



# Research on Modern science and Utilizing Technological Innovation Journal

## (RMUTI Journal)

RMUTI Journal

Vol. 17 No. 1 January–April 2024

2024



INSTITUTE OF RESEARCH AND DEVELOPMENT  
RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY ISAN

RMUTI Journal ได้รับการประเมินคุณภาพให้อยู่ในฐานข้อมูล  
ของศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (TCI) กลุ่มที่ 2

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

## วัตถุประสงค์

1. เพื่อเป็นสื่อกลางในการแลกเปลี่ยนองค์ความรู้ด้านวิชาการ ด้านงานวิจัย และสิ่งประดิษฐ์ระหว่างนักวิชาการ 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 บทความทุกบทความจะต้องผ่านการพิจารณาโดยผู้ทรงคุณวุฒิที่เกี่ยวข้องแบบผู้ทรงคุณวุฒิและผู้แต่งไม่ทราบชื่อกันและกัน (double-blind review)

## เจ้าของ

สถาบันวิจัยและพัฒนา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

744 ถ.สุนทรารายณ์ 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 และบทความในวารสารเป็นแนวคิดของผู้แต่ง มิใช่เป็นความคิดของคณะกรรมการจัดทำวารสาร และมีใช่เป็นความรับผิดชอบของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

วารสารงานวิจัยด้านวิทยาศาสตร์สมัยใหม่ และการใช้ประโยชน์นวัตกรรมเทคโนโลยี  
(RMUTI Journal)

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

ที่ปรึกษากองบรรณาธิการ

|                              |           |                                                                 |
|------------------------------|-----------|-----------------------------------------------------------------|
| รองศาสตราจารย์ ดร.โมษิต      | ศรีภูธร   | อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน                       |
| รองศาสตราจารย์ ดร.ศักดิ์ระวี | ระวีกุล   | ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน |
| รองศาสตราจารย์ ดร.วีรชัย     | พุทธรังค์ | ประธานหลักสูตรนิติวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์            |

กองบรรณาธิการ

|                                     |                  |                                                |
|-------------------------------------|------------------|------------------------------------------------|
| ศาสตราจารย์เกียรติคุณ ดร.พีระศักดิ์ | ศรีนิเวศน์       | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์                         |
| ศาสตราจารย์ ญาณวิทย์ ดร.เมธา        | วรรณพัฒน์        | มหาวิทยาลัยขอนแก่น                             |
| ศาสตราจารย์ ดร.กุลเชษฐ์             | เพียรทอง         | มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี                         |
| ศาสตราจารย์ ดร.เจษฎา                | ธาริบุญ          | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ     |
| ศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ฤทธิ์           | สมบัติสมภาพ      | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี          |
| ศาสตราจารย์ ดร.ตะวัน                | สุขน้อย          | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |
| ศาสตราจารย์ ดร.ทวนทอง               | จุฑาเกตุ         | มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี                         |
| ศาสตราจารย์ ดร.ปารเมศ               | ชุติมา           | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย                          |
| ศาสตราจารย์ ดร.เปี่ยมศักดิ์         | เมนะเสวต         | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย                          |
| ศาสตราจารย์ ดร.พิเชษฐ               | ลิ้มสุวรรณ       | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี          |
| ศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล                | เหล่าสุวรรณ      | มหาวิทยาลัยหาดใหญ่                             |
| ศาสตราจารย์ ดร.รัตติก               | ยัมนิรัญ         | สถาบันวิทยสิริเมธี                             |
| ศาสตราจารย์ ดร.วินัย                | ประสมพิทยากัญจน์ | มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์                          |
| ศาสตราจารย์ ดร.ศุภชัย               | ปทุมนากุล        | มหาวิทยาลัยขอนแก่น                             |
| ศาสตราจารย์ ดร.สำเริง               | จักรใจ           | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี          |
| ศาสตราจารย์ ดร.สุชาติ               | ลิ้มกัตถ์บุญ     | มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์                       |
| ศาสตราจารย์ ดร.สมชาติ               | โสภณธรรมฤทธิ์    | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี          |
| ศาสตราจารย์ ดร.สุทธวัฒน์            | เบญจกุล          | มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์                       |
| ศาสตราจารย์ นาวาอากาศโท ดร.สรวุฒิ   | สุจิตจร          | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี                    |
| ศาสตราจารย์ ดร.อรอนงค์              | นัยวิกุล         | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์                         |
| รองศาสตราจารย์ ดร.กนกอร             | อินทราพิเชฐ      | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี                    |
| รองศาสตราจารย์ ดร.กนต์ธร            | ชำนาญประศาสน์    | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี                    |
| รองศาสตราจารย์ ดร.คงศักดิ์          | ธาดุทอง          | มหาวิทยาลัยขอนแก่น                             |
| รองศาสตราจารย์ ดร.คณิต              | มุกดาใส          | มหาวิทยาลัยขอนแก่น                             |
| รองศาสตราจารย์ ดร.จักรี             | ศรีนนท์ฉัตร      | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี             |
| รองศาสตราจารย์ ดร.ชนกพร             | เผ่าศิริ         | มหาวิทยาลัยขอนแก่น                             |
| รองศาสตราจารย์ ดร.ณัฐวิวัฒน์        | พลดี             | มหาวิทยาลัยขอนแก่น                             |
| รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริศ             | สามารถ           | มหาวิทยาลัยขอนแก่น                             |



## กองบรรณาธิการ (ต่อ)

รองศาสตราจารย์ ดร.นิรัช  
รองศาสตราจารย์ ดร.ปราโมทย์  
รองศาสตราจารย์ ดร.ปรีชา  
รองศาสตราจารย์ ดร.มนัส  
รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภชัย  
รองศาสตราจารย์ ดร.วุฒิพล  
รองศาสตราจารย์ ดร.สมพงษ์  
รองศาสตราจารย์ ดร.สมพร  
รองศาสตราจารย์ ดร.สิทธิชัย  
รองศาสตราจารย์ ดร.สรายุธ  
รองศาสตราจารย์ อุดมศักดิ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นาถ  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรภาพ  
รองศาสตราจารย์ ดร.จิตติวัฒน์  
รองศาสตราจารย์ ดร.เชิดศักดิ์  
รองศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต  
รองศาสตราจารย์ ดร.ปกิต  
รองศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไกรสิทธิ์  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คมเดช  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักษดา  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาคริต  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพล  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เดือนเพ็ญ  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัฐพล  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รตินันท์  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รพีพงศ์  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศศิพันธ์  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุจิตรา  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อดิศักดิ์  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์อนุชา  
ดร.จารุพงษ์  
ดร.ฉันทพิชญ์  
ดร.เยาวพา  
ดร.รักษาดิ  
ดร.วัชรินทร์  
ดร.สุกัญญา

รองศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ศักดิ์

นางสาววลีรักษ์

สุดสังข์ มหาวิทยาลัยนเรศวร  
แพ่งคำ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
กอเจริญ วิทยาลัยเทคโนโลยีจิตรลดา  
ชัยจันทร์ มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์  
สิงห์ยะบุศย์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม  
สินธุนาวรัตน์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์  
ดุยจินดาชบาพร มหาวิทยาลัยขอนแก่น  
ไชยะ จังหวัดฉะเชิงเทรา  
แสงอาทิตย์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
เดชปัญญา มหาวิทยาลัยบูรพา  
สารบุตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร  
ลาดกระบัง

สุขศีล มหาวิทยาลัยนครพนม  
แก้วสวัสดิวงศ์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์  
นิติกานจนธาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน  
สุขศิริพัฒน์พงศ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน  
กฤตาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน  
กำบุญมา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน  
อัศวสุชี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน  
วสุเพ็ญ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน  
ภาพพัฒนบุรี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน  
ธำรงวุฒิ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน  
นวลฉิมพลี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน  
พิสิฐพิพัฒน์สิน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน  
วงศ์สอน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน  
สมนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน  
เหลื่อมพล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน  
เปี่ยมสุวรรณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน  
วงศ์สุทธาวาส มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน  
อุ้นเรือน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน  
ทาร์จิง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน  
กลั่นน้อย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน  
บรรเทา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน  
ชามาตย์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน  
ความหมั่น มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน  
กลั่นกล้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน  
ชาติบุปผาพันธ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน  
คำหล้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

## บรรณาธิการ

โยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

## ฝ่ายจัดการและธุรการ

ศรีศิลป์ไชย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน



## สารบัญ Table of Contents

### บทความวิจัย (Research Articles)

- กำลังของซีเมนต์อร์ตาร์ผสมเถ้าลอยไม้ยางพาราจากอุตสาหกรรม 1
- The Strength of Cement Mortar with Industrial Rubberwood Fly Ash**  
ทวีศักดิ์ ทองขวัญ, จุฑามาศ ลักษณะกิจ, นันทชัย ชูศิลป์, วิศิษฐ์ศักดิ์ ทับยัง, อรุณ ลูกจันทร์, พงศ์ศักดิ์ สุขมณี,  
อาศิร อัยรักษ์, ถาวร เกื้อสกุล และเปรมณัช ชุมพร้อม  
*Thaweesak Thongkhwan, Chuthamat Laksanakit, Nuntachai Chusilp, Wisitsak Tabyang, Arun Lukjan, Pongsak Sookmanee, Arsit Iyaruk, Tavorn Kuasakul, and Premmanat Chumprom*
- ความเป็นไปได้ของการนำเถ้าหนักไม้ยางพารามาใช้ในส่วนผสมของอิฐบล็อกประสาน 15
- The Feasibility of Using Rubberwood Bottom Ash in The Mixture of Interlocking Block**  
เปรมณัช ชุมพร้อม, จรูญ เจริญเนตรกุล, พรนารายณ์ บุญราศรี, จุฑามาศ ลักษณะกิจ, สมมาตร สวัสดิ์,  
พงศ์ศักดิ์ สุขมณี และทวีศักดิ์ ทองขวัญ  
*Premmanat Chumprom, Charoon Charoennatkul, Pornarai Boonrasi, Chuthamat Laksanakit, Sommart Swasdi, Pongsak Sookmanee, and Taweesak Thongkun*
- การพัฒนาหมึกพิมพ์สกรีนสีจากดินดำและดินแดงโดยใช้สารช่วยติดสีจากธรรมชาติ 27
- Development of Screen Inks from Black Soil and Red Soil using Natural Mordant**  
ภาวิณี เทียมดี และฐานิตา วงษ์สอาด  
*Pawinee Theamdee and Thanita Wongsard*
- การพัฒนาน้ำยาบ้วนปากจากสารสกัดใบฝรั่งและสารสกัดผลมะแว้งเครือ 38
- Development of Mouthwash from Guava Leaf Extract and Maweng Kruea Fruit Extract**  
ธัญญพัทธ์ มนุษย์, จรินทร์ธร ฟักคำ, อนงค์นุช ทุมปัต และกนกกร ผิวอ่อน  
*Thanyaphat Manud, Charinthorn Fakkham, Anongnook Thumpad, and Kanokkorn Phio-on*
- ผลของการใช้ปุ๋ยเคมีและน้ำหมักมูลสัตว์ต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของผักกาดหอมปัตเตอร์เฮด  
ที่ปลูกแบบใช้วัสดุทดแทนดิน 48
- Effects of Chemical Fertilizer and Bio-Extracts on the Growth and Yield of Butterhead  
Lettuce in Substrate Culture System**  
กาญจนา เหลืองสุวาลัย, สหสวรรณ บุญปฐมพล และชุติมา กาบแก้ว  
*Kanjana Luangsawalai, Sahassawat Boonpatompol, and Chutima Kapkao*
- การศึกษาสมบัติเชิงกลและสัณฐานวิทยาของพอลิโพรพิลีนที่ผสมผงยางอีพีดีเอ็มจากซีลประตูรถยนต์ 60
- Study of Mechanical and Morphological Properties of Polypropylene Blended with  
EPDM Rubber Powder from Automotive Door Seals**  
ศรินทร์ท ทองแสง, ณัฐรัตน์ เก่งกล้า, นันทินี บุญจันทร์ และกมลทิพย์ ถิรดิษสกุล  
*Sirinthorn Thongsang, Nattarat Kengkla, Nuntinee Boonjan, and Kamonthip Tiraditsaku*

สารบัญ (ต่อ)  
Table of Contents (Cont.)

บทความวิจัย (Research Articles)

|                                                                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ปัจจัยด้านคุณภาพการให้บริการรถไฟภายใต้การดำเนินชีวิตรูปแบบใหม่อย่างยั่งยืน กรณีศึกษา<br>เส้นทางรถไฟสายตะวันออกเฉียงเหนือ | 72 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

**The Factors in Rail Transportation Service Considering User Expectation Toward  
New Normal and Sustainability: Case study Northeastern lines**

นฤชา ตันยอัชฌาวุฒ, รัตนาภรณ์ เกษมศรี, เกษศิรินทร์, อธิธิไชพา, มัลลิกา สีฟอง, อานนท์ จันทรดัง,  
วิลาสินี กิริกิตติสกุล และณัฐญา วงละคร

*Narucha Tanaiutchawoot, Rattanaporn Kasamsri, Kestsirin Theerathitichaipa, Manlika Seefong,  
Anon Chantaratang, Wilasinee Keerakittisakul, and Nattiya Wonglakorn*

|                                                                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ผลเฉลยของสมการไดโอแฟนไทน์ $\frac{1^4}{v_1} + \frac{2^4}{v_2} + \frac{3^4}{v_3} + \dots + \frac{k^4}{v_k} = 1$ | 85 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

**The Solutions of Diophantine Equation  $\frac{1^4}{v_1} + \frac{2^4}{v_2} + \frac{3^4}{v_3} + \dots + \frac{k^4}{v_k} = 1$**

พัชรา ม่วงการ, จักรพันธ์ จันทโสภา และชลธิศ เสือนุ่ม

*Patchara Muangkarn, Jakkraphan Janthasopha, and Cholatis Suanoom*

# กำลังของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยไม้ยางพาราจากอุตสาหกรรม The Strength of Cement Mortar with Industrial Rubberwood Fly Ash

ทวีศักดิ์ ทองขวัญ<sup>1</sup> จุฑามาศ ลักษณะกิจ<sup>1\*</sup> นันทชัย ชูศิลป์<sup>1</sup> วิศิษฐ์ศักดิ์ ทับยัง<sup>1</sup> อรุณ ลูกจันทร์<sup>1</sup>  
พงศ์ศักดิ์ ศุขมณี<sup>1</sup> อาศิร อัยรักษ์<sup>1</sup> ถาวร เกื้อสกุล<sup>1</sup> และเปรมณัช ชุมพร้อม<sup>1</sup>

Thaweesak Thongkhwan<sup>1</sup> Chuthamat Laksanakit<sup>1\*</sup> Nuntachai Chusilp<sup>1</sup> Wisitsak Tabyang<sup>1</sup>  
Arun Lukjan<sup>1</sup> Pongsak Sookmanee<sup>1</sup> Arsit Iyaruk<sup>1</sup> Tavorn Kuasakul<sup>1</sup> and  
Premmanat Chumprom<sup>1</sup>

*Received: October 30, 2023; Revised: February 29, 2024; Accepted: March 6, 2024*

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษา กำลังของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอยไม้ยางพาราจากอุตสาหกรรม โดยใช้เถ้าลอยไม้ยางพาราแทนที่ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกชนิดใช้งานทั่วไป (GU) และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (PC) ในอัตราส่วนร้อยละ 0 10 20 และ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ทำให้มอร์ตาร์มีค่าการไหลเท่ากับ  $110 \pm 5$  ทำการทดสอบกำลังอัด กำลังคด และกำลังดึง จากผลการวิจัยพบว่า (1) กำลังอัดของมอร์ตาร์ มีค่าลดลงตามปริมาณเถ้าลอยไม้ยางพาราที่เพิ่มมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ GU สามารถใช้เถ้าลอยไม้ยางพาราได้ถึงร้อยละ 20 ส่วนมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ PC สามารถใช้เถ้าลอยไม้ยางพาราได้ถึงร้อยละ 10 (2) กำลังคดของมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยไม้ยางพาราร้อยละ 10 สามารถรับกำลังคดได้สูงกว่ามอร์ตาร์ส่วนผสมควบคุม และ (3) กำลังดึงของมอร์ตาร์มีค่าลดลงตามปริมาณเถ้าลอยไม้ยางพาราที่เพิ่มมากขึ้น สรุปได้ว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยไม้ยางพาราที่เหมาะสม คือ ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ซึ่งสามารถต่อยอดและพัฒนาในการใช้ประโยชน์ต่อไปได้

คำสำคัญ : เถ้าลอยไม้ยางพารา; มอร์ตาร์; กำลังอัด; กำลังคด; กำลังดึง

<sup>1</sup> คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

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

\* Corresponding Author, Tel. 08 9757 4263, E - mail: chuthamat.l@rmutsv.ac.th



## Abstract

The objective of this research is to study the strength of cement mortars mixed with industrial rubberwood fly ash. The rubberwood fly ash was used as a replacement for general-purpose hydraulic cement (GU) and Portland cement type 1 (PC) in proportions of 0, 10, 20, and 30 percent by weight of the binder. The water-to-cement ratio was varied to achieve a flow consistency of  $110 \pm 5$ . Compressive strength, flexural strength, and tensile strength were then tested. The results of the study indicated that (1) the compressive strength of mortars decreased with the increase of rubberwood fly ash content. However, GU mortar met with a percentage of replacement of 20 percent. For PC mortar, while, the appropriate replacement of 10 percent. (2) the mortars with 10 percent rubberwood fly ash showed higher compressive strength than the control mortars. And, (3) the tensile strength of mortars decreased with the increase of rubberwood fly ash content. In conclusion, the appropriate replacement level for cement with rubberwood fly ash was 10 percent which provided opportunities for future extensions and developments.

**Keywords:** Rubberwood Fly Ash; Mortar; Compressive Strength; Flexural Strength; Tensile Strength

## บทนำ

เถ้าลอยไม้ยางพาราเป็นของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิง จากเศษไม้ ปีกไม้ ในโรงงานอุตสาหกรรม เพื่อกำจัด หรือใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งผลจากกระบวนการเผาไหม้จะเกิดเป็นเถ้าจากไม้ยางพารา ทั้งเถ้าหนัก (Bottom Ash) และเถ้าลอย (Fly Ash) โดยเถ้าลอยมีลักษณะเป็นผงฝุ่น น้ำหนักเบาสามารถฟุ้งกระจายได้ง่าย การลดการฟุ้งกระจายของฝุ่นมีการกำจัดโดยการนำไปทิ้งโดยวิธีการฝังกลบ แต่การกำจัดด้วยวิธีดังกล่าวส่งผลให้เกิดมลพิษทางสิ่งแวดล้อม เกิดการฟุ้งกระจายของฝุ่นละออง และส่งผลกระทบต่อสุขภาพทางเดินหายใจของผู้อยู่อาศัยบริเวณใกล้เคียง การกำจัดเถ้าลอยด้วยวิธีอื่นจึงอาจเป็นทางเลือกที่ดีกว่า อย่างเช่นการใช้เถ้าลอยไม้ยางพาราทดแทนบางส่วนของปูนซีเมนต์ [1] พบว่าเถ้าลอยไม้ยางพารามีองค์ประกอบหลักทางเคมี คือ แคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) ร้อยละ 41.19 ส่งผลต่อสมบัติด้านกำลังอัด ซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) อลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และเฟอร์ริกออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ซึ่งทั้งหมดมีองค์ประกอบทางเคมีคล้ายปูนซีเมนต์ และ [2] ยังพบอีกว่าความแข็งแรงของอิฐที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยไม้ยางพาราจะเกิดปฏิกิริยาสำคัญ 2 ปฏิกิริยา คือ ปฏิกิริยาไฮเดรชัน ระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ ทำให้เกิดความแข็งแรง และปฏิกิริยาปอซโซลาน ซึ่งเกิดหลังปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้เกิดสารเชื่อมประสานขึ้น ส่งผลให้สามารถนำเถ้าลอยไม้ยางพารามาใช้งานได้ เพิ่มทางเลือกในการกำจัดเถ้าลอย และสร้างมูลค่ามากขึ้น เช่น [3] นำเถ้าไม้ยางพาราที่ผ่านการร่อนด้วยตะแกรงเบอร์ 4 ทดแทนบางส่วนในการผลิตบล็อกประสานปูพื้น [2] ศึกษาการใช้เถ้าลอยไม้ยางพาราเป็นส่วนผสมในอิฐ หรือ [4] ใช้เถ้าลอยไม้ยางพาราทดแทนบางส่วนสำหรับผลิตชิ้นส่วนโครงสร้างสำเร็จรูป ซึ่งเป็นแนวทางในการพัฒนาต่อยอด แต่พบว่าการใช้เถ้าลอยมีสมบัติบางอย่างที่ต้องศึกษาก่อนใช้งานไม่ว่าจะเป็นอัตราการเกิดคาร์บอนขึ้น ซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ปัจจัยด้านความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ความชื้นสัมพัทธ์อุณหภูมิ ที่มีผลต่อการเกิดคาร์บอนขึ้น โดยความชื้นสัมพัทธ์ประมาณร้อยละ 50 - 75 ทำให้อัตราการเกิดคาร์บอนขึ้นสูง [5] อีกทั้งอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ในอัตราที่สูงจะทำให้เกิดคาร์บอนขึ้นได้เร็วขึ้น [6] รวมถึงขนาดความละเอียดของอนุภาคของเถ้าลอย โดยมาตรฐาน ASTM C 618 ได้กำหนดความละเอียดของวัสดุที่สามารถใช้เป็นวัสดุปอซโซลานได้ต้องมีสัดส่วนข้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ไม่น้อยกว่าร้อยละ 34 เหมือนกับงานวิจัย [7] ที่ใช้เถ้าปาล์ม

น้ำมันบดละเอียด มีค่าร้อยละค้ำตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 9.4 ขนาดอนุภาคเฉลี่ย ( $d_{50}$ ) เท่ากับ 9.2 ไมโครเมตร แทนที่ปูนซีเมนต์โดยน้ำหนัก เพราะฉะนั้นปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่เหมาะสมจึงเป็นค่าแปรสำคัญในการศึกษา

การทดสอบสมบัติกำลังของมอร์ตาร์ที่ได้จากปูนซีเมนต์มีการทดแทนบางส่วนด้วยวัสดุชนิดต่าง ๆ เป็นข้อมูลบ่งชี้ถึงคุณภาพของวัสดุประสานดังกล่าวนั้น อาทิเช่น [8] พบว่าการใช้มอร์ตาร์มีแนวโน้ม กำลังอัด กำลังค้ำ และการไหลแผ่ลดลง ส่วนระยะเวลาการก่อตัวเพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณเส้นใยแปรใช้ใหม่จากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ และ [9] ผลกระทบของปริมาณเถ้าลอยที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลต่าง ๆ การเพิ่มขึ้นของปริมาณเถ้าลอยส่งผลให้กำลังค้ำ และกำลังอัดลดลง อีกทั้งผลของกำลังของมอร์ตาร์จะมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับกำลังของคอนกรีต โดยทั่วไปมาตรฐานของปูนซีเมนต์จะระบุถึงกำลังของมอร์ตาร์ โดยเฉพาะกำลังอัดว่าต้องมีกำลังอัดอย่างน้อยเท่ากับเท่าใดจึงถือว่าวัสดุประสานที่มีปูนซีเมนต์ชนิดดังกล่าว และวัสดุทดแทนบางส่วนผสมอยู่นั้นมีคุณภาพตามที่กำหนดหรือไม่

ความเป็นไปได้ในการนำเถ้าลอยจากไม้ยางพารามาทดแทนบางส่วนของปูนซีเมนต์ โดยการบ่งชี้คุณภาพของวัสดุโดยใช้ตัวอย่างมอร์ตาร์ ทดสอบสมบัติเชิงกล กำลังอัด กำลังค้ำ และกำลังค้ำ อ้างอิงจากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมา จึงเป็นแนวทางสำหรับการวิจัยในครั้งนี้ โดยใช้ตัวอย่างเถ้าลอยไม้ยางพาราที่ได้มาจากโรงไฟฟ้าชีวมวลที่ผลิตไฟฟ้าจากการเผาไม้ยางพาราในโรงงานอุตสาหกรรม เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ และปริมาณที่เหมาะสมในการทดแทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยจากไม้ยางพารา เพื่อต่อยอดในการใช้ประโยชน์ต่อไป

## วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ

วัสดุที่ใช้สำหรับการวิจัย ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ 2 ชนิด คือ ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกชนิดใช้งานทั่วไป (Hydraulic Cement - General Use: GU) ตามมาตรฐาน มอก. 2594-2556 [10] และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Portland Cement - Type I: PC) ตามมาตรฐาน มอก. 15-2562 [11] เป็นวัสดุประสานหลัก เถ้าลอยไม้ยางพารา (Rubberwood Fly Ash: RWA) จากการเผาไหม้ผลิตไฟฟ้า ในโรงไฟฟ้าชีวมวล พาเนล พลาสติก ไอโอ-พาเวอร์ อำเภอดำรงวิทยะ จังหวัดสงขลา พงมีลักษณะเป็นสีน้ำตาล และมีสัดส่วนค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 79.35 ทราบเมื่อน้ำค้ำขนาดที่อยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้งตามมาตรฐาน ASTM C778-00 [12] ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 16 และค้ำบนตะแกรงเบอร์ 30 ดังรูปที่ 1



(ก) ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกชนิดใช้งานทั่วไป (GU)



(ข) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (PC)



(ค) เถ้าลอยไม้ยางพารา



(ง) ทราบเมื่อน้ำ

รูปที่ 1 วัสดุวิจัย

เตรียมตัวอย่างปูนซีเมนต์ 1 ส่วน ผสมกับทราย 2.75 ส่วน โดยน้ำหนัก ผสมกับน้ำสะอาดที่ทำให้มอร์ตาร์มีค่าการไหล (Flow) เท่ากับ  $110 \pm 5$  ASTM C230/C230M-98 [13] ดำเนินการทั้งปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกชนิดใช้งานทั่วไป (GU) และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (PC) กำหนดเป็นส่วนผสมควบคุม จากนั้นใช้เกล็ดลอยไม้ยางพาราแทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์ทั้ง 2 ชนิด ในอัตราส่วนร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน อัตราส่วนผสมทั้งหมดดังตารางที่ 1 ผสมตัวอย่างมอร์ตาร์ในแต่ละส่วนผสมตามมาตรฐาน ASTM C305-99 [14] หล่อตัวอย่างเพื่อทดสอบ กำลังอัด กำลังคด และกำลังดึง ดังรูปที่ 2

การทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ (Compressive Strength Test) โดยหล่อขึ้นรูปตัวอย่างขนาด  $50 \times 50 \times 50$  mm จำนวน 3 ตัวอย่างต่อส่วนผสม จากนั้นปล่อยให้แห้ง 24 ชั่วโมง จึงถอดแบบบ่มในน้ำปูนขาวอิ่มตัวระยะเวลา 3 7 28 และ 60 วัน จากนั้นนำตัวอย่างขึ้นจากน้ำ เช็ดให้แห้งด้วยผ้า วัสดุมิติของตัวอย่าง และทำการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์จนเกิดการวิบัติตามมาตรฐาน ASTM C109/C100M-99 [15] วิธีการดังรูปที่ 2

การทดสอบกำลังคดของมอร์ตาร์ (Flexural Strength) หรือเรียกอีกอย่างว่าการทดสอบโมดูลัสแตกร้าวของมอร์ตาร์ (Modulus of Rupture) หล่อขึ้นรูปตัวอย่างคานขนาด  $40 \times 40 \times 160$  mm จำนวน 3 ตัวอย่างต่อส่วนผสม จากนั้นถอดแบบเมื่อครบ 24 ชั่วโมง บ่มในน้ำปูนขาวอิ่มตัวเป็นเวลา 3 7 28 และ 60 วัน จากนั้นนำตัวอย่างขึ้นจากน้ำ เช็ดให้แห้ง วัสดุมิติของตัวอย่าง ก่อนนำตัวอย่างไปทดสอบกำลังคดตามมาตรฐาน ASTM C348-08 [16] ดังรูปที่ 2 (ทดสอบแบบ 3 จุด)

การทดสอบกำลังดึงของมอร์ตาร์ (Tensile Strength Test) โดยหล่อขึ้นรูปตัวอย่างตามรูปแบบแบบหล่อมอร์ตาร์รูปบริเกต (Briquet) ส่วนที่คอดมีพื้นที่หน้าตัด  $25 \times 25$  mm จำนวน 3 ตัวอย่างต่ออัตราส่วนผสม จากนั้นถอดแบบที่อายุ 24 ชั่วโมง บ่มในน้ำปูนขาวอิ่มตัวเป็นเวลา 3 7 28 และ 60 วัน นำตัวอย่างขึ้นจากน้ำ เช็ดให้แห้งด้วยผ้า วัสดุมิติของตัวอย่าง และนำตัวอย่างไปทดสอบกำลังดึงของมอร์ตาร์ตามมาตรฐาน ASTM C 190-77 [17] ดังรูปที่ 2

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมของมอร์ตาร์

| ลำดับที่ | สัญลักษณ์ | อัตราส่วนผสมมอร์ตาร์โดยน้ำหนัก (อัตราส่วน) |                 |                          |      |       |
|----------|-----------|--------------------------------------------|-----------------|--------------------------|------|-------|
|          |           | ปูนซีเมนต์ (GU)                            | ปูนซีเมนต์ (PC) | เกล็ดลอยไม้ยางพารา (RWA) | ทราย | น้ำ   |
| 1        | GU        | 1.00                                       | -               | -                        | 2.75 | 0.495 |
| 2        | GU-10RWA  | 0.90                                       | -               | 0.10                     | 2.75 | 0.505 |
| 3        | GU-20RWA  | 0.80                                       | -               | 0.20                     | 2.75 | 0.520 |
| 4        | GU-30RWA  | 0.70                                       | -               | 0.30                     | 2.75 | 0.550 |
| 5        | PC        | -                                          | 1.00            | -                        | 2.75 | 0.550 |
| 6        | PC-10RWA  | -                                          | 0.90            | 0.10                     | 2.75 | 0.560 |
| 7        | PC-20RWA  | -                                          | 0.80            | 0.20                     | 2.75 | 0.570 |
| 8        | PC-30RWA  | -                                          | 0.70            | 0.30                     | 2.75 | 0.585 |



(ก) การทดสอบการไหลแผ่ของมอร์ตาร์



(ข) การทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์



(ค) การทดสอบกำลังดัดของมอร์ตาร์



(ง) การทดสอบกำลังดึงของมอร์ตาร์

รูปที่ 2 การทดสอบมอร์ตาร์

## ผลการวิจัยและการอภิปราย

### 1. สมบัติพื้นฐานของวัสดุ

#### 1.1 สมบัติทางกายภาพของวัสดุ

จากการศึกษาสมบัติทางกายภาพของวัสดุ พบว่าวัสดุประสาน ปูนซีเมนต์ GU ปูนซีเมนต์ PC และเถ้าลอยไม้ยางพารา มีค่าความถ่วงจำเพาะ 3.14 3.15 และ 2.52 ตามลำดับ ดังตารางที่ 2 ซึ่งสังเกตได้ว่า เถ้าลอยไม้ยางพาราจะมีความหนาแน่นน้อยกว่าปูนซีเมนต์เช่นเดียวกันกับงานวิจัย [3] ที่พบว่าเถ้าลอยไม้ยางพารา มีค่าความถ่วงจำเพาะ 2.59 ด้านขนาดอนุภาคเฉลี่ย  $d_{50}$  พบว่าปูนซีเมนต์ GU ปูนซีเมนต์ PC และเถ้าลอยไม้ยางพารา มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย  $d_{50}$  เท่ากับ 15.91 14.35 และ 80.50 ไมโครเมตร ตามลำดับ ดังตารางที่ 2 โดยขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์ทั้งสองชนิดสอดคล้องกับงานวิจัย [18] ส่วนขนาดอนุภาคของเถ้าลอยไม้ยางพารามีขนาดใหญ่กว่าปูนซีเมนต์อย่างเห็นได้ชัดซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัย [4] สมบัติพื้นฐานของวัสดุอื่น ๆ พบว่า มวลรวมละเอียดที่ใช้เป็นทรายแม่น้ำที่อยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้งโดยร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 16 ค้างบนตะแกรงเบอร์ 30 พบว่าทรายแม่น้ำมีค่าความถ่วงจำเพาะ 2.61 มีค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 0.96 โดยน้ำหนัก สมบัติพื้นฐานของทรายมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัย [18]

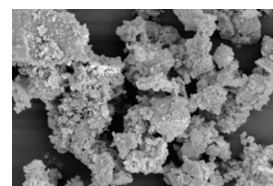
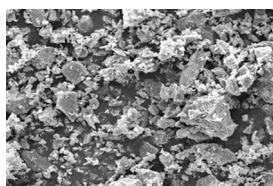
ตารางที่ 2 สมบัติทางกายภาพของวัสดุ

| วัสดุ                   | ความถ่วงจำเพาะ | ขนาดอนุภาคเฉลี่ย $d_{50}$ (ไมโครเมตร, $\mu\text{m}$ ) |
|-------------------------|----------------|-------------------------------------------------------|
| ปูนซีเมนต์ (GU)         | 3.14           | 15.91                                                 |
| ปูนซีเมนต์ (PC)         | 3.15           | 14.35                                                 |
| เถ้าลอยไม้ยางพารา (RWA) | 2.52           | 80.50                                                 |
| ทรายแม่น้ำ              | 2.61           | -                                                     |



## 1.2 ลักษณะอนุภาคของวัสดุประสาน

ลักษณะอนุภาคของวัสดุประสานโดยภาพถ่ายขยายกำลังสูง Scanning Electron Microscope (SEM) ของปูนซีเมนต์ GU ปูนซีเมนต์ PC และเถ้าลอยไม้ยางพารา ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า ดังรูปที่ 3 พบว่าปูนซีเมนต์ GU เป็นผงมีสีเทา ลักษณะจากภาพถ่ายกำลังสูงมีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุมรูปร่างไม่แน่นอนแตกต่างกัน ขนาดอนุภาคไม่สม่ำเสมอ ปูนซีเมนต์ PC เป็นผงสีเทาเข้ม ลักษณะจากภาพถ่ายกำลังสูงมีลักษณะผิวขรุขระเป็นเหลี่ยมมุม ส่วนเถ้าลอยไม้ยางพารา เป็นผงมีสีน้ำตาล ลักษณะจากภาพถ่ายกำลังสูงมีลักษณะผิวขรุขระ อนุภาคมีรูพรุนขนาดอนุภาคไม่สม่ำเสมอ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย [19] ที่พบว่าเถ้าลอยไม้ยางพารามีอนุภาคไม่สม่ำเสมอ และมีรูพรุนของอนุภาค และงานวิจัย [4] ที่พบว่าเถ้าลอยไม้ยางพารามีรูพรุนของอนุภาคบางส่วน ขนาดอนุภาคมีหลายขนาดปนกันอยู่



(ก) ปูนซีเมนต์ GU กำลังขยาย 1,000 เท่า  
 (ข) ปูนซีเมนต์ PC กำลังขยาย 1,000 เท่า  
 (ค) เถ้าลอยไม้ยางพารา RWA กำลังขยาย 1,000 เท่า  
 รูปที่ 3 ลักษณะอนุภาคของวัสดุประสานโดยภาพถ่ายขยายกำลังสูง (SEM)

## 1.3 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน

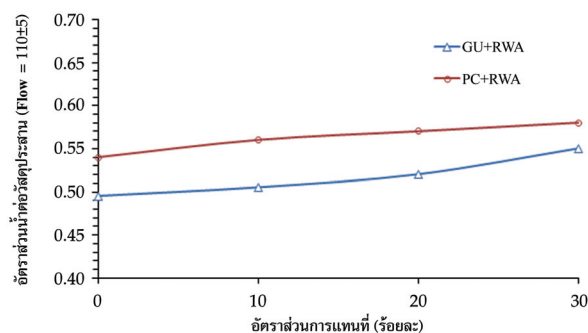
จากการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยไม้ยางพารา โดยวิธี X-ray Fluorescence (XRF) ดังตารางที่ 3 พบว่า ปริมาณซิลิคอนไดออกไซด์ร้อยละ 23.39 โดยน้ำหนักของวัสดุมีค่าใกล้เคียงปูนซีเมนต์ PC และปูนซีเมนต์ GU ส่วนแคลเซียมออกไซด์ มีค่าร้อยละ 33.43 ซึ่งน้อยกว่าปูนซีเมนต์ PC และปูนซีเมนต์ GU ด้วย จะเห็นได้ว่าปริมาณซิลิคอนไดออกไซด์ และแคลเซียมออกไซด์ จะเป็นองค์ประกอบหลักของปูนซีเมนต์ และเถ้าลอยไม้ยางพารา [4] หากผสมกับน้ำคาดการณ์ว่าสามารถเชื่อมประสานให้ตัวอย่างแข็งแรงขึ้นได้ นอกจากนี้การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) ของเถ้าลอยไม้ยางพารา มีค่าร้อยละ 4.01 โดยน้ำหนักของวัสดุ ผ่านมาตรฐาน ASTM C 618-19 [20] แต่ผลรวมของ  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  ของเถ้าลอยไม้ยางพาราไม่ผ่านมาตรฐาน ASTM C 618-19 [20] เหมือนกับงานวิจัย [18] ที่พบว่าผลรวมของ  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  ของเถ้าขยะ ปูนซีเมนต์ PC และปูนซีเมนต์ GU มีค่าน้อยกว่าร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุ และสอดคล้องกับงานวิจัย [21] ที่พบว่าเถ้าลอยไม้ยางพาราจะมีแคลเซียมออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลัก

ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน

| องค์ประกอบทางเคมี<br>(ร้อยละ)                                  | ปูนซีเมนต์<br>GU | ปูนซีเมนต์<br>PC | เถ้าลอย<br>ไมยางพารา<br>(RWA) | มาตรฐาน<br>ASTM C 618<br>Class C |
|----------------------------------------------------------------|------------------|------------------|-------------------------------|----------------------------------|
| ซิลิคอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ )                            | 19.36            | 20.75            | 23.39                         | -                                |
| อลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )                  | 5.37             | 5.14             | 6.84                          | -                                |
| ไออนออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )                        | 4.30             | 3.05             | 2.41                          | -                                |
| แคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ )                               | 61.39            | 61.74            | 33.43                         | -                                |
| แมกนีเซียมออกไซด์ ( $\text{MgO}$ )                             | 1.76             | 2.06             | 2.85                          | -                                |
| โซเดียมออกไซด์ ( $\text{Na}_2\text{O}$ )                       | 0.13             | 0.15             | 1.26                          | < 1.5                            |
| โพแทสเซียมออกไซด์ ( $\text{K}_2\text{O}$ )                     | 1.10             | 0.57             | 10.86                         | -                                |
| ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ ( $\text{SO}_3$ )                           | 3.54             | 3.89             | 6.41                          | < 5.0                            |
| การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI)                         | 2.73             | 2.16             | 4.01                          | < 6.0                            |
| $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ | 29.03            | 28.94            | 32.64                         | > 50                             |

## 2. สมบัติของมอร์ตาร์สด

ความต้องการน้ำ (Water Requirement) ของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ GU และมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ PC ที่แทนที่ด้วยเถ้าลอยไมยางพาราในอัตราส่วนร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุตามลำดับ พบว่าการแทนที่มอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ GU ด้วยเถ้าลอยไมยางพารามีค่าความต้องการน้ำ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.505 0.520 และ 0.550 ตามลำดับ และการแทนที่มอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ PC ด้วยเถ้าลอยไมยางพารามีค่าความต้องการน้ำ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.560 0.570 และ 0.585 ดังรูปที่ 4 ซึ่งสังเกตเห็นได้ว่ามอร์ตาร์มีค่าความต้องการน้ำเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่เถ้าลอยไมยางพาราที่มากขึ้น เนื่องจากวัสดุที่แทนที่มีอนุภาคใหญ่กว่าปูนซีเมนต์ จึงสามารถแทรกสอดเข้าระหว่างอนุภาคเพื่อให้วัสดุกระจายตัวได้น้อยลง ทำให้ต้องการน้ำเพิ่มขึ้นเพื่อทำให้การไหลแผ่เท่ากัน [22]



รูปที่ 4 ความต้องการน้ำของการแทนที่มอร์ตาร์ GU และ PC ด้วยเถ้าลอยไมยางพาราในอัตราส่วนที่ต่างกัน

## 3. สมบัติของมอร์ตาร์ที่แข็งตัวแล้ว

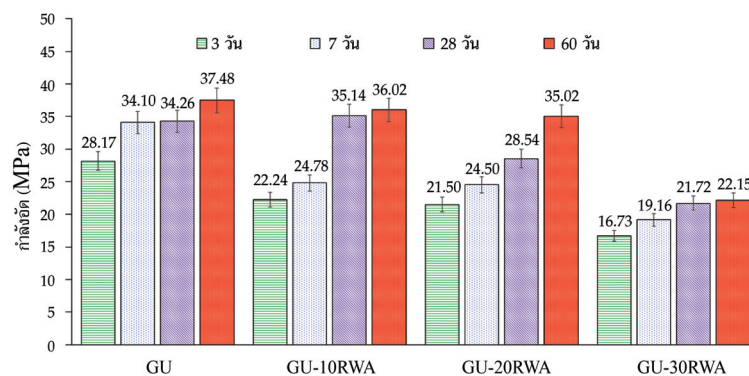
### 3.1 กำลังอัดของมอร์ตาร์

จากผลการทดสอบกำลังอัดของอัตราส่วนควบคุมมอร์ตาร์ที่อายุบ่ม 3 7 28 และ 60 วัน ดังตารางที่ 4 รูปที่ 5 และรูปที่ 6 พบว่า กำลังอัดของอัตราส่วนควบคุมมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ GU มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 28.17 34.10 34.26 และ 37.48 MPa ตามลำดับ ส่วนอัตราส่วนควบคุมมอร์ตาร์ PC มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 26.14 28.72 36.19 และ 37.84 MPa ตามลำดับ ซึ่งค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์อัตราส่วนควบคุมปูนซีเมนต์ GU และ PC มีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม เหมือนกับงานวิจัย [23] และ [24]

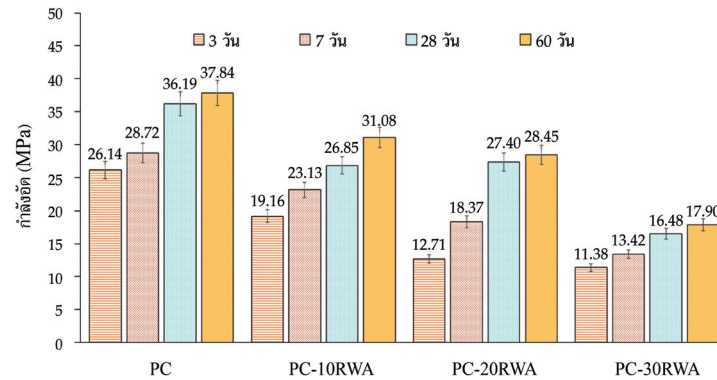
กำลังอัดมอร์ตาร์ของปูนซีเมนต์ GU และปูนซีเมนต์ PC เมื่อแทนที่ด้วยเถ้าลอยไม้ยางพารา ในอัตราส่วนร้อยละ 10 20 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ดังตารางที่ 4 รูปที่ 5 และรูปที่ 6 ผลการทดสอบ กำลังอัดทุกอัตราส่วนจะเห็นได้ว่าเมื่อแทนที่เถ้าลอยไม้ยางพาราบางส่วนในปูนซีเมนต์ จะทำให้ค่ากำลังอัดลดลง สอดคล้องกับปริมาณเถ้าลอยไม้ยางพาราที่เพิ่มขึ้น [25] เนื่องจากการลดปริมาณปูนซีเมนต์ที่เป็นตัวแปรสำคัญ ในกระบวนการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน อีกทั้งอนุภาคที่เข้ามาแทนที่มีขนาดใหญ่กว่าปูนซีเมนต์ จึงส่งผลให้กำลังอัด มีค่าต่ำลง แต่อย่างไรก็ตามมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยเถ้าลอยไม้ยางพาราสามารถพัฒนากำลังอัดได้ เนื่องจากผลของ กระบวนการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน ทั้งนี้การแทนที่ด้วยเถ้าลอยไม้ยางพาราในอัตราส่วนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ของวัสดุ มีค่ากำลังอัดใกล้เคียงอัตราส่วนควบคุมปูนซีเมนต์ GU และปูนซีเมนต์ PC มากที่สุด อีกทั้งอายุการบ่ม 28 วัน ของอัตราส่วนมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ GU การแทนที่เถ้าลอยไม้ยางพาราร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน มีค่ากำลังอัดสูงกว่าอัตราส่วนควบคุม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ [26] กล่าวว่า “การแทนที่ซีเมนต์ด้วยวัสดุผสม ละเอียดร้อยละ 10 ทำให้กำลังของมอร์ตาร์สูงขึ้นเนื่องจากอิทธิพลของการอัดตัวของอนุภาค” และงานวิจัยของ [27] กล่าวว่า “การแทนที่ซีเมนต์ด้วยวัสดุผสมที่มีขนาดเล็กหรือขนาดใกล้เคียงกับอนุภาคเฉลี่ยของซีเมนต์ช่วยลดแทรก การกระจายตัวได้ดีในเฟสได้ จึงทำให้ความสามารถในการรับกำลังดีกว่าอนุภาคขนาดใหญ่และหยาบกว่า” และ เมื่อแทนที่ด้วยเถ้าลอยไม้ยางพารามากกว่าในอัตราส่วนร้อยละ 10 ส่งผลให้มีกำลังอัดลดลงในทุกอัตราส่วน เนื่องจากองค์ประกอบสำหรับสร้างกำลังรับแรงอัดให้กับมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ GU และมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ PC ผ่านปฏิกิริยาไฮเดรชันได้เป็นผลิตภัณฑ์แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate, CSH) ที่ทำหน้าที่ เป็นตัวประสานมีปริมาณลดลงส่งผลให้มีการพัฒนากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ GU และ PC ผสมเถ้าลอยไม้ยางพาราลดลงไปด้วย

ตารางที่ 4 กำลังอัดของมอร์ตาร์

| ส่วนผสม  | กำลังอัด (MPa) |        |       |        |        |        |        |        |
|----------|----------------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
|          | 3 วัน          | ร้อยละ | 7 วัน | ร้อยละ | 28 วัน | ร้อยละ | 60 วัน | ร้อยละ |
| GU       | 28.17          | 100    | 34.10 | 100    | 34.26  | 100    | 37.48  | 100    |
| GU-10RWA | 22.24          | 79     | 24.78 | 73     | 35.14  | 103    | 36.02  | 96     |
| GU-20RWA | 21.50          | 76     | 24.50 | 72     | 28.54  | 83     | 35.02  | 93     |
| GU-30RWA | 16.73          | 59     | 19.16 | 56     | 21.72  | 63     | 22.15  | 59     |
| PC       | 26.14          | 100    | 28.72 | 100    | 36.19  | 100    | 37.84  | 100    |
| PC-10RWA | 19.16          | 73     | 23.13 | 81     | 26.85  | 74     | 31.08  | 82     |
| PC-20RWA | 12.71          | 49     | 18.37 | 64     | 27.40  | 76     | 28.45  | 75     |
| PC-30RWA | 11.38          | 44     | 13.42 | 47     | 16.48  | 46     | 17.90  | 47     |



รูปที่ 5 กำลังอัดมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ GU เมื่อแทนที่ด้วยเถ้าลอยไม้ยางพาราที่อายุบ่มต่างกัน

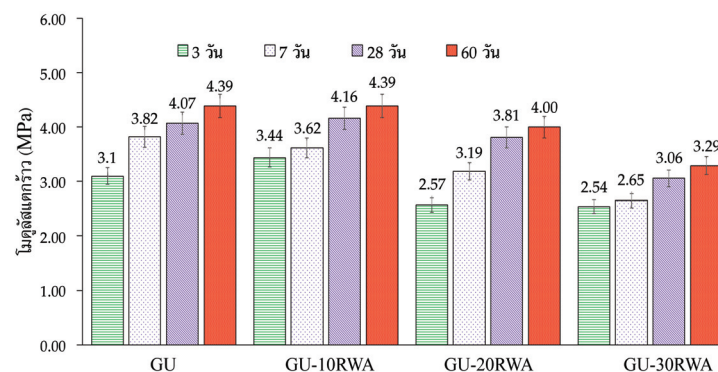


รูปที่ 6 กำลังอัดมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ PC เมื่อแทนที่ด้วยเถ้าลอยไม้ยางพาราที่อายุบ่มต่างกัน

### 3.2 กำลังคัดของมอร์ตาร์

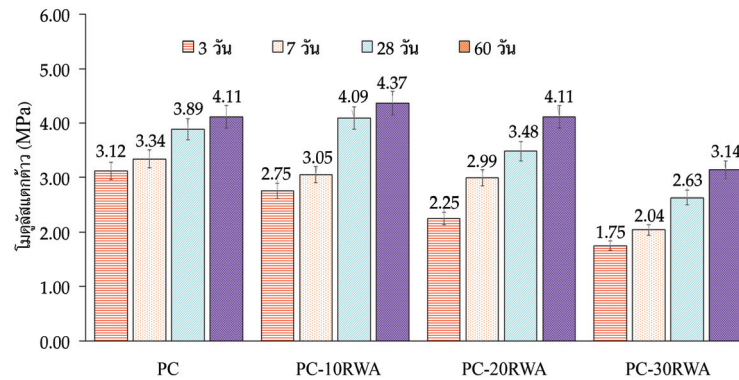
ผลการทดสอบกำลังคัดของมอร์ตาร์ ที่อายุการบ่ม 3 7 28 และ 60 วัน ซึ่งแสดงในรูปของค่าโมดูลัสแตกร้าว พบว่ากำลังคัดของอัตราส่วนควบคุมมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ GU ดังรูปที่ 7 และอัตราส่วนมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ PC ดังรูปที่ 8 มีค่าใกล้เคียงกัน และแสดงให้เห็นว่า ระยะเวลาการบ่มมีผลกับการพัฒนากำลังคัดของมอร์ตาร์ด้วย เมื่อมีการแทนที่เถ้าลอยไม้ยางพาราในอัตราส่วนร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานที่อายุการบ่ม 60 วัน พบว่าอัตราส่วนมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ GU เมื่อแทนที่ด้วยเถ้าลอยไม้ยางพารามีค่ากำลังคัดเท่ากับ 4.39 4.00 และ 3.29 MPa ตามลำดับ ดังรูปที่ 7 และอัตราส่วนมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ PC แทนที่ด้วยเถ้าลอยไม้ยางพารามีค่ากำลังคัดเท่ากับ 4.37 4.11 และ 3.14 MPa ตามลำดับ ดังรูปที่ 8 ซึ่งจะสังเกตเห็นว่ากำลังคัดทั้งมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ GU และ PC อัตราส่วน 10RWA สามารถรับกำลังคัดได้สูงกว่ามอร์ตาร์อัตราส่วนควบคุม จากนั้นกำลังคัดจะค่อย ๆ ลดลงตามอัตราส่วนการแทนที่เพิ่มขึ้นของเถ้าลอยไม้ยางพารา

การเปรียบเทียบกำลังคัด ( $f_b$ ) กับกำลังอัดของมอร์ตาร์ ( $f_c'$ ) อัตราส่วนมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ GU และอัตราส่วนมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ PC ที่อายุบ่ม 28 วัน พบว่า การแทนที่ด้วยเถ้าลอยไม้ยางพารามีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกัน เมื่อมีการแทนที่ด้วยเถ้าลอยไม้ยางพารากำลังคัดมีแนวโน้มลดลง ซึ่งสอดคล้องตามกำลังอัดที่ลดลงด้วย ดังรูปที่ 9 ซึ่งหากเปรียบเทียบกำลังคัดกับกำลังอัดของมอร์ตาร์ GU จะมีค่าเท่ากับ  $f_b = 0.6944\sqrt{f_c'}$  และหากเปรียบเทียบกำลังคัดกับกำลังอัดของมอร์ตาร์ PC มีค่าเท่ากับ  $f_b = 0.6873\sqrt{f_c'}$  สอดคล้องกับงานวิจัยของ [8] แสดงให้เห็นว่า กำลังรับแรงอัดสามารถใช้คาดการณ์กำลังคัดได้ [28]

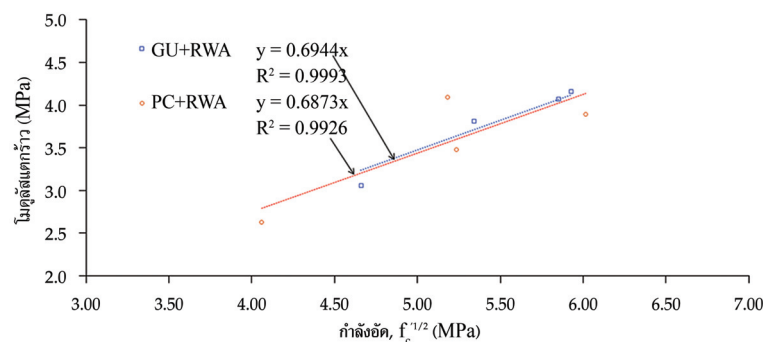


รูปที่ 7 กำลังคัดมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ GU เมื่อแทนที่ด้วยเถ้าลอยไม้ยางพาราที่อายุบ่มต่างกัน





รูปที่ 8 กำลังอัดมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ PC เมื่อแทนที่ด้วยเถ้าลอยไม้ยางพาราที่อายุบ่มต่างกัน

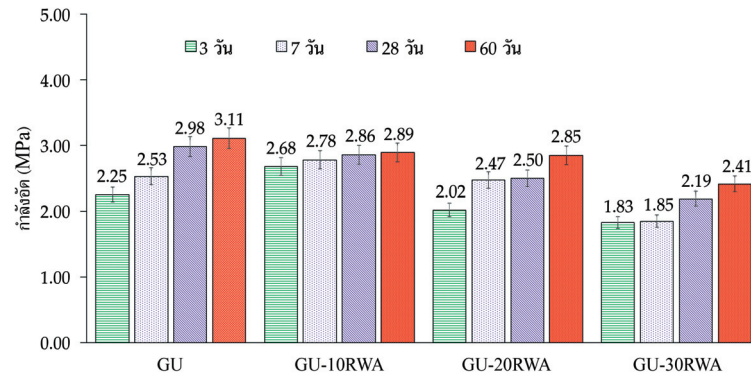


รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับกำลังอัดของมอร์ตาร์เมื่อแทนที่ด้วยเถ้าลอยไม้ยางพารา

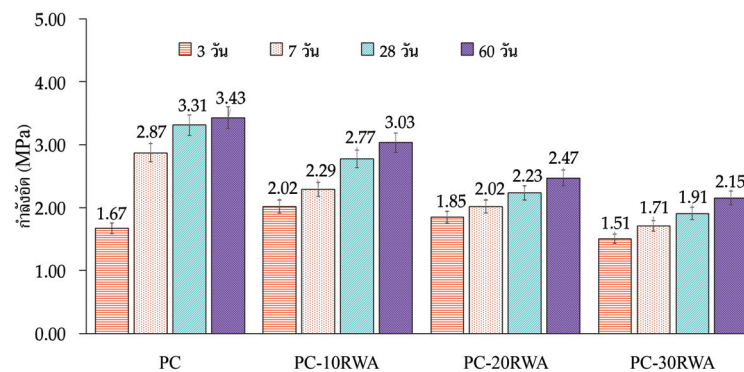
### 3.3 กำลังดึงของมอร์ตาร์

ผลการทดสอบกำลังดึงของมอร์ตาร์ที่อายุการบ่ม 3 7 28 และ 60 วัน พบว่า กำลังดึงของอัตราส่วนควบคุมมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ GU ดังรูปที่ 10 และอัตราส่วนควบคุมมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ PC ดังรูปที่ 11 มีค่าใกล้เคียง และสอดคล้องกัน การเพิ่มขึ้นของกำลังดึงสอดคล้องกับอายุการบ่มที่มากขึ้นเหมือนกับ [29] ที่พบว่า เมื่ออายุบ่มมอร์ตาร์มากขึ้นส่งผลให้กำลังดึงมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นด้วย และเมื่อแทนที่ด้วยเถ้าลอยไม้ยางพาราในอัตราส่วนร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน พิจารณาที่อายุการบ่ม 60 วัน อัตราส่วนควบคุมมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ GU แทนที่ด้วยเถ้าลอยไม้ยางพารามีค่าเท่ากับ 2.89 2.85 และ 2.41 MPa ตามลำดับ ดังรูปที่ 10 และอัตราส่วนควบคุมมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ PC แทนที่ด้วยเถ้าลอยไม้ยางพารามีค่าเท่ากับ 3.03 2.47 และ 2.15 MPa ตามลำดับ ดังรูปที่ 11 ซึ่งจากผลกำลังดึงของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ GU และ PC หากเทียบกับอัตราส่วนควบคุม ปริมาณเถ้าลอยไม้ยางพาราร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน กำลังดึงมีค่าต่ำกว่าอัตราส่วนควบคุมเล็กน้อยมีค่าใกล้เคียงที่สุด และเมื่อปริมาณเถ้าลอยไม้ยางพาราเพิ่มขึ้น กำลังดึงก็จะลดน้อยลงด้วยซึ่งมีความสอดคล้องกัน

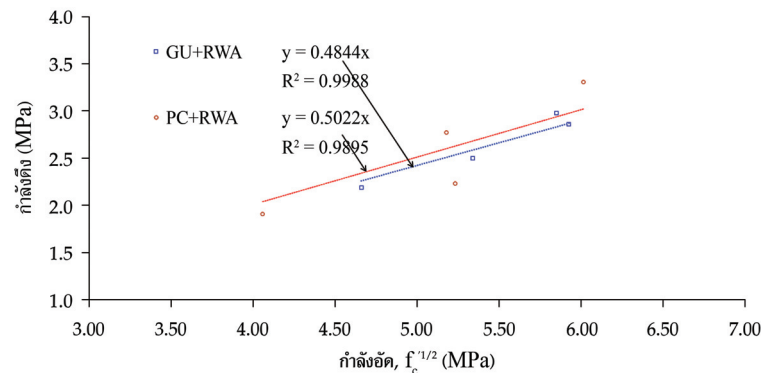
หากเปรียบเทียบกำลังดึง ( $f_t$ ) กับกำลังอัด ( $f_c$ ) ที่อายุบ่ม 28 วัน จากรูปที่ 12 ความสัมพันธ์เหมือนกับงานวิจัย [30] จะเห็นได้ว่า เมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยในอัตราส่วนผสมทั้งมอร์ตาร์ GU และ PC ทำให้กำลังดึงลดลง สอดคล้องกับกำลังอัดที่ลดลงด้วย ซึ่งหากเปรียบเทียบกำลังดึงกับกำลังอัดของมอร์ตาร์ GU จะมีค่าเท่ากับ  $f_t = 0.4844\sqrt{f_c}$  และหากเปรียบเทียบกำลังดึงกับกำลังอัดของมอร์ตาร์ PC มีค่าเท่ากับ  $f_t = 0.5022\sqrt{f_c}$  ใกล้เคียง ACI Committee 318 [31] ดังนั้นกำลังดึงที่เกิดขึ้น สามารถคาดการณ์ได้จากผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์



รูปที่ 10 กำลังดึงของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ GU เมื่อแทนที่ด้วยเถ้าลอยไม้ยางพาราที่อายุบ่มต่างกัน



รูปที่ 11 กำลังดึงของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ PC เมื่อแทนที่ด้วยเถ้าลอยไม้ยางพาราที่อายุบ่มต่างกัน



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังดึงกับกำลังอัดของมอร์ตาร์เมื่อแทนที่ด้วยเถ้าลอยไม้ยางพารา

## บทสรุป

การศึกษากำลังของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยไม้ยางพาราจากอุตสาหกรรม ผลการวิจัยพบว่า เถ้าลอยไม้ยางพารามีลักษณะอนุภาคผิวขรุขระ มีรูพรุน และขนาดอนุภาคไม่สม่ำเสมอ องค์ประกอบทางเคมี ประกอบด้วยแคลเซียม ออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลัก ไม่จัดเป็นวัสดุปอซโซลาน มอร์ตาร์มีความต้องการน้ำเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่เถ้าลอยไม้ยางพาราที่มากขึ้น และด้านกำลังพบว่า กำลังอัดมอร์ตาร์มีค่าลดลงเมื่อมีการแทนที่ด้วยเถ้าลอยไม้ยางพารามากขึ้น อย่างไรก็ตามจากผลการทดสอบกำลังอัดมอร์ตาร์ของปูนซีเมนต์ GU สามารถใช้เถ้าลอยไม้ยางพาราได้ถึงร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ส่วนมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ PC สามารถใช้เถ้าลอยไม้ยางพาราได้ถึงร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ด้านกำลังดึงของมอร์ตาร์พบว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยไม้ยางพาราร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน สามารถรับกำลังดึงได้สูงกว่ามอร์ตาร์

ส่วนผสมควบคุม และด้านกำลังดึงของมอร์ตาร์พบว่า กำลังดึงมีค่าลดลงตามปริมาณเถ้าลอยไม่ยางพาราที่เพิ่มมากขึ้น ผลการทดสอบด้านกำลังดึงแสดงให้เห็นว่า กำลังรับแรงอัดสามารถใช้คาดการณ์กำลังดัด และกำลังดึงได้ อย่างไรก็ตามจากผลการศึกษาการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยไม่ยางพาราที่เหมาะสม คือร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ซึ่งสามารถต่อยอดและพัฒนาในการใช้ประโยชน์ต่อไปได้

## กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ที่สนับสนุนในการดำเนินการวิจัยในครั้งนี้ ขอขอบคุณ บริษัท พาเนล พลัส จำกัด อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา ที่สนับสนุนวัสดุที่ใช้ในการทำวิจัย และขอขอบคุณนางสาวจิตรลดา ชมจันทร์ และนางสาววิริยา พุดคำ นักศึกษาสาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ที่ช่วยให้การวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

## References

- [1] Hawa, A. and Tonnayopas, D. (2008). Effect of Rubber Wood Fly Ash on Properties of Pumice Aggregate Concrete. In **Proceeding of the 6<sup>th</sup> PSU-Engineering Conference**. pp. 115-120 (in Thai)
- [2] 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)
- [3] Klathae, T., Sompakdee, N., Buathongkhue, C., and Deedard, N. (2020). Utilization of Parawood Ash in Concrete Paving Blocks. **Rajamangala University of Technology Srivijaya Research Journal**. Vol. 12, No. 1, pp. 36-48 (in Thai)
- [4] Thongkhan, T., Chusilp, N. and Laksanakit, C. (2022). The Strength of Concrete with Rubber Ash for Prefabricated Structure. In **The 27<sup>th</sup> National Convention on Civil Engineering**. MAT09-1- MAT09-7 (in Thai)
- [5] Roy, S. K., Poh, K. B., and Northwood, D. O. (1998). Durability of concrete-Accelerated Carbonation and Weathering Studies. **Building and Environment**. Vol. 34, No. 5, pp. 597-606. DOI: 10.1016/S0360-1323(98)00042-0
- [6] Fattuhi, N. I. (1986). Carbonation of Concrete Affected by Mic Constituents and Initial Water Curing Period. **RILEM Publications SARL**. Vol. 19, Issue 110, pp. 131-136
- [7] Sanawung, W., Tangchirapat, W., and Jaturapitakkul, C. (2018). Strength, Abrasion Resistance, and Chloride Ion Penetration of Concrete Containing Palm Oil Fuel Ash. **KMUTT Research & Development Journal**. Vol. 41, No. 1, pp. 83-96 (in Thai)
- [8] Siri wattanasanon, D., Chatveera, B., Sua-iam, G., and Yamoat, N. (2023). Engineering Properties of Mortars Incorporating Recycled Fibers from Waste Printed Circuit Boards. **The Journal of Industrial Technology**. Vol. 19, Issue 2, pp. 31-46. DOI: 10.14416/j.ind.tech.2023.06.002 (in Thai)
- [9] Zhao, Y., Chen, X., Wang, Z., Zhang, Y., and Leng, Y. (2023). An Experimental Study on the Influence of Fly Ash and Crumb Rubber on the Mechanical Property and Permeability of Engineered Cementitious Composite (ECC). **Journal of Building Engineering**. Vol. 76, pp. 1-15. DOI: 10.1016/j.job.2023.106998

- [10] TIS 2594-2556. Hydraulic Cement. **Thai Industrial Standard**. ISBN 978-616-231-470-4 (in Thai)
- [11] TIS 15-2562. Portland Cement. **Thai Industrial Standard**. ISBN 978-616-475-175-0 (in Thai)
- [12] ASTM C 778-00. (2001). Standard Specification for Standard Sand. **Annual Book of ASTM Standards**. Vol. 4, No. 1
- [13] ASTM C 230/C 230M-98. (2001). Standard Specification for Flow Table for Use in Test of Hydraulic Cement. **Annual Book of ASTM Standards**. Vol. 4, No. 1
- [14] ASTM C 305-99. (2001). Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency. **Annual Book of ASTM Standards**. Vol. 4, No. 1
- [15] ASTM C 109/C 100M-99. (2001). Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in or [50 mm] Cube Specimens). **Annual Book of ASTM Standards**. Vol. 4, No. 1
- [16] ASTM C 348-08. (2009). Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic Cement Mortars. **Annual Book of ASTM Standards**. Vol. 4, No. 1
- [17] ASTM C 190-77. (2001). Standard Test Method for Tensile Strength of Hydraulic Cement Mortars. **Annual Book of ASTM Standards**.
- [18] Wangbooncong, K., Chusilp, N., and Laksanakit, C. (2022). Characteristics of Municipal Waste Ash Affecting Mechanical Properties and Expansion of Mortar Immersed in Sodium Sulfate Solution. **Engineering Journal of Research and Development**. Vol. 33, No. 2, pp. 77-90 (in Thai)
- [19] Masae, M., Sikong, L., Kongsong, K., Phoempoon, P., Rawangwong, S., and Sririkun, W. (2013). Application of Rubber Wood Ash for Removal Nickel and Copper from Aqueous Solution. **Environment and Natural Resources J**. Vol. 11, No. 2, pp. 17-27
- [20] ASTM C 618-19. (2019). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. **Annual Book of ASTM Standards**.
- [21] Laksanakit, C., Swasdi, S., Tabyang, W., Chusilp, N., Kuasakul, T., Thongkhwan, T., Kongphet, N., Petchdee, T., and Naemsai, T. (2023). Effect of Rubberwood Fly Ash on Thermal Conductivity of Cement Fiber Board. **Research on Modern science and Utilizing Technological Innovation Journal (RMUTI Journal)**. Vol. 16, No. 3, pp. 51-65 (in Thai)
- [22] Chatveera, B. and Makul, N. (2012). Effect of the Particle Size of Limestone Powder on Portland Cement Mortar Mixed with Rice Husk Ash. **Engineering Journal of Research and Development**. Vol. 23, No. 1, pp. 10-17 (in Thai)
- [23] Sukayanudist, S. (2011). **Sulfate Resistance of Mortar with Limestone Powder**. M. ENG. Dissertation Civil Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi (in Thai)
- [24] Rumman, R., Kamal, M. R., Bediwy, A., and Alam, M. A. (2023). Partially Burnt Wood Fly Ash Characterization and Its Application in Low-Carbon Mortar and Concrete. **Construction and Building Materials**. Vol. 402, 132946, pp. 1-18. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.132946
- [25] Hawa, A. and Tonnayopas, D. (2013). Lightweight Aggregate Concrete Blended with Rice Husk Ash and Para Rubber Wood Fly Ash. In **the 11<sup>th</sup> International Conference on Mining Materials and Petroleum Engineering**. pp. 11-13
- [26] Khan, M. N. N., Jamil, M., Karim, M. R., Zain, M. F. M., and Kaish, A. B. M. A. (2017). Filler Effect of Pozzolanic Materials on the Strength and Microstructure Development of Mortar. **KSCE Journal of Civil Engineering**. Vol. 21, pp. 274-284. DOI: 10.1007/s12205-016-0737-5



- [27] Bouthong, P., Amritbenjaruethai, R., and Tonnayopas, D. (2014). Properties of Mortar Blended Modified Granite Fine. **Thaksin University Journal**. Vol. 17, No. 1, pp. 5-12 (in Thai)
- [28] Teixeira, E. R., Mateus, R., Camoes, A., and Branco, F. G. (2019). Quality and Durability Properties and Life-Cycle Assessment of High Volume Biomass Fly Ash Mortar. **Construction and Building Materials**. Vol. 197, pp. 195-207. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.11.173
- [29] Tanthikulwichit, N. and Ouypornprasert, W. (2021). Effect of Superplasticizer on Flow, Compressive Strength and Tensile Strength of Mortars. In **Proceeding of the 26<sup>th</sup> National Convention on Civil Engineering**. pp. MAT09- 1-8 (in Thai)
- [30] Poonpotmas, W., Intasai, T., Thanalue, T., Buacham, M., Thongarunsri, S., Haemawiboon, S., and Tangtermsirikul, S. (2017). Effect of Water-cement Ratio on Modulus of Rupture and Tensile Strain Capacity of Concrete. **UTK Research Journal**. Vol. 11, No. 2, pp. 96-104 (in Thai)
- [31] ACI Committee 318. (1999). **Building Code Requirements for Structural Concrete Institute**. Farmington Hills.

ความเป็นไปได้ของการนำเถ้าหนักไม้ยางพารามาใช้ในส่วนผสมของ  
อิฐบล็อกประสาน

## The Feasibility of Using Rubberwood Bottom Ash in The Mixture of Interlocking Block

เปรมณัช ชุมพร้อม<sup>1</sup> จริญญา เจริญเนตรกุล<sup>1</sup> พรนรายณ์ บุญราศรี<sup>1</sup> จุฑามาศ ลักษณะกิจ<sup>1</sup>  
สมมาตร สวัสดิ์<sup>1</sup> พงศ์ศักดิ์ สุขมณี<sup>1\*</sup> และทวิศักดิ์ ทองขวัญ<sup>1</sup>

Premmanat Chumprom<sup>1</sup> Charoon Charoennatkul<sup>1</sup> Pornarai Boonrasi<sup>1</sup>  
Chuthamat Laksanakit<sup>1</sup> Sommart Swasdi<sup>1</sup> Pongsak Sookmanee<sup>1\*</sup> and Taweesak Thongkun<sup>1</sup>

*Received: October 31, 2023; Revised: January 11, 2024; Accepted: January 17, 2024*

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความเป็นไปได้ในการนำเถ้าหนักไม้ยางพารามาผสมกับมวลรวมของอิฐบล็อกประสาน โดยมีส่วนประกอบของปูนซีเมนต์ต่อมวลรวมในอัตราส่วน 1:4 1:5 และ 1:6 โดยน้ำหนัก ซึ่งในมวลรวมจะผสมเถ้าหนักไม้ยางพารากับดินลูกรังในปริมาณร้อยละ 0 10 30 และ 50 โดยน้ำหนักของมวลรวมอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดบล็อกประสานแบบมือโยก เมื่อนำข้อมูลมาเปรียบเทียบกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน 602/2547 ซึ่งกำหนดความต้านแรงอัดของอิฐบล็อกประสานชนิดไม่รับน้ำหนักต้องไม่น้อยกว่า 25 kg/cm<sup>2</sup> ส่วนชนิดรับน้ำหนักต้องมีความต้านแรงอัดไม่น้อยกว่า 70 kg/cm<sup>2</sup> และค่าการดูดกลืนน้ำไม่เกิน 288 kg/m<sup>3</sup> พบว่า ทุกอัตราส่วนผ่านเกณฑ์ชนิดไม่รับน้ำหนัก ขณะที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานชนิดรับน้ำหนัก 3 อัตราส่วน คือ อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อมวลรวม 1:4 มวลรวมผสมเถ้าหนักไม้ยางพาราร้อยละ 0 10 30 และ 50 อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อมวลรวม 1:5 มวลรวมผสมเถ้าหนักไม้ยางพาราร้อยละ 0 และ 10 และอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อมวลรวม 1:6 มวลรวมผสมเถ้าหนักไม้ยางพาราร้อยละ 0

คำสำคัญ : อิฐบล็อกประสาน; เถ้าหนักไม้ยางพารา; มวลรวม; เครื่องอัดบล็อกประสานแบบมือโยก

<sup>1</sup> คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

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

\* Corresponding Author, Tel. 09 5591 9224, E - mail: pongsak.s@rmutsv.ac.th

## Abstract

The objective of this research is to evaluate the feasibility of using rubberwood bottom ash in the mixture of interlocking blocks. The mixtures were conducted including cement-to-aggregate ratios of 1:4, 1:5, and 1:6 by weight. The rubberwood bottom ash was used as the aggregate as same as laterite soil with different percentages of 0, 10, 30, and 50 by weight of aggregates. The mixtures were compacted using a manual interlocking molding machine. When comparing the research data with the community product standard 602/2547, which specifies that the ompressive strength of non-load-bearing blocks must be no fewer than 25 kg/cm<sup>2</sup>, and load-bearing blocks should have a compressive strength of no fewer than 70 kg/cm<sup>2</sup>, and the water absorption should not exceed 288 kg/m<sup>3</sup>, it is found that all mixtures met the stand for no-load-bearing blocks. While there were three mixtures met the standard for load-bearing blocks consisting of a ratio of cement to aggregate of 1:4 with 0, 10, 30, and 50 percent of rubberwood bottom ash, a ratio of cement to aggregate of 1:5 with 0 and 10 percent of rubberwood bottom ash, and a ratio of cement to aggregate of 1:6 with 0 percent of rubberwood bottom ash.

**Keywords:** Interlocking Blocks; Rubberwood Bottom Ash; Aggregates; A Manual Interlocking Molding Machine

## บทนำ

เถ้าหนักไม้ยางพาราเป็นของเสียที่เกิดจากกระบวนการเผาไม้ยางพารา เพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงในภาคอุตสาหกรรมทั่วประเทศ บริษัทผลิตไม้ปาร์ติเกิลบอร์ด อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา เป็นบริษัทหนึ่งที่มีปริมาณเถ้าหนักไม้ยางพาราสูงมากกว่า 10 ตันต่อเดือน มีค่าการปนเปื้อนของสารเคมีอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของกรมควบคุมมลพิษ ในปัจจุบันยังไม่มีจัดการเถ้าหนักไม้ยางพาราอย่างเป็นรูปธรรม มีเพียงแต่การกองเก็บไว้ในโรงงานและการฝังกลบเท่านั้น เมื่อฝนตกมีโอกาสที่จะเกิดเป็นปริมาณน้ำชะขยะ (Leachate) และนำมาสู่การรั่วไหลของมลภาวะสู่สิ่งแวดล้อม [1] การจัดการด้วยวิธีนี้ไม่เพียงแต่จะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมโดยตรงแล้ว ยังเป็นการสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายและพลังงานเครื่องจักรในกระบวนการฝังกลบอีกด้วย ทั้งยังเป็นการทำลายวัสดุแบบไม่มีค่า ทั้งที่วัสดุสามารถสร้างมูลค่าเพิ่มได้อย่างมากมาย เช่น การนำเถ้าไม้ยางพารามาสร้างอิฐ การผสมเถ้าไม้ยางพาราเพิ่มขึ้นเพื่อลดปริมาณปูนซีเมนต์ ส่งผลให้กำลังและความหนาแน่นจะมีค่าลดลง อิฐที่ได้จะเหมาะสำหรับการใช้งานที่ไม่รับน้ำหนัก [2] การใช้ประโยชน์จากเถ้าไม้ยางพาราในผลิตภัณฑ์คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น โดยทดลองนำเถ้าไม้ยางพาราแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ในปริมาณการเติมเถ้าไม้ยางพาราร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ในการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น ทดสอบค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 7 14 28 วัน ทดสอบการดูดกลืนน้ำที่ 28 วัน พบว่า กำลังต้านทานแรงอัดสูงสุดที่ 28 วันมีค่า 49.90 40.60 และ 39.80 MPa ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าตัวอย่างคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นที่อัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 10 และ 20 ให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม [3] การผลิตอิฐบล็อกประสานจากเถ้าไม้ยางพาราผสมดินขาวนาวิวาส โดยการอัดขึ้นรูปอิฐบล็อกประสานที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ ดินขาวเถ้าไม้ยางพารา และทราย ที่มีส่วนผสมในอัตราส่วนต่าง ๆ ทำการบ่มเป็นเวลา 28 วัน ทำการทดสอบสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลพบว่า การเพิ่มปริมาณเถ้าไม้ยางพาราทำให้ค่าความหนาแน่นมีค่าลดลง กล่าวคือทำให้อิฐบล็อกประสานมีน้ำหนักเบา โดยมีค่าความหนาแน่นต่ำสุดอยู่ที่ 1,532 kg/m<sup>3</sup> แต่ในขณะเดียวกันการเพิ่มปริมาณเถ้าไม้ยางพาราก็กส่งผลให้กำลังต้านทานแรงอัดของอิฐบล็อกประสานลดลง โดยมีค่ากำลัง

ด้านทานแรงอัดต่ำสุดอยู่ที่  $5.2 \text{ kg/m}^3$  และเมื่อพิจารณาตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 57-2533 และ 58-2530 พบว่า อิฐบล็อกประสานที่มีอัตราส่วนของดินขาว เถ้าเถ้าขี้เถ้าและทรายที่อัตราส่วน 3:1:2 โดยน้ำหนักผ่านมาตรฐานบล็อกประสานชั้นคุณภาพไม่รับน้ำหนัก [4] เนื่องจากวัสดุทั้ง 3 ชนิดมีองค์ประกอบทางเคมีที่ใกล้เคียงกัน ปูนซีเมนต์มีองค์ประกอบทางเคมีคือ แคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) ซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) อลูมินาออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และไอรอนออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ปริมาณร้อยละ 65.30 20.80 4.70 และ 3.40 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ [5] ส่วนดินลูกรังเป็นวัสดุหลักในมวลรวมของอิฐบล็อกประสานมีองค์ประกอบทางเคมีคือ ซิลิกอนออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) อลูมินาออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ไอรอนออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ร้อยละ 58.6 25.5 13.0 ตามลำดับ [6] และเถ้าขี้เถ้าเถ้าเถ้าที่ได้จากเตาเผาของกระบวนการผลิตแผ่นไม้ปาร์ติเกิลบอร์ด ซึ่งมีแคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) ซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) และโพแทสเซียมออกไซด์ ( $\text{K}_2\text{O}$ ) เป็นองค์ประกอบทางเคมีเป็นหลักร้อยละ 31.9 23.0 และ 10.4 ตามลำดับ โดยมีการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) ร้อยละ 7.7 ซึ่งเถ้าขี้เถ้ามีองค์ประกอบทางเคมีใกล้เคียงกับเถ้าลอยแคลเซียมสูง ซึ่งมีแคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) ซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) และโพแทสเซียมออกไซด์ ( $\text{K}_2\text{O}$ ) ร้อยละ 25.79 31.32 และ 2.93 [7] ดังนั้นการเพิ่มเถ้าขี้เถ้าเถ้าเถ้าในมวลรวมเป็นการเพิ่มวัสดุปอซโซลาน (Pozzolan) ให้กับมวลรวม อาจทำให้อิฐบล็อกประสานความแข็งแรงและความทนทานมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังมีการนำอิฐบล็อกประสานมาทดลองสร้างกำแพงกันดินจากอิฐบล็อกประสาน โดยทำการก่อกำแพงจำลองขนาดความสูง 1.60 ม. และกว้าง 2.00 ม. เสริมกำลังในโครงสร้างด้วย GFRP และเหล็กสตัดเกลียวที่ 10 20 และ 30 lbf ให้น้ำหนักกระทำผ่านทรายถมหลังกำแพงพบว่า การเสริมกำลังด้วย GFRP มีการเคลื่อนตัวในแนวราบน้อยกว่าการก่อแบบจุดต่อแห้งเสริมกำลังด้วยสตัดเกลียวร้อยละ 30.50 [8]

อย่างไรก็ตามเถ้าขี้เถ้าเถ้าเถ้าสามารถนำมาเป็นส่วนผสมของมวลรวม อัดขึ้นรูปเป็นอิฐบล็อกประสานผสมเถ้าขี้เถ้าเถ้าเถ้าได้ เนื่องจากการทบทวนวรรณกรรมที่ผ่านมาพบว่า มีการนำเถ้าขี้เถ้าเถ้าเถ้ามาผสมในอิฐบล็อกประสานในอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อมวลรวม 1:6 และ 1:8 และในมวลรวมจะสามารถผสมเถ้าขี้เถ้าเถ้าเถ้าได้สูงสุดที่อัตราส่วนผสมระหว่างดินลูกรังต่อเถ้าขี้เถ้าเถ้าเถ้าเถ้า 50:50 และ 75:25 [9] จึงจะผ่านมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน 602/2547 [10] อิฐบล็อกประสานชนิดไม่รับน้ำหนัก แต่การวิจัยในครั้งนี้คณะผู้วิจัยมุ่งเป้าไปที่อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อมวลรวม 1:4 1:5 และ 1:6 โดยน้ำหนัก มวลรวมมีอัตราส่วนผสมระหว่างดินลูกรังต่อเถ้าขี้เถ้าเถ้าเถ้าเถ้า 100:0 90:10 70:30 และ 50:50 โดยน้ำหนัก เพื่อต้องการเพิ่มปริมาณเถ้าขี้เถ้าเถ้าเถ้าเถ้าในมวลรวมให้ได้สูงสุด และผ่านมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน 602/2547 ซึ่งกำหนดความต้านแรงอัดของอิฐบล็อกประสานชนิดรับน้ำหนักต้องไม่น้อยกว่า  $70 \text{ kg/cm}^2$  และชนิดไม่รับน้ำหนักต้องไม่น้อยกว่า  $25 \text{ kg/cm}^2$  และค่าการดูดกลืนน้ำสำหรับชนิดรับน้ำหนักไม่เกิน  $288 \text{ kg/m}^3$  จึงอาจทำให้เกิดเป็นผลิตภัณฑ์อิฐบล็อกประสานรูปแบบใหม่ คือ สีของผลิตภัณฑ์ที่สวยงามแตกต่างไปจากเดิม เมื่อเปรียบเทียบกับบล็อกประสานที่มีขายอยู่ทั่วไปในท้องตลาด

## วัสดุ ส่วนผสม การเตรียมตัวอย่าง และการทดสอบ

1. วัสดุที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปอิฐบล็อกประสาน วัสดุที่ใช้ในการผลิตอิฐบล็อกประสานประกอบด้วยวัสดุยึดประสานคือ ปูนซีเมนต์ และมวลรวมประกอบด้วย 2 วัสดุ คือ ดินลูกรังและเถ้าขี้เถ้าเถ้าเถ้าเถ้า วัสดุทั้ง 3 ชนิด มีองค์ประกอบทางเคมีที่ใกล้เคียงกันโดยเฉพาะปูนซีเมนต์และเถ้าขี้เถ้าเถ้าเถ้าเถ้า โดยการเพิ่มเถ้าขี้เถ้าเถ้าเถ้าเถ้าในมวลรวมเป็นการเพิ่มวัสดุปอซโซลาน (Pozzolan) ให้กับมวลรวม อาจทำให้อิฐบล็อกประสานมีความแข็งแรงและความทนทานมากยิ่งขึ้น วัสดุที่ใช้ในการวิจัยดังรูปที่ 1





(ก) ปูนซีเมนต์

(ข) ดินลูกรัง

(ค) เล้าหนักไม้ยางพารา

รูปที่ 1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

การทดสอบสมบัติเบื้องต้นของดินลูกรังและเล้าหนักไม้ยางพารา เป็นกระบวนการที่สำคัญที่สุดในงานวิจัย เพื่อทราบสมบัติทางด้านวิศวกรรมเบื้องต้นของวัสดุ สำหรับนำไปเป็นฐานข้อมูลสำหรับการวิจัยครั้งต่อไปและเป็นข้อมูลสำหรับผู้ที่เกี่ยวข้องต้องการผลิตอิฐบล็อกประสานผสมเล้าหนักไม้ยางพารา ในการวิจัยนี้จะทดสอบสมบัติเบื้องต้นดังนี้

- 1) ทดสอบการกระจายขนาดของดิน (ASTM D 422-63) [11]
- 2) ทดสอบความถ่วงจำเพาะของดิน (ASTM D 143-94) [12]
- 3) ทดสอบหาค่าขีดความชื้นเหลวของดิน (ASTM D 2216-98) [13]
- 4) ทดสอบการบดอัดดินแบบสูงกว่ามาตรฐาน (ASTM D 1557-02) [14]
- 5) ทดสอบกำลังต้านแรงอัดของอิฐบล็อกประสานตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน 602/2547 [10]
- 6) ทดสอบการดูดกลืนน้ำของอิฐบล็อกประสานตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน 602/2547 [10]

การทดสอบสมบัติพื้นฐานของดินลูกรังและเล้าหนักไม้ยางพารา มีค่าการทดสอบการกระจายขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ร้อยละ 90.76 และ 93.23 ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ร้อยละ 28.37 และ 4.25 การทดสอบความถ่วงจำเพาะของดินลูกรังและเล้าหนักไม้ยางพารามีค่า 2.62 และ 2.25 การทดสอบการบดอัดดินในห้องปฏิบัติการแบบสูงกว่ามาตรฐานมีค่าความหนาแน่นแห้ง 1.80 g/cc และ 1.62 g/cc มีปริมาณน้ำที่เหมาะสมในการบดอัดร้อยละ 10.60 และ 7.60 และการทดสอบหาค่าขีดความชื้นเหลวของดินลูกรัง มีค่าพิกต์เหลวร้อยละ 28.15 พิกต์พลาสติกร้อยละ 22.91 และดัชนีมวลดินร้อยละ 5.24 ส่วนการทดสอบหาค่าขีดความชื้นเหลวของเล้าหนักไม้ยางพารา ไม่สามารถทำการทดสอบได้เนื่องจากเล้าหนักไม้ยางพาราไม่มีความเหนียว (Non Plastic) จึงไม่สามารถขึ้นรูปตามมาตรฐานการทดสอบ ซึ่งผลการทดสอบสมบัติพื้นฐานของวัสดุในมวลรวมมีผลการทดสอบที่ใกล้กับงานวิจัยที่ผ่านมา [9] ซึ่งการทดสอบการกระจายขนาดผ่านตะแกรงแตกต่างกันสูงสุดร้อยละ 37.65 การทดสอบความถ่วงจำเพาะของดินลูกรังและเล้าหนักไม้ยางพาราแตกต่างกันสูงสุดร้อยละ 4.44 การทดสอบการบดอัดดินในห้องปฏิบัติการแบบสูงกว่ามาตรฐานมีค่าความหนาแน่นแห้งแตกต่างกันสูงสุดร้อยละ 14.89 ปริมาณน้ำที่เหมาะสมในการบดอัดแตกต่างกันสูงสุดร้อยละ 83.55 และการทดสอบหาค่าขีดความชื้นเหลวของดินลูกรังแตกต่างกันสูงสุดร้อยละ 155.61 ซึ่งค่าความแตกต่างเกิดจากแหล่งที่มาของดินลูกรัง

2. การออกแบบส่วนผสมของอิฐบล็อกประสาน การออกแบบส่วนผสมมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อมวลรวม 1:4 1:5 และ 1:6 โดยน้ำหนัก มวลรวมมีอัตราส่วนผสมระหว่างดินลูกรังต่อเล้าหนักไม้ยางพารา 100:0 90:10 70:30 และ 50:50 โดยน้ำหนัก ทำการทดสอบความต้านแรงอัดและการทดสอบการดูดกลืนน้ำของอิฐบล็อกประสานอัตราส่วนการผสมละ 3 ตัวอย่าง ตามหลักทางวิศวกรรม จึงต้องใช้ก้อนตัวอย่างจำนวน 6 ตัวอย่างต่ออัตราส่วนการผสมทดสอบที่อายุการบ่ม 7 วัน และ 28 วัน พบว่า ต้องใช้ตัวอย่างอิฐบล็อกประสานทั้งหมดในการทดสอบจำนวน 144 ก้อน ดังนั้นจึงได้มีการกำหนดสัญลักษณ์ขึ้นมาเพื่อให้เข้าใจง่ายและป้องกันความผิดพลาดเนื่องจากการหยิบตัวอย่าง จึงมีรูปแบบการกำหนดสัญลักษณ์ดังสมการที่ (1) และตารางที่ 1

## A - B - C

(1)

เมื่อ

- A คือ อัตราส่วนของปูนซีเมนต์ต่อมวลรวม  
 B คือ อัตราส่วนดินลูกรังต่อเก้าหนักไม้ยางพารา  
 C คือ อายุการบ่ม

ตัวอย่าง การอ่านความหมายของสัญลักษณ์รายละเอียดของอิฐบล็อกประสาน

1:4 - 90:10 - 7 หมายถึง มีอัตราส่วนของปูนซีเมนต์ 1 ส่วน มวลรวม 4 ส่วน โดยในมวลรวม 4 ส่วน จะประกอบด้วยดินลูกรังร้อยละ 90 เก้าหนักไม้ยางพาราร้อยละ 10 และบ่มนาน 7 วัน

1:6 - 70:30 - 28 หมายถึง อิฐบล็อกประสานที่มีอัตราส่วนของปูนซีเมนต์ 1 ส่วน มวลรวม 6 ส่วน โดยในมวลรวม 6 ส่วน จะประกอบด้วยดินลูกรังร้อยละ 70 เก้าหนักไม้ยางพาราร้อยละ 30 และบ่มนาน 28 วัน

ตารางที่ 1 อัตราส่วนของอิฐบล็อกประสานผสมเก้าหนักไม้ยางพารา

| ลำดับ | สัญลักษณ์ A - B - C | จำนวน (ตัวอย่าง) |
|-------|---------------------|------------------|
| 1     | 1:4 - 100:0 - 7     | 6                |
| 2     | 1:4 - 90:10 - 7     | 6                |
| 3     | 1:4 - 70:30 - 7     | 6                |
| 4     | 1:4 - 50:50 - 7     | 6                |
| 5     | 1:4 - 100:0 - 28    | 6                |
| 6     | 1:4 - 90:10 - 28    | 6                |
| 7     | 1:4 - 70:30 - 28    | 6                |
| 8     | 1:4 - 50:50 - 28    | 6                |
| 9     | 1:5 - 100:0 - 7     | 6                |
| 10    | 1:5 - 90:10 - 7     | 6                |
| 11    | 1:5 - 70:30 - 7     | 6                |
| 12    | 1:5 - 50:50 - 7     | 6                |
| 13    | 1:5 - 100:0 - 28    | 6                |
| 14    | 1:5 - 90:10 - 28    | 6                |
| 15    | 1:5 - 70:30 - 28    | 6                |
| 16    | 1:5 - 50:50 - 28    | 6                |
| 17    | 1:6 - 100:0 - 7     | 6                |
| 18    | 1:6 - 90:10 - 7     | 6                |
| 19    | 1:6 - 70:30 - 7     | 6                |
| 20    | 1:6 - 50:50 - 7     | 6                |
| 21    | 1:6 - 100:0 - 28    | 6                |
| 22    | 1:6 - 90:10 - 28    | 6                |
| 23    | 1:6 - 70:30 - 28    | 6                |
| 24    | 1:6 - 50:50 - 28    | 6                |
| รวม   |                     | 144              |

3. การเตรียมตัวอย่าง การอัดขึ้นรูปอิฐบล็อกประสานผสมเถ้าหนักไม้ยางพาราด้วยเครื่องอัดบล็อกประสานแบบมือโยกเริ่มต้นจากเตรียมวัตถุดิบในการผสม อันได้แก่ ดินลูกรัง เถ้าหนักไม้ยางพารา ปูนซีเมนต์ และน้ำ ซึ่งดินลูกรังและเถ้าหนักไม้ยางพาราจะต้องร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 10 ดังรูปที่ 2(ก) การผสม ควรผสมดินและเถ้าหนักไม้ยางพารากับปูนซีเมนต์ให้เข้ากันก่อน แล้วค่อย ๆ เติมน้ำโดยใช้ฝักบัวหรือหัวฉีดพ่นให้เป็นละอองกว้าง น้ำที่ใช้ควรเป็นน้ำสะอาด ดังรูปที่ 2(ข) หลังจากนั้นนำดินที่ผสมแล้วเข้าเครื่องอัด โดยตวงน้ำหนักประมาณ 6 kg ควรใช้ส่วนผสมให้หมดภายใน 30 นาที หลังจากผสมน้ำเพื่อป้องกันปูนก่อตัวก่อนอัดขึ้นรูป ดังรูปที่ 2(ค) บล็อกประสานที่อัดเป็นก้อนแล้วทำการผึ่งในที่ร่มประมาณ 1 วัน เริ่มบ่มโดยการรดน้ำด้วยฝักบัว หรือฉีดพ่นเป็นละอองให้ชุ่ม แล้วคลุมด้วยผ้าพลาสติกไม่ให้ไอน้ำระเหยออก ตั้งไว้จนมีอายุครบ 7 และ 28 วัน ไม่ควรเคลื่อนย้ายก่อนกำหนด เพราะจะทำให้ก้อนบิ่นหรือเกิดการแตกร้าวได้ง่าย ดังรูปที่ 2(ง)



(ก) เตรียมวัตถุดิบในการผสม



(ข) การผสม



(ค) การเข้าเครื่องอัด



(ง) บล็อกประสาน

รูปที่ 2 การอัดขึ้นรูปอิฐบล็อกประสานผสมเถ้าหนักไม้ยางพารา

4. การทดสอบอิฐบล็อกประสาน การทดสอบความต้านแรงอัดและการทดสอบการดูดกลืนน้ำตามของอิฐบล็อกประสานตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน 602/2547 [10] จะใช้ตัวอย่างที่ผ่านการทดสอบลักษณะทั่วไป คือ การวัดขนาดและตรวจสอบรอยแตกร้าวหรือการบิ่นของตัวอย่างตามขั้นตอนการทดสอบในมาตรฐาน เมื่อทำการตรวจสอบลักษณะทั่วไปแล้วเสร็จเป็นที่เรียบร้อยแล้วจึงนำตัวอย่างไปทดสอบการทดสอบความต้านแรงอัดและการทดสอบการดูดกลืนน้ำ (รูปที่ 3-5) โดยงานทดสอบทั้งหมดจะทำการทดสอบที่สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย





(ก) การวัดขนาดของตัวอย่าง (ข) การตรวจสอบรอยร้าวหรือการบิ่นของตัวอย่าง

รูปที่ 3 การทดสอบลักษณะทั่วไปและมิติของอิฐบล็อกประสานผสมเถ้าหนักไม้ยางพารา



(ก) การเคลือบผิว

(ข) ทดสอบแรงอัด

(ค) ลักษณะการร้าว

รูปที่ 4 การทดสอบความต้านแรงอัดอิฐบล็อกประสานผสมเถ้าหนักไม้ยางพารา



(ก) การแช่น้ำ

(ข) การชั่งในน้ำ

(ค) การอบแห้ง

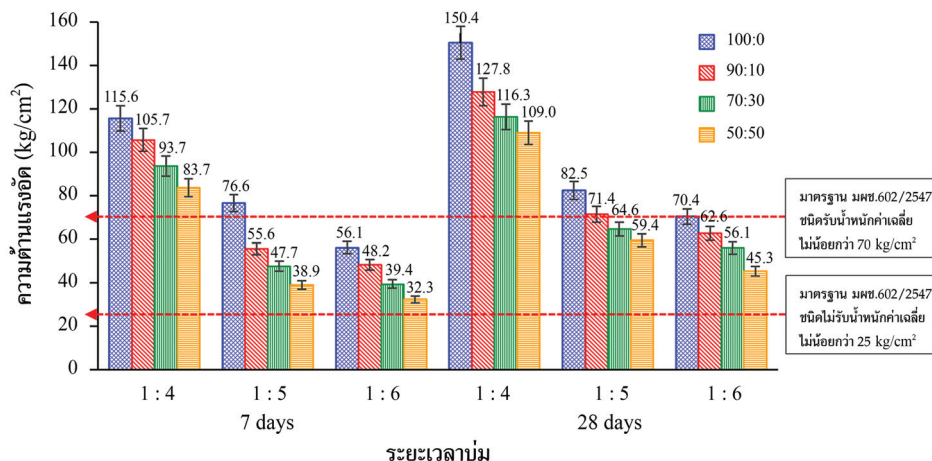
รูปที่ 5 การทดสอบการดูดกลืนน้ำของอิฐบล็อกประสานผสมเถ้าหนักไม้ยางพารา

## ผลการวิจัยและการอภิปราย

### 1. กำลังต้านทานแรงอัดของอิฐบล็อกประสาน

การทดสอบสมบัติเชิงกลของอิฐบล็อกประสานของการศึกษานี้คือการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัด ซึ่งมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน 602/2547 [10] กำหนดความต้านแรงอัดของอิฐบล็อกประสานชนิดรับน้ำหนัก ต้องไม่น้อยกว่า  $70 \text{ kg/cm}^2$  และชนิดไม่รับน้ำหนักต้องไม่น้อยกว่า  $25 \text{ kg/cm}^2$  จากการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน ปูนซีเมนต์ต่อมวลรวม 1:4 1:5 และ 1:6 โดยน้ำหนัก และในมวลรวมจะมีอัตราส่วนผสมระหว่างดินลูกรังต่อ เถ้าหนักไม้ยางพาราผสมกัน 100:0 90:10 70:30 และ 50:50 โดยน้ำหนัก ทำให้ได้ค่ากำลังต้านทานแรงอัด ดังรูปที่ 6





รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาบ่มกับความต้านแรงอัดของอิฐบล็อกประสานผสมของเถ้าหนักไม้ยางพารา

จากผลการทดสอบความต้านแรงอัดของอิฐบล็อกประสานผสมของเถ้าหนักไม้ยางพาราพบว่า ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน มีความต้านแรงอัดอยู่ในช่วง 45.28 - 150.40 ksc โดยมีค่าความต้านแรงอัดมากกว่า ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน ซึ่งมีความต้านแรงอัดอยู่ในช่วง 32.31 - 115.60 ksc โดยอัตราส่วน 1:5 - 50:50 มีการเพิ่มขึ้น ของความต้านแรงอัดของอิฐบล็อกประสานสูงสุดร้อยละ 52.58 ของความต้านแรงอัดระยะเวลาการบ่ม 7 วัน และอัตราส่วน 1:5 - 100:00 มีการเพิ่มขึ้นของความต้านแรงอัดของอิฐบล็อกประสานต่ำสุดร้อยละ 7.77 ของความต้าน แรงอัดระยะเวลาการบ่ม 7 วัน จากข้อมูลดังกล่าวทำให้ทราบว่า การพิจารณาผลการทดสอบความต้านแรงอัด ของอิฐบล็อกประสานผสมของเถ้าหนักไม้ยางพาราควรพิจารณาที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน และเถ้าหนัก ไม้ยางพาราที่เพิ่มขึ้นในมวลรวมจะมีผลต่อการพัฒนาความต้านแรงอัดที่มากกว่ามวลรวมที่มีดินลูกรังเป็นส่วนผสม เพียงอย่างเดียว

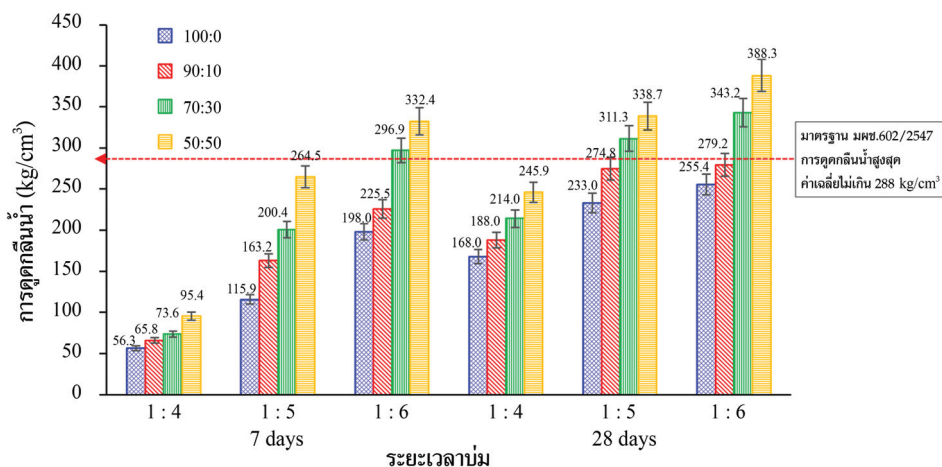
เมื่อพิจารณาความต้านแรงอัดของอิฐบล็อกประสานผสมของเถ้าหนักไม้ยางพาราระยะเวลาการบ่ม 28 วัน อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อมวลรวม 1:4 มีความต้านแรงอัดสูงสุดอยู่ในช่วง 108.95 - 150.40 ksc และ อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อมวลรวม 1:6 มีความต้านแรงอัดต่ำสุดอยู่ในช่วง 45.28 - 70.40 ksc ซึ่งสอดคล้องกับ งานวิจัยเรื่องคุณสมบัติเชิงวิศวกรรมของอิฐบล็อกประสานที่มีส่วนผสมของเถ้าหนักไม้ยางพาราจากโรงงาน ปลาปั่น [9] ที่อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อมวลรวม 1:6 มวลรวมมีอัตราส่วนดินลูกรังต่อเถ้าหนักไม้ยางพารา 50:50 มีความต้านแรงอัด 52.50 ksc มีความแตกต่างกันร้อยละ 15.95 ซึ่งอาจเป็นเพราะที่มาของวัสดุและ เทคนิคการอัดขึ้นรูป เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน 602/2547 [7] ทุกอัตราส่วนการผสม มีความต้านแรงอัดที่ผ่านมาตรฐานอิฐบล็อกประสานชนิดไม่รับน้ำหนัก ฉะนั้นอัตราส่วน 1:6 - 50:50 - 28 เป็นอัตราส่วนที่ดีที่สุด สามารถผสมเถ้าหนักไม้ยางพาราในมวลรวมได้ปริมาณสูงที่สุดในการผลิตอิฐบล็อก ประสานชนิดไม่รับน้ำหนัก แต่อัตราส่วน 1:5 - 70:30 - 28 1:5 - 50:50 - 28 1:6 - 90:10 - 28 1:6 - 70:30 - 28 และ 1:6 - 50:50 - 28 มีความต้านแรงอัดที่ไม่ผ่านมาตรฐานอิฐบล็อกประสานชนิดรับน้ำหนัก ดังนั้นอัตราส่วน 1:4 - 50:50 - 28 เป็นอัตราส่วนที่สามารถผสมเถ้าหนักไม้ยางพาราในมวลรวมได้ปริมาณสูงที่สุด ในการผลิตอิฐบล็อกประสานชนิดรับน้ำหนัก

อิทธิพลของอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อมวลรวม เป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อ มวลรวม 1:4 1:5 และ 1:6 โดยน้ำหนัก เมื่อกำหนดอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อมวลรวม 1:4 เป็นตัวควบคุม ส่งผลให้อัตราส่วนดินลูกรังต่อเถ้าหนักไม้ยางพารา 100:0 มีค่าความต้านแรงอัดลดลงร้อยละ 0 45.15 และ 53.19 อัตราส่วนดินลูกรังต่อเถ้าหนักไม้ยางพารา 90:10 มีค่าความต้านแรงอัดลดลงร้อยละ 0 44.12 และ 51.01 อัตราส่วนดินลูกรังต่อเถ้าหนักไม้ยางพารา 70:30 มีค่าความต้านแรงอัดลดลงร้อยละ 0 44.40 และ 51.79 และอัตราส่วนดินลูกรังต่อเถ้าหนักไม้ยางพารา 50:50 มีค่าความต้านแรงอัดลดลงร้อยละ 0 45.48 และ 58.44 เนื่องจากการผสมมวลในการวิจัยครั้งนี้มวลรวมมีการเพิ่มเถ้าหนักไม้ยางพาราและในขณะเดียวกันก็มีการลดปริมาณ ของดินลูกรังลงด้วยเช่นกัน จึงอาจส่งผลให้อิทธิพลของอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อมวลรวมมีผลต่อการลดลงของแรงอัด ที่ใกล้เคียงกัน

การเพิ่มเถ้าหนักไม้ยางพาราร้อยละ 0 10 30 และ 50 โดยน้ำหนักของมวลรวม ส่งผลให้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อมวลรวม 1:4 มีค่าความต้านแรงอัดลดลงร้อยละ 0 15.05 22.70 และ 27.56 ของอิฐบล็อกประสานที่ไม่ผสมเถ้าหนักไม้ยางพารา ตามลำดับ อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อมวลรวม 1:5 มีค่าความต้านแรงอัดลดลงร้อยละ 0 13.45 21.65 และ 28.00 ของอิฐบล็อกประสานที่ไม่ผสมเถ้าหนักไม้ยางพารา ตามลำดับ และอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อมวลรวม 1:6 มีค่าความต้านแรงอัดลดลงร้อยละ 0 11.08 20.38 และ 35.68 จากข้อมูลการเพิ่มปริมาณเถ้าหนักไม้ยางพาราจะส่งผลให้ค่าความต้านแรงอัดลดลง โดยเพิ่มเถ้าหนักไม้ยางพาราร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของมวลรวม อัตราส่วน 1:4 - 50:50 - 28 มีความต้านแรงอัดลดลงน้อยที่สุด และอัตราส่วน 1:6 - 50:50 - 28 มีความต้านแรงอัดลดลงมากที่สุด เนื่องจากปริมาณปูนซีเมนต์ที่มีมากเพียงพอต่อการยึดประสานมวลรวมให้เข้ากันได้เป็นอย่างดี จึงทำให้อัตราส่วนที่มีปูนซีเมนต์ผสมอยู่มากจะยังคงรักษาความแข็งแรงของวัสดุไว้ได้ดีที่สุด

## 2. การดูดกลืนน้ำของอิฐบล็อกประสาน

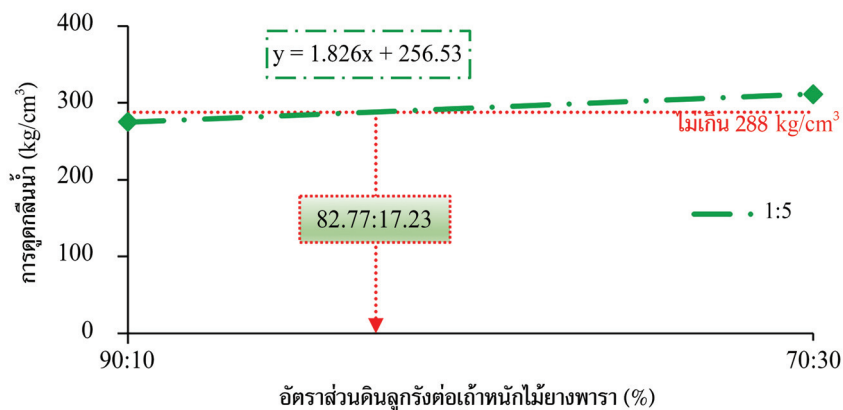
การดูดกลืนน้ำของอิฐบล็อกประสานตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน 602/2547 [10] พิจารณาเฉพาะอิฐบล็อกชนิดรับน้ำหนัก น้ำหนักอิฐบล็อกประสานเมื่ออบแห้งน้อยกว่า 1,680 kg จะมีค่าเฉลี่ยการดูดกลืนน้ำสูงสุดไม่เกิน 288 kg/m<sup>3</sup> จากการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อมวลรวม 1:4 1:5 และ 1:6 โดยน้ำหนัก และในมวลรวมจะมีอัตราส่วนผสมระหว่างดินลูกรังต่อเถ้าหนักไม้ยางพาราผสมกัน 100:0 90:10 70:30 และ 50:50 โดยน้ำหนัก ทำให้ได้ค่ากำลังต้านทานแรงอัด ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาบ่มกับการดูดกลืนน้ำของอิฐบล็อกประสานผสมของเถ้าหนักไม้ยางพารา

จากผลการทดสอบการดูดกลืนน้ำของอิฐบล็อกประสานผสมเถ้าหนักไม้ยางพาราพบว่า ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน มีค่าการดูดกลืนน้ำอยู่ในช่วง 56.30 - 332.42 kg/m<sup>3</sup> และระยะเวลาการบ่ม 28 วัน มีค่าการดูดกลืนน้ำอยู่ในช่วง 168.03 - 388.27 kg/m<sup>3</sup> ค่าการดูดกลืนน้ำควรพิจารณาที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน เนื่องจากอิฐบล็อกประสานที่มีปูนซีเมนต์เป็นวัสดุยึดประสานจะมีการพัฒนากำลังของกำลังสูงสุด [15] โดยอัตราส่วนที่มีค่าการดูดกลืนน้ำไม่ผ่านมาตรฐานอิฐบล็อกประสานชนิดรับน้ำหนักคืออัตราส่วน 1:5 - 70:30 1:5 - 50:50 1:6 - 70:30 และ 1:6 - 50:50 สังเกตได้ว่าการเพิ่มปริมาณเถ้าหนักไม้ยางพาราจะส่งผลให้ค่าการดูดกลืนน้ำของอิฐบล็อกประสานเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นอิฐบล็อกประสานผสมของเถ้าหนักไม้ยางพาราที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานชนิดรับน้ำหนัก 3 อัตราส่วน คือ อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อมวลรวม 1:4 มวลรวมผสมเถ้าหนักไม้ยางพาราร้อยละ 0 10 30 และ 50 โดยน้ำหนักของมวลรวม อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อมวลรวม 1:5 มวลรวมผสมเถ้าหนักไม้ยางพาราร้อยละ 0 และ 10 โดยน้ำหนักของมวลรวม และอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อมวลรวม 1:6 มวลรวมผสมเถ้าหนักไม้ยางพาราร้อยละ 0 (ไม่สามารถผสมเถ้าหนักไม้ยางพาราได้ในมวลรวม)

เพื่อหาค่าอัตราส่วนดินลูกรังต่อเถ้าหนักไม้ยางพาราที่เหมาะสมของอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อมวลรวม 1:5 จึงพิจารณาเลือกค่าการดูดกลืนน้ำของอัตราส่วนดังกล่าว ในช่วงอัตราส่วนดินลูกรังต่อเถ้าหนักไม้ยางพารา 90:10 ถึง 70:30 จึงได้ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนดินลูกรังต่อเถ้าหนักไม้ยางพารากับการดูดกลืนน้ำ

จากความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนดินลูกรังต่อเถ้าหนักไม้ยางพารากับการดูดกลืนน้ำสามารถพยากรณ์ที่ระดับความมั่นใจร้อยละ 95 ได้ว่า อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อมวลรวม 1:5 โดยน้ำหนัก ควรใช้อัตราส่วนดินลูกรังต่อเถ้าหนักไม้ยางพารา 82.77:17.23 โดยน้ำหนักของมวลรวม อาจกล่าวได้ว่าอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อมวลรวม 1:4 1:5 และ 1:6 สามารถผสมเถ้าหนักไม้ยางพาราในมวลรวมได้สูงร้อยละ 50 10 และ 0 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ จึงจะผ่านมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน 602/2547 [10] อิฐบล็อกประสานชนิดรับน้ำหนัก

### 3. วิเคราะห์ต้นทุนการผลิตอิฐบล็อกประสานผสมเถ้าหนักไม้ยางพารา

ปัจจุบันราคาท้องตลาดของอิฐบล็อกประสานชนิดไม่รับน้ำหนักราคา 20 บาทต่อก้อน ซึ่งอัตราส่วนที่สามารถผสมเถ้าหนักไม้ยางพาราได้สูงสุดที่ผ่านมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน 602/2547 [10] อิฐบล็อกประสานชนิดไม่รับน้ำหนักของการวิจัยครั้งนี้ คือ อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อมวลรวม 1:6 ในมวลรวมมีอัตราส่วนดินลูกรังต่อเถ้าหนักไม้ยางพารา 50:50 ซึ่งมีต้นทุนการผลิตต่อ 1 ก้อนตัวอย่าง ดังนี้ 1) ค่าดินลูกรัง 2.0 kg ราคา 0.25 บาท 2) เถ้าหนักไม้ยางพารา 2.0 kg ราคา 0.10 บาท (ค่าขนส่ง) 3) ปูนซีเมนต์ 0.5 kg ราคา 1.65 บาท 4) ค่าแรงงานในการอัดขึ้นรูปก้อนละ 4 บาท รวมทั้งหมด 6 บาทต่อก้อน จะสังเกตว่าการนำเถ้าหนักไม้ยางพารามาเป็นส่วนผสมในอิฐบล็อกประสานจะช่วยให้ลดต้นทุนให้กับผู้ประกอบการได้ค่อนข้างน้อย 0.15 บาท แต่เมื่อเปรียบเทียบกับ การลดปริมาณขยะอุตสาหกรรมที่ก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมในชุมชนใกล้เคียง เป็นการลดฝุ่นละอองในอากาศ ลดของเสียจากการชะล้างที่จะซึมลงผิวดินและแม่น้ำลำคลอง ถือว่าการผลิตอิฐบล็อกประสานผสมเถ้าหนักไม้ยางพารามีความเป็นไปได้และมีความคุ้มค่าต่อการลงทุน

### บทสรุป

การทดลองนำเถ้าหนักไม้ยางพารามาผสมในมวลรวมแล้วทำการอัดขึ้นรูปเป็นอิฐบล็อกประสาน ซึ่งพิจารณาผลการทดสอบตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน 602/2547 พบว่า เมื่ออัตราส่วนปูนซีเมนต์คงที่แต่มวลรวมเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ความต้านทานแรงอัดลดลง และการดูดกลืนน้ำเพิ่มสูงขึ้น ในทำนองเดียวกันการเติมเถ้าหนักไม้ยางพาราและลดปริมาณดินลูกรังตามอัตราส่วน จะส่งผลให้ความต้านทานแรงอัดลดลงและการดูดกลืนน้ำเพิ่มสูงขึ้นเช่นกัน และอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อมวลรวม 1:4 1:5 และ 1:6 โดยน้ำหนัก สามารถผสมเถ้าหนักไม้ยางพาราในมวลรวมได้สูงร้อยละ 50 10 และ 0 โดยน้ำหนัก จึงจะผ่านมาตรฐานอิฐบล็อกประสานชนิดรับน้ำหนัก ส่วนอิฐบล็อกประสานทุกอัตราส่วนตามขอบเขตของการวิจัยผ่านมาตรฐานอิฐบล็อกประสานชนิดไม่รับน้ำหนัก จึงถือได้ว่าอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อมวลรวม 1:6 โดยน้ำหนัก ผสมเถ้าหนักไม้ยางพาราในมวลรวมได้สูงร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการนำไปอัดขึ้นรูปเป็นอิฐบล็อกประสานชนิดไม่รับน้ำหนัก อีกทั้งการนำเถ้าหนักไม้ยางพารามาเป็นส่วนผสมในอิฐบล็อกประสานจะช่วยให้ลดต้นทุนให้กับผู้ประกอบการได้ค่อนข้างน้อย

0.15 บาท ถ้าผลิตปริมาณมากในภาคอุตสาหกรรมอิฐบล็อกประสานผสมเถ้าหนักไม่ยางพาราอาจเป็นตัวเลือกหนึ่งที่มีความคุ้มค่าต่อการลงทุนสูง

## กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความร่วมมือร่วมใจกันในหลายฝ่าย ขอขอบคุณ สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ที่ได้สนับสนุนสถานที่ในการทำวิจัย การใช้อุปกรณ์เครื่องมือทดสอบ ตลอดจนเจ้าหน้าที่และพนักงานในการดำเนินงานต่าง ๆ และที่สำคัญคือ นายวัชรวิศ บุลประพัทธ์ นายวรภัทร นิลพันธ์ และนางสาวสุภารัตน์ ไทยเจริญ ซึ่งเป็นผู้ควบคุมการทดสอบทั้งหมด และการวิจัยนี้เป็นกระบวนการหนึ่งโดยอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดบล็อกประสานแบบมือโยกหาสูตรที่ดีที่สุด มาสร้างบ้านต้นแบบจากอิฐบล็อกประสานผสมเถ้าหนักไม่ยางพารา ในงานวิจัยการจัดสรรจัดงบประมาณผ่านกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม ประจำปี พ.ศ. 2566 ภายใต้แผนงาน วิจัยเพื่อความเป็นเลิศทางวิชาการ เรื่อง บ้านต้นแบบจากอิฐบล็อกประสานผสมเถ้าหนักไม่ยางพารา

## References

- [1] Khamput, P. and Suweero, K. (2013). Prevention of Toxic Sseepage from a Landfill to Groundwater Using Natural Latex. **Journal of Community Development and Life Quality**. Vol. 1, No. 2, pp. 1-10
- [2] 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
- [3] Klathae, T., Sornpakdee, N., Buathongkhue, C., and Deedard, N. (2020). Utilization of Parawood Ash in Concrete Paving Blocks. **Rajamangala University of Technology Srivijaya Research Journal**. Vol. 12, No. 1, pp. 36-48 (in Thai)
- [4] Dasaesamoh, A., Maha, H., and Chebueraheng, H. (2014). Properties of Interlocking Block from 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
- [5] Hanjitsuwan, S., Tho-in, T., and Phoo-ngernkham, T. (2022). Influence of NaOH Concentration and Sand to Binder Ratio on Hybrid Cement Mortar for Filled Materials in Notched Concrete Beam. **RMUTI Journal Science and Technology**. Vol. 15, No. 1, pp. 1-10 (in Thai)
- [6] Ngenprom, N. and Rukzon, S. (2012). Development Laterite Soil Cement Containing Waste Ash from Industrial and Agricultural as Brick Interface. **Research Report of Rajamangala University of Technology Phra Nakhon**. pp. 41-42
- [7] Pangdaeng, S., Ngamtavee, S., Tho-in, T., Hanjitsuwan, S., and Phoo-ngernkham, T. (2022). Mechanical Properties of Fly Ash Geopolymer Concrete Incorporating Clay Residue and Silica Fume. **RMUTI JOURNAL Science and Technology**. Vol. 15, No. 2, pp. 1-10 (in Thai)
- [8] Bubpi, A., Amornpinyo, P., and Teerawong, J. (2022). Comparison of Retaining Walls from Half-Panel Interlocking Bricks with Dry Joints Reinforced with GFRP Material and Stud Steel. **RMUTI JOURNAL Science and Technology**. Vol. 15, No. 2, pp. 107-117 (in Thai)





- [9] Kuasakul, T., Charoennatkul, C., and Lukjan, A. (2017). Engineering Properties of Interlocking Blocks Containing Rubber Wood Ash of a Fishmeal Factory. In **The 14<sup>th</sup> National Kasetsart University Kamphaeng Saen Conference (The 14<sup>th</sup> KU-KPS) Conference**. pp. 384-392
- [10] Community Product Standards. (2004). **Interlocking Block**. pp. 1-3
- [11] ASTM (2002). ASTM D 422-63 Standard Test Methods for Particle-size Analysis of Soils.
- [12] ASTM (2017). ASTM D 143-94 Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer.
- [13] ASTM D 2216-98 Standard Test Method for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass.
- [14] ASTM (2021). ASTM D 1557-02 Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort.
- [15] Siam cement industry. (2005). **Cement and Application**. No. 2, p. 243

การพัฒนาหมึกพิมพ์สกรีนสีจากดินดำและดินแดงโดยใช้สารช่วยติดสี  
จากธรรมชาติ

## Development of Screen Inks from Black Soil and Red Soil using Natural Mordant

ภาวิณี เทียมดี<sup>1\*</sup> และฐานิตา วงษ์สอาด<sup>1</sup>

Pawinee Theamdee<sup>1\*</sup> and Thanita Wongsard<sup>1</sup>

*Received: January 22, 2024; Revised: March 8, 2024; Accepted: March 22, 2024*

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาสีพิมพ์สกรีนและศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการพิมพ์สกรีนบนผ้าฝ้ายด้วยสีจากดินดำและดินแดงโดยใช้สารช่วยติดสีธรรมชาติ โดยใช้อัตราส่วนผงสี 10 กรัม ผสมกับแป้งพิมพ์สำเร็จรูป 40 กรัม ผสมที่อุณหภูมิห้อง พิมพ์สกรีนลงบนผ้าฝ้าย ทำการศึกษาผลของเวลาในการอบผงสี ได้แก่ 0 5 10 และ 15 นาที อุณหภูมิอบผงสี 150 องศาเซลเซียส และศึกษาผลของสารช่วยติดสีหลังการพิมพ์สกรีนสีบนผ้าฝ้ายที่แตกต่างกัน 2 ชนิด คือ ดินสอพองและเกลือแกง ความเข้มข้นของสารช่วยติดสีร้อยละ 10 %w/v โดยการเปรียบเทียบความคงทนของสีต่อการซักล้าง ความคงทนของสีต่อสารฟอกขาว ความคงทนของสีต่อการฟุ้งแดด และความคงทนของสีต่อการรีด จากการทดลองพบว่าผ้าฝ้ายพิมพ์สกรีนสีดินดำและดินแดงอบผงสีที่ระยะเวลา 15 นาที เป็นสภาวะที่ดีที่สุด และเมื่อใช้ดินสอพองเป็นสารช่วยติดสีจะให้เจดสีที่เข้มข้นโดยผ้าที่ใช้เกลือแกงเป็นสารช่วยติดสีให้เจดสีที่สว่างมากขึ้น จากผลการทดสอบความคงทนต่อสี พบว่าสารช่วยติดสีจากดินสอพองช่วยให้ผ้าฝ้ายพิมพ์สกรีนสีดินดำและดินแดงมีความคงทนที่ดีที่สุด นอกจากนี้ยังสามารถพิมพ์สกรีนสีดินดำและดินแดงบนผลิตภัณฑ์ผ้าฝ้ายต่าง ๆ ได้

คำสำคัญ : สีพิมพ์สกรีน; สารช่วยติดสีธรรมชาติ; ดินดำ; ดินแดง; ความคงทนของสี

<sup>1</sup> คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี

<sup>1</sup> Faculty of Science and Technology, Thepsatri Rajabhat University

\* Corresponding Author, Tel. 08 6213 6336, E - mail: pawinee.t@lawasri.tru.ac.th

## Abstract

This research aims to develop printing ink and optimal conditions for screen printing on cotton fabric using natural colorants from black and red soil. The colorant powder, comprising 10 g, was blended with a prepared printing powder of 40 g at room temperature. Screen printing was conducted on cotton fabric, examining the impact of color-baking durations at intervals of 0, 5, 10, and 15 min at a temperature of 150 °C. Additionally, the effects of two different mordants such as Marl and sodium chloride at a 10% w/v concentration, were investigated concerning color fastness during washing, exposure to bleaching agents, sunlight, and abrasion resistance. The results of testing indicated that the cotton fabrics screen-printed with black and red soil colors with baked for 15 min exhibited the best colorants. When Marl was used as a mordant, the colors appeared richer, while sodium chloride produced brighter hues. The mordant from Marl exhibited superior color fastness for cotton fabrics screen printing with black and red soil colors. Furthermore, these colors with excellent durability could be screen-printed on various cotton fabric products.

**Keywords:** Screen Printing; Natural Mordants; Black Soil; Red Soil; Color Fastness

## บทนำ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมการพิมพ์สกรีนในงานสิ่งทอกำลังเป็นที่นิยม ซึ่งการพิมพ์สกรีน คือ การปาดหมึกให้ไหลผ่านไปเกาะบนวัสดุพิมพ์เพื่อให้เกิดภาพ สามารถทำบนวัสดุได้หลากหลาย [1] โดยเฉพาะการพิมพ์บนผ้าฝ้ายได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก เนื่องจากราคาไม่แพง ติดสีง่าย ระบายอากาศได้ดี สามารถทำความสะอาดได้ง่าย และผิวผ้ามีลักษณะความหยาบของหน้าตัด จึงยึดติดสีได้ดีกว่าผ้าพอลิเอสเตอร์ อีกทั้งผ้าฝ้ายเมื่อนำมาทำเป็นผลิตภัณฑ์สิ่งทอ ได้แก่ ผ้าปูโต๊ะ ชุดบนโต๊ะอาหาร ถุงผ้า และหน้ากากผ้า เป็นต้น สามารถสร้างรายได้ในระดับชุมชนถึงระดับอุตสาหกรรมได้ อย่างไรก็ตาม สีในการพิมพ์สกรีนนั้นนิยมใช้สีสังเคราะห์เคมีเนื่องจากหาซื้อได้ง่าย แต่ในการใช้สีสังเคราะห์เคมีส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ในหลายด้าน ไม่ว่าจะเป็นด้านสิ่งแวดล้อม รวมถึงสุขภาพของผู้ผลิตและผู้บริโภค ดังนั้น สีในการพิมพ์สกรีนจากแหล่งธรรมชาติ เช่น พืช สัตว์ และแร่ธาตุ [2] จึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจ ในอุตสาหกรรมการพิมพ์สกรีน เนื่องจากไม่เป็นอันตรายต่อสุขภาพของผู้ผลิตและผู้ใช้เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม สีพิมพ์สกรีนจากธรรมชาติส่วนมากสกัดได้จากคราม พงมะเกลือ [3] ใบตะเคียน [4] ใบสาบเสือ [5] และน้ำมันสะเดา [6] เป็นต้น

สีจากดินดำและดินแดง เป็นวัตถุดิบจากธรรมชาติที่สามารถหาได้ง่ายในท้องถิ่น ปัจจุบันมีการนำสีจากดินแดงมาใช้ในการย้อมสีผ้า [7] และใช้ดินสีดำ ดินสีน้ำตาลเข้ม และดินสีน้ำตาลอ่อน มาใช้ในการย้อมสีกระดาษสา [8] สำหรับการนำสีจากดินดำและดินแดงมาใช้ผลิตเป็นผงสีในการพิมพ์สกรีนยังมีจำนวนน้อยมาก จึงน่าสนใจที่จะนำมาใช้ประโยชน์ในงานสิ่งทอได้ อีกทั้งดินดำและดินแดงมีสารประกอบพวกอะลูมิเนียมซิลิเกต และสารประกอบโลหะปนอยู่ช่วยให้สีติดเส้นด้ายได้ดี ผงสีจากดินมีขนาดเล็ก จึงเหมาะสำหรับการติดสีบนผ้าฝ้าย [9] แต่สีธรรมชาติยังมีข้อเสีย คือ มีปริมาณการติดสีที่ต่ำ และสีตกในระหว่างการใช้งาน จึงจำเป็นต้องใช้สารช่วยติดสี (มอร์แดนท์) เพื่อเป็นตัวเสริมในการทำให้เส้นด้ายฝ้ายดูดซับสีได้ดีขึ้น เพื่อให้มีความคงทนต่อการใช้งานมากยิ่งขึ้น สารช่วยติดเคมีที่นิยมใช้ ได้แก่ เพอร์สัลเฟต จุนลี หรือสารส้ม เป็นต้น สารช่วยติดธรรมชาติ ได้แก่ น้ำปูนใส น้ำมะนาว น้ำขี้เถ้า เป็นต้น [10] นอกจากนั้นสารช่วยติดสีจะเป็นสารช่วยในการติดสีแล้วยังส่งผลต่อการเปลี่ยนเจดสีของสีย้อมได้ ถ้าหากใช้สารช่วยติดสีต่างชนิดกัน จะให้สีหลังการย้อมที่แตกต่างกัน [5], [11]

ดินสอพองเป็นวัตถุดิบธรรมชาติที่หาซื้อได้ง่าย และมีจำนวนมากในจังหวัดลพบุรี พบแร่ธาตุหลักจำพวก แคลเซียม เหล็ก และแมงกานีส มีคุณสมบัติช่วยจับสีและแทรกซึมชั้นยอดทำให้สีเข้มข้น สีสดทนนาน เนื้อผ้าแห้งเร็ว และเบาสบาย อีกทั้งเมื่อนำมาซักเพื่อทำความสะอาดจะทำให้เนื้อผ้าต่างจากเดิม โดยเฉพาะผ้าฝ้ายทอมือ ซึ่งมีลักษณะแข็งกระด้าง [12]

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาสีพิมพ์กรีนด้วยสีธรรมชาติจากดินแดงและดินดำ ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการพิมพ์สกรีนบนผ้าฝ้ายด้วยสีจากดินแดงและดินดำ และศึกษาชนิดสารช่วยติดสีที่เหมาะสม ได้แก่ ดินสอพองและเกลือแกง โดยพิจารณาจากความคงทนของสีต่อการซักล้าง ความคงทนของสีต่อการฟอกขาว ความคงทนของสีต่อการผึ่งแดด และความคงทนของสีต่อการรีด ผลการวิจัยทำให้ทราบสมบัติทางกายภาพ ซึ่งสามารถนำไปพัฒนาและถ่ายทอดให้กับวิสาหกิจชุมชน ทั้งยังช่วยยกระดับคุณภาพผลิตภัณฑ์ผ้าฝ้ายพิมพ์สกรีนจากสีธรรมชาติ

## ระเบียบวิธีวิจัย

### วัสดุและอุปกรณ์

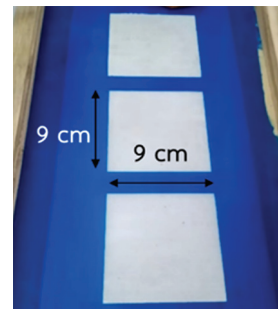
ผ้าฝ้ายฟอกขาวจากตลาดตัวเมือง จังหวัดลพบุรี แป้งพิมพ์สำเร็จรูป บริษัท แกลลอท เคมีคอล จำกัด ดินแดงและดินดำจากตำบลบ้านหมี่ อำเภอเมือง จังหวัดลพบุรี ดินสอพองและเกลือแกงจากตำบลถนนใหญ่ อำเภอเมือง จังหวัดลพบุรี สบู่เทียม โซเดียมคาร์บอเนต (Sodium Carbonate) โซเดียมคลอไรด์ (Sodium Chloride) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide) บริษัท ห้างหุ้นส่วนจำกัด ชายนันตีฟิค คอลซัพพลาย อุปกรณ์การพิมพ์สกรีน ได้แก่ กรอบไม้ และยางปาด บริษัท แกลลอท เคมีคอล จำกัด

### 1. การเตรียมสีพิมพ์สกรีนสีจากดินดำและดินแดงบนผ้าฝ้าย

1.1 การเตรียมผงสีดินแดงและดินดำ คัดแปลงตามวิธีของ [9] โดยนำดินแดงร่อนในตะแกรงร่อนแป้งด้วยมือ จากนั้นนำไปปั่นด้วยเครื่องปั่นไฟฟ้าจนละเอียด ผงสีดินดำทำวิธีเดียวกับการเตรียมผงสีดินแดง ดังรูปที่ 1(ก)

1.2 การเตรียมผ้าฝ้าย [5] นำผ้าฝ้ายแช่ในน้ำจนผ้าอมน้ำ บิดพอหมาด จากนั้นนำผ้าฝ้ายลงไปต้มในน้ำสะอาด 7.5 ลิตร ที่มีโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2.5 กรัม โซเดียมคาร์บอเนต 5 กรัม และสบู่เทียม 5 กรัม ต้มให้เดือดเป็นเวลา 30 นาที เมื่อครบระยะเวลาที่กำหนดแล้วล้างผ้าฝ้ายด้วยน้ำสะอาด และตากให้แห้ง

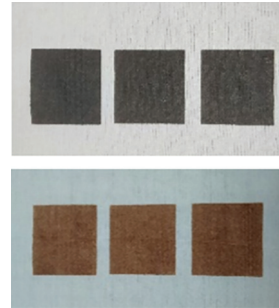
1.3 การผสมสีหมึกพิมพ์สกรีน คัดแปลงตามวิธีของ [9] โดยนำผงสีดิน 10 กรัม ผสมกับแป้งพิมพ์สำเร็จรูป 40 กรัม กวนผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน ทิ้งไว้ 15 นาที ดังรูปที่ 1(ข) จากนั้นนำสีที่ได้ไปพิมพ์สกรีนลงบนผ้าฝ้ายด้วยแม่พิมพ์สกรีน (กว้าง 9 ยาว 9 เซนติเมตร) ดังรูปที่ 1(ค) โดยการปาดสีไปกลับบนแม่พิมพ์สกรีน 5 ครั้ง ดังรูปที่ 1(ง) ได้ชิ้นงานผ้าฝ้ายที่พิมพ์สกรีนสีดินดำและดินแดง ดังรูปที่ 1(จ) จากนั้นนำตัวอย่างมาศึกษาอุณหภูมิในการอบหมึกสีที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0 5 10 และ 15 นาที ดังตารางที่ 1 จากนั้นนำไปวัดค่าสี



(ก) ผงสีดินดำและดินแดง (ข) ผงดินผสมแป้งพิมพ์สำเร็จรูป  
รูปที่ 1 การผสมสีหมึกพิมพ์สกรีน

(ค) แม่พิมพ์สกรีน





(ง) การพิมพ์สกรีนลงบนผ้าฝ้าย (จ) ชิ้นงานผ้าฝ้ายพิมพ์สกรีนสีดำและดินแดง

รูปที่ 1 การผสมสีหมึกพิมพ์สกรีน (ต่อ)

ตารางที่ 1 การเตรียมสีพิมพ์สกรีนสีจากดินดำและดินแดงสำหรับการพิมพ์สกรีนบนผ้าฝ้าย

| ตัวอย่าง | แป้งพิมพ์สำเร็จรูป<br>(กรัม) | ดินดำ<br>(กรัม) | ดินแดง<br>(กรัม) | เวลาอบพริกสี<br>(นาท) | อุณหภูมิอบพริกสี<br>(องศาเซลเซียส) |
|----------|------------------------------|-----------------|------------------|-----------------------|------------------------------------|
| B1       | 40                           | 10              | -                | 5                     | 150                                |
| B2       | 40                           | 10              | -                | 10                    | 150                                |
| B3       | 40                           | 10              | -                | 15                    | 150                                |
| R1       | 40                           | -               | 10               | 5                     | 150                                |
| R2       | 40                           | -               | 10               | 10                    | 150                                |
| R3       | 40                           | -               | 10               | 15                    | 150                                |

## 2. การใช้สารช่วยติดสีจากธรรมชาติสำหรับการพิมพ์สกรีนสีจากดินดำและดินแดงบนผ้าฝ้าย

การศึกษาสารช่วยติดสีสำหรับการพิมพ์สกรีน ดัดแปลงตามวิธีของ [9] นำผ้าฝ้ายที่พิมพ์สกรีนสีจากดินดำและดินแดงที่ได้ผลการพิมพ์สกรีนที่ดีที่สุด มาแช่สารช่วยติดสีหลังการพิมพ์สกรีน ชนิดของสารช่วยติดสีที่ใช้ คือ เกลือแกง และดินสอพอง ความเข้มข้นของสารช่วยติดสี คือ ร้อยละ 10 %w/v [13] - [14] เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นตากผ้าฝ้ายให้แห้ง และนำผ้าทั้งหมดไปวิเคราะห์ค่าสี ( $L^*$ ,  $a^*$  และ  $b^*$ )

## 3. การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ เคมี และความคงทนต่อสีบนผ้าฝ้าย

3.1 การวัดค่าสี นำผ้าฝ้ายที่พิมพ์สกรีนสีดินดำและดินแดง รวมถึงผลการใช้สารยึดติด มาวัดค่าสี (Color Value) (Hunter Lab รุ่น Color-Flex EZ, ญี่ปุ่น) โดยวัดค่า  $L^*$ ,  $a^*$  และ  $b^*$  ที่ตำแหน่งของผ้า 3 ตำแหน่ง รายงานค่าที่ได้ในรูปค่าเฉลี่ย โดย  $L^*$  คือ ความสว่าง (0 หมายถึงสีดำ และ 100 หมายถึงสีขาว)  $a^*$  คือ แกนสีเขียว-แดง ( $-a^*$  หมายถึง สีเขียว  $+a^*$  หมายถึง สีแดง)  $b^*$  คือ แกนสีเหลือง-น้ำเงิน ( $-b^*$  หมายถึง สีนํ้าเงิน  $+b^*$  หมายถึง สีเหลือง)  $\Delta E^*$  คือ ค่าความแตกต่างของสีโดยรวมดังสมการที่ (1) [15] - [16]

$$\Delta E^* = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2} \quad (1)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} \Delta E^* &= \text{ค่าความแตกต่างของสี} \\ \Delta L^* &= L^*_{\text{ของตัวอย่างมาตรฐาน}} - L^*_{\text{ของตัวอย่าง}} \\ \Delta a^* &= a^*_{\text{ของตัวอย่างมาตรฐาน}} - a^*_{\text{ของตัวอย่าง}} \\ \Delta b^* &= b^*_{\text{ของตัวอย่างมาตรฐาน}} - b^*_{\text{ของตัวอย่าง}} \end{aligned}$$

3.2 การทดสอบความคงทนต่อสี นำผ้าฝ้ายที่พิมพ์สกรีนสีดินดำและดินแดง รวมถึงผลการใช้สารช่วยติดมาทดสอบความคงทนของสีดัดแปลงตามวิธีของ [17] ดังนี้

3.2.1 ทดสอบความคงทนของสีต่อการซัก นำชิ้นทดสอบมาซักล้างในสารละลายผงซักฟอกร้อยละ 10 %w/v ซักด้วยเครื่องซักผ้าจำนวน 3 ครั้ง ครั้งละ 15 นาที ที่อุณหภูมิห้อง ( $28 \pm 2$  °C) หลังจากนั้นนำมาล้างน้ำและทำให้แห้งเพื่อประเมินผลการเปลี่ยนแปลงของสีบนชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องวัดค่าสี

3.2.2 การทดสอบความคงทนของสีต่อการฟอกขาว นำชิ้นทดสอบมาแช่ในสารละลายฟอกขาวร้อยละ 10 %w/v แช่เป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำมาล้างน้ำให้สะอาดและทำให้แห้งเพื่อประเมินผลการเปลี่ยนแปลงของสีบนชิ้นงานด้วยเครื่องวัดค่าสี

3.2.3 การทดสอบความคงทนของสีต่อการฟุ้งแดด นำชิ้นทดสอบมาฟุ้งแดดเป็นเวลา 7 วัน จากนั้นประเมินผลการเปลี่ยนแปลงของสีบนชิ้นงานด้วยเครื่องวัดค่าสี

3.2.4 การทดสอบความคงทนของสีต่อการรีด นำชิ้นทดสอบมารีดด้วยเตารีด (Electric iron) (Sharp รุ่น AM-P333T, 1000 วัตต์) ที่โหมดผ้า Cotton เป็นเวลา 2 นาที ต่อผ้า 1 ชิ้น จากนั้นประเมินผลการเปลี่ยนแปลงของสีบนชิ้นงานด้วยเครื่องวัดค่าสี

#### 4. การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

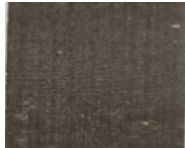
การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม SPSS® version 12 (SPSS Inc., สหรัฐอเมริกา) และวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

### ผลการวิจัยและการอธิบายผล

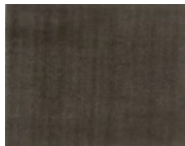
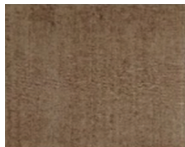
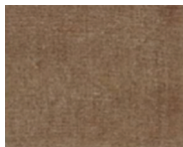
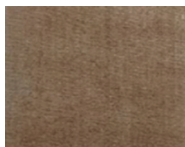
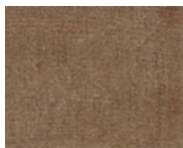
#### 1. ผลการวิเคราะห์การเตรียมหมึกพิมพ์สกรีนสีจากดินดำและดินแดงบนผ้าฝ้าย

จากการวิเคราะห์ค่าความแตกต่างของสี ( $\Delta E^*$ ) ของการศึกษาเวลาที่เหมาะสมสำหรับการอบหมึกสีพิมพ์สกรีนสีดินแดงและดินดำบนผ้าฝ้าย ดังตารางที่ 2 พบว่าที่เวลา 15 นาที ( $\Delta E^* = 0.75 \pm 0.13$ ) เป็นเวลาที่เหมาะสมในการอบหมึกสีพิมพ์สกรีนจากดินดำบนผ้าฝ้าย เนื่องจากค่า  $\Delta E^*$  มีค่ามากที่สุด โดยมีค่าสูงกว่าการอบหมึกที่ 5 นาที ( $\Delta E^* = 0.19 \pm 0.02$ ) และ 10 นาที ( $\Delta E^* = 0.57 \pm 0.08$ ) มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) และในการอบหมึกสีพิมพ์สกรีนจากดินแดงบนผ้าฝ้ายที่เวลา 15 นาที ( $\Delta E^* = 0.66 \pm 0.11$ ) มีค่า  $\Delta E^*$  มีค่ามากที่สุด เมื่อเทียบกับการอบหมึกที่ 5 นาที ( $\Delta E^* = 0.20 \pm 0.05$ ) และ 10 นาที ( $\Delta E^* = 0.41 \pm 0.03$ ) มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) แสดงให้เห็นว่าการอบหมึกที่เวลา 15 นาที ช่วยให้สีจากดินแดงและดินดำบนผ้าฝ้ายมีความเข้มของสีและความคมชัดได้ดีที่สุด สอดคล้องกับงานวิจัย [9] ที่พบว่าการอบหมึกที่เวลามากขึ้นส่งผลให้สีของหมึกพิมพ์สกรีนสีจากดินแดงมีความเข้มสีและความคมชัดมากขึ้น

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ค่าของสีของการพิมพ์สกรีนสีดินดำและดินแดงที่เวลาในการอบหมึกสีที่แตกต่างกัน

| ตัวอย่าง | เวลาอบหมึกสี<br>(นาที) | $\Delta E^*$      | ตัวอย่างผ้า                                                                          |                                                                                       |
|----------|------------------------|-------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|          |                        |                   | ก่อนอบหมึก                                                                           | หลังอบหมึก                                                                            |
| B1       | 5                      | $0.19 \pm 0.02^c$ |  |  |

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ค่าของสีของการพิมพ์สกรีนสีดินดำและดินแดงที่เวลาในการอบพริกสีที่แตกต่างกัน (ต่อ)

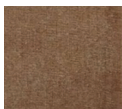
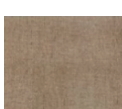
| ตัวอย่าง | เวลาอบพริกสี<br>(นาที) | $\Delta E^*$      | ตัวอย่างผ้า                                                                          |                                                                                       |
|----------|------------------------|-------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|          |                        |                   | ก่อนอบพริก                                                                           | หลังอบพริก                                                                            |
| B2       | 10                     | $0.57 \pm 0.08^b$ |    |    |
| B3       | 15                     | $0.75 \pm 0.13^a$ |    |    |
| R1       | 5                      | $0.20 \pm 0.05^c$ |    |    |
| R2       | 10                     | $0.41 \pm 0.03^b$ |   |   |
| R3       | 15                     | $0.66 \pm 0.11^a$ |  |  |

หมายเหตุ: <sup>a-c</sup> ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวดิ่ง มีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ( $p \leq 0.05$ )

2. ผลการวิเคราะห์การใช้สารช่วยติดจากธรรมชาติสำหรับการพิมพ์สกรีนสีจากดินดำและดินแดงบนผ้าฝ้าย ผลการศึกษานี้ช่วยตัดสินใจสำหรับผ้าฝ้ายพิมพ์สกรีนสีดินดำและดินแดงดังตารางที่ 3 แสดงลักษณะสีดินดำและดินแดงบนผ้าฝ้ายหลังใช้สารช่วยติดสีจากดินสอพองและเกลือแกง เปรียบเทียบกับที่ไม่ใช้สารช่วยติด (กลุ่มควบคุม) พบว่าผ้าฝ้ายพิมพ์สกรีนสีจากดินดำที่ใส่สารช่วยติดสีจากดินสอพองมีค่า  $L^*$  ค่าที่สูงสุดในขณะที่มีค่า  $a^*$  และ  $b^*$  สูงที่สุด ( $p \leq 0.05$ ) แสดงให้เห็นว่าสีสกรีนมีสีอยู่ในเฉดสีโทนดำที่มีความเข้มกว่ากลุ่มควบคุม ส่วนผ้าฝ้ายพิมพ์สกรีนสีจากดินดำที่ใส่สารช่วยติดสีจากเกลือแกง ค่า  $L^*$  มีความสว่างมากที่สุด ค่า  $a^*$  มีค่าสีแดงน้อยที่สุด และ  $b^*$  มีค่าสีเหลืองน้อยที่สุด มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) เมื่อเทียบกับตัวควบคุม ส่งผลให้การใส่สารช่วยติดสีจากเกลือแกงช่วยให้สีมีความสว่างของโทนสีมากกว่ากลุ่มควบคุมและการใส่ด้วยสารช่วยติดสีจากดินสอพอง จากการวิเคราะห์ค่าสีผ้าฝ้ายพิมพ์สกรีนสีจากดินแดงที่ใส่สารช่วยติดสีจากดินสอพอง พบว่าค่า  $L^*$  มีความสว่างน้อยที่สุด ค่า  $a^*$  มีค่าสีแดงมากที่สุด และ  $b^*$  มีค่าสีเหลืองมากที่สุด มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) เมื่อเทียบกับตัวควบคุม ส่งผลให้การใส่สารช่วยติดสีจากดินสอพองช่วยให้ได้สีน้ำตาลแดงที่มีความเข้มสีที่มากขึ้นเมื่อเทียบกับที่ไม่ใช้สารช่วยติดสี ส่วนผ้าฝ้ายพิมพ์สกรีนสีจากดินแดงที่ใส่สารช่วยติดสีจากเกลือแกง ค่า  $L^*$  มีความสว่างมากที่สุด ค่า  $a^*$  มีค่าสีแดงน้อยที่สุด และ  $b^*$  มีค่าสีเหลืองน้อยที่สุด มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) เมื่อเทียบกับตัวควบคุม ทำให้ผ้าฝ้าย

พิมพ์สกรีนสีจากดินแดงที่ใช้สารช่วยติดสีจากเกลือแกงช่วยให้ได้สีน้ำตาลแดงอ่อน สีส้มความสว่างมากขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ [18] ศึกษาโทนสีที่ได้จากพืชทางชายทะเลโดยใช้สารช่วยติดจากธรรมชาติหลังย้อม ได้แก่ น้ำด่างซี้เถ้า น้ำเกลือ และน้ำโคลนป่าชายเลน พบว่าน้ำด่างซี้เถ้า และน้ำเกลือสามารถช่วยให้สีติดเส้นใยให้สีสด สว่างขึ้น และน้ำโคลนป่าชายเลนสามารถช่วยให้สีติดเส้นใยให้สีที่เข้มขึ้น

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ค่าของสีของการพิมพ์สกรีนสีดินดำและดินแดงโดยใช้สารช่วยติดสี

| ตัวอย่าง | สารช่วยติด       | ค่าของสี                |                         |                         | ตัวอย่างผ้า                                                                           |
|----------|------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|          |                  | $L^*$                   | $a^*$                   | $b^*$                   |                                                                                       |
| สีดินดำ  | ไม่ใช้สารช่วยติด | 30.13±0.57 <sup>b</sup> | 1.86±0.13 <sup>b</sup>  | 2.09±0.27 <sup>b</sup>  |    |
|          | ดินสอพอง         | 27.45±0.94 <sup>c</sup> | 2.43±0.02 <sup>a</sup>  | 3.29±0.14 <sup>a</sup>  |    |
|          | เกลือแกง         | 33.39±1.02 <sup>a</sup> | 1.34±0.05 <sup>c</sup>  | 1.18±0.18 <sup>c</sup>  |   |
| สีดินแดง | ไม่ใช้สารช่วยติด | 49.99±1.33 <sup>b</sup> | 11.66±0.35 <sup>b</sup> | 12.15±0.35 <sup>b</sup> |  |
|          | ดินสอพอง         | 45.75±1.34 <sup>c</sup> | 13.57±0.46 <sup>a</sup> | 13.49±0.40 <sup>a</sup> |  |
|          | เกลือแกง         | 53.78±2.02 <sup>a</sup> | 10.25±0.87 <sup>c</sup> | 10.79±0.71 <sup>c</sup> |  |

หมายเหตุ: <sup>a-c</sup> ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งมีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ( $p \leq 0.05$ )

### 3. ผลการทดสอบความคงทนของสี

จากตารางที่ 4 แสดงค่าความแตกต่างของสี ( $\Delta E^*$ ) และความแตกต่างของความสว่าง ( $\Delta L^*$ ) หลังการทดสอบความคงทนของสีต่อการซักล้าง ความคงทนของสีต่อการฟอกขาว ความคงทนของสีต่อการผึ่งแดด และความคงทนของสีต่อการรีดของผ้าฝ้ายพิมพ์สกรีนสีดินดำและดินแดง โดยใช้สารช่วยติดสีจากดินสอพอง และเกลือแกง เปรียบเทียบกับไม่ใช้สารช่วยติดสี (กลุ่มควบคุม) พบว่าค่า  $\Delta E^*$  และ  $\Delta L^*$  หลังการทดสอบความคงทนของสีต่อการซักความคงทนของสีต่อการฟอกขาว ความคงทนของสีต่อการผึ่งแดด และความคงทนของสีต่อการรีดของผ้าฝ้ายพิมพ์สกรีนสีดินดำและดินแดง โดยใช้สารช่วยติดสีจากดินสอพอง มีค่าการเปลี่ยนสีต่ำที่สุด ( $p \leq 0.05$ ) แสดงถึงความคงทนของสีที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับตัวควบคุม เมื่อพิจารณาค่า  $\Delta E^*$  และ  $\Delta L^*$  หลังการทดสอบความคงทนต่อสีของผ้าฝ้ายพิมพ์สกรีนสีดินดำและดินแดง โดยใช้สารช่วยติดสีจากเกลือแกง



มีค่าการเปลี่ยนสีที่มากกว่าการใช้สารช่วยติดสีจากดินสอพองแต่มีค่าการเปลี่ยนสีที่น้อยกว่าตัวควบคุม ( $p \leq 0.05$ ) เนื่องจากดินสอพองมีองค์ประกอบธาตุแคลเซียมและโลหะหลายชนิด [19] - [20] ซึ่งอาจก่อให้เกิดโครงสร้างของสารประกอบเชิงซ้อนที่แข็งแรงระหว่างอนุภาคเม็ดสีและเส้นใยฝ้าย [21] ส่งผลให้มีความคงทนสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุม ในขณะที่สารช่วยติดจากเกลือแกงไม่มีองค์ประกอบของโลหะที่สามารถเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับโมเลกุลสีในดินทั้งสองชนิดได้ อย่างไรก็ตามประจุที่เกิดจากการละลายของเกลือแกงอาจเกิดแรงกระทำแบบมีขั้วที่ช่วยให้โมเลกุลสีจับกับประจุลบของฝ้ายได้ดีขึ้น แต่แรงกระทำทางประจุอาจส่งผลเพียงเล็กน้อย ทำให้สีที่ได้จากการใช้สารช่วยติดสีจากเกลือแกงความคงทนสูงกว่ากลุ่มควบคุมเพียงเล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ [22] ได้ศึกษาผลของสารช่วยติดที่มีต่อความคงทนของสีผ้าฝ้ายสีน้ำตาล พบว่าการใช้เกลือแกงเป็นสารช่วยติด [23] มีผลต่อความคงทนของสี ทำให้ผ้าฝ้ายสีน้ำตาลมีค่าการเปลี่ยนแปลงสีจากเดิมเล็กน้อยเมื่อเทียบกับผ้าฝ้ายสีน้ำตาลที่ไม่ใช้สารช่วยติดซึ่งมีค่าการเปลี่ยนแปลงสีที่มากกว่า

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบสมบัติความคงทนต่อสีของผ้าฝ้ายที่พิมพ์สกรีนสีดินดำและดินแดง โดยใช้สารช่วยติดสี

| ตัวอย่าง | สารช่วยติด       | ค่าของสี     | ความคงทนของสี     |                   |                   |                   |
|----------|------------------|--------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
|          |                  |              | ต่อการซักล้าง     | ต่อการฟอกขาว      | ต่อการผึ่งแดด     | ต่อการรีด         |
| ดินดำ    | ไม่ใช้สารช่วยติด | $\Delta E^*$ | $2.57 \pm 0.06^a$ | $1.32 \pm 0.08^a$ | $2.14 \pm 0.12^a$ | $1.10 \pm 0.07^a$ |
|          |                  | $\Delta L^*$ | $2.47 \pm 0.04^a$ | $0.98 \pm 0.11^a$ | $1.93 \pm 0.09^a$ | $1.90 \pm 0.05^a$ |
|          | ดินสอพอง         | $\Delta E^*$ | $0.37 \pm 0.05^c$ | $0.30 \pm 0.03^c$ | $0.28 \pm 0.04^c$ | $0.10 \pm 0.02^c$ |
|          |                  | $\Delta L^*$ | $0.14 \pm 0.02^c$ | $0.06 \pm 0.01^c$ | $0.19 \pm 0.02^c$ | $0.05 \pm 0.01^c$ |
|          | เกลือแกง         | $\Delta E^*$ | $2.10 \pm 0.09^b$ | $1.18 \pm 0.05^b$ | $1.05 \pm 0.01^b$ | $0.75 \pm 0.03^b$ |
|          |                  | $\Delta L^*$ | $2.03 \pm 0.04^b$ | $0.46 \pm 0.02^b$ | $1.28 \pm 0.03^b$ | $0.72 \pm 0.05^b$ |
| ดินแดง   | ไม่ใช้สารช่วยติด | $\Delta E^*$ | $4.20 \pm 0.18^a$ | $2.67 \pm 0.15^a$ | $1.92 \pm 0.10^a$ | $0.57 \pm 0.03^a$ |
|          |                  | $\Delta L^*$ | $1.84 \pm 0.06^a$ | $1.62 \pm 0.10^a$ | $0.80 \pm 0.11^a$ | $0.32 \pm 0.02^a$ |
|          | ดินสอพอง         | $\Delta E^*$ | $2.21 \pm 0.14^c$ | $0.66 \pm 0.10^c$ | $1.18 \pm 0.08^c$ | $0.14 \pm 0.02^c$ |
|          |                  | $\Delta L^*$ | $0.34 \pm 0.08^c$ | $0.04 \pm 0.01^c$ | $0.08 \pm 0.02^c$ | $0.02 \pm 0.01^c$ |
|          | เกลือแกง         | $\Delta E^*$ | $3.41 \pm 0.12^b$ | $1.76 \pm 0.12^b$ | $1.57 \pm 0.14^b$ | $0.29 \pm 0.03^b$ |
|          |                  | $\Delta L^*$ | $1.20 \pm 0.02^b$ | $0.57 \pm 0.04^b$ | $0.60 \pm 0.04^b$ | $0.10 \pm 0.01^b$ |

หมายเหตุ: <sup>a-c</sup> ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้ง มีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ( $p \leq 0.05$ )

#### 4. การประยุกต์ใช้สีพิมพ์สกรีนจากดินแดงและดินดำบนผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ

รูปที่ 2 แสดงการพิมพ์สกรีนสีจากดินดำและดินแดงลงบนผลิตภัณฑ์ ได้แก่ เสื้อโปโล และถุงผ้าฝ้าย พบว่าหมึกพิมพ์สกรีนสีจากดินดำและดินแดงโดยใช้สารช่วยติดสีจากธรรมชาติ มีความสะดวกในการนำไปใช้งาน และโทนสีมีความเหมาะสมบนผลิตภัณฑ์จากผ้าฝ้าย อีกทั้งสนับสนุนให้คนในชุมชนได้นำดินดำและดินแดงในพื้นที่มาใช้ให้เกิดประโยชน์ เป็นการสร้างชิ้นงานลงบนผ้าด้วยสีจากธรรมชาติเพื่อทดแทนการใช้สีจากเคมี



รูปที่ 2 ผลผลิตผ้าฝ้ายที่พิมพ์สกรีนสีจากดินแดงและดินดำ

### สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาการพัฒนาหมึกพิมพ์สกรีนบนผ้าฝ้ายด้วยสีจากดินดำและดินแดงโดยใช้สารช่วยติดสีธรรมชาติ รวมถึงศึกษาความคงทนของสีต่อการซักล้าง ความคงทนของสีต่อสารฟอกขาว ความคงทนของสีต่อการฟุ้งแดด และความคงทนของสีต่อการรีด ผลการวิจัยทำให้ทราบสภาวะที่เหมาะสมในการพิมพ์สกรีนสีดินดำและดินแดง บนผ้าฝ้าย ได้แก่ ผงสีดิน 10 กรัม แป้งพิมพ์สำเร็จรูป 40 กรัม อุณหภูมิอบพ่นสี 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที ได้ผ้าฝ้ายที่มีสีน้ำตาลแดงจากสีของดินแดง และผ้าฝ้ายสีดำจากสีของดินดำ เมื่อศึกษาผลของสารช่วยติดสี หลังการพิมพ์สกรีนสีบนผ้าฝ้ายที่แตกต่างกัน 2 ชนิด คือ ดินสอพองและเกลือแกง ความเข้มข้นของสารช่วยติดสี ร้อยละ 10 %w/v พบว่าเมื่อใช้ดินสอพองเป็นสารช่วยติดสีจะให้เจดสีที่เข้มข้น โดยผ้าที่ใช้เกลือแกงเป็น สารช่วยติดสีให้เจดสีที่สว่างมากขึ้น จากนั้นทำการเปรียบเทียบความคงทนของสีต่อการซักล้าง ความคงทน ของสีต่อสารฟอกขาว ความคงทนของสีต่อการฟุ้งแดด และความคงทนของสีต่อการรีด พบว่าสารช่วยติดสี จากดินสอพองช่วยให้ผ้าฝ้ายพิมพ์สกรีนสีดินดำและดินแดงมีความคงทนดีที่สุด สีพิมพ์สกรีนที่ได้สามารถพิมพ์สกรีน บนผลิตภัณฑ์ถุงผ้าฝ้ายและเสื้อโปโล นอกจากนี้การใช้สีจากธรรมชาติไม่กระทบต่อสิ่งแวดล้อมและทรัพยากร ธรรมชาติใด ๆ ซึ่งเป็นแนวทางหนึ่งที่สามารถเพิ่มมูลค่าให้กับผ้าฝ้ายพิมพ์สกรีนสีจากธรรมชาติได้

### กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับงบประมาณสนับสนุนการดำเนินงานวิจัยจากมหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี ประจำปีงบประมาณ 2566 และขอขอบคุณสาขาวิชาเคมี (ค.บ.) สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร และศูนย์วิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์สำหรับการทำวิจัย ในครั้งนี้

### References

- [1] Trirat, P. (2017). Development of Screen Inks from Natural Mordant and Colorant. **Art and Architecture Journal Naresuan University**. Vol. 8, No. 1, pp. 182-195 (in Thai)
- [2] Dawood, S. and Sen, T. (2014). Review on Dye Removal from Its Aqueous Solution into Alternative Cost Effective and Nonconventional Adsorbents. **Journal of Chemical and Process Engineering**. Vol. 1, No. 104, pp. 1-11

- [3] Chotithammaporn, W. (2022). Developing Screen Printing Ink from Natural Materials using Tamarind Seeds as Mordant and Kangplakreua fruits and Ebony Powder as Colorants. **The Journal of Industrial Technology: Suan Sunandha Rajabhat University**. Vol. 1, pp. 32-41 (in Thai)
- [4] Tichai, P. and Khampan, O. (2016). A Study of Pigment from Anogeissus Acuminata for Screen Printing to Make the Value-Added Nam Morn Weaving Cotton. **NRRU Community Research Journal**. Vol. 10, No. 2, pp. 99-106 (in Thai)
- [5] Ngaowan, N. and Manarungwit, K. (2022). A Study of Dyeing Cotton Yarn with Natural Dyes from Siam Weed. **Journal of Social Academic**. Vol. 15, No. 1, pp. 116-131 (in Thai)
- [6] El-Khatib, E. M., Ali, N. F., and El-Mohamedy, R. S. R. (2020). Influence of Neen Oil Pretreatment on the Dyeing and Antimicrobial Properties of Wool and Silk Fibers with Some Natural Dyes. **Arabian Journal of Chemistry**. Vol. 13, Issue 1, pp. 1094-1104. DOI: 10.1016/j.arabjc.2017.09.012
- [7] Atcharawan, N., Vongyuttakrai, P., and Mongkonpituksunk, S. (2011). The Extraction of Fabric Dyestuff from Laterite. **Journal of Industrial Education**. Vol. 5, No. 5, pp. 26-35 (in Thai)
- [8] Phacharapiyagul, B., Pradistapongs, S., and Lertwattananuruk, P. (2020). Dyeing Sa Paper with Natural Dye from Soil. In **Proceeding of the 7<sup>th</sup> Academic Meeting National and International Conference (SSRU2016), (Speed up Research towards World Class University)**. Bangkok: Suan Sunandha Rajabhat University. pp. 2866-2878 (in Thai)
- [9] Phohipeng, N., Jatuphatwarodom, S., and Mongkholrattanasit, R. (2020). Color Fastness and Physical Properties of Cotton Fabric in Silk Screen Printing with Red Soil. **UTK Research Journal**. Vol. 14, No. 2, pp. 91-103 (in Thai)
- [10] Pujeeb, N. (2023). The Study of Differences in Color Adhesion of Plants: Natural Mordant Experiments with the Eco-Printing Technique. **Silpa Bhirasri Journal of Fine Arts**. Vol. 11, No. 1, pp. 1-18 (in Thai)
- [11] Phosuwan, A. (2015). Dyeing Hand-Woven Cotton with Natural Colors. **Department of Science Service Ministry of Higher Education, Science, Research and Innovation**. Vol. 63, No. 19, pp. 25-27 (in Thai)
- [12] Thanomtham, P. (2018). The Development of Producing Mud-Dyed Cotton in Muang District of Chaiyaphum Province. **Journal of Suvarnabhumi Institute of Technology (Humanities and Social Sciences)**. Vol. 4, No. 2, pp. 271-282 (in Thai)
- [13] Yosyinyong, N., Yingyongwattanakun, N., and Yaijit, P. (2022). Result of a Fixing Agent to Dyeing Cotton Threads with Natural Dyes Extracted from the Bark of the Mahad Tree (*Artocarpus Lakoocha* Roxb.). **Journal of Home Economics**. Vol. 65, No. 1, pp. 54-65 (in Thai)
- [14] Chanalak, A. and Siritai, S. (2019). **Cotton Fabrics Printing with Colorants from Mangosteen Rind**. Master of Textile Chemical Technology (Industrial Textiles and Fashion Design). Rajamangala University of Technology Phra Nakhon
- [15] Kim, J -G., Yu, B., and Lee, Y -K. (2009). Correlations Between Color Differences Based on Three Color-Difference Formulas Using Dental Shade Guide Tabs. **Journal of Prosthodontics**. Vol. 18, No. 2, pp. 135-140. DOI: 10.1111/j.1532-849X.2008.00393.x
- [16] Salacheep, S., Ketkaew, S., and Kasemsiri, P. (2018). Effect of Light-Aging on Intelligent pH Indicator Film Composed of Gelatin and Extracted Anthocyanin from Butterfly Pea. **KKU Research Journal (Graduate Studies)**. Vol. 18, No. 4, pp. 1-11 (in Thai)

- [17] Kaewklaikhajornsiri, C. and Sikkha, P. (2012). Study of Fabric Dyeing Process of Indigo Fabrics using Banana Sap as Natural Mordant. **Art and Architecture Journal Naresuan University**. Vol. 3, No. 1, pp. 105-113 (in Thai)
- [18] Srisukho, P., Sangchan, N., Jaisuda, T., and Boonthon, K. (2019). A Study of Natural Color from Mangrove Plants at Tambol Boh, Ampur Klung, Chantaburi Province by Community Participation Process. **Rajabhat Rambhai Barni Research Journal**. Vol. 13, No. 1, pp. 64-73 (in Thai)
- [19] Blagoev, K., Grozeva, M., Malcheva, G., and Neykova, S. (2013). Investigation by Laser Induced Breakdown Spectroscopy, X-Ray Fluorescence and X-Ray Powder Diffraction of the Chemical Composition of White Clay Ceramic Tiles from Veliki Preslav. **Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy**. Vol. 79-80, pp. 39-43. DOI: 10.1016/j.sab.2012.11.003
- [20] Benjatikul, K. (2016). **Study on Anti-Ultraviolet Property of Marl**. Master of Science (Cosmetic Sciences). Huachiew Chalermprakiet University.
- [21] Thurnkul, N. and Pannat, A. (2021). The Effect of Ashes, Vinegar, Sodium Chloride, Calcium Hydroxide, Alum and Soy Bean Extract with Water on Silk Fiber Dyeing using from Actinomycetes Sp. N2. In **Proceeding of the 1<sup>st</sup> Kamphaeng Phet Rajabhat University National Conference**. Kamphaeng Phet: Kamphaeng Phet Rajabhat University. pp. 532-537 (in Thai)
- [22] Sakulborisut, K., Kraisuwan, S., and Piromthamsiri, K. (2016). The Effect of Mordants on the Colorfastness of Natural Brown Colored Cotton Fabric. **Srinakharinwirot University (Journal of Science and Technology)**. Vol. 8, No. 15, pp. 1-11 (in Thai)
- [23] Pimraporn, P. (2019). **A Study of Effect of Various Mordants Added to the Dye Extracted from *Litsea Glutinosa* (Lour.) Leaves on Color Shades of Dyeing Silk Thread Through Exhaustion Dyeing Process**. Master of Engineering (Textiles). Rajamangala University of Technology Thanyaburi



# การพัฒนาน้ำยาบ้วนปากจากสารสกัดใบฝรั่งและสารสกัดผลมะแว้งเครือ Development of Mouthwash from Guava Leaf Extract and Maweng Kruea Fruit Extract

ธัญญพัทธ์ มนุษย์<sup>1\*</sup> จรินทร์ธร ฟักคำ<sup>1</sup> อนงค์นุช ทุมปัด<sup>1</sup> และกนกกร พิวอ่อน<sup>1</sup>

Thanyaphat Manud<sup>1\*</sup> Charinthorn Fakkham<sup>1</sup> Anongnooch Thumpad<sup>1</sup> and  
Kanokkorn Phio-on<sup>1</sup>

Received: December 30, 2023; Revised: April 22, 2024; Accepted: April 23, 2024

## บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบฤทธิ์การต้านเชื้อแบคทีเรีย และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดใบฝรั่งผสมผลมะแว้ง และพัฒนาผลิตภัณฑ์น้ำยาบ้วนปากที่มีส่วนผสมของสารสกัดใบฝรั่งและสารสกัดผลมะแว้งเครือ ดำเนินการทดลอง โดยทำการสกัดสมุนไพรทั้ง 2 ด้วย 95 % เอทานอล ผลการวิจัยพบว่า สารสกัดสมุนไพร มีฤทธิ์ต้านเชื้อ *Streptococcus mutans* ประเมินความเข้มข้นของสารในระดับต่ำสุดที่สามารถยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ (MIC) พบการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อที่ 0.25 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร ขณะที่ความเข้มข้นของสารในระดับต่ำสุดที่สามารถฆ่าจุลินทรีย์ (MBC) พบสารสกัดมีฤทธิ์ฆ่าเชื้อแบคทีเรียที่ความเข้มข้น 0.25 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร โดยมีอัตราส่วน MBC/MIC เท่ากับ 1 ส่วนผลการทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ด้วยวิธี DPPH Radical Scavenging Assay พบว่า สารสกัดใบฝรั่งผสมผลมะแว้งเครือมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ  $IC_{50}$  เท่ากับ 16.06 ไมโครลิตร/มิลลิลิตร ซึ่งสารสกัดใบฝรั่งผสมสารสกัดผลมะแว้งมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระสูงกว่า สารมาตรฐาน BHT การพัฒนาน้ำยาบ้วนปากจากสารสกัดสมุนไพร พบว่าคุณสมบัติทางกายภาพของน้ำยาบ้วนปากจากสารสกัดใบฝรั่ง และสารสกัดมะแว้งเครือ มีสีเหลืองใส รสชาติขมฝาดเล็กน้อย หวาน กลิ่นมันท์ ความรู้สึกเย็นเล็กน้อย ไม่รู้สึกร้อนลิ้น และมีค่า pH = 6.7 มีความเหมาะสมสำหรับสภาพในช่องปาก

คำสำคัญ : สารสกัดใบฝรั่ง; สารสกัดผลมะแว้งเครือ; น้ำยาบ้วนปาก; ต้านเชื้อ; *Streptococcus mutans*

<sup>1</sup> วิทยาลัยสหเวชศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา

<sup>1</sup> College of Allied Health Sciences Suan Sunandha Rajabhat University

\* Corresponding Author; Tel. 09 4156 3961, E - mail: Thanyaphat.ma@ssru.ac.th

## Abstract

This study aims to test the antibacterial efficacy and antioxidant activity of leaf extract and Maweng Kruea fruit extract and develop a mouthwash product containing extracts from guava leaf and Maweng Kruea. The experiments were conducted by extracting both herbs with 95 % ethanol. Research results indicated that herbal extracts possess inhibitory effects against *Streptococcus mutans*. The minimum inhibitory concentration (MIC) that can inhibit microbial growth was found at 0.25 mg/mL, while the minimum bactericidal concentration (MBC) for killing bacteria was found at 0.25 mg/mL, with an MBC/MIC ratio of 1. The mouthwash composed of guava leaf and Maweng kruea fruit extracts exhibited antioxidant properties with an IC<sub>50</sub> of 16.06 µL/ml. The developed mouthwash from these herbal extracts was found to have physical properties suitable for oral use, including a clear yellow color, slightly bitter and slightly sweet taste, minty aroma, slight cooling sensation, no tongue irritation, and a pH value of 6.7, making it suitable for oral conditions.

**Keywords:** Guava Leaf Extract; Maweng Kruea Fruit Extract; Mouthwash; Antibacterial; *Streptococcus mutans*

## บทนำ

จากการรายงานขององค์การอนามัยโลก (WHO) เรื่องสุขภาพในช่องปาก ความเสมอภาค และปัจจัยทางสังคม พบว่า ยังมีความไม่เท่าเทียมกันในระบบบริการสุขภาพช่องปากในหลายประเทศ จนกลายเป็นปัญหาระดับสากล ที่มีความไม่เท่าเทียมกันในระดับสังคมที่แตกต่างกันไปตามขนาด และขอบเขต ถึงแม้ในประเทศที่มีรายได้สูง อาจมีสวัสดิการดูแลสุขภาพช่องปากของรัฐเป็นอย่างดี ซึ่งปัจจัยนี้ส่งผลกระทบต่อสุขภาพช่องปาก [1] ร้อยละของการมีกลิ่นปากที่ไม่พึงประสงค์ประมาณ 90 % เกิดจากหลายสาเหตุ เช่น การสูบบุหรี่ ดื่มเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ การรับประทานอาหารบางชนิดที่มีกลิ่นแรง [2] นอกจากนี้โรคในช่องปากและฟัน อาทิ โรคฟันผุ โรคปริทันต์อักเสบ โรคแผลร้อนใน โรคทอนซิลอักเสบ อาการไอเจ็บคอ มีเสมหะ หรือโรคระบบทางเดินหายใจ โรคเหล่านี้มักจะ ทำให้มีอาการปวด บวม เลือดออก และมีกลิ่นปาก [3] เชื้อโรคที่พบบ่อยในช่องปากเกิดจากเชื้อแบคทีเรียและเชื้อราที่มาจากการดูแลสุขภาพความสะอาดภายในช่องปากและอาจต้องใช้ยาปฏิชีวนะในการรักษา [4] อาจทำให้มีความเสี่ยงต่อเชื้อดื้อยาและเกิดผลข้างเคียงจากยาต่อระบบอื่น ๆ ของร่างกายผู้ใช้ ซึ่งการดูแลสุขภาพในช่องปากเป็นขั้นตอนที่สำคัญช่วยป้องกันการเกิดโรคเหล่านี้ ผลิตภัณฑ์รักษาความสะอาดในช่องปาก เช่น ยาสีฟัน น้ำยาบ้วนปาก หรือสเปรย์ฉีดฟันดับกลิ่นปาก เป็นอีกทางเลือกที่ส่วนใหญ่ใช้สารเคมีเป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งบางครั้งทำให้เกิดผลข้างเคียงต่อผู้ใช้ผลอาจทำให้เกิดการบวมของเหงือก แสบร้อนปาก เป็นแผลที่ปากมากขึ้น หรืออาจทำให้สีของฟันเปลี่ยนแปลงได้

ปัจจุบันมีการนิยมนำสารสกัดสมุนไพรหรือสารสกัดจากธรรมชาติมาใช้ เป็นทางเลือกในการดูแลสุขภาพมากขึ้น เพื่อลดผลข้างเคียงจากการใช้ยาที่มีสารเคมี และลดค่าใช้จ่ายในการรักษาพยาบาลพบว่า สารสกัดจากใบฝรั่งมีสรรพคุณในการรักษาโรคต่าง ๆ และระงับกลิ่นปากได้ดี สารเคมีที่เป็นองค์ประกอบสำคัญในใบฝรั่ง ได้แก่ Tannins, Guajaverin, Quercetin, Essential oil และ Ellagicacid มีรายงานฤทธิ์ทางเภสัชวิทยาของสารสกัดใบฝรั่งสำหรับรักษาโรคอูจจะร่วง [5] ยังมีการเจริญของแบคทีเรีย ลดอาการเหงือกอักเสบและบวมได้ [6] และมีความปลอดภัย สำหรับสารสกัดผลมะแว้งมีฤทธิ์การต้านการอักเสบ ลดอาการบวมออกฤทธิ์ดีในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมบวกและแบคทีเรียแกรมลบ เมื่อเทียบกับยามาตรฐาน Streptomycin ไม่พบความเป็นพิษในหนูทดลองและไม่พบการระคายเคืองผิวหนังต่อผิวหนังหนังกะต่าย [7]

จากข้อมูลดังกล่าวผู้วิจัยสนใจทำการวิจัยศึกษาด้านสมุนไพรที่สามารถต้านเชื้อแบคทีเรียที่ก่อให้เกิดกลิ่นปากศึกษาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและพัฒนาผลิตภัณฑ์น้ำยาบ้วนปากที่มีส่วนผสมของสมุนไพร เพื่อเพิ่มมูลค่าของสมุนไพรในท้องถิ่น จากการศึกษาและการหาข้อมูลเบื้องต้นพบว่า ใบฝรั่งที่มีฤทธิ์ยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียและมะแว้งเครือที่มีสรรพคุณช่วยอาการเจ็บคอและลดอาการบวม ด้านการอักเสบ จึงนำสมุนไพรทั้ง 2 ชนิดมาเป็นสารสกัดสมุนไพรและทดสอบฤทธิ์การต้านเชื้อ *Streptococcus mutans* ที่ก่อให้เกิดโรคในช่องปากด้วยวิธีการการหาค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ (Minimum Inhibitory Concentration; MIC) และความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ (Minimum Bactericidal Concentration; MBC) โดยวิธี Broth Dilution Assay ทดสอบหาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ นำไปพัฒนาสูตรน้ำยาบ้วนปากจากสารสกัดสมุนไพรใบฝรั่งและสารสกัดผลมะแว้งเครือ

## วิธีดำเนินการ

### 1. สารเคมีโดยวิธี DPPH Free Radical Scavenging Assay

- 1.1 สารสกัดใบฝรั่ง และสารสกัดผลมะแว้งเครือ ที่ได้จากการสกัดเครื่อง Rotary Evaporator
- 1.2 95 % Absolute Ethanol
- 1.3 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH)
- 1.4 Butylated Hydroxytoluene (BHT)

### 2. สารเคมีที่ใช้ในการทำผลิตภัณฑ์

ตารางที่ 1 สารเคมีใช้ในการทำผลิตภัณฑ์

| สารเคมี                 | คุณสมบัติ                     |
|-------------------------|-------------------------------|
| สารสกัดใบฝรั่ง          | สารสำคัญ                      |
| สารสกัดผลมะแว้งเครือ    | สารสำคัญ                      |
| 70 % Sorbitol           | สารให้ความหวาน                |
| Glycerin                | สารช่วยเปียก, ตัวทำละลายร่วม  |
| Propylene Glycol        | เพิ่มความชุ่มชื้น คุมความชื้น |
| 10 % Menthol in Alcohol | สารให้ความเย็น                |
| Peppermint Oil          | ระงับกลิ่นปาก กลิ่นหอมสดชื่น  |
| 95 % Ethanol            | ตัวทำละลาย                    |
| 70 % Ethanol            | ตัวทำละลาย                    |
| น้ำกลั่น                | ตัวทำละลายร่วม                |

### 3. การเตรียมสารสกัดสมุนไพร

การเตรียมตัวอย่างของสมุนไพร นำใบฝรั่งสด (*Psidium guajava* L.) และผลมะแว้งเครือ (*Solanum trilobatum* L.) มาล้างทำความสะอาด จากนั้นนำไปตากแดดให้แห้ง แล้วนำไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 - 48 ชั่วโมง แล้วนำสมุนไพรแต่ละชนิดไปบดหยาบด้วยเครื่องบดสมุนไพร นำผงบดหยาบใบฝรั่งน้ำหนัก 500 กรัม และผลมะแว้งเครือน้ำหนัก 300 กรัม ทั้ง 2 ชนิดมาหมักรวมกันด้วย 95 % Ethanol ทั้งไว้ 7 วัน ที่อุณหภูมิห้อง เมื่อครบกำหนดนำไปกรองแยกสารสกัดหยาบด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1 แล้วนำสารสกัดที่ได้มาระเหยตัวทำละลายออกโดยใช้เครื่องระเหยสุญญากาศแบบหมุน (Rotary Evaporator) จนสารสกัดแห้งแล้วนำมาเก็บใส่ขวดและเก็บที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส และคำนวณ % Yield ดังสมการที่ (1)

$$\text{สูตร \% Yield} = \frac{\text{น้ำหนักสารสกัดสมุนไพรที่ได้} \times 100}{\text{น้ำหนักสมุนไพรที่ใช้สกัด}} \quad (1)$$

#### 4. การทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ โดยวิธี DPPH Radical Scavenging Assay

การวิเคราะห์ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl radical scavenging assay โดยใช้สารที่มีคุณสมบัติเป็นอนุมูลอิสระซึ่งเป็นสารสังเคราะห์ที่อยู่ในรูปอนุมูลอิสระที่คงตัวและมีสีม่วง เมื่อ DPPH ทำปฏิกิริยากับสารต้าน Oxidation ที่ละลายด้วย Ethanol จะทำให้สีม่วงจางลงจนเป็นสีเหลือง การเตรียมสารละลาย DPPH Reagent ที่ความเข้มข้น 2.0 มิลลิโมลาร์ และตรวจวัดคุณสมบัติของสารสกัดสมุนไพรโดย

4.1 ชั่ง DPPH 7.9 มิลลิกรัม ใส่ลงใน Volumetric Flask ขนาด 100 มิลลิลิตร เติมน้ำ Ethanol เขย่าให้เข้ากัน และปรับปริมาตรจนถึงขีดที่กำหนด

4.2 เติมน้ำสารละลายมาตรฐาน และสารละลายสารสกัดสมุนไพร ลงใน 96 Well Plate จำนวน 100 ไมโครลิตร

4.3 เติมน้ำสารละลาย DPPH Radical ลงในหลุมที่มีสารมาตรฐาน และสารละลายสารสกัดสมุนไพร จำนวน 100 ไมโครลิตร

4.4 เขย่าให้เข้ากันตั้งทิ้งไว้ในที่มืด 30 นาที

4.5 วัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 520 นาโนเมตร

4.6 ทำการทดลอง 3 ซ้ำ แล้วหาค่าเฉลี่ย

4.7 นำค่าดูดกลืนแสงที่วัดได้มาคำนวณ % Inhibition จากสมการที่ (2)

$$\% \text{ Inhibition} = \frac{\text{Control OD} - \text{Sample OD}}{\text{Control OD} \times 100} \quad (2)$$

เมื่อ

Control OD คือ ค่าดูดกลืนแสงของ DPPH และตัวทำละลายที่ใช้

Sample OD คือ ค่าดูดกลืนแสงของสารสกัดที่ผสมกับ DPPH

4.8 จากนั้นนำค่าเฉลี่ยของ % Inhibition ในแต่ละความเข้มข้น ไปทำ Linear Regression เพื่อหาค่าความสามารถในการยับยั้งการเกิด Oxidation ได้ 50 % (50 % Inhibitory Concentration: IC<sub>50</sub>)

#### 5. สายพันธุ์แบคทีเรียและสภาวะการเพาะเลี้ยง

เชื้อ *Streptococcus mutans* สายพันธุ์ NCTC 10449 (IFO 13955) ที่มีข้อมูลลำดับจีโนมที่แยกได้จากชั้นเนื้อฟัน และเพาะเลี้ยงเชื้อโดยวิธีที่ระบุไว้ใน ATCCM Guidelines โดยทำการเพาะเชื้อบนอาหารวุ้นเลี้ยงเชื้อ Brain Heart Infusion Agar (OXOID CM1135) และอาหารเหลว Brain Heart Infusion Broth (OXOID CM1135) บ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 - 48 ชั่วโมง การหาค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ (Minimum Inhibitory Concentration; MIC) และความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ (Minimum Bactericidal Concentration; MBC) โดยวิธี Broth Dilution Assay การเพาะเลี้ยงเชื้อแบคทีเรียสำหรับการหาค่า MIC และ MBC ของสารสกัดเพื่อศึกษาค่า MIC และ MBC ด้วยวิธี Broth Dilution Assay เชื้อแบคทีเรีย *Streptococcus mutans* ปริมาณ 0.5 x 10<sup>8</sup> CFU ถูกเพาะเลี้ยงด้วยอาหารเลี้ยงเชื้อ Brain Heart Infusion Broth ใน Microtiter Plate ขนาด 96 หลุม ทำการทดสอบสารสกัดที่ความเข้มข้น 1 0.5 0.25 0.125 0.0625 0.03125 0.015 0.0075 และ 0.00375 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร จากนั้นบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ต่อเนื่องเป็นเวลา 12 - 16 ชั่วโมง

5.1 การหาค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ (MIC)

เมื่อทำการเพาะเลี้ยงเชื้อและเติมน้ำสารสกัดที่ความเข้มข้นต่างกัน (1 0.5 0.25 0.125 0.0625



0.03125 0.015 0.0075 และ 0.00375 (มิลลิกรัม/มิลลิลิตร) ลงใน Microtiter Plate ขนาด 96 หลุม อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 - 16 ชั่วโมง จากนั้นเติมสาร Resazurin ที่ความเข้มข้นสุทธิ 44 ไมโครโมลาร์ ลงในแต่ละหลุม จากนั้นบ่มต่ออีก 3 ชั่วโมง และทำการบันทึกค่า MIC จากหลุมที่มีความเข้มข้นของสารสกัดที่ต่ำที่สุดที่แสดงผลการยับยั้งการเจริญของเชื้อแบคทีเรีย โดยใช้ DMSO และ Clarithromycin เป็นตัวแปรควบคุม และทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

## 5.2 การหาความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ (MBC)

เมื่อทำการเพาะเลี้ยงเชื้อและเติมสารสกัดที่ความเข้มข้นต่างกันลงใน Microtiter Plate ขนาด 96 หลุม บ่มอุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ตามช่วงเวลาเดียวกันกับการหาค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ และนำแบคทีเรียจากหลุมที่ไม่พบการเจริญของแบคทีเรียไปเพาะเลี้ยงในอาหารวุ้นเลี้ยงเชื้อ จากนั้นนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 - 16 ชั่วโมง และทำการบันทึกค่า MBC จากตัวอย่างที่มีความเข้มข้นของสารสกัดที่ต่ำที่สุดที่แสดงผลการยับยั้งการเจริญของเชื้อแบคทีเรีย โดยใช้ DMSO และ Clarithromycin เป็นตัวแปรควบคุม และทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

## 6. การเตรียมน้ำยาบ้วนปาก

สูตรน้ำยาบ้วนปากได้มีการพัฒนามาจากการพัฒนาตำรับน้ำยาบ้วนปากสมุนไพรจากสารสกัดใบฝรั่ง เพื่อใช้ในทางทันตกรรม [8] มีทั้งหมด 6 สูตร ซึ่งผลการวิจัยพบว่าสูตรที่ 6 มีคุณสมบัติทางกายภาพที่เหมาะสมกับการใช้งานสำหรับเด็กและค่า pH เท่ากับ 6.7 เป็นสูตรพื้นฐานที่พัฒนาให้มีประสิทธิภาพทางการยับยั้งการเจริญของเชื้อแบคทีเรีย *Streptococcus mutans*

## ตารางที่ 2 สูตรตำรับของน้ำยาบ้วนปาก

| สาร                             | ปริมาณ                 |
|---------------------------------|------------------------|
| สารสกัดใบฝรั่ง และผลมะแว้งเครือ | 5 มิลลิลิตร            |
| 70% Sorbitol                    | 4.5 มิลลิลิตร          |
| Glycerin                        | 1 มิลลิลิตร            |
| Propylene Glycol                | 2 มิลลิลิตร            |
| Peppermint Oil                  | 0.03 มิลลิลิตร (1 หยด) |
| 70 % Ethanol                    | 2.5 มิลลิลิตร          |
| น้ำกลั่น                        | 50 มิลลิลิตร           |

จากสูตรตามตารางที่ 2 ผสมสารสกัดใบฝรั่งและผลมะแว้งเครือทั้ง 2 ชนิด หมักรวมกันด้วย 95 % Ethanol จำนวน 5 มิลลิกรัม กับน้ำกลั่น 20 มิลลิลิตร เติม Propylene Glycol PEG 400 ปริมาณ 2 มิลลิลิตร คนให้เข้ากัน เติม 70 % Sorbitol 4.5 มิลลิลิตร และ Glycerin 1 มิลลิลิตร แล้วคนให้เข้ากัน แต่งกลิ่นและรสชาติด้วย Peppermint 1 หยด เติม 70 % Ethanol 2.5 มิลลิลิตร แล้วคนให้เข้ากันจนได้สารละลายใส ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น จนได้ปริมาตร 50 มิลลิลิตร

ขั้นตอนการทดสอบกรด-ด่าง (pH Measurements) มีขั้นตอน คือ นำตัวอย่างปริมาณ 2 กรัม ไปทำละลายด้วยน้ำกลั่นบริสุทธิ์ปริมาณ 10 มิลลิลิตร แล้วกรองด้วยกระดาษกรอง แล้วทำการวัดค่าความเป็นกรด-ด่างด้วยเครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (Eutech Instruments) ที่อุณหภูมิห้อง (21 องศาเซลเซียส  $\pm$  2) ทำการสังเกตและบันทึกผลการทดลอง ตำรับที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงจึงจะถือว่ามีความคงตัวทางเคมี ซึ่ง pH ที่เหมาะสมของผลิตภัณฑ์ต้องอยู่ในช่วง 6.2 - 7.72 จึงจะเป็นค่าที่เหมาะสมกับช่องปาก

## ผลการวิจัย

### 1. การสกัดสารสมุนไพร

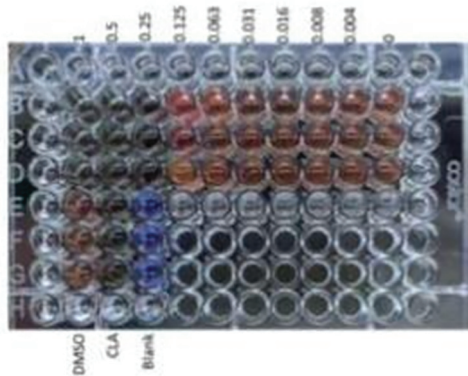
สารสกัดจากใบฝรั่งและผลมะแว้งเครือที่ได้ระเหยแอลกอฮอล์ 95 % หลังอบให้แห้งแล้ว มีลักษณะของสารสกัดที่ได้ออกมาเป็นของเหลวหนืดสีน้ำตาลเข้ม น้ำหนักของสารสกัดที่ได้เท่ากับ 130.56 กรัม จากนั้นน้ำหนักของสมุนไพรที่อบแห้งทั้ง 2 ชนิด รวมกันทั้งหมด 800 กรัม และคิด % Yield ที่ได้เท่ากับ 16.32 ไมโครลิตร/มิลลิกรัม ดังรูปที่ 1



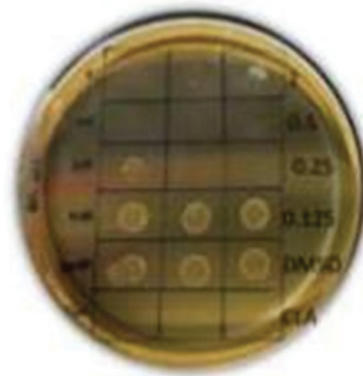
รูปที่ 1 สารสกัดใบฝรั่งผสมผลมะแว้งเครือ

### 2. ผลการต้านเชื้อแบคทีเรียของสารสกัดใบฝรั่งและสารสกัดมะแว้ง

การทดสอบการต้านเชื้อ *Streptococcus mutans* จากสารสกัดสมุนไพรได้รับการวิเคราะห์เพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพในการต้านเชื้อแบคทีเรียต่อเชื้อ *Streptococcus mutans* โดยทดสอบเพื่อประเมินความเข้มข้นของสารในระดับต่ำสุดที่สามารถยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ (MIC) ด้วยวิธี Broth Dilution Assay พบการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อที่ 0.25 มิลลิกรัม/มิลลิกรัม นอกจากนี้ความเข้มข้นของสารในระดับต่ำสุดที่สามารถฆ่าจุลินทรีย์ (MBC) พบสารสกัดมีฤทธิ์ฆ่าเชื้อแบคทีเรียที่ความเข้มข้น 0.25 มิลลิกรัม/มิลลิกรัม โดยมีอัตราส่วน MBC/MIC เท่ากับ 1 ซึ่งบ่งชี้ถึงฤทธิ์ฆ่าเชื้อแบคทีเรียโดยกระตุ้นให้เซลล์แบคทีเรียตายในระดับเดียวกับที่ยับยั้งการเจริญเติบโต ผลการต้านเชื้อแบคทีเรียโดยใช้วิธี Agar Dilution พบว่า ไม่สามารถทำผลการทดลองซ้ำได้ และพบการตกตะกอนเมื่อเตรียมสารประกอบในความเข้มข้นเกิน 2 มิลลิกรัม/มิลลิกรัม และพบว่าไม่มีการยับยั้งการเจริญเติบโตหรือฤทธิ์ฆ่าเชื้อแบคทีเรียแม้จะทดสอบที่ความเข้มข้นสูงถึง 4 มิลลิกรัม/มิลลิกรัม จากผลการทดลองโดยใช้วิธี Agar Dilution อาจเกิดขึ้นเนื่องจากฤทธิ์ทางชีวภาพในสารสกัดมีคุณสมบัติไม่ทนความร้อน ส่งผลให้สารออกฤทธิ์เสื่อมคุณภาพ ในขณะที่ Broth Dilution Assay จะเตรียมสารสกัดในระบบปิดที่ไม่ผ่านความร้อน ในอนาคตควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับผลของอุณหภูมิและความสามารถในการละลายของสารออกฤทธิ์ก่อนที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ในการยับยั้งเชื้อ *Streptococcus mutans* การเลือกวิธีการผลิตที่มีอุณหภูมิที่เย็นอาจเป็นวิธีที่เหมาะสมกว่าในการควบคุมศักยภาพในการต้านเชื้อแบคทีเรีย และควรมีการวิเคราะห์เพิ่มเติมเพื่อทำความเข้าใจการเปลี่ยนแปลงของโมเลกุลที่เป็นสาเหตุของการสูญเสียศักยภาพในการต้านเชื้อแบคทีเรียดังกล่าว



(ก) การยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์  
(MIC) (มิลลิกรัม/มิลลิลิตร)



(ข) การฆ่าเชื้อจุลินทรีย์  
(MBC) (มิลลิกรัม/มิลลิลิตร)

รูปที่ 2 ความเข้มข้นของสารในระดับต่ำสุดที่สามารถยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์

### 3. ผลทดสอบฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ

จากผลการศึกษาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระจากสารสกัดสมุนไพรใบฝรั่งผสมผลมะแว้งเครือ และสารมาตรฐาน BHT โดยทำปฏิกิริยากับ Free Radical Scavenging Assay (DPPH Assay) ผลที่ได้ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH Radical Scavenging Assay

| สารสกัดจากสมุนไพร       | IC <sub>50</sub> Values of DPPH Radical Scavenging Activity (ไมโครกรัม/มิลลิลิตร) |
|-------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| ใบฝรั่งผสมผลมะแว้งเครือ | 16.06                                                                             |
| BHT                     | 46.98                                                                             |

จากการทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH Radical Scavenging Assay สารสกัดจากสมุนไพรพบว่า IC<sub>50</sub> สารสกัดใบฝรั่งผสมผลมะแว้งเครือมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระมีค่า IC<sub>50</sub> เท่ากับ 16.06 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร ส่วนสารมาตรฐาน BHT มีค่า IC<sub>50</sub> เท่ากับ 46.98 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร เมื่อเปรียบเทียบสารสกัดสมุนไพรกับสารมาตรฐาน BHT พบว่า สารสกัดสมุนไพรสกัดใบฝรั่งผสมผลมะแว้งเครือมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ IC<sub>50</sub> สูงกว่าสารมาตรฐาน BHT

### 4. คุณสมบัติทางกายภาพของน้ำยาบ้วนปาก

จากการพัฒนาสูตรน้ำยาบ้วนปากของการพัฒนาตำรับน้ำยาบ้วนปากสมุนไพรจากสารสกัดใบฝรั่งเพื่อใช้ในทางทันตกรรมในสูตรที่ 6 พัฒนาต่อยอดเป็นน้ำยาบ้วนปากจากสารสกัดใบฝรั่งและสารสกัดมะแว้งเครือ พบว่าน้ำยาบ้วนปาก เมื่อผสมสารสกัดใบฝรั่งผสมผลมะแว้งเครือใน 70 % Sorbitol และ Glycerin น้ำยาบ้วนปากจะเกิดการข้นขึ้น จึงได้ทำการเพิ่ม PEG 400 เข้าไปซึ่งผลพบว่า ทำให้ใสขึ้นแต่น้ำยาบ้วนปากที่ได้มีรสชาติค่อนข้างขมและมีความร้อนลิ้น ผู้วิจัยจึงมีการปรับลดปริมาณของ PEG 400 ลงจากเดิม 2 มิลลิลิตร เป็น 1.5 มิลลิลิตร ซึ่งยังคงทำให้สารละลายใสน้อย และจากการชิมรสชาติของผู้วิจัยพบว่ามีความขมน้อยลงและความร้อนลิ้นที่ลดลง แต่งกลิ่นด้วย Peppermint Oil และเปลี่ยนความเข้มข้นของ Alcohol จาก 95 % เป็น 70 % พบว่า ได้สารละลายที่ใสไม่มีหยดน้ำมันลอยอยู่ที่ผิวหน้า ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 คุณสมบัติทางกายภาพของน้ำยาบ้วนปากจากสารสกัดใบฝรั่งและสารสกัดผลมะแว้งเครือ

| คุณสมบัติ | ลักษณะของน้ำยาบ้วนปาก                                                  |
|-----------|------------------------------------------------------------------------|
| ความใส    | ใส                                                                     |
| สี        | เหลือง                                                                 |
| รสชาติ    | ขมฝาดเล็กน้อย หวาน กลิ่นมันท์ ความรู้สึกเย็นเล็กน้อย ไม่รู้สึกร้อนลิ้น |
| pH        | 6.7                                                                    |

จากตารางที่ 4 พบว่า คุณสมบัติทางกายภาพของน้ำยาบ้วนปากจากสารสกัดใบฝรั่งและสารสกัดผลมะแว้งเครือมีสีเหลืองใส รสชาติขมฝาดเล็กน้อย หวาน กลิ่นมันท์ ความรู้สึกเย็นเล็กน้อย ไม่รู้สึกร้อนลิ้น และมีค่า pH 6.7 เหมาะสมกับสภาพในช่องปากของมนุษย์



รูปที่ 3 น้ำยาบ้วนปากจากสารสกัดสมุนไพรใบฝรั่งและสารสกัดผลมะแว้งเครือ

## สรุปผลการวิจัย

### 1. สรุปผลการวิจัย

การพัฒนา น้ำยาบ้วนปากจากสารสกัดใบฝรั่งผสมสารสกัดผลมะแว้งการทดสอบฤทธิ์การต้านเชื้อแบคทีเรียและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดสมุนไพร จากนั้นจึงพัฒนาผลิตภัณฑ์น้ำยาบ้วนปากที่มีส่วนผสมของสารสกัดใบฝรั่งและสารสกัดผลมะแว้ง และทำการทดสอบทางกายภาพของน้ำยาบ้วนปากจากสารสกัดสมุนไพรผลการทดลองให้ดังนี้

ผลจากการทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระพบว่า สารสกัดใบฝรั่งผสมผลมะแว้งเครือมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระมีค่า  $IC_{50}$  เท่ากับ 16.06 ไมโครลิตร / มิลลิกรัม เมื่อเปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน BHT มีค่า  $IC_{50}$  เท่ากับ 46.98 ไมโครลิตร / มิลลิกรัม พบว่า สารสกัดใบฝรั่งผสมสารสกัดผลมะแว้งมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระสูงกว่าสารมาตรฐาน BHT

ผลของการต้านเชื้อแบคทีเรียพบว่า สารสกัดสมุนไพรมีฤทธิ์การต้านเชื้อแบคทีเรีย *Streptococcus mutans* ที่ทำให้เกิดกลิ่นปาก ด้วยการหาค่า Minimum Inhibition Concentration (MIC) และ Minimum Bactericidal Concentration (MBC) ด้วยวิธี Broth Dilution Assay พบว่าสารสกัดยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ที่ความเข้มข้น 0.25 มิลลิกรัม/มิลลิกรัม และสามารถออกฤทธิ์ฆ่าเชื้อแบคทีเรีย *Streptococcus mutans* ที่ความเข้มข้น 0.25 มิลลิกรัม/มิลลิกรัม



ลักษณะทางกายภาพของน้ำยาบ้วนปากจากการพัฒนาสูตรน้ำยาบ้วนปากจากสารสกัดสมุนไพร มีลักษณะ สีเหลืองใส รสชาติขมฝาดเล็กน้อย ทวน กลิ่นมันท์ ความรู้สึกเย็นเล็กน้อยและไม่รู้สึกร้อนลิ้น ผลจากการทดสอบค่า pH ที่วัดได้ในน้ำยาบ้วนปากจากสารสกัดสมุนไพรมีค่าเท่ากับ 6.7 ซึ่งเหมาะสมกับช่องปากโดยค่า pH ที่เหมาะสมสำหรับช่องปากมนุษย์จะอยู่ในช่วง 6.2 - 7.72

## 2. อภิปรายผล

เชื้อจุลินทรีย์บางชนิดที่พบในคราบจุลินทรีย์ ที่ส่งผลให้เกิดกลิ่นไม่พึงประสงค์ในช่องปาก และก่อให้เกิดโรคในช่องปากนั้น มักพบเชื้อแบคทีเรีย *Streptococcus mutans* จากการศึกษาสารสกัดสมุนไพร ทั้ง 2 ชนิด คือ สารสกัดใบฝรั่งผสมผลมะแว้งเครือที่สกัดด้วย 95 % Ethanol นำไปทำการทดสอบการยับยั้งเชื้อ *Streptococcus mutans* ด้วยการประเมินความเข้มข้นของสารในระดับต่ำสุดที่สามารถยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ (MIC) ด้วยวิธี Broth Dilution Assay พบการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อที่ 0.25 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร นอกจากนี้ความเข้มข้นของสารในระดับต่ำสุดที่สามารถฆ่าจุลินทรีย์ (MBC) พบสารสกัดมีฤทธิ์ฆ่าเชื้อแบคทีเรีย ที่ความเข้มข้น 0.25 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร โดยมีอัตราส่วน MBC/MIC เท่ากับ 1 ซึ่งบ่งชี้ถึงฤทธิ์ฆ่าเชื้อแบคทีเรีย โดยกระตุ้นให้เซลล์แบคทีเรียตายในระดับเดียวกับที่ยับยั้งการเจริญเติบโต สอดคล้องกับงานวิจัยสารสกัดสมุนไพร ด้านเชื้อแบคทีเรียในช่องปาก [9] ที่พบว่าสารสกัดจากใบฝรั่งมีความเข้มข้นต่ำสุดที่ 5 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร และค่าความเข้มข้นต่ำสุดในการฆ่าเชื้อ 10 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร พบว่า สารสกัดสมุนไพรสารสกัดใบฝรั่งผสมผลมะแว้งเครือมีฤทธิ์การยับยั้งเชื้อ *Streptococcus mutans* ที่มีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อแบคทีเรีย ที่ความเข้มข้น 0.25 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร จึงนำสารสกัดสมุนไพรทั้ง 2 มาพัฒนาเป็นสูตรน้ำยาบ้วนปากจาก สารสกัดสมุนไพรที่สามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรียที่ก่อโรคและระงับกลิ่นปากจำนวน 1 สูตร โดยพัฒนาสูตร มาจากน้ำยาบ้วนปากของงานวิจัยศึกษาการพัฒนาตำรับน้ำยาบ้วนปากสมุนไพรจากสารสกัดใบฝรั่ง เพื่อใช้ในทางทันตกรรม [8] ที่มีลักษณะของน้ำยาบ้วนปากมีสีเหลืองใส รสชาติขมฝาดเล็กน้อย ทวน กลิ่นมันท์ ความรู้สึกเย็นเล็กน้อย ไม่รู้สึกร้อนลิ้น ที่มีค่า pH ที่เหมาะสมกับช่องปาก

## กิตติกรรมประกาศ

รายงานการวิจัยเรื่อง การพัฒนาน้ำยาบ้วนปากจากสารสกัดสมุนไพร สำเร็จโดยสมบูรณ์ลงด้วยดีเนื่องจาก ผู้วิจัยได้รับความกรุณาช่วยเหลือจากบุคคลผู้เกี่ยวข้องหลายฝ่าย ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ชุตติกาญจน์ ศรีวิบูลย์ อธิการบดี และรองศาสตราจารย์ ดร.รจนา จันทราสา ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา ที่สนับสนุนและอนุมัติทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2566 ซึ่งทำให้การวิจัยครั้งนี้สำเร็จโดยสมบูรณ์ตามวัตถุประสงค์ เจ้าหน้าที่ผู้เกี่ยวข้อง ทุกคนของสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา ที่ให้ความช่วยเหลือและการแนะนำ ด้านการเสนอโครงการวิจัยเพื่อขอรับทุนอุดหนุนการวิจัย นอกจากนั้นขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. สมเดช รุ่งศรีสวัสดิ์ คณบดีวิทยาลัยสหเวชศาสตร์ หัวหน้าสาขาวิชาการแพทย์แผนไทยประยุกต์ ตลอดจนเจ้าหน้าที่วิทยาลัยสหเวชศาสตร์ ที่ให้การสนับสนุน ท้ายที่สุด ผู้วิจัยขอขอบพระคุณนักวิชาการผู้แต่งตำราและ หนังสือจำนวนหลากหลายเล่มที่ผู้วิจัยใช้ศึกษาค้นคว้าประกอบการวิจัยครั้งนี้เป็นอย่างสูงยิ่ง หากปราศจากตำรา และหนังสือของผู้ทรงคุณวุฒิดังกล่าวแล้ว รายงานการวิจัยนี้จะไม่สำเร็จสมบูรณ์ได้เลย

## References

- [1] Department of Dental Public Health, Department of Health. (2012). **Promoting Oral Health for Overall Health at Every Stage of Life**. Bangkok: The Royal Thai Army Welfare Printing Office
- [2] Opiyanont, N. (2022). **Bad Breath**. Dentistry Department, Faculty of Medicine Ramathibodi Hospital, Mahidol University. Bangkok

- [3] Chidchuangchai, W. (2015). **Oral Examination and Diagnosis**. 2<sup>nd</sup> Edition. Bangkok: Mister Copy
- [4] Kraipiboon, P. (2013). **Diseases of the Oral Cavity and Teeth**. Bangkok: Amarin Health Amarin Printing and Publishing
- [5] Lutterodt, G. D. (1992). Inhibition of Microlax-Induced Experimental Diarrhoea with Narcotic-like Extracts of *Psidium guajava* Leaf in Rats. **Journal of Ethnopharmacology**. Vol. 37, Issue 2, pp. 151-157. DOI: 10.1016/0378-8741(92)90073-Z
- [6] Apisariyakul, A., Vanittanakorn, N., and Buddhasuk, D. (1995). Antifungal Activity of Turmeric Oil Extracted from *Curcuma longa* (Zingiberaceae). **Journal of Ethnopharmacology**. Vol. 49, Issue 3, pp. 163-169. DOI: 10.1016/0378-8741(95)01320-2
- [7] Thongpraditchote, S., Hanchanga, W., Wongkrajang, Y., Temsiririrkkul, R., and Atisuk, K. (2014). Toxicological Evaluation of *Solanum trilobatum* L. Fruit Extract. **Mahidol University Journal of Pharmaceutical Sciences**. Vol. 41, Issue 4, pp. 39-46
- [8] Thoma-udta, A. and Thoma-udta, P. (2019). **Development of Herbal Mouthwash Formula from Guava Leaf Extracts for Dental Use**. Mahasarakham Hospital
- [9] Khemnusanawan, S., Chumparang, C., and Watcharagul, S. (2021). The Antibacterial Properties of Herbal Extracts Against Oral Pathogenic Bacteria. In **Proceedings of the National Science, Technology, and Innovation Conference, 3<sup>rd</sup> Edition**. pp. 255-264. Science and Technology for Community Innovation at the Faculty of Science and Technology, University Loei

ผลของการใช้ปุ๋ยเคมีและน้ำหมักมูลสัตว์ต่อการเจริญเติบโตและผลผลิต  
ของผักกาดหอมบัตเตอร์เฮดที่ปลูกแบบใช้วัสดุทดแทนดิน

## Effects of Chemical Fertilizer and Bio-Extracts on the Growth and Yield of Butterhead Lettuce in Substrate Culture System

กาญจนา เหลืองสุวาลัย<sup>1</sup> สหสวรรณ บุญปฐมพล<sup>1</sup> และชุตินา กาบแก้ว<sup>1\*</sup>

Kanjana Luangsuwalai<sup>1</sup> Sahassawat Boonpatompol<sup>1</sup> and Chutima Kapkaeo<sup>1\*</sup>

*Received: December 12, 2023; Revised: April 24, 2024; Accepted: April 24, 2024*

### บทคัดย่อ

ผักกาดหอมบัตเตอร์เฮดเป็นผักกาดหอมชนิดหนึ่งที่นิยมนำมาบริโภคสด ซึ่งปัจจุบันนิยมปลูกด้วยระบบปลูกพืชในสารละลาย การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการใช้น้ำหมักจากมูลสัตว์ต่อการเจริญเติบโตของผักกาดหอมบัตเตอร์เฮดที่ปลูกในกระถางโดยใช้วัสดุทดแทนดิน (ทรายผสมถ่านแกลบ) โดยวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ซึ่งประกอบด้วย 6 ทรีตเมนต์ คือ (1) ปุ๋ยเคมีสูตร 16-16-16 (2) น้ำหมักมูลไส้เดือน (3) น้ำหมักมูลสุกร (4) ปุ๋ยเคมีสูตร 16-16-16 สลับกับน้ำหมักมูลไส้เดือน (5) ปุ๋ยเคมีสูตร 16-16-16 สลับกับน้ำหมักมูลสุกร และ (6) น้ำหมักมูลไส้เดือนสลับกับน้ำหมักมูลสุกร พบว่าการเจริญเติบโต และปริมาณคลอโรฟิลล์มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $P < 0.01$ ) ผลการทดลองสามารถแบ่งได้เป็น 3 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ 1 ผักกาดหอมบัตเตอร์เฮดที่ได้รับปุ๋ยเคมีสูตร 16-16-16 ให้การเจริญเติบโต (ความกว้างพุ่ม ความสูง จำนวนใบ ความยาวใบ และความกว้างใบ และปริมาณคลอโรฟิลล์) สูงที่สุด รองลงมาคือ กลุ่มผักกาดหอมบัตเตอร์เฮดที่ได้รับสารละลายปุ๋ยเคมีสลับกับน้ำหมักมูลสัตว์ และกลุ่มที่ 3 คือกลุ่มที่ได้รับน้ำหมักมูลสัตว์เพียงอย่างเดียว สำหรับผลผลิตพบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $P < 0.01$ ) โดยต้นผักกาดหอมบัตเตอร์เฮดที่ได้รับปุ๋ยเคมีสูตร 16-16-16 ให้น้ำหนักผลผลิตมากที่สุด รองลงมาคือ ต้นผักกาดหอมบัตเตอร์เฮดที่ได้รับปุ๋ยเคมีสลับกับน้ำหมักมูลสุกร และปุ๋ยเคมีสลับกับน้ำหมักมูลไส้เดือน ตามลำดับ

คำสำคัญ : ผักกาดหอมบัตเตอร์เฮด; น้ำหมักมูลไส้เดือน; น้ำหมักมูลสุกร; ระบบปลูกแบบใช้วัสดุทดแทนดิน

<sup>1</sup> คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา

<sup>1</sup> Faculty of Science of Technology, Bansomdejchaopraya Rajabhat University

\* Corresponding Author, Tel. 09 0969 5063, E - mail: chutee\_AE@hotmail.com

## Abstract

Butterhead is a type of lettuce that is commonly consumed fresh. Currently, it is popular to grow fresh vegetables using a hydroponic solution system. The objective of this study was to examine the effect of using animal manure extract solutions on the growth of butterhead lettuce, grown in plastic pots using a soil substitute of sand mixed with rice husk charcoal. A randomized trial was conducted, consisting of six treatments: (1) chemical fertilizer (16-16-16), (2) vermicompost extract, (3) swine manure extract, (4) chemical fertilizer alternating with vermicompost extract, (5) chemical fertilizer alternating with swine manure extract, and (6) vermicompost extract alternating with swine manure extract. The results indicated that there are highly significant differences ( $P<0.01$ ) in the growth (growth in terms of bush width, height, number of leaves, leaf length, and leaf width) and chlorophyll content within treatments. The results of the experiment can be divided into three groups: (1) butterhead lettuce supplied with chemical fertilizer, (2) butterhead lettuce grown with a chemical fertilizer solution alternating with animal manure extract, and (3) butterhead lettuce provided with animal manure extract. A significant difference ( $P<0.01$ ) was found between the yield of each fertilizer, with the first group producing the most fresh weight of yield when compared to the other groups. The next highest producing yields were from chemical fertilizers alternating with swine manure extract solution, and chemical fertilizers alternating with vermicompost extract solution, respectively.

**Keywords:** Butterhead Lettuce; Vermicompost Extract; Swine Manure Extract; Substrate Culture System

## บทนำ

ผักกาดหอมบัตเตอร์เฮด (*Lactuca sativa* var. *capitata* Lam.) บางครั้งเรียกว่า บิบ คือสลัดกึ่งห่อ จัดเป็นผักตระกูลผักสลัดที่ได้รับความนิยมบริโภคมาก เนื่องจากมีคุณค่าทางโภชนาการสูง ใบลักษณะอ่อนและนิ่มห่อปลีทลวม ใบมีลักษณะคล้ายมีน้ำมันหรือเนยจับที่ผิวใบ ผักกาดหอมบัตเตอร์เฮดเป็นพืชที่นิยมบริโภคสด โดยเฉพาะในสลัด รับประทานเป็นเครื่องเคียงน้ำพริก ห่อเมี่ยงคำ เนื้อย่าง และยำต่าง ๆ หรือนำมาตกแต่งในจานอาหาร ผักกาดหอมมีน้ำเป็นองค์ประกอบ 95 % คาร์โบไฮเดรต 1 - 2 % โปรตีน 1 - 2 % ไขมัน 0.25 % และมีวิตามินซีสูง นอกจากนี้ยังให้ฮีโมโกลบิน (Hemoglobin) ช่วยป้องกันโรคโลหิตจาง บรรเทาอาการท้องผูกเหมาะสำหรับผู้ที่มีผู้ป่วยเป็นโรคเบาหวาน [1]

มูลสุกร (Swine Manure) เป็นของเหลือทิ้งจำนวนมากจากฟาร์มเลี้ยงสุกร แต่จัดว่าเป็นปุ๋ยสำหรับบำรุงพืชและบำรุงดินชั้นดี เนื่องจากในมูลสุกรอุดมไปด้วยธาตุอาหารสำหรับพืช ทั้งธาตุอาหารหลัก คือ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม อีกทั้งยังมีธาตุอาหารรอง ได้แก่ แคลเซียม แมกนีเซียม กำมะถัน เหล็ก แมงกานีส ทองแดง และสังกะสี อีกด้วย โดยธาตุไนโตรเจนที่อยู่ในมูลสุกร มีทั้งที่อยู่ในรูปสารอินทรีย์และอนินทรีย์ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการเจริญเติบโตของพืช มีรายงานการวิเคราะห์ตัวอย่างมูลสุกร ที่แสดงให้เห็นว่าปริมาณธาตุไนโตรเจนที่อยู่ในรูปสารอินทรีย์ 35 % สามารถเปลี่ยนมาเป็นรูปธาตุอาหารที่เป็นประโยชน์แก่พืชในช่วงปีแรกและสารอินทรีย์ไนโตรเจนในมูลสุกรอีก 50 % จะปลดปล่อยออกมาให้พืชใช้ได้ในปีที่ 2 แสดงให้เห็นว่าปุ๋ยมูลสุกรมีการปลดปล่อยไนโตรเจนค่อนข้างช้าซึ่งเป็นข้อดีที่ทำให้ช่วยลดการชะล้างหรือการสูญเสียไนโตรเจนได้ [2] จากรายงานผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารพืชในมูลสุกรแห้งเก่า โดยกองเกษตรเคมี



กรมวิชาการเกษตรพบว่าปริมาณไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม ร้อยละ 2.38 16.25 และ 0.11 ตามลำดับ สำหรับผลการวิเคราะห์ธาตุอาหารหลักในมูลสุกร [3] พบว่ามูลสุกร มีปริมาณธาตุอาหารหลักดังนี้ 2.68%N 8.5%P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 1.67%K<sub>2</sub>O ในประเทศไทยโดยศูนย์ค้นคว้าและพัฒนาวิชาการอาหารสัตว์ สถาบันสุวรรณวาลกิจจามหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม ได้แนะนำการทำน้ำสกัดมูลสุกร โดยนำมูลสุกรแห้ง 1 กิโลกรัม ใส่ลงในลอนแช่น้ำ 10 ลิตร นาน 24 ชั่วโมง จากนั้นสามารถนำน้ำสกัดส่วนใสที่ได้มาเจือจางกับน้ำได้ 10 - 20 เท่า เพื่อใช้เป็นปุ๋ยรดทางดินหรือฉีดพ่นทางใบ หรือเก็บไว้ใช้ต่อไป ส่วนกากของมูลสุกรก็สามารถนำไปใช้เป็นปุ๋ยทางดินได้เลยโดยไม่ต้องเสียเวลาหมัก เหมือนปุ๋ยหมักทั่วไป ซึ่งในน้ำสกัดมูลสุกรมีปริมาณธาตุอาหารหลัก ธาตุอาหารรอง และจุลธาตุอาหารที่เป็นประโยชน์ต่อพืช เกือบทุกธาตุในปริมาณมากสามารถใช้เป็นปุ๋ยเพื่อเร่งการเจริญเติบโต การเพิ่มผลผลิตของพืช อีกทั้งยังสามารถใช้เป็นปุ๋ยเพื่อแก้ไขอาการขาดธาตุอาหารของพืชได้อีกด้วย [4]

ปุ๋ยหมักมูลไส้เดือน (Vermicompost) เป็นสิ่งขับถ่ายของไส้เดือนดินที่กินและย่อยอินทรีย์วัตถุแล้วเปลี่ยนเป็นปุ๋ยหมักคุณภาพสูง เพราะมีธาตุอาหารพืชที่จำเป็นที่ช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชและมีสารปกป้องศัตรูพืชที่มีประสิทธิภาพ ปุ๋ยหมักมูลไส้เดือน มีลักษณะเป็นเม็ดละเอียด คล้ายพีท (Peat) มีรายงานว่า มีระดับไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม (NPK) ในรูปแบบที่มีอยู่ สารอาหารรอง จุลินทรีย์ และเอนไซม์ ปุ๋ยหมักมูลไส้เดือนยังอุดมไปด้วยฮิวมัส ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นสารเชื่อมอนุภาคของดินเข้าด้วยกัน ทำให้เกิดเป็นเม็ดดิน [5]

การปลูกพืชบนดินเป็นวิธีทำโดยทั่วไปมีขั้นตอนไม่ยุ่งยากและต้นทุนไม่มาก แต่มักจะประสบปัญหาเกี่ยวกับโรคพืช แมลงศัตรูพืช และวัชพืช นอกจากนี้อาจพบปัญหาเกี่ยวกับความอุดมสมบูรณ์ของดินที่ปลูก บางแห่งยังพบดินที่มีปัญหา เช่น ดินเป็นกรด ดินด่าง และดินเค็ม อีกทั้งข้อจำกัดของแต่ละพื้นที่โดยเฉพาะในเขตกรุงเทพมหานครเนื่องจากที่ดินมีราคาแพง คนส่วนใหญ่อาศัยในอพาร์ทเมนต์ คอนโดมิเนียม และทาวน์เฮาส์ เป็นต้น [6] จากปัญหาต่าง ๆ ที่กล่าวมาทำให้ปัจจุบันนิยมนำระบบปลูกพืชแบบไร้ดินมาใช้ในการผลิตมากขึ้นเพราะมีข้อดีคือ จะทำให้ได้ผลผลิตที่สะอาดปราศจากการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ที่อยู่ในดิน ซึ่งการปลูกพืชแบบไร้ดินอาจแบ่งได้เป็น 3 ระบบใหญ่ ๆ คือ การปลูกพืชในสารละลาย (Hydroponics) การปลูกพืชในอากาศ (Aeroponics) และการปลูกพืชโดยใช้วัสดุปลูกทดแทนดิน (Substrate Culture) ซึ่งวัสดุในที่นี้มีทั้งที่เป็นอินทรีย์สารและอนินทรีย์สาร โดยวัสดุที่ใช้ปลูกมักเป็นวัสดุที่หาง่ายในท้องถิ่นของแต่ละประเทศ เช่น ในประเทศไทยวัสดุปลูกที่นิยมใช้ ได้แก่ ขุยมะพร้าว ทรายหยาบ ถ่านแกลบ และแกลบดิบ เป็นต้น [7] กระดาษที่ปลูกในวัสดุปลูกที่มีส่วนผสมระหว่างทรายหยาบผสมถ่านแกลบในอัตราส่วน 1:1 มีการเจริญเติบโตและให้ผลผลิตค่าน้ำสูง ทั้งนี้แหล่งสารอาหารสำหรับปลูกพืชระบบไร้ดิน คือสารละลายธาตุอาหารพืชสูตรต่าง ๆ ที่นิยมใช้ ได้แก่ สารละลายปุ๋ย A B หรือแม้กระทั่งในการปลูกพืชในดินปกติก็นิยมให้ปุ๋ยเคมีสูตรต่าง ๆ ทั้งนี้เพื่อส่งเสริมการเจริญเติบโตและเพิ่มผลผลิต ถึงแม้ว่าการปลูกพืชไร้ดินจะมีข้อดีหลายประการ แต่การปลูกพืชในระบบไร้ดินนั้นยังมีข้อจำกัด คือในช่วงปี พ.ศ. 2561 ได้ปรากฏข่าวเกี่ยวกับสารเคมีตกค้างในผักไฮโดรโปนิคส์ ซึ่งนอกจากตรวจพบสารเคมีกำจัดศัตรูพืชแล้วยังรวมถึงการตกค้างของปุ๋ยเคมีที่จำเป็นต้องใช้ในการปลูกพืชระบบไร้ดินอีกด้วย จากรายงานผลการตรวจวิเคราะห์ของเครือข่ายเตือนภัยสารเคมีกำจัดศัตรูพืชพบว่าพืชผักหลายชนิด ได้แก่ ผักคะน้า ผักกาดขาวดองฮ่องเต้ และผักบุ้งจีนที่ปลูกด้วยระบบนี้มีสารไนเตรต (Nitrate) ตกค้างอยู่ในปริมาณสูง รวมทั้งกลุ่มผักสลัดซึ่งนิยมปลูกด้วยระบบปลูกพืชไร้ดินก็มีสารไนเตรตตกค้างอยู่เช่นเดียวกัน ข่าวนี้ทำให้เกิดความกังวลต่อผู้บริโภคที่นิยมบริโภคผักที่ปลูกด้วยระบบไร้ดิน เนื่องจากสารไนเตรตที่เข้าสู่ร่างกายจะเปลี่ยนเป็นไนไตรต์ (Nitrite) ไปรบกวนการทำงานของต่อมไทรอยด์ และไนไตรต์สามารถทำปฏิกิริยากับสารเอมีน (Amine) ในอาหารกลายเป็นไนโตรซามีน (Nitrosamine) ซึ่งจัดว่าเป็นสารก่อมะเร็ง ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงมีความสนใจศึกษาผลของการใช้น้ำหมักมูลสัตว์ที่มีต่อการเจริญเติบโตของผักกาดหอมบัตเตอร์เฮดที่ปลูกโดยใช้วัสดุปลูกทดแทนดิน เพื่อทดแทนหรือลดปริมาณการใช้ปุ๋ยเคมีซึ่งช่วยให้ผู้บริโภคลดความกังวลเกี่ยวกับสารไนเตรตที่อาจจะตกค้างในผลผลิตผักได้

## วิธีการดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมการทดลอง โดยการเพาะเมล็ดผักกาดหอมบัตเตอร์เฮด บรรจุวัสดุเพาะ Coco Peat ลงในถาดเพาะ หยอดเมล็ดหุ้มละ 1 เมล็ด รดน้ำให้ชุ่มนำไปวางไว้ให้เมล็ดงอกในสภาพแสงรำไร เมื่อเมล็ดงอก ดูแลรดน้ำจนกระทั่งต้นกล้าเจริญเติบโตดี (หลังจากเพาะเมล็ด 2 สัปดาห์) ทำการย้ายปลูกลงในกระถางขนาด 8 นิ้ว ที่บรรจุวัสดุปลูก (ทราย แกลบดำและกากมะพร้าวสับ) กระถางละ 1 ต้น ดูแลให้น้ำทุกวัน หลังจากย้าย ต้นกล้าลงกระถางที่เตรียมไว้ 1 วัน เริ่มให้ปุ๋ยตามวิธีที่ที่กำหนด โดยรดทางดินในอัตรา 100 มิลลิลิตร/กระถาง ทุก 5 วัน หยุดให้สารละลายปุ๋ยก่อนการเก็บเกี่ยว 1 สัปดาห์

### 2. การเตรียมปุ๋ยเพื่อใช้ในการทดลอง

2.1 นำปุ๋ยเคมีสูตร 16-16-16 ละลายน้ำ อัตรา 4 กรัมต่อลิตร ใช้ปุ๋ยเคมีอัตรา 100 มิลลิลิตร/กระถาง (ค่า E.C. = 7891  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) รดผักสลัดทุก 5 วัน หรือใช้รดสลับกับน้ำหมักมูลสัตว์ตามวิธีที่ที่กำหนด ทุก 5 วัน จนกระทั่งก่อนเก็บเกี่ยว 1 สัปดาห์ จึงหยุดให้ปุ๋ย

2.2 การเตรียมปุ๋ยน้ำหมักมูลไส้เดือน โดยนำมูลไส้เดือนหมักกับน้ำสะอาดอัตรา 1 กิโลกรัมต่อน้ำ 20 ลิตร ลงในถังพลาสติก โดยการเติมอากาศด้วยเครื่องเติมอากาศใช้เวลาหมักนาน 1 สัปดาห์ จากนั้นกรองน้ำหมักมูลไส้เดือนที่ได้ผสมน้ำสะอาด อัตรา 1 ลิตรต่อน้ำ 4 ลิตร (ค่า E.C. = 491  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) เพื่อนำไปใช้รดทางดินอัตรา 100 มิลลิลิตร/กระถาง ทุก 5 วัน หรือใช้รดสลับกับปุ๋ยเคมี หรือน้ำหมักมูลสุกร ตามวิธีที่ที่กำหนด

2.3 การเตรียมปุ๋ยน้ำหมักมูลสุกร นำมูลสุกรแห้งหมักกับน้ำสะอาดอัตรา 1 กิโลกรัมต่อน้ำ 20 ลิตร ลงในถังพลาสติก โดยการเติมอากาศด้วยเครื่องเติมอากาศ ใช้เวลาหมักนาน 1 สัปดาห์ จากนั้นกรองน้ำหมักมูลสุกรที่ได้ ผสมน้ำสะอาดอัตรา 1 ลิตรต่อน้ำ 4 ลิตร (ค่า E.C. = 790  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) ก่อนนำไปใช้รดทางดินอัตรา 100 มิลลิลิตร/กระถาง ทุก 5 วัน หรือใช้รดสลับกับปุ๋ยเคมี หรือน้ำหมักมูลไส้เดือน ตามวิธีที่ที่กำหนด

2.4 การเตรียมวัสดุปลูก ผสมทรายกับถ่านแกลบอัตรา 2:1 จากนั้นนำกากมะพร้าวสับรองกัน กระถางขนาด 8 นิ้ว และใส่วัสดุปลูกที่ผสมไว้

2.5 รดน้ำเข้า-เย็นทุกวัน จากนั้นเก็บผลการเจริญเติบโตทุก ๆ 7 วัน

3. วางแผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD) ประกอบด้วย 6 วิธีที่ทดลอง ๆ ละ 10 ซ้ำ ดังนี้

- วิธีที่ 1 ปุ๋ยเคมีสูตร 16-16-16
- วิธีที่ 2 ปุ๋ยน้ำหมักมูลไส้เดือน
- วิธีที่ 3 ปุ๋ยน้ำหมักมูลสุกร
- วิธีที่ 4 ปุ๋ยน้ำหมักมูลไส้เดือนสลับกับปุ๋ยเคมี 16-16-16
- วิธีที่ 5 ปุ๋ยน้ำหมักมูลสุกรสลับกับปุ๋ยเคมี 16-16-16
- วิธีที่ 6 ปุ๋ยน้ำหมักมูลสุกรสลับกับปุ๋ยน้ำหมักมูลไส้เดือน

### 4. การบันทึกข้อมูล

4.1 บันทึกข้อมูลการเจริญเติบโต ความกว้างพุ่ม ความสูงลำต้น (โดยวัดจากระดับผิววัสดุปลูก ถึงใบยอด) ความกว้างใบ ความยาวใบ จำนวนใบ ปริมาณคลอโรฟิลล์ของใบ โดยใช้ Chlorophyll Meter SPAD 502 plus

4.2 บันทึกข้อมูล น้ำหนักสดต้น น้ำหนักแห้งต้น น้ำหนักสตราก น้ำหนักแห้งสตราก ในวันเก็บเกี่ยว ผลผลิต

5. การวิเคราะห์ข้อมูล วิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ Analysis of Variance (ANOVA) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

## ผลการทดลองและวิจารณ์

จากการทดลองศึกษาการเจริญเติบโตและผลผลิตของต้นผักกาดหอมบัตเตอร์เฮดด้วยสารละลายปุ๋ยต่าง ๆ ทุก 5 วัน พบว่า

1. ด้านการเจริญเติบโต ความกว้างพุ่มผักกาดหอมบัตเตอร์เฮดในช่วงอายุ 2-4 สัปดาห์ มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P>0.05$ ) แต่เมื่อต้นผักกาดหอมบัตเตอร์เฮดมีอายุ 6-8 สัปดาห์ พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P<0.01$ ) โดยในสัปดาห์ที่ 8 ซึ่งเป็นสัปดาห์ที่เก็บเกี่ยวผลผลิต พบว่าต้นผักกาดหอมบัตเตอร์เฮดที่ใส่ปุ๋ยเคมีสูตร 16-16-16 มีค่าเฉลี่ยของความกว้างพุ่มมากที่สุดเท่ากับ 23.93 เซนติเมตร รองลงมาคือ ต้นผักกาดหอมบัตเตอร์เฮดที่ได้รับปุ๋ยเคมีสลับกับปุ๋ยน้ำหมักมูลสุกร และปุ๋ยเคมีสลับกับปุ๋ยน้ำหมักมูลไส้เดือน ตามลำดับ โดยต้นผักกาดหอมบัตเตอร์เฮดที่ใส่ปุ๋ยน้ำหมักมูลไส้เดือนเพียงอย่างเดียว มีความกว้างพุ่มเฉลี่ยน้อยที่สุดเพียง 15.69 เซนติเมตร (ตารางที่ 1)

ตารางที่ 1 ความกว้างทรงพุ่มของต้นผักกาดหอมบัตเตอร์เฮดที่ได้รับสารละลายปุ๋ยแตกต่างกัน

| ทริทเมนต์               | อายุ (สัปดาห์) |            |                          |                         |
|-------------------------|----------------|------------|--------------------------|-------------------------|
|                         | 2              | 4          | 6                        | 8                       |
| ปุ๋ยเคมี                | 4.82±0.76      | 11.86±1.26 | 20.78±1.98 <sup>a</sup>  | 23.93±2.49 <sup>a</sup> |
| มูลไส้เดือน             | 5.39±0.70      | 12.51±1.13 | 17.02±1.69 <sup>c</sup>  | 15.69±2.32 <sup>d</sup> |
| มูลสุกร                 | 4.66±1.16      | 10.83±1.40 | 17.08±0.77 <sup>c</sup>  | 17.72±2.19 <sup>c</sup> |
| ปุ๋ยเคมีสลับมูลไส้เดือน | 5.60±1.97      | 11.89±1.36 | 18.60±1.06 <sup>b</sup>  | 20.86±2.43 <sup>b</sup> |
| ปุ๋ยเคมีสลับมูลสุกร     | 5.20±1.30      | 11.97±1.28 | 17.93±0.91 <sup>bc</sup> | 21.41±0.93 <sup>b</sup> |
| มูลไส้เดือนสลับมูลสุกร  | 5.29±0.77      | 11.93±2.46 | 17.3±1.69 <sup>bc</sup>  | 18.97±1.15 <sup>c</sup> |
| F-test                  | ns             | ns         | **                       | **                      |
| CV (%)                  | 21.91          | 12.52      | 7.95                     | 9.70                    |

หมายเหตุ: ns มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ( $P>0.05$ )

\*\* มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 % ( $P<0.01$ )

ตัวอักษรที่เหมือนกันในแนวดิ่งไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี DMRT ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

ความสูงของต้นผักกาดหอมบัตเตอร์เฮด อายุ 2 และ 6 สัปดาห์มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P>0.05$ ) อายุ 4 และ 8 สัปดาห์ พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P<0.01$ ) โดยสัปดาห์ที่ 8 พบว่าต้นผักกาดหอมบัตเตอร์เฮดที่ได้รับปุ๋ยเคมีสูตร 16-16-16 มีความสูงเฉลี่ยมากที่สุดเท่ากับ 3.79 เซนติเมตร โดยต้นผักกาดหอมบัตเตอร์เฮดที่ใส่ปุ๋ยน้ำหมักมูลไส้เดือนสลับกับปุ๋ยน้ำหมักมูลสุกร มีความสูงเฉลี่ยน้อยที่สุดเพียง 2.57 เซนติเมตร แต่เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยพบว่าไม่แตกต่างทางสถิติกับต้นผักกาดหอมบัตเตอร์เฮดที่ได้รับปุ๋ยสูตรอื่น ๆ (ตารางที่ 2)

จำนวนใบของต้นผักกาดหอมบัตเตอร์เฮด อายุ 2-4 สัปดาห์ มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P>0.05$ ) เมื่อต้นผักกาดหอมบัตเตอร์เฮดมีอายุ 6-8 สัปดาห์ พบว่าจำนวนใบมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P<0.01$ ) โดยที่อายุ 8 สัปดาห์หลังจากเพาะเมล็ด ต้นผักกาดหอมบัตเตอร์เฮดที่ได้รับปุ๋ยเคมีเพียงอย่างเดียว มีจำนวนใบเฉลี่ยมากที่สุด คือ 38.40 ใบ ขณะที่ต้นผักกาดหอมบัตเตอร์เฮดที่ได้รับปุ๋ยน้ำหมักมูลไส้เดือนเพียงอย่างเดียวมีจำนวนใบเฉลี่ยน้อยที่สุดเพียง 23 ใบ (ตารางที่ 3) นอกจากนี้พบว่าต้นผักกาดหอมบัตเตอร์เฮดที่ได้รับปุ๋ย 16-16-16 เริ่มเข้าปลีตั้งแต่สัปดาห์ที่ 7

ตารางที่ 2 ความสูงของต้นผักกาดหอมบัตเตอร์เฮดที่ได้รับสารละลายปุ๋ยแตกต่างกัน

| ทรีทเมนต์               | อายุ (สัปดาห์) |                        |           |                        |
|-------------------------|----------------|------------------------|-----------|------------------------|
|                         | 2              | 4                      | 6         | 8                      |
| ปุ๋ยเคมี                | 1.31±0.24      | 1.62±0.08 <sup>b</sup> | 2.53±0.19 | 3.79±0.17 <sup>a</sup> |
| มูลไส้เดือน             | 1.20±0.17      | 1.63±0.11 <sup>b</sup> | 2.38±0.16 | 2.59±0.19 <sup>b</sup> |
| มูลสุกร                 | 1.29±0.21      | 1.68±0.10 <sup>b</sup> | 2.47±0.14 | 2.67±0.18 <sup>b</sup> |
| ปุ๋ยเคมีสลับมูลไส้เดือน | 1.31±0.11      | 1.74±0.20 <sup>b</sup> | 2.57±0.26 | 2.60±0.12 <sup>b</sup> |
| ปุ๋ยเคมีสลับมูลสุกร     | 1.27±0.07      | 1.73±0.18 <sup>b</sup> | 2.50±0.11 | 2.62±0.06 <sup>b</sup> |
| มูลไส้เดือนสลับมูลสุกร  | 1.38±0.12      | 1.89±0.24 <sup>a</sup> | 2.41±0.17 | 2.57±0.11 <sup>b</sup> |
| F-test                  | ns             | **                     | ns        | **                     |
| CV (%)                  | 11.81          | 8.78                   | 6.88      | 4.90                   |

หมายเหตุ: ns มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ( $P>0.05$ )

\*\* มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 % ( $P<0.01$ )

ตัวอักษรที่เหมือนกันในแนวตั้งไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี DMRT ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

ตารางที่ 3 จำนวนใบของต้นผักกาดหอมบัตเตอร์เฮดที่ได้รับสารละลายปุ๋ยแตกต่างกัน

| ทรีทเมนต์               | อายุ (สัปดาห์) |           |                          |                         |
|-------------------------|----------------|-----------|--------------------------|-------------------------|
|                         | 2              | 4         | 6                        | 8                       |
| ปุ๋ยเคมี                | 5.90±0.32      | 9.30±0.67 | 17.80±1.75 <sup>a</sup>  | 38.40±3.34 <sup>a</sup> |
| มูลไส้เดือน             | 6.10±0.57      | 9.00±0.82 | 14.70±1.06 <sup>c</sup>  | 23.00±1.56 <sup>c</sup> |
| มูลสุกร                 | 6.00±0.67      | 9.30±0.67 | 14.80±1.03 <sup>c</sup>  | 23.20±2.74 <sup>c</sup> |
| ปุ๋ยเคมีสลับมูลไส้เดือน | 6.00±0.47      | 9.10±0.74 | 16.00±1.05 <sup>bc</sup> | 34.90±3.35 <sup>b</sup> |
| ปุ๋ยเคมีสลับมูลสุกร     | 5.70±0.67      | 8.90±0.57 | 16.40±1.26 <sup>b</sup>  | 34.60±4.88 <sup>b</sup> |
| มูลไส้เดือนสลับมูลสุกร  | 6.10±0.32      | 9.10±0.74 | 16.00±1.83 <sup>bc</sup> | 24.80±3.65 <sup>c</sup> |
| F-test                  | ns             | ns        | **                       | **                      |
| CV (%)                  | 8.42           | 7.70      | 8.35                     | 10.91                   |

หมายเหตุ: ns มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ( $P>0.05$ )

\*\* มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 % ( $P<0.01$ )

ตัวอักษรที่เหมือนกันในแนวตั้งไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี DMRT ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

ความยาวใบของต้นผักกาดหอมบัตเตอร์เฮดทุกทรีทเมนต์ในช่วงอายุ 2 - 4 สัปดาห์ มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P>0.05$ ) โดยความยาวใบเริ่มมีขนาดแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P<0.01$ ) เมื่อต้นผักกาดหอมบัตเตอร์เฮดมีอายุ 6 - 8 สัปดาห์ โดยในสัปดาห์ที่ 8 (ณ วันที่เก็บเกี่ยว) พบว่าต้นผักกาดหอมบัตเตอร์เฮดที่ได้รับปุ๋ยเคมีสูตร 16-16-16 มีความยาวใบเฉลี่ยมากที่สุด 12.01 เซนติเมตร ขณะที่ต้นผักกาดหอมบัตเตอร์เฮดที่ได้รับปุ๋ยน้ำหมักมูลไส้เดือนเพียงอย่างเดียว มีความยาวใบเฉลี่ยเพียง 7.93 เซนติเมตร (ตารางที่ 4)



ตารางที่ 4 ความยาวใบของผักกาดหอมบัตเตอร์เฮดที่ได้รับสารละลายปุ๋ยแตกต่างกัน

| ทรีทเมนต์               | อายุ (สัปดาห์) |           |                         |                         |
|-------------------------|----------------|-----------|-------------------------|-------------------------|
|                         | 2              | 4         | 6                       | 8                       |
| ปุ๋ยเคมี                | 4.22±0.48      | 7.70±0.60 | 10.27±0.85 <sup>a</sup> | 12.01±1.00 <sup>a</sup> |
| มูลไส้เดือน             | 4.26±0.30      | 7.63±0.61 | 8.02±1.13 <sup>c</sup>  | 7.93±0.83 <sup>d</sup>  |
| มูลสุกร                 | 3.93±0.61      | 7.40±0.73 | 8.46±0.98 <sup>bc</sup> | 8.93±0.91 <sup>c</sup>  |
| ปุ๋ยเคมีสลับมูลไส้เดือน | 4.55±0.59      | 7.59±0.77 | 9.98±0.87 <sup>a</sup>  | 10.47±1.17 <sup>b</sup> |
| ปุ๋ยเคมีสลับมูลสุกร     | 4.40±0.56      | 7.32±0.40 | 8.99±0.64 <sup>b</sup>  | 10.76±0.96 <sup>b</sup> |
| มูลไส้เดือนสลับมูลสุกร  | 4.55±0.36      | 7.22±0.99 | 8.14±0.93 <sup>bc</sup> | 8.90±0.75 <sup>c</sup>  |
| F-test                  | ns             | ns        | **                      | **                      |
| CV (%)                  | 11.18          | 9.11      | 10.01                   | 9.52                    |

หมายเหตุ: ns มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ( $P>0.05$ )

\*\* มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 % ( $P<0.01$ )

ตัวอักษรที่เหมือนกันในแนวดิ่งไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี DMRT ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

ความกว้างใบของต้นผักกาดหอมบัตเตอร์เฮดในช่วงอายุ 2 - 4 สัปดาห์ มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ ( $P>0.05$ ) ซึ่งในช่วงอายุ 6 - 8 สัปดาห์ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P<0.01$ ) โดยในสัปดาห์ที่ 8 พบว่าต้นผักกาดหอมบัตเตอร์เฮดที่ได้รับสารละลายปุ๋ยเคมีสูตร 16-16-16 เพียงอย่างเดียว มีความกว้างใบเฉลี่ยมากที่สุด 8.36 เซนติเมตร รองลงมาเป็นต้นผักกาดหอมบัตเตอร์เฮดที่ได้รับปุ๋ยเคมีสลับกับปุ๋ยน้ำหมักมูลสุกร หรือปุ๋ยน้ำหมักมูลไส้เดือน ตามลำดับ และผักกาดหอมบัตเตอร์เฮดที่ได้รับปุ๋ยน้ำหมักมูลไส้เดือนเพียงอย่างเดียว มีความกว้างใบเฉลี่ยเพียง 4.93 เซนติเมตร (ตารางที่ 5)

ตารางที่ 5 ความกว้างใบของผักกาดหอมบัตเตอร์เฮดที่ได้รับสารละลายปุ๋ยแตกต่างกัน

| ทรีทเมนต์               | อายุ (สัปดาห์) |           |                         |                        |
|-------------------------|----------------|-----------|-------------------------|------------------------|
|                         | 2              | 4         | 6                       | 8                      |
| ปุ๋ยเคมี                | 1.72±0.17      | 3.39±0.36 | 6.99±0.71 <sup>a</sup>  | 8.36±1.06 <sup>a</sup> |
| มูลไส้เดือน             | 1.79±0.13      | 3.23±0.21 | 4.77±0.44 <sup>d</sup>  | 4.93±0.43 <sup>c</sup> |
| มูลสุกร                 | 1.63±0.27      | 3.30±0.36 | 5.02±0.63 <sup>cd</sup> | 5.49±0.90 <sup>c</sup> |
| ปุ๋ยเคมีสลับมูลไส้เดือน | 1.85±0.28      | 3.38±0.35 | 5.62±0.82 <sup>bc</sup> | 6.84±1.12 <sup>b</sup> |
| ปุ๋ยเคมีสลับมูลสุกร     | 1.82±0.23      | 3.47±0.24 | 5.88±0.70 <sup>b</sup>  | 7.56±0.59 <sup>b</sup> |
| มูลไส้เดือนสลับมูลสุกร  | 1.89±0.17      | 3.47±0.58 | 5.18±0.69 <sup>cd</sup> | 5.43±0.50 <sup>c</sup> |
| F-test                  | ns             | ns        | **                      | **                     |
| CV (%)                  | 11.51          | 10.34     | 11.94                   | 11.89                  |

หมายเหตุ: ns มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ( $P>0.05$ )

\*\* มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 % ( $P<0.01$ )

ตัวอักษรที่เหมือนกันในแนวดิ่งไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี DMRT ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

ปริมาณคลอโรฟิลล์ในใบผักกาดหอมบัตเตอร์เฮด อายุ 4 สัปดาห์ มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ ( $P < 0.05$ ) แต่พบว่า เมื่อสัปดาห์ที่ 2 6 และ 8 สัปดาห์ ปริมาณคลอโรฟิลล์มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P > 0.05$  และ  $P < 0.01$ ) โดยในสัปดาห์ที่ 8 ใบของผักกาดหอมบัตเตอร์เฮดที่ได้รับสารละลายปุ๋ยเคมีสูตร 16-16-16 มีปริมาณคลอโรฟิลล์เฉลี่ยมากที่สุด 36.45 SPAD unit รองลงมาคือ ต้นผักกาดหอมบัตเตอร์เฮดที่ได้รับปุ๋ยเคมีร่วมกับปุ๋ยน้ำหมักมูลไส้เดือนหรือปุ๋ยน้ำหมักมูลสุกร สำหรับพืชที่ที่ได้รับปุ๋ยน้ำหมักมูลไส้เดือนหรือปุ๋ยน้ำหมักมูลไส้เดือนมีปริมาณคลอโรฟิลล์ต่ำกว่ากลุ่มที่ได้รับปุ๋ยเคมี โดยเฉพาะพืชที่ที่ได้รับปุ๋ยน้ำหมักมูลสุกรเพียงอย่างเดียว มีปริมาณคลอโรฟิลล์ต่ำที่สุดเพียง 22.83 SPAD unit (ตารางที่ 6)

ตารางที่ 6 ปริมาณคลอโรฟิลล์ในใบของผักกาดหอมบัตเตอร์เฮดที่ได้รับปุ๋ยแตกต่างกัน

| ทรีทเมนต์               | อายุ (สัปดาห์)            |            |                         |                          |
|-------------------------|---------------------------|------------|-------------------------|--------------------------|
|                         | 2                         | 4          | 6                       | 8                        |
| ปุ๋ยเคมี                | 21.32±1.35 <sup>a</sup>   | 21.91±3.71 | 32.69±4.52 <sup>a</sup> | 36.45±2.23 <sup>a</sup>  |
| มูลไส้เดือน             | 20.91±1.93 <sup>ab</sup>  | 20.74±1.89 | 25.23±2.92 <sup>b</sup> | 26.37±3.78 <sup>c</sup>  |
| มูลสุกร                 | 19.09±2.50 <sup>bc</sup>  | 19.67±3.23 | 25.70±3.20 <sup>b</sup> | 22.83±3.59 <sup>d</sup>  |
| ปุ๋ยเคมีสลับมูลไส้เดือน | 18.90±1.74 <sup>c</sup>   | 21.08±1.37 | 27.97±2.24 <sup>b</sup> | 31.06±2.49 <sup>b</sup>  |
| ปุ๋ยเคมีสลับมูลสุกร     | 20.69±1.61 <sup>abc</sup> | 18.76±3.67 | 28.47±2.60 <sup>b</sup> | 30.83±4.20 <sup>b</sup>  |
| มูลไส้เดือนสลับมูลสุกร  | 19.67±2.60 <sup>abc</sup> | 21.58±3.20 | 27.56±4.73 <sup>b</sup> | 25.09±3.40 <sup>cd</sup> |
| F-test                  | *                         | ns         | **                      | **                       |
| CV (%)                  | 9.74                      | 13.78      | 12.05                   | 11.41                    |

หมายเหตุ : ns มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ( $P > 0.05$ )

\* มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ( $P < 0.05$ )

\*\* มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 % ( $P < 0.01$ )

ตัวอักษรที่เหมือนกันในแนวดิ่งไม่มีความแตกต่างกันเมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย โดยวิธี DMRT ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

จากผลการทดลองทางด้านการเจริญเติบโตของผักกาดหอมบัตเตอร์เฮด พบว่าการเจริญเติบโตแตกต่างกัน (ตารางที่ 1 2 3 4 และ 5) โดยสามารถแบ่งได้เป็น 3 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ 1 ปุ๋ยเคมีสูตร 16-16-16 มีการเจริญเติบโตมากที่สุด เนื่องจากปุ๋ยเคมีเป็นปุ๋ยที่มีธาตุอาหารหลักในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืช และอัตราการปลดปล่อยธาตุอาหารของปุ๋ยเคมีก็เกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว พืชจึงสามารถนำไปใช้ในการเจริญเติบโตได้ตลอด [8] นอกจากนี้ ปริมาณธาตุอาหารหลักในน้ำหมักชีวภาพมีน้อยกว่าส่งผลให้มีการเจริญเติบโตน้อยกว่า [9] ประกอบกับ ต้นผักกาดหอมบัตเตอร์เฮดเป็นผักที่มีอายุสั้น การได้รับธาตุอาหารทำให้การเจริญเติบโตในด้านต่าง ๆ ดี โดยเฉพาะธาตุไนโตรเจนซึ่งช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตของยอดอ่อน ใบ และก้าน [10] สอดคล้องกับผลการทดลองของ [11] ที่ศึกษาการเจริญเติบโตและผลผลิตของผักกาดหอม 3 พันธุ์ ที่ปลูกในระบบไฮโดรโปนิคส์ในสารละลายธาตุอาหารพืช คือ สารละลายมาตรฐาน AB เปรียบเทียบกับสารละลายอินทรีย์ คือ น้ำหมักรกหมู น้ำหมักปลา และน้ำหมักผลไม้รวม พบว่าผักกาดหอมทุกพันธุ์ที่ปลูกในสารละลาย AB มีการเจริญเติบโต และให้ผลผลิตสูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้สารละลายธาตุอาหารอินทรีย์ทั้ง 3 ชนิด [12] ได้ศึกษาการปลูกผักสลัดเบบี้เรดคอสในระบบไฮโดรโปนิคส์โดยใช้สารละลายธาตุอาหารสูตรพระนคร และน้ำหมักชีวภาพสูตรต่าง ๆ พบว่าผักสลัดเบบี้เรดคอสมีการเจริญเติบโตที่แตกต่างกัน การใช้สารละลายธาตุอาหารสูตรพระนครในการปลูกมีการเจริญเติบโตดีที่สุด กลุ่มที่ 2 คือ ปุ๋ยเคมีสลับกับปุ๋ยน้ำหมักมูลไส้เดือน และปุ๋ยน้ำหมักมูลสุกร มีการเจริญเติบโตรองลงมาจากการใส่ปุ๋ยเคมีเพียงอย่างเดียว เพราะปริมาณธาตุอาหารในปุ๋ยน้ำหมักมูลไส้เดือน และปุ๋ยน้ำหมัก

มูลสุกรไม่เพียงพอต่อการเจริญเติบโตของต้นผักกาดหอมบัตเตอร์เฮด กลุ่มที่ 3 คือ ปุ๋ยน้ำหมักมูลไส้เดือน และปุ๋ยน้ำหมักมูลสุกรเพียงอย่างเดียว มีผลการเจริญเติบโตน้อยที่สุด เนื่องจากในสารละลายน้ำหมักที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้มีปริมาณธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของต้นบัตเตอร์เฮดน้อย ซึ่งผู้วิจัยได้ทำการวัดค่าการนำไฟฟ้า (EC) ของสารละลายปุ๋ยเคมี และน้ำหมักทั้งสองชนิด พบว่าน้ำหมักมูลไส้เดือนมีค่า EC 491  $\mu\text{S}/\text{cm}$  และน้ำหมักมูลสุกรมีค่า EC 790  $\mu\text{S}/\text{cm}$  เมื่อเปรียบเทียบกับสารละลายปุ๋ยเคมีสูตร 16-16-16 มีค่า EC 7891  $\mu\text{S}/\text{cm}$  จะเห็นได้ว่าปุ๋ยน้ำหมักทั้งสองสูตรมีค่า EC ต่ำกว่า 10 เท่า ส่งผลทำให้ต้นผักกาดหอมบัตเตอร์เฮดที่ได้รับปุ๋ยเคมีมีการเจริญเติบโตดีที่สุด ค่า EC ที่เหมาะสมสำหรับการปลูกต้นผักกาดหอมบัตเตอร์เฮดคือ 500 - 2000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  โดยทั่วไปเมื่อพืชยังเล็กจะมีความต้องการค่า EC ต่ำ ทำให้ต้นผักกาดหอมบัตเตอร์เฮดช่วงอายุ 2 - 4 สัปดาห์มีการเจริญเติบโตไม่แตกต่างกัน แต่เมื่อพืชมีการเจริญเติบโตมากขึ้น ความต้องการปริมาณธาตุอาหารเพิ่มมากขึ้น แต่ปริมาณธาตุอาหารที่ได้รับจากน้ำหมักมูลสัตว์ไม่เพียงพอจึงส่งผลให้การเจริญเติบโตในช่วงอายุ 6 - 8 สัปดาห์แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ นอกจากนี้พบว่าต้นผักกาดหอมบัตเตอร์เฮดที่ได้รับปุ๋ยเคมีสูตร 16-16-16 มีปริมาณคลอโรฟิลล์มากที่สุด เนื่องจากในปุ๋ยเคมีมีไนโตรเจนที่เป็นประโยชน์ปริมาณมากส่งผลให้ปริมาณคลอโรฟิลล์มีแนวโน้มสูงขึ้น ทั้งนี้เพราะไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของคลอโรฟิลล์ โดยโครงสร้างของคลอโรฟิลล์มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบอยู่ในปริมาณ 8.22 % ของน้ำหนักโมเลกุล [13] ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ [14] ที่ศึกษาอิทธิพลของปุ๋ยเคมีและน้ำหมักมูลไส้เดือนดินที่มีต่อปริมาณไนโตรเจนและการเจริญเติบโตของผักกาดหอมที่ปลูกในระบบไฮโดรโปนิคส์ และศึกษาความเป็นไปได้ที่จะใช้น้ำหมักมูลไส้เดือนดินแทนปุ๋ยเคมีในการปลูกแบบไฮโดรโปนิคส์ พบว่าผักกาดหอมที่ปลูกโดยใช้ปุ๋ยเคมีมีค่าการดูดกลืนแสงและปริมาณไนโตรเจนมากกว่าผักกาดหอมที่ปลูกโดยใช้น้ำหมักมูลไส้เดือนดิน และผักกาดหอมที่ปลูกโดยใช้ปุ๋ยเคมีมีการเจริญเติบโตที่ดีกว่าผักกาดหอมที่ปลูกโดยใช้น้ำหมักมูลไส้เดือน ซึ่งผักกาดหอมที่ปลูกโดยใช้น้ำหมักมูลไส้เดือน (สูตร A และสูตร B อัตราส่วน 1:200) มีน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งมากกว่าผักกาดหอมที่ปลูกโดยใช้น้ำหมักมูลไส้เดือน (ความเข้มข้น 50 %)

2. ด้านผลผลิต หลังการเก็บเกี่ยวผักกาดหอมบัตเตอร์เฮด (เมื่อมีอายุ 8 สัปดาห์) พบว่าผลผลิตมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.01$ ) โดยแบ่งเป็น 3 กลุ่ม คือ กลุ่มแรกเป็นผักกาดหอมบัตเตอร์เฮดที่ได้รับปุ๋ยเคมีสูตร 16-16-16 ปริมาณ 100 มล./ต้น ทุก 5 วัน ตลอดการทดลอง มีน้ำหนักผลผลิตสดเฉลี่ยมากที่สุดเท่ากับ 99.25 กรัม กลุ่มที่ 2 คือต้นที่ได้รับปุ๋ยเคมีสลับกับปุ๋ยน้ำหมักมูลสุกร และปุ๋ยเคมีสลับกับปุ๋ยน้ำหมักมูลไส้เดือนทุก 5 วัน กลุ่มที่ 3 คือต้นที่ได้รับปุ๋ยน้ำหมักมูลสุกรเพียงอย่างเดียว ปุ๋ยน้ำหมักมูลไส้เดือนสลับกับปุ๋ยน้ำหมักมูลสุกร และปุ๋ยน้ำหมักมูลไส้เดือนเพียงอย่างเดียวทุก 5 วัน ตามลำดับ โดยต้นผักกาดหอมบัตเตอร์เฮดที่ได้รับปุ๋ยน้ำหมักมูลไส้เดือนเพียงอย่างเดียวให้น้ำหนักผลผลิตเฉลี่ยเพียง 14.07 กรัม/ต้น (ตารางที่ 7) ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากในปุ๋ยเคมีมีไนโตรเจนอยู่ในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืชซึ่งมีบทบาทช่วยการส่งเสริมการเจริญเติบโตลำต้นและใบ [10] สูงกว่าไนโตรเจนที่มีอยู่ในปุ๋ยน้ำหมักมูลสัตว์ทั้งสองชนิด

น้ำหนักสดของรากเมื่อเก็บเกี่ยวโดยถอนทั้งต้นเมื่อมีอายุครบ 8 สัปดาห์ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.01$ ) โดยต้นผักกาดหอมบัตเตอร์เฮดที่ได้รับปุ๋ยเคมี หรือได้รับปุ๋ยเคมีสลับกับปุ๋ยน้ำหมักมูลสุกร หรือปุ๋ยน้ำหมักมูลไส้เดือนมีค่าใกล้เคียงกัน แต่จะมีน้ำหนักสดของรากต่ำกว่ากลุ่มที่ไม่ได้รับปุ๋ยเคมี (ตารางที่ 7) สำหรับการเจริญของรากนั้นเกี่ยวข้องกับธาตุฟอสฟอรัส โดยฟอสฟอรัสมีหน้าที่ช่วยเร่งการเจริญเติบโตและการแพร่กระจายของราก [10] ซึ่งผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าทั้งปุ๋ยเคมี และปุ๋ยน้ำหมักจากมูลสัตว์ทั้งสองชนิดต่างมีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์เพียงพอต่อการเจริญของราก แต่การที่รากของต้นผักกาดหอมบัตเตอร์เฮดกลุ่มที่ได้รับปุ๋ยเคมีมีน้ำหนักสดต่ำกว่ากลุ่มที่ไม่ได้รับปุ๋ยเคมี เป็นผลเนื่องมาจากกลุ่มที่ได้รับปุ๋ยน้ำหมักมูลสัตว์มีการแตกใบอ่อนน้อยทำให้สารอาหารที่เป็นผลผลิตจากกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงที่เกิดขึ้นถูกนำไปใช้ในการเจริญของรากแทนการเจริญของลำต้นและใบ โดยสามารถดูได้จากอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของส่วนต้นต่อน้ำหนักรากของต้นผักกาดหอมบัตเตอร์เฮดที่เก็บเกี่ยว พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.01$ ) โดยต้นผักกาดหอมบัตเตอร์เฮดที่ได้รับปุ๋ยเคมีเพียงอย่างเดียว หรือได้รับปุ๋ยเคมีสลับกับปุ๋ยน้ำหมักมูลสุกร

หรือปุ๋ยน้ำหมักมูลไส้เดือน มีอัตราส่วนของน้ำหนักลำต้นต่อน้ำหนักรากสูงกว่ากลุ่มที่ไม่ได้รับปุ๋ยเคมีค่อนข้างมาก (ตารางที่ 7) ทั้งนี้ยังสอดคล้องกับผลการทดลองทางด้านน้ำหนักแห้งของรากซึ่งแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า ทริทเมนต์ที่ได้รับปุ๋ยน้ำหมักมูลสัตว์โดยไม่ได้รับปุ๋ยเคมีมีการเจริญทางลำต้นและใบน้อย แต่ในทางกลับกัน จะมีการสะสมน้ำหนักแห้งของรากมากกว่าอย่างเห็นได้ชัด นั่นคือต้นผักกาดหอมบัตเตอร์เฮดที่ได้รับน้ำหมักมูลไส้เดือนเพียงอย่างเดียว น้ำหนักแห้งของรากมากที่สุดเท่ากับ 11.46 เปอร์เซ็นต์ (ตารางที่ 8) การที่ต้นผักกาดหอมบัตเตอร์เฮดกลุ่มที่ได้รับปุ๋ยเคมี หรือปุ๋ยเคมีสลับกับปุ๋ยน้ำหมักมูลสัตว์มีการสะสมน้ำหนักแห้งของต้นและใบต่ำกว่ากลุ่มที่ไม่ได้รับปุ๋ยเคมีอย่างมีนัยสำคัญแสดงให้เห็นว่า เมื่อพืชดูดน้ำในโตรเจนได้มากจะทำให้พืชเจริญทางใบได้ดีและอยู่ในสภาพอวบหนา [10] และผลผลิตจากการสังเคราะห์ด้วยแสงจึงถูกใช้ไปในการเจริญทางต้นมากกว่าเพื่อการสะสมอาหาร ซึ่งต้นผักกาดหอมบัตเตอร์เฮดที่ได้รับไนโตรเจนน้อย การเจริญเติบโตทางต้นก็จะน้อยลง แต่ในขณะเดียวกันพืชยังมีการสังเคราะห์ด้วยแสงทำให้อาหารที่เหลือจากการเจริญเติบโตจึงสะสมเป็นน้ำหนักแห้ง อย่างไรก็ตามผลการทดลองนี้ให้ผลไม่สอดคล้องกับการทดลองของ [15] ที่พบว่าการใช้น้ำหมักและน้ำที่ละลายจากปุ๋ยหมักมูลไส้เดือน 50 % มีศักยภาพมากพอในการใช้เป็นธาตุอาหารทดแทนการใช้ปุ๋ยเคมีในการปลูกผักกาดหอมในระบบไฮโดรโปนิคส์ และไม่สอดคล้องกับการทดลองของ [16] พบว่าปุ๋ยมูลไส้เดือนดินสามารถส่งเสริมการเจริญเติบโตและผลผลิตของผักกาดหอมได้ดีกว่าปุ๋ยหมักที่ได้จากพืช ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากความเข้มข้นของปุ๋ยน้ำหมักมูลไส้เดือน และปุ๋ยน้ำหมักมูลสุกรที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ใช้เพียง 20 % ซึ่งค่าเกินไปส่งผลทำให้ปริมาณธาตุอาหารที่เป็นประโยชน์ต่อพืชมีปริมาณต่ำ ไม่เพียงพอต่อความต้องการของพืช โดยพิจารณาจากค่า EC ที่วัดได้ค่อนข้างต่ำมาก โดยเฉพาะในปุ๋ยน้ำหมักมูลไส้เดือน ทั้งที่มีรายงานเกี่ยวกับการใช้ปุ๋ยมูลไส้เดือนช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตและผลผลิตของพืชเพิ่มขึ้น เนื่องจาก [17] รายงานว่าปุ๋ยมูลไส้เดือนจะทำให้วัสดุปลูกมีความร่วนซุย ระบายน้ำ และอากาศได้ดี รากพืชสามารถงอกขึ้นได้ง่าย ทำให้พืชมีการเจริญเติบโตได้ดี

ตารางที่ 7 ผลผลิต น้ำหนักสดของราก และอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักต้นต่อน้ำหนักรากของผักกาดหอมบัตเตอร์เฮดที่ได้รับสารละลายปุ๋ยแตกต่างกัน

| ทริทเมนต์               | ผลผลิต (กรัม)            | น้ำหนักสดราก (กรัม)      | น้ำหนักต้น/น้ำหนักราก   |
|-------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|
| ปุ๋ยเคมี                | 99.25±22.47 <sup>a</sup> | 5.04±0.97 <sup>bc</sup>  | 19.90±4.08 <sup>a</sup> |
| มูลไส้เดือน             | 14.07±2.25 <sup>c</sup>  | 6.28±1.56 <sup>ab</sup>  | 2.35±0.44 <sup>b</sup>  |
| มูลสุกร                 | 21.21±7.23 <sup>c</sup>  | 5.21±1.57 <sup>abc</sup> | 4.10±0.77 <sup>b</sup>  |
| ปุ๋ยเคมีสลับมูลไส้เดือน | 82.02±6.22 <sup>b</sup>  | 4.46±0.81 <sup>c</sup>   | 18.79±2.75 <sup>a</sup> |
| ปุ๋ยเคมีสลับมูลสุกร     | 88.53±6.72 <sup>b</sup>  | 5.08±0.84 <sup>bc</sup>  | 17.83±2.94 <sup>a</sup> |
| มูลไส้เดือนสลับมูลสุกร  | 18.03±4.57 <sup>c</sup>  | 6.37±1.55 <sup>a</sup>   | 2.88±0.72 <sup>b</sup>  |
| F-test                  | **                       | **                       | **                      |
| CV (%)                  | 15.31                    | 22.53                    | 15.31                   |

หมายเหตุ: \*\* มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 % ( $P < 0.01$ )  
ตัวอักษรที่เหมือนกันในแนวนอนไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย โดยวิธี DMRT ที่ระดับความเชื่อมั่น 95



ตารางที่ 8 น้ำหนักแห้งต้น และรากของผักกาดหอมบัตเตอร์เฮดที่ได้รับสารละลายปุ๋ยที่แตกต่างกัน

| ทรีทเมนต์               | น้ำหนักแห้งใบและต้น (%) | น้ำหนักแห้งราก (%)      |
|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| ปุ๋ยเคมี                | 6.11±0.35 <sup>c</sup>  | 7.97±0.39 <sup>bc</sup> |
| น้ำหมักมูลไส้เดือน      | 9.58±0.33 <sup>a</sup>  | 11.46±1.13 <sup>a</sup> |
| น้ำหมักมูลสุกร          | 8.84±0.57 <sup>b</sup>  | 9.39±0.74 <sup>ab</sup> |
| ปุ๋ยเคมีสลับมูลไส้เดือน | 6.75±0.23 <sup>c</sup>  | 6.08±0.84 <sup>c</sup>  |
| ปุ๋ยเคมีเคมีสลับมูลสุกร | 6.29±0.30 <sup>c</sup>  | 6.44±3.34 <sup>c</sup>  |
| มูลไส้เดือนสลับมูลสุกร  | 9.65±0.27 <sup>a</sup>  | 9.42±0.12 <sup>ab</sup> |
| F-test                  | **                      | **                      |
| CV (%)                  | 4.33                    | 12.92                   |

หมายเหตุ \*\* มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 % ( $P<0.01$ )  
ตัวอักษรที่เหมือนกันในแนวตั้งไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย โดยวิธี DMRT  
ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

## สรุปผล

- ผักกาดหอมบัตเตอร์เฮดที่ปลูกในระบบใช้วัสดุทดแทนดินมีการเจริญเติบโตและให้ผลผลิตสูงที่สุดเมื่อได้รับสารละลายปุ๋ย 16-16-16 ความเข้มข้น 4 g/L อัตรา 100 ml/กระถาง ทุก 5 วัน รองลงมาคือ ต้นที่ได้รับปุ๋ยเคมีสลับกับปุ๋ยน้ำหมักมูลสุกร หรือปุ๋ยน้ำหมักมูลไส้เดือน
- การลดปริมาณการใช้ปุ๋ยเคมี โดยการให้สารละลายปุ๋ย 16-16-16 สลับกับปุ๋ยน้ำหมักมูลสุกร หรือปุ๋ยน้ำหมักมูลไส้เดือน ทำให้การเจริญเติบโตและผลผลิตของผักกาดหอมบัตเตอร์เฮดที่มีอายุมากกว่า 4 สัปดาห์ขึ้นไป ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ
- ผักกาดหอมบัตเตอร์เฮดที่ปลูกโดยได้รับปุ๋ยน้ำหมักมูลไส้เดือน หรือปุ๋ยน้ำหมักมูลสุกรมีการสะสมน้ำหนักแห้งในส่วนของลำต้น ใบ และรากมากกว่าต้นที่ได้รับปุ๋ยเคมีอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

## References

- [1] Nonnecke, Libner, Ib. (1989). **The Leafy Crops; Lettuce. Vegetable Production**. New York, An AVI Book Published by Van Nostrand Reinhold (International) Limited, pp. 450-466
- [2] Nakhon Ratchasima Agricultural Occupation Promotion and Development Center. (2020). **Average Nutrient Content for Plants Contained in Dry Manure**. Access (4 August 2023). Available ([https://osd101.ldd.go.th/q/manual/table\\_compost.pdf](https://osd101.ldd.go.th/q/manual/table_compost.pdf)) (in Thai)
- [3] Nokum, N., Yusuk, P., and Kamon, N. (2019). **Research and Development Increase Production and Quality Organic Vegetable in Royal Project Area**. Complete Report of the Highland Research and Development Institute (Public Organization) (in Thai)
- [4] Kanto, U. and Juttupornpong, S. (2010). **The Addition of Animal Microorganisms is an Effective Fertilizer for Plants**. Access (17 August 2023). Available ([https://www3.rdi.ku.ac.th/exhibition/52/08-integration/Uthai/integration\\_00.html](https://www3.rdi.ku.ac.th/exhibition/52/08-integration/Uthai/integration_00.html)) (in Thai)
- [5] Shreedevi, A. S. and Hanchinal, S. N. (2017). Adoption of Vermicomposting Technology by Farmers of Gulbarga District in Karnataka. **Agriculture Update**. Vol. 12, Issue 4, pp. 639-642. DOI: 10.15740/HAS/AU/12.4/639-642

- [6] Kitpakdeekul, S. and Jirakiattikul, Y. (2002). Effect of Planting Material on Growth and the Yield of Kale in Soilless Culture. **Thai Journal of Science and Technology (TJST)**. Vol. 10, No. 2, pp. 47-53 (in Thai)
- [7] Thongket, T. (2001). **Soilless Culture**. Contemporary Agriculture. Kasetsart University Kamphaeng Saen Campus. pp. 43-48 (in Thai)
- [8] Poomipan, P., Chakatrakan, S., Latkanathinnawong, V., Pliumchareorn, C., and Chomphuphiw, P. (2016). Comparison Between Chemical Fertilizer and High Quality Organic Fertilizer on Quality of Rice Variety Suphan Buri 1. **Thai Journal of Science and Technology**. Vol. 24, No. 5, (Supplement) pp. 753-765 (in Thai)
- [9] Ratneetoo, B. (2013). Effect of Bio-extract from Cow Dung on the Growth and Yield of Chinese Cabbage (*Brassica chinensis Just*) under Hydroponics Culture. **Princess of Naradhiwas University Journal**. Vol. 5, No. 2, pp. 76-82 (in Thai)
- [10] Faculty Members of the Department of Soil Science. (2005). **Introduction to Soil Science**. 10<sup>th</sup> ed. Bangkok: Kasetsart University. (in Thai)
- [11] Khitka, B., Panyayom, W., and Charwwiang, K. (2019). Growth and Yield of Lettuce with Organic Nutrients-Solution for Hydroponics. **The Agricultural Science Journal**. Vol. 50, No. 1, pp. 328-334 (in Thai)
- [12] 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 Agricultural Journal**. Vol. 49, No. 2, pp. 304-311 (in Thai)
- [13] Dulyanukit, S. (1992). **Effects of Various Concentration Levels of Nitrogen and Phosphorus in Food Recipes Zarrouk on Spirulina (*Spirulina* sp.)**. Bangkok: Kasetsart University. (in Thai)
- [14] Pengkam, C. and Boonthai IWAI, C. (2018). Influence of Using Chemical Fertilizer and Vermicompost Extract on Nitrate Content and Growth in Lettuce Under Hydroponic System. **Khon Kaen Agricultural Journal**. Vol. 46, No. 1, pp. 1198-1201 (in Thai)
- [15] Klaythong, P. (2014). **Utilization of Extracted Juice from Vermicompost to Replace Chemical Fertilizer for Soilless Culture with Hydroponic System**. Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science in Environmental Management. Prince of Songkla University
- [16] Jala, A., Chittawanij, A., and Chakhatrakanand, S. (2012). The Effects of Vermicomposts from 2 Genus of Earthworm on Growth and Yield of Iceberg Lettuce. **Thai Journal of Science and Technology**. Vol. 1, No. 1, pp. 19-24 (in Thai)
- [17] Galli, E., Tomati, U., Grappelli, A., and Di Lena, G. (1990). Effect of Earthworm Casts on Protein Synthesis in *Agaricus bisporus*. **Biology and Fertility of Soils**. Vol. 9, pp. 290-291. DOI: 10.1007/BF00634103

การศึกษาสมบัติเชิงกลและสัณฐานวิทยาของพอลิโพรพิลีนที่ผสมพยาง  
อีพีดีเอ็มจากซีลประตูรถยนต์

## Study of Mechanical and Morphological Properties of Polypropylene Blended with EPDM Rubber Powder from Automotive Door Seals

ศิรินทร ทองแสง<sup>1\*</sup> ณัฐรัตน์ เก่งกล้า<sup>1</sup> นันทินี บุญจันทร์<sup>1</sup> และกมลทิพย์ ถิรดิษสกุล<sup>1</sup>  
Sirinthorn Thongsang<sup>1\*</sup> Nattarat Kengkla<sup>1</sup> Nuntinee Boonjan<sup>1</sup> and  
Kamonthip Tiraditsakul<sup>1</sup>

*Received: January 2, 2024; Revised: April 24, 2024; Accepted: April 24, 2024*

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลและสัณฐานวิทยาของพอลิโพรพิลีนที่ผสมพยางอีพีดีเอ็มจากซีลประตูรถยนต์ ซึ่งพยางอีพีดีเอ็มทำการเตรียมทั้งแบบไม่ดิวลคาไนซ์และดิวลคาไนซ์ด้วยวิธีการใช้ความร้อนร่วมกับแรงทางกล โดยศึกษาการดิวลคาไนซ์ของอีพีดีเอ็มในขั้นตอนการบดด้วยเครื่องบดแบบสองลูกกลิ้งที่อุณหภูมิ 220 °C และ 230 °C ความเร็วรอบลูกกลิ้ง 40 รอบต่อนาที เป็นเวลา 25 นาที จากนั้นบดต่อในเครื่องผสมภายในที่อุณหภูมิ 200 °C ความเร็วรอบโรเตอร์ 140 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที แล้วนำไปตรวจสอบความสามารถในการดิวลคาไนซ์ของยางจากวิธีการสกัดด้วยชอกเลต เพื่อเลือกอุณหภูมิที่เหมาะสม โดยนำพยางอีพีดีเอ็มทั้งสองแบบผสมลงในพอลิโพรพิลีนที่อัตราส่วน 0/100 10/90 20/80 30/70 และ 40/60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ด้วยเครื่องผสมภายในแล้วขึ้นรูปแผ่นจากเครื่องอัดรีด และนำไปทดสอบสมบัติการรับแรงดึงและแรงกระแทก รวมถึงตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาพบว่า การดิวลคาไนซ์ในขั้นตอนการบดด้วยเครื่องบดแบบสองลูกกลิ้งที่อุณหภูมิ 230 °C มีเปอร์เซ็นต์ของยางส่วนที่ละลายสูงกว่าที่อุณหภูมิ 220 °C ซึ่งแสดงถึงสามารถในการดิวลคาไนซ์ดีกว่า โดยพอลิโพรพิลีนที่ผสมพยางอีพีดีเอ็มทั้งสองแบบในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลให้ค่า Young's Modulus ลดลง แต่ความยืดหยุ่น จุกขาด และความทนแรงกระแทกเพิ่มสูงขึ้น ส่วนความต้านแรงดึงเริ่มมีแนวโน้มลดลงเมื่อผสมพยางอีพีดีเอ็ม

<sup>1</sup> คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

<sup>1</sup> Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi

\* Corresponding Author; Tel. 08 1777 1178, E - mail: sirinthorn.tho@mail.kmutt.ac.th

แบบไม่วัลคาไนซ์และแบบวัลคาไนซ์ที่ปริมาณ 30 และ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งการผสมผงยางอีพดีเอ็มแบบวัลคาไนซ์ลงในพอลิโพรพิลีนให้สมบัติเชิงกลค่อนข้างดีกว่าผงยางแบบไม่วัลคาไนซ์ เนื่องจากผงยางอีพดีเอ็มแบบวัลคาไนซ์ถูกทำให้มีขนาดเล็กลงและกระจายตัวได้ดี ส่งผลให้มีพื้นที่ผิวยึดเกาะกับเมทริกซ์พอลิโพรพิลีนมากขึ้น อีกทั้งผงยางแบบวัลคาไนซ์ถูกตัดขาดการเชื่อมขวางทำให้สายโซ่โมเลกุลเคลื่อนที่ได้อิสระและสามารถเข้ากันได้กับพอลิโพรพิลีนได้มากขึ้น

คำสำคัญ : ผงยางอีพดีเอ็ม; ซีลประตูรถยนต์; ยางวัลคาไนซ์; พอลิโพรพิลีน

## Abstract

This research studied the mechanical and morphological properties of polypropylene blended with Ethylene Propylene Dine Monomer (EPDM) rubber powder from automotive door seals. EPDM rubber powder was prepared as non-devulcanized and devulcanized by a thermo-mechanical method. The devulcanization of EPDM rubber powder in the crushing stage on a two-roll mill was studied at 220 °C and 230 °C, and a roller speed of 40 rpm for 25 minutes, and then further mashed in an internal mixer at 200 °C, and a rotor speed of 140 rpm for 10 minutes. Then, the devulcanization ability of the rubber was determined using the Soxhlet Extraction method to select the appropriate temperature. Both types of EPDM powder were mixed in polypropylene (PP) in the ratio of 0/100, 10/90, 20/80, 30/70, and 40/60 %wt. using an internal mixer and molded into a sheet by a hot press. It was found that the rubber devulcanization in the crushing stage on a two-roll mill with a temperature of 230 °C had a higher sol content than that of 220 °C, indicating a better ability to devulcanize. The tensile modulus of PP blends decreased with increasing both types of EPDM rubber powder, while the elongation at break and impact strength increased. The tensile strength tended to decrease when increasing with non-devulcanized and devulcanized EPDM at 30 and 40 %wt., respectively. The addition of devulcanized EPDM into PP gave rather better mechanical properties than that of non-devulcanized EPDM. The reason was that the devulcanized EPDM was a smaller powder and had a good dispersion, resulting in more surface area for adhesion with the PP matrix. In addition, the devulcanized EPDM that was scissored crosslinks became the free molecular chains, leading to a greater compatibility with PP.

**Keywords:** EPDM Rubber Powder; Automotive Door Seals; Devulcanized Rubber; Polypropylene

## บทนำ

ปัจจุบันมีการนำวัสดุยางมาใช้ในหลายอุตสาหกรรม เนื่องจากมีความโดดเด่นทั้งทางด้านความสามารถในการรับแรงกระแทก รับแรงสั่นสะเทือน หรือกันการรั่วซึมของของไหล อุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ก็เป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่มีการนำยางมาใช้กันมากไม่ว่าจะเป็นยางธรรมชาติหรือยางสังเคราะห์อย่างเช่นยางสไตรีน-บิวทาไดอีน ยางไนไตรล์ ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนหรือยางอีพดีเอ็ม เป็นต้น ซึ่งถูกนำมาใช้เป็นส่วนผสมสำหรับการผลิตยางล้อรถ ยางรองแท่นเครื่องยนต์ ซีลประตูรถยนต์ สายยางน้ำมันเบรก เป็นต้น [1] - [2] โดยชิ้นส่วนยางเหล่านี้ได้ผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชันที่ทำให้เกิดการเชื่อมขวาง (Crosslink) ระหว่างสายโซ่โมเลกุลยางทำให้ยางแข็งแรงขึ้นและมีสมบัติความเป็นอลาสติกที่ดี แต่โครงสร้างการเชื่อมขวางของยางวัลคาไนซ์นี้



ทำให้ไม่สามารถนำไปแปรใช้ใหม่ (Recycle) ได้โดยตรง ดังนั้น จึงจำเป็นต้องผ่านกระบวนการตัดขาดการเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่โมเลกุลยางก่อนเพื่อให้กลับไปสู่โครงสร้างคล้ายเดิมที่เรียกว่า กระบวนการดีวัลคาไนเซชัน (Devulcanization Process) ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การใช้ความร้อนร่วมกับแรงทางกล การใช้คลื่นอัลตราโซนิก การใช้คลื่นไมโครเวฟ การใช้สารเคมี เป็นต้น [3] - [4] พบว่า ความเร็วรอบสกรูและอุณหภูมิ바เรลของเครื่องอัดรีดสกรูคู่แบบหมุนร่วม (Co-Rotating Twin-Screw Extruder) เป็นปัจจัยที่สำคัญต่อกระบวนการดีวัลคาไนเซชันด้วยวิธีการใช้ความร้อนร่วมกับแรงทางกล เมื่อนำพยางวัลคาไนซ์ที่มียางธรรมชาติเป็นส่วนประกอบประมาณ 50 ส่วนในร้อยส่วนของยาง ร่วมกับยางสังเคราะห์ชนิดอื่น ๆ มาทำการดีวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิ바เรล 140 และ 160 °C การปรับเปลี่ยนความเร็วรอบสกรูไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของการดีวัลคาไนซ์ หากใช้อุณหภูมิ바เรลตั้งแต่ 170 °C ขึ้นไป ร่วมกับการปรับเปลี่ยนความเร็วรอบสกรูที่สูงขึ้นจะทำให้มีการดีวัลคาไนซ์มากขึ้น แต่ถ้าใช้อุณหภูมิ바เรลและความเร็วรอบสกรูที่สูงเกินไปจะส่งผลต่อการเสื่อมสภาพของพยางวัลคาไนซ์มากกว่า ดังนั้น พารามิเตอร์ที่เหมาะสมต่อการดีวัลคาไนซ์ของงานวิจัยนี้คือ การใช้อุณหภูมิ바เรลที่ 190 °C ร่วมกับการความเร็วรอบสกรู 60 รอบต่อนาที โดยส่วนใหญ่งานวิจัยได้ทำการศึกษาการนำยางที่ผ่านกระบวนการดีวัลคาไนเซชันไปผสมกับยางบริสุทธิ์แล้วนำไปผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชันใหม่ [5] - [8] จากงานวิจัยของ [8] ได้รายงานว่ายางอีพดีเอ็มจากแผ่นปูหลังคาที่ผ่านการดีวัลคาไนซ์ด้วยวิธีการใช้ความร้อนร่วมกับแรงทางกลตามด้วยคลื่นไมโครเวฟโดยใช้สารเบนโซิลเพอร์ออกไซด์เป็นสารดีวัลคาไนซ์ เมื่อนำมาผสมในยางธรรมชาติและยางสไตรีน-บิวทาไดอีนที่ปริมาณ 20 - 40 ส่วนในร้อยส่วนของยาง ส่งผลให้สมบัติเชิงกลและความเสถียรทางความร้อนเพิ่มขึ้น เนื่องจากในเมทริกซ์ของยางธรรมชาติและยางสไตรีน-บิวทาไดอีนสามารถเกิดการเชื่อมขวางได้ดีในระหว่างกระบวนการวัลคาไนเซชันได้ แต่การผสมยางอีพดีเอ็มที่ผ่านการดีวัลคาไนซ์ด้วยปริมาณที่มากขึ้นในยางอีพดีเอ็มบริสุทธิ์ส่งผลให้เกิดการเกาะกลุ่มของยางอีพดีเอ็มที่ดีวัลคาไนซ์ซึ่งเกิดการเชื่อมขวางมากกว่าในเมทริกซ์ยางอีพดีเอ็มบริสุทธิ์จึงทำให้สมบัติเชิงกลและความเสถียรทางความร้อนมีแนวโน้มลดลง นอกจากนี้ เป็นการศึกษาการนำยางที่ผ่านกระบวนการดีวัลคาไนเซชันไปผสมกับเทอร์โมพลาสติก [9] - [13] จากงานวิจัยของ [11] รายงานว่า พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่มีการผสมพยางวัลคาไนซ์ที่ผ่านการดีวัลคาไนซ์ด้วยวิธีการใช้คลื่นไมโครเวฟที่กำลัง 820 วัตต์ เป็นเวลามากถึง 5 นาที ร่วมกับการผสมสารเติมแต่งยางส่งผลให้สมบัติเชิงกลลดลงเนื่องจากเกิดการยึดเกาะไม่เต็มระหว่างเฟสพอลิเมอร์ทั้งสองจากการแสดงผลของค่ามอดูลัสสะสม (Storage Modulus) ที่ลดลง ส่วน [12] พบว่า เมื่อนำยางอีพดีเอ็มที่วัลคาไนซ์แบบซัลเฟอร์และแบบเพอร์ออกไซด์มาผ่านการดีวัลคาไนซ์ด้วยวิธีความร้อนร่วมกับแรงทางกลจากการนำยางอีพดีเอ็มมาเข้าเครื่องบดแบบสองลูกกลิ้ง (Two-Roll Mill) ที่อุณหภูมิ 210 และ 230 °C ด้วยความเร็วรอบลูกกลิ้ง 4 รอบต่อนาที แล้วนำไปบดผสมต่อในเครื่องผสมภายใน (Internal Mixer) ที่อุณหภูมิ 200 °C ด้วยความเร็วโรเตอร์ 140 รอบต่อนาที ส่งผลให้การลดลงของความหนาแน่นการเชื่อมขวาง (Crosslink Density) สูงถึง 85 % โดยยางที่วัลคาไนซ์ด้วยซัลเฟอร์แสดงประสิทธิภาพการดีวัลคาไนซ์ดีเยี่ยมในการตัดขาดการเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่โมเลกุลยาง ส่วนยางที่วัลคาไนซ์ด้วยเพอร์ออกไซด์กลับแสดงการเสื่อมสภาพของยางที่เป็นการตัดขาดสายโซ่โมเลกุลยางร่วมกับการตัดขาดการเชื่อมขวาง และเมื่อนำยางที่ไม่วัลคาไนซ์ ยางที่วัลคาไนซ์ และยางที่วัลคาไนซ์ผสมลงในพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงจะส่งผลให้สมบัติเชิงกลลดลงเนื่องจากการยึดเกาะที่ไม่เพียงพอระหว่างเฟสพอลิเมอร์ทั้งสองโดยพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่ผสมยางที่ไม่วัลคาไนซ์ให้สมบัติเชิงกลดีที่สุด และงานวิจัยของ [13] รายงานว่า พอลิโพรพิลีนที่ผสมยางอีพดีเอ็มที่วัลคาไนซ์ด้วยการใช้เครื่องอัดรีดสกรูคู่ (Twin-Screw Extruder) ที่ความเร็วรอบสกรู 200 รอบต่อนาที ร่วมกับคลื่นอัลตราโซนิกที่แอมพลิจูด 13 ไมครอน ให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมสูงกว่าการใช้แอมพลิจูดที่ต่ำกว่า โดยเฉพาะการผสมยางอีพดีเอ็มที่วัลคาไนซ์ปริมาณ 25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักให้สมบัติเชิงกลสูงที่สุดเนื่องจากทำให้เกิดพันธะระหว่างพอลิโพรพิลีนกับยางอีพดีเอ็ม อีกทั้งยางวัลคาไนซ์ที่ถูกวัลคาไนซ์อีกครั้งมีขนาดเล็กจึงส่งผลให้มีการกระจายตัวที่ดีในเมทริกซ์พอลิโพรพิลีนด้วย

จากงานวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่เป็นการศึกษาการนำพยางค์อย่างล้อซึ่งมีส่วนผสมของยางธรรมชาติและยางสไตรีน-บิวทาไดอีน [14] มาทำการตีวัลคาไนซ์ แต่การนำซิลิโคนไตรอยนต์ยางอีพีดีเอ็มยังไม่พบรายงานวิจัย

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีความสนใจนำพยางค์อีพีดีเอ็มจากซีลประตูลอยนํ้ามาผ่านกระบวนการดิวัลคาไนเซชันด้วยวิธีการใช้ความร้อนร่วมกับแรงทางกล แล้วนำมาผสมกับพอลิโพรพิลีนในอัตราส่วนต่าง ๆ เพื่อศึกษาสมบัติการรับแรงดึงและแรงกระแทก รวมถึงตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยา และเปรียบเทียบสมบัติกับพอลิโพรพิลีนที่ผสมพยางค์แบบไม่ดิวัลคาไนซ์ เพื่อเป็นแนวทางในการแก้ปัญหาของการเกิดของเสียสะสมที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และอาจใช้เป็นสารเพิ่มความทนแรงกระแทกให้กับพอลิโพรพิลีนได้

## วิธีดำเนินการวิจัย

### 1. วัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

- 1.1 พยางค์อีพีดีเอ็มจากซีลประตูลอยนํ้า ซึ่งผ่านการตัดแยกด้วยตะแกรงขนาด 20 - 40 เมช
- 1.2 พอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP) เกรด EL-Pro™ P700J มีค่าดัชนีการไหล (MFI) เท่ากับ 12 กรัมต่อ 10 นาที (ที่อุณหภูมิ 230 °C, 2.16 กิโลกรัม) อุณหภูมิหลอมเหลว 163 °C
- 1.3 โทลูอีน (Toluene) ความบริสุทธิ์ 99.5 % เกรด AR
- 1.4 เครื่องชั่งน้ำหนักไฟฟ้า (Electric Balance) รุ่น PB 602-L (0.5 - 200g)
- 1.5 เครื่องผสมภายใน รุ่น MX300-TQ
- 1.6 เครื่องบดแบบสองลูกกลิ้ง รุ่น MGLRM 110/1E
- 1.7 เครื่องอัดร้อน (Hot Press)
- 1.8 ตู้อบแห้ง (Hot Air Oven)
- 1.9 แม่พิมพ์ขึ้นรูปแผ่นพลาสติก
- 1.10 มีดบล็อกตัดชิ้นงานทดสอบแรงดึง
- 1.11 เครื่องอัดไฮดรอลิก
- 1.12 เครื่องเลื่อยสายพาน

### 2. วิธีการดำเนินการวิจัย

#### 2.1 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ แบ่งเป็น 2 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ทำการเตรียมยางดิวัลคาไนซ์ด้วยวิธีการใช้ความร้อนร่วมกับแรงทางกลตามแผนการดำเนินงานวิจัยของ [12] ที่มีการบดพยางค์อีพีดีเอ็มด้วยเครื่องบดแบบสองลูกกลิ้งแล้วบดต่อด้วยเครื่องผสมภายใน ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการนำพยางค์อีพีดีเอ็มจากการบดด้วยเครื่องบดแบบสองลูกกลิ้งที่อุณหภูมิ 220 และ 230 °C ความเร็วรอบลูกกลิ้ง 40 รอบต่อนาที เป็นเวลา 25 นาที แล้วบดต่อในเครื่องผสมภายในที่อุณหภูมิ 200 °C ความเร็วรอบโรเตอร์ 140 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที หลังจากนั้นนำยางดิวัลคาไนซ์ไปตรวจสอบความสามารถในการดิวัลคาไนซ์จากวิธีการสกัดด้วยซอกเลต โดยนำพยางค์อีพีดีเอ็มปริมาณ 10 กรัมมาแช่ในโทลูอีน 200 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 20 ชั่วโมง จากนั้นนำมารองและทำให้แห้งด้วยการนำเข้าตู้อบแห้งที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง แล้วคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ส่วนที่ละลายได้ของยางดิวัลคาไนซ์ (%Sol) ตามสมการ (1) ซึ่ง  $M_i$  และ  $M_f$  คือ ปริมาณยางดิวัลคาไนซ์ก่อนและหลังแช่ในโทลูอีน (กรัม) [12] เพื่อพิจารณาเลือกอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการดิวัลคาไนซ์ยางอีพีดีเอ็ม

$$\%Sol = \left[ 1 - \frac{M_f}{M_i} \right] \times 100 \quad (1)$$

ขั้นตอนที่ 2 นำพยางค์อีพีดีเอ็มแบบไม่ดิวัลคาไนซ์และแบบดิวัลคาไนซ์ผสมกับพอลิโพรพิลีนในอัตราส่วน 0/100 10/90 20/80 30/70 และ 40/60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ด้วยเครื่องผสมภายในที่อุณหภูมิ 210 °C ความเร็วรอบโรเตอร์ 40 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นเตรียมเป็นแผ่นพรีฟอร์มด้วยเครื่องบดแบบสองลูกกลิ้งที่อุณหภูมิ 70 °C ความเร็วรอบลูกกลิ้ง 20 รอบต่อนาที โดยมีช่องว่างระหว่างลูกกลิ้ง

7 มิลลิเมตร แล้วนำมาอัดขึ้นรูปแผ่นพลาสติกความหนา 2 และ 3 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องอัดร้อนที่อุณหภูมิ 180 °C แรงดัน 175 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 12 นาที แล้วทำการหล่อเย็นเวลา 15 นาที จากนั้นนำแผ่นพลาสติกหนา 2 มิลลิเมตร มาทำการตัดชิ้นงานทดสอบการรับแรงดึงด้วยมีดบล็อกตามมาตรฐาน ASTM D638 Type IV และแผ่นพลาสติกหนา 3 มิลลิเมตร ตัดชิ้นงานทดสอบรับแรงกระแทกแบบ Izod พร้อมกับทำรอยบาก ตามมาตรฐาน ASTM D256

## 2.2 การทดสอบสมบัติต่าง ๆ

2.2.1 การทดสอบสมบัติการรับแรงดึง นำชิ้นงานมาทดสอบการรับแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ รุ่น LR50K ตามมาตรฐาน ASTM D638 โดยใช้โหลดเซลล์ขนาด 10 กิโลนิวตัน ความเร็วในการดึง 500 มิลลิเมตร/นาที ที่อุณหภูมิ 25 °C เพื่อหาค่ามอดุลัสแรงดึง ความต้านแรงดึง และความยืดสูงสุด ณ จุดขาด

2.2.2 การทดสอบสมบัติการรับแรงกระแทก นำชิ้นงานมาทดสอบการรับแรงกระแทกด้วยเครื่องทดสอบแรงกระแทกแบบลูกตุ้มเหวี่ยง (Pendulum) ขนาด 4 จูล ตามมาตรฐาน ASTM D256 โดยหลังจากที่ลูกตุ้มเหวี่ยงกระแทกกับชิ้นงานทดสอบให้อ่านค่ามุมที่เปลี่ยนไป เพื่อนำไปคิดเป็นค่าพลังงานดูดซับ (Absorbed Energy) จากนั้นนำไปคำนวณหาค่าความทนแรงกระแทก (Impact Strength) ด้วยการนำค่าพลังงานดูดซับหารด้วยความยาวรอยบาก

2.2.3 การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยา นำผงยางอีพิตีเอ็มแบบไม่ดิวลคาไนซ์ และแบบดิวลคาไนซ์ และชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบการรับแรงดึงไปเคลือบทองภายใต้สภาวะสุญญากาศ จากนั้นตรวจสอบโครงสร้างสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด รุ่น JSM-6610LV เพื่อพิจารณาลักษณะรูปร่างของผงยางและพื้นผิวรอยขาดของชิ้นงาน

## ผลการวิจัยและอภิปรายผล

### 1. ผลการตรวจสอบส่วนที่ละลายได้ของยางดิวลคาไนซ์

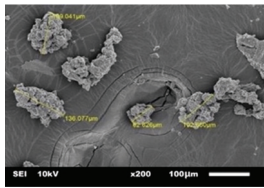
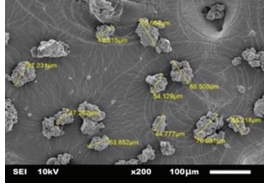
ผงยางอีพิตีเอ็มแบบดิวลคาไนซ์ที่ถูกเตรียมในขั้นตอนการบดด้วยเครื่องบดแบบสองลูกกลิ้งที่อุณหภูมิ 220 และ 230 °C พบว่า ผงยางที่ดิวลคาไนซ์ด้วยอุณหภูมิ 220 °C มีส่วนที่ละลายของยางดิวลคาไนซ์ 19 % ในขณะที่ผงยางที่ดิวลคาไนซ์ด้วยอุณหภูมิ 230 °C มีส่วนที่ละลายของยางดิวลคาไนซ์ 24.2 % โดยเปอร์เซ็นต์ส่วนที่ละลายได้แสดงถึงความสามารถในการดิวลคาไนซ์ เนื่องจากในระหว่างกระบวนการดิวลคาไนซ์มีการตัดขาดการเชื่อมขวางทำให้โพลีเมอร์แทรกเข้าไปทำลายได้มากขึ้น อุณหภูมิเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งเสริมการดิวลคาไนซ์เพราะทำให้มีพลังงานมากขึ้นในการตัดขาดการเชื่อมขวาง [15] ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ [4] กล่าวคือ เมื่อใช้อุณหภูมิในกระบวนการดิวลคาไนซ์มากขึ้นทำให้มีความสามารถในการดิวลคาไนซ์มากขึ้น ดังนั้น ผงยางดิวลคาไนซ์ที่ถูกเตรียมในขั้นตอนการบดด้วยเครื่องบดแบบสองลูกกลิ้งที่อุณหภูมิ 230 °C มีความสามารถในการดิวลคาไนซ์ดีกว่า จึงเลือกอุณหภูมินี้สำหรับการเตรียมยางดิวลคาไนซ์ต่อไป

### 2. ผลการตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยา

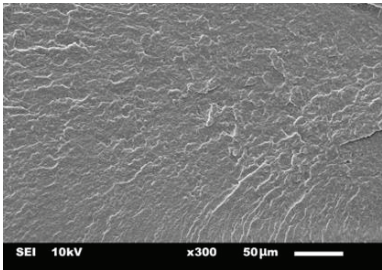
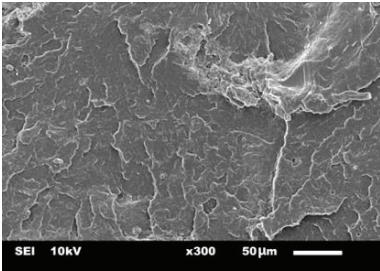
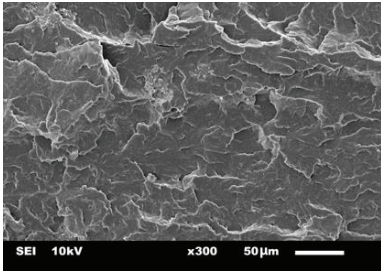
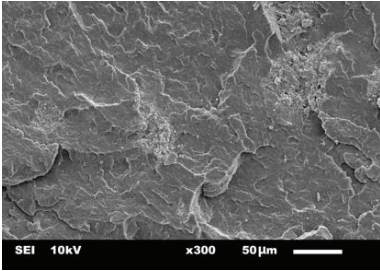
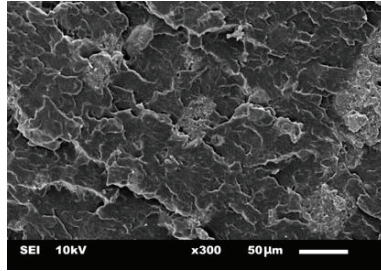
จากตารางที่ 1 แสดงภาพถ่ายผงยางอีพิตีเอ็มแบบไม่ดิวลคาไนซ์และแบบดิวลคาไนซ์ สังเกตได้ว่ามีความคล้ายกัน กล่าวคือ มีลักษณะเป็นผงสีดำนละเอียด ซึ่งเมื่อนำไปตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 200 เท่า พบว่า ผงยางอีพิตีเอ็มทั้งสองแบบมีลักษณะรูปร่างไม่แน่นอน ผิวขรุขระและแยกกันอยู่เดี่ยว ๆ โดยผงยางอีพิตีเอ็มแบบไม่ดิวลคาไนซ์ มีขนาดประมาณ 60 - 140 ไมโครเมตร แต่ผงยางอีพิตีเอ็มแบบดิวลคาไนซ์มีขนาดเล็กกว่าในช่วงประมาณ 40 - 80 ไมโครเมตร เนื่องจากการดิวลคาไนซ์นี้มีการใช้อุณหภูมิทำให้การเปลี่ยนการเชื่อมขวางแบบพอลิซัลฟิดิกและแบบไดซัลฟิดิกเป็นการเชื่อมขวางแบบมอนอซัลฟิดิก ในระหว่างที่ยางได้รับแรงทางกลรวมด้วยก็ทำให้การเชื่อมขวางแบบมอนอซัลฟิดิกถูกตัดขาด [16] และเกิดความเค้นเฉือนจนทำให้ยางแยกออกเป็นชิ้นเล็ก ๆ [17] ซึ่งการตัดขาดการเชื่อมขวางทำให้ยางมีโครงสร้างกลับคืนสู่สถานะเดิมและมีความอ่อนตัวลง [18]



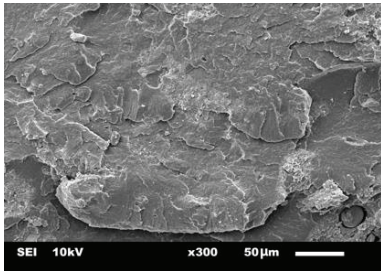
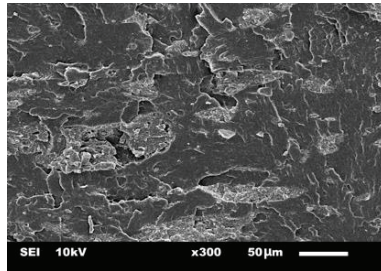
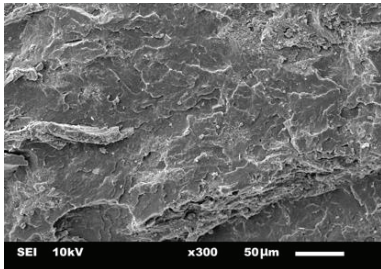
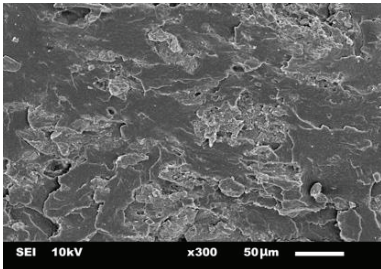
ตารางที่ 1 ภาพถ่ายจากกล้องดิจิทัลและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผงยางอีพิตีเอ็ม

| ผงยางอีพิตีเอ็ม  | กล้องดิจิทัล                                                                      | กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด                                                 |
|------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| แบบไม่ดิวลคาไนซ์ |  |  |
| แบบดิวลคาไนซ์    |  |  |

ตารางที่ 2 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพื้นผิวรอยขาดพอลิเมอร์ผสมระหว่างผงยาง- อีพิตีเอ็มกับพอลิโพรพิลีนในอัตราส่วนต่าง ๆ

| อัตราส่วนระหว่างผงยางอีพิตีเอ็ม<br>กับพอลิโพรพิลีน<br>(เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) | ผงยางอีพิตีเอ็มแบบไม่ดิวลคาไนซ์                                                      | ผงยางอีพิตีเอ็มแบบดิวลคาไนซ์                                                          |
|-------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 0/100                                                                         |  |                                                                                       |
| 10/90                                                                         |  |  |
| 20/80                                                                         |  |  |

ตารางที่ 2 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพื้นผิวรอยขาดพอลิเมอร์ผสมระหว่าง  
 พยาง- อีพิตีเอ็มกับพอลิพรพิลีนในอัตราส่วนต่าง ๆ (ต่อ)

| อัตราส่วนระหว่างพยางอีพิตีเอ็ม<br>กับพอลิพรพิลีน<br>(เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) | พยางอีพิตีเอ็มแบบไม้ตีวัลคาไนซ์                                                     | พยางอีพิตีเอ็มแบบตีวัลคาไนซ์                                                         |
|-----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 30/70                                                                       |   |   |
| 40/60                                                                       |  |  |

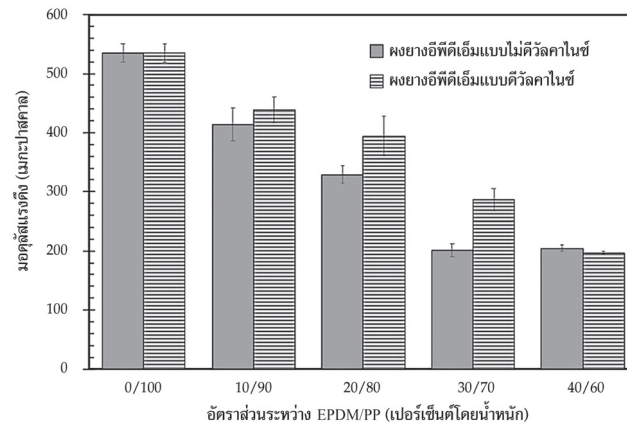
เมื่อพิจารณาลักษณะทางสัณฐานวิทยาจากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด  
 ที่กำลังขยาย 300 เท่า ของพื้นผิวรอยขาดพอลิเมอร์ผสมระหว่างพยางอีพิตีเอ็มกับพอลิพรพิลีนในอัตราส่วนต่าง ๆ  
 ที่แสดงดังตารางที่ 2 พบว่า พื้นผิวรอยขาดของพอลิพรพิลีนมีลักษณะการยึดก่อนขาดที่สม่ำเสมอ แต่เมื่อผสม  
 พยางอีพิตีเอ็มแบบไม้ตีวัลคาไนซ์ในพอลิพรพิลีนที่อัตราส่วน 10/90 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ส่งผลให้พื้นผิว  
 รอยขาดมีความสม่ำเสมออย่างมีพยางแทรกอยู่ อย่างไรก็ตาม พยางยังสามารถกระจายตัวได้ดีใน  
 พอลิพรพิลีนและมีการปกคลุมของเมทริกซ์พอลิพรพิลีนบนผิวอนุภาคพยางทำให้รอยขาดเกิดขึ้นในส่วนของ  
 เมทริกซ์เป็นหลัก เมื่อผสมพยางอีพิตีเอ็มในพอลิพรพิลีนในปริมาณที่มากขึ้นทำให้ยางเกาะกลุ่มกันมีขนาดใหญ่ขึ้น  
 และพอลิพรพิลีนไม่สามารถปกคลุมบนผิวของอนุภาคพยางได้ทั่วถึง ส่งผลให้เกิดรอยขาดบริเวณตำแหน่งที่  
 พยางมาเกาะกันเองซึ่งมีการยึดเกาะกันที่ไม่แข็งแรง จึงเห็นลักษณะการขาดเป็นชั้น ๆ ต่างระดับมากขึ้น  
 สำหรับการนำพยางอีพิตีเอ็มแบบตีวัลคาไนซ์ผสมในพอลิพรพิลีนในปริมาณต่าง ๆ มีความคล้ายคลึงกับ  
 พอลิพรพิลีนที่ผสมพยางอีพิตีเอ็มแบบไม้ตีวัลคาไนซ์ กล่าวคือ เมื่อผสมพยางอีพิตีเอ็มในปริมาณที่มากขึ้น  
 ทำให้พยางมาเกาะกลุ่มกันเองมากขึ้นและเกิดรอยขาดตรงยางที่มากเกาะกันทำให้มีรอยขาดเป็นชั้น ๆ มากขึ้น แต่การ  
 ผสมพยางแบบตีวัลคาไนซ์ที่มีขนาดเล็กกว่าทำให้อายุการใช้งานมีลักษณะเป็นชั้น ๆ น้อยกว่าหรือมีความสม่ำเสมอมากกว่า

### 3. ผลการทดสอบสมบัติการรับแรงดึง

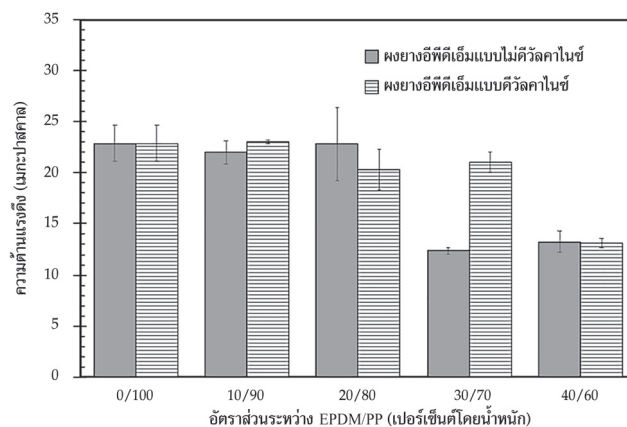
จากรูปที่ 1 แสดงค่ามอดุลัสแรงดึงของการผสมพยางอีพิตีเอ็มแบบไม้ตีวัลคาไนซ์และแบบตีวัลคาไนซ์  
 ในพอลิพรพิลีนที่อัตราส่วนต่าง ๆ พบว่า พอลิพรพิลีนมีค่ามอดุลัสแรงดึง 535.25 เมกะปาสกาล เมื่อทำการ  
 ผสมพยางอีพิตีเอ็มแบบไม้ตีวัลคาไนซ์ในพอลิพรพิลีนด้วยปริมาณที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่ามอดุลัสแรงดึงลดลง  
 เป็นลำดับ เนื่องจากพยางอีพิตีเอ็มอ่อนตัวและมีความมอดุลัสแรงดึงที่ต่ำกว่าพอลิพรพิลีน หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ  
 พยางอีพิตีเอ็มต้องการแรงเพียงเล็กน้อยก็สามารถทำให้เปลี่ยนรูปได้ง่าย ในขณะที่พอลิพรพิลีนต้องใช้แรง  
 ที่มากกว่าจึงจะเกิดการเปลี่ยนรูป [19] โดยการผสมพยางอีพิตีเอ็มแบบตีวัลคาไนซ์ในพอลิพรพิลีนด้วย  
 ปริมาณที่มากขึ้นทำให้ค่ามอดุลัสแรงดึงมีแนวโน้มลดลงเป็นลำดับเช่นเดียวกับการผสมพยางอีพิตีเอ็ม  
 แบบไม้ตีวัลคาไนซ์ แต่การผสมพยางอีพิตีเอ็มแบบตีวัลคาไนซ์จะให้ผลค่ามอดุลัสแรงดึงค่อนข้างสูงกว่า



เนื่องจากพยางค์อีพีดีเอ็มแบบดิวคาลาโนซึ่งถูกตัดขาดการเชื่อมขวางทำให้สายโซ่โมเลกุลเคลื่อนที่ได้อิสระ ซึ่งโครงสร้างทางเคมีของพยางค์อีพีดีเอ็มและพอลิโพรพิลีนมีความคล้ายกันจึงทำให้มีความเข้ากันได้ที่แสดงถึงการยึดเกาะกันที่ดีขึ้นระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสอง [20]



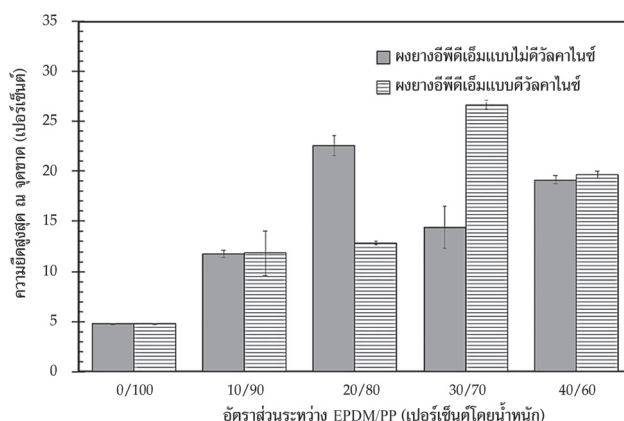
รูปที่ 1 มอดูลัสแรงดึงของพอลิเมอร์ที่ผสมระหว่างพยางค์อีพีดีเอ็มกับพอลิโพรพิลีนในอัตราส่วนต่าง ๆ



รูปที่ 2 ความต้านแรงดึงของพอลิเมอร์ที่ผสมระหว่างพยางค์อีพีดีเอ็มกับพอลิโพรพิลีนในอัตราส่วนต่าง ๆ

สำหรับผลการทดสอบความต้านแรงดึงแสดงดังรูปที่ 2 พบว่า พอลิโพรพิลีนมีค่าความต้านแรงดึง 22.89 เมกะปาสคาล เมื่อผสมพยางค์อีพีดีเอ็มแบบดิวคาลาโนในพอลิโพรพิลีนด้วยอัตราส่วน 10/90 และ 20/80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ค่าความต้านแรงดึงไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับพอลิโพรพิลีนที่ไม่ผสมพยางค์ เนื่องจากการผสมพยางค์ในปริมาณน้อยทำให้อนุภาคพยางค์สามารถกระจายตัวในพอลิโพรพิลีนได้ดีและพอลิโพรพิลีนสามารถปกคลุมบนผิวยางได้ทั่วถึง จึงทำให้เกิดรอยขาดตรงส่วนของพอลิโพรพิลีนเป็นหลักดังลักษณะทางสัณฐานวิทยาจากภาพถ่ายพื้นผิวรอยขาดที่แสดงในตารางที่ 2 แต่เมื่อนำพยางค์อีพีดีเอ็มผสมลงในพอลิโพรพิลีนที่อัตราส่วน 30/70 และ 40/60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ส่งผลให้ความต้านแรงดึงลดลง เนื่องจากพยางค์เกาะกลุ่มกันเป็นขนาดใหญ่ทำให้พอลิโพรพิลีนไม่สามารถปกคลุมบนผิวยางได้ทั่วถึง ดังนั้น จึงทำให้เกิดการเสียหายได้ง่าย โดยเฉพาะตรงตำแหน่งที่พยางค์มาเกาะกันเองเพราะมีการยึดเกาะกันไม่แข็งแรง ซึ่งสอดคล้องกับผลการตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาก่อนหน้า ส่วนค่าความต้านแรงดึงในกรณีของการผสมพยางค์อีพีดีเอ็มแบบดิวคาลาโนในพอลิโพรพิลีนนั้นมีแนวโน้มคล้ายกับการผสมพยางค์อีพีดีเอ็มแบบดิวคาลาโน กล่าวคือ การผสมพยางค์ที่ปริมาณ 10/90 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ค่าความต้านแรงดึงไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับพอลิโพรพิลีน และ ความต้านแรงดึงยังไม่เปลี่ยนแปลงจนถึงการผสมพยางค์อีพีดีเอ็มที่อัตราส่วน 30/70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งความต้านแรงดึงที่อัตราส่วนนี้มีค่าสูงกว่าการผสมพยางค์แบบดิวคาลาโน เนื่องจากพยางค์อีพีดีเอ็มหลังผ่าน

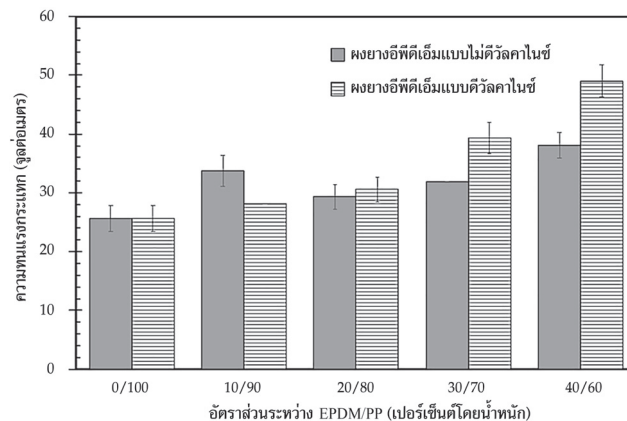
กระบวนการตีวัลคาไนเซชันทำให้มีขนาดเล็กลงและกระจายตัวในเมทริกซ์พอลิโพรพิลีนได้ดี [13], [21] ซึ่งส่งผลให้มีพื้นที่ผิวยึดเกาะกับพอลิโพรพิลีนมากขึ้นและมีการถ่ายโอนความเค้นได้ดีในพอลิเมอร์ผสม [22] อีกทั้งการที่พยางอียีตีเอ็มแบบตีวัลคาไนซ์ถูกตัดขาดในตำแหน่งการเชื่อมขวางจึงทำให้สายโซ่โมเลกุลเคลื่อนที่ได้อิสระและสามารถเข้ากันได้กับพอลิโพรพิลีนได้มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ [23] ได้รายงานว่าการตีวัลคาไนซ์พยางล้อยด้วยเครื่องอัดรีดสกรูและเครื่องผสมภายในทำให้การเชื่อมขวางลดลง เมื่อนำมาผสมในพอลิเมอร์คอมพอสิตของยางธรรมชาติกับเส้นใยชุนมะพร้าวส่งผลให้ความต้านแรงดึงมีค่าสูงกว่าการผสมพยางล้อยที่ไม่ผ่านการตีวัลคาไนซ์ อย่างไรก็ตาม หากเพิ่มอัตราส่วนพยางอียีตีเอ็มแบบตีวัลคาไนซ์ในพอลิโพรพิลีนมากขึ้นเป็น 40/60 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก ก็จะทำให้ความต้านแรงดึงลดลง



รูปที่ 3 ความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ที่ผสมระหว่างพยางอียีตีเอ็มกับพอลิโพรพิลีนในอัตราส่วนต่าง ๆ

ส่วนความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของพอลิโพรพิลีนที่ผสมพยางอียีตีเอ็มแสดงดังรูปที่ 3 พบว่าพอลิโพรพิลีนมีความยืดสูงสุด ณ จุดขาดที่ 4.75% แต่เมื่อผสมพยางอียีตีเอ็มแบบไม่ตีวัลคาไนซ์ที่อัตราส่วน 10/90 และ 20/80 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก ทำให้ความยืดสูงสุด ณ จุดขาดเพิ่มสูงขึ้นเป็น 11.80 และ 22.58 % เนื่องจากพยางอียีตีเอ็มเป็นวัสดุอ่อนตัวทำให้ยืดตัวได้มากขึ้น เมื่อนำพยางอียีตีเอ็มผสมลงในพอลิโพรพิลีนที่อัตราส่วน 30/70 และ 40/60 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก ทำให้ความยืดสูงสุด ณ จุดขาดลดลงที่สอดคล้องกับค่าความต้านแรงดึงและสัณฐานวิทยา เนื่องจากพยางเกาะกลุ่มกันเป็นขนาดใหญ่ขึ้น และพอลิโพรพิลีนไม่สามารถปกคลุมบนผิวของอนุภาคพยางได้ทั่วถึงทำให้การยึดเกาะกันไม่แข็งแรง จึงทำให้ความสามารถในการยืดตัวไม่ต่อเนื่อง สำหรับการผสมพยางอียีตีเอ็มแบบตีวัลคาไนซ์ในพอลิโพรพิลีนมีแนวโน้มของค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาดคล้ายกับการผสมพยางอียีตีเอ็มแบบไม่ตีวัลคาไนซ์ กล่าวคือ การผสมพยางอียีตีเอ็มแบบตีวัลคาไนซ์ที่อัตราส่วน 10/90 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก มีความยืดสูงสุด ณ จุดขาดเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับพอลิโพรพิลีน และความยืดสูงสุด ณ จุดขาดเพิ่มสูงขึ้นเมื่อผสมพยางในพอลิโพรพิลีนด้วยปริมาณที่มากขึ้น ซึ่งความยืดสูงสุด ณ จุดขาด มีค่ามากที่สุดที่อัตราส่วน 30/70 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก โดยที่มีค่าสูงกว่าการผสมพยางแบบไม่ตีวัลคาไนซ์ด้วย เนื่องจากพยางอียีตีเอ็มแบบตีวัลคาไนซ์มีขนาดเล็กกว่าและกระจายตัวทั่วเมทริกซ์ [21] ทำให้มีพื้นที่ผิวยึดเกาะกับพอลิโพรพิลีนมากกว่า [22] อีกทั้งพยางอียีตีเอ็มแบบตีวัลคาไนซ์ถูกตัดขาดในตำแหน่งการเชื่อมขวางทำให้สายโซ่โมเลกุลอิสระในการเคลื่อนที่ซึ่งสามารถเข้ากันได้กับพอลิโพรพิลีนได้มากขึ้น จึงทำให้มีความสามารถในการยืดตัวที่ต่อเนื่องมากขึ้นด้วย และความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของพอลิโพรพิลีนที่ผสมพยางอียีตีเอ็มแบบตีวัลคาไนซ์เริ่มลดลงที่อัตราส่วน 40/60 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบความต้านแรงดึงและสัณฐานวิทยา

#### 4. ผลการทดสอบสมบัติการรับแรงกระแทก



รูปที่ 5 ความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ที่ผสมระหว่างผงยางอีพดีเอ็มแบบไม่ดิวลคาไนซ์กับพอลิโพรพิลีนที่อัตราส่วนต่าง ๆ

สำหรับการทดสอบสมบัติการรับแรงกระแทกของการผสมผงยางอีพดีเอ็มแบบไม่ดิวลคาไนซ์และแบบดิวลคาไนซ์ในพอลิโพรพิลีนที่อัตราส่วน 0/100 10/90 20/80 30/70 และ 40/60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ดังรูปที่ 3 พบว่า พอลิโพรพิลีนมีค่าความทนแรงกระแทก 25.63 จูลต่อเมตร เมื่อผสมผงยางอีพดีเอ็มแบบไม่ดิวลคาไนซ์ในพอลิโพรพิลีนด้วยปริมาณที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความทนแรงกระแทกเพิ่มสูงขึ้นเป็นลำดับ โดยที่อัตราส่วน 40/60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีความทนแรงกระแทกสูงสุดที่ 38.08 จูลต่อเมตร เนื่องจากอนุภาคยางทำหน้าที่ดูดซับและกระจายพลังงานซึ่งช่วยเพิ่มความทนแรงกระแทกให้กับพอลิโพรพิลีนได้ดีขึ้น ส่วนกรณีของการผสมผงยางอีพดีเอ็มแบบดิวลคาไนซ์ในพอลิโพรพิลีนทำให้ค่าความทนแรงกระแทกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็นลำดับเช่นเดียวกับการผสมผงยางอีพดีเอ็มแบบไม่ดิวลคาไนซ์ ซึ่งการผสมผงยางอีพดีเอ็มแบบดิวลคาไนซ์จะให้ความทนแรงกระแทกสูงกว่า เนื่องจากผงยางมีขนาดเล็กกว่าและกระจายตัวได้ดีในเมทริกซ์พอลิโพรพิลีน [21] อีกทั้งการที่สายโซ่โมเลกุลยางถูกตัดขาดตรงการเชื่อมขวางทำให้สายโซ่โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่เข้ากันได้กับพอลิโพรพิลีนได้ดีกว่า

#### สรุปผลการวิจัย

จากผลการวิจัยสามารถสรุปสาระสำคัญได้ดังนี้

1. การดิวลคาไนซ์ในขั้นตอนการบดด้วยเครื่องบดแบบสองลูกกลิ้งที่อุณหภูมิ 230 °C ทำให้มีความสามารถในการดิวลคาไนซ์ได้ดีกว่าที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส
2. พอลิโพรพิลีนที่ผสมผงยางอีพดีเอ็มทั้งสองแบบไม่ดิวลคาไนซ์และดิวลคาไนซ์ในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลให้ค่า Young's Modulus ลดลง แต่ความยืดหยุ่น ฐาน จุดขาด และความทนแรงกระแทกเพิ่มสูงขึ้น ส่วนความต้านแรงดึงเริ่มมีแนวโน้มลดลงเมื่อผสมผงยางอีพดีเอ็มแบบไม่ดิวลคาไนซ์และแบบดิวลคาไนซ์ที่ปริมาณ 30 และ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
3. การผสมผงยางอีพดีเอ็มแบบดิวลคาไนซ์ลงในพอลิโพรพิลีนให้สมบัติเชิงกลค่อนข้างดีกว่าผงยางแบบไม่ดิวลคาไนซ์ เนื่องจากผงยางอีพดีเอ็มแบบดิวลคาไนซ์ถูกทำให้มีขนาดเล็กลงและกระจายตัวได้ดีขึ้น ดังนั้น ผลงานวิจัยนี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการนำผงยางอีพดีเอ็มจากซิลิโคนประจุลบไปใช้ในการแปรรูปใหม่ได้ด้วยการผสมกับพอลิโพรพิลีน โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์ที่ต้องการสมบัติความทนแรงกระแทก เช่น ท่อบำบัดน้ำเสีย เป็นต้น

## กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีที่ให้การสนับสนุนการทดสอบในงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

## References

- [1] Erman, B., Mark, J. E., and Roland, C. M. (2013). **The Science and Technology of Rubber**. 4<sup>th</sup> eds. Amsterdam: Elsevier
- [2] German, R. (1999). **Non-Tyre Rubber Components in the Automotive Industry**. Shrewsbury: iSmithers Rapra Publishing
- [3] Dorigato, A., Rigotti, D., and Fredi, G. (2022). Recent Advances in the Devulcanization Technologies of Industrially Relevant Sulfur-Vulcanized Elastomers. **Advanced Industrial and Engineering Polymer Research**. Vol. 6, Issue 3, pp. 288-309. DOI: 10.1016/j.aiepr.2022.11.003
- [4] Simon, D. Á. and Bárány, T. (2023). Microwave Devulcanization of Ground Tire Rubber and Its Improved Utilization in Natural Rubber Compounds. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**. Vol. 11, No. 5, pp. 1797-1808. DOI: 10.1021/acssuschemeng.2c05984
- [5] Movahed, S. O., Ansarifard, A., Karbalaee, S., and Far, S. A. (2015). Devulcanization and Recycling of Waste Automotive EPDM Rubber Powder by Using Shearing Action and Chemical Additive. **Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology**. Vol. 31, Issue 2, pp. 87-116. DOI: 10.1177/147776061503100202
- [6] Rigotti, D., Dorigato, A., Valentini, F., and Pegoretti, A. (2023). Devulcanization Parameters and Mechanical Properties of EPDM/Ground Tire Rubber Compounds. **Rubber Chemistry and Technology**. Vol. 96, Issue 1, pp. 114-129. DOI: 10.5254/rct.23.77949
- [7] Simon, D. Á. and Bárány, T. (2021). Effective Thermomechanical Devulcanization of Ground Tire Rubber with a Co-rotating Twin-Screw Extruder. **Polymer Degradation and Stability**. Vol. 190, Article 109626. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2021.109626
- [8] Colom, X., Carrillo-Navarrete, F., Saeb, M. R., Marin, M., Formela, K., and Cañavate, J. (2023). Evaluation and Rationale of the Performance of Several Elastomeric Composites Incorporating Devulcanized EPDM. **Polymer Testing**. Vol. 121, Article 107976. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2023.107976
- [9] Sripornsawat, B., Saiwari, S., and Nakason, C. (2018). Thermoplastic Vulcanizates Based on Waste Truck Tire Rubber and Copolyester Blends Reinforced with Carbon Black. **Waste Management**. Vol. 79, pp. 638-646. DOI: 10.1016/j.wasman.2018.08.038
- [10] Simon, D. Á., Halász, I. Z., Karger-Kocsis, J., and Bárány, T. (2018). Microwave Devulcanized Crumb Rubbers in Polypropylene Based Thermoplastic Dynamic Vulcanizates. **Polymers**. Vol. 10, Article 767. DOI: 10.3390/polym10070767
- [11] de Sousa, F. D. B., Gouveia, J. R., de Camargo Filho, P. M. F., Vidotti, S. E., Scuracchio, C. H., Amurin, L. G., and Valera, T. S. (2015). Blends of Ground Tire Rubber Devulcanized by Microwaves/HDPE - Part A: Influence of Devulcanization Process. **Polímeros**. Vol. 25, No. 3, pp. 256-264. DOI: 10.1590/0104-1428.1747



- [12] Purityi, D. Z. and Pölöskei, K. (2021). Thermomechanical Devulcanization of Ethylene Propylene Diene Monomer Rubber and Its Application in Blends with High-Density Polyethylene. **Journal of Applied Polymer Science**. Vol. 138, Issue 13, Article 50090. DOI: 10.1002/app.50090
- [13] Dong, H., Zhong, J., and Isayev, A. I. (2021). Manufacturing Polypropylene (PP)/Waste EPDM Thermoplastic Elastomers Using Ultrasonically Aided Twin-Screw Extrusion. **Polymers**. Vol. 13, Issue 2, Article 259. DOI: 10.3390/polym13020259
- [14] Garcia, P. S., de Sousa, F. D. B., de Lima, J. A., Cruz, S. A., and Scuracchio, C. H. (2015). Devulcanization of Ground Tire Rubber: Physical and Chemical Changes after Different Microwave Exposure Times. **eXPRESS Polymer Letters**. Vol. 9, No. 11, pp. 1015-1026. DOI: 10.3144/expresspolymlett.2015.91
- [15] Görbe, Á., Kohári, A., and Bárány, T. (2024). Efficiency of Thermomechanical Reclaiming of Ground Tire Rubber Conducted in Counter-rotating and Co-rotating Twin Screw Extruder. **Polymers**. Vol. 59, Issue 3, Article 455. DOI: 10.14314/polimery.2014.231
- [16] Brunella, V., Aresti, V., Romagnolli, U., Muscato, B., Girotto, M., Rizzi, P., and Luda, M. P. (2022). Recycling of EPDM via Continuous Thermo-Mechanical Devulcanization with Co-Rotating Twin-Screw Extruder. **Polymers**. Vol. 14, Issue 22, Article 4853. DOI: 10.3390/polym14224853
- [17] Diaz, R., Colomines, G., Peuvrel-Disdier, E., and Deterre, R. (2018). Thermo-Mechanical Recycling of Rubber: Relationship Between Material Properties and Specific Mechanical Energy. **Journal of Materials Processing Technology**. Vol. 252, pp. 454-468. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2017.10.014
- [18] Simon, D. Á., Purityi, D. Z., and Bárány, T. (2020). Devulcanization of Ground Tire Rubber: Microwave and Thermomechanical Approaches. **Scientific Reports**. Vol. 10, Article 16587. DOI: 10.1038/s41598-020-73543-w
- [19] Zulkifli, M. H., Rasidi, M. S. M., Musa, L., and Masa, A. H. (2021). The Study of Recycled Ethylene Propylene Diene Monomer (EPDM-r)/Polypropylene (PP) Polymeric Blends. **Journal of Physics: Conference Series**. Vol. 2080, Article 012012. DOI: 10.1088/1742-6596/2080/1/012012
- [20] Song, L. F., Bai, N., Shi, Y., Wang, Y. X., Song, L. X., and Liu, L. Z. (2023). Effects of Ethylene-Propylene-Diene Monomers (EPDMs) with Different Moony Viscosity on Crystallization Behavior, Structure, and Mechanical Properties of Thermoplastic Vulcanizates (TPVs). **Polymers**. Vol. 15, Issue 3, Article 642. DOI: 10.3390/polym15030642
- [21] Lendvai, L. (2023). Mechanical and Morphological Properties of PP/XNBR Blends Produced with Rubber Latex. **Journal of Polymer Research**. Vol. 30, Article 276. DOI: 10.1007/s10965-023-03660-3
- [22] Ridhwan, M., Nasir, J., Zulkepli, N. N., Mustafa, M., Abdullah, M. M. A. B., Omar, M. F., Ismail, H., and Sandu, A. V. (2014). The Effects of Different Particle Sizes of Recycled Acrylonitrile Butadiene Rubber and its Blend Ratios on Mechanical and Morphological Properties of vNBR/rNBR Blends. **Materiale Plastice**. Vol. 51, No.2, pp. 201-204
- [23] Ujianto, O., Putri, D. B., and AWinarto, D. (2017). A Comparative Study of Ground Tire Rubber Devulcanization using Twin Screw Extruder and Internal Mixer. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. Vol. 223, Article 012005. DOI: 10.1088/1757-899X/223/1/012005

ปัจจัยด้านคุณภาพการให้บริการรถไฟภายใต้การดำเนินชีวิตรูปแบบใหม่  
อย่างยั่งยืน กรณีศึกษาเส้นทางรถไฟสายตะวันออกเฉียงเหนือ

## The Factors in Rail Transportation Service Considering User Expectation Toward New Normal and Sustainability: Case study Northeastern lines

นฤชา ตันยัชฌาวุฒ<sup>1</sup> รัตนภรณ์ เกษมศรี<sup>1</sup> เกษศิรินทร์ ธีรติไชพา<sup>1</sup> มัลลิกา สีฟอง<sup>1</sup> อานนท์ จันทรตั้ง<sup>2</sup>  
วิลาลินี กิริกิตติสกุล<sup>2</sup> และณัฐญา วงละคร<sup>2\*</sup>

Narucha Tanaiutchawoot<sup>1</sup> Rattanaporn Kasamsri<sup>1</sup> Kestsirin Theerathitichaipa<sup>1</sup>  
Manlika Seefong<sup>1</sup> Anon Chantaratang<sup>2</sup> Wilasinee Keerakittisakul<sup>2</sup> and Nattiya Wonglakorn<sup>2\*</sup>

*Received: March 18, 2024; Revised: April 25, 2024; Accepted: April 26, 2024*

### บทคัดย่อ

การพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานและระบบคมนาคมขนส่งของประเทศไทยเป็นหนึ่งในเป้าหมายการพัฒนาประเทศอย่างยั่งยืน ประกอบด้วย การพัฒนาด้านการบริหารจัดการระบบคมนาคมขนส่ง เช่น ระบบบริหารจัดการการขนส่งและรูปแบบการให้บริการ และด้านโครงสร้างพื้นฐาน เช่น ถนน สถานีขนส่ง เส้นทางรถไฟ ซึ่งการขนส่งทางรถไฟนั้น ถือเป็นประเด็นสำคัญหลักอย่างหนึ่งในการนำไปสู่ความสำเร็จของการให้บริการด้านการขนส่ง และเนื่องด้วยปัจจุบันวิถีการดำเนินชีวิตเปลี่ยนแปลงไป งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยด้านคุณภาพการบริการของรถไฟสายตะวันออกเฉียงเหนือ โดยเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย คือ แบบสอบถาม ผู้วิจัยเก็บรวบรวมข้อมูลจากกลุ่มตัวอย่าง จำนวน 600 ราย และใช้แบบจำลองการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงยืนยันลำดับที่ 2 ในการวิเคราะห์ข้อมูล ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลแสดงให้เห็นว่า คุณภาพการบริการวัดได้จากลักษณะของยานพาหนะ กระบวนการและการบริการ ข้อมูลข่าวสาร พนักงาน และสถานี อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01 ดังนั้น ผู้ให้บริการควรดำเนินการจัดการข้อมูลการเดินทางบนขบวนรถและสถานี จัดสรรเจ้าหน้าที่รักษาความปลอดภัยในพื้นที่สถานี จัดระเบียบการขึ้นลงรถบริเวณชานชาลา และจัดให้มีการทำความสะอาดบริเวณสถานีอย่างสม่ำเสมอตามตารางเวลาที่กำหนด

คำสำคัญ : ปัจจัยการบริการ; รถไฟระหว่างเมือง; การเดินทางภายใต้วิถีชีวิตใหม่

<sup>1</sup> สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

<sup>2</sup> คณะวิทยาศาสตร์และศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

<sup>1</sup> Institute of Engineering, Suranaree University of Technology

<sup>2</sup> Faculty of Science and Liberal Arts, Rajamangala University of Technology Isan

\* Corresponding Author; Tel. 08 3740 8520, E - mail: nattiya.wo@rmuti.ac.th

## Abstract

The development of infrastructure and Thailand's transportation is a sustainable development country goal which consists of transportation management development such as transportation management system and service form, Infrastructure such as roads, transport stations, and railway routes. Railway transportation is a main issue in the success of transportation services. And all over the lifestyle has changed. Therefore, this research aims to study the services quality factors of Northeastern lines. The research instrument was a questionnaire. The researcher collected data from a sample group for 600 people and used second-order factor analysis. The result showed that the service quality is measured by vehicle characteristics, services, information, crews and terminal at a statistically significant level 0.01. Therefore, service providers should prepare the information of travel on vehicle and stations, provide the security guard in station, manage getting on and off trains at platform and clean the station regularly.

**Keywords:** Service Quality Factors; Intercity Rail Transportation; New Normal Transportation

## บทนำ

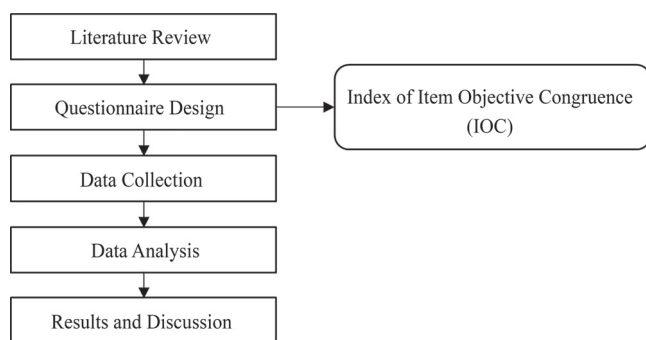
การให้บริการขนส่งทางรถไฟนั้น ถือเป็นประเด็นสำคัญหลักอย่างหนึ่งในการนำไปสู่ความสำเร็จของการให้บริการด้านการขนส่ง เป็นรูปแบบการเดินทางที่เชื่อมต่อจากต้นทางไปยังสถานีหรืออาคารที่พักผู้โดยสาร เพื่อเดินทางไปยังสถานีหรืออาคารที่พักผู้โดยสารที่ใกล้จุดหมายปลายทาง จึงจำเป็นต้องจัดเตรียมสิ่งอำนวยความสะดวกพื้นฐานด้านต่าง ๆ เพื่อรองรับความต้องการระหว่างเข้ารับบริการครอบคลุมผู้โดยสารทุกกลุ่ม ทั้งผู้โดยสารทั่วไปและผู้โดยสารกลุ่มเปราะบาง (ผู้โดยสารผู้สูงอายุ เด็ก หญิงตั้งครรภ์ และคนพิการ) อีกทั้งยังต้องสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการเดินทาง เช่น การเดินทางเพื่อท่องเที่ยวและพักผ่อน การเดินทางเพื่อติดต่อธุรกิจ และการเดินทางเพื่อกิจกรรมการออกกำลังกาย เป็นต้น และเนื่องด้วยปัจจุบันที่ทั่วโลกประสบปัญหาวิกฤติจากการแพร่ระบาดของเชื้อไวรัสโควิด 19 ทำให้วิถีการดำเนินชีวิตเปลี่ยนแปลงไป ก่อให้เกิดผลกระทบเป็นวงกว้างในทุกภาคส่วน เช่น การทำงาน การเรียนการสอน การประกอบธุรกิจ และการเดินทาง ฯลฯ เป็นเหตุให้ทุกภาคส่วนทั้งภาครัฐและเอกชน กำหนดมาตรการในการดำเนินชีวิตภายใต้ข้อจำกัดดังกล่าว ซึ่งรูปแบบการให้บริการของระบบขนส่งสาธารณะก็เปลี่ยนแปลงไป เช่น การเว้นที่ว่างระหว่างที่นั่งบนรถโดยสาร การจำกัดจำนวนผู้โดยสารที่จะเข้าใช้บริการระบบขนส่งสาธารณะ และการจัดการสิ่งอำนวยความสะดวกพื้นฐานต่าง ๆ ในระบบขนส่งสาธารณะ แนวความคิดในการนำเทคโนโลยีระบบอัจฉริยะเข้ามาใช้ เพื่อลดการสัมผัสในพื้นที่สาธารณะที่มีผู้ใช้งานเป็นจำนวนมาก ซึ่งมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องดำเนินการจัดการให้สอดคล้องกับความต้องการของผู้ใช้และรองรับเหตุการณ์ที่เกิดขึ้น เพื่อให้ผู้ใช้บริการหรือผู้โดยสารสามารถใช้บริการระบบขนส่งสาธารณะได้อย่างปลอดภัย และตอบสนองความต้องการการเดินทางด้วยรูปแบบต่าง ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพและยั่งยืน การเตรียมความพร้อมในการบริหารจัดการรูปแบบการให้บริการของระบบขนส่งสาธารณะจึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องดำเนินการจัดการให้สอดคล้องกับเหตุการณ์ที่เกิดขึ้น เพื่อให้ผู้โดยสารสามารถใช้บริการระบบขนส่งสาธารณะได้อย่างปลอดภัย และตอบสนองความต้องการการเดินทางด้วยรูปแบบต่าง ๆ อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม หากระบบขนส่งสาธารณะมีบริการดี ผู้รับบริการเกิดความประทับใจ ภาพลักษณ์ขององค์กรก็จะดีไปด้วย [1] ซึ่งส่วนใหญ่ผู้ใช้บริการมักจะมีคามคาดหวังที่จะได้รับการบริการที่ดีจากผู้ให้บริการ ซึ่งจะทำให้ผู้รับบริการเกิดความพึงพอใจ หรืออาจเกิดความประทับใจขึ้นได้ หากการบริการนั้นเกินความคาดหวัง [2] นอกจากแนวคิดด้านการบริการและความคาดหวัง แนวคิดด้านความยั่งยืน (Sustainability) ก็ถูกนำมาใช้กับการขนส่งสาธารณะเช่นเดียวกัน [3]

ซึ่งแนวคิดด้านความยั่งยืน ประกอบด้วย ด้านสิ่งแวดล้อม ด้านเศรษฐกิจ และด้านสังคม รวมถึงการเชื่อมโยงรูปแบบการออกแบบเพื่อทุกคน (Universal Design) ดังนั้น งานวิจัยนี้ทำการศึกษาปัจจัยด้านคุณภาพบริการมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยด้านคุณภาพการบริการของรถไฟฟ้าระหว่างเมือง เพื่อเป็นแนวทางสำหรับการวางแผนการบริการให้ตอบสนองต่อความต้องการของผู้โดยสารทุกกลุ่ม

## วิธีดำเนินการวิจัย

### 1. กรอบการวิจัย

การศึกษานี้เริ่มต้นด้วยการทบทวนวรรณกรรมเกี่ยวกับปัจจัยด้านคุณภาพการให้บริการรถไฟฟ้า และตรวจสอบวิธีการและทฤษฎีทางสถิติที่เป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้กับการศึกษา ผู้วิจัยได้พัฒนาแบบสอบถามตามผลการตรวจสอบและรวบรวมข้อมูลจากผู้ใช้บริการรถไฟฟ้าโดยการสัมภาษณ์แบบตัวต่อตัว จากนั้นถึงใช้วิธีการทางสถิติสองวิธีทั้งการวิเคราะห์ปัจจัยเชิงสำรวจ (Exploratory Factor Analysis; EFA) เพื่อการสกัดหรือจัดกลุ่มขององค์ประกอบตัวแปร และการวิเคราะห์ปัจจัยเชิงยืนยัน (Confirmatory Factor Analysis; CFA) เพื่อยืนยันตัวชี้วัดปัจจัยด้านคุณภาพการให้บริการรถไฟฟ้าภายใต้การดำเนินชีวิตรูปแบบใหม่ สุดท้ายจึงนำไปสู่การเสนอผลลัพธ์ทางสถิติและการอภิปรายผล โดยมีขั้นตอนวิจัยดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ขั้นตอนการวิจัย

### 2. ประชากรและการกำหนดกลุ่มตัวอย่าง

งานวิจัยนี้ดำเนินการศึกษากลุ่มประชากรในจังหวัดนครราชสีมา ขอนแก่น และหนองคาย สุ่มกลุ่มตัวอย่างผู้ที่เคยใช้บริการรถไฟฟ้าระหว่างเมือง ที่อาศัยอยู่ในเขตอำเภอเมืองนครราชสีมา อำเภอปากช่อง อำเภอเมืองหนองคาย และอำเภอเมืองขอนแก่น ด้วยแบบสอบถามที่มีตัวชี้วัดในการประมาณค่าในแบบจำลองจำนวน 69 ตัวชี้วัด ผู้วิจัยใช้วิธีการคำนวณจำนวนตัวอย่าง 5 - 10 คนต่อพารามิเตอร์ 1 ค่า [4] กลุ่มตัวอย่างที่ได้จากสัดส่วนกลุ่มตัวอย่าง 8:1 คิดเป็นจำนวน 552 คน ดังนั้น ผู้วิจัยได้ดำเนินการเก็บข้อมูลจากกลุ่มตัวอย่างจำนวน 600 คน เพื่อให้การสำรวจครอบคลุมกลุ่มตัวอย่าง และแสดงให้เห็นว่าข้อมูลมีความน่าเชื่อถืออยู่ในระดับดีมาก ผู้วิจัยได้กำหนดสัดส่วนของกลุ่มตัวอย่างจากจำนวนประชากรในแต่ละพื้นที่ โดยอ้างอิงจากสถิติจำนวนประชากร ปี พ.ศ. 2565 สามารถแบ่งกลุ่มตัวอย่างได้ คือ อำเภอเมืองนครราชสีมา 224 คน อำเภอปากช่อง 96 คน อำเภอเมืองหนองคาย 62 คน และอำเภอเมืองขอนแก่น 217 คน

### 3. เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

ผู้วิจัยดำเนินการออกแบบและพัฒนาแบบสอบถามเพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการเก็บรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับข้อมูลส่วนบุคคลและข้อมูลเกี่ยวกับความคาดหวังที่มีต่อการให้บริการ รวมถึงทัศนคติเกี่ยวกับการบริการ โดยใช้แบบสอบถามแบบปลายปิด (Close Ended Question) ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ ความคาดหวังของการใช้บริการรถไฟฟ้าระหว่างเมืองจำนวน 69 ข้อ ความคิดเห็นเกี่ยวกับการใช้บริการรถไฟฟ้าระหว่างเมืองจำนวน 33 ข้อ และข้อมูลทั่วไปและพฤติกรรมการใช้บริการรถไฟฟ้าจำนวน 11 ข้อ ดังนี้



ส่วนที่ 1 และ 2 ความคิดเห็นที่มีต่อการให้บริการด้านต่าง ๆ ของรถไฟฟ้าระหว่างเมือง แบบสอบถามมีลักษณะเป็นแบบมาตราส่วนประมาณค่า (Rating Scale) กำหนดเกณฑ์การให้คะแนนของระดับความคิดเห็นหรือความพึงพอใจแบ่งออกเป็น 5 ระดับ [5]

ส่วนที่ 3 ข้อมูลทั่วไปและพฤติกรรมการใช้บริการ ประสบการณ์การใช้บริการ และข้อมูลพื้นฐานของประชากร ประกอบด้วย เพศ อายุ ระดับการศึกษา รายได้ และความถี่ในการเดินทาง เป็นต้น

ในการวิจัยผู้วิจัยได้ศึกษาแนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับคุณภาพการบริการและทัศนคติเพื่อพัฒนาแบบสอบถามให้มีความสอดคล้องกับวัตถุประสงค์และสอดคล้องกับงานวิจัยมากที่สุดและตรวจสอบคุณภาพของเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย ประกอบด้วย 1) ดำเนินการตรวจสอบความตรงของเนื้อหา (Content Validity) โดยนำแบบสอบถามให้ผู้ทรงคุณวุฒิและผู้เชี่ยวชาญที่เกี่ยวข้องจำนวน 3 ท่าน และ 2) ดำเนินการทดสอบความตรงของเนื้อหาของแบบสอบถาม โดยวิธีวิเคราะห์ข้อคำถามและพิจารณาประเมินให้ค่าคะแนนเพื่อตรวจสอบดัชนีความสอดคล้อง (Index Objective-Item Congruence: IOC) ค่าดัชนี IOC ที่คำนวณได้ต้องมีค่ามากกว่า 0.5 ขึ้นไป [6] พบว่าค่าดัชนี IOC ที่ได้มีค่าเท่ากับ 0.67 - 1.00 สรุปได้ว่าข้อคำถามสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของงานวิจัย จากนั้นดำเนินการนำแบบสอบถามไปทดลองใช้ (Try Out) กับกลุ่มตัวอย่างจำนวน 30 คนเพื่อตรวจสอบความเที่ยง (Reliability) ของเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย และใช้วิธีการประมาณค่าความเที่ยงของแบบสอบถาม ด้วยวิธีประมาณค่าสัมประสิทธิ์แอลฟา (Cronbach's Alpha Coefficient) พบว่า ค่าที่ได้มีค่า 0.666 - 0.936 มากกว่า 0.6 ถือว่ายอมรับได้ แต่ถ้ามีค่ามากกว่า 0.7 ขึ้นไปถือว่าดี [7]

#### 4. การเก็บรวบรวมข้อมูล

ผู้วิจัยได้กำหนดเกณฑ์การคัดกลุ่มตัวอย่างจากประชากรที่อาศัยอยู่ในเขตอำเภอเมืองนครราชสีมา อำเภอปากช่อง อำเภอเมืองหนองคาย และอำเภอเมืองขอนแก่น ที่เคยใช้บริการรถไฟฟ้าระหว่างเมือง และเพื่อให้การสำรวจครอบคลุมเข้าถึงกลุ่มเป้าหมาย ผู้วิจัยใช้วิธีการเลือกกลุ่มตัวอย่างแบบไม่ใช้ความน่าจะเป็น (Non-Probability Sampling) ด้วยวิธีการเลือกกลุ่มตัวอย่างแบบบังเอิญ (Haphazard or Accidental Sampling) จำนวน 600 คน จากนั้นดำเนินการตรวจสอบข้อมูลที่ได้ เพื่อตรวจสอบความถูกต้องและครบถ้วนสมบูรณ์ของแบบสอบถาม และนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์ข้อมูลในลำดับถัดไป

### ผลการศึกษา

#### 1. ข้อมูลทั่วไปของผู้ใช้บริการรถไฟฟ้าระหว่างเมือง

การวิเคราะห์ความถี่และร้อยละของข้อมูลทั่วไปของผู้ใช้บริการรถไฟฟ้าระหว่างเมือง ประกอบด้วย เพศ สถานภาพ อาชีพ รายได้ ระดับการศึกษา ความถี่ในการใช้บริการ ประสบการณ์ใช้บริการในช่วงการแพร่ระบาด วัตถุประสงค์การเดินทาง การเข้าถึงสถานีรถไฟ อายุ และค่าใช้จ่ายในการเดินทางของผู้ใช้บริการรถไฟฟ้าระหว่างเมือง จำนวน 600 คน รายละเอียดดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ข้อมูลทั่วไปของผู้ใช้บริการรถไฟฟ้าระหว่างเมือง

| ข้อมูลทั่วไป | ประเภท/ชนิด                  | จำนวน (คน) | ร้อยละ |
|--------------|------------------------------|------------|--------|
| เพศ          | 1) ชาย                       | 295        | 49.17  |
|              | 2) หญิง                      | 305        | 50.83  |
| สถานภาพ      | 1) โสด                       | 325        | 54.17  |
|              | 2) สมรส/อยู่ด้วยกัน          | 245        | 40.83  |
|              | 3) หม้าย/หย่าร้าง/แยกกันอยู่ | 30         | 5.00   |

ตารางที่ 1 ข้อมูลทั่วไปของผู้ใช้บริการรถไฟฟ้าระหว่างเมือง (ต่อ)

| ข้อมูลทั่วไป                   | ประเภท/ชนิด                   | จำนวน (คน) | ร้อยละ |
|--------------------------------|-------------------------------|------------|--------|
| อาชีพ                          | 1) นักเรียน/นักศึกษา          | 142        | 23.67  |
|                                | 2) รับราชการ/รัฐวิสาหกิจ      | 116        | 19.33  |
|                                | 3) เกษตรกร/องค์กรเกษตรกร      | 115        | 19.17  |
|                                | 4) ลูกจ้างบริษัทเอกชน         | 57         | 9.50   |
|                                | 5) ผู้ประกอบการ/ธุรกิจส่วนตัว | 118        | 19.67  |
|                                | 6) อื่น ๆ                     | 52         | 8.67   |
| รายได้                         | 1) น้อยกว่า 5,000 บาท         | 97         | 16.17  |
|                                | 2) 5,001 - 10,000 บาท         | 161        | 26.83  |
|                                | 3) 10,001 - 15,000 บาท        | 138        | 23.00  |
|                                | 4) 15,001 - 20,000 บาท        | 100        | 16.67  |
|                                | 5) 20,001 - 25,000 บาท        | 80         | 13.33  |
|                                | 6) มากกว่า 25,000 บาท         | 24         | 4.00   |
| ระดับการศึกษา                  | 1) ประถมศึกษา                 | 50         | 8.33   |
|                                | 2) มัธยมศึกษา                 | 156        | 26.00  |
|                                | 3) อาชีวศึกษา/ปวช./ปวส.       | 141        | 23.50  |
|                                | 4)ปริญญาตรี                   | 214        | 35.67  |
|                                | 5) ปริญญาโท                   | 32         | 5.33   |
|                                | 6) ปริญญาเอก                  | 7          | 1.17   |
| ความถี่ในการใช้บริการ          | 1) 1 - 2 ครั้ง/สัปดาห์        | 276        | 46.00  |
|                                | 2) 3 - 4 ครั้ง/สัปดาห์        | 158        | 26.33  |
|                                | 3) 5 - 6 ครั้ง/สัปดาห์        | 76         | 12.67  |
|                                | 4) ทุกวัน                     | 20         | 3.33   |
|                                | 5) อื่น ๆ                     | 70         | 11.67  |
| การใช้บริการในช่วงการแพร่ระบาด | 1) เคย                        | 509        | 84.83  |
|                                | 2) ไม่เคย                     | 91         | 15.17  |
| วัตถุประสงค์การเดินทาง         | 1) ไปเรียน/ไปทำงาน            | 144        | 24.00  |
|                                | 2) ไปท่องเที่ยว               | 149        | 24.83  |
|                                | 3) ไปทำธุระส่วนตัว            | 162        | 27.00  |
|                                | 4) ไปซื้อของ                  | 82         | 13.67  |
|                                | 5) กลับบ้าน                   | 61         | 10.17  |
|                                | 6) อื่น ๆ                     | 2          | 0.33   |
| อายุเฉลี่ย                     | 35 ปี                         |            |        |

จากตารางที่ 1 เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ความถี่ และร้อยละของข้อมูลทั่วไปของผู้ใช้บริการรถไฟฟ้าระหว่างเมืองจำนวน 600 คน พบว่า กลุ่มตัวอย่างที่เป็นเพศหญิงจำนวน 305 คน (ร้อยละ 50.83) สถานภาพโสดจำนวน 325 คน (ร้อยละ 54.17) เป็นนักเรียน/นักศึกษาจำนวน 142 คน (ร้อยละ 23.67) มีรายได้ 5,001 - 10,000 บาทต่อเดือน จำนวน 161 คน (ร้อยละ 26.83) ใช้บริการ 1 - 2 ครั้ง/สัปดาห์ จำนวน 276 คน (ร้อยละ 46.00) รวมถึงเคยมีประสบการณ์ใช้บริการในช่วงการแพร่ระบาดโควิด-19 จำนวน 509 คน

(ร้อยละ 84.83) นอกจากนี้ยังพบว่า กลุ่มตัวอย่างส่วนใหญ่มีวัตถุประสงค์การเดินทางเพื่อไปทำธุระส่วนตัว จำนวน 162 คน (ร้อยละ 27.00) และมีอายุเฉลี่ย 35 ปี ตามลำดับ

## 2. ปัจจัยการวัดคุณภาพการให้บริการของรถไฟฟ้าระหว่างเมือง

เมทริกซ์เอกซ์กซ์ของแบบจำลองการวัดคุณภาพการให้บริการของรถไฟฟ้าระหว่างเมืองมีค่าเท่ากับ 24864.403 ( $df = 2346$ ,  $p < 0.001$ ) ซึ่งแตกต่างจากศูนย์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01 และมีความสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ค่าดัชนี Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) ซึ่งมีค่าเข้าใกล้ 1 ( $KMO = 0.925$ ) แสดงให้เห็นว่า เมทริกซ์สหสัมพันธ์ของตัวแปรสังเกตได้ไม่เป็นเมทริกซ์เอกซ์กซ์ ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่า KMO และ Bartlett's Test

| Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) | Bartlett's Test of Sphericity |      |        |
|--------------------------|-------------------------------|------|--------|
|                          | Chi-Square                    | df   | Sig.   |
| 0.923                    | 24864.403                     | 2346 | <0.001 |

เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ความสอดคล้องกลมกลืนของแบบจำลองการวัดคุณภาพการให้บริการของรถไฟฟ้าชานเมืองกับข้อมูลเชิงประจักษ์พบว่า แบบจำลองมีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี ( $\chi^2 = 3781.628$ ,  $df = 1359$ ,  $p < 0.001$ ) ซึ่งค่า Tucker-Lewis Index; TLI มีค่า 0.870 และค่า Comparative Fit Index; CFI มีค่า 0.876 มีความสอดคล้องกับข้อมูลเชิงประจักษ์ [8] นอกจากนี้ค่ารากของค่าเฉลี่ยกำลังสองของเศษเหลือในรูปคะแนนมาตรฐาน (Standard Root Mean Square Residual; SRMR) มีค่า 0.038 อยู่ระหว่าง 0 ถึง 1.00 ถ้ามีค่าต่ำกว่า 0.08 แสดงว่าโมเดลสอดคล้องกับข้อมูลเชิงประจักษ์ดี และรากของค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อนโดยประมาณ (Root Mean Square Error of Approximation; RMSEA) มีค่า 0.055 อยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 โมเดลมีความสอดคล้องกับข้อมูลเชิงประจักษ์ [9] - [10] ได้ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงยืนยันของแบบจำลองการวัดคุณภาพการให้บริการของรถไฟฟ้าระหว่างเมือง ประกอบด้วย ด้านพนักงาน (Crews) ด้านข้อมูลข่าวสาร (Information) กระบวนการและการบริการ (Services) ด้านสถานี (Terminals) และด้านยานพาหนะ (Vehicles) ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงยืนยันลำดับที่ 1 ของแบบจำลองการวัดคุณภาพการให้บริการของรถไฟฟ้าระหว่างเมือง

| ตัวแปร                                                            | องค์ประกอบ                                                                               | Loading | t-value | Error |
|-------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|---------|---------|-------|
| ด้านพนักงาน (Crews) (Cronbach's Alpha = 0.868 AVE=0.686 CR=0.877) |                                                                                          |         |         |       |
| C01                                                               | พนักงานให้บริการด้วยความรวดเร็ว กระฉับกระเฉง                                             | 0.677** | 28.732  | 0.024 |
| C02                                                               | พนักงานมีความรู้ความสามารถในการให้บริการ การให้ข้อมูล และการแจ้งเหตุ                     | 0.704** | 31.669  | 0.022 |
| C03                                                               | ความเพียงพอของจำนวนพนักงานในการให้บริการแต่ละสถานี                                       | 0.659** | 26.641  | 0.025 |
| C04                                                               | พนักงานแต่งกายสุภาพเรียบร้อย และให้บริการอย่างมีมารยาท                                   | 0.696** | 31.008  | 0.022 |
| C05                                                               | พนักงานมีความรู้ ความเข้าใจ ใส่ใจและเอาใจใส่ต่อผู้โดยสารทั่วไป และผู้โดยสารกลุ่มเปราะบาง | 0.665** | 27.518  | 0.024 |
| C06                                                               | เจ้าหน้าที่ดูแลความปลอดภัยอยู่ภายในสถานีรถไฟ                                             | 0.754** | 39.281  | 0.019 |
| C07                                                               | เจ้าหน้าที่ดูแลความปลอดภัยอยู่ภายในขบวนรถไฟ                                              | 0.691** | 30.125  | 0.023 |
| C08                                                               | เจ้าหน้าที่มีความรู้ในการปฐมพยาบาลเบื้องต้น เมื่อเกิดเหตุการณ์ที่เป็นอันตราย             | 0.642** | 25.328  | 0.025 |

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงยืนยันลำดับที่ 1 ของแบบจำลองการวัดคุณภาพการให้บริการของรถไฟระหว่างเมือง (ต่อ)

| ตัวแปร                                                                             | องค์ประกอบ                                                                                                                            | Loading | t-value | Error |
|------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|---------|-------|
| ด้านข้อมูลข่าวสาร (Information) (Cronbach's Alpha = 0.887 AVE=0.660 CR=0.863)      |                                                                                                                                       |         |         |       |
| I01                                                                                | ข้อมูลการเดินทางที่เป็นประโยชน์ต่อผู้โดยสาร                                                                                           | 0.703** | 32.04   | 0.022 |
| I02                                                                                | ข้อมูลการเดินทางที่เป็นประโยชน์ต่อผู้โดยสารกลุ่มเปราะบาง (กลุ่มคนพิการ)                                                               | 0.619** | 28.236  | 0.024 |
| I03                                                                                | มีคำแนะนำและข้อปฏิบัติตนเกี่ยวกับโรคระบาด (เอกสาร บุคลากร ป้ายประกาศหรืออื่น ๆ) อย่างชัดเจน                                           | 0.616** | 23.107  | 0.027 |
| I04                                                                                | ช่องทางการให้ข้อมูลที่ถูกต้องและเป็นจริง                                                                                              | 0.682** | 29.529  | 0.023 |
| I05                                                                                | ช่องทางการร้องเรียนการบริการที่น่าเชื่อถือ                                                                                            | 0.634** | 24.66   | 0.026 |
| I06                                                                                | มีมาตรการการดูแลผู้โดยสารกลุ่มเปราะบางแบบสากล                                                                                         | 0.722** | 34.135  | 0.021 |
| I07                                                                                | มีการใช้เทคโนโลยีลงทะเบียนการเข้า-ออกของผู้โดยสาร เพื่อติดตามภาวะการแพร่เชื้อโรค                                                      | 0.672** | 28.231  | 0.024 |
| I08                                                                                | มีแผนที่ ป้ายบอกทาง และสัญลักษณ์การเชื่อมต่อการเดินทาง ที่ชัดเจน                                                                      | 0.631** | 24.458  | 0.026 |
| ด้านกระบวนการและการบริการ (Services) (Cronbach's Alpha = 0.872 AVE=0.644 CR=0.733) |                                                                                                                                       |         |         |       |
| S01                                                                                | มีเจ้าหน้าที่ผู้โดยสารอัตโนมัติสำหรับผู้โดยสารทั่วไปและผู้โดยสารกลุ่มเปราะบาง                                                         | 0.597** | 22.131  | 0.027 |
| S02                                                                                | มีเส้นทางเดินทางไปยังจุดเชื่อมต่อการเดินทางสำหรับผู้โดยสารกลุ่มเปราะบาง เช่น แผ่นปูทางเท้าตลอดเส้นทางสำหรับผู้พิการทางสายตา และทางลาด | 0.633** | 25.191  | 0.025 |
| S04                                                                                | สามารถซื้อตั๋วรถไฟได้หลากหลายช่องทาง                                                                                                  | 0.713** | 34.331  | 0.021 |
| S05                                                                                | ขั้นตอน/วิธีการซื้อตั๋วโดยสาร สะดวกและเข้าใจง่าย                                                                                      | 0.701** | 32.674  | 0.021 |
| S06                                                                                | สามารถจองตั๋วโดยสารล่วงหน้าได้                                                                                                        | 0.689** | 31.111  | 0.022 |
| S07                                                                                | สามารถรู้สถานะขบวนรถไฟโดยสารได้แบบเรียลไทม์หรือตรวจสอบเวลาเดินทางจริงได้บนเว็บไซต์/แอปพลิเคชัน                                        | 0.648** | 26.524  | 0.024 |
| S08                                                                                | มีมาตรการการดูแลผู้โดยสารในกรณีขบวนรถล่าช้า                                                                                           | 0.583** | 21.106  | 0.028 |
| S09                                                                                | มีการตรวจวัดอุณหภูมิร่างกายก่อนเข้าใช้บริการในสถานีรถไฟ ในสถานการณ์แพร่ระบาดเชื้อโรค                                                  | 0.590** | 21.694  | 0.027 |
| S10                                                                                | มาตรการป้องกัน ดูแล ผู้โดยสาร เมื่อเกิดสถานการณ์ที่เป็นอันตราย เช่น อาชญากรรม การคุกคามทางเพศ                                         | 0.654** | 27.157  | 0.024 |
| S13                                                                                | กระบวนการหยุดรถ-ปล่อยรถมีความปลอดภัยกับผู้โดยสาร                                                                                      | 0.784** | 47.239  | 0.017 |
| S14                                                                                | ตารางเวลาการเดินทางครอบคลุมความต้องการของผู้โดยสาร                                                                                    | 0.688** | 30.859  | 0.022 |
| S15                                                                                | ความตรงต่อเวลาของการเดินทาง                                                                                                           | 0.617** | 23.701  | 0.026 |
| S17                                                                                | ระยะเวลาในการเดินทางขณะอยู่บนขบวนรถไฟที่เหมาะสม                                                                                       | 0.564** | 19.743  | 0.029 |
| S19                                                                                | อัตราค่าโดยสารมีการคำนวณอย่างเป็นมาตรฐานสำหรับผู้โดยสารกลุ่มเปราะบาง (กลุ่มคนพิการ)                                                   | 0.718** | 34.781  | 0.021 |
| S20                                                                                | อัตราค่าโดยสารเหมาะสมสอดคล้องกับสภาพเศรษฐกิจหรือในสถานการณ์แพร่ระบาดโควิด                                                             | 0.656** | 27.193  | 0.024 |



ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงยืนยันลำดับที่ 1 ของแบบจำลองการวัดคุณภาพการให้บริการของรถไฟระหว่างเมือง (ต่อ)

| ตัวแปร                                                                | องค์ประกอบ                                                                                                                     | Loading | t-value | Error |
|-----------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|---------|-------|
| S21                                                                   | ความเหมาะสมของราคาค่าโดยสารกับคุณภาพที่ได้รับ                                                                                  | 0.674** | 29.263  | 0.023 |
| S24                                                                   | โปรโมชั่นตั๋วเดินทางสำหรับผู้โดยสารประจำ ผู้โดยสารกลุ่มเปราะบาง                                                                | 0.615** | 23.556  | 0.026 |
| ด้านสถานี (Terminals) (Cronbach's Alpha = 0.827 AVE=0.636 CR=0.874)   |                                                                                                                                |         |         |       |
| T01                                                                   | ความสะดวกและเป็นระเบียบเรียบร้อยของสถานี                                                                                       | 0.748** | 38.397  | 0.019 |
| T02                                                                   | ที่นั่ง ที่พัก บริเวณสถานีรถไฟค่านึงถึงระยะทางเพียงพอต่อผู้โดยสาร                                                              | 0.748** | 38.079  | 0.02  |
| T03                                                                   | ทำความสะอาดเข้าชื้อบริเวณสถานีอย่างสม่ำเสมอใน<br>สถานการณ์แพร่ระบาดเชื้อโรค                                                    | 0.775** | 43.445  | 0.018 |
| T04                                                                   | ร้านจำหน่ายอาหาร เครื่องดื่ม และสินค้า OTOP บริเวณสถานีรถไฟ                                                                    | 0.569** | 21.306  | 0.028 |
| T05                                                                   | อาคารจอดรถเพียงพอสำหรับผู้มาใช้บริการ                                                                                          | 0.512** | 16.227  | 0.032 |
| T06                                                                   | ช่องจอดรถสำหรับผู้มาใช้บริการกลุ่มเปราะบาง                                                                                     | 0.620** | 23.46   | 0.026 |
| T08                                                                   | กล้องวงจรปิดครอบคลุมพื้นที่บริเวณสถานีรถไฟ                                                                                     | 0.520** | 16.677  | 0.031 |
| T10                                                                   | สิ่งอำนวยความสะดวก เช่น ลิฟต์ ทางเลื่อน ที่นั่ง ที่พัก<br>บริเวณสถานีรถไฟเอื้อสำหรับผู้โดยสารกลุ่มเปราะบาง                     | 0.519** | 16.683  | 0.031 |
| T15                                                                   | มีระบบขนส่งสาธารณะรองรับบริเวณสถานีรถไฟ เช่น รถสามล้อ,<br>มอเตอร์ไซด์รับจ้าง, รถแท็กซี่, รถตุ้ และรถโดยสารสาธารณะ เป็นต้น      | 0.698** | 31.245  | 0.022 |
| T16                                                                   | สถานที่ตั้งของสถานีรถไฟ อยู่ในทำเลที่มีความสะดวกต่อการเดินทาง<br>เชื่อมต่อการเดินทางรูปแบบอื่น                                 | 0.647** | 25.79   | 0.025 |
| ด้านยานพาหนะ (Vehicles) (Cronbach's Alpha = 0.841 AVE=0.639 CR=0.886) |                                                                                                                                |         |         |       |
| V01                                                                   | ขบวนรถไฟโดยสารมีความทันสมัย สะอาดและเป็นระเบียบเรียบร้อย                                                                       | 0.639** | 25.568  | 0.025 |
| V02                                                                   | ผู้โดยสารแยกตามกลุ่มผู้โดยสาร เช่น ผู้โดยสารสำหรับผู้โดยสารกลุ่มเปราะบาง<br>และผู้โดยสารที่มีเด็กร่วมเดินทาง เป็นต้น           | 0.618** | 23.657  | 0.026 |
| V03                                                                   | จัดให้มีห้องสุขาสำหรับผู้โดยสารบนขบวนรถไฟ                                                                                      | 0.596** | 21.954  | 0.027 |
| V05                                                                   | ที่นั่งหรือที่นอนบนขบวนรถไฟมีความสะดวกสบายและเอื้อต่อ<br>ผู้โดยสารกลุ่มเปราะบาง                                                | 0.636** | 25.071  | 0.025 |
| V06                                                                   | ที่นั่งหรือที่นอนในขบวนรถไฟค่านึงถึงระยะทางของผู้โดยสาร<br>ในสถานการณ์แพร่ระบาดเชื้อโรค                                        | 0.577** | 20.475  | 0.028 |
| V08                                                                   | ป้ายบอกเส้นทางและจุดจอดรถขณะเดินทางบนขบวนรถไฟ                                                                                  | 0.777** | 45.831  | 0.017 |
| V09                                                                   | ความสะดวกของขบวนรถไฟ เช่น ที่นั่ง ห้องน้ำ และทางเดิน                                                                           | 0.702** | 32.775  | 0.021 |
| V10                                                                   | ความเหมาะสมของอุณหภูมิภายในตัวรถไฟ                                                                                             | 0.674** | 29.315  | 0.023 |
| V11                                                                   | มีการจัดเตรียมหน้ากาก เจลล้างมือ รวมทั้งตู้ฆ่าเชื้อโรคสำหรับผู้โดยสาร                                                          | 0.582** | 20.997  | 0.028 |
| V12                                                                   | ความปลอดภัยในระหว่างการเดินทาง                                                                                                 | 0.701** | 32.638  | 0.021 |
| V13                                                                   | ขบวนรถไฟมีอุปกรณ์ ระบบป้องกัน ดูแลผู้โดยสาร เมื่อเกิดสถานการณ์<br>ที่เป็นอันตรายสำหรับผู้โดยสารทั่วไปและผู้โดยสารกลุ่มเปราะบาง | 0.619** | 23.831  | 0.026 |

ตารางที่ 3 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงยืนยันลำดับที่ 1 ของแบบจำลองการวัดคุณภาพการให้บริการของรถไฟฟ้าระหว่างเมือง พบว่า ตัวชี้วัดด้านคุณภาพการให้บริการ ประกอบด้วย ด้านพนักงาน (Cre) ด้านข้อมูลข่าวสาร (Inf) กระบวนการและการบริการ (Ser) ด้านสถานี (Ter) และด้านยานพาหนะ (Veh) จำนวน 54 ตัว โดยมีรายละเอียดดังนี้

ด้านพนักงาน (Crews) จำนวน 8 ตัว มีค่าน้ำหนักองค์ประกอบมาตรฐานระหว่าง 0.642 - 0.754 สามารถยืนยันความเป็นองค์ประกอบของคุณภาพการให้บริการด้านพนักงานได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01 ประกอบด้วย พนักงานให้บริการด้วยความรวดเร็ว กระฉับกระเฉง (C01) พนักงานมีความรู้ความสามารถในการให้บริการ การให้ข้อมูล และการแจ้งเหตุ (C02) ความเพียงพอของจำนวนพนักงานในการให้บริการแต่ละสถานี (C03) พนักงานแต่งกายสุภาพเรียบร้อย และให้บริการอย่างมีมารยาท (C04) พนักงานมีความรู้ ความเข้าใจ ใส่ใจและเอาใจใส่ต่อผู้โดยสารทั่วไปและผู้โดยสารกลุ่มเปราะบาง (C05) เจ้าหน้าที่ดูแลความปลอดภัยอยู่ภายในสถานีรถไฟ (C06) เจ้าหน้าที่ดูแลความปลอดภัยอยู่ภายในขบวนรถไฟ (C07) และเจ้าหน้าที่มีความรู้ในการปฐมพยาบาลเบื้องต้น เมื่อเกิดเหตุการณ์ที่เป็นอันตราย (C08) ซึ่งเจ้าหน้าที่ดูแลความปลอดภัยอยู่ภายในสถานีรถไฟ (C06) มีค่าน้ำหนักองค์ประกอบมาตรฐานมากที่สุด คือ 0.754

ด้านข้อมูลข่าวสาร (Information) จำนวน 8 ตัว มีค่าน้ำหนักองค์ประกอบมาตรฐานระหว่าง 0.613 - 0.722 สามารถยืนยันความเป็นองค์ประกอบของคุณภาพการให้บริการด้านพนักงานได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01 ประกอบด้วย ข้อมูลการเดินทางที่เป็นประโยชน์ต่อผู้โดยสาร (I01) ข้อมูลการเดินทางที่เป็นประโยชน์ต่อผู้โดยสารกลุ่มเปราะบาง (I02) มีคำแนะนำและข้อปฏิบัติตนเกี่ยวกับโรคระบาด (เอกสาร บุคลากร ป้ายประกาศหรืออื่น ๆ) อย่างชัดเจน (I03) ช่องทางการให้ข้อมูลที่ถูกต้องและเป็นจริง (I04) ช่องทางการร้องเรียนการบริการที่น่าเชื่อถือ (I05) มีมาตรการการดูแลผู้โดยสารกลุ่มเปราะบางแบบสากล (I06) มีการใช้เทคโนโลยีลงทะเบียนการเข้า-ออกของผู้โดยสาร เพื่อติดตามการแพร่เชื้อโรค (I07) และมีแผนที่ป้ายบอกทาง และสัญลักษณ์การเชื่อมต่อการเดินทางที่ชัดเจน (I08) ซึ่งมีมาตรการการดูแลผู้โดยสารกลุ่มเปราะบางแบบสากล (I06) มีค่าน้ำหนักองค์ประกอบมาตรฐานมากที่สุด คือ 0.722

ด้านกระบวนการและการบริการ (Services) จำนวน 17 ตัว มีค่าน้ำหนักองค์ประกอบมาตรฐานระหว่าง 0.564 - 0.784 สามารถยืนยันความเป็นองค์ประกอบของคุณภาพการให้บริการด้านพนักงานได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01 ประกอบด้วย มีเจ้าหน้าที่ผู้โดยสารอัตโนมัติสำหรับผู้โดยสารทั่วไปและผู้โดยสารกลุ่มเปราะบาง (S01) มีเส้นทางเดินทางไปยังจุดเชื่อมต่อการเดินทางสำหรับผู้โดยสารกลุ่มเปราะบาง เช่น แผ่นปูทางเท้าตลอดเส้นทางสำหรับผู้พิการทางสายตา และทางลาด (S02) สามารถซื้อตั๋วรถไฟได้หลากหลายช่องทาง (S04) ขั้นตอน/วิธีการซื้อตั๋วโดยสาร สะดวกและเข้าใจง่าย (S05) สามารถจองตั๋วโดยสารล่วงหน้าได้ (S06) สามารถรู้สถานะขบวนรถไฟโดยสารได้แบบเรียลไทม์หรือตรวจสอบเวลาเดินทางตามเวลาจริงได้บนเว็บไซต์/แอปพลิเคชัน (S07) มีมาตรการการดูแลผู้โดยสารในกรณีขบวนรถล่าช้า (S08) มีการตรวจวัดอุณหภูมิร่างกายก่อนเข้าใช้บริการในสถานีรถไฟในสถานการณ์แพร่ระบาดเชื้อโรค (S09) มาตรการป้องกัน ดูแล ผู้โดยสารเมื่อเกิดสถานการณ์ที่เป็นอันตราย เช่น อาชญากรรม การคุกคามทางเพศ (S10) กระบวนการหยุดรถ-ปล่อยรถมีความปลอดภัยกับผู้โดยสาร (S13) ตารางเวลาการเดินทางครอบคลุมความต้องการของผู้โดยสาร (S14) ความตรงต่อเวลาของการเดินทาง (S15) ระยะเวลาในการเดินทางขณะอยู่บนขบวนรถไฟที่เหมาะสม (S17) อัตราค่าโดยสารมีการคำนวณอย่างเป็นมาตรฐานสำหรับผู้โดยสารกลุ่มเปราะบาง (S19) อัตราค่าโดยสารเหมาะสมสอดคล้องกับสภาพเศรษฐกิจหรือในสถานการณ์แพร่ระบาดโควิด (S20) ความเหมาะสมของราคาค่าโดยสารกับคุณภาพที่ได้รับ (S21) และโปรโมชั่นตั๋วเดินทางสำหรับผู้โดยสารประจำ ผู้โดยสารกลุ่มเปราะบาง (S24) ซึ่งกระบวนการหยุดรถ-ปล่อยรถมีความปลอดภัยกับผู้โดยสาร (S13) มีค่าน้ำหนักองค์ประกอบมาตรฐานมากที่สุด คือ 0.784

ด้านสถานี (Terminals) จำนวน 10 ตัว มีค่าน้ำหนักองค์ประกอบมาตรฐานระหว่าง 0.512 - 0.775 สามารถยืนยันความเป็นองค์ประกอบของคุณภาพการให้บริการด้านพนักงานได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่

ระดับ 0.01 ประกอบด้วย ความสะอาดและเป็นระเบียบเรียบร้อยของสถานี (T01) ที่นั่ง ที่พัก บริเวณสถานีรถไฟ คำนึงถึงระยะทางเพียงพอต่อผู้โดยสาร (T02) ทำความสะอาดฆ่าเชื้อบริเวณสถานีอย่างสม่ำเสมอในสถานการณ์แพร่ระบาดเชื้อโรค (T03) ร้านจำหน่ายอาหาร เครื่องดื่ม และสินค้า OTOP บริเวณสถานีรถไฟ (T04) อาคารจอดรถเพียงพอสำหรับผู้มาใช้บริการ (T05) ช่องจอดรถสำหรับผู้มาใช้บริการกลุ่มเปราะบาง (T06) กล้องวงจรปิดครอบคลุมพื้นที่บริเวณสถานีรถไฟ (T08) สิ่งอำนวยความสะดวก เช่น ลิฟต์ ทางเลื่อน ที่นั่ง ที่พักบริเวณสถานีรถไฟเอื้อสำหรับผู้พิการ (T10) มีระบบขนส่งสาธารณะรองรับบริเวณสถานีรถไฟ เช่น รถสามล้อ มอเตอร์ไซด์รับจ้าง รถแท็กซี่ รถตุ๊ก และรถโดยสารสาธารณะ เป็นต้น (T15) และสถานที่ตั้งของสถานีรถไฟ อยู่ในทำเลที่มีความสะดวกต่อการเดินทางเชื่อมต่อการเดินทางรูปแบบอื่น (T16) ซึ่งทำความสะอาดฆ่าเชื้อบริเวณสถานีอย่างสม่ำเสมอในสถานการณ์แพร่ระบาดเชื้อโรค (T03) มีค่าน้ำหนักองค์ประกอบมาตรฐานมากที่สุด คือ 0.775

ด้านยานพาหนะ (Vehicles) จำนวน 11 ตัว มีค่าน้ำหนักองค์ประกอบมาตรฐานระหว่าง 0.577 - 0.777 สามารถยืนยันความเป็นองค์ประกอบของคุณภาพการให้บริการด้านพนักงานได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01 ประกอบด้วย ขบวนรถไฟโดยสารมีความทันสมัย สะอาดและเป็นระเบียบเรียบร้อย (V01) ผู้โดยสารแยกตามกลุ่มผู้โดยสาร เช่น ผู้โดยสารสำหรับผู้พิการ และผู้โดยสารที่มีเด็กร่วมเดินทาง เป็นต้น (V02) จัดให้มีห้องสุขาบุหรีแยกบนขบวนรถไฟ (V03) ที่นั่งหรือที่นอนบนขบวนรถไฟมีความสะดวกสบายและเอื้อต่อผู้โดยสารกลุ่มเปราะบาง (V05) ที่นั่งหรือที่นอนในขบวนรถไฟคำนึงถึงระยะทางของผู้โดยสารในสถานการณ์แพร่ระบาดเชื้อโรค (V06) ป้ายบอกเส้นทางและจุดจอดรถขณะเดินทางบนขบวนรถไฟ (V08) ความสะอาดของขบวนรถไฟ เช่น ที่นั่ง ห้องน้ำ และทางเดิน (V09) ความเหมาะสมของอุณหภูมิภายในตัวรถไฟ (V10) มีการจัดเตรียมหน้ากาก เจลล้างมือ รวมทั้งคู่มือเชื้อโรคสำหรับผู้โดยสาร (V11) ความปลอดภัยในระหว่างการเดินทาง (V12) และขบวนรถไฟมีอุปกรณ์ ระบบป้องกัน ดูแลผู้โดยสาร เมื่อเกิดสถานการณ์ที่เป็นอันตรายสำหรับผู้โดยสารทั่วไปและผู้โดยสารกลุ่มเปราะบาง (V13) ซึ่งป้ายบอกเส้นทางและจุดจอดรถขณะเดินทางบนขบวนรถไฟ (V08) มีค่าน้ำหนักองค์ประกอบมาตรฐานมากที่สุด คือ 0.777

ตัวชี้วัดทั้งหมดของแบบจำลองการวัดคุณภาพการให้บริการของรถไฟระหว่างเมือง มีค่าน้ำหนักองค์ประกอบมาตรฐานมากกว่า 0.5 ถือว่ายอมรับได้ [7] แต่ถ้ามียาค่ามากกว่า 0.6 ขึ้นไปถือว่าดี [11] และเมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยความแปรปรวนที่ถูกสกัดได้ (AVE) มีค่า 0.636 - 0.686 มีค่ามากกว่า 0.5 แสดงให้เห็นว่าเป็นองค์ประกอบที่มีความน่าเชื่อถือสูง และมีค่าความเที่ยงรวม (CR) มีค่า 0.733 - 0.886 มีค่ามากกว่า 0.5 [12] กล่าวได้ว่า องค์ประกอบด้านคุณภาพการให้บริการ ประกอบด้วยตัวชี้วัดที่ดีมีความเชื่อมั่นสอดคล้องภายในองค์ประกอบ

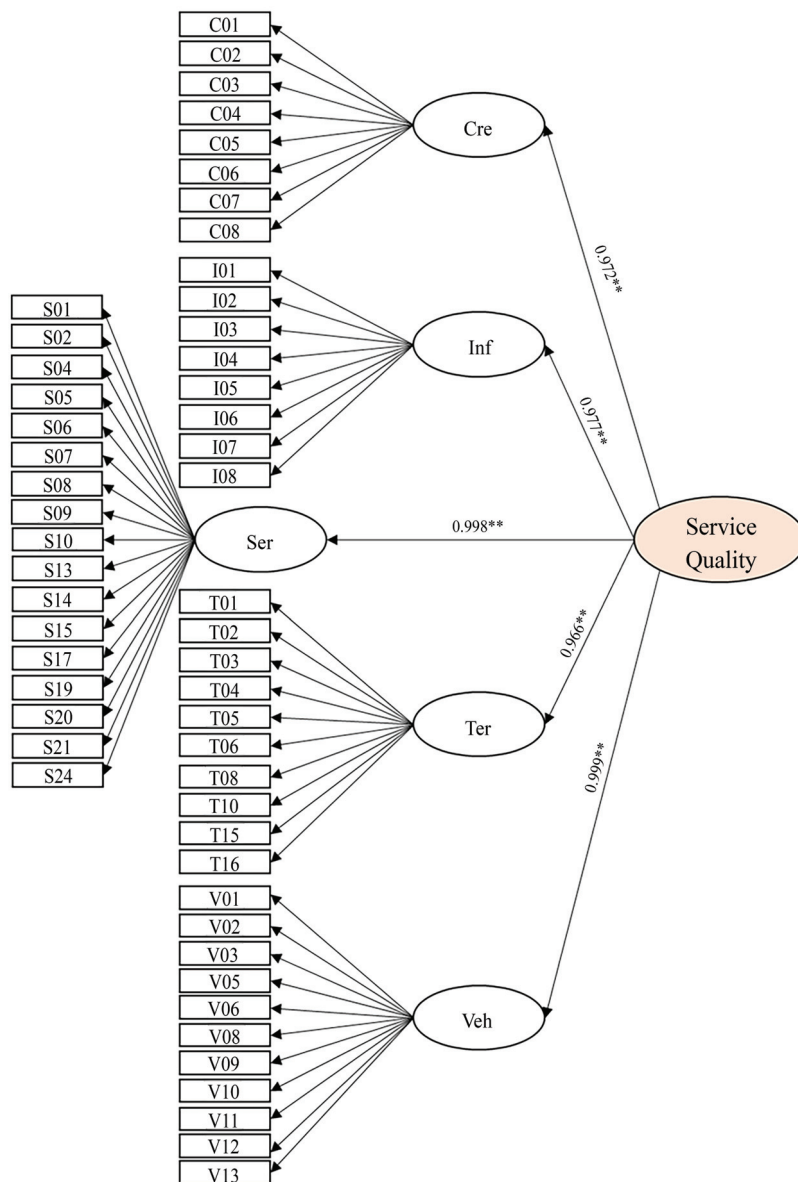
ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงยืนยันลำดับที่ 2 ของแบบจำลองการวัดคุณภาพการให้บริการของรถไฟระหว่างเมือง

| ตัวแปร | องค์ประกอบ            | Loading | t-value | Error |
|--------|-----------------------|---------|---------|-------|
| Cre    | พนักงาน               | 0.972** | 128.159 | 0.008 |
| Inf    | ข้อมูลข่าวสาร         | 0.977** | 136.873 | 0.007 |
| Ser    | กระบวนการและการบริการ | 0.998** | 244.622 | 0.004 |
| Ter    | สถานี                 | 0.966** | 133.034 | 0.007 |
| Veh    | ยานพาหนะ              | 0.999** | 194.223 | 0.005 |

จากตารางที่ 4 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงยืนยันลำดับที่ 2 ของแบบจำลองการวัดคุณภาพการให้บริการของรถไฟระหว่างเมืองพบว่า ตัวชี้วัดด้านคุณภาพการให้บริการ ประกอบด้วย ด้านพนักงาน (Cre)

ด้านข้อมูลข่าวสาร (Inf) ด้านกระบวนการและการบริการ (Ser) ด้านสถานี (Ter) และด้านยานพาหนะ (Veh) สามารถยืนยันความเป็นองค์ประกอบของตัวชี้วัดด้านคุณภาพการให้บริการของแบบจำลองการวัดคุณภาพการให้บริการของรถไฟระหว่างเมืองได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01 โดยมีค่าน้ำหนักองค์ประกอบมาตรฐานระหว่าง 0.972 - 0.999 ซึ่งด้านยานพาหนะ (Veh) มีค่าน้ำหนักองค์ประกอบมาตรฐานมากที่สุด คือ 0.999 ซึ่งตัวชี้วัดทั้งหมดของแบบจำลองการวัดคุณภาพการให้บริการของรถไฟระหว่างเมือง มีค่าน้ำหนักองค์ประกอบมาตรฐานมากกว่า 0.5 ถือว่ายอมรับได้ [7] แต่ถ้ามียค่ามากกว่า 0.6 ขึ้นไปถือว่าดี [11] และเมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยความแปรปรวนที่ถูกสกัดได้ (AVE) เท่ากับ 0.982 มีค่ามากกว่า 0.5 แสดงให้เห็นว่าเป็นองค์ประกอบที่มีความน่าเชื่อถือสูง และมีค่าความเที่ยงรวม (CR) เท่ากับ 0.993 มีค่ามากกว่า 0.5 [12] กล่าวได้ว่าองค์ประกอบด้านคุณภาพการให้บริการ ประกอบด้วยตัวชี้วัดที่ดีที่มีความเชื่อมั่นสอดคล้องภายในองค์ประกอบ

เมื่อนำผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงยืนยันของแบบจำลองการวัดคุณภาพการให้บริการของรถไฟระหว่างเมืองไปเขียนแบบจำลองที่แสดงผลในรูปของแผนภาพ (Diagram) ได้ดังรูปที่ 2 คือ คุณภาพการให้บริการของรถไฟฟ้าชานเมืองวัดได้จากตัวแปรแฝง 5 ตัว 54 ตัวชี้วัด



รูปที่ 2 แบบจำลองการวัดคุณภาพการให้บริการของรถไฟระหว่างเมือง



## สรุปผลและการอภิปรายผล

ระบบขนส่งทางรถไฟถือว่าเป็นระบบขนส่งที่มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการคมนาคมของประเทศ เนื่องจากเป็นระบบการขนส่งที่มีความปลอดภัยสูง ราคาต่ำ สะดวกสบาย และตรงต่อเวลา [13] ดังนั้นการพัฒนาด้านการให้บริการขนส่งทางรถไฟนั้นจึงถือเป็นประเด็นสำคัญหลักอย่างหนึ่ง สำหรับการพัฒนาระบบการขนส่งทางรางรถไฟให้มีประสิทธิภาพ ซึ่งวัตถุประสงค์ของการศึกษานี้เพื่อศึกษาปัจจัยด้านคุณภาพการให้บริการรถไฟภายใต้การดำเนินชีวิตรูปแบบใหม่ และใช้เพื่อเป็นแนวทางสำหรับการวางแผนการบริการให้ตอบสนองต่อความต้องการของผู้โดยสารทุกกลุ่ม จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลของกลุ่มตัวอย่างพบว่า กลุ่มตัวอย่างมีทั้งเพศชายและเพศหญิงส่วนใหญ่มีรายได้ 5,001 - 10,000 บาทต่อเดือน มีวัตถุประสงค์การเดินทางเพื่อไปทำธุระส่วนตัว รูปแบบการเดินทางเข้าถึงสถานีรถไฟด้วยรถจักรยานยนต์เป็นส่วนใหญ่ และมีค่าใช้จ่ายในการเดินทางด้วยรถไฟเฉลี่ย 82.54 บาท/เที่ยว เมื่อพิจารณาความคาดหวังการให้บริการ 5 ด้านของกลุ่มตัวอย่าง พบว่า ปัจจัยหลักความคาดหวังการบริการด้านยานพาหนะมีระดับความคาดหวังมากที่สุด รองลงมาคือ ด้านกระบวนการและการบริการ ด้านข้อมูลข่าวสาร ด้านพนักงาน และด้านสถานี ตามลำดับ ซึ่งปัจจัยภายในที่มีความสำคัญของคุณภาพการให้บริการ ได้แก่ 1) ป้ายบอกเส้นทางและจุดจอดรถขณะเดินทางบนขบวนรถไฟ 2) กระบวนการหยุดรถและปล่อยรถมีความปลอดภัยต่อผู้โดยสาร 3) มีมาตรการดูแลผู้โดยสารกลุ่มเปราะบางแบบสากล 4) ความสะอาดของขบวนรถไฟ เช่น ที่นั่งห้องน้ำ และทางเดิน อย่างสม่ำเสมอ และ 5) มีความปลอดภัยในระหว่างการเดินทาง ซึ่งแตกต่างจากการศึกษาในอดีตที่คุณภาพการบริการวัดจากด้านข้อมูลข่าวสารมากที่สุด [14] - [17] ปัจจัยภายในที่มีผลต่อคุณภาพการให้บริการสูงสุด คือ มีการระบุอัตราค่าโดยสารที่ชัดเจน และมีการจัดตารางเวลาเดินรถที่ชัดเจน สอดคล้องกับการศึกษาก่อนหน้านี้พบว่า การให้ข้อมูลเกี่ยวกับรถไฟอย่างถูกต้องและการปรับปรุงข้อมูลให้ทันสมัยเป็นปัจจัยสำคัญในการตอบสนองต่อความต้องการของผู้โดยสารหรือผู้ใช้บริการระบบขนส่งทางราง [18] อีกทั้งยังเห็นได้ว่าในปัจจุบันผู้โดยสารให้ความสำคัญกับผู้โดยสารกลุ่มเปราะบางและมาตรการการดูแลความสะอาดมากยิ่งขึ้น ดังนั้น ผู้ให้บริการรถไฟควรดำเนินการจัดการข้อมูลการเดินทาง ป้ายบอกทาง และสื่อประชาสัมพันธ์ต่าง ๆ เพื่ออำนวยความสะดวกแก่ผู้ใช้บริการทุกกลุ่ม ควรจัดสรรเจ้าหน้าที่รักษาความปลอดภัยในพื้นที่สถานีเพื่อป้องกันการเกิดอาชญากรรม และจัดระเบียบการขึ้นลงรถบริเวณชานชาลา รวมถึงจัดให้มีการทำความสะอาดบริเวณสถานีอย่างสม่ำเสมอตามตารางเวลาที่กำหนด

## กิตติกรรมประกาศ

ได้รับเงินอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์วิจัยและนวัตกรรม และกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม ปีงบประมาณ 2566 เลขที่สัญญา 179279

## References

- [1] Anantapak, V. (2011). **A Study of Travelers' Attitudes Towards Public Transport Service: A Case Study of Amnatcharoen**. M. Eng. Institute of Engineering, Suranaree University of Technology
- [2] Pornpanuwich, C. (1997). **People's Expectations Regarding the Role of Officials in Managing Local Natural Resources: Case Study of Phrae Province**. M. A. Faculty of Environment and Resource Studies. Mahidol University
- [3] Fenton, P. (2017). Sustainable Mobility in the Low Carbon City: Digging Up the Highway in Odense, Denmark. **Sustainable Cities and Society**. Vol. 29, pp. 203-210. DOI: 10.1016/j.scs.2016.11.006

- [4] Wiratchai, N. (1999). **Lisrel Model: Analytical Statistics for Research**. Bangkok. Chulalongkorn University Press
- [5] Likert, R. (1932). **A Technique for the Measurement of Attitudes**. Archives of Psychology
- [6] Kanchanawasri, S. (2009). **Traditional Testing Theory**. Bangkok, Chulalongkorn University Press
- [7] Prentice, P. and Publishing, H. (2010). **Advanced Diagnostics for Multiple Regression: a Supplement to Multivariate Data Analysis Multivariate Data Analysis**. Computer Science, Mathematics
- [8] Lee, S. C., Tsai, C. H., Lin, Y. C., Li, H. J., Jiang, D. R., Fu, I. N., and Chen, K. L. (2021). Factorial Validity of the Theory of Mind Inventory-2 in Children with Autism Spectrum Disorder. **Autism Research**. Vol. 14, No. 11, pp. 2424-2431. DOI: 10.1002/aur.2581
- [9] Bollen, K. A. and Long, J. S. (1993). **Testing Structural Equation Models**. Sage Publications, Inc.
- [10] Pavlov, G., Shi, D., and Maydeu-Olivares, A. (2020). **How to Use Item Desirability Ratings in Constructing Forced-Choice Tests [Poster]**. Society for Industrial and Organizational Psychology Annual Conference, Austin, TX, United States
- [11] Kline, R. B. (2004). **Beyond Significance Testing: Reforming Data Analysis Methods in Behavioral Research**. American Psychological Association. DOI: 10.1037/10693-000
- [12] Hair, J. F., Gabriel, M., and Patel, V. (2014). AMOS Covariance-Based Structural Equation Modeling (CB-SEM): Guidelines on its Application as a Marketing Research Tool. **Brazilian Journal of Marketing**. Vol. 13, No. 2. DOI:10.5585/remark.v13i2.2718
- [13] Lee, W. -H., Yen, L. -H., and Chou, C.-M. (2016). A Delay Root Cause Discovery and Timetable Adjustment Model for Enhancing the Punctuality of Railway Services. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**. Vol. 73, pp. 49-64. DOI: 10.1016/j.trc.2016.10.009
- [14] Losada-Rojas, L. L., Gkartzonikas, C., Pyrialakou, V. D., and Gkritza, K. (2019). Exploring Intercity Passengers' Attitudes and Loyalty to Intercity Passenger Rail: Evidence from an On-Board Survey. **Transport Policy**. No. 73, pp. 71-83. DOI: 10.1016/j.tranpol.2018.10.011
- [15] Wonglakorn, N., Ratanavaraha, V., and Karoonsoontawong, A., and Jomnonkwao, S. (2021). Exploring Passenger Loyalty and Related Factors for Urban Railways in Thailand. **Sustainability**. Vol. 13, Issue 10, Article 5517. DOI: 10.3390/su13105517
- [16] Wonglakorn, N., Chantaratang, A., Suksiripattanapong, C., Na Sritha, K., Aunphoklang, W., Ninjinda, N., and Keerakittisakul, W. (2023). The Development of Service Metrics Indicators of a Public Transportation Service Case Study: Intercity Trains in Nakhon Ratchasima Province, Thailand. **Sustainability**. Vol. 15, Issue 15, Article 11739. DOI: 10.3390/su151511739
- [17] Farazi, N. P., Murshed, M. N., and Hadiuzzaman, M. (2022). Application of Machine Learning to Investigate Heterogeneity in Users' Perception of Intercity Train Service Quality in Developing Countries. **Case Studies on Transport Policy**. Vol. 10, No. 1, pp. 227-238. DOI:10.1016/j.cstp.2021.12.004
- [18] Ibrahim, A. N. H., Borhan, M. N., Md Yusoff, N. I., and Ismail, A. (2020). Rail-Based Public Transport Service Quality and User Satisfaction - A Literature Review. **Promet-Traffic & Transportation**. Vol. 32, No. 3, pp. 423-435. DOI: 10.7307/ptt.v32i3.3270

ผลเฉลยของสมการไดโอแฟนไทน์  $\frac{1^4}{v_1} + \frac{2^4}{v_2} + \frac{3^4}{v_3} + \dots + \frac{k^4}{v_k} = 1$

The Solutions of Diophantine Equation  $\frac{1^4}{v_1} + \frac{2^4}{v_2} + \frac{3^4}{v_3} + \dots + \frac{k^4}{v_k} = 1$

พัชรา ม่วงการ<sup>1</sup> จักรพันธ์ จันทโสภา<sup>1</sup> และชลธิศ เสือนุ่ม<sup>1\*</sup>

Patchara Muangkarn<sup>1</sup> Jakkraphan Janthasopha<sup>1</sup> and Cholatis Suanoom<sup>1\*</sup>

*Received: March 15, 2024; Revised: April 26, 2024; Accepted: April 29, 2024*

## บทคัดย่อ

ในบทความนี้ เราแนะนำผลเฉลยของสมการไดโอแฟนไทน์รูปแบบ  $\frac{1^4}{v_1} + \frac{2^4}{v_2} + \frac{3^4}{v_3} + \dots + \frac{k^4}{v_k} = 1$  เมื่อ  $v_1$  เป็น

จำนวนเต็มบวก โดยที่  $2 \leq v_1 < v_2 < v_3 < \dots < v_k$  และ  $k = v_1$  โดยผลการวิจัยพบว่า จะมีเพียง 1 ผลเฉลย เมื่อ  $v_1 = 2$  จะมีเพียง 3 ผลเฉลยเมื่อ  $v_1 = 3$  และจะมีผลเฉลยทั่วไปอย่างน้อย 4 ผลเฉลยเมื่อ  $v_1 \geq 4$

คำสำคัญ : สมการไดโอแฟนไทน์; ผลเฉลยทั่วไปของสมการ; สมการเชิงเส้น

<sup>1</sup> คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร

<sup>1</sup> Faculty Science and Technology, Kamphaeng Phet Rajabhat University

\* Corresponding Author; Tel. 06 1416 1559, E - mail: cholatis.suanoom@gmail.com

## Abstract

In this paper, we introduce solutions of the Diophantine equation on the following from:

$$\frac{1^4}{v_1} + \frac{2^4}{v_2} + \frac{3^4}{v_3} + \dots + \frac{k^4}{v_k} = 1 \text{ where } v_1 \text{ are positive integer such that } 2 \leq v_1 < v_2 < v_3 < \dots < v_k \text{ and } k = v_1.$$

The results show that there will be only 1 solution when  $v_1 = 2$ , there will be only 3 solutions when  $v_1 = 3$ , and there will be at least 4 partial solutions when  $v_1 \geq 4$ .

**Keywords:** Diophantine Equation; General Solutions of Equations; Linear Equation

## บทนำ

สมการไดโอแฟนไทน์ เป็นสมการที่สนใจผลเฉลยเป็นจำนวนเต็มเท่านั้น อาจจะเป็นสมการดีกรีมากกว่าหนึ่ง อาจจะมีตัวแปรเดียวหรือหลายตัวแปร หรืออาจเป็นระบบสมการที่กำหนดตัวแปรมากกว่าจำนวนสมการ และเป็นสาขาหนึ่งในการศึกษาทฤษฎีจำนวน ในปี พ.ศ. 2561 [1] ได้แสดงการพิสูจน์การหาผลเฉลยของสมการไดโอแฟนไทน์ในรูปแบบ  $\frac{1}{v_1} + \frac{3}{v_2} + \frac{5}{v_3} + \dots + \frac{2k+1}{v_k} = 1$  ..... (1) และ  $\frac{2}{v_1} + \frac{4}{v_2} + \frac{6}{v_3} + \dots + \frac{2k}{v_k} = 1$  .....(2) เมื่อ  $2 \leq v_1 < v_2 < v_3 < \dots < v_k$  เป็นจำนวนเต็ม และ  $k = v_1$  โดยผลการวิจัยพบว่า สำหรับสมการไดโอแฟนไทน์ในรูปแบบ (1) เมื่อ  $v_1 = 2$  และ  $v_1 = 3$  จะมีผลเฉลย 1 คำตอบ และ 4 คำตอบ ตามลำดับ และเมื่อ  $v_1 \geq 4$  จะมีผลเฉลยทั่วไปอย่างน้อย 4 คำตอบ และสำหรับสมการไดโอแฟนไทน์รูปแบบ (2) เมื่อ  $v_1 = 2$  และ  $v_1 = 3$  จะมีผลเฉลย 1 คำตอบ และ 8 คำตอบ ตามลำดับ เมื่อ  $v_1 = 4$  และ  $v_1 \geq 5$  จะมีผลเฉลยทั่วไปอย่างน้อย 2 คำตอบ และอย่างน้อย 4 คำตอบ ตามลำดับต่อไป ในปี พ.ศ. 2564 [2] ได้แสดงการพิสูจน์การหาผลเฉลยของสมการไดโอแฟนไทน์ในรูปแบบของ  $\frac{1}{v_1} + \frac{2}{v_2} + \frac{3}{v_3} + \dots + \frac{k}{v_k} = 1$  เมื่อ  $2 \leq v_1 < v_2 < v_3 < \dots < v_k$  เป็นจำนวนเต็มบวก และ  $k = v_1$  ในปี พ.ศ. 2565 ได้แสดงการพิสูจน์การหาผลเฉลยของสมการไดโอแฟนไทน์ในรูปแบบ  $\frac{1^2}{v_1} + \frac{2^2}{v_2} + \frac{3^2}{v_3} + \dots + \frac{k^2}{v_k} = 1$  เมื่อ  $2 \leq v_1 < v_2 < v_3 < \dots < v_k$  เป็นจำนวนเต็ม และ  $k = v_1$  โดยผลการวิจัยพบว่า เมื่อ  $v_1 = 2$  จะมีผลเฉลยเพียง 1 ผลเฉลย และ  $v_1 = 3$  จะมีผลเฉลย 2 เฉลย และเมื่อ  $v_1 \geq 4$  จะมีผลเฉลยทั่วไปอย่างน้อย 4 ผลเฉลย และในปี พ.ศ. 2565 [3] ได้แสดงการพิสูจน์การหาผลเฉลยของสมการไดโอแฟนไทน์ในรูปแบบ  $\frac{1^2}{v_1} + \frac{2^2}{v_2} + \frac{3^2}{v_3} + \dots + \frac{k^2}{v_k} = 1$  เมื่อ  $2 \leq x_1 < x_2 < x_3 < \dots < x_k$  เป็นจำนวนเต็ม และ  $k = x_1$

จากงานวิจัยดังกล่าวมาผู้วิจัยได้ศึกษาและปรับเปลี่ยนรูปแบบของตัวเศษของสมการไดโอแฟนไทน์เป็นจำนวนกำลังสี่ดังต่อไปนี้  $\frac{1^4}{v_1} + \frac{2^4}{v_2} + \frac{3^4}{v_3} + \dots + \frac{k^4}{v_k} = 1$  เมื่อ  $v_1$  เป็นจำนวนเต็มบวก โดยที่



$2 \leq v_1 < v_2 < v_3 < \dots < v_k$  และ  $k = v_1$  เพื่อทำการหาผลเฉลยที่เป็นจำนวนเต็มบวกของสมการนี้ โดยใช้วิธีการที่ได้แนวคิดมาจากผลงานของ Nechemia Burstein

## ผลการศึกษา

ในบทนี้ผู้ศึกษาจะศึกษาสมการไดโอแฟนไทน์  $\frac{1^4}{v_1} + \frac{2^4}{v_2} + \frac{3^4}{v_3} + \dots + \frac{k^4}{v_k} = 1$  เมื่อ  $2 \leq v_1 < v_2 < v_3 < \dots < v_k$  เป็นจำนวนเต็ม และ  $k = v_1$

**ทฤษฎีบท 2.1** สำหรับสมการไดโอแฟนไทน์  $\frac{1^4}{v_1} + \frac{2^4}{v_2} + \frac{3^4}{v_3} + \dots + \frac{k^4}{v_k} = 1$

เมื่อ  $2 \leq v_1 < v_2 < v_3 < \dots < v_k$  เป็นจำนวนเต็ม และ  $k = v_1$

จะได้ว่า (i) มีเพียงผลเฉลยเดียว เมื่อ  $v_1 = 2$

(ii) มีเพียง 3 ผลเฉลย เมื่อ  $v_1 = 3$

(iii) มีอย่างน้อย 4 ผลเฉลย เมื่อ  $v_1 \geq 4$

การพิสูจน์ จะแบ่งเป็น 3 กรณี

(i) กรณี  $v_1 = 2$

$$\text{พิจารณา } \frac{1^4}{2} + \frac{2^4}{v_2} = 1$$

$$\text{จะได้ } \frac{16}{v_2} = \frac{1}{2}$$

$$\text{ดังนั้น } v_2 = 32$$

จะเห็นว่าเมื่อ  $v_1 = 2$

จะได้ผลเฉลยของสมการเพียงผลเฉลยเดียว คือ  $v_2 = 32$

ดังนั้น กรณี  $v_1 = 2$  จะมีเพียงผลเฉลยเดียว คือ 32

(ii) กรณี  $v_1 = 3$

$$\text{พิจารณา } \frac{1^4}{3} + \frac{2^4}{v_2} + \frac{3^4}{v_3} = 1, \quad \frac{1}{3} + \frac{16}{v_2} + \frac{81}{v_3} = 1$$

$$\text{จะได้ } \frac{16}{v_2} + \frac{81}{v_3} = \frac{2}{3}$$

$$\text{เมื่อ } v_2 = 4, 5, 6, \dots, 24$$

จะทำให้  $\frac{16}{v_2} \geq \frac{2}{3}$  ดังนั้น  $\frac{16}{v_2} + \frac{81}{v_3}$  จะมีค่ามากกว่า  $\frac{2}{3}$  แสดงว่า เมื่อ  $v_2 \leq 24$  จะทำให้สมการไม่มีผลเฉลย

และเมื่อพิจารณา  $v_2 = 25, 26, 27, \dots, 145$

ดังนั้น เมื่อ  $v_2 \geq 145$  จะทำให้ค่าของ  $\frac{16}{v_2} + \frac{81}{v_3}$  น้อยกว่า  $\frac{2}{3}$  แสดงว่า  $v_2 \geq 145$  จะทำให้สมการไม่มี

ผลเฉลย

$$\text{เนื่องจาก } \frac{16}{145} + \frac{81}{146} < \frac{2}{3}$$

จะได้  $\frac{16}{32} + \frac{81}{v_3} = \frac{2}{3}$ ,  $\frac{16}{48} + \frac{64}{v_3} = \frac{2}{3}$  และ  $\frac{16}{96} + \frac{64}{v_3} = \frac{2}{3}$  ตามลำดับ

ดังนั้น  $v_2 = 486,243$  และ  $162$  ตามลำดับ

ดังนั้น กรณี  $v_1 = 3$  สมการไดโอแฟนไทน์  $\frac{1^4}{v_1} + \frac{2^4}{v_2} + \frac{3^4}{v_3} + \dots + \frac{k^4}{v_k} = 1$  จะมีผลเฉลยเพียง 3 ผลเฉลย

ได้แก่  $(3,32,486)$ ,  $(3,48,243)$  และ  $(3,96,162)$

(iii) กรณีที่  $v_1 \geq 4$  จะพิจารณาผลเฉลยบางส่วน ในรูปผลเฉลยทั่วไปดังนี้  
จะหาผลเฉลยทั่วไปรูปแบบที่ 1

$$\begin{aligned} 1 &= (1+1+1+\dots+1) \cdot \frac{1}{v_1} \\ &= \frac{1}{v_1} + \frac{1}{v_1} + \frac{1}{v_1} + \dots + \frac{1}{v_1} \\ &= \frac{1^4}{1^4} \cdot \frac{1}{v_1} + \frac{2^4}{2^4} \cdot \frac{1}{v_1} + \frac{3^4}{3^4} \cdot \frac{1}{v_1} + \dots + \frac{v_1^4}{v_1^4} \cdot \frac{1}{v_1} \\ &= \frac{1^4}{v_1} + \frac{2^4}{2^4 v_1} + \frac{3^4}{3^4 v_1} + \dots + \frac{v_1^4}{v_1^4 v_1} \end{aligned}$$

จะเห็นว่า  $v_1 < 2^4 v_1 < 3^4 v_1 < \dots < v_1^4 v_1$  และ  $k = v_1$

ดังนั้น ผลเฉลยทั่วไปรูปแบบที่ 1 จะอยู่ในรูป

$$= \frac{1^4}{v_1} + \frac{2^4}{2^4 v_1} + \frac{3^4}{3^4 v_1} + \dots + \frac{v_1^4}{v_1^4 v_1} = 1 \quad (1)$$

เมื่อ  $v_1 = v_1, v_2 = 2^4 v_1, v_3 = 3^4 v_1, \dots, v_k = v_1^4 v_1$

จะหาผลเฉลยทั่วไปรูปแบบที่ 2

เนื่องจาก  $\frac{1}{N} = \frac{1}{N+M} + \frac{M}{N(N+M)}$

กำหนดให้  $N = v_1$  และ  $M = 1$  จะได้  $\frac{1}{v_1} = \frac{1}{v_1+1} + \frac{1}{v_1(v_1+1)}$

แทนค่าสมการข้างต้นใน (1) จะได้

$$\begin{aligned} \frac{1}{v_1+1} + \frac{1}{v_1(v_1+1)} + \left[ \frac{2^4}{2^4 v_1} + \frac{3^4}{3^4 v_1} + \dots + \frac{v_1^4}{v_1^4 v_1} \right] &= 1 \\ \frac{1}{v_1+1} + \left[ \frac{2^4}{2^4 v_1} + \frac{3^4}{3^4 v_1} + \dots + \frac{v_1^4}{v_1^4 v_1} \right] + \frac{1}{v_1(v_1+1)} &= 1 \\ \frac{1}{v_1+1} + \left[ \frac{2^4}{2^4 v_1} + \frac{3^4}{3^4 v_1} + \dots + \frac{v_1^4}{v_1^4 v_1} \right] + \left[ \frac{(v_1+1)^4}{(v_1+1)^4} \cdot \frac{1}{v_1(v_1+1)} \right] &= 1 \end{aligned}$$

$$\frac{1}{v_1+1} + \left[ \frac{2^4}{2^4 v_1} + \frac{3^4}{3^4 v_1} + \dots + \frac{v_1^4}{v_1^4 v_1} \right] + \left[ \frac{(v_1+1)^4}{(v_1+1)^4} \cdot \frac{1}{v_1(v_1+1)} \right] = 1$$

$$\frac{1}{v_1+1} + \left[ \frac{2^4}{2^4(v_1+1-1)} + \frac{3^4}{3^4(v_1+1-1)} + \dots + \frac{(v_1+1-1)^4}{(v_1+1-1)^4(v_1+1-1)} \right] + \frac{(v_1+1)^4}{(v_1+1-1)(v_1+1)^5} = 1$$

แทนค่า  $v_1+1$  ด้วย  $Y$  จะได้

$$\frac{1}{Y_1} + \left[ \frac{2^4}{2^4(Y_1-1)} + \frac{3^4}{3^4(Y_1-1)} + \dots + \frac{(Y_1-1)^4}{(Y_1-1)^4(Y_1-1)} \right] + \frac{Y_1^4}{(Y_1-1)Y_1^5} = 1$$

และแทนค่า  $Y$  ด้วย  $v_1$  จะได้

$$\frac{1}{v_1} + \left[ \frac{2^4}{2^4(v_1-1)} + \frac{3^4}{3^4(v_1-1)} + \dots + \frac{(v_1-1)^4}{(v_1-1)^4(v_1-1)} \right] + \frac{v_1^4}{(v_1-1)v_1^5} = 1$$

จาก  $v_1 \geq 4$  จะได้ว่า  $4v_1 > v_1 + 4$

$$4(4)v_1 > 4(v_1 + 4)$$

$$16v_1 > 4v_1 + 16$$

$$16v_1 - 16 > 4v_1$$

$$2^4(v_1 - 1) > 4v_1$$

นั่นคือ  $2^4(v_1 - 1) > 4v_1$

จึงทำให้ได้  $v_1 < 2^4(v_1 - 1) < 3^4(v_1 - 1) < \dots < (v_1 - 1)^4(v_1 - 1) < (v_1 - 1)v_1^5$  และ  $k = x_1$

ดังนั้น ผลเฉลยทั่วไปรูปแบบที่ 2 จะอยู่ในรูป

$$\frac{1^4}{v_1} + \left[ \frac{2^4}{2^4(v_1-1)} + \frac{3^4}{3^4(v_1-1)} + \dots + \frac{(v_1-1)^4}{(v_1-1)^4(v_1-1)} \right] + \frac{v_1^4}{v_1^5(v_1-1)} = 1 \quad (2)$$

เมื่อ  $v_1 = v_1, v_2 = 2^4(v_1 - 1), v_3 = 3^4(v_1 - 1), \dots, v_{k-1} = (v_1 - 1)^4(v_1 - 1), v_k = v_1^5(v_1 - 1)$

จะหาผลเฉลยทั่วไปรูปแบบที่ 3

$$\text{เนื่องจาก } \frac{1}{N} = \frac{1}{N+M} + \frac{M}{N(N+M)}$$

$$\text{กำหนดให้ } N = x_1 \text{ และ } M = 1 \text{ จะได้ } \frac{1}{v_1} = \frac{1}{v_1+1} + \frac{1}{v_1(v_1+1)}$$

แทนค่าสมการข้างต้นใน (2) จะได้

$$\frac{1}{v_1+1} + \frac{1}{v_1(v_1+1)} + \left[ \frac{2^4}{2^4(v_1-1)} + \frac{3^4}{3^4(v_1-1)} + \dots + \frac{(v_1-1)^4}{(v_1-1)^4(v_1-1)} \right] + \frac{v_1^4}{v_1^5(v_1-1)} = 1$$

$$\frac{1}{v_1+1} + \left[ \frac{2^4}{2^4(v_1-1)} + \frac{3^4}{3^4(v_1-1)} + \dots + \frac{(v_1-1)^4}{(v_1-1)^4(v_1-1)} \right] + \frac{v_1^4}{v_1^5(v_1-1)} + \frac{1}{v_1(v_1-1)} = 1$$

$$\frac{1}{v_1+1} + \left[ \frac{2^4}{2^4(v_1-1)} + \frac{3^4}{3^4(v_1-1)} + \dots + \frac{(v_1-1)^4}{(v_1-1)^4(v_1-1)} \right] + \frac{v_1^4}{v_1^5(v_1-1)} + \frac{(v_1+1)^4}{(v_1-1)^4} \cdot \frac{1}{v_1(v_1+1)} = 1$$

$$\frac{1}{v_1+1} + \left[ \frac{2^4}{2^4(v_1+1-1-1)} + \frac{3^4}{3^4(v_1+1-1-1)} + \dots + \frac{(v_1+1-1-1)^4}{(v_1+1-1-1)^4(v_1+1-1-1)} \right] + \frac{(v_1+1-1)^4}{(v_1+1-1)^5(v_1+1-1-1)} + \frac{(v_1+1)^4}{(v_1+1)^4(v_1+1-1)(v_1+1)} = 1$$

แทนค่า  $v_1+1$  ด้วย  $Y$  จะได้

$$\frac{1}{Y} + \left[ \frac{2^4}{2^4(Y-2)} + \frac{3^4}{3^4(Y-2)} + \dots + \frac{(Y-2)^4}{(Y-2)^4(Y-2)} \right] + \frac{(Y-1)^4}{(Y-1)^5(Y-2)} + \frac{Y^4}{Y^4(Y-1)(Y)} = 1$$

และแทนค่า  $Y$  ด้วย  $v_1$  จะได้

$$\frac{1}{v_1} + \left[ \frac{2^4}{2^4(v_1-2)} + \frac{3^4}{3^4(v_1-2)} + \dots + \frac{(v_1-2)^4}{(v_1-2)^4(v_1-2)} \right] + \frac{(v_1-1)^4}{(v_1-1)^5(v_1-2)} + \frac{v_1^4}{v_1^5(v_1-1)} = 1$$

จาก  $v_1 \geq 4$  จะได้ว่า  $v_1 + 4v_1 > v_1 + 8$

$$4(4)v_1 > 4(v_1 + 4)$$

$$16v_1 > 4v_1 + 32$$

$$16v_1 - 32 > 4v_1$$

$$2^4(v_1 - 2) > 4v_1$$

ดังนั้น  $4(v_1 - 2) > v_1$

นั่นคือ  $2^4(v_1 - 2) > v_1$

จาก  $(v_1 - 1) > (v_1 - 2)$  จะได้  $(v_1 - 1)^4 \geq (v_1 - 2)^4$  ดังนั้น  $(v_1 - 2)^4 < (v_1 - 1)^4$

จึงทำให้ได้ว่า  $v_1 < 2^4(v_1 - 2) < 3^4(v_1 - 2) < \dots < (v_1 - 2)^4(v_1 - 2) < (v_1 - 2)(v_1 - 1)^4 < v_1^5(v_1 - 1)$

และ  $k = v_1$

ดังนั้น ผลเฉลยทั่วไปรูปแบบที่ 3 จะอยู่ในรูป

$$\frac{1}{v_1} + \left[ \frac{2^4}{2^4(v_1-2)} + \frac{3^4}{3^4(v_1-2)} + \dots + \frac{(v_1-2)^4}{(v_1-2)^4(v_1-2)} \right] + \frac{(v_1-1)^4}{(v_1-1)^5(v_1-2)} + \frac{v_1^4}{v_1^5(v_1-1)} = 1 \quad (3)$$



ซึ่ง  $v_1 = v_1, v_2 = 2^4(v_1 - 2), v_3 = 3^4(v_1 - 2), \dots, v_{n-2} = (v_1 - 2)^4(v_1 - 2),$   
 $v_{k-1} = (v_1 - 2)(v_1 - 1)^5, v_k = v_1^5(v_1 - 1)$

จะหาผลเฉลยทั่วไปรูปแบบที่ 4

จากรูปแบบเศษส่วน  $\frac{1}{N} = \frac{1}{N+M} + \frac{M}{N(N+M)}$

กำหนดให้  $N = x_1$  และ  $M = T$  โดยที่  $T$  เป็นจำนวนเต็มบวก ซึ่ง  $T = 2, 3, \dots, \left\lfloor \frac{15v_1}{16} \right\rfloor$

แทนค่าสมการข้างต้น ใน (1) จะได้

$$\frac{1}{v_1 + T} + \frac{T}{v_1(v_1 + T)} + \left[ \frac{2^4}{2^4 v_1} + \frac{3^4}{3^4 v_1} + \dots + \frac{v_1^4}{v_1^4 v_1} \right] = 1$$

$$\frac{1}{v_1 + T} + \left[ \frac{2^4}{2^4 v_1} + \frac{3^4}{3^4 v_1} + \dots + \frac{v_1^4}{v_1^4 v_1} \right] + \frac{T}{v_1(v_1 + T)} = 1$$

$$\frac{1^4}{v_1 + T} + \frac{2^4}{2^4 v_1} + \frac{3^4}{3^4 v_1} + \dots + \frac{v_1^4}{v_1^4 v_1} + \left[ \underbrace{(1+1+1+\dots+1)}_T \cdot \frac{T}{v_1(v_1 + T)} \right] = 1$$

$$\frac{1^4}{v_1 + T} + \frac{2^4}{2^4 v_1} + \frac{3^4}{3^4 v_1} + \dots + \frac{v_1^4}{v_1^4 v_1} + \left[ \frac{(v_1 + 1)^4}{(v_1 + 1)^4} + \frac{(v_1 + 2)^4}{(v_1 + 2)^4} + \dots + \frac{(v_1 + T)^4}{(v_1 + T)^4} \right] \cdot \frac{1}{v_1(v_1 + T)} = 1$$

$$\frac{1^4}{v_1 + T} + \frac{2^4}{2^4 v_1} + \frac{3^4}{3^4 v_1} + \dots + \frac{v_1^4}{v_1^4 v_1} + \frac{(v_1 + 1)^4}{(v_1 + 1)^4 v_1(v_1 + T)} + \frac{(v_1 + 2)^4}{(v_1 + 2)^4 v_1(v_1 + T)} + \dots + \frac{(v_1 + T)^4}{(v_1 + T)^4 v_1(v_1 + T)} = 1$$

จะเห็นได้ว่าสมการที่ได้นี้ ไม่ได้อยู่ในรูป  $k = x_1$  จึงจัดรูปดังนี้

$$\begin{aligned} & \frac{1^4}{v_1 + T} + \frac{2^4}{2^4(v_1 + T - T)} + \frac{3^4}{3^4(v_1 + T - T)} + \dots + \frac{(v_1 + T - T)^4}{(v_1 + T - T)^4(v_1 + T - T)} \\ & + \frac{(v_1 + T - T + 1)^4}{(v_1 + T - T + 1)^4(v_1 + T - T)(v_1 + T)} + \frac{(v_1 + T - T + 2)^4}{(v_1 + T - T + 2)^4(v_1 + T - T)(v_1 + T)} \\ & + \dots + \frac{(v_1 + T)^4}{(v_1 + T)^4(v_1 + T - T)(v_1 + T)} = 1 \end{aligned}$$

จากนั้นแทนค่า  $v_1 + T$  ด้วย  $Y$  จะได้

$$\begin{aligned} & \frac{1^4}{Y} + \frac{2^4}{2^4(Y - T)} + \frac{3^4}{3^4(Y - T)} + \dots + \frac{(Y - T)^4}{(Y - T)^4(Y - T)} + \frac{(Y - T + 1)^4}{(Y - T + 1)^4(Y - T)(Y)} \\ & + \frac{(Y - T + 2)^4}{(Y - T + 2)^4(Y - T)(Y)} + \dots + \frac{(Y)^4}{(Y)^4(Y - T)(Y)} = 1 \end{aligned}$$

จากนั้นแทนค่า  $Y$  ด้วย  $v_1$  จะได้

$$\frac{1^4}{v_1} + \frac{2^4}{2^4(v_1-T)} + \frac{3^4}{3^4(v_1-T)} + \dots + \frac{(v_1-T)^4}{(v_1-T)^4(v_1-T)} + \frac{(v_1-T+1)^4}{(v_1-T+1)^4(v_1-T)v_1} + \frac{(v_1-T+2)^4}{(v_1-T+2)^4(v_1-T)v_1} + \dots + \frac{v_1^4}{v_1^4(v_1-T)v_1} = 1$$

$$\text{เมื่อ } T = 2, 3, \dots, \left\lfloor \frac{15v_1}{16} \right\rfloor$$

$$\text{จาก } T < \frac{15v_1}{16}$$

$$\text{จะได้ว่า } v_1 - T > v_1 - \frac{15v_1}{16}$$

$$v_1 - T + 2 > v_1 - \frac{15v_1}{16} + 2$$

$$v_1 - T + 2 > \frac{16v_1 - 15v_1 + 32}{16}$$

$$\text{จึงทำให้ } v_1 - T + 2 > \frac{v_1 + 31}{16}$$

$$\text{และ } v_1 \geq 4 \text{ จึงทำให้ได้ว่า } v_1 - T + 2 > 1$$

$$\text{พิจารณา } 1 < (v_1 - T + 2) + 1$$

$$(v_1 - T) < (v_1 - T)(v_1 - T + 2) + 1$$

$$(v_1 - T) < ((v_1 - T) + 1)^4$$

$$(v_1 - T)^4(v_1 - T) < (v_1 - T + 1)^4 \cdot v_1$$

$$\text{จึงทำให้ได้ว่า } v_1 < 2^4(v_1 - T) < 3^4(v_1 - T) < \dots < (v_1 - T)^4(v_1 - T) < (v_1 - T + 1)^4(v_1 - T)v_1$$

$$< (v_1 - T + 2)^4(v_1 - T)v_1 < x_1^4(v_1 - T)v_1 \text{ และ } k = v_1$$

ดังนั้น ผลเฉลยทั่วไปรูปแบบที่ 4 จะอยู่ในรูป

$$\frac{1^4}{v_1} + \frac{2^4}{2^4(v_1-T)} + \frac{3^4}{3^4(v_1-T)} + \dots + \frac{(v_1-T)^4}{(v_1-T)^4(v_1-T)} + \frac{(v_1-T+1)^4}{(v_1-T+1)^4(v_1-T)v_1} + \frac{(v_1-T+2)^4}{(v_1-T+2)^4(v_1-T)v_1} + \dots + \frac{v_1^4}{v_1^4(v_1-T)v_1} = 1 \quad (4)$$

$$\text{ซึ่ง } v_1 = v_1, v_2 = 2^4(v_1 - T), v_3 = 3^4(v_1 - T), \dots, v_{v_1-T} = (v_1 - T)^4(v_1 - T), \\ v_{v_1-T+1} = (v_1 - T + 1)^4(v_1 - T)v_1, v_{2v_1-T+2} = (v_1 - T + 2)^4(v_1 - T)v_1, \dots, \\ v_k = v_1^4(v_1 - T)v_1$$

$$\text{โดยที่ } T = 2, 3, \dots, \left\lfloor \frac{15v_1}{16} \right\rfloor$$

สรุปได้ว่า เมื่อ  $v_1 \geq 4$  สมการนี้จะมีผลเฉลยทั่วไปบางส่วนอย่างน้อย 4 ผลเฉลย ได้แก่

ผลเฉลยทั่วไปรูปแบบที่ 1 :

$$\frac{1^4}{v_1} + \frac{2^4}{2^4 v_1} + \frac{3^4}{3^4 v_1} + \dots + \frac{v_1^4}{v_1^4 v_1} = 1$$

ผลเฉลยทั่วไปรูปแบบที่ 2 :

$$\frac{1^4}{v_1} + \left[ \frac{2^4}{2^4(v_1-1)} + \frac{3^4}{3^4(v_1-1)} + \dots + \frac{(v_1-1)^4}{(v_1-1)^4(v_1-1)} \right] + \frac{v_1^4}{v_1^5(v_1-1)} = 1$$

ผลเฉลยทั่วไปรูปแบบที่ 3 :

$$\frac{1}{v_1} + \left[ \frac{2^4}{2^4(v_1-2)} + \frac{3^4}{3^4(v_1-2)} + \dots + \frac{(v_1-2)^4}{(v_1-2)^4(v_1-2)} \right] + \frac{(v_1-1)^4}{(v_1-1)^5(v_1-2)} + \frac{v_1^4}{v_1^5(v_1-1)} = 1$$

ผลเฉลยทั่วไปรูปแบบที่ 4 :

$$\begin{aligned} & \frac{1^4}{v_1} + \frac{2^4}{2^4(v_1-T)} + \frac{3^4}{3^4(v_1-T)} + \dots + \frac{(v_1-T)^4}{(v_1-T)^4(v_1-T)} + \frac{(v_1-T+1)^4}{(v_1-T+1)^4(v_1-T)v_1} \\ & + \frac{(v_1-T+2)^4}{(v_1-T+2)^4(v_1-T)v_1} + \dots + \frac{v_1^4}{v_1^4(v_1-T)v_1} = 1 \end{aligned}$$

$$\text{โดยที่ } T = 2, 3, \dots, \left\lfloor \frac{15v_1}{16} \right\rfloor$$

## สรุปผลและการอภิปรายผล

ในบทความนี้ เราแนะนำผลเฉลยของสมการไดโอแฟนไทน์รูปแบบ  $\frac{1^4}{v_1} + \frac{2^4}{v_2} + \frac{3^4}{v_3} + \dots + \frac{k^4}{v_k} = 1$  เมื่อ  $v_i$  เป็นจำนวนเต็มบวก โดยที่  $2 \leq v_1 < v_2 < v_3 \dots < v_k$  และ  $k = v_1$  โดยผลการวิจัยพบว่า จะมีเพียง 1 ผลเฉลยเมื่อ  $v_1 = 2$  จะมีเพียง 3 ผลเฉลยเมื่อ  $v_1 = 3$  และจะมีผลเฉลยทั่วไปบางส่วนอย่างน้อย 4 ผลเฉลยเมื่อ  $v_1 \geq 4$

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณโปรแกรมวิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร

## References

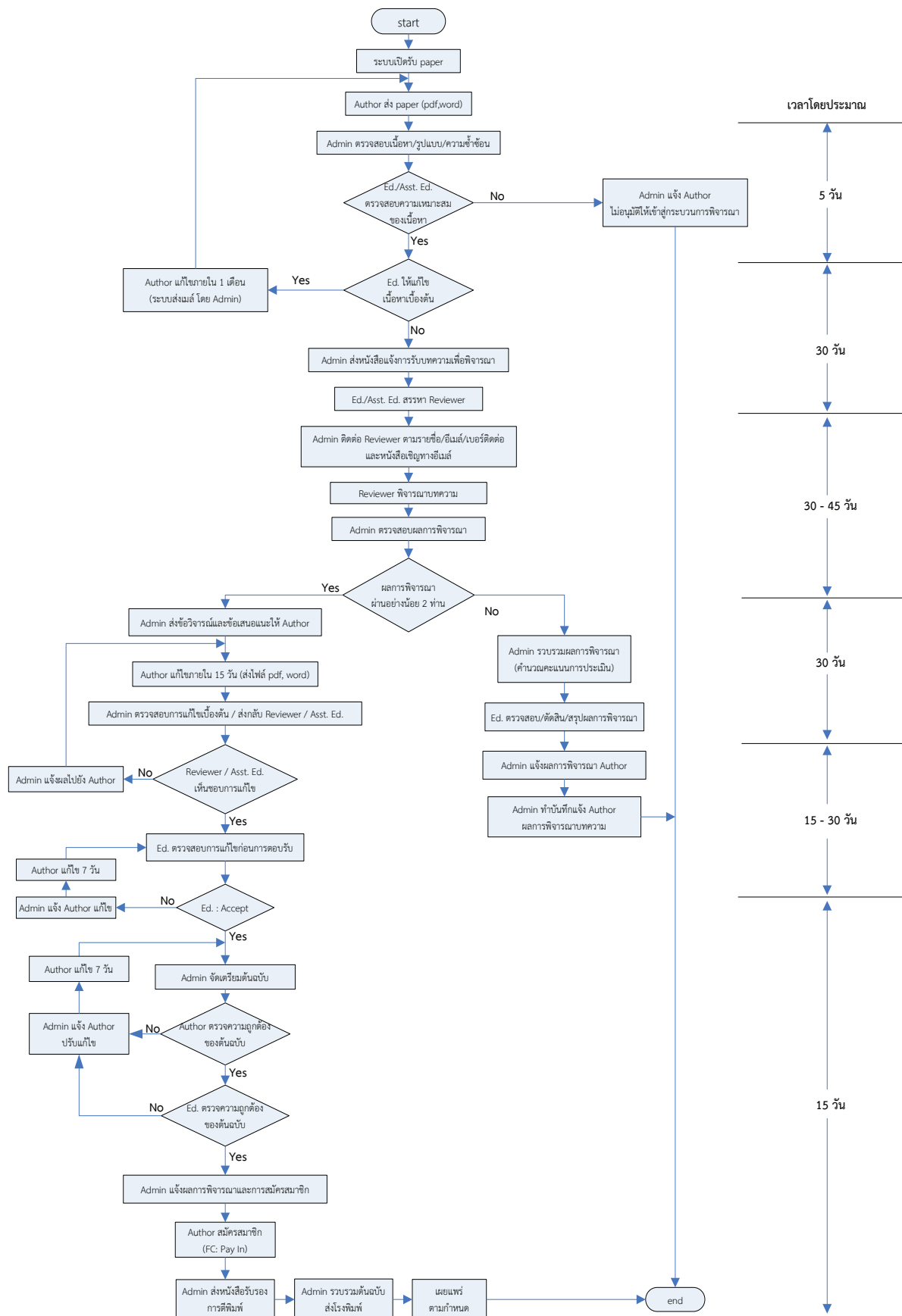
- [1] Thamkaew, P., Kameeh, P., Maneelek, P., and Wongmookham, S. (2019). Solutions of the Diophantine equation (1)  $1/v_1 + 3/v_2 + 5/v_3 + \dots + (2k-1)/v_k = 1$  and (2)  $2/v_1 + 4/v_2 + 6/v_3 + \dots + 2k/v_k = 1$ . **Sakthong: Journal of Science and Technology (STTT)**. Vol. 6, No. 1, pp. 1-10
- [2] Burshtein, N. (2017). On solution of the Diophantine equation,  $1/v_1 + 2/v_2 + 3/v_3 + \dots + k/v_k = 1$  when  $2 \leq v_1 < v_2 < v_3 < \dots < v_k$  are integers and  $k = v_1$ . **Notes on Number Theory and Discrete Mathematics**. Vol. 23, Number 2, pp. 30-35
- [3] Thamkaew, P. and Thamkaew, J. (2022). Solutions of the Diophantine Equation  $\frac{1^2}{x_1} + \frac{2^2}{x_2} + \frac{3^2}{x_3} + \dots + \frac{k^2}{x_k} = 1$ . **Science and Technology Nakhon Sawan Rajabhat University Journal**. Vol. 14, Issue 20, pp. 128-126



**RMUTI Journal**



# วารสารงานวิจัยด้านวิทยาศาสตร์สมัยใหม่ และการใช้ประโยชน์นวัตกรรมเทคโนโลยี (RMUTI Journal)



วารสารงานวิจัยด้านวิทยาศาสตร์สมัยใหม่ และการใช้ประโยชน์นวัตกรรมเทคโนโลยี  
(RMUTI Journal)  
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

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

2. รูปแบบการพิมพ์บทความ

การตั้งค่าหน้ากระดาษ

- ระยะขอบ
  - ขอบบน (Top Margin) 2.5 ซม. ขอบล่าง (Bottom Margin) 2.5 ซม.
  - ขอบขวา (Right Margin) 2.5 ซม. ขอบซ้าย (Left Margin) 2.5 ซม.
- ระยะห่างบรรทัด 1 เท่า
- รูปแบบตัวอักษร บทความภาษาไทยใช้ TH SarabunPSK  
บทความภาษาอังกฤษใช้ Times New Roman
- การย่อหน้า 7 ตัวอักษร พิมพ์ตัวที่ 8
- จำนวนหน้า 12 หน้า แต่ไม่ควรเกิน 15 หน้า
- ชื่อบทความ ภาษาไทย ขนาดตัวอักษร 24 ตัวหนา  
ภาษาอังกฤษ ขนาดตัวอักษร 20 ตัวหนา
- ชื่อผู้เขียน ภาษาไทย ขนาดตัวอักษร 18 และจัดชิดซ้าย  
ภาษาอังกฤษ ขนาดตัวอักษร 14 และจัดชิดซ้าย
- ตัวเลขยก (ต่อท้ายนามสกุล) ขนาดตัวอักษร 18
- ที่อยู่ ภาษาไทย ขนาดตัวอักษร 14  
ภาษาอังกฤษ และภาษาอังกฤษ 10
- ชื่อหัวเรื่องหลักในบทความ เช่น “บทคัดย่อ” “คำสำคัญ” “วิธีดำเนินการ” “ผลการวิจัย”  
“สรุปผลการวิจัย” “กิตติกรรมประกาศ” “เอกสารอ้างอิง” จัดชิดซ้ายหน้ากระดาษ
  - กรณีบทความภาษาไทย ขนาดตัวอักษร 20 ตัวหนา
  - กรณีบทความภาษาอังกฤษ ขนาดตัวอักษร 16 ตัวหนา
- ชื่อหัวเรื่องรอง จัดชิดซ้ายหน้ากระดาษ
  - กรณีบทความภาษาไทย ขนาดตัวอักษร 16 ตัวหนา
  - กรณีบทความภาษาอังกฤษ ขนาดตัวอักษร 12 ตัวหนา
- เนื้อหาในส่วนต่าง ๆ และคำสำคัญ
  - กรณีบทความภาษาไทย ขนาดตัวอักษร 16
  - กรณีบทความภาษาอังกฤษ ขนาดตัวอักษร 12

- ชื่อตาราง

กรณีบทความภาษาไทย ชื่อความ “ตารางที่ x” ใช้ขนาดตัวอักษร 16 ตัวหนา วางด้านบน ชิดซ้ายหน้ากระดาษ ตามด้วยชื่อตารางที่เป็นตัวอักษรขนาด 16 ไม่หนา

กรณีบทความภาษาอังกฤษ ชื่อความ “Table x” ใช้ขนาดตัวอักษร 12 ตัวหนา วางด้านบน ชิดซ้ายหน้ากระดาษ ตามด้วยชื่อตารางที่เป็นตัวอักษรขนาด 12 ไม่หนา

- ชื่อรูปภาพ

กรณีบทความภาษาไทย ชื่อความ “รูปที่ x” ใช้ขนาดตัวอักษร 16 ตัวหนา วางด้านล่าง จัดชิดซ้ายหน้ากระดาษ ตามด้วยคำชื่อรูปที่เป็นตัวอักษรขนาด 16 ไม่หนา

กรณีบทความภาษาอังกฤษ ชื่อความ “Figure x” ใช้ขนาดตัวอักษร 12 ตัวหนา วางด้านล่าง จัดชิดซ้ายหน้ากระดาษ ตามด้วยคำชื่อรูปที่เป็นตัวอักษรขนาด 12 ไม่หนา

### 3. ส่วนประกอบของบทความแต่ละประเภท

#### 3.1 บทความวิจัย จะประกอบไปด้วย

##### ก. ส่วนปก

1. ชื่อบทความ (Title) ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ควรกระชับรัด ไม่ยาวเกินไป บทความภาษาไทยชื่อเรื่องต้องมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ บทความภาษาอังกฤษชื่อเรื่องไม่ต้องมีภาษาไทย

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

3. บทคัดย่อ (Abstract) ควรสั้น ตรงประเด็น ครอบคลุมสาระสำคัญของการศึกษา ประกอบไปด้วย เนื้อหา ได้แก่ วัตถุประสงค์ วิธีการ ผลการวิจัย และการอภิปรายผล เป็นต้น โดยเขียนลงใน 1 ย่อหน้า ถ้าบทความเป็นภาษาไทย จะต้องมีย่อหน้าภาษาไทย 1 ย่อหน้า และภาษาอังกฤษ 1 ย่อหน้า โดยให้ภาษาไทยขึ้นก่อน เนื้อความในบทคัดย่อภาษาไทยและภาษาอังกฤษต้องมีความหมายเดียวกัน ความยาวของบทคัดย่อภาษาอังกฤษ กำหนดให้มีความยาวได้ไม่เกิน 300 คำ

4. คำสำคัญ (Key Words) เป็นการกำหนดคำสำคัญที่สามารถไปใช้สืบค้นในระบบฐานข้อมูล หากเป็นบทความภาษาไทยต้องมีคำสำคัญ 2 ภาษา คือภาษาไทยและภาษาอังกฤษที่มีความหมายตรงกัน ส่วนกรณีของบทความภาษาอังกฤษให้มีเพียงคำสำคัญในรูปแบบภาษาอังกฤษเท่านั้น จำนวนคำสำคัญที่กำหนดให้มีคำสำคัญได้ อย่างน้อย 3 คำ แต่ไม่เกิน 5 คำ

**\*\*หมายเหตุ :** เนื้อหาส่วนปกจะต้องเขียนให้อยู่ในกระดาษจำนวน 1 หน้า เท่านั้น

##### ข. ส่วนเนื้อหา

1. บทนำ (Introduction) เพื่ออธิบายถึงความสำคัญของปัญหา และวัตถุประสงค์ของการวิจัย รวมถึงการทบทวนวรรณกรรม และเอกสารที่เกี่ยวข้อง

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

3. ผลการวิจัย (Results) เสนอผลการทดลองอย่างชัดเจน ตรงประเด็น ควรมีรูปภาพและ/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) เพื่อแสดงความขอบคุณแก่ผู้ให้ความช่วยเหลือในการวิจัย อาจมีหรือไม่ก็ได้

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

### 3.2 บทความวิชาการ จะประกอบไปด้วย

#### ก. ส่วนปก

มีส่วนประกอบเหมือนบทความวิจัย และเขียนให้อยู่ในกระดาษ จำนวน 1 หน้า เท่านั้น

#### ข. ส่วนเนื้อหา

1. บทนำ (Introduction) เป็นส่วนของที่มาของมูลเหตุของการเขียนบทความ

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

3. ผลการศึกษา/ผลการดำเนินการ (Results) เป็นการเสนอผลอย่างชัดเจน ตามประเด็นโดยลำดับตามหัวข้อที่ศึกษาหรือดำเนินการ

4. สรุป (Conclusion) สรุปประเด็น และสาระสำคัญที่ได้จากการศึกษา

5. เอกสารอ้างอิง (References) ใช้รูปแบบที่วารสารกำหนด รายการการอ้างอิงต้องเขียนในรูปแบบภาษาอังกฤษเท่านั้น

### 4. การอ้างอิงเอกสารในเนื้อเรื่องของบทความ (In-text Citations)

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

#### การเขียนรายการเอกสารอ้างอิง (Reference List)

##### 1) หนังสือ

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

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

##### 2) หนังสือแปล

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

ตัวอย่างเช่น

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

##### 3) บทความหรือบทในหนังสือ

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

ตัวอย่างเช่น

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

4) บทความในหนังสือรายงานประชุมทางวิชาการ/สัมมนาทางวิชาการ

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

ตัวอย่างเช่น

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

5) วารสาร

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

ตัวอย่างเช่น

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

6) บทความในหนังสือพิมพ์

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

ตัวอย่างเช่น

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

7) บทความในสารานุกรม

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

ตัวอย่างเช่น

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

8) วิทยานิพนธ์

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

ตัวอย่างเช่น

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

9) สื่ออิเล็กทรอนิกส์ (สื่ออิเล็กทรอนิกส์) : www

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

ตัวอย่างเช่น

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

10) ผู้แต่งเป็นหน่วยงาน

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

ตัวอย่างเช่น

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

11) มีเฉพาะชื่อบรรณาธิการเป็นผู้รวบรวม

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

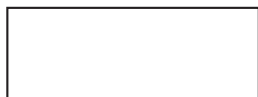
ตัวอย่างเช่น

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

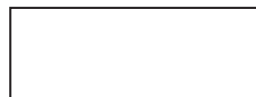


## 5. รูปแบบการใส่รูปภาพในเนื้อหาบทความ

- 1) ชื่อรูปภาพห้ามขึ้นต้นด้วยคำว่า “แสดง”
- 2) รูปภาพที่แสดงต้องมีคำอธิบายอยู่ในเนื้อหาบทความที่มีการระบุถึงรูปภูษนั้น ๆ
- 3) คำอธิบายรูปภาพ ให้เขียนไว้ได้รูปภาพแต่ละรูปภาพ โดยจัดรูปภาพไว้กึ่งกลางหน้ากระดาษ และคำอธิบายจัดชิดซ้ายหน้ากระดาษ
- 4) ไฟล์ของรูปภาพต้องเป็นไฟล์ที่มีนามสกุล .jpg, .png, .tiff หรือ .eps เท่านั้น ความละเอียดไม่ต่ำกว่า 300 dpi
- 5) ลายเส้นที่ปรากฏบนรูปภาพต้องมีความคมชัด กรณีที่เป็นรูปภาพ ต้องระบุชื่อแกนต่าง ๆ ให้ครบถ้วน
- 6) กรณีที่มีรูปภาพย่อย ควรจัดให้รูปภาพย่อยทั้งหมดอยู่ในหน้าเดียวกัน สำหรับบทความภาษาไทยให้เขียนคำบรรยายใต้ชื่อรูปย่อยแต่ละรูป และกำหนดลำดับของรูปภาพด้วยตัวอักษร ตัวอย่างเช่น



(ก) รูปย่อยที่ 1



(ข) รูปย่อยที่ 2

### รูปที่ 1 ตัวอย่างการเขียนคำอธิบายรูปภาพ

- สำหรับบทความภาษาอังกฤษ ให้ใช้อักษร (a), (b),... แทนการกำหนดรูปภาพย่อย
- 7) การเว้นระยะบรรทัด ก่อนรูปภาพ ให้เว้น 1 บรรทัด และหลังจากชื่อรูปภาพ ให้เว้น 1 บรรทัด
  - 8) การใช้ภาพสี อาจทำให้เกิดความสวยงาม แต่ให้คำนึงถึงการสื่อความหมายกรณีที่มีการจัดพิมพ์เอกสารแบบขาวดำเพื่อให้ผู้อ่านสามารถเข้าใจได้ กรณีที่เป็นกราฟควรกำหนดลักษณะเส้นที่แตกต่างกัน เพื่อให้สามารถเข้าใจได้เมื่อมีการจัดพิมพ์แบบขาว - ดำ
  - 9) ขนาดของรูปต้องไม่ใหญ่เกินกว่าความกว้างของหน้ากระดาษที่กำหนดไว้
  - 10) หากเป็นการคัดลอกรูปภาพมาจากที่อื่น ผู้เขียนควรมีการอ้างอิงแหล่งที่มาให้ถูกต้อง

## 6. รูปแบบการใส่ตารางในเนื้อหาบทความ

- 1) ชื่อตารางห้ามขึ้นต้นด้วยคำว่า “แสดง”
- 2) ตารางที่แสดงต้องมีคำอธิบายอยู่ในเนื้อหาบทความที่มีการระบุถึงตารางนั้น ๆ
- 3) คำอธิบายตาราง ให้เขียนไว้ด้านบนของตาราง โดยจัดคำอธิบายไว้ชิดขอบด้านซ้ายของหน้ากระดาษ และตารางอยู่กึ่งกลางหน้ากระดาษ ควรจัดเนื้อหาตารางให้อยู่บนหน้าเดียวกัน กรณีที่ตารางมีความยาวเกินหน้ากระดาษ ให้ใส่ชื่อตาราง “ตารางที่ x .....” ไว้ที่ด้านบนของตารางในหน้าแรก และใส่ชื่อตาราง “ตารางที่ x ..... (ต่อ)” ไว้ที่ด้านบนของตารางในหน้าถัดไป
- 4) ขนาดของตารางต้องไม่ใหญ่เกินกว่าความกว้างของหน้ากระดาษที่กำหนดไว้
- 5) การเว้นระยะบรรทัด ก่อนชื่อตาราง ให้เว้น 1 บรรทัด และหลังสิ้นสุดตาราง ให้เว้น 1 บรรทัด
- 6) การกำหนดเส้นขอบตาราง ให้กำหนดเฉพาะเส้นด้านบน และด้านล่างของบรรทัด ดังตัวอย่าง

### ตารางที่ 1 ตัวอย่างการนำเสนอตาราง

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

## 7. รูปแบบการใส่สมการในเนื้อหาบทความ

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

$$y = ax + b \quad (1)$$

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

## 8. การดำเนินงานของกองบรรณาธิการ

1) บทความที่ส่งเข้าวารสาร ต้องส่งผ่านระบบออนไลน์ที่ <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/rmutijo/index>

2) บทความที่ถูกส่งเข้ามายังระบบ กองบรรณาธิการจะพิจารณาบทความเบื้องต้นเกี่ยวกับความถูกต้องของรูปแบบทั่วไป บทความที่ไม่ดำเนินการตามรูปแบบที่กำหนดจะไม่รับเข้าสู่กระบวนการพิจารณาโดยผู้ทรงคุณวุฒิ และจะส่งกลับเพื่อทำการแก้ไข ดังนั้น เพื่อให้เกิดความรวดเร็วในเข้าสู่กระบวนการพิจารณาผล ผู้เขียนควรดำเนินการจัดทำวารสารให้ถูกต้องตามรูปแบบที่กำหนดอย่างเคร่งครัด

3) เมื่อบทความผ่านการพิจารณาให้ตีพิมพ์ลงในวารสาร และผู้เขียนได้ดำเนินการจัดเตรียมเอกสารต่าง ๆ อย่างถูกต้อง ครบถ้วนตามข้อกำหนดของวารสารเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ผู้เขียนจะได้รับหนังสือรับรองการตีพิมพ์บทความเพื่อเป็นการยืนยัน

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



หมายเลขบทความ

(สำหรับเจ้าหน้าที่)

แบบฟอร์มการส่งบทความ

วารสารงานวิจัยด้านวิทยาศาสตร์สมัยใหม่ และ การใช้ประโยชน์นวัตกรรมเทคโนโลยี (RMUTI Journal)  
Research on Modern science and Utilizing Technological Innovation Journal  
(RMUTI Journal)

วันที่ .....

ข้าพเจ้า (นาย/นาง/นางสาว) .....

ระดับการศึกษาสูงสุด ..... ตำแหน่งทางวิชาการ .....

หน่วยงาน .....

ที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้สะดวก .....

โทรศัพท์.....โทรสาร.....โมบาย.....

e-mail.....

ขอส่ง ☐ บทความวิจัย ☐ บทความวิชาการ

สาขาของบทความ (กรุณาเลือก)

☐ Chemistry

☐ Engineering

☐ Materials Science

☐ Environmental Science

☐ Mathematics

ชื่อบทความ (ภาษาไทย) .....

.....

.....

(ภาษาอังกฤษ) .....

.....

.....

ชื่อผู้เขียนร่วม (พร้อมคำนำหน้าชื่อ อีเมล และเบอร์โทรศัพท์)

1. ....

2. ....

3. ....

4. ....

5. ....

ขอเสนอชื่อผู้ทรงคุณวุฒิที่มีความเชี่ยวชาญในสาขาที่เกี่ยวข้อง

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

คุณวุฒิ.....สาขาที่เชี่ยวชาญ.....

หน่วยงานที่สังกัด.....

ที่อยู่สำหรับส่งเอกสาร.....

.....

หมายเลขโทรศัพท์.....Email.....

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

คุณวุฒิ.....สาขาที่เชี่ยวชาญ.....

หน่วยงานที่สังกัด.....

ที่อยู่สำหรับส่งเอกสาร.....

.....

หมายเลขโทรศัพท์.....Email.....

#### หมายเหตุ

1. ผู้ทรงคุณวุฒิต้องมีตำแหน่งทางวิชาการ ระดับ ผศ. ขึ้นไป หรือจบการศึกษาระดับปริญญาเอก และต้องไม่สังกัดหน่วยงานเดียวกับผู้ประพันธ์

2. กองบรรณาธิการขอสงวนสิทธิ์ในการเป็นผู้พิจารณาคัดเลือกผู้ทรงคุณวุฒิเพื่อพิจารณาผลงานทางวิชาการ

ข้าพเจ้าได้รับทราบและยินดีปฏิบัติตามเงื่อนไขและข้อกำหนดต่าง ๆ ในแบบฟอร์มแนบท้าย ซึ่งมีรายละเอียดอยู่ใน “คำแนะนำผู้เขียน” ที่ทางกองบรรณาธิการวารสาร RMUTI Journal ได้กำหนดขึ้น และยินดีให้กองบรรณาธิการมีสิทธิ์ที่จะไม่รับพิจารณา หากไม่จัดรูปแบบตามที่กำหนด ยินยอมให้มีสิทธิ์ในการเลือกสรรหาผู้กลั่นกรองโดยอิสระเพื่อพิจารณาด้านฉบับที่ข้าพเจ้า (และผู้แต่งร่วม) ส่งมา ยินยอมให้กองบรรณาธิการสามารถตรวจแก้ไขต้นฉบับดังกล่าวได้ตามที่เห็นสมควร และข้าพเจ้า “ขอรับรองว่า บทความนี้ไม่เคยลงตีพิมพ์ในวารสารใดมาก่อน ไม่อยู่ระหว่างการพิจารณาจากวารสารอื่น และยินยอมว่าบทความที่ตีพิมพ์ลงในวารสารวิชาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ถือเป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี”

หากข้าพเจ้ามีความประสงค์ในการขอยกเลิกการพิจารณาบทความหลังจากวันที่ได้รับหนังสือยืนยันการรับบทความ ข้าพเจ้ายินดีดำเนินการตามกระบวนการของกองบรรณาธิการวารสาร RMUTI Journal

ลงชื่อ.....

(.....)



หนังสือรับรองการตีพิมพ์บทความ  
วารสารงานวิจัยด้านวิทยาศาสตร์สมัยใหม่ และ การใช้ประโยชน์นวัตกรรมเทคโนโลยี  
(RMUTI Journal)  
Research on Modern science and Utilizing Technological Innovation Journal  
(RMUTI Journal)

ขอรับรองว่าบทความ.....

เรื่อง .....  
.....  
โดย .....  
.....

ได้ผ่านการประเมินจากคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิที่มีความเชี่ยวชาญ  
และมาจากหลากหลายสถาบันจำนวน ๓ ท่าน  
แบบผู้ทรงคุณวุฒิและผู้แต่งไม่ทราบชื่อกันและกัน (double-blind review)  
และตีพิมพ์ในวารสารงานวิจัยด้านวิทยาศาสตร์สมัยใหม่ และ การใช้ประโยชน์นวัตกรรมเทคโนโลยี  
(RMUTI Journal)  
Research on Modern science and Utilizing Technological Innovation Journal  
(RMUTI Journal)  
ปีที่..... ฉบับที่.....(.....-..... พ.ศ.....)



(.....)

บรรณาธิการวารสาร RMUTI Journal  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน





หนังสือยืนยันการถอนบทความ  
วารสารงานวิจัยด้านวิทยาศาสตร์สมัยใหม่ และ การใช้ประโยชน์นวัตกรรมเทคโนโลยี  
(RMUTI Journal)  
Research on Modern science and Utilizing Technological Innovation Journal  
(RMUTI Journal)

ข้าพเจ้า (นาย/นาง/นางสาว).....

สังกัดหน่วยงาน .....

มีความประสงค์ขออนุญาตพิจารณาบทความ รหัสบทความ .....เรื่อง .....

.....

.....

.....

ที่ได้ส่งเข้ามายังวารสารระบบการจัดการวารสารออนไลน์ RMUTI Journal เมื่อวันที่ .....

เนื่องจาก (ระบุเหตุผลในการถอนบทความ).....

.....

.....

ลงชื่อ.....ผู้ถอนบทความ

(.....)



**RMUTI Journal**



# **RMUTI Journal**

**Research on Modern science and  
Utilizing Technological Innovation Journal**

**Vol. 17 No. 1 January–April 2024**

**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](mailto:rmuti.journai@gmail.com)**