

# Journal of Science and Technology Buriram Rajabhat University

วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์



มหาวิทยาลัย  
ราชภัฏบุรีรัมย์

คณะวิทยาศาสตร์  
Faculty of  
Science

ปีที่ 9  
ฉบับที่ 2

เดือน กรกฎาคม - ธันวาคม 2568

ISSN 2774-0757 (Online)

## บทบรรณาธิการ

วารสาร “วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์” หรือ Journal of Science and Technology Buriram Rajabhat University เป็นวารสารวิชาการที่ตีพิมพ์ราย 6 เดือน โดยมีวัตถุประสงค์หลักในการเผยแพร่งานวิจัยและบทความวิชาการด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี เพื่อเปิดโอกาสให้เกิดการแลกเปลี่ยนความรู้และประสบการณ์ระหว่างนักวิจัย คณาจารย์ นักวิชาการ รวมถึงบุคลากรในแวดวงการศึกษาทั้งในประเทศและต่างประเทศ วารสารได้ดำเนินงานมาอย่างต่อเนื่องเข้าสู่ปีที่ 9 และยังคงยึดมั่นในการรักษาคุณภาพและมาตรฐานวิชาการอย่างเข้มงวด

สำหรับวารสาร “วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์” ปีที่ 9 ฉบับที่ 2 กำหนดเผยแพร่เดือนกรกฎาคม ถึง เดือนธันวาคม 2568 ในฉบับนี้ประกอบด้วยบทความวิจัยจำนวนทั้งสิ้น 7 เรื่องที่ครอบคลุมหลากหลายสาขาวิชา ตั้งแต่ด้านเกษตรกรรมและสิ่งแวดล้อม ได้แก่ การศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับผลิตปุ๋ยคอกอัดเม็ด ซึ่งนำเสนอแนวทางในการพัฒนาปุ๋ยอินทรีย์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเกษตรอย่างยั่งยืน และการส่งเสริมปลูกพืชเศรษฐกิจด้วยนวัตกรรม IoT เชิงสร้างสรรค์เพื่อวิเคราะห์พื้นที่ปลูกพืชที่เหมาะสมในตำบลแม่วิน อำเภอแม่วง จังหวัดเชียงใหม่ ซึ่งสะท้อนการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งเพื่อสนับสนุนการตัดสินใจทางการเกษตรในระดับชุมชน บทความด้านวิทยาศาสตร์และวิศวกรรม เช่น ผลกระทบของการเติมโดโลไมท์ต่อสมบัติของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ฐานกากตะกอนอะลูมิเนียมที่ใช้ให้เห็นถึงศักยภาพในการรีไซเคิลของเสียอุตสาหกรรมเพื่อสร้างวัสดุก่อสร้างที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและนวัตกรรมในการผลิตมะละกอบลอคภัย ซึ่งนำเสนอเทคนิคการเพาะปลูกที่ลดการใช้สารเคมีเพื่อความปลอดภัยของผู้บริโภคและสิ่งแวดล้อม ในขณะที่ด้านคณิตศาสตร์ มีงานวิจัยที่น่าสนใจอย่างการศึกษาผลเฉลยของระบบสมการเพลล์  $x^2-8t^2 y^2=1$  และ  $pz^2-t^2 y^2=-1$  ซึ่งขยายความเข้าใจในทฤษฎีจำนวนและสมการไดโอแฟนไทน์ ตลอดจนด้านชีววิทยาและผลิตภัณฑ์ชุมชน ได้แก่ การศึกษาฤทธิ์ด้านอนุมูลอิสระและสารพฤกษเคมีของขมิ้นขาว (นมขมิ้น) สำหรับเป็นส่วนผสมของเครื่องสำอางในการยกระดับสินค้าชุมชนบ้านระกาใต้ อำเภอกระสัง จังหวัดบุรีรัมย์ ที่เปิดโอกาสในการพัฒนาผลิตภัณฑ์จากพืชสมุนไพรท้องถิ่นเพื่อเพิ่มมูลค่าเศรษฐกิจชุมชน และด้านเทคโนโลยีสารสนเทศกับการพัฒนาระบบจองใบอนุญาตการประชุมออนไลน์แบบอัจฉริยะ ซึ่งเป็นนวัตกรรมเพื่อประหยัดงบประมาณและเพิ่มประสิทธิภาพการบริหารจัดการในองค์กร

วารสารฉบับนี้จึงสะท้อนถึงการบูรณาการองค์ความรู้ทางวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี นวัตกรรม และการพัฒนาท้องถิ่น เพื่อสร้างสรรค์ที่ตอบสนองต่อความต้องการของสังคมในยุคยั่งยืนและดิจิทัลอย่างแท้จริง

บทความวิจัยและบทความวิชาการทุกเรื่องที่ได้รับการตีพิมพ์ในฉบับนี้ ได้ผ่านการพิจารณาอย่างละเอียดรอบคอบเพื่อรักษาคุณภาพมาตรฐานวิชาการ กองบรรณาธิการดำเนินการตรวจสอบต้นฉบับเบื้องต้นทั้งในมิติเนื้อหาและรูปแบบการจัดพิมพ์ หากไม่เป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด วารสารขอสงวนสิทธิ์ในการไม่นำเข้าสู่กระบวนการประเมินต่อไป บทความที่ผ่านการตรวจสอบเบื้องต้นจะถูกส่งให้ผู้ทรงคุณวุฒิจากสถาบันต่างๆ ภายนอกอย่างน้อย 3 ท่าน ดำเนินการประเมินแบบปกปิดสองทาง (Double-Blinded Peer Review) โดยผู้นิพนธ์และผู้ประเมินไม่ทราบตัวบุคคลของกันและกัน เพื่อความเที่ยงธรรม โปร่งใส และปราศจากอคติ กระบวนการนี้ไม่เพียงเสริมความน่าเชื่อถือให้แก่วารสาร แต่ยังรับประกันว่าผลงานทุกชิ้นได้รับการกลั่นกรองอย่างเป็นระบบ ส่งผลให้วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์ ยังคงรักษามาตรฐานและชื่อเสียงในฐานะสื่อกลางเผยแพร่งานวิชาการที่มีคุณภาพทั้งในระดับสถาบันและระดับชาติต่อไป

โดยลิขสิทธิ์ของบทความที่ตีพิมพ์ในวารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์ เป็นของวารสารแต่เพียงผู้เดียว ข้อคิดเห็น ข้อเสนอแนะ หรือเนื้อหาต่างๆ ที่ปรากฏในบทความถือเป็นความรับผิดชอบของผู้พิมพ์โดยตรง ไม่ใช่จุดยืนหรือความเห็นของกองบรรณาธิการ ซึ่งอาจไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยกับเนื้อหาทุกประการ หากเกิดข้อขัดแย้งหรือประเด็นทางกฎหมายอันเนื่องมาจากเนื้อหา ผู้พิมพ์จะต้องรับผิดชอบต่อผู้เดียว สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับมนุษย์ ผู้พิมพ์ต้องแนบเอกสารรับรองจริยธรรมการวิจัยจากคณะกรรมการที่เกี่ยวข้อง พร้อมระบุให้รับรองอย่างชัดเจนในบทความ เช่นเดียวกับงานวิจัยที่ใช้สัตว์ทดลอง ซึ่งต้องมีหลักฐานการรับรองจริยธรรมการใช้สัตว์ เพื่อยืนยันว่าการวิจัยดำเนินไปตามมาตรฐานจริยธรรมสากลอย่างเคร่งครัด

กองบรรณาธิการใคร่หวังเป็นอย่างยิ่งว่าวารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์ ปีที่ 9 ฉบับที่ 2 นี้ จะเป็นประโยชน์ต่อผู้อ่านทุกท่าน ไม่ว่าจะเป็นนักวิชาการ นักศึกษา หรือผู้สนใจทั่วไป และจุดประกายไอเดียใหม่ๆ ในการวิจัยต่อยอด หากท่านมีความสนใจส่งบทความเพื่อตีพิมพ์ในฉบับต่อไป กองบรรณาธิการยินดีต้อนรับอย่างยิ่ง โดยทุกบทความจะได้รับการประเมินอย่างเข้มข้นจากผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาที่เกี่ยวข้อง เพื่อคงไว้ซึ่งมาตรฐานวิชาการที่สูงต่อไป ในโอกาสนี้ ขอขอบพระคุณทุกท่านที่ให้การสนับสนุนวารสารมาโดยตลอด และยินดีรับฟังข้อคิดเห็นหรือข้อเสนอแนะอันเป็นประโยชน์ เพื่อนำไปพัฒนาวารสารให้ดียิ่งขึ้น ทั้งในมิติเนื้อหา รูปแบบ และกระบวนการจัดการ ให้วารสารนี้ยังคงเป็นแหล่งความรู้ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีที่มีคุณภาพและเป็นที่ยอมรับในระดับสากลต่อไป

บรรณาธิการ

## วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์

### ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริภาณี จุฑาปะมา รักษาการแทนอธิการบดี มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุพัตรา รักการศิลป์ รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์

### บรรณาธิการผู้ทรงคุณวุฒิ

- |                                                |                             |
|------------------------------------------------|-----------------------------|
| 1. ศาสตราจารย์ ดร.ชิดชนก เหลือสินทรัพย์        | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย       |
| 2. ศาสตราจารย์ ดร.อลงกลด แทนอมทอง              | มหาวิทยาลัยขอนแก่น          |
| 3. รองศาสตราจารย์ ดร.ปรีชา ประเทพา             | มหาวิทยาลัยมหาสารคาม        |
| 4. รองศาสตราจารย์ ดร.ไพโรจน์ ประมวล            | มหาวิทยาลัยมหาสารคาม        |
| 5. รองศาสตราจารย์ ดร.วิภาวี ทิพย์แก้ว          | มหาวิทยาลัยขอนแก่น          |
| 6. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เกตุจันทร์ จำปาไชยศรี | มหาวิทยาลัยนเรศวร           |
| 7. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เสรี ปานช้าง          | มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่  |
| 8. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ น.สพ.ประยุทธ์ กุศลรัตน์  | มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา |
| 9. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธรัช อารีราษฎร์       | มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม  |
| 10. อาจารย์ ดร.สุนันทา กลิ่นถาวร               | มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม  |
| 11. ผศ.ดร.ถิรนนท์ สอนแก้ว                      | มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง      |

### บรรณาธิการ

อาจารย์ ดร.ทิพวัลย์ แสนคำ

### รองบรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุธีรา สุนทรารักษ์

### กองบรรณาธิการ

1. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรัณย์ จำรัสธนสารย์
2. อาจารย์ ดร.ชาตวุฒิ ธนาจิรันธร
3. อาจารย์กิตติคุณ บุญเกตุ
4. อาจารย์พุทธชาด ลิ้มศิริเรืองไร
5. อาจารย์สกรณ บุษบง

## ผู้ทรงคุณวุฒิประจำฉบับ

- |                                              |                             |
|----------------------------------------------|-----------------------------|
| 1. ศาสตราจารย์ ดร.ธีระชัย บงการณ             | มหาวิทยาลัยนเรศวร           |
| 2. รองศาสตราจารย์ ดร.วรปภา อารีราษฎร์        | มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม  |
| 3. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธรัช อารีราษฎร์     | มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม  |
| 4. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เมตตา เกวี่ชาลี     | มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม  |
| 5. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ราตรี คำโหมง        | มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์  |
| 6. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บัวหลัน คุ่มไพบูลย์ | มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี   |
| 7. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กนกวรรณ ยันตะบุศย์  | มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์   |
| 8. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนิดา รัชเวทย์      | มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่  |
| 9. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรทิพย์ ศรีมงคล     | มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร     |
| 10. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อารยา มุสิกกา      | มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์  |
| 11. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุชาดา สานุสันต์   | มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์  |
| 12. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เปรม อิงคเวชชากุล  | มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์  |
| 13. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภัทรนันท์ ทวดอาจ   | มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์  |
| 14. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ จีวัฒนา   | มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์  |
| 15. ผู้ช่วยศาสตราจารย์นำสุข นวพงษ์พัฒน์      | มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา |
| 16. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธัญพรรณ ฮ่อบรรทัด      | มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์  |
| 17. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ยวีร์รักษ์ โอธรรมย์    | มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์  |
| 18. ผู้ช่วยศาสตราจารย์สำคัญ ฮ่อบรรทัด        | มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์  |

## สารบัญ

เรื่อง

หน้า

|                                                                                                                                                                             |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| การศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการผลิตปุ๋ยอินทรีย์อัดเม็ดจากมูลสัตว์<br>และผลต่อการเจริญเติบโตของผักบุ้งจีน.....                                                              | 1   |
| กนกวรรณ ยันตะบุศย์ ภัชญา เสาวเวียง ประภัสสร บัวนาถ และวีรญา สิงคนิภา                                                                                                        |     |
| ผลกระทบของการเติมโดโลไมท์ต่อสมบัติของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ฐานกากตะกอน<br>อะลูมิเนียม.....                                                                                      | 15  |
| นางสาวฮั้ววานี พิงพา พิทักษ์ เหล่ารัตนกุล และเบญญา เชิดหิรัญกร                                                                                                              |     |
| การศึกษาผลเฉลยของระบบสมการเพลล์.....                                                                                                                                        | 39  |
| วิภาวดี มูลไชยสุข                                                                                                                                                           |     |
| การศึกษาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและสารพิษตกค้างของขมิ้นขาว (นมขมิ้น)<br>สำหรับเป็นส่วนผสมของเครื่องสำอางในการยกระดับสินค้าชุมชนบ้านระกาใต้<br>อำเภอกระสัง จังหวัดบุรีรัมย์..... | 61  |
| ชุลีกานต์ สายเนตร และวีริญรักษ์ สือออก                                                                                                                                      |     |
| การพัฒนาระบบจองใบอนุญาตการประชุมออนไลน์แบบอัจฉริยะ : นวัตกรรมเทคโนโลยี<br>สารสนเทศเพื่อประหยัดงบประมาณและเพิ่มประสิทธิภาพองค์กร.....                                        | 75  |
| นโรดม กิตติเดชานุภาพ นายอาทิตย์ ดือราโซ และภูริทรัพย์ เดชพิพัฒน์ประชา                                                                                                       |     |
| การส่งเสริมการปลูกพืชเศรษฐกิจด้วยนวัตกรรม IoT เชิงสร้างสรรค์เพื่อวิเคราะห์พื้นที่<br>ปลูกพืชที่เหมาะสมในตำบลแม่วิน อำเภอแม่วาง จังหวัดเชียงใหม่.....                        | 91  |
| ชนินทร์ มัทธนชัย และบุษราภรณ์ มัทธนชัย                                                                                                                                      |     |
| นวัตกรรมในการผลิตมะละกอปลอดภัย.....                                                                                                                                         | 107 |
| รภัสสา จันทาศรี                                                                                                                                                             |     |

การศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการผลิตปุ๋ยอินทรีย์อัดเม็ดจากมูลสัตว์  
และผลต่อการเจริญเติบโตของผักบุ้งจีน  
Optimum Ratio for Manure Fertilizer Pellets and Effects on the growth of  
Water Convolvulus (*Ipomoea Aquatica*)

กนกวรรณ ยันตะบุศย์\* ภัชญา เสาวเวียง ประภัสสร บัวนาค และวีรญา สิงคนิภา  
Kanokwan Yantaboot\*, Patchaya Saoviang, Prapussorn Buanak  
and Weeraya Singcanipa

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์  
Faculty of Science and Technology, Surindra Rajabhat University  
Email: kanokwan.ya@srru.ac.th

Received : March 26, 2025  
Revised : October 16, 2025  
Accepted : December 1, 2025

### บทคัดย่อ

การผลิตปุ๋ยคอกอัดเม็ดจากมูลโค มูลกระบือ และมูลสุกร มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอัตราส่วนผสมปุ๋ยคอกที่เหมาะสมในการอัดเม็ดปุ๋ยสำเร็จรูป โดยศึกษาอัตราส่วนผสมปุ๋ยคอกมีทั้งหมด 7 สูตร ใช้แยมันสำหรับเป็นตัวแทนปุ๋ยคอก พบว่า อัตราส่วนที่เหมาะสมในการขึ้นรูปเม็ดปุ๋ย (ปุ๋ยคอก : แยมันสำหรับ) คือ 90 : 10 วิเคราะห์หาปริมาณร้อยละธาตุอาหารหลัก (N-P-K) ของปุ๋ยแต่ละสูตร เทียบกับมาตรฐานปุ๋ยของ กรมวิชาการเกษตรกระทรวงเกษตรและสหกรณ์ พบว่า มูลโค มูลกระบือ และมูลสุกร มีปริมาณร้อยละธาตุอาหารหลักดังนี้ มูลโค มีปริมาณร้อยละไนโตรเจน  $0.857 \pm 0.016$ , ร้อยละฟอสฟอรัส  $0.193 \pm 0.006$ , ร้อยละโพแทสเซียม  $0.995 \pm 0.036$  มูลกระบือมีปริมาณร้อยละไนโตรเจน  $0.587 \pm 0$ , ร้อยละฟอสฟอรัส  $0.866 \pm 0.006$ , ร้อยละโพแทสเซียม  $1.156 \pm 0.008$  และมูลสุกรมีปริมาณร้อยละไนโตรเจน  $0.400 \pm 0.016$ , ร้อยละฟอสฟอรัส  $0.834 \pm 0.006$ , ร้อยละโพแทสเซียม  $0.830 \pm 0.020$  ตามลำดับ ปริมาณร้อยละธาตุอาหารหลักของเม็ดปุ๋ยมีปริมาณร้อยละไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานโดยกรมวิชาการเกษตร ประสิทธิภาพของปุ๋ยคอกอัดเม็ดต่อการเจริญเติบโตของผักบุ้ง สูตร 7 เป็นสูตรที่ต้นผักบุ้งจีนมีความสูงเฉลี่ยสูงสุดคือ 22.5 cm มีน้ำหนักสดประมาณ 9 กรัม และค่าเฉลี่ยจำนวนใบ เท่ากับ 9.67

คำสำคัญ: ปุ๋ยอัดเม็ด ปุ๋ยคอก วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

## ABSTRACT

The study on the production of pelleted manure from bovine (cow), bubaline (buffalo), and porcine (pig) sources aimed to determine the optimal mixing ratio for ready-made fertilizer pellets. Seven different ratios were tested using tapioca starch as a binder, and the optimal ratio for forming the pellets (manure:tapioca starch) was found to be 90:10. Analysis of the initial major plant nutrients (N-P-K) revealed the following contents: bovine manure had  $0.857 \pm 0.016\%$  N,  $0.193 \pm 0.006\%$  P, and  $0.995 \pm 0.036\%$  K; bubaline manure had  $0.587 \pm 0\%$  N,  $0.866 \pm 0.006\%$  P, and  $1.156 \pm 0.008\%$  K; and porcine manure had  $0.400 \pm 0.016\%$  N,  $0.834 \pm 0.006\%$  P, and  $0.830 \pm 0.020\%$  K, respectively. Crucially, the major nutrient content (N, P, and K) in the finished fertilizer pellets was higher than the standard criteria set by the Department of Agriculture, Ministry of Agriculture and Cooperatives. Furthermore, in testing the efficacy of the pelleted manure on water spinach growth, Formula 7 yielded the best results, with the Chinese water spinach plants achieving the highest average height of 22.5 cm, an average fresh weight of approximately 9 grams, and an average leaf count of 9.67.

**Keywords:** Pellet fertilizer, Manure fertilizer, Agricultural wastes

## บทนำ

ปุ๋ย (Fertilizer) คือ วัสดุที่ได้จากสิ่งมีชีวิต (Organic) หรือกระบวนการสังเคราะห์ทางเคมี (Inorganic) ที่ประกอบด้วยธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืชโดยเฉพาะอย่างยิ่ง ธาตุอาหารหลักคือ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม และธาตุอาหารอื่น ๆ ปุ๋ยสามารถแบ่งตามแหล่งที่มาองค์ประกอบ และเทคโนโลยี ได้ 3 ชนิดได้แก่ 1) ปุ๋ยอนินทรีย์ (Inorganic fertilizer) คือปุ๋ยที่มีองค์ประกอบของสารอนินทรีย์จากการสังเคราะห์ ยกเว้นปุ๋ยยูเรีย ( $\text{NH}_2\text{CONH}_2$ ) อาจเป็นปุ๋ยเดี่ยวหรือปุ๋ยผสม 2) ปุ๋ยอินทรีย์ (Organic fertilizer) มีสารประกอบเป็นสารอินทรีย์ เช่น ปุ๋ยคอก, ปุ๋ยหมัก, ปุ๋ยพืชสด และ 3) ปุ๋ยอินทรีย์น้ำ (Liquid Organic Fertilizer) คือปุ๋ยที่มีจุลินทรีย์เป็นองค์ประกอบ (ศิริพร, 2557) ปัจจุบันพบว่า เกษตรกรไทยเลือกใช้ปุ๋ยเคมีเพื่อเร่งการเจริญเติบโตของพืช เพิ่มผลผลิตให้มีปริมาณเพิ่มขึ้น โดยไม่คำนึงถึงผลเสียต่อสภาพแวดล้อม และคุณภาพดิน ในปี 2563 ประเทศไทยใช้ปุ๋ยเคมีคิดเป็นมูลค่า 46 ล้านบาท (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2564) ผลกระทบของการใช้ปุ๋ยเคมีเป็นระยะเวลานานส่งผลให้สภาพดินเสื่อมโทรม ขาดความอุดมสมบูรณ์ไม่สามารถเพาะปลูกพืชได้

เช่น ดิน มีความเป็นกรด โครงสร้างของดินเสื่อมสภาพ ปุ๋ยอินทรีย์จึงเป็นอีกหนึ่งทางเลือกเพื่อช่วยแก้ปัญหาดังกล่าว (ดรูณี, 2565) เนื่องจากปุ๋ยอินทรีย์มีจุลินทรีย์ มีธาตุอาหารหลัก ธาตุอาหารรองและธาตุอาหารเสริม ช่วยปรับปรุงโครงสร้างของดินทำให้ดินร่วนซุย (สุมิตร, 2562; จักรกฤษ และคณะ, 2563; ปุณณดา และคณะ, 2563; เบ็ญจพร กุลนิตย์ และคณะ, 2565) ปุ๋ยคอกเป็นอินทรีย์วัตถุที่เกิดจากการสะสมของมูลสัตว์เลี้ยงชนิดต่าง ๆ ที่มีการย่อยสลายบางส่วนในคอกสัตว์ที่อยู่ในรูปที่เป็นของแข็ง ของเหลว ส่วนใหญ่เป็นมูลสัตว์เลี้ยง เช่น มูลโค มูลเป็ด มูลไก่ มูลสุกร มูลกระบือ นิยมใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติดิน และสามารถปลดปล่อยธาตุอาหารให้แก่พืช ทำให้ได้ผลผลิตเพิ่มขึ้นมากกว่าการไม่ใส่ปุ๋ยคอก (สำราญ และ พรชัย, 2553) ดังนั้นปุ๋ยคอกเป็นอีกทางเลือกเพื่อปรับปรุงสภาพดิน เพราะสามารถหาได้ง่าย มีปริมาณมากเพียงพอ และช่วยให้เกษตรกรลดต้นทุน (อภิศรา และคณะ, 2565) ข้อเสียของปุ๋ยคอก คือเรื่องกลิ่น ซึ่งแก๊สที่มากับกลิ่น เช่น แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $H_2S$ ) และแอมโมเนีย ( $NH_3$ ) จะมีกลิ่นรุนแรง หากมีความเข้มข้นสูงอาจทำให้ระคายเคืองต่อตา จมูก (Schiffman et al., 2001) ปัจจุบันปุ๋ยอินทรีย์อัดเม็ดได้รับความนิยมจากเกษตรกรภายใน ประเทศเนื่องจากสะดวกในการนำไปใช้และการเก็บรักษา (ขวลิต และคณะ, 2564)

ทางผู้วิจัยมีวัตถุประสงค์เพื่อนำมูลสัตว์ มาขึ้นรูปอัดเม็ดเพื่อการใช้งานที่สะดวกง่าย ลดปัญหาของกลิ่นเพื่อประโยชน์ต่อการนำไปใช้เพิ่มประสิทธิภาพให้ดิน พืชที่ต้องการปลูกลงไปในดินและเป็นแนวทางให้เกษตรกรเพิ่มมูลค่าของปุ๋ยหรือวัตถุดิบในท้องถิ่นมาปรับใช้ให้เกิดประโยชน์ ลดต้นทุนการผลิตทางด้านปุ๋ยอย่างยั่งยืน

#### วัตถุประสงค์การวิจัย

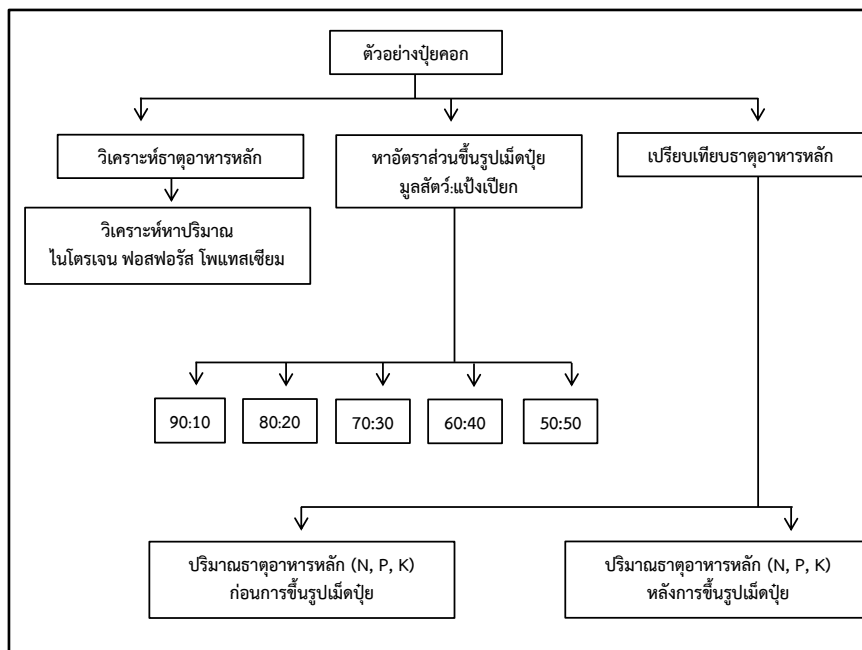
1. ศึกษาปริมาณร้อยละธาตุอาหารหลัก (N-P-K) ในตัวอย่างปุ๋ยคอกทั้ง 3 ชนิด (มูลโค มูลกระบือ และมูลสุกร) เพื่อผลิตปุ๋ยคอกอัดเม็ด
2. ศึกษาอัตราส่วนการขึ้นรูปที่เหมาะสมในการผลิตปุ๋ยอินทรีย์อัดเม็ดจากมูลสัตว์
3. ศึกษาประสิทธิภาพของปุ๋ยคอกอัดเม็ดต่อการเจริญเติบโตของผักบุ้ง

#### วิธีการดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้ เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์ปุ๋ยคอกอัดเม็ดโดยการนำมาผสมกับแป้งมันสำปะหลังเป็นตัวประสาน และเทียบปริมาณร้อยละธาตุอาหารหลัก (N-P-K) กับมาตรฐานของ กรมวิชาการเกษตร (2548) โดยมีรายละเอียดการดำเนินการวิจัยดังนี้

#### การเตรียมตัวอย่างมูลสัตว์

การเก็บตัวอย่างมูลสัตว์ในการเก็บตัวอย่างปุ๋ยคอกทั้ง 3 ชนิด คือ (มูลโค, มูลกระบือ, มูลสุกร) เก็บตัวอย่างมาจากหมู่บ้านทางของ หมู่ที่ 9 ตำบลระแงง อำเภอศีขรภูมิ จังหวัดสุรินทร์ นำมูลสัตว์ที่เก็บมาวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารหลักก่อนและหลังการอัดเม็ด ศึกษาหาอัตราส่วนขึ้นรูปที่เหมาะสม และการศึกษาประสิทธิภาพของปุ๋ยคอกอัดเม็ดต่อการเจริญเติบโตของผักบุ้ง ดังแผนการทดลองดังภาพประกอบ 1



ภาพประกอบ 1 แผนผังกระบวนการทดลอง

### สารเคมี และเครื่องมือ

1. ซีลีเนียมมิกซ์
2. กรดซัลฟิวริก ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) เกรด AR บริษัท RCI Labscan
3. กรดไฮโดรคลอริก ( $\text{HCl}$ ) เกรด AR บริษัท RCI Labscan
4. สารละลายโมลิบโดวานาเดต เกรด AR บริษัท Kemaus
5. กรดไนตริก ( $\text{HNO}_3$ ) เกรด AR บริษัท Merk
6. กรดไฮเปอร์คลอริก ( $\text{HClO}_4$ ) เกรด AR บริษัท Kemaus
7. แคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) เกรด AR บริษัท Kemaus
8. แป้งมันสำปะหลัง
9. เครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (ยี่ห้อ PerkinElmer UV/VIS Lambda 365 )
10. เครื่องอะตอมิกสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (ยี่ห้อ PerkinElmer Atomic Absorption Spectrometer AAnalyst 400)

Spectrometer AAnalyst 400)

### การวิเคราะห์มูลสัตว์

การวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจน โดยการชั่งตัวอย่างที่บดผ่านตะแกรงขนาด 40 mesh ปริมาตร 1.00 กรัม ใส่ในหลอดย่อยขนาด 800 มิลลิลิตร เติมนีลีนีเนียมมิกซ์ 3 กรัม ในกรดซัลฟิวริก เข้มข้นประมาณ 15 มิลลิลิตร เขย่าแล้วตั้งทิ้งไว้ 15 นาที นำไปย่อยด้วยเครื่องย่อยจนสารละลายใสไม่มีสี

จากนั้นทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องและเติมน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ จากนั้นนำไปกลั่นจนได้ปริมาตร 150 มิลลิลิตร จากนั้นนำสารที่ได้จากกระบวนการกลั่นไทเทรตด้วยสารละลายมาตรฐานกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ จนถึงจุดยุติจะได้สารละลายสีชมพู คำนวณหาปริมาณไนโตรเจน จากสมการ 1

$$\% N = \frac{N.(HCl) (mL.HCl - mL.Blank) \times 14.0067 \times 100}{\text{Weight of sample} \times 1000} \quad (1)$$

เมื่อ

N. (HCl) = ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานกรดไฮโดรคลอริก

mL HCl = ปริมาณของสารละลายมาตรฐานกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ในการไทเทรตกับตัวอย่าง

mL Blank = ปริมาณของสารละลายมาตรฐานกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ในการไทเทรต Blank

Weight of sample = น้ำหนักของตัวอย่าง หน่วยเป็นกรัม

**การวิเคราะห์หาปริมาณฟอสฟอรัส** มีการสร้างกราฟมาตรฐานเตรียมสารละลายมาตรฐานฟอสฟอรัสความเข้มข้น 0 4 8 12 และ 16 ppm เติมสารละลายโมลิบโดวานาเดต 5 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 30 นาที นำสารละลายมาตรฐานวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 420 nm สร้างกราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มข้นและค่าการดูดกลืนแสง ส่วนขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างปุ๋ย ทำได้โดยการบดปุ๋ยให้ละเอียดผ่านตะแกรงขนาด 40 mesh และอบที่อุณหภูมิ 75°C 24 ชั่วโมง แล้วชั่งตัวอย่างปุ๋ย 0.2 กรัม เติมกรดผสม (HNO<sub>3</sub> : HClO<sub>4</sub>) อัตราส่วน 1 : 1 ปริมาตร 10 มิลลิลิตร นำไปย่อยบนเตาให้ความร้อน ประมาณ 30 นาที ทำการกรองสารละลายหลังการย่อยส่วนการวิเคราะห์ทำได้โดยปิเปตต์สารละลายตัวอย่าง 1 มิลลิลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร เติมสารละลายโมลิบโดวานาเดต 5 มิลลิลิตร ปรับปริมาตร 50 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 30 นาที จากนั้นนำสารตัวอย่างวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง ยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 420 nm คำนวณหาปริมาณฟอสฟอรัสจากสมการ 2

$$\%P = \frac{2.3 \times r \times df \times 100}{S \times 10^6} \quad (2)$$

เมื่อ

r = ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสเมื่อเทียบกับกราฟมาตรฐาน

df = อัตราการเจือจาง

S = น้ำหนักของตัวอย่าง

**การวิเคราะห์ปริมาณโพแทสเซียม** มีขั้นตอนการเตรียมสารละลายซัพเพอร์คาร์บอเนตโดยชั่งแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) จำนวน 1.25 กรัม ใส่ในปิกรเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น 5 มิลลิลิตร เติม กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น ปริมาณ 10 มิลลิลิตร นำไปให้ความร้อน 15 นาทีทิ้งไว้ให้เย็น แล้วนำสารหลังจากต้มปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นปริมาณ 100 มิลลิลิตร ส่วนขั้นตอนการสร้างกราฟมาตรฐานทำได้โดยเตรียมสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมความเข้มข้น 0 3 6 9 12 และ 15 ppm จากสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมความเข้มข้น 100 ppm เติมสารละลายซัพเพอเรเซอร์ 10 มิลลิลิตร จากนั้นปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น นำสารละลายตัวอย่างและสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียม วิเคราะห์ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอพซอร์ชันสเปกโตรมิเตอร์ หาปริมาณโพแทสเซียมด้วยสมการ 3

$$\% \text{K}_2\text{O} = \frac{1.2045 \times \text{ppm K} \times \text{dilution factor} \times 100}{\text{wt. of sample} \times 10^6} \quad (3)$$

เมื่อ

ppm K = ค่าโพแทสเซียมอ่านได้จากเครื่อง

dilution factor = ค่าแฟกเตอร์ความเจือจาง

wt. of sample = น้ำหนักของตัวอย่าง

### การศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการทำปุ๋ยคอกอัดเม็ด

การทำปุ๋ยคอกอัดเม็ดโดยการขึ้นรูปเม็ดปุ๋ยด้วยแป้งมันสำปะหลัง ซึ่งต้องหาอัตราส่วนแป้งมันสำปะหลังต่อปุ๋ยคอก ในอัตราส่วนต่าง ๆ เพื่อให้ทราบว่าอัตราส่วนไหนเป็นอัตราส่วนที่ดีที่สุด ขั้นตอนผลิตปุ๋ยเม็ดดังภาพประกอบ 2 ซึ่งทางผู้วิจัยได้ทดลองนำแป้งมันสำปะหลัง 100 กรัม เติมน้ำ  $300 \text{ cm}^3$  กวนให้ความร้อนจนแป้งมันสำปะหลังสุก มาผสมกับปุ๋ยในอัตราส่วนดังตารางที่ 1 ต่อ 1 อัตราส่วน คลุกเคล้าให้เข้ากัน สังเกตความชื้นของปุ๋ยที่ผสมด้วยการบีบผสมด้วยมือสามารถจับเป็นก้อน ทำการอัดเม็ดปุ๋ยด้วยเครื่องอัดเม็ด จากนั้นนำเม็ดปุ๋ยที่ได้ตากแดดให้แห้ง ประมาณ 1 วัน



ภาพประกอบ 2 ขั้นตอนการผลิตปุ๋ยคอกอัดเม็ดโดยใช้มูลกระปือ

ตารางที่ 1 การหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของปุ๋ยคอกอัดเม็ด

| วัตถุดิบ                         | อัตราส่วน |
|----------------------------------|-----------|
| มูลสัตว์กระปือ + แป้งมันสำปะหลัง | 50 : 50   |
| มูลสัตว์กระปือ + แป้งมันสำปะหลัง | 60 : 40   |
| มูลสัตว์กระปือ + แป้งมันสำปะหลัง | 70 : 30   |
| มูลสัตว์กระปือ + แป้งมันสำปะหลัง | 80 : 20   |
| มูลสัตว์กระปือ + แป้งมันสำปะหลัง | 90 : 10   |

#### การศึกษาประสิทธิภาพของปุ๋ยคอกอัดเม็ดต่อการเจริญเติบโตของผักบุ้ง

ผู้วิจัยได้ทำการปลูกผักบุ้งจีนและทดลองใช้ปุ๋ยทั้ง 7 สูตร โดยมีสูตรที่มีส่วนผสมและอัตราส่วนในแต่ละกรรมวิธีดังตารางที่ 2 และนำปุ๋ยอัดเม็ดที่ได้จากสูตร 7 สูตรมาศึกษาประสิทธิภาพของปุ๋ยคอกอัดเม็ดต่อการเจริญเติบโตของผักบุ้ง โดยทำการปลูกในถุงพลาสติกขนาด 7 x 11 นิ้ว และนำดินปลูกมา

ใส่ถุงพลาสติกทำการปลูกผักบั้งจำนวน 5 เมล็ด และทำเมื่อผักบั้งอายุ 25 วัน ทำการใส่ปุ๋ยอัดเม็ด ครั้งแรก 10 กรัมต่อถุง ทุก ๆ 5 วันจนครบ 25 วัน โดยมีชุดควบคุม อีก 3 ถุงที่ไม่ใส่ปุ๋ย ทำการรดน้ำ ทุกเช้า และเย็นจากนั้นวัดความสูงของลำต้น จำนวนใบ ดังภาพประกอบ 3

ตารางที่ 2 อัตราส่วนผสมปุ๋ยคอกอัดเม็ด

| สูตร | วัตถุดิบ                                      | อัตราส่วน         |
|------|-----------------------------------------------|-------------------|
| 1    | มูลโค + แป้งมันสำปะหลัง                       | 90 : 10           |
| 2    | มูลกระบือ + แป้งมันสำปะหลัง                   | 90 : 10           |
| 3    | มูลสุกร + แป้งมันสำปะหลัง                     | 90 : 10           |
| 4    | มูลโค + มูลกระบือ + แป้งมันสำปะหลัง           | 45 : 45 : 10      |
| 5    | มูลโค + มูลสุกร + แป้งมันสำปะหลัง             | 45 : 45 : 10      |
| 6    | มูลกระบือ + มูลสุกร + แป้งมันสำปะหลัง         | 45 : 45 : 10      |
| 7    | มูลโค + มูลกระบือ + มูลสุกร + แป้งมันสำปะหลัง | 30 : 30 : 30 : 10 |



ภาพประกอบ 3 ประสิทธิภาพของปุ๋ยคอกอัดเม็ด

### ผลการวิจัย

#### ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารหลักในปุ๋ยคอกทั้ง 3 ชนิด

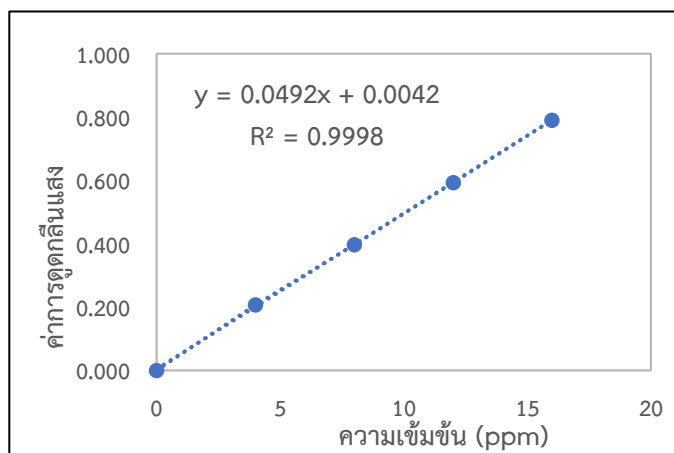
จากตารางที่ 3 แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณร้อยละไนโตรเจนทั้งหมดในมูลโค มูลกระบือ และ มูลสุกร พบว่า มีปริมาณร้อยละของไนโตรเจนต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานของกรมวิชาการเกษตร ปุ๋ยมูลโค มีปริมาณร้อยละไนโตรเจนมากที่สุด คือ  $0.857 \pm 0.016$  ปุ๋ยมูลกระบือ  $0.587 \pm 0$  และปุ๋ยมูลสุกร  $0.400 \pm 0.016$  ตามลำดับ การวิเคราะห์ปริมาณร้อยละฟอสฟอรัสทั้งหมดในปุ๋ยคอกทั้ง 3 ชนิดเทียบกับ

กราฟมาตรฐานดังภาพประกอบ 4 พบว่า ปุ๋ยมูลกระป๋องมีปริมาณร้อยละฟอสฟอรัสมากที่สุดคือ  $0.866 \pm 0.006$  ปุ๋ยมูลสุกรมีปริมาณร้อยละฟอสฟอรัส  $0.834 \pm 0.006$  และมูลโคมีปริมาณร้อยละฟอสฟอรัส  $0.193 \pm 0.006$  ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบปริมาณฟอสฟอรัสตามเกณฑ์มาตรฐานโดยกรมวิชาการเกษตรกำหนด พบว่า ปุ๋ยมูลโคมีปริมาณร้อยละ  $0.193 \pm 0.006$  มีปริมาณต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานโดยกรมวิชาการเกษตร การวิเคราะห์ปริมาณร้อยละโพแทสเซียมทั้งหมดในมูลโค มูลกระป๋อง และมูลสุกรเทียบกับกราฟมาตรฐาน ดังภาพประกอบ 5 พบว่า มีปริมาณร้อยละของโพแทสเซียมมูลโค มูลกระป๋อง และมูลสุกร คือ  $0.995 \pm 0.036$ ,  $1.156 \pm 0.008$  และ  $0.830 \pm 0.020$  ตามลำดับ พบว่า ปริมาณร้อยละของโพแทสเซียมสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานโดยกรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์

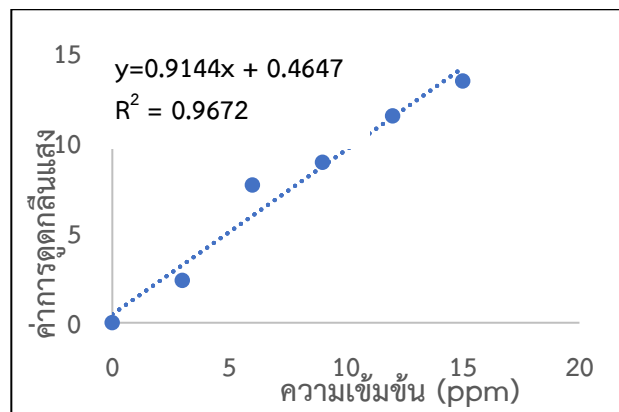
ตารางที่ 3 ปริมาณธาตุอาหารหลักในปุ๋ยคอกทั้ง 3 ชนิด

| ธาตุอาหารหลัก     | ปริมาณธาตุอาหาร<br>(ร้อยละโดยน้ำหนัก) |                   |                   | มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์<br>(ร้อยละโดยน้ำหนัก)* |
|-------------------|---------------------------------------|-------------------|-------------------|--------------------------------------------|
|                   | มูลโค                                 | มูลกระป๋อง        | มูลสุกร           |                                            |
| ไนโตรเจนทั้งหมด   | $0.857 \pm 0.016$                     | $0.587 \pm 0$     | $0.400 \pm 0.016$ | ไม่น้อยกว่า ร้อยละ 1.0                     |
| ฟอสฟอรัสทั้งหมด   | $0.193 \pm 0.006$                     | $0.866 \pm 0.006$ | $0.834 \pm 0.006$ | ไม่น้อยกว่า ร้อยละ 0.5                     |
| โพแทสเซียมทั้งหมด | $0.995 \pm 0.036$                     | $1.156 \pm 0.008$ | $0.830 \pm 0.020$ | ไม่น้อยกว่า ร้อยละ 0.5                     |

ที่มา: \* ประกาศกรมวิชาการเกษตร เรื่องกำหนดเกณฑ์ปุ๋ยอินทรีย์ พ.ศ. 2548



ภาพประกอบ 4 กราฟมาตรฐานในการวิเคราะห์หาปริมาณฟอสฟอรัส



ภาพประกอบ 5 กราฟมาตรฐานในการวิเคราะห์หาปริมาณโพแทสเซียม

#### ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารหลักในปุ๋ยคอกอัดเม็ด

จากตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ปริมาณร้อยละธาตุอาหารหลักก่อน และหลังทำปุ๋ยคอกอัดเม็ด ทั้ง 7 สูตร หากเปรียบเทียบปริมาณร้อยละไนโตรเจนของปุ๋ยคอกก่อนและหลังการขึ้นรูปอัดเม็ดพบว่า ปริมาณร้อยละไนโตรเจนหลังทำการอัดเม็ดปุ๋ยแล้วมีปริมาณเพิ่มขึ้นทุกสูตร เนื่องจากกาบแป้ง มันสำปะหลัง เป็นตัวประสานที่ใช้ในการขึ้นรูปเม็ดปุ๋ยให้เม็ดปุ๋ยยึดติดกันขึ้นรูปเป็นเม็ดได้ อาจจะมี ไนโตรเจนเพิ่มขึ้นเนื่องจากกาบแป้งมันสำปะหลัง (กิตติชัย โสพันทา และคณะ, 2558) เปรียบเทียบ ร้อยละฟอสฟอรัสหลังการขึ้นรูปพบว่า ปริมาณร้อยละฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมมีปริมาณเพิ่มขึ้น ผ่านเกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ของกรมวิชาการเกษตร

ตารางที่ 4 ปริมาณร้อยละธาตุอาหารหลักก่อนและหลังทำปุ๋ยอัดเม็ดทั้ง 7 สูตร

| สูตร | ค่าเฉลี่ย ( $\bar{X}$ ) ปริมาณร้อยละของธาตุอาหาร ก่อนทำปุ๋ยอัดเม็ด |             |             | ค่าเฉลี่ย ( $\bar{X}$ ) ปริมาณร้อยละของธาตุอาหาร หลังทำปุ๋ยอัดเม็ด |             |              |
|------|--------------------------------------------------------------------|-------------|-------------|--------------------------------------------------------------------|-------------|--------------|
|      | ไนโตรเจน                                                           | ฟอสฟอรัส    | โพแทสเซียม  | ไนโตรเจน                                                           | ฟอสฟอรัส    | โพแทสเซียม   |
| 1    | 0.857±0.016                                                        | 0.193±0.006 | 0.995±0.036 | 1.727±0.032                                                        | 0.772±0.012 | 9.52±0.219   |
| 2    | 0.587±0                                                            | 0.866±0.006 | 1.156±0.008 | 1.605±0.016                                                        | 1.363±0.005 | 3.464±0.106  |
| 3    | 0.400±0.016                                                        | 0.834±0.006 | 0.830±0.020 | 1.512±0.028                                                        | 3.191±0.006 | 6.524±0.415  |
| 4    | 0.7185±0.016                                                       | 0.529±0.006 | 1.075±0.022 | 1.605±0.070                                                        | 1.911±0.013 | 9.791±0.429  |
| 5    | 0.628±0.016                                                        | 0.514±0.006 | 0.913±0.028 | 1.717±0.016                                                        | 0.226±0     | 11.378±0.692 |
| 6    | 0.49±0.016                                                         | 0.850±0.006 | 0.993±0.014 | 1.661±0.080                                                        | 2.200±0.006 | 8.69±0.634   |
| 7    | 0.612±0.010                                                        | 0.631±0.006 | 0.994±0.021 | 1.596±0.056                                                        | 1.770±0.007 | 12.877±0.890 |

### ผลการศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการทำปุ๋ยอัดเม็ด

ผลหาอัตราส่วนและวิธีการที่เหมาะสมในการทำปุ๋ยคอกอัดเม็ด ทำการขึ้นรูปเม็ดโดยใช้แป้งมันสำปะหลังต่อปุ๋ยคอกในอัตราส่วนต่าง ๆ พบว่า อัตราส่วน 50 : 50 มีปริมาณแป้งเยอะเกินไปทำให้จับตัวกันค่อนข้างมีเม็ดที่ใหญ่ พอแห้งปุ๋ยมีลักษณะที่แข็งมาก ละลายได้แต่ใช้เวลานาน อัตราส่วน 60 : 40 มีปริมาณแป้งเยอะทำให้จับตัวกันค่อนข้างมีเม็ดใหญ่ พอแห้งแล้วมีความแข็งละลายน้ำได้แต่ใช้เวลานาน อัตราส่วน 70 : 30 มีปริมาณแป้งพอที่จะทำให้จับตัวกันแล้วค่อนข้างมีเม็ดที่เท่ากัน พอแห้งแล้วเม็ดแข็งเล็กน้อย ละลายน้ำได้ใช้เวลาไม่นาน อัตราส่วน 80 : 20 มีปริมาณแป้งที่พอจะทำให้ปุ๋ยจับตัวกันแล้วค่อนข้างเป็นเม็ดเล็ก เม็ดใหญ่ ขนาดไม่ค่อยเท่ากัน พอแห้งแล้วเม็ดแข็งเล็กน้อยละลายน้ำได้ใช้เวลา ไม่นาน อัตราส่วน 90 : 10 เป็นอัตราส่วนที่ดีที่สุดในการอัดเม็ด เนื่องจากเมื่อนำเข้าเครื่องอัดเม็ดแล้วสามารถควบคุมขนาดของเม็ดให้เท่ากันได้ เมื่อนำไปละลายน้ำ พบว่า สามารถละลายน้ำได้เร็วกว่าอัตราส่วนอื่น ๆ เมื่อนำอัตราส่วนได้มาผสมกับมูลโค มูลกระบือและมูลสุกรได้ปุ๋ยอัดเม็ดทั้งหมด 7 สูตร ดังตารางที่ 2

### ผลของการศึกษาประสิทธิภาพของปุ๋ยคอกอัดเม็ดต่อการเจริญเติบโตของผักบุ้ง

การทดสอบการใช้ปุ๋ยแต่ละสูตร จะวิธีการสุ่มต้นผักบุ้งจึ้นนำไปวัดการเจริญเติบโตแบบกระจาย ทั้ง 3 กระถางโดยการวัดความสูง น้ำหนักสด และจำนวนใบได้ผลการเจริญเติบโตของผักบุ้งแสดงดังตารางที่ 5 พบว่า สูตรปุ๋ยสูตรที่ 7 เป็นสูตรที่ดีที่สุดเนื่องจากให้ความสูงของต้นผักบุ้งจึ้นสูงที่สุดประมาณ 22.5 เซนติเมตร น้ำหนักสดประมาณ 9 กรัม และค่าเฉลี่ยจำนวนใบ 9.67

ตารางที่ 5 ผลการเจริญเติบโตของผักบุ้ง

| สูตร   | ค่าเฉลี่ยความสูง<br>(เซนติเมตร) | ค่าเฉลี่ยน้ำหนักสด<br>(กรัม) | ค่าเฉลี่ยจำนวนใบ<br>( $\bar{x}$ ) |
|--------|---------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|
| ควบคุม | 18.66                           | 5.33                         | 7.00                              |
| 1      | 20.00                           | 6.00                         | 9.33                              |
| 2      | 19.66                           | 5.83                         | 8.33                              |
| 3      | 21.33                           | 7.67                         | 8.67                              |
| 4      | 21.33                           | 7.33                         | 10.00                             |
| 5      | 22.17                           | 8.33                         | 9.00                              |
| 6      | 20.83                           | 6.67                         | 8.67                              |
| 7      | 22.5                            | 9.00                         | 9.67                              |

## อภิปรายผลการวิจัย

การพัฒนาปุ๋ยคอกอัดเม็ดเพื่อการเกษตรในเชิงพาณิชย์สามารถสรุปและอภิปรายผลได้ดังนี้

1. การวิเคราะห์หาปริมาณธาตุอาหารหลัก ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมในปุ๋ยคอก พบว่า ในปุ๋ยคอก ได้แก่ มูลโค มูลกระบือ และมูลสุกร มีปริมาณไนโตรเจนร้อยละ  $0.857 \pm 0.016$   $0.587 \pm 0$  และ  $0.400 \pm 0.016$  ตามลำดับซึ่งไนโตรเจนไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานเมื่อเทียบกับมาตรฐานกรมวิชาการ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ ปริมาณร้อยละฟอสฟอรัสของมูลโค มูลกระบือ และมูลสุกร  $0.193 \pm 0.006$   $0.866 \pm 0.006$  และ  $0.834 \pm 0.006$  ตามลำดับ มูลกระบือ และมูลสุกรผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้ที่กรมวิชาการเกษตร กระทรวงการเกษตรและสหกรณ์ปริมาณร้อยละโพแทสเซียมของมูลโค มูลกระบือ และมูลสุกร  $0.995 \pm 0.036$   $1.156 \pm 0.008$  และ  $0.830 \pm 0.020$  ตามลำดับ ผ่านเกณฑ์มาตรฐานกรมวิชาการเกษตร กระทรวงการเกษตรและสหกรณ์ ปริมาณร้อยละของธาตุอาหารหลักหลังขึ้นรูปมีปริมาณร้อยละของธาตุอาหารหลักสูงขึ้น เนื่องจากการใช้แอมโมเนียสำหรับเป็นตัวยึดประสานจากโครงสร้างของแอมโมเนียประกอบของไนโตรเจนจึงส่งผลให้ปริมาณไนโตรเจนหลังการขึ้นรูปเม็ดมีค่าเพิ่มขึ้น

2. ศึกษาอัตราส่วนการขึ้นรูปปุ๋ยอัดเม็ดที่เหมาะสม (ปุ๋ยคอก: แปะเปียก) 90 : 10 และสูตรปุ๋ยสูตรที่ 7 (มูลโค : มูลกระบือ : มูลสุกร : แปะมันสำปะหลัง) คือ 30 : 30 : 30 : 10 เป็นสูตรที่ดีที่สุดเนื่องจากให้ความสูงของต้นผักบุ้งจีนสูงที่สุดประมาณ 22.5 เซนติเมตร น้ำหนักสดประมาณ 9 กรัม และค่าเฉลี่ยจำนวนใบ 9.67

## สรุปผลการวิจัย

ผลการศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสม ในการผลิตปุ๋ยอินทรีย์อัดเม็ดจากมูลสัตว์และผลต่อการเจริญเติบโตของผักบุ้งจีน พบว่า ปริมาณธาตุอาหารหลัก ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส หลังการอัดขึ้นรูปมีปริมาณร้อยละธาตุอาหารหลักผ่านเกณฑ์มาตรฐานกรมวิชาการเกษตร กระทรวงการเกษตรและสหกรณ์ อัตราส่วนที่เหมาะสมในการขึ้นรูป (ปุ๋ยคอก : แปะเปียก) 90 : 10 และสูตรปุ๋ยที่ดีที่สุดคือ สูตรที่ 7 มีอัตราส่วน (มูลโค : มูลกระบือ : มูลสุกร : แปะมันสำปะหลัง) คือ 30 : 30 : 30 : 10

## เอกสารอ้างอิง

กรมวิชาการเกษตร. (2557). *ประกาศกรมวิชาการเกษตร เรื่อง มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ พ.ศ. 2548*. สืบค้นเมื่อวันที่ 3 กุมภาพันธ์ 2568, จาก <https://www.doa.go.th/ard/wp-content/uploads/2019/11/FEDOA11.pdf>.

- กิตติชัย โสพันทา, วิษุตา ภาโส, กนกวรรณ วรดง และ อนันตสิทธิ์ ไชยวังราช. (2558). การประดิษฐ์และสมบัติของกระถางชีวภาพ. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร*, 7(2), 1 - 7.
- จักรกฤษ ศรีล่อ, ศุภชัย ชัยภูมิ, ชัยวินทร์ นวลศรี, คงเดช พะสีนาม, ธันวมาศ กาศสนุก และปณณดา ทะรังสี. (2563). การใช้ปุ๋ยอัดเม็ดจากเศษผงใบยาสูบลินทรีย์วัดฤเพื่อเพิ่มผลผลิตคะน้า. *วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร*, 51(1), 190 - 195.
- ขวลิต รักษาภิรมณ์, พชรพร ปิ่นมณี, อารียา เกิดโต และสุภาพร พงศ์ธรพุกษ์. (2564). ปุ๋ยอินทรีย์อัดเม็ดจากปุ๋ยหมักเปลือกกาแฟและถ่านชีวภาพ. *วารสารวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์*, 13(18), 64 - 74.
- ดร.ณิ พวงบุตร และวชิราวุธ พิเศษไตร. (2565). ผลของการใช้มูลไส้เดือนร่วมกับการใช้ปุ๋ยเคมีต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของข้าวโพดข้าวเหนียว. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรธานี*, 10, 119 - 133.
- เบ็ญจพร กุลนิตย์, สุจินดา ปิตตาระโส และธนกร สิริตระกูลศักดิ์. (2565). ผลของชนิดอัตราของปุ๋ยอินทรีย์ต่อการเจริญเติบโต ผลผลิต และผลตอบแทนทางเศรษฐกิจของพืชของการผลิตคะน้า. *วารสารแก่นเกษตร*, 49(3), 538 - 550.
- ปณณดา ทะรังสี, ชัยวินทร์ นวลศรี, คงเดช พะสีนาม, ธันวมาศ กาศสนุก, นนทพร รัตนจักร และจักรกฤษ ศรีล่อ. (2563). ผลของปุ๋ยหมักจากของเสียกระบวนการผลิตไฮเทนจากน้ำกากส่า และกากยีสต์ร่วมกับวัสดุอินทรีย์ต่อผลผลิตดาวเรือง. *วารสารแก่นเกษตร*, 48(1), 989 - 994.
- ปิยะวัฒน์ ศรีธรรม, วิทยา อิ่มสำราญ, พิทักษ์ บุญไทย และ สุภา สีสนมาก. (2559). เครื่องผสมพร้อมกับการอัดเม็ดปุ๋ยอินทรีย์. *วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ*, 2(2), 87 - 96.
- ศิริพร กาทอง และเฉลิม เรื่องวิริยะชัย. (2557). การหาปริมาณไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมในปุ๋ยอินทรีย์น้ำ. *วารสารวิจัย มข. (ฉบับบัณฑิตศึกษา)*, 14(4), 57 - 68.
- สุมิตร วิลัยพร. (2562). ผลของการใช้ปุ๋ยหมักแบบเติมอากาศและปุ๋ยเคมีต่อผลผลิตผักบุ้ง. *วารสารวิชาการเกษตร*, 37(1), 48 - 58.
- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. (2564). *ปริมาณและมูลค่าการนำเข้าปุ๋ยเคมี*. สืบค้นเมื่อวันที่ 15 กันยายน 2568, จาก <https://www.oae.go.th/view/1/ปัจจัยการผลิต/TH>
- สำราญ วิจิตรพันธ์ และพรชัย ล้อวิลัย. (2553). ผลของปุ๋ยคอกและ/หรือปุ๋ยเคมีที่มีต่อผลผลิตและคุณค่าทางโภชนาการของถั่วเนาเปียร์ยักษ์ ภายใต้การให้น้ำชลประทาน. *วารสารวิจัย มข.*, 15(4), 271 - 282.
- อภิศรา เตะเซววงกุล, คณิตา ตั้งคณานุรักษ์, ดาวจรัส เกตุโรจน์ และสุธี จรรยาสุทธีวงศ์. (2565). การใช้ประโยชน์มูลสัตว์เพื่อเป็นทางเลือกของการใช้ปุ๋ยเคมีอย่างเข้มข้นในการเกษตรของชุดดินรือเสาะ. *วารสารวิจัย มข. (ฉบับบัณฑิตศึกษา)*, 22(1), 156 - 167.

Schiffman, S.S., Bennett, J.L., Raymer, J.H. (2001). "The effect of environmental odors emanating from commercial swine operations on the mood of nearby residents. *Brain Research Bulletin*, 37(4), 369 - 375.

ผลกระทบของการเติมโดโลไมต์ต่อสมบัติของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ฐานกากตะกอนอะลูมิเนียม  
The Effects of Dolomite Addition on the Properties of Aluminium Dross  
Residue-Based Geopolymer Material

นางสาวธัชวณี พึ่งพา<sup>1</sup> พัทธ์ เหล่ารัตนกุล<sup>2</sup> และเบญญา เชิดหิรัญกร<sup>1\*</sup>

Haswanee Phungpha<sup>1</sup>, Pitak Laoratanakul<sup>2</sup>, and Benya Cherdhirunkorn<sup>1\*</sup>

สาขาวิชาวิศวกรรมและเทคโนโลยีวัสดุ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์<sup>1</sup>

Division of Materials and Textiles Technology, Faculty of Science and Technology,  
Thammasat University<sup>1</sup>

ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (NSTDA)<sup>2</sup>

National Metal and Materials Technology Center (MTEC), National Science and Technology  
Development Agency (NSTDA)<sup>2</sup>

Email: benya@tu.ac.th

Received : April 2, 2025

Revised : November 18, 2025

Accepted : December 1, 2025

### บทคัดย่อ

กากตะกอนอะลูมิเนียมเป็นของเสีย จากกระบวนการรีไซเคิลตะกอนอะลูมิเนียม ซึ่งมีก่ประสบปัญหาการกำจัดที่มีต้นทุนสูงและการลักลอบทิ้ง และผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีพบว่า มีปริมาณสารประกอบของอะลูมิเนียมสูง และมีซิลิกาเล็กน้อย ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการผลิตวัสดุจีโอพอลิเมอร์จากวัตถุดิบหลักคือกากตะกอนอะลูมิเนียม โดยเติมโดโลไมต์ในช่วง 0 ถึง 30% โดยน้ำหนัก และใช้สารละลายอัลคาไลน์เป็นตัวกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยา โดยจะใช้สารละลายผสมระหว่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 7 โมลาร์ และโซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) ในอัตราส่วน 1:3 และกำหนดอัตราส่วนของเหลวต่อของแข็งที่ 0.5 ผลการทดลองพบว่า กากตะกอนอะลูมิเนียมก่อให้เกิดก๊าซแอมโมเนียจากการทำปฏิกิริยาของ AlN และน้ำ หรือ AlN และ NaOH ทำให้วัสดุมีรูพรุนจำนวนมาก และมีกำลังรับแรงอัดไม่มาก อย่างไรก็ตามการเติมโดโลไมต์ช่วยเพิ่มความแข็งแรงของวัสดุ โดยค่ากำลังรับแรงอัดที่ดีที่สุดพบในวัสดุที่เติมโดโลไมต์ 10% แต่เมื่อเติมในปริมาณ 20-30% กลับส่งผลให้ความแข็งแรงลดลง นอกจากนี้ ได้ทำการวิเคราะห์โครงสร้างเฟส โครงสร้างจุลภาค และการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างด้วยเทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์, กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และเทคนิคการวิเคราะห์การดูดกลืนแสงอินฟราเรด ตามลำดับ จากผลการทดลองแสดง

ให้เห็นว่า วัสดุจีโอพอลิเมอร์ฐานกากตะกัณอะลูมิเนียมมีสมบัติที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานด้านวัสดุมวลเบาได้

**คำสำคัญ:** จีโอพอลิเมอร์ กากตะกัณอะลูมิเนียม โดโลไมท์

## ABSTRACT

Aluminium Dross (AD) is a waste product from the aluminium recycling process, which often faces high disposal costs and illegal dumping issues. The chemical composition analysis revealed a high amount of aluminium compounds and a small amount of silica in AD. In this research, the development of a geopolymer using AD as the main raw material was conducted. Dolomite in the range of 0-30 wt% was added as an additive. In the production of geopolymers, the mixed alkaline solution used as a reaction activator was the mixture of sodium hydroxide (NaOH, 7 M) and sodium silicate ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) in a ratio of 1:3. The solid raw materials and alkaline liquid were mixed at a liquid-to-solid ratio of 0.5. The results show that AD residue generates ammonia gas, resulting in a highly porous material with low compressive strength. However, the addition of dolomite enhances material strength as the highest compressive strength was obtained in the sample with 10 wt% dolomite. Further additions of dolomite (20-30 wt%) into the mixtures resulted in lower strength. Additionally, the phase structure, microstructure, and chemical structural changes were investigated using XRD, SEM, and FTIR techniques, respectively. The results indicated that this AD based geopolymer with 10 wt% dolomite established reasonable properties for the lightweight material application.

**Keywords:** Geopolymer, Aluminium dross residue, Dolomite

## บทนำ

ปัจจุบันปัญหาสิ่งแวดล้อม และภาวะโลกร้อนเป็นเรื่องที่ต้องให้ความสำคัญ เพื่อนำไปสู่การพัฒนาที่ยั่งยืน (Sustainable development) หนึ่งในปัญหาคือการที่โรงงานอุตสาหกรรมปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกระบวนการผลิต ซึ่งในอุตสาหกรรมวัสดุก่อสร้างอย่างปูนซีเมนต์ ก็เป็นหนึ่งใน

อุตสาหกรรมที่มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จำนวนมาก ถึงแม้ว่าปูนซีเมนต์จะเป็นวัสดุที่แข็งแรง และเป็นวัสดุที่นิยมใช้ในการก่อสร้าง แต่การผลิตปูนซีเมนต์ นั้นไม่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ในขั้นตอนการผลิตปูนซีเมนต์ต้องใช้พลังงานสูงในการเผาวัตถุดิบ ซึ่งอุณหภูมิในการเผาคือประมาณ 1,400 องศาเซลเซียส และในปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างการเผา ยังเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) เป็นจำนวนมาก ซึ่งเป็นก๊าซที่เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดภาวะโลกร้อน ปรากฏการณ์เรือนกระจก และฝนกรดอีกด้วย นอกจากนั้นยังส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิต ไม่ว่าจะเป็นสิ่งแวดล้อม มนุษย์และสัตว์อีกด้วย โดยในการผลิตปูนซีเมนต์ 1 ตัน จะมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถูกปล่อยออกมาถึงประมาณ 1 ตันด้วย (Poonyakanok, 2023) ดังนั้น จึงมีงานวิจัยจำนวนมากที่นำเสนอการวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ ซึ่งหนึ่งในวัสดุที่สามารถนำมาทดแทนปูนซีเมนต์ได้ก็คือ วัสดุจีโอพอลิเมอร์ (Geopolymers) ซึ่งสามารถช่วยลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และการใช้พลังงานได้อย่างมาก เมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ใช้ซีเมนต์ (Shobeiri, 2021; Stafford, 2016; McLellan, 2011) นอกจากนั้นยังมีขั้นตอนการผลิตง่ายไม่ซับซ้อน และไม่ทำลายหรือก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศ ซึ่งจีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสานระหว่างซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) และ อะลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) (Xu, 2005) ซึ่งมีงานวิจัยรายงานว่า เป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงสูง สามารถใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ได้ โดยในการผลิตใช้สารละลายที่มีความเป็นด่างสูงในการชะละลายพันธะของซิลิกาและอะลูมินา ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) และ โซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) ในการเชื่อมต่อกันใหม่ระหว่าง Si Al และ O หรือเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน โดยวัตถุดิบหลักที่ใช้จะต้องมีปริมาณซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) และอะลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) สูง ซึ่งสามารถพบได้ในวัสดุธรรมชาติ เช่น ดิน และวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมหรือการเกษตร เช่น เถ้าลอย (Fly ash) เป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่านหินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า และตะกอนเตาถลุงเหล็ก (Blast Furnace Slag) ผลพลอยได้จากการผลิตเหล็กและเหล็กกล้าจากเตาหลอม (Rashad, 2013)

ถึงแม้ว่า โดยทั่วไปวัสดุจีโอพอลิเมอร์จะใช้วัตถุดิบตั้งต้น ที่มีองค์ประกอบของซิลิกาและอะลูมินา แต่ในงานวิจัยนี้ สนใจศึกษาการผลิตวัสดุจีโอพอลิเมอร์จากกากตะกอนอะลูมิเนียมผสมโดโลไมท์ ซึ่งในวัสดุทั้งสองนี้มีปริมาณซิลิกาค่อนข้างน้อย และมีปริมาณสารประกอบอะลูมิเนียมสูง อย่างไรก็ตาม ในการผลิตโดยทั่วไปจะมีการใช้สารละลายอัลคาไลน์ได้แก่  $\text{NaOH}$  และ  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ในการทำปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน ซึ่งหากใช้วัตถุดิบที่มีปริมาณซิลิกาน้อย Si ที่จะดึงมาใช้ในโครงสร้างของจีโอพอลิเมอร์ จะได้มาจาก  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  จึงอาจจะต้องเพิ่มปริมาณ  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  สูงกว่าการผลิตจีโอพอลิเมอร์จากวัตถุดิบที่มีซิลิกาเป็นส่วนประกอบ

กากตะกอนอะลูมิเนียม เป็นเศษเหลือทิ้งที่ต้องกำจัดจากโรงงานรีไซเคิลโลหะอะลูมิเนียม ซึ่งเป็นอุตสาหกรรมที่มีจำนวนมากในประเทศไทย เนื่องจากโลหะอะลูมิเนียมจัดว่าเป็นวัสดุหนึ่งที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายเนื่องจากสมบัติที่ดีหลายประการ เช่น น้ำหนักเบา มีความแข็งแรง ไม่เกิดสนิม มีการนำอะลูมิเนียมมาใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นชิ้นส่วนรถยนต์ เครื่องครัว หรือเฟอร์นิเจอร์ ก็ตาม โดยมีหลายงานวิจัยที่ได้นำกากตะกอนอะลูมิเนียมมาใช้เป็นวัตถุดิบ ในการผลิตวัสดุจีโอพอลิเมอร์ เช่น งานวิจัยของ Pimchanok Puksisuwon และคณะ ได้ทำการผลิตวัสดุจีโอพอลิเมอร์

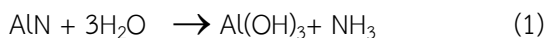
จากกากตะกอนอะลูมิเนียมและเถ้าขานอ้อย กำหนดความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้น 10 โมลาร์ และใช้อัตราส่วนระหว่าง  $\text{NaOH}:\text{Na}_2\text{SiO}_3$  เท่ากับ 1 : 3 และ 1 : 4 และใช้อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็งเท่ากับ 0.25 ซึ่งมีของเหลวในปริมาณน้อย เพื่อลดกลิ่นของแอมโมเนียที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาของกากตะกอนอะลูมิเนียมกับน้ำ และขึ้นรูปด้วยการอัดพบว่า การเติมกากตะกอนอะลูมิเนียม 50% โดยน้ำหนัก ให้ผลการทดสอบความแข็งแรงที่ดีที่สุด (Puksisuwan, 2018) อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ ยังไม่ได้ศึกษาจีโอพอลิเมอร์ที่มีปริมาณกากตะกอนอะลูมิเนียมมากกว่า 50%

งานวิจัย ของ Mohamed Hamdy Elseknidy ได้ทำการทดสอบสมบัติเชิงกล และความทนทานของส่วนผสมคอนกรีตที่ประกอบด้วยเถ้าลอย ตะกอนอะลูมิเนียม (Aluminium dross) และหินฝุ่นพบว่า เถ้าลอย 10% ตะกอนอะลูมิเนียม 10% และหินฝุ่น 20% มีสมบัติที่ดีกว่าคอนกรีตมาตรฐาน โดยมีค่าความแข็งแรงอัด (Compressive strength) 35 MPa และความแข็งแรงดัด (Flexural strength) 7 MPa [Elseknidy MH, 2020] และงานวิจัยของ Thye Foo Choo ได้นำตะกอนอะลูมิเนียม (Aluminium dross) กับเถ้าลอย มาเป็นวัตถุดิบเพื่อผลิตเซรามิกมัลติโฟรพอร์พบว่ามีสูตรที่เหมาะสมที่สุด คือ เถ้าลอย 80% กากตะกอนอะลูมิเนียม 20% (Choo, 2020)

นอกจากนี้ยังมีหลายงานวิจัยต้องการพัฒนาวัสดุทางเลือกใหม่เป็นวัสดุสีเขียว (Green materials) ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เช่น งานวิจัยของ J. O Dirisu ได้พัฒนาวัสดุคอมโพสิตสำหรับผ้าเปตาที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โดยใช้เปลือกไข่ กะลามะพร้าว กะลาปาล์ม ปอแก้ว และตะกอนอะลูมิเนียมประกอบกันเป็นโครงสร้าง ผลการวิจัยได้ผลิตภัณฑ์ผ้าเปตาที่มีความสามารถในการระบายความร้อน และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม (Dirisu, 2019) และมีงานวิจัยจำนวนมาก ได้ทำการพัฒนาวิธีการนำวัสดุเหลือทิ้งต่าง ๆ มาเป็นวัตถุดิบในการผลิตวัสดุจีโอพอลิเมอร์ เช่น ตะกอนจากเตาหลอมเหล็ก (Blast furnace slag) (Rashad, 2013) โดยวัสดุจีโอพอลิเมอร์มีความแข็งแรงสูง [Aziz I, 2019] ทนต่ออุณหภูมิและสารเคมี (Thunuguntla, 2018) และน่าจะนำมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ได้

กากตะกอนอะลูมิเนียมในงานวิจัยนี้ ได้นำมาจากโรงงานรีไซเคิลตะกอนอะลูมิเนียม (บริษัทท็อปไฟว์แมนูแฟคเจอร์ จำกัด) โดยเป็นส่วนที่เหลือทิ้งจากกระบวนการรีไซเคิล ซึ่งเป็นการนำตะกอนอะลูมิเนียมมาแยกเป็นส่วนที่เป็นก้อนขนาดใหญ่ ขนาดกลาง และขนาดเล็กเป็นฝุ่น โดยตะกอนก้อนใหญ่จะมีส่วนที่เป็นโลหะอะลูมิเนียมอยู่มาก ทำให้สามารถนำกลับไปผ่านการหลอมใหม่ และแยกโลหะอะลูมิเนียมออกมาได้ แต่ส่วนที่เป็นก้อนขนาดกลาง และเล็กมีโลหะอะลูมิเนียมอยู่น้อยมาก และไม่คุ้มกับการลงทุนนำไปหลอมใหม่ ดังนั้น โรงงานรีไซเคิลอะลูมิเนียมจากตะกอนจะต้องจ้างกำจัดเศษเหลือทิ้งตะกอนในส่วนนี้ โดยโรงงานต้องเสียค่าใช้จ่ายสูง ในการจ้างกำจัดราคา 3-5 บาทต่อกิโลกรัม หรือประมาณมากกว่า 2 ล้านบาทต่อปี (ข้อมูลจากบริษัทท็อปไฟว์ แมนูแฟคเจอร์ จำกัด) ผู้ประกอบการบางรายอาจทำการกำจัดแบบไม่ถูกต้องหรือขาดความรอบคอบนั้น ตะกอนอะลูมิเนียมจะสัมผัสกับความชื้นหรือน้ำ ทำให้เกิดกลิ่นฉุนรุนแรงของแอมโมเนีย ดังปฏิกิริยาในสมการ (1) ส่งผลให้มีอาการแสบจมูก และเป็นอันตรายต่อระบบหายใจอีกด้วย ดังนั้น จะต้องใช้ความระมัดระวังสูงในการกำจัด

ปัญหาขยะตะกอนอะลูมิเนียมจึงเป็นปัญหาที่ควรจะได้รับการแก้ไข อย่างไรก็ตามยังมีงานวิจัยที่ศึกษาการใช้งานกากตะกอนอะลูมิเนียมอยู่ไม่มาก โดยงานวิจัยส่วนมากทำการวิจัยโดยการนำกากตะกอนอะลูมิเนียมมาใช้ในการผลิตร่วมกับปูนซีเมนต์ หรือใช้ในการผลิตเซรามิก



จากสมการ (1) พบว่า เมื่อเฟส AlN ในกากตะกอนอะลูมิเนียมทำปฏิกิริยากับน้ำ จะเกิดเจล  $\text{Al}(\text{OH})_3$  ซึ่งเป็นของแข็ง นอกจากนั้นเฟสที่เป็นสารประกอบของอะลูมิเนียมออกไซด์ทำปฏิกิริยากับน้ำ ทำให้เกิดเป็นเฟส Boehmite หรือ gibbsite เกิดการแข็งตัวคล้ายซีเมนต์ได้ หรือเมื่อมีการเติม NaOH และ  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  และสามารถเกิดโครงสร้างพันธะของ Al-O-Si ได้ โดย Si มาจาก  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$

ในงานวิจัยนี้สนใจนำวัตถุดิบอีกตัวที่นำมาใช้ผสมกับกากตะกอนอะลูมิเนียม ก็คือโดโลไมท์ สูตรเคมีคือ  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$  (ชื่อเต็ม แคลเซียมแมกนีเซียมคาร์บอเนต) ลักษณะจะเป็นผงละเอียดสีขาว มีน้ำหนักและมีความหนาแน่นสูง โดโลไมท์ ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) จะประกอบไปด้วย CaO ด้วย 38% แล้วและ MgO 14% ส่วนองค์ประกอบทางเคมีในส่วนของ Si และ Al พบในปริมาณที่น้อย (Aizat, 2017) ตัวอย่างงานวิจัยที่นำโดโลไมท์มาใช้ในวัสดุโพลิเมอร์ เช่น งานวิจัยของ Y. Zarina และคณะ ได้ผลิตวัสดุโพลิเมอร์จากเถ้าหม้อไอน้ำ (Boiler Ash) ที่ผสมโดโลไมท์ ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) 1-5% โดยน้ำหนัก โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ความเข้มข้น 12 โมลาร์ ผลการทดลอง พบว่า การเติมโดโลไมท์ ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) 4% ลงในจีโอโพลิเมอร์เพสต์จะมีกำลังอัดสูงสุด เท่ากับ 7.3 MPa (Zarina, 2014) งานวิจัยของ Yip และคณะ ผลของการเติมโดโลไมท์ ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) ลงในวัสดุโพลิเมอร์ฐานดินขาวพบว่า การเติมโดโลไมท์ ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) ประมาณ 20% ช่วยเพิ่มความแข็งแรงในการอัดตัวของวัสดุโพลิเมอร์ได้ [Yip CK, 2008] นอกจากนั้นคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ได้มีการศึกษาโดยการนำโดโลไมท์มาผลิตเป็นกระเบื้องโดยการอัด และนำไปเผาที่อุณหภูมิ 1,050-1,090 องศาเซลเซียสจะช่วยให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงมากยิ่งขึ้น (Tonnyayopas, 2011) และงานวิจัยของ Youssef Arkame และคณะ ได้ศึกษาเซรามิกรูปทรงจากโดโลไมท์ ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) ที่มีการเติมตะกอนอะลูมิเนียม และนำไปเผาที่อุณหภูมิใกล้เคียงกัน 1200-1300 องศาเซลเซียส เพื่อดูโครงสร้างจุลภาค และสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน [Y.Arkame, 2023] นอกจากนั้น จากงานวิจัยพบว่า การเติมโดโลไมท์ในจีโอโพลิเมอร์ฐานเถ้าลอยเป็นแหล่งให้ Ca และ Mg ซึ่งสามารถเกิดเป็นเจล C-S-H หรือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และ M-S-H หรือ แมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรต ได้ ซึ่งมีคุณสมบัติในการช่วยยึดเหนี่ยวโครงสร้างเหมือนในซีเมนต์ทั่วไป จึงเป็นส่วนช่วยเพิ่มความแข็งแรงได้ (Aizat, 2018; Aizat, 2020) การเติมโดโลไมท์ผสมกับ GGBS (Ground Granulated Blast furnace Slag) ในอัตราส่วน 30 : 70 โดยน้ำหนัก ช่วยเพิ่มความแข็งแรงในช่วงต้นได้ดีกว่า ปูนซีเมนต์ โดยโดโลไมท์ทำหน้าที่เติมเต็มหรือแทรกตัวเข้าไปในช่องว่างของจีโอโพลิเมอร์ช่วยลดความพรุนตัว

ในงานวิจัยนี้ จึงได้ศึกษากระบวนการผลิต และสมบัติของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่ผลิตจากการผสมกากตะกอนอะลูมิเนียมและโดโลไมท์ โดยใช้สารละลายอัลคาไลน์ผสมระหว่าง NaOH และ  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  เพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์เรชัน และศึกษาสมบัติของวัสดุจีโอพอลิเมอร์จากกากตะกอนอะลูมิเนียมและโดโลไมท์ โดยทดสอบหาเวลาในการเซ็ตตัวของส่วนผสม ความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ กำลังรับแรงอัด โครงสร้างเฟส โครงสร้างจุลภาค องค์ประกอบทางเคมี และการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของชิ้นงานที่ผลิตได้

## วิธีการดำเนินการวิจัย

### วัตถุดิบส่วนของแข็งและการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของวัตถุดิบ

วัตถุดิบหลักในส่วนของแข็งได้แก่ กากตะกอนอะลูมิเนียม (AD) ที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมรีไซเคิล บริษัทท้อปไฟว์แมนูแฟคเจอร์ จำกัด และผงโดโลไมท์ (DO) พบว่า กากตะกอนอะลูมิเนียมมีขนาดเล็ก และเป็นผงละเอียด และหยาบปะปนกัน มีสีดำเทา และมีกลิ่นฉุนซึ่งอาจเกิดจากการที่ส่วนประกอบของกากตะกอนที่มีองค์ประกอบของไนโตรเจนทำปฏิกิริยากับน้ำในอากาศทำให้เกิดแก๊สแอมโมเนีย ส่วนโดโลไมท์ลักษณะเป็นผงสีขาว มีความละเอียดมากกว่า โดยจะนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี โครงสร้างเฟส และโครงสร้างทางเคมีของกากตะกอนอะลูมิเนียมและโดโลไมท์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซน (X-ray fluorescence, XRF) ด้วยเครื่อง Wavelength dispersive X-ray fluorescence spectrometers (WDXRF) ยี่ห้อ Bruker รุ่น S6 Jaguar เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction, XRD) ยี่ห้อ Bruker รุ่น D2 Phaser และเทคนิคฟูเรียรทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier-transform infrared spectroscopy, FTIR) ยี่ห้อ SHIMADZU IR Spirit รุ่น QATR-S

### การเตรียมสารละลายอัลคาไลน์ (Alkaline solution)

ในงานวิจัยนี้ส่วนผสมของเหลว ซึ่งเป็นสารละลายอัลคาไลน์ ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ความเข้มข้น 7 โมลาร์ (องค์ประกอบหลักใน NaOH ได้แก่ NaOH 99%,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  0.5%, NaCl 0.04,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  0.005%) โดยนำสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เตรียมได้ มาผสมกับสารละลายโซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ , Technical grade : 42-43 Baume) โดยใช้อัตราส่วนระหว่าง NaOH :  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  เท่ากับ 1 : 3 กวนส่วนผสมสารละลายเข้าด้วยกันและตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมงก่อนนำมาใช้งาน

### การผสมและขึ้นรูปชิ้นงาน

กระบวนการผลิตชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์ เริ่มจากเตรียมวัตถุดิบโดยนำกากตะกอนอะลูมิเนียมมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 150 (105  $\mu\text{m}$ ) เพื่อนำสิ่งปนเปื้อนในกากตะกอนอะลูมิเนียมที่มีขนาดใหญ่ ออกก่อน ผสมกับส่วนของโดโลไมท์ที่มีความละเอียดอยู่แล้วไม่ต้องนำมาร่อนผ่านตะแกรง โดยปริมาณส่วนผสมของแข็งเป็นดังตารางที่ 1 โดยใช้โดโลไมท์ 0 ถึง 30 % โดยน้ำหนัก ซึ่งการผสมทำภายใน

ผู้ดูแลวันเพื่อความปลอดภัย เนื่องจากการผสมกากตะกอนอะลูมิเนียมกับของเหลวที่มีน้ำจะทำให้เกิดปฏิกิริยาดังสมการ (1) เกิดก๊าซแอมโมเนีย

ตารางที่ 1 ส่วนผสมวัตถุดิบของแข็ง

| ชื่อชิ้นงาน | กากตะกอนอะลูมิเนียม (AD)<br>(% โดยน้ำหนัก) | โดโลไมต์ (DO)<br>(% โดยน้ำหนัก) |
|-------------|--------------------------------------------|---------------------------------|
| 0DO         | 100                                        | 0                               |
| 10DO        | 90                                         | 10                              |
| 20DO        | 80                                         | 20                              |
| 30DO        | 70                                         | 30                              |

หลังจากผสมส่วนผสมของแข็ง (Solid) จนเข้ากันดีแล้ว จึงนำมาผสมกับสารละลายอัลคาไลน์ (Liquid) โดยกำหนดอัตราส่วนระหว่างของเหลวต่อของแข็ง (L/S) เท่ากับ 0.5 (โดยน้ำหนัก) จากนั้นกวนให้เป็นเนื้อเดียวกัน แล้วเทลงแม่แบบขนาด  $3 \times 3 \times 3 \text{ cm}^3$  และ  $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$  สำหรับการทดสอบสมบัติต่าง ๆ เมื่อชิ้นงานเซตตัวแข็งดีแล้ว ทำการห่อด้วยฟิล์มพลาสติกใสเพื่อบ่มชิ้นงาน โดยวางไว้ในอุณหภูมิห้อง เพื่อให้การเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์เซชันดำเนินต่อไปจนสมบูรณ์ โดยจะทำการบ่มที่ 7 วัน 14 วัน และ 28 วัน

### การวิเคราะห์ทดสอบชิ้นงาน

#### การทดสอบการเซตตัวของชิ้นงาน (Setting time)

การทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์ ได้แก่ การทดสอบเพื่อหาเวลาในการเซตตัว (Setting time) ด้วยเครื่อง VICAT ยี่ห้อ Humboldt รุ่น H-3050 เริ่มการทดสอบด้วยการผสมชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์โดยนำส่วนผสมของแข็งผสมกับสารละลายอัลคาไลน์ คนให้เข้ากัน แล้วเทใส่แม่แบบที่เตรียมไว้ ทดสอบโดยการวัดระยะขมของเข็มไวแคตในชิ้นงาน ทุก ๆ 2 นาที จนชิ้นงานเซตตัวและเข็มไม่สามารถจมลงในชิ้นงานได้

#### การทดสอบความหนาแน่น (Bulk density)

ความหนาแน่นของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์ ถูกทดสอบเมื่อบ่มชิ้นงานไว้แล้ว 28 วัน โดยชั่งน้ำหนักของชิ้นงานตัวอย่าง และวัดขนาดของชิ้นงานเพื่อนำมาคำนวณหาปริมาตร แล้วคำนวณหาความหนาแน่นตามสมการ (1) ดังนี้

$$\text{Bulk Density} = \frac{M}{V} \quad (1)$$

เมื่อ  $M$  คือ น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)

$V$  คือ ปริมาตรตัวอย่าง (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

### การทดสอบการดูดซึมน้ำ (Water absorption)

หลังจากขึ้นงานจีโอพอลิเมอร์ถูกบ่มครบ 28 วัน จึงนำตัวอย่างมาแช่ในภาชนะที่มีน้ำสะอาดทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำตัวอย่างมาเช็ดให้ยู่สภาพอิมตัวผิวแห้ง นำมาชั่งเป็นค่าน้ำหนักเปียก หลังจากนั้นอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส จนแห้งแล้วชั่งน้ำหนักแห้ง และคำนวณหาปริมาณการดูดซึมน้ำตามสมการ (2) ดังนี้

$$\% \text{Water Absorption} = \frac{W_S - W_D}{W_D} \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ  $W_S$  คือ น้ำหนักตัวอย่างอมน้ำชั่งในอากาศ (กรัม)

$W_D$  คือ น้ำหนักตัวอย่างแห้ง (กรัม)

### การทดสอบสมบัติเชิงกล

สมบัติเชิงกลที่ทำการทดสอบคือ กำลังอัด (Compressive strength) ของขึ้นงาน โดยใช้เครื่องทดสอบแบบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine ยี่ห้อ Tinius Olsen รุ่น H50KT) การทดสอบกำลังอัดของขึ้นงานขนาด  $3 \times 3 \times 3 \text{ cm}^3$  โดยทำการทดสอบขึ้นงานหลังการบ่มเป็นเวลา 7 14 และ 28 วัน เพื่อศึกษาการพัฒนา กำลังอัด ในการทดสอบใช้อัตราเร็วในการอัดตัวอย่างคือ 5 มิลลิเมตรต่อนาที จนกระทั่งตัวอย่างแตก และคำนวณค่ากำลังอัดของตัวอย่าง ดังแสดงในสมการที่ (3)

$$\text{Compressive strength} = \frac{F}{A} \quad (3)$$

เมื่อ  $F$  คือ ค่าแรงอัด (นิวตัน)

$A$  คือ พื้นที่หน้าตัดของขึ้นงานที่ตั้งฉากกับแนวแรงอัด (ตารางเมตร)

### การวิเคราะห์โครงสร้างเฟสของขึ้นงาน

การทดสอบเพื่อวิเคราะห์โครงสร้างของเฟสของขึ้นงานตัวอย่าง 0DO 1DO 2DO และ 3DO หลังบ่ม 28 วัน ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer, XRD, ยี่ห้อ Bruker รุ่น D2 Phaser) โดยในการทดสอบจะใช้รังสีเอกซ์  $\text{CuK}\alpha$  วัดในช่วงมุม ( $2\theta$ ) เท่ากับ 10 ถึง 80 องศา บันทึกค่าทุก ๆ 0.02 องศา และใช้ Time per step เท่ากับ 0.2 วินาที

### การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน

การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของพื้นผิวรอยแตกของชิ้นงาน 10DO 20DO และ 30DO ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Field Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-7800F Prime)

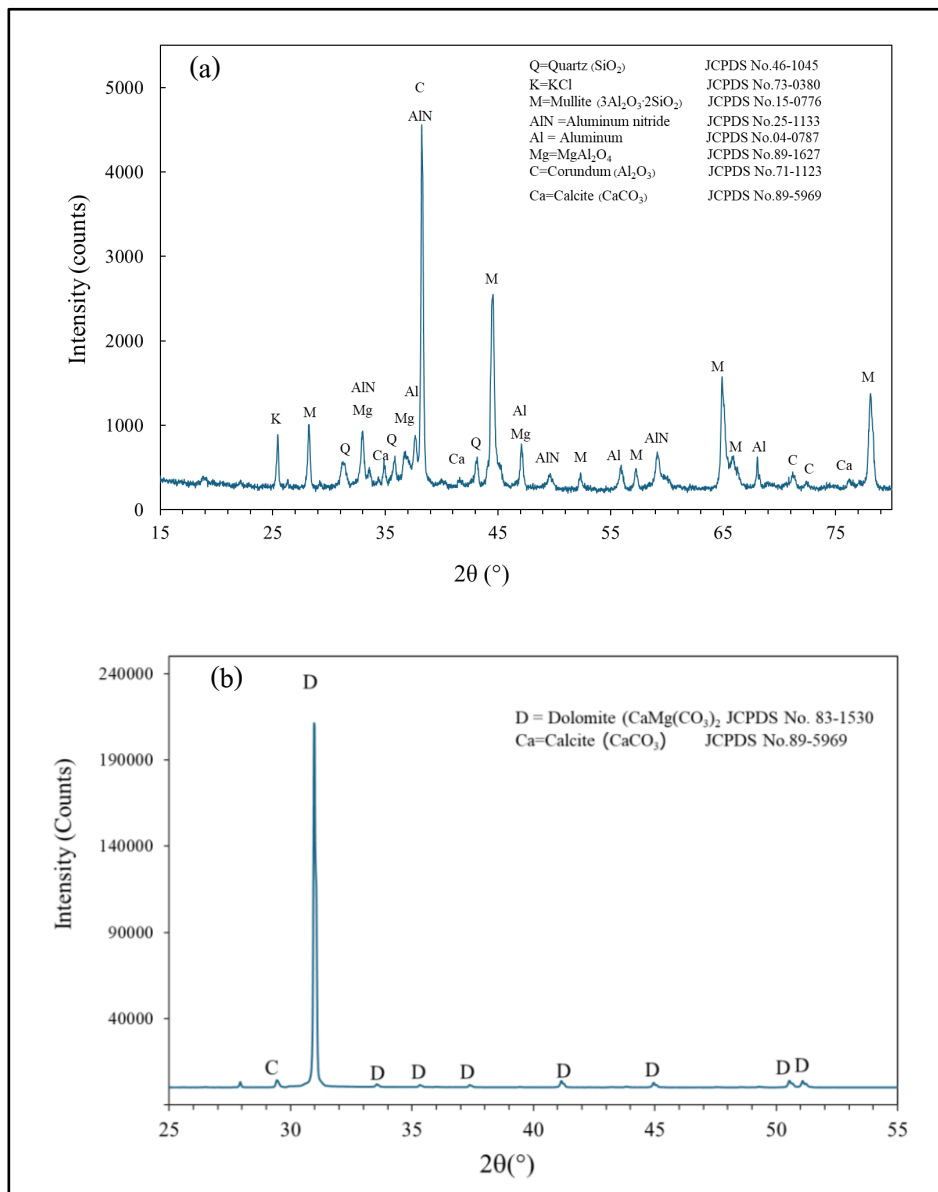
### การวิเคราะห์โครงสร้างพันธะเคมีของชิ้นงาน

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์ ด้วยเครื่องฟูเรียรทรานส์ฟอร์มสเปกโตรสโกปี (Fourier transform Infrared Spectrometer, FTIR, ยี่ห้อ SHIMADZU IR Spirit รุ่น QATR-S) โดยวิเคราะห์ในช่วงเลขคลื่น  $400\text{--}4000\text{ cm}^{-1}$

## ผลการวิจัย

### ผลการวิเคราะห์วัตถุดิบด้วยเทคนิค XRD XRF และ FTIR

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างเฟสของกากตะกอนอะลูมิเนียม (AD) และโดโลไมท์ (DO) ด้วยเทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD : X-ray diffraction) แสดงในภาพประกอบ 1 (a) และ (b) ตามลำดับ พบว่า กากตะกอนอะลูมิเนียมปรากฏเฟสหลักคือ อะลูมินัมไนไตรด์ (AlN) และมัลไลต์ ( $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ) นอกจากนั้นยังพบเฟสของ ซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) แมกนีเซียมอะลูมิเนียมสปิเนล ( $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ ) อะลูมิเนียม (Al) แคลไซต์ ( $\text{CaCO}_3$ ) และ โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ในกากตะกอนอะลูมิเนียมอีกด้วย ส่วนโดโลไมท์ (DO) ปรากฏเฟสหลักคือ โดโลไมท์ ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) และพบเฟสของแคลไซต์ ( $\text{CaCO}_3$ ) เล็กน้อย



ภาพประกอบ 1 ผลวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (a) ภาาตะกอนอะลูมิเนียม และ (b) โดโลไมท์

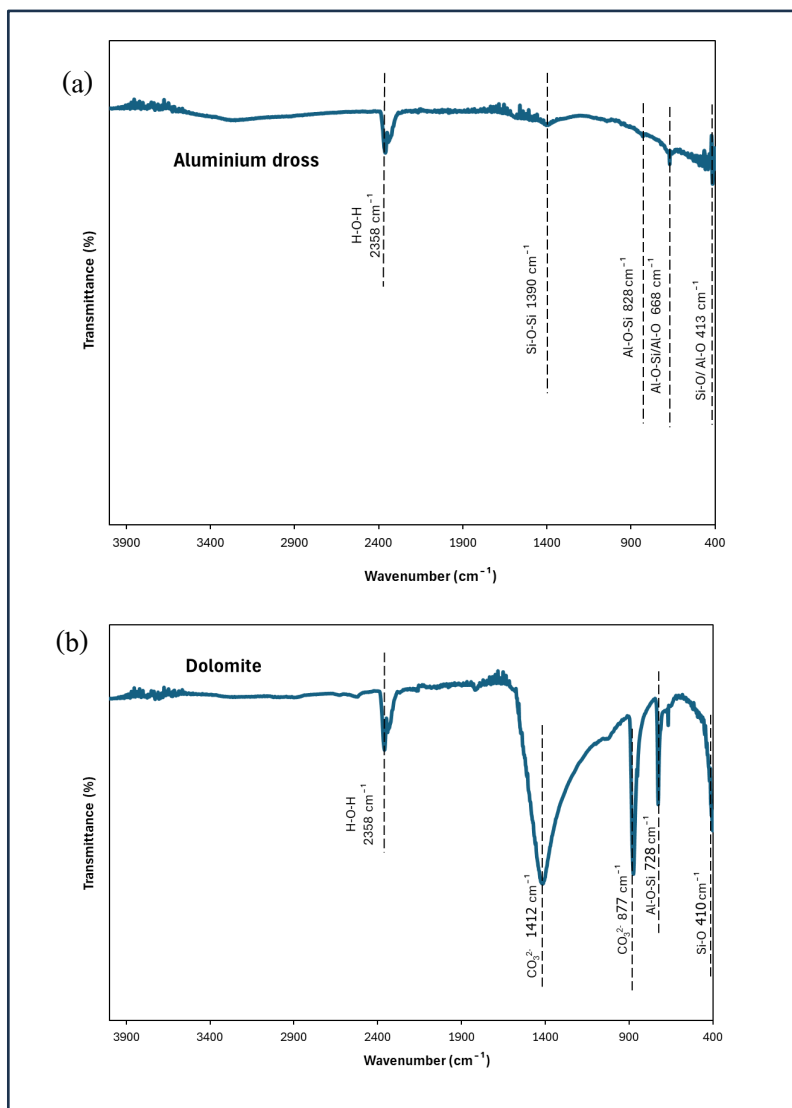
ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของกากตะกอนอะลูมิเนียม และโดโลไมท์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ *XRF : X-ray fluorescence* (ตารางที่ 2) พบว่า กากตะกอนอะลูมิเนียมมีองค์ประกอบทางเคมีหลักคือสารประกอบของอะลูมิเนียม โดยแสดงผลในรูปของออกไซด์คือมีอะลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ถึง 64.1 wt% อย่างไรก็ตามจากผลวิเคราะห์ XRD พบว่า อะลูมิเนียมส่วนมากอยู่ในรูปของสารประกอบอะลูมิเนียมไนไตรด์ ( $\text{AlN}$ ) และมีเฟสอะลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และโลหะอะลูมิเนียม ( $\text{Al}$ ) ด้วย ส่วนโดโลไมท์มีองค์ประกอบทางเคมีหลักแสดงในรูปของสารประกอบออกไซด์คือ แคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) 52.23 wt% และแมกนีเซียมออกไซด์ ( $\text{MgO}$ ) 42.43 wt% ซึ่งจากผลวิเคราะห์เฟสด้วย XRD พบว่า เป็นโดโลไมท์ ซึ่งเป็นสารประกอบ  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$  และบางส่วนเป็นเฟสของ  $\text{CaCO}_3$  และพบว่า มีซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) และอะลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) เล็กน้อย

**ตารางที่ 2** องค์ประกอบทางเคมีของกากตะกอนอะลูมิเนียม และโดโลไมท์ด้วยเทคนิค XRF

| Oxide Composition       | wt%                          |               |
|-------------------------|------------------------------|---------------|
|                         | Aluminium dross residue (AD) | โดโลไมท์ (DO) |
| $\text{SiO}_2$          | 6.3                          | 0.58          |
| $\text{Al}_2\text{O}_3$ | 64.1                         | 0.11          |
| $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | 1.9                          | -             |
| $\text{CaO}$            | 1.6                          | 52.23         |
| $\text{MgO}$            | 7.9                          | 42.43         |
| $\text{Na}_2\text{O}$   | 3                            | -             |
| $\text{K}_2\text{O}$    | 1                            | -             |
| $\text{SO}_3$           | 0.5                          | -             |
| Total                   | 86.3                         | 95.96         |
| Loss on ignition        | 13.7                         | 4.35          |

โครงสร้างทางเคมีของวัตถุดิบกากตะกอนอะลูมิเนียมและโดโลไมท์ ทดสอบโดยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (FTIR : Fourier transform Infrared Spectroscopy) ในภาพประกอบ 2 พบว่า กากตะกอนอะลูมิเนียมจะปรากฏพีคที่เลขคลื่น  $2358\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็น H-O-H stretching ของกลุ่ม -OH ซึ่งเป็นโมเลกุลของน้ำที่ดูดซับบนพื้นผิวของผงกากตะกอนอะลูมิเนียม ส่วนพีคที่เลขคลื่น  $1390\text{ cm}^{-1}$  เกิดการสั่นของหมู่ฟังก์ชันซิลิกา (Si-O-Si) และพีคที่เลขคลื่น  $828\text{ cm}^{-1}$   $678\text{ cm}^{-1}$  เกิดจากการสั่นของพันธะระหว่างอะลูมิเนียมและซิลิกอนในเฟสของสารประกอบอะลูมิเนียมซิลิเกต Al-O-Si พีคที่เลขคลื่น  $686\text{ cm}^{-1}$  เกิดจากการสั่นของพันธะของอะลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) หรือเฟสผสม Al-Si-O ส่วนผลวิเคราะห์ FTIR ของโดโลไมท์จะปรากฏพีคเลขคลื่น  $2358\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็น H-O-H

stretching ของกลุ่ม -OH ซึ่งเป็นโมเลกุลของน้ำ และพบพีคที่เลขคลื่น 1412 และ 877  $\text{cm}^{-1}$  เกิดจากการสั่นสารประกอบคาร์บอเนต ซึ่งโดโลไมท์ก็คือ  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$  นอกจากนั้นที่เลขคลื่น 728 และ 410  $\text{cm}^{-1}$  เกิดจากการสั่นของพันธะ Al-O-Si และ Si-O ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบด้วยเทคนิค XRD และ XRF



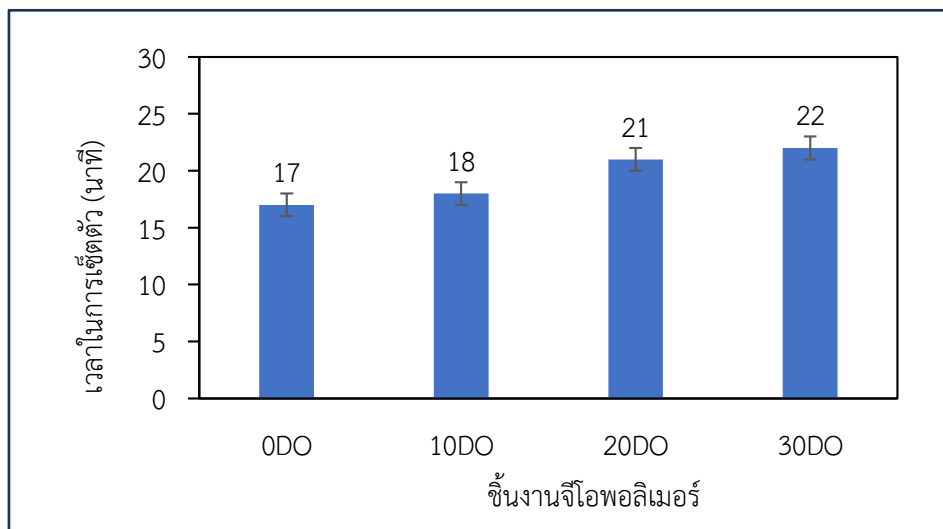
ภาพประกอบ 2 ผลวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันในโมเลกุลด้วยเทคนิค FTIR (a) กากตะกรันอะลูมิเนียม (b) โดโลไมท์

### ผลของการเติมโดโลไมท์ต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ฐานตะกอนอะลูมิเนียม

จากการผสมวัตถุดิบกากตะกอนอะลูมิเนียมและโดโลไมท์ (0 ถึง 30%โดยน้ำหนัก) ร่วมกับสารละลายอัลคาไลน์ NaOH 7 M และ  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  (อัตราส่วน 1 : 3) พบว่า เกิดปฏิกิริยาคายความร้อน และเกิดฟองก๊าซแอมโมเนียจำนวนมาก ทำให้ชิ้นงานพองตัว

### ผลการทดสอบเวลาในการเซตตัว (Setting time) ด้วยเครื่อง VICAT

ผลการทดสอบเวลาในการเซตตัวของจีโอพอลิเมอร์ พบว่า ส่วนผสมของจีโอพอลิเมอร์จากกากตะกอนอะลูมิเนียม 100% (ODO) เซตตัวเร็วที่สุดโดยใช้เวลาไป 17 นาที เมื่อเติมโดโลไมท์ลงไป ชิ้นงานส่งผลให้การเซตตัวของชิ้นงานช้าลงเล็กน้อย โดยเวลาในการเซตตัวมีค่าไม่ต่างกันมาก ดังแสดงในภาพประกอบ 3 ชิ้นงานที่ผสมโดโลไมท์ 10% โดยน้ำหนัก (10DO) โดยใช้เวลาในการเซตตัว 18 นาที ส่วนชิ้นงาน 20DO และ 30DO ใช้เวลา 21 และ 22 นาทีตามลำดับ

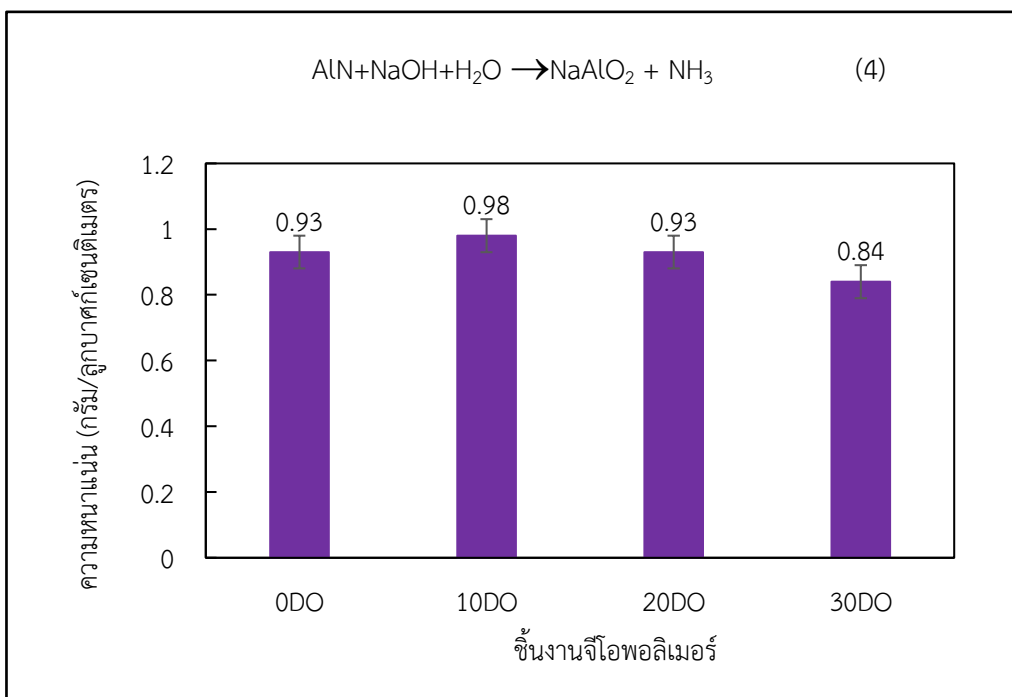


ภาพประกอบ 3 ระยะเวลาในการเซตตัวของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์

### ความหนาแน่นของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์ (Bulk density)

จากภาพประกอบ 4 แสดงค่าความหนาแน่นของวัสดุจีโอพอลิเมอร์จากกากตะกอนอะลูมิเนียมที่มีการเติมโดโลไมท์ มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 0.84-0.98 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยชิ้นงานจากกากตะกอนอะลูมิเนียม ODO มีค่าความหนาแน่น 0.93 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร และเมื่อเติมโดโลไมท์ไป 10% โดยน้ำหนักค่าความหนาแน่นมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย 0.98 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร แต่เมื่อเติมโดโลไมท์ในปริมาณเพิ่มมากขึ้นเป็น 20 และ 30% โดยน้ำหนักค่าความหนาแน่นลดลงเป็น 0.93 และ 0.84 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ดังนั้น การเติมโดโลไมท์ (DO) 10% ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้น

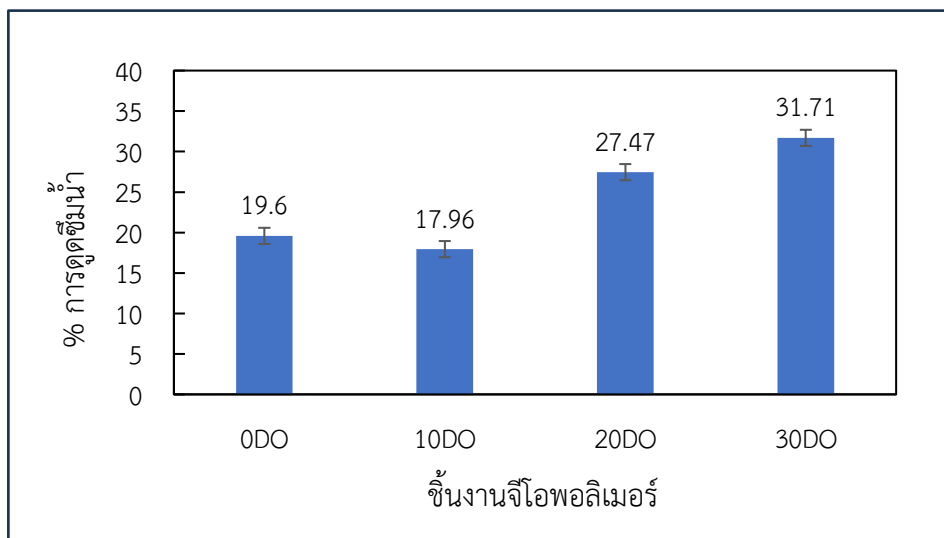
เล็กน้อย แต่การเติมโดโลไมท์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ชิ้นงานมีค่าความหนาแน่นลดลงเล็กน้อย จากผลการวัดความหนาแน่นของชิ้นงานจะเห็นว่าชิ้นงานมีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำ ซึ่งเกิดจากในระหว่างการผลิตชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์ฐานกากตะกอนอะลูมิเนียม เมื่อกากตะกอนอะลูมิเนียมสัมผัสกับน้ำที่อยู่ในสารละลายอัลคาไลน์ จะเกิดปฏิกิริยาระหว่างอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (AlN) ที่อยู่ในกากตะกอนอะลูมิเนียมและโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และ น้ำ ตามปฏิกิริยาในสมการที่ (4) ทำให้เกิดก๊าซแอมโมเนีย ส่งผลให้ชิ้นงานมีรูพรุนสูง



ภาพประกอบ 4 ความหนาแน่นของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์

#### การดูดซึมน้ำของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์

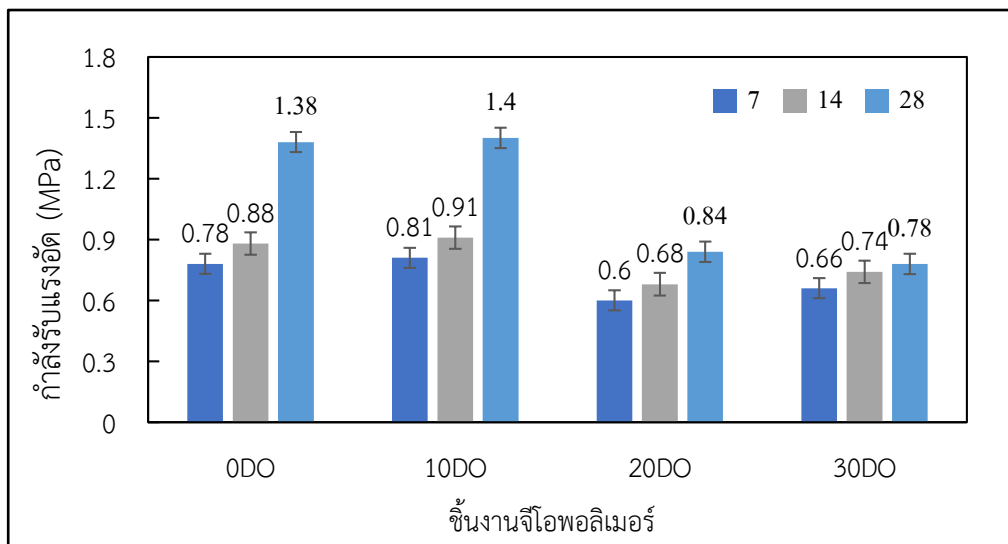
ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของชิ้นงานตัวอย่างแสดงในภาพประกอบ 5 พบว่า ชิ้นงานที่ไม่เติมโดโลไมท์ (ODO) มีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ 19.6% เมื่อเติมโดโลไมท์ลงไปในชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์ 10% โดยน้ำหนัก พบว่า ชิ้นงานมีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำลดลง โดยมีค่าการดูดซึมน้ำ เท่ากับ 17.96% อย่างไรก็ตามการเติมโดโลไมท์เพิ่มขึ้นเป็น 20-30% โดยน้ำหนัก ทำให้ค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น สัมพันธ์กับค่าความหนาแน่นที่น้อยลง หรือมีรูพรุนเพิ่มขึ้นนั่นเอง



ภาพประกอบ 5 เปอร์เซนต์การดูดซึมน้ำของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์

#### ผลการทดสอบกำลังอัด (Compressive Strength)

จากการทดสอบการรับแรงอัดของชิ้นงานหลังการบ่ม 7 14 และ 28 วัน พบว่า กำลังอัดของชิ้นงานเป็นดังภาพประกอบ 6 โดยกำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อบ่มนานขึ้นซึ่งเวลาบ่มที่นานนั้นทำให้ชิ้นงานมีการพัฒนาโครงสร้างจากปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์เซชันที่สมบูรณ์มากขึ้น ชิ้นงาน 0DO หรือชิ้นงานจากกากตะกอนอะลูมิเนียม 100% โดยน้ำหนักที่บ่ม 7 14 และ 28 วัน ค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 0.78 0.88 และ 1.38 MPa เมื่อเติมโดโลไมท์ในจีโอพอลิเมอร์ที่ฐานกากตะกอนอะลูมิเนียม 10% โดยน้ำหนัก ส่งผลให้ชิ้นงานมีค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นเป็น 0.81 0.91 และ 1.4 MPa เนื่องจากโดโลไมท์มีองค์ประกอบของ Ca และ Mg สูง อาจทำให้เกิดเจล Ca-S-H หรือ M-S-H ที่ไปเติมในรูพรุนทำให้ความพรุนลดลง แต่การเติมโดโลไมท์มากขึ้นเป็น 20-30% โดยน้ำหนัก ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลง ซึ่งอาจเกิดเนื่องจากโครงสร้างของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์ 20DO และ 30 DO มีรูพรุนสูง สอดคล้องกับผลการทดสอบความหนาแน่นและค่าการดูดซึมน้ำที่ได้กล่าวไปแล้ว

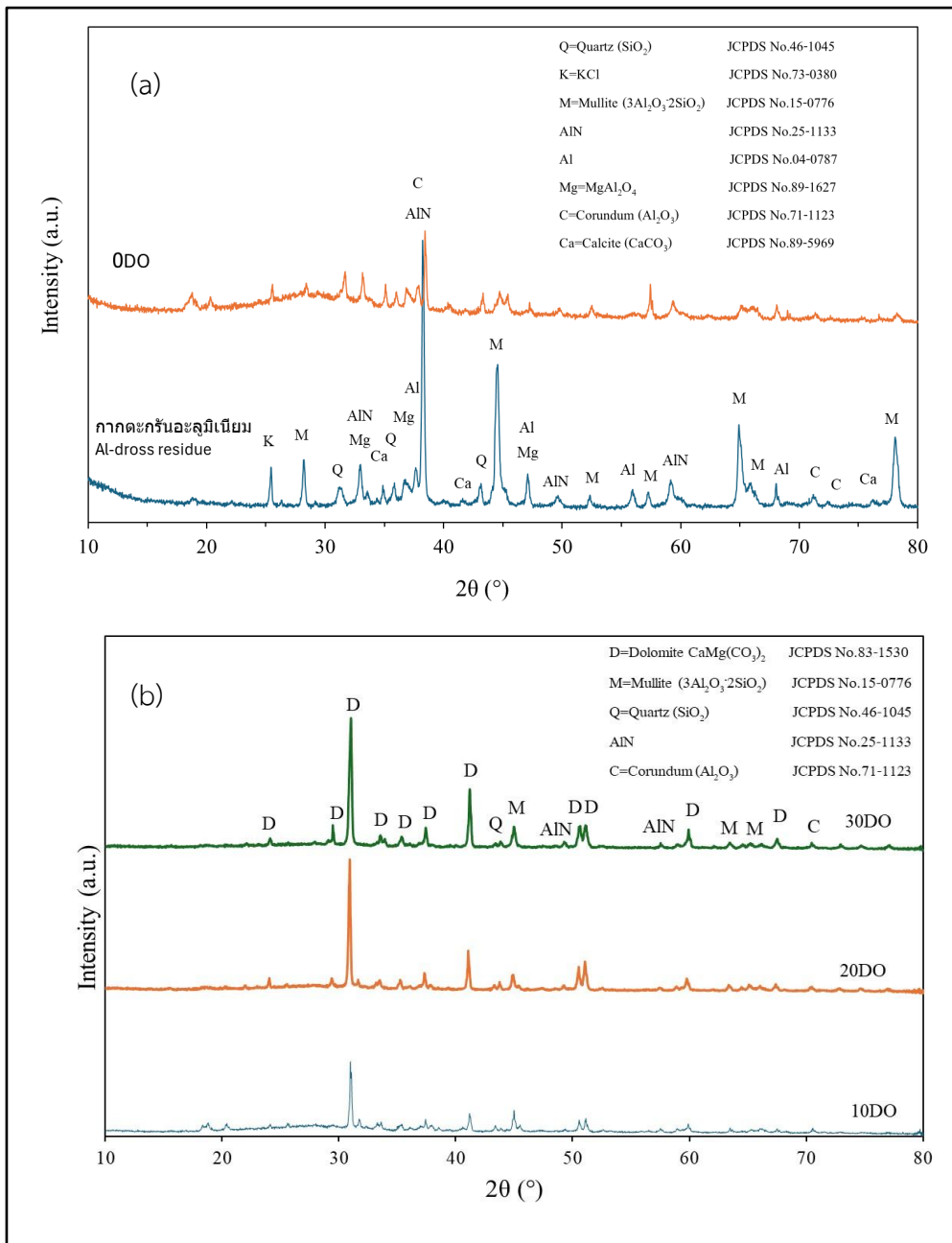


ภาพประกอบ 6 กําลังรับแรงอัดของชั้นงานอีพ็อกซี

#### ผลการวิเคราะห์โครงสร้างเฟส (Phase structure) ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

ภาพประกอบ 7 (a) กราฟเปรียบเทียบผลการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ แสดงการเปลี่ยนแปลงของเฟสของชั้นงาน 0DO หรือ กากตะกอนอะลูมิเนียม 100% เทียบกับเฟสที่พบในวัสดุดิบกากตะกอนอะลูมิเนียม ซึ่งพบว่า หลังจากกากตะกอนอะลูมิเนียมทำปฏิกิริยากับสารละลายอัลคาไลน์ เกิดปฏิกิริยาคายความร้อน และพบเฟสอสัณฐาน (Amorphous) แสดงโดยการพบพีคกว้างที่มุม  $2\theta$  เท่ากับ  $20-35^\circ$  นอกนั้นพบเฟสเดิมของวัสดุดิบซึ่งเกิดจากการที่วัสดุดิบบางส่วนยังไม่ทำปฏิกิริยา

ผลวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของชั้นงานอีพ็อกซี 10DO 20DO และ 30AD แสดงในภาพประกอบ 7 (b) พบว่า ชั้นงานอีพ็อกซีจากกากตะกอนอะลูมิเนียมที่มีการเติมโดโลไมท์ มีพีคที่สูงและแหลม ซึ่งแสดงถึงความเป็นผลึก (Crystal) ของโดโลไมท์ โดยพบพีคหลักที่มุม  $2\theta$  เท่ากับ  $31^\circ$  การเติมโดโลไมท์ปริมาณมากขึ้นพบพีคที่ความเข้มสูงขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเติมโดโลไมท์เพิ่มขึ้นอาจจะไม่เกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น พีคของโดโลไมท์จึงปรากฏสูงขึ้นนั่นเอง นอกจากนั้นยังพบเฟสที่เป็นส่วนที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาของกากตะกอนอะลูมิเนียมเล็กน้อย ได้แก่ AlN,  $Al_2O_3$ , Mullite และ Quartz เล็กน้อย

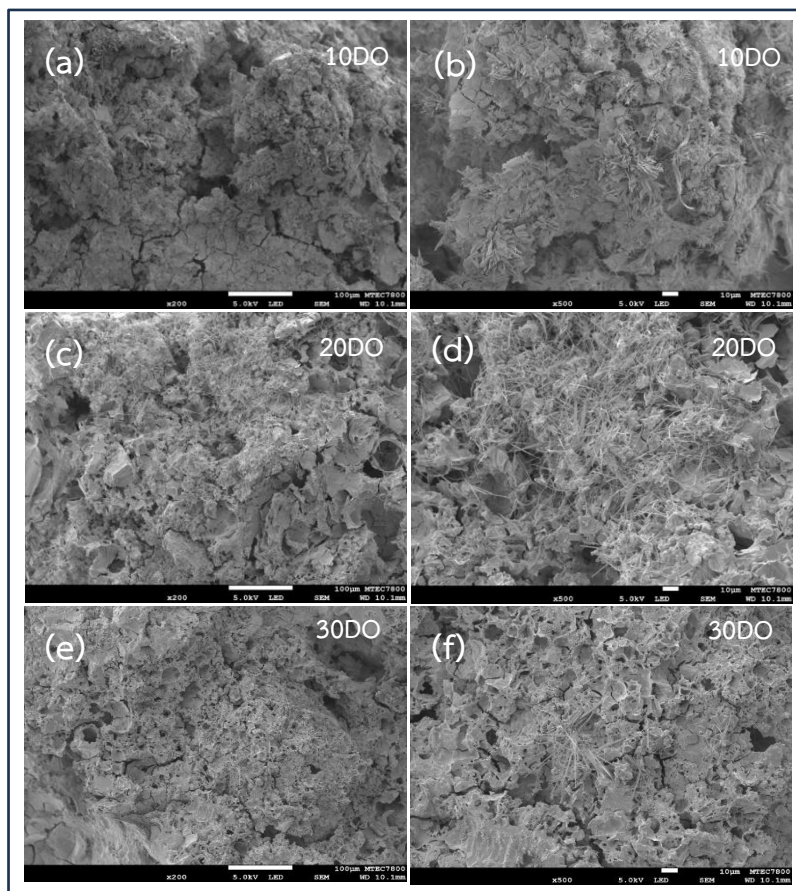


ภาพประกอบ 7 ผลการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) ของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์

(a) วัสดุดิบกากตะกอนอะลูมิเนียมและ 0DO (b) 10 DO, 20DO และ 30DO

### ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค

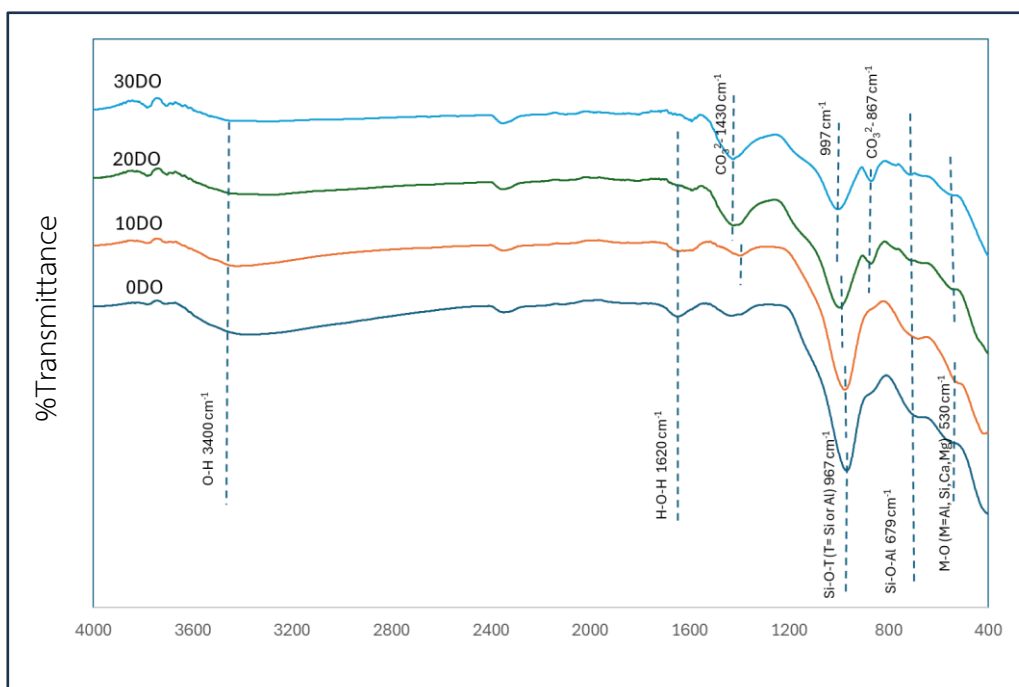
ผลการวิเคราะห์ พื้นผิวรอยแตกของตัวอย่างชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์ฐานกากตะกัณอะลูมิเนียมผสมโดโลไมท์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงในภาพประกอบ 8 โดยภาพ (a) และ (b) คือ ชิ้นงาน 10DO (c) และ (d) คือ ชิ้นงาน 20DO (e) และ (f) คือ ชิ้นงาน 30DO ทำการถ่ายภาพที่กำลังขยาย 200 และ 500 เท่า จากภาพถ่าย SEM พบว่า ชิ้นงานมีรูพรุนจำนวนมากกระจายอยู่ทั่วชิ้นงาน จากภาพส่วนสี่เท่าคือเนื้อจีโอพอลิเมอร์ที่เกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันแล้ว พบโครงสร้างผลึกรูปเข็มกระจายทั่วชิ้นงาน แต่ไม่ได้ส่งผลต่อชิ้นงานโดยตรง เนื่องจากเมื่อเติมโดโลไมท์เพิ่มขึ้นพบผลึกรูปเข็มที่มีลักษณะเหมือนเส้นใยยาวขึ้นและมากขึ้น แต่ผลกำลังรับแรงอัดของชิ้นงานกลับมีค่าลดลง



ภาพประกอบ 8 ภาพถ่าย SEM แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์กากตะกัณอะลูมิเนียมผสมโดโลไมท์ (a), (c), (e) กำลังขยาย 200 เท่า และ (b), (d), (f) กำลังขยาย 500 เท่า

### ผลวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (FTIR : Fourier transform Infrared Spectroscopy)

จากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปีในภาพประกอบ 9 พบว่า ทุกตัวอย่างมีโครงสร้างทางเคมีใกล้เคียงกัน เมื่อเติมโดโลไมท์ปริมาณมากขึ้น 20DO และ 30DO พบพีกที่เลขคลื่น  $867\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเกิดจากการสั่นของคาร์บอเนต ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) พีกที่เป็นแถบกว้างที่เลขคลื่น  $3400\text{ cm}^{-1}$  เกิดจากการยืดตัว (Stretching) ของหมู่ฟังก์ชัน O-H ซึ่งเป็นน้ำที่อยู่ในชั้นงาน ส่วนที่เลขคลื่น  $1620\text{ cm}^{-1}$  พบพีกการงอของ H-O-H ซึ่งเกิดจากโมเลกุลของน้ำในโครงสร้างผลึก หรือเจลพิดในตำแหน่ง  $1430\text{ cm}^{-1}$  เกิดจากการสั่นแบบไม่สมมาตรของคาร์บอเนต  $\text{CO}_3^{2-}$  ซึ่งพบพีกชัดเจน ในชั้นงานที่มีโดโลไมท์สูง พีกที่แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างไปเป็นจีโอพอลิเมอร์ โดยเกิดจากการสั่นของหมู่ฟังก์ชัน Si-O-T (T=Si/Al) คือพีกที่เลขคลื่น  $967\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นพีกที่ไม่ปรากฏในผลการวิเคราะห์ FTIR ของวัตถุดิบกากตะกอนอะลูมิเนียม นอกจากนี้ ยังพบการสั่นของหมู่ฟังก์ชัน Si-O-Al ที่เลขคลื่น  $679\text{ cm}^{-1}$  เมื่อพิจารณาตำแหน่งพีกการสั่นของพันธะ Si-O-T เมื่อมีการเติมโดโลไมท์ ทำให้พีกนี้ปรากฏที่เลขคลื่นสูงขึ้น แสดงถึงการที่พันธะที่เชื่อมโยงกันแน่นกว่า



ภาพประกอบ 9 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของชั้นงาน 0DO 10DO 20DO และ 30DO ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (FTIR)

### ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของชิ้นงานด้วยเทคนิค XRF

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์จากกากตะกอนอะลูมิเนียมผสมโดโลไมท์ ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF) แสดงในตารางที่ 2 พบว่า องค์ประกอบทางเคมีหลักคือธาตุ Si และ Al ถึงแม้ว่าในวัตถุดิบหลักคือกากตะกอนอะลูมิเนียมและโดโลไมท์จะมีปริมาณ Si น้อยมาก แต่ Si ที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์เหล่านั้นมาจากสารละลายโซเดียมซิลิเกต ทำให้พบ Si ปริมาณมากในชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์ ชิ้นงานที่เติมโดโลไมท์ไปจำนวนมากขึ้นพบว่า มี Ca และ Mg ในปริมาณมากขึ้น การเติมโดโลไมท์ (DO) ลงไปในชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์ 10-30% โดยน้ำหนัก นั้นส่งผลให้ค่า Si และ Al ลดลง ส่วนค่าที่มีปริมาณมากขึ้น อย่างชัดเจนได้แก่ Ca พบเป็น 5.23% 10.5% และ 14.4% ตามลำดับ เนื่องจากในโดโลไมท์ มีแคลเซียมเป็นส่วนประกอบปริมาณมาก อย่างไรก็ตามเมื่อนำปริมาณของ Si และ Al มาแสดงผลในรูปอัตราส่วนของ Si/Al พบว่า ชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์จากกากตะกอนอะลูมิเนียมที่มีการผสมโดโลไมท์ (DO) ในปริมาณที่มากขึ้น จะส่งผลให้อัตราส่วนของ Si/Al สูงขึ้น โดยชิ้นงานที่มีอัตราส่วนของ Si/Al สูงสุดที่ 2.10 ได้แก่ 30DO ส่วนธาตุโซเดียมหรือ Na ที่พบมาจากสารละลายอัลคาไลน์ที่เติมไปเพื่อเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน

ตารางที่ 2 องค์ประกอบเคมีของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์จากกากตะกอนอะลูมิเนียมผสมโดโลไมท์

| องค์ประกอบทางเคมี<br>% โดยน้ำหนัก | 0DO  | 10DO  | 20DO  | 30DO  |
|-----------------------------------|------|-------|-------|-------|
| Si                                | 14.7 | 15.57 | 11.83 | 10.58 |
| Al                                | 10.2 | 11.9  | 5.91  | 5.01  |
| Na                                | 10.3 | 8.35  | 7.01  | 6.99  |
| Ca                                | 0.4  | 5.23  | 10.55 | 14.4  |
| K                                 | 0.6  | 0.47  | 0.33  | 0.25  |
| Ba                                |      | 0.1   |       |       |
| K                                 |      | 1.04  |       |       |
| Mg                                | 0.2  | 0.08  | 1.99  | 2.97  |
| S                                 | 0.1  | 0.07  | 0.05  |       |
| Zn                                |      | 0.1   |       |       |
| Cu                                |      | 0.43  | 0.31  | 0.23  |
| Fe                                | 0.8  | 0.7   | 0.47  | 0.35  |
| Mn                                |      | 0.1   | 0.08  |       |
| Si/Al                             | 1.44 | 1.31  | 2     | 2.1   |

## อภิปรายผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ ทำการผลิตวัสดุจีโอพอลิเมอร์จากเศษเหลือทิ้งอุตสาหกรรมรีไซเคิลตะกรันอะลูมิเนียม และเติมโดโลไมท์ เพื่อปรับสมบัติของชิ้นงาน ถึงแม้ว่าวัตถุดิบทั้งสองชนิดมีองค์ประกอบทางเคมีที่เป็นส่วนของ Si น้อยแต่จำเป็นในการเกิดเจลจีโอพอลิเมอร์ในปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอไรเซชัน และวัตถุดิบทั้งสองมี Al Ca และ Mg สูง แต่ในกระบวนการผลิตนั้นสามารถเพิ่มองค์ประกอบของ Si เข้าไปในระบบได้จากสารละลายโซเดียมซิลิเกต ดังนั้นการใช้วัตถุดิบส่วนของแข็งที่มี Si น้อยจึงมีความเป็นไปได้ในการผลิตวัสดุจีโอพอลิเมอร์ ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกผลิตโดยใช้  $\text{NaOH}:\text{Na}_2\text{SiO}_3$  อัตราส่วน 1:3 ซึ่งเป็นสัดส่วนที่มี Si สูง และจากผลการทดสอบ พบว่า ส่วนผสมทั้งที่ไม่ และไม่มีโดโลไมท์สามารถเกิดการเซตตัวแข็งได้ หลังผสมต้องเทลงแม่แบบทันที เพราะส่วนผสมเกิดปฏิกิริยาความร้อน และมีฟองก๊าซเกิดขึ้นจำนวนมาก และทำให้ชิ้นงานพองตัวตามปริมาณของฟองที่เกิดขึ้น ก๊าซที่เกิดขึ้นนี้ส่วนมากคือก๊าซแอมโมเนีย ดังนั้นในขั้นตอนการผสมจึงต้องอยู่ในตู้ดูดควัน เพื่อความปลอดภัย

การเติมโดโลไมท์มีผลทำให้ปฏิกิริยาเกิดช้าลงและทำให้เวลาในการเซตตัวนานขึ้น ซึ่งส่งผลต่อการผลิต โดยเป็นการเพิ่มเวลาที่สามารถเทลงแม่แบบ (Workability) นอกจากนั้นการเพิ่มโดโลไมท์ในปริมาณ 10% ทำให้เกิดฟองก๊าซลดลง จำนวนรูพรุนน้อยลง ซึ่งส่งเสริมให้ความแข็งแรงของชิ้นงานสูงขึ้น ทั้งนี้จากงานวิจัยหลายงานได้รายงานถึงสาเหตุที่โดโลไมท์สามารถช่วยเสริมความแข็งแรงของชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์ได้ เนื่องจากการเกิดโครงสร้างของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) หรืออาจเกิดโครงสร้างของแมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรต (MSH) ซึ่งจะไปแทรกแทนที่รูพรุน ทำให้รูพรุนน้อยลง และทำให้ชิ้นงานแข็งแรงขึ้น อย่างไรก็ตามการเพิ่มโดโลไมท์ 20 และ 30% ทำให้มีส่วนของโดโลไมท์ที่ไม่ทำปฏิกิริยาเหลืออยู่จำนวนมากทำให้ความแข็งแรงลดลง ดังนั้นการศึกษาวิจัยในอนาคตควรจะเพิ่มส่วนของวัตถุดิบที่มีองค์ประกอบของ Si สูงขึ้น เช่นเศษเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมการผลิตไฟฟ้าพลังชีวมวลได้แก่ ถ่านอัดแท่ง ถ่านอัดแท่ง หรืออื่น ๆ ซึ่งถ่านเหล่านี้มักมีซิลิกาสูง นอกจากนั้นยังอาจจะเพิ่มกำลังอัดได้โดยการอบที่อุณหภูมิสูงด้วย

## สรุปผล

เศษเหลือทิ้ง จากอุตสาหกรรมรีไซเคิลอะลูมิเนียมจากตะกรันอะลูมิเนียม (Al dross residue) และโดโลไมท์สามารถนำมาใช้ในการผลิตวัสดุจีโอพอลิเมอร์ได้ โดยใช้ Si ในการสร้างเจล และโครงสร้างของจีโอพอลิเมอร์จากสารละลายโซเดียมซิลิเกต ซึ่งการเติมโดโลไมท์ 10% ให้ผลดีที่สุด โดยทำให้เกิดรูพรุนลดลง มีการดูดซึมน้ำลดลง และมีกำลังอัดสูงสุด คือ 1.4 MPa เมื่อบ่ม 28 วัน ซึ่งวัสดุจีโอพอลิเมอร์นี้มีน้ำหนักเบาโดยมีความหนาแน่นเพียง 0.98 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งน่าจะสามารถนำไปใช้ในงานก่อสร้างในส่วนที่ไม่ต้องรับน้ำหนัก หรืออาจจะใช้ในงานตกแต่งสวนได้ เนื่องจากมีรูพรุนสูงน้ำซึม

ผ่านได้ง่าย ทั้งนี้การนำเศษเหลือทิ้งมาใช้ประโยชน์เป็นการช่วยในเรื่องของการลดปัญหาการนำเศษเหลือทิ้งเหล่านี้ไปทิ้ง และเป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มมูลค่าให้เศษเหลือทิ้งเหล่านี้ด้วย

### กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (ศูนย์รังสิต และศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) สำหรับการสนับสนุนด้านเครื่องมือวิเคราะห์ทดสอบและสถานที่ และผู้วิจัยขอขอบคุณการสนับสนุนของหน่วยวิจัยด้านวัสดุยั่งยืนและเศรษฐกิจหมุนเวียน แห่งมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (Thammasat University Research Unit in Sustainable Materials and Circular Economy, SMACE)

### เอกสารอ้างอิง

- Aziz, I., Abdullah, M.M.A. B., Yong, H., & Ming, L. (2019). Behaviour changes of ground granulated blast furnace slag geopolymers at high temperature. *Advances in Cement Research*, 32, 1-28. doi:10.1680/jadcr.18.00162.
- Aizat, E.A., Abdullah, M.M.A., Liew Y.M., & Heah, C.Y. (2018). Dolomite/fly ash alkali activated geopolymer strengths with the influence of solid/liquid ratio. *AIP Conference Proceeding: Proceeding of the 4<sup>th</sup> International Conference on Green Design and Manufacture 2018: Advanced and emerging applications, Ho Chi Minh, Vietnam*, 2030(1). doi:10.1063/1.5066915.
- Aizat, E.A., Abdullah, M.M.A., Vizureanu, P., Salleh, M.A.A.M., Sandu, A.V., Chaiprapa, J., Yoriya, S., Hussin, K. & Aziz, I.H. (2020) Strength development and elemental distribution of dolomite/fly ash geopolymer composite under elevated temperature. *Materials (Basel)*, 13(4):1015. doi:10.3390/ma13041015.
- Arkame, Y., Harrati, A., Jannaoui, M., Et-Tayea, Y., Yamari, I., Sdiri, A., & Sadik, C. (2023). Effects of slag addition and sintering temperature on the technological properties of dolomite based porous ceramics. *Open Ceramics*, 13, 100333. doi:10.1016/j.oceram.2023.100333.
- Ashfaq, M., Sharif, M., Irfan-ul-Hassan, M., Sahar, U., Akmal, U., & Mohamed, A. (2024). Up-scaling of fly ash-based geopolymer concrete to investigate the binary

- effect of locally available metakaolin with fly ash. *Heliyon*, 10, e26331. doi:10.1016/j.heliyon.2024.e26331.
- Choo, T.F., Mohd Salleh, M.A., Kok, K Y., Matori, K.A., & Abdul Rashid, S. (2020). Characterization of High-Temperature Hierarchical Porous Mullite Washcoat Synthesized Using Aluminium Dross and Coal Fly Ash. *Crystals*, 10(3). doi:10.3390/cryst10030178.
- Dirisu, J.O., Fayomi, O.S.I., Oyedepo, S.O., Jolayemi, K.J., & Moboluwarin, D.M. (2019). Critical evaluation of aluminium dross composites and other potential building ceiling materials. *Procedia Manufacturing*, 35, 1205-1210. doi:10.1016/j.promfg.2019.06.078.
- Elseknidy, M.H., Salmiaton, A., Nor Shafizah, I., & Saad, A.H. (2020). A Study on Mechanical Properties of Concrete Incorporating Aluminium Dross, Fly Ash, and Quarry Dust. *Sustainability*, 12(21). doi:10.3390/su12219230.
- Lv, S., Ni, H., Wang, X., Ni, W., & Wu, W. (2022). Effects of Hydrolysis Parameters on AlN Content in Aluminium Dross and Multivariate Nonlinear Regression Analysis. *Coatings*, 12(5). doi:10.3390/coatings12050552.
- McLellan, B.C., Williams, R.P., Lay, J., van Riessen, A., & Corder, G.D. (2011). Costs and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary portland cement. *Journal of Cleaner Production*, 19(9), 1080-1090. doi:10.1016/j.jclepro.2011.02.010.
- Naghizadeh, A., Tchadjie, L.N., Ekolu, S.O., & Welman-Purchase, M. (2024). Circular production of recycled binder from fly ash-based geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 415, 135098. doi:10.1016/j.conbuildmat.2024.135098.
- Poonyakanok, W. (n.d.) Green concrete. Retrieved from <https://risc.in.th/th/knowledge/>.
- Puksisuwan, P., Laoratanakul, P., & Cherdhirunkorn, B. (2018). Utilization of aluminium dross as a main raw material for synthesis of geopolymer. *Journal of Metals, Materials and Minerals*, 27(2).
- Rashad, A.M. (2013). A comprehensive overview about the influence of different additives on the properties of alkali-activated slag – A guide for Civil Engineer. *Construction and Building Materials*, 47, 29-55. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.04.011.

- Shobeiri, V., Bennett, B., Xie, T., & Visintin, P. (2021). A comprehensive assessment of the global warming potential of geopolymer concrete. *Journal of Cleaner Production*, 297, 126669. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126669>.
- Stafford, F.N., Dias, A.C., Arroja, L., Labrincha, J.A., & Hotza, D. (2016). Life cycle assessment of the production of Portland cement: a Southern Europe case study. *Journal of Cleaner Production*, 126, 159-165. doi:10.1016/j.jclepro.2016.02.110.
- Thunuguntla, C.S., & Gunneswara Rao, T.D. (2018). Effect of mix design parameters on mechanical and durability properties of alkali activated slag concrete. *Construction and Building Materials*, 193, 173-188. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.10.189.
- Tonnayopas, D., Saelee, P., & Chantaramanee, S. (2011). *Production of Lightweight Ceramic Tile from Kaolin Refining Waste and Addition of Dolomite and Waste Clay Brick*. Thaksin University Journal, 14(2), 140-148.
- Toobpeng, N., Thavorniti, P., & Jiemsirilars, S. (2024). Effect of additives on the setting time and compressive strength of activated high-calcium fly ash-based geopolymers. *Construction and Building Materials*, 417, 135035. doi:10.1016/j.conbuildmat.2024.135035.
- Xu, H., & Van Deventer, J.S.J. (2000). The geopolymerisation of aluminosilicate minerals. *International Journal of Mineral Processing*, 59(3), 247-266. doi:10.1016/S0301-7516(99)00074-5.
- Zarina, Y., Abdullah, A. M., & Ahmad, M. A. (2014). *The effect of dolomite incorporation on the properties of boiler ash-based geopolymer*. In *Applied Mechanics and Materials* (Vol. 660, pp. 289-293). Trans Tech Publications.

การศึกษาผลเฉลยของระบบสมการเพลล์

$$x^2 - 8t^2y^2 = 1 \text{ และ } pz^2 - t^2y^2 = -1$$

An Investigation of the Solutions of the System of Pell Equations

$$x^2 - 8t^2y^2 = 1 \text{ and } pz^2 - t^2y^2 = -1$$

วิภาวดี มูลไชยสุข

Vipawadee Moonchaisook

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์

Faculty of Science and Technology, Surindra Rajabhat University

Email: dindum4300@gmail.com

Received : April 15, 2025

Revised : September 7, 2025

Accepted : December 1, 2025

### บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลเฉลยที่เป็นจำนวนเต็มบวกของระบบสมการเพลล์

$$x^2 - 8t^2y^2 = 1 \text{ และ } pz^2 - t^2y^2 = -1$$

โดยที่  $p$  เป็นจำนวนเฉพาะ และ  $t, x, y, z$  เป็นจำนวนเต็มบวก อีกทั้งต้องเป็นไปตามเงื่อนไขว่า  $\gcd(x, y) = 1$  และ  $\gcd(t, x) = 1$  วิธีการวิจัยประกอบด้วยการปรับสมการให้อยู่ในรูปแบบที่เหมาะสมต่อการวิเคราะห์เชิงโครงสร้าง พร้อมใช้แนวคิดทางทฤษฎีจำนวน เช่น คุณสมบัติของจำนวนเฉพาะ สมการกำลังสี่ และทฤษฎีความผกผันกำลังสอง เพื่อแยกกรณีและพิสูจน์อย่างเป็นระบบ ผลการวิจัย พบว่า ระบบสมการดังกล่าวไม่มีคำตอบจำนวนเต็มบวก กล่าวคือ ไม่มีจำนวนเต็มบวก  $x, y, z$  ใดที่ทำให้ระบบสมการนี้เป็นจริงพร้อมกัน การศึกษานี้ช่วยเสริมสร้างความเข้าใจเกี่ยวกับพฤติกรรมของสมการแบบเพลล์ และส่งเสริมแนวทางใหม่ในการวิเคราะห์สมการเชิงโครงสร้างที่มีความซับซ้อนในคณิตศาสตร์เชิงทฤษฎี อีกทั้งยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการศึกษาปัญหาทางคณิตศาสตร์อื่น ๆ ได้ในอนาคต

คำสำคัญ: ระบบสมการเพลล์ ผลเฉลยพร้อมกัน สมภาค สมการไดโอแฟนไทน์

## ABSTRACT

This research aims to study the positive integer solutions of the Pell-type system of equations

$$x^2 - 8t^2y^2 = 1 \text{ and } pz^2 - t^2y^2 = -1$$

where  $p$  is a prime number, and  $t, x, y, z$  are positive integers satisfying the conditions  $\gcd(x, y) = 1$  and  $\gcd(t, x) = 1$ . The methodology involves transforming the system into a form suitable for structural analysis. Number-theoretic concepts such as the properties of prime numbers, fourth power residues, and the quadratic reciprocity theorem are employed to classify cases and provide rigorous proofs. The results reveal that the system has no positive integer solutions; that is, there are no positive integers  $x, y, z$  that simultaneously satisfy both equations. This study enhances the understanding of the behavior of Pell-type equations and promotes new approaches for analyzing complex structural systems in theoretical number theory. Moreover, the findings have the potential for application in future mathematical research.

**Key Words:** Pell's equation system, Simultaneous solutions, Congruences, Diophantine equations

## Introduction

The Pell equation is one of the most significant equations in number theory and algebra, and it has been extensively studied regarding its potential solutions. Numerous mathematicians have undertaken the task of proving and exploring the possibilities of solutions in various forms. For instance, Bennett (1998) established the statement “if  $a$  and  $b$  are distinct positive integers, the system of equations  $x^2 - az^2 = 1$  and  $y^2 - bz^2 = 1$  could yield at most three solutions.” J.H. Chen (2001) demonstrated that a particular form of the Pell equation  $a^2x^4 - By^2 = 1$  had at most one solution, while P. Yuan (2004) proved that  $x^2 - 4m(m+1)y^2 = y^2 - bz^2 = 1$  had a unique positive integer solution.

In 2014, X. Ai, J. Chen, S. Zhang, and H. Hu investigated Pell system of equations

$x^2 - 24y^2 = 1$  and  $y^2 - pz^2 = 1$  where  $p$  is a prime number, revealing that such system of equations yielded exactly two solutions. Simultaneously, L. Tao (2015) showed that certain forms of the Pell equations  $x^2 - 24y^2 = 1$  and  $y^2 - 2pz^2 = 1$  did not have integer solutions. In 2018, Q. Yunyun (2018) examined specific Pell system of equations  $x^2 - (a^2 - 1)y^2 = 1$  and  $y^2 - pz^2 = 1$  for  $a = 2, 3$  and concluded that these equations similarly fail to yield integer solutions. These studies highlight the ongoing importance and continuity of research regarding the Pell equation. Consequently, this research aims to explore the solutions of Pell system of equations  $x^2 - 8t^2y^2 = 1$  and  $pz^2 - t^2y^2 = -1$  where  $p$  is a prime number and  $t, x, y, z$  are positive integers, we focus on fundamental concepts in number theory, such as congruences and quartic residues.

## Preliminaries

This section discusses the important definitions and theorems used in the proofs of the lemma and the main theorems of this paper, without providing proofs of these theories. Those who are interested can study more from the reference documents.

**Definition 2.1** Let  $n$  be a positive integer. For integers  $a$  and  $b$ , we say that  $a$  is congruent to  $b$  modulo  $n$ , denoted as  $a \equiv b(\text{mod } n)$ , if  $n$  divides  $(a - b)$  (Smith,2020).

**Definition 2.2** Let  $a$  be an integer and  $n$  be a positive integer. We say that  $a \equiv r(\text{mod } n)$  if  $r$  is the remainder when  $a$  is divided by  $n$ , where  $0 \leq r < n$ .

**Definition 2.3** Let  $n$  be a positive integer. If there exists an integer  $x$  such that  $x^4 \equiv a(\text{mod } n)$ , then  $a$  is called a biquadratic residue modulo  $n$ .

**Example:** The fourth power residues modulo 6 for  $x = 0, 1, 2, 3, 4, 5$  are shown as follows. Because

$$\begin{array}{ll} 0^4 \equiv 0(\text{mod } 6), & 1^4 \equiv 1(\text{mod } 6) \\ 2^4 \equiv 4(\text{mod } 6), & 3^4 \equiv 3(\text{mod } 6) \\ 4^4 \equiv 4(\text{mod } 6), & 5^4 \equiv 1(\text{mod } 6) \end{array}$$

to analyze the Diophantine equation  $x^4 \equiv 5 \pmod{6}$ , we begin by considering the possible residues modulo 6. The residues  $x^4 \pmod{6}$  for  $x \in \{0,1,2,3,4,5\}$  yield the set of possible results  $\{0,1,3,4\}$ . Since 5 is not in this set, the congruence  $x^4 \equiv 5 \pmod{6}$  has no solutions.

For  $n = 8$  similarly we evaluate  $x^4$  for  $x = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$  as follow:

$$\begin{array}{ll} 0^4 \equiv 0 \pmod{8}, & 1^4 \equiv 1 \pmod{8} \\ 2^4 \equiv 0 \pmod{8}, & 3^4 \equiv 1 \pmod{8} \\ 4^4 \equiv 0 \pmod{8}, & 5^4 \equiv 1 \pmod{8} \\ 6^4 \equiv 0 \pmod{8}, & 7^4 \equiv 1 \pmod{8} \end{array}$$

Thus, the resulting residues are  $\{0, 1\}$ . Since 4 is not in this set, the congruence  $x^4 \equiv 4 \pmod{8}$  has no solutions.

For  $n = 9$  similarly we evaluate  $x^4$  for  $x = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8$  as follow:

$$\begin{array}{ll} 0^4 \equiv 0 \pmod{9}, & 1^4 \equiv 1 \pmod{9} \\ 2^4 \equiv 7 \pmod{9}, & 3^4 \equiv 0 \pmod{9} \\ 4^4 \equiv 4 \pmod{9}, & 5^4 \equiv 4 \pmod{9} \\ 6^4 \equiv 0 \pmod{9}, & 7^4 \equiv 7 \pmod{9}, \\ & 8^4 \equiv 1 \pmod{9}. \end{array}$$

Thus, the resulting residues are  $\{0, 1, 4, 7\}$ . Since 9 is not in this set, the congruence  $x^4 \equiv 9 \pmod{9}$  has no solutions.

**Definition 2.4** A positive integer that is not a perfect square is referred to as a non-square integer. The positive solution of a Diophantine equation is called the fundamental solution if  $(x, y)$  are positive integers that satisfy the equation for any positive solution (Hardy & Wright, 2008).

**Definition 2.5** A Pell's equation is a specific of Diophantine equation of the form  $x^2 - Dy^2 = 1$  where  $D$  is a non-square positive integer, and  $x$  and  $y$  are integers, which are the integer solution  $(x, y)$  that satisfies this relationship.

**Example 1:** Consider the Diophantine equation  $x^2 - 3y^2 = 1$ .

The positive integer solutions include  $(x, y) = (2, 1)$ . In this case,  $(2, 1)$  is regarded as a fundamental solution because it is the smallest positive solution that satisfies the equation. Moreover, since  $D = 3$  is a positive integer that is not a perfect square, this equation is classified as a Pell's equation according to the definition.

**Example 2:** Consider the equation  $x^2 - 2y^2 = 1$ .

This is known as Pell's equation. One fundamental solution is  $(3,2)$ . Since  $3^2 - 2(2^2) = 9 - 8 = 1$ , other solutions can be generated from this fundamental solution using recurrence relation.

### Main Theorem

**Theorem 3.1** The Pell-type system of equations

$$\begin{cases} x^2 - 8t^2y^2 = 1 \\ pz^2 - t^2y^2 = -1 \end{cases}$$

has no integer solutions  $(x, y)$ , when  $p$  is a prime number,  $t, x, y, z$  are positive integers, and  $\gcd(x, y) = 1, \gcd(t, x) = 1$ .

**Proof.** Consider the Pell's system of equation given by:

$$\begin{cases} x^2 - 8t^2y^2 = 1 & (1) \\ pz^2 - t^2y^2 = -1 & (2) \end{cases}$$

when  $p$  is a prime number and  $t, x, y$  and  $z$  are positive integers. This equation can be rewritten as

$$\begin{cases} x^2 - 8t^2y^2 = 1 \\ x^2 + pz^2 = 9t^2y^2 \end{cases} \quad (3)$$

By adding equations (1) and (2), we obtain equation (3). This equation can then be expressed in a new form as follows:

$$\begin{cases} x^2 - 8t^2y^2 = 1 \\ pz^2 = (3ty + x)(3ty - x) \end{cases} \quad (4)$$

Let  $d = \gcd(3ty + x, 3ty - x)$ .

Thus,  $d|(3ty + x)$  and  $d|(3ty - x)$ .

Then, there exist integers  $m$  and  $n$  such that

$$3ty + x = dm \text{ and } 3ty - x = dn.$$

Adding and subtracting these two equations, we get  $6ty = d(m + n)$  and  $2m = d(m - n)$ .

Therefore  $d|6ty$  and  $d|2x$ .

Now, consider that  $(x, y) = 1$  and  $(t, x) = 1$ . if  $3|x$ , then  $\gcd(3ty, x) = 3$ .

Suppose that  $3|x$ , then clearly  $3|3ty$ , and since  $x$  is divisible by 3, we have  $\gcd(3ty, x) = 3$ .

On the other hand, if  $3 \nmid x$ , then  $\gcd(3ty, x) = 1$ .

Therefore, the possible values of  $\gcd(3ty, x)$  are either 1 or 3.

Since  $d \mid 6ty$  and  $d \mid 2x$ , the possible values of  $d$  must divide both 6 and 2.

The common divisors of 6 and 2 are  $\gcd(6, 2) = \{1, 2\}$ .

But from the previous reasoning about  $\gcd(3ty, x)$ ,

we also consider the case when  $\gcd(3ty, x) = 3$ .

Therefore, the possible values of  $d$  must divide both 6 and 3, i.e.,

$$d \in \{1, 2, 3, 6\}$$

Therefore, we conclude that  $d$  can be 1, 2, 3 or 6. From equation (4), we have

$$\left(\frac{3ty+x}{d}\right)\left(\frac{3ty-x}{d}\right) = \frac{pz^2}{d^2} \quad (5)$$

This implies

$$\left(\frac{3ty+x}{d}\right)\left(\frac{3ty-x}{d}\right) = mn \quad (6)$$

From equation (5), we have

$$d(dmn) = pz^2$$

Which implies that

$$d \mid pz^2$$

Since  $p$  is a prime number, the possible prime factorization of  $pz^2$  implies that  $d$  must be a divisor of  $p, z$ , or  $z^2$ . In particular, we focus on the case  $d \mid p$ , which implies  $d = 1$  or  $d = p$ , due to the primality of  $p$ . In order to analyze the structure of the equation, we consider the implications of  $d^2$  in relation to  $p$  and  $z^2$ . Among all possible factorizations, we focus on the meaningful algebraic cases that lead to integer values of all variables:

Case 1:  $d^2 = p$ , which implies  $d = \sqrt{p}$  (requires  $p$  to be a square), and hence  $mn = z^2$ .

Case 2:  $d^2 = z^2$ , which implies  $d = z$ , and thus  $mn = p$ .

Other algebraic combinations, such as  $d^2 = pz$ , do not result in perfect squares or contradict the integrality of  $d, z$ , or  $p$ , and are therefore excluded from consideration. These two cases represent the only feasible scenarios that preserve the integer nature of all variables and align with the original equation structure.

**Case 1:**  $d^2 = p$  and  $mn = z^2$

since  $p$  is a prime number ( $p > 1$ ). the condition  $d^2 = p$  implies that  $d = \sqrt{p}$ .

However, prime numbers like 2, 3, 5, etc., are not perfect squares, meaning their square roots are not integers. Thus,  $d$  cannot be an integer.

**Case 2:**  $d^2 = z^2$  and  $mn = p$ .

In this scenario, we have  $d|z$  and  $\gcd(m, n) = 1$ .

We let

$$z = duv \quad (7)$$

where  $u$  and  $v$  are integers such that  $(u, v) = 1$ .

Substituting equation (5) into equation (6), we have

$$\left(\frac{3ty+x}{d}\right)\left(\frac{3ty-x}{d}\right) = pu^2v^2.$$

Given the equation and the conditions  $mn = pu^2v^2$  and  $\gcd(m, n) = 1$ , it follows that  $m = pu^2$  and  $n = v^2$ , where  $m$  and  $n$  are integers satisfying  $\gcd(m, n) = 1$ .

Since  $\frac{3ty+x}{d}$  and  $\frac{3ty-x}{d}$  have a product equal to  $pu^2v^2$  and exhibit symmetry, there are two possible Scenario for assigning the values  $pu^2$  and  $v^2$ :

$$\text{Scenario 1: } \frac{3ty+x}{d} = pu^2 \text{ and } \frac{3ty-x}{d} = v^2$$

$$\text{Scenario 2: } \frac{3ty+x}{d} = v^2 \text{ and } \frac{3ty-x}{d} = pu^2$$

$$\text{Since } d|6ty, \text{ we observe that } \frac{6ty}{d} = \frac{3ty+x}{d} + \frac{3ty-x}{d} = pu^2 + v^2$$

where  $t, x, y$  and  $z$  are positive integers..

Since  $pu^2 + v^2 \in \mathbb{Z}$ , and  $d|6ty$ , this implies that  $6t|d(pu^2 + v^2)$ .

Hence, we assume that the parameters  $d, u, v, t \in \mathbb{Z}^+$  are chosen such that  $d(pu^2 + v^2)$  is divisible by  $6ty$ , ensuring  $y = d\left(\frac{pu^2+v^2}{6t}\right)$  is a positive integer.

From the two scenarios, we obtain

$$x = \pm d\left(\frac{pu^2-v^2}{2}\right) \text{ and } y = d\left(\frac{pu^2+v^2}{6t}\right).$$

Substitute  $x$  and  $y$  into equation (1),

we have

$$d^2\left(\frac{pu^2-v^2}{2}\right)^2 - 8t^2d^2\left(\frac{pu^2+v^2}{6t}\right)^2 = 1.$$

$$\begin{aligned} \frac{d^2}{4}(p^2u^2 - 2pu^2v^2 + v^4) - 8\frac{d^2}{36}(p^2u^4 + 2pu^2v^2 + v^4) &= 1 \\ \left(\frac{d^2}{4} - \frac{8d^2}{36}\right)p^2u^4 + \left(\frac{-d^2}{4} - \frac{8d^2}{36}\right)(2pu^2v^2) + \left(\frac{d^2}{4} - \frac{8d^2}{36}\right)v^4 &= 1. \end{aligned}$$

Then

$$\begin{aligned} d^2(p^2u^4 - 17(2pu^2v^2) + v^4) &= 36. \\ p^2u^4 + (-17)(2pu^2v^2) + v^4 &= \frac{36}{d^2}. \end{aligned}$$

That is

$$(pu^2 - 17v^2)^2 - 288v^4 = \frac{36}{d^2}.$$

Let

$$\beta = \left| \frac{d(pu^2 - 17v^2)}{6} \right|$$

Therefore

$$\beta^2 - 8d^2v^4 = 1 \quad (8)$$

From equation (8), we can consider four cases based on the values of  $d = 1, 2, 3$  and  $6$ , utilizing the concept of fourth power remainders and the definition of the solution set for Diophantine equations to analyze the solutions for each sub-case as follows.

**Case 2.1:**  $d = 1$ . From equation (8) we have

$$\left(\frac{\beta + 1}{2}\right)\left(\frac{\beta - 1}{2}\right) = 2v^4 \quad (9)$$

The equation can be rearranged for clarity by letting  $v = st$  to simplify the analysis as follows.

$$\left(\frac{\beta + 1}{2}\right)\left(\frac{\beta - 1}{2}\right) = 2s^4t^4.$$

We can consider two cases because the equation has two factors  $\frac{\beta+1}{2}$  and  $\frac{\beta-1}{2}$ . These factors can be related in different ways, which leads to two possible scenarios.

### Case 2.1.1

Assume:

$$\begin{cases} \frac{\beta+1}{2} = 2s^4 \\ \frac{\beta-1}{2} = t^4 \end{cases} \quad \text{or} \quad \begin{cases} \frac{\beta+1}{2} = 2t^4 \\ \frac{\beta-1}{2} = s^4 \end{cases}$$

From this, we can derive

$$\frac{\beta+1}{2} - \frac{\beta-1}{2} = 2s^4 - t^4 = 1.$$

Or

$$\frac{\beta+1}{2} - \frac{\beta-1}{2} = 2t^4 - s^4 = 1.$$

which is a Diophantine equation. The only integer solution is  $(s, t) = (1, 1)$  when  $s$  and  $t$  are positive integers.

From  $\beta = \left| \frac{d(pu^2 - 17v^2)}{6} \right|$ , we get  $\beta = 3$  and  $pu^2 = 35 = (5)(7)$ .

Thus  $p = 5$  and  $u = \pm\sqrt{7}$  or  $p = 7$  and  $u = \pm\sqrt{5}$ . Therefore,  $z = \pm\sqrt{7}$  or  $z = \pm\sqrt{5}$ .

Since the values obtained do not yield any integer solutions, we conclude that this case has no integer results.

### Case 1.1.2

Assume:

$$\begin{cases} \frac{\beta+1}{2} = s^4 \\ \frac{\beta-1}{2} = 2t^4 \end{cases} \tag{10}$$

Or

$$\begin{cases} \frac{\beta+1}{2} = t^4 \\ \frac{\beta-1}{2} = 2s^4 \end{cases} \tag{11}$$

From this, we can derive

$$\frac{\beta+1}{2} - \frac{\beta-1}{2} = s^4 - 2t^4 = 1.$$

Or

$$\frac{\beta+1}{2} - \frac{\beta-1}{2} = t^4 - 2s^4 = 1.$$

Let  $u = s^2$  and  $w = t^2$  for positive integers  $w$  and  $u$ . This gives the equation:

$$s^4 - 2t^4 = u^2 - 2w^2 = 1.$$

Or

$$\begin{aligned} t^4 - 2s^4 &= w^2 - 2u^2 = 1 \\ u_n + w_n\sqrt{2} &= (3 + 2\sqrt{2})^n. \end{aligned}$$

Or

$$w_n + u_n\sqrt{2} = (3 + 2\sqrt{2})^n.$$

Since  $3 + 2\sqrt{2}$  is the fundamental solution to the equation  $u^2 - 2w^2 = 1$  and  $w^2 - 2s^2 = 1$  we have  $u_1 = s^2 = 3$  and  $w_1 = t^2 = 2$ .

Or  $w_1 = t^2 = 3$  and  $u_1 = s^2 = 2$ .

Thus,  $s = \pm\sqrt{3}$  and  $t = \pm\sqrt{2}$ . Or  $s = \pm\sqrt{2}$  and  $t = \pm\sqrt{3}$ .

Therefore, equation (10) and (11) has no integer solution.

It can be observed that swapping the values of  $s^4$  and  $t^4$  between  $\left(\frac{\beta+1}{2}\right)$  and  $\left(\frac{\beta-1}{2}\right)$  does not change the final result. Therefore, in cases 2 to 4, the proof will consider swapping only the constants, as detailed below.

### Case 2.2: $d = 2$

From equation (8), we obtain:

$$\beta^2 - 32v^4 = 1.$$

This implies:

$$\left(\frac{\beta+1}{2}\right)\left(\frac{\beta-1}{2}\right) = 8v^4.$$

Since  $v = st$ , We can express it as:

$$\left(\frac{\beta+1}{2}\right)\left(\frac{\beta-1}{2}\right) = 8s^4t^4.$$

We will divide this into four sub-cases as follows:

#### Case 2.2.1

Assume:

$$\begin{cases} \frac{\beta+1}{2} = 4s^4 \\ \frac{\beta-1}{2} = 2t^4 \end{cases} \quad (12)$$

From this, we can derive

$$\frac{\beta+1}{2} - \frac{\beta-1}{2} = 4s^4 - 2t^4 = 1.$$

Let  $r = 2s^2$  and  $w = t^2$  for positive integers  $w$  and  $u$ . This gives the equation:

$$r^2 - 2w^2 = 1,$$

The general solution to the equation  $r^2 - 2w^2 = 1$  is given by:

$$r_n + w_n\sqrt{2} = (3 + 2\sqrt{2})^n.$$

Since  $3 + 2\sqrt{2}$  is the fundamental solution to the equation  $r^2 - 2w^2 = 1$ , we have:

$$r_1 = 2s^2 = 3 \text{ and } w_1 = t^2 = 2.$$

$$\text{Thus, } s = \sqrt{\frac{3}{2}} \text{ and } t = \sqrt{2}$$

Therefore, equation (12) has no integer solution.

### Case 2.2.2

Assume:

$$\begin{cases} \frac{\beta + 1}{2} = 2s^4 \\ \frac{\beta - 1}{2} = 4t^4 \end{cases} \quad (13)$$

From this, we can derive

$$\frac{\beta + 1}{2} - \frac{\beta - 1}{2} = 2s^4 - 4t^4 \quad (14)$$

From equation (14), we obtain:

$$2s^4 \equiv 1(\text{mod } 4).$$

This means:  $8s^4 \equiv 4(\text{mod } 8)$ ,

Which is impossible since  $8 \nmid 8s^4$ . This means that 4 cannot be a remainder of  $8s^4$  modulo 8.

Therefore, equation (13) has no integer solution.

### Case 2.2.3

Assume:

$$\begin{cases} \frac{\beta + 1}{2} = 8s^4 \\ \frac{\beta - 1}{2} = t^4 \end{cases} \quad (15)$$

From this, we can derive

$$\frac{\beta + 1}{2} - \frac{\beta - 1}{2} = 8s^4 - t^4 = 1 \quad (16)$$

From equation (16), we obtain:

$$t^4 \equiv -1(\text{mod } 8).$$

Since  $-1 \equiv 7(\text{mod } 8)$ . This leads to:

$$t^4 \equiv 7(\text{mod } 8).$$

Since 7 is not a fourth power residue modulo 8, Therefore, equation (15) has no integer solution.

#### Case 2.2.4

Assume:

$$\begin{cases} \frac{\beta + 1}{2} = s^4 \\ \frac{\beta - 1}{2} = 8t^4 \end{cases} \quad (17)$$

From (17), we derive:

$$\frac{\beta + 1}{2} - \frac{\beta - 1}{2} = s^4 - 8t^4 = 1 \quad (18)$$

Let  $u = s^2$  and  $w = t^2$  for positive integers  $w$  and  $u$ .

This gives the equation:

$$u^2 - 8w^2 = 1.$$

Since  $3 + \sqrt{8}$  is the fundamental solution to the equation  $u^2 - 8w^2 = 1$ , we have:

The general solution to the equation

$u^2 - 8w^2 = 1$  is given by:

$$u_n + w_n\sqrt{8} = (3 + \sqrt{8})^n.$$

$$u_1 = s^2 = 3 \text{ and } w_1 = t^2 = 1.$$

$$\text{Thus, } s = \pm\sqrt{2} \text{ and } t = \pm 1$$

Therefore, equation (17) has no integer solution.

#### Case 2.3: $d = 3$

From equation (8), we obtain:

$$\beta^2 - 72v^4 = 1.$$

The equation can be rearranged for clarity by letting  $v = st$  to simplify the analysis as follows.

$$\left(\frac{\beta + 1}{2}\right)\left(\frac{\beta - 1}{2}\right) = 18s^4t^4.$$

We can consider six cases because the equation has two factors  $\frac{\beta+1}{2}$  and  $\frac{\beta-1}{2}$ . These factors can be related in different ways, which leads to six possible scenarios.

### Case 2.3.1

Assume:

$$\begin{cases} \frac{\beta + 1}{2} = 6s^4 \\ \frac{\beta - 1}{2} = 3t^4 \end{cases} \quad (19)$$

From equation (19), we can derive:

$$\frac{\beta + 1}{2} - \frac{\beta - 1}{2} = 6s^4 - 3t^4 = 1 \quad (20)$$

From equation (20), we obtain the congruence

$$3t^4 \equiv -1(\text{mod } 6) \text{ or } 3t^4 \equiv 5(\text{mod } 6)$$

Now we analyze possible values of  $t \pmod{6}$ . We compute  $t^4 \pmod{6}$  for  $t = 0, 1, 2, 3, 4, 5$ .

The resulting values are  $t^4 \pmod{6} \in \{0, 1, 3, 4\}$ .

Thus,  $3t^4 \equiv 5(\text{mod } 6)$  is not possible. This contradiction implies that our assumption leads to no integer solution. Therefore, equation (19) has no integer solution.

### Case 2.3.2

Assume:

$$\begin{cases} \frac{\beta + 1}{2} = 3s^4 \\ \frac{\beta - 1}{2} = 6t^4 \end{cases} \quad (21)$$

From equation (21), we can derive:

$$\frac{\beta + 1}{2} - \frac{\beta - 1}{2} = 3s^4 - 6t^4 = 1 \quad (22)$$

From equation (22), we obtain the following congruence:

$$3s^4 \equiv 1(\text{mod } 6) \text{ or } 6t^4 \equiv 2(\text{mod } 6).$$

Next, we analyze these congruences to determine the implications for  $s$  and  $t$ :

$3s^4 \equiv 1(\text{mod } 6)$  implies that  $s^4$  must be congruent to  $1(\text{mod } 2)$  (since  $3 \equiv 3(\text{mod } 6)$  and  $1$  is odd)  $6s^4 \equiv 2(\text{mod } 6)$  simplifies to  $0 \equiv 2(\text{mod } 6)$  which is impossible.

Thus, we conclude that the system of equations given by equation (21) does not yield any integer solutions.

### Case 2.3.3

Assume:

$$\begin{cases} \frac{\beta + 1}{2} = 9s^4 \\ \frac{\beta - 1}{2} = 2t^4 \end{cases} \quad (23)$$

From equation (23), we can derive:

$$\frac{\beta + 1}{2} - \frac{\beta - 1}{2} = 9s^4 - 2t^4 = 1 \quad (24)$$

Let  $w = t^2$  and  $q = 3s^2$  for positive integers  $w$  and  $q$ . This gives the equation:

$$q^2 - 2w^2 = 1,$$

The general solution to the equation  $q^2 - 2w^2 = 1$  is given by  $q_n + w_n\sqrt{2} = (3 + 2\sqrt{2})^n$ .

Since  $3 + 2\sqrt{2}$  is the fundamental solution to the equation  $q^2 - 2w^2 = 1$ , we have:  $q_1 = 3s^2 = 3$  and  $w_1 = t^2 = 2$ . Thus,  $s = \pm 1$  and  $t = \pm\sqrt{2}$ .

Therefore, equation (23) has no integer solution.

### Case 2.3.4

Assume:

$$\begin{cases} \frac{\beta + 1}{2} = 2s^4 \\ \frac{\beta - 1}{2} = 9t^4 \end{cases} \quad (25)$$

From equation (25), we can derive:

$$\frac{\beta + 1}{2} - \frac{\beta - 1}{2} = 2s^4 - 9t^4 = 1 \quad (26)$$

This simplifies to:

$$2s^4 \equiv 1(\text{mod } 9)$$

$$10s^4 \equiv 5(\text{mod } 9)$$

Since  $10 \equiv 1(\text{mod } 9)$ , we can conclude:

$$s^4 \equiv 5(\text{mod } 9)$$

Now we analyze all possible values of  $s^4(\text{mod } 9)$ :

We find that  $s^4(\text{mod } 9) \in \{0, 1, 4, 7\}$ , so 5 is not a valid value.

This is impossible because 5 is not fourth power residue modulo 9.

Thus, we conclude that equation (25) has no integer solutions.

### Case 2.3.5

Assume:

$$\begin{cases} \frac{\beta + 1}{2} = 18s^4 \\ \frac{\beta - 1}{2} = t^4 \end{cases} \quad (27)$$

From equation (27), we can derive:

$$18s^4 - t^4 = 1 \quad (28)$$

Now, rearranging gives:

$$-t^4 - 1 \equiv 9(2s^4).$$

That implies:

$$-t^4 \equiv 1(\text{mod } 9).$$

Since  $-1 \equiv 8(\text{mod } 9)$ , we can write:

$$t^4 \equiv 8(\text{mod } 9).$$

This is impossible because 8 is not a quadratic residue modulo 9.

Therefore, we conclude that equation (27) has no integer solutions.

### Case 2.3.6

Assume:

$$\begin{cases} \frac{\beta + 1}{2} = s^4 \\ \frac{\beta - 1}{2} = 18t^4 \end{cases} \quad (29)$$

From equation (29), we can derive

$$\frac{\beta+1}{2} - \frac{\beta-1}{2} = s^4 - 18t^4 = 1 \quad (30)$$

Let  $u = s^2$  and  $k = 9t^2$  for positive integers  $W$  and  $u$ . This gives the equation:

$$u^2 - 2k^2 = 1,$$

The general solution to the equation  $u^2 - 2k^2 = 1$  is given by:

$$u_n + k_n\sqrt{2} = (3 + 2\sqrt{2})^n.$$

Since  $3 + 2\sqrt{2}$  is the fundamental solution to the equation  $u^2 - 2k^2 = 1$ , we have:

$$u_1 = s^2 = 3 \text{ and } k_1 = 9t^2 = 2.$$

$$\text{Thus, } s = \pm\sqrt{3} \text{ and } t = \pm\frac{1}{3}\sqrt{2}.$$

Therefore, equation (29) has no integer solution.

**Case 2.4:**  $d = 6$ , from equation (8), we derive

$$\beta^2 - 288v^4 = 1.$$

This implies

$$\left(\frac{\beta+1}{2}\right)\left(\frac{\beta-1}{2}\right) = 72v^4.$$

Given that  $v = st$ ,

$$\text{we have } \left(\frac{\beta+1}{2}\right)\left(\frac{\beta-1}{2}\right) = 72s^4t^4.$$

We can divide the analysis into 8 sub-cases as follows:

#### Case 2.4.1

Assume:

$$\begin{cases} \frac{\beta+1}{2} = 9s^4 \\ \frac{\beta-1}{2} = 8t^4 \end{cases} \quad (31)$$

From equation (31), we can derive

$$\frac{\beta+1}{2} - \frac{\beta-1}{2} = 9s^4 - 8t^4 = 1 \quad (32)$$

Given that  $v = st$  and  $z = duv$ , we find that

$(s, t) = (1, 1)$  is a solution for equation (32).

Now, substituting into the equation for  $\beta$ , we have:

$$\beta = \left| \frac{d(pu^2 - 17v^2)}{6} \right|$$

Assume that  $\beta = 17$ .

From  $pu^2 = 34 = (17)(2)$  the possible values are:

a) If  $p = 17$ , then  $u^2 = 2$ , which implies  $u = \pm\sqrt{2}$

b) If  $p = 2$ , then  $u^2 = 17$ , which implies  $u = \pm\sqrt{17}$ .

In both cases,  $u \notin \mathbb{Z}$ , and therefore  $z = duv = d \cdot u \cdot v = d \cdot u \cdot 1 = \pm d\sqrt{2}$  or  $\pm d\sqrt{17}$ .

Therefore, we conclude that equation (31) has no integer solutions.

#### Case 2.4.2

Assume:

$$\begin{cases} \frac{\beta + 1}{2} = 8s^4 \\ \frac{\beta - 1}{2} = 9t^4 \end{cases} \quad (33)$$

From equation (33), we can derive

$$\frac{\beta+1}{2} - \frac{\beta-1}{2} = 8s^4 - 9t^4 = 1 \quad (34)$$

This leads to  $8s^4 \equiv 1 \pmod{9}$ . Since  $8s^4 \equiv -s^4 \pmod{9}$ ,

we can rewrite this as  $-8 \equiv 1 \pmod{9}$ .

Thus, we have  $s^4 \equiv 8 \pmod{9}$ .

This is impossible because 8 is not a quadratic residue modulo 9.

Therefore, we conclude that equation (33) has no integer solutions.

#### Case 2.4.3

Assume:

$$\begin{cases} \frac{\beta + 1}{2} = 36s^4 \\ \frac{\beta - 1}{2} = 2t^4 \end{cases} \quad (35)$$

From equation (35), we can derive

$$\frac{\beta+1}{2} - \frac{\beta-1}{2} = 36s^4 - 2t^4 = \quad (36)$$

From equation (36). Let  $h = 6s^2$  and  $w = t^2$  for positive integers  $h$  and  $w$  This gives the equation

$$h^2 - 2w^2 = 1 \text{ is given by } h_n + w_n\sqrt{2} = (3 + 2\sqrt{2})^n.$$

Since  $3 + 2\sqrt{2}$  is the fundamental solution to the equation  $h^2 - 2w^2 = 1$ ,

we have:  $h_1 = 6s^2 = 3$  and  $w_1 = t^2 = 2$ .

Thus,  $s = \pm\sqrt{\frac{1}{2}}$  and  $t = \pm\sqrt{2}$ .

Therefore, equation (35) has no integer solution

#### Case 2.4.4

Assume:

$$\begin{cases} \frac{\beta + 1}{2} = 2s^4 \\ \frac{\beta - 1}{2} = 36t^4 \end{cases} \quad (37)$$

From equation (37), we can derive

$$\frac{\beta + 1}{2} - \frac{\beta - 1}{2} = 2s^4 - 36t^4 = 1 \quad (38)$$

This leads to:

$$2s^4 - 1 \equiv 1 \pmod{9} \text{ or } 8s^4 \equiv 4 \pmod{9}.$$

$$\text{Since } 8s^4 \equiv -s^4 \pmod{9},$$

we can rewrite this as  $4 \equiv -5 \pmod{9}$

Thus, we have  $s^4 \equiv 8 \pmod{9}$  is impossible.

Consequently, we conclude that equation (37) has no integer solutions.

#### Case 2.4.5

Assume:

$$\begin{cases} \frac{\beta + 1}{2} = 18s^4 \\ \frac{\beta - 1}{2} = 4t^4 \end{cases} \quad (39)$$

From equation (39), we can derive

$$\frac{\beta + 1}{2} - \frac{\beta - 1}{2} = 18s^4 - 4t^4 = 1 \quad (40)$$

This leads to  $-4t^4 - 1 = 9(-2s^4)$ .

Since  $-4t^4 \equiv 1 \pmod{9}$ . We can also write this as  $-8t^4 \equiv 2 \pmod{9}$ .

This simplifies to:  $t^4 \equiv 2 \pmod{9}$ .

However, 2 is not a quadratic residue modulo 9. Therefore, this situation is impossible.

Consequently, we conclude that equation (39) has no integer solutions.

## Case 2.4.6

Assume:

$$\begin{cases} \frac{\beta + 1}{2} = 4s^4 \\ \frac{\beta - 1}{2} = 18t^4 \end{cases} \quad (41)$$

From equation (41), we can derive

$$\frac{\beta + 1}{2} - \frac{\beta - 1}{2} = 4s^4 - 18t^4 = 1 \quad (42)$$

Let  $r = 2s^2$  and  $f = 3t^2$  for positive integers  $r$  and  $f$ .

This gives the equation  $r^2 - 2f^2 = 1$ . The general solution to the equation  $r^2 - 2f^2 = 1$  is given by:

$$r_n + f_n\sqrt{2} = (3 + 2\sqrt{2})^n.$$

Since  $3 + 2\sqrt{2}$  is the fundamental solution to the equation  $r^2 - 2f^2 = 1$ , we have:  $r_1 = 2s^2 = 3$  and  $k_1 = 9t^2 = 2$ .

Thus,  $s = \pm\sqrt{\frac{3}{2}}$  and  $t = \pm\sqrt{\frac{2}{9}}$ .

Therefore, equation (41) has no integer solutions.

## Case 2.4.7

Assume:

$$\begin{cases} \frac{\beta + 1}{2} = 72s^4 \\ \frac{\beta - 1}{2} = t^4 \end{cases} \quad (43)$$

From equation (43), we can derive

$$\frac{\beta + 1}{2} - \frac{\beta - 1}{2} = 72s^4 - t^4 = 1 \quad (44)$$

Rearranging this gives:

$$-t^4 - 1 = 9(-8s^4)$$

This can also be written as:

$$t^4 + 1 = 72s^4$$

Next, we analyze this equation modulo 9:

$$t^4 \equiv -1(\text{mod } 9)$$

Which can be expressed as:  $t^4 \equiv 8(\text{mod } 9)$

Since 8 is not a residue for fourth powers modulo 9, Therefore, equation (43) has no integer solutions.

#### Case 2.4.8

Assume:

$$\begin{cases} \frac{\beta + 1}{2} = s^4 \\ \frac{\beta - 1}{2} = 72t^4 \end{cases} \quad (45)$$

From equation (45), we can derive

$$\frac{\beta + 1}{2} - \frac{\beta - 1}{2} = s^4 - 72t^4 = 1.$$

This simplifies to:

$$s^4 - 1 = 72t^4 \quad (46)$$

We can factor the left side:

$$(s^2 - 1)(s^2 + 1) = 72t^4$$

Sine  $72t^4$  is even, both  $s^2 - 1$  or  $s^2 + 1$ .

Must also be even, which implies that  $s^2$  must be odd as well.

Now, let us consider the equation modulo 3.

If  $s^2 \equiv 0(mod 3)$ , then

$$s^2 - 1 \equiv 2(mod 3).$$

And

$$s^2 + 1 \equiv 1(mod 3).$$

The product becomes:

$$(s^2 - 1)(s^2 + 1) \equiv 2 \cdot 1 \equiv 2(mod 3).$$

But

$$72t^4 \equiv 0(mod 3).$$

This is a contradiction.

The analysis in the modulo systems shows that contradictions arise, which indicates that there are no integer values for sss and ttt that satisfy equation (45). Therefore, we conclude that the equation has no integer solution.

Conclusion: Main Theorem (Theorem 3.1)

The Pell's system of equations:

$$\begin{cases} x^2 - 8t^2y^2 = 1 \\ pz^2 - t^2y^2 = -1 \end{cases}$$

The objective is to explore possible integer solutions for  $x, y$  and  $z$  given that  $p$  is a prime number, and  $t, x, y$  and  $z$  are positive integers. After deriving an equation from the combination of (1) and (2), we arrive at an analysis based on the gcd (greatest common divisor) of certain terms. This analysis further leads us to consider various cases for the value for  $d = \gcd(3ty + x, 3ty - x)$  and the implications for the system of equations. Each case ( $d = 1, d = 2, d = 3$  and  $d = 6$ ) fails to yield any integer solutions. Therefore, the system has no integer solutions for any prime  $p$ .

### Conclusion

This study analyzes the system of Pell equations  $x^2 - 8t^2y^2 = 1$  and  $pz^2 - t^2y^2 = -1$  Where  $p$  is a prime number and  $t, x, y, z$  are positive integers. By applying number-theoretic methods such as modular analysis and quartic residues, we have demonstrated through an in-depth analysis that this system of equations does not admit positive integer solutions. This provides a clearer understanding of the characteristics and limitations of this type of Pell equation by exploring the properties of the variables and utilizing the theory of quartic residues. The results of this study are significant for the development of new approaches in the analysis of complex Diophantine equations. Additionally, it highlights the potential applications of number theory in various contexts, which can be useful for further studies or solving other mathematical problems in the future.

### Acknowledgments

The researcher would like to express sincere gratitude to all the esteemed reviewers for their valuable advice and suggestions, which have significantly enhanced the completeness and accuracy of this research article. Additionally, I would like to extend my appreciation to the Faculty of Science and Technology at Surindra Rajabhat University for their excellent support throughout the research process.

## References

- Ai, X., Chen, J., Zhang, S., & Hu, H. (2015). Complete solutions of the simultaneous Pell equations  $x^2 - 24y^2 = 1$  and  $y^2 - pz^2 = 1$ . *Journal of Number Theory*, 147(1), 103-108.
- Bennett, M.A. (1998). On the number of solutions of simultaneous Pell equations. *Journal für die reine and angewandte Mathematik*, 498(1), 173-199.
- Chen, J.H. (2001). A note on the Diophantine equation  $a^2x^4 - By^2 = 1$ . *Acta Arithmetica*, 96(3), 205-212.
- Smith, J. (2020). Congruences and their applications in number theory. *Number Theory Review*, 22(3), 45-52.
- Tao, L. (2015). Conjectured that for the system of simultaneous Pell equations  $x^2 - 24y^2 = 1$  and  $y^2 - pz^2 = 1$ . *Pure Mathematical Sciences*, 5(1), 27-32.
- Yuan, P. (2004). Unique positive integer solutions for a class of Pell-type equations. *Number Theory*, 26(1), 33-40.
- Yunyun, Q. (2018), On simultaneous Pell equations  $x^2 - (a^2 - 1)y^2 = 1$  and  $y^2 - pz^2 = 1$ . *Journal of Number theory*, 184(1), 128-132.

การศึกษาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและสารพฤกษเคมีของขมิ้นขาว (นมขมิ้น)  
สำหรับเป็นส่วนผสมของเครื่องสำอางในการยกระดับสินค้าชุมชนบ้านระกาใต้  
อำเภอกระสัง จังหวัดบุรีรัมย์

The Antioxidant and Phytochemical of *Curcuma zedoaria* (Christm.) Roscoe  
(storageroot) into Cosmetic Ingredients to upgrading community products at  
Ra-ka-tai Village, Kra-sang District, Buriram Province

ชุลีกานต์ สายเนตร\* และ วิริญรัชญ์ สื่อออก

Chuleekant Sainate\* and Wirinratch Sue-aok

อาจารย์ประจำสาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์

Program of Chemistry, Faculty of Science, Buriram Rajabhat University

Email: Chuleekant.sn@bru.ac.th

Received : March 16, 2025

Revised : December 1, 2025

Accepted : December 2, 2025

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและชนิดของสารพฤกษเคมี ในนมขมิ้นที่นำไปทำผลิตภัณฑ์เซรั่มเปรียบเทียบกับขมิ้นอ้อย โดยกลุ่มประชากรที่ทำการศึกษาในงานวิจัยนี้ คือ เหง้าของพืชในวงศ์ *Zingiberaceae* (ขิง ข่า และขมิ้น) (*Curcuma zedoaria* (Christm.) Roscoe (storage root) ซึ่งกลุ่มตัวอย่างที่ได้ทำการคัดเลือกแบบเฉพาะเจาะจง คือ “นมขมิ้น” (หมายถึง ส่วนผสมของว่านตระกูลขิง ข่า และขมิ้น 4 ชนิด ที่นำมาทำเซรั่มนมขมิ้นประกอบด้วยว่านนางคำ ว่านมหาเมฆ ว่านเอ็นเหลือง และว่านชกมดลูก) ในขั้นแรกได้ทำการศึกษาชนิดของสารอาหารที่มีอยู่ในวัตถุดิบทั้งหมดพบว่า ทั้งขมิ้นอ้อยสดและนมขมิ้นสดมีสารอาหารกลุ่มโปรตีน ไขมัน กากใย และความชื้นต่อมาในขั้นที่สองได้ทำการสกัดสารสำคัญจากนมขมิ้น และขมิ้นอ้อยโดยใช้ตัวทำละลายเอทานอลเพียงชนิดเดียวเนื่องจากเป็นที่นิยม และปลอดภัยที่สุด ในการศึกษาชนิดของสารพฤกษเคมีพบว่า ในนมขมิ้นและขมิ้นอ้อย มีสารฟลาโวนอยด์และซาโปนิน ขั้นที่สามทำการทดสอบหาปริมาณสารฟีนอลิก พบว่า สารสกัดจากขมิ้นอ้อยมีปริมาณสารฟีนอลิกเท่ากับ 120.340 และนมขมิ้นเท่ากับ 27.920 และในขั้นตอนสุดท้ายได้ทำการศึกษาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH เทียบเท่าวิตามินซี พบว่า ค่า IC<sub>50</sub> สารสกัดขมิ้นอ้อยมีค่าเท่ากับ 50.9059 ug/mg และสารสกัดจากนมขมิ้นเท่ากับ 348.1242 ug/mg ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า ปริมาณของสารที่ออกฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของขมิ้นอ้อย และนมขมิ้นแตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ในทั้งขมิ้นอ้อยและนมขมิ้นที่ใช้ทำ

เป็นส่วนผสมของผลิตภัณฑ์ชุมชน โดยเฉพาะเซรั่มนมขมมีสารต้านอนุมูลอิสระจริง และสามารถนำมาใช้เป็นส่วนประกอบของเครื่องสำอางได้

**คำสำคัญ:** สารพฤกษเคมี ดีพีพีเอช สารต้านอนุมูลอิสระ สารประกอบฟีนอลิก บุรีรัมย์

## ABSTRACT

This study aimed to evaluate the antioxidant activity and phytochemical constituents of turmeric milk serum compared with *Curcuma zedoaria* (Christm.) Roscoe (storage root). The plant materials examined were rhizomes of *Zingiberaceae*, with purposive sampling applied to select “turmeric milk,” a mixture of four species (*Curcuma aromatica*, *Curcuma aeruginosa*, *Curcuma* sp., and *Curcuma xanthorrhiza*). Proximate analysis showed that both fresh turmeric milk and *C. zedoaria* contained proteins, fats, fiber, and moisture. Ethanolic extraction was performed using 95% ethanol as a safe and effective solvent. Phytochemical screening indicated the presence of flavonoids and saponins in both extracts. The total phenolic content was higher in *C. zedoaria* extract (120.340 mg GAE/g) than in turmeric milk extract (27.920 mg GAE/g). Antioxidant activity, measured by the DPPH assay and expressed as vitamin C equivalent, showed  $IC_{50}$  values of 50.9059  $\mu\text{g}/\text{mg}$  for *C. zedoaria* and 348.1242  $\mu\text{g}/\text{mg}$  for turmeric milk. Statistical analysis revealed a significant difference ( $p < 0.05$ ) between the two extracts. These findings confirm that both *C. zedoaria* and turmeric milk contain antioxidant compounds, highlighting their potential application as natural ingredients in community-based cosmetic formulations.

**Key Words:** Phytochemical, DPPH, Antioxidant, Phenolic compound, Buriram

## บทนำ

นมขม นมข้าว หรือ ไข่ขม คือ รากสะสมอาหารของพืช (storage root) ที่อุดมไปด้วยสารอาหารพวกแป้ง ไขมัน น้ำ และโปรตีน (Pandey et al., 2023) มีรายงานการวิจัยเกี่ยวกับนมขม นมข้าว หรือ ไข่ขมนั้นว่าถูกจัดอยู่ในตระกูลพืชวงศ์ *Zingiberaceae* (ขิง ข่า และขมิ้น) ที่มีประวัติการนำมาใช้ประโยชน์อย่างยาวนานและครอบคลุมทางด้านการแพทย์พื้นบ้านไปจนถึงการทำอาหารโดยพืชกลุ่มนี้มีมากกว่า 70 สายพันธุ์ แหล่งกำเนิดจะอยู่ในเขตแอฟริกาตะวันตก

เอเชีย และออสเตรเลีย ซึ่งได้รับการศึกษาทางด้านพฤกษเคมี ด้านเภสัชวิทยาและชนิดของสารชีวโมเลกุลที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ต้านไวรัส ต้านเชื้อแบคทีเรีย ต้านการอักเสบ ช่วยบรรเทาอาการโรคทางเดินอาหาร ลดเบาหวานและต้านมะเร็งเต้านมนอกจากนี้ยังใช้เป็นยาฆ่าแมลงสีย้อมธรรมชาติและไล่แมลงได้ (Dhiman et al., 2023)

ในประเทศไทย “ขมิ้น” หรือรากเหง้าสะสมอาหารของพืชวงศ์ *Zingiberaceae* ถูกนำมาใช้ประโยชน์อย่างหลากหลาย ทั้งในด้านอาหาร และการแพทย์พื้นบ้าน โดยนิยมรับประทานสดหรือปรุงเป็นเครื่องเทศเพื่อแต่งรสและกลิ่นในอาหารท้องถิ่น นอกจากนี้ ยังใช้เป็นยาพื้นบ้านในการบรรเทาอาการทางระบบทางเดินอาหาร เช่น ขับลม แก้อืดท้องอืด จุกเสียด และลดการอักเสบผ่านวิธีการต้มดื่มหรือบดพอกเฉพาะที่ ปัจจุบันมีการพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์สมุนไพรพร้อมดื่มเพื่อบำรุงสุขภาพ รวมทั้งถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง เช่น สบู่ มาสก์ สบู่ และยาสระผมสมุนไพร เนื่องจากมีคุณสมบัติช่วยลดกลิ่นกาย และต้านจุลชีพได้ดี อีกทั้งยังมีบทบาทในพิธีกรรมท้องถิ่น และความเชื่อด้านความเป็นสิริมงคล รวมถึงการปลูกเพื่อเป็นไม้ประดับ ในเชิงเศรษฐกิจพบว่า มีการปลูกและจำหน่ายเชิงพาณิชย์ทั้งในรูปแบบสด แห้ง ผง และสารสกัด โดยองค์ความรู้การใช้ส่วนใหญ่เน้นไปที่เหง้าและรากสะสมอาหารมากกว่าส่วนอื่น ๆ ของพืชในสกุลเดียวกัน จากความหลากหลายของการใช้ประโยชน์ดังกล่าวนี้ชี้ให้เห็นถึงศักยภาพในการพัฒนาต่อยอดเป็นผลิตภัณฑ์สมุนไพรมาตรฐาน และเครื่องสำอางธรรมชาติที่สามารถเพิ่มมูลค่าได้อย่างยั่งยืน (Boonma et al., 2023)

ในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ กลุ่มแปรรูปสมุนไพรสดที่บ้านระกาใต้ ตำบลบ้านปรือ อำเภอกะสัง จังหวัดบุรีรัมย์ ได้นำพืชตระกูลพืชขิง ข่า ขมิ้น มาประยุกต์ใช้เพื่อการผลิตเครื่องสำอางสำหรับบำรุงผิวหน้า โดยเลือกใช้รากสะสมอาหารของว่าน 4 ชนิด ได้แก่ ว่านนางคำหรือว่านนวลจันทร์ (*Curcuma aromatica* Salisb.) ว่านมหาเมฆ (*Curcuma aeruginosa* Roxb.) ว่านเอ็นเหลียง (*Curcuma* sp.) และว่านขมิ้นดอก (*Curcuma xanthorrhiza*) โดยนำมาสกัดด้วยน้ำสะอาดทำให้ได้สารสกัดที่มีลักษณะเป็นของเหลวสีขาวคล้ายน้ำมัน ซึ่งชุมชนเรียกกันว่า “นมขมิ้น” มาพัฒนาเป็นเซรั่มนมขมิ้นเพื่อใช้ภายในครัวเรือน รวมทั้งต่อยอดเป็นผลิตภัณฑ์ชุมชนที่สามารถสร้างรายได้ให้แก่สมาชิกในชุมชนได้อีกด้วย นอกจากนี้ชุมชนยังได้นำ “ขมิ้นอ้อย” ซึ่งเป็นสมุนไพรพื้นท้องถิ่นมาพัฒนาเป็นส่วนผสมของผลิตภัณฑ์เครื่องสำอางในรูปแบบผงขัดหน้า และผงขัดผิว เพื่อเพิ่มทางเลือกในการใช้ประโยชน์จากพืชสมุนไพรในท้องถิ่นเพิ่มเติม

จากการสนทนา และการเก็บข้อมูลภาคสนาม พบว่า กลุ่มแปรรูปสมุนไพรสดที่บ้านระกาใต้ มีความสนใจที่จะศึกษาข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับสารสำคัญในนมขมิ้นและขมิ้นอ้อย เนื่องจากมีรายงานการวิจัยระบุว่าสารดังกล่าวมีคุณสมบัติในการลดการเกิดสิวและผดผื่นบนใบหน้าได้จริง โดยกลุ่มสารที่ออกฤทธิ์หลัก คือ กลุ่มสารต้านอนุมูลอิสระ (Na Nongkhai et al., 2024) ซึ่งเป็นจุดเด่นที่สามารถนำไปใช้เป็นฐานข้อมูลในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ของชุมชนที่ได้รับการรองรับจากงานวิจัยและสามารถส่งเสริมการขายและจัดจำหน่ายเชิงพาณิชย์ต่อไปในอนาคตได้

ด้วยเหตุนี้ทางคณะผู้วิจัย จึงได้ทำการศึกษาค้นคว้าข้อมูลเพื่อส่งเสริมและสนับสนุนการปัญหาดังกล่าวโดยใช้กระบวนการและนวัตกรรมทางด้านเคมี เพื่อยกระดับผลิตภัณฑ์เซรั่มนมขมิ้น และขมิ้นอ้อยให้กับกลุ่มแปรรูปสมุนไพรสตรีบ้านระกาใต้ ตำบลบ้านปรือ อำเภอกระสัง จังหวัดบุรีรัมย์

### วัตถุประสงค์การวิจัย

เพื่อศึกษาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและชนิดของสารพฤกษเคมีในนมขมิ้น (วุ้นผสม 4 ชนิด)

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Geetha et al. (2020) ได้ทดสอบฤทธิ์ต้านจุลชีพของสารสกัดจาก *Curcuma zedoaria* และ *Curcuma aromatica* ต่อเชื้อ *Cutibacterium acnes* ซึ่งเป็นเชื้อที่เกี่ยวข้องกับการเกิดสิว รวมถึงเชื้อแกรมบวกชนิดอื่น ๆ ผลการศึกษาพบว่า มีศักยภาพในการยับยั้งการเจริญของเชื้อดังกล่าว ได้อย่างชัดเจน จึงเป็นหลักฐานสนับสนุนการใช้เหง้าของพืช *Zingiberaceae* เหล่านี้เป็นวัตถุดิบสำคัญสำหรับการพัฒนาเครื่องสำอางหรือผลิตภัณฑ์ด้านผิวในอนาคต

Ivanović et al. (2020) ศึกษาส่วนประกอบทางเคมีและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของพืชวงศ์ *Zingiberaceae* 4 ชนิด (กระวาน ขมิ้นชัน ขิง และกะลามัง) โดยเปรียบเทียบ “สารสกัดหยาบ” ที่สกัดด้วย 80% เอทานอล 80% เมทานอล และน้ำ (ด้วย UAE) พบว่า โดยรวม 80% เอทานอลให้ศักยภาพด้านชีวภาพสูงที่สุด ทั้งด้านปริมาณสารฟีนอลรวมและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ (ABTS FRAP) เมื่อเทียบกับตัวทำละลายอื่น จึงชี้ว่า เอทานอลเป็นตัวทำละลายที่เหมาะสมสำหรับดึงสารออกฤทธิ์จากพืชกลุ่มนี้ โดยยังคำนึงถึงความปลอดภัยต่อการใช้งานในอาหารและเครื่องสำอางได้ด้วย

Rahmat et al. (2021) ได้ทบทวนองค์ความรู้เกี่ยวกับ *Curcuma xanthorrhiza* หรือขมิ้นขาว โดยนำเสนอข้อมูลด้านชาติพันธุ์พฤกษศาสตร์ องค์ประกอบสารสำคัญ เช่น xanthorrhizol และ curcuminoids ตลอดจนรายงานฤทธิ์ทางเภสัชวิทยาที่หลากหลาย ได้แก่ ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ต้านการอักเสบ และต้านจุลชีพ ผลการศึกษาสนับสนุนว่า การใช้เหง้าสะสมอาหารของพืชในวงศ์ *Zingiberaceae* มีศักยภาพสูงในการพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์สุขภาพและเครื่องสำอางที่เกี่ยวข้องกับการดูแลผิวพรรณและการป้องกันการอักเสบ

Hussain et al. (2022) ได้ศึกษาคุณสมบัติของ “เคอร์คูมิน” ซึ่งเป็นสารออกฤทธิ์หลักที่พบมากในเหง้าของพืชสกุล *Curcuma* โดยเฉพาะ *Curcuma longa* รายงานสรุปว่า มีฤทธิ์ต้านจุลชีพที่สำคัญต่อเชื้อก่อโรคผิวหนังหลายชนิด รวมทั้งเชื้อที่เกี่ยวข้องกับการเกิดสิว พร้อมทั้งกล่าวถึง ความปลอดภัยของการประยุกต์ใช้สารสกัดเฉพาะที่ ข้อมูลดังกล่าวชี้ให้เห็นถึงศักยภาพของเคอร์คูมินในการนำไปพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์เวชสำอางสำหรับควบคุมสิวและการติดเชื้อบนผิวหนัง

Manasa et al. (2023) ได้ศึกษาเทคนิคสกัดเคอร์คูมินจาก *Curcuma longa* และศึกษาปัจจัยด้านตัวทำละลาย พบหลักฐานจากหลายการทดลองสอดคล้องกันว่า เอทานอลเป็น ตัวทำละลาย

**อินทรีย์ที่ “นิยมและให้ผลดีที่สุด”** สำหรับการสกัดเคอร์คูมิน ทั้งในแง่ผลผลิตร้อยละและประสิทธิภาพของส่วนผสม

Putri et al. (2023) ได้พัฒนาต้นแบบผลิตภัณฑ์เครื่องสำอางในรูปแบบผงแป้งฝุ่นต้านผิวจากสารสกัดเหง้า *Curcuma* โดยใช้เอทานอลเป็นตัวสกัด และทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ ผลการทดลองพบว่า แป้งฝุ่นที่ได้มีคุณสมบัติเหมาะสมสำหรับใช้เป็นผลิตภัณฑ์เครื่องสำอาง และมีการเสริมด้วยสารประกอบเช่นสังกะสีออกไซด์ (ZnO) เพื่อเพิ่มฤทธิ์ต้านจุลชีพ งานวิจัยนี้ จึงเป็นตัวอย่างการนำองค์ความรู้ด้านสมุนไพรและเหง้าพืช *Zingiberaceae* มาพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ที่ตอบสนองต่อความต้องการด้านความงามและสุขภาพผิว

Crusca et al. (2025) ได้ทำการศึกษาทางคลินิกแบบสุ่ม โดยใช้เจลที่มีสารออกฤทธิ์จาก *Curcuma longa* ร่วมกับการฉายแสง LED สีฟ้าเพื่อรักษาสิว ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า สามารถลดรอยโรคสิวอักเสบได้อย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุม อีกทั้งไม่พบอาการข้างเคียงที่รุนแรง การศึกษานี้สะท้อนให้เห็นว่าเหง้าขมิ้นเมื่อนำมาพัฒนาเป็นสูตรร่วมกับเทคโนโลยีสมัยใหม่ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการดูแลผิวหนัง และมีความเป็นไปได้ที่จะต่อยอดเชิงพาณิชย์

Siramon et al. (2021) ได้ทำการสกัดแยกสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพจากเหง้าว่านนางคำและวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างสารสกัดหยาบโดยเทคนิคลิควิดโครมาโทกราฟี แมสส์สเปกโตรเมตรีจากผลการวิเคราะห์พบองค์ประกอบทางเคมีจำนวน 5 ชนิด แบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ (1) กลุ่มเคอร์คูมินอยด์ : Bisdemethoxycurcumin Demethoxycurcumin Curcumin และ (2) กลุ่มองค์ประกอบระเหยได้ Furanodienone และ Turmerone

## วิธีการดำเนินการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้ได้ทำการสกัดสารสำคัญจากขมิ้นอ้อยและนมขมิ้น โดยเลือกใช้เอทานอลเป็นตัวทำละลายเพียงชนิดเดียวร่วมกับวิธีการสกัดแบบแช่ (maceration extraction) ทั้งนี้เนื่องจากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องพบว่า เอทานอลเป็นตัวทำละลายที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการสกัดสารออกฤทธิ์จากพืชสมุนไพรที่มีความปลอดภัยต่อผู้ผลิตและผู้บริโภค รวมถึงเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม อีกทั้งยังสามารถประยุกต์ใช้ได้จริงในระดับชุมชนจึงสอดคล้องกับแนวทางการพัฒนาผลิตภัณฑ์สมุนไพรที่เน้นทั้งประสิทธิภาพและความยั่งยืน

### ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

ประชากร คือ พืชในตระกูล *Zingiberaceae*

กลุ่มตัวอย่าง คือ ขมิ้นอ้อยและนมขมิ้น (ว่านผสม 4 ชนิด)

## การวิเคราะห์สารอาหาร

ในขั้นตอนนี้ได้ทำการวิเคราะห์สารอาหารสำคัญ เช่น โปรตีน ไขมัน วิเคราะห์กากใยและความชื้น โปรตีนวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนด้วยวิธี kjeldahl by Foss / Kjelttec 8400 ไขมันวิเคราะห์ด้วยวิธี extraction of fat in soya beans, ASN\_3136 by Foss / 2050 กากใย วิเคราะห์ด้วยวิธี AOAC Official Methods of Analysis 21<sup>th</sup> ed., 2019, method 978.10 by Gerharat FT12 และความชื้น วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Thermogravimetric Analyzer ยี่ห้อ; LECO, รุ่น; TGA-701

## การสกัดสารสำคัญ

### 1. การเตรียมตัวอย่าง (Sue-aok W. et al., 2023)

เหง้าขมิ้นอ้อยสดจำนวน 1 กิโลกรัม และนมขมิ้นสดจำนวน 1 กิโลกรัม ถูกนำมาล้างทำความสะอาดด้วยน้ำสะอาด และตากในที่ร่มจนแห้งสนิท สำหรับนมขมิ้นสด 1 กิโลกรัม ประกอบด้วย ร่วสนุนไพร 4 ชนิด ได้แก่ ร่วนางคำ (*Curcuma aromatica*) ร่วมหาเมฆ (*Curcuma aeruginosa*) ร่วเอ็นเหลียง (*Curcuma sp.*) และร่วข้มตลูก (*Curcuma xanthorrhiza*) โดยผสมในอัตราส่วน 1:1:1:1 หลังจากการตากแห้ง พบว่า น้ำหนักแห้งของขมิ้นอ้อยเท่ากับ 117.7000 กรัม และนมขมิ้นเท่ากับ 98.4700 กรัม



ภาพประกอบ 1 ลักษณะของขมิ้นอ้อยตากแห้ง (a) และลักษณะของนมขมิ้นตากแห้ง (b)

### 2. การสกัดสารสำคัญ

ตัวอย่างที่แห้งแล้วถูกห่อด้วยผ้าขาวบาง และนำไปแช่ในเอทานอล 95% ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 3 วัน หลังจากนั้นทำการกรองเพื่อแยกกากออก และนำกากที่เหลือมาสกัดซ้ำด้วยวิธีเดียวกัน เพื่อให้ได้สารสกัดอย่างครบถ้วน

### 3. การระเหยตัวทำละลาย

สารละลายที่ได้จากการสกัด ถูกนำไประเหยตัวทำละลายเอทานอลออกโดยใช้เครื่องระเหยแบบลดความดัน (rotary evaporator) เพื่อให้ได้สารสกัดหยาบเอทานอล (crude ethanol extract) ของเหง้ามันอ้อยและนมขมิ้น ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์ทางเคมีหรือการพัฒนาผลิตภัณฑ์สมุนไพรต่อไป

**การวิเคราะห์ชนิดของสารพฤกษเคมีเบื้องต้น** (Buachoon et al., 2022)

#### การทดสอบไกลโคไซด์

นำสารสกัดหยาบเอทานอล 4 มิลลิลิตร ถูกทำให้แห้งจนมีปริมาตร 2 มิลลิลิตร เติมแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ 1 มิลลิลิตร เขย่า เกิดสารสีแดง บ่งบอกถึงการพบสารไกลโคไซด์

#### การทดสอบแทนนิน

นำสารสกัดหยาบเอทานอลผสมกับสารละลาย 2% ของ  $\text{FeCl}_3$  2 มิลลิลิตร เกิดสีน้ำเงิน - เขียวหรือน้ำเงิน - ดำบ่งบอกถึงการพบสารโพลีฟีนอลและแทนนิน

#### การทดสอบฟลาโวนอยด์

นำสารสกัดหยาบเอทานอลผสมกับสารละลาย  $\text{NaOH}$  เข้มข้น 0.1 M ปริมาตร 2 มิลลิลิตร ถ้าปรากฏสีส้มเหลืองบ่งบอกถึงการมีอยู่ของฟลาโวนอยด์

#### การทดสอบซาโปนิน

สารสกัดหยาบเอทานอลผสมกับน้ำกลั่น 5 มิลลิลิตร ในหลอดทดลอง และเขย่าอย่างแรงนาน 30 วินาที การก่อตัวของโฟมคงตัวนาน 30 นาที บ่งบอกถึงการพบซาโปนิน

**การวิเคราะห์ปริมาณสารฟีนอลิกรวม** (Sue-aok et al., 2023)

การเตรียมสารละลายมาตรฐานกรดแกลลิกที่ความเข้มข้น 10 20 40 60 80 และ 100 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร เตรียมสารสกัดหยาบเอทานอล ที่ความเข้มข้น 200 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร สารละลาย Folin-Ciocalteu ที่ความเข้มข้น 10 % (v/v) และสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต ที่ความเข้มข้น 75 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร ผสมสารละลายกรดแกลลิกหรือสารตัวอย่าง ปริมาตร 1 มิลลิลิตร และสาร Folin-Ciocalteu ปริมาตร 5 มิลลิลิตร นำไปเก็บไว้ในที่มืด นาน 3 นาทีที่อุณหภูมิห้อง เติมน้ำกลั่นโซเดียมคาร์บอเนต ปริมาตร 4 มิลลิลิตร แล้วเก็บไว้ในที่มืด นาน 30 นาที นำไปวัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 756 นาโนเมตร นำค่าการดูดกลืนแสงมาหาค่าเฉลี่ย และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เพื่อนำไปคำนวณหาปริมาณสารประกอบฟีนอลิก จากกราฟมาตรฐานโดยรายงานผลในหน่วยมิลลิกรัมสมมูลของกรดแกลลิกต่อสารสกัดหยาบ 1 กรัม (mg GAE/g of extract)

**การวิเคราะห์ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH (DPPH radical scavenging assay)** (Sue-aok et al., 2023)

การเตรียมสารละลายสารสกัดหยาบและสารมาตรฐานวิตามินซี ที่ความเข้มข้น สารสกัดหยาบ ไขมันอ้อย 10 25 50 และ 100 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร สารสกัดหยาบนมขมิ้น 50 100 250 และ 500 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร สารมาตรฐานวิตามินซี 1 2 3 และ 15 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร ใช้สารสกัดหยาบและสารมาตรฐาน ปริมาตร 5 มิลลิลิตร เติมสารละลาย DPPH 0.2 มิลลิโมลาร์ (mM) ปริมาตร 1.25 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน ตั้งไว้ในที่มืดเป็นเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิห้อง นำสารละลายมาวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์แบบยูวี-วิสิเบิล (UV-Visible spectrophotometer) ที่ความยาวคลื่น 517 นาโนเมตร คำนวณค่าเปอร์เซ็นต์การยับยั้ง (%Inhibition) จากสมการ

$$\% \text{ Inhibition} = \left[ 1 - \frac{A_{\text{sample}}}{A_{\text{control}}} \right] \times 100$$

$A_{\text{sample}}$  คือ ค่าการดูดกลืนแสงของสารตัวอย่าง

$A_{\text{control}}$  คือ ค่าการดูดกลืนแสงของชุดควบคุม (ใช้เอทานอลแทนสารตัวอย่าง)

การสร้างกราฟมาตรฐานของสารสกัดหยาบไขมันอ้อย สารสกัดหยาบนมขมิ้น และสารมาตรฐานวิตามินซี ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารกับ %Inhibition เพื่อหาค่า  $IC_{50}$  ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงความเข้มข้นของสารที่ออกฤทธิ์ยับยั้งอนุมูลอิสระได้ 50%

### ผลการวิจัย

ผลการทดลองการวิเคราะห์สารอาหาร การสกัดสารสำคัญด้วยตัวทำละลายเอทานอล การวิเคราะห์ชนิดของสารพฤษเคมีเบื้องต้น การหาปริมาณสารฟีนอลิกรวม และการศึกษาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH ได้แสดงผลการทดสอบตามรายงานดังต่อไปนี้

#### ผลการวิเคราะห์สารอาหาร

สารอาหารส่งผลต่อประสิทธิภาพเครื่องสำอางที่ใช้ในการบำรุงผิว ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงได้นำตัวอย่าง 2 ชนิด คือ ไขมันอ้อยและนมขมิ้นดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สารอาหารที่พบในไขมันอ้อยและนมขม

| ชนิดของสารอาหาร | ไขมันอ้อย | นมขม |
|-----------------|-----------|------|
| โปรตีน          | พบ        | พบ   |
| ไขมัน           | พบ        | พบ   |
| กากใย           | พบ        | พบ   |
| ความชื้น        | พบ        | พบ   |

จากตารางที่ 1 พบว่า ไขมันอ้อยและนมขมที่ใช้ทำผลิตภัณฑ์นั้นมีสารอาหารโปรตีน ไขมัน กากใยและความชื้นอยู่ปนอยู่ จึงสรุปได้ในเบื้องต้นว่า ในเนื้อไขมันอ้อยและนมขมมีสารอาหารที่ จำเป็นต่อการเจริญเติบโตและช่วยบำรุงส่วนที่สึกหรอของร่างกายได้ (Duangjit et al., 2020) แต่ สิ่งบ่งชี้ว่าผลิตภัณฑ์นมขมเป็นสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่มีผลต่อการบำรุงผิวหนังนั้นมีความ จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องตรวจสอบด้วยวิธี DPPH ซึ่งจะได้ทำการศึกษาในลำดับถัดไป

#### ผลการสกัดสารสำคัญจากพืชตัวอย่าง

การสกัดสารสำคัญจากเหง้าของไขมันอ้อย และนมขมมาทำการสกัดด้วยวิธีการหมักแช่ เอทานอล 95% ที่อุณหภูมิห้อง นาน 3 วัน จึงระเหยตัวทำละลายด้วยเครื่องระเหยลดความดัน (rotary evaporator) จะได้สารสกัดพืช (crude ethanol extract) ซึ่งมีลักษณะและร้อยละสารสกัด แสดงดัง ตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการสกัดสารสำคัญจากพืชตัวอย่าง

| พืช<br>ตัวอย่าง | ปริมาตร<br>เอทานอล<br>(ml) | ลักษณะ<br>สารสกัด               | น้ำหนักพืช<br>แห้งที่ใช้<br>(g) | น้ำหนัก<br>สารสกัด<br>(g) | ร้อยละ<br>สารสกัดต่อน้ำหนัก<br>พืชแห้ง |
|-----------------|----------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------|----------------------------------------|
| ไขมันอ้อย       | 1,400                      | สารสกัดเหนียว<br>มีสีน้ำตาลเข้ม | 117.7000                        | 18.4495                   | 15.6750                                |
| นมขม            | 900                        | สารสกัดเหนียว<br>มีสีน้ำตาลอ่อน | 98.4700                         | 4.0725                    | 4.1358                                 |

จากผลการสกัดสารสำคัญของไขมันอ้อยและนมขมพบว่า เอทานอลสามารถสกัดสารออกฤทธิ์ จากพืชทั้งสองชนิดได้ อย่างไรก็ตาม ปริมาณสารสกัดที่ได้จากไขมันอ้อยมีค่าสูงกว่าสารสกัดจากนมขม อย่างชัดเจน เมื่อพิจารณาข้อมูลจากตารางที่ 2 พบว่า น้ำหนักสารสกัดที่ได้จากไขมันอ้อยมากกว่า อาจเนื่องมาจากไขมันอ้อยมีความเข้มข้นของสารสำคัญ (active compounds) สูงกว่า ในขณะที่นม

ขมิ้นซึ่งเป็นการผสมผสานหลายชนิด อาจทำให้สัดส่วนสารออกฤทธิ์เฉพาะนั้นเจือจางลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพการละลายในตัวทำละลายเอทานอลลดลง ข้อสังเกตนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Rahmat et al. (2021) ที่รายงานว่าขมิ้นอ้อย (*Curcuma zedoaria*) มีสารสำคัญในกลุ่ม **sesquiterpenes** และ **curcuminoids** ในปริมาณสูง ซึ่งเป็นกลุ่มสารที่ละลายได้ดีในเอทานอล จึงทำให้ได้ผลผลิตสารสกัดมากกว่า

### ผลการวิเคราะห์ชนิดของสารพฤษเคมีเบื้องต้น

ในขั้นตอนนี้ได้ทดสอบชนิดของสารพฤษเคมีเบื้องต้นจำนวนทั้งสิ้น 4 ชนิด คือ ไกลโคไซด์ แทนนิน ฟลาโวนอยด์ และซาโปนิน ของสารสกัดจากขมิ้นอ้อยและสารสกัดนมขมิ้น ให้ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ชนิดของสารพฤษเคมีเบื้องต้นที่พบในสารสกัดนมขมิ้น

| ชนิดของสารอาหาร | ขมิ้นอ้อย | นมขมิ้น |
|-----------------|-----------|---------|
| ไกลโคไซด์       | ไม่พบ     | ไม่พบ   |
| แทนนิน          | ไม่พบ     | ไม่พบ   |
| ฟลาโวนอยด์      | พบ        | พบ      |
| ซาโปนิน         | พบ        | พบ      |

จากตารางที่ 3 จึงสามารถสรุปได้ว่า ชนิดของสารพฤษเคมีที่พบในสารสกัดจากขมิ้นอ้อย นมขมิ้นมีสารฟลาโวนอยด์ และซาโปนินสอดคล้องกับงานวิจัยของ Destryana et al. (2024) ได้กล่าวว่า ในพืชตระกูล *Zingiberaceae* มีฟลาโวนอยด์อยู่

### ผลการวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิก

กราฟมาตรฐานที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ามิลลิกรัมของกรดแกลลิก (mg of gallic acid) เพื่อใช้สำหรับในการวิเคราะห์หาปริมาณของสารฟีนอลิกรวมของสารสกัดขมิ้นอ้อยและนมขมิ้น จากนั้นเมื่อนำสารสกัดขมิ้นอ้อยและสารสกัดจากนมขมิ้น ที่ได้ทำการเตรียมแล้วมาวัดค่าการดูดกลืนแสง พบว่า สารสกัดจากขมิ้นอ้อยมีค่าการดูดกลืนแสงเทียบเท่ากรดแกลลิกในระดับที่เท่ากับ 0.06017 มิลลิกรัมของกรดแกลลิกและสารสกัดนมขมิ้นมีค่าการดูดกลืนแสงเทียบเท่ากรดแกลลิก ในระดับที่เท่ากับ 0.01396 มิลลิกรัมของกรดแกลลิก ตามลำดับ แสดงผลการทดลองดังตารางที่ 4

**ตารางที่ 4** ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 765 นาโนเมตรเทียบเท่าปริมาณกรดแกลลิก

| สารสกัดพืช | ความเข้มข้น<br>(ไมโครกรัม/มิลลิลิตร) | ค่าการดูดกลืนแสง    | ปริมาณกรดแกลลิก |
|------------|--------------------------------------|---------------------|-----------------|
| ไขมันอ่อน  | 200                                  | $0.6323 \pm 0.0057$ | 0.06017         |
| นมไขมัน    | 200                                  | $0.1621 \pm 0.0046$ | 0.01396         |

จากนั้นเมื่อนำค่าการดูดกลืนแสงของสารสกัดทั้ง 2 ชนิดมาคำนวณเพื่อปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวมทั้งหมดจากสมการในกราฟมาตรฐานพบว่า ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกในสารสกัดจากไขมันอ่อนเท่ากับ 120.340 mg GAE /g of extract และนมไขมันเท่ากับ 27.9200 mg GAE /g of extract ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 5

**ตารางที่ 5** ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกในสารสกัดไขมันอ่อนและสารสกัดนมไขมัน

| สารสกัดพืชตัวอย่าง | ปริมาณสารประกอบฟีนอลิก<br>(mg GAE /g of extract) |
|--------------------|--------------------------------------------------|
| ไขมันอ่อน          | 120.340                                          |
| นมไขมัน            | 27.9200                                          |

#### ผลการทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระโดยวิธี DPPH

ในขั้นตอนนี้ ได้ทำการวิเคราะห์สารที่ออกฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดจากไขมันอ่อน และสารนมไขมัน โดยนำมาทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH พบว่า สารมาตรฐานวิตามินซีให้ค่า  $IC_{50}$  สูงที่สุด เท่ากับ 7.6186 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร รองลงมาคือสารสกัดจากไขมันอ่อนให้ค่า  $IC_{50}$  เท่ากับ 50.9059 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร และสารสกัดจากนมไขมัน ให้ค่า  $IC_{50}$  เท่ากับ 348.1242 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร แสดงผลดังตารางที่ 6

**ตารางที่ 6** ค่า  $IC_{50}$  ของสารมาตรฐานวิตามินซี สารสกัดไขมันอ่อน และสารสกัดว่านผสม 4 ชนิด

| สารตัวอย่าง         | $IC_{50}$ (ไมโครกรัม/มิลลิลิตร) |
|---------------------|---------------------------------|
| สารมาตรฐานวิตามินซี | 7.6186                          |
| สารสกัดไขมันอ่อน    | 50.9059                         |
| สารสกัดจากนมไขมัน   | 348.1242                        |

จากตารางที่ 9 แสดงให้เห็นว่า สารสกัดขมิ้นอ้อยและสารสกัดนมขมิ้นมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระจริง แต่อย่างไรก็ตามสารสกัดทั้งสองชนิดนั้น ยังมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระน้อยกว่าสารมาตรฐานวิตามินซี เนื่องจากสารมาตรฐานวิตามินซีเป็นสารบริสุทธิ์ที่ไม่มีสารเจือปน

### อภิปรายผลการวิจัย

ขมิ้นอ้อยสดและนมขมิ้นสดนั้นมีสารอาหารกลุ่มโปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรตและวิตามิน แต่เมื่อนำนมขมิ้นมาทำการสกัดด้วยน้ำสะอาดและต้มด้วยความร้อน เพื่อให้อยู่ในรูปของเชอร์รุ่มนมขมิ้นนั้นจะพบเพียงสารอาหารกลุ่มโปรตีนและวิตามินจึงเป็นสาเหตุที่ทำให้ไขมันและคาร์โบไฮเดรตเกิดการสูญเสียได้ ส่วนการสกัด โดยใช้ตัวทำละลายเอทานอล เพื่อศึกษาชนิดของสารฟีนอลิกที่สำคัญในขมิ้นอ้อยและนมขมิ้นพบว่า มีสารฟลาโวนอยด์และซาโปนิน ต่อมาทำการทดสอบเพื่อศึกษาปริมาณสารฟีนอลิก รวมทั้งหมดและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระจากสารสกัดจากขมิ้นอ้อยและสารสกัดนมขมิ้น พบว่า สารสกัดจากขมิ้นอ้อย มีปริมาณสารฟีนอลิกรวมทั้งหมดเท่ากับ 120.340 และสารสกัดนมขมิ้นมีปริมาณสารฟีนอลิกรวมทั้งหมดเท่ากับ 27.9200 และการศึกษาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH เทียบกับวิตามินซี พบว่า ค่า  $IC_{50}$  ของวิตามินซีมีค่าเท่ากับ 7.6186  $\mu\text{g}/\text{mg}$  สารสกัดขมิ้นอ้อยมีค่าเท่ากับ 50.9059  $\mu\text{g}/\text{mg}$  และสารสกัดนมขมิ้นเท่ากับ 348.1242  $\mu\text{g}/\text{mg}$  โดยฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดจากขมิ้นอ้อยและสารสกัดนมขมิ้นมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 จึงสามารถสรุปได้ว่าทั้งขมิ้นอ้อยและนมขมิ้นที่ใช้ทำเป็นส่วนผสมของผลิตภัณฑ์ชุมชน โดยเฉพาะเชอร์รุ่มนมขมิ้นมีสารต้านอนุมูลอิสระจริงและสามารถนำมาใช้เป็นส่วนประกอบของเครื่องสำอางได้ ในอนาคตสำหรับการวิจัยเรื่องนี้ จะดำเนินการขยายผลงานวิจัยโดยการเปรียบเทียบตัวทำละลาย และเทคนิคสกัดที่หลากหลาย พร้อมทั้งวิเคราะห์ชนิด และปริมาณสารสำคัญด้วยเครื่องมือที่ทันสมัยมากขึ้นควบคู่กับการทดสอบฤทธิ์ทางชีวภาพ และความปลอดภัย เพื่อยืนยันศักยภาพของสารสกัดในการพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์เครื่องสำอางหรือสมุนไพรสุขภาพ ทั้งยังควรพิจารณาด้านเศรษฐกิจและการต่อยอดเชิงพาณิชย์ เพื่อสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับชุมชนอย่างยั่งยืน

### เอกสารอ้างอิง

- Boonma, T., Saensouk, S., & Saensouk, P. (2023). Diversity and traditional utilization of the Zingiberaceae plants in Nakhon Nayok Province, Central Thailand. *Diversity*, 15(8), 904. <https://doi.org/10.3390/d15080904>.
- Buachoon, N. (2022). Phytochemical screening and antioxidant activity of fresh and dried

- Nasturtium officinal plants. *EAU Heritage Journal Science and Technology*, 14(1), 144–154.
- Crusca, J.d.S., de Moraes, L.H.O., Figueira, T.G., Parizotto, N.A., & Rodrigues, G.J. (2025). Photodynamic therapy effects with Curcuma longa L. active ingredients in gel and blue LED on acne: A randomized, controlled, and double-blind clinical study. *Photonics*, 12(1), 80. <https://doi.org/10.3390/photonics12010080>.
- Destryana, R., Estiasih, T., & D., S. (2024). Zingiberaceae rhizome essential oil: A review of chemical composition, biological activity, and application in food industry. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1299, 012010.
- Dhiman, A., Sharma, M., & Sharma, M. (2023). Ethnopharmacological profile of Curcuma aromatica Salisb. *Journal of Mountain Research*, 18(1), 267–279.
- Duangjit, S., Suwannarat, K., Kittiphinitnunta, K., Ongwisut, P., Bumrunghai, S., Ngawhirunpat, T., Charoenputtakun, P., & Sila-On, W. (2020). Role of natural antioxidants for topical applications: Properties, efficacy, safety and novel delivery systems. *International Journal of Pharmaceutical Sciences*, 15(1), 21–48.
- Geetha, S., Ghandi, K., & Lalita, M. (2020). Antibacterial effects of Curcuma species and Vigna radiata against MRSA, MRSE, and Propionibacterium acnes. *INTI Journal*, 2020(39), 1–10.
- Hussain, Y., et al. (2022). Antimicrobial potential of curcumin: Therapeutic applications. *Molecules*, 27(21), 7235. <https://doi.org/10.3390/molecules27217235>.
- Ivanović, M., Alimpić Aradski, A., Dimitrijević, M., Stanković, J., & Stanković, M. (2021). Comparative study of chemical composition and antioxidant activity of essential oils and crude extracts of four characteristic Zingiberaceae herbs. *Plants*, 10(3), 501. <https://doi.org/10.3390/plants10030501>.
- Manasa, P.S.L., Priyanka, A.S., & Godavarthi, A. (2023). Various extraction techniques of curcumin—A comprehensive review. *ACS Omega*, 8(40), 36764–36783. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c04205>.
- Na Nongkhai, T., Sang-Oon, P., Duangjai, A., Limsuwan, S., Theansungnoen, T., & Maddocks, S. E. (2024). In vitro cytotoxicity and antimicrobial activity against acne-causing bacteria and phytochemical analysis of galangal (*Alpinia galanga*) and bitter ginger (*Zingiber zerumbet*) extracts. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(20), 10869. <https://doi.org/10.3390/ijms252010869>
- Pandey, A., Pandey, S.T., Yadav, A., Tiwari, S.K., & Srivastava, N. (2023). A review on family

- Zingiberaceae. *International Journal of Medical and Pharmaceutical Research*, 4(3), 354–360.
- Putri, D. A., Alfarisi, N. L., Syukri, M., & Sari, D. P. (2023). Physical evaluation of *Curcuma* rhizome extract anti-acne loose powder. [Conference/Technical paper]. Retrieved from <https://scispace.com/pdf/physical-evaluation-of-curcuma-rhizome-extract-curcuma-sg1tuvqt.pdf>
- Rahmat, E., Lee, J., & Kang, Y. (2021). Javanese turmeric (*Curcuma xanthorrhiza* Roxb.): Ethnobotany, phytochemistry, biotechnology, and pharmacological activities. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2021, Article 9960813. <https://doi.org/10.1155/2021/9960813>.
- Siramon, P., & Waeonukul, R. (2021). Chemical composition and antibacterial activities of rhizome extract from *Curcuma aromatica* Salisb. *YRU Journal of Science and Technology*, 6(2), 118–125.
- Sue-aok, W., & Jankana, S. (2023). Antioxidant and antimicrobial activities of *Vitex scabra* and *Syzygium gratum*. *European Chemical Bulletin*, 12(4), 3044–3052.

การพัฒนาระบบจองใบอนุญาตการประชุมออนไลน์แบบอัจฉริยะ : นวัตกรรมเทคโนโลยี  
สารสนเทศเพื่อประหยัดงบประมาณและเพิ่มประสิทธิภาพองค์กร  
Development of Smart Online Meeting License Booking System : IT Innovation  
for Cost Reduction and Enhanced Organizational Performance

นโรดม กิตติเดชาณุภาพ<sup>1\*</sup>, อาทิตย์ ดือราโซ<sup>2</sup> และ ภุริทรัพย์ เดชพิพัฒน์ประชา<sup>3</sup>  
Narodom Kittidachanuphap<sup>1\*</sup>, Arthit Dueraso<sup>2</sup>, and Bhurisub Dejpipatpracha<sup>3</sup>

คณะวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา<sup>1</sup>

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

สำนักวิทยบริการและเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา<sup>2</sup>

Office of Academic Services and Information Technology, Yala Rajabhat University<sup>2</sup>

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏภูเก็ต<sup>3</sup>

Faculty of Science and Technology, Phuket Rajabhat University<sup>3</sup>

Email: narodom.k@yru.ac.th

Received : July 31, 2025

Revised : October 6, 2025

Accepted : December 1, 2025

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) พัฒนาระบบจองใบอนุญาตการประชุมออนไลน์แบบรวมศูนย์ที่มีประสิทธิภาพและบุคลากรภายในมหาวิทยาลัยสามารถใช้งานได้อย่างเท่าเทียม 2) เพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานใบอนุญาตการประชุมออนไลน์ให้เกิดประโยชน์สูงสุด และ 3) ลดต้นทุนการจัดซื้อใบอนุญาตการประชุมออนไลน์ของมหาวิทยาลัย

การดำเนินการวิจัยใช้ประชากรและกลุ่มตัวอย่างจากบุคลากรมหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา จำนวน 832 คน แบ่งเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มตัวอย่างสำหรับการพัฒนาระบบ คัดเลือกแบบเจาะจง จำนวน 50 ราย ประกอบด้วย อาจารย์ 25 ราย เจ้าหน้าที่สายสนับสนุน 15 ราย และบุคลากรสายบริหาร 10 ราย และกลุ่มตัวอย่างสำหรับการประเมินความพึงพอใจ จำนวน 256 ราย ประกอบด้วย อาจารย์ เจ้าหน้าที่และนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา เครื่องมือในการวิจัย ได้แก่ ระบบที่พัฒนาดำรงวงจรการพัฒนาซอฟต์แวร์ (Software Development Life Cycle : SDLC) โดยใช้สถาปัตยกรรมเรสตฟูลเอพีไอ (RESTful API) ประกอบด้วยแบ็กเอนด์ที่พัฒนาด้วยลาราวเอล (Laravel) และฟรอนต์เอนด์ที่พัฒนาด้วยนัคซ์ (Nuxt) เชื่อมต่อกับส่วนต่อประสานโปรแกรมประยุกต์ของแพลตฟอร์ม การประชุมออนไลน์สำหรับการจัดการ

ใบอนุญาตอัตโนมัติ แบบสอบถามความพึงพอใจ 5 ระดับ และเครื่องมือทดสอบประสิทธิภาพ อพาเช่ เจเมเตอร์ (Apache JMeter) สถิติที่ใช้ในการวิจัย ได้แก่ สถิติเชิงพรรณนา (Descriptive Statistics) การวิเคราะห์เนื้อหา (Content Analysis) และการวิเคราะห์ข้อมูล แบบผสมผสาน (Mixed-Method Analysis)

ผลการวิจัยพบว่า 1) ระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถจัดการใบอนุญาตแบบรวมศูนย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยลดเวลาการจองจาก 30 นาทีเหลือ 3 นาที (ลดลงร้อยละ 90) และลดขั้นตอนการจองจาก 10 ขั้นตอนเหลือ 4 ขั้นตอน ระบบรองรับผู้ใช้งานพร้อมกัน 500 ราย ด้วยเวลาตอบสนองเฉลี่ย 1.2 วินาที มีความพร้อมใช้งานร้อยละ 99.8 และผู้ใช้งานสามารถเข้าถึงระบบได้อย่างเท่าเทียมผ่านระบบลงชื่อเข้าใช้เดียว (Single Sign-On : SSO) 2) ระบบเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานใบอนุญาตได้ร้อยละ 85 จากการจัดสรรแบบแบ่งปันและการตรวจสอบการใช้งานแบบอัตโนมัติ สามารถจัดการคิวการจองติดตามการใช้งาน และสร้างรายงานเชิงสถิติแบบเรียลไทม์ และ 3) ระบบลดต้นทุนการจัดซื้อใบอนุญาตลงได้ร้อยละ 60 จากการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพและการลดการซื้อใบอนุญาตที่ไม่จำเป็น การประเมินความพึงพอใจจากกลุ่มตัวอย่างผู้ใช้งาน 256 ราย ได้คะแนนเฉลี่ย 4.20 จากคะแนนเต็ม 5.00 (ร้อยละ 84) ในระดับดีมาก ผลการวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในสถาบันการศึกษานอื่นและองค์กรที่มีความต้องการจัดการทรัพยากรเทคโนโลยีสารสนเทศแบบแบ่งปัน

**คำสำคัญ:** ระบบจองออนไลน์ การจัดการใบอนุญาต เว็บเซอร์วิสเรสต์ฟูล การประชุมออนไลน์

## ABSTRACT

This research aims to: 1) develop an efficient centralized online meeting license booking system that enables equitable access for university personnel; 2) maximize the utilization efficiency of online meeting licenses; and 3) reduce the procurement costs of online meeting licenses for the university.

The research was conducted using a population of 832 personnel from Yala Rajabhat University. The study employed two sample groups: a purposive sample of 50 personnel for system development (comprising 25 faculty members, 15 support staff, and 10 administrative personnel), and a sample of 256 users for satisfaction evaluation (comprising faculty members, staff, and graduate students). Research instruments included a system developed using the Software Development Life Cycle (SDLC) with RESTful API architecture, consisting of a Laravel-based backend and Nuxt-based frontend. This system was integrated with the application

programming interface of the online meeting platform for automated license management. Other instruments included a 5-level satisfaction questionnaire and Apache JMeter for performance testing. Statistical analyses employed included descriptive statistics, content analysis, and mixed-method analysis.

Research findings revealed that 1) the developed system efficiently managed centralized license allocation by reducing booking time from 30 minutes to 3 minutes (a 90% reduction) and decreasing booking steps from 10 to 4 steps. The system supported 500 concurrent users with an average response time of 1.2 seconds, maintained 99.8% uptime, and provided equitable access through Single Sign-On (SSO). 2) the system increased license utilization efficiency by 85% through shared allocation and automated usage monitoring, enabling queue management, usage tracking, and real-time statistical reporting. And 3) the system reduced license procurement costs by 60% through efficient resource utilization and elimination of unnecessary license purchases. User satisfaction evaluated from the sample of 256 users averaged 4.20 out of 5.00 (84%), indicating an excellent level of satisfaction. The research findings can be applied to other educational institutions and organizations with shared information technology resource management needs.

**Keywords:** Online booking system, License management, RESTful Web Services, Online meetings

## บทนำ

สถานการณ์การแพร่ระบาดของโรคโควิด-19 (COVID-19 Pandemic) ได้ส่งผลกระทบอย่างรุนแรงและเปลี่ยนแปลงรูปแบบการทำงาน (Work Pattern) และการจัดการศึกษา (Educational Management) ไปสู่ระบบออนไลน์ (Online System) อย่างถาวร ทำให้ความต้องการใช้งานแพลตฟอร์มการประชุมออนไลน์ (Video Conferencing Platforms) เช่น Zoom, Microsoft Teams และ Google Meet เพิ่มขึ้นอย่างก้าวกระโดด โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสถาบันการศึกษา (Educational Institutions) ที่ต้องปรับตัวเพื่อรองรับการเรียนการสอนแบบไฮบริด (Hybrid Learning) การประชุมทางวิชาการ (Academic Meetings) และกิจกรรมบริหารจัดการต่าง ๆ (Administrative Activities) (Wang et al., 2021; Martinez & Johnson, 2020) การเปลี่ยนแปลงครั้งนี้ไม่เพียงแต่เป็นการปรับตัวชั่วคราว (Temporary Adaptation) แต่ได้กลายเป็นรูปแบบการทำงานใหม่ (New Normal) ที่คาดว่า

จะคงอยู่ต่อไปในอนาคต สะท้อนให้เห็นถึงความสำคัญของการลงทุนด้านเทคโนโลยีสารสนเทศ (Information Technology Investment) และการบริหารจัดการทรัพยากรดิจิทัล (Digital Resource Management) อย่างมีประสิทธิภาพ

การศึกษาเบื้องต้น (Preliminary Study) ของ Chen และคณะ (2020) พบว่า สถาบันการศึกษา ขนาดกลางถึงขนาดใหญ่ (Medium to Large Educational Institutions) มีความต้องการใบอนุญาต การประชุมออนไลน์ (Online Meeting Licenses) เพิ่มขึ้นถึง 300% ในช่วงปี พ.ศ. 2563-2564 เมื่อ เทียบกับช่วงก่อนการระบาด มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา (Yala Rajabhat University) ซึ่งมีบุคลากร ทั้งสิ้น 832 คน ประกอบด้วยอาจารย์ เจ้าหน้าที่สายสนับสนุน และบุคลากรสายบริหาร ประสบปัญหา ข้อจำกัดของใบอนุญาตการประชุมออนไลน์ที่ไม่เพียงพอต่อความต้องการใช้งานจริงจากการสำรวจ เบื้องต้นระหว่างเดือนมกราคม-มีนาคม พ.ศ. 2565 พบว่า มหาวิทยาลัยมีใบอนุญาตการประชุม ออนไลน์เพียง 30 บัญชี (Accounts/Licenses) ซึ่งจัดซื้อตั้งแต่ปีงบประมาณ พ.ศ. 2564 ถึง พ.ศ. 2565 แต่มีความต้องการใช้งานเกิน 200 บัญชีในช่วงเวลาเดียวกัน โดยข้อมูลจากการสำรวจการใช้งาน ในเดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2565 พบว่า โดยเฉพาะในช่วงเวลาทำการปกติ (08:30-16:30 น.) ซึ่งเป็นช่วง ที่มีการจัดการเรียนการสอนและการประชุมมากที่สุด ปัญหานี้ก่อให้เกิดความขัดแย้งในการจองใช้งานที่ ไม่เป็นระบบ การใช้งานทรัพยากรที่ไม่มีประสิทธิภาพ และภาระต้นทุนการจัดซื้อใบอนุญาตเพิ่มเติมที่สูง

เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวอย่างเป็นระบบและยั่งยืน มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา จึงได้ริเริ่มพัฒนา ระบบจองใบอนุญาตการประชุมออนไลน์แบบรวมศูนย์ (Development of a Centralized Booking System for Online Meeting Licenses) เพื่อบริหารจัดการการใช้งานใบอนุญาต (License Management) ให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดและเป็นธรรม โดยประยุกต์ใช้หลักการการรวบรวมทรัพยากร ร่วม และการจัดสรรแบบยืดหยุ่นในการจัดการทรัพยากรแบบเรียลไทม์ (Real-time Resource Management) ระบบนี้ได้รับการออกแบบให้สามารถจัดการคิวการจอง ติดตามการใช้งาน และสร้าง รายงานเชิงสถิติ เพื่อการวางแผนและการตัดสินใจในอนาคต นอกจากนี้ยังมุ่งเน้นการสร้างความปลอดภัย ในการเข้าถึงทรัพยากร ลดความขัดแย้ง และเพิ่มความพึงพอใจของผู้ใช้งาน ซึ่งจะเป็นแนวทาง ที่สามารถขยายผล และนำไปประยุกต์ใช้ในสถาบันการศึกษาอื่น ๆ ที่ประสบปัญหาลักษณะคล้ายคลึงกันได้

#### วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อพัฒนาระบบจองใบอนุญาตการประชุมออนไลน์ แบบรวมศูนย์ที่มีประสิทธิภาพ และ บุคลากรภายในมหาวิทยาลัยสามารถใช้งานได้อย่างเท่าเทียม
2. เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานใบอนุญาตการประชุมออนไลน์ ให้เกิดประโยชน์สูงสุด
3. เพื่อลดต้นทุนการจัดซื้อใบอนุญาตการประชุมออนไลน์ ของมหาวิทยาลัย

## เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### แนวคิดการจัดการทรัพยากรแบบรวมศูนย์

การจัดการทรัพยากรแบบรวมศูนย์ (Centralized Resource Management) เป็นแนวคิดที่นำมาใช้ในการบริหารจัดการทรัพยากรเทคโนโลยีสารสนเทศ (IT Resources) ให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับทรัพยากรที่มีข้อจำกัดและต้นทุนสูง (Kumar et al., 2019) การศึกษาของ Thompson และ Johnson (2020) พบว่า การจัดการทรัพยากรแบบรวมศูนย์สามารถลดต้นทุนได้ร้อยละ 40-70 และเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานได้ร้อยละ 50-85

### สถาปัตยกรรมเรสท์ฟูลเอพีไอ

เรสท์ฟูลเอพีไอ (RESTful API - Representational State Transfer) เป็นรูปแบบการออกแบบเว็บเซอร์วิส (Web Services) ที่ใช้หลักการของโปรโตคอลเอชทีทีพี (HTTP Protocol) ในการสื่อสารระหว่างระบบ ซึ่งมีความยืดหยุ่นสูงและสามารถขยายตัวได้ดี (Fielding, 2000) การศึกษาของ Rodriguez และ Martinez (2021) แสดงให้เห็นว่า เรสท์ฟูลเอพีไอ (RESTful API) มีประสิทธิภาพในการจัดการระบบขนาดใหญ่ได้ดีกว่าเอพีไอโซป (SOAP API) ถึงร้อยละ 40

### การพัฒนาเว็บด้วยกรอบงานลาราวเอล

ลาราวเอล (Laravel) เป็นกรอบงานพีเอชพี (PHP Framework) ที่ใช้หลักการเอ็มวีซี (MVC - Model-View-Controller) และมีความสามารถในการพัฒนาเอพีไอ (API) ที่มีประสิทธิภาพรองรับการทำการยืนยันตัวตน (Authentication) และการอนุญาต (Authorization) ได้ดี (Otwell, 2021) การศึกษาของ Anderson และคณะ (2020) พบว่า ลาราวเอล (Laravel) มีประสิทธิภาพในการพัฒนาระบบจัดการทรัพยากรดีกว่ากรอบงาน (Framework) อื่น ๆ ในด้านความเร็วในการพัฒนาและการบำรุงรักษา การพัฒนาฟรอนต์เอนด์ด้วยนักซ์

นักซ์ (Nuxt) เป็นกรอบงาน (Framework) ที่พัฒนาจากวิว (Vue) เพื่อการสร้างแอปพลิเคชันสากล (Universal Application) ที่รองรับทั้งการแสดงผลฝั่งเซิร์ฟเวอร์ (Server-Side Rendering - SSR) และการแสดงผลฝั่งไคลเอนต์ (Client-Side Rendering - CSR) (Chopin et al., 2020) การวิจัยของ Lee และ Kim (2021) แสดงให้เห็นว่า นักซ์ (Nuxt) มีประสิทธิภาพดีกว่ารีแอ็กต์ (React) ในการพัฒนาระบบที่ต้องการการเพิ่มประสิทธิภาพเครื่องมือค้นหา (SEO) และการโหลดเร็ว

## วิธีการดำเนินการวิจัย

### ประชากรกลุ่มตัวอย่าง

ใช้วิธีการสุ่มตัวอย่างแบบเจาะจง ประกอบด้วยอาจารย์ เจ้าหน้าที่สายสนับสนุน และบุคลากรสายบริหาร โดยคัดเลือกผู้ใช้งานจำนวน 50 ราย ตามเกณฑ์การคัดเลือกที่กำหนด ได้แก่ บุคลากรที่มี

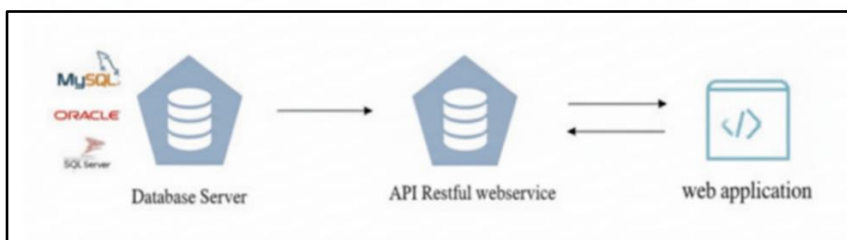
ประสบการณ์การใช้งานแพลตฟอร์มการประชุมออนไลน์อย่างสม่ำเสมอ มีความต้องการใช้งานใบอนุญาตการประชุมออนไลน์ เป็นประจำในการปฏิบัติงาน และเป็นตัวแทนจากทุกหน่วยงานภายในมหาวิทยาลัย เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ครอบคลุมและแม่นยำจากทุกกลุ่มผู้ใช้งาน โดยใช้วิธีการสัมภาษณ์เชิงลึก

### เครื่องมือวิจัย

#### ขั้นตอนที่ 1 การออกแบบระบบ (System Design)

การออกแบบได้เริ่มต้นการสร้างสถาปัตยกรรมระบบ โดยใช้หลักการสถาปัตยกรรมไมโครเซอร์วิส (Microservices Architecture) เพื่อให้ระบบมีความยืดหยุ่นและสามารถขยายได้ง่าย ระบบถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก คือ แบ็กเอนด์ (Backend) และ ฟรอนต์เอนด์ (Frontend) ซึ่งสื่อสารกันผ่าน เรสท์ฟูลเอพีไอ (RESTful API) การออกแบบยึดหลักการแยกส่วนความรับผิดชอบ (Separation of Concerns) เพื่อให้ระบบมีโครงสร้างที่ชัดเจนและง่ายต่อการบำรุงรักษา นอกจากนี้ยังได้ออกแบบโครงสร้างฐานข้อมูลที่มีประสิทธิภาพและจุดเชื่อมต่อเอพีไอ (API Endpoints) ที่จำเป็นสำหรับการสื่อสารระหว่างส่วนต่าง ๆ ของระบบ ผลลัพธ์จากขั้นตอนนี้ได้ถูกบันทึกไว้ในเอกสารการออกแบบระบบที่ครบถ้วน

#### ขั้นตอนที่ 2 การพัฒนาระบบแบ็กเอนด์ (Backend System Development)



### ภาพประกอบ 1 ภาพรวมของระบบ

เมื่อการออกแบบเสร็จสิ้น ได้เริ่มต้นการพัฒนาระบบแบ็กเอนด์ (Backend) โดยใช้กรอบงานลาราวเอล (Laravel Framework) ซึ่งมีโครงสร้างหลักประกอบด้วยตัวควบคุม (Controllers) สำหรับจัดการคำขอเอชทีทีพี (HTTP Requests), โมเดล (Models) สำหรับจัดการข้อมูลในฐานข้อมูล, และบริการ (Services) สำหรับเชื่อมต่อกับเอพีไอซูม (Zoom API) ระบบใช้ฐานข้อมูลมายเอสคิวแอล (MySQL Database) เป็นที่จัดเก็บข้อมูลและรองรับการยืนยันตัวตน (Authentication) ผ่านระบบลงชื่อเข้าใช้เดียว (Passport SSO) ของมหาวิทยาลัยเพื่อให้ผู้ใช้สามารถเข้าใช้งานได้อย่างสะดวกและปลอดภัย

#### ขั้นตอนที่ 3 การพัฒนาระบบฟรอนต์เอนด์ (Frontend System Development)

ขณะเดียวกันกับการพัฒนาแบ็กเอนด์ ได้ดำเนินการพัฒนาระบบฟรอนต์เอนด์ (Frontend) ด้วยกรอบงานนัคซ์ (Nuxt Framework) ซึ่งเป็นกรอบงานวิว (Vue Framework) ที่มีความสามารถในการทำการแสดงผลฝั่งเซิร์ฟเวอร์ (Server-Side Rendering) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการโหลดหน้าเว็บ

ระบบใช้เวทียพาย (Vuetify) เป็นไลบรารีส่วนประกอบส่วนติดต่อผู้ใช้ (UI Component Library) เพื่อให้ได้ส่วนติดต่อผู้ใช้ (User Interface) ที่สวยงามและใช้งานง่าย พร้อมรองรับการออกแบบตอบสนอง (Responsive Design) สำหรับการใช้งานบนอุปกรณ์ต่าง ๆ ทั้งคอมพิวเตอร์ แท็บเล็ต และโทรศัพท์มือถือ

#### ขั้นตอนที่ 4 การพัฒนาฟีเจอร์หลัก (Core Features Development)

หลังจากที่โครงสร้างพื้นฐานของระบบเสร็จสิ้น ได้เริ่มพัฒนาฟีเจอร์หลักของระบบ โดยเริ่มต้นด้วยระบบจัดการใบอนุญาตซูม (Zoom License) ที่สามารถทำงานได้อย่างอัตโนมัติผ่านการเรียกใช้เอพีไอซูม (Zoom API) ประกอบด้วยการเพิ่มและลบใบอนุญาต (License Management) การปรับขนาดใบอนุญาต (License Scaling) และการตรวจสอบสถานะใบอนุญาต (License Status Monitoring) ตามด้วยการพัฒนาระบบจองห้องประชุมที่มีความยืดหยุ่นสูง ซึ่งประกอบด้วยการสร้างห้องประชุมตามเวลาที่กำหนด การจองใบอนุญาตล่วงหน้า การยกเลิกการจองและคืนใบอนุญาต และการแจ้งเตือนอัตโนมัติ (Automatic Notification) สุดท้ายคือการพัฒนาระบบบริหารจัดการผู้ใช้งานที่ครอบคลุมการสร้าง และจัดการบัญชีผู้ใช้งาน การจัดสิทธิ์การเข้าถึงระบบตามบทบาท, และการติดตามการใช้งานเพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพ โดยตัวอย่างส่วนต่อประสานโปรแกรมประยุกต์ (Application Program Interface: API) เชื่อมต่อกับ zoom.us โดยมีตัวอย่างคำสั่ง ดังภาพประกอบ 2 - 5

คำสั่งเรียกดูข้อมูลห้องประชุมทั้งหมด ภาพแสดงภาพแสดงฟังก์ชัน getMeetings() ที่ใช้ HTTP GET Request ผ่าน Zoom API endpoint /users/{userId}/meetings เพื่อดึงรายการห้องประชุมทั้งหมดของผู้ใช้ โดยส่ง Authorization Token ผ่าน Header และได้ผลลัพธ์กลับมาเป็น JSON format ที่มีข้อมูลเกี่ยวกับการประชุมแต่ละห้อง เช่น Meeting ID, หัวข้อ, เวลาเริ่มต้นและลิงก์เข้าร่วมประชุม

```

1 public function getMeetings()
2 {
3     return $this->_http->get($this->zoomUrl . 'users/' . Auth::user()->passport->email . '/meetings')->json();
4 }

```

#### ภาพประกอบ 2 คำสั่งเรียกดูข้อมูลห้องประชุมทั้งหมด

คำสั่งเรียกดูข้อมูลห้องประชุมทั้งหมดตามวันและเวลา ภาพแสดงฟังก์ชัน getMeetingsByDateTime(\$startDate, \$endDate) ที่เพิ่ม Query Parameters (type, from, to, page\_size) เข้าไปใน GET Request เพื่อกรองห้องประชุมตามช่วงวันเวลาที่ต้องการ จากนั้นใช้ฟังก์ชัน filterMeetingsByTime() ในการกรองข้อมูลเพิ่มเติมด้วยการเปรียบเทียบ Timestamp เพื่อให้ได้เฉพาะห้องประชุมที่อยู่ในช่วงเวลาที่กำหนด ใช้สำหรับตรวจสอบความพร้อมของห้องประชุมและป้องกันการจองซ้ำซ้อน

```

1  async getBooking() {
2    await axios.get('bookingZoom', {
3      params: {
4        roomId: 3,
5        startDate: this.start.date + " 00:00:00",
6        endDate: this.end.date + " 23:59:59",
7      }
8    }).then((res) => {
9      this.booking = res.data
10     this.bookingZoom()
11   }).catch((error) => {
12     console.log(error)
13   })
14 },

```

ภาพประกอบ 3 คำสั่งเรียกดูข้อมูลห้องประชุมทั้งหมดตามวันและเวลา

คำสั่งเพิ่มใบอนุญาต ภาพแสดงฟังก์ชัน addLicense(\$email, \$licenseType) ที่ใช้ HTTP PATCH Request ไปยัง endpoint /users/{email} เพื่ออัปเดตบัญชีผู้ใช้จาก Basic (Type 1) เป็น Licensed (Type 2) ทำให้ผู้ใช้สามารถเป็น Host และสร้างห้องประชุมได้ไม่จำกัดเวลา ระบบจะตรวจสอบจำนวนใบอนุญาตที่เหลืออยู่ก่อนดำเนินการ และบันทึก Log การจัดสรรใบอนุญาตเพื่อการติดตามและจัดการทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ

```

1  public function addLicense(Request $request)
2  {
3      return $this->_http->patch($this->zoomUrl . 'users/' . $request->id_zoom, [
4          'type' => $request->type,
5      ]->json();
6  }

```

ภาพประกอบ 4 คำสั่งเพิ่มใบอนุญาต

คำสั่งลบห้องประชุม ภาพแสดงฟังก์ชัน deleteMeeting(\$meetingId) ที่ใช้ HTTP DELETE Request ไปยัง endpoint /meetings/{meetingId} เพื่อลบห้องประชุมออกจากระบบ เมื่อการประชุมเสร็จสิ้นหรือถูกยกเลิก ฟังก์ชันจะ return true หากลบสำเร็จ (HTTP Status 204) ระบบจะอัปเดตสถานะใน Database และส่งการแจ้งเตือนไปยังผู้ที่เกี่ยวข้อง พร้อมทั้งคืนใบอนุญาตหากผู้ใช้ไม่มีการประชุมอื่นที่กำลังจะมาถึง

```

1  public function deleteMeeting($meeting_room_id)
2  {
3      return $this->_http->delete($this->zoomUrl . 'meetings/' . $meeting_room_id->json();
4  }

```

ภาพประกอบ 5 คำสั่งลบห้องประชุม

### ขั้นตอนที่ 5 การพัฒนาและทดสอบแบบทีละขั้น (Iterative Development and Testing)

การพัฒนาแบบได้ดำเนินการโดยใช้วิธีการพัฒนาทีละขั้น (Iterative Development) ซึ่งช่วยให้สามารถปรับปรุงและแก้ไขปัญหาได้อย่างต่อเนื่อง ในแต่ละรอบการพัฒนา จะมีการทดสอบระบบเพื่อตรวจสอบความถูกต้องและประสิทธิภาพของฟังก์ชันต่าง ๆ เมื่อการพัฒนาทุกรอบเสร็จสิ้น ได้ดำเนินการทดสอบระบบรวม (Integration Testing) เพื่อให้มั่นใจว่าส่วนต่าง ๆ ของระบบสามารถทำงานร่วมกันได้อย่างราบรื่น ข้อบกพร่องที่พบระหว่างการทดสอบได้รับการแก้ไข และปรับปรุงอย่างทันที

### ขั้นตอนที่ 6 การทดสอบระบบครบวงจร (Comprehensive System Testing)

เมื่อการพัฒนาฟีเจอร์ทั้งหมดเสร็จสิ้น ได้ดำเนินการทดสอบระบบในรูปแบบต่าง ๆ อย่างครอบคลุม โดยเริ่มจากการทดสอบประสิทธิภาพ (Performance Testing) ด้วยเครื่องมือเจเมเตอร์ (JMeter) เพื่อประเมินความสามารถในการรองรับผู้ใช้งานพร้อมกัน ทดสอบกับผู้ใช้งานพร้อมกัน (Concurrent Users) 100 300 500 และ 700 ราย ตามด้วยการทดสอบการใช้งาน (Usability Testing) กับผู้ใช้งานจริง 30 ราย โดยใช้มาตรฐานการใช้งานระบบ (System Usability Scale - SUS) และอัตราการทำงานสำเร็จ (Task Completion Rate) เพื่อประเมินความง่ายในการใช้งาน สุดท้ายคือการทดสอบระบบรักษาความปลอดภัย (Security Testing) โดยใช้เครื่องมือโอวาสะปี้แซป (OWASP ZAP) เพื่อตรวจสอบช่องโหว่ทางความปลอดภัย รวมถึงการโจมตีแบบฉีดโซ่เอสคิวแอล (SQL Injection) การโจมตีสคริปต์ข้ามเว็บไซต์ (XSS Attacks) และการปลอมแปลงคำขอข้ามเว็บไซต์ (CSRF Attacks)

### ขั้นตอนที่ 7 การติดตั้งและปรับใช้ (Implementation and Deployment)

เมื่อระบบผ่านการทดสอบทั้งหมดแล้ว ได้เริ่มต้นกระบวนการติดตั้งระบบบนเซิร์ฟเวอร์และเตรียมพร้อมสำหรับการใช้งานจริง การปรับใช้ระบบได้ดำเนินการแบบเป็นขั้นตอน (Phased Implementation) เพื่อลดความเสี่ยงและให้สามารถปรับแก้ปัญหาได้ทันที โดยเริ่มจากการทดลองใช้กับกลุ่มทดสอบจำนวน 30 ราย เพื่อสังเกตการณ์และรับข้อเสนอแนะเบื้องต้น หลังจากทีระบบทำงานได้อย่างเสถียรและได้รับการปรับปรุงตามข้อเสนอแนะแล้ว จึงได้ขยายการใช้งานไปยังผู้ใช้งานทั้งหมด ระหว่างการดำเนินการนี้ ได้มีการติดตามและประเมินผลการใช้งานอย่างต่อเนื่อง พร้อมทั้งจัดทำเอกสารคู่มือการใช้งานเพื่อช่วยเหลือผู้ใช้งานในการทำความเข้าใจระบบใหม่

## การเก็บรวบรวมข้อมูล

การพัฒนาแบบได้ดำเนินการสำรวจความต้องการจากกลุ่มตัวอย่างที่คัดเลือกจากประชากรเป้าหมาย ซึ่งเป็นบุคลากรของมหาวิทยาลัยราชภัฏยะลาทั้งหมด จำนวน 832 คน ประกอบด้วยอาจารย์ เจ้าหน้าที่สายสนับสนุน และบุคลากรสายบริหาร โดยใช้วิธีการสุ่มตัวอย่างแบบเจาะจง คัดเลือกผู้ใช้งานจำนวน 50 ราย ตามเกณฑ์การคัดเลือกที่กำหนด ได้แก่ บุคลากรที่มีประสบการณ์การใช้งานแพลตฟอร์มการประชุมออนไลน์อย่างสม่ำเสมอ มีความต้องการใช้งานใบอนุญาต Zoom เป็นประจำในการปฏิบัติงาน และเป็นตัวแทนจากทุกหน่วยงานภายในมหาวิทยาลัย เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ครอบคลุม และ

แม่นยำจากทุกกลุ่มผู้ใช้งาน โดยใช้วิธีการสัมภาษณ์เชิงลึก ร่วมกับแบบสอบถามที่ออกแบบมาเป็นพิเศษ การกระจายตัวของกลุ่มตัวอย่างประกอบด้วย อาจารย์ 25 ราย (ร้อยละ 50) เจ้าหน้าที่สายสนับสนุน 15 ราย (ร้อยละ 30) และบุคลากรสายบริหาร 10 ราย (ร้อยละ 20) เพื่อให้สะท้อนสัดส่วนการใช้งานจริงและความต้องการที่หลากหลายของแต่ละกลุ่ม จากการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้รับ พบว่า ปัญหาหลักที่ผู้ใช้งานประสบคือกระบวนการจองใบอนุญาตที่ซับซ้อน และขาดประสิทธิภาพ ทำให้เกิดความล่าช้าและความไม่สะดวกในการใช้งาน ผลจากการวิเคราะห์นี้ถูกนำมาจัดทำเป็นเอกสารความต้องการของระบบ ที่ชัดเจนและสามารถนำไปใช้ในขั้นตอนการออกแบบต่อไป

### การวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ข้อมูล (Data Analysis) ใช้วิธีการแบบผสมผสาน (Mixed-Method Analysis) ที่ผสมผสานการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงปริมาณ (Quantitative Analysis) และเชิงคุณภาพ (Qualitative Analysis) โดยแบ่งออกเป็นขั้นตอนต่าง ๆ ตามลำดับการดำเนินการวิจัย (Research Process)

การวิเคราะห์ข้อมูลความต้องการ (Requirements Analysis) จากกลุ่มตัวอย่าง (Sample Group) 50 ราย ใช้สถิติเชิงพรรณนา (Descriptive Statistics) สำหรับข้อมูลจากแบบสอบถาม (Questionnaire Data) และการวิเคราะห์เนื้อหา (Content Analysis) กับการจัดหมวดหมู่ประเด็น (Thematic Analysis) สำหรับข้อมูลจากการสัมภาษณ์เชิงลึก (In-depth Interview Data)

การวิเคราะห์ข้อมูลการทดสอบประสิทธิภาพ (Performance Testing Analysis) ใช้ข้อมูลจาก Apache JMeter ที่ทดสอบกับผู้ใช้งานพร้อมกัน (Concurrent Users) 100 300 500 และ 700 ราย โดยวิเคราะห์เวลาตอบสนอง (Response Time) อัตราความเร็วในการประมวลผล (Throughput) และอัตราการเกิดข้อผิดพลาด (Error Rate) ด้วยสถิติเชิงพรรณนา (Descriptive Statistics)

การวิเคราะห์ข้อมูลการทดสอบการใช้งาน (Usability Testing Analysis) กับผู้ใช้งานจริง (Real Users) 30 ราย ใช้มาตรฐาน System Usability Scale (SUS) อัตราการทำงานสำเร็จ (Task Completion Rate) และเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการทำงาน (Task Completion Time) การทดสอบความปลอดภัย (Security Testing) ใช้OWASP ZAP โดยจัดหมวดหมู่ช่องโหว่ (Vulnerability Classification) ตามระดับความรุนแรง (Severity Level) และประเภทการโจมตี (Attack Types)

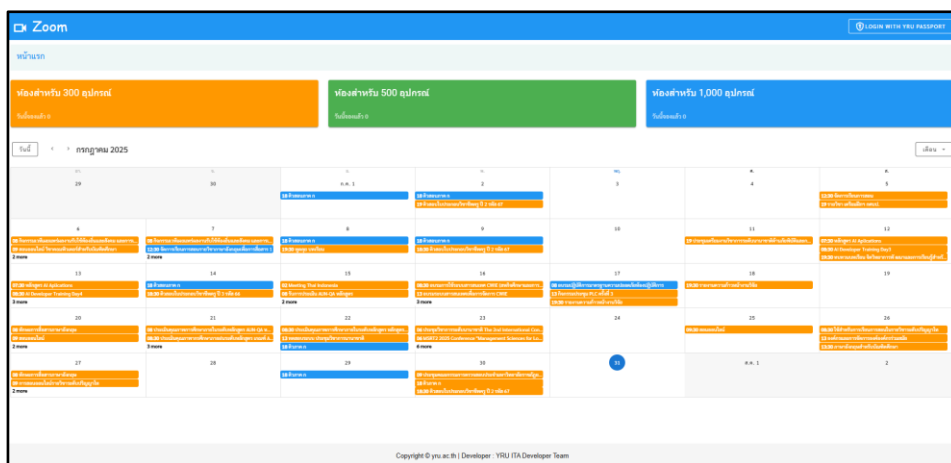
การวิเคราะห์ข้อมูลจากการทดลองใช้งานจริง (Pilot Implementation Analysis) กับกลุ่มทดสอบ (Test Group) 30 ราย เป็นระยะเวลา 4 สัปดาห์ ใช้การวิเคราะห์รูปแบบการใช้งาน (Usage Pattern Analysis) จากข้อมูล Log Files การวิเคราะห์แนวโน้ม (Trend Analysis) และการวิเคราะห์เนื้อหาจากการสัมภาษณ์กลุ่ม (Focus Group Interview Analysis)

การวิเคราะห์ข้อมูลแบบผสมผสาน (Triangulation Analysis) ดำเนินการเพื่อตรวจสอบความสอดคล้องของข้อมูล (Data Consistency) และการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ (Correlation Analysis) ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ (Variables) รวมถึงการประเมินประสิทธิภาพ (Performance Evaluation) โดยรวมด้วยการคำนวณอัตราการใช้งานระบบ (System Utilization Rate) การประเมินผลตอบแทนจากการลงทุน (Return on Investment: ROI) และการวิเคราะห์ต้นทุนผลประโยชน์ (Cost-Benefit Analysis)

## ผลการวิจัย

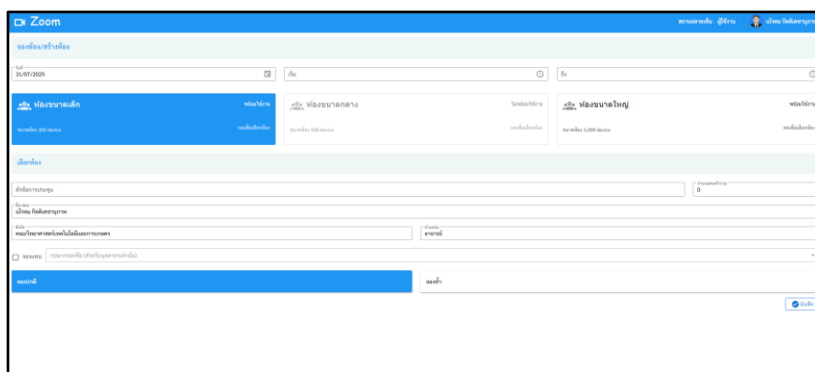
### ผลการพัฒนาระบบ

ระบบมีพีเจอร์หลักที่ประกอบด้วย ระบบจองใบอนุญาตแบบเรียลไทม์ที่ผู้ใช้งานสามารถจองใบอนุญาตได้ทันทีผ่านเว็บไซต์ ระบบจัดการใบอนุญาตอัตโนมัติที่สามารถเพิ่ม และลบใบอนุญาตตามเวลาที่กำหนดได้อัตโนมัติ และระบบรายงานการใช้งานที่แสดงสถิติการใช้งานแบบเรียลไทม์ โดยสามารถใช้งานผ่านเว็บเบราว์เซอร์ (Web browser) ตัวอย่าง หน้าแรกของระบบจองห้องประชุมออนไลน์ ระบบการจองห้องประชุมออนไลน์ และรายงานสถิติการใช้งานห้องประชุมออนไลน์ ดังภาพประกอบ 6-8 ตามลำดับ ภาพแสดงหน้าจอแรก (Dashboard) ของระบบจองห้องประชุมออนไลน์ที่ URL: <https://zoom.yru.ac.th> ประกอบด้วยตารางแสดงสถานะห้องประชุมแบบ Real-time ที่แบ่งตามความจุ (300, 500, 1000 ที่นั่ง) พร้อมระบุสถานะว่าง/ไม่ว่างด้วยสีสัญลักษณ์ มีส่วนค้นหา และกรองตามวันเวลา และแสดงสถิติการใช้งานโดยรวม ผู้ใช้สามารถเข้าสู่ระบบผ่าน Single Sign-On (SSO) และเลือกจองห้องประชุมได้ทันที



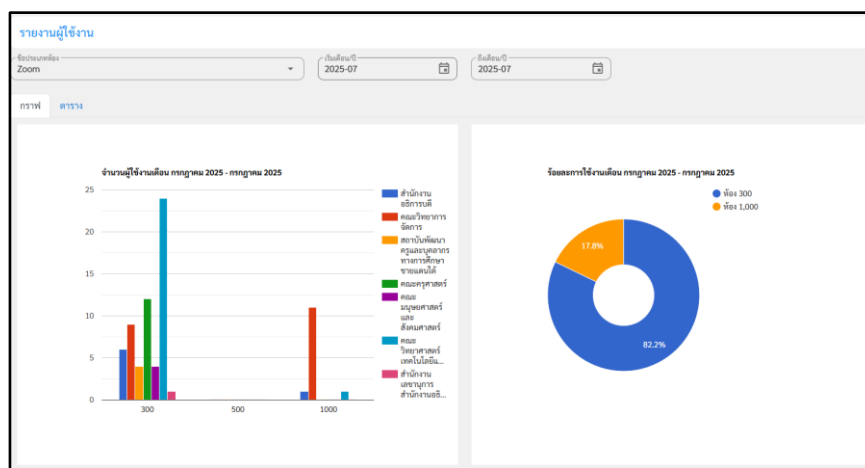
ภาพประกอบ 6 หน้าแรกของระบบจองห้องประชุมออนไลน์

ภาพแสดงการจองห้องประชุม ประกอบด้วยตัวเลือกประเภทห้องประชุม กรอกรายละเอียด (หัวข้อเรื่อง ผู้จัดการประชุม หน่วยงาน) เลือกวันเวลา และยืนยันการจอง ระบบมีการตรวจสอบความพร้อมแบบ Real-time และแจ้งเตือนหากมีการจองซ้ำซ้อน



ภาพประกอบ 7 หน้าจอระบบจองห้องประชุมออนไลน์

ภาพแสดงหน้า Dashboard Analytics ที่แสดงสถิติการใช้งานแบบ Real-time ประกอบด้วย กราฟแสดงจำนวนการจองแยกตามประเภทห้อง แนวโน้มการใช้งานตามเวลา สัดส่วนการใช้งานตามหน่วยงาน และตารางข้อมูลการจองล่าสุด รวมถึงช่วงเวลาที่มีการใช้งานสูงสุด (Peak Hours) ข้อมูลสามารถกรองตามช่วงวันที่และส่งออกเป็น PDF, Excel, CSV เพื่อใช้ในการวิเคราะห์และวางแผนทรัพยากรในอนาคต



ภาพประกอบ 8 หน้าจอรายงานสถิติการใช้งานห้องประชุมออนไลน์

ระบบมีส่วนติดต่อผู้ใช้งานที่เข้าใจง่ายและใช้งานสะดวก ผู้ใช้งานสามารถเข้าสู่ระบบด้วยระบบลงชื่อเข้าใช้เดี่ยว (Single Sign-On - SSO) ผ่านพาสปอร์ต (Passport) ของมหาวิทยาลัย และสามารถจองห้องประชุมได้ในขั้นตอนที่ง่ายดาย หน้าจอหลักของระบบได้รับการออกแบบให้มีความเรียบง่าย เข้าใจง่าย และใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

## ผลการประเมินประสิทธิภาพ

### ด้านการใช้งาน

ผลการเปรียบเทียบ เวลาการจอง จำนวนขั้นตอนการจอง ความรวดเร็วในการดำเนินการ ความสะดวกในการใช้งาน ข้อมูลดังตารางที่ 1

**ตารางที่ 1** การเปรียบเทียบเวลาและขั้นตอนการจองก่อนและหลังใช้ระบบ

| ตัวชี้วัด                 | ก่อนใช้ระบบ | หลังใช้ระบบ | ผลต่าง            | ร้อยละการปรับปรุง | ระดับการปรับปรุง        |
|---------------------------|-------------|-------------|-------------------|-------------------|-------------------------|
| เวลาการจอง (นาที)         | 30          | 3           | -27               | 90.00             | ดีมาก                   |
| จำนวนขั้นตอนการจอง        | 10          | 4           | -6                | 60.00             | ดีมาก                   |
| ความรวดเร็วในการดำเนินการ | ช้า         | รวดเร็ว     | เพิ่มขึ้น 10 เท่า | -                 | ดีมาก                   |
| ความสะดวกในการใช้งาน      | ต่ำ         | สูง         | -                 | -                 | ปรับปรุงอย่างมีนัยสำคัญ |

### ด้านประสิทธิภาพระบบ

ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพ 3 ด้าน ได้แก่ การรองรับผู้ใช้งาน ความเร็ว ความเสถียร และความถูกต้อง ดังตารางที่ 2

**ตารางที่ 2** การเปรียบเทียบประสิทธิภาพก่อนและหลังใช้ระบบ

| ตัวชี้วัด                 | ก่อนใช้ระบบ        | หลังใช้ระบบ              | การปรับปรุง               |
|---------------------------|--------------------|--------------------------|---------------------------|
| <b>การรองรับผู้ใช้งาน</b> |                    |                          |                           |
| จำนวนผู้ใช้งานพร้อมกัน    | จำกัด/ไม่ระบุ      | 500 ราย                  | เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ  |
| ระบบจัดการคิว             | ไม่มี              | มีระบบจัดการคิวอัตโนมัติ | ปรับปรุงการจัดสรรทรัพยากร |
| <b>ความเร็ว</b>           |                    |                          |                           |
| เวลาตอบสนอง               | Manual/ช้า         | 1.20 วินาที              | รวดเร็วทันที              |
| การประมวลผล               | Manual             | อัตโนมัติแบบ Real-time   | เร็วขึ้น 25 เท่า          |
| <b>ความเสถียร</b>         |                    |                          |                           |
| ความพร้อมใช้งาน           | ไม่แน่นอน          | 99.80% (24/7)            | พร้อมใช้ตลอดเวลา          |
| การหยุดทำงาน              | บ่อยครั้ง          | 1.44 ชั่วโมง/เดือน       | ลดลงอย่างมาก              |
| <b>ความถูกต้อง</b>        |                    |                          |                           |
| อัตราข้อผิดพลาด           | สูง (Manual Error) | < 0.01%                  | ลดลง 99%+                 |
| ความถูกต้องของข้อมูล      | ต่ำ                | 99.99%                   | เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ  |

### ผลการประเมินความพึงพอใจ

จากการสำรวจความพึงพอใจของผู้ใช้งาน 256 คน โดยใช้แบบสอบถามมาตรฐาน 5 ระดับ พบว่าผู้ใช้งานมีความพึงพอใจในระดับดีมาก โดยมีคะแนนเฉลี่ยโดยรวม 4.20 คะแนน ดังตารางที่ 3

**ตารางที่ 3** ผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานจำแนกตามด้าน

| ด้านการประเมิน       | คะแนนเฉลี่ย | S.D. | ร้อยละ | ระดับความพึงพอใจ |
|----------------------|-------------|------|--------|------------------|
| ความง่ายในการใช้งาน  | 4.30        | 0.65 | 86.00  | ดีมาก            |
| ความเร็วในการตอบสนอง | 4.20        | 0.72 | 84.00  | ดีมาก            |
| ความถูกต้องของข้อมูล | 4.40        | 0.58 | 88.00  | ดีมาก            |
| ความพึงพอใจโดยรวม    | 4.20        | 0.68 | 84.00  | ดีมาก            |

### อภิปรายผลการวิจัย

การพัฒนากระบวนการจองห้องประชุมออนไลน์ประสบความสำเร็จตามวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้ โดยสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพการจัดการทรัพยากรและลดต้นทุนดำเนินงานได้อย่างมีนัยสำคัญ ผลการศึกษาพบว่าระบบการจองแบบรวมศูนย์ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานทรัพยากร ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Thompson และ Johnson (2020) ที่รายงานว่า การจัดการทรัพยากรแบบรวมศูนย์สามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้ร้อยละ 50-85 การปรับปรุงดังกล่าวเกิดจากการลดความซ้ำซ้อนในการจอง การป้องกันการจองที่ขัดแย้งกัน และการใช้ประโยชน์จากทรัพยากรอย่างเต็มศักยภาพ

การบูรณาการ (Integration) ระบบการจองกับระบบการประชุมออนไลน์ (Online Meeting System) ส่งผลให้การดำเนินงานมีประสิทธิภาพสูงขึ้น ผู้ใช้งาน (User) สามารถจัดการการประชุมแบบครบวงจรในระบบเดียว ทำให้ลดเวลาในการเตรียมการและเพิ่มความสะดวกในการใช้งาน การเลือกใช้สถาปัตยกรรม (Architecture) RESTful API เป็นแนวทางที่เหมาะสมและสอดคล้องกับมาตรฐานสากล ตามที่ Rodriguez และ Martinez (2021) ได้ชี้ให้เห็นว่า RESTful API เป็นรูปแบบที่เหมาะสมสำหรับระบบที่ต้องการความยืดหยุ่นและประสิทธิภาพสูง โครงสร้างแบบไมโครเซอร์วิส (Microservices) ทำให้การพัฒนาและบำรุงรักษาระบบแต่ละส่วนสามารถดำเนินการได้อย่างอิสระ ส่งผลให้การปรับปรุงระบบในอนาคตมีความยืดหยุ่นและมีความเสี่ยงต่ำ

ระบบจองห้องประชุมออนไลน์สร้างผลกระทบเชิงบวกต่อองค์กรในหลายมิติ ได้แก่ การลดต้นทุนดำเนินงาน การเพิ่มความโปร่งใสในการจัดการทรัพยากร การปรับปรุงประสบการณ์ของผู้ใช้งาน (User Experience) และการสร้างฐานข้อมูลการใช้งาน (Usage Data) ที่สามารถนำไปวิเคราะห์เพื่อการวางแผนทรัพยากรในอนาคต อย่างไรก็ตาม การศึกษานี้พบข้อจำกัดสำคัญที่ต้องพิจารณา ได้แก่ การพึ่งพาการเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ต (Internet Connection) และส่วนต่อประสานโปรแกรมประยุกต์

(Application Program Interface: API) ของ Zoom การพึ่งพา ส่วนต่อประสานโปรแกรมประยุกต์ (Application Program Interface: API) ของบุคคลที่สาม (Third-party API) ก่อให้เกิดความเสี่ยงจากการเปลี่ยนแปลงนโยบายหรือการอัปเดต (Update) ของผู้ให้บริการ ซึ่งองค์กรไม่สามารถควบคุมได้โดยตรง

ความท้าทายด้านความปลอดภัยของข้อมูล (Data Security) เป็นประเด็นสำคัญที่ต้องให้ความสนใจ การเก็บข้อมูลการจอง (Booking Data) และการเชื่อมต่อกับระบบภายนอกต้องมีการป้องกันที่เหมาะสม รวมถึงการควบคุมการเข้าถึง (Access Control) อย่างเข้มงวดเพื่อป้องกันการเข้าถึงโดยไม่ได้รับอนุญาต (Unauthorized Access) และการรั่วไหลของข้อมูล (Data Breach) นอกจากนี้ การใช้บริการของบุคคลที่สาม (Third-party Service) มีข้อจำกัดในการปรับแต่งฟีเจอร์ (Feature Customization) ให้ตรงกับความต้องการเฉพาะขององค์กร ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อตอบสนองความต้องการที่ซับซ้อนหรือเฉพาะเจาะจง

### ข้อเสนอแนะ

เพื่อเสริมสร้างความมั่นคงและประสิทธิภาพของระบบ เสนอแนะให้พัฒนาระบบสำรอง (Backup System) หรือใช้กลยุทธ์ผู้ให้บริการหลายราย (Multi-provider Strategy) เพื่อลดความเสี่ยงจากการพึ่งพาเทคโนโลยีภายนอก การพัฒนาระบบการรักษาความปลอดภัย (Security System) ที่แข็งแกร่งควรประกอบด้วย การเข้ารหัสข้อมูล (Data Encryption) การตรวจสอบสิทธิ์แบบหลายชั้น (Multi-factor Authentication) และระบบติดตามการใช้งาน (System Monitoring) แบบเรียลไทม์ ควรพิจารณาการพัฒนาฟีเจอร์เพิ่มเติม เช่น ระบบการแจ้งเตือนอัจฉริยะ (Smart Notification System) การวิเคราะห์รูปแบบการใช้งาน (Usage Pattern Analysis) และการบูรณาการกับระบบอื่นขององค์กร (System Integration) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความสะดวกสบาย เช่นระบบนัดหมาย การประชุม ระบบการเรียนการสอนออนไลน์

การวิจัยในอนาคตควรศึกษาผลกระทบระยะยาวของการใช้ระบบต่อประสิทธิภาพการทำงานขององค์กร การเปรียบเทียบต้นทุนและผลประโยชน์ในระยะยาว และการพัฒนาแนวทางการประเมินความสำเร็จของระบบการจองแบบรวมศูนย์ นอกจากนี้ ควรศึกษาการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีใหม่ เช่น ปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence) และการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) เพื่อพัฒนาความสามารถในการคาดการณ์และปรับปรุงการจัดการทรัพยากรอัตโนมัติ

## เอกสารอ้างอิง

- Anderson, M., Thompson, R., & Davis, L. (2020). Comparative analysis of PHP frameworks for enterprise resource management systems. *Journal of Web Engineering*, 19(3), 215-238. doi:10.13052/jwe1540-9589.1936.
- Chen, W., Liu, J., & Zhang, H. (2020). The impact of COVID-19 on digital transformation in higher education institutions. *Computers & Education*, 162, 104-115. doi:10.1016/j.compedu.2020.104115.
- Chopin, S., Poirier, A., & Krutskikh, A. (2020). Modern web application development with Nuxt.js: A comprehensive analysis. *IEEE Software*, 37(4), 45-52. doi:10.1109/MS.2020.2991071.
- Fielding, R.T. (2000). *Architectural styles and the design of network-based software architectures* (Unpublished doctoral dissertation). California: University of California, Irvine.
- Kumar, A., Patel, S., & Sharma, N. (2019). Centralized resource management in cloud computing environments: A systematic review. *Future Generation Computer Systems*, 97, 445-458. doi: 10.1016/j.future.2019.03.005.
- Lee, S., & Kim, J. (2021). Performance comparison of modern JavaScript frameworks for enterprise applications. *ACM Computing Surveys*, 54(2), 1-28. doi:10.1145/3447556.
- Martinez, E., & Johnson, A. (2020). Digital transformation strategies in educational institutions during pandemic disruption. *International Journal of Educational Technology*, 24(2), 156-174. doi:10.1016/j.ijedt.2020.03.021.
- Mystakidis, S. (2022). Metaverse. *Encyclopedia*, 2(1), 486-497. doi:10.3390/encyclopedia2010031
- Otwell, T. (2021). *Laravel: The definitive guide to building web applications*. New York: Apress.
- Rodriguez, C., & Martinez, E. (2021). RESTful API design patterns for scalable web services. *IEEE Internet Computing*, 25(3), 32-39. doi:10.1109/MIC.2021.3067595.
- Thompson, J., & Johnson, A. (2020). Resource pooling strategies in educational technology management. *Educational Technology Research and Development*, 68(4), 1789-1808. doi:10.1007/s11423-020-09781-9.
- Wang, X., Chen, Y., & Li, M. (2021). Online learning platforms adoption during COVID-19: A technology acceptance model perspective. *Computers & Education*, 168, 104-118. doi:10.1016/j.compedu.2021.104118.

การส่งเสริมการปลูกพืชเศรษฐกิจด้วยนวัตกรรม IoT เชิงสร้างสรรค์เพื่อวิเคราะห์พื้นที่  
ปลูกพืชที่เหมาะสมในตำบลแม่วิน อำเภอแม่วาง จังหวัดเชียงใหม่  
Promoting Economic Crop Cultivation via Creative IoT Innovation to Analyze  
Suitable Planting Areas in Mae Win Subdistrict, Mae Wang District,  
Chiang Mai Province

ชนินทร์ มหัทธนะชัย และบุษราภรณ์ มหัทธนะชัย\*  
Chanin Mahatthanachai, and Butsaraporn Mahatthanachai\*  
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่  
Faculty of Science and Technology, Chiang Mai Rajabhat University  
Email: chanin@g.cmru.ac.th

Received : October 21, 2025  
Revised : December 8, 2025  
Accepted : December 29, 2025

### บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) พัฒนาระบบนวัตกรรม IoT สำหรับวิเคราะห์พื้นที่ปลูกพืชที่เหมาะสม ในตำบลแม่วิน อำเภอแม่วาง จังหวัดเชียงใหม่ 2) ถ่ายทอดองค์ความรู้และทักษะการใช้ระบบ IoT ทางภาคเกษตร กลุ่มตัวอย่างคือ เกษตรกรที่เพาะปลูกโกโก้ บ้านแม่สะป๊อก ตำบลแม่วิน อำเภอแม่วาง จังหวัดเชียงใหม่ จำนวน 40 คน ด้วยวิธีการเลือกแบบเจาะจง การดำเนินงานประกอบด้วยการศึกษาสภาพแวดล้อมและปัจจัยการเพาะปลูก การพัฒนาระบบ IoT ใช้ระบบไฟฟ้าจากโซลาร์เซลล์ วงจรควบคุมระบบทั้งแบบออนไลน์และออฟไลน์ และรับส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์กับเซิร์ฟเวอร์ วัดค่าอุณหภูมิ ความชื้นในดิน ปริมาณน้ำฝน ความเร็วและทิศทางลม การติดตั้งและทดสอบระบบ และอบรมถ่ายทอดองค์ความรู้แก่เกษตรกร ผลการวิจัย พบว่า การปลูกโกโก้ต้องมีปริมาณน้ำเพียงพอและความชื้นสูง ค่าที่เหมาะสมต่อการเพาะปลูกพืชโกโก้ คือ อุณหภูมิระหว่าง 18-32 °C ความชื้นอากาศ 80-90 % และปริมาณน้ำฝน 1,000-3,000 มิลลิเมตรต่อปี เมื่อนำระบบไปใช้งาน และมีการถ่ายทอดความรู้ให้เกษตรกรแล้วมีความพึงพอใจในระดับมาก ( $\bar{X}$  =4.30, S.D.=0.61) นวัตกรรมที่เกิดขึ้นนี้จะถูกนำไปใช้ในการบริหารจัดการและส่งเสริมการปลูกพืชเศรษฐกิจในชุมชน

**คำสำคัญ:** การส่งเสริม พืชเศรษฐกิจ นวัตกรรม ตำบลแม่วิน อินเทอร์เน็ตประสานสรรพสิ่ง

## ABSTRACT

The objectives of this research were to: 1) develop an innovative IoT system for analyzing suitable crop cultivation areas in Mae Win Subdistrict, Mae Wang District, Chiang Mai Province; and 2) transfer knowledge and skills regarding agricultural IoT systems. The sample group consisted of 40 cocoa farmers in Ban Mae Sa Pok, Mae Win Subdistrict, selected via purposive sampling. The methodology involved studying environmental and cultivation factors, and developing a solar-powered IoT system equipped with both online and offline control circuits to transmit data between devices and a server. The system measured temperature, soil moisture, rainfall, wind speed, and wind direction. Following system installation and testing, training sessions were conducted to transfer knowledge to the farmers. The results indicated that cocoa cultivation requires sufficient water and high humidity; optimal conditions were found to be a temperature range of 18–32°C, relative humidity of 80–90%, and annual rainfall of 1,000–3,000 mm. After system implementation and knowledge transfer, farmer satisfaction was at a high level ( $\bar{X}$  =4.30, S.D.=0.61). This innovation will be utilized to manage and promote the cultivation of economic crops within the community.

**Keywords:** promoting, economic crop, innovation, Mae Win Subdistrict, IoT

## บทนำ

การใช้เทคโนโลยีดิจิทัลเพื่อขับเคลื่อนภาคเกษตรกรรมเป็นแนวทางสำคัญของการพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศไทย การพัฒนาเกษตรกรรมและเทคโนโลยีดิจิทัลโดยใช้ความรู้เทคโนโลยีและนวัตกรรมจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตและยกระดับขีดความสามารถของภาคเศรษฐกิจ รวมถึงภาคเกษตรกรรมสมัยใหม่ที่ใช้ข้อมูล และดิจิทัลเป็นฐานในการตัดสินใจ (สำนักงานสภาพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ, 2566) การเชื่อมต่อกับเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT) เพื่อเก็บข้อมูล และวิเคราะห์จัดการเกษตรกรรมแบบแม่นยำจะช่วยให้เกษตรกรสามารถรู้ปัจจัยสำคัญ เช่น ความชื้นของดิน อุณหภูมิสภาพอากาศ ลักษณะของพื้นที่เพาะปลูก เพื่อเลือกพื้นที่ที่เหมาะสมต่อการเพาะปลูกพืชเศรษฐกิจ การใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งในภาคเกษตร ยังสอดคล้องกับทิศทางการพัฒนาในระดับภูมิภาค และระดับจังหวัด โดยให้ความสำคัญกับการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานเทคโนโลยีและนวัตกรรมดิจิทัลเพื่อเพิ่มขีดความสามารถทางเศรษฐกิจของพื้นที่ สร้างมูลค่าเพิ่มและ

รองรับการเปลี่ยนผ่านสู่เศรษฐกิจดิจิทัล (สำนักบริหารยุทธศาสตร์กลุ่มจังหวัดภาคเหนือตอนบน 1, 2568)

พื้นที่ในตำบลแม่วิน อำเภอแม่วาง จังหวัดเชียงใหม่ เป็นพื้นที่หนึ่งที่มีการทำเกษตรกรรม โดยมีสภาพภูมิประเทศเป็นแบบภูเขาสูงมีอากาศเย็น มีปริมาณน้ำเพียงพอต่อการเพาะปลูกตลอดทั้งปี มีการปลูกพืชเศรษฐกิจหลายชนิด เช่น ข้าวโพด พืชผัก ผลไม้เมืองหนาว โกโก้ เป็นต้น (องค์การบริหารส่วนตำบลแม่วิน, 2562) อย่างไรก็ตามเกษตรกรยังประสบปัญหาผลผลิตตกต่ำ สาเหตุหนึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและต้นทุนการผลิตที่สูงขึ้น ซึ่งส่งผลให้เกิดความเสี่ยงด้านผลผลิตไม่สามารถจัดการทรัพยากรอย่างเหมาะสม เกษตรกรยังขาดความรู้ในการบริหารจัดการพื้นที่เกษตรกรรม (สิทธิโชค พรรคพิทักษ์, อรรถวุธ แก้วสีขาว และธนาพล ตรีสกุล, 2564) จากการสัมภาษณ์เกษตรกรในพื้นที่ตำบลแม่วิน จำนวน 10 คน พบว่า ผู้ปลูกพืชเศรษฐกิจยังคงใช้ประสบการณ์เฉพาะตนหรือข้อมูลจากครอบครัวในการเพาะปลูก โดยไม่มีการใช้ข้อมูลด้านดินหรือสภาพแวดล้อมที่ตรวจวัดด้วยเทคโนโลยีดิจิทัล (กลุ่มเกษตรกรบ้านแม่สะป๊อก, สัมภาษณ์, 2566) การนำเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งจึงมีบทบาทสำคัญในการปฏิรูปภาคการเกษตรของไทย หากมีระบบแจ้งเตือนสถานะแวดล้อมทางการเกษตรทันสมัย จะทำให้การเพาะปลูกมีความแม่นยำมากขึ้น (ภูกิจ คงเปี่ยม และธนพล แพร่งกระโทก, 2568)

การวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการพัฒนาระบบนวัตกรรม IoT เพื่อวิเคราะห์พื้นที่ปลูกพืชที่เหมาะสมกับพืชเศรษฐกิจ ระบบจะช่วยตรวจสอบปัจจัยสำคัญในการเพาะปลูก เช่น อุณหภูมิ ความชื้นของอากาศ และดิน ค่า pH ของดิน และสภาพแวดล้อม การพัฒนาเกษตรกรให้สามารถประยุกต์ใช้เทคโนโลยีในการทำเกษตรสมัยใหม่ ตลอดจนการถ่ายทอดองค์ความรู้และเทคโนโลยีช่วยลดความเหลื่อมล้ำเสริมสร้างความเข้มแข็งของเศรษฐกิจฐานราก การดำเนินงานจะศึกษาปัญหาและวิเคราะห์ศักยภาพของเกษตรกร นำมาสู่การพัฒนาแบบต้นแบบที่เหมาะสมกับบริบทของชุมชน โดยมุ่งหวังให้ผลลัพธ์ช่วยยกระดับความสามารถของชุมชนในการใช้นวัตกรรมดิจิทัล เพิ่มประสิทธิภาพในการบริหารจัดการทรัพยากรการเกษตรและสร้างความยั่งยืนในการประกอบอาชีพเกษตรกรรมของชุมชน

### วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อพัฒนาระบบนวัตกรรม IoT สำหรับวิเคราะห์พื้นที่ปลูกพืชที่เหมาะสมในตำบลแม่วิน อำเภอแม่วาง จังหวัดเชียงใหม่
2. เพื่อถ่ายทอดองค์ความรู้และทักษะการใช้ระบบ IoT ทางเกษตรให้กับเกษตรกร และคนในชุมชน

## วิธีการดำเนินการวิจัย

การศึกษาวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยเชิงปฏิบัติการแบบมีส่วนร่วมของชุมชน นักวิจัย และหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง โดยมีขอบเขตการวิจัยดังนี้

### 1. ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

1.1 ประชากร ได้แก่ กลุ่มเกษตรกรผู้เพาะปลูกโกโก้ ในอำเภอแม่วาง จังหวัดเชียงใหม่ จำนวน 200 คน

1.2 กลุ่มตัวอย่าง ได้แก่ เกษตรกรที่เพาะปลูกโกโก้ บ้านแม่สะป๊อก ตำบลแม่วิน อำเภอแม่วาง จังหวัดเชียงใหม่ จำนวน 40 คน โดยการเลือกกลุ่มตัวอย่างด้วยวิธีการเลือกแบบเจาะจง เนื่องจากเป็นกลุ่มเกษตรกรที่มีการเพาะปลูกโกโก้ มีการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ และมีร้านค้าในการจำหน่ายผลิตภัณฑ์จากโกโก้ ซึ่งโกโก้เป็นพืชเศรษฐกิจที่สามารถสร้างรายได้ให้กับชุมชนทั้งการจำหน่ายผลสด การแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์และยังเป็นแหล่งท่องเที่ยวของชุมชน

### 2. เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

2.1 เครื่องมือด้านการพัฒนา คือ ระบบ IoT ซึ่งสร้างสรรค์ ประกอบด้วยเซนเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิ ความชื้นอากาศ และฐานข้อมูลปริมาณน้ำฝน สำหรับการวิเคราะห์ค่าสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมกับการปลูกโกโก้

2.2 เครื่องมือด้านการเก็บรวบรวมข้อมูล คือ แบบสัมภาษณ์ ใช้ในการศึกษาสภาพแวดล้อมและปัจจัยการเพาะปลูก และแบบสอบถามเพื่อประเมินความพึงพอใจต่อการอบรม และการใช้งานระบบ

### 3. วิธีการดำเนินงาน

3.1 ศึกษาสภาพแวดล้อมและปัจจัยการเพาะปลูกโกโก้ โดยวิธีการสัมภาษณ์เชิงลึกกลุ่มเกษตรกรที่ปลูกโกโก้ บ้านแม่สะป๊อก ตำบลแม่วิน อำเภอแม่วาง จังหวัดเชียงใหม่

3.2 การพัฒนาระบบ IoT และการวิเคราะห์พื้นที่ปลูก โดยแบ่งเป็น 4 ขั้นตอนคือ 1) การออกแบบระบบ IoT โดยการสำรวจพื้นที่และนำมาออกแบบงาน 2) การพัฒนาระบบ IoT ทั้งระบบฮาร์ดแวร์และระบบซอฟต์แวร์ 3) การทดสอบระบบ โดยนำไปติดตั้ง และผลลัพธ์จากการใช้งาน 4) การวิเคราะห์ค่าดินเพื่อทราบค่า pH ของดินนำไปใช้ในการเพาะปลูก

3.3 การจัดอบรมถ่ายทอดองค์ความรู้และการประเมินผล

### 4. การเก็บรวบรวมข้อมูล

ข้อมูลปฐมภูมิ ได้แก่ ข้อมูลสภาพแวดล้อมและปัจจัยการเพาะปลูกโดยการศึกษาข้อมูลจากการสัมภาษณ์ของกลุ่มเกษตรกร และข้อมูลทุติยภูมิ ได้แก่ ศึกษาจากเอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ตลอดจนศึกษาข้อมูลจากหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง และเอกสารอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น

### 5. การวิเคราะห์ข้อมูล

ใช้สถิติเชิงพรรณนาในการวิเคราะห์ข้อมูล ได้แก่ ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ใช้รายงานผลความพึงพอใจ โดยมีเกณฑ์เปรียบเทียบคือ (บุญชม ศรีสะอาด, 2560)

| ระดับความพึงพอใจ | ช่วงคะแนน | ระดับความพึงพอใจ | ช่วงคะแนน |
|------------------|-----------|------------------|-----------|
| มากที่สุด        | 4.51-5.00 | น้อย             | 1.51-2.50 |
| มาก              | 3.51-4.50 | น้อยที่สุด       | 1.00-1.50 |
| ปานกลาง          | 2.51-3.50 |                  |           |

### ผลการวิจัย

ผลการวิจัยได้ดำเนินงานตามวัตถุประสงค์และวิธีดำเนินงานวิจัย ได้ผลลัพธ์ดังนี้

#### 1. ศักยภาพแวดล้อมและปัจจัยการเพาะปลูกโกโก้

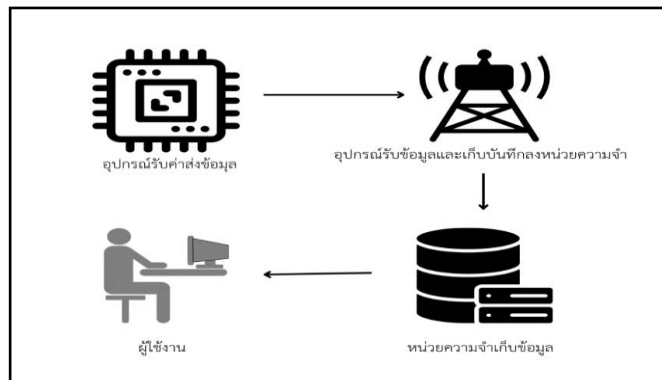
ข้อมูลทั่วไปของเกษตรกรในชุมชน จากการสัมภาษณ์เกษตรกรของบ้านแม่สะป๊อก ตำบลแม่วิน อำเภอแม่วาง จังหวัดเชียงใหม่ พบว่า เกษตรกรเริ่มมีการปลูกสวนโกโก้ ตั้งแต่ ปี พ.ศ. 2560 มีการปลูกกระจายในพื้นที่บ้านแม่สะป๊อก การปลูกต้นโกโก้ 2 ไร่ จะมีประมาณ 100 ต้น โดยมีการปลูกต้นกล้วยไปพร้อมกับการปลูกโกโก้ ซึ่งจะเก็บผลผลิตได้เมื่อต้นอายุประมาณ 2-3 ปี สามารถเก็บผลผลิตได้ประมาณ 100 กิโลกรัม และหากบำรุงรักษาดีก็จะได้ผลผลิตมากขึ้น ปัญหาที่พบในการปลูกโกโก้คือ แมลงศัตรูพืช ตัวด้วงเจาะต้นโกโก้ และกระรอกมากินผลโกโก้ ปัญหาการขาดแคลนน้ำเนื่องจากมีความต้องการน้ำและความชื้นสูงสม่ำเสมอตลอดทั้งปี ควรต้องให้ปริมาณน้ำอย่างเพียงพอและรักษาความชื้นของพื้นดิน ดังนั้นการปลูกพืชขึ้นที่รักษาความชื้นของดินได้ก็จะทำให้โกโก้มีผลผลิตที่ดี

#### 2. การพัฒนาระบบ IoT และการวิเคราะห์พื้นที่ปลูก

##### 2.1 การออกแบบระบบ IoT

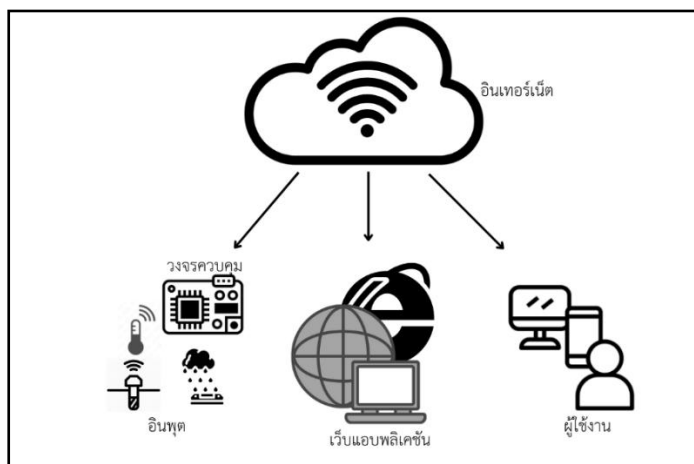
ผู้วิจัยได้สำรวจพื้นที่เพื่อเก็บข้อมูลสภาพแวดล้อมของพื้นที่ทดลอง เพื่อเตรียมติดตั้งระบบ IoT ซึ่งพบว่า พื้นที่ปลูกโกโก้เป็นที่ราบสูงไม่มีระบบไฟฟ้าแต่สามารถใช้ระบบโซล่าเซลล์ได้ สัญญาณเครือข่ายสื่อสารสามารถใช้ระบบ 3G ได้แต่บางครั้งสัญญาณไม่สม่ำเสมอมีขาดหายไปช่วงกลางวันมีอากาศร้อน การเดินทางเข้าพื้นที่สวนโกโก้บางแห่งไม่สามารถใช้รถเข้าไปในพื้นที่ได้จากการสำรวจข้อมูลดังกล่าวจึงนำมาออกแบบระบบ IoT เพื่อเก็บข้อมูลสภาพแวดล้อมพื้นที่ปลูกทั้งแบบออฟไลน์และแบบออนไลน์หากข้อมูลในระบบใดมีข้อผิดพลาดก็สามารถนำข้อมูลอีกระบบมาใช้งานได้ การออกแบบระบบมีดังนี้

แบบที่ 1 การเก็บข้อมูลแบบออฟไลน์ เมื่อเซนเซอร์รับข้อมูลแล้วจะจัดเก็บข้อมูลลงในหน่วยความจำภายในอุปกรณ์ที่ติดตั้ง ผู้ใช้งานต้องเข้าพื้นที่ไปคัดลอกข้อมูลจากหน่วยความจำภายในอุปกรณ์เป็นระยะเพื่อสำรองข้อมูลไว้ แสดงการทำงานดังภาพประกอบ 1



ภาพประกอบ 1 แบบไดอะแกรมแสดงการทำงานของระบบแบบออฟไลน์

แบบที่ 2 การเก็บข้อมูลแบบออนไลน์ โดยอุปกรณ์เซนเซอร์รับข้อมูลแล้วจะส่งข้อมูลผ่านสัญญาณอินเทอร์เน็ตไปจัดเก็บไว้ในเซิร์ฟเวอร์ และใช้เว็บแอปพลิเคชันเป็นเรียกข้อมูลจากเซิร์ฟเวอร์เพื่อแสดงข้อมูลให้กับผู้ใช้งานได้ แสดงการทำงานดังภาพประกอบ 2



ภาพประกอบ 2 ผังไดอะแกรมแสดงการทำงานของระบบแบบออนไลน์

## 2.2 การพัฒนาระบบ IoT

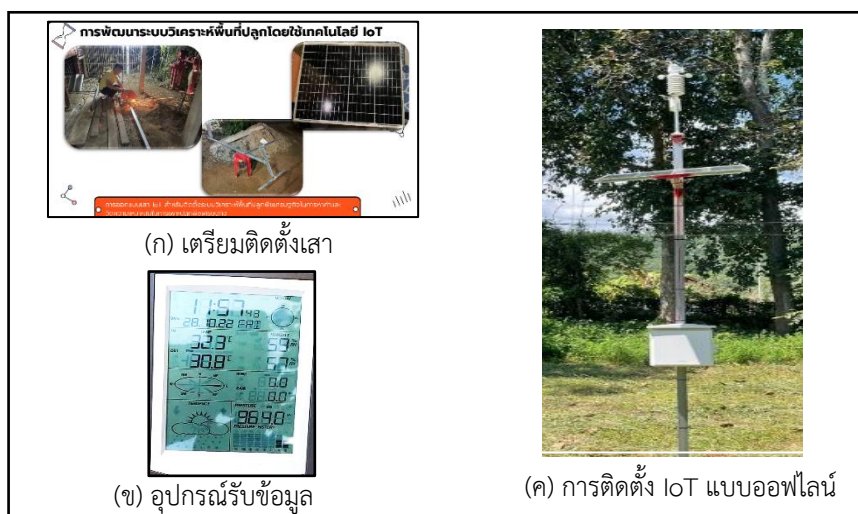
เมื่อออกแบบระบบแล้วนำมาพัฒนาระบบ IoT ทั้งด้านฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ดังนี้

2.2.1 พัฒนาด้านฮาร์ดแวร์ ระบบ IoT ได้นำอุปกรณ์เซนเซอร์ที่ตรวจวัดค่าสภาพแวดล้อมในพื้นที่ปลูกและคุณสมบัติเกณฑ์ในการพิจารณาแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงข้อมูลส่วนประกอบของระบบ

| การตรวจวัด          | ชื่ออุปกรณ์ (ภาษาไทย/อังกฤษ)                                     | คุณสมบัติ/เกณฑ์พิจารณา (Spec)                                                                                                                                                                                         |
|---------------------|------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| อุณหภูมิและความชื้น | เทอร์โม-ไฮโกรมิเตอร์ (Thermo-hygrometer Sensor)                  | ช่วงวัดอุณหภูมิ: เซ็น -40 องศาเซลเซียส ถึง +60 องศาเซลเซียส ความแม่นยำอุณหภูมิ $\pm 0.3$ องศาเซลเซียส<br>ช่วงวัดความชื้น: 0 ถึง 100 %<br>ความแม่นยำความชื้น $\pm 3\%$                                                 |
| ปริมาณน้ำฝน         | เครื่องวัดปริมาณน้ำฝน (Rain Gauge)                               | แบบคนกระดก (Tipping Bucket) ความละเอียด เซ็น 0.2 มิลลิเมตรต่อการกระดก                                                                                                                                                 |
| ความเร็วและทิศทางลม | เครื่องวัดความเร็วลมและทิศทางลม (Anemometer and Wind Vane)       | ช่วงวัดความเร็วลม: เซ็น 0 ถึง 60 m/s (เมตร/วินาที) หรือสูงกว่า ความแม่นยำความเร็วลม $\pm 0.5$ m/s<br>ทิศทางลมวัดได้ 360° วัสดุ/โครงสร้าง ควรแข็งแรงทนทานต่อแรงลมและสภาวะอากาศรุนแรง                                   |
| แสงอาทิตย์          | เซ็นเซอร์วัดรังสีดวงอาทิตย์ (Solar Radiation Sensor/Pyranometer) | หน่วยวัดเป็นวัตต์ต่อตารางเมตร (W/m <sup>2</sup> )<br>ช่วงวัด 0 ถึง 2000 W/m <sup>2</sup> ความถูกต้อง $\pm 5\%$ ควรมีลูกน้ำ (Leveling Bubble) สำหรับตั้งให้อยู่ในระนาบที่ตั้งฉากกับพื้นโลกเสมอ เพื่อความแม่นยำในการวัด |

จากตารางที่ 1 เซนเซอร์จะใช้ในการวัดค่าความชื้นในดิน ปริมาณน้ำฝน ทิศทางของลม อุณหภูมิในอากาศ ความชื้นในอากาศ จากนั้นนำมาประกอบติดตั้งระบบ IoT ซึ่งแบ่งเป็น 2 ระบบคือ การเก็บข้อมูลแบบออฟไลน์ และการเก็บข้อมูลแบบออนไลน์ แสดงดังภาพประกอบ 3-4



ภาพประกอบ 3 ติดตั้งระบบ IoT แบบออฟไลน์

จากภาพประกอบ 3 การเก็บข้อมูลจะเป็นแบบออฟไลน์เนื่องจากพื้นที่ในการติดตั้งระบบ IoT สัญญาณอินเทอร์เน็ตหรือสัญญาณโทรศัพท์มือถือไม่เสถียร จึงใช้การเก็บข้อมูลลงหน่วยความจำของเครื่อง การออกแบบเสา IoT ให้มีความสูง 4 เมตร โดยใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์ ระบบจะต้องถูกบรรจุในกล่องเพื่อป้องกันน้ำฝนความร้อนและป้องกันแมลงต่าง ๆ อุปกรณ์รับข้อมูลเป็นแบบสัมผัสจะบันทึกผลค่าเซนเซอร์ในเครื่องซึ่งสามารถดูค่าต่าง ๆ ได้ทันทีรวมถึงตรวจสอบปริมาณแบตเตอรี่ หากต้องการสำรองข้อมูลสามารถคัดลอกจัดเก็บในสื่อบันทึกข้อมูลได้ การติดตั้งแบบออนไลน์จะแสดงดังภาพประกอบ 4



#### ภาพประกอบ 4 ติดตั้งระบบ IoT แบบออนไลน์

จากภาพประกอบ 4 การเก็บข้อมูลจะเป็นแบบออนไลน์ มีการใช้งานระบบโซล่าเซลล์ในการสำรองระบบไฟฟ้าโดยมีแผงโซล่าเซลล์ จำนวน 1 แผง ขนาด 50W ตัวควบคุมการชาร์จแบตเตอรี่ แบตเตอรี่จำนวน 1 ก้อน ขนาด 12v 12Ah เพื่อส่งกำลังไฟไปยังอุปกรณ์วงจรการควบคุมระบบ กล่องแผงวงจรควบคุมการทำงานของระบบ การทำงานสามารถรับส่งข้อมูลผ่านทางระบบอินเทอร์เน็ตได้โดยใช้ระบบ 3G ผ่านทางระบบผู้ให้บริการโทรศัพท์ จากนั้นแปลงจากสัญญาณ Cellular เป็นสัญญาณ WiFi และรับส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์กับเซิร์ฟเวอร์ที่ใช้รวมข้อมูล

2.2.2 พัฒนาด้านซอฟต์แวร์ ได้ทำการออกแบบฐานข้อมูลและการพัฒนาระบบ โดยการออกแบบฐานข้อมูล จำนวน 4 แฟ้มข้อมูลได้แก่ 1) แฟ้มผู้ใช้งานระบบ 2) แฟ้มอุณหภูมิ 3) แฟ้มความชื้น 4) แฟ้มความชื้นในดิน ดังรายละเอียดตามตารางที่ 2

ตารางที่ 2 Data Sensor

| แหล่งข้อมูล | ชื่อแฟ้มข้อมูล<br>อังกฤษ | ชื่อแฟ้มข้อมูล<br>ภาษาไทย | คำอธิบายแฟ้มข้อมูล      | ชนิดแฟ้มข้อมูล   |
|-------------|--------------------------|---------------------------|-------------------------|------------------|
| D1          | User                     | แฟ้มผู้ใช้งานระบบ         | เก็บข้อมูลผู้ใช้งานระบบ | Master File      |
| D2          | temp                     | แฟ้มอุณหภูมิ              | เก็บข้อมูลอุณหภูมิ      | Transaction File |
| D3          | humi                     | แฟ้มความชื้น              | เก็บข้อมูลความชื้น      | Transaction File |
| D4          | soil                     | แฟ้มความชื้นในดิน         | เก็บข้อมูลความชื้นในดิน | Transaction File |

การพัฒนาเขียนโปรแกรม ในการพัฒนาการเขียนโปรแกรมของระบบนั้น จะแบ่งเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 จะเป็นการเขียนโปรแกรมในส่วนของการควบคุมอุปกรณ์ IoT ส่วนที่ 2 จะเป็นการเขียนโปรแกรมบนแอปพลิเคชัน โดยจะกำหนดข้อมูลที่ส่งมาจากบอร์ดคอนโทรลเลอร์เพื่อทำการส่งข้อมูลไปบนเว็บแอปพลิเคชัน และแอปพลิเคชัน line แสดงเขียนโปรแกรมดังภาพประกอบ 5

```
//ดึงข้อมูล library
#include <ESP8266WiFi.h>
#include <BlynkSimpleEsp8266.h>
#include "DHT.h"
#include <TridentTD_LineNotify.h>
```

(ก) การดึง library การควบคุมต่าง ๆ ที่ใช้

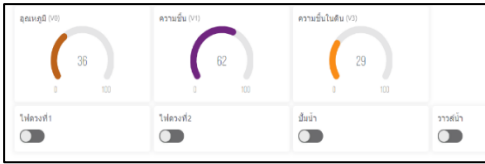
```
//ส่วนเชื่อมต่อ Blynk
#define BLYNK_PRINT Serial
#define BLYNK_TEMPLATE_ID "TMPLtpnmerOB"
BLYNK_CONNECTED() {
  Blynk.syncAll();
}
```

(ข) การเชื่อมต่อแอปพลิเคชัน

```
#define LINE_TOKEN ".."

// wifi ที่ใช้เชื่อมต่อ
char ssid[] = "..";
char pass[] = "..";
```

(ค) การเชื่อมต่อผ่านอินเทอร์เน็ตและ line

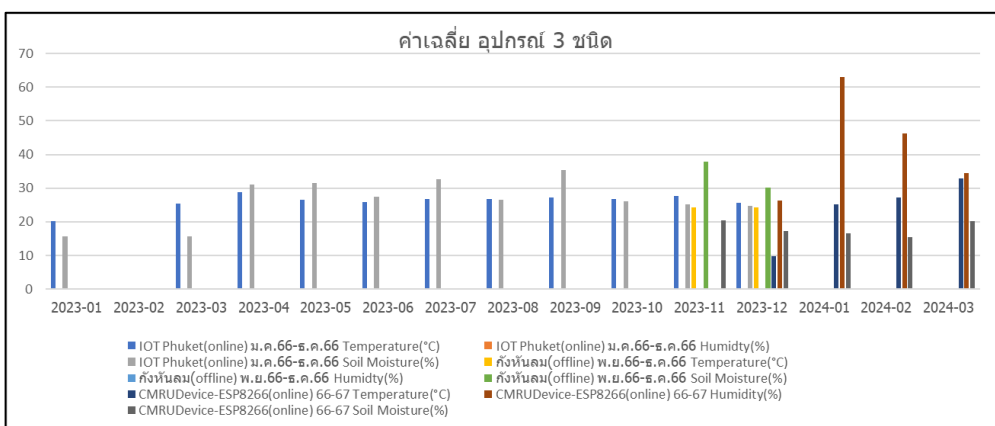


(ง) หน้าแสดงผลและควบคุมการทำงาน

ภาพประกอบ 5 การพัฒนาโปรแกรม

### 2.3 การทดสอบระบบ

ระบบ IOT ที่พัฒนาขึ้น สามารถใช้ในการสนับสนุนข้อมูลสภาพแวดล้อมที่เหมาะสม ในการเพาะปลูกพืช และสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ค่าสภาพแวดล้อมที่เหมาะสม ซึ่งค่าที่เหมาะสมต่อการเพาะปลูกพืชโกโก้ คือ อุณหภูมิต้อง ไม่ต่ำกว่า 10 °C และควรอยู่ระหว่าง 18-32 °C (ไม่ควรสูงเกิน 35 °C) ความชื้นอากาศควรอยู่ระหว่าง 80-90 % ปริมาณน้ำฝนควรอยู่ระหว่าง 1,000-3,000 มิลลิเมตรต่อปี แสดงการรายงานผลข้อมูลเป็นกราฟแสดงดังภาพประกอบ 6 ข้อมูลค่าเฉลี่ยรายเดือนของค่าเซ็นเซอร์จากอุปกรณ์ 3 ตัว ได้แก่ IOT Phuket กังหันลม (Wind Turbine) และ CMRUDevice-ESP8266



ภาพประกอบ 6 แสดงกราฟในการวัดค่าสภาพแวดล้อมภูมิอากาศเฉลี่ย 3 อุปกรณ์

ปัญหาที่พบจากการทดสอบระบบคือ 1) ด้านฮาร์ดแวร์ เนื่องจากพื้นที่มีอากาศร้อนทำให้อุปกรณ์เกิดความเสียหาย เช่น แบตเตอรี่บวม มดแมลงเข้าไปทำรังในกล่องควบคุม จึงทำให้ระบบไม่สามารถทำงานได้ ดังนั้นจึงต้องตรวจสอบจากการดูค่าข้อมูลในระบบออนไลน์เป็นระยะ หรือเข้าพื้นที่เพื่อไปตรวจสอบอุปกรณ์และมีการติดตั้งพัดลมเพื่อระบายความร้อน 2) ด้านซอฟต์แวร์ มักจะเกิดปัญหาเรื่องการจัดเก็บข้อมูล กรณีออนไลน์หากสัญญาณการสื่อสารขาดหายทำให้ข้อมูลบางส่วนไม่สมบูรณ์ และกรณีออฟไลน์ต้องสำรองข้อมูลในสื่อบันทึกข้อมูลเป็นระยะเพื่อป้องกันสูญหายของข้อมูล

### 2.4 การวิเคราะห์ค่าดิน

การวิเคราะห์ดินเพื่อนำผลการวิเคราะห์ดินค่า pH ของดินไปใช้ในการเพาะปลูก เมื่อเปรียบเทียบค่า pH ของดิน โดยใช้ตัวกลางสารละลายที่แตกต่างกัน ได้แก่ น้ำกลั่น, KCl และ  $\text{CaCl}_2$  แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการเปรียบเทียบค่า pH ของดินโดยใช้ตัวกลางของสารละลายที่แตกต่างกัน

| ตัวอย่างดิน   | ความเป็นกรด-ด่าง |      |                   | ปริมาณ<br>อินทรีย์วัตถุ<br>(%โดยหนัก) | ปริมาณ<br>ฟอสฟอรัส<br>(%โดยหนัก) | ปริมาณ<br>โพแทสเซียม<br>(%โดยหนัก) | ปริมาณ<br>ไนโตรเจน<br>(%โดยหนัก) |
|---------------|------------------|------|-------------------|---------------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|
|               | H <sub>2</sub> O | KCl  | CaCl <sub>2</sub> |                                       |                                  |                                    |                                  |
| ดินในสวนโกโก้ | 5.58             | 4.54 | 5.43              | 10.28                                 | 0.001                            | 0.024                              | 0.16                             |

จากตารางที่ 3 เมื่อนำดินมาวิเคราะห์ทางเคมี ได้แก่ ความเป็นกรด-ด่างปริมาณอินทรีย์วัตถุ ปริมาณฟอสฟอรัส ปริมาณโพแทสเซียม และปริมาณไนโตรเจน พบว่า ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 5.58 (H<sub>2</sub>O) 4.54 (KCl) และ 5.43 (CaCl<sub>2</sub>) ปริมาณอินทรีย์วัตถุเท่ากับ 10.28% โดยน้ำหนัก ปริมาณฟอสฟอรัสเท่ากับ 0.001% โดยน้ำหนัก ปริมาณโพแทสเซียมเท่ากับ 0.024% โดยน้ำหนัก และปริมาณไนโตรเจนเท่ากับ 0.16% โดยน้ำหนัก

### 3. การจัดอบรมถ่ายทอดองค์ความรู้และการประเมินผล

การอบรมถ่ายทอดองค์ความรู้การใช้งานระบบ IoT ให้แก่ชุมชน ได้มีการจัดทำวิดีโอขั้นตอนในการใช้ระบบ IoT เพื่อนำไปใช้งาน และจัดอบรมให้ความรู้แก่เกษตรกร ณ องค์การบริหารส่วนตำบลแม่วิน อำเภอแม่วาง จังหวัดเชียงใหม่ โดยผู้เข้าร่วมกิจกรรมเป็นเกษตรกรภายในชุมชนตำบลแม่วิน อำเภอแม่วาง จังหวัดเชียงใหม่ จำนวน 40 คน แสดงดังภาพประกอบ 7



ภาพประกอบ 7 การอบรมถ่ายทอดองค์ความรู้การใช้งานระบบ IoT

หลังการอบรมแล้วได้ประเมินผลความพึงพอใจในการอบรมถ่ายทอดความรู้และการนำไปใช้งานจากกลุ่มเกษตรกรจำนวน 40 คน พบว่า โดยภาพรวมมีความพึงพอใจในระดับมาก ( $\bar{X} = 4.32$ , S.D.=0.55) รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 แสดงผลการประเมินความพึงพอใจและคุณภาพของระบบ จากการอบรม

| หัวข้อที่ประเมิน                                                           | ค่าเฉลี่ย | ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน | ระดับความพึงพอใจ |
|----------------------------------------------------------------------------|-----------|----------------------|------------------|
| ด้านการถ่ายทอดความรู้และการนำไปใช้งาน                                      |           |                      |                  |
| 1. ผู้เข้าอบรมมีความรู้ความเข้าใจ ก่อนการอบรม                              | 3.65      | 0.66                 | มาก              |
| 2. ผู้เข้าอบรมได้รับความรู้ความเข้าใจ หลังการอบรม                          | 4.53      | 0.51                 | มากที่สุด        |
| 3. วิทยากรถ่ายทอดความรู้ได้ถูกต้อง มีความชัดเจน และอธิบายเนื้อหาเข้าใจง่าย | 4.50      | 0.51                 | มาก              |
| 4. วิทยากรตอบคำถามได้ตรงประเด็นชัดเจน                                      | 4.55      | 0.50                 | มากที่สุด        |
| 5. ความเหมาะสมสื่ออุปกรณ์ที่ใช้ในการอบรม                                   | 4.23      | 0.58                 | มาก              |
| 6. การใช้เวลาในการอบรม                                                     | 4.10      | 0.68                 | มาก              |
| 7. สามารถนำความรู้ไปประยุกต์ใช้ในการปฏิบัติงานได้งานเกษตรได้               | 4.38      | 0.54                 | มาก              |
| 8. ผู้อบรมสามารถนำความรู้ที่ได้รับไปเผยแพร่/ถ่ายทอดได้                     | 4.40      | 0.55                 | มาก              |
| 9. ผู้อบรมได้รับประโยชน์ในการอบรมครั้งนี้                                  | 4.43      | 0.55                 | มาก              |
| 10. ความพึงพอใจในการจัดโครงการอบรมโดยภาพรวม                                | 4.30      | 0.52                 | มาก              |
| รวม                                                                        | 4.31      | 0.56                 | มาก              |
| ด้านคุณภาพของระบบ                                                          |           |                      |                  |
| 1. ความพึงพอใจในการใช้งาน                                                  | 4.35      | 0.62                 | มาก              |
| 2. ความสามารถของระบบ ในการนำไปใช้ประโยชน์                                  | 4.45      | 0.50                 | มาก              |
| 3. ความน่าสนใจและเทคนิคที่ใช้ในงาน                                         | 4.35      | 0.53                 | มาก              |
| 4. การจัดวางองค์ประกอบเหมาะสม ใช้งานง่าย ชับซ้อน                           | 4.38      | 0.49                 | มาก              |
| 5. การออกแบบใช้งานในส่วนของการรับข้อมูล                                    | 4.15      | 0.59                 | มาก              |
| 6. การออกแบบใช้งานในส่วนของการประมวลผลข้อมูล                               | 4.33      | 0.58                 | มาก              |
| 7. การออกแบบใช้งานในส่วนของการแสดงผลและการนำไปใช้                          | 4.35      | 0.48                 | มาก              |
| 8. ความสะดวกในการใช้งานโปรแกรม                                             | 4.43      | 0.60                 | มาก              |
| 9. สามารถตอบโจทย์ความต้องการของผู้ใช้                                      | 4.25      | 0.59                 | มาก              |

ตารางที่ 4 (ต่อ)

| หัวข้อที่ประเมิน                           | ค่าเฉลี่ย | ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน | ระดับความพึงพอใจ |
|--------------------------------------------|-----------|----------------------|------------------|
| 10. รูปแบบการใช้งานระบบโดยรวมมีความสมบูรณ์ | 4.25      | 0.54                 | มาก              |
| รวม                                        | 4.33      | 0.55                 | มาก              |
| รวมทั้งสิ้น                                | 4.32      | 0.55                 | มาก              |

จากตารางที่ 4 ผลการประเมินความพึงพอใจต่อการอบรมครั้งนี้ โดยภาพรวมมีความพึงพอใจอยู่ในระดับมาก ( $\bar{X} = 4.32$ , S.D.=0.55) ซึ่งแบ่งเป็น 2 ด้าน คือ 1) ด้านการถ่ายทอดความรู้และการนำไปใช้งาน พบว่า โดยภาพรวมมีความพึงพอใจในระดับมาก ( $\bar{X} = 4.31$ , S.D.=0.56) โดยหัวข้อที่มีลำดับความพึงพอใจจากมากไปน้อย 3 อันดับแรก คือ วิทยากรตอบคำถามได้ตรงประเด็นชัดเจน ( $\bar{X} = 4.55$ , S.D.=0.50) ผู้เข้าอบรมได้รับความรู้ความเข้าใจหลังการอบรม ( $\bar{X} = 4.53$ , S.D.=0.51) วิทยากรถ่ายทอดความรู้ได้ถูกต้อง มีความชัดเจน และอธิบายเนื้อหาเข้าใจง่าย ( $\bar{X} = 4.50$ , S.D.=0.51) ตามลำดับ 2) ด้านคุณภาพของระบบ พบว่า โดยภาพรวมมีความพึงพอใจในระดับมาก ( $\bar{X} = 4.33$ , S.D.=0.55) โดยหัวข้อที่มีลำดับความพึงพอใจจากมากไปน้อย 3 อันดับแรก คือ ความสามารถของระบบในการนำไปใช้ประโยชน์ ( $\bar{X} = 4.45$ , S.D.=0.50) ความสะดวกในการใช้งานโปรแกรม ( $\bar{X} = 4.43$ , S.D.=0.60) การจัดวางองค์ประกอบเหมาะสม ใช้งานง่ายซับซ้อน ( $\bar{X} = 4.38$ , S.D.=0.49) ตามลำดับ

### อภิปรายผล

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาตามวัตถุประสงค์ คือ 1) พัฒนาระบบนวัตกรรม IoT สำหรับวิเคราะห์พื้นที่ปลูกพืชที่เหมาะสม 2) ถ่ายทอดองค์ความรู้และทักษะการใช้ระบบ IoT ทางภาคเกษตรให้กับเกษตรกรและคนในชุมชน ผลการวิจัยพบว่า 1) สภาพแวดล้อมและปัจจัยการเพาะปลูกโกโก้บ้านแม่สะป๊อก ตำบลแม่วิน อำเภอแม่วาง จังหวัดเชียงใหม่ การปลูกต้นโกโก้ 2 ไร่ จะมีประมาณ 100 ต้น อายุต้นประมาณ 2-3 ปีสามารถเก็บผลผลิตได้ประมาณ 100 กิโลกรัม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยเกี่ยวกับการศึกษาต้นทุนและผลตอบแทนของผลิตภัณฑ์โกโก้ในจังหวัดเชียงราย (วรลักษณ์ วรณโณ และนกุล อินทกุล, 2566) โดยมีความแตกต่างพื้นที่ปลูกของชุมชนตำบลแม่วินจะมีการปลูกพื้นที่อื่นเพื่อเพิ่มความขึ้นของดิน 2) การพัฒนาระบบ IoT และการวิเคราะห์พื้นที่ปลูก ได้แบ่งเป็น 3 ขั้นตอน คือ 2.1) การออกแบบระบบ IoT เพื่อเก็บข้อมูลสภาพแวดล้อมในการเพาะปลูกพื้นที่ ได้ออกแบบเป็น 2 ระบบ คือ การเก็บข้อมูลแบบออฟไลน์ โดยจะจัดเก็บข้อมูลลงในหน่วยความจำภายในอุปกรณ์ที่ติดตั้งเพื่อลดปัญหาการสัญญาณอินเทอร์เน็ตที่ไม่เสถียร และการเก็บข้อมูลแบบออนไลน์ โดยอุปกรณ์เซนเซอร์รับข้อมูลแล้วจะส่งข้อมูลผ่านสัญญาณอินเทอร์เน็ตไปจัดเก็บไว้ในเซิร์ฟเวอร์ และใช้เว็บแอปพลิเคชันเป็น

เรียกข้อมูลจากเซิร์ฟเวอร์เพื่อแสดงข้อมูลให้กับผู้ใช้งานได้ ซึ่งสอดคล้องกับการวิจัยระบบแจ้งเตือนสถานะแวดล้อมทางการเกษตรโดยใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งที่มีการส่งข้อมูลแบบกลุ่มเมฆ และแสดงภาพกราฟิกบนหน้าจออุปกรณ์เคลื่อนที่ (สิทธิโชค พรค์พิทักษ์, อรรควุธ แก้วสีขาว และธนาพล ตรีสกุล, 2564) 2.2) การพัฒนาระบบ ได้พัฒนาระบบด้านฮาร์ดแวร์ได้นำอุปกรณ์เซนเซอร์ที่ตรวจวัดค่าสภาพแวดล้อมในพื้นที่ปลูกตรวจวัดอุณหภูมิ ความชื้น ปริมาณน้ำฝน ความเร็วและทิศทางลม ทั้งแบบออนไลน์ และออฟไลน์ตามที่ได้ออกแบบไว้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยการประยุกต์ใช้ IoT ที่มีการใช้ระบบเซนเซอร์หลายรูปแบบในการวัดและควบคุมสภาพแวดล้อมการปลูกพืช (ภูกิจ คงเปี่ยม และธนพล แพร่งกระโทก, 2568) การพัฒนาระบบด้านซอฟต์แวร์ ได้มีการจัดข้อมูลค่าเซนเซอร์ในฐานข้อมูลและเขียนโปรแกรมส่งข้อมูลไปแสดงผลในเว็บแอปพลิเคชันและแอปพลิเคชัน line สอดคล้องกับงานวิจัยการพัฒนาซอฟต์แวร์รหัสเปิดที่ได้มีการประยุกต์ใช้แอปพลิเคชันผ่านระบบเครือข่ายอินเทอร์เน็ต (อิตติศักดิ์ โพธิ์ทอง, ประสิทธิ์ เมฆอรุณ และสิทธิชัย ชูสำโรง, 2562) 2.3) การทดสอบระบบ เมื่อนำระบบ IoT ไปใช้งานแล้วสามารถใช้ในการจัดเก็บข้อมูลสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมในการเพาะปลูกพืชได้ แต่พบปัญหาในการดำเนินการคือ อุปกรณ์มีความเสียหายเนื่องจากอากาศร้อน มีแมลงเข้าไปทำรังในกล่องควบคุม และระบบสัญญาณอินเทอร์เน็ตขาดหายเป็นระยะ ซึ่งงานวิจัยอื่น ก็พบปัญหาเซนเซอร์เนื่องจากเซนเซอร์แต่ละรุ่นรับส่งค่าไม่เท่ากัน แพลตฟอร์มเซิร์ฟเวอร์อาจมีการเปลี่ยนแปลงควรรศึกษาก่อนเลือกใช้งาน (ชัยนันท์ ปัญญาวุฒิส, พิชรี ทิพย์ประชา, ชลธิชา เปี่ยมทองสกุล และนวพล เทพนรินทร์, 2568) 2.4) การวิเคราะห์ค่าดิน เมื่อนำดินมาวิเคราะห์ทางเคมี ได้แก่ ความเป็นกรด-ด่างปริมาณอินทรีย์วัตถุ ปริมาณฟอสฟอรัส ปริมาณโพแทสเซียม และปริมาณไนโตรเจน พบว่า ความเป็นกรด-ด่างเท่ากัน 5.58 (H<sub>2</sub>O) 4.54 (KCl) และ 5.43 (CaCl<sub>2</sub>) ซึ่งจะนำไปปรับปรุงในการเพาะปลูกพืช 3) การจัดอบรมถ่ายทอดองค์ความรู้และการประเมินผล ได้จัดทำวิดีโอการใช้งานระบบ IoT และอบรมการใช้งานให้กับกลุ่มเกษตรกรตำบลแม่วิน ผลการประเมินความพึงพอใจต่อการอบรมครั้งนี้ โดยภาพรวมมีความพึงพอใจอยู่ในระดับมาก ( $\bar{X}$  =4.32, S.D.=0.55) ซึ่งแบ่งเป็น 2 ด้าน คือ 1) ด้านการถ่ายทอดความรู้และการนำไปใช้งาน พบว่า โดยภาพรวมมีความพึงพอใจอยู่ในระดับมาก ( $\bar{X}$  =4.31, S.D.=0.56) 2) ด้านคุณภาพของระบบ พบว่า โดยภาพรวมมีความพึงพอใจอยู่ในระดับมาก ( $\bar{X}$  =4.33, S.D.=0.55) การพัฒนาเกษตรกรให้สามารถประยุกต์ใช้เทคโนโลยีในการทำเกษตรสมัยใหม่ ซึ่งจะเป็นรากฐานในการพัฒนาคนขยายผลทางการเกษตรและสร้างความเข้มแข็งของเศรษฐกิจฐานรากของประเทศ

### ข้อเสนอแนะ

1. ข้อเสนอแนะเพื่อนำผลการวิจัยไปใช้ให้เกิดประโยชน์

1.1 การจัดเก็บข้อมูลสภาพอากาศและการวิเคราะห์ค่าดินในพื้นที่ปลูกโกโก้ สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์การปลูกพืชชนิดอื่นในพื้นที่ใกล้เคียงได้

1.2 ระบบ IoT สามารถนำไปใช้งานเกษตรกรรมกับพื้นที่อื่น

2. ข้อเสนอแนะเพื่อการทำวิจัยในครั้งต่อไป

2.1 การศึกษาบริบทพื้นที่เป็นสิ่งสำคัญ หากอยู่ในพื้นที่ห่างไกลเดินทางลำบาก ระบบอินเทอร์เน็ตไม่เสถียร และมีอากาศร้อนสูงจะมีผลต่อการดูแลรักษาระบบ ควรออกแบบระบบให้มีน้ำหนักเบา ทนทาน และอาจเลือกการเก็บข้อมูลทั้งแบบบันทึกในเครื่องและการจัดเก็บในระบบคลาวด์เพื่อป้องกันข้อมูลสูญหาย

2.2 การใช้เซนเซอร์ตรวจวัดค่าควรเลือกที่มีประสิทธิภาพสูง คงทน เพื่อผลค่าวัดมีความคลาดเคลื่อนน้อย

## เอกสารอ้างอิง

ชัยนันท์ ปัญญาวุฒิส, พัทธี ทิพย์ประชา, ชลธิชา เปี่ยมทองสกุล และนवल เทพนรินทร์. (2568).

การถ่ายทอดเทคโนโลยีและประยุกต์ใช้อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT) ระบบร่อนน้ำอัตโนมัติผ่านแอปพลิเคชันเพื่อยกระดับฟาร์มตัวอย่างสู่ธุรกิจเกษตรชุมชน: กรณีศึกษาฟาร์มตัวอย่างโครงการพระราชดำริ โคก หนอง นา โมเดล ค่ายพระปกเกล้า อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา.

วารสารวิชาการสถาบันการอาชีวศึกษาภาคใต้ 1, 10(1), 13-26.

ธิดาศักดิ์ โพธิ์ทอง, ประสิทธิ์ เมฆอรุณ และ สิทธิชัย ชูสำโรง. (2562). การพัฒนาระบบฟาร์มอัจฉริยะสำหรับเกษตรยุคใหม่ด้วยซอฟต์แวร์รหัสเปิดและอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง. *วารสารเกษตรนเรศวร*, 16(2), 10-17.

บุญชม ศรีสะอาด. (2560) *การวิจัยเบื้องต้น* (พิมพ์ครั้งที่ 10). กรุงเทพฯ: สุวีริยาสาส์น.

ภูกิจ คงเปี่ยม และธนพล แพร่งกระโทก. (2568). สถานการณ์และแนวโน้มการประยุกต์ใช้อินเทอร์เน็ตประสานสรรพสิ่งสำหรับฟาร์มปลูกพืชอัจฉริยะในประเทศไทย. *Journal of Industrial Education*, 24(1), C1-C10.

วรลักษณ์ วรรณโล และ นกุล อินทกุล. (2566). การศึกษาต้นทุนและผลตอบแทนของผลิตภัณฑ์โกโก้กรณีศึกษาวิสาหกิจชุมชนโกโก้เชียงราย. *วารสารบัญชีปริทัศน์ มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย*, 8(2), 60-80.

สิทธิโชค พรหมพิทักษ์, อรรควุธ แก้วสีขาว และธนาพล ตรีสกุล. (2564). การพัฒนาระบบแจ้งเตือนสภาวะแวดล้อมทางการเกษตรโดยใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง กรณีศึกษา มะม่วง. *วารสารวิชาการ “การจัดการเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม”*, 8(1), 60-72.

สำนักงานสภาพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ. (2566). *แผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ฉบับที่ 13 พ.ศ. 2566-2570*.

สำนักบริหารยุทธศาสตร์กลุ่มจังหวัดภาคเหนือตอนบน 1. (2568). *แผนพัฒนากลุ่มจังหวัดภาคเหนือตอนบน 1 (พ.ศ. 2566-2570)*. เชียงใหม่.

องค์การบริหารส่วนตำบลแม่วิน. (2562). *รายงานข้อมูลชุมชนตำบลแม่วิน อำเภอแม่วาง จังหวัด เชียงใหม่*.

# นวัตกรรมในการผลิตมะละกอปลอดภัย Innovations in Safe Papaya Production

รภัทสา จันทาศรี

Rapatsa Janthasri

สาขาเกษตรศาสตร์ คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม

อำเภอเมือง จังหวัดมหาสารคาม

Department of Agriculture, Faculty of Agricultural Technology, Maha Sarakham

Rajabhat University, Maha Sarakham, Thailand

Email: juntasri@hotmail.com

Received : September 29, 2025

Revised : December 25, 2025

Accepted : December 27, 2025

## บทคัดย่อ

การผลิตมะละกอเพื่อความปลอดภัย หรืออาจเรียกเป็นการผลิตมะละกอในระบบอินทรีย์ ซึ่งมีวิธีการปฏิบัติได้หลายแบบ อาทิ การเลือกช่วงเวลาปลูกที่เหมาะสม การจัดการธาตุอาหารและการควบคุมวัชพืช การผลิตมะละกอเพื่อความปลอดภัย สามารถทำได้โดยการปลูกผสมผสานกับพืชชนิดอื่นซึ่งสามารถควบคุมการเกิดโรคและป้องกันแมลงศัตรูพืช การผลิตมะละกอปลอดสาร การผลิตมะละกอรระบบเกษตรอินทรีย์ การผลิตมะละกอตามแนวปฏิบัติที่ดี (GAP) และการผลิตมะละกอในระบบเกษตรยั่งยืน การประยุกต์ใช้รูปแบบใดขึ้นกับสภาพความเหมาะสมของพื้นที่ และเป้าหมายของผู้ผลิตมะละกอ เพื่อเน้นความปลอดภัยของทั้งผู้ผลิตและผู้บริโภค โดยมีผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมน้อยที่สุด

นวัตกรรมการผลิตมะละกอ เพื่อความปลอดภัย โดยการนำภูมิปัญญาพื้นบ้านที่เป็นเสมือนมรดกตกทอดให้กับเกษตรกรรุ่นหลังได้นำเทคนิคเหล่านี้ไปประยุกต์ใช้ให้เข้ากับสภาพแวดล้อม ซึ่งไม่จำเป็นต้องอาศัยสารเคมีในการป้องกันกำจัดโรคแมลง แต่จะเป็นแนวทางช่วยส่งเสริมต่าง ๆ ได้แก่ การปลูกพืชแซม การปลูกพืชตระกูลถั่ว การใช้ปุ๋ยคอก ปุ๋ยหมักและสารไล่แมลงสมุนไพรต่าง ๆ ให้ระบบการผลิตมะละกามีประสิทธิภาพและเพิ่มความปลอดภัย ให้กับผู้ผลิตและผู้บริโภคอย่างยั่งยืน

**คำสำคัญ:** การเกษตรตามแนวปฏิบัติที่ดี (GAP) การผลิตมะละกอเพื่อความปลอดภัย ระบบเกษตรยั่งยืน

## ABSTRACT

Safe papaya production, also known as organic papaya production, involves various practices such as selecting appropriate planting seasons, nutrient management, and weed control. Safe papaya production can be achieved by intercropping with other plant species to control diseases and prevent insect pests. This includes residue-free production, organic agriculture systems, Good Agricultural Practices (GAP), and sustainable agriculture systems. The application of any specific model depends on the suitability of the area and the producer's goals; the priority is the safety of both producers and consumers while minimizing environmental impact.

Innovations in safe papaya production involve integrating local wisdom, a heritage passed down to future generations of farmers, to adapt these techniques to the local environment. This approach eliminates the need to rely on chemicals for disease and pest management. Instead, it employs supportive methods such as intercropping, planting legumes, and using manure, compost, and herbal insect repellents. These practices ensure the papaya production system is efficient and sustainably enhance safety for both producers and consumers.

**Keywords:** Good Agricultural Practices (GAP), safe papaya production, sustainable farming system

## Introduction

Vegetable and fruit growing has long been a part of Thai society. Most rural Thai families grow their own fruits and vegetables for home consumption in their yards, around the house and around their rice fields or other cash crop production areas. Papaya is a multi-use crop. Unripe papaya is mainly used to make somtam, a popular dish for people of all ages and in all parts of the country. Somtam's appealing spicy crunch has made it popular even in other countries and now it is almost as well-known as tomyam goong and pad Thai. Of course, papaya is also a fruit for eating ripe that has good vitamin content and mild laxative qualities. (Janthasri & Chaiyaboon, 2016). Lastly, papaya can be grown for industrial processing to make canned fruit or tomato sauce,

and the papain in papaya sap can be used in the leather tanning and cosmetics industries. Papaya is grown in tropical and subtropical areas all over the world. The places with great potential for increasing papaya production in the future are China and the Middle East. Papaya is easy to grow and grows quickly so it is found at almost every household, especially in northeast Thailand. It can be planted in any season and can flower and produce fruit all year round. It is not bothered by as many insect pests and plant diseases as some other plants are. The main diseases are PRSV and root rot and the main insect pests are aphids and mites, but they normally are only a problem at the end of the rainy season and beginning of the dry season. (Food and Agriculture Organization, 2019).

People all over the world have become increasingly aware of the problems with chemical approaches to agriculture. The overuse of fertilizer, pesticide, fungicide and herbicide can have damaging effects on farmers, consumers and the environment. (Hueso, et al., 2019). More and more consumers are concerned about their health and are demanding safer agricultural products. There is strong demand for pesticide-free or organically grown fruits and vegetables.

Up to now, research on papaya has focused on 5 areas : 1.Control of PRSV 2. Increasing yield and improving fruit quality 3. Producing papaya for the export market 4. Producing papaya for processing industries and 5. Producing papaya for papain extraction. Safe papaya production touches on almost all these areas. The author's personal observation of papaya growing areas in northeast Thailand seemed to show that when papaya was intercropped with other plants it tended to reduce the incidence of PRSV. However, one research study in which papaya was intercropped with mango trees found the opposite. The study was an observation of an 8,000 square meter plantation where 800 Kaek Dam Si Sa Ket variety papayas were grown interspersed with Kaew variety mango trees for 2 years. It was found that the incidence of PRSV was even higher than in non-intercropped papaya plantations. This may have been because the farmer did not provide enough water and fertilizer for the papaya plants and didn't weed, so they were not strong. (Somsri, 2014)

In contrast, another study in which 800 papaya plants were intercropped with custard apple trees on a 6,400 square meter plot found that the incidence of PRSV was reduced by 80% and the farmer gained more income. For comparison, on another papaya plot the papaya plants were not intercropped but were sprayed with an organic

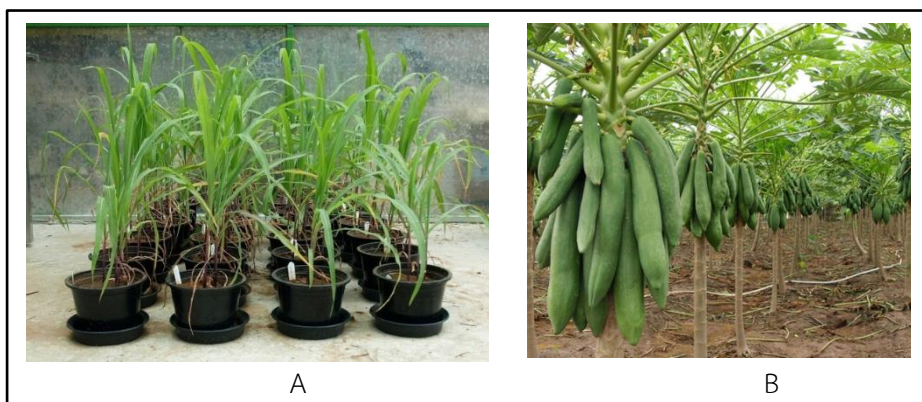
pesticide made from custard apple tree leaf extract, and it turned out this had no positive effect on PRSV incidence. Papaya can be intercropped with other plants to reduce PRSV damage. For instance, bananas are a good choice. This is partly because the banana pseudostems and leaves are mostly made of tissues that contain a lot of water, and when aphids carrying PRSV bite banana plants and suck out their juices, it tends to wash away or dilute the virus. Marigolds, basil and mint are also good choices to plant around the edges of the field and around the bases of papaya plants. Some plants act as a natural barrier, keeping the aphids from entering the papaya plantation. Marigolds are said to help maintain soil moisture and fend off nematodes that could damage the papaya roots. Nematode damage in papaya makes the plants slow growing and stunted with yellow leaves. If nematodes attack the roots before the plant begins to flower, it will never flower. There are also some plants that tend to harbor and invite PRSV-carrying aphids, such as chili pepper, eggplant and cucurbits. These plants should never be planted near papaya plantations. (Janthasri & Chaiyaboon, 2015). The purpose of this article is to compile information related to papaya cultivation or the technologies used to produce safe papaya for the benefit of farmers and other interested parties.

### **Guidelines for safe papaya production.**

#### **1. Plantation area**

Papaya is a tropical plant in the family Caricaceae. It is tree-like but only lives 1 to 3 years. It is the most productive in the first year and fruit production declines after that, so for commercial production most farmers only keep the plants for 2 years. However, for casual household growers they tend to let it keep growing until it dies naturally. For safe papaya production, you should choose a place where PRSV has not been seen. It should be far from residential communities because most households grow papaya, and most of it is infected with PRSV. (Abeyasinghe et al.,2016). The plantation area should be bordered all around by large trees because that is a windbreak and a barrier against aphids. You can also plant trees along the edges or around the sides such as banana, custard apple or rubber trees. There should be a water source that can provide water even in the dry season. A pond on the plantation can be used to store rain water and receive excess water during heavy rains. Papaya does not tolerate

flooding. If the soil is clay, trenches should be dug. If the soil is sandy, it may require more treatment with manure and compost. A research study found that beneficial soil fungus can promote the strong growth and productivity of papaya plants. In an experiment where mycorrhiza were added to the soil, the papaya plants grew taller, had thicker stems, produced more fruit and were more resistant to disease because the fungus helps the plants absorb more nutrients from the soil. (Janthasri, 2021). (Figure 1).



**Figure 1.** A: Corn grown to raise *arbuscular mycorrhiza* for adding to the soil  
B: Papaya grown with *arbuscular mycorrhiza* added

Before planting papaya, it is a good idea to increase the organic matter in the soil by plowing under green manure. Organic matter gives the soil more air spaces that promote good drainage and help the plant roots access nutrients better. Leguminous crops such as peas or beans can be grown and plowed in while they are flowering (about 45-60 days after planting). That is the time they have the highest nitrogen content. Some legumes have a beneficial kind of bacteria called rhizobium growing in their roots in a symbiotic relationship. The rhizobium get carbon and energy from the legume plant, and the legume plant gets easily absorbable nitrogen from the rhizobium. If you are planting a leguminous crop for the first time, it is a good idea to add commercially prepared rhizobium to the soil. After a few years there will be a sufficient population in the soil so you don't need to add more rhizobium bacteria for your legume crop. Green manure helps increase the nitrogen content of the soil and also improves the soil

structure. It is also useful for controlling weed growth and preventing soil erosion. You can mow the legumes before plowing under and spread the chopped dead plant parts on top of the soil after planting. (Janthasri, 2021).

## **2. Season**

Papaya can be grown at any time of the year, but the best planting time varies with the geographical and climatic conditions. If the land is in the highlands or on a plateau, at a higher elevation compared to the flood plains, and the farmer is relying mainly on rain water, then the papaya plants should be transplanted at the beginning of the rainy season. Plentiful rain will reduce the labor input for irrigation. For instance, seeds could be started in July and transplanted in August and then the farmer would be able to harvest fruits starting in January, which is a season when the prices are higher. If the land is in the flood plain area, papaya seedlings should be transplanted in the dry season or the end of the rainy season to avoid flooding. Seeds could be started in January and transplanted in February. The first harvest would be in July. (Janthasri, 2015).

## **3. Maintenance Practices**

**Irrigation systems :** The most popular kinds of irrigation systems are mini sprinklers and drip irrigation. When papaya plants grow larger, high-pressure sprinkler systems that sprinkle from higher up rather than just at the plant bases can be used to help spray the bottoms of the leaves to keep off aphids. When the seedlings are first transplanted, they should be watered every other day or 3-4 times a week. (Estrella-Maldonado et al., 2019) In the first few months they should be watered whenever it doesn't rain for a day. However, the amount of water given each time should not be enough to flood the plantation or pool around the stems, because that may encourage root rot. If they are not given enough water, the papaya plants will be small and stunted. Later, when they start to flower, they should not be allowed to dry out for more than a week. If they do not get enough water the flowers might drop early or might not get fertilized and will not produce fruit, or the fruits will be small. Even if they are watered later they will still suffer the after-effects of the dry spell for quite some time. So it is important to water them every 5 or 6 days. If the plants are watered well during the dry season then usually the fruit produced at that time will be good quality with good flavor. (Janthasri, 2021).

**Plant nutrient management :** Two months after transplanting seedlings you should start to feed them with organic fertilizer supplemented with small amounts of chemical fertilizer. In areas where papaya or other crops have been grown for a long time, the soil

fertility may be depleted. Also in places with sandy or clay soil, it may lack organic matter, so it is very important to add large amounts of manure, compost, and green manure. Usually one kilogram per plant per month is required. Organic growers normally add fermented organic liquid fertilizer every two weeks and also add beneficial microorganisms to the soil. For manure, dry chicken manure is preferable to pig manure or cow manure because it contains more nutrients. (Janthasri & Chaiyaboon, 2016).

Weeding: Weeds are very dangerous, especially when papaya seedlings are small, because the papaya plants need time to establish themselves and grow stronger. The weeds compete with the papaya plants for water and nutrients, and sometimes they attract insect pests and plant diseases. Weeds can be chopped out with a hoe or mowed out and the dead plant parts piled around 50 centimeters from the base of the papaya plants to help retain soil moisture. (Junthasri & Suwanseree, 2022). Organic growers also often grow cover crops, and that is a good way to reduce weeds without using herbicides.

#### **4. Prevent Disease Occurrence**

Growing mixed orchards with many kinds of crops in the same area is a good way to reduce the severity of plant diseases and insect pests. In monocrop orchards the insect pests have a large amount of the food they want, but in mixed orchards there is only a small amount of each kind of food. There are fewer of each kind of plant, so the smell of them will not be so strong as to attract insects from far away. Even if some insects are there to feed on a specific kind of plant, if there is not a large food supply for them, they will not be able to reproduce quickly and their population will not rise quickly. Also, some of the plants may be home to beneficial insects that prey on some of the insect pests. Some of the plants that can be intercropped with papaya and have proven to be useful in controlled studies are banana, custard apple and lemongrass. (Martin, et al., 2019)

Some appropriate cover crops that can be planted before transplanting the papaya seedlings are basil, ivy gourd and Malabar spinach. Vine-type cover plants such as ivy gourd should be allowed to climb part way up the papaya plants to discourage red spiders from nesting in the papaya leaves, but the tips should be nipped back at least once a month so they don't cover too much of the papaya plants. (Janthasri, 2015).

The organic growers at Srisa-asoke Community in Ubol Ratchathani pile dry hay almost a foot deep all over the area for growing papayas before transplanting and plant

banana plants around all four sides of the plantation as well as intercropping with bananas. The hay will slowly decompose, adding humus to the soil. Soon mushrooms come up from the hay. The farmers add large amounts of liquid fermented organic fertilizer to the plantation every week and they don't need to use any chemical fertilizer or pesticide (Anwar et al., 2019). (Figure 2-3).



**Figure 2.** Papaya intercropped with banana at Srisa-asoke Community



**Figure 3.** Papaya intercropped with Asiatic pennywort (*Centella asiatica*) and other herbs

Other plants should be intercropped with papaya seedlings while they are small because it will take 7 to 8 months for them to start producing fruit. In the mean time the farmer can use the land around and between the seedlings to grow something else that will provide food or income, rather than letting the areas go to weed and then

having to expend more labor for removing the weeds. They should be fast growing annual plants such as beans or other vegetables and should only be grown if they don't interfere with the health of the papaya plants. When the papaya plants reach productive age, additional intercropping is not recommended because growing other crops may interfere with the papaya's roots. However, a cover crop like calopogonium, centrosema, or pueraria can be grown to prevent erosion, maintain moisture and add nitrogen to the soil. (Sharma, Mitra, & Saran, 2016).

## **5. Local wisdom and safe papaya production**

Papaya has been grown in Thailand for generations and the popular dish somtam, which uses unripe papaya as the main ingredient, has become a part of the local culinary culture. There are now many variations on somtam with different ingredients added, such as peanut somtam, fermented fish somtam, salted crab somtam, seafood somtam, wild herb somtam, salted egg somtam, pickled crab somtam and even live crab somtam. (Janthasri, Janloon., & Suwanseree, 2017).

### **5.1 Folk wisdom about papain**

Thai cooks have passed down a method for making boiled meat very tender. They add a small unripe papaya to the pot. The reason it works is that the papain in papaya sap is an enzyme that helps break down the proteins in meat, making it softer. Papain is also used in leather tanning. Research by showed that when papaya farmers extract sap from papaya plants for obtaining papain, they can get more sap if they tap the plants in the morning between 8:00 and noon than if they tap them in the afternoon or evening. The plants exude sap at the rate of about 100 milliliters in 5 hours. Papaya plants can be tapped for sap from the age of 5 months up. (Choudhary, 2025).

### **5.2 Use of papaya tips and leaves to lure cherry snails that are a pest in rice fields**

Cherry snails (so named because of the pretty color of their eggs) are a serious pest in rice paddies. One effective way to destroy them is to plant papaya plants around the rice paddies and place papaya leaves and growing tips down in the rice field. The snails will come to feed on the papaya tips and will lay their eggs there or on the papaya plant stems instead of rice plants. Then the farmer can more easily gather the adult snails and eggs and burn them to destroy them. (Janthasri, 2021).

### 5.3 Wrapping with cloth

Some farmers wrap developing papaya fruits in cloth, tying a piece of cloth to the top of the fruit stem and letting it hang down to cover all the fruits (Figure 4). Farmers in the central region tend to use thin white cloth while those in the northeast often use checkered loin cloths. This practice was believed to increase productivity, but the actual benefit is to prevent sunburn, which can cause unsightly brown specks on papayas. (Janthasri, 2015)



**Figure 4.** Cloth wrapping papaya in Thailand

### 5.4 Using papaya leaves as cricket food

Some farmers raise crickets in cement pipes for extra food and income. Papaya leaves are a good additive to the cricket food and they can be obtained for free when the farmers thin out some of the leaves. Crickets survive well on papaya leaves and can be sold every 4 months.

### 5.5 Renewing papaya plants

There is a way to encourage new growth from old papaya plants and make them productive again. These are the steps:

1. During the rainy season, select papaya plants that are healthy and have been productive.

2. Harvest all the remaining fruits, then cut off the top of the plant, cutting the stem to just 50 cm from soil level, and make holes for rain water drainage.

3. New stems will grow up from buds in the old stem.

4. From among the new stems, choose just 2 or 3 strong ones from different sides of the plant so it will be balanced, and cut off the others.

5. Add 15-15-15, 16-16-16 or 32-10-10 fertilizer and manure. Water well on days it doesn't rain and otherwise treat as you would newly transplanted papaya seedlings.

The new stems will start to produce fruit after about 4 months and can continue producing for about 2 years. You can repeat the renewing process once more by cutting down the same plant, but not more than twice (Figure 5).



**Figure 5.** Renewed papaya plant

### 5.6 Intercropping with marigolds

Nematodes have become a problem in some areas of the northeast with sandy loam soil. Nematodes make galls on the papaya roots and then the plant cannot absorb water and nutrients from the soil. It will turn yellow and die. Nematodes can spread around a whole plantation by moving in the soil when it is irrigated. One way to stop nematodes is by intercropping with marigolds. Marigolds synthesize natural chemicals

that give them their characteristic smell, and those chemicals are repellent to nematodes. Marigold flowers can also be sold for additional income. (Janthasri,R., & Chaiyaboon, 2016)

## Conclusion

Safe papaya production can mean an organic growing system, sustainable farming methods, following good agricultural practice or GAP standards, or just reducing the use of agricultural chemicals. Which methods are used depend on the conditions of the growing area and the intentions of the grower, but the main idea is to make papaya growing safe for consumers and the natural environment.

Safe papaya growing methods may include intercropping and the use of manure, compost and herbal insect repellents. These innovations can enable farmers to increase the value of their products by promoting them as safe for consumers and the environment.

## References

- Abeyasinghe, S., Kumari, W.G.S.M., Arachchi, I.M.M., & Dickinson, M. (2016). Occurrence of phytoplasma diseases of papaya in Sri Lanka. *International Society for Horticultural Science. Acta Hortic*, 1111, 25-30. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2016.1111.4>.
- Anwar, M., Rasul, M.G., Ashwath, N., & Nabi, M.D.N. (2019). The potential of utilising papaya seed oil and stone fruit kernel oil as non-edible feedstock for biodiesel production in Australia-a review. *Energy Reports*, 5,280-297. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egy.2019.02.007>.
- Choudhary, R., Kaushik, R., Chawla, P. & Manna, S. (2025). Exploring the extraction, functional properties, and industrial applications of papain from (*Carica papaya*). *Journal of the science of food and agriculture*, 105(3), 1533-154. <https://doi.org/10.1002/jsfa.13776>.
- Estrella-Maldonado, H., Ramírez Amaranta, G., Fuentes Ortiz, G., Góngora-Castillo, E., Peraza-Echeverría, S., Martínez, O., & Santamaría, J.M. (2019). Native *Carica papaya*: developing transcriptome resources to study water-deficit stress.

- International Society for Horticultural Science. Acta Hortic*, 1250, 77-84.  
<https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2019.1250.12>.
- Food and Agriculture Organization– FAO. (2019). *Papaya production*.  
 From <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC/visualize>.
- Hueso, J.J., Salinas, I., Pinillos, V., & Cuevas, J. (2019). Papaya greenhouse cultivation in south-east Spain. *International Society for Horticultural Science. Acta Hortic*, 1250, 1-6. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2019.1250.1>.
- Janthasri, R. (2015). A : Shifting Cultivation Method for Producing Papaya for Unripe Consumption in Northeast Thailand. *Chinese–USA Business Review*, 14(11), 566-573. doi: 10.17265/1537-1514/2015.11.005.
- Janthasri, R. (2021). Extending indigenous knowledge on organic soil management to reduce papaya ringspot virus in Maha Sarakham Province, Thailand. *Prawarun Agricultural Journal*, 18(1), 8-16. <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/pajrmu>.
- Janthasri, R. & Chaiyaboon, W. (2015). Yellow Krang-A new cultivar of papaya for green consumption with tolerance to papaya ringspot virus. *Journal of Horticultural Research*, 23(2), 39-48. doi:10.2478/johr-2015-0015.
- Janthasri, R. & Chaiyaboon, W. (2016). Present Status of Production and Marketing of Papaya for Unripe Consumption in Northeastern Thailand. *International Journal of Agriculture, Environment and Biotechnology*, 9(2),323-332.  
 doi: number: 10.5958/2230-732X.2016.00042.5.
- Janthasri, R., Janloon, S. & Suwanseree, V. (2017). Prominent Traits of Some F1 Hybrid Papaya Lines in Thailand. *Philippine Agricultural Scientist*, 100(1), 16-23.  
 doi :10.62550/RJ1623.
- Junthasri, R., & Suwanseree, V. (2022). Effect of hand pollination to increases yield of papaya (*Carica papaya*) cv. 'yellow krang' grown in Thailand. *The Agriculture Science Society of Thailand*, 55(2), 124 -134. <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/TJAS/article/view/257692>.
- Martin, W., Isaac, W.A.P., Khan, A. & Persad, A.B. (2019). Effect of sustainable fertilizer regime on papaya ('Red Lady' and 'Tainung No. 2') yield parameters. *International Society for Horticultural Science. Acta Hortic*, 1250, 7-14.  
<https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2019.1250.2>.

- Sharma, S.K., Mitra, S.K., & Saran, S. (2016). Papaya production in India-history, present status and future prospects. *International Society for Horticultural Science. Acta Hortic*, 1111, 87-94. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2016.1111.13>.
- Somsri, S. (2014). Current status of papaya production in Thailand. *International Society for Horticultural Science. Acta Hortic*, 1022, 31-45.

## สารบัญ

|                                                                                                                                                                              |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| ■ การศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการผลิตปุ๋ยอินทรีย์อัดเม็ดจากมูลสัตว์<br>และผลต่อการเจริญเติบโตของผักบุ้งจีน.....                                                             | 1   |
| กนกวรรณ ยันตะบุศย์ ภิชญา เสาเวียง ประภัสสร บัวนาค และวีรญา สิงคณิกา                                                                                                          |     |
| ■ ผลกระทบของการเติมโดโลไมท์ต่อสมบัติของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ฐานกากตะกรัน<br>อะลูมิเนียม.....                                                                                    | 15  |
| นางสาวอิชวานี พึ่งพา พัทักษ์ เหล่ารัตนกุล และเบญญา เชิดศิริบุตร                                                                                                              |     |
| ■ การศึกษาผลเฉลยของระบบสมการไอพลัส.....                                                                                                                                      | 39  |
| วิภาวดี มูลไชยสุข                                                                                                                                                            |     |
| ■ การศึกษาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและสารพฤกษเคมีของขมิ้นขาว (นมขมิ้น)<br>สำหรับเป็นส่วนผสมของเครื่องสำอางในการยกระดับสินค้าชุมชนบ้านระกาใต้<br>อำเภอกระสัง จังหวัดบุรีรัมย์..... | 61  |
| ชุลีกานต์ สายเนตร และวิริญรัชญ์ สือออก                                                                                                                                       |     |
| ■ การพัฒนาระบบจองใบอนุญาตการประชุมออนไลน์แบบอัจฉริยะ : นวัตกรรมเทคโนโลยี<br>สารสนเทศเพื่อประหยัดงบประมาณและเพิ่มประสิทธิภาพองค์กร.....                                       | 75  |
| นโรดม กิตติเดชาบุภาพ นายอาทิตย์ ดือราโซ และภูริกรทรัพย์ เดชพิพัฒน์ประชา                                                                                                      |     |
| ■ การส่งเสริมการปลูกพืชเศรษฐกิจด้วยนวัตกรรม IoT เชิงสร้างสรรค์เพื่อวิเคราะห์พื้นที่<br>ปลูกพืชที่เหมาะสมในตำบลแม่วิน อำเภอแม่วาง จังหวัดเชียงใหม่.....                       | 91  |
| ชนินทร์ มหัทธนะชัย และบุษราภรณ์ มหัทธนะชัย                                                                                                                                   |     |
| ■ นวัตกรรมในการผลิตมะละกอปลอดภัย.....                                                                                                                                        | 107 |
| รภัสสา จันทาศร                                                                                                                                                               |     |

## สารบัญ

- การศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการผลิตปุ๋ยอินทรีย์อัดเม็ดจากมูลสัตว์  
และผลต่อการเจริญเติบโตของผักบุ้งจีน.....1  
กนกวรรณ ยันตะบุศย์ ภัชญา เสาเวียง ประภัสสร บัวนาค และวีรญา สิงคณิกา
- ผลกระทบของการเติมโดโลไมท์ต่อสมบัติของวัสดุชีวพอลิเมอร์ฐานกากตะกอน  
อะลูมิเนียม.....15  
นางสาวอชวานี พึ่งพา พัททิกษ์ เหล่ารัตนกุล และเบญญา เชิดพิริญกร
- การศึกษาผลเฉลยของระบบสมการพลล์.....39  
วิภาวดี มูลไชยสุข
- การศึกษาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและสารพฤกษเคมีของขมิ้นขาว (นมขมิ้น)  
สำหรับเป็นส่วนผสมของเครื่องสำอางในการยกระดับสินค้าชุมชนบ้านระกาใต้  
อำเภอกระสัง จังหวัดบุรีรัมย์.....61  
ชุลีกานต์ สายเนตร และวีรณัฐ ธีรออก
- การพัฒนาระบบจองใบอนุญาตการประชุมออนไลน์แบบอัจฉริยะ : นวัตกรรมเทคโนโลยี  
สารสนเทศเพื่อประหยัดงบประมาณและเพิ่มประสิทธิภาพองค์กร.....75  
นโรดม กิตติเดชาบุภาพ นายอาทิตย์ ดือราโซ และภูริกรพิทย์ เดชพิพัฒน์ประชา
- การส่งเสริมการปลูกพืชเศรษฐกิจด้วยนวัตกรรม IoT เชิงสร้างสรรค์เพื่อวิเคราะห์พื้นที่  
ปลูกพืชที่เหมาะสมในตำบลแม่วิน อำเภอแม่วาง จังหวัดเชียงใหม่.....91  
ชนินทร์ มหัทธนะชัย และบุษราภรณ์ มหัทธนะชัย
- นวัตกรรมในการผลิตมะละกอลอดภัย.....107  
รภัสสา จันทาศร

# Journal of Science and Technology Buriram Rajabhat University

วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์



ปีที่ 9  
ฉบับที่ 2

เดือน กรกฎาคม - ธันวาคม 2568

ISSN 2774-0757 (Online)

มหาวิทยาลัย  
ราชภัฏบุรีรัมย์

คณะวิทยาศาสตร์  
Faculty of  
Science