค่าการซึมผ่านอากาศผ้าทอ rPET ที่ประกอบด้วยเส้นใยยาวต่อเนื่องจำนวนต่างกัน [6]

2.3 ความแข็งแรงต่อแรงดึงของผ้าทอ rPET

้โดยทั่วไปความแข็งแรงต่อแรงดึงของผ้าเป็นสมบัติที่บ่งบอกถึงความแข็งแรงของผ้า ้เป็นการวัดความต้านทานของผ้าเมื่อได้รับแรงดึงยืดด้วยอัตราการเคลื่อนที่คงที่ในแนวตั้ง จากการทดสอบ ความแข็งแรงต่อแรงดึงของผ้าทอจากเส้นด้าย rPET ดังรูปที่ 5 เมื่อพิจารณาตามแนวเส้นด้ายยืนพบว่า ้ผ้าทอโครงสร้างลายขัดและผ้าทอโครงสร้างลายทแยง มีความแข็งแรงต่อแรงดึงมากกว่าผ้าทอโครงสร้าง ลายขัดสานตะกร้าอย่างเห็นได้ชัดทั้งการใช้เส้นด้ายพ่ง rPET-1 และ rPET-2 เพราะผ้าทอทั้งสองโครงสร้าง มีการขัดกันแน่นกว่าผ้าทอโครงสร้างลายสานขัดตะกร้า รวมทั้งมีการขัดกันระหว่างเส้นด้ายพุ่งและเส้นด้ายยืน ้มากกว่า จึงทำให้สามารถทนต่อแรงดึงได้มากกว่า [10] เมื่อพิจารณาตามแนวเส้นด้ายพ่งดังรปที่ 5 พบว่า ้ผ้าทอโครงสร้างลายขัดมีความแข็งแรงต่อแรงดึงมากที่สุด รองลงมาคือ ผ้าทอโครงสร้างลายทแยง และ ผ้าทอโครงสร้างลายขัดสานตะกร้า เนื่องจากผ้าทอโครงสร้างลายขัดมีการส่งเส้นด้ายยืนและเส้นด้ายพ่งขัดกันทกเส้น จึงทำให้ผ้ามีความแข็งแรงต่อแรงดึงมากกว่าผ้าทอโครงสร้างอื่น เช่นเดียวกับการเปรียบเทียบความแข็งแรง ต่อแรงดึงของผ้าทอโครงสร้างลายขัด โครงสร้างลายทแยง 2/1 และโครงสร้างลายทแยง 2/2 ในงานวิจัย ู้ที่ผ่านมาพบว่า ผ้าทอโครงสร้างลายขัดมีความแข็งแรงมากกว่าผ้าทอโครงสร้างลายทแยง เนื่องจากผ้าทอ ้โครงสร้างลายขัดมีความแน่นมากกว่าเป็นไปตามความสามารถในการซึมผ่านของอากาศที่มีค่าต่ำ รวมทั้งผ้าทอ ้โครงสร้างลายขัดมีการขัดกันระหว่างเส้นด้ายพุ่งและเส้นด้ายยืนมากกว่า จึงทำให้ผ้ามีความต้านทานต่อ ีแรงคึงขาดได้มากกว่า [10] และพบว่าผ้าทอทกโครงสร้างที่ใช้เส้นด้ายพ่ง rPET-2 มีความแข็งแรงต่อแรงคึง ในทิศทางเส้นด้ายยืนและทิศทางเส้นด้ายพุ่งมากกว่าการใช้เส้นด้ายพุ่ง rPET-1 เนื่องจากเส้นด้ายควบ ้มีความแข็งแรงมากกว่าตามจำนวนของเส้นด้ายและจำนวนเส้นใยยาวที่เป็นองค์ประกอบในโครงสร้าง

เมื่อพิจารณาตามแนวเส้นค้ายยืนตารางที่ 4 พบว่า ผ้าทอโครงสร้างลายขัคมีค่าระยะยึคมากที่สุด รองลงมาคือ ผ้าทอโครงสร้างทแยง และผ้าทอโครงสร้างลายขัดสานตะกร้า เมื่อพิจารณาตามแนวเส้นด้ายพุ่ง พบว่า ผ้าทอโครงสร้างลายขัด มีค่าระยะยึคมากที่สุด รองลงมาคือ ผ้าทอโครงสร้างลายขัดสานตะกร้า และ ผ้าทอโครงสร้างลายทแยง โดยที่ผ้าทอทุกโครงสร้างที่ใช้เส้นด้ายพุ่ง rPET-2 มีค่าระยะยึดในทิศทางเส้นด้ายพุ่ง และทิศทางเส้นด้ายยืนมากกว่าการใช้เส้นด้ายพุ่ง rPET-1 เพราะเส้นด้ายพุ่ง rPET-2 มีการเข้าเกลียวรวมกัน ทำให้เส้นด้ายมีความเหนียวเพิ่มขึ้น สามารถดึงยึดได้มากกว่าเส้นด้ายพุ่ง rPET-1

จากการนำผ้าทอทั้งหกตัวอย่างมาทำการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึงของผ้าทอพบว่า Plain-2 แข็งแรงที่สุด รองลงมาคือ Twill-2 และ Plain-1


รูปที่ 5 ผลของแรงดึงขาดของผ้าทอ rPET

	การทดสอเ	มแรงดึงยืด	การทดสอบ	การทดสอบแรงฉีกขาด		
พ ายย เง	แรงคึงขาด (kgf)	ระยะยืด (mm)	แรงฉีกขาด (kgf)	ระยะยืด (mm)		
Plain-1						
- แนวด้ายยืน	367.66±3.39	26.95±2.07	15.38±1.99	44.65±10.02		
- แนวด้ายพุ่ง	183.13±4.08	22.51±1.44	16.22±0.99	36.93±2.98		
Plain-2						
- แนวด้ายยืน	$364.89 \pm 4.48$	38.39±2.05	11.49±0.73	27.63±3.94		
- แนวด้ายพุ่ง	320.30±15.92	22.64±3.83	13.65±1.14	25.83±7.56		
Twill-1						
- แนวด้ายยืน	336.23±10.03	18.99±0.77	16.25±3.14	48.66±10.62		
- แนวด้ายพุ่ง	135.50±4.57	16.99±0.62	15.05±1.88	43.33±4.46		
Twill-2						
- แนวด้ายยืน	383.54±12.01	25.23±1.21	28.46±1.68	40.59±2.85		
- แนวด้ายพุ่ง	240.75±18.23	19.10±1.71	33.37±1.94	47.13±4.68		
Basket-1						
- แนวด้ายยืน	226.10±27.37	15.62±1.16	0.37±0.32	39.53±9.95		
- แนวด้ายพุ่ง	119.46±6.69	17.10±0.65	2.90±0.95	51.76±8.70		
Basket-2						
- แนวด้ายยืน	221.84±26.95	16.25±1.17	$0.64 \pm 0.58$	40.12±3.94		
- แนวด้ายพุ่ง	231.95±10.00	20.84±1.26	$1.31 \pm 0.90$	50.17±6.59		

		5	1 a	ខ		a	2
ตารางท 4	ผลการทดสอบคว	ามแขงแ	เรงตอแรงดง	และความแขงแ	รงตอเ	ເรັນฉกข	าดของผาทอ

#### 2.4 ความแข็งแรงต่อแรงฉีกขาดของผ้าทอ rPET

ความแข็งแรงต่อการฉีกขาดของผ้าเป็นสมบัติหนึ่งที่นิยมใช้ในการประเมินความสามารถ ในการใช้งานของผ้าทอและมีความสมเทตุสมผลมากกว่าความแข็งแรงในการดึงยืด การใช้งานของผ้าทอที่มัก จะใช้ความแข็งแรงต่อการฉีกขาดในการประเมินความสามารถ เช่น ชุดทางการทหาร ผ้าเต็นท์ ผ้าใบกันแดด ผ้าเปลสนาม เป็นต้น [10] การฉีกขาดบนผ้าเป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเส้นด้ายหรือผ้าที่เกิดจาก แรงกระทำ ต่างจากการขาดของผ้าจากแรงดึงที่เกิดจากทิศทางของแรงที่กระทำบนเส้นด้ายในทิศทางเดียวกัน ผ้าทอที่มีความต้านทานต่อการฉีกขาดที่ต่ำจึงไม่เหมาะกับการนำไปใช้งาน [12] ในงานวิจัยนี้จึงนำความแข็งแรง
 ต่อแรงฉีกขาดของผ้าทอมาใช้พิจารณาสมบัติด้านความแข็งแรงของผ้าทอแต่ละตัวอย่างสำหรับการเลือก
 ตัวอย่างนำไปขึ้นขึ้นงานเก้าอี้พกพาเช่นกัน จากการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงฉีกขาดของผ้าทอจากเส้นด้าย
 rPET ดังรูปที่ 6 เมื่อพิจารณาตามแนวเส้นด้ายยืนพบว่า ผ้าทอโครงสร้างลายทแยงมีความแข็งแรงต่อแรงฉีกขาดของผ้าทอลากเส้นด้าย
 มากที่สุด รองลงมาคือ ผ้าทอโครงสร้างลายขัด และผ้าทอโครงสร้างลายทแยงมีความแข็งแรงต่อแรงฉีกขาด
 มากที่สุด รองลงมาคือ ผ้าทอโครงสร้างลายขัด และผ้าทอโครงสร้างลายขัดสานตะกร้า เมื่อพิจารณาจาก
 ผ้าทอโครงสร้างลายขัดและโครงสร้างลายขัดสานตะกร้าพบว่า ลักษณะของการขัดของเส้นด้ายพุ่งและเส้นด้ายยืน
 ทำให้เส้นค้ายสูญเสียความเคลื่อนไทวเมื่อได้รับแรง จึงทำให้ทนต่อแรงฉีกขาดได้น้อยกว่าผ้าทอโครงสร้างลายทแยง
 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [10], [12] เมื่อพิจารณาตามแนวเส้นค้ายพุ่งพบว่า ผ้าทอโครงสร้างลายทดแยง
 และผ้าทอโครงสร้างลายขัด มีความแข็งแรงต่อแรงฉีกขาดได้น้อยกว่าผ้าทอโครงสร้างลายทแยง
 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [10], [12] เมื่อพิจารณาตามแนวเส้นค้ายพุ่งพบว่า ผ้าทอโครงสร้างลายทดแยง
 และผ้าทอโครงสร้างลายขัด มีความแข็งแรงต่อแรงฉีกขาดมากกว่าผ้าทอโครงสร้างลายขัดสานตะกร้าอย่างเห็น
 ได้ชัด อย่างไรก็ตาม การใช้เส้นด้ายพุ่งต่างกันไม่ส่งผลกับแรงฉีกขาดมากกว่าผ้าทอโครงสร้างลายขัดและโครงสร้าง
 ลายขัดสานตะกร้า แต่กลับส่งผลกับการฉีกขาดในทิศทางตามแนวด้ายยืนและทิศทางตามแนวด้ายพุ่งของผ้าทอ
 โครงสร้างลายทแยง โดยที่ผ้าตอที่ใช้เส้นด้ายพุ่ง rPET-2 มีความแข็งแรงต่อแรงฉีกขาดมากกว่าเส้นด้ายพุ่ง
 rPET-1

เมื่อพิจารณาตามแนวเส้นด้ายยืนดังตารางที่ 4 พบว่า ผ้าทอโครงสร้างลายทแยงมีค่าระยะยืด มากกว่าผ้าทอโครงสร้างลายขัดและผ้าทอโครงสร้างลายขัดสานตะกร้าอย่างเห็นได้ชัด แสดงให้เห็นว่าผ้าทอ โครงสร้างลายทแยงมีสมบัติด้านความยึดหยุ่นที่ดีกว่าผ้าลายอื่น เมื่อพิจารณาตามแนวเส้นด้ายพุ่งพบว่า ผ้าทอโครงสร้างลายขัดสานตะกร้ามีค่าระยะยืดมากที่สุด รองลงมาคือ ผ้าทอโครงสร้างลายทแยง และผ้าทอ โครงสร้างลายขัด การใช้เส้นด้ายพุ่งต่างกัน ส่งผลกับระยะยึดตามแนวด้านยืนของผ้าทอโครงสร้างลายขัดสานตะกร้า โดยที่การใช้เส้นด้ายพุ่ง rPET-2 ทำให้ผ้าทอดังกล่าวมีค่าระยะยืดด้านยืนมากกว่าการใช้เส้นด้ายพุ่ง rPET-1 จากการนำผ้าทอทั้งหกตัวอย่างมาทำการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงฉีกขาดของผ้าทอพบว่า

Twill-2 แข็งแรงที่สุด รองลงมาคือ Plain-1 และ Twill-1 ซึ่งมีค่าไม่ต่างกัน

เมื่อพิจารณาความแข็งแรงของผ้าทอทกตัวอย่างทั้งแรงดึงขาดและแรงฉีกขาด ผู้วิจัยได้เลือกผ้าทอโครงสร้างลายขัดที่ใช้เส้นด้ายพุ่ง rPET-2 นั่นคือ Plain-2 ซึ่งทนต่อแรงดึงขาดสูงสุด และ ผ้าทอโครงสร้างลายทแยงที่ใช้เส้นด้ายพุ่ง rPET-2 นั่นคือ Twill-2 ซึ่งทนต่อแรงฉีกขาดสูงสุด ไปทำการเย็บตะเข็บ และขึ้นรูปเก้าอี้พกพาเพื่อเปรียบเทียบการรองรับน้ำหนักกับเก้าอี้พกพาในท้องตลาดจากผ้าพอลิเอสเตอร์



รูปที่ 6 ผลของแรงฉีกขาดของผ้าทอ rPET

### 3. ผลการทดสอบการรองรับน้ำหนักของเก้าอี้พกพา

จากการนำ Plain-2 และ Twill-2 ขึ้นรูปเก้าอี้พกพาและทำการทดสอบการรองรับน้ำหนักเปรียบเทียบ กับเก้าอี้พกพาในท้องตลาดจากผ้าพอลิเอสเตอร์แบบที่มีการบุผ้ากาว และไม่มีการบุผ้ากาว ใช้สัญลักษณ์ F และ NF แสดงผลการทดสอบดังรูปที่ 7 และตารางที่ 5 เมื่อกดน้ำหนักด้วยแรง 150 kgf จำนวน 5 รอบ ลงบนเก้าอี้พกพาที่ใช้ผ้ารองนั่งแตกต่างกันพบว่า เก้าอี้พกพาที่ใช้ผ้า Plain-2 ผ้ายืดออก 12.53 มิลลิเมตร แต่ไม่พบการเปลี่ยนแปลงบนเนื้อผ้าและโครงเก้าอี้ ส่วนเก้าอี้พกพาที่ใช้ผ้า Twill-2 ผ้ายืดออก 17.45 มิลลิเมตร และเนื้อผ้ามีการฉีกขาดในขณะที่มีแรงกดลงบนผ้าก่อนที่โครงเก้าอี้มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง นั่นคือ โครงเก้าอี้ เกิดความเสียหายจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของผ้าทอดังกล่าว เก้าอี้พกพาในท้องตลาดจากผ้าพอลิเอสเตอร์ แบบที่มีการบุผ้ากาว ผ้ายืดออก 16.84 มิลลิเมตร และตะเข็บมีการฉีกขาด โครงเก้าอี้ไม่มีการขำรุด เก้าอี้ต้นแบบจากท้องตลาดที่ใช้ผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ไม่มีผ้ากาว ผ้ายืดออก 24.61 มิลลิเมตร ตะเข็บและเนื้อผ้า มีการฉีกขาด รวมทั้งโครงเก้าอี้เกิดการชำรุด แสดงให้เห็นว่า เก้าอี้พกพาในท้องตลาดจากผ้าพอลิเอสเตอร์ นั้นมีผ้าบุกาวเป็นวัสดุเสริมที่ช่วยทำให้เก้าอี้พกพามีความแข็งแรงสูงขึ้น



## รูปที่ 7 ลักษณะเก้าอี้พกพาจากผ้าทอตัวอย่างหลังการทดสอบ

¥ .!	ผ้ารถ	องนั่ง	ຮັດງ ຄ.ວັນດ		
ดเวอยาง	ตะเข็บฉีก	เนื้อผ้าฉีก	- เพลกเขางอ	528280 (mm)	
Plain-2	-	-	-	12.53	
Twill-2	-	$\checkmark$	$\checkmark$	17.45	
F	$\checkmark$	-	-	16.84	
NF	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$	24.61	

1			v	2
a _		2	ໍ່	2 a
ตารางท 5	ผลการทดสอบการรอง	າງນາ	เาหนก	ของเกาอพกพา

เมื่อเปรียบเทียบเก้าอี้พกพาที่ใช้ผ้า Plain-2 Twill-2 และผ้าพอลิเอสเตอร์ที่ไม่มีผ้าบุกาวซึ่งเป็น วัสดุเสริมออก จะเห็นได้ว่า เก้าอี้พกพาที่ใช้ผ้ารองนั่งจากเส้นด้าย rPET ทั้งสองตัวอย่าง ได้แก่ Plain-2 และ Twill-2 มีความคงทนทั้งในเรื่องของตะเข็บ เนื้อผ้า และโครงเก้าอี้ได้ดีกว่า นอกจากนั้นยังพบว่า เก้าอี้พกพา จากผ้า Plain-2 ซึ่งใช้เส้นด้ายยืนเป็น rPET-2 และเส้นด้ายพุ่ง rPET-2 ทอด้วยโครงสร้างลายขัด มีความทนทาน มากที่สุด โดยพิจารณาจากผ้ารองนั่ง ทั้งตะเข็บ และเนื้อผ้า รวมทั้งมีระยะยืดของผ้าจากแรงกดน้อยที่สุด ซึ่งช่วยทำให้โครงเก้าอี้ไม่มีความเสียหาย อีกทั้งมีความคงทนมากกว่าเก้าอี้พกพาในท้องตลาดจากผ้าพอลิเอสเตอร์ ที่นำมาศึกษาอีกด้วย

## สรุปและอภิปรายผล

จากการนำเส้นด้าย rPET มาตีเกลียวด้วยจำนวน 4 เกลียวต่อนิ้ว โดยใช้เส้นด้ายจำนวน 1 เส้น และ 2 เส้น ได้แก่ rPET-1 และ rPET-2 ทำให้เส้นด้ายทนต่อแรงดึงขาดได้มากขึ้น แต่ไม่ส่งผลต่อระยะยืดก่อนขาด เมื่อนำไปทอ ผ้าสามโครงสร้าง ได้แก่ ผ้าทอลายขัด ผ้าทอลายทแยง และผ้าทอลายขัดสานตะกร้า โดยใช้เส้นด้าย rPET-2 เป็นเส้นด้ายยืน และใช้เส้นด้าย rPET-1 หรือเส้นด้าย rPET-2 เป็นเส้นด้ายพุ่งพบว่า ผ้าทอทุกโครงสร้างที่ใช้ เส้นด้าย rPET-2 เป็นเส้นด้าย rPET-1 หรือเส้นด้าย rPET-2 เป็นเส้นด้ายพุ่งพบว่า ผ้าทอทุกโครงสร้างที่ใช้ เส้นด้าย rPET-2 เป็นเส้นด้ายพุ่งมีความแข็งแรงต่อแรงดึงและแรงฉีกขาดได้ดีกว่าการใช้ rPET-1 เป็นเส้นด้ายพุ่ง ผ้าทอลายขัดมีความแข็งแรงต่อแรงดึงมากที่สุด รองลงมาคือ ผ้าทอลายทแยง และผ้าทอลายขัดสานตะกร้า ส่วนผ้าทอลายทแยงมีความแข็งแรงต่อแรงฉีกขาดมากที่สุด รองลงมาคือ ผ้าทอลายขัด และผ้าทอลายขัดสานตะกร้า

เมื่อเลือกผ้าทอลายขัดที่ใช้เส้นด้ายพุ่ง rPET-2 ซึ่งมีความแข็งแรงต่อแรงดึงมากที่สุด และผ้าทอลายทแยง ที่ใช้เส้นด้ายพุ่ง rPET-2 ซึ่งมีความแข็งแรงต่อแรงฉีกขาดมากที่สุด มาขึ้นรูปเก้าอี้พกพา และทดสอบการรองรับ น้ำหนักด้วยแรงกด 150 kgf จำนวน 5 รอบ พบว่า เก้าอี้พกพาที่ใช้ผ้ารองนั่งจากผ้าทอลายขัดที่ใช้เส้นด้าย rPET-2 เป็นเส้นด้ายพุ่งมีความทนทานที่สุด เนื่องจากผ้ารองนั่งไม่มีการขาดและรอยฉีกขาด ระยะยึดของผ้า น้อยที่สุด และไม่พบความเสียทายกับโครงเก้าอี้ แสดงให้เห็นว่า ผ้าทอดังกล่าวสามารถนำไปใช้งานได้ เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบนี้กับเก้าอี้พกพาในท้องตลาดจากผ้าพอลิเอสเตอร์

ผลการวิจัยนี้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ซึ่งได้ผลลัพธ์ไปในทางที่ดี นั่นคือ สามารถนำผ้าทอจาก เส้นด้ายวัสดุรีไซเคิล 100 % มาใช้งานในลักษณะของผ้ารองนั่งสำทรับเก้าอี้พกพาได้ โดยใช้ความรู้ทางการ ออกแบบเชิงวิศวกรรมสิ่งทอ ในการเลือกโครงสร้างเส้นด้าย โครงสร้างลายทอ และการทดสอบสมบัติของผ้า เพื่อเลือกวัสดุทรือตัวอย่างผ้าให้เหมาะสมในการใช้งาน อย่างไรก็ตาม การนำวัสดุรีไซเคิลมาใช้งานในเชิง สิ่งทอในงานวิจัยที่ผ่านมา ไม่ว่าจะเป็นการใช้ rPET ในรูปแบบของเส้นใย ทรือเส้นด้ายในการขึ้นรูปเป็นผืนผ้า ทั้งผ้าทอ ผ้าถัก ทรือผ้าไม่ทอ ต่างทำการทดสอบในเชิงสมบัติของผ้าเท่านั้น จึงยังเป็นข้อจำกัดของข้อมูล การนำวัสดุรีไซเคิลเหล่านี้ไปใช้งานในลักษณะต่าง ๆ ที่นอกเหนือไปจากเสื้อผ้าเครื่องนุ่งท่ม ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ จึงได้ประยุกต์การทดสอบทางงานโยธากับผ้ารองนั่งสำทรับเก้าอี้พกพา โดยขึ้นรูปผ้าทอรีไซเคิลกับโครงเก้าอื้ และทดสอบความคงทนต่อแรงกดกับขึ้นงานจริง เพื่อแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการใช้งานจริง พบว่า เก้าอี้พกพาที่ใช้ผ้ารองนั่งจากผ้าทอ rPET ในการศึกษานี้สามารถทนทานต่อแรงกดได้ดีกว่าเก้าอี้พกพาในท้องตลาด จากผ้าพอลิเอสเตอร์ จากผลดังกล่าวไม่เพียงแต่แสดงถึงการขยายขอบเขตการใช้งานของวัสดุรีไขเคิลนอกเหนือ จากเสื้อผ้าเครื่องนุ่งห่ม ซึ่งสามารถต่อยอดสู่ผลิตภัณฑ์ในลักษณะคล้ายกัน เช่น เปลสนามพกพา อีกทั้งยังเป็น การแสดงถึงการสร้างทางเลือกในการใช้วัสดุรีไขเคิลจากพลาสติก rPET มาผลิตผ้าทอถือเป็นการส่งเสริม ความรับผิดชอบต่อลิ่งแวดล้อมอีกด้วย

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัท อินโครามา โพลีเอสเตอร์ อินดัสตรี้ส์ จำกัด (มหาชน) สำหรับความอนุเคราะห์เส้นด้ายพอลิเอทิลีน เทเรฟทาเลตรีไซเคิล และบริษัท มาสเท็กซ์ จำกัด สำหรับความอนุเคราะห์ในการตีเกลียวเส้นด้าย ทั้งนี้ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งทอ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ในการสนับสนุน เครื่องมือ ห้องปฏิบัติการทอ และห้องปฏิบัติการทดสอบสิ่งทอสำหรับการทำวิจัยนี้

# References

 Telli, A. and Özdil, N. (2015). Effect of Recycled PET Fibers on the Performance Properties of Knitted Fabrics. Journal of Engineered Fibers and Fabrics. Vol. 10, Issue 2, pp. 47-50

- [2] Frost, H., Zambrano, M. C., Leonas, K., Pawlak, J. J., and Venditti, R. A. (2020). Do Recycled Cotton or Polyester Fibers Influence the Shedding Propensity of Fabrics during Laundering?
   AATCC Journal of Research. Vol. 7, Issue 1 suppl, pp. 32-41. DOI: 10.14504/ajr.7.S1.4
- [3] Khan, S. U., Hassan, T., Wasim, M., Khan, M. Q., Salam, A., Hassan, S. Z. U., Abbasi, A. M. R., and Mustafa, T. (2023). Valorization of Recycled PET for Yarn Manufacturing and Knitwear Fabrics used for Apparel Applications. **Polymer Bulletin**. Vol. 80, Issue 3, pp. 2779-2799. DOI: 10.1007/s00289-022-04172-8
- [4] Albini, G., Brunella, V., Placenza, B., Martorana, B., and Guido Lambertini, V. (2019). Comparative Study of Mechanical Characteristics of Recycled PET Fibres for Automobile Seat Cover Application.
   Journal of Industrial Textiles. Vol. 48, No. 6, pp. 992-1008. DOI: 10.1177/1528083717750887
- [5] Bhanderi, K. K., Joshi, J. R., and Patel, J. V. (2023). Recycling of Polyethylene Terephthalate (PET Or PETE) Plastics - An Alternative to Obtain Value Added Products: A Review. Journal of the Indian Chemical Society. Vol. 100, Issue 1, DOI: 10.1016/j.jics.2022.100843
- [6] KiriŞ, G. and Yılmaz, D. (2021). The Effect of Recycled Polyester (rPET) Filament Fiber Properties on Various Woven Fabric Performance Properties. Tekstil ve Konfeksiyon. Vol. 31, No. 3, pp. 171-182. DOI: 10.32710/tekstilvekonfeksiyon.767428
- Seval, U. (2021). The Bursting Strength Properties of Knitted Fabrics Containing Recycled Polyester Fiber. The Journal of The Textile Institute. Vol. 112, Issue 12, pp. 1998-2003. DOI: 10.1080/00405000.2020.1862490
- [8] Majumdar, A., Shukla, S., Singh, A. A., and Arora, S. (2020). Circular Fashion: Properties of Fabrics Made from Mechanically Recycled Poly-Ethylene Terephthalate (PET) Bottles. Resources, Conservation and Recycling. Vol. 161, Article 104915. DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.104915
- [9] Atakan, R., Sezer, S., and Karakas, H. (2020). Development of Nonwoven Automotive Carpets Made of Recycled PET Fibers with Improved Abrasion Resistance. Journal of Industrial Textiles. Vol. 49, No. 7, pp. 835-857. DOI: 10.1177/1528083718798637
- [10] Jahan, I. (2017). Effect of Fabric Structure on the Mechanical Properties of Woven Fabrics.
   Advance Research in Textile Engineering. Vol. 2, No. 2, DOI: 10.26420/advrestexteng.2017.1018
- [11] Kotb, N. A. (2012). Predicting Yarn Quality Performance Based on Fibers types and Yarn Structure. Life Science Journal. Vol. 9, No. 3, pp. 1009-1015
- [12] Eryuruk, S. and Kalaoglu, F. (2015). The Effect of Weave Construction on Tear Strength of Woven Fabrics. Autex Research Journal. Vol. 15, No. 3, pp. 207-214. DOI: 10.1515/aut-2015-0004

# การศึกษาการทำแบบจำลองการระเทยสารด้วยเลเซอร์บนตะกั่วเทลลูไรด์ A Study of Laser Ablation Simulation on Lead Telluride

ธนพล ขอบขำ<sup>1\*</sup> วรวิทย์ โกสลาทิพย์<sup>1</sup> นริส ประทินทอง<sup>2</sup> และทัศวัลย์ คัมภีระพันธ์<sup>3</sup> Tanaphon Khokham<sup>1\*</sup> Voravit Kosalathip<sup>1</sup> Naris Pratinthong<sup>2</sup> and Taswal Kumpeerpun<sup>3</sup>

Received: October 6, 2023; Revised: November 21, 2023; Accepted: November 22, 2023

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการสร้างแบบจำลองการระเทยสารด้วยเลเซอร์ (Laser Ablation) บนวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก คือ ตะกั่วเทลลูไรด์ (Lead Telluride: PbTe) การเปลี่ยนของอุณหภูมิเกิดจากการระเทยด้วยลำแสงเลเซอร์บน PbTe เป็นการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้ระเบียบวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ ด้วยโปรแกรม COMSOL Multiphysics 5.5 และ ANSYS 2021 R1 ในการทำวิจัยกำหนดให้กำลังของเลเซอร์มีการเปลี่ยนแปลงระหว่าง 10 ถึง 40 W ในขณะที่ความเร็วในการเคลื่อนที่ของเลเซอร์มีการเปลี่ยนแปลงจาก 1000 ถึง 4000 rpm ผลการสร้างแบบจำลองพบว่า ที่ความเร็วในการเคลื่อนที่ของเลเซอร์มีการเปลี่ยนแปลงจาก 1000 ถึง 4000 rpm เมื่อกำลังของเลเซอร์เพิ่มขึ้น เช่นเดียวกันที่ให้กำลังของเลเซอร์คงที่ อุณหภูมิสูงสุดลดลงเมื่อความเร็ว ในการเคลื่อนที่ของเลเซอร์เพิ่มขึ้น แหล่งความร้อนเคลื่อนที่แบบจุด (Moving Point Heat Source) ของเลเซอร์ที่ 20 W ให้อุณหภูมิสูงสุดสูงกว่าจุดหลอมเหลวของ PbTe เล็กน้อย อาจส่งผลในการสร้างอนุภาคนาโนของ PbTe ทั้งสองโปรแกรมมีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างกันไม่ถึง 10 % จึงสามารถใช้ในการสร้างและพัฒนาแบบจำลอง ทางคณิตศาสตร์ของการระเทยสารด้วยเลเซอร์ให้สมบูรณ์และดียิ่งขึ้นไปอีก

**คำสำคัญ** : ตะกั่วเทลลูไรด์; วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก; การระเหยสารด้วยเลเซอร์; แบบจำลอง; ระเบียบวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์

<sup>่</sup> คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> คณะพลังงานสิ่งแวคล้อมและวัสคุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> ศูนย์บูรณาการเทคโนโลยีเพื่ออุสาหกรรมไทย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Faculty of Science, King Mongkut's University of Technology Thonburi

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> School of Energy, Environment and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Thai Industry Technology Integrating Center, King Mongkut's University of Technology Thonburi

<sup>\*</sup> Corresponding Author, Tel. 09 4493 8310, E - mail: guy.tanaphon@gmail.com

# Abstract

This objective of this research was to study the simulation of laser ablation on thermoelectric material (Lead Telluride: PbTe). The temperature change caused by laser beam ablation on PbTe target was simulated using both COMSOL Multiphysics 5.5 and ANSYS 2021 R1 finite element analysis software packages. The laser power varied between 10 to 40 W, while the speeds ranged from 1000 to 4000 rpm. The results showed that at any given laser speed, the local maximum temperature on PbTe increased with an increase in the laser power. The maximum temperature decreased with an increase in the laser speed at a constant laser power. The moving point heat source of laser at 20 W gave the maximum temperature, which was slightly higher than the melting point of PbTe, potentially resulting in the generation of PbTe nanoparticles. The results obtained from both software differed by about 10 %. Both software can be used to simulate completely and even more effective in the future.

Keywords: Lead Telluride; Thermoelectric Material; Laser Ablation; Simulation; Finite Element Methods

### บทนำ

วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติถ้าให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านจะได้ความแตกต่างของอุณหภูมิ และ ถ้าให้ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างด้านสองด้านของตัววัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกจะได้กระแสไฟฟ้าออกมา โดยประสิทธิภาพของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกนั้นขึ้นอยู่กับค่า Figure of Merit (*ZT*) โดยที่  $ZT = S^2 \sigma T / k$ เมื่อ *S*,  $\sigma$ , *k* และ *T* คือ สัมประสิทธิ์ซีเบค สภาพการนำไฟฟ้า สภาพการนำความร้อน และอุณหภูมิ ตามลำดับ โดยที่คุณสมบัติของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกที่ดีนั้น ค่าสภาพการนำไฟฟ้าควรจะมีค่าสูง และค่าสภาพการนำความร้อน ควรมีค่าที่ต่ำ

การระเทยสารและการสังเคราะท์อนุภาคนาโนด้วยเลเซอร์นั้น เป็นการสังเคราะท์เชิงฟิสิกส์ ได้ผลเร็ว และไม่ทำลายสิ่งแวดล้อมเพราะไม่ได้ใช้สารเคมีในการสังเคราะท์ การสังเคราะท์ด้วยเลเซอร์นั้นสามารถ ประยุกต์ได้หลายอย่าง ดังตัวอย่างงานวิจัย การสังเคราะท์อนุภาคนาโนของตะกั่วเทลลูไรด์ (PbTe) ผ่านตัวกลาง ที่เป็นน้ำด้วยเลเซอร์แบบพัลส์ (Pulse Laser) โดยใช้ Nd: YAG Laser ตามความยาวคลื่นที่ 266 532 และ 1064 nm โดยที่ความยาวคลื่นที่ 1064 nm ส่งผลต่อการสังเคราะท์อนุภาคนาโนของตะกั่วเทลลูไรด์ไท้มีขนาดเล็กที่สุด ที่เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคนาโนอยู่ในช่วง 4 – 6 nm [1] การเตรียมผงนาโนเทอร์โมอิเล็กทริกในน้ำ โดยใช้ Nd: YAG Laser ที่ความยาวคลื่น 532 nm [2] การศึกษาโครงสร้างเชิงจุลภาค และคุณสมบัติทางแสง ของฟิล์มบางซิงค์ซาเลนในด์ (ZnSe) ที่เคลือบโดยการระเทยสารด้วยเลเซอร์ในระบบสุญญากาศ โดยใช้ คาร์บอนไดออกไซด์เลเซอร์แบบต่อเนื่อง (CW-CO₂ Laser) โดยฟิล์มบางที่ได้นั้นมีการนำไปทำการอบอ่อน (Anneal) ที่อุณทภูมิ 100 200 และ 300 °C พบว่าเมื่ออุณทภูมิในการอบอ่อนเพิ่มขึ้น จะทำให้ขนาดของผลึก (Crystallite Size) ของฟิล์มบางซิงค์ซาเลนในด์มีการเพิ่มขึ้น และค่าช่องว่างแถบพลังงาน (Energy Band Gap) จะลดลง เมื่ออุณทภูมิในการอบอ่อนเพิ่มขึ้น [3] แต่ไม่สามารถรู้ได้ว่าขณะที่เลเซอร์สังเคราะห์วัสดุให้เป็นอนุภาคนาโนนั้น อุณทภูมิของเลเซอร์ขณะสังเคราะท์มีค่าเท่าใด แต่การสร้างแบบจำลองจะทำให้รู้อุณทภูมิขณะที่เลเซอร์สังเคราะห์วัสดุ

การสร้างแบบจำลองมีประโยชน์อย่างมาก ช่วยให้คาดการณ์ผลการทดลอง หรือกระบวนการผลิต ล่วงหน้าได้ ทำให้ลดโอกาสความผิดพลาดในการทดลอง หรือความผิดพลาดในกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมได้ การสร้างแบบจำลองการให้ความร้อนด้วยแหล่งพลังงานความร้อนจากเลเซอร์ ซึ่งจะมีประโยชน์ในงานด้าน การตัดด้วยเลเซอร์ การเชื่อมด้วยเลเซอร์ มีตัวอย่างงานวิจัยสร้างแบบจำลองการหลอมผงอัลลอยด์ AlSi10Mg ให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยเลเซอร์ ใช้การสร้างแบบจำลองโดยระเบียบวิธีไฟในต์เอลิเมนต์ ด้วยโปรแกรม ANSYS 17.0 โดยมีการศึกษาโดยการเปลี่ยนแปลงกำลังของเลเซอร์เป็น 70 100 130 160 และ 190 W และการเปลี่ยนแปลง ความเร็วของเลเซอร์เป็น 100 200 300 400 และ 500 mm/s พบว่าที่กำลังของเลเซอร์ และความเร็วของเลเซอร์ ที่แตกต่างกัน มีผลกับอุณหภูมิของเลเซอร์ในการหลอมผงอัลลอยด์ [4] การศึกษาการสร้างแบบจำลอง การเชื่อมเหล็กเฟสคู่ (DP 600 steel) และอลูมิเนียมอัลลอยค์ 6061 (AA 6061) ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์ ให้เป็นเนื้อเดียวกัน ด้วยเลเซอร์ไดโอดกำลังสูงแบบต่อเนื่อง และมีการเปรียบเทียบกับผลการทดลอง โดยมีการ เปลี่ยนแปลงความหนาแน่นพลังงานเลเซอร์ (Laser Energy Density) เป็น 371 J/mm<sup>2</sup> ที่ความเร็วเลเซอร์เป็น 8 mm/s และที่ความหนาแน่นพลังงานเลเซอร์เป็น 297 J/mm<sup>2</sup> ที่ความเร็วเลเซอร์เป็น 10 mm/s พบว่า เมื่อความหนาแน่นพลังงานเลเซอร์เพิ่มขึ้น อุณหภูมิก็จะเพิ่มขึ้น และความลึกและความกว้างของรอยเชื่อมที่ได้ จากการทำแบบจำลอง และจากการทดลองมีความแตกต่างอยู่เล็กน้อย [5]

จากที่กล่าวมาจะเห็นว่าสร้างแบบจำลองของการให้ความร้อนด้วยเลเซอร์นั้นมีประโยชน์มาก ดังนั้นจะทำการศึกษาการสร้างและพัฒนาแบบจำลองของการระเหยด้วยเลเซอร์คาร์บอนไดออกไซด์แบบต่อเนื่อง ที่มีการเปลี่ยนแปลงกำลังของเลเซอร์ และความเร็วในการเคลื่อนที่ของลำแสงเลเซอร์ เสมือนแหล่งความร้อน เคลื่อนที่แบบจุดบนตะกั่วเทลลูไรด์ที่เป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก เพื่อหาอุณหภูมิในการหลอมเหลวขณะที่ ลำแสงเลเซอร์เคลื่อนที่บนตะกั่วเทลลูไรด์ การหลอมเหลวจะส่งผลต่อกระบวนการระเหยสารโดยการฉายเลเซอร์ เพื่อให้เกิดผงนาโน โดยใช้ระเบียบวิธีการ ไฟในต์เอลิเมนต์ในการสร้างแบบจำลอง ด้วยโปรแกรม COMSOL Multiphysics 5.5 และ ANSYS 2021 R1 และเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างจากผลอุณหภูมิขณะที่ ลำแสงเลเซอร์เคลื่อนที่บนตะกั่วเทลลูไรด์ที่ได้จากการทำแบบจำลองระหว่างสองโปรแกรม เพื่อเป็นแนวทาง ในการทดลองการสังเคราะห์ผงนาโนของตะกั่วเทลลูไรด์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เลเซอร์

### วิธีการวิจัย

### 1. สมการการถ่ายโอนความร้อน

การศึกษาการทำแบบจำลองจะศึกษาผ่านสมการการถ่ายโอนความร้อน โดยการผันความร้อนใน 3 มิติ ซึ่งอธิบายอุณหภูมิ (T) ที่เป็นฟังค์ชันกับ x, y, z และเวลา (t) ดังสมการที่ (1) [6]

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \nabla T - \nabla \cdot (k \nabla T) = Q \tag{1}$$

เทอม  $ho C_p rac{\partial T}{\partial t}$  เป็นเทอมสะสมความร้อนภายในวัสดุที่ขึ้นกับเวลา เทอม  $ho C_p u 
abla T$  เป็นเทอม

ที่มีการแพร่ทางความร้อนเนื่องจากแหล่งความร้อนที่เคลื่อนที่ (Moving Heat Source) หรือลำเลเซอร์ (Laser Beam) ที่เคลื่อนที่ และเทอม  $abla \cdot (k 
abla T)$  เป็นเทอมการนำความร้อนภายในตะกั่วเทลลูไรด์

โดยที่

 $\rho$ คือความหนาแน่นของตะกั่วเทลลูไรด์  $(kg/m^3)$  $C_p$ คือความจุความร้อนของตะกั่วเทลลูไรด์  $(J/kg \cdot K)$ Tคืออุณทภูมิ (K)kคือการนำความร้อนของตะกั่วเทลลูไรด์  $(W/m \cdot K)$ 

โดยลำแสงที่ฉายลงผิวของตะกั่วเทลลูไรด์ จะเป็นการสร้างความร้อน โดยรูปแบบของฟลักซ์ความร้อน โดยของฟลักซ์ความร้อนโดยลำแสงเลเซอร์มีรูปแบบการกระทำตัวแบบแบบเกาส์เซียน (Gaussian Laser Beam) โดยมีสมการดังสมการที่ (2) [4]

$$q = \frac{2AP}{\pi r_0^2} e^{\frac{-2r^2}{r_0^2}}$$
(2)

เมื่อลำแสงเลเซอร์กระทบกับตะกั่วเทลลูไรด์ จะเกิดการดูดกลืน และการสะท้อนของแสง จะทำให้ เกิดเป็นแหล่งความร้อน (Heat Source) ตามกฎของเบียร์ - แลมเบิร์ต (Beer-Lambert Law) ดังสมการที่ (3)

$$q = A(1-R)\frac{2P}{\pi r_0^2} e^{\frac{-2r^2}{r_0^2}}$$
(3)

โดยที่

Р	คือ	กำลังของเลเซอร์ ( $W$ )
A	คือ	สัมประสิทธิ์การดูดกลืนของตะกั่วเทลลูไรด์
R	คือ	สัมประสิทธิ์การสะท้อนของตะกั่วเทลลูไรด์
$r_0$	คือ	รัศมีของลำแสงเลเซอร์ (m)
r	คือ	ระยะระทว่างลำแสงเลเซอร์และตะกั่วเทลลูไรด์ ( <i>m</i> )

เงื่อนไขเริ่มต้นสำหรับอุณหภูมิที่เวลา t=0 ให้เป็นดังสมการที่ (4)

$$T(x, y, z, t) /_{t=0} = T_0 = 300K$$
(4)

การถ่ายโอนความร้อนจากแต่ละด้านของขึ้นงาน ยกเว้นด้านล่างของขึ้นงาน เป็นดังสมการที่ (5)

$$-k\left(\frac{\partial T}{\partial Z}\right) = \varepsilon\sigma(T^4 - T_s^4) + h(T - T_0)$$
(5)

การสูญเสียพลังงานความร้อนจากด้านข้างของตัวตะกั่วเทลลูไรด์ เนื่องจากการนำพาความร้อน (Convection Heat Transfer) จากอากาศ ดังสมการที่ (6) [17] ซึ่งในการทดลองการหมุนของเป้าที่ติดกับ ตะกั่วเทลลูไรด์จะทำให้การนำพาความร้อนเป็นแบบ Force Convection ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ [8]

$$q = h(T - T_0) \tag{6}$$

โดยที่

h คือ สัมประสิทธิ์การนำพาความร้อน ( $W / m^2 \cdot K$ ) T คือ อุณหภูมิด้านบนของตะกั่วเทลลูไรด์ (K)  $T_0$  คือ อุณหภูมิอากาศรอบ  $\eta$  (K)

และมีการสูญเสียความร้อนเนื่องจากการแผ่รังสีจากตะกั่วเทลลูไรด์ ไปรอบ ๆ ผิวของ Chamber ที่ไว้รองรับผงนาโนที่หลุดออกมาจากการสังเคราะห์ ดังสมการที่ (7)

$$q = \varepsilon \sigma (T^4 - T_s^4) \tag{7}$$

โดยที่

- $\sigma$  คือ Stefan-Boltzmann Constant
- $T_s$  คือ อุณหภูมิที่ผิว Chamber มีค่าสูงกว่าอุณหภูมิอากาศรอบ ๆ ประมาณ 310 K

ที่ด้านล่างของตะกั่วเทลลูไรด์ ไม่มีการสูญเสียความร้อน เป็นดังสมการที่ (8) [4]

$$\left[k\left(\frac{\partial T}{\partial Z}\right)\right]_{Z=0} = 0 \tag{8}$$

2. การออกแบบจำลอง

การออกแบบจำลองนั้นใช้โปรแกรม COMSOL Multiphysics 5.5 และโปรแกรม ANSYS 2021 R1 ในการทำแบบจำลอง รูปร่างของตะกั่วเทลลูไรด์สำหรับทำแบบจำลองเป็นรูปทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 14 มิลลิเมตร และหนา 3 มิลลิเมตร สภาพรอบ ๆ ของตะกั่วเทลลูไรด์อยู่ในอากาศ ทำให้สามารถมีการนำพา ความร้อนจากอากาศได้ ลำแสงเลเซอร์ยิงไปยังด้านบนของตะกั่วเทลลูไรด์ และเคลื่อนที่ที่ระยะรัศมี 4 มิลลิเมตร และได้ทำการแบ่งโดเมนด้านบนของชิ้นงานออกเป็นสองโดเมน โดยโดเมนหนึ่งมีการสร้างเส้นทางที่เลเซอร์ มีการเคลื่อนที่ ดังรูปที่ 1



(ก) การแบ่งโคเมนโดยโปรแกรม COMSOL Multiphysics (ข) การแบ่งโคเมนโดยโปรแกรม ANSYS
 รูปที่ 1 รูปทรงของตะกั่วเทลลูไรด์ที่มีการแบ่งเป็น 2 โคเมน จากทั้งสองโปรแกรม

และใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) ในการสร้าง Mesh แต่ละโดเมน โดยที่โดเมนที่ให้เลเซอร์เคลื่อนที่ทำ Mesh แบบ Ultrafine Mesh ส่วนโดเมนที่เหลือได้ที่การทำ Mesh แบบ Coarse Mesh วัตถุประสงค์เพื่อลดเวลาในการทำแบบจำลอง [9] โดยรูปร่างของ Mesh ที่สร้างคือ Tetrahedral ดังรูปที่ 2 และสาเหตุที่ใช้โปรแกรม COMSOL Multiphysics 5.5 และโปรแกรม ANSYS 2021 R1 ในการทำแบบจำลอง เพราะทั้งสองโปรแกรมนี้ เป็นโปรแกรมที่มีการคำนวณที่มีค่าผิดพลาดน้อย และ เป็นโปรแกรมที่นิยมในการทำแบบจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยสมบัติทางความร้อนของตะกั่วเทลลูไรด์ แสดงดังตารางที่ 1 และพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับแบบจำลอง แสดงดังตารางที่ 2





(ก) Mesh โดยโปรแกรม COMSOL Multiphysics
 รูปที่ 2 Tetrahedral Mesh บนขึ้นงานจากทั้งสองโปรแกรม

(ข) Mesh โดยโปรแกรม ANSYS

4	20	¥	5	থা ত		
ตารางท 1	สมบตทาง	ความรอนขอ	วงตะกวเทล	งลูไรด	[10]	-[14]

Properties of PbTe	Values
Thermal conductivity ( $k$ ), $W/mK$	2.141
Density ( $\rho$ ), $kg/m^3$	8150
Specific heat capacity ( $C_p$ ), $J/kgK$	155
Emissivity ( $\mathcal{E}$ )	0.8
Melting point, K	1190
Convection heat transfer coefficient ( h ), $W / m^2 \cdot K$	10

## **ตารางที่ 2** พารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษา

Parameters	Values
Laser Power (W)	10, 20, 30 และ 40
Laser spot size (mm)	0.2
Absorption coefficient	0.8
Scanning speed (rpm)	1000, 2000, 3000 และ 4000
Time (s)	0.075
Reflection coefficient	0.2

### ผลการวิจัย

### 1. การศึกษาการเปลี่ยนแปลงกำลังของเลเซอร์

เมื่อแสงเลเซอร์กระทบบนตะกั่วเทลลูไรด์ และให้ลำแสงเลเซอร์เคลื่อนที่หมุนด้วยความเร็ว 4000 rpm เวลาในการเคลื่อนที่ของลำแสงเลเซอร์เป็น 0.075 วินาที โดยมีการเปลี่ยนแปลงกำลังของเลเซอร์เป็น 10, 20, 30 และ 40 W เพื่อหากำลังของเลเซอร์ที่เหมาะสมในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนของตะกั่วเทลลูไรด์ โดยสอดคล้องกับการทดลองของ [16] จากอุณหภูมิที่ได้จะเห็นได้ว่าเมื่อกำลังของเลเซอร์เพิ่มขึ้น อุณหภูมิ ก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ดังรูปที่ 3 เป็นอุณหภูมิบนตะกั่วเทลลูไรด์ โดยโปรแกรม COMSOL Multiphysics อุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดประมาณ 975, 1670, 2400 และ 3060 K และรูปที่ 4 เป็นอุณหภูมิบนตะกั่วเทลลูไรด์ โดยโปรแกรม ANSYS อุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดประมาณ 915.43, 1627.7, 2291.5 และ 2955.4 K ตามลำดับ เมื่อกำลังของเลเซอร์เพิ่มขึ้น ทำให้ฟลักซ์ความร้อน (Heat Flux) เพิ่มขึ้นด้วยตามสมการที่ (2) เพราะฟลักซ์



## ความร้อนเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกำลังของเลเซอร์ [4]





รูปที่ 3 อุณหภูมิบนตะกั่วเทลลูไรด์ โดยโปรแกรม COMSOL Multiphysics ที่มีการเปลี่ยนแปลงกำลังเลเซอร์ 10 - 40 W



(ก) กำลังเลเซอร์ 10 W (ข) กำลังเลเซอร์ 20 W รูปที่ 4 อุณหภูมิบนตะกั่วเทลลูไรค์ โดยโปรแกรม ANSYS ที่มีการเปลี่ยนแปลงกำลังเลเซอร์ 10 - 40 W



(ค) กำลังเลเซอร์ 30 W
 (ง) กำลังเลเซอร์ 40 W
 รูปที่ 4 อุณหภูมิบนตะกั่วเทลลูไรด์ โดยโปรแกรม ANSYS ที่มีการเปลี่ยนแปลงกำลังเลเซอร์ 10 - 40 W (ต่อ)

จากรูปที่ 5 และรูปที่ 6 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิสูงสุดกับเวลาที่มีการเปลี่ยนแปลง

กำลังของเลเซอร์ โดยโปรแกรม COMSOL Multiphysics และ ANSYS กับเวลาในการเคลื่อนที่ของเลเซอร์ ตั้งแต่ 0 ถึง 0.075 วินาที ที่จุดเริ่มต้นของการเคลื่อนที่ของเลเซอร์ที่ 0 วินาที อุณหภูมิเริ่มต้นของทุกการ เปลี่ยนแปลงกำลังเลเซอร์เป็น 300 K จะเห็นว่าช่วงของอุณหภูมิสูงสุดที่กำลังเลเซอร์ 20 W ทั้งโปรแกรม COMSOL Multiphysics และ ANSYS มีค่ามากกว่าอุณหภูมิจุดหลอมเหลว (Melting Point) ของตะกั่ว เทลลูไรด์เล็กน้อย อาจส่งผลให้อนุภาคนาโนที่หลุดออกมาจากการสังเคราะห์ด้วยวิธีการระเทยด้วยเลเซอร์ มีขนาดเล็กที่สุด



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิสูงสุดและเวลาโดยโปรแกรม COMSOL Multiphysics ที่มีการ เปลี่ยนแปลงกำลังของเลเซอร์





และความแตกต่างของการเปลี่ยนแปลงกำลังของเลเซอร์เป็น 10 20 30 และ 40 W จากการสร้าง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม COMSOL Multiphysics และโปรแกรม ANSYS แตกต่างกัน 9.14, 5.44, 6.9 และ 6.66% ตามลำดับ

### 2. การศึกษาการเปลี่ยนแปลงความเร็วการเคลื่อนที่ของลำแสงเลเซอร์

เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วการเคลื่อนที่ของลำแสงเลเซอร์เป็น 1000 2000 3000 และ 4000 rpm โดยให้กำลังของเลเซอร์คงที่ที่ 40 W และเวลาในการเคลื่อนที่ของลำแสงเลเซอร์เป็น 0.075 วินาที เพื่อหาความเร็วรอบที่เหมาะสมในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนของตะกั่วเทลลูไรด์ โดยสอดคล้องกับการทดลอง ของ [8] สังเกตได้ว่าเมื่อความเร็วในการเคลื่อนที่ของลำแสงเลเซอร์เพิ่มขึ้น อุณหภูมิจะค่อย ๆ ลดลงดังรูปที่ 7 เป็นอุณหภูมิบนตะกั่วเทลลูไรด์ โดยโปรแกรม COMSOL Multiphysics อุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดประมาณ 5640 4130 3430 และ 3060 K และรูปที่ 8 เป็นอุณหภูมิบนตะกั่วเทลลูไรด์ โดยโปรแกรม ANSYS อุณหภูมิ เฉลี่ยสูงสุดประมาณ 5292.3 3915.1 3328.7 และ 2955.4 K ตามลำดับ เมื่อมีการเปลี่ยนความเร็วของ การเคลื่อนที่ของลำแสงเลเซอร์จะส่งผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิ [13] จนทำให้อุณหภูมิลดลง



(ก) ความเร็วรอบ 1000 rpm

(ข) ความเร็วรอบ 2000 rpm

รูปที่ 7 อุณทภูมิบนตะกั่วเทลลูไรด์ โดยโปรแกรม COMSOL Multiphysics ที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบ ของลำแสงเลเซอร์



(ค) ความเร็วรอบ 3000 rpm
 (ง) ความเร็วรอบ 4000 rpm
 รูปที่ 7 อุณทภูมิบนตะกั่วเทลลูไรด์ โดยโปรแกรม COMSOL Multiphysics ที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบ ของลำแสงเลเซอร์ (ต่อ)



(ค) ความเร็วรอบ 3000 rpm (ง) ความเร็วรอบ 4000 rpm รูปที่ 8 อุณทภูมิบนตะกั่วเทลลูไรด์ โดยโปรแกรม ANSYS ที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบของลำแสงเลเซอร์

จากรูปที่ 9 และรูปที่ 10 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิสูงสุดกับเวลาที่มีการเปลี่ยนแปลง ความเร็วการเคลื่อนที่ของลำแสงเลเซอร์ โดยโปรแกรม COMSOL Multiphysics และ ANSYS กับเวลา ในการเคลื่อนที่ของเลเซอร์ตั้งแต่ 0 ถึง 0.075 วินาที จะเห็นว่าช่วงของอุณหภูมิสูงสุดที่มีการเปลี่ยนแปลง ความเร็วการเคลื่อนที่ของลำแสงเลเซอร์ทั้งโปรแกรม COMSOL Multiphysics และ ANSYS อุณหภูมิมีค่า มากกว่าจุดหลอมเหลวของตะกั่วเทลลูไรด์มาก อาจส่งผลให้อนุภาคนาโนที่หลุดออกมาจากการสังเคราะห์ด้วย วิธีการระเทยด้วยเลเซอร์มีขนาดใหญ่จนเกินไป



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิสูงสุดและเวลาโดยโปรแกรม COMSOL Multiphysics ที่มีการเปลี่ยนแปลง ความเร็วการเคลื่อนที่ของลำแสงเลเซอร์



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระทว่างอุณหภูมิสูงสุดและเวลาโดยโปรแกรม ANSYS ที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็ว การเคลื่อนที่ของลำแสงเลเซอร์

และความแตกต่างของการเปลี่ยนแปลงความเร็วการเคลื่อนที่ของลำแสงเลเซอร์เป็น 1000 2000 3000 และ 4000 rpm จากการสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม COMSOL Multiphysics และโปรแกรม ANSYS แตกต่างกัน 8.8 8.09 7.0 และ 6.66% ตามลำดับ

### 3. การเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการสร้างแบบจำลอง

เมื่อทำการยิงเลเซอร์ไปที่ตะกั่วเทลลูไรค์ จะเห็นว่าที่กำลังเลเซอร์ 10 W ความเร็วรอบ 4000 rpm รอยที่เกิดขึ้นบนตะกั่วเทลลูไรค์นั้นเห็นได้ไม่ชัด ซึ่งสอดคล้องกับผลของแบบจำลองคือ อุณทภูมิไม่ถึงจุดหลอมเหลว ของตะกั่วเทลลูไรค์ แต่ที่กำลังเลเซอร์ 20 W ความเร็วรอบ 4000 rpm และที่กำลังเลเซอร์ 40 W ความเร็วรอบ 4000 rpm รอยที่เกิดขึ้นบนตะกั่วเทลลูไรค์จะมีความชัดขึ้น ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลของแบบจำลองคือ อุณทภูมิเกินจุดหลอมเหลวของตะกั่วเทลลูไรค์ ดังรูปที่ 11





(ก) กำลังเลเซอร์ 10 W ความเร็วรอบ 4000 rpm

(ข) กำลังเลเซอร์ 20 W ความเร็วรอบ 4000 rpm



```
(ค) กำลังเลเซอร์ 40 W ความเร็วรอบ 4000 rpm
รูปที่ 11 รอยที่เกิดจากการยิงเลเซอร์บนตะกั่วเทลลูไรด์ที่มีการเพิ่มกำลังของเลเซอร์
```

## สรุปผลการวิจัย

ผลการศึกษาการทำแบบจำลองการระเทยสารด้วยเลเซอร์บนตะกั่วเทลลูไรด์ (PbTe) ที่มีการศึกษาการเปลี่ยนแปลง กำลังของเลเซอร์ และการเปลี่ยนแปลงความเร็วการเคลื่อนที่ของลำแสงเลเซอร์ สรุปได้ดังนี้

 การเปลี่ยนแปลงกำลังของเลเซอร์ เมื่อกำลังของเลเซอร์เพิ่มขึ้นจะทำให้อุณหภูมิที่เลเซอร์กระทบ บนตะกั่วเทลลูไรด์เพิ่มขึ้น และที่กำลังเลเซอร์ 20 W ทั้งโปรแกรม COMSOL Multiphysics และโปรแกรม ANSYS ช่วงอุณหภูมิสูงสุดที่ได้มีค่ามากกว่าจุดหลอมเหลวของตะกั่วเทลลูไรด์เล็กน้อย อาจส่งผลให้อนุภาคนาโน ที่หลุดออกมาจากการสังเคราะห์ด้วยวิธีการระเทยด้วยเลเซอร์มีขนาดเล็กที่สุด

2. การเปลี่ยนแปลงความเร็วของการเคลื่อนที่ของลำแสงเลเซอร์ ทั้งโปรแกรม COMSOL Multiphysics และโปรแกรม ANSYS เมื่อความเร็วการเคลื่อนที่ของลำแสงเลเซอร์เพิ่มขึ้น จาก 1000 จนถึง 4000 rpm จะส่งผลให้มีการกระจายตัวของอุณหภูมิ จะทำให้อุณหภูมิลดลง และช่วงอุณหภูมิสูงสุดที่ได้มีค่ามากกว่า จุดหลอมเหลวของตะกั่วเทลลูไรด์มาก อาจส่งผลให้อนุภาคนาโนที่หลุดออกมาจากการสังเคราะห์ด้วยวิธีการระเทย ด้วยเลเซอร์มีขนาดใหญ่

3. การสร้างแบบจำลองของการระเทยสารด้วยเลเซอร์คาร์บอนไดออกไซด์แบบต่อเนื่องบนตะกั่ว เทลลูไรด์ (PbTe) จากทั้งโปรแกรม COMSOL Multiphysics และโปรแกรม ANSYS นั้นมีความแตกต่าง จากผลของอุณทภูมิที่ได้ทั้งการเปลี่ยนแปลงกำลังของเลเซอร์เป็น 9.1 5.44 6.9 และ 6.66 % และ การเปลี่ยนแปลงความเร็วการเคลื่อนที่ของลำแสงเลเซอร์เป็น 8.8 8.09 7.0 และ 6.66 % ตามลำคับ จะเห็นได้ว่า ทั้งสองโปรแกรมให้ผลที่สอดคล้องกันมี error จากการจำลองต่างกันไม่เกิน 10 % ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย ของ [7] ที่มีความแตกต่างระหว่างโปรแกรม COMSOL Multiphysics และโปรแกรม ANSYS ไม่เกิน 10 % ทั้งนี้ด้วยข้อจำกัดของคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการรัน สามารถใช้ทั้งสองโปรแกรมนี้ในการสร้างแบบจำลอง การระเหยสารด้วยเลเซอร์คาร์บอนไดออกไซด์แบบต่อเนื่องบนตะกั่วเทลลูไรด์ได้ และสามารถใช้ทั้งสองโปรแกรมนี้ ในการพัฒนาการสร้างแบบจำลองของการระเหยสารด้วยเลเซอร์ให้สมบูรณ์และดียิ่งขึ้นไปอีก

4. การเปรียบเทียบผลการทดลอง กับผลของแบบจำลอง เมื่อกำลังของเลเซอร์เพิ่มขึ้นจะเห็นรอยบน ตะกั่วเทลลูไรด์ชัดขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลของแบบจำลองคือ เมื่อกำลังเลเซอร์เป็น 10 W ความเร็วรอบ 4000 rpm รอยที่เกิดขึ้นบนตะกั่วเทลลูไรด์นั้นเห็นได้ไม่ชัด ซึ่งสอดคล้องกับผลของแบบจำลองคืออุณหภูมิไม่ถึง จุดหลอมเหลวของตะกั่วเทลลูไรด์ แต่เมื่อกำลังเลเซอร์เป็น 20 W และ 40 W ความเร็วรอบ 4000 rpm รอยที่เกิดขึ้นบนตะกั่วเทลลูไรด์ แต่เมื่อกำลังเลเซอร์เป็น 20 W และ 40 W ความเร็วรอบ 4000 rpm เกินจุดหลอมเหลวของตะกั่วเทลลูไรด์จะมีความชัดขึ้น ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลของแบบจำลองคือ อุณหภูมิ เกินจุดหลอมเหลวของตะกั่วเทลลูไรด์

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ที่อำนวยความสะดวกทางด้านโปรแกรม ANSYS 2021 R1 สำหรับงานวิจัยนี้

## References

- [1] Chubilleau, C., Lenoir, B., Migot, S., and Dauscher, A. (2011). Laser Fragmentation in Liquid Medium: A New Way for the Synthesis of PbTe Nanoparticles. Journal of Colloid and Interface Science. Vol. 357, Issue 1, pp. 13-17. DOI: 10.1016/j.jcis.2011.01.057
- [2] Kosalathip, V., Dauscher, A., Lenoir, B., Migot, S., and Kumpeerapun, T. (2008). Preparation of Conventional Thermoelectric Nanopowders by Pulsed Laser Fracture in Water: Application to the Fabrication of a pn Hetero-Junction. Applied Physics A. Vol. 93, pp. 235-240. DOI: 10.1007/ s00339-008-4650-8
- [3] Phae-ngam, W., Suchat, S., Kumpeerapun, T., and Kosalathip, V. (2014). Influence of Air Annealing on the Structural, Morphology and Optical Properties of ZnSe Thin Films by CW-CO2 Laser Evaporation. Advanced Materials Letters. Vol. 9, Issue 5, pp. 496-500. DOI: 10.5185/amlett.2014.4577
- [4] Samantaray, M., Sahoo, S., and Thatoi, D. (2018). Computational Modeling of Heat Transfer and Sintering Behavior During Direct Metal Laser Sintering of AlSi10Mg Alloy Powder. Comptes Rendus Mecanique. Vol. 346, Issue 11, pp. 1043-1054. DOI: 10.1016/j.crme.2018.08.006
- [5] Indhu, R., Loganathan, S., Vijayaraghavan, L., and Soundarapandian, S. (2018). A Study on Continuous Beam Laser Welding of Dissimilar Materials Using Multi-Physics Simulation.
   Materials Science. COMSOL Conference 2020
- [6] Said-Bacar, Z., Leroy, Y., Antoni, F., Slaoui, A., and Fogarassy, E. (2011). Modeling of CW Laser Diode Irradiation of Amorphous Silicon Films. Applied Surface Science. Vol. 257, Issue 12, pp. 5127-5131. DOI: 10.1016/j.apsusc.2010.11.025
- [7] Luo, D., Wang, R., Yan, Y., Sun, Z., Zhou, W., and Ding, R. (2021). Comparison of Different Fluid-Thermal-Electric Multiphysics Modeling Approaches for Thermoelectric Generator Systems.
   Renewable Energy. Vol. 180, pp. 1266-1277. DOI: 10.1016/j.renene.2021.09.033
- [8] Phae-Ngam, W., Kosalathip, V., Kumpeerapun, T., Limsuwan, P., and Dauscher, A. (2011). Preparation and Characterization of Tellurium Nano-particles by Long Pulsed Laser Ablation. Advanced Materials Research. Vol. 214. pp. 202-206. DOI: DOI:10.4028/www.scientific.net/AMR.214.202

- [9] Caiazzo, F. and Alfieri, V. (2018). Simulation of Laser Heating of Aluminum and Model Validation via Two-Color Pyrometer and Shape Assessment. Materials. Vol. 11, Issue 9, p. 1056. DOI: 10.3390/ma11091506
- [10] El-Sharkawy, A. A., Abou EI-Azm, A. M., Kenawy, M. I., Hillal, A. S., and Abu-Basha, H. M. (1983). Thermophysical Properties of Polycrystalline PbS, PbSe, and PbTe in the Temperature Range 300-700 K. International Journal of Thermophysics. Vol. 4, pp. 261-269
- [11] Hwang, J. -Y., Kim, E. S., Hasan, S. W., Choi, S. -M., Lee, K. H., and Kim, S. W. (2015). Reduction of Lattice Thermal Conductivity in PbTe Induced by Artificially Generated Pores. Advances in Condensed Matter Physics. Vol. 2015, pp. 1-6. DOI: 10.1155/2015/496739
- [12] Dughaish, Z. H. (2002). Lead Telluride as a Thermoelectric Material for Thermoelectric Power Generation. Physica B: Condensed Matter. Vol. 322, Issue 1-2, pp. 205-223. DOI: 10.1016/S0921 -4526(02)01187-0
- Shatma, P., Dubey, A. K., and Pandey, A. K. (2014). Numerical Study of Remperature and Stress Fields in Laser Cutting of Aluminium Alloy Sheet. Procedia Materials Science. Vol. 5, pp. 1887-1896. DOI: 10.1016/j.mspro.2014.07.510
- [14] Kosky, P., Balmer, R., Keat, W., and Wise, G. (2013). Exploring Engineering. Academic Press
- [15] Hitesh, D. V., Santhanakrishnan, S., Harimkar, S. P., Sandra, K. S. B., and Dahotre, N. B. (2013).
   One-Dimensional Multipulse Laser Machining of Structural Alumina: Evolution of Surface Topography. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. Vol. 68, pp. 69-83. DOI: 10.1007/s00170-012-4709-8
- [16] Phae-ngam, W., Kosalathip, V., Kumpeerapun, T., Limsuwan, P., and Dauscher, A. (2011). Synthesis and Characterize of Bi<sub>0.6</sub>Sb<sub>1.4</sub>Te<sub>3</sub> Nano-particles from Long Pulsed Laser Ablation. Journal of Applied Sciences. Vol. 11, Issue 21, pp. 3625-3629. DOI: 10.3923/jas.2011.3625.3629
- [17] Linsen, S. and Guoquan, S.(2012). Temperature Field Simulation of Laser Drilling in ANSYS.
   Advances in Intelligent Systems Research. In Proceedings of the 1<sup>st</sup> International Conference
   on Mechanical Engineering and Material Science (MEMS 2012). DOI: 10.2991/mems.2012.139

# ผลของเถ้าลอยไม้ยางพาราต่อสภาพนำความร้อนของแผ่นซีเมนต์ไฟเบอร์ Effect of Rubberwood Fly Ash on Thermal Conductivity of Cement Fiber Board

จุฑามาศ ลักษณะกิจ<sup>1</sup> สมมาตร์ สวัสดิ<sup>1\*</sup> วิศิษฏ์ศักดิ์ ทับยัง<sup>1</sup> นันทชัย ชูศิลป์<sup>1</sup> ถาวร เกื้อสกูล<sup>1</sup> ทวีศักดิ์ ทองขวัญ<sup>1</sup> นพดล คงเพชร<sup>1</sup> ธีระวัฒน์ เพชรดี<sup>1</sup> และฐานวิทย์ แนมใส<sup>1</sup> Chuthamat Laksanakit<sup>1</sup> Sommart Swasdi<sup>1\*</sup> Wisitsak Tabyang<sup>1</sup> Nuntachai Chusilp<sup>1</sup> Tavorn Kuasakul<sup>1</sup> Taweesak Thongkun<sup>1</sup> Nopadon Kongphet<sup>1</sup> Theerawat Petchdee<sup>1</sup> and Thanwit Naemsai<sup>1</sup>

Received: October 15, 2023; Revised: November 23, 2023; Accepted: November 30, 2023

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของเถ้าไม้ยางพาราต่อสภาพนำความร้อนของแผ่นซีเมนต์ไฟเบอร์ ที่ทำจากซีเมนต์ เถ้าลอยไม้ยางพารา เยื่อกระคาษและเส้นใยต้นกล้วย โดยใช้เถ้าลอยไม้ยางพาราแทนที่ซีเมนต์ ในอัตราส่วนร้อยละ 0 5 10 15 และ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ใช้เส้นใยกระคาษและเส้นใยต้นกล้วยคงที่ ร้อยละ 46 และ 1 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ตามลำคับ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.6 ความหนา 10 mm อัดขึ้นรูปกึ่งแห้งด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกใช้แรงกด 25 Ton ผลการทดสอบพบว่า การเพิ่มขึ้น ของเถ้าลอยไม้ยางพาราทำให้สภาพการนำความร้อนลดลงและดูดซับเสียงได้ดีขึ้น แต่ไม่ทำให้ความหนาแน่น ความต้านทานแรงคัด และแรงดึงตั้งฉากผิวหน้าเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ อัตราส่วนที่มีค่าการนำความร้อน ดีที่สุดคือ อัตราส่วนที่ผสมเถ้าลอยไม้ยางพาราร้อยละ 20 มีค่าการนำความร้อน 0.620 W/mK ซึ่งสูงกว่า แผ่นเซลโลกรีตที่มีจำหน่ายทั่วไปเพียงร้อยละ 8

คำสำคัญ : เถ้าฉอยไม้ยางพารา; แผ่นซีเมนต์ไฟเบอร์; สภาพนำความร้อน; ความเป็นฉนวน

<sup>1</sup> คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya

<sup>\*</sup> Corresponding Author, Tel. 08 1898 8759, E - mail: sommart.s@rmutsv.ac.th

## Abstract

This research aimed to investigate the influence of rubberwood fly ash on the thermal conductivity of fiber cement sheets made from cement, rubberwood fly ash, paper pulp, and banana fibers. Rubberwood fly ash was used as a replacement for cement at percentages of 0 %, 5 %, 10 %, 15 %, and 20 % by weight of the binder, while the paper pulp and banana fibers were fixed at 46 % and 1 % by weight of the binder. The water-to-binder ratio (w/b) was set at 0.6, and the thickness of the sheets was 10 mm. The sheets were molded using a semi-dry process using a hydraulic pressing machine with a force of 25 tons. The results showed that increasing of the percentage of rubberwood fly ash reduced the thermal conductivity or increased thermal insulation and also improved sound absorption properties. However, it did not significantly affectted density, compressive strength, and tensile strength perpendicular to the surface. The optimal ratio for satisfactory thermal conductivity was a mixture with 20% rubberwood fly ash, which had a thermal conductivity of 0.620 W/mK, higher than the typical cellocrete sheets with only 8 %.

Keywords: Para Rubber Wood Fly Ash; Fiber Cement Sheet; Thermal Conductivity; Thermal Insulation

### บทน้ำ

แผ่นซีเมนต์ไฟเบอร์เป็นวัสดุก่อสร้างที่มีการใช้งานหลากหลายรูปแบบทั้งงานผนัง ฝ้าเพดาน และพื้น ส่วนผสมหลัก ที่ใช้ในการผลิตแผ่นซีเมนต์ไฟเบอร์คือ ซีเมนต์และเส้นใยธรรมชาติที่ได้จากพืช เช่น สน มะพร้าว และ/หรือ ้เส้นใยสังเคราะห์แล้วเอามาขึ้นรูป และนำไปอบไอน้ำโดยใช้แรงดันสงทำให้มีความแข็งแรง ทนน้ำ สามารถติดตั้งง่าย ้ต้นทุนหลักของแผ่นซีเมนต์ไฟเบอร์แปรผันตามปริมาณปูนซีเมนต์ หากมีการนำเถ้าลอยไม้ยางซึ่งเป็นเถ้าชีวมวล ประเภทหนึ่งและเป็นผลพลอยได้ (By Product) จากภาคอุตสาหกรรมมาแทนที่ปนซีเมนต์จะช่วยลดต้นทน ้ได้ทางหนึ่ง มีการศึกษาการนำเถ้าไม้ยางพารามาใช้แทนที่ปุ่นซีเมนต์ทั้งในงานซีเมนต์มอร์ต้าร์ [1] พบว่า การนำเถ้าไม้ยางพาราผสมกับผงพัมมิซทำให้มอร์ต้าร์มีกำลังอัดและความต้านทานไฟฟ้าสูงกว่ามอร์ต้าร์ควบคุม และหากเติมน้ำมันเครื่องใช้แล้วลงในส่วนผสมของมอร์ต้าร์ไม่เกินร้อยละ 0.2 จะเพิ่มความสามารถในการ ้ต้านทานไฟฟ้าจำเพาะสงขึ้น ทั้งนี้ต้องผสมเถ้าลอยไม้ยางพาราไม่เกินร้อยละ 20 [2] เมื่อนำเถ้าไม้ยางพารา มาประยุกต์กับผลิตภัณฑ์อิฐบล็อกประสาน ซึ่งได้ข้อสรุปว่า การเติมเถ้าไม้ยางพาราในส่วนผสมทำให้การดูด ้ซึมน้ำเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นและกำลังอัดลดลง แต่ทำให้อิฐมีสมบัติต้านทานความร้อนดีขึ้น และหากเพิ่มระยะเวลา บ่มนานขึ้นจะทำให้มีการพัฒนากำลังอัดได้สูงกว่า 4.5 MPa [3] - [6] ในกรณีที่นำเถ้าไม้ยางพารามาใช้กับ ผลิตภัณฑ์แผ่นกระเบื้องซีเมนต์ปพื้นพบว่า ถ้าแทนที่ปนซีเมนต์ด้วยเถ้าไม้ยางพาราขนาดเล็ก 5 - 10 µm ไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ จะทำให้กำลังอัดลดลงประมาณร้อยละ 10 [7] สำหรับการผสม เถ้าลอยไม้ยางพาราในผลิตภัณฑ์กระเบื้องเซรามิกมวลเบาพบว่า เถ้าลอยไม้ยางพารามีผลกระทบต่อกำลังอย่างมาก และแนะนำให้ผสมเถ้าลอยไม้ยางพาราไม่เกินร้อยละ 10 เพราะจะได้ส่วนผสมกระเบื้องเซรามิกมวลเบาที่มี ้สมบัติที่ดีเหมาะที่จะพัฒนาต่อไปในเชิงอุตสาหกรรมได้ [8] - [9] และสำหรับการผสมเถ้าลอยไม้ยางพารา ในงานคอนกรีตสำหรับชิ้นส่วนโครงสร้างสำเร็จรป [10] คอนกรีตบล็อกประสานปพื้น [11] คอนกรีตมวลเบา [12] พบผลลัพธ์ในทิศทางเดียวกัน คือ เมื่อปริมาณเถ้าไม้ยางพาราเพิ่มขึ้นกำลังอัดลดลง แต่ถ้าผสมเถ้าไม้ยางพารา ้ไม่เกินร้อยละ 20 ของน้ำหนักวัสดประสานและใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดประสานไม่เกิน 0.55 คอนกรีตจะยัง รับกำลังได้ตามเกณฑ์ มยผ. 1101-64 สำหรับคอนกรีตโครงสร้างทั่วไป ค.1 ซึ่งกำหนดให้กำลังรับแรงอัดได้ ไม่น้อยกว่า 150 ksc เกณฑ์มอก. 827-2531 สำหรับคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น และมอก. 2035-2543 สำหรับ คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นสำหรับงานหนัก ซึ่งกำหนดให้กำลังรับแรงอัดของเฉลี่ยได้ไม่น้อยกว่า 40 MPa และ 40 MPa

ไม่เพียงแต่การใช้เถ้าไม้ยางพาราในงานมอร์ต้าร์และงานคอนกรีตยังมีการนำเถ้าไม้ยางมาใช้ในการ ปรับปรุงคุณภาพของดินลูกรัง เพราะเถ้าไม้ยางพารามีปริมาณ CaO สูงจึงมีศักยภาพในการเป็นวัสดุประสานได้ [13] แต่หากนำมาใช้กับงานดินซีเมนต์ในรูปแบบของอิฐบล็อกประสานพบว่า การเติมเถ้าไม้ยางพาราจะทำให้อิฐ มีรูพรุนและต้านทานความร้อนได้สูงขึ้น [4] นอกจากนี้ยังมีการใช้เถ้าไม้ยางพาราบดผสมในพลาสติกชีวภาพ เพราะช่วยเพิ่มการยึดเกาะและปรับปรุงเสถียรภาพทางความร้อนของพลาสติกชีวภาพได้ [14] หรือผสมในวัสดุ เชิงประกอบชีวภาพในปริมาณไม่เกินร้อยละ 20 ทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงขึ้น แต่ระยะยึด ณ จุดขาดลดลง เพราะเถ้าไม้ยางพารามีความเป็นกรดด่างสูงซึ่งมีอิทธิพลต่อการเพิ่มขึ้นของการเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่ โปรตีนของกูลเต็นข้าวสาลี ซึ่งทำให้วัสดุเชิงประกอบชีวภาพแข็งแรงขึ้นแต่ยึดหยุ่นน้อยลง [15]

จากวิจัยที่ผ่านมาได้ข้อสรุปว่า เถ้าไม้ยางพารามีส่วนช่วยทำให้คุณสมบัติเชิงความร้อนของผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ดีขึ้น ขณะที่งานวิจัยที่มีการนำเถ้าลอยไม้ยางพารามาเป็นส่วนผสมของผลิตภัณฑ์แผ่นฉนวนยังมีอยู่อย่างจำกัด [16] ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะนำเถ้าลอยไม้ยางพารามาผลิตซีเมนต์ไฟเบอร์ที่มีความเป็นฉนวน โดยนำมาผสม กับเส้นใยกล้วยซึ่งเป็นของเหลือทิ้งจากภาคเกษตร และเส้นกระดาษซึ่งเป็นขยะสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ และมีจำนวนมากที่สุด (ร้อยละ 19) ของขยะที่เกิดขึ้นทั่วประเทศ หรือประมาณ 2.47 ล้านตัน [17] การนำขยะ จากกระดาษซึ่งเป็นเส้นใยจากพืชมาใช้ซ้ำก่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดทั้งในทางเศรษฐกิจ สิ่งแวคล้อม และทรัพยากร ธรรมชาติ

# วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ

้วัสดที่ใช้ในการวิจัยประกอบด้วย ซีเมนต์ไฮดรอลิกชนิดใช้งานทั่วไป เถ้าลอยไม้ยางพารา ซึ่งทำหน้าที่เป็นวัสดประสาน เถ้าลอยไม้ยางพาราของการศึกษานี้ได้จากเตาเผาของกระบวนการผลิตไม้อัดเทียมของบริษัท พาเนล พลัส จำกัด อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF) พบว่า มีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO<sub>2</sub>) และโพแทสเซียมออกไซด์ (K<sub>2</sub>O) เป็นองค์ประกอบ ทางเคมีเป็นหลักร้อยละ 31.9 23.0 และ 10.4 ตามลำดับ โดยมีการสญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) ร้อยละ 7.7 เส้นใยจากต้นกล้วยน้ำว้าสกัดแยกเส้นใยด้วยวิธีเชิงกลโดยนำลำต้นกล้วยมาตัดให้ยาวประมาณ 50 cm จากนั้นลอกออกให้เป็นกาบกล้วย แล้วนำไปตีเพื่อให้เยื่อเซลลูโลสหลุดออกเหลือเฉพาะเส้นใยด้วย ้เครื่องตีเส้นใย วิธีนี้ทำให้เส้นใยถูกรบกวนและฉีกขาดน้อยที่สุด นำไปตากแดดให้แห้งสนิทและตัดให้ได้ ความยาวประมาณ 50 mm กระดาษรีไซเคิล 60 - 80 gram ชั่งน้ำหนักตามอัตราส่วนที่ออกแบบไว้ แช่น้ำที่ชั่งน้ำหนักแล้วไม่น้อยกว่า 24 ชั่วโมง แล้วปั่นให้ละเอียดด้วยเครื่องปั่นผสมสี บีบน้ำออกให้เป็นเส้นใย ้กระดาษแบบหมาด (ชั่งน้ำหนักน้ำที่บีบออกตามอัตราส่วนที่ออกแบบไว้) ปริมาณน้ำที่คงเหลือในเส้นใยกระดาษ เทียบเท่ากับปริมาณน้ำของอัตราส่วนผสม จากนั้นนำมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ดังรูปที่ 1 อัตราส่วนผสม ของแผ่นซีเมนต์ไฟเบอร์แสดงในตารางที่ 1 โดยใช้เถ้าลอยไม้ยางพาราแทนที่ปุ่นซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 0 5 10 15 และ 20 โดยน้ำหนักของวัสดประสาน กำหนดให้เป็นตัวแปรต้น ใช้เส้นใยกระดาษและเส้นใยต้นกล้วย ้คงที่ร้อยละ 46 และ 1 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน กำหนดให้เป็นตัวแปรควบคุม โดยมีสภาพนำความร้อน ้สมบัติเชิงกล และสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงของแผ่นซีเมนต์ไฟเบอร์เป็นตัวแปรตาม



(ข) เถ้าลอยไม้ยางพารา



(ค) เส้นใยกระดาษแบบหมาด



(ก) ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก

ชนิดใช้งานทั่วไป

(ง) เครื่องตีเส้นใยกล้วย



(จ) ตากเส้นใยกล้วย



(ฉ) เส้นใยกล้วยสกัดด้วยวิธีทางกล

# รูปที่ 1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้งานวิจัย

	2	1		1	a	σγI	, ,
ตารางท 1	อตร	าสวนผ	เสมขอ	างแผง	างเบ	านตโ	ฟเบอร
	0						

ความหนา	รหัส	w/b	ซีเมนต์	เถ้าลอยไม้	เส้นใยกระดาษแบบหมาด	เส้นใยต้นกล้วย
(mm)			(g)	ยางพารา (g)	(g)	(g)
10	FA00*	0.6	1000	0	460	10
10	FA05	0.6	950	50	460	10
10	FA10	0.6	900	100	460	10
10	FA15	0.6	850	150	460	10
10	FA20	0.6	800	200	460	10

\* อัตราส่วนควบคุม

การขึ้นรูปแผ่นซีเมนต์ไฟเบอร์แบบกึ่งแห้งเริ่มจาก (1) ผสมปูนซีเมนต์และเถ้าลอยไม้ยางพาราให้เข้ากัน จากนั้นใส่เส้นใยกระดาษแบบทมาดลงในภาชนะผสม คลุกส่วนผสมให้เข้ากัน จากนั้นใส่เส้นใยกล้วยและทำการผสม ให้เข้ากันให้เส้นใยกล้วยกระจายตัวให้ทั่ว (2) - (3) ทาน้ำมันในแบบหล่อก่อนจะนำส่วนผสมเทลงในแบบหล่อ จากนั้นใส่แผ่นอะคริลิคและฟิล์มถนอมอาทารเพื่อไม่ให้แผ่นซีเมนต์ไฟเบอร์เกาะติดแบบหล่อ (4) นำส่วนผสม เทลงในแบบหล่อแล้วเกลี่ยส่วนผสมให้ได้ความหนาสม่ำเสมอกันทั่วทั้งแบบหล่อ ปิดทับส่วนผสมด้วย ฟิล์มถนอมอาทารและแผ่นอะคริลิค (5) กดส่วนผสมด้วยแรง 25 Ton ค้างไว้เป็นเวลา 10 นาที (6) นำแบบ หล่อขิ้นบนและแผ่นอะคริลิคออก นำแผ่นซีเมนต์ไฟเบอร์ออกจากแม่พิมพ์ โดยวางบนแผ่นไม้หรือพลาสติกที่มี ขนาดใหญ่กว่าเพื่อป้องกันไม่ให้ชิ้นตัวอย่างแตกหัก บ่มในอากาศ 28 วัน โดยการห่อด้วยฟิล์มถนอมอาหาร เพื่อป้องกันมิให้เกิดการสูญเสียน้ำอย่างกระทันหัน ซึ่งจะทำให้เกิดรอยแตกร้าวที่ผิวได้ ดังรูปที่ 2



(ค) ปูฟิล์มถนอมอาหาร เพื่อไม่ให้ส่วนผสม ติดแบบหล่อ



(ข) ทาน้ำมันที่แบบหล่อ แล้ววางแผ่นอะคริลิค



(ก) ผสมปูนซีเมนต์
 เถ้าลอยไม้ยางพารา
 เส้นใยกระดาษและ
 เส้นใยกล้วยให้เข้ากัน



(ง) เทส่วนผสมลงในแบบหล่อ
 แล้วเกลี่ยให้มีความหนาสม่ำเสมอ
 รูปที่ 2 การขึ้นรูปแผ่นไฟเบอร์ซีเมนต์



(จ) กดขึ้นรูปด้วยแรง 25 Ton แล้วนำไปบ่มในอากาศ



(ฉ) แผ่นซีเมนต์ไฟเบอร์ที่ขึ้นรูป

การทดสอบสมบัติของแผ่นซีเมนต์ไฟเบอร์ ได้แก่ ความหนาแน่น ความชื้น การพองตัวเมื่อแช่น้ำ ความต้านแรงดัด (แรงดัดแบบ 3 จุด) และความต้านแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า ตามมาตรฐาน มอก. 878-2537 ใช้เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ขนาด 2 kN และขนาด 40 kN ทดสอบสภาพนำความร้อนตามมาตรฐาน ASTM D5470 และทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียง ตามมาตรฐาน ISO 10534-2 ด้วยเครื่องทดสอบการทดสอบ ค่าการดูดกลืนคลื่นเสียงของวัสดุ (Acoustic Testing Material) แบบหลอดอิมพีแดนซ์ยี่ห้อ Bruel & Kjaer รุ่น 7740 ช่วงความถี่ 250 - 2000 Hz. ดังรูปที่ 3



(ข) เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ ขนาด 40 kN ทดสอบแรงดึงตั้งฉากผิวหน้า



(ก) เครื่องทดสอบอเนกประสงค์
 ขนาด 2 kN ทดสอบแรงดัด



(ค) เครื่องทดสอบสภาพการนำความร้อน



(ง) เครื่องทดสอบสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียง รูปที่ 3 เครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล เชิงความร้อน และสมบัติทางเสียงของแผ่นซีเมนต์ไฟเบอร์

# ผลการวิจัยและการอภิปราย

1. ความหนาแน่น ความขึ้น และการพองตัวเมื่อแช่น้ำ

ความหนาแน่นของแผ่นซีเมนต์ไฟเบอร์ของการศึกษานี้มีค่าระหว่าง 1372 - 1414 kg/m<sup>3</sup> เมื่อเปรียบเทียบ กับมาตรฐาน มอก. 878-2537 ซึ่งกำหนดความหนาแน่นของแผ่นขิ้นไม้อัดซีเมนต์: ความหนาแน่นสูง หรือ แผ่นซีเมนต์ไฟเบอร์ไว้ระหว่าง 1100 - 1300 kg/m<sup>3</sup> จากรูปที่ 4(ก) พบว่า แผ่นซีเมนต์ไฟเบอร์ทุกอัตราส่วน ผสมมีความหนาแน่นสูงกว่าเกณฑ์ และสูงกว่าความหนาแน่นของแผ่นฉนวนจากเถ้าไม้ยางพาราของ [16] ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.16 g/cm<sup>3</sup> แผ่นฉนวนผสมเถ้าแกลบของ [18] ซึ่งมีค่าระหว่าง 0.015 - 0.170 g/cm<sup>3</sup> แผ่นไฟเบอร์ซีเมนต์ของ [19] ซึ่งมีค่าระทว่าง 0.49 - 0.122 g/cm<sup>3</sup> แผ่นฝ้าเพดานผสมขุยมะพร้าวของ [20] ซึ่งมีค่าระทว่าง 881.02 - 1064.2 kg/m<sup>3</sup> แผ่นยิปซัมบอร์ดจากผักตบชวาของ [21] ซึ่งมีค่าระทว่าง 861.45 - 907.52 g/cm<sup>3</sup> โดยทุกอัตราส่วนผสมมีค่าความทนาแน่นต่ำกว่าอัตราส่วนควบคุม FA00 แต่ไม่ลดลง ตามร้อยละของเถ้าลอยไม้ยางพาราที่เพิ่มขึ้น เพราะเถ้าลอยไม้ยางพาราซึ่งมีค่าความถ่วงจำเพาะ 2.53 เมื่อถูกนำมา แทนที่ปุ่นซีเมนต์ซึ่งมีค่าความถ่วงจำเพาะ 3.15 ในปริมาณไม่เกินร้อยละ 20 ผลรวมของมวลของวัสดุประสาน ต่อหน่วยความถ่วงจำเพาะจึงแตกต่างกันเล็กน้อยไม่เกินร้อยละ 5 เถ้าลอยไม้ยางพาราจึงไม่ทำให้ความทนาแน่น เปลี่ยนแปลง สำหรับความซื้นของแผ่นซีเมนต์ไฟเบอร์ มีค่าระทว่างร้อยละ 9 - 13 (รูปที่ 3(ข)) เป็นไปตามเกณฑ์ มอก. 878-2537 ส่วนการพองตัวเมื่อแซ่น้ำ (รูปที่ 3(ค)) มีค่าระทว่างร้อยละ 3.87 - 14.54 ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์ มอก. 878-2537 ทุกอัตราส่วนผสม และสูงกว่าแผ่นฉนวนของ [16] ซึ่งมีค่าระหว่างร้อยละ 0.69 - 0.91 การที่แผ่นซีเมนต์ไฟเบอร์ ของการศึกษานี้มีค่าการพองตัวเมื่อแซ่น้ำร้อยละ 1.07 และแผ่นซีเมนต์ไปเบอร์จดผสมเส้นใยจากกล่องเครื่องตื่มและเถ้ากากส่าของ [22] ซึ่งมีค่าระหว่างร้อยละ 0.69 - 0.91 การที่แผ่นซีเมนต์ไปเบอร์ของการศึกษานี้มีค่าการพองตัวเมื่อเพี่น้ำการพองตัวเมื่อแซ่น้้าร้อยละ 1.07 และแผ่นซีเมนต์ไปเบอร์จดผสมเส้นใยจากกล่องเครื่องดื่มและเถ้ากากส่าของ [22] ซึ่งมีค่าระหว่างร้อยละ 0.69 - 0.91 การที่แผ่นซิเมนต์ไฟเบอร์ของการศึกษานี้มีค่าการพองตัวเมื่อแซ่น้ำลูงอาจเพราะเส้นใยกระดาษในส่วนผสม ยังจับตัวเป็นก้อนกระจายอยู่ทั่วแผ่นไม่เป็นเนื้อเดียวกันกับวัสดุประสาน ดังรูปที่ 5 เมื่อนำไปแซ่น้ำก้อนเส้นใย กระดาษงเถ้าไม่เล้านาจึงเนินกับสุดที่น้ำและความซื้นลูกเก้บกักไว้ได้จำนวนมากทำให้เกิดการพองตัวสูง สรุปได้ว่า ร้อยละของ เถ้าลอยไม้ยางพาราไม่แม่ไม่เป็นมูดกูกก็บากไว้ได้จำนวนมากทำให้เกิดการพองตัวสูง สรุปได้ว่า ร้อยละของ เถ้าลอยไม้อางพาราไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความหนานนางกับการพองตัวเมื่อแซ่น้ำล้า



(ข) ความชื้น รูปที่ 4 ความหนาแน่น ความชื้น และการพองตัวเมื่อแช่น้ำของแผ่นซีเมนต์ไฟเบอร์



(ค) การพองตัวเมื่อแซ่น้ำ รูปที่ 4 ความหนาแน่น ความซึ้น และการพองตัวเมื่อแซ่น้ำของแผ่นซีเมนต์ไฟเบอร์ (ต่อ)



รูปที่ 5 ภาพขยายของแผ่นซีเมนต์ไฟเบอร์

### 2. สมบัติเชิงกลของแผ่นซีเมนต์ไฟเบอร์

การทดสอบสมบัติเขิงกลของแผ่นซีเมนต์ไฟเบอร์ของการศึกษานี้ประกอบด้วย ความด้านแรงดัด มอดูลัสยึดทยุ่น และความต้านแรงดึงตั้งฉากกับผิวทน้า ดังรูปที่ 6(ก) – (ค) ผลการทดสอบพบว่า ความต้านแรงดัด ของแผ่นซีเมนต์ไฟเบอร์ผสมเถ้าลอยไม้ยางพารามีค่าระหว่าง 1.10 – 1.21 MPa ซึ่งต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน มอก. 878-2532 และเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C1186-02 อย่างมาก เช่นเดียวกับมอดูลัสยึดทยุ่นซึ่งมีค่าระหว่าง 433 – 3415 MPa ค่ามอดูลัสยึดทยุ่นของแผ่นซีเมนต์ไฟเบอร์ของการศึกษานี้ต่ำกว่าแผ่นฉนวนผนังเบาจาก เส้นใยชานอ้อยซึ่งใช้กาวสังเคราะห์ไอโซไซยาเนตเรซินและกาวพอลิแลกติกแอซิดเป็นสารยึดติด [23] และ ความต้านแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้าซึ่งมีค่าระหว่าง 0.10 – 0.17 MPa ซึ่งต่ำกว่าเกณฑ์อย่างมากเช่นกัน โดยปริมาณเถ้าลอยไม้ยางพาราที่เพิ่มขึ้นในอัตราส่วนผสมไม่ส่งผลต่อการพัฒนากำลังดัดและแรงดึงตั้งฉากกับ ผิวทน้าของแผ่นซีเมนต์ไฟเบอร์ ขณะที่มอดูลัสยึดทยุ่นของแผ่นซีเมนต์ไฟเบอร์ผสมเถ้าลอยไม้ยางพารา แสดงแนวโน้มความเปลี่ยนแปลงได้ชัดเจน (รูปที่ 6(ค)) กล่าวคือ เมื่อรับแรงกดเท่ากันค่าหนึ่ง อัตราส่วนผสม ควบคุม (FA00) แอ่นตัวน้อยหรือยืดทยุ่นได้น้อยกว่าอัตราส่วนที่ผสมเถ้าไม้ยางพารา โดยอัตราส่วนผสมที่มี เถ้าลอยไม้ยางพาราร้อยละ 5 มีค่าการแอ่นตัวมากที่สุด มอดูลัสยืดหยุ่นของอัตราส่วนที่ผสมเถ้าลอยไม้ยางพารา ร้อยละ 10 มีค่าสูงสุดที่ 2584 MPa และลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อร้อยละของเถ้าลอยไม้ยางเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่า เถ้าลอยไม้ยางพารามีผลต่อค่ามอดูลัสยึดทยุ่นของแผ่นซีเมนต์ไฟเบอร์ โดยลักษณะการวิบัติของแผ่นซีเมนต์ ใฟเบอร์นี้เป็นการวิบัติแบบแตกทักออกจากกันตามลักษณะของวัสดุเปราะดังรูปที่ 7 การที่แผ่นซีเมนต์ไฟเบอร์ มีสมบัติเชิงกลต่ำกว่าเกณฑ์อย่างมากอาจเพราะการขึ้นรูปแบบกึ่งแท้งทำใท้แผ่นซีเมนต์ไฟเบอร์ไม่เป็น เนื้อเดียวกัน (รูปที่ 2 และ 5) จึงเป็นจุดอ่อนและทำให้มีความแข็งแรงต่ำ



รูปที่ 6 สมบัติเชิงกลของแผ่นซีเมนต์ไฟเบอร์

วารสารงานวิจัยด้านวิทยาศาสตร์สมัยใหม่ และการใช้ประโยชน์นวัตกรรมเทคโนโลยี ปีที่ 16 ฉบับที่ 3 (กันยายน - ธันวาคม 2566) Research on Modern science and Utilizing Technological Innovation Journal (RMUTI Journal) Vol. 16, No. 3, (September - December 2023)









(ก) การวิบัติจากการทดสอบความต้านทานแรงดัด



(ข) การวิบัติจากการทดสอบแรงดึงตั้งฉากผิวหน้า



#### 3. สภาพการนำความร้อน

การทดสอบสภาพการนำความร้อนทรือแทนด้วยสัญลักษณ์ K ของแผ่นซีเมนต์ไฟเบอร์ผสม เถ้าลอยไม้ยางพารา ดังรูปที่ 8 พบว่า มีค่าสภาพการนำความร้อนระหว่าง 0.620 – 0.772  $W/m \cdot K$ โดยอัตราส่วนที่มีค่าการนำความร้อนต่ำสุดคือ FA20 เห็นได้ชัดว่าค่าการนำความร้อนมีค่าลดลงเมื่อร้อยละ ของเถ้าลอยไม้ยางพาราเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับค่าการนำความร้อนของแผ่นเซลโลกรีตโฟมความหนา 12 mm พบว่า แผ่นซีเมนต์ไฟเบอร์ FA20 มีค่าสูงกว่าประมาณร้อยละ 8 และสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐาน มอก. 878-2532 แต่มีค่าความเป็นฉนวนสูงกว่าแผ่นฝ้าเพดานของ [24] อย่างไรก็ตาม ค่าที่ได้ยังสูงกว่าค่าของฉนวนกันความร้อน จากพืชในเขตท้องถิ่น คือ เส้นใยหญ้า ใยมะพร้าว กากกล้วย ฟางข้าว และกาบหมากของ [25] ซึ่งใช้ปริมาณ เส้นใยร้อยละ 60 (K = 0.017 – 0.028  $W/m \cdot K$ ) และแผ่นฉนวนจากเถ้าไม้ยางพาราของ [16] ซึ่งใช้กาวผง (กาวแดง) เป็นสารยึดเกาะมีค่า K เท่ากับ 0.44  $W/m \cdot K$  กล่าวได้ว่า สภาพนำความร้อนของแผ่นซีเมนต์ ไฟเบอร์แปรผกผันกับเถ้าลอยไม้ยางพาราดังเช่นที่ [26] ได้ให้ข้อสังเกตไว้ก่อนทน้านี้ เพราะเถ้าลอยไม้ยางพารา มีแคลเซียมออกไซค์เป็นองค์ประกอบหลักซึ่งมีความไวต่อความซื้นและดูดซับน้ำจากอากาศได้ง่ายจึงทำให้ ค่าสภาพนำความร้อนต่ำ และจากการทดสอบทางสถิติพบว่า สภาพนำความร้อนของแผ่นซีเมนต์ไฟเบอร์ของ การศึกษานี้และของเซลโลกรีตไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ 0.05 (p-value = 0.37)

### 4. สัมประสิทธิ์การดูดซับเสียง

การทดสอบการดูดซับเสียงตามมาตรฐาน ISO 10534-2 ได้ผลดังตารางที่ 3 และรูปที่ 9 พบว่า สัมประสิทธิ์การดดซับเสียง (Sound Absorption Coefficient, SAC) ของแผ่นซีเมนต์ไฟเบอร์ของการศึกษานี้ มีค่าเฉลี่ยระหว่างร้อยละ 16.244 - 22.442 ซึ่งเพิ่มขึ้นตามร้อยละของเถ้าลอยไม้ยางพารา ยกเว้นอัตราส่วนผสม ที่มีปริมาณเถ้าลอยไม้ยางพาราร้อยละ 20 เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงในช่วงความถี่ในย่านมิคโลว (250 - 500 Hz) เห็นได้ชัดว่า การดูดซับเสียงของแผ่นซีเมนต์ไฟเบอร์แต่ละอัตราส่วนมีค่าไม่แตกต่างกัน แต่ที่ความถี่ย่านกลาง (500 - 2000 Hz) การดุดซับเสียงของแผ่นซีเมนต์ไฟเบอร์เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องแต่ไม่แปรผัน ้ตามร้อยละของเถ้าลอยไม้ยางพาราที่เพิ่มขึ้น ยกเว้นแผ่นซีเมนต์ไฟเบอร์ที่มีปริมาณเถ้าลอยร้อยละ 20 อาจกล่าวได้ว่า ค่า SAC มีแนวโน้มผันผวน เมื่อพิจารณาที่ย่านความถี่ 1000 และ 2000 Hz แผ่นซีเมนต์ไฟเบอร์ ที่มีปริมาณเถ้าลอยร้อยละ 15 และร้อยละ 20 มีค่าสัมประสิทธิ์ดูคซับเสียงสูงสุดเท่ากับ 0.375 และ 0.474 ้แต่มีค่าต่ำกว่าวัสดุฉนวนที่ทำจากฟางข้าวสาลี แกลบ และขี้เลื่อย ที่ขึ้นรูปด้วยจีโอพอลิเมอร์ของ [27] ้ซึ่งมีค่า SAC สูงสุดระหว่าง 0.56 - 0.71 อาจเนื่องจากเถ้าลอยไม้ยางพารามีรูพรุนกระจายตัวอยู่ประปราย ้ไม่ต่อเนื่อง และไม่สม่ำเสมอ ดังรูปที่ 10 ซึ่งต่างจากฟางข้าวสาลีที่มีรูพรุนจำนวนมากและมีความสม่ำเสมอกว่า เถ้าลอยไม้ยางพารา นอกจากนี้พบว่า ที่ย่านความถี่สูงกว่า 2000 Hz ค่าสูงสุดของ SAC ของ FA00 FA05 FA10 FA15 และ FA20 มีค่าประมาณ 0.830 0.805 0.730 0.608 และ 0.495 ตามลำดับ ซึ่งลดลงเมื่อปริมาณ ้เถ้าลอยไม้ยางพาราเพิ่มขึ้น โดยภาพรวมแผ่นซีเมนต์ไฟเบอร์ที่ผสมเถ้าลอยไม้ยางพาราร้อยละ 15 ดูดซับเสียง ได้ดีที่สุด อย่างไรก็ตามค่าการดูดซับเสียงเฉลี่ยยังค่อนข้างต่ำ ยังไม่ผ่านเกณฑ์การนำไปใช้เป็นวัสดุดูดซับเสียง ้ซึ่งจะต้องมีค่าสัมประสิทธิ์การลดเสียง (Noise Reduction Coefficient, NRC) ไม่น้อยกว่า 0.40 แต่มีข้อบ่งชื่ ้เบื้องต้นว่า เถ้าลอยไม้ยางพารามีผลทำให้การดูดซับเสียงในความถี่ย่านกลางของแผ่นซีเมนต์ไฟเบอร์ดีขึ้น



รูปที่ 9 ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงของแผ่นซีเมนต์ไฟเบอร์



(ข) ย่านความถี่ 250 - 2000 Hz รูปที่ 9 ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงของแผ่นซีเมนต์ไฟเบอร์ (ต่อ)



รูปที่ 10 ภาพขยายของเถ้าลอยไม้ยางพารา

อัตราสาาเมสน		NDC				
ยพวาด านคดม	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	ค่าเฉลี่ย	NKU
FA00	3.109	7.655	24.520	29.693	16.244	0.16244
FA05	4.292	9.084	23.977	40.717	19.518	0.19518
FA10	4.391	9.448	34.269	38.291	21.600	0.21600
FA15	4.033	9.142	37.524	39.070	22.442	0.22442
FA20	4.008	7.171	18.420	47.365	19.241	0.19241

ตารางที่ 3 สัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงและสัมประสิทธิ์การลดเสียง

## บทสรุป

การผลิตและทดสอบสมบัติของแผ่นซีเมนต์ไฟเบอร์ที่มีเถ้าลอยไม้ยางพาราเป็นส่วนผสม ซึ่งผลการวิจัยพบว่า เถ้าลอยไม้ยางพาราที่มีแคลเซียมออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลักจึงไม่จัดเป็นวัสดุปอซโซลานเช่นเดียวกับซีเมนต์ การแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยไม้ยางพาราจึงทำให้แผ่นซีเมนต์ไฟเบอร์มีความแข็งแรงลดลงเมื่อปริมาณ เถ้าลอยเพิ่มขึ้น แต่เถ้าลอยไม้ยางมีผลต่อการลดลงของสภาพการนำความร้อน ซึ่งหมายถึงมีความเป็นฉนวน ดีขึ้นนั่นเอง จากผลการศึกษานี้เป็นข้อพิสูจน์เบื้องต้นว่าเถ้าลอยไม้ยางพาราเหมาะสำหรับเป็นส่วนผสมของ ผลิตภัณฑ์ป้องกันความร้อน จึงมีการศึกษาปริมาณหรือรูปแบบของเถ้าลอยไม้ยางพาราที่จะเพิ่มประสิทธิภาพ การป้องกันความร้อน ขณะที่การดูดซับเสียงของแผ่นซีเมนต์ไฟเบอร์ผสมเถ้าลอยไม้ยางพาราที่จะเพิ่มประสิทธิภาพ เว้านกลางแสดงแนวโน้มแบบผันผวนแต่มีค่าสูงกว่าอัตราส่วนควบคุม ทั้งนี้มีข้อสังเกตุว่า การขึ้นรูปแบบกึ่งแห้ง เป็นวิธีที่ควรหลีกเลี่ยง เพราะเมื่อวัสดุประสานแข็งตัวและเคลือบเส้นใยกระดาษที่ยังจับตัวเป็นก้อน ทำให้แผ่น ซีเมนต์ไฟเบอร์ไม่เป็นเนื้อเดียวกันถึงแม้จะมีความหนาแน่นสูงแต่มีความเปราะคล้ายกับคุกกี้

## กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ที่สนับสนุนทุน โครงการวิจัยประเภททุนงบประมาณเงินรายได้ ประจำปี พ.ศ. 2565

# References

- [1] Tonnayopas, D. and Yiamyokkun, J. (2005). Pumice Powder and Rubber Wood Ash Use as Cement Additives on the Physical and Mechanical Characteristics of Mortar. In Proceedings of The 4<sup>th</sup> PSU-Engineering Conference. pp.MnE-7-12 (in Thai)
- [2] Tonnayopas, D. and Thanomsirisilp, M. (2018). Effects of Used Engine Oil on Properties of Mortar Containing Pumice Blended Para Rubber Wood Ash. RMUTP Research Journal. Vol. 12, No. 1, pp. 53-63 (in Thai)
- [3] Dasaesamoh, A., Maming, J., Radeang, N., and Awae, Y. (2011). Physical Properties and Mechanical Properties of Para Rubber Wood Fly Ash Brick. Journal of Yala Rajabhat University. Vol. 6, No. 1, pp. 25-35 (in Thai)
- [4] Dasaesamoh, A., Awae, S., Mama, A., and Binmama, D. (2012). Thermal Performance of Para Rubber Wood Ash Brick. RMUTTO RESEARCH JOURNAL. Vol. 5, No. 1, pp. 72-80 (in Thai)
- [5] Dasaesamoh, A., Maha, H., and Chebueraheng, H. (2014). Properties of Interlocking Block form Para Rubber Wood Fly Ash Mixed Narathiwat Kaolin. Journal of Research Unit on Science, Technology and Environment for Learning. Vol. 5, No. 2, pp. 202-208 (in Thai)
- [6] Thanpattranon, P. and Lekrungroenggid, N. (2020). Agricultural Waste Recycling by Using Para-wood Ash as Composite Material for Interlocking Block. Thai Society of Agricultural Engineering Journal. Vol. 26, No. 2, pp. 47-52 (in Thai)
- [7] Boonyaroj, V. and Saramanus, S. (2019). Utilization of Para Wood Ash in a Prototype of Flat Sheet Cement Composites. In Proceeding of International Conference on Power, Energy and Innovation (ICPEI 2019). pp. 114-117
- [8] Tonnayopas, D., Sinsorn, W., and Chantaramanee, S. (2012). Preparation of Lightweight Tile by Ceramic Glove Mould Waste Blended Rubber Wood Fly Ash and Kaolin Tailing. Thaksin University Journal. Vol. 15, No. 3, Special Issue, pp. 250-258 (in Thai)
- [9] Tonnayopas, D., Kooptarnon, K., Panritdam, H., and Chantaramanee, S. (2014). Novel Lightweight Ceramic Tile Made from Kaolin Refining Waste and Para Rubber Wood Fly Ash. Industrial Technology Lampang Rajabhat University Journal. Vol. 7, No. 1, pp. 70-82 (in Thai)

- [10] Thongkhwan, T., Chusilp, N., and Laksanakit, C. (2022). The Strength of Concrete with Rubber Wood Ash for Prefabricated Structure. In Proceeding of The 27<sup>th</sup> National Convention on Civil Engineering. MAT09-1-7 (in Thai)
- [11] Klathae, T., Sornpakdee, N., Buathongkhue, C., and Deedard, N. (2020). Utilization of Parawood Ash in Concrete Paving Blocks. **RMUTSV Research Journal**. Vol. 12, No. 1, pp. 36-48 (in Thai)
- [12] Hawa, A. (2008). Properties of Pumice Lightweight Concrete Containing Rubber Wood Fly Ash and Rice Husk Ash. M.S. Engineering. Department of Civil Engineering. Faculty of Engineering. Thesis Prince of Songkla University (in Thai)
- Bamrungphon, Y., Tiyasaengthong, S., Suksiripattanapong, C., Tabyang, W., Chusilp, N., and Laksanakit, C. (2022). Improvement of Lateritic Soil by Using Biomass Ash Geopolymer. In Proceeding of The 27<sup>th</sup> National Convention on Civil Engineering. GTE40-1-5 (in Thai)
- [14] Sundum, T. and Kaewtatip, K. (2017). Effect of Wheat Gluten and Milled Rubber Wood Fly Ash on the Properties of Starch-based Bioplastics. The Journal of Industrial Technology: Suan Sunandha Rajabhat University. Vol. 5, No. 2, pp. 29-37 (in Thai)
- [15] Bootklad, M. Szecsenyi, K. M., and Kaewtatip, K. (2015). Structure and Properties of Wheat Gluten/Rubber Wood Ash Biocomposites. The Journal of Industrial Technology: Suan Sunandha Rajabhat University. Vol. 18, No. 3, pp. 49-55
- [16] Deetriphet, R., Radeng, S., Vani, P., and Dasaesamon, A. (2012). Insulation Board from Para Rubber Wood Fly Ash Reinforced by Mineral Fiber. Journal of Research Unit on Science, Technology and Environment for Learning. Vol. 3, No. 1, pp. 37-41 (in Thai)
- [17] Media Center for Development Foundation. (2012). Paper for Trees Project. Access (2 April 2021). Available (https://urbancreature.co/save-papers-save-trees/)
- [18] Tok, R., Maae, E., and Dearamae, R. (2021). Development of Insulation from Nano-composite Materials from Rice Husk Ash and Carbon of Hermit Flowers. Journal of Physics and General Science. Vol. 5, No. 1, pp. 43-53 (in Thai)
- [19] Laksanakit, C. and Chusilp, N. (2019). Effect of Natural Fibers from Waste Materials on Properties of Cement Fibers Ceiling Boards. Engineering Journal of Research and Development. Vol. 30, No. 4, pp. 7-17 (in Thai)
- [20] Weeranukul, P., Suweero, K., and Weeranukul, I. (2018). Coconut Coir Ceiling Board Product with Thermal Insulation Property. Journal of Engineering, RMUTT. Vol. 16, No. 2, pp. 129-138 (in Thai)
- Boontositrakul, K., Weeranukul, P., Deepanya, W., and Suweero, K. (2021). Development of Water Hyacinth Gypsum Broad for Community Enterprise. Journal of Engineering, RMUTT. Vol. 19, No. 1, pp. 113-123 (in Thai)
- [22] Paoleng, P. and Meepon, I. (2023). The Development of Cement-bonded Composite Board from Aseptic Carton Waste with Distillery Slop. Engineering Journal of Research and Development. Vol. 34, Issue 2, pp. 53-69 (in Thai)
- [23] Padkho, N. (2015). The Production and Study Property of Insulation Wall Light Board from Bagasse Fiber for Using in Architecture Work. Journal of Engineering, RMUTT. Vol. 13, No. 2, pp. 11-20 (in Thai)

- [24] Chusilp, N., Laksanakit, C., Boonrasri, P., Somboon, C., and Thongkun, T. (2019). The Development of Tile Roof from Disposal Materials. RMUTSV Research Journal. Vol. 11, No. 1, pp. 41-53 (in Thai)
- [25] Jarawae, R. (2016). The Development of Insulation from Local Plants. Yala: Yala Rajabhat University
- [26] Nisaimun, C. (2021). Preparation of Low-Density Calcium Silicate Ceramics for Insulating Refractory Applications Using Rice Husk Ash. M.S. Science. Department of Materials Science. Faculty of Science. Thesis Chulalongkorn University
- [27] Wang, S., Li, H., Zou, S., Liu, L., Bai, C., Zhang, G., and Fang, L. (2022). Experimental Study on Durability and Acoustic Absorption Performance of Biomass Geopolymer-Based Insulation Materials. Construction and Building Materials. Vol. 361, pp. 129575. DOI: 10.1016/j. conbuildmat.2022.129575

# ประสิทธิภาพแรงอัดในแนวแกนของเสาท่อเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า กรอกคอนกรีตโดยใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม Axial Compression Performance of Rectangular Concrete-Filled Steel Tubular Columns Using Environmentally Friendly Hydraulic Cement

ศักดิ์สิทธิ์ พันทวี<sup>1</sup> จักษดา ธำรงวุฒิ<sup>1\*</sup> จีรศักดิ์ สุพรมวัน<sup>1</sup> เชิดศักดิ์ สุขศิริพัฒนพงศ์<sup>1</sup> นำชัย จ้อยสูงเนิน<sup>1</sup> และวาริน ชุบขุนทด<sup>1</sup>

Saksith Pantawee<sup>1</sup> Jaksada Thumrongvut<sup>1\*</sup> Jeerasak Supromwan<sup>1</sup> Cherdsak Suksiripattanapong<sup>1</sup> Namchai Joysoongnern<sup>1</sup> and Warin Chupkhunthod<sup>1</sup>

Received: September 30, 2023; Revised: December 5, 2023; Accepted: December 7, 2023

### บทคัดย่อ

บทความนี้เน้นศึกษาพฤติกรรมรับแรงในแนวแกนและลักษณะการวิบัติของเสาท่อเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า กรอกคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (เสา HC-CSFT) ตัวอย่างทดสอบมีจำนวน 36 ตัวอย่าง เป็นเสาหน้า ตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 150 x 75 mm และสูง 750 mm ตัวแปรสำคัญที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ ประเภทของ ปูนซีเมนต์ ความหนาของท่อเหล็ก กำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีต และอายุบ่มของคอนกรีต ปูนซีเมนต์ 2 ประเภทที่แตกต่างกัน ได้แก่ ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (HC) และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (PC) ถูกใช้สำหรับกำลัง รับแรงอัดประลัยเท่ากับ 18 25 และ 32 MPa ที่อายุบ่มของคอนกรีตเท่ากับ 28 และ 90 วัน และท่อเหล็ก มี 3 ความหนา ได้แก่ 3.0 4.5 และ 6.0 mm การให้แรงอัดกระทำอย่างสม่ำเสมอต่อหน้าตัดทั้งหมดของเสา และทดสอบโดยการเพิ่มแรงกระทำในแนวแกนอย่างต่อเนื่องจนถึงจุดวิบัติของเสา จากการทดสอบพบว่า เสา HC-CSFT แสดงพฤติกรรมการรับแรงในลักษณะเชิงเส้นตรงถึงประมาณ 90 - 95 % ของแรงอัดสูงสุด หลังจากนั้นพฤติกรรมจะเปลี่ยนแบบไร้เชิงเส้นจนกระทั่งถึงจุดวิบัติ การแตกร้าวของแกนคอนกรีตและการโก่งเดาะ เฉพาะที่ของผนังท่อเหล็กเป็นรูปแบบการวิบัติของเสา HC-CSFT เสา PC-CFST มีแรงอัดสูงสุดสูงกว่าเสา

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Isan, Nakhon Ratchasima

<sup>\*</sup> Corresponding Author, Tel. 08 1548 4799, E - mail: jaksada.th@rmuti.ac.th

HC-CFST ประมาณ 1 - 2 % ที่อายุบ่ม 28 วัน อย่างไรก็ตาม ที่อายุบ่ม 90 วัน เสา HC-CFST มีแรงอัดสูงสุด สูงมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเสา PC-CFST เนื่องจากคอนกรีตที่ใช้ HC มีส่วนผสมของวัสดุปอซโซลาน ทดแทนการใช้ปูนเม็ด นอกจากนี้ยังพบว่าสมการออกแบบของ ACI สามารถทำนายแรงอัดสูงสุดของเสา HC-CFST ได้อย่างถูกต้อง โดยสรุป จากผลการศึกษาซี้ให้เห็นว่าปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกสามารถใช้เป็นทางเลือกทดแทน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในกรณีของเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ : เสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีต; ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก; ท่อเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า; แรงอัดในแนวแกน

# Abstract

This paper focuses on the study of the axial load behavior and failure characteristics of rectangular concrete-filled steel tubular columns using hydraulic cement (HC-CFST columns) under concentric axial loading. The experimental specimens consisted of 36 rectangular columns, each measuring 150 x 75 mm in cross-sectional dimensions and 750 mm in height. The key variables examined in this study encompass the type of cement, the thickness of the steel tube, the ultimate compressive strength of the concrete, and curing time. Two distinct variants of cement, hydraulic cement and ordinary Portland cement, were employed at three different compressive strengths of 18, 25, and 32 MPa, with curing times of 28 and 90 days. Steel tubes were available in three thicknesses: 3.0, 4.5, and 6.0 mm. The compressive load was uniformly applied to the entire section and tested by progressively increasing the axial load until the column reached failure. According to the test results, the HC-CFST columns display linear elastic behavior up to almost 90 - 95 % of their maximum compressive loads, after which the behavior transforms nonlinear until failure. Cracking of the concrete core, as well as local buckling of the hollow steel tube, were observed as modes of failure in the HC-CFST columns. The PC-CFST columns demonstrated a maximum compressive load that was approximately 1 - 2 % higher than that of the HC-CFST column at 28 days of curing. Nevertheless, for 90 days, the HC-CFST columns exhibited a greater maximum compressive load compared to the PC-CFST column due to the presence of pozzolanic components in the HC-based concrete instead of clinker. In addition, it has been observed that the ACI design equations are capable of accurately predicting the maximum compressive load of the HC-CFST columns. In summary, the findings of this study suggest that hydraulic cement could be used as an effective alternative to ordinary Portland cement in the case of concrete-filled steel tubular columns.

### Keywords: Concrete-Filled Steel Tube Column; Hydraulic Cement; Rectangular Steel Tube; Axial Compression

### บทน้ำ

ปัจจุบันปัญหาจากขั้นตอนการก่อสร้างระบบแบบหล่อในที่ (Cast-In-Place Construction) ส่งผลให้ใช้ระยะเวลามาก ในการดำเนินงาน รวมถึงจำนวนแรงงานและต้นทุนค่อนข้างสูง และสิ่งที่ผู้รับเหมาต้องเผชิญตั้งแต่อดีตจนถึง ปัจจุบันคือ ปัญหาการขาดแคลนแรงงานก่อสร้างที่มีทักษะสูง [1] ถึงแม้ว่ามีจำนวนแรงงานต่างด้าวที่เข้ามาทดแทน
แต่ยังไม่เพียงพอต่อความต้องการในงานก่อสร้าง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง สำหรับการขับเคลื่อนนโยบายด้านการพัฒนา ้โครงสร้างพื้นฐาน ยิ่งส่งผลให้เกิดความต้องการจำนวนแรงงานที่เพิ่มสงขึ้นในอุตสาหกรรมก่อสร้าง ระบบก่อสร้าง แบบหล่อในที่ดังกล่าวอาจไม่สอดคล้องกับทิศทางการก่อสร้างที่มีการแข่งขันกันในด้านระยะเวลาและต้นทุน [2] ้นอกจากนี้ยังมีผลกระทบทางอ้อมคือ ระบบก่อสร้างแบบหล่อในที่ต้องใช้ไม้เป็นค้ำยันและแบบหล่อคอนกรีต ้ในปริมาณมาก ซึ่งส่งผลเสียโดยตรงต่อปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมอีกด้วย [3] - [4] จากข้อจำกัดที่กล่าวมา จึงเกิดการ พัฒนาระบบการก่อสร้างแบบสำเร็จรูป (Prefabrication) เพื่อตอบสนองการขยายตัวและเพิ่มประสิทธิภาพของ ขึ้นส่วนโครงสร้าง (Structural Member) เนื่องจากสามารถลดระยะเวลาในการก่อสร้างและควบคุมคุณภาพ ้ของขึ้นงานได้ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับระบบแบบเดิม [5] นอกจากนี้ สามารถลดปัญหาการขาดแคลนแรงงาน รวมถึงลดมลภาวะเรื่องขยะและของเสียในสถานที่ก่อสร้างได้เป็นอย่างดี [6] ตัวอย่างเช่น การประยุกต์ใช้ ท่อเหล็กกลวง (Steel Hollow Tube) เป็นแบบหล่อสำเร็จรูปถาวรของเสา โดยการออกแบบให้ท่อเหล็กรับแรง ร่วมกับโครงสร้างเสาโดยไม่ถอดแบบหล่อเสาดังกล่าวออก [7] - [10] เสาเชิงประกอบประเภทนี้ถูกเรียกว่า เสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีต (Concrete-Filled Steel Tube Column, CFST) ข้อดีของเสาดังกล่าวเมื่อเปรียบเทียบ ้กับเสาคอนกรีตเสริมเหล็กรูปแบบเดิม ได้แก่ (1) ก่อสร้างได้อย่างรวดเร็วเนื่องจากท่อเหล็กกลวงถูกใช้เป็น แบบหล่อถาวรให้โครงสร้างเสา ทำให้ต้นทุนและเวลาในการก่อสร้างลดลง [11] (2) ท่อเหล็กกลวงทำหน้าที่ร่วมกับ แกนคอนกรีตในการรับแรงอัดโดยอาศัยหลักการ กระทำร่วมกันแบบคอมโพสิต (Composite Action) และ ้แกนคอนกรีตยังช่วยป้องกันการโก่งเดาะของท่อเหล็กในระยะเริ่มต้นและเพิ่มประสิทธิภาพของหน้าตัด ส่งผลให้ เสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดและความเหนียวสูงกว่าเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก [12] - [14] (3) เสาเชิงประกอบช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับพลังงาน ส่งผลให้เหมาะสำหรับโครงสร้างพื้นฐานที่อยู่ใน พื้นที่เสี่ยงต่อภัยพิบัติเนื่องจากแผ่นดินไหว [15]

้อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบันเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตใช้วัสดุเชื่อมประสานจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Ordinary Portland Cement, OPC) เป็นหลัก โดยขั้นตอนการผลิตปุนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีการปล่อย ้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO,) ส่ชั้นบรรยากาศในอัตราสง และเป็นลำดับที่ 1 ของอตสาหกรรมที่ปล่อยก๊าซ เรือนกระจก (Greenhouse Gases) ในประเทศไทย [16] ซึ่งในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์จำนวน 1 ตัน มีปริมาณการปล่อย CO, ประมาณ 1 ตัน เช่นเดียวกัน [17] ผลกระทบจากปรากฏการณ์เรือนกระจกส่งผลต่อ การเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศและสังคมของมนุษย์ เช่น การเพิ่มอุณหภูมิของชั้นบรรยากาศทำให้เกิดผลกระทบ ้ด้านสุขภาพต่อมนุษย์ทั้งทางตรงและทางอ้อม เป็นต้น [18] ดังนั้น การใช้วัสดุเชื่อมประสานทางเลือกเพื่อทดแทน การใช้ปุ่นซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะเป็นผลกระทบเชิงบวกต่อการลดปัญหาการปล่อย CO, และสภาวะเรือนกระจก ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกหรือไฮบริดซีเมนต์ เป็นวัสดุที่มีองค์ประกอบจากปูนเม็ด (Clinker) ยิปซั่ม (Gypsum) เถ้าลอย (Fly Ash) และทินปูน (Limestone) โดยลดปริมาณการใช้ปูนเม็ดและแทนที่ด้วยวัสดุทดแทนตามมาตรฐาน มอก. 2594-2556 [19] เมื่ออัตราส่วนผสมปูนเม็ดลดลง ทำให้ใช้พลังงานในกระบวนการผลิตและปลดปล่อย CO, ้น้อยกว่าเมื่อเทียบกับการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ อย่างไรก็ตาม หน่วยงานภาครัฐและภาคเอกชนหลายราย ้ในประเทศไทย ยังขาดความเชื่อมั่นสำหรับการนำปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกไปใช้ในงานก่อสร้าง เนื่องจากยังขาดข้อมูล ผลทดสอบชิ้นส่วนโครงสร้างที่ใช้ปนซีเมนต์ไฮดรอลิกภายใต้แรงกระทำ [20] ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถประสงค์ เพื่อศึกษาพฤติกรรมของเสาท่อเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้ากรอกคอนกรีตที่ใช้ปุนซีเมนต์ไฮดรอลิก (HC-CSFT) ภายใต้แรงอัดในแนวแกน และเปรียบเทียบผลทดสอบที่ได้กับเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตที่ใช้ปนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (PC-CSFT) โดยบทความนี้ได้เน้นศึกษาเสาที่มีหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular Section) เนื่องจากการก่อสร้าง อาคารในปัจจุบันนิยมให้ด้านแคบของเสามีความกว้างเท่ากับหรือใกล้เคียงกับความหนาของผนังก่ออิฐหรือ ้ ผนังสำเร็จรูป เพื่อเพิ่มเนื้อที่การใช้สอยแก่ตัวอาคาร รวมถึงเสาหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ยังไม่มีผู้ศึกษามากนัก [21] ้สุดท้าย ผลลัพธ์ที่ได้จากงานวิจัยจะช่วยยกระดับความเชื่อมั่นของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก และสามารถนำองค์ความรู้ ที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในงานโครงสร้างพื้นฐานได้อย่างถูกต้องและเหมาะสม เพื่อเพิ่มผลผลิตและประสิทธิภาพที่ทันต่อ สถานการณ์ในการดำเนินงานก่อสร้างต่อไป

# วิธีดำเนินการวิจัย

#### 1. สมบัติของวัสดุ

้ปนซีเมนต์ที่ใช้ในการเปรียบเทียบมี 2 ประเภท ได้แก่ ปนซีเมนต์ไฮดรอลิก (HC) ประเภทใช้งานทั่วไป (GU) ตาม มอก. 2594-2556 [19] และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 (PC) ตาม มอก. 15-2562 [22] คอนกรีตกำลังปกติ (ทน่วยน้ำทนักประมาณ 2,400 kg/m³) ออกแบบปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีตตามมาตรฐาน ACI 211.1 [23] โดยมีกำลังรับแรงอัดประลัยเท่ากับ 18 25 และ 32 MPa ของคอนกรีตรูปทรงกระบอก ที่อายบ่ม 28 วัน ซึ่งเป็นกำลังรับแรงอัดประลัยในช่วงใช้งานและมักใช้ก่อสร้างอาคารขนาดเล็กในประเทศไทย ท่อเหล็กกลวงหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด (H x B) เท่ากับ 150 x 75 mm ผลิตโดยการพับแผ่นเหล็กโครงสร้าง แบบรีดเย็น ซึ่งเป็นท่อเหล็กกล้าคาร์บอนสำหรับงานโครงสร้างทั่วไปตาม มอก. 107-2561 [24] ที่มีความหนา เท่ากับ 3.0 4.5 และ 6.0 mm ในการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตกระทำตามมาตรฐาน ASTM C39 [25] ที่อายุบ่ม 28 และ 90 วัน และทดสอบกำลังรับแรงดึงเหล็กกล้าคาร์บอนรูปกระดูกจากท่อเหล็กกลวงหน้าตัด สี่เหลี่ยมผืนผ้าตามมาตรฐาน ASTM A500 [26] จากผลการทดสอบคอนกรีตที่มีกำลังรับแรงอัดประลัยตาม เป้าหมายเท่ากับ 18 25 และ 32 MPa ของตัวอย่างรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 100 mm และความสูง 200 mm โดยมีจำนวน 5 ตัวอย่างต่อส่วนผสมพบว่า ที่อายุบ่ม 28 วัน คอนกรีตที่ใช้ HC มีกำลังรับ แรงอัดประลัยเฉลี่ยเท่ากับ 18.2 25.1 และ 33.8 MPa ตามลำดับ และคอนกรีตที่ใช้ PC มีกำลังรับแรงอัด ประลัยเฉลี่ยเท่ากับ 18.8 25.4 และ 34.2 MPa ตามลำดับ ดังตารางที่ 1 จากตารางเห็นได้ว่า ทุกส่วนผสมของ ้คอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดประลัยผ่านเกณฑ์ตามเป้าหมายที่กำหนด โดยคอนกรีตที่ใช้ PC มีกำลังรับแรงอัด ประลัยสงกว่าคอนกรีตที่ใช้ HC เล็กน้อยเนื่องจาก HC มีอัตราส่วนผสมปนเม็ดน้อยกว่า PC ประมาณ 10 % ของปริมาณทั้งหมด [27] ส่งผลให้การพัฒนากำลังรับแรงอัดมีค่าต่ำกว่าที่อายุบ่ม 28 วัน อย่างไรก็ตาม ที่อายุบ่ม 90 วัน คอนกรีตที่ใช้ HC มีกำลังรับแรงอัดประลัยสงกว่าคอนกรีตที่ใช้ PC ประมาณ 1 - 2 % เนื่องจาก HC เลือกใช้วัสดุปอซโซลานทดแทนปูนเม็ด ซึ่งเป็นปัจจัยหลักต่อกำลังรับแรงอัดที่สูงขึ้น เมื่ออายุบ่มคอนกรีตเกินกว่า 28 วัน [16]

#### 2. ตัวอย่างเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีต

ตัวอย่างเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีต (เสา CFST) หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด (*H x B*) เท่ากับ 150 x 75 mm ความสูง (*L*) เท่ากับ 750 mm มีอัตราส่วนความสูงต่อด้านแคบสุดของหน้าตัด (*L/B*) เท่ากับ 10 โดยเสา CFST เป็นเสาสั้นตามมาตรฐาน วสท. 1007-34 ข้อ 5303(ก) ที่ระบุว่า อัตราส่วนของ *L/B* ของเสา มีค่าไม่เกิน 15 ตัวอย่างเสาจำนวน 36 ตัวอย่างถูกแบ่งเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มที่ 1 เป็นเสาท่อเหล็กกรอก คอนกรีตที่ใช้ HC (เสา HC-CFST) และกลุ่มที่ 2 เป็นเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตที่ใช้ PC (เสา PC-CFST) ซึ่งใช้เป็นเสาอ้างอิง ดังตารางที่ 1 และรูปที่ 1 แสดงลักษณะของเสาท่อเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้ากรอก คอนกรีตที่ใช้ศึกษา

ชื่อตัวอย่างทดสอบทั้ง 2 กลุ่ม ถูกกำหนดสัญลักษณ์ในรูปแบบ XX-YY-ZZ โดยใช้หลักการ ดังต่อไปนี้ XX หมายถึง ประเภทของเสา CFST มี 2 รูปแบบ ได้แก่ HC-CFST และ PC-CFST เป็นสัญลักษณ์แทน เสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตที่ใช้ HC และเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตที่ใช้ PC ตามลำดับ YY หมายถึง กำลังรับแรงอัดประลัยตามเป้าหมายมีค่าเท่ากับ 18 25 และ 32 MPa ของคอนกรีตที่อายุบ่ม 28 วัน สุดท้าย ZZ เป็นสัญลักษณ์แทน ความหนาของท่อเหล็กกลวงที่มีความหนา 3 ค่า ได้แก่ 3.0 4.5 และ 6.0 mm ตัวอย่างเช่น HC-CFST-25-6.0 หมายถึง เสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตที่ใช้ HC มีกำลังรับแรงอัดประลัย ของคอนกรีตเท่ากับ 25 MPa และความหนาท่อเหล็กเท่ากับ 6.0 mm และ PC-CFST-32-3.0 คือ เสาท่อเหล็ก กรอกคอนกรีตที่ใช้ PC มีกำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีตเท่ากับ 32 MPa และความหนาท่อเหล็กเท่ากับ 3.0 mm

				Concrete		S	Steel Tube	e	
Group	Specimen	Binder	$A_{c}$	$f_{c,28D}^{\prime}$	$f_{c,90D}^{\prime}$	t	$A_{st}$	$f_{y,st}$	Number
			$(mm^2)$	(MPa)	(MPa)	(mm)	$(mm^2)$	(MPa)	
	HC-CFST-18-3.0	HC	9,959	18.2	21.9	3.0	1,291	384.5	2
	HC-CFST-18-4.5	HC	9,358	18.2	21.9	4.5	1,892	388.2	2
	HC-CFST-18-6.0	HC	8,787	18.2	21.9	6.0	2,463	395.4	2
	HC-CFST-25-3.0	HC	9,959	25.1	28.1	3.0	1,291	384.5	2
1	HC-CFST-25-4.5	HC	9,358	25.1	28.1	4.5	1,892	388.2	2
	HC-CFST-25-6.0	HC	8,787	25.1	28.1	6.0	2,463	395.4	2
	HC-CFST-32-3.0	HC	9,959	33.8	39.0	3.0	1,291	384.5	2
	HC-CFST-32-4.5	HC	9,358	33.8	39.0	4.5	1,892	388.2	2
	HC-CFST-32-6.0	HC	8,787	33.8	39.0	6.0	2,463	395.4	2
	PC-CFST-18-3.0	PC	9,959	18.8	21.6	3.0	1,291	384.5	2
	PC-CFST-18-4.5	PC	9,358	18.8	21.6	4.5	1,892	388.2	2
	PC-CFST-18-6.0	PC	8,787	18.8	21.6	6.0	2,463	395.4	2
	PC-CFST-25-3.0	PC	9,959	25.4	27.9	3.0	1,291	384.5	2
2	PC-CFST-25-4.5	PC	9,358	25.4	27.9	4.5	1,892	388.2	2
	PC-CFST-25-6.0	PC	8,787	25.4	27.9	6.0	2,463	395.4	2
	PC-CFST-32-3.0	PC	9,959	34.2	38.5	3.0	1,291	384.5	2
	PC-CFST-32-4.5	PC	9,358	34.2	38.5	4.5	1,892	388.2	2
	PC-CFST-32-6.0	PC	8,787	34.2	38.5	6.0	2,463	395.4	2

ตารางที่ 1 สมบัติเชิงกลของวัสดุและตัวอย่างเสา CFST

#### 3. ขั้นตอนการทดสอบ

รูปที่ 2 แสดงการติดตั้งตัวอย่างเสา CFST กับเครื่อง Universal Testing Machines (UTM) แผ่นเหล็กความหนาเท่ากับ 50 mm จำนวน 2 แผ่น ถูกติดบริเวณปลายด้านบนและด้านล่างของเสา CFST เพื่อถ่ายแรงอัดจากเครื่องทดสอบลงสู่พื้นที่หน้าตัดทั้งหมด นอกจากนี้ Linear Variable Differential Transformer (LVDT) จำนวน 2 ตัว ถูกติดตั้งที่บริเวณด้านบนหัวกดของเครื่อง UTM เพื่อวัดค่าเฉลี่ยของระยะหดตัว ในแนวแกนของเสา CFST จากนั้น เริ่ม Pre-load โดยใช้แรงกระทำประมาณ 25 % ของกำลังรับแรงอัคคอนกรีต เพื่อลดแรงเสียดทานระหว่างหน้าสัมผัสของตัวอย่างเสาและแผ่นเหล็ก [20] สุดท้าย เพิ่มแรงกระทำอย่างต่อเนื่องด้วย อัตรา 1 mm/min [14] พร้อมเก็บข้อมูลตลอดการทดสอบโดยใช้ KYOWA DAQ จนเสา CFST เกิดการวิบัติ โดยสมบูรณ์หรือทยุดทดสอบที่ระยะทดตัวเฉลี่ยเท่ากับ 50 mm [21]



รูปที่ 1 รายละเอียดและลักษณะของเสา CFST



#### รูปที่ 2 การติดตั้งตัวอย่างเสา

#### ผลการทดสอบและอภิปรายผล

#### 1. พฤติกรรมรับแรงและลักษณะการวิบัติ

งานวิจัยนี้จำกัดการแสดงผลที่ค่าการทดตัวในแนวแกน (Axial Shortening) ของเสาเท่ากับ 20 mm ทรือเท่ากับ 0.0267 mm/mm ของค่าความเครียดในแนวแกน (Axial Strain) คอนกรีต ซึ่งมีค่าประมาณ 10 เท่า ของความเครียดที่กำลังรับแรงอัดประลัยของตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอก และนิยามให้แรงอัดสูงสุด (Maximum Load) หรือ เป็นแรงอัดสุดท้ายที่เกิดขึ้นของเสา CFST โดยปราศจากการโก่งเใดาะของท่อเหล็ก [21] รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและการหดตัวในแนวแกนของเสา HC-CFST และเสา PC-CFST ที่ได้จากการทดสอบ โดยแบ่งกลุ่มตามกำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีตเท่ากับ 18 25 และ 32 MPa ตามลำดับ





จากรูปที่ 3 พบว่า พฤติกรรมรับแรงของเสา HC-CFST และเสา PC-CFST มีลักษณะใกล้เคียงกัน โดยพฤติกรรมรับแรงทั้งหมดสามารถแบ่งได้เป็นสองช่วง ในช่วงแรกความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและการหดตัว ของเสา HC-CFST และเสา PC-CFST มีลักษณะแบบเชิงเส้นตรง (Linear) จนถึงค่าแรงอัดประมาณ 90 - 95 % ของแรงอัดสูงสุด ณ จุดนี้แกนคอนกรีตจะเกิดการแตกร้าวและการหดตัวในแกนอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้คอนกรีต เกิดการขยายตัวออกทางด้านข้าง [28] การขยายตัวของคอนกรีตดังกล่าวดันให้ท่อเหล็กที่โอบรัดแกนคอนกรีต เกิดการตัดโค้งออกของผนังท่อเฉพาะที่ที่ตำแหน่งด้านกว้างของผนังท่อเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า [29] จากนั้น พฤติกรรมของเสาเข้าสู่ช่วงที่สอง เมื่อตัวอย่างเสารับแรงอัดเพิ่มขึ้น ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและการหดตัว ในแนวแกนเริ่มมีค่าลดลงและเปลี่ยนรูปแบบในลักษณะไร้เชิงเส้นตรง (Nonlinear) อย่างต่อเนื่องจนตัวอย่าง เสาเกิดการวิบัติ [10] โดยพฤติกรรมรับแรงของเสา HC-CFST และเสา PC-CFST มีลักษณะแบบ Strain-Softening เนื่องจากผนังท่อเหล็กเกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่ส่งให้ความแกร่งของเสามีค่าลดลง [8]

รูปที่ 4(ก) และรูปที่ 4(ข) แสดงลักษณะการวิบัติของเสา HC-CFST และเสา PC-CFST โดยเรียงลำดับ ตามความหนาท่อเหล็กเท่ากับ 3.0 4.5 และ 6.0 mm จากรูปพบว่าเสา HC-CFST และเสา PC-CFST มีลักษณะ การวิบัติใกล้เคียงกัน โดยแกนคอนกรีตเกิดการแตกร้าวและขยายตัวออกทางด้านข้าง ส่งให้คอนกรีตเกิดแรงดัน และผลักผนังท่อเหล็กที่โอบรัดจนเกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่ [14] ลักษณะการวิบัติดังกล่าวยังสอดคล้องกับ ผลการศึกษาเสาท่อเหล็กที่โอบรัดจนเกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่ [14] ลักษณะการวิบัติดังกล่าวยังสอดคล้องกับ ผลการศึกษาเสาท่อเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้ากรอกคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า [29] นอกจากนี้ เสา HC-CFST และเสา PC-CFST ทุกตัวอย่างมีการหดตัวในแนวแกนเกินกว่า 30 mm หรือเทียบได้กับเสามีความเครียดเชิงอัด (Compressive Strain) มากกว่า 0.040 mm/mm (4.0 %) ซึ่งบ่งชี้ว่า เสา HC-CFST และเสา PC-CFST สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างก่อนการวิบัติได้สูงเมื่อเทียบกับเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก [20]



(ก) เสา HC-CFST



(ข) เสา PC-CFST

รูปที่ 4 ลักษณะการวิบัติของเสา

#### 2. แรงอัดสูงสุดและเปรียบเทียบกับสมการเสาเชิงประกอบ

ผลการทดสอบแรงอัดสูงสุดของเสา HC-CFST และเสา PC-CFST ภายใต้แรงอัดในแนวแกน ดังตารางที่ 2 กำหนดให้แรงอัคสูงสุด (Maximum Load) ของเสา HC-CFST และเสา PC-CFST ที่อายุบ่ม 28 และ 90 วัน ใช้สัญลักษณ์เป็น *P<sub>test,25D</sub>* และ *P<sub>test,90D</sub>* จากตารางที่ 2 เห็นได้ว่า เมื่อท่อเหล็กมีความหนาเพิ่มขึ้น แรงอัคสูงสุดของเสา HC-CFST และเสา PC-CFST มีค่าสูงขึ้น เนื่องจากท่อเหล็กเป็นวัสดุหลักในการรับแรง และควบคุมการวิบัติของเสา [8], [27] นอกจากนี้เสา PC-CFST มีแรงอัดสูงสุดที่อายุบ่ม 28 วัน สูงกว่าเสา HC-CFST ประมาณ 1 - 2 % สอดคล้องกับผลทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตดังตารางที่ 1 โดยคอนกรีต ที่ใช้ PC มีกำลังอัดประลัยสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ HC เล็กน้อย อย่างไรก็ตาม ที่อายุบ่ม 90 วัน เสา HC-CFST สามารถรับแรงอัคสูงสุดได้มากกว่าเสา PC-CFST เนื่องจากคอนกรีตที่ใช้ HC มีส่วนผสมของวัสดุปอซโซลาน ทดแทนการใช้ปูนเม็ด ส่งผลให้คอนกรีตที่ใช้ HC มีกำลังรับแรงอัดสูงขึ้นที่อายุบ่ม 90 วัน [17]

Group	Specimen	Binder	f'_c (MPa)	t (mm)	P <sub>test,25D</sub> (kN)	P <sub>test,90D</sub> (kN)	P <sub>n,ACI</sub> (kN)
	HC-CFST-18-3.0	HC	18	3.0	685.8	714.2	650.5
	HC-CFST-18-4.5	HC	18	4.5	918.5	946.1	879.2
	HC-CFST-18-6.0	HC	18	6.0	1,165.7	1196.9	1,109.8
	HC-CFST-25-3.0	HC	25	3.0	742.2	771.8	708.9
1	HC-CFST-25-4.5	HC	25	4.5	980.9	1004.8	934.1
	HC-CFST-25-6.0	HC	25	6.0	1,233.8	1279.3	1,161.3
	HC-CFST-32-3.0	HC	32	3.0	821.8	869.5	782.5
	HC-CFST-32-4.5	HC	32	4.5	1,032.8	1080.4	1,003.3
	HC-CFST-32-6.0	HC	32	6.0	1,263.0	1308.0	1,226.3
	PC-CFST-18-3.0	PC	18	3.0	693.5	704.3	655.5
	PC-CFST-18-4.5	PC	18	4.5	924.5	942.3	884.0
	PC-CFST-18-6.0	PC	18	6.0	1,170.5	1188.0	1,114.3
	PC-CFST-25-3.0	PC	25	3.0	748.7	767.9	711.4
2	PC-CFST-25-4.5	PC	25	4.5	989.8	996.8	936.5
	PC-CFST-25-6.0	PC	25	6.0	1,243.1	1250.4	1,163.6
-	PC-CFST-32-3.0	PC	32	3.0	829.9	850.5	785.9
	PC-CFST-32-4.5	PC	32	4.5	1,038.7	1069.8	1,006.5
	PC-CFST-32-6.0	PC	32	6.0	1,275.1	1300.5	1,229.3

ตารางที่ 2 แรงอัดสูงสุดและแรงอัดในแนวแกนระบุจากสมการออกแบบ

#### 3. เปรียบเทียบแรงอัดสูงสุดกับสมการเสาเชิงประกอบ

สำหรับการเปรียบเทียบแรงอัดสูงสุดที่ได้จากการทดสอบเสา HC-CFST และเสา PC-CFST กับ สมการออกแบบเสาตามมาตรฐาน ACI 318 [30] ในเบื้องต้นสมมติให้เสา HC-CFST และเสา PC-CFST มีปฏิสัมพันธ์อย่างสมบูรณ์ (Full Interaction) ระหว่างแกนคอนกรีตและท่อเหล็กภายใต้แรงอัด โดยแรงอัด ในแนวแกนระบุ (Nominal Axial Load) ของเสา HC-CFST และเสา PC-CFST สามารถหาจากสมการที่ (1)

$$P_{n,\text{ACI}} = 0.85 A_c f'_c + A_{st} f_{y,st} \tag{1}$$

โดยที่

 $A_c$  และ  $A_{st}$  คือ พื้นที่หน้าตัดของแกนคอนกรีตและท่อเหล็ก  $f_c'$  และ  $f_{y,st}$  คือ กำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีตและกำลังครากของท่อเหล็ก

รูปที่ 5 แสดงการเปรียบเทียบแรงอัดสูงสุดที่ได้จากการทดสอบ เสา HC-CFST และเสา PC-CFST กับแรงอัดในแนวแกนระบุจากสมการออกแบบเสาตามมาตรฐาน ACI 318 ( $P_{n,ACI}$ ) จากรูปที่ 5 พบว่า เสา HC-CFST และเสา PC-CFST มีอัตราส่วนของแรงอัดสูงสุดที่ทดสอบได้ที่อายุบ่ม 28 วัน และแรงอัดในแนวแกน ระบุจากสมการออกแบบของ ACI ( $P_{test,28D} / P_{n,ACI}$ ) อยู่ในช่วงระหว่าง 1.03 - 1.07 ดังรูปที่ 5(ก) - 5(ข) โดยอัตราส่วนดังกล่าวมีค่ามากกว่า 1.00 หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า สมการออกแบบเสาตามมาตรฐาน ACI 318 สามารถทำนายแรงอัดสูงสุดของเสา HC-CFST และเสา PC-CFST ได้อย่างถูกต้อง และสอดคล้องกับ ผลการศึกษาที่ผ่านมา [14], [29] นอกจากนี้ที่อายุบ่ม 90 วัน เสา HC-CFST และเสา PC-CFST มีอัตราส่วน อยู่ในช่วงระหว่าง 1.0 - 1.11 ดังแสดงในรูปที่ 5(ค) - (ง) และเมื่อเทียบกับผลการทดสอบที่อายุบ่ม 28 วัน พบว่า อัตราส่วนดังกล่าวมีส่วนต่างเพิ่มขึ้นจากเดิมประมาณ 3 - 4 %





ดังนั้นในภาพรวมของการศึกษานี้ เสา HC-CFST จึงมีประสิทธิภาพการรับแรงอัดในแนวแกน เทียบเท่ากับเสา PC-CFST หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า ปูนขีเมนต์ไฮดรอลิกสามารถใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ในเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตได้อย่างมีประสิทธิภาพ และยังช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเนื่องจากการใช้ วัสดุดิบบางส่วนเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ตลอดจนนำไปสู่การวางมาตรฐานทางวิศวกรรมเพื่อนำปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก มาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนค์ในงานก่อสร้างต่อไป

#### สรุปผล

จากการศึกษาเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (เสา HC-CSFT) เปรียบเทียบกับเสาท่อเหล็ก กรอกคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 (เสา PC-CFST) พบข้อสรุป ดังนี้

 พฤติกรรมรับแรงของเสา HC-CFST และเสา PC-CFST มีลักษณะใกล้เคียงกัน ในช่วงแรก ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัคและการทดตัวของเสา HC-CFST และเสา PC-CFST มีลักษณะแบบเซิงเส้นตรง จนถึงค่าแรงอัดประมาณ 90 - 95 % ของแรงอัดสูงสุด จากนั้นช่วงที่สอง ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและ การทดตัวในแนวแกนมีค่าลดลงและเปลี่ยนรูปแบบในลักษณะไร้เชิงเส้นตรง (Nonlinear) แบบ Strain-Softening เนื่องจากการโก่งเดาะของผนังท่อเหล็ก ส่งให้ความแกร่งของเสามีค่าลดลง

2) เสา HC-CFST และเสา PC-CFST มีลักษณะการวิบัติคล้ายคลึงกัน โดยแกนคอนกรีตเกิดการแตกร้าว และขยายตัวออกทางด้านข้าง ส่งให้คอนกรีตเกิดแรงดันและผลักผนังท่อเหล็กที่โอบรัดจนเกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่

3) เสา PC-CFST มีแรงอัดสูงสุดที่อายุบ่ม 28 วัน สูงกว่าเสา HC-CFST ประมาณ 1 - 2 % อย่างไรก็ตาม ที่อายุบ่ม 90 วัน เสา HC-CFST สามารถรับแรงอัดสูงสุดได้มากกว่าเสา PC-CFST เนื่องจากคอนกรีตที่ใช้ HC มีส่วนผสมของวัสดุปอซโซลานทดแทนการใช้ปูนเม็ด ส่งผลให้คอนกรีตที่ใช้ HC มีกำลังรับแรงอัดสูงขึ้น ที่อายุบ่ม 90 วัน

 สมการออกแบบเสาตามมาตรฐาน ACI สามารถนำมาประยุกต์ใช้ประเมินแรงอัดสูงสุดของเสา HC-CFST และเสา PC-CFST ได้อย่างถูกต้อง โดยให้สัดส่วนความปลอดภัยเฉลี่ยประมาณ 5 และ 9 % ที่อายุบ่ม
 28 และ 90 วัน

#### กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยี ราชมงคลอีสาน เลขที่สัญญา FF66-P2-010

# References

- Wang, Z., Hu, H., and Gong, J. (2018). Framework for Modeling Operational Uncertainty to Optimize Offsite Production Scheduling of Precast Components. Automation in Construction. Vol. 86, pp. 69-80. DOI: 10.1016/j.autcon.2017.10.026
- [2] 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)
- [3] Hata, M., Sato, M., and Miyazawa, S. (2022). Experimental Study on the Application of Cementless Material with Industrial By-Products to Steam-Cured Precast Concrete Products. Materials. Vol. 15, p. 7624 DOI: 10.3390/ma15217624
- [4] Thumrongvut, J., Seangatith, S., and Kumlue, K. (2014). Effects of Flexural Strengthening with Non-Prestressed Wires on Precast Partially-Prestressed Concrete Beams. RMUTI Journal. Vol. 7, No. 2, pp. 16-33 (in Thai)
- [5] Kim, S., Hwang, S., and Son, J. (2022). Safety Management Guidelines for Precast Concrete Production Plants Using Importance-Performance Analysis. Journal of Construction Engineering and Management. Vol. 148, Issue 7, Article 04022038. DOI: 10.1061/(ASCE) CO.1943-7862.0002298

- [6] Kamali, M. and Hewage, K. (2017). Development of Performance Criteria for Sustainability Evaluation of Modular Versus Conventional Construction Methods. Journal of Cleaner Production. Vol. 142, Part 4, pp. 3592-3606. DOI: 10.1016/J.JCLEPRO.2016.10.108
- [7] Ellobody, E. and Young, B. (2006). Design and Behaviour of Concrete-Filled Cold-Formed Stainless Steel Tube Columns. Engineering Structures. Vol. 28, Issue 5, pp. 716-728. DOI: 10.1016/ j.engstruct.2005.09.023
- [8] Seangatith, S. and Thumrongvut, J. (2011). Behaviors of Square Thin-Walled Steel Tubed RC Columns Under Direct Axial Compression on RC Core. Procedia Engineering. Vol. 14, pp. 513-520. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.07.064
- [9] Liew, J. Y. R. and Xiong, D. X. (2012). Ultra-High-Strength Concrete Filled Composite Columns for Multi-Storey Building Construction. Advances in Structural Engineering. Vol. 15, Issue 9, pp. 1487-1503. DOI: 10.1260/1369-4332.15.9.1487
- [10] Thumrongvut, J. and Ritraksa, K. (2016). Effects of Load Application on High-Strength Concrete-Filled Circular Steel Tube Specimens. RMUTI Journal Science and Technology. Vol. 9, No. 2, pp. 145-160 (in Thai)
- Xiong, M. X., Xiong, D. X., and Richard Liew, J. Y. (2017). Axial Performance of Short Concrete Filled Steel Tubes with High- and Ultra-High- Strength Materials. Engineering Structures. Vol. 136, pp. 494-510. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.01.037
- Chang, X., Ru, Z. L., Zhou, W., and Zhang, Y. B. (2013). Study on Concrete-Filled Stainless Steel-Carbon Steel Tubular (CFSCT) Stub Columns Under Compression. Thin-Walled Structures. Vol. 63, pp. 125-133. DOI: 10.1016/j.tws.2012.10.002
- [13] Thumrongvut, J., Tipcharoen, A., and Prathumwong, K. (2021). Post-Fire Performance of Square Concrete-Filled Steel Tube Columns Under Uni-Axial Load. Materials Science Forum. Vol. 1016, pp. 618-623. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1016.618
- Bokkhunthod, N., Thumrongvut, J., Supromwan, J., and Seangatith, S. (2022). Experimental Study of Cellular Lightweight Concrete-Filled Steel Tube Columns Using Hydraulic Cement.
   Key Engineering Materials. Vol. 922, pp. 147-152. DOI: DOI:10.4028/p-3zquh9
- [15] Skalomenos, K. A., Hatzigeorgiou, G. D., and Beskos, D. E. (2014). Parameter Identification of Three Hysteretic Models for the Simulation of the Response of CFT Columns to Cyclic Loading.
   Engineering Structures. Vol. 61, pp. 44-60. DOI: 10.1016/j.engstruct.2014.01.006
- [16] Thumrongvut, J., Seangatith, S., Phetchuay, C., and Suksiripattanapong, C. (2022). Comparative Experimental Study of Sustainable Reinforced Portland Cement Concrete and Geopolymer Concrete Beams Using Rice Husk Ash. Sustainability. Vol. 14, No. 16, p. 9856. DOI: 10.3390/ su14169856
- [17] Phojan, W., Luepongpattana, S., Wonglakorn, N., Thumrongvut, J., Tabyang, W., Keawsawasvong, S., and Suksiripattanapong, C. (2023). Mechanical and Environmental Characteristics of High Calcium Fly Ash Geopolymer Stabilized Soft Bangkok Clay Contaminated with Zinc Sludge. Case Studies in Chemical and Environmental Engineering. Vol. 8, DOI: 10.1016/j.cscee.2023.100480
- [18] Sanchaiwut, M., Thumrongvut, J., Pantawee, S., and Seangatith, S. (2022). Effects of Substitution of Fine Aggregate with Recycled Asphalt Pavement on Compressive Strength of Normal Concrete. Key Engineering Materials. Vol. 922, pp. 163-168. DOI: 10.4028/p-5h70w4

- [19] Thai Industrial Standard. (2013). Hydraulic cement (TIS 2594-2556). Thai Industrial Standards Institute, Ministry of Industry, Bangkok. (in Thai)
- [20] Thumrongvut, J., Khamphay, P., Seangatith, S., Pantawee, S., and Supromwan, J. (2023). Axial load Performance of Concrete-Filled Steel Tube Columns with Hydraulic Cement and Strengthened by Steel Bars. Ladkrabang Engineering Journal. Vol. 40, No. 2, pp. 117-127 (in Thai)
- [21] Thumrongvut, J., Seangatith, S., Siriparinyanan, T., and Wangrakklang, S. (2016). An Experimental Behaviour of Cellular Lightweight Concrete-Filled Steel Square Tube Columns Under Axial Compression. Materials Science Forum. Vol. 860, pp. 121-124. DOI: 10.4028/www.scientific. net/MSF.860.121
- [22] Thai Industrial Standard. (2019). **Portland Cement (TIS 15-2562)**. Thai Industrial Standards Institute, Ministry of Industry, Bangkok. (in Thai)
- [23] ACI Committee 211. (2009). Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete, ACI 211.1-91. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA.
- [24] Thai Industrial Standard. (2018). Carbon Steel Tubes for General Structure (TIS 107-2561). Thai Industrial Standards Institute, Ministry of Industry, Bangkok. (in Thai)
- [25] ASTM C39. (2018). Standard Test Methods for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. ASTM: West Conshohocken, PA, USA.
- [26] ASTM A500. (2018). Standard Specification for Cold-Formed Welded and Seamless Carbon Steel Structural Tubing in Rounds and Shapes. ASTM: West Conshohocken, PA, USA.
- [27] Joysoongnern, N., Thumrongvut, J., Suksiripattanapong, C., and Seangatith, S. (2023). Behavior and Strength of Circular Hydraulic Cement Concrete-Filled Steel Tube Columns. Rajamangala University of Technology Srivijaya Research Journal. Vol. 15, No. 2, pp. 348-360 (in Thai)
- [28] Seangatith, S. and Thumrongvut, J. (2009). Experimental Investigation on Square Steel Tubed RC Columns Under Axial Compression. Suranaree Journal of Science and Technology. Vol. 16, No. 3, pp. 205-220
- [29] Thumrongvut, J. and Tiwjantuk, P. (2018). Strength and Axial Behavior of Cellular Lightweight Concrete-Filled Steel Rectangular Tube Columns Under Axial Compression. Materials Science Forum. Vol. 941, pp. 2417-2422
- [30] ACI Committee 318. (2019). Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19). American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA

# การศึกษาผนังอิฐก่อเสริมกำลังด้วยไม้ไผ่ภายใต้การทดสอบแบบค้อนเหวี่ยง The Study of the Reinforced Masonry Walls with Bamboo under the Pendulum Test

อนุชาติ ลื้อนันต์ศักดิ์ศิริ<sup>1</sup> ไพฑูรย์ นาแซง<sup>1\*</sup> วรวิทย์ โพธิ์จันทร์<sup>1</sup> วีระชัย ทิรัญวัฒนเกษม<sup>1</sup> และเฉลิมศักดิ์ นามเชียงใต้<sup>1</sup>

Anuchat Leeanansaksiri<sup>1</sup> Phaithun Nasaeng<sup>1\*</sup> Worawit Projan<sup>1</sup> Weerachai Hirunwattanakasem<sup>1</sup> and Chalermsak Namchiangtai<sup>1</sup>

Received: October 5, 2023; Revised: November 9, 2023; Accepted: December 20, 2023

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการรับแรงของผนังอิฐก่อเสริมกำลังด้วยไม้ไผ่ภายใต้การทดสอบด้วย ค้อนเหวี่ยง ผนังอิฐก่อที่ทดสอบมีทั้งหมด 6 ตัวอย่าง โดยมีขนาดเฉลี่ย 600 x 600 มิลลิเมตร ประกอบด้วย ผนังอิฐมอญแบบไม่ฉาบ (CT1) ผนังอิฐมอญแบบฉาบ (CT2) ผนังอิฐก่อเสริมกำลังด้วยไม้ไผ่ระยะห่าง 50 มิลลิเมตร (W1) ผนังอิฐก่อเสริมกำลังด้วยไม้ไผ่ระยะห่าง 100 เซนติเมตร (W2) ผนังอิฐก่อเสริมกำลัง ด้วยไม้ไผ่ระยะห่าง 150 มิลลิเมตร (W3) และผนังอิฐก่อเสริมกำลังด้วยไม้ไผ่ระยะห่าง 200 มิลลิเมตร (W4) การทดสอบกระทำภายใต้แรงกระแทกแบบค้อนเหวี่ยงโดยมีมุมองศาในการให้แรงตั้งแต่ 5 ถึง 90 องศา ผลการทดสอบพบว่าตัวอย่าง CT1 CT2 W1 W2 W3 และ W4 มีค่ากำลังรับแรงกระแทกเท่ากับ 9.04 21.33 39.2 34.28 26.92 และ 25.01 นิวตันเมตร ตามลำดับ สำหรับตัวอย่างควบคุม CT2 เมื่อเปรียบเทียบ กับตัวอย่าง CT1 แสดงให้เห็นว่าการฉาบปูนที่ผนังอิฐก่อทำให้กำลังรับแรงกระแทกสูงขึ้น 2.36 เท่า นอกจากนี้ เมื่อทำการเปรียบเทียบตัวอย่างผนังอิฐก่อที่ทำการเสริมกำลังด้วยไม้ไผ่ตามระยะ 50 ถึง 200 มิลลิเมตร เทียบกับตัวอย่าง CT2 พบว่าผนัง W1 W2 W3 และ W4 ให้กำลังรับแรงกระแทกสูงขึ้น 1.83 1.61 1.26 และ 1.17 เท่า ตามลำดับ การเสริมกำลังด้วยไม้ไผ่ทำให้กำลังรับแรงกระแทกที่ได้สูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

คำสำคัญ : ไม้ไผ่; อิฐก่อ; การทดสอบด้วยค้อนเหวี่ยง

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ขอนแก่น

Faculty of Engineering, Northeastern University, Khonkaen

<sup>\*</sup> Corresponding Author, Tel. 06 5354 5350, E - mail: phaithun.nas@neu.ac.th

# Abstract

The objective of this research was to study the reinforced masonry walls with bamboo under the pendulum test. A total of 6 samples of masonry walls were tested, with an average size of 600 x 600 mm, consisting of 1) non-plastered Mon brick wall (CT1), 2) plastered Mon brick wall (CT2), 3) reinforced masonry wall with bamboo at a distance of 50 mm (W1), 4) reinforced masonry wall with bamboo at a distance of 100 mm (W2), 5) reinforced masonry wall with bamboo at a distance of 150 mm (W3), and reinforced masonry wall with bamboo at a distance of 200 mm (W4). Assessments were performed using the pendulum test with application angles ranging from 5 to 90 degrees. The results found that samples CT1, CT2, W1, W2, W3 and W4 had impact load values of 9.04, 21.33, 39.2, 34.28, 26.92, and 25.01 N.m, respectively. For the control sample CT2, it was shown that plastering the masonry wall resulted in a 2.36 times higher impact load when compared with sample CT1. In addition, when comparing the masonry wall samples reinforced with bamboo at a distance of 50 to 200 mm with the CT2 sample, it was found that walls W1, W2, W3, and W4 had 1.83, 1.61, 1.26, and 1.17 times higher impact load, respectively. Thus, it can be concluded that reinforcement using the reinforced masonry walls with bamboo significantly increased the impact load.

Keywords: Bamboo; Masonry; Pendulum Test

#### บทนำ

้ประเทศไทยอยู่ในพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากการเกิดแผ่นดินไหวค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับหลายประเทศใกล้เคียง ้เช่น พม่า และจีน เป็นต้น ทั้งนี้ประเทศไทยมีรอยเลื่อนที่มีพลังที่สำคัญในภาคเหนือ ได้แก่ รอยเลื่อนแม่จัน ้รอยเลื่อนแม่ฮ่องสอน รอยเลื่อนแม่ทา และรอยเลื่อนแพร่ ส่วนรอยเลื่อนในภาคตะวันตก คือ รอยเลื่อน ้ศรีสวัสดิ์ รอยเลื่อนเจดีย์สามองค์ รอยเลื่อนเมย และภาคใต้ ได้แก่ รอยเลื่อนระนอง และรอยเลื่อนคลองมะล่ย เมื่อเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหวจากรอยเลื่อนเหล่านี้ เป็นผลให้อาคารเกิดการสั่นไหว ทำให้เกิดความตื่นตัว ้จากประชาชนทั่วไปในความปลอดภัยของอาคารต่าง ๆ โดยเฉพาะในกรุงเทพมหานครที่มีอาคารสูงมากมาย ้ในช่วงเวลาหลายปีที่ผ่านมาอาคารได้ถูกสร้างขึ้นเป็นจำนวนมากและการออกแบบไม่ได้คำนึงถึงผลของ แรงแผ่นดินไหวต่อโครงสร้างเป็นหลัก ยกตัวอย่างเมื่อวันที่ 5 พฤษภาคม พ.ศ. 2557 เวลา 18.08 น. ตามเวลาของประเทศไทยได้เกิดเหตุการณ์แผ่นดินไทวคำนวณศูนย์กลางในเบื้องต้นพบว่ามีจุดศูนย์กลาง อยู่บริเวณตำบลทรายขาว อำเภอพาน จังหวัดเชียงราย ละติจูด 19.685°N ลองติจูด 99.687°E ขนาดแผ่นดินไหว 6.3 ความลึก 7 กิโลเมตร ความรุนแรงระดับ VIII ตามมาตราเมอร์คัลลี่ จากเหตุการณ์ครั้งนี้มีผู้เสียชีวิต 1 คน ที่จังหวัดเชียงราย บาดเจ็บมากกว่า 100 คน พบความเสียหายเกิดขึ้นแก่บ้านเรือนและสิ่งปลูกสร้างเป็นจำนวนมาก และเป็นบริเวณกว้าง มีผลกระทบถึง 7 จังหวัด และการเกิดแผ่นดินไหวในครั้งนี้ทำให้เกิดแผ่นดินไหวตาม (Aftershock) กระจายตัวหลายบริเวณ ในเขตอำเภอแม่ลาว อำเภอพาน อำเภอแม่สรวย อำเภอเมือง จังหวัด เขียงราย ครอบคลมพื้นที่เป็นบริเวณกว้างตลอดแนวรอยเลื่อนพะเยา [1] ทำให้อาคารบ้านเรือนพร้อมสิ่งปลกสร้าง ได้รับความเสียทายเป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะผนังอิฐก่อ

ผนังอิฐก่ออาคารโดยทั่วไปแล้วจะเป็นแค่การก่อเพื่อใช้ในงานสถาปัตยกรรม สามารถแบ่งเป็นผนังภายนอก และผนังภายใน โดยที่ผนังภายนอกมีหน้าที่ป้องกันตัวอาคารจากสภาพแวดล้อมต่าง ๆ เช่น พายุฝน แสงแดด ทรือความร้อน ส่วนผนังภายในจะใช้แบ่งพื้นที่ออกเป็นโซนใช้งานต่าง ๆ ภายในตัวอาคารและยังใช้เป็นที่เก็บเสียง กันการรบกวน อีกทั้งตัวผนังบางส่วนยังทำหน้าที่ในการรับน้ำหนักของคอนกรีตเสริมเหล็ก และบางส่วนไม่ได้ รับน้ำหนัก ซึ่งในการก่อสร้างผนังวัสดุที่นิยมนำมาใช้ในการก่อผนังประกอบด้วย อิฐมอญ อิฐบล็อก อิฐมวลเบา เป็นต้น และเนื่องจากผนังอิฐในโครงสร้างอาคาร (Infill Wall) เดิมไม่ได้มีการออกแบบให้สามารถต้านทาน แรงแผ่นดินไหวได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในกรณีผนังที่มีช่องเปิดด้วยบานประตูและหน้าต่าง จะมีกำลังต้านทาน ต่ำมาก ดังนั้น การศึกษาวิธีการเสริมกำลังและพฤติกรรมต้านทานแผ่นดินไหวของผนังอิฐจึงเป็นประโยชน์ ต่ออาคารเป็นอย่างมาก

จากผลงานวิจัยที่ผ่านมา [2] - [7] ได้ทำการศึกษาการเสริมกำลังผนังอิฐก่อโดยใช้วัสดุเสริมกำลัง Fiber Reinforced Polymer (FRP) และวัสดุเสริมกำลัง Cabon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) ภายใต้ การทดสอบแบบเพนดูลัมเทส ผลการศึกษาพบว่าการเสริมกำลังผนังอิฐก่อด้วยไฟเบอร์ทำให้กำลังรับแรงของ ผนังอิฐก่อสูงกว่าตัวอย่างที่ไม่ได้มีการเสริมกำลัง นอกจากนี้ [8] - [9] ได้ศึกษาผนังอิฐก่อเสริมกำลังโดยใช้วัสดุ Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) ผลการศึกษาที่ได้มีความสอดคล้องกับการเสริมกำลังผนังอิฐก่อ ด้วย FRP และ CFRP เช่นกัน และยังมีการศึกษาการเสริมกำลังผนังอิฐก่อโดยการใช้คอนกรีตพ่นซึ่งเป็น งานวิจัยของ [10] ผลการศึกษาพบว่าคอนกรีตพ่นทำหน้าที่ปกป้องผนังอิฐก่อ รวมถึงทำให้เกิดชั้นความหนา ของคอนกรีตเสมือนเป็นเกาะป้องกันผนังอิฐก่อทำให้ผนังอิฐก่อมีความสามารถรับกำลังได้สูงเมื่อเปรียบเทียบ กับตัวอย่างควบคุมที่ไม่ได้มีการเสริมกำลัง

ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้เล็งเห็นถึงการเสริมกำลังผนังอิฐก่อเพื่อให้มีความแข็งแรงในการรับแรงกระแทก ที่เกิดจากภัยธรรมชาติ อันเกิดจากแรงแผ่นดินไหวที่เข้ากระทำในทิศทางตั้งฉากกับผนังอิฐก่อรวมถึงแรงฉม เป็นต้น และจากฝีมือมนุษย์ที่เกิดจากความประมาท เช่น อุบัติเหตุจากการขับรถชนผนัง การกระแทกจากเครื่องจักรต่าง ๆ โดยนำเอาวัสดุที่มีในธรรมชาติหรือในท้องถิ่นได้แก่ ไม้ไผ่ ซึ่งมีทั่วไปในแต่ละท้องที่ของประเทศไทย มาทำการเสริม กำลังผนังอิฐก่อเพื่อเป็นการลดค่าใช้จ่ายเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้วัสดุจำพวกคาร์บอนไฟเบอร์ซึ่งมีราคาสูง โดยการทดสอบผนังก่ออิฐเสริมกำลังด้วยไม้ไผ่ภายใต้การทดสอบด้วยค้อนเหวี่ยงทำตามมาตรฐาน มอก. 2226-2548 [11] โดยเสริมกำลังผนังอิฐก่อด้วยวิธีเฟอร์โรซีเมนต์ (Ferrocement)

# ทฤษฎีที่ใช้ในการศึกษา

#### 1. การทดสอบแบบค้อนเหวี่ยง (Pendulum Test)

การทดสอบโดยแรงกระแทก ส่วนใหญ่เพื่อต้องหาความสามารถในการดูดกลืน พลังงานของวัสดุ ภายใต้แรงกระแทก ซึ่งทำได้โดยใช้พลังงานกระแทกชิ้นทดสอบนั้น ต้องใช้ค้อนเหวี่ยง (Pendulum Hammer) ตีชิ้นงานภายใต้ภาวะที่กำหนดดังรูปที่ 1



#### รูปที่ 1 หลักการทดสอบโดยการกระแทกแบบค้อนเหวี่ยง

จากรูปที่ 1 จะเห็นว่ามีหลักการเหมือนแบบลูกตุ้มนาฬิกา ซึ่งสามารถที่จะคำนวณปริมาณพลังงาน ที่ใช้กระแทกขึ้นทดสอบ ได้จากผลต่างของระดับสูงของลูกตุ้ม เมื่อเริ่มแกว่งและหลังจากที่แกว่งไปกระแทก ขึ้นทดสอบให้ทักแล้ว ในการทดสอบโดยวิธีค้อนเหวี่ยงกระแทกนี้ จะเห็นได้ว่าพลังงานศักย์ของค้อนเหวี่ยง ก่อนปล่อย จากตำแหน่ง A คือ mga หลังจากปล่อยพลังงานศักย์จะลดลง และพลังงานจลน์เพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงจุดก่อนการ กระแทกที่ตำแหน่ง B พลังงานศักย์มีค่าเหลือศูนย์ส่วนพลังงานจลน์จะมีค่าที่มากที่สุดเมื่อค้อนเหวี่ยงมาถึงจุดไกลที่สุด คือตำแหน่ง C ซึ่งพลังงานศักย์มีค่าเป็น mgb ดังนั้นผลต่างระหว่างพลังงานศักย์ที่ตำแหน่ง A และ C คือ พลังงานกระแทกที่ทำให้ขึ้นทดสอบแตกหัก [12] โดยคำนวณได้ดังสมการที่ (1)

พลังงานกระแทกขึ้นทคสอบ = mgr (
$$\cos\beta$$
-  $\cos\alpha$ ) (1)

เมื่อ

m = กำหนดให้มีหน่วยกิโลกรัม (kg)

 $g \ = \ 9.806 \ m/s^2$ 

α = มุมยกขึ้นก่อนการกระแทกเป็นองศา

- β = มุมยกขึ้นภายหลังการกระแทกเป็นองศา
- r = รัศมีความยาวจากจุดศูนย์กลางหมุนถึงตำแหน่งตี

สำทรับพลังงานกระแทกชิ้นทดสอบ จะมีค่าเป็น จูล (J) ซึ่งในเครื่องทดสอบส่วนมาก จะอ่านค่า พลังงานนี้ได้โดยตรงจากสเกลที่ถูกแบ่งเป็นหน่วยพลังงานไว้เป็นจูลด้วยเหมือนกัน

2. เทคนิคในการเสริมกำลังผนังอิฐก่อโดยวิธีเฟอร์โรซีเมนต์ (Ferrocement)

เทคนิคในการเสริมกำลังผนังอิฐก่อจะใช้การเสริมกำลังด้วยวิธีเฟอร์โรซีเมนต์ (Ferrocement) โดยทั่วไปแล้วซีเมนต์มอร์ต้าร์เป็นวัสดุที่แข็งเปราะ เมื่อนำมาใช้กับวัสดุที่มีการกระจายแรง เช่น ลวดตาข่าย จะทำให้คุณสมบัติดีขึ้นเนื่องจากการกระจายตัวของแรงจึงทำให้ต้านทานการแตกร้าว กำลังรับแรงดึง แรงดัด ต้านทานแรงกระแทกและการล้าได้ดี โดยมีลักษณะการเสริมดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 รูปแบบการเสริมกำลังด้วยวิธีเฟอร์โรซีเมนต์

เฟอร์โรซีเมนต์ โดยทั่วไปจะใช้ลวดตาข่ายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 ถึง 1.0 มิลลิเมตร และ ช่องว่างของตาข่าย 5 ถึง 25 มิลลิเมตร โดยมีสัดส่วนปริมาตรเหล็กต่อปริมาตรคอนกรีต ร้อยละ 1 ถึงร้อยละ 8 ความหนาของเฟอร์โรซีเมนต์อยู่ในช่วง 10 ถึง 40 มิลลิเมตร ระยะหุ้มใช้ 1.5 ถึง 2 มิลลิเมตร โดยมอร์ต้าร์ จะประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 น้ำและมวลรวมละเอียด (ทรายธรรมชาติ) ขนาดประมาณ 5 ถึง 7 มิลลิเมตร เฟอร์โรซีเมนต์ใช้สำหรับโครงสร้างที่มีความบางได้ แต่มีความทนทานเท่ากับคอนกรีตเสริมเหล็ก เพราะมีพฤติกรรมเป็นวัสดุยึดหยุ่นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous Elastic) ทำให้มีช่วงยืดหยุ่นกว้างกว่าคอนกรีตทั่วไป การกระจายตัวของลวดตาข่ายและอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตรของคอนกรีต (Specific Surface) ส่งผลให้มีคุณสมบัติต้านการแตกร้าวดี

# วิธีด่ำเนินการศึกษา

#### 1. วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

อิฐที่ใช้ในการศึกษาเป็นอิฐมอญขนาด 60 x 135 x 60 มิลลิเมตร เป็นอิฐชนิดมอญคู่ วัสดุประสาน งานก่อและฉาบใช้ปูนซีเมนต์สำเร็จ ตามมาตรฐาน มอก. 15-2555 [13] ไม้ไผ่ที่ใช้เป็นไม้ไผ่ตันหรือไผ่ด้ามขวาน เตรียมตัวอย่างให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร รวมความหนาไม้ไผ่ 2 ด้านโดยประมาณ 10 มิลลิเมตร จากพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ แสดงวัสดุในงานวิจัยดังตารางที่ 1

รูปวัสคุ	รายการวัสดุ	หมายเหตุ
	อิฐมอญ ขนาด 60 x 135 x 60 มม.	อิฐจากพื้นที่อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น
	ປູนก่อและปูนฉาบ	ตราเสือ มอก. 15-2555
	ไม้ไผ่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มม.	ชนิดไผ่ตัน แบบตากแท้ง

#### ตารางที่ 1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

#### 2. การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

2.1 การทดสอบการรับกำลังอัดของอิฐมอญ ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C170-90 [14] โดยเลือกตัวอย่างอิฐจำนวน 5 ก้อน เรียงกันแล้วทำการกดตัวอย่างจำนวน 3 ชุด เพื่อหาค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ย ของกำลังรับแรงอัดของอิฐมอญ

2.2 กำลังรับแรงอัดของปริซึมอิฐก่อได้ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1314-07 [15] โดยการนำอิฐมาก่อโดยมีปูนก่อเป็นตัวเชื่อมประสานจำนวน 5 ก้อน แล้วทำการฉาบตัวอย่างให้เสมือนกับการก่อ และฉาบในงานก่อสร้างทั่วไป

2.3 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์สำเร็จที่ใช้ทำปูนก่อและปูนฉาบ วิธีทดสอบทำตาม มาตรฐาน ASTM C349-97 [16] ทำการควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (Water-Cement Ratio w/c) เท่ากับ 0.35 สำหรับปูนซีเมนต์สำเร็จงานก่อ และควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (Water-Cement Ratio w/c) เท่ากับ 0.40 สำหรับปูนซีเมนต์สำเร็จงานฉาบ น้ำที่ใช้ผสมปูนซีเมนต์เป็นน้ำประปา ทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 7 14 และ 28 วัน

2.4 กำลังรับแรงดึงของไม้ไผ่ ได้ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D5034-21 [17] โดยการ ทดสอบเตรียมโดยการดึงด้วยเครื่อง UTM

#### 3. การทดสอบผนังอิฐก่อภายใต้เพนดูลัมเทสหรือวิธีค้อนเหวี่ยง

การทดสอบเพนดูลัมหรือการทดสอบการรับการกระแทกด้านข้างของผนังอิฐก่อด้วยวิธีค้อนเหวี่ยง ตามมาตรฐาน มอก. 2226-2548 [11] ดังรูปที่ 3(ก) โดยการนำผนังอิฐก่อที่ทำการเตรียมตัวอย่างขนาด 600 x 600 มม. โดยมีสัญลักษณ์ตัวอย่างดังตารางที่ 2 เข้าทดสอบที่ชุดทดสอบเพนดูลัมเทสและทำการทดสอบ จะให้น้ำหนักที่ตุ้ม 3 กิโลกรัม เริ่มต้นเหวี่ยงแขนเหวี่ยงทำมุมที่ 5 องศา และเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ครั้งละ 5 องศา จนชิ้นงานเกิดการวิบัติ และนำผลที่ได้จากการทดสอบความทนการกระแทกที่ไม่ทำให้เกิดรอยร้าวที่ทำให้เกิด ความเสียหายต่อผนังอิฐก่อ ทำการเปรียบเทียบตัวอย่างผนังอิฐก่อที่ไม่ได้เสริมกำลังกับผนังอิฐก่อที่เสริมกำลัง ด้วยไม้ไผ่ด้วยวิธีเฟอร์โรซีเมนต์

สำหรับการเตรียมตัวอย่างการทดสอบจะทำการก่อตัวอย่างแถวละ 4 ก้อน จำนวน 8 ชั้น ดังรูปที่ 3(ค) ทิ้งตัวอย่างไว้ 24 ชั่วโมง ให้ปูนก่อเซ็ตตัว หลังจากนั้นจะทำการเสริมกำลังผนังอิฐก่อด้วยไม้ไผ่ตามระยะห่าง ที่กำหนดคือ 50 ถึง 200 มม. นำมาวางทับกันเสมือนเป็นเหล็กตะแกรงตามระยะที่กำหนดแล้วใช้ลวดในการยึด ดังรูปที่ 2 และ 3(ข) โดยในการยึดไผ่เข้ากับผนังต้องทำการกีดผนังให้เป็นร่องตามระยะที่กำหนดและฝังไม้ไผ่ เข้าไปในผนังอิฐก่อ หลังจากนั้นทำการฉาบปูนให้มีความหนาด้านละ 10 มม. ทิ้งตัวอย่างไว้ที่อายุ 28 วันรอการทดสอบ









ตารางที่ 2 สัญลักษณ์ตัวอย่างอิฐที่ใช้ในงานวิจัย

ชนิดของผนังอิฐก่อ	สัญลักษณ์แทนตัวอย่างทดสอบ	ขนาดของตัวอย่าง (มม.) กว้าง x ยาว x หนา
ผนังอิฐมอญแบบไม่ฉาบ	CT1	600 x 600 x 60
ผนังอิฐมอญแบบฉาบ	CT2	620 x 620 x 75
ผนังอิฐก่อเสริมไม้ไผ่ระยะท่าง 50 มม.	W1	620 x 620 x 80
ผนังอิฐก่อเสริมไม้ไผ่ระยะท่าง 100 มม.	W2	620 x 620 x 80
ผนังอิฐก่อเสริมไม้ไผ่ระยะท่าง 150 มม.	W3	620 x 620 x 80
ผนังอิฐก่อเสริมไม้ไผ่ระยะท่าง 200 มม.	W4	620 x 620 x 80

# ผลการศึกษา

#### 1. ผลการทดสอบการรับกำลังอัดของอิฐมอญ

ผลการทดสอบการรับกำลังอัดของอิฐมอญ ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C170-90 [14] โดยเลือกตัวอย่างอิฐจำนวน 5 ก้อน เรียงกันแล้วทำการกดตัวอย่างจำนวน 3 ชุด จากการทดสอบได้ผลการรับ กำลังอัดเฉลี่ย 55.75 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 1.24 และมีค่าการดูดกลืนน้ำ เฉลี่ยร้อยละ 8.76 โดยเทียบเกณฑ์ที่สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 153-2540 [18] กำหนด อิฐมอญกลวงก่อแผงไม่รับน้ำหนักจัดอยู่ในชั้นคุณภาพระดับ ก ดังแสดงมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ตามตารางที่ 3 และเมื่อทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดของอิฐ 1 ก้อน ได้ผลการรับกำลังอัดเฉลี่ย 3 ก้อน เท่ากับ 41.66 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.816

ขั้นคุณภาพ	ค่าคูดกลืนน้ำสูงสุด % เฉลี่ย 5 ก้อน	ค่าดูดกลืนน้ำสูงสุด % เฉลี่ย 1 ก้อน
ก	10	12
ป	14	16
P	20	24

ตารางที่ 3 ค่าการดูดกลืนน้ำของอิฐแดงตามที่สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกำหนด

#### 2. ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของปริขึมอิฐก่อ

กำลังรับแรงอัดของปริซึมอิฐก่อได้ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1314-07 [14] โดยการนำอิฐ มาก่อโดยมีปูนก่อเป็นตัวเชื่อมประสานจำนวน 5 ก้อน แล้วทำการฉาบตัวอย่างให้เสมือนกับการก่อและฉาบ ในงานก่อสร้างทั่วไป จากการทดสอบได้ผลการรับกำลังอัดเฉลี่ย 3 ก้อน เท่ากับ 33.97 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 1.13 เมื่อเทียบกับกำลังรับแรงอัดของอิฐ 1 ก้อนพบว่ากำลังอัดปรึซึมอิฐก่อ มีกำลังรับแรงอัดลดลงเนื่องจากผลของอัตราส่วนชะลูดซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ [19] ได้กล่าวไว้ว่าอัตราส่วน ระหว่างความกว้างต่อความสูงหรือที่เรียกว่า อัตราส่วนความชะลูดส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดที่ลดลงของผนังอิฐก่อ

3. ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์สำเร็จที่ใช้ทำปูนก่อและปูนฉาบ

การทดสอบกำลังรับแรงอัดของปูนขีเมนต์สำเร็จที่ใช้ทำปูนก่อและปูนฉาบ วิธีทดสอบทำตามมาตรฐาน ASTM C349-97 ทำการควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อขีเมนต์ (Water-Cement Ratio w/c) เท่ากับ 0.35 สำหรับ ปูนขีเมนต์สำเร็จงานก่อ และควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อขีเมนต์ (Water-Cement Ratio w/c) เท่ากับ 0.40 สำหรับ ปูนขีเมนต์สำเร็จงานฉาบ ทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 7 14 และ 28 วัน จากผลการทดสอบดังรูปที่ 4 ปูนซีเมนต์ สำเร็จงานก่อได้ค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุ 7 14 และ 28 วัน จากผลการทดสอบดังรูปที่ 4 ปูนซีเมนต์ สำเร็จงานก่อได้ค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุ 7 14 และ 28 วัน มีค่าเท่ากับ 15.6 20.1 และ 21.8 Mpa ตามลำดับ สำทรับปูนซีเมนต์สำเร็จงานฉาบได้ค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุ 7 14 และ 28 วัน มีค่าเท่ากับ 11.0 12.55 และ 14.0 Mpa ตามลำดับ ซึ่งกำลังทั้งปูนก่อและปูนฉาบผ่านมาตรฐานอุตสาหกรรมที่กำหนดให้ต้องมากกว่า 2.5 Mpa ผลการทดสอบแสดงให้เห็นถึงการพัฒนากำลังรับแรงที่เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาของการบ่มซึ่งสอดคล้อง กับ [20] ได้กล่าวไว้ว่าระยะเวลาในการบ่มเกิดจากกลไกปฏิกิริยาเคมีระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ โดยเกิดปฏิกิริยา ไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์เป็นหลัก อนุภาคปูนซีเมนต์สัมผัสกับน้ำ ซีเมนต์จะทำปฏิกิริยากับน้ำเรียกว่า ไฮเดรชั่น ผลของปฏิกิริยาดังกล่าวจะก่อให้เกิดสารที่มีคุณสมบัติเชื่อมประสาน คือ Calcium Silicate Hydrate (CSH), Calcium Aluminate Hydrate (CAH) และ Calcium Hydroxide, Ca(OH)<sub>2</sub> เป็นผลทำให้กำลังอัดที่ได้มี การพัฒนาไปตามระยะเวลาของการบ่ม และงานก่อให้ค่ากำลังอัดสูงกว่า เนื่องจาก w/c ต่ำกว่า ปูนฉาบ อย่างไรก็ตามงานฉาบนิยมใช้ w/c ที่สูงกว่าเนื่องจากต้องการความสามารถทำงานได้ (Work Ability) ที่ดีกว่าปูนก่อ



รูปที่ 4 ค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงอัคของปูนซีเมนต์สำเร็จงานก่อและงานฉาบที่อายุการบ่ม 7 14 และ 28 วัน

#### 4. ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของไม้ไผ่

ผลกำลังรับแรงคึงของไม้ไผ่ชนิดไม้ไผ่ด้ามขวานได้ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D5034-21 [17] โดยการทดสอบเตรียมโดยการคึงด้วยเครื่อง UTM จากผลการทดสอบกำลังรับแรงคึงสูงสุดเฉลี่ยจำนวน 3 ตัวอย่างเท่ากับ 83.36 กิโลนิวตัน ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 1.13 และค่าโมดูลัสยึดหยุ่นของไม้ไผ่ด้ามขวาน แบบแห้งมีค่าเท่ากับ 77.8 MPa ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ [21] ได้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของไม้ไผ่ ในช่วง 52.64 - 87.69 MPa

#### 5. ผลการทดสอบผนังอิฐก่อภายใต้เพนดูลัมเทสหรือวิธีค้อนเหวี่ยง

ผลการทดสอบผนังอิฐก่อภายใต้เพนดูลัมเทสหรือวิธีค้อนเหวี่ยง ตามมาตรฐาน มอก. 2226-2548 [11] ทดสอบตัวอย่างที่อายุ 28 วัน จำนวนชุดละ 3 ตัวอย่าง ในการทดสอบตัวอย่างผนังอิฐก่อประกอบด้วย ผนังอิฐมอญแบบไม่ฉาบ (CT1) ผนังอิฐมอญแบบฉาบ (CT2) ผนังอิฐก่อเสริมกำลังด้วยไม้ไผ่ระยะท่าง 50 มม. (W1) ผนังอิฐก่อเสริมกำลังด้วยไม้ไผ่ระยะท่าง 100 มม. (W2) ผนังอิฐก่อเสริมกำลังด้วยไม้ไผ่ระยะท่าง 150 มม. (W3) และผนังอิฐก่อเสริมกำลังด้วยไม้ไผ่ระยะท่าง 200 มม. (W4) จากผลการทดสอบแสดง ในตารางที่ 4 และแสดงผลการเปรียบเทียบกำลังของผนังอิฐก่อดังรูปที่ 5

สัญลักษณ์แทน ตัวอย่างทดสอบ	ความสูงตกกระทบ (มิลลิเมตร)	มุมเทวี่ยง (องศา)	กำลังรับแรงกระแทก (นิวตัน-เมตร)
CT1	370.00	35.00	9.04
CT2	725.00	55.00	21.33
W1	1332.05	77.50	39.20
W2	1165.08	71.66	34.28
W3	915.05	62.50	26.92
W4	850.00	60.00	25.01

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบผนังอิฐก่อภายใต้แรงกระทำแบบค้อนเหวี่ยง



รูปที่ 5 กำลังรับแรงกระแทกของตัวอย่างผนังอิฐก่อที่อายุ 28 วัน

จากรูปที่ 5 แสดงกำลังรับแรงกระแทกของตัวอย่างผนังอิฐก่อที่อายุ 28 วัน พบว่าตัวอย่าง CT1 CT2 W1 W2 W3 และ W4 มีค่ากำลังรับแรงกระแทกเท่ากับ 9.04 21.33 39.2 34.28 26.92 และ 25.01 นิวตันเมตรตามลำคับ สำหรับตัวอย่างควบคุม CT2 เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่าง CT1 แสดงให้เห็นว่า การฉาบปูนที่ผนังอิฐก่อทำให้กำลังรับแรงกระแทกสูงขึ้น 2.36 เท่า เป็นผลมาจากแรงยึดเหนี่ยวและความหนา

ที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อกำลังรับแรงกระแทกของวัสคุประสานทำหน้าที่กระจายแรงเข้าหน้าตัดของตัววัสดุก่อ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ [22] ได้กล่าวไว้ว่ามอร์ต้าร์ปูนฉาบทำหน้าที่ยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุก่อส่งผลทำให้ ความสามารถของผนังอิฐก่อรับกำลังได้เพิ่มขึ้น

สำหรับการเปรียบเทียบตัวอย่างผนังอิฐก่อที่ทำการเสริมกำลังด้วยไม้ไผ่ตามระยะ 50 ถึง 200 มิลลิเมตร กับด้วอย่าง CT2 พบว่าผนัง W1 W2 W3 และ W4 ให้กำลังรับแรงกระแทกสูงขึ้น 1.83 1.61 1.26 และ 1.17 เท่า ตามลำดับ ตัวอย่าง W1 ให้ค่ากำลังสูงสุดแสดงให้เห็นว่าระยะของการเสริมกำลังด้วยไม้ไผ่ส่งผลกระทบ ต่อกำลังรับแรงกระแทกที่ลดลง กล่าวคือ ระยะที่กว้างขึ้นทำให้ผนังอิฐก่อลดลงอย่างมีนัยสำคัญซึ่งสอดคล้องกับ งานวิจัยของ [22] เป็นการเสริมกำลังด้วยตะแกรงเหล็กฉีก ได้กล่าวไว้ว่าการเสริมกำลังที่มีช่องตาข่ายที่ใหญ่ ส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดและแรงยึดเหนี่ยวที่ลดลง ผลกระทบดังกล่าวส่งผลกระทบโดยตรงของการเสริมกำลัง ด้วยวิธีเฟอร์โรซีเมนต์หรือที่เรียกว่า ผนังบาง ซึ่งต้องการแรงยึดเหนี่ยวระหว่างมอร์ต้าร์และวัสดุเชื่อมแรงยึดเหนี่ยว จำพวกวัสดุทอ เช่น ตะแกรงเหล็กฉีก ตะแกรงกรงไก่ เหล็กไวข์เมช เป็นต้น และเมื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติ ในการรับแรงกระแทกของวัสดุเสริมคานไม้ไผ่กับวัสดุอื่น ซึ่งมีงานวิจัยในต่างประเทศ โดยการใช้วัสดุพวกไฟเบอร์ เช่น Fiber Reinforced Polymer (FRP) วัสดุเสริมกำลัง Cabon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) และ วัสดุเสริมกำลัง Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) เมื่อเสริมกำลังผนังอิฐก่อให้แรงกระแทกเพิ่มขึ้น 2.0 ถึง 3.0 เท่า แสดงให้เห็นว่าการใช้ไม้ไผ่เสริมกำลังผนังอิฐก่อมีชืดความสามารถความสามารถไม่เท่ากับวัสดุ ไฟเบอร์เสริมกำลัง

#### 6. รูปแบบการวิบัติของผนังอิฐก่อ

ผนังอิฐมอญแบบไม่ฉาบ CT1 เมื่อเริ่มทำการทดสอบที่ 5 องศา ไม่เกิดรอยร้าว และเพิ่มขึ้นครั้งละ 5 องศา พบว่ามีค่าเฉลี่ยที่จะเกิดรอยร้าวที่ 10 องศา ของการเหวี่ยงค้อนในการกระแทกรอยร้าวเกิดขึ้นที่จุดกระแทกและ รอยร้าวจะเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งถึงที่องศาเฉลี่ย 35 องศา ซึ่งขิ้นงานเกิดการวิบัติที่วัสดุก่อและระหว่างอิฐ กับปูนก่อ โดยผนังแตกออกจากกัน เป็นลักษณะการวิบัติด้วยแรงกระแทกทำให้ตัวอย่างเกิดการแยกตัวของวัสดุก่อ

ผนังอิฐมอญแบบฉาบ CT2 และผนังอิฐก่อเสริมกำลังด้วยไม้ไผ่ W1 W2 W3 และ W4 เมื่อเริ่ม ทำการทดสอบที่ 5 องศา ไม่เกิดรอยร้าว และเพิ่มขึ้นครั้งละ 5 องศา พบว่ามีค่าเฉลี่ยที่จะเกิดรอยร้าวที่ 40 องศา ของการเหวี่ยงค้อนในการกระแทกรอยร้าวเกิดขึ้นที่จุดกระแทกและรอยร้าวจะเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่ง ถึงที่องศาเฉลี่ย 55.0 - 77.5 องศา ซึ่งขึ้นงานเกิดการวิบัติที่วัสดุก่อและระหว่างอิฐกับปูนก่อ โดยผนังแตกออกจากกัน เป็นลักษณะการวิบัติด้วยแรงกระแทกทำให้ตัวอย่างเกิดการทะลุเช่นเดียวกันกับตัวอย่าง CT1 ลักษณะการวิบัติ ดังตารางที่ 5

#### **ตารางที่** 5 รูปแบบการวิบัติของผนังอิฐก่อ



# **ตารางที่** 5 รูปแบบการวิบัติของผนังอิฐก่อ (ต่อ)



#### สรุปผลการศึกษา

ผลการศึกษาผนังอิฐก่อเสริมกำลังด้วยไม้ไผ่ภายใต้การทดสอบแบบค้อนเหวี่ยง ซึ่งตัวอย่างผนังอิฐก่อทั้ง 6 ตัวอย่าง ได้แก่ ผนังอิฐมอญแบบไม่ฉาบ (CT1) ผนังอิฐมอญแบบฉาบ (CT2) ผนังอิฐก่อเสริมกำลังด้วยไม้ไผ่ระยะห่าง 50 มม. (W1) ผนังอิฐก่อเสริมกำลังด้วยไม้ไผ่ระยะห่าง 100 มม. (W2) ผนังอิฐก่อเสริมกำลังด้วยไม้ไผ่ระยะห่าง 150 มม. (W3) และผนังอิฐก่อเสริมกำลังด้วยไม้ไผ่ระยะห่าง 200 มม. (W4) ได้ผลสรุปดังนี้

 การฉาบและไม่ฉาบผนังอิฐก่อด้วยวัสดุประสานมีผลกระทบโดยตรงกับการรับแรงกระแทกของ ผนังอิฐก่อ โดยผนังอิฐก่อที่มีการฉาบปูนฉาบจะส่งผลโดยตรงต่อผนังอิฐก่อโดยเพิ่มกำลังและความแข็งแรงให้ กับผนังอิฐก่อ

2. ผลการทดสอบเพนดูลัมเทสของผนังอิฐก่อสำหรับผนังอิฐก่อที่ทำการเสริมกำลังด้วยไม้ไผ่ตามระยะ
 50 ถึง 200 มิลลิเมตร เปรียบเทียบกับตัวอย่างผนังอิฐมอญแบบฉาบ (CT2) พบว่าผนัง W1 W2 W3 และ W4
 ให้กำลังรับแรงกระแทกสูงขึ้น 1.83 1.61 1.26 และ 1.17 เท่า ตามลำดับ

 ระยะการวางเสริมไม้ไผ่ส่งผลกระทบต่อกำลังรับแรงกระแทกที่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยระยะวางยิ่งท่างมากเท่าไรกำลังรับแรงกระแทกก็จะลดลงตามไปด้วย เนื่องจากการเสริมกำลังด้วยวิธี เฟอร์โรซีเมนต์ซึ่งต้องการแรงยึดเหนี่ยวระหว่างมอร์ต้าร์และวัสดุเชื่อมแรงยึดเหนี่ยวจำพวกวัสดุทอเพื่อสร้าง ขั้นผนังบางทำหน้าที่รับแรงกระแทก ดังนั้นวัสดุทอยิ่งมีระยะที่ถื่มากเท่าไรก็ส่งผลต่อกำลังรับแรงได้ดีขึ้น 4. การวิบัติของผนังอิฐก่อที่ไม่มีการเสริมกำลังจะวิบัติแบบเลื่อนไถลในผนังอิฐก่อโดยจะเกิดการ แตกหักของอิฐแยกออกจากมอร์ต้าร์เมื่อได้รับแรงกระแทกแบบค้อนเหวี่ยงเกิดความเสียหายที่ปูนฉาบและ ตัวของอิฐก่อ ส่วนการวิบัติของผนังอิฐก่อที่มีการเสริมกำลังด้วยไม้ไผ่จะวิบัติแบบการกระแทกทำให้ตัวอย่าง เกิดการทะลุ อย่างไรก็ตามตัวอย่างผนังอิฐก่อไม่เกิดการแยกตัวของผนังเหมือนตัวอย่างที่ไม่ได้ทำการเสริมกำลัง

#### กิตติกรรมประกาศ

้ผู้วิจัยขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมโยธาคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือที่อนุเคราะห์ ให้ใช้พื้นที่ อุปกรณ์และห้องทดสอบในงานวิจัยครั้งนี้

### References

- [1] Meteorological Department. (2017). Earthquake Report in Thailand and Adjacent Areas in June 2017 Seismological Bureau. Access (23 July 2023). Available (https://earthquake.tmd. go.th/report/file/seismo-report-1504512433.pdf) (in Thai)
- [2] Albert, M. L., Elwi, A. E., and Cheng, J. J. R. (2001). Strengthening of Unreinforced Masonry Walls using FRPs. Journal of Composite for Construction. Vol. 5, No. 2, pp.76-84. DOI: 10.1061/(ASCE) 1090-0268(2001)5:2(76)
- [3] Ghobarah, A. and El Mandooh Galal, K. (2004). Out-of-Plane Strengthening of Unreinforced Masonry Walls with Openings. Journal of Composites for Construction. Vol. 8, No. 4, pp. 298-305.
   DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0268(2004)8:4(298)
- [4] Gilstrap, J. M. and Dolan, C. W. (1998), Out-of-plane Bending of FRP-ReinforcedMasonry Walls. Composites Science and Technology. Vol. 58, No. 8, pp. 1277-1284. DOI:10.1016/ S0266-3538(98)00007-4
- [5] Hamilton, H. R. and Dolan, C. W. (2001). Flexural Capacity of Glass FRP Strengthened Concrete Masonry Walls. Journal of Composites for Construction. Vol. 5, No. 3, pp.170-178. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0268(2001)5:3(170)
- [6] Hamoush, S. A., McGinley, M. W., Mlakar, P., Scott, D., and Murray, K. (2001). Out-of-Plane Strengthening of Masonry Walls with Reinforced Composites. Journal of Composites for Construction. Vol. 5, No. 3, pp. 139-145. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0268(2001)5:3(139)
- Kiss, R. M., Kollar, L. P., Jai, J., and Krawinkler, H. (2002). Masonry Strengthened with FRP Subjected to Combined Bending and Compression, Part II: Test Results and Model Predictions.
   Journal of Composite Materials. Vol. 36, No. 9, pp. 1049-1063. DOI: 10.1177/0021998302036009475
- [8] Saileysh Sivaraja, S., Thandavamoorthyb, T. S., Vijayakumarc, S., Mosesaranganathana, S., Rathnasheelad, P. T., and Dasarathye, A. K. (2013). GFRP Strengthening and Applications of Unreinforced Masonry Wall (UMW). Procedia Engineering. Vol. 54, pp. 428-439. DOI: 10.1016/ j.proeng.2013.03.038
- Kahn, L. F. (1984). Shotcrete Strengthening of Brick Masonry Walls. Concrete International: Design and Construction. Vol. 6, No. 7, pp. 34-39
- Schmidt, M. E. and Cheng, L. (2009). Impact Response of Externally Strengthened Unreinforced Masonry Walls using CFRP. Journal of composites for Construction. Vol. 13, No. 4, pp. 252-261.
   DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000011

- [11] Standard of Precast Concrete Wall Panels. Thai Industrial Standard Institute. TISI 2226/2005.
- [12] James, E. (2000). **The Simple Pendulum**. Access (15 May 2023). Available (http://www.phys. utk.edu/labs/simplependulum.pdf)
- [13] Standard Portland Cement. Thai Industrial Standard Institute. TISI 15/2019.
- [14] Standard Test Method for Compressive Strength of Dimension Stone. American Society for Testing and Materials. ASTM C170-90.
- [15] Standard Test Method for Compressive Strength of Masonry Prisms. American Society for Testing and Materials. ASTM C1314-07.
- [16] Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars. American Society for Testing and Materials. ASTM C349-97.
- [17] Standard Test Method for Breaking Strength and Elongation of Textile Fabrics (Grab Test).American Society for Testing and Materials. ASTM D5034-21.
- [18] Standard of Structural Clay Nonloadbearing Screen Tiles. Thai Industrial Standard Institute. TISI 153/1997.
- [19] Leeanansaksiri, A. (2022). A Study of Compressive Strength on Masonry Infilled Walls under Pendulum Test. In The 9<sup>th</sup> National and the 7<sup>th</sup> International Conference on Research and Innovation Development for the Next Normal Society: Transition from the New Normal. pp. 503-514. (in Thai)
- [20] Lea, F. M. (2019). The Chemistry of Cement and Concrete. (5th ed). Butterworth-Heinemann
- [21] Ounjaijom, T., Maneeinta, N., and Punyacum, W. (2017). Mechanical Properties of Five Species Dried Bamboo. Srinakharinwirot University Engineering Journal. Vol. 12, No. 2, pp. 8-14 (in Thai)
- [22] Leeanansaksiri, A., Panyakapo, P., and Ruangrassamee, A.(2018). Seismic Capacity of Masonry Infilled RC Frame Strengthening with Expanded Metal Ferrocement. Engineering Structures. Vol. 159, pp. 110-127. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.12.034

# การหาค่าเหมาะสมที่สุดในการเคลือบผิวเซ็นเซอร์เทอร์มิสเตอร์โดยใช้ หลักการ DMAIC Optimization in the Cotating Thermistor Sensors Using the Principle DMAIC

บรรพจน์ มีสา<sup>1</sup> และวีระพล ทับทิมดี<sup>1</sup> Banpot Meesa<sup>1</sup> and Weerapol Taptimdee<sup>1</sup>

Received: September 25, 2023; Revised: November 30, 2023; Accepted: December 20, 2023

#### บทคัดย่อ

การทาค่าเหมาะสมที่สุดในการเคลือบผิวเซ็นเซอร์เทอร์มิสเตอร์โดยใช้หลักการ DMAIC มีวัตถุประสงค์เพื่อ ค่าเหมาะสมที่สุดในการเคลือบผิวเซ็นเซอร์เทอร์มิสเตอร์โดยใช้หลักการ DMAIC โดยปรับปรุงวิธีการทำงาน ตามหลักการของ DMAIC พบว่าปริมาณการใช้น้ำยาเคลือบผิวมีการเหลือทิ้งมากเกินไปจากภาชนะที่ใช้ใส่น้ำยาจุ่ม จึงทำการออกแบบใหม่พบว่า ถาดใหม่ที่มีขนาดปริมาตร 170,100 ลูกบาศก์มิลลิเมตร ปริมาณน้ำยาเคลือบผิวที่ใช้ 200.20 กรัม จากการเปลี่ยนขนาดภาชนะทำให้น้ำยาเคลือบผิวลดลงร้อยละ 30 การใช้น้ำยาเคลือบผิวที่ใช้ 73.63 กรัมต่อ 1,000 ชิ้น การออกแบบจำลองหาค่าเหมาะสมที่สุดจุดคุ้มทุนอยู่ที่ 3,600 ชิ้น จุ่ม 30 ครั้ง ปริมาณน้ำยาเคลือบผิวที่ใช้ 465.40 กรัม ร้อยละน้ำยาเคลือบผิวที่ใช้ 56.98 ผลการใช้น้ำยาเคลือบผิวจำนวน 93,427 ชิ้น ใช้ปริมาณน้ำยาเคลือบผิวไป 8,335.13 กรัม โดยใช้เคลือบผิว 5,732.53 กรัม คิดเป็นร้อยละการใช้ น้ำเคลือบผิวร้อยละ 68.71 การเปรียบเทียบกับการทำงานที่ได้ใช้น้ำยาเคลือบผิวร้อยละ 47.67 ความแตกต่าง อยู่ที่ร้อยละ 21.04 สูตรการทาค่าเหมาะสมคือ Z min = 200.20 + 8.84X

คำสำคัญ : ค่าเหมาะสมที่สุด; หลักการ DMAIC; เซ็นเซอร์เทอร์มิสเตอร์

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์ ฉะเชิงเทรา

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Faculty of Industrial Technology, Rajabhat Rajanagarindra University, Chachoengsao

<sup>\*</sup> Corresponding Author, Tel. 08 9558 7782, E - mail: banpotmeesa@gmail.com

# Abstract

An Optimization in the coating thermistor sensors using the principle DMAIC. have objective In order to Optimization the coating of the thermistor sensor surface using the principle DMAIC. By improving the working method according to the DMAIC principle, it was found that the amount of coating solution used was too much left over from the container used to hold the dipping solution. So a new design was made. The research found that A new tray with a volume of 170,100 cubic millimeters. 200.20 grams of coating solution. The change of container size caused the coating to decrease by 30 % usage73.63 grams of coating per 1,000 pieces. Design Simulate find Optimization value the break-even point is 3,600 pieces, 30 times. The amount of coating used is 465.40 grams coating 56.98 %. The use of 93,427 coatings was 8,335.13 grams using coatings of 5,732.53 grams or 68.71 % of coatings compared with 47.67 % of coatings. The difference was 21.04 %. The optimal formulation was Z min = 200.20 + 8.84X.

Keywords: Optimization Value; DMAIC Process; Thermistor Sensors

#### บทนำ

อุตสาหกรรมเครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ เป็นอุตสาหกรรมที่เข้ามามีบทบาทสำคัญต่อระบบเศรษฐกิจไทย ตลอดหลายสิบปีที่ผ่านมา เนื่องจากช่วยสร้างรายได้จากการส่งออกและการจ้างงานเป็นจำนวนมาก โดยไทย ถือเป็นหนึ่งในประเทศที่มีศักยภาพในการผลิตเครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์อยู่สูงมาก โดยเฉพาะด้านทรัพยากร มนุษย์และภูมิศาสตร์ อุตสาหกรรมจึงมีการเติบโตมาอย่างต่อเนื่อง โดยปัจจุบันไทยเป็นผู้ส่งออกเครื่องใช้ไฟฟ้า และอิเล็กทรอนิกส์สำคัญของโลก1 ในหลายผลิตภัณฑ์ อาทิ เครื่องปรับอากาศ (อันดับที่ 2) เครื่องซักผ้า (อันดับที่ 2) คอมเพรสเซอร์ (อันดับที่ 6) ตู้เย็น (อันดับที่ 8) และฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์: HDD (อันดับที่ 2 ของโลก) [1] ดังนั้น ผู้ประกอบการจึงต้องทาแนวทางในการปรับปรุงผลิตภัณฑ์ของตนให้ทันกับการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา และ สามารถตอบสนองความต้องการของลูกค้าได้ โดยคำนึงถึงคุณภาพของสินค้า ต้นทุนที่ต่ำ และการส่งมอบ สินค้าที่ตรงเวลาซึ่งจำเป็นจะต้องปรับปรุงกระบวนการผลิตและอาศัยการบริหารการจัดการที่ดี งานวิจัยนี้ จึงมุ่งเน้น ที่จะปรับปรุงกระบวนการผลิตโดยลดความสูญเปล่าที่ไม่ก่อให้เกิดมูลค่าเพิ่มในการผลิต เพื่อลดต้นทุนในการผลิต และยังคงรักษาระดับคุณภาพของสินค้าให้คงเดิม ซึ่งความสูญเปล่าเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลให้เกิดต้นทุนในการผลิต และประสิทธิภาพการทำงานที่ไม่ดี ดังนั้น จึงควรทำการปรับปรุงแก้ไขกระบวนการผลิตเพื่อลดความสูญเปล่า ที่เกิดขึ้นต่อไป [2]

สำหรับภาพรวมสถานการณ์อุตสาหกรรมเครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ปี พ.ศ. 2562 ขยายตัวร้อยละ 1.0 (%yoy) โดยดัชนีผลผลิตอุตสาหกรรมกลุ่มเครื่องใช้ไฟฟ้าจะอยู่ในภาวะหดตัวต่อเนื่องที่ร้อยละ -0.22 (%yoy) เนื่องจากความต้องการจากทั้งในและต่างประเทศอยู่ในภาวะอิ่มตัว หลังเติบโตสูงในช่วง 2-3 ปีที่ผ่านมา โดยสินค้าหลักที่ปรับตัวลดลง ได้แก่ เครื่องปรับอากาศ ตู้เย็น และมอเตอร์ไฟฟ้า ประกอบกับแนวโน้ม การเติบโตของเศรษฐกิจโลกเริ่มกลับเข้าสู่ช่วงชะลอตัวอีกครั้งเป็นปัจจัยกดคันอุตสาหกรรมกลุ่มเครื่องใช้ไฟฟ้า ให้อยู่ในภาวะหดตัวต่อไป [3]

กลุ่มอิเล็กทรอนิกส์จะมีอัตราการเติบโตชะลอตัวลงเหลือเพียงร้อยละ 1.62 (%yoy) จากสินค้าอิเล็กทรอนิกส์ เช่น วงจรรวม (IC) เซมิคอนดักเตอร์ และฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (HDD) ทั้งนี้กลุ่มอิเล็กทรอนิกส์จะได้รับผลกระทบ โดยตรงจากการเติบโตของเศรษฐกิจโลกมีแนวโน้มชะลอตัว โดยสินค้ากลุ่มอิเล็กทรอนิกส์ที่จะได้รับผลกระทบ โดยตรง เช่น ฮาร์ดดิสไดรฟ์, แผงวงจรไฟฟ้า และวงจรพิมพ์ เป็นต้น ซึ่งปัจจัยเหล่านี้จะส่งผลให้อัตราการเติบโต ของอุตสาหกรรมกลุ่มอิเล็กทรอนิกส์อยู่ในภาวะชะลอตัว [3]

จากข้อมูลเดือนธันวาคม พ.ศ. 2563 มีผู้ประกอบการในอุตสาหกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ มีจำนวน 2,587 ราย ประกอบด้วยผู้ประกอบการในอุตสาหกรรมขึ้นส่วนไฟฟ้าจำนวน 717 ราย อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ จำนวน 618 ราย อุตสาหกรรมไฟฟ้าจำนวน 468 ราย และอื่น ๆ จำนวน 784 ราย หากจำแนกตามขนาดธุรกิจ พบว่า มีผู้ประกอบการขนาดเล็กจำนวน 1,552 ราย ซึ่งส่วนใหญ่เป็นผู้ประกอบการสัญชาติไทย ผู้ประกอบการ ขนาดกลางจำนวน 560 ราย และผู้ประกอบการขนาดใหญ่จำนวน 475 รายส่วนจำนวนแรงงานในอุตสาหกรรม ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์จำนวน 371,340 อุตสาหกรรมขึ้นส่วนไฟฟ้าจำนวน 187,497 ราย อุตสาหกรรมไฟฟ้าจำนวน 98,058 ราย และอื่น ๆ จำนวน 97,907 ราย [4]

มีมูลค่าการส่งออก 5,700.87 ล้านเทรียญสทรัฐ ปรับตัวเพิ่มขึ้นจากเดือนก่อนร้อยละ 8.94 และ เมื่อเทียบกับเดือนเดียวกันของปีก่อนปรับตัวเพิ่มขึ้นร้อยละ 15.54 ในทุกตลาดส่งออกหลัก โดยสินค้าที่ปรับตัว เพิ่มขึ้น ได้แก่ อุปกรณ์ประกอบของเครื่องคอมพิวเตอร์วงจรรวมและไมโครแอสแซมบลี (Integrated Circuits) และเครื่องปรับอากาศ เป็นต้นสถานการณ์การส่งออกของสินค้าไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ปี พ.ศ. 2563 มีมูลค่า การส่งออก 59,490.20 ล้านเหรียญสหรัฐ มีการปรับตัวลดลงร้อยละ 0.51 เมื่อเทียบกับปีก่อน โดยปรับตัวลดลง ในตลาดส่งออกหลัก ได้แก่ตลาดเม็กซิโก ตลาดอาเซียน ตลาดสหภาพยุโรป ตลาดญี่ปุ่น และตลาดฮ่องกง สินค้าที่ปรับตัวลดลง ได้แก่ อุปกรณ์ประกอบของเครื่องคอมพิวเตอร์วงจรรวมและไมโครแอสแซมบลี (Integrated Circuits) และเครื่องปรับอากาศ เป็นต้น [4]

จากบริษัทผลิตขึ้นส่วนอิเล็คทรอนิคแห่งหนึ่งที่พบปัญหาอย่างมากกับการผลิตในกระบวนการเคลือบผิว ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ (เซ็นเซอร์ เทอร์มิสเตอร์) จากการรวบรวมข้อมูลจากกรณีศึกษา กระบวนการผลิต ระหว่างเคือนพฤษภาคมถึงเคือนตุลาคม ปี พ.ศ. 2563 (Resin) เหลือทิ้งเป็นปริมาณมากที่สุด และเป็นสาเหตุเดียว ที่ไม่สามารถนำ (Resin) ที่เกิดขึ้นกลับมาเข้าสู่กระบวนการทำซ้ำ (Rework) ได้จากปัญหา (Resin) เหลือทิ้ง ปริมาณมากที่เกิดขึ้นดังกล่าว คณะผู้วิจัยมีความสนใจที่จะลดปริมาณ (Resin) ที่ทิ้ง ทิ้งให้น้อยลงกว่าเดิม ในกระบวนการเคลือบผิว เซ็นเซอร์ เทอร์มิสเตอร์โดยนำขั้นตอน DMAIC [5] มาช่วยในการแก้ไขปรับปรุง กระบวนการเคลือบผิว เซ็นเซอร์ เทอร์มิสเตอร์โดยนำขั้นตอน DMAIC [5] มาช่วยในการแก้ไขปรับปรุง กระบวนการผลิต และแนวคิดเกี่ยวกับวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรมนำมาใช้ปรับปรุงกระบวนการผลิต [6] เพื่อให้เกิดมูลค่าเพิ่มในด้านการผลิต [7] ลดค่าใช้จ่ายสูญเปล่า ลดของเสียในกระบวนการผลิต [8] - [10] เพื่อที่จะให้อุตสาหกรรมมีการแข่งขันในปัจจุบันและอนาคต [11] ที่จะมาถึง โดยวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ เพื่อหาค่าเหมาะสมที่สุดในการเคลือบผิวเซ็นเซอร์เทอร์มิสเตอร์โดยใช้หลักการ DMAIC

# วิธีการดำเนินการวิจัย

#### 1. ขั้นตอน Define

ในขั้นตอน Define เป็นการกำหนดสถานที่ในการทำงาน การระดมสมองร่วมกับผู้ที่เกี่ยวข้อง เพื่อค้นทาปัญหาที่เกิดขึ้นกับการทาค่าเหมาะสมที่สุดในการผลิตขิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ (เซ็นเซอร์ เทอร์มิสเตอร์) จากการระดมสมองเพื่อพิจารณาทาปริมาณน้ำยาให้เหมาะสมที่สุดในการผลิต เกิดขึ้นจากผลการผลิตที่ได้ออกมา ทำให้ทราบว่า การใช้น้ำยาเคลือบผิวไม่เกินร้อยละ 46.32 ของน้ำยาเคลือบผิวส่งผลให้น้ำยาเคลือบผิวที่ใช้ ไม่สอดคล้องกับการเคลือบ [12] ดังนั้นจึงมีการระดมสมองว่าสามารถที่จะลดน้ำยาเคลือบผิวในการทิ้ง ให้น้อยลงกว่าเดิมซึ้งทิ้งถึงร้อยละ 53.68 สาเหตุเดียวที่ทำให้เกิดปริมาณน้ำยามากเกินไปในกระบวนการผลิต ขิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ (เซ็นเซอร์ เทอร์มิสเตอร์) โดยไม่สามารถนำกลับเข้าสู่กระบวนการทำซ้ำ (Rework) ได้ คือ น้ำยาหมดอายุการใช้งาน และคิดทาวิธีการที่จะทำการเคลือบให้ได้มากที่สุด หรือเหมาะสมที่สุด การวิจัยครั้งนี้ เพื่อสร้างความน่าเชื่อถือให้เกิดขึ้น และไม่ส่งผลต่อคุณภาพของขิ้นงานด้วย

#### 2. ขั้นตอน Measure

ในกระบวนการ Measure เป็นการวัดข้อมูลที่เก็บรวบรวมข้อมูลในการทำการวิจัย เพราะว่า ถ้าการ เก็บรวบรวมข้อมูลนั้นมีความผิดพลาดก็จะส่งผลให้จุดประสงค์ที่ตั้งไว้ในการวิจัยไม่ตรงตามที่กำหนดไว้ตั้งแต่ต้น โดยมีระยะเวลาที่ใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูลจากใบตรวจสอบกระบวนการผลิต ซึ่งเป็นข้อมูลจากแผนกประกัน คุณภาพ และแผนกวางแผนของบริษัท ก่อนทำการปรับปรุงแก้ไขช่วงเดือนกรกฎาคมถึงเดือนธันวาคม ปี พ.ศ. 2563 ดังตารางที่ 1 และช่วงเดือนมกราคมถึงเดือนมีนาคม ปี พ.ศ. 2564 ดังตารางที่ 2

เดือน	ชิ้นงานที่ผลิต(ขึ้น)	ชิ้นงานได้คุณภาพ(ชิ้น)	ร้อยละ
กรกฎาคม	93,354	93,236	99.87
สิงหาคม	85,235	85,235	100.00
กันยายน	111,542	111,542	100.00
ตุลาคม	198,087	198,087	100.00
พฤศจิกายน	89,061	89,061	100.00
ธันวาคม	120,840	120,840	100.00
มกราคม	67,938	67,938	100.00
กุมภาพันธ์	105,592	105,592	100.00
มีนาคม	102,984	102,088	99.13
รวม	974,633	973,619	99.88
ค่าเฉลี่ย	108,293	108,180	99.88

a .	y a	Å 1 A 6	<u>م ۲ ا</u>			a a	
ตารางท 1	ขอมูลการผลด	าชนสวนอเลก	ทรอนกสชวง	กรกฎาคม	พ.ศ. 2563	ถง มนาคม	พ.ศ. 2564

จากตารางที่ 1 พบว่า ขึ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ (เซ็นเซอร์ เทอร์มิสเตอร์) ที่ผลิตเดือนกรกฎาคม ชิ้นงานผลิตทั้งหมด 93,354 ชิ้น ชิ้นงานได้คุณภาพ 93,236 ชิ้น ร้อยละงานดี 99.87 เดือนสิงหาคมชิ้นงานผลิต ทั้งหมด 85,235 ชิ้น ชิ้นงานได้คุณภาพ 85,235 ชิ้น ร้อยละงานดี 100.00 เดือนกันยายนชิ้นงานผลิตทั้งหมด 111,542 ชิ้น ชิ้นงานได้คุณภาพ 111,542 ชิ้น ร้อยละงานดี 100.00 เดือนตุลาคมชิ้นงานผลิตทั้งหมด 198,087 ชิ้น ชิ้นงานได้คุณภาพ 198,087 ชิ้น ร้อยละงานดี 100.00 เดือนพฤศจิกายนชิ้นงานผลิตทั้งหมด 89,061 ชิ้น ชิ้นงานได้คุณภาพ 89,061 ชิ้น ร้อยละงานดี 100.00 เดือนอันวาคมชิ้นงานผลิตทั้งหมด 89,061 ชิ้น ชิ้นงานได้คุณภาพ 89,061 ชิ้น ร้อยละงานดี 100.00 เดือนอันวาคมชิ้นงานผลิตทั้งหมด 120,840 ชิ้น ชิ้นงาน ได้คุณภาพ 120,840 ชิ้น ร้อยละงานดี 100.00 เดือนมกราคมชิ้นงานผลิตทั้งหมด 67,938 ชิ้น ชิ้นงานได้คุณภาพ 67,938 ชิ้น ร้อยละงานดี 100.00 เดือนกุมภาพันธ์ชิ้นงานผลิตทั้งหมด 105,592 ชิ้น ชิ้นงานได้คุณภาพ 105,592 ชิ้น ร้อยละงานดี 100.00 เดือนมีนาคมชิ้นงานผลิตทั้งหมด 102,984 ชิ้น ชิ้นงานได้คุณภาพ 102,088 ชิ้น ร้อยละงานดี 99.13 ที่ผลิตทั้งหมดในช่วงเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2563 ถึงมีนาคม พ.ศ. 2564 พบว่า ชิ้นงานผลิต ทั้งหมด 974,633 ชิ้น ชิ้นงานได้คุณภาพ 973,619 ชิ้น ร้อยละของงานดี 99.88

#### 3. ขั้นตอน Analyze

ในกระบวนการ Analyze เป็นขั้นตอนการวิเคราะท์ค้นทาสาเหตุของปัญหาที่เกิดขึ้น และการค้นทา ต้นตอของสาเหตุที่ทำให้เกิดการใช้น้ำยาที่มากไม่เหมาะในกระบวนการทำงาน วิเคราะท์สาเหตุปัญหาตามหลัก ทฤษฏี และระบุปัญหาที่แท้จริงได้ เพื่อเป็นแนวทางในการแก้ไข โดยเริ่มจากการวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้นได้รับ มาจากกระบวนการเชื่อม โดยคิดจากการเก็บข้อมูลการใช้ปริมาณน้ำยาที่ใช้เคลือบ โดยเลือกเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2563 ที่มีผลการผลิตได้ขึ้นงานทั้งหมด 89,061 ชิ้น ชิ้นงานได้คุณภาพ 89,061 ชิ้น ร้อยละงานดี 100.00

້	สี่บงานที่แลิต	ปริมาณน้ำยาเคลือบ	น้ำยาเคลือบใช้ไป	น้ำยาเคลือบเหลือ	ร้อยละน้ำยาที่ใช้
FIJUN		(ขึ้น)	(กรัม)	(กรัม)	(กรัม)
1	5,885	1,020	458	562	44.90
2	8,033	1,080	578	502	53.52
3	5,588	960	403	557	41.98
4	6,921	1,080	567	513	52.50
5	7,057	1,140	605	535	53.07
6	6,996	1,080	522	558	48.33
7	5,684	1,020	416	604	40.78
8	6,859	1040	507	533	48.75
9	6,671	1,020	475	454	46.57
10	8,094	1,200	611	589	50.92
11	5,602	1,080	424	656	39.26
12	8,079	1,320	646	674	48.94
13	7,592	1,200	577	623	48.08
รวม	89,061	14,240	6,789	7,360	47.67
ค่าเฉลี่ย	6,851	1,095.38	522.23	566.15	47.67

ตารางที่ 2 ข้อมูลคุณภาพชิ้นงานที่ไม่เปลี่ยนแปลงต่อน้ำยาเคลือบในช่วงพฤศจิกายน พ.ศ. 2563

จากตารางที่ 2 แสดงจำนวนการวิเคราะห์ข้อมูลจากการเก็บข้อมูลเพื่อหาปริมาณน้ำยาที่ใช้ในการ ผลิตขิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ (เซ็นเซอร์ เทอร์มิสเตอร์) ในเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2563 จำนวน 89,061 ขิ้น ใช้ปริมาณน้ำยาเคลือบผิวไป 14,240 กรัม โดยใช้เคลือบ 6,789 กรัม เหลือทิ้ง 7,360 กรัม คิดเป็นร้อยละ การใช้น้ำยาเคลือบผิว ร้อยละ 47.67 เมื่อทำการค่าเฉลี่ยจำนวนชิ้นงาน 6,850.85 ขิ้น ใช้ปริมาณน้ำยาเคลือบผิวไป 1,095.38 กรัม โดยใช้ไป 522.23 กรัม เหลือทิ้ง 566.15 กรัม คิดเป็นร้อยละน้ำยาเคลือบผิวเหลือทิ้งร้อยละ 52.33 จากตารางมีการใช้น้ำยาเคลือบผิวต่ำกว่าร้อยละ 50 อยู่ 9 ครั้ง

#### 4. ขั้นตอน Improve

ในขั้นตอน Improve เป็นการปรับปรุงแก้ไขสาเหตุและกระบวนการทำงาน [13] ที่การใช้น้ำยา ในการเคลือบผิวไม่ถึงร้อยละ 50 ของน้ำยาเคลือบผิวในแต่ละครั้งในกระบวนการผลิตขิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ (เซ็นเซอร์ เทอร์มิสเตอร์) ที่ได้หลังจากการเก็บรวบรวมข้อมูล และทำการวิเคราะห์ข้อมูลปริมาณการใช้น้ำยา เคลือบผิวที่ได้ เดือนพฤศจิกายน ปี พ.ศ. 2563 แล้วทำการทดลองในการลดปริมาณน้ำยา เดือนมกราคมถึง เดือนมีนาคม ปี พ.ศ. 2564 ก็จะเป็นการปรับปรุงทำการแก้ไข ดังนี้

#### 4.1 การเลือกกลุ่มตัวอย่างในการทดลอง

การเลือกกลุ่มตัวอย่างที่ใช้การลดปริมาณน้ำยาในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ (เซ็นเซอร์ เทอร์มิสเตอร์) ในการลดน้ำยาในการเคลือบเพื่อให้ได้น้ำยาที่เหมาะสมในการเคลือบชิ้นงานทั้งหมด โดยใช้สูตรการทากลุ่มตัวอย่างแบบอย่างง่ายของทาโรยามาเน่ [14] ในการคำนวณเพื่อกำหนดขนาดของ กลุ่มตัวอย่างในการทดลอง และมีระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยยอมให้คลาดเคลื่อนร้อยละ 5 โดยที่ชิ้นงาน เดือนมกราคม 67,938 ชิ้น ได้กลุ่มตัวอย่าง 397.65 ชิ้น ชิ้นงานเดือนกุมภาพันธ์ 105,592 ชิ้น ได้กลุ่มตัวอย่าง 398.49 ชิ้น ชิ้นงานเดือนมีนาคม 102,984 ชิ้น ได้กลุ่มตัวอย่าง 398.45 ชิ้น ดังนั้นจึงปรับชิ้นงานตัวอย่าง เป็น 400 ชิ้นเท่ากันทั้งหมด

เดือน	ขิ้นงานทั้งหมด (ขิ้น)	จำนวนขึ้นงานตัวอย่าง (ขึ้น)	จำนวนขึ้นงานเสียจากตัวอย่าง (ขิ้น)
มกราคม	67,938	400	0
กุมภาพันธ์	105,592	400	0
มีนาคม	102,984	400	0
รวม	276,514	1,200	0

4		-	2			1 64		~	-	~	~		
ຕາອາໜີ ?	ລົງຈາ	ເລລັງຈາ	างเดียา	າງແຕ້ງລ	612.99	ส่วงเดือง	ແພລຂາ	ดมฉีง	ເລື້ວ	งเฉียาวด	an St	MI 0	2561
כוזעונווי	ิ ดดท	เดงเน	14041	าเหตาย	עוט	ם ואזתר ם	เยานม	ะเทยเก	เตอ	นมน Ir	าท ก	M.M.	2304
	ย												

จากตารางที่ 3 พบว่า จำนวนขึ้นงานตัวอย่างที่จะใช้ในการเคลือบผิว เดือนมกราคมถึงเดือนมีนาคม พ.ศ. 2564 จำนวนชิ้นงานที่ทำการผลิตทั้งหมด 276,514 ชิ้น จำนวนชิ้นงานตัวอย่างที่ได้คือ 400 ชิ้น ต่อ 1 เดือน จากทั้งหมด 3 เดือน จะได้ชิ้นงานทั้งหมด 1,200 ชิ้น ในการเคลือบ

4.2 การทดลองการเคลือบผิวในถาด

จากการระดมสมองเพื่อพิจารณาทาปริมาณน้ำยาให้เหมาะสมที่สุดในการผลิต เกิดขึ้นจากผลการผลิตที่ได้ออกมา ทำให้ทราบว่า การใช้น้ำยาเคลือบผิวไม่เกินร้อยละ 46.32 ของน้ำยาเคลือบผิว ส่งผลให้น้ำยาเคลือบผิวที่ใช้ไม่สอดคล้องกับการเคลือบ ดังนั้นจึงมีการระดมสมองว่าสามารถที่จะลดน้ำยาเคลือบผิว ในการทิ้งให้น้อยลงกว่าเดิมซึ้งทิ้งถึงร้อยละ 53.68 สาเหตุเดียวที่ทำให้เกิดปริมาณน้ำยามากเกินไปในกระบวนการ ผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ (เซ็นเซอร์ เทอร์มิสเตอร์) โดยไม่สามารถนำกลับเข้าสู่กระบวนการทำซ้ำ (Rework) ได้ คือ น้ำยาหมดอายุการใช้งาน และคิดหาวิธีการที่จะทำการเคลือบให้ได้มากที่สุดหรือเหมาะสมที่สุด โดยพิจารรณา ที่ถาดในการเคลือบผิวว่าสามารถลดปริมาณาการเติมน้ำยาลงไป [15] เพื่อไม่ส่งผลต่อคุณภาพของชิ้นงาน

4.2.1 การออกแบบถาดใหม่

จากเดิมใช้ภาชนะที่มีขนาด กว้าง×ยาว×สูง = 90×300×9 mm. ได้ปริมาตร 243,000 ลูกบาศก์มิลลิเมตร ใช้ปริมาณน้ำยาเคลือบผิวที่ 286.00 กรัม ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ถาดก่อนปรับปรุง

ได้ทำการเปลี่ยนภาชนะที่มีขนาดกว้าง×ยาว×สูง = 70×270×9 mm. ได้ปริมาตร 170,100 ลูกบาศก์มิลลิเมตร ปริมาณน้ำยาเคลือบผิวที่ใช้ 200.20 กรัม ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ถาดหลังปรับปรุง จากการเปลี่ยนขนาดถาดทำให้น้ำยาเคลือบผิวลดลงร้อยละ 30 เมื่อคำนวณมาแล้ว ทราบว่า การใช้น้ำยาเคลือบผิว 73.63 กรัมต่อ 1,000 ชิ้น

#### 4.2.2 การทดลองใช้งาน เมื่อได้ภาชนะที่ทำการทดลองแล้วจึงนำมาใช้งานโดยการกำหนดรูปแบบการใช้งาน ตามกระบวนการทำงานดังรูปที่ 3



_!	_	
	4	0
O		
S 9 197 2	11 219 1 519 15171 551 5 29 171	9 151/15/9/1.9/191
40	<b>N</b>	

ครั้งที่	จำนวนขึ้นงาน (ขึ้น)	น้ำยาเคลือบทั้งหมด (กรัม)	น้ำยาที่ใช้ (กรัม)	น้ำยาที่เหลือ (กรัม)
1	120	200.20	8.84	191.36
2	120	200.20	8.85	191.35
3	120	200.20	8.85	191.35
4	120	200.20	8.84	191.36
5	120	200.20	8.85	191.35
6	120	200.20	8.84	191.36
7	120	200.20	8.84	191.36
8	120	200.20	8.84	191.36
9	120	200.20	8.84	191.36
10	120	200.20	8.84	191.36
รวม	1,200	279.79	88.43	191.36
เฉลี่ย	120	200.20	8.84	191.357

a .	a	ดเ
ตารางท 4	การทดลองเคลอบผวโดยส	าดเหม

จากตารางที่ 4 พบว่า การใช้น้ำยาเคลือบผิวชิ้นงานจำนวน 1,200 ชิ้น ใช้น้ำยาไป 88.43 กรัม ทิ้ง 191.36 กรัม คือ การใช้น้ำยาเคลือบผิวคงที่ทำให้ทราบว่าการเติมน้ำยาเคลือบผิวแต่ละรอบ เท่ากับ 8.84 กรัม จึงนำไปทดลองใช้กับงานจริงได้

การออกแบบจำลองทาค่าเหมาะสมที่สุดในการผลิตขึ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ (เซ็นเซอร์ เทอร์มิสเตอร์) ในกระบวนการเคลือบผิวโดยการจำลองที่ 12,000 ขึ้นงาน เทียบกับการใช้น้ำยา ที่คงที่ได้ดังตารางที่ 5

ลำดับที่	จำนวนขิ้นงาน	การจุ่ม (ขึ้น)	น้ำยาที่ใช้ทั้งหมด (ครั้ง)	ร้อยละน้ำยาที่ใช้ (กรัม)
1	120	1	200.20	4.42
2	240	2	209.04	8.46
3	360	3	217.88	12.17
4	480	4	226.72	15.60
5	600	5	235.56	18.76
6	720	6	244.40	21.70
7	840	7	253.24	24.44
8	960	8	262.08	26.98
9	1,080	9	270.92	29.37
10	1,200	10	279.76	31.60
11	2,400	20	368.16	48.02
12	3,600	30	456.56	58.09
13	6,000	50	633.36	69.79
14	12,000	100	1,075.36	82.21
รวม	30,600	255	4,933.24	451.61
ค่าเฉลี่ย	2,186	18	352.37	32.26

ตารางที่ 5 การออกแบบจำลองหาค่าเหมาะสมที่สุดในการผลิตขึ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์

จากตารางที่ 5 พบว่าการออกแบบจำลองหาค่าเหมาะสมที่สุดในการผลิตขึ้นส่วน

อิเล็กทรอนิกส์ (เซ็นเซอร์ เทอร์มิสเตอร์) ในกระบวนการเคลือบผิวโดยการจำลองที่ 120 ชิ้นงาน จุ่ม 1 ครั้ง ปริมาณน้ำยาเคลือบผิวที่ใช้ 200.20 กรัม ร้อยละน้ำยาเคลือบผิวที่ใช้ 4.42 เมื่อพิจารณากระบวนการเคลือบผิว โดยการจำลองที่ 12,000 ชิ้นงาน จุ่ม 100 ครั้ง ปริมาณน้ำยาเคลือบผิวที่ใช้ 1,075.36 กรัม ร้อยละน้ำยาเคลือบผิว ที่ใช้ 82.21 นำข้อมูลที่ได้ไปเสนอผู้บริหาร จุดคุ้มทุนอยู่ที่ 3,600 ชิ้น จุ่ม 30 ครั้ง ปริมาณน้ำยาเคลือบผิวที่ใช้ 456.56 กรัม ร้อยละน้ำยาเคลือบผิวที่ใช้ร้อยละ 58.09 จึงได้ทำการอนุมัติในการทำงานเดือนเมษายนต่อ

#### 5. ขั้นตอน Control

ในขั้นตอน Control เป็นขั้นตอนการควบคุมดูแลไม่ให้ปัญหาที่ได้รับการแก้ไขนั้นเกิดขึ้นอีก โดยการ ควบคุมการทำงานในส่วนการคิดค่าเหมาะสมของน้ำยาที่เป็นตัวแปรที่จะสามารถทำให้ได้ค่าเหมาะสมที่สุด โดยการเสียน้ำยาที่น้อยที่สุด ได้ทำการทดลองใช้จริงในเดือนเมษายนพ.ศ. 2564 มีผลการวิจัยดังตารางที่ 6

ครั้งที่	ขึ้นงานที่ผลิต	การจุ่ม (ขิ้น)	น้ำยาเคลือบที่ใช้ (ครั้ง)	น้ำยาเคลือบทั้งหมด (กรัม)	ร้อยละน้ำยาที่ใช้ (กรัม)
1	6,913	58	424.17	624.37	67.94
2	7,218	60	442.88	643.08	68.87
3	7,536	63	462.40	662.60	69.79
4	6,921	58	424.66	624.86	67.96
5	7,057	59	433.01	633.21	68.38
6	6,996	58	429.26	629.46	68.20
7	6,819	57	418.40	618.60	67.64
8	6,859	57	420.86	621.06	67.76
9	6,671	56	409.32	609.52	67.15
10	8,094	67	496.63	696.83	71.27
11	6,672	56	409.38	609.58	67.16
12	8,079	67	495.71	695.91	71.23
13	7,592	63	465.83	666.03	69.94
รวม	93,427	779	5,732.53	8,335.13	68.71
ค่าเฉลี่ย	7,187	60	441	641	68.71

ตารางที่ 6 ผลการใช้น้ำยาเคลือบผิวเดือนเมษายน พ.ศ. 2564

จากตารางที่ 6 แสดงจำนวนการวิเคราะห์ข้อมูลจากการเก็บข้อมูลเพื่อหาปริมาณ น้ำยาที่ใช้ในการผลิตขิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ (เซ็นเซอร์ เทอร์มิสเตอร์) ได้ผลการใช้น้ำยาเคลือบผิวเดือน เมษายน พ.ศ. 2564 ได้ทำการผลิต 13 ครั้ง จำนวน 93,427 ขิ้น ใช้ปริมาณน้ำยาเคลือบผิวไป 8,335.13 กรัม โดยใช้เคลือบผิว 5,732.53 กรัม คิดเป็นร้อยละการใช้น้ำยาเคลือบผิวร้อยละ 68.71 เมื่อทำการหาค่าเฉลี่ยแล้ว จากจำนวน 13 ครั้ง จำนวนขิ้นงาน 7,1871 ชิ้น ใช้ปริมาณน้ำยาเคลือบผิวทั้งหมดไป 641 กรัม โดยใช้ไป 441 กรัม คิดเป็นร้อยละการใช้น้ำยาเคลือบผิวร้อยละ 68.71

#### สรุปผลการทดลอง

#### 1. การใช้น้ำยาเคลือบผิว

การใช้น้ำยาเคลือบผิวในการผลิต 13 ครั้ง จำนวน 93,427 ชิ้น ใช้ปริมาณน้ำยาเคลือบผิวไป 8,335.13 กรัม โดยใช้เคลือบ 5,732.53 กรัม เมื่อทำการทาค่าเฉลี่ยแล้ว ใช้ปริมาณน้ำยาเคลือบผิวไป 641 กรัม โดยใช้เคลือบผิวไป 441 กรัม คิดเป็นร้อยละการใช้น้ำยาเคลือบผิว ร้อยละ 68.71 เมื่อทำการเทียบกับการทำงาน ในช่วงพฤศจิกายน ปี พ.ศ. 2563 ที่ได้ใช้น้ำยาเคลือบผิวร้อยละ 47.67 ทำให้การใช้น้ำยาเคลือบผิวเพิ่มขึ้นร้อยละ 68.71 ความแตกต่างอยู่ที่ร้อยละ 21.04 แสดงให้เห็นว่างานวิจัยนี้สามารถหาค่าเหมาะสมที่สุดในการผลิตชิ้นส่วน อิเล็กทรอนิกส์ (เซ็นเซอร์ เทอร์มิสเตอร์) ได้อย่างมีประสิทธิภาพกับงานวิจัยที่ได้นำหลักการ DMAIC [16] ซึ่งสามารถนำไปใช้จริงเพื่อลดปริมาณการใช้น้ำยาเคลือบผิวในโรงงานอุตสาหกรรมได้ ดังรูปที่ 4



- รูปที่ 4 แผนภูมิการใช้น้ำยาเคลือบผิวก่อนและหลังปรับปรุง
  - 2. สูตรการหาค่าเหมาะสมที่สุด

การทาค่าเหมาะสมที่สุดในการผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ (เซ็นเซอร์ เทอร์มิสเตอร์) ในกระบวนการ เคลือบผิวโดยใช้หลักการ DMAIC จะได้สูตรการทาค่าเหมาะสมดังนี้

สูตร	Zmin	=	200.20 + 8.84X
เมื่อ	Zmin	=	ค่าเหมาะสมของน้ำยาที่น้อยที่สุด
	200.20	=	จำนวนน้ำยาคงที่
	8.84	=	ปริมาณน้ำยาเคลือบ/จำนวนชิ้นงาน 120 ชิ้น
	Х	=	จำนวนรอบ
จากชิ้	นงาน 3 <i>,</i> 60	0 ชิ้	ิ้น จุ่ม 30 ครั้ง ได้ปริมาณน้ำยาที่ผลิตดังนี้
	Zmin	=	200.20 + 8.84(30)
		=	200.20 + 265.20
		=	465.40
ע	် ခရမ		– coo a' a v qy ਨ a' i a'

ร้อยละน้ำยาที่ใช้ = 56.98 เมื่อเทียบกับการใช้น้ำยาที่ผ่านมาอยู่ที่ร้อยละ 47.67

จากการใช้สูตรสามารถบอกได้ว่า ขั้นต่ำที่สุดในการเคลือบผิวขิ้นส่ว<sup>้</sup>นอิเล็กทรอนิกส์ (เซ็นเซอร์ เทอร์มิสเตอร์) อยู่ที่ 3,600 ขิ้นต่อการจุ่ม 30 ครั้ง จะได้ใช้น้ำยาเคลือบที่เกินร้อยละ 50 อยู่ที่ร้อยละ 56.98 เมื่อเทียบกับการใช้น้ำยาที่ผ่านมาอยู่ที่ร้อยละ 47.67

#### References

- Jamfa, A. (2020). Industry Electrical Appliances and Electronics Faced with the Economic Crisis. Access (30 August 2021). Available (https://shorturl.asia/TJ3jf)
- [2] Lopsoonthorn, U. (2016). Reducing Waste in the Process of Assembling Electronic Circuits Onto PCB Boards. By Application of Experimental Design, Master of Engineering Thesis Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
- [3] Government Savings Bank. (2019). Industry Electrical Appliances and Electronics. Access (30 August 2021). Available (https://shorturl.asia/5MdmS)

- [4] M Report Co., Ltd.. (2021). 314-Electronics-Industry. Access (30 August 2021). Available (https://shorturl.asia/5D73L)
- [5] White Rungroj, S., and Kuptansathian, N. (2013). Productivity Improvement of Electronics Part by Using DMAIC Technique A Case Study of Printed Circuit Board Assembly Manufactoring. Journal of Engineering, RMUTT. Vol. 11, Issue 1, pp. 23-36
- [6] Nakvachiratrakul, C., Pipatpanyanukul, K., Sukhasem, R., and Chankham, M. (2018). Implementing the DMAIC for Defect Reduction in the Aircraft Parts Manufacturing. In Industrial Engineering Network Academic Conference 2018. Department of Industrial Engineering Faculty of Engineering Ubon Ratchathani University 23-26 July 2018 Ubon Ratchathani. pp. 227-231
- [7] Chayut, B. and Jenjira, S. (2018). The Implementation of DMAIC for Shortening Inspection Time of Vehicle Inspection Department: A Case Study of An Automobile Factory in Rayong Province. Journal of Engineering and Innovation. Vol. 15, Issue 4, pp. 62-74
- [8] Tirasakon, K. and Roninthon, K. (2016). Reduce Waste from the Manufacture of Sausage with the Application DMAIC Case Study: Food Industry. Journal of Industrial Technology. Vol. 11, No. 2, pp. 77-83
- [9] Panoram, A. (2017). Defect Reduction for Optical Transceivers Manufacturing Process by DMAIC Method. Master of Engineering Thesis Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering Thammasat University
- [10] Mananuam, P. (2020). Defect Reduction for Transmitter Optical Sub-Assembly Manufacturing Process by DMAIC Method. Master of Engineering Thesis Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering Thammasat University
- [11] Phinij, K. and Wichuta, N. (2017). Operational Management Affecting Operational Efficiency of Production Industry Small and Medium Enterprises in Pathum Thani Province. Access (30 August 2021). Available (https://app.northbkk.ac.th/research\_/?news=research&id=000434)
- [12] Kaewyindee, W. (2019). Defect Reduction of Dyeing and Finishing Process in the Sample Factory by DMAIC. Master of Engineering Thesis in Industrial Engineering, Graduate School, Silpakorn University
- [13] Ismail, A. S. S., As'arry, A., Sapuan, S. M., and Tarique, J. (2023). Improvement of Plastic Manufacturing Processes by Six Sigma and DMAIC Methods. Applied Science and Engineering Progress. Vol. 16, No 3, (Special Issue) pp. 1-12. DOI: 10.14416/j.asep.2023.04.003
- [14] Yamane, T. (1973). Statistics: An Introductory Analysis. Tokyo: Harper International Edition
- [15] Sornnarindra, S. (2018). Reduction of Sewing Thread Stock by DMAIC Concept in Garment Industry. Master of Engineering Thesis in Industrial and Logistics Engineering Management, Graduate School, Khon Kaen University
- [16] Meesa, B., Pinthong, J., Phalasak, N., and Karatpong, E. (2016) Reducing of Waste in Manufacturing Process of Electronic Sheets (PCB Board) using DMAIC. Academic Journal Uttaradit Rajabhat University. Vol. 11, Issue 2, pp. 148-158

# **RMUTI Journal**





# วารสารงานวิจัยด้านวิทยาศาสตร์สมัยใหม่ และการใช้ประโยชน์นวัตกรรมเทคโนโลยี Research on Modern science and Utilizing Technological Innovation Journal (RMUTI Journal)

# 1. ประเภทของบทความที่ตีพิมพ์

1.1 บทความวิจัย (Research article) เป็นบทความที่ได้จากงานวิจัย

1.2 บทความวิชาการ (Academic article) เป็นบทความที่มีลักษณะดังนี้

 เป็นบทความจากการทบทวนเอกสาร ซึ่งเป็นผลมาจากการวิจัยหลาย ๆ ครั้ง ถือเป็นบทความที่มี ความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง

2. เป็นบทความนำเสนอกระบวนการในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ การทดสอบภาคสนาม รวมไปถึง เทคนิคการวิเคราะห์ใหม่ ๆ

3. เป็นบทความที่มาจากประสบการณ์ หรือความชำนาญของผู้เขียน

4. เป็นบทความเกี่ยวกับนโยบายด้านต่าง ๆ ของหน่วยงาน

#### 2. รูปแบบการพิมพ์บทความ

การตั้งค่าหน้ากระดาษ

-	ระยะขอบ					
	ขอบบน (Top Ma	argin) 2.5	รัชม. ข	ขอบล่าง (Bottom Margin)	2.5 ซม.	
	ขอบขวา (Right ]	Margin) 2.5	ซม. เ	เอบซ้าย (Left Margin)	2.5 ซม.	
-	ระยะท่างบรรทัด	1 เท่า				
-	รูปแบบตัวอักษร	บทความภาษา	าไทยใช้	TH SarabunPSK		
		บทความภาษา	าอังกฤษใช้	Times New Roman		
-	<b>การย่อหน้า</b> 7 ตัว	อักษร พิมพ์ตัว	ที่ 8			
-	จำนวนหน้า 12 ห	น้า แต่ไม่ควรเ	กิน 15 หน้า			
-	ชื่อบทความ	ภาษาไทย	ขนาดตัวอัก	ษร 24 ตัวหนา		
		ภาษาอังกฤษ	ขนาดตัวอัก	ษร 20 ตัวหนา		
-	ชื่อผู้เขียน	ภาษาไทย	ขนาดตัวอัก	ษร 18 และจัดชิดซ้าย		
		ภาษาอังกฤษ	ขนาดตัวอัก	ษร 14 และจัดชิดซ้าย		
-	ตัวเลขยก (ต่อท้ายนามสกุล) ขนาดตัวอักษร 18					
-	ที่อยู่ ภา	ษาไทย	ขนาดตัวอัก	ษร 14		
	ภา	ษาอังกฤษ	และภาษาอัง	กฤษ 10		
-	ชื่อหัวเรื่องหลักใ	นบทความ เข	ใน "บทคัด	ย่อ" "คำสำคัญ" "วิธีดำเ	เนินการ" "ผลการวิจัย"	
"สรุปผลการวิจัย	" "กิตติกรรมประก	าาศ" "เอกสาร	อ้างอิง" จัดร์	ชิดซ้ายหน้ากระดาษ		
	กรณีบทค <sup>ะ</sup>	วามภาษาไทย	ขนา	ิจตัวอักษร 20 ตัวหนา		
กรณีบทความภาษาอังกฤษ ขนาดตัวอักษร 16 ตัวหนา						
<ul> <li>ชื่อหัวเรื่องรอง จัดชิดซ้ายหน้ากระดาษ</li> </ul>						
	กรณ <b>ี</b> บทค <sup>ะ</sup>	วามภาษาไทย	ขนา	ิดตัวอักษร 16 ตัวหนา		
	กรณ <b>ี</b> บทค <sup>ะ</sup>	<u></u> ວາມກາ <del>ษ</del> าอังกฤ	ษ ขนา	ิดตัวอักษร 12 ตัวหนา		
-	เนื้อหาในส่วนต่าง	ๆ และค่ำส่ำคั	ัญ			
	กรณ <b>ีบท</b> ค <sup>ะ</sup>	วามภาษาไทย	ขนา	ิดตัวอักษร 16		
	กรณ <b>ี</b> บทค <sup>ะ</sup>	วามภาษาอังกฤ	ษ ขนา	ิดตัวอักษร 12		
- ชื่อตาราง

กรณีบทความภาษาไทย ข้อความ "ตารางที่ x" ใช้ขนาดตัวอักษร 16 ตัวหนา วางด้านบน ชิดช้ายหน้ากระดาษ ตามด้วยชื่อตารางที่เป็นตัวอักษรขนาด 16 ไม่หนา

กรณีบทความภาษาอังกฤษ ข้อความ "Table x" ใช้ขนาดตัวอักษร 12 ตัวหนา วางด้านบน ชิดช้ายหน้ากระดาษ ตามด้วยชื่อตารางที่เป็นตัวอักษรขนาด 12 ไม่หนา

- ชื่อรูปภาพ

กรณีบทความภาษาไทย ข้อความ "รูปที่ x" ใช้ขนาดตัวอักษร 16 ตัวหนา วางด้านล่าง จัดชิดข้ายหน้ากระดาษ ตามด้วยคำชื่อรูปที่เป็นตัวอักษรขนาด 16 ไม่หนา

กรณีบทความภาษาอังกฤษ ข้อความ "Figure x" ใช้ขนาดตัวอักษร 12 ตัวหนา วางด้านล่าง จัดชิดช้ายหน้ากระดาษ ตามด้วยคำชื่อรูปที่เป็นตัวอักษรขนาด 12 ไม่หนา

#### 3. ส่วนประกอบของบทความแต่ละประเภท

3.1 บทความวิจัย จะประกอบไปด้วย

ก. ส่วนปก

1. ชื่อบทความ (Title) ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ควรกระทัดรัด ไม่ยาวเกินไป บทความ ภาษาไทยชื่อเรื่องต้องมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ บทความภาษาอังกฤษชื่อเรื่องไม่ต้องมีภาษาไทย

2. ชื่อผู้เขียน (Authors) ชื่อเต็ม - นามสกุลเต็ม ของผู้เขียนทุกคน โดยให้รายละเอียดต้นสังกัด ของผู้เขียนไว้ที่บรรทัดล่างสุดของหน้าแรก พร้อมทั้งระบุชื่อผู้เขียนประสานงาน (Corresponding Author) ด้วยการระบุ เบอร์โทรศัพท์ และ E-mail Address ที่สามารถติดต่อได้ และให้ใส่เครื่องหมายดอกจันทร์ตัวยกกำกับไว้ต่อท้ายนามสกุล และตัวเลขยก ให้เขียนไว้ต่อท้ายนามสกุล เพื่อระบุที่อยู่ของผู้เขียน

3. บทคัดย่อ (Abstract) ควรสั้น ตรงประเด็น ครอบคลุมสาระสำคัญของการศึกษา ประกอบไปด้วย เนื้อทา ได้แก่ วัตถุประสงค์ วิธีการ ผลการวิจัย และการอภิปรายผล เป็นต้น โดยเขียนลงใน 1 ย่อทน้า ถ้าบทความ เป็นภาษาไทย จะต้องมีบทคัดย่อภาษาไทย 1 ย่อทน้า และภาษาอังกฤษ 1 ย่อทน้า โดยใท้ภาษาไทยขึ้นก่อน เนื้อความ ในบทคัดย่อภาษาไทยและภาษาอังกฤษต้องมีความทมายเดียวกัน ความยาวของบทคัดย่อภาษาอังกฤษ กำหนดให้มี ความยาวได้ไม่เกิน 300 คำ

4. คำสำคัญ (Key Words) เป็นการกำหนดคำสำคัญที่สามารถไปใช้เป็นคำสืบค้นในระบบฐานข้อมูล ทากเป็นบทความภาษาไทยต้องมีคำสำคัญ 2 ภาษา คือภาษาไทยและภาษาอังกฤษที่มีความหมายตรงกัน ส่วนกรณี ของบทความภาษาอังกฤษให้มีเพียงคำสำคัญในรูปแบบภาษาอังกฤษเท่านั้น จำนวนคำสำคัญที่กำหนดให้มีคำสำคัญได้ อย่างน้อย 3 คำ แต่ไม่เกิน 5 คำ

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

### ข. ส่วนเนื้อทา

1. บทน้ำ (Introduction) เพื่ออธิบายถึงความสำคัญของปัญหา และวัตถุประสงค์ของการวิจัย รวมถึงการทบทวนวรรณกรรม และเอกสารที่เกี่ยวข้อง

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

3. ผลการวิจัย (Results) เสนอผลการทดลองอย่างชัดเจน ตรงประเด็น ควรมีรูปภาพและ/หรือ ตารางประกอบการอธิบายผลในตารางและรูปภาพ ต้องไม่ซ้ำซ้อนกัน รูปภาพและตารางของบทความที่เป็นภาษาไทย ให้บรรยายเป็นภาษาไทย รูปภาพและตารางของบทความที่เป็นภาษาอังกฤษ ให้บรรยายเป็นภาษาอังกฤษ

4. การอภิปรายผล (Discussion) เป็นการอภิปรายผลการวิจัย เพื่อให้ผู้อ่านมีความเห็นคล้อยตาม เพื่อเปรียบเทียบกับผลการวิจัยของผู้อื่น พร้อมทั้งเสนอแนวทางที่จะนำไปใช้ประโยชน์ผลการวิจัยและการอภิปรายผล (Results and Discussion) อาจนำมาเขียนตอนเดียวกันได้ 5. บทสรุป (Conclusion) สรุปประเด็น และสาระสำคัญของการวิจัย

6. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgements) เพื่อแสดงความขอบคุณแก่ผู้ให้ความช่วยเหลือ ในการวิจัย อาจมีหรือไม่มีก็ได้

7. เอกสารอ้างอิง (References) เป็นรายการเอกสารที่ถูกอ้างไว้ในส่วนของเนื้อเรื่อง เพื่อใช้เป็น หลักในการค้นคว้าวิจัย จำนวนเอกสารที่นำมาอ้างอิงตอนท้ายต้องมีจำนวนตรงกับที่ถูกอ้างอิงไว้ในส่วนของเนื้อเรื่อง ที่ปรากฏในบทความเท่านั้น <u>การจัดเรียงให้เรียงตามลำดับการอ้างอิงในเนื้อหา</u>โดยให้ยึดถือรูปแบบการเขียนเอกสารอ้างอิง ตามที่ทางวารสาร มทร.อีสาน กำหนด และต้องเขียนในรูปแบบภาษาอังกฤษเท่านั้น

3.2 **บทความวิชาการ** จะประกอบไปด้วย

ก. ส่วนปก

มีส่วนประกอบเหมือนบทความวิจัย และเขียนให้อยู่ในกระดาษ จำนวน 1 หน้า เท่านั้น

ข. ส่วนเนื้อหา

1. บทน้ำ (Introduction) เป็นส่วนของที่มาของมูลเหตุของการเขียนบทความ

2. วิธีการศึกษา/วิธีดำเนินการ (Method) (ถ้ามี) เป็นการอธิบายวิธีการศึกษา หรือการดำเนินการ ตามประเภทของบทความวิชาการ

3. ผลการศึกษา/ผลการดำเนินการ (Results) เป็นการเสนอผลอย่างชัดเจน ตามประเด็นโดยลำดับ ตามหัวข้อที่ศึกษาหรือดำเนินการ

4. สรุป (Conclusion) สรุปประเด็น และสาระสำคัญที่ได้จากการศึกษา

5. เอกสารอ้างอิง (References) ใช้รูปแบบที่วารสารกำหนด รายการการอ้างอิงต้องเขียนใน รูปแบบภาษาอังกฤษเท่านั้น

# 4. การอ้างอิงเอกสารในเนื้อเรื่องของบทความ (In-text Citations)

การอ้างอิงเอกสารในเนื้อเรื่องใช้รูปแบบ IEEE ระบบตัวเลข (Numerical System) <u>เท่านั้น</u> โดยรายการ อ้างอิงเอกสารให้จัดชิดซ้ายหน้ากระดาษ หมายเลขลำดับของเอกสารอ้างอิงในเครื่องหมายงเล็บกรอบสี่เหลี่ยม ตัวอย่างเช่น [1] เป็นต้น หากเป็นการอ้างอิงเอกสารหลายฉบับในเวลาเดียวกัน ให้ใส่หมายเลขอ้างอิงเรียงตามลำดับ จากน้อยไปหามาก 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

#### 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
  - 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 หรือผู้เรียบเรีย<sup>้</sup>ง. (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

- ชื่อรูปภาพท้ามขึ้นต้นด้วยคำว่า "แสดง"
- 2) รูปภาพที่แสดงต้องมีคำอธิบายอยู่ในเนื้อหาบทความที่มีการระบุถึงรูปภาพนั้น ๆ

 คำอธิบายรูปภาพ ให้เขียนไว้ใต้รูปภาพแต่ละรูปภาพ โดยจัดรูปภาพไว้กึ่งกลางหน้ากระดาษ และคำอธิบาย จัดชิดช้ายหน้ากระดาษ

- 4) ไฟล์ของรูปภาพต้องเป็นไฟล์ที่มีนามสกุล .jpg, .png, .tiff หรือ .eps เท่านั้น ความละเอียดไม่ต่ำกว่า 300 dpi
- 5) ลายเส้นที่ปรากฏบนรูปภาพต้องมีความคมชัด กรณีที่เป็นรูปกราฟ ต้องระบุชื่อแกนต่าง ๆ ให้ครบถ้วน

 กรณีที่มีรูปภาพย่อย ควรจัดให้รูปภาพย่อยทั้งหมดอยู่ในหน้าเดียวกัน สำหรับบทความภาษาไทย ให้เขียนคำบรรยายใต้ชื่อรูปย่อยแต่ละรูป และกำหนดลำดับของรูปภาพด้วยตัวอักษร ตัวอย่างเช่น





(ข) รูปย่อยที่ 2

รูปที่ 1 ตัวอย่างการเขียนคำอธิบายรูปภาพ

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

7) การเว้นระยะบรรทัด ก่อนรูปภาพ ให้เว้น 1 บรรทัด และหลังจากชื่อรูปภาพ ให้เว้น 1 บรรทัด

8) การใช้ภาพสี อาจทำให้เกิดความสวยงาม แต่ให้คำนึงถึงการสื่อความหมายกรณีที่มีการจัดพิมพ์เอกสาร แบบขาวคำเพื่อให้ผู้อ่านสามารถเข้าใจได้ กรณีที่เป็นกราฟควรกำหนดลักษณะเส้นที่แตกต่างกัน เพื่อให้สามารถเข้าใจได้ เมื่อมีการจัดพิมพ์แบบขาว - ดำ

9) ขนาดของรูปต้องไม่ใหญ่เกินกว่าความกว้างของหน้ากระดาษที่กำหนดไว้

10) หากเป็นการคัดลอกรูปภาพมาจากที่อื่น ผู้เขียนควรมีการอ้างอิงแหล่งที่มาให้ถูกต้อง

#### 6. รูปแบบการใส่ตารางในเนื้อหาบทความ

- ชื่อตารางห้ามขึ้นต้นด้วยคำว่า "แสดง"
- 2) ตารางที่แสดงต้องมีคำอธิบายอยู่ในเนื้อทาบทความที่มีการระบุถึงตารางนั้น ๆ

 คำอธิบายตาราง ให้เขียนไว้ด้านบนของตาราง โดยจัดคำอธิบายไว้ชิดขอบด้านซ้ายของหน้ากระดาษ และ ตารางอยู่กึ่งกลางหน้ากระดาษ ควรจัดเนื้อหาตารางให้อยู่บนหน้าเดียวกัน กรณีที่ตารางมีความยาวเกินหน้ากระดาษ ให้ใส่ชื่อตาราง "ตารางที่ x ......." ไว้ที่ด้านบนของตารางในหน้าแรก และใส่ชื่อตาราง "ตารางที่ x ....... (ต่อ)" ไว้ที่ด้านบนของตารางในหน้าถัดไป

- 4) ขนาดของตารางต้องไม่ใหญ่เกินกว่าความกว้างของหน้ากระดาษที่กำหนดไว้
- 5) การเว้นระยะบรรทัด ก่อนชื่อตาราง ให้เว้น 1 บรรทัด และหลังสิ้นสุดตาราง ให้เว้น 1 บรรทัด
- การกำหนดเส้นขอบตาราง ให้กำหนดเฉพาะเส้นด้านบน และด้านล่างของบรรทัด ดังตัวอย่าง

Table Head	Table Column Head								
таріе пеац	Subhead (unit)	Subhead (unit)							
XXX	123	456							
XXX	321	654							

#### **ตารางที่** 1 ตัวอย่างการนำเสนอตาราง

#### 7. รูปแบบการใส่สมการในเนื้อหาบทความ

- 1) จัดตำแหน่งของสมการไว้กึ่งกลางหน้ากระดาษ
- 2) พิมพ์สมการด้วยโปรแกรม MathType โดยใช้รูปแบบตัวอักษร Times New Roman ขนาด 11
- 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

2) บทความที่ถูกส่งเข้ามายังระบบ กองบรรณาธิการจะพิจารณาบทความเบื้องต้นเกี่ยวกับความถูกต้อง ของรูปแบบทั่วไป <u>บทความที่ไม่ดำเนินการตามรูปแบบที่กำหนดจะไม่รับเข้าสู่กระบวนการพิจารณา</u>โดยผู้ทรงคุณวุฒิ และ จะส่งกลับเพื่อทำการแก้ไข ดังนั้น เพื่อให้เกิดความรวดเร็วในเข้าสู่กระบวนการพิจารณาผล ผู้เขียนควรดำเนินการจัด ทำวารสารให้ถูกต้องตามรูปแบบที่กำหนดอย่างเคร่งครัด

 เมื่อบทความผ่านการพิจารณาให้ตีพิมพ์ลงในวารสาร และผู้เขียนได้ดำเนินการจัดเตรียมเอกสารต่าง ๆ อย่างถูกต้อง ครบถ้วนตามข้อกำหนดของวารสารเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ผู้เขียนจะได้รับหนังสือรับรองการตีพิมพ์ บทความเพื่อเป็นการยืนยัน

 หากทางวารสารตรวจพบว่าบทความที่ถูกส่งเข้ามามีการคัดลอก หรือเผยแพร่ในที่อื่น ๆ ก่อนหน้า หรือมีการดำเนินการใด ๆ อันเป็นการกระทำที่ผิดจรรยาบรรณของนักวิจัย ทางวารสารจะดำเนินการทำหนงสือ แจ้งไปยังหน่วยงานต้นสังกัด และระงับการพิจารณาและรับบทความจากผู้เขียนบทความนั้นเป็นระยะเวลาอย่างน้อย 5 ปี



หมายเลขสมาชิก

..... (สำหรับเจ้าหน้าที่)

#### แบบฟอร์มการส่งบทความ

#### วารสารงานวิจัยด้านวิทยาศาสตร์สมัยใหม่ และการใช้ประโยชน์นวัตกรรมเทคโนโลยี Research on Modern science and Utilizing Technological Innovation Journal (RMUTI Journal)

## วันที่ ..... ข้าพเจ้า (นาย/นาง/นางสาว) ..... ระดับการศึกษาสูงสุด ...... ตำแหน่งทางวิชาการ ..... หน่วยงาน ที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้สะดวก..... โทรศัพท์.....โทรสาร.....โทรสาร..... e-mail..... ขอส่ง 🗌 บทความวิจัย 🗌 บทความวิชาการ สาขาของบทความ (กรุณาเลือก) Chemistry **Engineering** Materials Science Environmental Science ☐ Mathematics ชื่อบทความ (ภาษาไทย) ..... ..... (ภาษาอังกฤษ) .....

ชื่อผู้เขียนร่วม (พร้อมคำนำหน้าชื่อ อีเมล์ และเบอร์โทรศัพท์)

1.	
2.	
3.	
4.	
5.	

ขอเสนอชื่อผู้ทรงคุณวุฒิที่มีความเชี่ยวชาญในสาขาที่เกี่ยวข้อง

1. ชื่อ-สกุล	ตำแหน่งทางวิชาการ
คุณวุฒิสาข	าที่เชี่ยวชาญ
้ หน่วยงานที่สังกัด	
ที่อย่ลำหรับส่งเอกสาร	
บ	
ทมายเลขโทรศัพท์	Email
2. ชื่อ-สกล	ตำแหน่งทางวิชาการ
	าที่เชี่ยวชาณ.
้ ทุ่นวยเงานที่สังกัด	
ที่อยู่สำหรับส่งเอกสาร	
หมายเลขโทรศัพท์	Fmail
NI97 10 PPA D PAI 91 1 MAA1	L111((111

#### หมายเหตุ

 ผู้ทรงคุณวุฒิต้องมีตำแหน่งทางวิชาการ ระดับ ผศ. ขึ้นไป หรือจบการศึกษาระดับปริญญาเอก และต้องไม่ สังกัดหน่วยงานเดียวกับผู้ประพันธ์

2. กองบรรณาธิการขอสงวนสิทธิ์ในการเป็นผู้พิจารณาคัดเลือกผู้ทรงคุณวุฒิเพื่อพิจารณาผลงานทางวิชาการ

 เจ้าของบทความที่ผ่านการพิจารณาให้ตีพิมพ์ลงในวารสาร จะต้องสมัครสมาชิกวารสาร มทร.อีสาน อย่างน้อย 1 ปี เพื่อเป็นการยืนยันการตีพิมพ์บทความลงในวารสาร

ข้าพเจ้าได้รับทราบและยินดีปฏิบัติตามเงื่อนไขและข้อกำหนดต่าง ๆ ใน<u>แบบฟอร์มแนบท้าย ซึ่งมีรายละเอียด</u> <u>อยู่ใน "คำแนะนำผู้เขียน"</u> ที่ทางกองบรรณาธิการวารสาร RMUTI Journal ได้กำหนดขึ้น และยินดีให้กองบรรณาธิการมีสิทธิ์ ที่จะไม่รับพิจารณา หากไม่จัดรูปแบบตามที่กำหนด ยินยอมให้มีสิทธิ์ในการเลือกสรรทาผู้กลั่นกรองโดยอิสระเพื่อพิจารณา ด้นฉบับที่ข้าพเจ้า (และผู้แต่งร่วม) ส่งมา ยินยอมให้กองบรรณาธิการสามารถตรวจแก้ไขค้นฉบับดังกล่าวได้ตามที่เห็นสมควร และข้าพเจ้า "ขอรับรองว่า บทความนี้ไม่เคยลงตีพิมพ์ในวารสารใดมาก่อน ไม่อยู่ระหว่างการพิจารณาจากวารสารอื่น และ ยินยอมว่าบทความที่ตีพิมพ์ลงในวารสารวิชาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ถือเป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัย เทคโนโลยีราชมงคลอีสาน"

ทากข้าพเจ้ามีความประสงค์ในการขอยกเลิกการพิจารณาบทความหลังจากวันที่ได้รับหนังสือยืนยันการรับบทความ <u>ข้าพเจ้ายินคีรับผิดชอบค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานที่มหาวิทยาลัยฯ ดำเนินการตามกระบวนของกองบรรณาธิการวารสาร RMUTI</u> <u>Journal ตามที่จ่ายจริง</u>

ลงชื่อ.....)



# หนังสือรับรองการตีพิมพ์บทความ วารสารงานวิจัยด้านวิทยาศาสตร์สมัยใหม่ และการใช้ประโยชน์นวัตกรรมเทคโนโลยี Research on Modern science and Utilizing Technological Innovation Journal (RMUTI Journal)

ขอรับรองว่าบทความ.....

โดย	ເรื่อง			 • • • •	••••	••••	 ••••	••••	 •••	• • •	 •••		•••	 	 	 • • •		••••	•••		•••	 ••••	 	
โดย	_			 	•••	••••	 ••••	••••	 	• • •	 •••		•••	 	 	 		•••		•••	•••	 ••••	 	
	โดย			 • • • •	•••	••••	 ••••	••••	 •••	•••	 •••	•••	•••	 	 	 		•••	•••	•••	•••	 ••••	 	
		••••	••••	 	•••	•••	 ••••	••••	 •••	•••	 •••		•••	 	 	 • • •	• • • •	•••	•••	•••	•••	 ••••	 ••••	••••

(.....)

บรรณาธิการวารสาร RMUTI Journal มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน



# หนังสือยืนยันการถอนบทความ วารสารงานวิจัยด้านวิทยาศาสตร์สมัยใหม่ และการใช้ประโยชน์นวัตกรรมเทคโนโลยี Research on Modern science and Utilizing Technological Innovation Journal (RMUTI Journal)

ข้าพเจ้า	(นาย/นาง/นาง	າສາວ)			•••••	
สังกัดหน่วยงาน						••••
มีความประสงค์ขอถอา	นการพิจารณาบท	าความเรื่อง				
	••••••		•••••			
ที่ได้ส่งเข้ามายังวารสา	ร RMUTI Jo	ournal เมื่อว่	วันที่		และย์	ยินยอมรับผิดขอบ
ค่าใช้จ่ายในการดำเนิน	เการตามกระบวน	เการของวารล	กร RMU	TI Journal เป็นจำนวนเงิน		บาท
(			) โø	ายชำระเงินผ่านทางบัญชีกองทุน	สนับสนุนการวิจั	<i>เ</i> ้ยธนาคารกรุงไทย
สาขาม.เทคโนโลยีรา	ชมงคลอีสาน เ	นครราชสีมา	ชื่อบัญชี	"กองทุนสนับสนุนการวิจัย	มทร.อีสาน"	บัญชีออมทรัพย์
เลขที่ 980-9-74231-2						

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

ລູນນື່ອ	ผู้ถอนบทความ
(	)





# **RMUTI Journal**

# **Science and Technology**

Vol. 16 No. 3 September-December 2023

ISSN: 3027-6756 (Online)



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.journai@gmail.com