

วารสาร

# วิทยาศาสตร์ และ เทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

ปีที่ 42 ฉบับที่ 4 กรกฎาคม - สิงหาคม 2566

JOURNAL OF SCIENCE AND TECHNOLOGY  
MAHASARAKHAM UNIVERSITY  
INDEXED IN

ISSN (Print Edition) : 1686-9664  
ISSN (Online Edition) : 2586-9795



ขอขอบคุณภาพจาก : รองศาสตราจารย์ ดร. สุรพล แสนสุข  
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม



# วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

## วัตถุประสงค์

วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม จัดทำขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเป็นแหล่งเผยแพร่ผลงานทางวิชาการที่มีคุณภาพของนักวิชาการทั้งในและต่างประเทศ โดยเผยแพร่บทความวิจัย (research article) บทความปริทัศน์ (review article) ในสาขาวิชาต่างๆ ได้แก่ คณิตศาสตร์ วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี วิศวกรรมศาสตร์ เกษตรศาสตร์ แพทยศาสตร์ วิทยาศาสตร์สุขภาพ และสหวิทยาการด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

## เจ้าของ

มหาวิทยาลัยมหาสารคาม  
สำนักงานกองบรรณาธิการ  
กองส่งเสริมการวิจัยและบริการวิชาการ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม  
ตำบลขามเรียง อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150  
โทรศัพท์ภายใน 1754 โทรศัพท์โทรสาร 0-4375-4416

## ที่ปรึกษา

อธิการบดีมหาวิทยาลัยมหาสารคาม  
ศาสตราจารย์ ดร.วิสุทธิ์ ไบไม่  
ศาสตราจารย์ ดร.วิชัย บุญแสง  
ศาสตราจารย์ ดร.พีระศักดิ์ ศรีนิเวศน์

## บรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร.ปรีชา ประเทพา

## ผู้ช่วยบรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร.ไพโรจน์ ประมวล  
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม  
ศาสตราจารย์ ดร.ศิริธร ศิริอมรรพรรณ  
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม  
ศาสตราจารย์ ดร.อนงค์ฤทธิ์ แข็งแรง  
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม  
รองศาสตราจารย์ นายสัตวแพทย์ ดร.วรพล เองวานิช  
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม  
รองศาสตราจารย์ ดร.วัลยา สุทธิขำ  
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม  
รองศาสตราจารย์ ดร.อวิชัย กุมพล  
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมนึก พ่วงพรพิทักษ์  
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

## กองบรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร.ทวีศักดิ์ บุญเกิด  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ศาสตราจารย์ ดร.ละอองศรี เสนาะเมือง  
มหาวิทยาลัยขอนแก่น  
ศาสตราจารย์ ดร.ปราณี อานแป๊ะ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ศาสตราจารย์ ดร.นิวัฒน์ เสนาะเมือง  
มหาวิทยาลัยขอนแก่น  
ศาสตราจารย์ ดร.วงศา เล้าหศิริวงศ์  
มหาวิทยาลัยขอนแก่น  
ศาสตราจารย์ ดร.ขวัญใจ กนกเมธากุล  
มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ศาสตราจารย์ นายแพทย์ศิริเกษม ศิริลักษณ์  
มหาวิทยาลัยนครสวรรค์  
รองศาสตราจารย์ ดร.สุนันท์ สายกระสุน  
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม  
รองศาสตราจารย์ ดร.สุวรรณา บุญยะสิทธิ์  
มหาวิทยาลัยขอนแก่น  
รองศาสตราจารย์ ดร.ฉันทนา อารมย์ดี  
มหาวิทยาลัยขอนแก่น  
รองศาสตราจารย์ ดร.บุญจง ขาวสิทธิวงษ์  
สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์  
รองศาสตราจารย์ ดร.พรเทพ ถนนแก้ว  
มหาวิทยาลัยขอนแก่น  
รองศาสตราจารย์ ดร.นฤมล แสงประดับ  
มหาวิทยาลัยขอนแก่น  
รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต บุญปก  
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม  
รองศาสตราจารย์เทอดศักดิ์ คำเหม็ง  
มหาวิทยาลัยนครพนม  
รองศาสตราจารย์ยืน ภู่วรรณ  
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์  
รองศาสตราจารย์ นายสัตวแพทย์ ดร.ณัฐพล ภูมิพันธุ์  
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นพรัตน์ พุทธกาล  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนุชา เพียรชนะ  
มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เสกสรร สุขะเสนา  
มหาวิทยาลัยนครสวรรค์  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วัลย์พร ทองเจริญบัวงาม  
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อลงกรณ์ ละม่อม  
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม  
อาจารย์ เกษัชกร ดร.รักษิณดา วัฒนาลัย  
มหาวิทยาลัยสยาม  
Dr.Adrian Roderick Plant  
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

## เลขานุการ

ผู้อำนวยการกองส่งเสริมการวิจัยและบริการวิชาการ

## ผู้ช่วยเลขานุการ

พิศกรวิไล รุ่งวิสัย  
จิรรัตน์ ภูสีฤทธิ

## กำหนดเผยแพร่

ปีละ 6 ฉบับ  
ฉบับที่ 1 มกราคม-กุมภาพันธ์  
ฉบับที่ 2 มีนาคม-เมษายน  
ฉบับที่ 3 พฤษภาคม-มิถุนายน  
ฉบับที่ 4 กรกฎาคม-สิงหาคม  
ฉบับที่ 5 กันยายน-ตุลาคม  
ฉบับที่ 6 พฤศจิกายน-ธันวาคม

บทความและความคิดเห็นในวารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม เป็นความคิดเห็นของผู้เขียน กองบรรณาธิการไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป และบทความในวารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สงวนสิทธิ์ตามกฎหมายไทย การจะนำไปเผยแพร่ต้องได้รับอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษรจากกองบรรณาธิการเท่านั้น

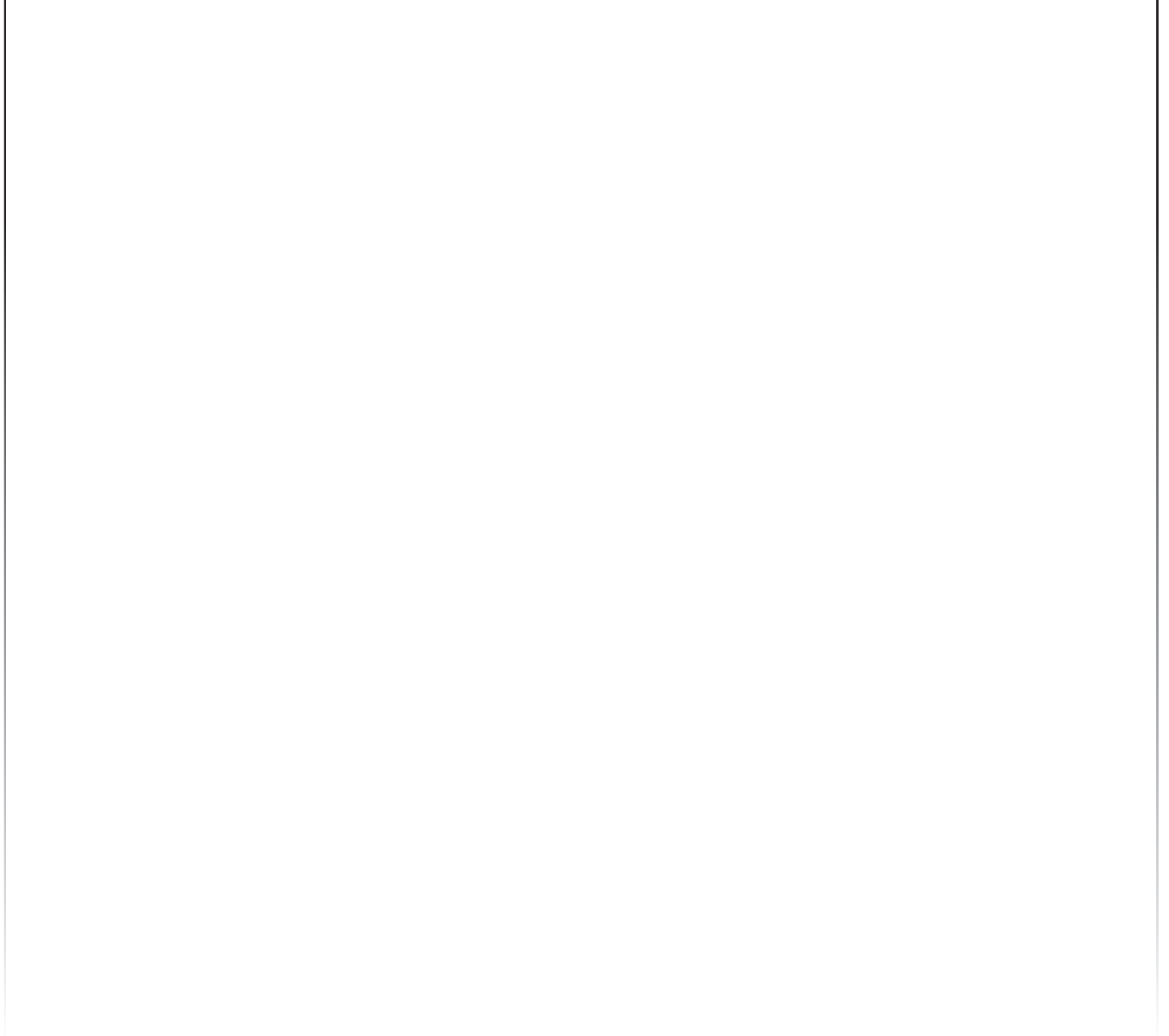
## บทบรรณาธิการ

สำหรับ วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ฉบับนี้ ทางกองบรรณาธิการได้นำภาพของพืชสกุล “เปราะทอง” ชนิดใหม่ของโลก ซึ่งนักวิจัยของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เป็นผู้ค้นพบระหว่างศึกษาความหลากหลายของพืชวงศ์ขิงในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของไทย โดยตั้งชื่อภาษาไทย และ ชื่อวิทยาศาสตร์ ว่า เปราะ ทองศรีสุนทร และ *Cornukaempferia srisumoniae* P. Saensouk, Saensouk & Boonma ตามลำดับ มาให้ผู้อ่านและผู้สนใจได้รับทราบข้อมูลสำหรับพืชชนิดนี้มีลักษณะทางพฤกษศาสตร์ คือ มีเหง้าแบบเจริญออกทางด้านข้าง (sympodial rhizome) โดยเนื้อด้านในเหง้ามี 2-3 ชั้น มีกลิ่นหอมอ่อนๆ และมีรสขม ระบบรากเป็นแบบรากฝอยและมีรากสะสมอาหาร (tuberous roots) กาบใบเรียงสลับ มีลิ้นใบสั้นและบาง ปลายแยกเป็นสองพู แต่ละพูปลายโค้งกลมหรือปลายตัดตรง ใต้ใบมีขน ช่อดอกเกิดกลางกลุ่มใบ โดยถูกหุ้มด้วยกาบของใบที่อยู่ด้านในสุด เนื่องจากมีก้านช่อดอกที่สั้นมาก ใบประดับรูปใบหอกหรือรูปไข่ ปลายแหลม แฉกหลอด กลีบดอกรูปใบหอกหรือรูปขอบขนาน ปลายรูปค้อม เกสรเพศผู้ที่เป็นหมันรูปไข่กลับแคบหรือรูปหอกกลับ ปลายโค้งมน สีเหลืองอมส้ม กลีบปากสีเหลืองอมส้มไปจนถึงสีส้ม และมีขีดหรือจุดสีแดงที่ส่วนฐานของกลีบ เกสรเพศผู้มีก้านชูอับเรณูสั้น และแบน สีเหลืองอ่อนไปจนถึงสีเหลืองเข้ม อับเรณูยาวปลายโค้ง สีเหลือง ยอดเกสรเพศเมียมีขนครุย รังไข่รูปทรงรีหรือรูปทรงไข่กลับ ผิวมีขน ปัจจุบันประโยชน์ของพืชชนิดนี้ คือ นิยมนำมาปลูกเป็นไม้ประดับ ไม้กระถางสะสม สำหรับผู้ที่สนใจในพืชวงศ์นี้

รองศาสตราจารย์ น.สพ.ดร.วรพล เองวานิช

ผู้ช่วยบรรณาธิการ

วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม





## Academic Articles

### Computer and Information Technology

การเรียนรู้ของเครื่องในการพิสูจน์ตัวตนด้วยชีวมาตร

97

#### Machine learning in biometric authentication

สุวิมล วงศ์สิงห์ทอง, จุฑามาส ไพบุญย์ศักดิ์ และ ทรงพล นครเศรษฐ์เรืองศักดิ์

Suwimon Vongsingthong, Juthamas Paiboonsak and Songpon Nakaresruengsak

TMAC: โพรโทคอลชั้นแมคเพื่อการสื่อสารระยะไกลสำหรับโพรโทคอลเอ็มคิวทีบีบนเครือข่ายลอรา

108

#### TMAC: A telemetry MAC protocol for MQTT over LoRa networks

ธงชัย เจือจันทร์, ทวีวัฒน์ มูลจัต และ เอกธนาช เหลืองศิริวรรณ

Thongchai Chuachan, Taweewat Moonjat and Aktanat Luengsirivan

## Research Articles

### Chemistry

ผลของระดับกลีเซอรินต่อคุณภาพฟิล์มย่อยสลายได้จากแป้งข้าวหอมมะลิ

118

#### Effects of glycerin level on quality of biodegradable film from thai jasmine rice flour

ประยูร จอมหล้าพีรติกุล, ละมุล วิเศษ, อาภาภรณ์ จอมหล้าพีรติกุล, ภูชิสส์ ตันวานิชกุล และ ชัยณรงค์ หล่มช้างคำ

Prayoon Jomlaperatikul, Lamul Wiset, Apapon Jomlaperatikul, Bhuchiss Tanwanichkul and Chainarong Lomchangkum

### Environmental Science

การผสมผสานวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเพื่อเป็นแหล่งผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพ

127

#### Blending agricultural residue as a source for biofuel production

ปัทมทัต ลือโสภา และ วิจิตรา สิงห์หิรัญนุสรณ์

Pannatat Luesopa and Wichitra Singhirunnusorn

### Physical Science

การศึกษาคาบการโคจรและรัศมีของดาวเคราะห์นอกระบบสุริยะ WASP-10b

138

#### Study on the orbital period and radius of WASP-10b exoplanet

ทิตลา พรแสน, สุมินทร์ญา เจือเงิน, พัฒนพงษ์ จำรัสประเสริฐ, ธนวัฒน์ รังสูงเนิน และ สมานชาญ จันทร์เอี่ยม

Titala Pornsan, Suminya Chueangoen, Patthanapong Jumrusprasert, Thanawat Rangsungnoen and Smanchan Chandaiam



# การเรียนรู้ของเครื่องในการพิสูจน์ตัวตนด้วยชีวมาตร

## Machine learning in biometric authentication

สุวิมล วงศ์สิงห์ทอง<sup>1\*</sup>, จุฑามาส ไพบูลย์ศักดิ์<sup>2</sup> และ ทรงพล นครเศรษฐ์ศักดิ์<sup>3</sup>  
Suwimon Vongsingthong<sup>1\*</sup>, Juthamas Paiboonsak<sup>2</sup> and Songpon Nakaresruengsak<sup>3</sup>

Received: 29 August 2022 ; Revised: 24 October 2022 ; Accepted: 28 December 2022

### บทคัดย่อ

ไบโอเมตริกซ์ เป็นนวัตกรรมที่มีการพัฒนาอย่างรวดเร็วในยุคที่ปัญญาประดิษฐ์แพร่หลาย โดยอัตลักษณ์ดิจิทัลของมนุษย์ที่นิยมใช้ในการพิสูจน์ตัวตนในอุปกรณ์ทั่วไปและอุปกรณ์เคลื่อนที่ ได้แก่ ลายนิ้วมือ ม่านตา และใบหน้า ด้วยความเป็นเอกลักษณ์และความสะดวกในการใช้งานที่ให้ความปลอดภัยและความรวดเร็วในการทำรายการ ทั้งยังเป็นการเพิ่มความมั่นใจให้กับผู้ทำธุรกรรมออนไลน์และผู้ใช้อุปกรณ์เคลื่อนที่ในยุคปกติใหม่ จนรหัสผ่านเพื่อพิสูจน์ตัวตนแบบดั้งเดิมได้รับความนิยมน้อยลง การทำงานของระบบการพิสูจน์ตัวตนแบบไบโอเมตริกซ์ใช้เทคนิคการประมวลผลภาพและการจดจำรูปแบบ คุณภาพของภาพนำเข้าจึงมีผลต่อประสิทธิภาพของระบบอย่างมาก ความท้าทายที่สำคัญในการประมวลผลของระบบเกิดจากการนำเข้าภาพที่มีสัญญาณรบกวน ตัวอย่างทางพยาธิสภาพที่ไม่ดี และสภาพแวดล้อมที่ยากต่อการควบคุม ดังนั้น การบูรณาการการเรียนรู้ของเครื่องเข้ากับระบบพิสูจน์ตัวตนแบบไบโอเมตริกซ์จึงเป็นนวัตกรรมทางเลือกที่ได้รับความนิยมในการเพิ่มความชาญฉลาดและประสิทธิภาพของกระบวนการตรวจสอบความถูกต้อง ขณะเดียวกันยังช่วยลดเวลาในการประมวลผล และลดกระบวนการที่ซับซ้อนโดยไม่ต้องปรับแก้โปรแกรม บทความวิชาการนี้จึงจัดทำขึ้นเพื่อประเมินจุดแข็ง และจุดอ่อนของไบโอเมตริกซ์ข้างต้น โดยนำเสนอหลักฐานเชิงประจักษ์เกี่ยวกับความก้าวหน้าในการบูรณาการการเรียนรู้ของเครื่องเข้ากับระบบพิสูจน์ตัวตนแบบไบโอเมตริกซ์ ประโยชน์ที่ได้ คือ การให้ข้อมูลทางเลือกที่เหมาะสม คุ่มค่า และมีประสิทธิภาพสำหรับผู้ที่กำลังมองหาเทคโนโลยีรักษาความปลอดภัยในการทำธุรกรรมต่างๆ เช่น การจองที่พัก การทำรายการบัญชีธนาคาร การขอรับสวัสดิการจากรัฐ การรับคำขอเป็นเพื่อนบนโซเชียลมีเดีย หรือการมีปฏิสัมพันธ์อื่นๆทางออนไลน์

**คำสำคัญ:** การเรียนรู้ของเครื่อง ไบโอเมตริกซ์ ระบบพิสูจน์ตัวตน อัตลักษณ์ดิจิทัล

### Abstract

Within the artificial intelligence rebellion, barely any innovation has been meliorated as quickly as biometrics. Fingerprint, iris, and face are popular digital identities, routinely integrated into common devices and portable gadgets to empower a quick and secure authentication. The uniqueness and ease of use of biometrics have subrogated traditional authentication, such as password and powered up the confidence of users conducting online transactions and using mobile devices in the new normal era. The authentication systems are actuated by image processing and pattern recognition techniques. The performance of these systems are highly affected by the quality of the acquired input where noisy images, poor pathological samples, and less controlled surroundings are major challenges to overcome. An innovative and attractive alternative is the machine learning based authentication. The intelligence and efficiency of authentication process can be increased while processing time and complication processes are lessen without program

<sup>1</sup> สาขาวิชาธุรกิจวิศวกรรม คณะวิทยาการจัดการ สถาบันวิทยาการจัดการแห่งแปซิฟิก วิทยาเขตนิมิตใหม่ ปทุมธานี 12150

<sup>2</sup> สาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศและการจัดการ คณะบริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยเกริก กรุงเทพฯ 10220

<sup>3</sup> สาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี วิทยาลัยเซาธ์อีสท์บางกอก กรุงเทพฯ 10260

<sup>1</sup> Department of Engineering Business, Faculty of Management Science, Pacific Institute of Management Science, Nimitmai Campus, Pathum Thani 10220, Thailand

<sup>2</sup> Department of Information Technology and Management, Faculty of Business Administration, Krirk University, Bangkok 10220, Thailand

<sup>3</sup> Department of Information technology, Faculty of Science and Technology, Southeast College Bangkok, Bangkok, 10260, Thailand

\* Corresponding Author, e-mail: suwimonv@yahoo.com



adjustment. Therefore, this academic article was composed to evaluate the strengths and weaknesses of the top three aforementioned biometrics. Empirical evidences on the breakthrough of machine learning based authentication systems were presented. The benefits lie in providing solutions for those who are looking for the appropriate, cost-effective and efficient security technology for booking accommodation with a host, accessing bank account, applying for government benefits, accepting a new friend request on social media or any online interactions.

**Keywords:** Authentication, Biometrics, Digital Identity, Machine Learning

## บทนำ

การระบาดของ COVID-19 ที่เริ่มขึ้นตั้งแต่ต้นปี พ.ศ.2563 ส่งผลให้ผู้คนปรับเปลี่ยนพฤติกรรมการใช้ชีวิตประจำวัน ลดการทำกิจกรรมนอกบ้าน เช่น เดินทาง ทำงาน เดินทางซื้อสินค้า รับประทานอาหารในร้าน เป็นการใช้เวลาในบ้านและห้องไซเบอร์เสปสมากขึ้น อุตสาหกรรมดิจิทัลจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งต่อการทำกิจกรรมดังกล่าวเพื่อยืนยันว่าตนเองเป็นผู้ใช้ที่ถูกต้องและได้รับอนุญาตให้ทำธุรกรรมนั้น โดยอุตสาหกรรมดิจิทัลเป็นได้ทั้ง รหัสผู้ใช้ รหัสผ่าน ภาพถ่าย หรืออุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ เช่น บัตร ATM สมาร์ทการ์ด และโทรศัพท์เคลื่อนที่ แม้สิ่งเหล่านี้มีความสำคัญต่อการรักษาความปลอดภัย แต่ก็เพิ่มความยุ่งยากในการจดจำหรือพกพา ทำให้เอกลักษณ์ทางชีวภาพของมนุษย์ หรือไบโอเมตริกซ์ (Biometrics) ที่ให้ทั้งความสะดวกสบาย และความแม่นยำในระดับสูง กลายเป็นทางเลือกต้นๆ ในการพิสูจน์และยืนยันตัวตน (Authentication) ที่ได้รับความนิยม เพราะช่วยแก้ปัญหาการลืมรหัสผ่าน และ token พิสูจน์ตัวตนสูญหาย (Ali, 2021; สุวิมล วงศ์สิงห์ทอง, 2565)

ไบโอเมตริกซ์ถูกนำมาใช้ในกระบวนการพิสูจน์ตัวตนที่ต้องการความถูกต้องและความปลอดภัยในระดับสูง ตัวอย่างเช่น สายการบิน Delta Air Lines ในรัฐแอตแลนตา สหรัฐอเมริกา และสายการบินเครือข่าย นำเทคโนโลยีจดจำใบหน้า (Face Recognition) มาให้ผู้โดยสารเช็คอินผ่านตู้บริการแบบเรียลไทม์ ทำให้ผู้โดยสารเดินทางผ่านสนามบินได้อย่างรวดเร็วแบบไร้รอยต่อ (Lardinois, 2021) ธนาคาร Seven ประเทศญี่ปุ่น (Seven Bank, 2019) ใช้เทคโนโลยีจดจำใบหน้ามาเพิ่มความปลอดภัยให้กับผู้ใช้บริการ ATM ที่ตู้กดเงินรถไฟรางเบาแดลลัส (Dallas Area Rapid Transit: DART) ในนอร์ทเท็กซัส สหรัฐอเมริกา (Shepard, 2016) ใช้เทคโนโลยีจดจำใบหน้ามาพิสูจน์ตัวตนผู้ใช้บริการขนส่งสาธารณะเพื่อให้บริการได้อย่างครอบคลุมตั้งแต่การจองตั๋ว การจัดเก็บข้อมูลความต้องการพิเศษของผู้โดยสาร จนถึงเชื่อมต่อข้อมูลประวัติการรักษาพยาบาลของผู้โดยสารให้กับโรงพยาบาล หรือสถานี่ตำรวจเพื่อขอความช่วยเหลือกรณีฉุกเฉิน

แนวทางการเพิ่มระดับความปลอดภัยให้สูงขึ้นสามารถทำได้โดยการเพิ่มปัจจัยในการพิสูจน์ตัวตน ดังเช่น สำนักงานสอบสวนกลางสหรัฐ (Federal Bureau of

Investigation: FBI) (Seffers, 2020) และองค์การตำรวจอาชญากรรมระหว่างประเทศ (International Criminal Police Organization: Interpol) ใช้ปัจจัยในการยืนยันตัวตนที่ประกอบด้วยลายนิ้วมือ ม่านตา ใบหน้า ท่าทางการเดิน และเสียง เพื่อสืบค้นและตรวจสอบประวัติอาชญากรรม (Macdonald, 2022) ผู้ผลิตอุปกรณ์ IoT (Internet of Things) เช่น Google Home, Alexa และ Siri ใช้เทคโนโลยีการจดจำเสียงมาผสมผสานกับเทคโนโลยีการจดจำใบหน้า เพื่อเปิดไฟ หรือปิด/เปิดประตูบ้าน (Noh, *et al.* 2020) นอกจากนี้ไบโอเมตริกซ์ยังถูกนำมาใช้ในโครงการระดับชาติขนาดใหญ่ เช่น โครงการ Aadhaar ที่ดำเนินการโดยกระทรวงอิเล็กทรอนิกส์และเทคโนโลยีสารสนเทศ ประเทศอินเดีย ตามพระราชบัญญัติ Aadhaar 2016 เพื่อนำไบโอเมตริกซ์มารักษาความปลอดภัยให้ฐานข้อมูลประชาชนอินเดียมากกว่าพันล้านคนแบบรวมศูนย์ ด้วยการให้ประชาชนที่เข้าร่วมโครงการใช้บัตร Adahaar ที่บูรณาการไบโอเมตริกซ์ของม่านตา และลายนิ้วมือ เข้ากับเลขบัตรประชาชน 12 หลัก แทนระบบสุติบัตรและบัตรปันส่วนแบบเดิมที่เสี่ยงต่อการสูญหายหรือเสียหาย ความสำเร็จในการนำไบโอเมตริกซ์มาใช้ครั้งนี้ทำให้คนชายขอบในชนบทสามารถเข้าถึงบริการของรัฐ และรัฐก็ลดเวลาและค่าใช้จ่ายในการบันทึกข้อมูลและตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลพลเมือง ประชาชนเชิงประจักษ์ คือให้ความสะดวกและความปลอดภัยกับประชาชนเป็นอย่างมาก จนมีการขยายความร่วมมือต่อไปยังประเทศศรีลังกาและประเทศอื่นๆ ในภูมิภาค (Jayashree, 2019)

ไบโอเมตริกซ์ หรือการประยุกต์ใช้เอกลักษณ์ของมนุษย์จึงกลายเป็นแนวทางหลักในการรักษาความปลอดภัยในภาวะปกติใหม่ (New Normal) ด้วยจุดเด่นที่ไบโอเมตริกซ์ยากต่อการลอกเลียนหรือ ทำซ้ำ และให้ความปลอดภัยในระดับสูง จึงเป็นเรื่องสำคัญที่ผู้ใช้ชีวิตในยุคดิจิทัลควรเข้าใจจุดเด่น จุดด้อย และทิศทางการพัฒนาระบบพิสูจน์ตัวตนด้วยไบโอเมตริกซ์ เพื่อให้สามารถเลือกสรรแนวทางการพิสูจน์ตัวตนได้อย่างเหมาะสม สอดคล้องกับบริบทการใช้งาน และมีประสิทธิผลตามที่คาดหวัง บทความนี้จึงจัดทำขึ้นเพื่อวิเคราะห์ความก้าวหน้าในการนำไบโอเมตริกซ์มาใช้ในการพิสูจน์ตัวตน โดยศึกษาไบโอเมตริกซ์ที่มีความแพร่หลาย 3 คุณลักษณะ คือ ลายนิ้วมือ ม่านตา และใบหน้า เพื่อวิเคราะห์แนวทาง

การบูรณาการกระบวนการพิสูจน์ตัวตนด้วยไบโอเมตริกซ์กับการเรียนรู้ของปัญญาประดิษฐ์ หรือการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) ที่ให้ทั้งความถูกต้อง ความมั่นคง และประสิทธิภาพในราคาที่ย่อมเยา

**วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง**

นับตั้งแต่ยุคเริ่มต้นของคอมพิวเตอร์ มนุษย์มีความพยายามที่จะปกป้องข้อมูลส่วนตัวหรือข้อมูลที่มีความสำคัญด้วยรหัสผ่าน ในขณะที่ผู้ไม่ประสงค์ดีก็คิดค้นวิธีขโมยหรือทำลายรหัสผ่านเพื่อเข้าถึงข้อมูล แม้ต่อมามนุษย์สามารถพัฒนารหัสผ่านที่ซับซ้อนขึ้น ผู้ไม่ประสงค์ดีก็ยังสามารถพัฒนาเครื่องมือทำลายรหัสผ่านที่ซับซ้อนได้เช่นกัน

ในยุคดิจิทัลที่ผู้คนนิยมทำธุรกรรมการเงิน ซื้อขายสินค้า และเข้าถึงข้อมูลส่วนบุคคลผ่านโซเชียลมีเดีย ผู้ใช้รายใดที่มีบัญชีดิจิทัลหลายบัญชีก็ต้องพยายามเพิ่มความปลอดภัยด้วยการสร้างรหัสผ่านที่ซับซ้อนและแตกต่างกันตามกระบวนการรักษาความปลอดภัยที่ถูกต้อง เช่น หากผู้ใช้มีบัญชีดิจิทัล 10 บัญชี หมายถึง มีรหัสผ่าน 10 รหัส การจดจำรหัสผ่านให้ได้ทั้งหมดจึงเป็นเรื่องยุ่งยากและอาจไม่ปลอดภัยเนื่องจากผู้ใช้อาจจะต้องจดรหัสไว้ที่ใดที่หนึ่ง แม้ต่อมามีการเพิ่มความปลอดภัยให้กับระบบพิสูจน์ตัวตนด้วยการเพิ่มปัจจัยเป็นแบบ 2 ปัจจัย(Two-Factor Authentication) หรือหลายปัจจัย(Multi-Factor Authentication) แต่ยังคงพบปัญหาการหัสทางกายภาพ (Hardware Token) เช่น บัตรเครดิต หรือบัตร ATM สูญหายหรือถูกขโมย หรือการโจมตีรหัสที่ส่งมาทางโทรศัพท์ ข้อความ หรือ SMS ถูกส่งต่อไปยังโทรศัพท์เครื่องอื่น ทำให้ผู้พัฒนาสนใจแนวทางการตรวจสอบสิทธิ์ด้วยการวิเคราะห์ข้อมูล ที่เรียกว่า การพิสูจน์ตัวตนแบบปรับเปลี่ยนได้ หรือการพิสูจน์ตัวตนตามความเสี่ยง (Adaptive/Risk Based Authentication) ที่แนวคิดพื้นฐานมาจากการรวบรวมข้อมูลที่ครอบคลุมพฤติกรรมที่เป็นไปได้ และสภาพแวดล้อมที่

หลากหลายของผู้ใช้ในปริมาณมากที่สุด มาจัดทำฐานข้อมูลเพื่อนำมาใช้สร้างกฎเกณฑ์ที่น่าเชื่อถือในการระบุผู้ใช้ ตลอดจนตรวจสอบพฤติกรรมเสี่ยงที่มีแนวโน้มว่าจะเป็นอันตราย เพื่อเพิ่มความสามารถในการป้องกันการปลอมแปลงข้อมูลหรือลักลอบใช้บัญชีโดยปราศจากการแทรกแซงของผู้ใช้

ข้อมูลที่เหมาะสมจึงควรเป็นข้อมูลที่มีความหลากหลาย และมีจำนวนมากพอสำหรับสอนเครื่องให้เกิดการเรียนรู้ โดยข้อมูลนี้อาจเป็นไบโอเมตริกซ์ของผู้ใช้ ได้แก่ ม่านตาลายนิ้วมือ หรือคุณลักษณะอื่นๆ ที่สามารถบ่งบอกตัวตนของเจ้าของบัญชี

**1. ไบโอเมตริกซ์ (Biometrics)**

ไบโอเมตริกซ์ ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน คือ “Bio” หมายถึง “ชีววิทยา” ที่เป็นการศึกษาเกี่ยวกับวิทยาศาสตร์ของสิ่งมีชีวิต ส่วนใหญ่จัดอยู่ในกลุ่มการวัดเชิงคุณภาพ และ “Metric” หมายถึง ระบบการวัดข้อมูลทางสถิติเพื่อการเปรียบเทียบหรือการติดตาม ซึ่งเป็นตัวชี้วัดเชิงปริมาณ ทั้งสององค์ประกอบอาจดูไม่เข้าพวก แต่ถูกนำมาหลอมรวมกันเพื่อรับรองความถูกต้องและสร้างความปลอดภัยในโลกดิจิทัล ด้วยจุดเด่นที่ไบโอเมตริกซ์เป็นเอกลักษณ์เฉพาะสำหรับทุกคน การระบุตัวตนด้วยไบโอเมตริกซ์จึงให้ความปลอดภัยกว่ารหัสผ่านแบบเดิม

ไบโอเมตริกซ์ที่ใช้ในการรักษาความปลอดภัยของข้อมูลส่วนบุคคลมีหลากหลาย เช่น เสียงพูด จังหวะการพิมพ์ คีย์บอร์ด ท่าทางการเคลื่อนไหว ลายนิ้วมือ ม่านตา และใบหน้า นอกจากความรวดเร็วและความสะดวกสบาย ยังมีความปลอดภัยสูง เนื่องจากไม่ปรากฏว่ามีบุคคลสองคนใด แม้กระทั่งเป็นฝาแฝดที่มีลายนิ้วมือ ม่านตา หรือใบหน้าเหมือนกันทุกประการ ดังนั้นไบโอเมตริกซ์จึงมีความพิเศษ ที่เป็นอัตลักษณ์เฉพาะของแต่ละบุคคลที่เหมาะสมจะใช้ตรวจสอบความแตกต่างระหว่างบุคคล

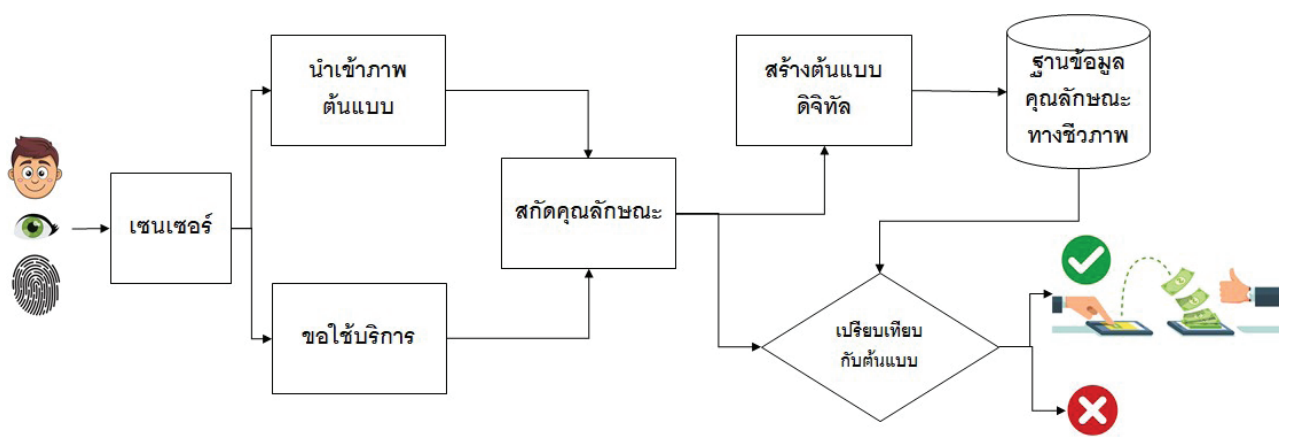


Figure 1 Biometric Authentication Process

Figure 1 แสดงตัวอย่างกระบวนการพิสูจน์ตัวตนด้วยไบโอเมตริกซ์แบบพื้นฐาน ที่ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน: การลงทะเบียน การสกัดคุณลักษณะ และการยืนยันตัวตน ขั้นตอนแรกเป็นการนำเข้าไปไบโอเมตริกซ์ด้วยเซนเซอร์ เช่น ภาพดวงตา ลายนิ้วมือ หรือ ใบหน้าที่สมบูรณ์ของผู้ใช้ ข้อมูลนำเข้าจะถูกแปลงเป็นดิจิทัลเพื่อสกัดคุณลักษณะเฉพาะที่ไม่ซ้ำกันในผู้ใช้แต่ละราย เพื่อนำไปสร้างต้นแบบ (Template) จัดเก็บไว้ในฐานข้อมูล ในขั้นตอนที่ 2 ดังนั้นเมื่อผู้ใช้ต้องการเข้าถึงบริการ ผู้ใช้จะต้องยืนยันตัวตนด้วยไบโอเมตริกซ์ชนิดเดียวกันกับที่ลงทะเบียนไว้ ในขั้นตอนที่ 3 ข้อมูลนำเข้าจะถูกนำไปประมวลผลเพื่อสกัดคุณลักษณะเฉพาะมาเข้ากระบวนการพิสูจน์ตัวตนทำนองเดียวกับขั้นตอนการลงทะเบียน เพิ่มเติมคือข้อมูลที่รับเข้าจะถูกจับคู่เพื่อเปรียบเทียบกับต้นแบบที่จัดเก็บไว้ หากการจับคู่สำเร็จ หมายถึงผู้ใช้ผ่านการรับรองความถูกต้องและสามารถเข้าถึงบริการหรือทรัพยากรนั้นๆ (Zulfqar, Syed, Khan, & Khurshid, 2019) โดยจะเน้นไบโอเมตริกซ์พื้นฐานในชีวิตประจำวัน ได้แก่ ลายนิ้วมือ ม่านตา และใบหน้า ซึ่งแต่ละคุณลักษณะล้วนมีคุณสมบัติเฉพาะที่แตกต่างและเหมาะสมกับการใช้งานในบริบทที่ต่างกัน (สุวิมล วงศ์สิงห์ทอง, 2565)

**2. ลายนิ้วมือ (Fingerprint)**

ลายนิ้วมือ เป็นคุณลักษณะที่นำมาใช้เพื่อพิสูจน์ตัวตนในหลายทศวรรษที่ผ่านมา แต่ยังคงได้รับความนิยมจากการใช้งานที่สะดวก อุปกรณ์รับภาพมีราคาถูก เป็นคุณลักษณะที่มีความเสถียร และให้ผลลัพธ์ที่มีความแม่นยำสูง โดยทั่วไปคุณลักษณะของลายนิ้วมือที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ ดังแสดงใน Figure 2 ประกอบด้วย สันลายนิ้วมือ (Ridge) ที่มีลักษณะเป็นเส้นนูนโค้ง สูงกว่าพื้นผิวของนิ้วมือ และร่องลายนิ้วมือ (Furrow) ที่มีลักษณะเป็นร่องสีขาวสลับอยู่ระหว่างสันลายนิ้วมือ ซึ่งการนำส่วนประกอบทั้งสองมาใช้ช่วยให้การบ่งชี้เจ้าของลายนิ้วมือเป็นไปอย่างถูกต้องแม่นยำ (Nguyen & Nguyen, 2019)



Figure 2 Fingerprint

**3. ม่านตา (Iris)**

ดวงตาของมนุษย์เปลี่ยนแปลงได้ตลอดเวลา ในขณะที่ม่านตาของบุคคลใดบุคคลหนึ่งจะไม่เปลี่ยนแปลง ภาพดวงตาที่สมบูรณ์ของมนุษย์ประกอบด้วยพื้นผิวของม่านตาที่เป็นวงกลมสีในดวงตา มีลักษณะคล้ายเครือข่ายที่ประกอบด้วยวงกลมและลวดลายรอบๆ มากมายมองเห็นได้ยาก ดังแสดงใน Figure 3 จึงนิยมใช้แสงอินฟราเรดที่มองไม่เห็นในเครื่องสแกนม่านตาเพื่อเพิ่มความสว่างให้ม่านตา ทำให้ภาพที่ได้มีความสมบูรณ์และเหมาะสมในการแปลงเป็นดิจิทัลยิ่งขึ้น สะดวกต่อการวัดรูปแบบเฉพาะของม่านตา และตรวจจับพื้นที่ของม่านตาเพื่อแยกขมตาและเปลือกตาออกจากดวงตา ผลลัพธ์สุดท้าย คือ ชุดของพิกเซลที่มีเพียงม่านตา ซึ่งข้อมูลนี้จะถูกนำเข้ากระบวนการจำแนกข้อมูล (Classification) เพื่อสร้างต้นแบบที่ประกอบด้วยคุณลักษณะเฉพาะของลวดลายเส้นและสี ของดวงตา (Marsico, Petrosino, & Ricciardi, 2016)

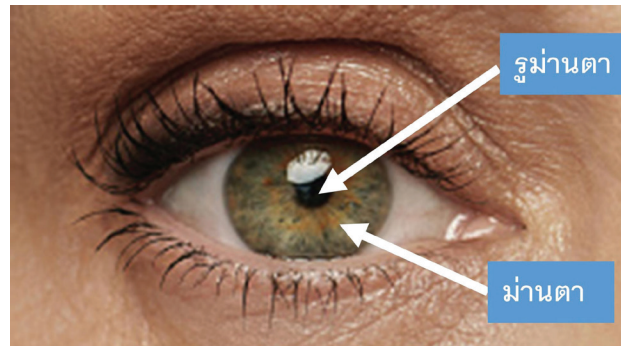


Figure 3 Iris

**4. ใบหน้า (Face)**

เทคโนโลยีการจดจำใบหน้าทำงานได้กับภาพทั้ง 2 มิติ และ 3 มิติ แต่การใช้ภาพ 2 มิติยังคงได้รับความนิยมมากกว่า ด้วยความรวดเร็วและความสะดวกในการจับคู่ระหว่างภาพถ่ายกับข้อมูล ซึ่งในขั้นตอนการพิสูจน์ตัวตนภาพใบหน้าทั้งกรณีเป็นภาพใบหน้าคนเดียวหรือเป็นกลุ่มจะถูกนำเข้าผ่านกล้อง เพื่อตรวจจับและระบุตำแหน่งที่ต้องการตรวจสอบ ดังแสดงใน Figure 4 จุดเน้น คือ ระยะห่างระหว่างดวงตา ความลึกของเบ้าตา ระยะห่างจากหน้าผากถึงคาง รูปร่างของโหนกแก้ม รูปร่างของริมฝีปาก หู และคาง หรือองค์ประกอบเพิ่มเติมอื่นๆ โดยกระบวนการพิสูจน์ตัวตนจะใช้วิธีอ่านรูปทรงใบหน้า เพื่อแยกแยะความแตกต่างระหว่างบุคคล หลังจากนั้นข้อมูลภาพจะถูกแปลงให้เป็นดิจิทัล แล้ววิเคราะห์ด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์เพื่อเปรียบเทียบภาพที่ดิจิทัลที่ได้กับต้นแบบที่จัดเก็บในฐานข้อมูล (Marsico et al., 2016)



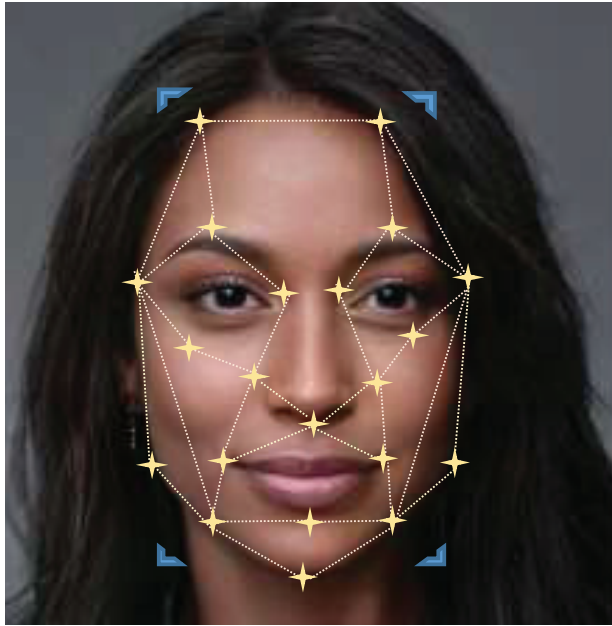


Figure 4 Face

### ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อคุณภาพของไบโอเมตริกซ์

ตัวชี้วัดคุณภาพของต้นแบบไบโอเมตริกซ์มีความสำคัญต่อกระบวนการพิสูจน์ตัวตนอย่างมาก ทั้งในขั้นตอนการลงทะเบียนและการยืนยันตัวตน แม้ระบบพิสูจน์ตัวตนจะมีอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพสูงเพียงไร แต่ยังคงมีความเสี่ยงจากปัจจัยภายนอกที่ยากต่อการควบคุม เป็นต้นว่า 1) ธรรมชาติของไบโอเมตริกซ์ เช่น ระหว่างจับภาพ ผู้ใช้มีพฤติกรรมหรือมีคุณลักษณะทางชีวภาพที่เปลี่ยนแปลงไป ทำให้คุณภาพของข้อมูลนำเข้าลดลง เช่น มีหนวด สวมหน้ากากอนามัย อยู่ในบริเวณที่มีแสงมาก หรือความเปลี่ยนแปลงที่เกิดจากปัจจัยที่ไม่อาจหลีกเลี่ยง เช่น อายุ ประเพณี เพศ และอาการบาดเจ็บ 2) ลักษณะการปฏิสัมพันธ์ระหว่างเซนเซอร์จับภาพกับผู้ใช้ และข้อจำกัดในการปฏิบัติงาน เช่น ระยะในการสัมผัสใกล้หรือไกลเกินไป ทำให้ภาพที่รับเข้าแตกต่างไปจากต้นแบบ และ 3) สิ่งแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความชื้น และพื้นหลัง

ปัจจัยเหล่านี้ล้วนมีอิทธิพลต่อคุณภาพของไบโอเมตริกซ์ และนำไปสู่ข้อจำกัดในการพยากรณ์ที่ใช้หลักการให้คะแนนความเสี่ยงที่สอดคล้องกับกฎ ซึ่งแนวทางการพัฒนาจำเป็นต้องใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง เพื่อให้คอมพิวเตอร์สามารถวิเคราะห์เชิงลึก หากความสัมพันธ์ ดีความ เรียนรู้และจดจำรูปแบบได้ด้วยประสบการณ์ที่เรียนรู้จากข้อมูลจำนวนมาก เพื่อนำไปปรับระบบให้รองรับประสบการณ์ใหม่อย่างอัตโนมัติ จึงเป็นความท้าทายในการบูรณาการการเรียนรู้ของเครื่องกับระบบพิสูจน์ตัวตนด้วยไบโอเมตริกซ์ เพราะกระบวนการนี้ช่วยลดอุปสรรคที่เกิดจากสภาพแวดล้อมที่มีปัญหา ไม่ว่าจะปัญหาของเซนเซอร์ หรือเสียงรบกวน ทั้งยังทำให้กระบวนการพิสูจน์ตัวตนด้วยไบโอเมตริกซ์มีความแม่นยำสูงขึ้น

### การเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning)

เป้าหมายหลักของการเรียนรู้ของเครื่อง คือ การทำให้คอมพิวเตอร์เรียนรู้ และปรับตนเองอย่างอัตโนมัติตามสถานการณ์โดยปราศจากการแทรกแซงหรือความช่วยเหลือจากมนุษย์เพื่อปรับแก้โปรแกรม (Fazala, et al, 2018) การเรียนรู้ของเครื่องจึงเป็นการประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence) ในการสร้างระบบเรียนรู้ของตัวเองจากข้อมูลจำนวนมากที่เป็นทั้งตัวอย่าง ประสบการณ์ หรือคำสั่งในการสอน เพื่อให้คอมพิวเตอร์สร้างแบบจำลอง (Model) ที่เข้าใจและรู้จำรูปแบบ (Pattern Recognition) ในข้อมูล เพื่อกำหนดรูปแบบ และความสัมพันธ์ของข้อมูลที่น่าสนใจ เพื่อให้คอมพิวเตอร์สามารถตัดสินใจหรือพยากรณ์ผลลัพธ์ตามหลักการทางสถิติหรือคณิตศาสตร์อย่างอัตโนมัติ ซึ่งแบบจำลองจะมีความสามารถในการปรับตนเองด้วยข้อมูลที่นำมาใช้สอนได้อย่างรวดเร็วในระดับเดียวกับการทำงานของสมองมนุษย์ และแนวทางการเรียนรู้ของเครื่องได้รับการพิสูจน์แล้วว่าช่วยลดอุปสรรคของระบบพิสูจน์ตัวตนแบบเดิมได้เป็นอย่างมาก (Matsumi, Nozaki, & Yoshikawa, 2018)

การสอน (Training) เครื่องให้เกิดการเรียนรู้มีหลายวิธี (Kantardzic, 2020) เป็นต้นว่า การเรียนรู้แบบมัลติทาสก์ (Multitask Learning) ที่เป็นพื้นฐานในการเรียนรู้แบบมีผู้สอน มักใช้วิธีปรับแบบจำลองให้เหมาะสมกับชุดข้อมูล เพื่อให้สามารถนำแบบจำลองไปใช้กับข้อมูลชุดอื่น และอีกวิธีที่ได้รับนิยมเช่นกัน คือ การถ่ายโอนการเรียนรู้ (Transfer Learning) เป็นการถ่ายโอนความรู้ที่เกิดจากการที่เครื่องเรียนรู้จากข้อมูลชุดหนึ่งแล้วนำผลที่ได้ไปตั้งต้นสำหรับการทำงานกับข้อมูลชุดอื่นที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน วิธีนี้มีประโยชน์สำหรับการแก้ปัญหาที่สัมพันธ์กับข้อมูลจำนวนมากหรือข้อมูลขนาดใหญ่ (Big Data) เนื่องจากทำให้สามารถนำแบบจำลองที่มีอยู่ไปใช้ได้อย่างต่อเนื่อง ลดเวลาในการสอนเครื่องด้วยชุดข้อมูลใหม่ โดยสามารถกระบวนการเรียนรู้ของเครื่องเป็นประเภทหลัก (Mahdavinejad et al., 2018) ได้ดังนี้

การเรียนรู้แบบไม่มีผู้สอน (Unsupervised learning) หมายถึง คอมพิวเตอร์มีอิสระในการค้นหารูปแบบที่ซ่อนอยู่ในข้อมูลเพื่อสร้างความเชื่อมโยงในการแยกแยะความเหมือนหรือความแตกต่างของข้อมูลด้วยตนเอง โดยไม่มีผลลัพธ์หรือตัวแปรเป้าหมาย วิธีการนี้นิยมใช้ในการจัดกลุ่มข้อมูลที่ยากต่อการตีความหรือยังไม่มีผู้ใดสามารถทำความเข้าใจข้อมูลได้ อัลกอริทึมในกลุ่ม ได้แก่ K-Nearest Neighbor (KNN), K-means, Hidden Markov Model (HMM), Density-based spatial clustering of applications with noise (DBSCAN) และ Principal Component Analysis (PCA)

การเรียนรู้แบบมีผู้สอน (Supervised learning) เป็นแนวทางในการสร้างปัญญาประดิษฐ์ การเรียนรู้วิธีนี้ต้องการ

การมีส่วนร่วมของมนุษย์อย่างต่อเนื่อง เนื่องจากคอมพิวเตอร์ต้องสอนและสร้างการเรียนรู้ให้แบบจำลอง เพื่อให้แบบจำลองสามารถตอบสนองและยืนยันผลได้อย่างถูกต้อง และเมื่อเวลาผ่านไปแบบจำลองจะสามารถปรับปรุงตัวเองให้จัดการกับชุดข้อมูลใหม่ตามรูปแบบที่ “เรียนรู้” ได้อย่างแม่นยำโดยอัตโนมัติ อัลกอริทึมของการเรียนรู้แบบมีผู้สอนนี้ เกิดจากการสอนให้คอมพิวเตอร์เรียนรู้จากข้อมูลที่มีการกำหนดค่า (Labeled) เข้าไปเข้ามา จนสามารถตรวจจับรูปแบบและความสัมพันธ์ที่แฝงอยู่ระหว่างข้อมูลนำเข้าและกำหนดค่าให้ข้อมูลส่งออกได้อย่างแม่นยำเมื่อต้องทำงานกับข้อมูลใหม่ อัลกอริทึมในกลุ่มนี้ได้แก่ Support Vector Machine (SVM), Decision Trees (DT), K-Nearest Neighbor (KNN) และ Random Forest (RF)

การทดสอบคุณภาพของผลลัพธ์ที่ผ่านการประมวลผลนิยมใช้มาตรวัดพื้นฐาน เป็นต้นว่า ความถูกต้อง (Accuracy) หมายถึง ร้อยละที่แบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่องทำนายผลลัพธ์ได้ถูกต้อง, TP (True Positive) หมายถึง แบบจำลองทำนายว่าผลลัพธ์ถูกต้องและผลลัพธ์นั้นถูกต้อง, TN (True Negative) หมายถึง แบบจำลองทำนายผลลัพธ์ว่าไม่ถูกต้องและผลลัพธ์นั้นไม่ถูกต้อง, FP (False Positive) หมายถึง แบบจำลองทำนายว่าผลลัพธ์ถูกต้องแต่ผลลัพธ์นั้นไม่ถูกต้อง และ FN (False Negative) หมายถึง แบบจำลองทำนายว่าผลลัพธ์ไม่ถูกต้องแต่ผลลัพธ์นั้นถูกต้อง หรือในบางกรณีอาจใช้มาตรวัดอื่นเพิ่มเติม เช่น Average detection error rate ที่หมายถึงความผิดพลาดที่ตรวจสอบได้จากการทำงานของแบบจำลอง (Goodfellow, Bengio & Courville, 2022)

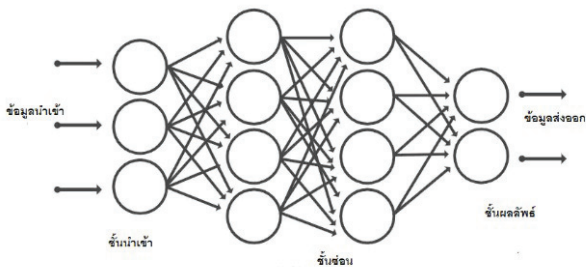


Figure 5 Deep Learning Model

แม้การเรียนรู้ของเครื่องแบบไม่มีผู้สอนและแบบมีผู้สอน เป็นเทคนิคการประมวลผลข้อมูลที่เพิ่มความแม่นยำให้กับภารกิจด้วยปัญญาประดิษฐ์ได้เป็นอย่างดี แต่การนำมาใช้กับอัตลักษณ์ดิจิทัลที่เป็นเสียง วิดีโอ หรือรูปภาพ การคัดเลือกลักษณะเฉพาะ (Feature) ที่เหมาะสมใช้เวลาและทรัพยากรค่อนข้างมาก ขณะที่แบบจำลองการเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning) ใช้เทคนิคการสร้างปัญญาประดิษฐ์ด้วยสถาปัตยกรรมโครงข่ายประสาทเทียมที่มีหลายชั้นเรียงซ้อนกันคล้ายตาข่ายของเซลล์ประสาทที่เชื่อมต่อกันในสมองมนุษย์ (Bock *et al.*, 2019) ประกอบด้วยชั้นสามระดับดังแสดงใน Figure 5 คือ ชั้นนำเข้า (Input Layer) ชั้นซ่อน

(Hidden Layer) และชั้นผลลัพธ์ (Output Layer) แต่ละชั้นประกอบด้วยโหนดเซลล์ประสาทเทียมที่เชื่อมต่อกัน ทำหน้าที่เป็นตาข่ายสามมิติ (Three Dimensional Network) ที่โหนดหนึ่งสามารถสื่อสารกับโหนดอื่นๆ ในบริเวณใกล้เคียง โดยชั้นนำเข้าข้อมูลจะรับข้อมูลเพื่อส่งไปประมวลผลที่ชั้นซ่อน และชั้นผลลัพธ์จะเป็นส่วนที่ตัดสินใจเกี่ยวกับข้อมูลผลลัพธ์ ทำให้แบบจำลองสร้างการเรียนรู้และปรับปรุงความแม่นยำของการพยากรณ์ได้ด้วยตัวเองด้วยการปรับน้ำหนักระหว่างโหนดในเครือข่าย ทำให้สามารถวิเคราะห์ได้แบบเรียลไทม์ โดยแบบจำลองจะคัดเลือกลักษณะเฉพาะที่ให้ผลลัพธ์ที่แม่นยำจากแต่ละภาพผ่านโครงข่ายประสาทเทียมที่เรียนรู้คุณลักษณะต่างๆ โดยตรงจากข้อมูลที่สอน ดังนั้นจึงลดภาระผู้เชี่ยวชาญในการแยกคุณลักษณะด้วยตนเอง (Yang, 2019)

การเรียนรู้เชิงลึก จึงเป็นแนวทางใหม่ที่ทำให้ความแม่นยำและประสิทธิภาพที่โดยเฉพาะอย่างยิ่งการทำงานกับข้อมูลที่ซับซ้อน เช่น เสียง รูปภาพ และวิดีโอ จึงเหมาะสมกับการพิสูจน์ตัวตนด้วยไบโอเมตริกซ์ (Charniak, 2018) ที่ทำให้คุณภาพของผลลัพธ์มีความแม่นยำกว่าการเรียนรู้ของเครื่องแบบพื้นฐาน (Bazrafkan, Thavalengal, & Corcoran, 2018) โดยแบบจำลองที่นิยมใช้ได้แก่ Convolutional Neural Network (CNN), Fully Convolutional Deep Neural Network (FCDNN), Fully Convolutional Network (FCN) และ Multi-scale Convolutional Neural Network (MCNN) ในทางปฏิบัติการสอนแบบจำลองในกลุ่ม CNN ใช้เวลามากเนื่องจากต้องใช้ข้อมูลขนาดใหญ่ในการสอน จึงนิยมใช้วิธีถ่ายโอนการเรียนรู้ ด้วยการนำแบบจำลองที่สอนไว้แล้วด้วยงานที่ใกล้เคียงกันมาใช้เป็นส่วนตั้งต้นของแบบจำลองใหม่ แล้วสอนเครื่องเพิ่มเติมด้วยข้อมูลในงานเฉพาะทาง (Manjunatha *et al.*, 2018)

**การบูรณาการการเรียนรู้ของเครื่องเข้ากับ ระบบพิสูจน์ตัวตนด้วยไบโอเมตริกซ์**

**1. การจดจำลายนิ้วมือ (Fingerprint)**

การจดจำลายนิ้วมือ เป็นแนวทางการรักษาความปลอดภัยที่มีการพัฒนาและแพร่หลายมากที่สุดในทางปฏิบัติ ลายนิ้วมือถูกนำไปใช้เป็นหลักฐานทางกฎหมายทั่วโลก ด้วยจุดเด่นที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาน้อย และง่ายต่อการใช้ จนลายนิ้วมือกลายเป็นมาตรฐานในการเข้าถึงอุปกรณ์ที่ใช้ในชีวิตประจำวันของผู้คนยุคดิจิทัลทั่วโลก ไม่ว่าเพื่อการใช้โทรศัพท์เคลื่อนที่ แท็บเล็ต และแม้แต่แล็ปท็อป ทั้งที่ทำงานหรือองค์กรล้วนนิยมนำเครื่องสแกนลายนิ้วมือไปใช้แทนรหัสผ่าน บัตรประจำตัว และรหัสเข้าประตู เพื่อประโยชน์ด้านความปลอดภัย ติดตามการทำงาน และบริหารจัดการพนักงาน

แม้การจดจำลายนิ้วมือเป็นวิธีที่ให้ความปลอดภัยสูงและนิยมใช้ในหลายแพลตฟอร์ม แต่ยังมีเสียงต่อการโจมตีเพราะปลอมแปลงได้ไม่ยากนัก จึงมีการนำเทคนิคต่างๆ มาใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความแม่นยำในการพิสูจน์ตัวตนด้วยลายนิ้วมือ ดังการศึกษาของ Tarare *et al.* (Tarare, Anjekar, & Turkar, 2015) ที่ใช้ภาพ 2 มิติของลายนิ้วมือไปประมวลผลด้วยกระบวนการแปลงเวฟเลตเติมหน่วย (Discrete Wavelet Transform, DWT) เพื่อแปลงสัญญาณลายนิ้วมือจากฐานเวลา (Time Domain) เป็นฐานความถี่ (Frequency Domain) แล้วนำไปสกัดลักษณะเด่นของสัญญาณเพื่อจำแนกเพศผู้ใช้ โดยลักษณะเด่นที่ใช้คือ ความหนาแน่นของลายนิ้วมือและความถี่ของเส้นลายนิ้วมือ ที่เพศหญิงที่ค่าดังกล่าวสูงกว่าลายนิ้วมือของเพศชาย อัลกอริทึมการเรียนรู้ของเครื่องที่ใช้คือ KNN และพบว่าแม้ลายนิ้วมือนำเข้าจะไม่ชัดเจน แต่ยังคงมี success rate ในการพยากรณ์ที่ 75% Nguyen, H.T., and Nguyen, L.T. (Nguyen & Nguyen, 2019) พัฒนาเทคนิคการจำแนกประเภท (Classification) ลายนิ้วมือด้วยเทคนิคการประมวลผลภาพ (Image Processing) ที่สามารถลดจำนวนครั้งในการเปรียบเทียบ ทำให้เวลาในการเปรียบเทียบลายนิ้วมือที่รับเข้าและลายนิ้วมือต้นแบบที่เก็บในฐานข้อมูลลดลง ทั้งยังเพิ่มคุณภาพของข้อมูลนำเข้า ทำให้กระบวนการสกัดคุณลักษณะ (Feature Extraction) ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และพบว่าอัลกอริทึม RF ให้ค่าความถูกต้อง (accuracy) สูงกว่า 96.75% ขณะที่อัลกอริทึม SVM ให้ค่าความถูกต้อง (accuracy) สูงกว่า 95.5% Kim *et al.* (Kim, Cui, Kim, & Nguyen, 2019) แก้ปัญหาการจับคู่ลายนิ้วมือเพื่อใช้ในการสอนเครื่องที่มีค่าใช้จ่ายสูง ใช้เวลามากในการจัดเตรียม และยังคงควบคุมด้วยข้อจำกัดการคุ้มครองความเป็นส่วนตัว จึงใช้โครงข่ายประสาทแบบลึก (Deep Neural Network) สร้างฐานข้อมูลขนาดใหญ่ของลายนิ้วมือ เพื่อทดสอบการตรวจจับลายนิ้วมือปลอม และพบว่าข้อมูลที่สร้างขึ้นมีข้อผิดพลาดเฉลี่ยที่ตรวจพบ (average detection error rate) เพียง 1.57%

## 2. การจดจำใบหน้า (Face Recognition)

ในสามทศวรรษที่ผ่านมา เทคนิคการจดจำใบหน้าได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นอย่างก้าวกระโดดในการใช้เพื่อเฝ้าระวัง ระบุอาชญากร ค้นหาบุคคลที่สูญหาย โดยใช้วิธีเปรียบเทียบใบหน้ากับที่บันทึกในกล้องกับผู้ที่อยู่ในรายการเฝ้าระวัง ทำให้ระบบจดจำใบหน้าถูกใช้เป็นหนึ่งในมาตรการป้องกันการขโมยสินค้า การรักษาความปลอดภัยในสถานที่ที่ต้องการความปลอดภัยสูง เช่น ธนาคาร และสนามบิน เพราะหามีอาชญากรปะปนมากับผู้โดยสารอาจก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อทั้งสายการบินและผู้โดยสาร นอกจากนี้ยังนิยมนำมาใช้เพื่อควบคุมการเข้าอาคาร การเช็คอินในโรงแรม และการซื้อ

สินค้าออนไลน์ หรือนำไปเป็นคุณลักษณะเพิ่มเติมสำหรับการยืนยันตัวตน เพื่อเพิ่มความแม่นยำ โดยเทคนิคการจดจำใบหน้าที่น่าสนใจ ได้แก่ ผลการศึกษาของ Smith-Creasey *et al.* (Smith-Creasey, Albaloo Shib, & Rajarajana, 2018) ใช้เทคนิคการจดจำใบหน้าตามสัญญาณชีพ ด้วยการตรวจสอบใบหน้าแบบต่อเนื่องผ่านกล้องโทรศัพท์เคลื่อนที่ ใช้รูปถ่ายผู้ใช้ในหลายๆ กิจกรรม เช่น เดิน นั่ง และยืน เป็นข้อมูลตั้งต้นในการสอนโดยเครื่องจะตรวจสอบคุณลักษณะของผู้ใช้เป็นระยะ เพื่อตัดสิทธิการเข้าถึงอุปกรณ์ทันทีที่ตรวจสอบได้ว่ามีผู้แอบอ้าง ทั้งยังเป็นการลดปัญหาการปลอมแปลงใบหน้าด้วยภาพถ่าย (spoofing) การสกัดคุณลักษณะของใบหน้าใช้อัลกอริทึม SVM ให้ค่าความถูกต้อง (TRR) สูงสุดถึง 91.58% Bonazza *et al.* (Bonazza, Mitéran, Gin hac, & Dubois, 2018) เสนอแนวทางการลดปริมาณข้อมูลและเวลาที่ใช้ในการสอนเครื่อง โดยทดสอบความแตกต่างระหว่างการเรียนรู้ของเครื่องแบบดั้งเดิม (Classical Learning) และการเรียนรู้ของเครื่องแบบถ่ายโอน ด้วยแบบจำลอง RF พบว่าการเรียนรู้ของเครื่องแบบถ่ายโอน ช่วยลดเวลาในการสอนเครื่อง และให้ค่าความถูกต้อง (accuracy) เพิ่มขึ้นเป็น 85% Phillips *et al.* (Phillips, Zou, Li, & Li, 2019) ใช้คุณลักษณะของม่านตามาบูรณาการกับการจดจำใบหน้า เพื่อการตรวจสอบสิทธิ์ผู้ใช้ พบว่าระบบพิสูจน์ตัวตนที่ออกแบบมีความถูกต้อง (accuracy) เพิ่มขึ้นเป็น 99.98% Zulfiqar *et al.* (Zulfiqar, Syed, Khan, & Khurshid, 2019) เพิ่มความแม่นยำการจดจำใบหน้า โดยทดสอบในบริเวณที่มีแสงสว่างแตกต่างกัน ผู้ใช้แสดงสีหน้าที่ต่างกัน ผู้ใช้มีรูปทรงใบหน้าที่แตกต่างกัน ผู้ใช้สวมอุปกรณ์บดบังใบหน้า และผู้ใช้แสดงท่าทางที่แตกต่างกัน พบว่าการใช้แบบจำลองการเรียนรู้เชิงลึก (CNN) ช่วยให้ผลลัพธ์ที่ได้มีค่าความถูกต้อง (accuracy) สูงถึง 98.76%

## 3. การจดจำม่านตา (Iris Recognition)

เป็นที่ยอมรับกันว่าการพิสูจน์ตัวตนด้วย ม่านตา มีความเสถียรในระดับสูง แม้บุคคลที่มีพันธุกรรมเหมือนกัน พื้นผิวม่านตาก็มีความแตกต่างกัน ทั้งยังเปลี่ยนแปลงตามอายุและสิ่งแวดล้อมน้อย ทว่าการตรวจสอบม่านตาก็มีเงื่อนไขบางประการที่มีความจำเพาะเจาะจงมากกว่าคุณลักษณะทางชีวภาพอื่น และปัจจัยภายนอกที่มีผลกระทบต่อคุณภาพของม่านตาค่อนข้างมาก คือ ระยะห่างและมุมมองของการรับภาพ การยืนยันตัวตนด้วยม่านตาจึงต้องการความร่วมมือจากผู้ใช้อย่างมาก แต่แม้ผู้ใช้ให้ความร่วมมืออย่างครบถ้วนแล้ว ยังอาจต้องเผชิญปัญหาอื่น เช่น การบดบังของขนตามุมในการอ่านภาพ การเคลื่อนไหวที่ทำให้ภาพไม่ชัดเจน แสงสะท้อนที่ผิดปกติจากดวงตา และสภาพแวดล้อมของแสงที่เปลี่ยนแปลงไป จึงควรหลีกเลี่ยงการใช้กล้อง near-infrared (NIR)



และไฟ near-infrared เพราะทำให้ยากต่อการแบ่งส่วนของตา และการกำหนดขอบเขตของม่านตา ซึ่งมีแนวทางการปรับปรุงคุณภาพและความถูกต้องของการจดจำม่านตาที่น่าสนใจ ดังนี้ Arsalan *et al.* (Arsalan *et al.*, 2017) เสนอวิธีการกำหนดขอบเขตของม่านตาให้แม่นยำในสถานการณ์ที่ยากต่อการควบคุม เช่น ผู้ใช้สวมแว่นสายตา มุมจับภาพไม่ถูกต้อง ผู้ใช้กรอกตาไปมา และเปิดตาบางส่วน โดยแบ่งออกเป็นสองขั้นตอน ขั้นตอนแรก คือ การกรองแบบ Bottom-hat เพื่อลบภาพส่วนที่ไม่ต้องการให้เหลือเฉพาะองค์ประกอบของโครงสร้างส่วนที่ต้องการ ขั้นตอนที่สอง ใช้แบบจำลอง CNN กำหนดขอบเขตม่านตาจากภาพดวงตาที่ได้จากขั้นตอนแรก โดยประมาณขอบเขตของรูม่านตาโดยใช้มาตรฐานของอัตราส่วนระหว่างการหดตัวและการขยายรูม่านตาเป็นเกณฑ์การพิจารณา เพื่อคำนวณพื้นที่จริงของม่านตา วิธีนี้ทำให้ average segmentation error ลดลงเหลือเพียง 0.0082 Bazrafkan *et al.* (Bazrafkan *et al.*, 2018) แก้ปัญหาข้อจำกัดของภาพม่านตาที่มีคุณภาพต่ำ โดยใช้แบบจำลอง FCDNN มาเพิ่มความแม่นยำในการคำนวณพื้นที่ม่านตา ทำให้ค่าความถูกต้อง (accuracy) เพิ่มขึ้นเป็น 96-99% สำหรับชุดข้อมูลทดสอบ Bath800, CASIA1000, UBIRIS, และ MobBio และเมื่อใช้แบบจำลองกับภาพที่มีคุณภาพระดับมาตรฐาน ค่าความถูกต้อง (accuracy) สูงสุดเพิ่มเป็น 99.30% Tobji *et al.* (Tobji, Di, & Ayoub, 2019) เตรียมข้อมูลม่านตาโดยวิธีถ่ายภาพการเรียนรู้จากระบบเดิม แล้วนำภาพที่มีความละเอียดสูงมาแยกออกเป็นส่วนย่อย เพื่อใช้แบบจำลอง FCN ตัดส่วนเฉพาะภาพม่านตาที่ต้องการ ส่งเข้าแบบจำลอง MCNN เพื่อสกัดคุณลักษณะเฉพาะของม่านตา จากนั้นนำข้อมูลมาจัดหมวดหมู่ โดยใช้แบบจำลอง FCN และ MCNN ผลที่ได้ให้ความถูกต้อง (accuracy) สูงถึง 99.41%

## บทสรุป

ในกลุ่มของระบบพิสูจน์ตัวตนด้วยไบโอเมตริกซ์ พบว่าไบโอเมตริกซ์ที่ยอมรับมากที่สุด คือ **ลายนิ้วมือ** ด้วยจุดเด่นที่ลายนิ้วมือเป็นสรีระที่มนุษย์คุ้นเคย และมีความเป็นเอกลักษณ์เฉพาะจากลวดลายของเส้น สันและร่องบนพื้นผิวของนิ้วของบุคคลที่ต่างกัน แต่สิ่งที่น่ากังวล คือ เป็นไบโอเมตริกซ์ที่ง่ายต่อการทำซ้ำ แม้ข้อมูลที่จัดเก็บไว้จะผ่านการเข้ารหัส แต่ผู้ไม่ประสงค์ดียังสามารถสร้างภาพที่มีรูปแบบและลายเส้นคล้ายคลึงได้ เพราะมนุษย์อาจทิ้งรอยนิ้วมือไว้บนพื้นผิวที่สัมผัส แต่แม้ลายนิ้วมือจะมีจุดอ่อน การคาดเดาลายนิ้วมือก็ทำได้ยากกว่ารหัสผ่าน ทำให้ลายนิ้วมือเป็นหนึ่งในวิธีพิสูจน์ตัวตนที่พบบ่อยที่สุด **การจดจำม่านตา** เป็นเทคนิคที่มีความน่าเชื่อถือ มีความปลอดภัยในระดับสูงเนื่องจากเป็นวิธีการที่มีความละเอียด และมีโอกาสที่จะเกิดความผิดพลาด

น้อยมากโดยเฉพาะหากใช้แสงอินฟราเรดในการสแกน ทั้งการทำซ้ำม่านตาก็ทำได้ยาก แต่ในทางปฏิบัติการพิสูจน์ตัวตนด้วยการสแกนม่านตา ยังได้รับการยอมรับในระดับปานกลาง ด้วยข้อกังวลด้านสุขอนามัยและการเข้าถึง เช่น หากผู้ใช้ต้องวางตาบนเบ้าตาของอุปกรณ์สแกนที่ใช้ร่วมกับผู้อื่น อาจเสี่ยงต่อสุขอนามัยโดยเฉพาะในสถานการณ์โรคระบาด ทั้งหากไม่สามารถปรับระดับเครื่องสแกนได้ย่อมเป็นเรื่องยากสำหรับคนที่มีส่วนสูงต่างกัน หรือหากผู้ใช้มีโรคประจำตัว เช่น โรคเบาหวาน อาจทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงไปจนเกิดปัญหาในการจดจำม่านตา นอกจากนี้ การกำหนดตำแหน่งของม่านตาผู้ใช้ให้ตรงกับกล้องยังมีความยุ่งยาก และอาจมีความผิดพลาดในการอ่านม่านตาจากระยะไกล ในขณะที่ **การจดจำใบหน้า** เป็นเทคโนโลยีใหม่ที่มีปัญหาการปลอมแปลงได้เป็นอย่างดี และได้รับการพิสูจน์ว่ามีประสิทธิภาพ เนื่องจากใช้การตรวจสอบใช้วิธีวิเคราะห์รูปร่าง และตำแหน่งของส่วนต่างๆ ของใบหน้ามาพิจารณาประกอบเพื่อสร้างเงื่อนไขการจับคู่ และเป็นเทคโนโลยีที่มีการพัฒนาอย่างรวดเร็วในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา จึงเป็นตัวเลือกที่ยอดเยี่ยมสำหรับการพิสูจน์ตัวตนระยะไกล จุดเด่นอีกประการคือ เทคโนโลยีนี้ง่ายต่อการสแกนฝูงชนเพื่อหาบุคคลต้องสงสัย ข้อเสียหลัก คือ เทคโนโลยีนี้เน้นที่ใบหน้าเป็นหลัก ทำให้ผู้ใช้ต้องมองตรงมาที่กล้องในมุมที่กำหนด เพื่อให้การทำงานเป็นไปอย่างถูกต้อง ทั้งรูปแบบการโจมตีในปัจจุบันมีการพัฒนาไปอย่างมาก ทำให้เห็นวาระบบไบโอเมตริกซ์ยังต้องมีการพัฒนาให้มีความก้าวหน้าด้วยการบูรณาการกับเทคโนโลยีอื่น

การวิเคราะห์ข้อมูลไบโอเมตริกซ์ใช้หลักการประมวลผลรูปภาพที่นำเข้ามาผ่านกล้องมาแปลงเป็นข้อมูลดิจิทัล แล้วสกัดคุณลักษณะพิเศษเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับคุณลักษณะพิเศษของข้อมูลต้นแบบที่สกัดในขั้นตอนการลงทะเบียน ความแม่นยำของระบบจึงขึ้นอยู่กับคุณภาพของข้อมูลนำเข้า และการควบคุมสภาวะแวดล้อมให้ปราศจากสัญญาณรบกวน อย่างไรก็ตามโดยธรรมชาติมักไม่สามารถหลีกเลี่ยงสัญญาณรบกวนชุดข้อมูลที่รวบรวมโดยเซนเซอร์รับภาพ ให้ความถูกต้องถูกลดทอนลงไป ดังนั้นการเพิ่มคุณภาพของสัญญาณนำเข้าเพื่อให้การประมวลผลเป็นไปอย่างแม่นยำในสถานการณ์ต่างๆ จึงเป็นสิ่งสำคัญ ดังมีการนำเทคโนโลยีการเรียนรู้ของเครื่องมาลดทอนข้อจำกัดเดิมๆ ของระบบพิสูจน์ตัวตน ด้วยจุดเด่นที่ผู้ใช้สามารถสร้างแบบจำลองในการประมวลผลภาพ (image processing) หากแบบจำลองนั้นถูกสอนมาด้วยข้อมูลที่มีความหลากหลาย ครอบคลุมพฤติกรรมที่แตกต่างกันของผู้ใช้ และข้อมูลที่ใช้สอนมีปริมาณมากพอ แบบจำลองนั้นจะสามารถจำแนกรูปแบบ และหาแนวโน้มจากข้อมูลจำนวนมากเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรได้เป็นอย่างดี ช่วยให้เครื่องเกิดการเรียนรู้และแยกแยะ

คุณลักษณะของผู้ใช้ได้อย่างถูกต้อง และวิเคราะห์ข้อมูลขนาดใหญ่ได้อย่างรวดเร็ว ปัญหาที่ตามมา คือ พื้นที่ในการจัดเก็บเวลาและต้นทุนในการรวบรวมข้อมูล ตลอดจนทรัพยากรในการประมวลผลที่เพิ่มขึ้น ทำให้มีการทดลองเพื่อใช้ DNN สร้างฐานข้อมูลลายนิ้วมือเพื่อการสอนเครื่อง (Kim, Cui, Kim, & Nguyen, 2019) การกำหนดคุณลักษณะเพื่อลดเงื่อนไขในการทำงานของเครื่อง โดยใช้ความหนาแน่น และความถี่ของสันลายนิ้วมือมาเป็นคุณลักษณะพิเศษในการจำแนกเพศ (Tarare, Anjekar, & Turkar, 2015) และ การลดจำนวนครั้งในการเปรียบเทียบข้อมูลที่รับเข้าเพื่อลดเวลาในการประมวลผล (Nguyen & Nguyen, 2019) ทั้งยังมีความพยายามในการสอนเครื่องด้วยวิธีแบบที่หลากหลาย (Zulfiqar, Syed, Khan, & Khurshid, 2019) หรือการจับภาพใบหน้าอย่างต่อเนื่อง (Smith-Creasey, Albaloo Shib, & Rajarajana, 2018) เพื่อลดปัญหาการปลอมแปลงตัวตน การใช้เทคนิคการโอนย้ายข้อมูลเพื่อลดเวลาในการสอนเครื่อง (Bonazza, Mitéran, Ginhac, & Dubois, 2018; Tobji, Di, & Ayoub, 2019) หรือการใช้หลายคุณลักษณะมาบูรณาการเข้าด้วยกัน (Phillips, Zou, Li, & Li, 2019) หรือการใช้เทคนิคเพื่อปรับคุณภาพของข้อมูลนำเข้าในกรณีที่ข้อมูลมีคุณภาพต่ำ (Arsalan *et al.*, 2017; Bazrafkan *et al.*, 2018)

เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่องที่นำมาใช้ในการพิสูจน์ตัวตน ส่วนใหญ่เป็นการนำการเรียนรู้แบบไม่มีผู้สอนมาใช้ หากต้องการให้เครื่องพยากรณ์ผลลัพธ์ได้แม่นยำ ข้อมูลที่นำมาใช้สอนควรมีปริมาณมากพอ มีความถูกต้องสมบูรณ์รองรับสถานการณ์ที่หลากหลาย และมีการกำหนดค่าผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับข้อมูล เพื่อให้อุปสรรคอันเกิดจากพฤติกรรมของมนุษย์และสถานะแวดล้อมมีผลต่อแบบจำลองน้อยที่สุด

เทคนิคการเรียนรู้แบบถ่ายโอนถูกนำมาใช้ในบางกรณีเพื่อลดเวลาในการเตรียมข้อมูล ขณะเดียวกันการศึกษาหลายชิ้นให้ความสำคัญกับการนำเทคนิคการเรียนรู้เชิงลึกมาใช้ระบบพิสูจน์ตัวตน ด้วยกระบวนการทำงานที่ใกล้เคียงกับกระบวนการคิดที่ปรับได้เองเช่นเดียวกับสมองมนุษย์ อย่างไรก็ตามเทคโนโลยีนี้ต้องการทรัพยากรสำหรับการวิเคราะห์และเปรียบเทียบข้อมูลที่มีประสิทธิภาพสูง ซึ่งอาจจำเป็นต้องใช้หน่วยประมวลผลกราฟิก (GPU) เพื่อออกแบบมาเพื่อเพิ่มความเร็วในการประมวลผลข้อมูลรูปภาพ มาช่วยในการคำนวณ หรืออาจใช้คอมพิวเตอร์ที่ประมวลผลแบบขนาน (Parallel Processing) มาเพิ่มความเร็วในการสืบค้นข้อมูลจากฐานข้อมูลที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งผลการศึกษาล่าสุดแสดงให้เห็นว่าการใช้การเรียนรู้เชิงลึกช่วยลดความยุ่งยากให้กับผู้ใช้ในการคัดเลือกตัวแปรที่นำไปใช้ในการพยากรณ์ เพิ่มความถูกต้องของผลลัพธ์ มีศักยภาพในการรักษาความปลอดภัย

แบบไบโอเมตริกซ์ได้สูง และเพิ่มความแข็งแกร่งในการโจมตีของผู้ไม่ประสงค์ดี ขณะเดียวกันในสถานการณ์ที่ต้องการความปลอดภัยที่สูงขึ้น ผู้ใช้ควรพิจารณาต่อว่า การใช้ปัจจัยในการพิสูจน์ตัวตนเพียงอย่างเดียวเช่น ลายนิ้วมือนั้นเพียงพอหรือไม่ หรือต้องใช้คุณลักษณะของสรีระมนุษย์หลายชนิดร่วมกัน เช่น เสียงและใบหน้า สัญญาณหัวใจและลายนิ้วมือหรืออื่นๆ ร่วมกัน เพิ่มเพื่อสร้างความแข็งแกร่งอย่างแท้จริงและคาดได้ว่าในอนาคตอันใกล้เทคโนโลยีการพิสูจน์ตัวตนด้วยไบโอเมตริกซ์จะยังคงมีความก้าวหน้าในการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง และอาจถูกนำมาใช้เป็นมาตรฐานเบื้องต้นในการป้องกันโจร ผู้บุกรุก และบุคคลที่เป็นอันตราย

### ข้อเสนอแนะ

แรงจูงใจหลักในการพิสูจน์ตัวตนด้วยไบโอเมตริกซ์คือ ความถูกต้อง และความปลอดภัยจากการปลอมแปลงที่เพิ่มขึ้นในค่าใช้จ่ายที่ลดลง แม้ไบโอเมตริกซ์มีศักยภาพในการแก้ปัญหาการพิสูจน์ตัวตนได้ดี แต่การระบุตัวตนด้วยไบโอเมตริกซ์ยังมีความซับซ้อนจากปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อความถูกต้องในการทำงานของระบบ จากปัจจัยหลักด้านสภาพแวดล้อม ดังนั้นในบริบททั่วไปการจดจำลายนิ้วมืออาจเป็นตัวเลือกที่เหมาะสมในการใช้งานกับอุปกรณ์เคลื่อนที่ แต่อาจไม่ใช่ทางเลือกที่ดีที่สุดเมื่อต้องการระบุตัวตนจากระยะไกล ปัจจัยอื่นที่ต้องพิจารณาควบคู่เพื่อป้องกันการปลอมแปลงอัตลักษณ์ส่วนบุคคล คือ ในสถานะแวดล้อมนั้นๆ คุณลักษณะใดของไบโอเมตริกซ์จะมีความเหมาะสมมากที่สุด ปัจจุบันยังคงไม่มีเทคโนโลยีการพิสูจน์ตัวตนด้วยไบโอเมตริกซ์ที่สมบูรณ์แบบ ทำให้มีการนำเทคนิคอื่นๆ มาปรับปรุงระบบเดิมเพื่อกำจัดจุดอ่อน เช่น การเรียนรู้ของเครื่อง การเรียนรู้เชิงลึก และคุณลักษณะทางชีวภาพมากกว่าหนึ่งคุณลักษณะมาบูรณาการ เพื่อลดจุดอ่อนของวิธีการเดิม และเพิ่มช่องทางการใช้ประโยชน์จากจุดแข็งของแต่ละวิธีการอย่างสร้างสรรค์ แต่แนวทางในการปรับปรุงประสิทธิภาพหรือการลดอัตราความผิดพลาดที่จะเกิดขึ้น ย่อมมีต้นทุน เช่น ทรัพยากรที่เพิ่มขึ้น และการทำงานที่ช้าลง ดังนั้นผู้ใช้จึงควรศึกษาข้อดีข้อเสียอย่างรอบคอบ ก่อนตัดสินใจใช้ระบบพิสูจน์ตัวตนด้วยไบโอเมตริกซ์ เพื่อให้มีความคุ้มค่าและสอดคล้องกับบริบทของตนมากที่สุด

### เอกสารอ้างอิง

สุวิมล วงศ์สิงห์ทอง. (2565). *การบริหารความมั่นคงสารสนเทศ*. มหาวิทยาลัยเกริก. ศูนย์วิจัยและผลิตตำรา. มหาวิทยาลัยเกริก. 364 หน้า.

- Ali, R. (2021). AI-enabled Decision Support System: Methodologies, Applications, and Advancements 2021. *Scientific Programming 2021*(Article ID 3225687). doi:<https://doi.org/10.1155/2021/3225687>
- Arsalan, M., Hong, H. G., Naqvi, R. A., Lee, M. B., Kim, M. C., Kim, D. S., ... Park, K. R. (2017). Deep Learning-Based Iris Segmentation for Iris Recognition in Visible Light Environment. *Symmetry*, 9(263), 1-25. [https://mdpi-res.com/d\\_attachment/symmetry/symmetry-09-00263/article\\_deploy/symmetry-09-00263.pdf?version=1509792574](https://mdpi-res.com/d_attachment/symmetry/symmetry-09-00263/article_deploy/symmetry-09-00263.pdf?version=1509792574)
- Bazrafkan, S., Thavalengal, S., & Corcoran, P. (2018). An End to End Deep Neural Network for Iris Segmentation in Unconstraint Scenarios. *Neural Networks*, 106, 79-95. <https://doi.org/10.1016/j.neunet.2018.06.011>
- Bock, F.E., Aydin, R.C., Cyron, C.J., Huber, N., Kalidindi, S.R., Klusemann, B. (2019). A Review of the Application of Machine Learning and Data Mining Approaches in Continuum Materials Mechanics. *Sec. Computational Materials Science Front. Mater.* 6:110. <https://doi.org/10.3389/fmats.2019.00110>
- Bonazza, P., Mitéran, J., Ginhac, D., & Dubois, J. (2018). *PhD Forum : Machine Learning VS Transfer Learning Smart Camera Implementation for Face Authentication*. Paper presented at the ICDS '18, September 3–4, 2018, Eindhoven, Netherlands. <https://doi.org/10.1145/3243394.3243710>
- Charniak, E. (2018). *Introduction to Deep Learning*, The MIT Press Cambridge, Massachusetts London, England
- Daugman J., 2004. How Iris Recognition Works. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, Vol. 14, No. 1, January 2004
- Fazala, M. I., Patela, M. E., Tyea, J., & Guptab, Y. (2018). The past, present and future role of artificial intelligence in imaging. *European Journal of Radiology*, 105, 246-250. <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2018.06.020>
- Goodfellow, I., Bengio, Y., Courville, A. (2022). *Deep Learning (Adaptive Computation and Machine Learning series)*. The MIT Press
- Jayashree, R. (2020). *Analysis of Aadhaar Card Dataset Using Big Data Analytics*. In: Emerging Trends in Computing and Expert Technology. COMET 2019. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies, vol 35. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-32150-5\\_123](https://doi.org/10.1007/978-3-030-32150-5_123)
- Kantardzic, M. (2020). *DATA MINING Concepts, Models, Methods, and Algorithms Third Edition*, IEEE Press, Wiley
- Kim, H., Cui, X., Kim, M.-G., & Nguyen, T. H. B. (2019). "Fingerprint Generation and Presentation Attack Detection using Deep Neural Networks," 2019 IEEE Conference on Multimedia Information Processing and Retrieval (MIPR), 2019, pp. 375-378, doi: 10.1109/MIPR.2019.00074.
- Lardinois, F. (2021, October 27, 2021). Delta Air Lines partners with TSA PreCheck to launch biometrics-based bag drops. <https://techcrunch.com/2021/10/27/delta-air-lines-partners-with-tsa-precheck-to-launch-biometrics-based-bag-drops/>
- Macdonald, A. (2022). Interpol program for fighting terrorism through biometrics deployed in Cameroon. *Biometric.Update.com*. <https://www.biometricupdate.com/202201/interpol-program-for-fighting-terrorism-through-biometrics-deployed-in-cameroon>
- Mahdavinejad, M.S., Rezvan, M., Berekatain, M., Adibi, P., Barnaghi, P., Sheth, A.P.(2018). Machine learning for internet of things data analysis: a survey. *Digital Communications and Networks*, p 161-175. <https://doi.org/10.1016/j.dcan.2017.10.002>
- Marsico, M. D., Petrosino, A., & Ricciardi, S. (2016). Iris Recognition through Machine Learning Techniques: a Survey. *Pattern Recognition Letters*. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2016.02.001>
- Manjunatha, V., Ramalingam, S., Marks, T., Davis, L. (2018). *Class Subset Selection for Transfer Learning using Submodularity*. <https://arxiv.org/abs/1804.00060v1> [cs.CV] 30 Mar 2018
- Matsumi, S., Nozaki, Y., Yoshikawa, M. (2018). Feature Extraction Driven Modeling Attack Against Double Arbiter PUF and Its Evaluation, AICCC '18, December 21–23, 2018, Tokyo, Japan. DOI: <https://doi.org/10.1145/3299819.3299835>

- Nguyen, H. T., & Nguyen, L. T. (2019). Fingerprints Classification through Image Analysis and Machine Learning Method. <https://doi.org/10.3390/a12110241>
- Noh, N. S. M., Jaafar, H., Mustafa, W. A., Idrus, S. Z. S., & Mazelan, A. H. (2020). Smart Home with Biometric System Recognition. *Journal of Physics: Conference Series*, 1529 042020. doi:10.1088/1742-6596/1529/4/042020
- Phillips, T., Zou, X., Li, F., & Li, N. (2019). *Enhancing Biometric-Capsule-based Authentication and Facial Recognition via Deep Learning*. Paper presented at the the 24th ACM Symposium, SACMAT '19, June 3–6, 2019, 141-146, Toronto, ON, Canada. <https://doi.org/10.1145/3322431.3325417>
- Seffers, G. I. (2020). FBI Upgrades Biometric Technologies. *Signal*. doi:<https://www.afcea.org/content/fbi-upgrades-biometric-technologies>
- Seven Bank, L. (2019). Introducing a Next-generation ATM with face recognition and QR code reader. [https://www.sevenbank.co.jp/english/ir/pdf/2019/20190912\\_E1.pdf](https://www.sevenbank.co.jp/english/ir/pdf/2019/20190912_E1.pdf)
- Shepard, S. (2016). Dallas Area Rapid Transit to Increase Security with Cameras. *Security Today*. doi:<https://securitytoday.com/articles/2016/02/19/dallas-area-rapid-transit-to-increase-security-with-cameras.aspx?admgarea=ht.networkcentric&m=1>
- Smith-Creasey, M., Albaloooshib, F. A., & Rajarajana, M. (2018). Continuous face authentication scheme for mobile devices with tracking and liveness detection. *Microprocessors and Microsystems*, 63, 147-157. <https://doi.org/10.1016/j.micpro.2018.07.008>
- Tarare, S., Anjekar, A., & Turkar, H. (2015). *Fingerprint Based Gender Classification Using DWT Transform*. 2015 International Conference on Computing and Communication Control and Automation. February 26 - 27, 2015. Pune, India. doi: 10.1109/ICCU-BEA.2015.141
- Tobji, R., Di, W., & Ayoub, N. (2019). FMnet: Iris Segmentation and Recognition by Using Fully and Multi-Scale CNN for Biometric Security. *Applied Sciences*, 9(2042), 1-17. [https://mdpi-res.com/d\\_attachment/applsci/applsci-09-02042/article\\_deploy/applsci-09-02042.pdf?version=1558088546](https://mdpi-res.com/d_attachment/applsci/applsci-09-02042/article_deploy/applsci-09-02042.pdf?version=1558088546)
- Yang, X-S. (2019). *Introduction to Algorithms for Data Mining and Machine Learning*. Academic Press. United Kingdom
- Zulfiqar, M., Syed, F., Khan, M. J., & Khurshid, K. (2019). *Deep Face Recognition for Biometric Authentication*. Proceeding of the 1st International Conference on Electrical, Communication and Computer Engineering (ICECCE), 24-25 July 2019, Swat, Pakistan. <https://doi.org/10.1109/ICECCE47252.2019.8940725>



# TMAC: โพรโทคอลชั้นแมคเพื่อการสื่อสารระยะไกลสำหรับโพรโทคอลเอ็มคิวทีทีบนเครือข่ายลอรา

## TMAC: A telemetry MAC protocol for MQTT over LoRa networks

ธงชัย เจือจันทร์<sup>1</sup>, ทวีวัฒน์ มุลจัต<sup>1</sup> และ เอกชนัช เหลืองศิริวรรณ<sup>1\*</sup>

Thongchai Chuachan<sup>1</sup>, Taweewat Moonjat<sup>1</sup> and Aktanat Luengsirivan<sup>1\*</sup>

Received: 29 August 2022 ; Revised: 13 January 2023 ; Accepted: 16 February 2023

### บทคัดย่อ

เอ็มคิวทีทีเป็นโพรโทคอลที่ออกแบบและพัฒนาสำหรับการเชื่อมต่อที่มีแบนด์วิดท์ต่ำ และถูกนำไปประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายสำหรับอินเทอร์เน็ตในสรรพสิ่ง ซึ่งส่วนใหญ่เอ็มคิวทีทียังคงถูกประยุกต์ใช้เพียงบนเครือข่ายรูปแบบที่ซีพี/ไอพีเดิม แต่ปัจจุบันมีความต้องการใช้เอ็มคิวทีทีสำหรับเครือข่ายระยะไกลมากขึ้น โดยงานวิจัยก่อนหน้ายังไม่มีการพัฒนาโพรโทคอลเอ็มคิวทีทีให้ผสมผสานใช้ร่วมกับเครือข่ายระยะไกลได้อย่างมีประสิทธิภาพ งานวิจัยนี้จึงออกแบบและพัฒนาโพรโทคอล TMAC เพื่อขยายการเชื่อมต่อโพรโทคอลเอ็มคิวทีทีที่ใช้สำหรับเครือข่ายระยะไกล และทดลองโพรโทคอลจากงานวิจัยนี้บนระบบทดสอบ ซึ่งผลการทดลองพบว่า โพรโทคอล TMAC สามารถเชื่อมต่อได้ในระยะไม่ต่ำกว่า 5 กิโลเมตรและมีโอเวอร์เฮดของเน็ตเวิร์คต่ำ

**คำสำคัญ:** เอ็มคิวทีที เครือข่ายลอรา ไอโอที

### Abstract

MQ Telemetry Transport (MQTT) has been designed and developed for an ultra-low bandwidth communication and has been applied to used in Internet of Things (IoT). Recently, MQTT has been used in traditional TCP/IP networks. Yet, the ultra-low bandwidth and long-range communication of MQTT have been considerably increased. Previous proposed techniques still struggle to make MQTT compatible with Long-Range (LoRa) networks. In this paper, we have design and implement the Telemetry Media Access Control (TMAC). Our TMAC helps increase ranges of MQTT's data communications. We have experimented our TMAC using a network testbed. Experimental results have illustrated that our TMAC can transfer data over 5 kilometers with low network overhead.

**Keywords:** MQTT, LoRa Networks, IoT

<sup>1</sup> สาขาวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์ จังหวัดสุรินทร์

<sup>1</sup> Computer science, Faculty of Science and Technology Surin Rajabhat University, Surin Province

\* Corresponding author Email: aktanat@sru.ac.th

## บทนำ

MQ Telemetry Transport (MQTT) (HiveMQ, 2020) เป็นหนึ่งในโพรโทคอลที่ถูกใช้อย่างแพร่หลายสำหรับการเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบเครือข่ายอินเทอร์เน็ตของอุปกรณ์อินเทอร์เน็ตในสรรพสิ่ง (Internet of Things: IoT) โดย MQTT ถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อควบคุมสั่งการและรับข้อมูลจากอุปกรณ์เซ็นเซอร์ (Sensors) ผ่านเครือข่าย Ethernet และ WiFi เป็นต้น ซึ่งทำให้ MQTT มีความสำคัญอย่างมากสำหรับ IoT ในปัจจุบัน

จากความต้องการประยุกต์ใช้ IoT สำหรับเครือข่ายระยะไกล หน่วยงาน Internet Engineering Task Force (IETF) (IETF, 2021) จึงออกแบบมาตรฐาน Low-Power Wide Area Network (LPWAN) (Heile *et al.*, 2018) เพื่อเพิ่มศักยภาพของ IoT ให้สามารถเชื่อมต่อผ่านเครือข่ายไร้สายที่มีระยะครอบคลุมพื้นที่การเชื่อมต่อกว้างขึ้น โดย Long-Range (LoRa) (Ferré & Giremus, 2018; Vangelista, 2017) เป็นหนึ่งเทคโนโลยีการมอดูเลชัน (Modulation) ของเครือข่ายไร้สายที่ถูกนำมาใช้ แต่ LoRa ขาดโพรโทคอลควบคุมการเชื่อมต่อสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ และไม่สามารถนำ MQTT ผสานเป็นส่วนหนึ่งกับ LoRa ได้

ก่อนหน้านี้มีการพัฒนาโพรโทคอล Long Range Wide Area Networks (LoRaWAN) (Petrariu *et al.*, 2019) ทำงานเทียบได้กับชั้น Media Access Control (MAC) (Ansari & Zhang, 2013) ที่คอยกำกับการรับและส่งเฟรมข้อมูลของ LoRa ซึ่ง LoRaWAN มีความสามารถ เช่น เชื่อมต่อแบบสองทาง (Full Duplex) มีกลไกควบคุมการส่งเฟรมข้อมูล และสามารถผสาน LoRaWAN ให้ถูกใช้งานกับ MQTT ผ่านทางแม่ข่าย (Server) ของ LoRaWAN ได้ แต่ LoRaWAN ไม่สามารถผสานเข้ากับ MQTT ได้โดยตรงที่เกตเวย์ดัง Figure 3 (ในส่วนของ App Server) ไม่สามารถสื่อสารได้แบบปลายทางสู่ปลายทาง (End-to-End) มีความหน่วงของการเชื่อมต่อสูง (High Latency) และส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการเชื่อมต่อสื่อสารดัง (Kietzmann *et al.*, 2022) ดังกล่าวไว้

ด้านงานวิจัยที่มีแนวคิดที่จะนำ MQTT มาผสานเข้ากับ LoRa (Bhawiyuga *et al.*, 2019 ; Huang *et al.*, 2019 ; Spinsante *et al.*, 2017 ; Sun *et al.*, 2020) นั้น ส่วนใหญ่ใช้วิธีสร้างเกตเวย์และรับข้อมูลจากอุปกรณ์ IoT ในชั้น LoRa โดยไม่มีการพัฒนาชั้น MAC และถึงแม้จะมีโอเวอร์เฮดด้านการประมวลผล (Computational Overhead) ไม่สูง แต่จะเกิดโอเวอร์เฮดของเครือข่าย (Network Overhead) สูงหากอุปกรณ์เกิดการเชื่อมต่อล้มเหลว เกิดข้อมูลสูญหายโดยที่ไม่มีกลไกตรวจสอบ ทำให้การเชื่อมต่อโดยใช้ LoRa นั้นไม่มีความน่าเชื่อถือ (Unreliable) และไม่มีวิธีการเมื่อต้องส่งข้อมูลที่มี

ขนาดใหญ่กว่าแบนด์วิดท์ของ LoRa และไม่สามารถเชื่อมต่อแบบ Full Duplex ได้

ส่วนการประกาศมาตรฐาน SCHC over LoRaWAN (Audebert *et al.*, 2021) ถูกออกแบบให้มีกลไก Fragmentation and Reassembly (FaR) อยู่บน LoRaWAN โดยใช้กลไกของ Static Context Header Compression and Fragmentation (SCHC) (Minaburo *et al.*, 2020) ซึ่งช่วยให้การพัฒนา มีความสะดวกมากขึ้นและสามารถนำ MQTT ผสานกับ LoRa ได้โดยให้ MQTT อยู่บนโพรโทคอล SCHC แต่การเพิ่มชั้นเครือข่าย MQTT ให้อยู่บน SCHC และ LoRaWAN นั้นจะทำให้มีโอเวอร์เฮดของเครือข่ายสูง และไม่เหมาะกับการนำไปใช้กับเครือข่ายที่มีทั้งแบนด์วิดท์และทรัพยากรประมวลผลต่ำ

งานวิจัยนี้จึงออกแบบและพัฒนาโพรโทคอล Telemetry Media Access Control (TMAC) สำหรับการสื่อสารโดยใช้ MQTT บนเครือข่าย LoRa ที่มีคุณสมบัติ 1) ปรับปรุงโพรโทคอล MQTT ให้ผสานใช้งานร่วมกับ LoRa ได้ 2) เพิ่มปริมาณการส่งข้อมูลโดยพัฒนากลไก FaR 3) มีกลไกป้องกันการสูญหายของข้อมูลในชั้น MAC และ 4) เข้ากันได้กับ MQTT ที่ถูกใช้อยู่ในปัจจุบัน โดย TMAC ถูกพัฒนาโดยใช้ MicroPython ติดตั้งและทดสอบโพรโทคอลบนฮาร์ดแวร์รุ่น ESP32 TTGO-v1.0 แล้วทดสอบบนเครือข่าย Test-bed เพื่อศึกษาโอเวอร์เฮดของเครือข่าย และดีเลย์ (Delay) และกลไกการกู้คืน (Recovery) แฝงเกิดที่เกิดสูญหาย ซึ่งผลการทดลองพบว่าโพรโทคอลจากงานวิจัยนี้เกิดโอเวอร์เฮดของเครือข่ายต่ำ และเกิดการสูญหายและมีการกู้คืนสัดส่วนน้อยที่การส่งสัญญาณระยะ 5 กิโลเมตร

## บททวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

### 1. โพรโทคอล MQTT

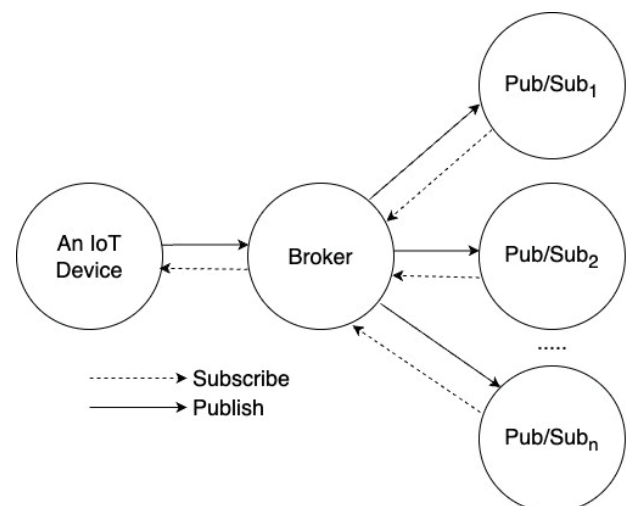
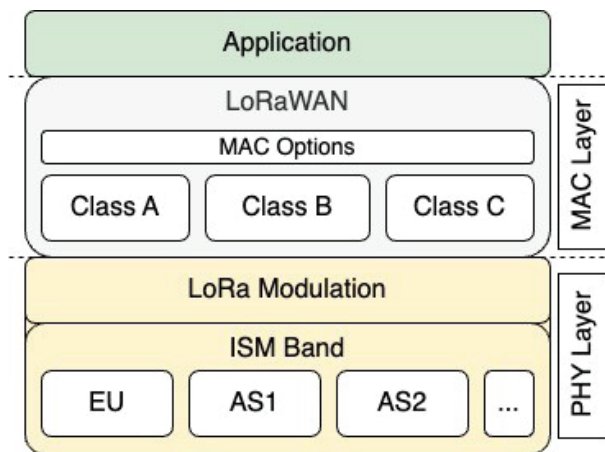


Figure 1 An MQTT system architecture

MQ Telemetry Transport (MQTT) เป็นหนึ่งในโพรโทคอลที่ถูกใช้สำหรับการรับและส่งคำสั่งควบคุมระหว่างอุปกรณ์ IoT และผู้ใช้ โดยอาศัยตัวกลาง (Broker) ดังแสดงใน Figure 1 ทั้งอุปกรณ์ IoT และผู้รับข้อมูล (Pub/Sub ใน Figure 1) จะต้องเชื่อมไปยัง Broker ก่อนและถ้าหาก Pub/Sub จะสื่อสารไปยังอุปกรณ์ IoT (An IoT Device) จะต้องส่งคำสั่งไปที่ Broker โดยใช้ชื่อเรียก เช่น /room1/light เป็นต้น ซึ่งเรียกว่าการ Publish ข้อมูล จากนั้นอุปกรณ์ใดๆ ก็ตามที่เชื่อมไปยัง Broker และมีการรอรับข้อมูล (Subscribe) ชื่อเดียวกับ Broker จะส่งข้อมูลดังกล่าวให้กับทุกอุปกรณ์ที่ Subscribe ไว้

โพรโทคอล MQTT ในปัจจุบันทำงานอยู่บนชั้นทรานสปอร์ต (Transport layer) ส่งข้อมูลโดยใช้ TCP (Socolofsky & Kale, 1991) และส่งข้อมูลได้แบบเรียลไทม์ (Realtime) ซึ่งเกิดจากปัจจัยการออกแบบที่คำนึงถึงประสิทธิภาพการใช้พลังงานแบบเตอเรียร์ ใช้แบนด์วิดท์ต่ำ และกำลังเป็นเครื่องมือสำคัญสำหรับการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ IoT ที่ต้องการครอบคลุมพื้นที่ส่งสัญญาณในระยะไกลได้

**2. โพรโทคอล LoRaWAN**

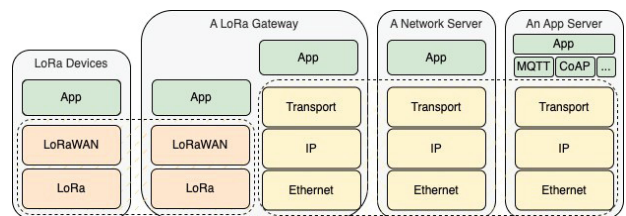


**Figure 2** LoRaWAN protocol stack

Long Range Wide Area Networks (LoRaWAN) (Petrariu *et al.*, 2019) เป็นโพรโทคอลในชั้น MAC ที่สนับสนุนให้เกิดการเชื่อมต่อแบบสองทาง (Bi-directional Communication) สนับสนุนการเชื่อมต่อสื่อสารขณะที่อุปกรณ์เกิดการเคลื่อนที่ (Mobility) และเชื่อมต่อได้ในระยะไกล ซึ่งใน Figure 2 เป็นชั้นการทำงานของ LoRaWAN โดย LoRaWAN ทำงานอยู่บนชั้นกายภาพ (PHY layer) LoRa และ LoRaWAN จะมีชุดรูปแบบการทำงานทั้งหมด 3 คลาส ประกอบด้วย Class A, Class B และ Class C ใน Class A อุปกรณ์ IoT จะอยู่ในสถานะเดินเครื่องเปล่า (Idle) และจะเริ่มทำงานตามเวลาที่กำหนดและกลับสู่สถานะ Idle เพื่อทำงานในรอบถัดไป ส่วน Class B ปรับปรุงจาก Class A โดยมีการกำหนดช่วงเวลาทำงานเป็น

ช่วงเวลาที่กำหนดเพื่อรอรับข้อมูล ทำให้ Class B มีแพ็กเก็ต Beacon เพื่อใช้ประสานเวลา (Synchronize) เป็นระยะเพื่อให้ทุกอุปกรณ์ IoT มีเวลาที่ตรงกันสำหรับใช้บริหารการส่งข้อความจากหลายอุปกรณ์ และ Class C จะทำงานตลอดเวลา ทำให้ Class C เตรียมรับและส่งข้อมูลตลอดเวลาโดยไม่คำนึงถึงการใช้พลังงาน ซึ่งเหมาะกับการใช้กับระบบที่ต้องรับและส่งข้อมูลตลอดเวลา เช่น Smart Grid เป็นต้น

สำหรับสถาปัตยกรรม LoRaWAN ดัง Figure 3 นั้นเป็นภาพรวมทั้งหมด ซึ่งประกอบด้วย 4 ส่วน คือ 1) อุปกรณ์ IoT ที่เชื่อมต่อเข้าสู่เครือข่าย LoRaWAN (LoRa Devices) 2) ส่วนเกตเวย์ (LoRa Gateway) ซึ่งจะคอยรับและส่งแพ็กเก็ตในชั้น LoRaWAN ระหว่างอุปกรณ์ IoT และเกตเวย์ จากนั้นเกตเวย์จะแทนที่ชั้น LoRaWAN ด้วย TCP/IP และส่งไปยัง A Network Server 3) ส่วน A Network Server จะคอยรับข้อมูลจากหลายเกตเวย์เพื่อตรวจสอบการซ้ำของแพ็กเก็ตจากอุปกรณ์ IoT และส่งต่อให้ส่วนที่ 4) ซึ่งเป็นส่วนของ An Application Server โดยข้อมูลในชั้น App จะนำไปใช้ประโยชน์ต่อโดยนักพัฒนา เช่น เชื่อมต่อโดยใช้โพรโทคอล MQTT, Rest API, CoAP และอื่นๆ ซึ่งจะเห็นว่าสถาปัตยกรรมทั้งหมดของ LoRaWAN นั้นมีความซับซ้อน ทำให้อาจมีดีเลย์สูง



**Figure 3** LoRaWAN communication architecture

**3. งานวิจัยก่อนหน้า**

งานวิจัยที่พยายามผสมผสาน LoRa ร่วมกับ MQTT ก่อนหน้า (Bhawiyuga *et al.*, 2019; Spinsante *et al.*, 2017; Sun *et al.*, 2020) มีลักษณะคล้ายกัน คือ อาศัยการสร้างเกตเวย์เพื่อนำข้อมูลที่ได้รับจากชั้น LoRa เข้าไปไว้ในส่วนข้อความของ MQTT แล้วแทรกด้วย TCP/IP ก่อนที่จะส่งข้อมูลต่อไปยัง Broker และ Broker ก็จะส่งต่อไปยังผู้รับข้อมูล (Subscribers) ถึงแม้ LoRa จะถูกผสมผสานจากชั้น LoRa ไปยัง MQTT ได้ แต่จะเกิดปัญหาเมื่อจำนวนอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อมีจำนวนมาก ซึ่งอาจทำให้เกิดแพ็กเก็ตสูญหายโดยไม่มีการตรวจสอบ และสื่อสารแบบสองทางไม่ได้ ซึ่งเป็นหนึ่งในปัญหาที่ถูกแก้ไขได้จากงานวิจัยนี้

ด้าน Changqing และคณะ (Sun *et al.*, 2020) ได้พัฒนาการผสมผสาน LoRa และ MQTT เข้าด้วยกันโดยการใช้ Raspberry PI เป็นเกตเวย์ LoRa แล้วนำข้อมูลที่ได้จากชั้น

LoRa ส่งต่อไปยังแม่ข่ายกลาง 2 ช่องทางคือ การใช้ MQTT และ Rest API เมื่อข้อมูลถูกเก็บที่แม่ข่ายบนระบบคลาวด์แล้ว ก็จะนำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่นๆ แต่วิธีการนี้เป็นเพียงการเพิ่มช่องทางการส่งข้อมูลจากเกตเวย์สู่ระบบคลาวด์ ซึ่งในสภาพแวดล้อมใช้งานจริงการนำข้อมูลเข้าสู่ระบบคลาวด์โดยมีสองช่องทางอาจไม่มีความจำเป็น และไม่ช่วยให้การสื่อสารโดยใช้ LoRa มีประสิทธิภาพมากขึ้น

Amin และคณะ (Tayebi *et al.*, 2022) วิเคราะห์และออกแบบการเชื่อมต่อเครือข่ายของอุปกรณ์ IoT ที่ใช้ LoRaWAN และไม่ใช่ LoRaWAN จากนั้นทำการผสมผสานทั้งสองส่วนเข้าด้วยกันเพื่อใช้ระบบหลังบ้าน (Backend) ของ LoRaWAN ได้ เช่น การเชื่อมต่อจาก CoAP มายัง Backend ของ LoRaWAN ได้ เป็นต้น และถึงแม้ Amin และคณะ จะช่วยให้อุปกรณ์ที่เชื่อมต่อด้วย LoRaWAN และไม่ใช่ LoRaWAN ใช้งานร่วมกันก่อนที่จะผสมผสานเข้าสู่ MQTT ได้ แต่ก็เป็นการเพิ่มความซับซ้อนของการเชื่อมต่อเครือข่ายและยากต่อการจัดการ และมีโอกาสที่จะเกิดดีเลย์และโอเวอร์เฮดในเครือข่ายสูง

#### 4. การผสมผสาน LoRa กับ MQTT โดยใช้ LoRAWAN และ SCHC

ความพยายามที่จะนำ TCP/IP ให้สามารถสื่อสารได้บน LoRa ของมาตรฐาน RFC 9011 (Audebert *et al.*, 2021) เป็นวิธีอาศัย LoRaWAN เป็นกลไกส่งเฟรมสำหรับ SCHC ซึ่งคอยห่อหุ้ม (Encapsulate) แพ็กเก็ตจากการสื่อสารด้วย TCP/IP ไปยังอุปกรณ์ IoT บน LoRaWAN ดังนั้น RFC 9011 จึงเป็นจุดเชื่อมต่อที่ทำให้ TCP/IP ถูกขยายการให้ใช้งานบนเครือข่าย LoRa ได้ แต่วิธีนี้เป็นเพียงการเพิ่มจำนวนชั้นของเครือข่ายจำนวนมหาศาลโดยไม่จำเป็น ซึ่งกลไกการเชื่อมต่อด้วย TCP/IP หากนำมาใช้บน LoRaWAN จะเกิดโอเวอร์เฮดในระบบเครือข่ายสูงจนส่งผลให้การขยายตัวของการใช้ IoT ช้าลงเนื่องจากปัญหาด้านประสิทธิภาพได้

### การออกแบบโพรโทคอล TMAC

#### 1. สถาปัตยกรรมของ TMAC

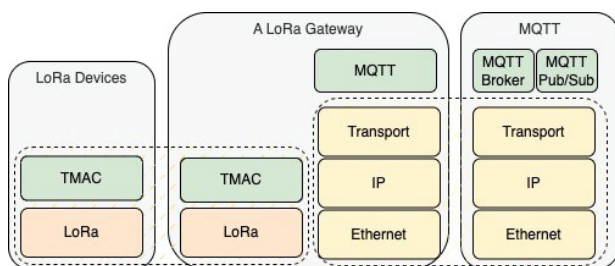


Figure 4 TMAC Protocol Stack and Architecture

งานวิจัยนี้ออกแบบโพรโทคอล Telemetry Media Access Control (TMAC) เพื่อขยายการใช้โพรโทคอล MQTT บนเครือข่าย LoRa โดยมีสถาปัตยกรรมดัง Figure 4 ซึ่งมี 3 ส่วน คือ

- Lora Devices คือ อุปกรณ์ IoT ที่สนับสนุนการเชื่อมต่อด้วย LoRa และในอุปกรณ์จะมีชั้นเครือข่าย 2 ชั้นคือ LoRa และ TMAC
- A LoRa Gateway เป็นส่วนที่คอยแปลโพรโทคอล TMAC ที่ได้รับจากจุดเชื่อมต่อ LoRa (LoRa Interface) มาสร้างเป็นแพ็กเก็ต MQTT ที่อยู่บนเครือข่าย TCP/IP และส่งต่อไปยัง MQTT Broker
- MQTT คือส่วนของ MQTT Broker และกลุ่มอุปกรณ์ Pub/Sub บนระบบคลาวด์

### 2. โพรโทคอล TMAC

#### 2.1 ขั้นตอน Bootstrapping ของ TMAC

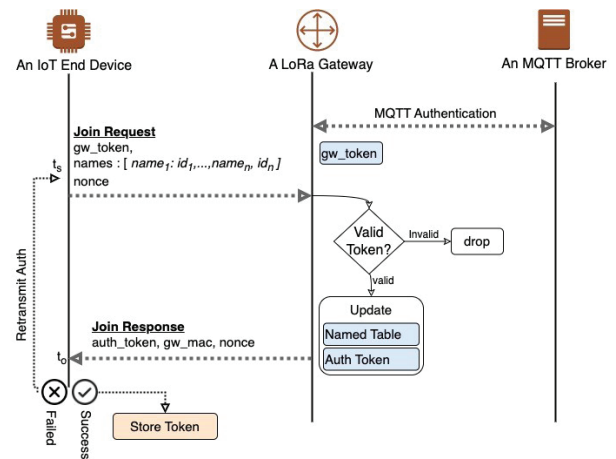


Figure 5 An TMAC bootstrapping procedure

ขั้นตอนการเชื่อมต่อของ TMAC และ MQTT เป็นดัง Figure 5 โดยจะต้องเริ่มติดตั้ง LoRa Gateway โดยยืนยันตัวตนและเชื่อมต่อไปยัง Broker จนสำเร็จ และที่เกตเวย์จะมีค่าคอนฟิกสำหรับการให้สิทธิ์การเข้าถึงเครือข่ายของอุปกรณ์ IoT คือ gw\_token และเมื่อมีการปลุกเครื่อง (Bootstrap) อุปกรณ์ IoT จะเริ่มทำงานดัง Figure 5 โดยอุปกรณ์ IoT จำเป็นต้องมีการคอนฟิกค่าเบื้องต้นไว้ดังนี้

- gw\_token คือ รหัสที่ใช้สำหรับยืนยันขอสิทธิ์การเชื่อมต่อเครือข่ายผ่านเกตเวย์
- names คือ รายการชื่อที่ใช้สำหรับการ Publish และ Subscribe จากอุปกรณ์ IoT ไปยัง Broker โดยข้อมูลส่วนนี้จะแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ชื่อ (name) และหมายเลขชื่อ (id)



- *nonce* เป็นหมายเลขจากการสุ่มเพื่อป้องกันการซ้ำซ้อนของข้อมูลและใช้เป็นเครื่องมือระบุแพ็กเก็ต

เมื่อเริ่มปลูกเครื่องอุปกรณ์ IoT จะส่งข้อมูลข้างต้นไปแบบกระจาย (Broadcast) เมื่อเกตเวย์ได้รับและพบว่าแพ็กเก็ตประเภท Join Request (กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.3 การแบ่งและรวมเฟรมของ TMAC) เกตเวย์จะตรวจสอบ *gw\_token* เพื่อยืนยันและให้สิทธิ์เชื่อมต่อ โดยถ้าหาก *gw\_token* ถูกต้อง เกตเวย์จะเก็บข้อมูล *names* ลงตาราง MQTT Names และ Auth Tokens ดัง Table 1 และ Table 2 ตามลำดับ

ในตาราง MQTT Names ดัง Table 1 ประกอบด้วยหมายเลข *MAC*, *name\_id* และ *name* โดย *MAC* เป็นข้อมูลที่ดึงมาจากเฟรมของ TMAC (กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.3 การแบ่งและรวมเฟรมของ TMAC) ส่วน *name\_id* คือ หมายเลขเอกลักษณ์ของ *name* มี ซึ่ง *name* นี้คือชื่อสำหรับเชื่อมต่อกับ Broker และถูกใช้สำหรับการ Publish และ Subscribe ข้อมูลตามกลไกของ MQTT

**Table 1** MQTT Names

MAC	name_id	name
MAC <sub>1</sub>	1	/p
MAC <sub>2</sub>	2	/n
...	...	...
MAC <sub>n</sub>	n	/x

ส่วนตาราง Auth Tokens ใน Table 2 จะอัปเดตเมื่อเกตเวย์ยืนยันเลข *gw\_token* สำเร็จ โดยเกตเวย์จะสุ่มเลข *auth\_token* ขนาด 16 บิต จับคู่กับเลข *MAC* ซึ่งมีขนาด 48 บิต โดย *auth\_token* นี้จะใช้สำหรับการยืนยันตัวตนคู่กับการใช้เลข *MAC* สำหรับการ Publish ข้อมูล

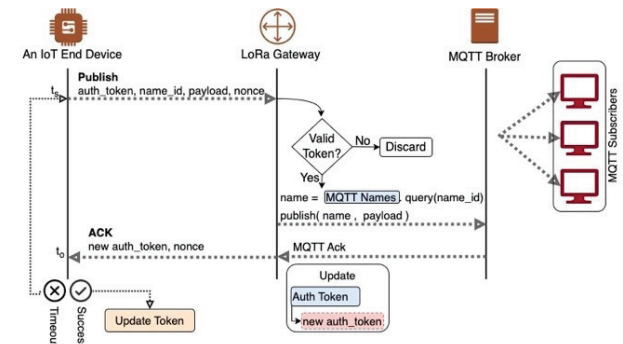
หลังจากที่ตาราง MQTT Names และ Auth Tokens ถูกอัปเดตแล้ว เกตเวย์จะส่ง *auth\_token*, *gw\_mac* และเลข *nonce* ของเกตเวย์กลับไปยังอุปกรณ์ IoT เป็นแพ็กเก็ตประเภท Join Response (กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.3 การแบ่งและรวมเฟรมของ TMAC) โดย *auth\_token* คือ หมายเลขที่ใช้สำหรับยืนยันอุปกรณ์ IoT ที่ผ่านการอนุญาตโดยเกตเวย์แล้วสามารถใช้สำหรับส่งคำสั่ง Publish ข้อมูลได้ ส่วน *gw\_mac* เป็นหมายเลข *MAC* ของเกตเวย์ ถูกใช้สำหรับการส่ง Publish ไปยังเกตเวย์ได้แบบตรง (Unicast) ส่วน *nonce* เป็นเลขเดียวกันกับ *nonce* ที่ได้รับจากแพ็กเก็ต Join Request เพื่อยืนยันว่าเป็นแพ็กเก็ต Join Response ที่ตอบสนองจากการส่ง Join Request ที่ถูกต้อง

**Table 2** Auth Tokens

MAC	auth_token
MAC <sub>1</sub>	Tk <sub>1</sub>
MAC <sub>2</sub>	Tk <sub>2</sub>
...	...
MAC <sub>n</sub>	Tk <sub>n</sub>

ส่วนกลไกป้องกันการสูญหายของแพ็กเก็ตในขั้นตอน Bootstrapping ของ TMAC นั้น หลังจากเริ่มส่ง Join Request ระบบจะเก็บเวลาเริ่มทำงาน *t<sub>s</sub>* จากนั้นรอแพ็กเก็ตตอบกลับ ซึ่งถ้าหากแพ็กเก็ตถูกส่งสำเร็จอุปกรณ์ IoT จะได้รับแพ็กเก็ต Join Response แต่ถ้าหากไม่ได้รับแพ็กเก็ต Join Response จนถึง *t<sub>o</sub>* ซึ่งหมายถึงการหมดเวลา (Timeout) อุปกรณ์ IoT จะหน่วงเวลารอ (Backoff) ด้วยการสุ่มระหว่าง 1 ถึง 10 วินาที และเมื่อหมดเวลา Backoff แล้ว TMAC จะเริ่มส่งแพ็กเก็ต Join Request และเข้าสู่ขั้นตอน Bootstrapping ใหม่

**2.2 การ Publish ข้อมูลด้วย TMAC**



**Figure 6** An IoT device publishes MQTT payloads

หนึ่งในกลไกของ MQTT คือการ Publish ข้อมูลไปยัง Broker ซึ่งการ Publish โดยใช้ TMAC บนเครือข่าย LoRa นั้นเป็นไปตาม Figure 6 ซึ่งเริ่มต้นส่งข้อมูลจากอุปกรณ์ IoT ที่ประกอบด้วย *auth\_token*, *name\_id*, *payload* และ *nonce* เมื่อแพ็กเก็ตส่งถึงเกตเวย์ เกตเวย์จะตรวจสอบ *auth\_token* ในตาราง Auth Tokens (ตาม Table 2) โดยใช้เลข *MAC* และ *auth\_token* หากไม่ตรงกันเกตเวย์จะทิ้งแพ็กเก็ตดังกล่าวทิ้ง แต่ถ้าหากถูกต้องเกตเวย์จะค้นหา *name* จากตาราง MQTT Names (ใน Table 1) แล้วทำการ Publish ข้อมูล *payload* ไปยัง Broker

หลังจากเกตเวย์ส่งแพ็กเก็ตไปยัง Broker และได้รับแพ็กเก็ต PUBACK จาก Broker แล้ว เกตเวย์จะสร้าง *auth\_token* ใหม่ และอัปเดตข้อมูลลงในตาราง Auth Tokens และส่ง *auth\_token* กลับไปยังอุปกรณ์ IoT โดยใช้แพ็กเก็ตประเภท

Acknowledgement (ACK) ซึ่งประกอบด้วย *auth\_token* และ *nonce* และหลังจากแพ็กเก็ต ACK ถูกส่งถึงอุปกรณ์ IoT แล้ว อุปกรณ์ IoT จะอัปเดตค่า *auth\_token* ไว้ใช้สำหรับการ Publish ข้อมูลในครั้งถัดไป

สำหรับแพ็กเก็ตที่เริ่มส่ง ณ  $t_s$  จนถึง  $t_o$  แล้วแต่ยังไม่ได้รับแพ็กเก็ต ACK จะเกิด Timeout ขึ้น อุปกรณ์ IoT จะเข้าสู่กระบวนการส่งใหม่ (Retransmission) โดยกลับไปที่ยุทธวิธี  $t_s$

### 2.3 การรับข้อมูลด้วยวิธี Subscribe ผ่าน TMAC

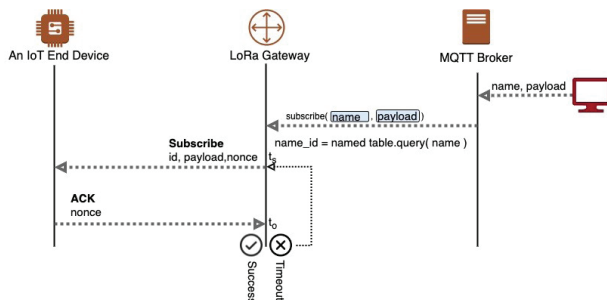


Figure 7 A subscription of IoT devices over TMAC

การ Subscribe ข้อมูลจาก Broker ผ่าน LoRa ของโพรโทคอล TMAC นั้น มีกลไกดัง Figure 7 ซึ่งเริ่มจากเกตเวย์ได้รับแพ็กเก็ต Subscribe จาก Broker จากนั้น เกตเวย์จะค้นหา *name\_id* และ *MAC* จากการนำส่วน Topic ของแพ็กเก็ต Subscribe ค้นหาในตาราง MQTT Names แล้วประกอบเป็นแพ็กเก็ต TMAC ซึ่งมี *name\_id* และ *payload* เป็นส่วนประกอบส่งไปยังอุปกรณ์ IoT พร้อมกับเริ่มนับเวลา  $t_s$  และหลังจากที่แพ็กเก็ตถูกส่งถึงอุปกรณ์ IoT แล้ว อุปกรณ์ IoT จะส่งแพ็กเก็ตประเภท ACK กลับมายังเกตเวย์ เพื่อยืนยันการได้รับข้อมูล แต่ถ้าหากไม่ได้รับ ACK จนถึง  $t_o$  เกตเวย์จะเริ่ม Backoff และส่งแพ็กเก็ตใหม่

## 3. การส่งเฟรมแพ็กเก็ต TMAC

### 3.1 เฟรมแพ็กเก็ต TMAC

	48-bit	4-bit	4-bit	8-bit	8-bit	variable	16-bit
	MAC	f_cnt	f_idx	p_type	p_len	payload	crc
An Example	748f3cc24b0d	3	0	1	255	{sensros: { ...	a2
	748f3cc24b0d	3	1	1	255	temp: 28.4,.....	8c
	748f3cc24b0d	3	2	1	240	.....}}	fa

Figure 8 TMAC frame

การส่งเฟรม TMAC ตาม Figure 8 มีทั้งหมด 5 ประเภท โดยมีข้อมูลแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนหัวแพ็กเก็ต (Header) ของ TMAC ประกอบด้วยหมายเลข MAC, *f\_cnt*, *f\_idx*, *p\_type*, *p\_len*, และ *crc* มีขนาดรวมกันเท่ากับ 88 บิต (11 ไบต์) และส่วน payload มีขนาดที่ยืดหยุ่นตามค่าในฟิลด์ *p\_len* โดยมีรายละเอียดดังนี้

- MAC คือ หมายเลข MAC ของอุปกรณ์ IoT
- *f\_cnt* คือ จำนวนเฟรมที่ใช้ทั้งหมดสำหรับการส่ง เฟรมแพ็กเก็ตมีขนาดใหญ่กว่า 255 ไบต์ ซึ่งเป็นขนาดเฟรมที่ใหญ่ที่สุดที่สามารถส่งได้ต่อครั้งด้วยไลบรารี *sx127x* ผ่านเครือข่าย LoRa
- *f\_idx* คือ ดัชนี (index) ของเฟรมแพ็กเก็ต โดยจะมีค่าไม่เกิน *f\_cnt*
- *p\_type* คือ ประเภทของเฟรมแพ็กเก็ต TMAC ซึ่งกล่าวไว้ในหัวข้อ 3.3.2
- *p\_len* คือ ขนาดของ payload
- payload คือ ข้อมูลที่ถูกส่งโดยใช้ TMAC
- *crc* คือ ค่าที่ใช้ตรวจสอบความถูกต้องของเฟรม

### 3.2 ประเภทของเฟรมแพ็กเก็ต TMAC

การส่งเฟรมแพ็กเก็ตของ TMAC ตาม Figure 8 ในส่วนของ *p\_type* จะมีหมายเลขขนาด 8 บิต สำหรับระบุประเภทของเฟรมต่อไปนี้

- Join Request คือ เฟรมสำหรับการส่งขอรับการอนุญาตเข้าเชื่อมต่อเครือข่าย (ได้รับ *auth\_token*) ซึ่ง Join Request หมายเลข MAC จะระบุเลข MAC ของผู้ส่งจากอุปกรณ์ IoT และเป็นแพ็กเก็ตประเภท Broadcast ถ้าเกตเวย์ได้รับ *p\_type* เป็น Join Request ก็จะนำแพ็กเก็ต Join Request มาประมวลผล ส่วนอุปกรณ์ IoT อื่นๆ จะไม่สนใจแพ็กเก็ต Join Request ดังกล่าว
- Join Response จะส่งแพ็กเก็ตแบบ Unicast โดยเลข MAC ในเฟรมแพ็กเก็ต จะหมายถึงเลข MAC ของผู้รับ เช่น ถ้าเกตเวย์ส่งแพ็กเก็ต Join Response และระบุเลข MAC เป็น 748f3cc24b0d แล้วอุปกรณ์ IoT ที่มีเลข MAC ดังกล่าวเท่านั้นที่จะนำเฟรมแพ็กเก็ตไปประมวลผล อุปกรณ์ IoT อื่นๆ ก็จะไม่สนใจเฟรมแพ็กเก็ตดังกล่าว
- Publish เป็นแพ็กเก็ตที่ถูกส่งจากอุปกรณ์ IoT และการส่งจะระบุ MAC ของเกตเวย์ เพื่อให้เกตเวย์ส่งต่อแพ็กเก็ตดังกล่าวไปยัง Broker
- Subscribe คือ เป็นประเภทแพ็กเก็ตที่ต้องส่งจากเกตเวย์ไปยังอุปกรณ์ IoT ผ่านเครือข่าย LoRa ทำให้

แพ็กเก็ตประเภทนี้จะระบุเลข MAC เป็นของอุปกรณ์ IoT ที่ต้องรับแพ็กเก็ต Subscribe

- ACK เป็นแพ็กเก็ตแจ้งผลการส่งแพ็กเก็ตสำเร็จ ดังนั้นจึงระบุเลข MAC ของผู้รับในแพ็กเก็ต ACK

### 3.3 กลไกการ Fragmentation

ในการแพ็กเก็ตโดยใช้ TMAC บนเครือข่าย LoRa แพ็กเก็ตจะถูกแบ่งออกเป็นเฟรมให้มีขนาดไม่เกินกว่าที่ LoRa จะสามารถรับและส่งข้อมูลได้ เช่น การส่งแพ็กเก็ตบนเครือข่าย LoRa โดยใช้ไลบรารี sx127x จะทำได้ไม่เกิน 255 ไบต์ เป็นต้น ซึ่งหน่วยนี้เป็นหน่วยที่ระบุแพ็กเก็ตขนาดใหญ่ที่สุดที่จะส่งได้ Maximum Transmission Unit (MTU) ดังนั้นกลไกการ Fragmentation จะช่วยให้เฟรมแพ็กเก็ตมีขนาดไม่เกิน MTU ดังนี้

- หาจำนวนของเฟรมแพ็กเก็ตได้จาก  $c = p / (255-h)$  เมื่อ  $c$  คือ จำนวนเฟรมแพ็กเก็ต ที่จะถูกสร้าง  $p$  คือ ความยาวของ payload และ  $h$  คือ ความยาวของหัวแพ็กเก็ต TMAC
- หลังจากได้  $c$  แล้วก็จะแบ่ง payload ออกตามจำนวน  $c$  ซึ่งหาได้จาก  $s = p/c$  เมื่อ  $s$  คือขนาดของข้อมูลในแต่ละเฟรมแพ็กเก็ต  $p$  คือ ขนาดของ payload และ  $c$  คือค่าที่ได้จากการหาจำนวนของเฟรมแพ็กเก็ต
- ข้อมูลที่ถูกแบ่งจาก payload แล้วจะนำมาเติม Header ของ TMAC และเริ่มส่งทีละเฟรม โดยทิ้งระยะห่างระหว่างเฟรมเป็นเวลา 100 มิลลิวินาที (ms) ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสม (Optimal) และน้อยที่สุดที่ทำให้การส่งเฟรมสำเร็จ

### 3.4 กลไกการ Reassembly

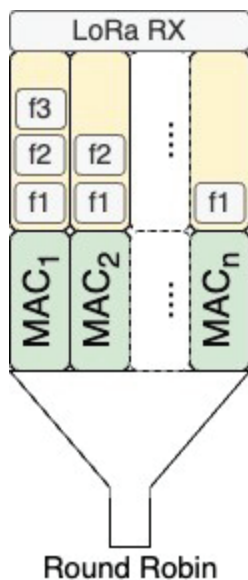


Figure 9 Reassembly bucket

หลังจากที่แพ็กเก็ตถูกส่งแล้ว ผู้รับจะตรวจสอบหมายเลข MAC ว่าเป็นแพ็กเก็ตของตัวเองหรือไม่ ถ้าหากหมายเลข MAC ตรงกับหมายเลข MAC ของเครื่อง ผู้รับจะสร้างตะกร้าดัง Figure 9 และรับแต่ละเฟรมแพ็กเก็ตไว้ที่ตะกร้าตามเลข MAC โดยหลังจากที่ได้รับ  $f\_idx$  ครบตาม  $f\_cnt$  แล้ว ตะกร้าของเลข MAC นั้นจะมีสถานะเป็นพร้อมนำออก และ TMAC จะนำเฟรมแพ็กเก็ตทั้งหมดมารวมเป็นแพ็กเก็ตและนำไปประมวลผลทีละแพ็กเก็ตตามลำดับด้วยวิธี Round Robin

สำหรับหมายเลข MAC ที่ถูกนำไปสร้างตะกร้าแต่จำนวน  $f\_idx$  รวมแล้วไม่เท่ากับ  $f\_cnt$  เกินกว่าเวลาที่กำหนด (Timeout) MAC ตะกร้าดังกล่าวจะถูกล้างออกจากหน่วยความจำ

### 4. การพัฒนาโปรโตคอลต้นแบบ

การพัฒนาโปรโตคอล TMAC พัฒนาโดยใช้ภาษา MicroPython และใช้ไลบรารี sx127x ในการกล้าสัญญาณ LoRa ระหว่างอุปกรณ์ IoT และเกตเวย์ ส่วนการสื่อสารระหว่างเกตเวย์และ Broker นั้นเกตเวย์พัฒนาโดยใช้ไลบรารี mqtt.simple สำหรับ esp32 และ Broker ใช้วิธีติดตั้งซอฟต์แวร์ Mosquito MQTT Broker บนระบบปฏิบัติการลินุกซ์ Ubuntu 20.04 LTS

### การทดลองและประเมินผล

#### 1. แผนผังการทดลอง

การออกแบบการทดลองของงานวิจัยเพื่อประเมินประสิทธิภาพและประสิทธิผลของโปรโตคอล TMAC โดยมีแผนผังดัง Figure 10 ซึ่งประกอบด้วยคอมพิวเตอร์ Laptop, MQTT Broker, LoRa Gateway และ กลุ่มอุปกรณ์ IoT โดยคอมพิวเตอร์ Laptop และ LoRa Gateway จะเชื่อมไปยัง MQTT Broker ผ่านเครือข่ายไร้สาย (Wireless) ช่วงความถี่ 2.4 GHz และเกตเวย์จะเชื่อมกับกลุ่มอุปกรณ์ IoT<sub>1-5</sub> ผ่านเครือข่าย LoRa ห่างกันระยะ 1, 2, 3, 4, และ 5 กิโลเมตรตามลำดับ โดยข้อมูลที่ส่งมี 3 ส่วน คือ

- อุปกรณ์ IoT<sub>1-5</sub> เข้าร่วมเครือข่าย (Join Networks) กับ LoRa Gateway เพื่อทดสอบการส่งเฟรมแพ็กเก็ตประเภท Join Request และ Join Response
- การส่งข้อมูล Publish จากอุปกรณ์ IoT<sub>1-5</sub> โดยงานวิจัยนี้ส่งข้อมูลขนาด 250, 500 และ 750 ไบต์ตามลำดับเพื่อทดสอบการส่งเฟรมแพ็กเก็ตที่มีการแบ่งเป็นหลายเฟรมแพ็กเก็ตและเฟรมแพ็กเก็ตเดียว
- การ Subscribe ข้อมูลโดยอุปกรณ์ IoT<sub>1-5</sub> จาก Laptop ผ่าน MQTT Broker เพื่อทดสอบการส่งแพ็กเก็ตประเภท Subscribe ผ่านเครือข่าย LoRa



Figure 10 The test-bed scenario

หลังจากกำหนดการส่งข้อมูลแล้วการทดลองนี้ ได้กำหนดค่าพารามิเตอร์อื่นๆ เช่น Timeout ไว้ที่ 5 วินาที (sec) พื้นที่การทดลองเป็นอ่างเก็บน้ำเพื่อควบคุม Line-of-Sight ของอุปกรณ์ IoT<sub>1-5</sub> ให้เป็นแบบไม่มีสิ่งกีดขวาง และชั้น PHY ของ LoRa ดัง Table 3

Table 3 LoRa's parameter Settings

MAC	ID
Frequency	923.2Mhz
TX power	14
Signal bandwidth	125kHz
Spread factor	7
Coding rate	4
Preamble length	8
Implicit header	False

ฮาร์ดแวร์ที่ใช้สำหรับการทดลองโปรโตคอล TMAC ของวิจัยนี้ในส่วนของ MQTT Broker และ Laptop ใช้คอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊กหน่วยประมวลผล Intel Core i5 หน่วยความจำสำรอง 8 GB ติดตั้งระบบปฏิบัติการลินุกซ์ Ubuntu 20.04 LTS ส่วนอุปกรณ์ IoT<sub>1-5</sub> และ LoRa Gateway ใช้ ESP32 LILYGO T-Beam V1.1 หน่วยประมวลผลรุ่น CH9102 หน่วยความจำ SPRAM 8MB และ FLASH 4MB ติดตั้ง MicroPython และโปรโตคอล TMAC จากงานวิจัยนี้

## 2. ตัววัด

ตัววัด (Metrics) ด้านประสิทธิภาพและประสิทธิผลของงานวิจัยกำหนดขึ้นเพื่อวัดประสิทธิภาพการเชื่อมต่อสื่อสารในระยะไกล ปริมาณการส่งข้อมูล (Throughput) ดีเลย์ (Delay) และปริมาณการส่งแพ็กเก็ตใหม่เมื่อเกิดแพ็กเก็ตสูญหาย (Retransmission) ดังต่อไปนี้

- Throughput โดยส่วนใหญ่ใช้ประเมินปริมาณการส่งข้อมูลสำเร็จ การใช้ Throughput ในการประเมินผลทำให้สามารถประเมินประสิทธิภาพของการส่งแพ็กเก็ตเกิดของ TMAC ที่ผสมกับ MQTT ได้ และรายงานในหน่วยกิโลบิตต่อวินาที (kbps)

- Delay เพื่อวัดความล่าช้าในการส่งแพ็กเก็ตเกิดจากต้นทางไปยังปลายทาง เช่น จาก Laptop ไปยัง IoT<sub>1</sub>, IoT<sub>2</sub> และ IoT<sub>3</sub> ตาม Figure 8 โดย Delay ใช้เป็นเครื่องมือประเมินประสิทธิภาพการจัดการแพ็กเก็ตเกิดโดยใช้ TMAC ได้ และรายงานในหน่วย ms

- Retransmission Ratio ใช้ประเมินอัตราการกู้คืน (Recovery) แพ็กเก็ตที่สูญหายของโปรโตคอล TMAC ในหน่วยร้อยละ

การทดลองตามตัววัดในงานวิจัยนี้ทำซ้ำอย่างน้อย 40 ครั้งและกำหนดช่วงความเชื่อมั่นไว้ที่ร้อยละ 95

## 3. ผลการทดลอง

### 3.1 ดีเลย์จากการส่งแพ็กเก็ตเกิด Join Request และ Join Response

ใน Figure 11 เป็นผลการทดลองส่ง Join Request จากอุปกรณ์ IoT จนกว่าจะได้รับ Join Response จากเกตเวย์จากระยะทาง 1-5 กิโลเมตร จะเห็นว่าการเกิดดีเลย์อยู่ในระดับใกล้เคียงกัน แต่ถ้าดูในระยะ 4 กิโลเมตรมี Error bar สูงนั้นเกิดจากอุปกรณ์ IoT ไม่ได้รับ Join Response จากเกตเวย์จำนวน 2 ครั้งแต่เนื่องจากได้มีการกำหนดค่า Timeout ไว้ที่ 5 sec (หรือ 5,000 ms) ทำให้เกิด Error bar ในช่วงที่กว้างแต่โดยเฉลี่ยแล้วระยะทางไม่ส่งผลต่อดีเลย์ของแพ็กเก็ตเกิด Join Request และ Join Response โดย TMAC สามารถประสานระหว่าง LoRa และ MQTT ได้ในเวลาที่ดีกว่า 2,500 ms ในระยะทาง 5 กิโลเมตร ซึ่งจะเห็นว่าระยะทางไม่ส่งผลให้เกิดเน็ตเวิร์คโอเวอร์เฮตสูงขึ้น

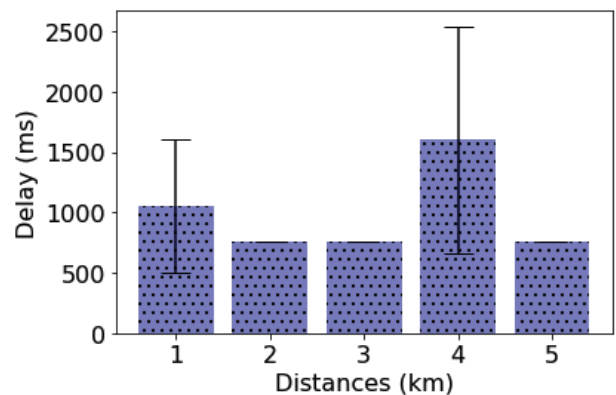
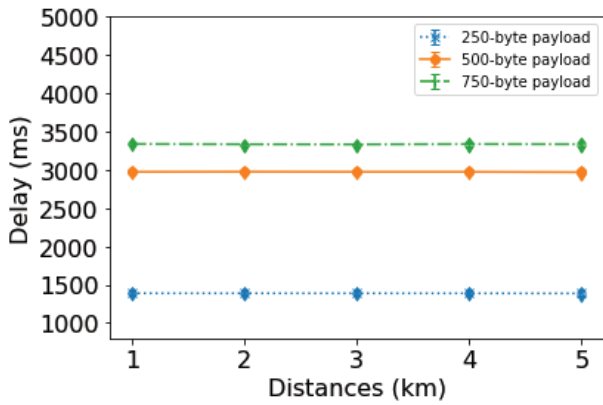


Figure 11 TMAC network join delay



**3.2 ดีเลย์จากการการ Publish ข้อมูล**

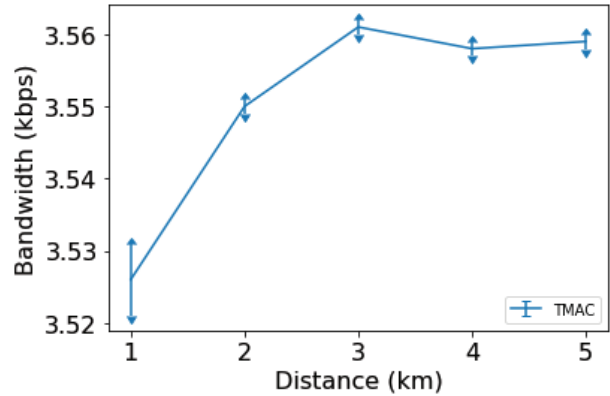


**Figure 12** The TMAC delay of 250, 500 and 750 bytes data transmission

การ Publish ข้อมูลจากอุปกรณ์ IoT เพื่อผสานเข้ากับ MQTT นั้น TMAC สามารถช่วยให้ Publish ข้อมูลผ่านเครือข่าย LoRa ได้ปริมาณมากขึ้น โดยการทดลองได้ทดสอบส่ง Payload ขนาดตั้งแต่ 250, 500 และ 750 ไบต์ และ Publish สำเร็จร้อยละ 100 และเกิดดีเลย์ขึ้นดัง Figure 12 ซึ่งแกน x คือระยะทางในหน่วยกิโลเมตร และแกน y คือค่าดีเลย์ที่เกิดขึ้น โดยจะเห็นว่าการส่งแพ็กเก็ตที่ไม่เกิด Fragmentation ในทุกระยะทางจะมีดีเลย์ต่ำสุดที่  $1,386.1 \pm 0.9$  ms และสูงสุดที่  $1,388.1 \pm 0.8$  ms และถ้าหากมีการ Fragmentation มีดีเลย์ของการส่งแพ็กเก็ตขนาด 500 ไบต์ตั้งแต่  $2,969.6 \pm 1.2$  ms และสูงสุดที่  $2,975.8 \pm 1.2$  ms ส่วนแพ็กเก็ตที่มี Payload ขนาด 750 ไบต์จะมีดีเลย์อยู่ตั้งแต่  $3,333.0 \pm 0.9$  ms และสูงสุดที่  $3,338.0 \pm 1.3$  ms ทำให้ TMAC เป็นโพรโทคอลที่ช่วยเพิ่มปริมาณการส่งข้อมูลผ่านเครือข่าย LoRa ช่วยป้องกันแพ็กเก็ตสูญหาย และมีดีเลย์อยู่ในระดับต่ำกว่า 3,500 ms ในระยะ 5 กิโลเมตร

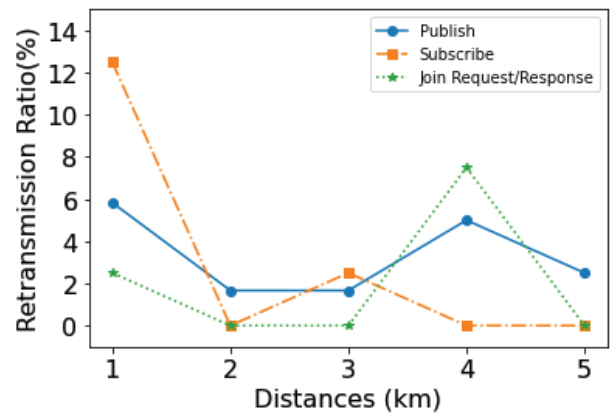
**3.3 ผลการใช้แบนด์วิดท์เมื่อ Publish และ Subscribe ข้อมูล**

เมื่อมีการ Publish และ Subscribe ข้อมูลผ่านเครือข่าย LoRa โดยใช้ Payload ขนาด 250, 500 และ 750 ไบต์จากระยะทางตั้งแต่ 1-5 กิโลเมตร ดัง Figure 13 โดยแกน x คือระยะทางที่ทำการทดสอบ และแกน y คือ แบนด์วิดท์ที่ใช้ระหว่างการสื่อสารบนเครือข่าย LoRa ในหน่วย kbps และคาดว่าจะการส่งข้อมูลในระยะที่ไกลขึ้นจะเกิดโอเวอร์เฮดสูงชันและจะทำให้แบนด์วิดท์ลดลง แต่ผลการทดลองพบว่าแบนด์วิดท์ที่ใช้รับและส่งข้อมูลผ่านเครือข่าย LoRa จะอยู่ระหว่าง  $3.52 \pm 0.1$  kbps ถึง  $3.56 \pm 0.1$  kbps และเป็นระดับแบนด์วิดท์ที่สามารถใช้งานได้สำหรับการรับและส่งคำสั่งควบคุมอุปกรณ์ IoT จากระยะไกลได้



**Figure 13** The bandwidth of TMAC publish and subscribe transmission

**3.4 การเกิด Retransmission**



**Figure 14** TMAC Retransmission Ratio

สัดส่วนการเกิด Retransmission ดัง Figure 14 คือจำนวนร้อยละของการส่งแพ็กเก็ตใหม่ของผลการทดลองทั้งหมด เมื่อเกิดการเชื่อมต่อล้มเหลวผ่านเครือข่าย LoRa ที่ระยะทาง 1-5 กิโลเมตรตามแนวแกน x และสัดส่วนร้อยละตามแนวแกน y และหากดูข้อมูลในแกน y จะเห็นว่าสัดส่วนการเกิด Retransmission ต่ำกว่าร้อยละ 10 โดยมีเพียงการส่ง Subscribe จากเกตเวย์ในระยะ 1 กิโลเมตรเท่านั้นที่มีสัดส่วน Retransmission สูงร้อยละ 12 โดยการทดลองนี้จะเห็นว่า TMAC ช่วยให้การส่งข้อมูลได้ร้อยละ 100 โดยมีสัดส่วนการ Retransmission ไม่เกินร้อยละ 12 ที่ระยะทาง 1-5 กิโลเมตร

**สรุป**

โพรโทคอล MQTT เป็นโพรโทคอลที่มีความสำคัญสำหรับการเชื่อมต่อของอุปกรณ์ IoT แต่ด้วยความต้องการใช้งานของ MQTT บนเครือข่าย LoRa มีสูงขึ้น และยังขาดโพรโทคอลในชั้น MAC ที่คอยประสานและผนวก MQTT เข้ากับ LoRa ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยก่อนหน้านี้มีความพยายามพัฒนาวิธีการที่หลากหลาย แต่ก็ยังมีจุดที่ต้องปรับปรุงแก้ไข เช่น โอเวอร์เฮดของเครือข่าย ดีเลย์ขนาดของ

แพ็กเก็ตมีจำนวนจำกัด ความซับซ้อนการผสาน MQTT เข้ากับ LoRa การเพิ่มขึ้นเครือข่ายบน LoRa เพื่อให้สนับสนุน MQTT และการใช้ LoRa โดยไม่อาศัยชั้น MAC ซึ่งทำให้การเชื่อมต่อไม่มีความน่าเชื่อถือ งานวิจัยนี้จึงออกแบบโปรโตคอล TMAC สำหรับผสาน MQTT ให้เข้ากับ LoRa แล้วทดสอบในระบบเครือข่าย Test-bed ในระยะ 1-5 กิโลเมตรโดยใช้ขนาด Payload ที่หลากหลาย และพบว่าโปรโตคอล TMAC สามารถช่วยให้การส่งแพ็กเก็ตได้ร้อยละ 100 มีดีเลย์ไม่เกิน 3,500 ms ในระยะ 1-5 กิโลเมตร และมีโอเวอร์เฮดเครือข่ายต่ำ ซึ่ง Retransmission สูงสุดเพียงร้อยละ 12 ได้

### เอกสารอ้างอิง

- Ansari, N., & Zhang, J. (2013). *Media Access Control and Resource Allocation: For Next Generation Passive Optical Networks*. Springer Publishing Company, Incorporated.
- Audebert, V., Catalano, J., Coracin, M., Gourrierc, M. L., Sornin, N., & Yegin, A. (2021). *Static Context Header Compression and Fragmentation (SCHC) over LoRaWAN* (RFC No. 9011; Standards Track). IETF.
- Bhawiyuga, A., Amron, K., Primanandha, R., Kartikasari, D. P., Arijudin, H., & Prabandari, D. A. (2019). LoRa-MQTT Gateway Device for Supporting Sensor-to-Cloud Data Transmission in Smart Aquaculture IoT Application. *2019 International Conference on Sustainable Information Engineering and Technology (SIET)*, 187–190. <https://doi.org/10.1109/SIET48054.2019.8986124>
- Ferré, G., & Giremus, A. (2018). LoRa Physical Layer Principle and Performance Analysis. *2018 25th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS)*, 65–68. <https://doi.org/10.1109/ICECS.2018.8617880>
- Heile, B., Minaburo, A., PAradells, J., Perkins, C., Ponsard, B., Ratilainen, A., SUM, C.-S., Toutain, L., Yegin, A., & Zuniga, J. C. (2018). *Low-Power Wide Area Network (LPWAN) Overview* (RFC No. 8376). IETF.
- HiveMQ. (2020). *MQTT & MQTT 5 Essentials* (Vol. 1). HiveMQ GmbH.
- Huang, A., Huang, M., Shao, Z., Zhang, X., Wu, D., & Cao, C. (2019). A Practical Marine Wireless Sensor Network Monitoring System Based on LoRa and MQTT. *2019 IEEE 2nd International Conference on Electronics Technology (ICET)*, 330–334. <https://doi.org/10.1109/ELTECH.2019.8839464>
- IETF. (2021). *Internet Engineering Task Force*. <https://www.ietf.org/>
- Kietzmann, P., Alamos, J., Kutscher, D., Schmidt, T. C., & Wählisch, M. (2022). Delay-Tolerant ICN and Its Application to LoRa. *Proceedings of the 9th ACM Conference on Information-Centric Networking*, 125–136. <https://doi.org/10.1145/3517212.3558081>
- Minaburo, A., Toutain, L., Gomez, C., Barthel, D., & Zuniga, J. C. (2020). *SCHC: Generic Framework for Static Context Header Compression and Fragmentation* (RFC No. 8724). IETF. <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc8724>
- Petrariu, A. I., Lavric, A., & Coca, E. (2019). LoRaWAN Gateway: Design, Implementation and Testing in Real Environment. *2019 IEEE 25th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME)*, 49–53. <https://doi.org/10.1109/SIITME47687.2019.8990791>
- Socolofsky, T. J., & Kale, C. J. (1991). *A TCP/IP Tutorial* (RFC) [1180]. IETF.
- Spinsante, S., Ciattaglia, G., Del Campo, A., Perla, D., Pignini, D., Cancellieri, G., & Gambi, E. (2017). A LoRa enabled building automation architecture based on MQTT. *2017 AEIT International Annual Conference*, 1–5. <https://doi.org/10.23919/AEIT.2017.8240560>
- Sun, C., Zheng, F., Zhou, G., & Guo, K. (2020). Design and Implementation of Cloud-based Single-channel LoRa IIoT Gateway Using Raspberry Pi. *2020 39th Chinese Control Conference (CCC)*, 5259–5263. <https://doi.org/10.23919/CCC50068.2020.9189480>
- Tayebi, A., Veltri, L., Zanichelli, F., & Caselli, S. (2022). Interworking between LoRaWAN and non-LoRa IoT Systems. *2022 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops and Other Affiliated Events (PerCom Workshops)*, 415–420. <https://doi.org/10.1109/PerComWorkshops53856.2022.9767494>
- Vangelista, L. (2017). Frequency Shift Chirp Modulation: The LoRa Modulation. *IEEE Signal Processing Letters*, 24(12), 1818–1821. <https://doi.org/10.1109/LSP.2017.2762960>

# ผลของระดับกลีเซอรินต่อคุณภาพฟิล์มย่อยสลายได้จากแป้งข้าวหอมมะลิ

## Effects of glycerin level on quality of biodegradable film from thai jasmine rice flour

ประยูร จอมหล้าพิรติกุล<sup>1\*</sup>, ละมุล วิเศษ<sup>2</sup>, อาภาภรณ์ จอมหล้าพิรติกุล<sup>1</sup>, ภุชิสส์ ตันวานิชกุล<sup>1</sup>  
และ ชัยณรงค์ หล่มช้างคำ<sup>1</sup>

Prayoon Jomlaperatikul<sup>1\*</sup>, Lamul Wiset<sup>2</sup>, Apapon Jomlaperatikul<sup>1</sup>, Bhuchiss Tanwanichkul<sup>1</sup>  
and Chainarong Lomchangkum<sup>1</sup>

Received: 29 August 2022 ; Revised: 23 November 2022 ; Accepted: 14 December 2022

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากรรมวิธีในการขึ้นรูปของฟิล์มย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่มีผลต่อสมบัติของฟิล์ม ใช้แป้งข้าวหอมมะลิเป็นสารตั้งต้นในการขึ้นรูปฟิล์ม ใช้กลีเซอรินเป็นสารเพิ่มความยืดหยุ่นที่ปริมาณ 0.75, 1.5 และ 2.25% W/W ตามลำดับ โดยทำการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อน เปรียบเทียบกับการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งปั๊มความร้อน โดยทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกล ได้แก่ การต้านแรงดึง การยืดตัวของฟิล์ม และสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ค่าสี การละลายน้ำ อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ ประยุกต์การห่อหุ้มอาหารด้วยการบรรจุบิสกิต และหาร้อยละการย่อยสลายของฟิล์ม ผลการทดลอง พบว่าการต้านแรงดึงมีค่าสูงเมื่อปริมาณกลีเซอรินเพิ่มขึ้น ค่าสีโดยรวมมีค่าเฉลี่ย  $L^*=77.98\pm 1.20$ ,  $a^*=-1.58\pm 0.22$  และ  $b^*=7.35\pm 0.55$  การยืดตัว การละลายน้ำและอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเพิ่มของกลีเซอริน ความชื้นของฟิล์มอยู่ระหว่าง  $8.68\pm 0.69 - 10.59\pm 0.83$  %db เมื่อทำการทดสอบบรรจุกับผลิตภัณฑ์บิสกิต พบว่าฟิล์มที่มีปริมาณกลีเซอรินสูง ส่งผลให้ความชื้นของบิสกิตมีค่าสูงตามและความกรอบลดลง และเมื่อเปรียบเทียบกรรมวิธีในการอบแห้ง พบว่าการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน สามารถชะลอการซึมผ่านของไอน้ำเข้าสู่บิสกิตได้ดีกว่า ส่งผลให้คงความกรอบของผลิตภัณฑ์มีค่ามากกว่าการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบลมร้อน ฟิล์มที่เติมปริมาณกลีเซอรินสูงใช้เวลาในการย่อยสลายสั้น ฟิล์มย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากแป้งข้าวหอมมะลิ สามารถประยุกต์ใช้เพื่อผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์ทางชีวภาพเพื่อทดแทนวัสดุสังเคราะห์ เพื่อช่วยลดปริมาณขยะที่ย่อยสลายได้ยากในอนาคตต่อไปได้

**คำสำคัญ:** ฟิล์มย่อยสลายได้ แป้งข้าวหอมมะลิ การอบแห้ง

### Abstract

This research aimed to study the forming process impacting film properties. The film formation was based on Thai jasmine rice flour with using glycerin as a plasticizer in amounts of 0.75, 1.5 และ 2.25% W/W respectively. The comparison between hot air drying machine and heat pump drying machine, at 35 degree celsius was conducted. Mechanical properties: Tensile strength and elongation; physical properties: color, solubility, water vapor permeability, their application as biscuit packaging; and percentage of degradability were examined. The result showed that the decrease of tensile strength correlated to increased amount of glycerin. Also, the average color values were  $L^*=77.98\pm 1.20$ ,  $a^*=-1.58\pm 0.22$  and  $b^*=7.8\pm 0.55$ . The elongation, solubility and water vapor permeability rate increased when the amount of glycerin rose. The moisture contents of the film were between  $8.68\pm 0.69$  and  $10.59\pm 0.83$ %db. The study also found that when it was used for biscuit packaging, the film with high glycerin led to the greater moisture of biscuit, and the lower crispiness. When comparing between hot air dryer and heat pump dryer, the finding showed that heat pump

<sup>1</sup> อาจารย์, สาขาวิชาวิศวกรรมอาหารและชีวภาพ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น จ.ขอนแก่น, 40000

<sup>2</sup> ผู้ช่วยศาสตราจารย์, สาขาวิศวกรรมชีวภาพ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม จ.มหาสารคาม 44150

<sup>1</sup> Lecturer, Department of Food and Biological Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Isan Khon Kaen Campus, Khon Kean, 40000, Thailand

<sup>2</sup> Assistance Professor, Department of Biological Engineering, Faculty of Engineering, Mahasarakham University, Kantarawichai District, MahaSarakhm 44150, Thailand

\* Corresponding author; e-mail address: prayoon.jo@muti.ac.th

drying machine was able to better delay water vapor permeability into biscuit. Biodegradable film from Thai jasmine rice flour with high glycerin degraded in shorter time. It can be applied to bio-based packaging production in order to substitute the synthetic, which can reduce indecomposable waste in the future.

**Keywords:** Biodegradable film, Jasmine Rice Flour, Drying

## บทนำ

ปัจจุบันการใช้ฟิล์มย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable films) สำหรับการบรรจุภัณฑ์อาหาร ซึ่งมีจุดประสงค์ คือ ยืดอายุการเก็บรักษา ป้องกันการปนเปื้อนของผลิตภัณฑ์อาหาร อีกทั้งยังใช้ทดแทนพลาสติกจากการสังเคราะห์ทางปิโตรเคมี ซึ่งก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมภายหลังการใช้งาน โดยทั่วไปฟิล์มย่อยสลายได้ทางชีวภาพ จะใช้พอลิเมอร์ชีวภาพเป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ในการขึ้นรูปฟิล์ม เช่น โพรตีน พอลิแซ็กคาไรด์ ไชมัน รวมทั้งฟิล์มที่ขึ้นรูปจากพอลิเมอร์หลายๆ ชนิดร่วมกัน ที่เรียกว่าฟิล์มคอมโพสิต (รังสิณี ไสธรรวิทย์, 2560) การใช้พอลิเมอร์จากวัสดุเกษตรเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตภัณฑ์หลงเหลือทิ้งจากการแปรรูปผลิตผลทางการเกษตร โดยการนำไปเป็นสารตั้งต้นในการผลิตฟิล์มย่อยสลายได้ เป็นการเพิ่มมูลค่า ช่วยลดปัญหาทางด้านขยะ และลดมลพิษให้กับสิ่งแวดล้อมอีกด้วย

ข้าวหอมมะลิเป็นพืชเศรษฐกิจที่มีการปลูกกระจายทั่วประเทศ โดยเฉพาะแถบภาคอีสานในเขตพื้นที่ทุ่งกุลาร้องไห้ ซึ่งเป็นพื้นที่ครอบคลุม 5 จังหวัด ได้แก่ จังหวัดร้อยเอ็ด สุรินทร์ มหาสารคาม ยโสธร และจังหวัดศรีสะเกษ ถือได้ว่าเป็นแหล่งผลิตที่ได้คุณภาพสูง ด้วยเอกลักษณ์ของข้าวหอมมะลิที่มีความหอม นุ่ม จึงทำให้เป็นที่นิยมของผู้บริโภคทั้งในประเทศและต่างประเทศ ปัจจุบันมีการส่งออกข้าวหอมมะลิประมาณ 10.39 ล้านตันต่อปี (สำนักมาตรฐานสินค้าส่งออก กรมการค้าต่างประเทศ, 2564) ทั้งนี้ยังไม่รวมการบริโภคภายในประเทศ ในการแปรรูปข้าวเปลือกให้เป็นข้าวสารจากข้าวเปลือก 1 ตัน หรือ 1,000 กิโลกรัม เมื่อทำการแปรรูปแล้วได้เนื้อข้าวเฉลี่ย 660 กิโลกรัม นอกจากนั้นเป็นรำข้าวขาว 80 กิโลกรัม รำข้าวกล้อง 30 กิโลกรัม และแกลบในปริมาณ 230 กิโลกรัม ตามลำดับ (หมอเกษตร ทองกวาว, 2562) ซึ่งจากการแปรรูปข้าวนั้น เนื้อข้าวถือว่าเป็นผลิตภัณฑ์หลักที่นำไปบริโภคในรูปแบบต่างๆ แต่มีการแบ่งลำดับชั้นของเนื้อข้าวออกเป็นชั้นๆ และมูลค่าการซื้อขายก็ต่างกัน ซึ่งปลายข้าวเป็นลำดับชั้นล่างสุดของการแบ่งชั้นของเมล็ดข้าว มีราคาค่อนข้างต่ำ ส่วนใหญ่จะใช้เป็นอาหารสัตว์ หรือการนำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น ทำไอ้จ๊ก หรือทำขนม เป็นต้น

การนำผลิตภัณฑ์จากส่วนปลายข้าวมาผลิตเป็นแป้งเพื่อใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตฟิล์มย่อยสลายได้ทางชีวภาพ เป็นที่น่าสนใจสำหรับนวัตกรรมบรรจุภัณฑ์ใน

ยุคปัจจุบัน ซึ่งสามารถนำมาทดแทนการใช้บรรจุภัณฑ์จากพลาสติกได้ การใช้แป้งข้าวเป็นพอลิเมอร์เพียงชนิดเดียวจะส่งผลให้ฟิล์มมีสมบัติที่เปราะ ฉีกขาดง่าย ไม่เหมาะแก่การใช้งาน จึงจำเป็นต้องมีการเติมพลาสติกไซเซอร์ (plasticizer) เพื่อปรับปรุงสมบัติทางด้านต่างๆ ให้กับฟิล์ม (Sothornvit and Krochta, 2000) รวมถึงกรรมวิธีในการขึ้นรูปฟิล์ม มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติของฟิล์มด้วย โสภิตา วิศาลศักดิ์กุล และคณะ (2559) ได้พัฒนาผลิตภัณฑ์ฟิล์มแป้งเมล็ดขนุน โดยใช้กลีเซอรินเป็นพลาสติกไซเซอร์ พบว่าสามารถขึ้นรูปฟิล์มได้ดี มีความยืดหยุ่นและเกาะตัวดี อัจจิมา อุณแก้ว และคณะ (2563) ได้ทำการศึกษาฟิล์มย่อยสลายได้จากข้าวไรซ์เบอร์รี่ พบว่าฟิล์มสามารถลดการสูญเสียน้ำและชะลอระยะเวลาเหี่ยวของผิวของมะเขือเทศได้

การขึ้นรูปฟิล์มมีกระบวนการขึ้นรูปอยู่หลายวิธี เช่น วิธีการจุ่ม การฉีดพ่น การทา และการหล่อหุ้ม (รังสิณี ไสธรรวิทย์, 2560) ซึ่งแต่ละกระบวนการขึ้นรูป มีกรรมวิธีและจุดประสงค์การใช้งานที่แตกต่างกัน เช่น การอบแห้งด้วยลมร้อน (Hot air oven) ซึ่งเป็นที่นิยมใช้มากและใช้พลังงานในการอบให้ที่ต่ำ แต่ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งที่นาน เนื่องจากภายในห้องอบแห้งมีการไหลเวียนของอากาศน้อย ทำให้การลดความชื้นในผลิตภัณฑ์ทำได้ช้า การอบแห้งด้วยปั๊มความร้อน (Heat pump dryer) เป็นอีกวิธีที่ใช้เทคนิคในการดึงความชื้นออกจากผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิต่ำได้อย่างรวดเร็ว ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้น และไม่ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างของผลิตภัณฑ์ แต่เนื่องจากการอบแห้งแบบปั๊มความร้อนเป็นการอบแห้งที่มีกระบวนการดึงความชื้นภายในห้องอบแห้งสู่ภายนอกตลอดเวลา ส่งผลให้ต้นทุนกำลังของเครื่องอบแห้งทำงานตลอดระยะเวลาการอบแห้ง ทำให้มีการใช้พลังงานในการอบแห้งที่สูง (ชาลีดา บรมพิชัยชาติกุล, 2555)

## วัตถุประสงค์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาวิธีการขึ้นรูปฟิล์มที่เตรียมจากแป้งข้าวหอมมะลิด้วยกรรมวิธีที่แตกต่างกันโดยใช้กลีเซอรินเป็นพลาสติกไซเซอร์ ขึ้นรูปฟิล์มด้วยการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบลมร้อน ทำการเปรียบเทียบกับการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน และเพื่อศึกษาสมบัติทางกล สมบัติทางกายภาพของฟิล์ม และนำไปประยุกต์โดยเน้นบรรจุภัณฑ์ห่อหุ้มอาหารต่อไป



## อุปกรณ์และวิธีการ

วางแผนการทดลองเป็นแบบ 2x3 factorial in CRD โดยปัจจัยหลักเป็นการอบแห้งทั้ง 2 แบบ คือ การอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบลมร้อน และการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบ บั้มความร้อน ปัจจัยรองเป็นปริมาณกลีเซอริน มี 3 ระดับ ได้แก่ 0.75, 1.5 และ 2.25% W/V วิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance: ANOVA) เพื่อดูอิทธิพลของปัจจัยและเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของตัวแปรตาม ที่ศึกษา ใช้โปรแกรม SPSS Version 15.0

### 1. การเตรียมฟิล์ม

โดยประยุกต์จากภาวิณี เทียมดี และกวีนา สุขสำราญ, (2563)

1.1 การเตรียมฟิล์ม โดยนำแป้งข้าวหอมมะลิปริมาณ 2.5% W/V ค่อยๆ เทลงในน้ำกลั่น และกวนเป็นเวลา 3 ชั่วโมง

1.2 เติมน้ำตาล 0.25% W/V และอัลจินต 0.75% W/V กวนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที

1.3 เติมกลีเซอรินปริมาณต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ 0.75, 1.5 และ 2.25% W/V กวนเป็นเวลา 20 นาที

1.4 นำส่วนผสมที่เตรียมไว้ปริมาณ 60 กรัม เทส่วนผสมลงบนถาดเคลือบผิวเรียบขนาด 163x246 มิลลิเมตร ทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนและเครื่องอบแห้งแบบบั้มความร้อน ทำการอบแห้งจนฟิล์มเหลือความชื้นสุดท้าย 8-12% db (เครื่องอบแห้งแบบลมร้อนใช้เวลา 24 ชั่วโมง และเครื่องอบแห้งแบบบั้มความร้อนใช้เวลา 6 ชั่วโมง) ทิ้งให้เย็น ลอกแผ่นฟิล์มออกจากถาด เก็บไว้ในโถความชื้นเพื่อรอการทดสอบต่อไป

### 2. การทดสอบสมบัติของฟิล์ม

#### 2.1 การวัดค่าสี (Color)

การวัดค่าสี ทำการวัดค่าสีด้วยเครื่องวัดสี Hunter lab รุ่น color flex EZ ทำการวัดค่าสีใน ระบบสี CIE L\*, a\*, b\* โดยที่

ค่า L\* คือ ความสว่าง (lightness) มีค่าตั้งแต่ 0-100 โดย 0 คือสีดำ และ 100 คือสีขาว

ค่า a\* คือสีเขียว (-a\*) จนถึงสีแดง (+a\*)  
ค่า b\* คือสีน้ำเงิน (-b\*) จนถึงสีเหลือง (+b\*) ทำการทดสอบตัวอย่างละ 3 ซ้ำ

#### 2.2 การวัดความหนา (Thickness)

การวัดความหนาใช้ไมโครมิเตอร์ทศนิยม 3 ตำแหน่ง ในการวัดค่าความหนาของฟิล์ม โดยสุ่มวัด 6 จุดทั่วทั้งแผ่นของฟิล์มบันทึกผล ทำการทดสอบตัวอย่างละ 3 ซ้ำ

### 2.3 การทดสอบปริมาณความชื้น (Moisture Content)

ตัดแผ่นฟิล์มให้มีขนาดชิ้นเล็กๆ ปริมาณ 1 กรัม นำเข้าทดสอบความชื้นด้วยเครื่องทดสอบ Moisture Analyzers รุ่น MX-50 บันทึกผล ทำการทดสอบตัวอย่างละ 3 ซ้ำ

### 2.4 การทดสอบสมบัติทางกล (Mechanical property)

การทดสอบสมบัติทางกลของฟิล์มแป้งข้าวหอมมะลิ ได้แก่ การต้านทานแรงดึง (Tensile strength, TS) และร้อยละการยืดตัว (% Elongation,) ให้เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D882 (1995) โดยใช้เครื่อง Universal testing machine ยี่ห้อ LLOYD LRX Plus ประยุกต์ตามวิธีของกมลทิพย์ เอกธรรมสุทธิ (2553) โดยใช้หัววัดแรงขนาด 50 นิวตัน ในการวัดค่าการทดสอบ ตัวอย่างในการทดสอบมีขนาด 25.4x100 มิลลิเมตร ความยาวช่วงทดสอบ 60 มิลลิเมตร และความเร็วในการดึง 20 มิลลิเมตรต่อนาที โดยการทดสอบการต้านแรงดึงหาได้จาก สมการที่ 1

$$TS = \frac{\text{Max force}}{\text{Film area}} \quad (1)$$

โดยที่

TS = ค่าการต้านแรงดึง (N/m<sup>2</sup>)

Max force = ค่าแรงดึงสูงสุด (N)

Film area = พื้นที่หน้าตัดของฟิล์ม (m<sup>2</sup>)

ค่าร้อยละการยืดตัวหาได้จาก สมการที่ 2

$$\epsilon = \frac{\delta}{L} \quad (2)$$

โดยที่

$\epsilon$  = ร้อยละการยืดตัว

$\delta$  = ความยาวที่เปลี่ยนแปลงไป (mm)

L = ความยาวช่วงทดสอบ (mm)

### 2.5 การทดสอบสมบัติการซึมผ่านของไอน้ำ (Water Vapor Transmission Rate: WVTR)

อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ ทำการดัดแปลงตามวิธีของกมลทิพย์ เอกธรรมสุทธิ และอดิศักดิ์ เอกโสวรรณ, (2543) ขั้นตอนการทดสอบอัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มมีดังนี้

1) เติมน้ำกลั่น 20 มิลลิลิตร ลงในภาชนะกระป๋องอลูมิเนียม ทำการปิดปากกระป๋องด้วยแผ่นฟิล์มที่ต้องการทดสอบพร้อมปิดเทปกาวให้แนบสนิทและขังบันทึกน้ำหนัก

2) นำกระป๋องอลูมิเนียมวางในโถดูดความชื้น (Desiccator) ที่บรรจุซิลิกาเจล ปิดฝาโถให้สนิท

3) นำกระป๋องอลูมิเนียมออกมาบันทึกน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงทุกๆ 1 ชั่วโมง เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

4) ใช้น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงกับเวลา เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่สูญเสียไปกับเวลาแล้วนำค่าที่ได้มาคำนวณอัตราการซึมผ่านไอน้ำตามสมการที่ 3

$$WVTR = \frac{\text{Slope}}{\text{Film area}} \quad (3)$$

โดยที่

WVTR = อัตราการซึมผ่านไอน้ำ (g/(m<sup>2</sup>xday))

Slope = น้ำหนักที่สูญเสียต่อเวลา (g/day)

Film area = พื้นที่ของฟิล์มที่ไอน้ำซึมผ่าน (m<sup>2</sup>)

### 2.6 การทดสอบการละลายน้ำ (Solubility)

การทดสอบการละลายน้ำของฟิล์มดัดแปลงการทดสอบตามวิธีของ Margarita *et al.*, (2012) ขั้นตอนการทดสอบการละลายน้ำของฟิล์ม

1) ทำการอบแห้งฟิล์มที่ใช้ทดสอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง พักให้เย็นเพื่อทำการชั่งน้ำหนักแผ่นฟิล์ม (W<sub>1</sub>)

2) ตัดแผ่นฟิล์มเป็นชิ้นเล็กๆ จากนั้นนำฟิล์มไปละลายในน้ำกลั่นปริมาตร 50 มิลลิลิตร พร้อมทั้งกวนด้วยเครื่องกวนสารละลายนาน 1 ชั่วโมง ทำการกรองสารละลายด้วยกระดาษกรอง Whatman No.4 ที่ชั่งน้ำหนักแล้ว (a<sub>1</sub>) นำกระดาษกรองที่มีฟิล์มไม่ละลายไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 25 นาที และทำให้เย็นในโถดูดความชื้น 24 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักของกระดาษกรอง (a<sub>2</sub>) คำนวณร้อยละการละลายน้ำของฟิล์ม การหาค่าการละลายน้ำของฟิล์มสามารถหาได้จากสมการที่ 4

$$\% \text{Solubility} = \frac{W_1 \cdot (a_2 - a_1)}{W_1} \times 100 \quad (4)$$

โดยที่

W<sub>1</sub> = น้ำหนักของแผ่นฟิล์ม (กรัม)

a<sub>1</sub> = น้ำหนักของกระดาษกรองก่อนอบ (กรัม)

a<sub>2</sub> = น้ำหนักของกระดาษกรองหลังอบ (กรัม)

### 2.7 การทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradation)

เตรียมแผ่นฟิล์มให้มีขนาด 2x5 เซนติเมตร ชั่งน้ำหนักที่แน่นอน นำไปฝังดินที่มีความชื้นประมาณร้อยละ 20 ในกะบะขนาด 30x40 เซนติเมตร ที่ความลึกประมาณ 10 เซนติเมตร ทดสอบในที่ร่มไม่มีการให้น้ำเป็นเวลา 2 สัปดาห์ นำแผ่นฟิล์มทำความสะอาดและชั่งน้ำหนัก หาค่าร้อยละการย่อยสลายจากสมการ (Dang *et al.*, 2016)

$$\% \text{ Degradable} = \frac{(A-B)}{A} \times 100 \quad (5)$$

โดยที่

A = น้ำหนักของแผ่นฟิล์มเริ่มต้น (กรัม)

B = น้ำหนักของแผ่นฟิล์มหลังการย่อยสลาย (กรัม)

### 3. การประยุกต์การใช้ฟิล์มในการบรรจุอาหาร

#### 3.1 การประยุกต์การใช้ฟิล์มย่อยสลายได้

โดยการใช้ฟิล์มบรรจุแผ่นบิสกิต (ความชื้นเริ่มต้น 5.03%db) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ปิดผนึกโดยรอบด้วยความร้อน เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง (25 องศาเซลเซียส) เป็นระยะเวลา 3, 5, 7 และ 10 วัน เพื่อทำการหาค่าความกรอบและความชื้นของบิสกิตภายหลังการเก็บรักษาการประยุกต์ใช้ฟิล์มบรรจุอาหาร แสดงดัง Figure 1

#### 3.2 การทดสอบค่าความกรอบของบิสกิต

การทดสอบความกรอบโดยใช้หลักการทดสอบแบบกดทะลุ โดยบันทึกค่าที่แผ่นบิสกิตเริ่มแตก ทดสอบด้วยเครื่อง Universal testing machine



Figure 1 Film Application for packaging

### 3.3 การทดสอบค่าความชื้นของของบิสกิต

นำบิสกิตที่ได้จากการเก็บรักษาตามเงื่อนไขการทดสอบหาความชื้นของบิสกิตด้วยเครื่อง Moisture Analyzers รุ่น MX-50

#### การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ทางสถิติ โดยวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two-way analysis of variance) เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธีการ Duncan's Multiple Range Test (DMRT) โดยกำหนดความเชื่อมั่นทางสถิติที่ระดับ  $p < 0.05$

#### ผลและวิจารณ์การทดลอง

ฟิล์มที่ได้จากแป้งข้าวหอมมะลิมีลักษณะสีขาว ผิวด้านที่สัมผัสกับแผ่นออลิกลีมีลักษณะเรียบและผิวด้านที่สัมผัสกับอากาศมีลักษณะขรุขระ เนื่องจากผิวที่สัมผัสกับอากาศมีการระเหยตัวของน้ำในสารละลายฟิล์มออกสู่ผิวของฟิล์มระหว่างการอบแห้ง ส่งผลทำให้ผิวฟิล์มมีความขรุขระไม่เรียบ ฟิล์มที่ได้จากการอบแห้งแสดงดัง Figure 2



Figure 2 Biodegradable Film from Thai Jasmine Rice Flour

#### 1. ผลการทดสอบสมบัติของฟิล์ม

การทดสอบสมบัติของฟิล์มที่ปริมาณกลีเซอรินและกรรมวิธีการอบแห้งต่างกัน แสดงดัง Table 1

##### 1.1 ค่าสี

เนื่องด้วยข้าวหอมมะลิมีเอกลักษณ์ที่มีสีค่อนข้างขาว ฟิล์มที่ผลิตจากแป้งข้าวหอมมะลิจึงมีลักษณะสีขาวตามลักษณะของแป้งที่นำมาผลิต ซึ่งกรรมวิธีการอบแห้ง และปริมาณกลีเซอรินที่แตกต่างกันไม่ส่งผลต่อสีของฟิล์ม

##### 1.2 ความหนา

ผลของความหนาของฟิล์ม พบว่าการเพิ่มปริมาณกลีเซอรินและชนิดของกรรมวิธีในการทำแห้งไม่ส่งผลต่อความหนาของฟิล์มไม่แตกต่างกันทางสถิติ ( $p < 0.05$ )

### 1.3 ความชื้น

ความชื้นของฟิล์มที่มีปริมาณกลีเซอริน 2.25% W/V มีความชื้นสูงกว่าฟิล์มที่มีปริมาณกลีเซอริน 0.75 และ 1.5% W/V ในกระบวนการทำแห้งทั้ง 2 กรรมวิธี ซึ่งปริมาณความชื้นที่สูงนี้อาจเนื่องจากกลีเซอรินเป็นสารที่มีโมเลกุลที่มีขั้ว (polar molecule) ซึ่งมีสมบัติที่ชอบน้ำ และละลายน้ำได้ดี (hydrophilic) ส่งผลทำให้ฟิล์มสะสมความชื้นได้มากกว่า ซึ่งสอดคล้องกับ Mohammad *et al.* (2013) ได้อธิบายถึงกลีเซอรินทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความยืดหยุ่นและยังสะสมโมเลกุลของน้ำได้เป็นอย่างดี เป็นผลทำให้มีความชื้นสูงในฟิล์มที่มีปริมาณของกลีเซอรินเพิ่มขึ้น

#### 1.4 สมบัติทางกล

ฟิล์มที่เติมปริมาณกลีเซอรินเพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้ค่าการต้านแรงดึงลดลงส่วนค่าการยืดตัวจะเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) ทั้ง 2 กรรมวิธีในการอบแห้ง สอดคล้องกับรายงานของ Mohammad *et al.*, (2013) ได้ศึกษาผลของกลีเซอรินต่อฟิล์มที่ผลิตจากเมล็ดเทียนแดง (cress seed) รายงานว่าฟิล์มมีความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นในขณะที่ค่าความต้านแรงดึงลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเพิ่มปริมาณกลีเซอรินเป็นการเติมสารเพิ่มความยืดหยุ่นให้กับฟิล์ม ทำให้โมเลกุลของกลีเซอรินแทรกเข้าไปอยู่ในช่องว่างระหว่างพอลิเมอร์ ทำให้แรงยึดเกาะระหว่างโมเลกุลของแป้งน้อยลง ฟิล์มจะมีความเหนียว ยืดหยุ่น ค่าการยืดตัวสูง ส่วนค่าแรงต้านการดึงมีค่าน้อยลง

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการอบแห้งทั้ง 2 กรรมวิธี พบว่าการต้านแรงดึงและการยืดตัวของฟิล์มไม่แตกต่างกันทางสถิติ ( $p < 0.05$ )

#### 1.5 สมบัติการซึมผ่านของไอน้ำ

อัตราการซึมผ่านของไอน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณกลีเซอรินที่เพิ่มขึ้น อาจเนื่องจากกลีเซอรินเป็นสารที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) ส่งผลให้โมเลกุลของน้ำสามารถแทรกผ่านช่องว่างระหว่างโมเลกุลได้ง่ายกว่าทำให้ไอน้ำซึมผ่านได้ดี ซึ่งทั้ง 2 กระบวนการอบแห้งมีค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) พบว่าฟิล์มที่ผ่านการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนจะมีอัตราการซึมผ่านไอน้ำที่สูงกว่าการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบบีบความร้อน เนื่องจากการอบแห้งด้วยลมร้อนใช้เวลาในการอบแห้งนานกว่า และมีปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ในห้องอบแห้งที่สูงกว่าเครื่องอบแห้งแบบบีบความร้อน ทำให้สารละลายฟิล์มมีระยะเวลาในการรวมตัวกันระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์และกลีเซอรินในระหว่างกระบวนการอบแห้งได้นานกว่า ส่งผลให้กลีเซอรินแทรกซึมอยู่ในช่องว่างระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ได้มากและไอน้ำสามารถซึมผ่านแผ่นฟิล์มได้ดีกว่า (Margarita *et al.*, 2012)

**1.6 การละลาย**

การเพิ่มขึ้นของปริมาณกลีเซอรินส่งผลให้ การละลายของฟิล์มเพิ่มมากขึ้น อาจเนื่องจาก กลีเซอรินเป็นสารที่ไม่มีเลกุลที่ชอบน้ำ ทำให้การแทรกซึมของโมเลกุลของน้ำ ได้สามารถเข้าสู่โครงสร้างระหว่างช่องว่างของพอลิเมอร์ของฟิล์มได้ดี สอดคล้องกับ Asgar *et al.*, (2013) รายงานว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณกลีเซอรินช่วยเพิ่มการละลายของฟิล์มสตาร์ชจากแป้งข้าวสาลีได้ดี ซึ่งกระบวนการอบแห้งทั้ง 2 กรณี การละลายของฟิล์มมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) การอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนมีร้อยละการละลายที่สูงกว่าการอบแห้งด้วยปั๊มความร้อน อาจเนื่องจากกระบวนการอบแห้งแบบลมร้อนมีอัตราการอบแห้งที่ต่ำ ใช้เวลาในการอบแห้งนาน ทำให้กลีเซอรินมีการแทรกซึมช่องว่างระหว่างพอลิเมอร์ได้ดีกว่า เช่นเดียวกับ Tapia *et al.*, (2013) รายงานเกี่ยวกับอัตราการอบแห้งที่สูง ส่งผลให้การละลายที่ลดลง

**1.7 การทดสอบการย่อยสลาย**

การย่อยสลายของฟิล์ม ฟิล์มที่ผ่านการทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน ซึ่งทั้ง 2 กระบวนการอบแห้ง พบว่าฟิล์มเกิดการย่อยสลายตามธรรมชาติดัง Figure 3 และร้อยละการย่อยสลายดัง Table 1 ฟิล์มที่เติมกรีเซอรินสูงจะมีการย่อยสลายได้ดีกว่า อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ( $p < 0.05$ ) การเพิ่มกรีเซอรินเป็นการเพิ่มสมบัติการดูดซับความชื้นให้กับแผ่นฟิล์ม ทำให้แผ่นฟิล์มดูดซับความชื้นที่อยู่ในดินเข้าสู่ภายในแผ่นฟิล์มทำให้เกิดการย่อยสลายได้ดีขึ้น



Figure 3 After biodegradable of film

สอดคล้องกับงานวิจัยของ Pawinee and Thanyalak, (2019) ทดสอบการใช้กลีเซอรินเป็นพลาสติกไซเซอร์เพื่อยืดอายุกล้วยน้ำว้า พบว่าการย่อยสลายเกิดขึ้นเร็วตามปริมาณ

กลีเซอรินที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้การทดสอบการย่อยสลายของฟิล์ม หากมีการทดสอบในพื้นที่ที่เป็นดินตามธรรมชาติ อาจทำให้เกิดการย่อยสลายของฟิล์มได้มากขึ้น เนื่องจากในดินตามพื้นที่ธรรมชาติ นอกจากจะมีจุลินทรีย์ที่ช่วยย่อยสลายแล้ว ยังมีสิ่งมีชีวิตต่างๆ จำนวนมากที่สามารถเพิ่มอัตราการย่อยสลายได้เร็วขึ้น

**2. การประยุกต์การใช้ฟิล์มย่อยสลายได้**

จากการใช้แผ่นฟิล์มประยุกต์ในการบรรจุภัณฑ์ โดยการบรรจุบิสกิตดัง Figure 1. การขึ้นรูปฟิล์มด้วยกรรมวิธีทั้ง 2 กรรมวิธี พบว่าค่าความกรอบของแผ่นบิสกิตจะลดลงตามระยะเวลาการเก็บรักษา ในทางตรงข้าม ค่าความชื้นในแผ่นบิสกิตมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเก็บรักษาที่ระยะเวลาานความชื้นสามารถแทรกซึมผ่านแผ่นฟิล์มเข้าสู่บิสกิตได้มากตามระยะเวลาที่เก็บรักษา การอบแห้งด้วยลมร้อน ค่าความกรอบจะลดลงที่ปริมาณกลีเซอรินสูง และระยะเวลาเก็บรักษาเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเพิ่มปริมาณกลีเซอรินส่งผลทำให้ค่าอัตราการซึมผ่านไอน้ำที่สูง ทำให้ความชื้นสามารถซึมผ่านแผ่นฟิล์มเข้าสู่บิสกิตได้ดีกว่า และกรรมวิธีการอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนที่มีอัตราการซึมผ่านไอน้ำที่น้อยกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนตามรายงานข้างต้น ส่งผลให้ค่าความกรอบโดยรวมมีค่าสูงกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อน

สำหรับค่าความกรอบและค่าความชื้นของบิสกิตที่ปริมาณกลีเซอรินต่างๆ ตามระยะเวลาการเก็บรักษาแสดงดัง Figure 4-7

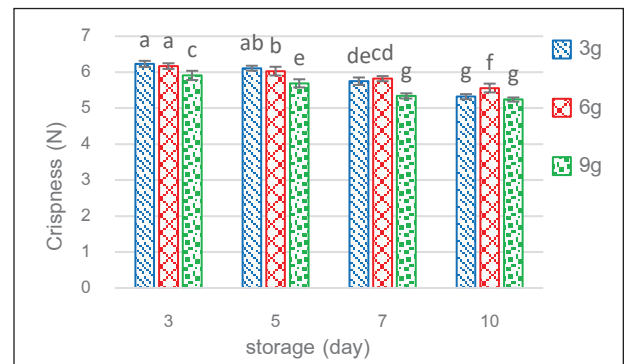


Figure 4 Crispness of biscuit with hot air oven.

<sup>a,b,c</sup> The different letters are mean significant differences between sample during storage periods ( $p < 0.05$ ).



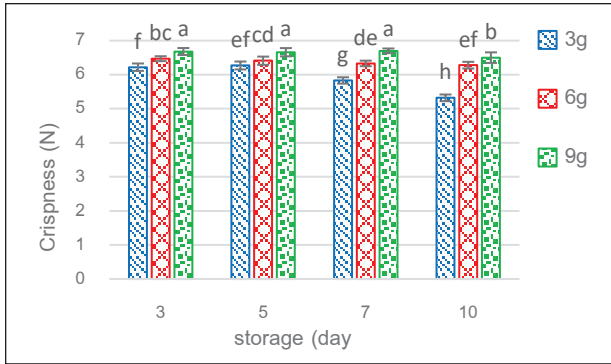


Figure 5 Crispness of biscuit with heat pump dryer.

<sup>a,b,c</sup>The different letters are mean significant differences between sample during storage periods ( $p < 0.05$ ).

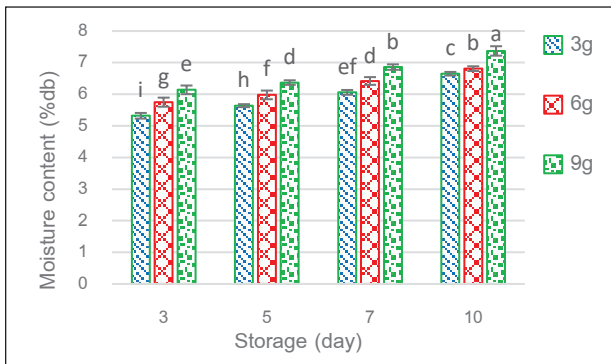


Figure 6 Moisture content of biscuit with hot air oven.

<sup>a,b,c</sup>The different letters are mean significant differences between sample during storage periods ( $p < 0.05$ ).

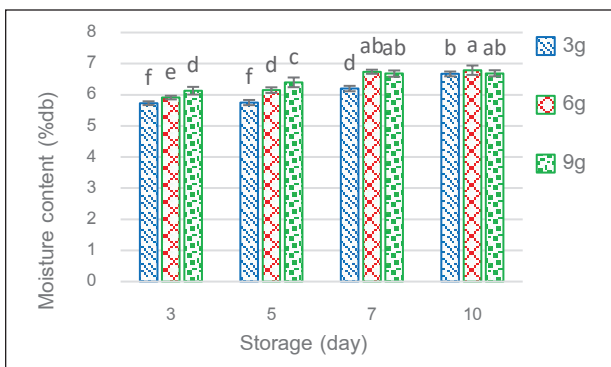


Figure 7 Moisture content of biscuit with heat pump dryer.

<sup>a,b,c</sup>The different letters are mean significant differences between sample during storage periods ( $p < 0.05$ ).

### สรุปผล

ฟิล์มจากแป้งข้าวหอมมะลิ สามารถขึ้นรูปด้วยการรมวิธีทางความร้อนทั้งการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนและด้วยเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน การพัฒนาปรับปรุงสมบัติของฟิล์มโดยการเติมสารเพิ่มความยืดหยุ่นในการเตรียมฟิล์ม พบว่าปริมาณกลีเซอรินมีผลต่อสมบัติของฟิล์ม โดยการเพิ่มปริมาณกลีเซอรินส่งผลทำให้ค่าความชื้น การยืดตัว การซึมผ่านไอน้ำและการละลายน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณกลีเซอรินที่เพิ่มขึ้น ส่วนการต้านแรงดึงฟิล์มจะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณกลีเซอรินในการเตรียมฟิล์ม

กรรมวิธีในการอบแห้ง ฟิล์มที่ผ่านการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน ซึ่งในระหว่างกระบวนการอบแห้ง ความชื้นในสารละลายฟิล์มสามารถระเหยออกได้ไวกว่าการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบลมร้อน ซึ่งใช้ระยะเวลาในการอบแห้งนาน ส่งผลให้อัตราการซึมผ่านไอน้ำและการละลายน้ำของฟิล์มได้ดีกว่า ในส่วนของค่าความหนา ความชื้น การต้านแรงดึง การยืดตัว และการย่อยสลายของฟิล์ม กรรมวิธีในการอบแห้งทั้ง 2 กระบวนการอบแห้งมีค่าใกล้เคียงกัน

ทางด้านการประยุกต์การใช้งาน โดยการใช้ฟิล์มในการบรรจุผลิตภัณฑ์เพื่อการเก็บรักษา ซึ่งการเพิ่มปริมาณกลีเซอรินในการเตรียมฟิล์มมีผลทำให้ความชื้นเข้าสู่ผลิตภัณฑ์ได้มากกว่า และการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน สามารถป้องกันความชื้นเข้าสู่ผลิตภัณฑ์ได้ดีกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อน ทำให้ผลิตภัณฑ์คงความกรอบนานกว่า และการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ (35 องศาเซลเซียส) ไม่ส่งผลต่อค่าสีของฟิล์ม ทำให้ฟิล์มมีสีเป็นไปตามสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมฟิล์ม

### กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ตามสัญญาเลขที่ ENG03/65 คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร และชีวภาพ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น ที่ให้ความอนุเคราะห์ในด้านเครื่องมือและอุปกรณ์ ในการปฏิบัติการวิจัยครั้งนี้

**Table 1** properties of biodegradable film from Thai jasmine rice flour

process drying	glycerin (g)	thickness (mm) NA	moisture (%db)	resistance to tensile (N/m <sup>2</sup> )	elongation (mm)	water vapor permeability (g/m <sup>2</sup> ·day)	water solubility (%)	degradation (%)	color measurement (NA)		
									L*	a*	b*
Dry with hot wind	3	0.26±0.02	8.68±0.69 <sup>b</sup>	337.41±7.85 <sup>ab</sup>	8.28±1.7 <sup>bc</sup>	353.25±10.20 <sup>c</sup>	76.88±5.24 <sup>c</sup>	55.19±8.37 <sup>d</sup>	79.8±1.79	-1.7±0.50	6.4±1.10
	6	0.27±0.01	9.22±0.57 <sup>b</sup>	301.19±10.50 <sup>bc</sup>	9.61±1.29 <sup>b</sup>	418.54±11.40 <sup>b</sup>	84.27±6.71 <sup>b</sup>	64.88±10.20 <sup>bc</sup>	77.3±1.32	-1.3±0.34	7.6±1.15
	9	0.29±0.02	10.59±0.83 <sup>a</sup>	290.70±22.41 <sup>c</sup>	11.67±1.25 <sup>a</sup>	450.18±16.90 <sup>a</sup>	91.64±6.38 <sup>a</sup>	67.06±11.53 <sup>ab</sup>	78.5±1.51	-1.9±0.4	7.3±0.53
Dry with heat pump	3	0.27±0.02	8.91±0.84 <sup>b</sup>	354.67±16.32 <sup>a</sup>	6.95±1.39 <sup>c</sup>	247.16±11.92 <sup>a</sup>	63.68±6.10 <sup>d</sup>	61.94±10.68 <sup>c</sup>	76.5±1.39	-1.7±0.51	7.9±0.76
	6	0.30±0.02	9.30±0.83 <sup>b</sup>	290.02±21.97 <sup>c</sup>	8.18±1.65 <sup>bc</sup>	282.14±16.34 <sup>d</sup>	73.97±8.02 <sup>c</sup>	63.40±7.84 <sup>c</sup>	78.6±1.99	-1.5±0.36	7.1±0.75
	9	0.28±0.02	10.49±1.0 <sup>a</sup>	269.26±21.91 <sup>c</sup>	11.60±1.26 <sup>a</sup>	342.77±15.35 <sup>c</sup>	84.87±8.78 <sup>b</sup>	69.26±10.16 <sup>a</sup>	77.2±1.70	-1.4±0.33	7.8±0.52

<sup>a,b,c</sup> The different letters in the same column are statistically significant different (p<0.05)

**เอกสารอ้างอิง**

กมลทิพย์ เอกธรรมสุทธิ. (2553). ผลของซินไฮโดรไลเซทต่อสมบัติทางกายภาพของฟิล์มแป้งบุก. *วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยหอการค้าไทย*, 30(1), 81-89.

กมลทิพย์ เอกธรรมสุทธิ และอดิศักดิ์ เอกโสวรรณ. (2543). ฟิล์มแป้งบุกชนิดบริโภาคได้: การเตรียม สมบัติบางประการ และการนำไปใช้ประโยชน์. *อาหาร*, 30(1), 44-51.

ชาลีดา บรมพิชัยชาติกุล. (2555). เทคโนโลยีการทำแห้งแบบผสมผสาน: การนำมาใช้เพื่อถนอมผลิตภัณฑ์อาหารที่ไวต่อความร้อน. *วารสารวิจัยและพัฒนา มจร*, 35(2), 269-283.

ภาวิณี เทียมดี และกวิณา สุขสำราญ. (2563). การพัฒนาฟิล์มย่อยสลายได้จากแป้งมันแกวเพื่อประยุกต์ใช้เป็นถุงเพาะชำ. *วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร*, 14(1), 1-14.

รังสิณี โสธรวิทย์. (2560). *ฟิล์มและสารเคลือบพอลิเมอร์ชีวภาพสำหรับระบบอาหาร*. (พิมพ์ครั้งที่ 3). สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

โสภิตา วิศาลศักดิ์กุล, อรวัลภ์ อุปถัมภานนท์, กุลวดี สังข์สนธิ, สุภา จุฬคุปต์ และสุทัศน์ย์ บุญโญภาส. (2559). การพัฒนาผลิตภัณฑ์พลาสติกชีวภาพจากแป้งเมล็ดขนุน. *วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา*, 21(2), 216-228.

สำนักมาตรฐานสินค้าส่งออก กรมการค้าต่างประเทศ (2564, 20มิถุนายน). *สถานการณ์ข้าว*. <https://www.dft.go.th/th/>

หมอเกษตรทองกวาว (2562, 12 มิถุนายน). อัตราการแปรรูป "ข้าวเปลือก" เป็น "ข้าวสาร" ของไทยสี่ได้ก็เปอร์เซ็นต์. *เทคโนโลยีชาวบ้าน*. <https://www.technologychaoban.com/>

อัจฉิมา อุ่นแก้ว, เจนจิรา รอดสุขโข, พรนภา เกษมศิริ และวลัยพร เหมโส. (2563). การศึกษาคุณลักษณะของฟิล์มบรรจุภัณฑ์ย่อยสลายได้จากข้าวไรซ์เบอร์รี่. *วารสารวิจัย มช. (ฉบับบัณฑิตศึกษา)*, 20(4), 81-93

Asgar, F., Bahareh, S. and Mahsa, M. (2013). Effect of Glycerol on Physical and Mechanical Properties of Wheat Starch Edible Films. *Journal of Texture Studies*, 44(3), 176-186.

ASTM D882-02. (1995). *Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting*. <https://www.astm.org/d0882-18.html>

Dang, M.N., Thi, V.V.D., Anne, C., Grillet, H.H.T. and Chi, N.H.T. (2016). Biodegradability of polymer film based on low density polyethylene and cassava starch. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 115, 257-265.

Margarita, M.A.M., Delia, R.T.B. and Florencia, C.M. (2012). Development and optimization of biodegradable films based on achira flour. *Carbohydrate Polymers*, 88(2), 449-458.

Mohammad, J., Naimeh, K., Mehran, G. and Mehri, H.N. (2013). Effect of glycerol concentration on edible film production from cress seed carbohydrate gum. *Carbohydrate Polymers*, 96(1), 39-46.

Mohammad, J., Farideh, T.Y., Seyed, A. M. and Arash, K. (2013). Physical, barrier and antioxidant properties of a novel plasticized edible film from quince seed mucilage. *International Journal of Biological Macromolecules*, 62, 500-507.

Pawinee, T. and Thanyalak, A. (2019). The effect of glycerol content on physical and mechanical properties of the biodegradable film from sweet potato flour for preserving namwa banana. *Life Sciences and Environment Journal*, 20(1), 70-80.

Sothornvit, R. and Krochta, JM. (2000). Water Vapor Permeability and Solubility of films from Hydrolyzed Whey Protein. *Journal of Food Science*, 65(4), 700–703.

Tapia-Blácido, D.R., Amaral, S.P.J.d, and Menegalli, F.C. (2013). Effect of drying conditions and plasticizer type on some physical and mechanical properties of amaranth flour films. *LWT - Food Science and Technology*, 50(2), 392-400.

# การผสมผสานวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเพื่อเป็นแหล่งผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพ

## Blending agricultural residue as a source for biofuel production

ปัทมาภรณ์ ลือโสภา<sup>1, 2</sup> และ วิจิตรา สิงห์หิรัญนุสรณ์<sup>2</sup>  
Pannatat Luesopa<sup>1, 2</sup> and Wichitra Singhirunnusorn<sup>2</sup>

Received: 7 September 2021 ; Revised: 24 November 2022 ; Accepted: 14 December 2022

### บทคัดย่อ

วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเป็นแหล่งชีวมวลเพื่อการผลิตพลังงานทดแทนที่มีศักยภาพและความสำคัญ อย่างไรก็ตามการนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาใช้เพื่อการผลิตพลังงานจำเป็นต้องศึกษาคุณสมบัติและคุณลักษณะของวัสดุ เนื่องจากพืชแต่ละชนิดมีคุณสมบัติ ลักษณะ และความพร้อมใช้งานที่แตกต่างกันตามฤดูกาล การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติและลักษณะของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร 5 ประเภท ได้แก่ ตอซังข้าว ฟางข้าว ใบอ้อย ใบมันสำปะหลัง และเหง้ามันสำปะหลัง นอกจากนี้ยังศึกษาศักยภาพความพร้อมใช้งานของวัสดุชีวมวล โดยแบ่งเป็นกลุ่มที่มีศักยภาพการผลิตสูงหรือวัสดุประเภทหลัก ได้แก่ ตอซังข้าว ฟางข้าว และใบอ้อย และกลุ่มที่มีศักยภาพการผลิตต่ำหรือวัสดุประเภทเสริม ได้แก่ ใบมันสำปะหลัง และเหง้ามันสำปะหลัง ผลการศึกษาพบว่า ใบมันสำปะหลัง เหง้ามันสำปะหลัง และใบอ้อย เป็นกลุ่มวัสดุที่มีปริมาณสารระเหย คาร์บอนคงตัว ลิกนิน และเซลลูโลสในสัดส่วนที่สูง และปริมาณเถ้าต่ำ ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญและส่งผลกระทบต่อค่าความร้อนที่สูงของวัสดุ โดยใบมันสำปะหลัง มีค่าความร้อนสูงที่สุด 19.29 MJ/kg รองลงมา ได้แก่ เหง้ามันสำปะหลัง 17.49 MJ/kg และใบอ้อย 16.92 MJ/kg ตามลำดับ ในขณะที่ตอซังข้าว และฟางข้าว พบว่าเป็นกลุ่มวัสดุที่มีค่าความร้อนที่ต่ำกว่า (14.20 MJ/kg และ 14.31 MJ/kg) ผลจากการผสมผสานวัสดุหลักแบบ 2 ประเภท พบว่า อัตราส่วนที่ให้ค่าความร้อนสูงที่สุดคือ ใบอ้อย:ฟางข้าว (80:20) 16.08 MJ/kg การผสมผสานชีวมวลวัสดุหลักแบบ 3 ประเภท พบว่า ใบอ้อย:ตอซังข้าว:ฟางข้าว (60:20:20) ให้ค่าความร้อนสูงที่สุด 15.68 MJ/kg การปรับปรุงคุณสมบัติด้านพลังงานด้วยวัสดุเสริม (ใบ และเหง้ามันสำปะหลัง) พบว่า ฟางข้าว:ใบมันสำปะหลัง (50:50) เป็นอัตราส่วนที่ให้ค่าความร้อนสูงที่สุด คือ 16.18 MJ/kg จากการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มอัตราส่วนของวัสดุเสริมส่งผลทำให้ค่าความร้อนเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังส่งผลทำให้ปริมาณเถ้ามีแนวโน้มลดลง

**คำสำคัญ:** การผสมผสานชีวมวล วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เชื้อเพลิงชีวภาพ พลังงานทดแทน

### Abstract

Agricultural residue becomes a renewable energy source with potential and importance. When using agricultural residue for energy production, it is essential to study the properties and characterizations. Each biomass has different properties, characteristics, and availability during various seasons. This study aimed to examine the properties and characteristics of five biomass materials including rice stubble (RB), rice straw (RW), sugar cane leaves (SL), cassava leaves (CL), and cassava rhizome (CR). Material blending scheme was also investigated depending on their seasonal availability to produce renewable energy fuels. RB, RW, and SL were categorized as the main materials in all seasons and the rest are supplement materials. The results showed that cassava leaves, sugarcane leaves, and cassava rhizomes were among the biomasses with highest HHV (19.29, 17.49, and 16.92 MJ/kg, respectively); high contents of volatiles, fixed carbon, and cellulose; and lower in ash. On the other hand, rice stubble and straw had low HHVs (14.20 MJ/kg and 14.31 MJ/kg, respectively). The two-type blending of main materials results showed that SL:RW

<sup>1</sup> สำนักงานพลังงานจังหวัดมหาสารคาม อำเภอเมือง จังหวัดมหาสารคาม

<sup>2</sup> ศูนย์สหวิทยาการวิจัยเพื่อความยั่งยืนทางสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150,

<sup>1</sup> Mahasarakham Provincial Energy Office

<sup>2</sup> Multidisciplinary Research Center for Environmental Sustainability (MRCES), Faculty of Environment and Resource Studies, Mahasarakham University, Kantharawichai District, Mahasarakham 44150,

\* Corresponding author; Pannatat Luesopa, MRCES, Faculty of Environment and Resource Studies, Mahasarakham University, Kantharawichai District, Mahasarakham 44150, mpluesopa@gmail.com



at a ratio of 80:20 contained the highest heat value (16.08 MJ/kg). Three-type blending showed that SL:RW:RB at a ratio of 60:20:20 had the highest heat value (15.68 MJ/kg). The improvement of energy properties with supplement materials (CL and CR) showed that RW:CL (50:50) ratio had the highest heat value of 16.18 MJ/kg. The study shows that heat value increases with an increase of in the ratio of supplement materials (CL and CR), and the amount of ash tends to decrease.

**Keywords:** Biomass Blending, Agricultural Residue, Biofuel, Renewable Energy

## บทนำ

วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเป็นแหล่งชีวมวลที่มีความสำคัญและศักยภาพการใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อทดแทนพลังงานจากฟอสซิล รวมทั้งการผลิตและการใช้พลังงานจากชีวมวลยังส่งผลดีต่อสมดุลคาร์บอนในบรรยากาศ ประเทศไทยถือว่ามีความพื้นที่ที่มีศักยภาพและความหลากหลายของชีวมวลประเภทวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรสูง ในปี 2556 มีการประมาณการวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรจากพืชเศรษฐกิจหลักที่เกิดขึ้นสูงถึง 134 ล้านตัน/ปี แต่มีการนำไปใช้ประโยชน์เพียง 72 ล้านตัน ทำให้มีวัสดุเหลือทิ้งตกค้างกว่า 62 ล้านตัน หรือประมาณร้อยละ 46 หากนำวัสดุเหลือทิ้งเหล่านี้มาผลิตเป็นพลังงานสามารถคิดเป็นค่าพลังงาน ประมาณ 562,223.8 TJ หรือ 13,348 Ktoe (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2556) วัสดุที่ตกค้างในพื้นที่เหล่านี้หากมีการจัดการที่ไม่ถูกวิธีอาจทำให้คุณภาพดินเสื่อมโทรม ก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศ และ ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทั้งในระยะสั้นและระยะยาว

ประเทศไทยมีนโยบายส่งเสริมความมั่นคงทางด้านพลังงานตามแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์ พ.ศ. 2561 - 2580 (PDP, 2018) และแผนขับเคลื่อนเศรษฐกิจฐานรากของกระทรวงพลังงาน ที่ส่งเสริมให้เกิดโรงไฟฟ้าชุมชน โดยส่งเสริมการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนภายในท้องถิ่น เช่น ชีวมวลจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เพื่อสร้างความมั่นคงทางพลังงาน และสร้างรายได้ให้กับชุมชนในการจำหน่ายวัตถุดิบเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงไฟฟ้า

อย่างไรก็ตาม การนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาผลิตเป็นพลังงานทดแทนจำเป็นที่จะต้องพิจารณาคุณสมบัติและคุณลักษณะของชีวมวล เนื่องจากพืชชีวมวลแต่ละชนิดมีองค์ประกอบและคุณสมบัติทางพลังงานที่แตกต่างกัน และที่สำคัญปริมาณของวัสดุมีความผันผวนตามฤดูกาล การพิจารณาเลือกใช้วัสดุประเภทเดียวในการผลิตเชื้อเพลิงจะส่งผลให้เกิดการขาดแคลนวัสดุ เพิ่มค่าใช้จ่ายในการจัดการเก็บ อีกทั้งข้อดีของวัสดุชีวมวลส่วนใหญ่มีความหนาแน่นทางพลังงานที่ต่ำ (Anukam *et al.*, 2016 ; Daioglou *et al.*, 2016) ดังนั้น แนวทางการผสมผสานวัสดุเหลือทิ้งทางการ

เกษตรจึงเป็นแนวทางที่สามารถลดข้อจำกัดต่างๆ เหล่านี้ พร้อมทั้งเพิ่มประสิทธิภาพด้านพลังงานให้กับวัสดุด้วยอีกทางหนึ่ง

งานวิจัยที่เกี่ยวกับการเพิ่มประสิทธิภาพด้านพลังงานด้วยการผสมผสานชีวมวลจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรยังพบว่ามีน้อย ในขณะที่งานวิจัยในอดีตส่วนใหญ่เน้นการผสมผสานชีวมวลเพื่อลดปัญหาความเสถียรด้านการขาดแคลนวัสดุ เช่น การผสมวัสดุเหลือทิ้งจากข้าวโพดเลี้ยงสัตว์กับถ่านหิน (Anukam *et al.*, 2016), แกลบ ชี้เลื่อย กับ ถ่านหิน (Sasongko *et al.*, 2017), ไม่สนกับเศษเหลือทิ้งจากต้นกาแฟ (Mendoza Martinez *et al.*, 2019), ดังนั้นงานวิจัยในครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากระบวนการผสมผสานชีวมวลจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเพื่อเป็นเชื้อเพลิงทางเลือกในการผลิตพลังงานทดแทนสำหรับโรงไฟฟ้าชีวมวลในประเทศไทย

## วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ เคมี และทางพลังงานของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร และการปรับปรุงคุณสมบัติทางพลังงานของชีวมวลด้วยการผสมผสานวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

## วิธีการวิจัย

การวิจัยในครั้งนี้ได้ทำการศึกษาวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรจากพืชเศรษฐกิจหลักในพื้นที่จังหวัดมหาสารคาม จำนวน 5 ประเภท ได้แก่ ตอซังข้าว (Rice Stubble: RB) ฟางข้าว (Rice Straw: RW) ใบอ้อย (Sugar cane Leaves: SL) ใบมันสำปะหลัง (Cassava Leaves: CL) และเหง้ามันสำปะหลัง (Cassava Rhizome: CR) โดยมีวิธีการศึกษาดังนี้

### 1. การเตรียมวัสดุ

การเตรียมวัสดุเพื่อการวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆ ของชีวมวล เริ่มด้วยการนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรทั้ง 5 ประเภทมาตากแห้ง โดยอาศัยแสงแดด (Sun-dried) หรืออบด้วยเตาอบลมร้อนจนวัสดุแห้งและมีน้ำหนักคงที่ จากนั้นทำการบดย่อยวัสดุด้วยเครื่องบดย่อยจนได้วัสดุที่มีขนาด

ประมาณ 1 - 3 มิลลิเมตร ตัวอย่างดังกล่าวนี้ใช้สำหรับการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณ (Proximate Analysis), การวิเคราะห์เยื่อใย (Detergent Analysis) และการวิเคราะห์ค่าความร้อน (High heat value)

### 2. การวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณ

การวิเคราะห์คุณสมบัติและองค์ประกอบของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร คุณสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ปริมาณความชื้น (Moisture Content ; MC) ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D3173 คุณสมบัติทางเคมี ได้แก่ ปริมาณสารระเหย (Volatile Matter ; VM) ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D3175 ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon ; FC) ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D3172 และปริมาณเถ้า (Ash) ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D3174 (ปีนมนัส วิโสรัมย์, 2563)

### 3. การวิเคราะห์เยื่อใย

การหาส่วนประกอบของเยื่อใยต่างๆ ในพืช ได้แก่ เซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) ลิกนิน (Lignin) และเถ้า (Ash) อาศัยวิธีการ Detergent Analysis (ปีนมนัส วิโสรัมย์, 2563)

### 4. การวิเคราะห์ค่าความร้อน

การวิเคราะห์ค่าความร้อนสูง (High Heat Value ; HHV) โดยใช้เครื่อง Bomb Calorimeter รุ่น e2K ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D5865-13 (ปีนมนัส วิโสรัมย์, 2563 ; Anukam *et al.*, 2016)

### 5. การศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนการผสมผสานวัสดุต่อคุณสมบัติของชีวมวล

การวิจัยต้องการศึกษากระบวนการผสมผสานวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่มีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพด้านพลังงานและเป็นทางเลือกการใช้งานให้กับวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรในฤดูกาลต่างๆ ตลอดทั้งปี จากข้อมูลปริมาณวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรในพื้นที่จังหวัดมหาสารคาม วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรจากการเพาะปลูกข้าวมีปริมาณมากที่สุดคือ 705 พันตันปี รองลงมาคือ อ้อย 465 พันตันปี และมันสำปะหลัง 88 พันตันปี (วิจิตร สิงห์หิรัญสุวรรณ และคณะ, 2560) การศึกษาแบ่งวัสดุออกเป็น 2 กลุ่ม โดยอาศัยปริมาณของวัสดุที่มีตลอดทั้งปีภายในพื้นที่จังหวัดมหาสารคาม เป็นข้อพิจารณา สามารถแบ่งกลุ่มประเภทวัสดุที่มีศักยภาพการผลิตสูง เรียกว่าเป็น “วัสดุหลัก” ได้แก่ ตอซังข้าว (RB) ฟางข้าว (RW) และใบอ้อย (SL) และวัสดุที่มีศักยภาพการผลิตต่ำ เรียกว่า “วัสดุเสริม” ได้แก่ ใบมันสำปะหลัง (CL) และเหง้ามันสำปะหลัง (CR) การศึกษากระบวนการผสมผสาน แบ่งออกเป็น 2 แนวทาง ได้แก่

#### 5.1 การผสมผสานชีวมวลประเภทวัสดุหลัก

ทำการออกแบบส่วนผสมชีวมวลประเภทวัสดุหลัก ได้แก่ ตอซังข้าว (RB) ฟางข้าว (RW) และใบอ้อย (SL) ด้วยวิธีการออกแบบส่วนผสม mixture design แบบ simplex lattice ได้ชุดการทดลอง จำนวน 21 ชุดการทดลอง อัตราส่วนวัสดุแต่ละประเภทแปรผันตามอัตราส่วน คือ 0, 20, 40, 60, 80, 100 wt% โดยการศึกษาได้แบ่งการผสมผสานวัสดุหลักออกเป็นแบบ 2 ชนิด และแบบ 3 ชนิด ตัวอย่างที่ทำการผสม 21 ชุดการทดลอง นำมาวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณ (Proximate Analysis) และหาค่าความร้อน (HHV) ซึ่งมีการทำซ้ำทั้งหมด 3 ซ้ำต่อชุดการทดลอง

#### 5.2 การผสมผสานวัสดุหลักและการเพิ่มวัสดุเสริม

ด้วยคุณสมบัติทางพลังงานของใบมันสำปะหลัง (CL) และเหง้ามันสำปะหลัง (CR) ซึ่งเป็นวัสดุเสริม และมีค่าความร้อนสูงกว่าวัสดุประเภทอื่น การวิจัยจึงต้องการศึกษาผลของการปรับปรุงคุณสมบัติทางพลังงานของชีวมวลประเภทวัสดุหลักด้วยการผสมร่วมกับวัสดุเสริม โดยการวิจัยได้นำชุดการทดลองจากข้อ 5.1 ที่มีค่าความร้อนต่ำกว่าเกณฑ์ มาทดสอบโดยการเพิ่มอัตราส่วนวัสดุเสริมที่ละ 10 wt% ทั้งนี้ โดยมีเงื่อนไขในการเพิ่มวัสดุเสริม คือ วัสดุเสริมต้องมีอัตราส่วนที่น้อยกว่าหรือเท่ากับวัสดุหลัก จึงกำหนดอัตราส่วนผสมระหว่างวัสดุหลักต่อวัสดุเสริม คือ 90:10 80:20 70:30 60:40 50:50 wt% ด้วยการศึกษาวัสดุเสริม 2 ชนิด ดังนั้นจึงทำการศึกษาการเพิ่มวัสดุเสริม 1 ชนิด (ทีละชนิด) และ 2 ชนิด พร้อมกัน โดยสามารถออกแบบการทดลองได้ทั้งหมด 30 ชุดการทดลอง และนำวัสดุที่ผสมผสานนี้ไปทำการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณ (Proximate Analysis) และหาค่าความร้อน (HHV) โดยทำการทดลอง จำนวน 3 ซ้ำต่อชุดการทดลอง

#### ผลการวิจัย

##### 1. คุณสมบัติของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

การศึกษาวิเคราะห์คุณสมบัติด้านกายภาพของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรทั้ง 5 ชนิด พบว่า ปริมาณความชื้น (Moisture Content) ของวัสดุมีปริมาณอยู่ระหว่าง  $6.97 \pm 0.11$  –  $8.57 \pm 0.13\%$  โดยตอซังข้าว (RB) มีปริมาณความชื้นสูงที่สุด  $8.57 \pm 0.13\%$  ในขณะที่ใบอ้อย (SL) มีปริมาณความชื้นต่ำที่สุด  $6.97 \pm 0.11\%$  ถึงแม้ว่าปริมาณความชื้นจะไม่ได้มีความสัมพันธ์กับค่าความร้อนของวัสดุอย่างมีนัยสำคัญ แต่อย่างไรก็ตาม หากวัสดุที่เป็นเชื้อเพลิงมีปริมาณความชื้นที่สูงจะทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานในกระบวนการเผาไหม้ ความชื้นของวัสดุที่แนะนำควรอยู่ระหว่าง 5 - 10% (Mendoza Martinez *et al.*, 2019) ซึ่งจะเห็นได้ว่าวัสดุทั้ง 5 ประเภทมีค่าความชื้น

อยู่ในเกณฑ์ที่แนะนำในการนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงพลังงาน (Table 1)

คุณสมบัติด้านเคมีของวัสดุแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่สามารถเผาไหม้ได้ ได้แก่ สารระเหย (Volatile Matter) และคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon) และส่วนที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้ คือ เถ้า (Ash Content) โดยปริมาณสารระเหยและคาร์บอนคงตัวเป็นองค์ประกอบที่มีผลต่อค่าความร้อนของวัสดุ หากวัสดุมีปริมาณสารระเหยและคาร์บอนคงตัวสูง จะส่งผลให้มีค่าความร้อนสูงตามไปด้วย โดยทั่วไปปริมาณสารระเหยที่มีความเหมาะสมในการนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลทั่วไปควรมีค่าอยู่ระหว่าง 65 - 85% โดยน้ำหนัก (Mendoza Martinez *et al.*, 2019) ผลการศึกษาพบว่าไบอ้อย (SL) เป็น

วัสดุที่มีปริมาณสารระเหยสูงที่สุด  $75.69 \pm 1.05\%$  และวัสดุที่มีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงที่สุด ได้แก่ เหง้ามันสำปะหลัง (CR)  $15.27 \pm 0.14\%$  ซึ่งพบว่าสอดคล้องกับค่าความร้อนของวัสดุดังกล่าวซึ่งจะได้นำเสนอต่อไป (Table 1)

ในส่วนปริมาณเถ้า พบว่าตอซังข้าว (RB) เป็นวัสดุที่มีปริมาณเถ้าสูงที่สุด  $12.70\%$  โดยวัสดุที่มีปริมาณเถ้าต่ำที่สุดคือ เหง้ามันสำปะหลัง (CR) พบเพียง  $3.77\%$  ด้วยเถ้าคือส่วนที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้ของวัสดุ ดังนั้นหากวัสดุมีปริมาณเถ้าสูง จะส่งผลต่อการลดประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง ทำให้ค่าความร้อนโดยรวมจากการเผาไหม้ของวัสดุมีค่าต่ำ (Konrad and Piotr, 2019)

**Table 1** Results of proximate analysis, detergent analysis and calorimetry of agricultural residues

Properties	Agricultural Residues (dry basis)				
	RB	RW	SL	CL	CR
<b>Proximate Analysis (%)</b>					
Moisture Content	8.57±0.13	7.70±0.09	6.97±0.11	7.29±0.18	7.22±0.18
Volatile Matter	66.99±0.98	67.14±0.44	75.69±1.05	72.13±0.49	73.74±0.53
Ash Content	12.70±0.45	11.32±0.07	4.31±0.05	6.87±0.28	3.77±0.36
Fixed Carbon	11.74±0.89	13.85±0.51	13.03±0.99	13.71±0.44	15.27±0.14
<b>Detergent Analysis (%)</b>					
Hemicellulose	37.90±0.53	32.92±0.19	28.67±0.29	23.56±0.48	11.92±0.13
Cellulose	30.14±0.27	29.37±0.32	37.74±0.49	33.36±0.36	45.06±0.14
Lignin	21.90±0.34	27.78±0.56	26.69±0.32	39.01±0.55	38.38±0.27
Other	10.06±0.20	9.92±0.06	6.90±0.41	4.07±0.12	4.64±0.27
<b>Calorimetry (MJ/kg)</b>					
High Heating Value	14.20±0.32	14.31±0.37	16.92±0.16	19.29±0.37	17.49±0.17

Note. RB: Rice Stubble; RW: Rice Straw; SL: Sugar cane Leaves; CL: Cassava Leaves; CR: Cassava Rhizome.

การศึกษาคุณสมบัติทางด้านชีวเคมี ได้แก่ ปริมาณเฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนิน คุณสมบัติด้านชีวเคมีเป็นปัจจัยในการพิจารณาเลือกชีวมวลเพื่อการผลิตพลังงาน คุณสมบัติที่ต้องการแตกต่างกันไปตามรูปแบบการผลิตพลังงาน ในการผลิตเชื้อเพลิงเพื่อใช้ในการเผาไหม้เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าจะพิจารณาปริมาณเซลลูโลส (Cellulose) และลิกนิน (Lignin) เป็นองค์ประกอบหลัก เนื่องจากเซลลูโลส (Cellulose) เป็นแหล่งคาร์บอนจำนวนมากในชีวมวล และลิกนิน (Lignin) มีคุณสมบัติเป็นกาวธรรมชาติช่วยในการยึดเกาะของก้อนเชื้อเพลิงมีผลต่อความแข็งแรงของเชื้อเพลิงที่ผลิตจากวัสดุชีวมวล (Tumuluru *et al.*, 2011) นอกจากนี้ลิกนินยังเป็นองค์ประกอบที่ส่งผลทำให้ชีวมวลมีค่าความร้อน

สูงด้วย (Domingos *et al.*, 2020 ; Maksimuk *et al.*, 2021) จากการศึกษาพบว่า ไบมันสำปะหลัง (CL) มีปริมาณลิกนินสูงที่สุด คือ  $39.01 \pm 0.55\%$  ส่วนเหง้ามันสำปะหลัง (CR) เป็นวัสดุที่มีปริมาณเซลลูโลสสูงที่สุด คือ  $45.06 \pm 0.14\%$  และมีปริมาณเฮมิเซลลูโลสต่ำที่สุด คือ  $11.92 \pm 0.13\%$

คุณสมบัติด้านพลังงาน จากการศึกษาค่าความร้อนสูงของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรพบว่า ไบมันสำปะหลัง (CL) มีค่าความร้อนสูงที่สุด  $19.29 \pm 0.37$  MJ/kg รองลงมา ได้แก่ เหง้ามันสำปะหลัง (CR)  $17.49 \pm 0.17$  MJ/kg และไบอ้อย (SL)  $16.92 \pm 0.16$  MJ/kg ตามลำดับ สำหรับส่วนตอซังข้าว (RB) และฟางข้าว (RW) มีค่าความร้อนสูงที่ใกล้เคียงกัน เท่ากับ  $14.20 \pm 0.32$  MJ/kg และ  $14.31 \pm 0.37$  MJ/kg ตามลำดับ

จากการศึกษาคุณสมบัติของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรทั้ง 5 ชนิด จะเห็นได้ว่า ปริมาณสารระเหย (Volatile Matter) คาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon) เถ้า (Ash Content) และลิกนิน มีผลต่อค่าความร้อนของวัสดุ กล่าวคือหากวัสดุมีปริมาณสารระเหย (Volatile Matter) คาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon) และลิกนิน ในปริมาณที่สูง จะส่งผลให้ค่าความร้อนของวัสดุมีแนวโน้มที่สูงตามไปด้วย แต่หากวัสดุมีปริมาณเถ้าที่สูงจะส่งผลให้แนวโน้มของวัสดุมีค่าความร้อนที่ต่ำลง (Ray *et al.*, 2017) (Table 1)

จากการวิเคราะห์คุณสมบัติด้านพลังงานของวัสดุทั้ง 5 ประเภท เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าความร้อนของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรประเภทอื่นที่ใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับโรงไฟฟ้าชีวมวลในปัจจุบัน ได้แก่ ชันไม้ (17.7 MJ/kg), แกลบ (14.6 MJ/kg) และส่วนผสมระหว่าง ชันไม้: แกลบ (50:50) (15.8 MJ/kg) พบว่า วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรทั้ง 5 ประเภทมีค่าความร้อนที่สูงกว่าและใกล้เคียงกับตัวอย่างวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่ใช้เป็นวัตถุดิบในโรงไฟฟ้า ชีวมวลในปัจจุบัน แต่อย่างไรก็ตามเมื่อนำค่าความร้อนของวัสดุทั้ง 5 ประเภทมาเปรียบเทียบกับมาตรฐานเชื้อเพลิงชีวมวลแข็งของ

ประเทศไทย ประเภทที่ไม่ได้ทำจากไม้ ซึ่งกำหนดให้เชื้อเพลิงต้องมีค่าความร้อน ไม่น้อยกว่า 14.5 MJ/kg. (มอก.2772-2560) (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2560) จะพบว่า ไบโอมสำหรับหลัง (CL) เหม่งสำหรับหลัง (CR) และไบอ้อย (SL) มีค่าความร้อนที่สูงกว่าเกณฑ์มาตรฐาน ในขณะที่ตอซังข้าว (RB) และฟางข้าว (RW) มีค่าความร้อนต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด

## 2. การผสมผสานชีวมวลประเภทวัสดุหลัก

การผสมผสานชีวมวลประเภทวัสดุหลัก แบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ ได้แก่ การผสมผสานวัสดุแบบ 2 ชนิด และแบบ 3 ชนิด โดยในรูปแบบของการผสมผสานแบบ 2 ชนิด พบว่าชุดการทดลองที่ให้ค่าความร้อนสูงสุด คือ ส่วนผสมระหว่าง ไบอ้อย (SL) : ฟางข้าว (RW) ในอัตราส่วน 80:20 โดยให้ค่าความร้อน  $16.08 \pm 0.25$  MJ/kg ซึ่งใกล้เคียงกับส่วนผสมระหว่างไบอ้อย (SL) : ตอซังข้าว (RB) (80:20) ที่ให้ค่าความร้อน  $16.06 \pm 0.20$  MJ/kg ในขณะที่ส่วนผสมระหว่างตอซังข้าว (RB) : ฟางข้าว (RW) อัตราส่วน 60:40 ให้ค่าความร้อนต่ำที่สุด อยู่ที่  $14.58 \pm 0.10$  MJ/kg (Table 2, Figure 1)

**Table 2** Results of proximate analysis and calorimetry of blended samples of main material agricultural residue.

Blended samples ratio (wt%)			Proximate analysis (%)				Calorimetry
RB	RW	SL	MC	VM	Ash	FC	HHV (MJ/Kg)
100	-	-	8.57±0.13	66.99±0.98	12.70±0.45	11.74±0.89	14.20±0.32
-	100	-	7.70±0.09	67.14±0.44	11.32±0.07	13.85±0.51	14.31±0.37
-	-	100	6.97±0.11	75.69±1.05	4.31±0.05	13.03±0.99	16.92±0.16
80	20	-	10.58±0.18	64.05±0.25	12.06±0.36	13.32±0.09	14.52±0.11
20	80	-	9.48±0.18	65.58±0.39	11.79±0.20	13.15±0.25	14.90±0.21
80	-	20	9.85±0.51	66.46±0.48	10.38±0.36	13.31±0.26	14.63±0.11
20	-	80	7.52±0.06	73.21±0.91	5.70±0.27	13.57±0.77	16.06±0.20
-	80	20	8.87±0.21	67.52±0.60	10.30±0.05	13.32±0.35	15.01±0.38
-	20	80	6.58±0.09	74.12±0.16	5.60±0.11	13.70±0.17	16.08±0.25
60	40	-	10.26±0.20	64.97±0.48	11.82±0.11	12.95±0.41	14.58±0.10
40	60	-	10.15±0.23	65.55±0.76	11.85±0.25	12.45±1.15	14.77±0.22
60	-	40	9.65±0.04	68.70±0.57	8.63±0.41	13.01±0.19	15.05±0.19
40	-	60	9.28±0.11	69.25±0.79	7.28±0.19	14.40±1.06	15.43±0.19
-	60	40	8.71±0.19	68.36±0.37	8.54±0.09	14.39±0.51	15.20±0.23
-	40	60	8.68±0.08	69.40±0.30	6.98±0.04	14.94±0.33	15.55±0.26
40	40	20	10.67±0.17	64.69±0.63	10.62±0.21	14.02±0.64	14.72±0.24
40	20		10.43±0.32	66.42±0.46	8.90±0.35	14.26±0.48	15.23±0.08
20	40	40	8.94±0.76	66.72±0.67	8.81±0.17	15.53±0.55	15.28±0.32



**Table 2** Results of proximate analysis and calorimetry of blended samples of main material agricultural residue (cont.)

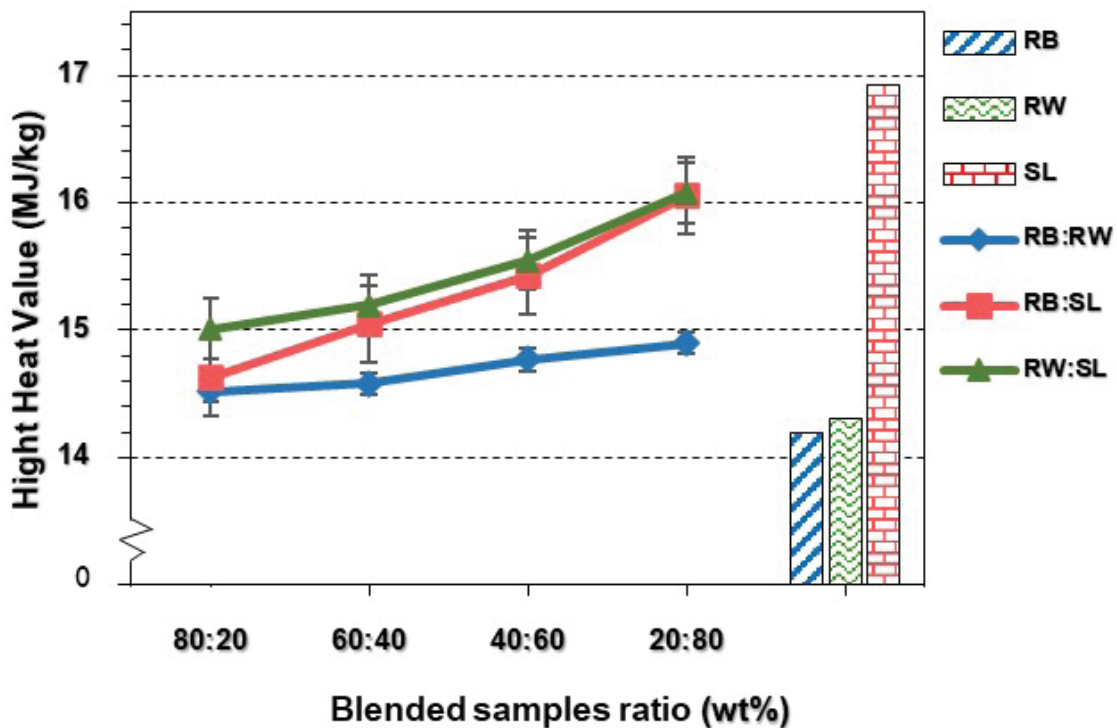
Blended samples ratio (wt%)			Proximate analysis (%)				Calorimetry
RB	RW	SL	MC	VM	Ash	FC	HHV (MJ/Kg)
60	20	20	11.39±0.40	64.19±0.09	10.42±0.09	14.00±0.22	14.56±0.36
20	60	20	10.92±0.18	64.12±0.63	10.33±0.23	14.63±0.33	15.24±0.16
20	20	60	10.20±0.16	67.13±0.40	7.53±0.39	15.13±0.26	15.68±0.30

Note. MC: Moisture Content; VM: Volatile Matter; Ash: Ash content; FC: Fixed Carbon; HHV: High Heating Value.

จากผลข้างต้น จะเห็นได้ว่าการเพิ่มสัดส่วนของไบอ้อยจะส่งผลต่อค่าความร้อนของวัสดุ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยเฉพาะวัสดุที่มีค่าความร้อนต่ำอย่างตอซังข้าว (RB) (14.20±0.32) และ ฟางข้าว (RW) (14.31±0.37) ในขณะที่ผสมผสานโดยการแทนที่ระหว่างปริมาณตอซังข้าว (RB) และฟางข้าว (RW) ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความร้อนอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้เพราะวัสดุทั้งสองประเภทมีองค์ประกอบที่คล้ายกัน (Table 2, Figure 1)

รูปแบบการผสมผสานแบบ 3 ชนิด พบว่าชุดการทดลองที่ให้ค่าความร้อนสูงที่สุด คือ ไบอ้อย (SL) : ตอซังข้าว

(RB) : ฟางข้าว (RW) ในอัตราส่วน 60:20:20 โดยให้ค่าความร้อน 15.68±0.30 MJ/kg สำหรับชุดการทดลองที่ให้ค่าความร้อนต่ำที่สุดคือ ตอซังข้าว (RB) : ฟางข้าว (RW) : ไบอ้อย (SL) ในอัตราส่วน 60:20:20 ซึ่งให้ค่าความร้อน 14.56±0.36 MJ/kg ผลจากการผสมผสานแบบ 3 ชนิด ให้ผลลัพธ์สอดคล้องกับการผสมผสานแบบ 2 ชนิด คือเมื่อเพิ่มสัดส่วนของไบอ้อย (SL) จะส่งผลให้วัสดุมีค่าความร้อนเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย ผลที่เป็นเช่นนั้นเนื่องจากไบอ้อย (SL) เป็นวัสดุที่มีค่าความร้อนและปริมาณสารระเหยสูงที่สุดเมื่อเทียบในวัสดุประเภทหลักด้วยกัน (Figure 2)



**Figure 1** Heat values of samples from two-type blending scheme

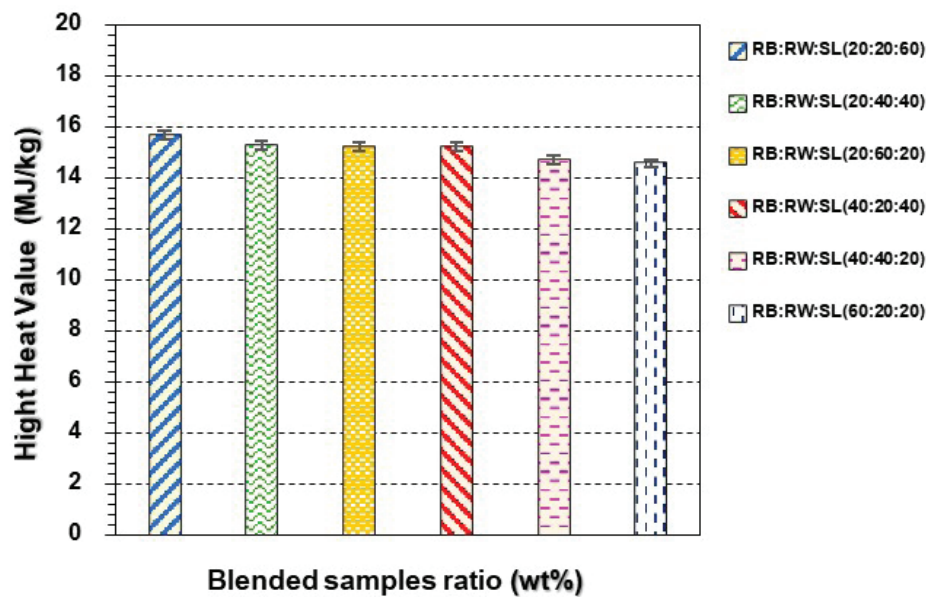


Figure 2 Heat values of samples from three-type blending scheme

นอกจากการเพิ่มสัดส่วนของไบโอดีเซลจะส่งผลต่อค่าความร้อนของวัสดุแล้ว ยังพบว่าส่งผลต่อสัดส่วนเถ้าของวัสดุที่ลดลงด้วย โดยรูปแบบการผสมผสานวัสดุแบบ 2 ชนิด พบว่าชุดการทดลองที่มีปริมาณเถ้าต่ำที่สุด คือ ไบโอดีเซล (SL) : ฟางข้าว (RW) ในอัตราส่วน 80:20 มีปริมาณเถ้า  $5.60 \pm 0.11\%$  ซึ่งใกล้เคียงกับส่วนผสม ไบโอดีเซล (SL) : ตอซังข้าว (RB) อัตราส่วน 80:20 ซึ่งมีปริมาณเถ้า  $5.70 \pm 0.27\%$  ในขณะที่การผสมผสานวัสดุแบบ 3 ชนิด พบว่าชุดการทดลองระหว่างไบโอดีเซล (SL) : ตอซังข้าว (RB) : ฟางข้าว (RW) ในอัตราส่วน 60:20:20 มีปริมาณเถ้าต่ำที่สุด ( $7.53 \pm 0.39\%$ )

การศึกษาได้เปรียบเทียบค่าความร้อนจากวัสดุที่มีการผสมผสาน กับมาตรฐานเชื้อเพลิงชีวมวลแข็งของประเทศไทย ตาม มอก.2772-2560 ซึ่งเชื้อเพลิงควรมีค่าความร้อนสูงไม่น้อยกว่า 14.5 MJ/kg (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2560) ผลการศึกษาพบว่า มีชุดการทดลองซึ่งค่าความร้อนสูงผ่านเกณฑ์มาตรฐาน จำนวน 19 ชุดการทดลอง และมีจำนวน 2 ชุดการทดลองที่ยังมีค่าความร้อนสูงต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน ได้แก่ ตอซังข้าว (RB) และฟางข้าว (RW) ดังนั้น การวิจัยจึงต้องการปรับปรุงคุณสมบัติทางพลังงานของวัสดุทั้ง 2 ชนิดดังกล่าว โดยการผสมผสานกับชีวมวลประเภทวัสดุเสริมที่มีค่าความร้อนสูงกว่า ได้แก่ ไบโอดีเซล (CL) และเหง้ามันสำปะหลัง (CR) ดังผลการศึกษาต่อไปนี้

### 3. การปรับปรุงคุณสมบัติชีวมวลด้วยวัสดุเสริม

การปรับปรุงคุณสมบัติทางด้านพลังงานของวัสดุหลัก 2 ชนิด ได้แก่ ตอซังข้าว (RB) และฟางข้าว (RW) ด้วยผสมผสานกับวัสดุเสริม ได้แก่ ไบโอดีเซล (CL) และเหง้า

มันสำปะหลัง (CR) การวิจัยได้ศึกษาในรูปแบบการผสมผสาน 2 แบบ ได้แก่ การใช้วัสดุเสริม 1 ชนิด และ 2 ชนิด

การผสมผสานวัสดุเสริมทีละชนิด พบว่า การผสมผสานสัดส่วนของไบโอดีเซลกับเหง้ามันสำปะหลังในอัตราส่วนต่างๆ กับตอซังข้าว ส่งผลให้ค่าความร้อนสูงขึ้น 4.65% - 13.45% มีค่าความร้อนสูงอยู่ระหว่าง  $14.86 \pm 0.14$  -  $16.11 \pm 0.22$  MJ/kg โดยอัตราส่วนที่ให้ค่าความร้อนสูงที่สุด คือ ตอซังข้าว (RB) : ไบโอดีเซล (CL) อัตราส่วน 50:50 ในขณะที่การผสมผสานไบโอดีเซลกับฟางข้าว ส่งผลให้ค่าความร้อนเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับตอซัง โดยค่าความร้อนสูงเพิ่มขึ้น 4.96% - 13.56% จากการเพิ่มอัตราส่วนของไบโอดีเซล (Table 3, Figure 3,4)

สำหรับการปรับปรุงคุณภาพวัสดุหลัก โดยการผสมผสานกับเหง้ามันสำปะหลัง พบว่าสามารถเพิ่มค่าความร้อนสูงของตอซังและฟางข้าวได้ 3.66% - 11.97% และ 3.28% - 12.79% ตามลำดับ โดยการเพิ่มอัตราส่วนของเหง้าถึงร้อยละ 50 ทำให้วัสดุผสมผสานมีค่าความร้อนสูงที่สุด คือ  $15.90 \pm 0.19$  MJ/kg สำหรับตอซัง และ  $16.14 \pm 0.19$  MJ/kg

ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มอัตราส่วนการผสมผสานวัสดุเสริมทั้งสองชนิดส่งผลต่อการปรับปรุงคุณสมบัติทางพลังงานในรูปของค่าความร้อนสูงของวัสดุอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (Table 3, Figure 3,4)

การศึกษาได้พิจารณารูปแบบการผสมผสานวัสดุเสริมพร้อมกันทั้งสองชนิด (CL+CR) โดยผลการศึกษาแสดงอิทธิพลของการเพิ่มวัสดุเสริมทั้งสองรูปแบบที่มีแนวโน้ม

เช่นเดียวกัน แต่พบว่าค่าความร้อนสูงของทั้งส่วนผสมตอซัง (RB) และฟางข้าว (RW) มีค่าสูงกว่าการเพิ่มไบโอมันสำปะหลัง และเหง้ามันสำปะหลังเพียงอย่างเดียว โดยการใช่วัสดุเสริมทั้งสองชนิด (CL+CR) ผสมผสานกับทั้งตอซังและฟางข้าว

ในอัตราส่วน 50:50 สามารถเพิ่มค่าความร้อนสูงของวัสดุได้ถึง 13.94% และ 13.49% ตามลำดับ และมีค่าความร้อนสูงสุด  $16.18 \pm 0.25$  MJ/kg และ  $16.24 \pm 0.25$  MJ/kg ตามลำดับ (Table 3, Figure 3, 4)

**Table 3** Results of proximate analysis and calorimetry of blended samples of supplement material.

Blended samples ratio (wt%)				Proximate analysis (%)				Calorimetry
RB	RW	CL	CR	MC	VM	Ash	FC	HHV (MJ/Kg)
90	-	10	-	10.02±0.46	65.05±0.27	11.25±0.48	13.69±0.63	14.86±0.14
80	-	20	-	9.89±0.25	65.17±0.50	11.15±0.29	13.79±0.81	15.10±0.11
70	-	30	-	9.73±0.38	65.24±0.17	10.99±0.17	14.04±0.55	15.38±0.05
60	-	40	-	9.58±0.34	65.52±0.27	10.60±0.65	14.30±0.70	15.94±0.21
50	-	50	-	9.47±0.18	65.70±0.17	10.02±0.26	14.81±0.09	16.11±0.22
90	-	-	10	9.79±0.14	64.00±0.48	12.04±0.50	14.17±0.12	14.72±0.16
80	-	-	20	9.74±0.02	66.96±0.60	10.49±0.25	12.80±0.38	14.96±0.16
70	-	-	30	9.71±0.07	67.18±0.68	9.15±0.11	13.96±0.57	15.12±0.22
60	-	-	40	9.69±0.13	68.15±0.42	8.71±0.17	13.45±0.59	15.49±0.37
50	-	-	50	9.68±0.07	68.71±0.29	7.69±0.19	13.93±0.27	15.90±0.19
-	90	10	-	8.90±0.16	65.04±0.37	10.98±0.28	15.08±0.25	15.02±0.19
-	80	20	-	8.88±0.10	65.26±0.77	10.36±0.16	15.50±0.78	15.27±0.23
-	70	30	-	8.75±0.09	65.61±0.40	9.61±0.22	16.02±0.36	15.70±0.25
-	60	40	-	8.63±0.23	66.48±0.45	8.99±0.52	15.90±0.38	15.90±0.23
-	50	50	-	8.51±0.08	67.72±0.23	8.47±0.24	15.30±0.09	16.25±0.20
-	90	-	10	10.13±0.20	64.19±0.31	10.28±0.15	15.39±0.29	14.78±0.15
-	80	-	20	9.92±0.21	65.45±0.50	9.40±0.11	15.23±0.30	15.15±0.18
-	70	-	30	9.86±0.04	65.75±0.31	9.08±0.07	15.31±0.38	15.28±0.25
-	60	-	40	9.74±0.36	66.67±0.53	8.78±0.93	14.81±0.62	15.63±0.34
-	50	-	50	9.45±0.38	67.63±0.22	7.52±0.13	15.40±0.46	16.14±0.19
90	-	10		10.34±0.39	62.53±0.46	12.53±0.51	14.60±0.16	15.02±0.23
80	-	20		10.23±0.33	63.96±0.40	11.44±0.61	14.37±0.16	15.12±0.17
70	-	30		10.20±0.11	64.12±0.37	10.55±0.39	15.14±0.08	15.40±0.31
60	-	40		10.12±0.02	64.63±0.19	9.82±0.15	15.43±0.32	15.65±0.17
50	-	50		9.81±0.12	65.92±0.29	9.28±0.49	15.00±0.58	16.18±0.25
-	90	10		9.40±0.17	64.52±0.82	11.12±0.27	14.97±0.69	15.13±0.22
-	80	20		9.17±0.09	65.23±0.39	10.24±0.34	15.37±0.14	15.22±0.31
-	70	30		9.14±0.04	66.02±0.33	9.39±0.15	15.46±0.33	15.49±0.20
-	60	40		9.12±0.09	66.21±0.33	9.23±0.18	15.44±0.37	15.77±0.31
-	50	50		9.08±0.04	67.55±0.64	8.61±0.32	14.76±0.44	16.24±0.25

Note. MC: Moisture Content; VM: Volatile Matter; Ash: Ash content; FC: Fixed Carbon; HHV: High Heating Value.

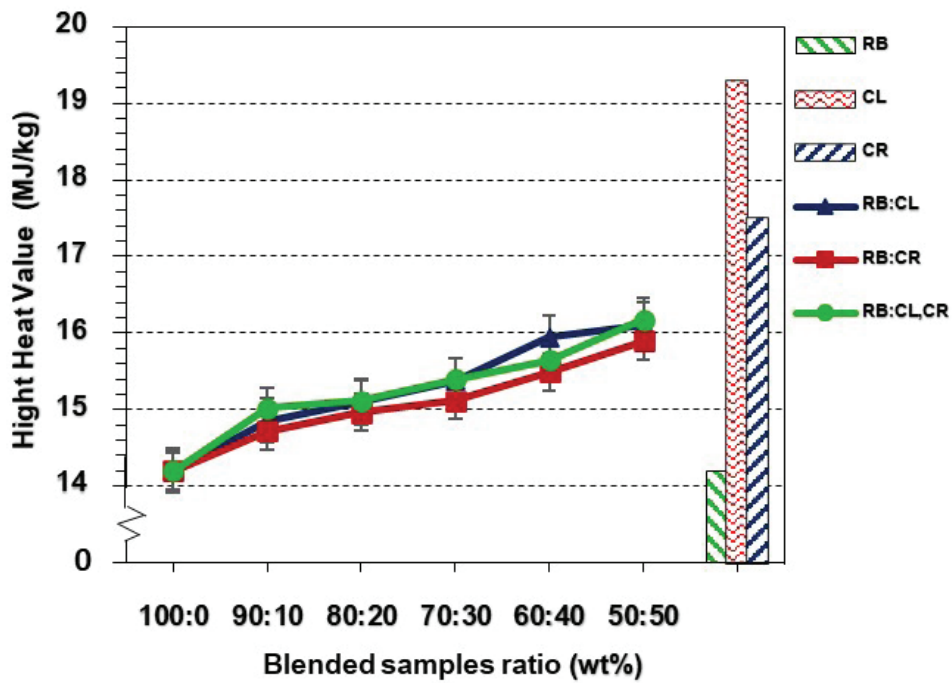


Figure 3 Heat values of rice stubble (RB) blended with supplement materials

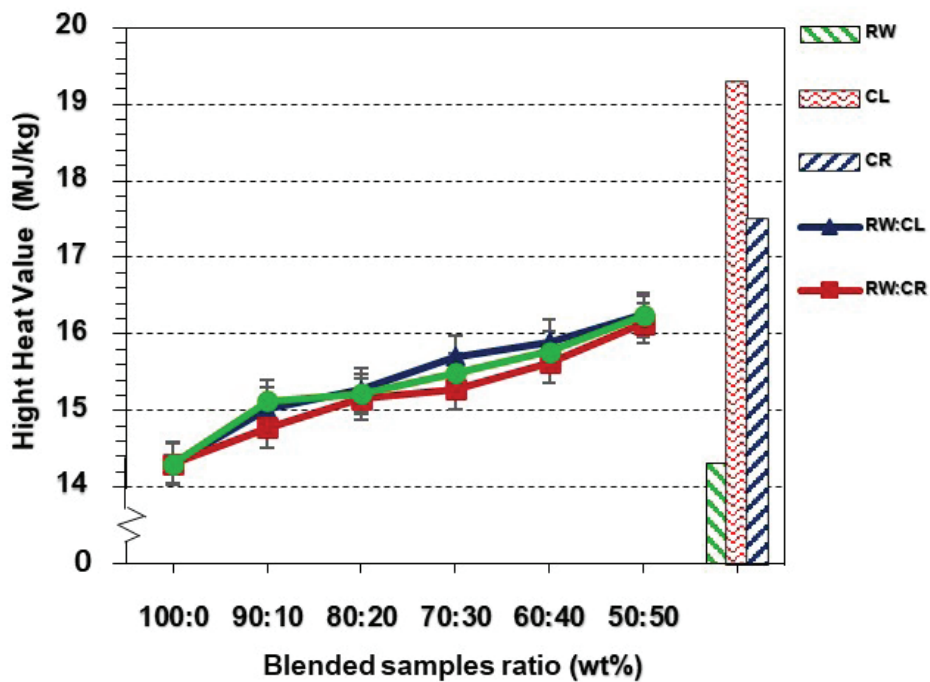


Figure 4 Heat values of rice straw (RW) blended with supplement materials

**สรุปผลการศึกษา**

จากการศึกษาวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรทั้ง 5 ประเภท ไบโอมันสำปะหลัง เหง้ามันสำปะหลัง และใบอ้อย เป็นกลุ่มวัสดุที่มีองค์ประกอบส่งผลให้ค่าความร้อนที่สูง ในขณะที่ตอซังข้าว และฟางข้าว เป็นวัสดุที่มีศักยภาพทางด้าน ปริมาณตลอดทั้งปีแต่มีค่าความร้อนที่ต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน

อย่างไรก็ตามการนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่มีค่า ความร้อนสูงกว่ามาผสมผสานสามารถปรับปรุงคุณสมบัติ ทางด้านพลังงานของวัสดุได้ ผลจากการศึกษาแสดงให้เห็น ว่าการเพิ่มสัดส่วนของ ไบโอมันสำปะหลัง เหง้ามันสำปะหลัง และใบอ้อย ส่งผลทำให้ค่าความร้อนของวัสดุมีแนวโน้ม เพิ่มขึ้น ทำให้ทุกชุดการทดลองจากการผสมผสานวัสดุ



เหลือทิ้งทางการเกษตรให้ค่าความร้อนที่สูงกว่าเกณฑ์มาตรฐาน ผลลัพธ์สุดท้ายคือการนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่มีคุณสมบัติทางด้านพลังงานสูงสามารถนำไปผสมผสานกับวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่มีคุณสมบัติทางด้านพลังงานต่ำแต่มีศักยภาพด้านปริมาณที่สูง แนวทางนี้จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพทางด้านพลังงานให้กับวัสดุ ลดปัญหาการขาดแคลนจากการใช้งานวัสดุประเภทเดียวกัน ลดค่าใช้จ่ายในการจัดการเก็บ และสามารถเป็นประโยชน์กับชุมชนในการประยุกต์รูปแบบการผสมผสานและอัตราส่วนต่างๆ ไปใช้เพื่อเป็นแหล่งผลิตเชื้อเพลิงพลังงานทดแทน

แต่อย่างไรก็ตาม เนื่องจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมีความหนาแน่นทางพลังงานต่ำจึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงคุณสมบัติให้พร้อมใช้งาน โดยการเพิ่มความหนาแน่นทางพลังงาน ผลจากการศึกษานี้จะนำไปสู่การวิจัยในขั้นต่อไปกับการผลิตเชื้อเพลิงพลังงานทดแทนจากการผสมผสานชีวมวลโดยใช้กระบวนการอัดแข็งเชื้อเพลิงชีวมวล (Densification) เพื่อเป็นเชื้อเพลิงสำหรับโรงไฟฟ้าชีวมวล และการประเมินความคุ้มค่าในทางเศรษฐศาสตร์ในการนำเชื้อเพลิงมาใช้ในเชิงพาณิชย์

### กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการทำกิจกรรมส่งเสริมและสนับสนุนการวิจัยและนวัตกรรมจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และทุนสนับสนุนการดำเนินการวิจัยจากศูนย์สหวิทยาการการวิจัยเพื่อความยั่งยืนทางสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

### เอกสารอ้างอิง

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2564). ฐานข้อมูลศักยภาพชีวมวลในประเทศไทย ประจำปีเพาะปลูก พ.ศ.2556. สืบค้นจาก URL: <http://webkc.dede.go.th/testmax/nod e/2450>. 1 กุมภาพันธ์.

กระทรวงอุตสาหกรรม. (2565). *มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเชื้อเพลิงชีวมวลแข็งอัดเม็ด (มอก. 2772-2560)*. สืบค้นจาก URL: [https://www.tisi.go.th/website/standardlist/tis\\_5](https://www.tisi.go.th/website/standardlist/tis_5). 15 มกราคม.

ปีนมนัส วิโสรัมย์. (2563). *การปรับปรุงประสิทธิภาพทางพลังงานของเชื้อเพลิงจากหญ้าหลายฤดู*. วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต. สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม. มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.

วิจิตรา สิงห์หิรัญนุสรณ์, ปีนมนัส วิโสรัมย์ และเพชรรัตน์ บุญร่วม. (2560). การกระจายเชิงพื้นที่ของเชื้อเพลิงชีวมวลรุ่นที่สองและศักยภาพในการใช้ผลิตพลังงานทดแทน: กรณีศึกษาชีวมวลจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรภายในจังหวัดมหาสารคาม. *การประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยมหาสารคามวิจัย ครั้งที่ 14*, มหาวิทยาลัยมหาสารคาม: 266-277

Anukam, A. I., Mamphweli, S. N., Mabizela, P. S., and Meyer, E. L. (2016). Blending Influence on the Conversion Efficiency of the Cogasification Process of Corn Stover and Coal. *Journal of Chemistry*, 2016, 1-8.

Daiglou, V., Stehfest, E., Wicke, B., Faaij, A., and van Vuuren, D. P. (2016). Projections of the availability and cost of residues from agriculture and forestry. *GCB Bioenergy*, 8(2), 456-470.

Domingos, I., Ayata, U., Ferreira, J., Cruz-Lopes, L., Sen, A., Sahin, S. and Esteves, B. (2020). Calorific Power Improvement of Wood by Heat Treatment and Its Relation to Chemical Composition. *Energies* 13(20).

Konrad Kaczynski, K. K., and Piotr, P. (2019). Characteristics of agro and wood biomass combustion in the stream of inert material. E3S Web of Conferences, 137, 01031. *local firing systems in Brazil. Biomass and Bioenergy*, 123, 70-77.

Maksimuk, Y., Antonava, Z., Krouk, V., Korsakova A. and Kursevich, V. (2021). Prediction of higher heating value (HHV) based on the structural composition for biomass. *Fuel* 299.

Mendoza Martinez, C. L., Sermyagina, E., de Cassia Oliveira Carneiro, A., Vakkilainen, E., and Cardoso, M. (2019). Production and characterization of coffee-pine wood residue briquettes as an alternative fuel for local firing systems in Brazil. *Biomass and Bioenergy*, 123, 70-77

Ray, A. E., Li, C., Thompson, V. S., Daubaras, D. L., Nagle, N., and Hartley, D. S. (2017). *Biomass Blending and Densification: Impacts on Feedstock Supply and Biochemical Conversion Performance*. The INL is a U.S. Department of Energy National Laboratory.

Sasongko, D., Wulandari, W., Rubani, I. S., and Rusydiansyah, R. (2017). *Effects of biomass type, blend composition, and co-pyrolysis temperature on hybrid coal quality*. 1805: 040009.

Tumuluru, J. S., Wright, C. T., Hess, J. R., and Kenney, K. L. (2011). A review of biomass densification systems to develop uniform feedstock commodities for bioenergy application. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 5(6), 683-707.

# การศึกษาคาบการโคจรและรัศมีของดาวเคราะห์นอกระบบสุริยะ WASP-10b

## Study on the Orbital Period and Radius of WASP-10b Exoplanet

ทิตลา พรแสน<sup>1\*</sup>, สุมินทร์ญา เจือเงิน<sup>1</sup>, พัฒนพงษ์ จำรัสประเสริฐ<sup>1</sup>, ธนวัฒน์ รังสูงเนิน<sup>1</sup>  
และ สมานชาญ จันทร์เอี่ยม<sup>2</sup>

Titala Pornsan<sup>1\*</sup>, Suminya Chueangoen<sup>1</sup>, Patthanapong Jumrusprasert<sup>1</sup>,  
Thanawat Rangsunoen<sup>1</sup> and Smanchan Chandaiam<sup>2</sup>

**Received:** 9 September 2022 ; **Revised:** 14 November 2022 ; **Accepted:** 14 December 2022

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคาบการโคจรและรัศมีของดาวเคราะห์นอกระบบสุริยะ WASP-10b โดยใช้วิธีทรานซิทและวิเคราะห์ข้อมูล ด้วยการใช้เทคนิคโฟโตเมตรี ผู้วิจัยได้ทำการเก็บข้อมูลภาพถ่ายโดยใช้กล้องโทรทรรศน์สะท้อนแสง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.7 เมตร ทำการบันทึกภาพถ่ายผ่านแผ่นกรองแสงความยาวคลื่นสีที่ตามองเห็น (V) ณ หอดูดาวเฉลิมพระเกียรติ 7 รอบ พระชนมพรรษา นครราชสีมา โดยเก็บข้อมูลในวันที่ 16 พฤศจิกายน พ.ศ. 2563 ระหว่างเวลา 20.00 น. ถึง วันที่ 17 พฤศจิกายน พ.ศ. 2565 เวลา 00.00 น. และนำข้อมูลมาวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรม AstrolmageJ จากการวิเคราะห์กราฟแสงของดาวเคราะห์นอกระบบสุริยะ WASP-10b เพื่อหาคาบการโคจรและรัศมี พบว่าดาวเคราะห์นอกระบบสุริยะ WASP-10b มีคาบการโคจร 2.925 วัน และมีรัศมี 1.41 เท่าของรัศมีดาวพฤหัสบดี เมื่อเปรียบเทียบกับค่าจากพารามิเตอร์ที่ได้จากโปรแกรม AstrolmageJ พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับการคำนวณของผู้วิจัยและผลการวิจัยของ Yves Jongen ที่ศึกษาดาวเคราะห์นอกระบบสุริยะ WASP-10b ในระยะเวลาที่ใกล้เคียงกัน

**คำสำคัญ:** ดาวเคราะห์นอกระบบสุริยะ ทรานซิท รัศมี คาบการโคจร

### Abstract

The purpose of this research was to determine orbital period and radius of the WASP-10b exoplanet by using photometry method and Analyze the data via AstroimageJ program. Visible(V) – filter was attached to the 0.7 meter reflecting telescope at Regional Observatory for the Public, Nakhon Ratchasima. Data were collected on from 08.00 pm on 16<sup>th</sup> November , 2020 to 00.00 pm on 17<sup>th</sup> November , 2020. From the analyzed light curves, the orbital period of WASP-10b exoplanet was 2.925 days and the radius was 1.41 Jupiter radius ( $R_{jup}$ ). The results of this research are with the former researcher works.

**Keywords:** Exoplanet, Transit, Radius, Orbital period

<sup>1</sup> ภาควิชาฟิสิกส์และวิทยาศาสตร์ทั่วไป คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา

<sup>2</sup> หอดูดาวเฉลิมพระเกียรติ 7 รอบพระชนมพรรษา นครราชสีมา

<sup>1</sup> Physics and General Science Department Faculty of Science and Technology Nakhonratchasima Rajabhat University

<sup>2</sup> National Astronomical Research Institute of Thailand, Ministry of Higher Education, Science, Research and Innovation

\* Corresponding author Titala Pornsan E-mail: Titalapornsan@gmail.com

## บทนำ

ดาราศาสตร์เป็นวิทยาศาสตร์แขนงหนึ่ง ที่เข้ามามีประโยชน์ในชีวิตประจำวันของมนุษย์มากขึ้น จึงทำให้เป็นที่สนใจในกลุ่มนักดาราศาสตร์ (กฤตพล ทองจรัส, ออนไลน์, 2563) ปัจจุบันดาวเคราะห์นอกระบบสุริยะเป็นวัตถุท้องฟ้าที่นักดาราศาสตร์ให้ความสนใจและศึกษาค้นคว้าเพื่อให้ได้องค์ความรู้ใหม่ ซึ่งข้อมูลที่ได้รับจะเป็นฐานข้อมูลในการศึกษาวิเคราะห์อย่างต่อเนืองในอนาคต

ดาวเคราะห์นอกระบบสุริยะ WASP-10b เป็นดาวเคราะห์นอกระบบสุริยะที่ค้นพบในปี ค.ศ. 2008 ด้วยกล้องโทรทรรศน์ Super WASP ในโครงการ Wide Angle Search for Planets (WASP) ด้วยวิธีทรานซิท จัดเป็นดาวเคราะห์นอกระบบสุริยะประเภทดาวพฤหัสบดีร้อน WASP-10b มีมวลประมาณ 3 เท่าของดาวพฤหัสบดี (Christian *et al.*, 2008) และรัศมีประมาณ 1.08 เท่าของรัศมีดาวพฤหัสบดี (Johnson *et al.*, 2009) WASP-10b เป็นดาวเคราะห์นอกระบบสุริยะที่มีคาบการโคจร 3.092727 วัน มีตำแหน่งอยู่ที่ไรต์แอสเซนชัน 23 ชั่วโมง 15 นาที 58.23 วินาที ค่าเดคลิเนชัน +31 องศา 27 ลิปดา 47.1 ฟลิปดา ค่าโชติมาตรปรากฏ 12.7 ค่าความลึกของกราฟแสงที่แสดงแสงที่ลดลง 0.0394 จากค่าแสงปกติ (Christian *et al.*, 2008)

การวิจัยครั้งนี้มุ่งศึกษาการเปลี่ยนแปลงคาบการโคจรและรัศมีของดาวเคราะห์นอกระบบสุริยะ WASP-10b เพื่อเป็นข้อมูลเพิ่มเติมและเป็นประโยชน์ในทางดาราศาสตร์ โดยเก็บข้อมูลจากการสังเกตการณ์ ณ หอดูดาวเฉลิมพระเกียรติ 7 รอบ พระชนมพรรษา นครราชสีมา โดยใช้วิธีทรานซิทและวิเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตเมตรี

## วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อบ่งบอกคาบการโคจรและรัศมีของดาวเคราะห์นอกระบบสุริยะ WASP-10b

## วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาดาวเคราะห์นอกระบบสุริยะ โดยทำการสังเกตวัตถุที่สนใจและวิเคราะห์ข้อมูลที่ต้องการจึงจำเป็นต้องมีเครื่องมือที่ใช้ ดังนี้

1) กล้องโทรทรรศน์และซีซีดีโฟโตมิเตอร์ กล้องโทรทรรศน์ที่ใช้ในการสังเกตการณ์ในครั้งนี้ คือ กล้องโทรทรรศน์สะท้อนแสง Corrected Dall - Kirkham Astrograph Telescope ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.7 เมตร ติดตั้งบนฐานแบบอิวเควตอเรียล สามารถควบคุมการทำงานได้จากคอมพิวเตอร์และการควบคุมผ่านระบบเครือข่ายอินเทอร์เน็ต

2) ETD - Exoplanet Transit Database เป็นฐานข้อมูลแสดงช่วงเวลาทรานซิทของดาวเคราะห์นอกระบบสุริยะ WASP-10b

3) โปรแกรม Maxim DL เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการบันทึกข้อมูลภาพถ่ายของวัตถุที่สนใจและเป็นโปรแกรมที่เชื่อมต่อกับกล้องซีซีดีโฟโตมิเตอร์

4) โปรแกรม AstrolmageJ เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการลบสัญญาณรบกวนจากภาพถ่ายทางดาราศาสตร์ และสามารถนำภาพถ่ายมาวิเคราะห์เพื่อให้ได้กราฟแสงและค่าพารามิเตอร์

## ขั้นตอนการเก็บรวบรวมข้อมูล

การหาคาบการโคจรและรัศมีของดาวเคราะห์นอกระบบสุริยะมีขั้นตอนการดำเนินงาน ดังนี้

1) ผู้วิจัยให้เลือกดาวเคราะห์นอกระบบสุริยะ WASP-10b จากฐานข้อมูล ETD - Exoplanet Transit Database (Exoplanet Transit Database, online, 2020) ซึ่งการเลือกดาวที่สนใจนั้นมีเกณฑ์ในการเลือกดังนี้

- เลือกดาวเคราะห์ที่มีคาบการโคจรในช่วง 1-5 วัน
- เลือกดาวเคราะห์ที่มีค่าโชติมาตรปรากฏตั้งแต่ 8-13
- เลือกดาวเคราะห์ที่มีค่าความลึกของกราฟแสง 0.020 ขึ้นไป
- เลือกดาวเคราะห์ที่สังเกตได้บนท้องฟ้าในช่วงเดือนกันยายนถึงเดือนธันวาคม

2) เลือกดาวเคราะห์นอกระบบสุริยะที่เกิดจากการตรวจหาโดยใช้วิธีทรานซิท

งานวิจัยนี้เลือกศึกษาดาวเคราะห์นอกระบบสุริยะ WASP-10b มีคาบการโคจร 3.092727 วัน มีพิกัดตำแหน่งไรต์แอสเซนชัน 23 ชั่วโมง 15 นาที 58.23 วินาที ค่าเดคลิเนชัน +31 องศา 27 ลิปดา 47.1 ฟลิปดา ค่าโชติมาตรปรากฏ 12.7 ค่าความลึกของกราฟแสงที่ลดลง 0.0394 จากค่าแสงปกติ โดยศึกษาเวลาทรานซิทของดาวเคราะห์นอกระบบสุริยะ WASP-10b จากฐานข้อมูล ETD - Exoplanet Transit Database และทำการสังเกตดาวโดยปรับกล้องโทรทรรศน์หันหน้าไปตำแหน่งของดาวเคราะห์นอกระบบสุริยะ WASP-10b ผ่านโปรแกรม TheSky X ตั้งค่าเวลาในการถ่ายภาพแผ่นกรองแสงในช่วงความยาวคลื่นสีที่ตามองเห็น (V) โดยจะเริ่มถ่าย 1 ชั่วโมงก่อนดาวเริ่มทรานซิทและเมื่อดาวเคราะห์นอกระบบสุริยะ WASP-10b ผ่านช่วงทรานซิทไปแล้ว จะทำการถ่ายต่อไปอีก 1 ชั่วโมงเพื่อจะได้นำมาวิเคราะห์ข้อมูลภาพถ่ายให้ได้กราฟแสงที่สมบูรณ์ยิ่งขึ้น



หลังจากถ่ายภาพเป็นที่เรียบร้อยแล้ว จะทำการถ่ายภาพ Dark, Bias และ Flat แสงผ่านแผ่นกรองแสงในช่วงความยาวคลื่นสีที่ตามองเห็น (V) อีกครั้ง อย่างละ 10 ภาพ

นำภาพถ่ายที่ได้มาประมวลผลข้อมูลเพื่อหา Transit light curve โดยมีขั้นตอน ดังนี้

1) การลบสัญญาณรบกวน (Calibration process) เป็นวิธีการนำภาพถ่ายที่ได้มาลบสัญญาณรบกวนด้วยโปรแกรม AstrolImageJ ใช้ในกรณีที่ไมผ่านการกำจัดสัญญาณรบกวนด้วยโปรแกรมอื่น

2) การวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้ วิธีการโฟโตเมตรีด้วยโปรแกรม AstrolImageJ โดยการดึงไฟล์ภาพที่ลบสัญญาณรบกวนไว้แล้วมาวิเคราะห์

การหาคาบการโคจรของดาวเคราะห์นอกระบบสุริยะ สามารถดำเนินการโดยเริ่มจาก Figure 1 ทรานซิทของดาวเคราะห์นอกระบบสุริยะในรูปของกราฟ จะเห็นได้ว่าสามารถหาระยะเวลาการเคลื่อนผ่านดาวฤกษ์ได้ ดังสมการที่ 1 (ศวัสกมล ปัจดี, 2563)

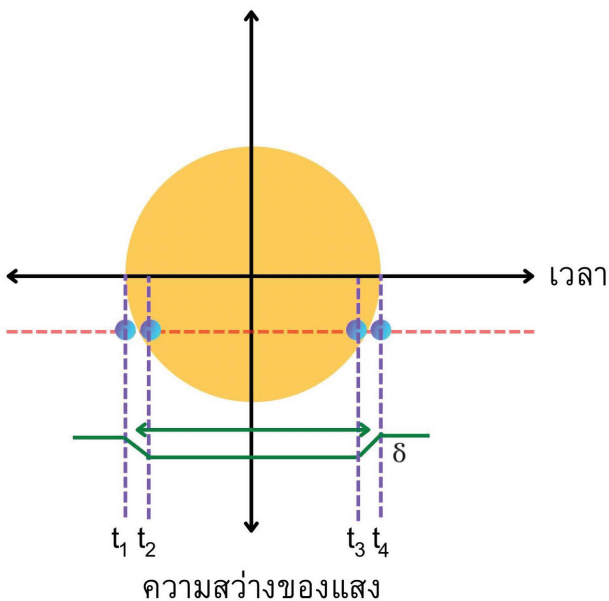


Figure 1 Transits of planets outside the solar system

$$t = t_4 - t_1 \tag{1}$$

เมื่อ

t คือ ระยะเวลากการเคลื่อนผ่าน หน่วย วินาที (s)

t<sub>1</sub> คือ ตำแหน่งแรกที่ดาวเริ่มเคลื่อนผ่าน หน่วย วินาที

(s)

t<sub>4</sub> คือ ตำแหน่งสุดท้ายที่ดาวเคลื่อนผ่าน หน่วย วินาที

(s)

เมื่อได้ค่าระยะเวลาการเคลื่อนผ่าน จะสามารถนำไปหาคาบการโคจรของดาวเคราะห์นอกระบบสุริยะได้ดังสมการที่ 2 (ศวัสกมล ปัจดี, 2563)

$$t = \frac{R_* \cdot P_p}{a \cdot \pi} \tag{1}$$

เมื่อ

t คือ ระยะเวลาของการเคลื่อนผ่าน หน่วย วินาที (s)

R<sub>\*</sub> คือ รัศมีของดาวฤกษ์ดวงแม่ หน่วย กิโลเมตร (km)

P<sub>p</sub> คือ คาบการโคจรของดาวเคราะห์ หน่วย วินาที (s)

a คือ ระยะห่างของดาวถึงกึ่งแกนหลักหน่วย กิโลเมตร (km)

การหารัศมีของดาวเคราะห์นอกระบบสุริยะ

การคำนวณหารัศมีของดาวเคราะห์นอกระบบสุริยะ เราสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3 (ศวัสกมล ปัจดี, 2563)

$$\delta = \left( \frac{R_p}{R_*} \right)^2 \tag{2}$$

เมื่อ

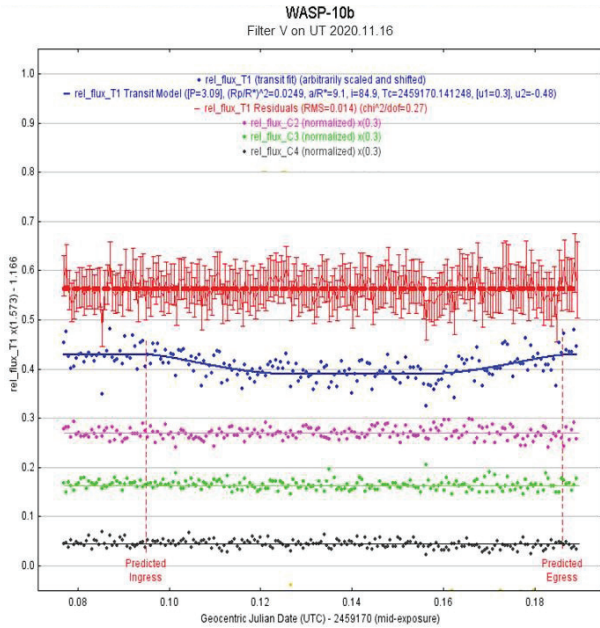
δ คือ ค่าสเกลความลึกของหลุมจากกราฟแสง หน่วย วัตต์ต่อตารางเมตร (W/m<sup>2</sup>)

R<sub>p</sub> คือ รัศมีของดาวเคราะห์ที่โคจรรอบดาวแม่ หน่วย กิโลเมตร (km)

R<sub>\*</sub> คือ รัศมีของดาวฤกษ์ดวงแม่ หน่วย กิโลเมตร (km)

### ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

คณะผู้วิจัยได้ทำการเริ่มเก็บข้อมูลภาพถ่ายดาวเคราะห์นอกระบบสุริยะ WASP-10b ในวันที่ 16 พฤศจิกายน พ.ศ. 2563 ตั้งแต่เวลา 20:19 น. วันที่ 17 พฤศจิกายน พ.ศ. 2563 เวลา 00:27 น. จากนั้นทำการลบสัญญาณรบกวน ด้วยโปรแกรม AstrolImageJ และนำภาพที่ได้มาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโฟโตเมตรี ซึ่งจะทำให้ได้กราฟแสงเทียบกับดาวอ้างอิง (Transit light curve) โดยกราฟแสงแสดงข้อมูล แสดงดัง Figure 2



**Figure 2** Light curve of exoplanet WASP-10b as of November 16, 2020 through the optical filter in the visible light wavelength (V) relative to the reference star.

แกน X แสดงเวลาแบบ JD และแกน Y แสดงความเข้มแสงในหน่วยวัตต์ต่อตารางเมตร ใช้ค่าที่แสดงบนแกน X และแกน Y มาวิเคราะห์หาคาบการโคจรและรัศมีของดาวเคราะห์นอกระบบสุริยะ WASP-10b กราฟสีแดงแสดงความคลาดเคลื่อนแสงในแต่ละภาพถ่ายของดาว WASP-10b กราฟสีน้ำเงิน แสดงผลของความเข้มแสงของดาว WASP-10b โดยโปรแกรม AstrolmageJ ซึ่งมีรายละเอียด ดังนี้

1) ความกว้างของกราฟ แสดงถึงระยะเวลาทรานซิท ตั้งแต่ดาวเคราะห์ WASP-10b ยังไม่เริ่มบดบังดาวฤกษ์ดวงแม่ (เส้นปะแรก) จนเริ่มเคลื่อนเข้าไปบดบังดาวฤกษ์ดวงแม่และเคลื่อนออกจากการบดบังดาวฤกษ์ดวงแม่ (เส้นปะที่ 2) ซึ่งระยะเวลาของทรานซิทจะนำไปคำนวณหาคาบการโคจร

2) ความลึกของกราฟ แสดงถึงความเข้มแสงของดาวฤกษ์ดวงแม่ที่ลดลงหรือค่าความลึกของกราฟแสง โดยค่าความลึกของกราฟแสงนำไปคำนวณหารัศมี

กราฟสีชมพูกราฟสีเขียวและกราฟสีดำ แสดงความเข้มแสงของดาวอ้างอิง

เส้นประสีแดง แสดงถึงขอบเขตเวลาตั้งแต่เริ่มทรานซิทจนถึงสิ้นสุดทรานซิท ความกว้างของทรานซิทจะนำมาหาเวลาทรานซิทของดาวเคราะห์นอกระบบสุริยะ WASP-10b และนำเวลาทรานซิทไปคำนวณหาคาบการโคจรต่อไป

การคำนวณหาคาบการโคจรและรัศมีของดาวเคราะห์นอกระบบสุริยะ WASP-10b

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคาบการโคจรและรัศมีของดาวเคราะห์นอกระบบสุริยะ WASP-10b ดังนั้น ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากกราฟ จะสนใจเพียงคาบการโคจรและรัศมี โดยค่าพารามิเตอร์แสดงค่ารัศมี มีค่าเท่ากับ 1.41 เท่าของรัศมีดาวพฤหัสบดี ดัง Figure 3 ค่าพารามิเตอร์กราฟแสงของดาวเคราะห์นอกระบบสุริยะ WASP-10b (ข) แสดงรัศมี WASP-10b

ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้คำนวณหาคาบการโคจรจากระยะเวลาทรานซิทที่แสดงในกราฟพารามิเตอร์ดัง Figure 3 ค่าพารามิเตอร์กราฟแสงของดาวเคราะห์นอกระบบสุริยะ WASP-10b (ก) แสดงระยะเวลาการทรานซิท เท่ากับ 0.091396 วัน หรือ 7,896.6144 วินาที และหาคาบการโคจรจากสมการ

$$t = \frac{R_* \cdot P_p}{a \cdot \pi}$$

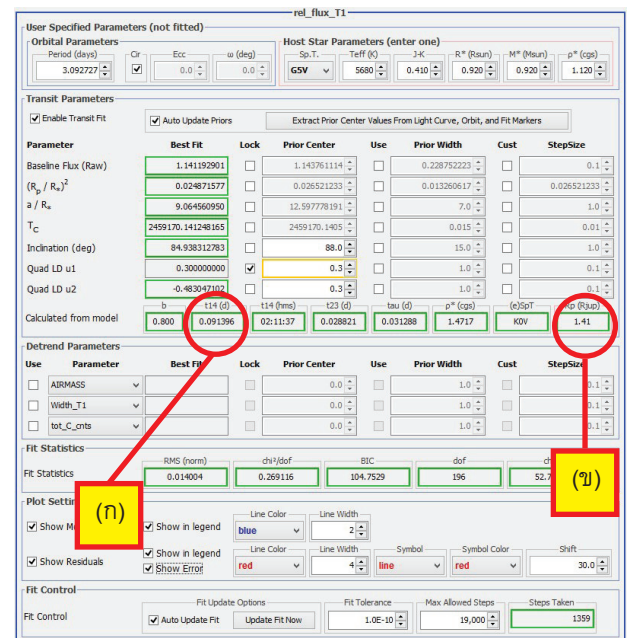
และ

$$P_p = \frac{a \cdot t \cdot \pi}{R_*}$$

$$P_p = 252,758.8445 \text{ วินาที}$$

หรือ

$$P_p = 2.925 \text{ วัน}$$



**Figure 3** Optical graph parameters of the exoplanet WASP-10b (a) show the transit period (b) show the WASP-10b radius.

ในการคำนวณหาคาบการโคจรของดาวเคราะห์นอกระบบสุริยะจะใช้เวลาเริ่มต้นถึงเวลาสิ้นสุดของทรานซิท

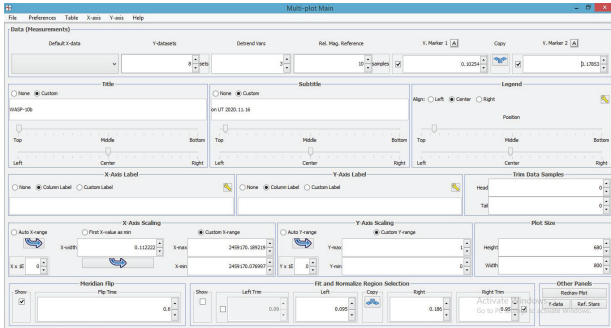


Figure 4 The value of the start to end time of the transition.

เวลาทรานซิทหาได้จากสมการที่ (1) จะได้ว่า

$$t = t_4 - t_1$$

$$t = 2459170.18853 - 2459170.09254 \text{ GJD}$$

นำค่าจากตารางแปลงจากหน่วย JD เป็นเวลาสากลจะได้ว่า

$$t = 16 \text{ hr} : 31 \text{ m} : 28.99 \text{ s} - 14 \text{ hr} : 13 \text{ m} : 15.46 \text{ s}$$

เปลี่ยนเวลาให้เป็นวินาที

$$t = 8,293.53 \text{ วินาที}$$

$$\text{หรือ } t = 138.226 \text{ นาที}$$

หาคาบการโคจรจากสมการที่ (2) จะได้ว่า

$$P_p = \frac{a \cdot t \cdot \pi}{R_p}$$

$$P_p = \frac{(0.0371 \times 149,597,871) \times 8293.53 \times \pi}{0.783 \times 695,700}$$

$$P_p = 265,463.5206 \text{ วินาที}$$

$$\text{หรือ } 3.072 \text{ วัน}$$

ในการคำนวณหาค่ารัศมีของดาวเคราะห์นอกระบบสุริยะ จะพิจารณาความเข้มแสงของดาวฤกษ์ที่ลดลงหรือความลึกของกราฟ โดยที่ แกน X แสดงเวลาแบบ JD และแกน Y แสดงความเข้มแสงในหน่วยวัตต์ต่อตารางเมตร ดัง Figure 5

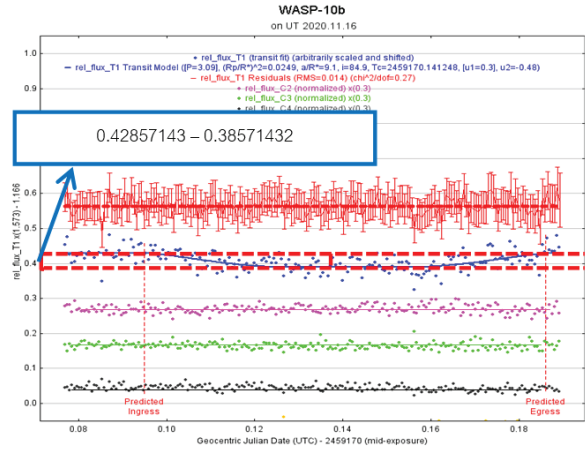


Figure 5 Optical depth graph of exoplanet WASP-10b.

หารัศมีจากสมการที่ (3) จะได้ว่า

$$\delta = \left( \frac{R_p}{R_*} \right)^2$$

$$R_p^2 = \delta \cdot R_*^2$$

หา  $\delta$  จากกราฟ ได้ดังนี้

$$\delta = 0.42857143 - 0.38571432$$

$$= 0.04285711$$

แทนค่า

$$R_p^2 = 0.04285711 \times (0.783 \times 695,700)^2$$

$$R_p = 112,770.4222 \text{ กิโลเมตร}$$

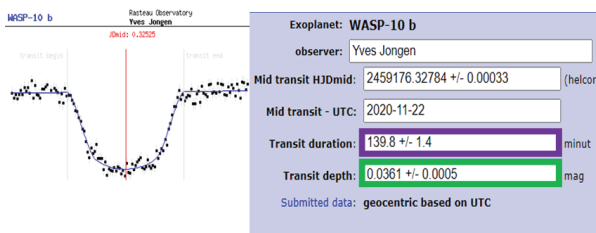
$$R_p/R_j = 112,770.4222 \div 71,492 \text{ กิโลเมตร}$$

$$R_p = 1.577 \text{ เท่าของรัศมีดาวพฤหัสบดี}$$

จากการคำนวณหาคาบการโคจรของดาวเคราะห์นอกระบบสุริยะ WASP-10b ผู้วิจัยได้คาบการโคจรจากกราฟเท่ากับ 3.072 วันและได้รัศมีจากการคำนวณเท่ากับ 1.577 เท่าของรัศมีดาวพฤหัสบดี

เปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่า การวิจัยของ Yves Jongen ที่เก็บข้อมูลภาพถ่ายของดาว WAS-10b ในวันที่ 22 เดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2563 ทราบค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง คือ ระยะเวลาในทรานซิทเท่ากับ 139.8 นาทีและค่าความลึกของกราฟแสงเท่ากับ 0.0361 ดัง Figure 6 โดย กรอบสี่เหลี่ยม แสดงเวลาทรานซิท กรอบสี่เหลี่ยม แสดงค่าความลึกของกราฟแสงเนื่องจากความเข้มแสงที่ลดลง Yves Jongen และคณะได้ระยะเวลาทรานซิท 139.8 นาทีและความลึกของกราฟแสงที่ 0.0361 เมื่อเทียบกับผลการวิจัยที่ได้ คือ เวลาทรานซิท 0.091396 วัน

หรือ 131.6 นาที ค่าความลึกของกราฟแสงเท่ากับ 0.042857 ดัง Figure 5



**Figure 6** The results of Yves Jongen's research. The purple frame shows the transition time. The green frame shows the depth of the light curve due to the light intensity decrease.

ที่มา: Exoplanet Transit Database, online, 2020

### สรุปผลการวิจัย

จากการวิเคราะห์ดาวเคราะห์นอกระบบสุริยะ WASP-10b พารามิเตอร์ ที่ได้จากโปรแกรม AstrolImageJ ทำให้ทราบคาบการโคจรและรัศมีของดาวเคราะห์นอกระบบสุริยะ WASP-10b พบว่ามีคาบการโคจร 252,758.8445 วินาที หรือ 2.925 วัน และมีค่ารัศมี 1.41 เท่าของรัศมีดาวพฤหัสบดี ซึ่งผลที่ได้ จากพารามิเตอร์มีค่าใกล้เคียงกับการคำนวณของผู้วิจัย โดยการคำนวณของผู้วิจัยมีคาบการโคจร 265,463.5206 วินาที หรือ 3.072 วันและมีค่ารัศมี 1.577 เท่าของรัศมีดาวพฤหัสบดี และใกล้เคียงกับผลการวิจัยของ Yves Jongen ที่ได้ทำการวิจัย ในระยะเวลาที่ใกล้เคียงกัน โดยข้อมูลจากพารามิเตอร์ที่ได้จากโปรแกรม AstrolImageJ ผู้วิจัยทราบระยะทรานซิท 131.6 นาทีและค่าความลึกของกราฟแสงเท่ากับ 0.0428 และ Yves Jongen ทราบระยะทรานซิท 139.8 นาทีและค่าความลึกของกราฟแสงเท่ากับ 0.0361 เมื่อเปรียบเทียบระยะทรานซิทมีค่าความแตกต่าง 6.23 เปอร์เซ็นต์ ค่าความลึกของกราฟแสงมีค่าความแตกต่าง 15 เปอร์เซ็นต์

ดังนั้น ค่าที่ได้จากพารามิเตอร์ที่ได้จากโปรแกรม AstrolImageJ จึงใกล้เคียงกับการคำนวณของผู้วิจัยและใกล้เคียงกับผลการวิจัยของผู้ที่วิจัยท่านอื่นในระยะเวลาที่สังเกตใกล้เคียงกัน

### กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสถาบันวิจัยดาราศาสตร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์และสถานที่สำหรับการดำเนินการวิจัย และขอขอบคุณ คณะกรรมการสอบโครงงานวิจัย ที่ช่วยแนะนำ และให้ความรู้เพิ่มเติมแก่ผู้วิจัยเป็นอย่างดี และขอขอบคุณบุคคลอื่นๆ ที่ไม่ได้เอ่ยชื่อนามไว้ ณ ที่นี้ ซึ่งมีส่วนเกี่ยวข้องในการวิจัยจนกระทั่งงานวิจัยเล่มนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

### เอกสารอ้างอิง

- ดาราศาสตร์. (2559). เนื้อหา ประวัติทางดาราศาสตร์. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://iceeicee27.wixsite.com/astronomy/blank-4>. (10 สิงหาคม 2563)
- ดาวฤกษ์.(ม.ป.ป.). ความส่องสว่าง. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: [https:// sites.google.com/a/samakhi.ac.th/dawvks/khwam-sxng-swang](https://sites.google.com/a/samakhi.ac.th/dawvks/khwam-sxng-swang). (10 สิงหาคม 2563)
- ศวัสกมล ปิจดี. (2558). การสังเกตการณ์ด้วยเทคนิคโฟโตเมตริกและการวิเคราะห์ดาวเคราะห์นอกระบบสุริยะแบบดาวยูเรนัสร้อน GJ3470 b ด้านวิธีผ่านหน้า. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- หอดูดาวสำหรับโรงเรียน. (2560). กล้องถ่ายภาพซีซีดี. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : <http://nso.narit.or.th/index.php/2017>. (10 สิงหาคม 2563)
- หอดูดาวสำหรับโรงเรียน. (2560). ดาวเคราะห์นอกระบบสุริยะ. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://nso.narit.or.th/index.php/2017>. (10 สิงหาคม 2563)
- หอดูดาวสำหรับโรงเรียน. (2560). แผ่นกรองแสง. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://nso.narit.or.th/index.php/2017>. (10 สิงหาคม 2563)
- หอดูดาวสำหรับโรงเรียน. (2060). การตรวจหาดาวเคราะห์นอกระบบสุริยะ. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://nso.narit.or.th/index.php/2017>. (10 สิงหาคม 2563 )
- AstrolImageJ ImageJ for Astronomy. (2017). louisville (Online). Available URL : <https://www.astro.louisville.edu/software/astrolImageJ/>. (15 August 2020)
- Astronomy Technology Today. ( 2017) Planwave Telescopes. (Online). Available URL : [https:// astronomytechnologytoday.com/](https://astronomytechnologytoday.com/) 2017. (15 August 2020)
- Christian.et.al (2008). WASP-10b: a  $3M_J$  gas-giant planet transiting a late-type K star. Journal, Queen's University. Volume 5 pages 1585-1590.
- ETD - Exoplanet Transit Database. Varia Star and Exoplanet Section (Online). Available URL : [http:// var.astro.cz/EN/tresca/transit\\_detail=1606131123](http://var.astro.cz/EN/tresca/transit_detail=1606131123). (10 March 2021)
- Exoplanets Exploration nasa. (2014). About Exoplanets. (Online). Available URL : <https://exoplanets.nasa.gov/what-is-an-exoplanet/about-exoplanets/>. (10 August 2020 )



Grauzhanina *et al.* (2017). Spectroscopic observations of the exoplanet WASP-32b transit. Article, *Astrophysical Bulletin*. Volume 72 pages 67–72.

Johnson *et al.* (2009). A smaller radius for the transiting exoplanet WASP-10b. *Journal, University of Hawaii*. Volume 692 pages L100-L104.

NARIT. (2562). หอดูดาวเฉลิมพระเกียรติ 7 รอบ พระชนมพรรษา นครราชสีมา. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : <http://www.narit.or.th/index.php/caas/87-observatory/2019>. (10 สิงหาคม 2563)

Quora. (2018). How does the transit method work in practice for exoplanet discovery. (Online). Available URL : <https://www.quora.com/How-does-the-transit-method-work-in-practice-for-exoplanet-discovery>. (15 August 2020)

Regulusastro. (1997). How-To Help keep this site up and running!. (Online). Available URL : <https://regulusastro.com/how-t>

## คำแนะนำสำหรับผู้พิมพ์

วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม กำหนดพิมพ์ปีละ 6 ฉบับ ฉบับที่ 1 (มกราคม-กุมภาพันธ์) ฉบับที่ 2 (มีนาคม-เมษายน) ฉบับที่ 3 (พฤษภาคม-มิถุนายน) ฉบับที่ 4 (กรกฎาคม-สิงหาคม) ฉบับที่ 5 (กันยายน-ตุลาคม) ฉบับที่ 6 (พฤศจิกายน-ธันวาคม) ผู้พิมพ์ทุกท่านสามารถส่งบทความวิจัยเพื่อรับการพิจารณาลงตีพิมพ์ได้ โดยไม่ต้องเป็นสมาชิกและไม่จำเป็นต้องสังกัดมหาวิทยาลัยมหาสารคาม ผลงานที่ได้รับการพิจารณาในวารสารจะต้องมีสาระที่น่าสนใจ เป็นงานที่ทบทวนความรู้เดิมหรือองค์ความรู้ใหม่ ที่ทันสมัย รวมทั้งข้อคิดเห็นทางวิชาการที่เป็นประโยชน์ต่อผู้อ่าน และจะต้องเป็นงานที่ไม่เคยตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารอื่นมาก่อน รวมถึงไม่อยู่ระหว่างพิจารณาลงพิมพ์ในวารสารใด บทความอาจถูกดัดแปลงแก้ไข เนื้อหา รูปแบบ และสำนวน ตามที่กองบรรณาธิการเห็นสมควร ทั้งนี้ เพื่อให้วารสารมีคุณภาพในระดับมาตรฐานสากล และนำไปอ้างอิงได้

### การเตรียมต้นฉบับ

1. ต้นฉบับพิมพ์เป็นภาษาไทยหรือภาษาอังกฤษ แต่เรื่องจะต้องมีบทคัดย่อทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ การใช้ภาษาไทยให้ยึดหลักการใช้คำศัพท์การเขียนทับศัพท์ภาษาอังกฤษตามหลักของราชบัณฑิตยสถาน ให้หลีกเลี่ยงการเขียนภาษาอังกฤษร่วมกับภาษาไทยในข้อความ ยกเว้นกรณีจำเป็น เช่น ศัพท์ทางวิชาการที่ไม่มีทางแปล หรือคำที่ใช้แล้วทำให้เข้าใจง่ายขึ้น คำศัพท์ภาษาอังกฤษที่เขียนเป็นภาษาไทยให้ใช้ตัวเล็กทั้งหมด ยกเว้นชื่อเฉพาะ สำหรับต้นฉบับภาษาอังกฤษ ควรได้รับการตรวจสอบความถูกต้องของภาษาจากผู้เชี่ยวชาญด้านภาษาอังกฤษก่อน

2. ขนาดของต้นฉบับ ใช้กระดาษขนาด A4 (8.5x11 นิ้ว) และพิมพ์โดยเว้นระยะห่างจากขอบกระดาษด้านละ 1 นิ้ว จัดเป็น 2 คอลัมน์

3. ชนิดของขนาดตัวอักษร ทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษให้ใช้ตัวอักษร **Browallia New**

3.1 ชื่อเรื่องให้ใช้อักษรขนาด **18 pt. ตัวหนา**

3.2 ชื่อผู้พิมพ์ใช้อักษรขนาด **16 pt. ตัวปกติ**

3.3 หัวข้อหลักใช้อักษรขนาด **16 pt. ตัวหนา**

3.4 หัวข้อรองใช้อักษรขนาด **14 pt. ตัวหนา**

3.5 บทคัดย่อและเนื้อหาใช้ตัวอักษรขนาด **14 pt. ตัวบาง**

3.6 เชิงอรรถอยู่หน้าแรกที่เป็นรายละเอียดชื่อตำแหน่งทางวิชาการ และที่อยู่ของผู้พิมพ์ใช้อักษรขนาด 12 pt. ตัวบาง และใส่ Corresponding author

4. ผู้พิมพ์จะต้องจัดเตรียมต้นฉบับในรูปแบบของไฟล์ “.doc” (MS Word) และ “.pdf” (Portable Document Format)

5. จำนวนหน้า ความยาวของบทความไม่ควรเกิน 12 หน้า รวมตาราง รูป ภาพ และเอกสารอ้างอิง

6. รูปแบบการเขียนต้นฉบับ แบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่ ประเภทบทความรายงานผลวิจัยหรือบทความวิจัย (research article) และบทความจากการทบทวนเอกสารวิจัยที่ผู้อื่นทำเอาไว้ หรือบทความทางวิชาการ หรือบทความทั่วไป หรือบทความปริทัศน์ (review article)

7. การส่งบทความ ส่ง online ผ่านระบบ ThaiJo โดยสามารถเข้าไปดูรายละเอียดที่ [www.scjmsu.msu.ac.th](http://www.scjmsu.msu.ac.th)

8. หากจัดรูปแบบไม่ถูกต้องทางวารสารจะจัดส่งคืนผู้พิมพ์เพื่อปรับแก้ไข ก่อนเสนอผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณา ซึ่งอาจทำให้กระบวนการตีพิมพ์ล่าช้า

## บทความวิจัย/บทความวิชาการ ให้เรียงลำดับหัวข้อดังนี้

**ชื่อเรื่อง (Title)** ชื่อเรื่องให้มีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ควรสั้น กระชับ และสื่อเป้าหมายหลักของงานวิจัย ไม่ใช่คำย่อ ความยาวไม่เกิน 100 ตัวอักษร

**ชื่อผู้พิมพ์ [Author (s)]** และที่อยู่ ให้มีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ และระบุตำแหน่งทางวิชาการ หน่วยงาน หรือสถาบันที่สังกัด และ E-mail address ของผู้พิมพ์ไว้เป็นเชิงบรรณของหน้าแรก เพื่อกองบรรณาธิการสามารถติดต่อได้

**บทคัดย่อ (Abstract)** เป็นการย่อเนื้อความงานวิจัยทั้งเรื่องให้สั้น และมีเนื้อหา ประกอบด้วย วัตถุประสงค์ ผลการค้นพบที่สำคัญ และสรุป มีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ โดยบทคัดย่อภาษาอังกฤษมีความยาวไม่เกิน 300 คำ สำหรับบทคัดย่อภาษาไทยให้สอดคล้องกับบทคัดย่อภาษาอังกฤษ

**คำสำคัญ (Keywords)** ทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ไม่เกิน 5 คำ ให้ระบุไว้ท้ายบทคัดย่อของแต่ละภาษา

**บทนำ (Introduction)** เป็นส่วนเริ่มต้นของเนื้อหา ที่บอกความเป็นมา เหตุผล และวัตถุประสงค์ ที่นำไปสู่งานวิจัยนี้ ให้ข้อมูลทางวิชาการที่เกี่ยวข้องจากการตรวจสอบเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่มีรายงานการศึกษาท่อนหน้า

**วัสดุอุปกรณ์และวิธีการศึกษา (Materials and Methods)** ให้ระบุรายละเอียด วัสดุอุปกรณ์ สิ่งื่อนำมาศึกษา จำนวน ลักษณะเฉพาะของตัวอย่างที่ศึกษา อธิบายวิธีการศึกษา แผนการทดลองทางสถิติ วิธีการเก็บข้อมูลการวิเคราะห์และการแปลผล

**ผลการศึกษา (Results)** รายงานผลที่ค้นพบ ตามลำดับขั้นตอนของการวิจัย อย่างชัดเจนได้ใจความ ถ้าผลไม่ซับซ้อน และมีตัวเลขไม่มากควรใช้คำบรรยาย แต่ถ้ามีตัวเลข หรือ ตัวแปรมาก ควรใช้ตารางหรือแผนภูมิประกอบการรายงานผลการศึกษา

**วิจารณ์และสรุปผล (Discussion and Conclusion)** การอภิปรายผลการศึกษาว่าตรงกับวัตถุประสงค์และเปรียบเทียบกับสมมติฐานของการวิจัยที่ตั้งไว้ หรือแตกต่างไปจากผลงานที่มีผู้รายงานไว้ก่อนหรือไม่ อย่างไร เหตุผลใดจึงเป็นเช่นนั้น และมีพื้นฐานอ้างอิงที่เชื่อถือได้ ผู้พิมพ์อาจมีข้อเสนอแนะที่นำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์ หรือตั้งประเด็นคำถามการวิจัย ซึ่งเป็นแนวทางสำหรับการวิจัยต่อไป

**ตาราง รูป ภาพ แผนภูมิ (Table, Figures, and Diagrams)** ควรคัดเลือกเฉพาะที่จำเป็น แทรกไว้ในเนื้อเรื่อง โดยเรียงลำดับให้สอดคล้องกับคำอธิบายในเนื้อเรื่อง และมีคำอธิบายเป็นภาษาอังกฤษ ที่สื่อความหมายได้สาระครบถ้วน กรณีที่เป็นตาราง คำอธิบายอยู่ด้านบน ถ้าเป็นรูป ภาพ แผนภูมิ คำอธิบายอยู่ด้านล่าง

**กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgements)** ระบุงานวิจัยได้รับการสนับสนุนงบประมาณ หรือสนับสนุนด้านอื่นๆ รวมถึงความช่วยเหลือจากองค์กรใดหรือผู้ใดบ้าง

**เอกสารอ้างอิง (References)** ระบุงานการเอกสารที่นำมาใช้อ้างอิงให้ครบถ้วนไว้ท้ายเรื่อง โดยใช้ APA Style ดังตัวอย่าง สามารถดูรายละเอียดและตัวอย่างเพิ่มเติมได้ที่ [www.scjmsu.msu.ac.th](http://www.scjmsu.msu.ac.th)

## เอกสารอ้างอิงให้เขียนตามรูปแบบ “Publication Manual of the American Psychological Association” (7<sup>th</sup> Edition)

### 1. หนังสือ (ในรูปแบบรูปเล่ม)

ชื่อ-สกุล. (ปีพิมพ์). *ชื่อเรื่อง* (พิมพ์ครั้งที่). สำนักพิมพ์.

ตัวอย่าง:

วิธาน ฐานะวุฑฒิ. (2547). *หัวใจใหม่-ชีวิตใหม่*. ปิตติศึกษา.

## 2. บทความในวารสารอิเล็กทรอนิกส์

ชื่อ-สกุล. (ปีพิมพ์). ชื่อบทความ. ชื่อวารสาร, เลขของปีที่ (เลขของฉบับที่), เลขหน้า. /<https://doi.org/เลขdoi>

ตัวอย่าง:

มานะ สินธุวงษานนท์. (2549). ปัจจัยส่งเสริมการจัดการศึกษาที่ส่งผลต่อคุณภาพนักเรียนในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ. *วารสารครุศาสตร์*, 18 (2), 115-116.

## 3. รายงานการประชุมเชิงวิชาการ (Proceeding)

ชื่อ-สกุล. (ปี). ชื่อบทความ. ใน/ชื่อบรรณานุกรม (บ.ก.), ชื่อหัวข้อการประชุม. ชื่อการประชุม (น. เลขหน้า). ฐานข้อมูล.

ตัวอย่าง:

พัชราภา ตันติชูเวช. (2553). การศึกษาทั่วไปกับคุณลักษณะบัณฑิตที่พึงประสงค์ในประเทศมาเลเซีย และสิงคโปร์ ศึกษาโดยเปรียบเทียบกับประเทศไทย. ใน ศิริชัย กาญจนวาสี (บ.ก.), *การขับเคลื่อนคุณภาพการศึกษาไทย. การประชุมวิชาการและเผยแพร่ ผลงานวิจัยระดับชาติ* (น. 97-102). คณะครุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

## 4. หนังสือพิมพ์และหนังสือพิมพ์ออนไลน์

ชื่อสกุล. (ปี, /วัน/เดือน). ชื่อคอลัมน์. ชื่อหนังสือพิมพ์, เลขหน้า.

ตัวอย่าง:

พงษ์พรรณ บุญเลิศ. (2561, 15 สิงหาคม). เติลนิวีส์ว่าไรดี: 'สื่อพิพิธภัณฑน์' เชื่อม ยุคสมัย เข้าถึงด้วย 'มิติใหม่' อินเทอร์เน็ต. *เติลนิวีส์*, 4.

## 5. หนังสือ (ในรูปแบบอิเล็กทรอนิกส์)

ชื่อ สกุล. (ปีพิมพ์). ชื่อเรื่อง (พิมพ์ครั้งที่). URL

ตัวอย่าง:

กระทรวงศึกษาธิการ. (2560). *หลักสูตรการศึกษาปฐมวัย พุทธศักราช 2560 สำหรับเด็กอายุ ต่ำกว่า 3-5 ปี*. [http://drive.google.com/file/d/1HiTwiRh1Er73h VYIMh1cYWzQiaNI\\_Vc/view](http://drive.google.com/file/d/1HiTwiRh1Er73h VYIMh1cYWzQiaNI_Vc/view)



## Instruction for Authors

Research manuscripts relevant to subject matters outlined in the objectives are **Accepted** from all institutions and private parties provided they have not been preprinted elsewhere. The context of the papers may be **Revised** as appropriate to the standard. The manuscript must be interesting topic, review knowledge, modern knowledge, and academic comments that are beneficial to readers. The journal publishes 6 issues a year. Vol.1 (January-February) Vol.2 (March-April) Vol.3 (May-June) Vol.4 (July-August) Vol.5 (September-October) Vol.6 (November-December).

### Preparation of manuscripts:

1. Manuscripts can be written in either Thai or English with the abstract in both Thai and English. The use of Thai language adheres to the principles of vocabulary, transliteration in English according to the principles of the Royal Society of Thailand. Manuscript should be specific, clear, concise, accurate, and consistent. Mixing Thai and English should be avoided except for the case of necessity, such as academic vocabulary with no translation or mixing words for easier understanding. English vocabulary written in Thai must use all lowercase except for unique names. English language manuscripts should be checked by an English language editor prior to submission.

2. Manuscript should be on A4 standard size paper. Each side must have 1" margins with 2 columns.

3. Browallia New font is required with font size as follows:

3.1 Title of the article: **18 pt. Bold**

3.2 Name (s) of the authors: **16 pt. Unbold**

3.3 Main Heading: **16 pt. Bold**

3.4 Sub-heading: **14 pt. Bold**

3.5 Body of the text: **14 pt. Unbold**

3.6 Footnotes for authors and their affiliations: **12 pt. Unbold**, must be cited at the bottom of the first page. Academic position and corresponding author must be added at footnotes.

4. Manuscripts should be typed in MS word ".doc" and ".pdf" (Portable Document Format)

5. The number of pages are limited to 12 pages, including references, tables, graphs, or pictures.

6. Types of manuscripts: research articles and review articles.

7. Manuscript submission: online submission via [www.scjmsu.msu.ac.th](http://www.scjmsu.msu.ac.th).

**8. Manuscript with uncorrected format will be sent back to the author before review process which can delay the publication process.**

### Research article / review article must be in sequence as follows:

**Title:** denoted in both Thai and English, must be concise and specific to the point, normally less than 100 characters.

**Name (s) of the author (s) :** denoted with affiliation must be in Thai and English, academic position must be specified, and email address for contact the author.

**Abstract:** This section of the paper should follow an informative style, concisely covering all the important of findings. The abstract must include objectives, findings, and conclusion. Thai and English abstract is required. The English abstract is restricted to **300 words**. Thai abstract should be relevant to English version.

**Keywords:** Give 4-5 concise words to specify your article

**Introduction:** This section is the initial part of the article, contain information about background, reasons, purposes, and review section.

**Materials and Methods:** A discussion of the materials used, and a description clearly detailing how the experiment was undertaken, e.g., experimental design, data collection and analysis, and interpretation

**Results:** Present the output. Li the information in complicated, add tables, graphs, diagrams etc., as necessary.

**Discussion and Conclusion:** Discuss how the results are relevant/oppose to the objective and hypothesis. How the result is different/relevant when comparing to the former findings. Give us your reason why result is like that base on reliable researches. This part should end with suggestions for research utilization or providing questions for future studies.

**Tables, figures, diagrams:** Selected only necessary objects to insert in the body of manuscript in accordance with the description in the text. The short description is required in English with completely meaningful. For figures and diagrams, the description is below the picture. But, for table, the description is on top of the table.

**Acknowledgement:** the name of the persons, organization, or funding agencies who helped support the research are acknowledged in this section.

**References:** listed and referred in APA.

## Reference are written in “Publication Manual of the American Psychological Association” (7<sup>th</sup> Edition)

### 1. Book

Mertens, D.M. (2014). *Research and evaluation in education and psychology: Integrating diversity with quantitative, qualitative, and mixed methods* (4<sup>th</sup> ed.). SAGE.

### 2. Academic Journal

Herbst-Damm, K.L., & Kulik, J.A. (2005). Volunteer support, marital status, and the survival times of terminally ill patients. *Health Psychology, 24*, 225-229. <https://doi.org/10.1037/0278-6133.24.2.225>

### 3. Conference Proceeding

Katz, I., Gabayan, K., & Aghajan, H. (2007). A multi-touch surface using multiple cameras. In J. Blanc-Talon, W. Philips, D. Popescu, & P. Scheunders (Eds.), *Lecture notes in computer science: Vol. 4678. Advanced concepts for intelligent vision systems* (pp. 97-108). Springer-Verlag. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-74607-2\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-540-74607-2_9)

### 4. Newspaper / Online Newspaper

Brody, J.E. (2007, December 11). Mental reserves keep brain agile. *The New York Times*. <http://www.nytimes.com>

### 5. E-book

Dahlberg, G., & Moss, P. (2005). *Ethics and politics in early childhood education*. <https://epdf.tips/ethics-and-politics-in-early-childhoodeducation-contesting-early-childhood.html>

## **Aim and Scope:**

The Journal of Science and Technology aims to disseminate of scientific knowledge in the discipline of Mathematics, Science, Technology, Engineering, Agriculture, Medicine, Health Science, Interdisciplinary in science and technology. The journal publishes both research article and review article.

## **Ownership**

Maharakham University  
Editorial Office  
Division of Research Facilitation and Dissemination,  
Khamriang Sub-district, Kantharawichai District,  
Maha Sarakham Province 44150  
Tel & Fax: 0 4375 4416 ext. 1754

## **Advisors**

President of Maharakham University  
Professor Dr.Visut Baimai  
Professor Dr.Vichai Boonsaeng  
Professor Dr.Peerasak Srinives

## **Editor-in-Chief**

Professor Dr.Preecha Prathepha

## **Assistant Editors**

Professor Dr.Pairot Pramual  
Maharakham University  
Professor Dr.Sirithon Siriamornpun  
Maharakham University  
Professor Dr.Anongrit Kangrang  
Maharakham University  
Associate Professor Dr.Worapol Aengwanich  
Maharakham University  
Associate Professor Dr.Vallaya Sutthikhum  
Maharakham University  
Associate Professor Dr.Orawich Goompol  
Maharakham University  
Assistant Professor Dr.Somnuk Puangpronpitag  
Maharakham University

## **Editorial Board**

Professor Dr.Thaweesakdi Boonkerd  
Chulalongkorn University  
Professor Dr.La-orsri Sanoamuang  
Khon Kaen University  
Professor Dr.Pranee Anprung  
Chulalongkorn University  
Professor Dr.Niwat Sonoamuang  
Khon Kaen University  
Professor Dr.Wongsa Laohasiriwong  
Khon Kaen University  
Professor Dr.Kwanjai Kanokmedhakul  
Khon Kaen University

Professor Dr.Sirikasem Sirilak  
Naresuan University  
Associate Professor Dr.Sunan Saikrasun  
Maharakham University  
Associate Professor Dr.Suwanna Boonyaleepun  
Khon Kaen University  
Associate Professor Dr.Chantana Aromdee  
Khon Kaen University  
Associate Professor Dr.Boonchong Chawsithiwong  
National Institute of Development Administration  
Associate Professor Dr.Porntep Tanonkeo  
Khon Kaen University  
Associate Professor Dr.Narumon Sangpradub  
Khon Kaen University  
Associate Professor Dr.Chawalit Boonpok  
Maharakham University  
Associate Professor Terdsak Khammeng  
Nakhon Phanom University  
Associate Professor Yuen Poovarawan  
Kasetsart University  
Associate Professor Dr.Natapol Pumipuntu  
Maharakham University  
Assistant Professor Dr.Napparat Buddhakala  
Rajamangala University of Technology Thanyaburi  
Assistant Professor Dr.Anucha Pranchana  
Ubon Ratchathani Rajabhat University  
Assistant Professor Dr.Seckson Sukhasena  
Naresuan University  
Assistant Professor Dr.Walaiporn Tongjaroenbuengam  
Maharakham University  
Assistant Professor Dr.Alongkorn Lamom  
Maharakham University  
Dr.Rakjinda Wattanalai  
Siam University  
Dr.Adrian Roderick Plant  
Maharakham University

## **Secretary**

Director of the Division of Research Facilitation and Dissemination

## **Assistant secretary**

Phakwilai Rungwisai  
Jirarat Puseerit

## **Six issues per year**

Number 1 January-February  
Number 2 March-April  
Number 3 May-June  
Number 4 July-August  
Number 5 September-October  
Number 6 November-December



JOURNAL OF

# SCIENCE AND TECHNOLOGY

MAHASARAKHAM UNIVERSITY

Volume 42 Number 4 July- August 2023

JOURNAL OF SCIENCE AND TECHNOLOGY  
MAHASARAKHAM UNIVERSITY  
INDEXED IN

ISSN (Print Edition) : 1686-9664  
ISSN (Online Edition) : 2586-9795



ขอขอบคุณภาพจาก : รองศาสตราจารย์ ดร. สุรพล แสนสุข  
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม