



# วารสารวิจัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

Rajamangala University of Technology Srivijaya Research Journal

Vol.16 No.3 (September - December 2024)

ISSN 3027-7140 (Online)



วารสารวิจัย  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

---

ที่ปรึกษา	ศาสตราจารย์ ดร.สุวัฒน์ ชัยนุส คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการประมง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
บรรณาธิการ	รองศาสตราจารย์ ดร.ชาติรี หอมเขียว คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ผู้ช่วยบรรณาธิการ	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ ทองหนู่น้อย คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการประมง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นพรัตน์ มะเห คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการประมง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิรักษ์ สงรักษ์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการประมง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรพร ธารางกูร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการประมง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุดคนึง ณ ระนอง คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการประมง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

**วารสารวิจัย**  
**มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย**

---

**กองบรรณาธิการ**

ศาสตราจารย์ ดร.อลงกลด แทนออมทอง

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ศาสตราจารย์ ดร.ทวนทอง จุฑาเกตุ

คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

Professor Ir. Dr. Anuar Mat Safar

University Malaysia Perlis, Malaysia

Professor Mitsuhiko Sano

Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo, Japan

Professor Qinghua Zhang

Chongqing University of Posts and Telecommunications, China

Professor Zhangyong Li

Chongqing University of Posts and Telecommunications, China

Professor Clarissa Yvonne Domingo

Central Luzon State University, Philippines

Professor Virginia Venturina

Central Luzon State University, Philippines

Professor Noraine Medina

Central Luzon State University, Philippines

Professor Ravelina Velasco

Central Luzon State University, Philippines

Professor Ronaldo Alberto

Central Luzon State University, Philippines

Professor Edilyn Lansangan

Central Luzon State University, Philippines

Professor Ariel Mactal

Central Luzon State University, Philippines

Associate Professor Dr. David Crookall

University of Nice Sophia Antipolis, France

Associate Professor Dr. Ir. Wan Arfiani Barus, M.P

Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, Indonesia

รองศาสตราจารย์ ดร.ปิ่น จันจุฬา

คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่  
รองศาสตราจารย์ ญัฐวรัตน์ ปภากสิทธิ

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รองศาสตราจารย์ ดร.ลักษมี วิทยา

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการประมง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย  
รองศาสตราจารย์ ดร.ศศิโรตม์ เกตุแก้ว

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง

รองศาสตราจารย์ ดร.อุเทน คำนำน

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

รองศาสตราจารย์ ดร.เกษรา คูหา

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา  
รองศาสตราจารย์ประพจน์ พรหมสมบูรณ์

คณะเกษตรศาสตร์และทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิยม กำลังดี

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงศ์ แก้วบุญมา

คณะเทคโนโลยีการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สหพงศ์ สมวงศ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิกรม ฉันทรางกูร

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย  
ดร.กิตติมา ตันดิหาชัย

คณะศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

นางสาวกุลิกา ชนะเสวตร

วิทยาลัยการโรงแรมและการท่องเที่ยว มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย



## สารบัญ

---

การปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังโดยใช้เถ้าปาล์มน้ำมันและปูนซีเมนต์เพื่อใช้ในงานก่อสร้างถนน พีระวัฒน์ พงษ์วิศกร สราวุธ จริตงาม และ โอภาส สมใจนึก	557 - 571
การพัฒนาระบบอบแห้งด้วยสุญญากาศแบบพัลส์ร่วมกับรังสีอินฟราเรดต้นทุนต่ำ วัชรพล ชยประเสริฐ ศิวลักษณ์ ปฐวีรัตน์ และ ชูเกียรติ โชติกเสถียร	572 - 590
การทดสอบเพื่อตรวจสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปที่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กฝั่งที่ส่วนรองรับภายใต้แรงกระทำเป็นจุดแบบตามขวาง ชูชง กงแก้ว สิทธิชัย แสงอาทิตย์ และ จักรดา ชำรงวุฒิ	591 - 609
การพัฒนาอัลกอริทึมสำหรับระบบฟาร์มจิ้งหรีดอัจฉริยะด้วยโหมดประหยัดพลังงาน เอกรัฐ ชะอุ่มเอียด สิทธิพงษ์ เฟิงประเดิม และ เตือนแรม แพ่งเกี่ยว	610 - 624
อิทธิพลของความหนาวัสดุด้านการแทงจากเส้นใยพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งที่มีต่อความลึกรอยแทง ศศิณี จันทสี ปกรณ์ จันทะยาสาคร และ ไชยยันต์ ไชยยะ	625 - 640
Geopolymer from Metakaolin containing Field Para Rubber Latex Coating for Protecting Reinforced Concrete against Corrosion Abideng Hawa, Preecha Salaemae and Woraphot Prachasaree	641 - 655
ผลกระทบของการจัดเรียงแนวเส้นใยที่มีต่อความแข็งแรงของแผ่นเกราะกันกระสุนที่ผลิตจากใยแก้วผ้าทอ ปฐมภรณ์ ชัยกุล อภิพัฒน์ ศกุนตนาถ นนทวัฒน์ จันทรเพ็ญ และ ชีรวัฒน์ เหล่านภากุล	656 - 670
คุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนในช่องการไหลที่มีพินรูปตัววีเรียงแถวเดียวติดตั้งอยู่บนพื้นผิว เสรี ทองชุม ปฐมพร นระระโต ประทีป ทิพย์ประชา นิโอะ ปุชู และ ชยุต นันทคุสิต	671 - 688

<b>Development and Acceptance of Time Attendance Web Application Using Identity Verification with Picture and Location of Personnel in Private Universities</b>	<b>689 - 702</b>
Pramote Sittijuk and Wiraiwan Sanchana	
<b>การพัฒนาแพลตฟอร์มดิจิทัลสำหรับธุรกิจการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืดในท้องถิ่น</b>	<b>703 - 715</b>
อภิรักษ์ จุ่นกรณ์ รุจิราวดี ชรรณแสง และ ภรณ์ยา ปาลวิสุทธิ	
<b>การพัฒนาเหมืองความรู้เชิงความหมายสมุนไพรรไทยเพื่อการบำบัดรักษา</b>	<b>716 - 733</b>
อนุพงษ์ สุขประเสริฐ ดวงจันทร์ สีหาราช เกษฎาพร ปาคำวัง สุภาพร วิสูงระ และ จิตรนันท์ ศรีเจริญ	
<b>Most Probable Number-Polymerase Chain Reaction-based Quantification of <i>Escherichia coli</i> O26, O104, O111, and O157 from Thai and Imported Malaysian Beef</b>	<b>734 - 742</b>
Pattamarat Rattanachua, Woralop Modleahman, Sunisa Yensai and Pharanai Sukhumungoon	
<b>การศึกษาลักษณะพื้นฐานวิทยา การเจริญของกลุ่มเส้นใย และการผลิตเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์ในถังเช่าสีทองที่คัดเลือกจากฟาร์มต่าง ๆ ในภาคกลางของประเทศไทย</b>	<b>743 - 761</b>
สามารถ ต่ายขาว กัญญา กอแก้ว ดวงหทัย รัตนสังฆธรรม และ สุนทรา เฟื่องฟูง	
<b>การยับยั้งเชื้อ <i>Staphylococcus aureus</i> บนผ้าฝ้ายด้วยสารสกัดจากลำต้น และใบฟ้าทะลายโจร</b>	<b>762 - 771</b>
ศรันยา เพ็ญผ่อง จุฑามณี แสงสว่าง และ ณัฐรัตน์ อุษณะอำไพพงษ์	
<b>การพัฒนาผลิตภัณฑ์แผ่นฟิล์มผสมผงจิ้งหรีดและการประยุกต์ในกรานอล่าบอล</b>	<b>772 - 784</b>
ปาลิตา ไม้ประเสริฐ ชนกานต์ พยัคฆพันธ์ ปาริสุทธิ เฉลิมชัยวัฒน์ พรราวดา จันทโร ปัทมา หิรัญโยภาส และ ดวงกมล แสงธีรกิจ	
<b>ผลของอิมัลซิไฟเออร์ต่อคุณสมบัติเนื้อสัมผัส คุณสมบัติทางเคมีและความคงตัวของอิมัลชันไส้กรอกหมูที่ผลิตจากเนื้อสุกรแช่เยือกแข็ง</b>	<b>785 - 799</b>
วรวลัญช์ นิมพะเนาวิ เอกรินทร์ อินประมุล มาลัยพร วงศ์แก้ว รัตติยากร ชาตดนนท และ สุนงกษ โตไพบูลย์	

ผลของรูปแบบการบรรจุต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพผลิตภัณฑ์ขนมไหว้พระจันทร์ ระหว่างการเก็บรักษา กมลทิพย์ กรรไพบเราะ	800 - 812
การปรับปรุงคุณภาพเลือดโคปนเพื่อใช้เป็นส่วนผสมในอาหารปลาดุกลูกผสม พรทิตา ทองสนิทกาญจน์ ธนภัทร วรปัสสุ ณิชูรินทร์ ศิริรัตนนันท์ และ ปิยพงศ์ บางใบ	813 - 825
ความหลากหลายของสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกตามลำธารนอกเขตป่าอนุรักษ์ ในอำเภอธารโต และอำเภอเบตง จังหวัดยะลา สิทธิศักดิ์ จันทรัตน์ อานิช โตะพง เรสฟิยา หล้าปุเต๊ะ สมศักดิ์ บัวทิพย์ เทียนทิพย์ ไกรพรหม และ พัน ยี่ลีน	826 - 841
การพยากรณ์ราคาขายปลีกเฉลี่ยรายเดือนของน้ำมันดีเซล 91 ในเขตกรุงเทพมหานคร วรางคณา เรียนสุทธิ	842 - 853

# การปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังโดยใช้เถ้าปาล์มน้ำมันและปูนซีเมนต์ เพื่อใช้ในการก่อสร้างถนน

## Lateritic Soil Quality Improvement Using Palm Oil Fuel Ash and Cement for Road Construction

พีระวัฒน์ พงษ์ชวีศกร<sup>1\*</sup> สราวุธ จริตงาม<sup>1</sup> และ โอภาส สมใจนึก<sup>2</sup>

Peerawat Pongchawitkorn<sup>1\*</sup>, Saravut Jaritngam<sup>1</sup> and Opas Somchainuek<sup>2</sup>

Received: 24 February 2023, Revised: 1 June 2023, Accepted: 19 June 2023

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเถ้าปาล์มน้ำมันและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มาใช้เพื่อปรับปรุงคุณภาพของดินลูกรังจากแหล่งดินบ้านควนจง อ.นาหม่อม จ.สงขลา เพื่อนำมาใช้ในการก่อสร้างถนน โดยปรับปรุงโดยปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 2, 3, 4 และ 5 โดยน้ำหนักของดิน และปรับปรุงโดยปูนซีเมนต์อัตราส่วนร้อยละ 5 ผสมกับเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีขนาดต่ำกว่า 45 ไมครอน ในอัตราส่วนร้อยละ 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนักของดิน โดยทำการทดสอบหาคุณสมบัติพื้นฐานและทางวิศวกรรม วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี รวมถึงศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราดของดินลูกรัง ผลการศึกษาพบว่าดินลูกรังที่ปรับปรุงโดยเถ้าปาล์มน้ำมันและปูนซีเมนต์ มีองค์ประกอบหลักคือ  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$  และ  $\text{K}_2\text{O}$  การปรับปรุงดินลูกรังโดยใช้ปูนซีเมนต์ ทำให้ค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นสูงสุดอยู่ที่ 24.8 ksc ในอัตราส่วนปูนซีเมนต์ร้อยละ 5 ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน และการปรับปรุงโดยใช้เถ้าปาล์มน้ำมันและปูนซีเมนต์ทำให้ค่าปริมาณความชื้นเหมาะสมเพิ่มขึ้นจาก 9.7 เป็น 11.2% ทำให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดลดลงจาก 1.970 เป็น 1.861  $\text{g/cm}^3$  และทำให้ค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นสูงสุดอยู่ที่ 31.1 ksc ในอัตราส่วนปูนซีเมนต์ร้อยละ 5 เถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 5 ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน และค่ากำลังอัดลดลงตามปริมาณของเถ้าปาล์มน้ำมันที่เพิ่มขึ้น จากค่ากำลังอัดของดินลูกรังที่ปรับปรุงโดยปูนซีเมนต์ในทุกอัตราส่วนผสม และดินลูกรังที่ปรับปรุงโดยปูนซีเมนต์และเถ้าปาล์มน้ำมันในอัตราส่วนปูนซีเมนต์ร้อยละ 5 เถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 5 ที่ผ่านระยะเวลาบ่ม 7 วัน ผ่านมาตรฐานชั้นรองพื้นทางดินซีเมนต์ของกรมทางหลวงในการนำไปใช้ในการก่อสร้างถนน

<sup>1</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90110

<sup>1</sup> Department of Civil and Environment Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hatyai, Songkhla 90110, Thailand.

<sup>2</sup> สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ สำนักงานทางหลวงที่ 18 อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา 90000

<sup>2</sup> Bureau of Materials Analysis and Inspection, Office of Highway 18, Mueang, Songkhla 90000, Thailand.

\* ผู้นิพนธ์ประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): dan.peerawat@hotmail.com

**คำสำคัญ:** ดินลูกรังนาหม่อม, เถ้าปาล์มน้ำมัน, ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, งานก่อสร้างถนน, กำลังอัด, กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด

## ABSTRACT

This research studied the possibility of using Palm Oil Fuel Ash (POFA) and Portland cement Type 1 to improve the quality of lateritic soil from the Ban Khuan Chong, Namom district, Songkhla province for road construction. The soil was improved by incorporating cement at proportions of 2%, 3%, 4%, and 5% by weight, and by incorporating a mixture of POFA with particle sizes less than 45 microns at proportions of 5%, 10%, and 15% by weight, along with 5% cement. The preliminary and engineering properties of the soil were tested, including chemical composition analysis (XRF) and microstructure analysis using a scanning electron microscope (SEM). The study found that the main components of the laterite soil improved with POFA and cement were SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO and K<sub>2</sub>O. The soil improved with cement achieved a maximum compressive strength of 24.8 ksc at 5% cement content over a curing period of 28 days. The soil improved with POFA and cement showed an increase in optimum moisture content (OMC) from 9.7% to 11.2%, resulting in a decrease in maximum dry density (MDD) from 1.970 to 1.861 g/cm<sup>3</sup>. The soil also achieved the maximum compressive strength of 31.1 ksc at a 5% cement mixed with 5% POFA over a curing period of 28 days. The compressive strength decreased with an increase in the amount of POFA. The soil samples improved with cement at all proportions and the soil samples improved with 5% cement and 5% POFA over a curing period of 7 days met the subbase layer requirements for soil-cement subbase according to the Department of Highways standards for road construction. over a curing period of 7 days met the subbase layer requirements for soil-cement subbase according to the Department of Highways standards for road construction.

**Key words:** Namom lateritic soil, palm oil fuel ash, Portland cement type 1, road construction, compressive strength, scanning electron microscope

## บทนำ

ถนนมีความสำคัญเป็นอย่างมากสำหรับการคมนาคมทางภาคพื้นดิน ถนนในประเทศไทยมีความยาวถึง 702,723 กิโลเมตร (Ministry of Transport Operation Center, 2021) คุณภาพของถนนมีความสำคัญ เนื่องจากถ้าไม่ได้มาตรฐานจะทำให้เกิดอันตรายต่อผู้ใช้ถนน โดยกรมทางหลวงมีการใช้ดินลูกรังเป็นวัสดุหลักในการก่อสร้างชั้นรองพื้นทาง

แต่อาจจะเป็นปัญหาสำหรับบางพื้นที่ที่ไม่สามารถหา ดินลูกรังที่มีคุณสมบัติที่ดีพอสำหรับใช้เป็นวัสดุชั้นรองพื้นทางได้ ผู้วิจัยจึงได้ทำการพัฒนาวัสดุชั้นรองพื้นทางอย่างดินลูกรังโดยใช้ปูนซีเมนต์และเถ้าชีวมวลอย่างเถ้าปาล์มน้ำมันซึ่งเป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันที่สำคัญเป็นอย่างมากในภาคใต้

ดินลูกรังเกิดจากการสลายตัวทางธรรมชาติของหินที่อยู่ในสภาพภูมิอากาศที่มีอุณหภูมิสูง และมีปริมาณความชื้นสูง หรือเขตร้อนชื้น ในประเทศไทย มีสภาพภูมิอากาศแบบร้อนชื้นจะมีการเกิดดินลูกรังสูงมาก โดยทั่วไปดินลูกรัง หมายถึงดินที่มีส่วนหยาบที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่า 2 มิลลิเมตร มากกว่าร้อยละ 35 โดยปริมาณ และมีอนุภาคดินที่สามารถแทรกอยู่ช่องว่างมีขนาดใหญ่กว่า 1 มิลลิเมตร (Land Development Department, 2020) ลักษณะของดินลูกรังประกอบไปด้วยออกไซด์ทุติยภูมิของเหล็ก (Secondary Oxide of Iron) หรือ อะลูมินัม (Aluminum) เกือบจะไม่เป็นค่า ส่วนใหญ่จะประกอบไปด้วยซิลิกา (Silica) และอาจจะมีแร่ควอตซ์ (Quartz) และดินขาว (Kaolinite) ประกอบอยู่เป็นจำนวนมากได้ มีลักษณะแข็ง และมีสีน้ำตาลแดง หรือสีน้ำตาลแดง (Alexander and Cady, 1962)

ในภาคใต้ ปาล์มน้ำมันถือเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญเป็นอย่างมาก ปาล์มน้ำมันมีพื้นที่ขึ้นต้นถึงประมาณ 5 ล้านไร่ และมีผลผลิตถึงประมาณ 14 ล้านตันในปี พ.ศ.2563 (Office of Agricultural Economics, 2020) หลังจากผ่านกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มนั้น จะเหลือกากผลปาล์ม เช่น กากใย กะลา และทะลายปาล์ม โดยเป็นที่นิยมนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลให้กับโรงงานอุตสาหกรรม และหม้อกำเนิดไอน้ำในโรงไฟฟ้าชีวมวลในอุณหภูมิ 800-900 องศาเซลเซียส แทนที่เชื้อเพลิงถ่านหินที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก จากข้อมูลทางสถิติของข้อมูลผลผลิตสินค้าเกษตร 5 ปีย้อนหลัง ผลผลิตจากปาล์มน้ำมันในภาคใต้มีปริมาณกว่า 60 ล้านตัน ของเหลือจากกระบวนการผลิตปาล์มน้ำมันนั้นมีปริมาณสูงถึงประมาณ 32 ล้านตัน และหลังจากการนำวัสดุเหล่านั้นไปใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลจะได้เป็นเถ้าปาล์มน้ำมัน ปริมาณ 1.6 ล้านตัน เฉลี่ยเป็น 3.2 แสนตันต่อปี ซึ่งเป็นปริมาณที่สูงมาก และการกำจัดเถ้า

ชีวมวลที่เกิดจากการเผาไหม้นั้นจะต้องนำไปฝังกลบเนื่องจากเถ้าชีวมวลมีขนาดเล็ก และฟุ้งกระจายได้ง่าย อาจจะทำให้สร้างปัญหาต่อทางเดินหายใจได้ (Jaturapitakkul, 2012) จึงเหมาะแก่การนำมาใช้เพื่อเป็นส่วนประกอบในการพัฒนาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินลูกรัง และเพื่อใช้ประโยชน์จากเถ้าปาล์มน้ำมันให้ได้มากที่สุด โดยจากหลายงานวิจัยนั้น ได้ศึกษาคุณสมบัติของเถ้าปาล์มน้ำมัน และได้พบว่าคุณสมบัติทางเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมันนั้นสามารถเทียบเคียงวัสดุพอลิซิลานได (Rakson *et al.*, 2005) เนื่องจากคุณสมบัติทางเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมันนั้นมีส่วนประกอบหลัก คือ ซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ), อลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และ แคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) ตามมาตรฐาน ASTM C618-19 (ASTM, 2019)

การทำวิจัยเกี่ยวกับการปรับปรุงคุณภาพดินโดยใช้เถ้าปาล์มน้ำมัน เช่น Nnochiri *et al.* (2017) ได้นำดินลูกรังจาก 3 แหล่งที่มีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน (L1, L2, L3) มาผสมกับปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 0-10 และเถ้ากะลาปาล์มน้ำมันในอัตราส่วนร้อยละ 1-10 โดยน้ำหนักดิน และผลการทดสอบสรุปได้ว่าการเติมเถ้ากะลาปาล์มน้ำมัน และปูนซีเมนต์ลงไปทำให้ค่าพิกัดเหลว (LL) และค่าพิกัดพลาสติก (PI) ลดลงอย่างมีนัยยะสำคัญ ส่วนผสมที่ให้กำลังอัดที่สูงที่สุดสำหรับตัวอย่าง L1 คือ เถ้ากะลาปาล์มน้ำมันร้อยละ 4 และปูนซีเมนต์ร้อยละ 6 สำหรับตัวอย่าง L2 คือ เถ้ากะลาปาล์มน้ำมันร้อยละ 4 และปูนซีเมนต์ร้อยละ 4 สำหรับตัวอย่าง L3 คือ เถ้ากะลาปาล์มน้ำมันร้อยละ 4 และปูนซีเมนต์ร้อยละ 6 Onyelowe (2019) ได้นำตัวอย่างดินลูกรังประเภท A-2-7 มาปรับปรุงด้วยเถ้าทะลายปาล์มน้ำมันในอัตราส่วนร้อยละ 3, 6, 9, 12 และ 15 โดยน้ำหนักดิน จากผลการทดสอบสรุปได้ว่าการปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังโดยเถ้าทะลายปาล์มน้ำมันทำให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนของเถ้า

ทะเลสาปาล์มน้ำมัน ค่าปริมาณความชื้นสูงสุดลดลงที่อัตราส่วนเถ้าทะเลสาปาล์มน้ำมันร้อยละ 0 ถึง 6 และเพิ่มขึ้นที่อัตราส่วนเถ้าทะเลสาปาล์มน้ำมันร้อยละ 6 ถึง 15, ค่า CBR เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนของเถ้าทะเลสาปาล์มน้ำมัน โดยค่า CBR ที่สูงที่สุดอยู่ที่ 30% ที่อัตราส่วนเถ้าทะเลสาปาล์มน้ำมันร้อยละ 9 และค่ากำลังอัดมากที่สุดที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน ในอัตราส่วนเถ้าทะเลสาปาล์มน้ำมันที่ร้อยละ 12 Pourakbar *et al.* (2015) ได้นำดินเหนียว มาปรับปรุงด้วย Alkaline activator เช่น KOH และ NaOH และเถ้าปาล์มน้ำมันในอัตราส่วนร้อยละ 10, 15, 20 และ 25 โดยน้ำหนักดิน โดยทำการบ่มเป็นระยะเวลา 7, 90 และ 180 วัน จากผลการทดสอบสรุปได้ว่าการปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันทำให้ค่ากำลังอัดที่สูงที่สุดอยู่ที่อัตราส่วนเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 15 สำหรับตัวอย่างที่ผสม KOH ที่ระยะเวลาการบ่ม 180 วัน และสำหรับตัวอย่างที่ผสม NaOH มีค่ากำลังอัดสูงที่สุดอยู่ที่อัตราส่วนเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 20 ที่ระยะเวลาการบ่ม 180 วัน โดยค่ากำลังอัดจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่มที่เพิ่มขึ้น Otunyo and Chukuigwe (2018) ได้นำดินลูกรังคุณภาพต่ำกว่ามาตรฐานมาทำการปรับปรุงโดยใช้เถ้าทะเลสาปาล์มน้ำมันในอัตราส่วนร้อยละ 20, 25 และ 30 โดยน้ำหนักดินลูกรัง จากผลการทดสอบสรุปได้ว่าค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดอยู่ที่อัตราส่วนเถ้าทะเลสาปาล์มน้ำมันร้อยละ 25 และจะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของเถ้าทะเลสาปาล์มน้ำมัน, ค่าปริมาณความชื้นสูงสุดอยู่ที่อัตราส่วนเถ้าทะเลสาปาล์มน้ำมันร้อยละ 20 และต่ำสุดในอัตราส่วนเถ้าทะเลสาปาล์มน้ำมันที่ร้อยละ 25 ค่ากำลังอัดที่สูงที่สุดอยู่ที่อัตราส่วนเถ้าทะเลสาปาล์มน้ำมันร้อยละ 20 และ 25 ที่ระยะเวลาการบ่ม 14 และ 28 วันตามลำดับ และสำหรับค่า CBR ที่สูงที่สุดอยู่ที่อัตราส่วนเถ้าทะเลสาปาล์มน้ำมันร้อยละ 20 ทั้งแบบผ่านการบ่ม และไม่ผ่านการบ่ม Ahmad *et al.* (2011)

ได้นำดินพรมมาปรับปรุงโดยใช้เถ้าปาล์มน้ำมันขนาดต่ำกว่า 445 ไมครอน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ในอัตราส่วนเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 10, 15 และ 20 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 10, 15, 20 และ 30 โดยน้ำหนักดิน และทำการทดสอบหาค่ากำลังอัดที่ระยะเวลาการบ่ม 0, 7 และ 14 วัน จากผลการทดสอบสรุปได้ว่าค่ากำลังอัดที่สูงที่สุดอยู่ที่อัตราส่วนเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 10 ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 20 ที่ทุกระยะเวลาการบ่ม และสำหรับค่ากำลังอัดที่ต่ำที่สุดอยู่ที่อัตราส่วนเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 20 ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 10 ที่ทุกระยะเวลาการบ่ม และค่ากำลังอัดของทุกอัตราส่วนผสมจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่ม Oke and Kolawole (2020) ได้นำดินลูกรังมาปรับปรุงโดยใช้เถ้าทะเลสาปาล์มน้ำมันเปล่าในอัตราส่วนเถ้าร้อยละ 2, 4, 6, 8, 10, 12 และ 14 โดยน้ำหนักดิน จากผลการทดสอบสรุปได้ว่าการปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังโดยเถ้าทะเลสาปาล์มน้ำมันเปล่าทำให้ค่าปริมาณความชื้นสูงสุดเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของเถ้าทะเลสาปาล์มน้ำมันเปล่าที่เพิ่มขึ้น และค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดลดลงตามอัตราส่วนของเถ้าทะเลสาปาล์มน้ำมันเปล่าที่เพิ่มขึ้น, ค่า CBR สูงที่สุดอยู่ที่อัตราส่วนเถ้าทะเลสาปาล์มน้ำมันเปล่า 8% และค่ากำลังอัดสูงที่สุดอยู่ที่อัตราส่วนเถ้าทะเลสาปาล์มน้ำมันเปล่าที่ร้อยละ 8 สำหรับระยะเวลาบ่ม 7, 14 และ 28 วันตามลำดับ และค่ากำลังอัดจะลดลงตามการเพิ่มขึ้นของเถ้าทะเลสาปาล์มน้ำมันเปล่า Phudphong and Hormdee (2022) ได้นำดินลมหอบมาปรับปรุงด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันและตะกรันเตาถลุงเหล็ก จากผลการทดสอบสรุปได้ว่าการปรับปรุงดินด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 5 ที่ผ่านการบ่มร้อนด้วยอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน และบ่มในอุณหภูมิห้องปกติอีก 7 วัน มีค่ากำลังอัดผ่านมาตรฐานชั้นพื้นทางของกรมทางหลวง และมีค่า

กำลังอัดมากกว่าดินที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ร้อยละ 5

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินลูกรังในพื้นที่บ้านควนจง อ.นาหม่อม จ.สงขลา ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างจุลภาคจากภาพถ่ายของดินลูกรังทั้งก่อนและหลังปรับปรุง และนำเสนออัตราส่วนผสมระหว่างดินลูกรัง ปูนซีเมนต์ และเถ้าปาล์ม น้ำมันสำหรับเป็นวัสดุชั้นรองพื้นทางในงานก่อสร้างถนน และการนำวัสดุเหลือทิ้งอย่างเถ้าปาล์ม น้ำมัน ที่เป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมปาล์ม น้ำมัน ซึ่งเป็นอุตสาหกรรมที่สำคัญเป็นอย่างมากของภาคใต้

### วิธีดำเนินการวิจัย

บทความนี้ทำการทดสอบคุณสมบัติของดินลูกรังจากแหล่งดินบ้านควนจง อ.นาหม่อม จ.สงขลา ในห้องปฏิบัติการ ทั้งก่อนและหลังปรับปรุงโดยปูนซีเมนต์และเถ้าปาล์ม น้ำมัน

#### 1. การเตรียมวัสดุในการทดสอบ

1.1 ดินลูกรังจากบ้านควนจง อ.นาหม่อม จ.สงขลา ดังแสดงใน (Figure 1)



**Figure 1** Ban Khuan Chong, Namom lateritic soil source

1.2 เถ้าปาล์ม น้ำมัน ที่ได้จากการเผาในเตาเผาระบบปิดที่อุณหภูมิ 700-800 องศาเซลเซียส จากบริษัท นามหงส์ น้ำมันปาล์ม จำกัด จังหวัดกระบี่

โดยทำการบดด้วยเครื่อง Gyrotory Crusher รอบละ 2 กิโลกรัม เป็นระยะเวลา 30 นาที โดยทำการปรับความละเอียดสูง และทำการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 คัดขนาดต่ำกว่า 45 ไมครอน ดังแสดงใน (Figure 2 และ 3)



**Figure 2** Gyrotory Crusher



**Figure 3** POFA after grinded

1.3 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ผ่านมาตรฐาน มอก. 15

1.4 น้ำประปาสะอาด

2. ทำการทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุดินลูกรังเปล่าตามมาตรฐานชั้นรองพื้นทาง DH-S 205/2532 (DOH, 1989) ดังต่อไปนี้

2.1 การทดสอบหาขนาดมวลคละของดิน (Sieve Analysis) ตามมาตรฐาน DH-T 205/2517 (DOH, 1974a)

2.2 ทดสอบความต้านทานการสึกกร่อน (Abrasion) โดยใช้เครื่อง Los Angeles Abrasion ตามมาตรฐาน DH-T 202/2515 (DOH, 1972a)

2.3 ทดสอบเพื่อประเมินค่าพิกัดสถานะความคงตัวของมวลดิน (Atterberg Limits) ตามมาตรฐาน DH-T 102/2515 และ 103/2515 (DOH, 1972b)

2.4 ทดสอบการบดอัดดิน (Modified Proctor test) ตามมาตรฐาน DH-T 108/2517 (DOH, 1974b)

2.5 ทดสอบกำลังรับน้ำหนัก (CBR) ตามมาตรฐาน DH-T 109/2517 (DOH, 1974c)

2.6 ทดสอบกำลังอัด (Unconfined Compressive Strength, UCS) ตามมาตรฐาน DH-T 105/2515 (DOH, 1972c)

3. ทำการทดสอบกำลังอัด (UCS) ของวัสดุดินลูกรังผสมปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 2, 3, 4 และ 5 โดยน้ำหนักของดินลูกรัง และวัสดุดินลูกรังผสมปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 5 และเก้าปาล์ม น้ำมันร้อยละ 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนักของดิน ดังแสดงใน (Table 1) โดยมีระยะเวลาการบ่มตัวอย่างอยู่ที่ 7 และ 28 วันในถุงพลาสติก และแช่น้ำเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ก่อนทำการทดสอบ โดยทำการทดสอบโดยใช้จำนวนตัวอย่างอัตราส่วนละ 3 ตัวอย่าง ดังแสดงใน (Figure 4, 5 และ 6)



**Figure 4** Lateritic soil improved with cement curing in closed plastic bag



**Figure 5** Lateritic soil improved with cement and POFA curing in closed plastic bag



**Figure 6** UCS testing of Lateritic soil improved with cement

4. ทำการวิเคราะห์ชนิดของธาตุและปริมาณธาตุ (XRF) ของเก้าปาล์มน้ำมัน และถ่ายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ดินลูกรังทั้งก่อนและหลังการปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์และเก้าปาล์มน้ำมัน

**Table 1** Ratio Between Lateritic Soil, Portland Cement Type 1 and POFA

Ratio No.	Lateritic Soil (LS)	Portland Cement		POFA (P)	Symbol
		Type 1 (C)			
1	100	0	0	0	LS100
2	98	2	0	0	LS98C2
3	97	3	0	0	LS97C3
4	96	4	0	0	LS96C4
5	95	5	0	0	LS95C5
6	90	5	5	5	LS90C5P5
7	85	5	10	10	LS85C5P10
8	80	5	15	15	LS80C5P15

## ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

### 1. ผลการทดสอบคุณสมบัติของดินลูกรัง

จากผลการทดสอบคุณสมบัติดินลูกรังจากแหล่งดินบ้านควนจง (Table 2) แสดงให้เห็นว่าค่าพิกัดเหลวเท่ากับ 33.1%, ค่าพิกัดพลาสติกเท่ากับ 22.2% และ ค่าดัชนีพลาสติกเท่ากับ 10.9% ซึ่งผ่านเกณฑ์วัสดุชั้นรองพื้นทางของกรมทางหลวง DH-S 205/2532 (DOH, 1989) ทั้งหมด ค่าปริมาณความชื้นเหมาะสมเท่ากับ 9.7% และค่าความหนาแน่นแห้ง

สูงสุดอยู่ที่ 1.970 g/cm<sup>3</sup> ค่าความต้านทานการสึกกร่อนเท่ากับ 63.1% สูงกว่าเกณฑ์ที่ตั้งไว้ที่ไม่เกิน 60% อยู่ไม่มาก ค่า CBR เท่ากับ 8.1% ไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนดไว้ที่ 25% และค่ากำลังอัดโดยไม่ผ่านการบ่มเท่ากับ 4.8 ksc ไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนดไว้ที่ 7 ksc และจากผลการทดสอบจำแนกได้ว่าดินลูกรังอยู่ในประเภท A-2-4 โดยจำแนกด้วยวิธีการของ AASHTO โดยลักษณะดินลูกรังมีเม็ดละเอียดมากและมีความเหนียวสูง

**Table 2** Properties of Lateritic Soil

Property	Result	Sieve No.	% Passed
Liquid Limit (%)	33.1	2"	100
Plastic Limit (%)	22.2	1"	100
Plastic Index (%)	10.9	3/4"	91.8
OMC (%)	9.7	3/8"	69.7
MDD (g/cm <sup>3</sup> )	1.969	4	50
Abrasion (%)	63.1	10	46.4
C.B.R. (Soaked) (%)	8.1	40	41.0
UCS (ksc)	4.8	200	33.1

## 2. ผลการทดสอบหองค์ประกอบทางเคมี (XRF)

ผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมัน, ดินลูกรัง, ดินลูกรังผสมปูนซีเมนต์ และดินลูกรังผสมปูนซีเมนต์และเถ้าปาล์มน้ำมัน ดังแสดงใน (Table 3)

ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีพบว่า ปริมาณองค์ประกอบของตัวอย่างดินลูกรังเปลามี

SiO<sub>2</sub> อยู่ที่ 59.96% ส่วนเถ้าปาล์มน้ำมันมีปริมาณ SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> และ Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> อยู่ที่ 63.80%, 1.43% และ 1.64% ตามลำดับ รวมกันได้ 66.86% เมื่อเทียบกับวัสดุปอชโซลานเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C618-19 (ASTM, 2019) จัดอยู่ในคลาส N โดยมีผลรวมของ SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> และ Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> มากกว่า 50%

**Table 3** Chemical composition of Lateritic Soil, POFA and Improved Lateritic Soil

Chemical Composition	Concentration (%)			
	POFA	LS100	LS95C5	LS90C5P5
SiO <sub>2</sub>	63.795	59.961	58.188	55.768
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.430	22.921	20.552	19.467
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.635	8.807	8.218	8.205
CaO	5.955	0.020	3.364	5.082
K <sub>2</sub> O	4.499	1.994	1.937	2.138
TiO <sub>2</sub>	0.168	0.956	1.040	0.908
MgO	2.792	0.208	0.300	0.527
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	3.170	0.238	0.190	0.358

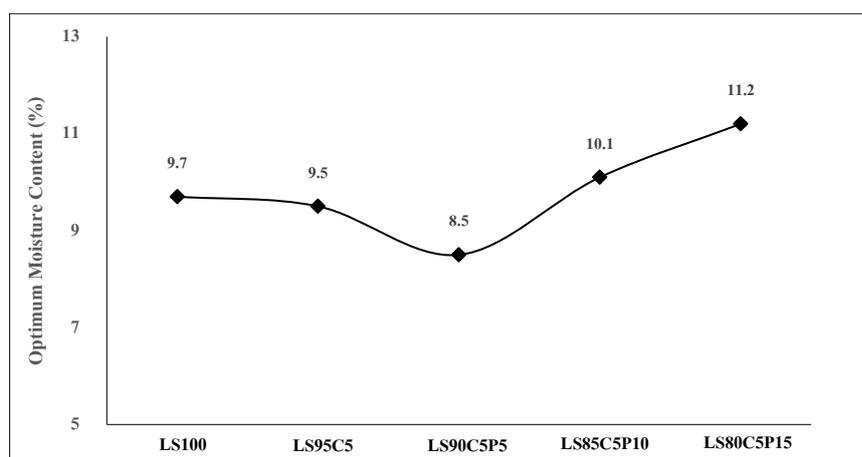
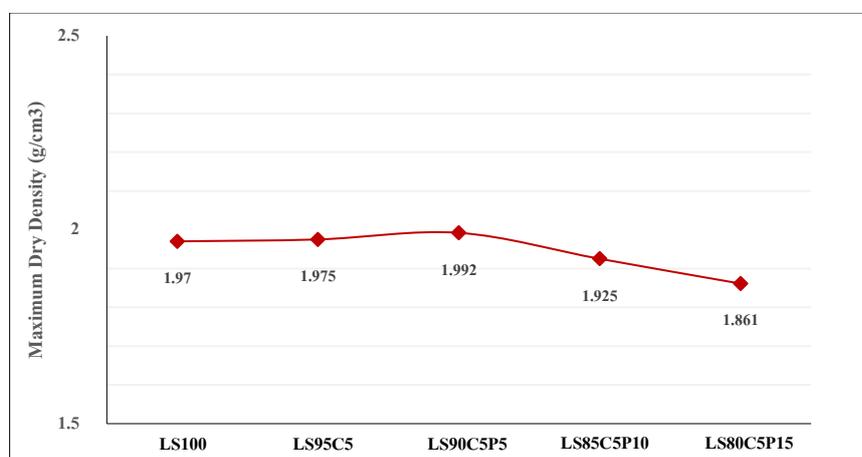
## 3. ผลการทดสอบปริมาณความชื้นเหมาะสม (OMC) และ ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (MDD)

จากผลการทดสอบดังแสดงใน (Table 4) แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของเถ้าปาล์มน้ำมันมีผลกระทบต่อค่าปริมาณความชื้นเหมาะสม โดยจากดินลูกรังเปลามีค่าปริมาณความชื้นเหมาะสม 9.7% แต่เมื่อเพิ่มเถ้าปาล์มน้ำมันเข้าไปจะทำให้ค่าขึ้นไป 11.2% ดังแสดงใน (Figure 7) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Otunyo and Chukuigwe (2018); Onyelowe (2019) โดยการเพิ่มขึ้นของค่าปริมาณความชื้นเหมาะสม เกิดจากที่ตัวปูนซีเมนต์และเถ้าปาล์มน้ำมันมีคุณสมบัติของการดูดซึมน้ำที่ดี จึงทำให้ดินลูกรังผสมปูนซีเมนต์และเถ้าปาล์มน้ำมันใช้ปริมาณของน้ำมากขึ้น และการเพิ่มขึ้นของเถ้าปาล์มน้ำมันมี

ผลกระทบต่อค่าปริมาณความหนาแน่นแห้งสูงสุด โดยค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดของดินลูกรังเท่ากับ 1.970 g/cm<sup>3</sup> เมื่อเพิ่มเถ้าปาล์มน้ำมันเข้าไปแล้วทำให้ค่าลดลงเท่ากับ 1.861 g/cm<sup>3</sup> ดังแสดงใน (Figure 8) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Otunyo and Chukuigwe (2018); Onyelowe (2019) เมื่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันทำให้ค่าความหนาแน่นแห้งลดลง โดยการลดลงของค่าปริมาณความหนาแน่นแห้งสูงสุดเกิดจากที่ตัวปูนซีเมนต์และเถ้าปาล์มน้ำมันได้เข้าไปแทนที่ของดินลูกรังในอัตราส่วนที่มาก จึงทำให้ตัวดินลูกรังมีความหนาแน่นที่ลดลงเมื่ออยู่ในสภาวะที่แห้ง

**Table 4** Optimum Moisture Content and Maximum Dry Density of Lateritic soil and Improved Lateritic soil

Ratio	OMC (%)	MDD (g/cm <sup>3</sup> )
LS100	9.7	1.969
LS95C5	9.5	1.975
LS90C5P5	8.4	1.992
LS85C5P10	10.1	1.926
LS80C5P15	11.2	1.861

**Figure 7** Optimum Moisture Content (OMC) of Lateritic soil and Improved Lateritic soil**Figure 8** Maximum Dry Density (MDD) of Lateritic soil and Improved Lateritic soil

#### 4. ผลการทดสอบค่ากำลังอัด (UCS)

การทดสอบกำลังอัดของวัสดุดินลูกรัง และดินลูกรังที่ปรับปรุงโดยปูนซีเมนต์ และปูนซีเมนต์ผสมเข้าปาล์มน้ำมันในอัตราส่วนที่กำหนด โดยปมในถุงพลาสติกและแช่น้ำเป็นเวลา 2 ชั่วโมงก่อนทำ

การทดสอบ ดังแสดงใน (Table 5) พบว่าค่ากำลังอัดของดินลูกรังที่ผสมด้วยปูนซีเมนต์มีค่าสูงขึ้นตามปริมาณปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น และระยะเวลาการบ่มที่เพิ่มมากขึ้น โดยค่ากำลังอัดที่สูงที่สุดอยู่ที่ 17.5 และ 24.8 ksc ในอัตราส่วน LS95C5 ที่ระยะเวลาการบ่ม 7

และ 28 วันตามลำดับเช่นกัน ดังแสดงใน (Figure 9) ซึ่งมียาค่ามากขึ้นกว่าดินลูกรังที่ไม่ปรับปรุงที่มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 4.8 ksc และดินลูกรังที่ผ่านการปรับปรุงโดยเถ้าปลาล์มน้ำมันและปูนซีเมนต์มีค่ากำลังอัดสูงสุดอยู่ที่ 7.1 และ 31 ksc ในอัตราส่วน LS90C5P5 ที่ระยะเวลาการบ่ม 7 และ 28 วันตามลำดับ ซึ่งมีค่ากำลังอัดสูงกว่าการปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์อย่างเดียวที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน เพราะเมื่อเพิ่มเถ้าปลาล์มน้ำมันที่เป็นวัสดุปอชโซลานที่คล้ายคลึงกับปูนซีเมนต์ทำให้เกิดปฏิกิริยาปอชโซลานยิ่งขึ้นไป แต่ในระยะเวลาการบ่ม 7 วันค่ากำลังอัดของดินลูกรังผสมกับปูนซีเมนต์และเถ้าปลาล์มน้ำมันมีค่าน้อยกว่าดินลูกรังผสมกับปูนซีเมนต์อย่างเดียว แสดงให้เห็นถึงว่าระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาปอชโซลานนั้นใช้เวลาอย่างน้อย 28 วัน และเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าปลาล์มน้ำมันขึ้น ไม่ได้ทำให้ค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นไปด้วย

เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของเถ้าปลาล์มน้ำมันทำให้ดินลูกรังน้อยลง และทำให้แรงยึดระหว่างดินลูกรังและวัสดุปอชโซลานลดลงเช่นกัน ดังแสดงใน (Figure 10) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Otunyo and Chukuigwe (2018), Onyelowe (2019); Oke and Kolawole (2020) ที่ได้ค่าจากการทดสอบกำลังอัดน้อยลงเมื่อมีอัตราส่วนของเถ้าปลาล์มน้ำมันมากเกินไป เมื่อเทียบค่ากำลังอัดของดินลูกรังที่ผ่านการปรับปรุงแล้วกับมาตรฐานชั้นรองพื้นทางดินซีเมนต์ DH-S 206/2564 (DOH, 2021) พบว่าดินลูกรังที่ผ่านการปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ในทุกอัตราส่วนผสมและดินลูกรังผ่านการปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าปลาล์มน้ำมันที่อัตราส่วน LS90C5P5 ที่ผ่านระยะเวลาบ่ม 7 วัน ผ่านเกณฑ์มาตรฐานซึ่งตั้งไว้ที่ 7 ksc ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน

**Table 5** Unconfined Compressive Strength of Improved Lateritic soil

Ratio	UCS (ksc)		
	0 days cured	7 days cured	28 days cured
LS100	4.8	-	-
LS98C2	-	7.7	8.0
LS97C3	-	12.2	13.8
LS96C4	-	12.6	15.9
LS95C5	-	17.5	24.8
LS90C5P5	-	7.1	31.1
LS85C5P10	-	6.9	19.2
LS80C5P15	-	6.7	11.7

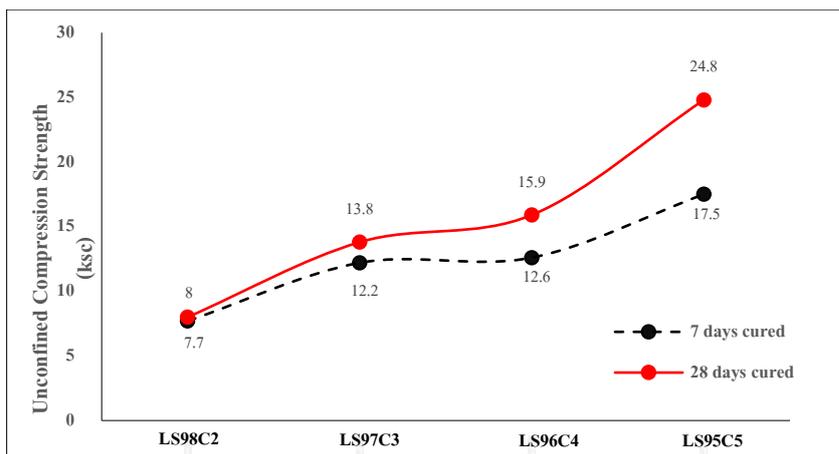


Figure 9 Unconfined Compressive Strength of Lateritic soil improved with Cement

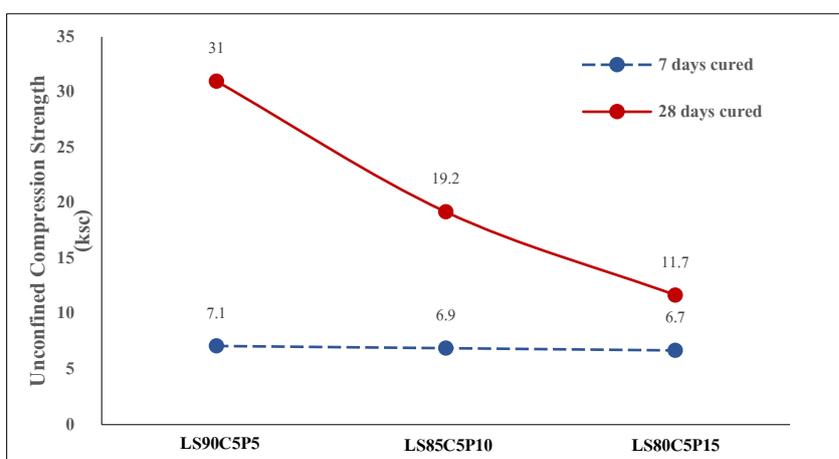


Figure 10 Unconfined Compressive Strength of Lateritic soil improved with Cement and POFA

### 5. ภาพถ่ายโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

จากการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของดินลูกรังด้วยกำลังขยาย 10,000 เท่า (Figure 11) แสดงให้เห็นถึงผลึกดินขาว (Kaolinite) (Ivanic *et al.*, 2015) เรียงตัวซ้อนกันอย่างเป็นระเบียบ จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของดินลูกรังพบว่า มี Silicon Dioxide ถึง 59.96% จากภาพถ่ายของ LS95C5 (Figure 12(A)) ด้วยกำลังขยาย

10,000 เท่า และจากภาพถ่ายของ LS90C5P5 ด้วยกำลังขยาย 10,000 เท่า (Figure 12(B)) และเมื่อเทียบกับ Figure 5 ซึ่งเป็นภาพดินลูกรัง จะแสดงให้เห็นถึงผลึกเอตทริงไทต์ (Ettringite) แทรกขึ้นมาระหว่างเม็ดดิน และช่องว่างระหว่างเม็ดดินลดลง จากการทำปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นจากวัสดุประสานอย่างปูนซีเมนต์และเถ้าปลาล์มน้ำมัน ทำให้ดินลูกรังที่ปรับปรุงโดยปูนซีเมนต์และเถ้าปลาล์มน้ำมันมีกำลังอัดที่สูง



Figure 11 LS100 at the magnification of 10,000x



(A)



(B)

Figure 12 28 days cured LS95C5 (A) and LS90C5P5 (B) at the magnification of 10,000x

## สรุป

ผลจากการทดสอบการปรับปรุงดินลูกรังด้วยปูนซีเมนต์ และเถ้าปลาล์มน้ำมันสามารถทำให้คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินลูกรังมีประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยการเติมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ทำให้ค่ากำลังอัดของดินลูกรังเพิ่มขึ้นตามปริมาณปูนซีเมนต์ และระยะเวลาการบ่มที่เพิ่มขึ้น โดยสูงสุดอยู่ที่ 17.5 และ 24.8 ksc ในอัตราส่วนปูนซีเมนต์ร้อยละ 5 ที่ผ่านการบ่ม 7 และ 28 วันตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าค่ากำลังอัดของดินลูกรังที่ไม่ผ่านการปรับปรุงที่มีค่า

กำลังอัดอยู่ที่ 4.8 ksc ถึง 265% และ 417% ตามลำดับ และการปรับปรุงโดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมกับเถ้าปลาล์มน้ำมันทำให้ค่าปริมาณความชื้นสูงสุดเพิ่มขึ้นจาก 9.7% เป็น 11.2% และทำให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดลดลงจาก 1.970 g/cm<sup>3</sup> เป็น 1.861 g/cm<sup>3</sup> และทำให้มีค่ากำลังอัดสูงสุดอยู่ที่ 31.1 ksc ในอัตราส่วนปูนซีเมนต์ร้อยละ 5 และเถ้าปลาล์มน้ำมันร้อยละ 5 ที่ผ่านการบ่ม 28 วัน โดยเพิ่มขึ้นจากดินลูกรังที่ไม่ผ่านการปรับปรุงที่มีค่ากำลังอัดอยู่ที่ 4.8 ksc และที่ผ่านการปรับปรุงโดยปูนซีเมนต์ร้อยละ 5 ที่มีค่ากำลังอัดอยู่ที่ 24.8 ksc

ที่ผ่านการบ่ม 28 วัน ถึง 546% และ 25% ตามลำดับ แต่ที่ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน ดินลูกรังที่ผ่านการปรับปรุงโดยปูนซีเมนต์และเถ้าปลาล์มน้ำมันมีค่ากำลังอัดสูงสุดอยู่ที่ 7.1 ksc ในอัตราส่วนปูนซีเมนต์ร้อยละ 5 และเถ้าปลาล์มน้ำมันร้อยละ 5 ซึ่งน้อยกว่าดินลูกรังที่ผ่านการปรับปรุงโดยปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียวในทุกอัตราส่วนผสม แสดงให้เห็นว่าระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างดินลูกรังปูนซีเมนต์และเถ้าปลาล์มน้ำมันนั้นใช้เวลาอย่างน้อย 28 วัน และเมื่อปริมาณเถ้าปลาล์มน้ำมันเพิ่มขึ้นทำให้ค่ากำลังอัดลดลงอย่างมากเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของเถ้าปลาล์มน้ำมันทำให้ดินลูกรังน้อยลง และทำให้แรงยึดระหว่างดินลูกรังและวัสดุปอซโซลานลดลงเช่นกัน โดยอัตราส่วนผสมที่แนะนำในการนำไปใช้ในงานก่อสร้างถนน คือ อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ร้อยละ 2 ถึง 5 และอัตราส่วนดินลูกรังร้อยละ 90 ผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 5 และเถ้าปลาล์มน้ำมันร้อยละ 5 ซึ่งมีค่ากำลังอัดผ่านเกณฑ์ชั้นรองพื้นทางดินซีเมนต์ของกรมทางหลวง และจากการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าสามารถนำของเสียจากอุตสาหกรรมชีวมวลอย่างเถ้าปลาล์มน้ำมันมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดได้ เพื่อที่จะได้ลดมลพิษทางอากาศที่เกิดจากเถ้าปลาล์มน้ำมัน และสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายและพื้นที่ฝังกลบได้ ไร่ใดก็ตามควรทดสอบแคลิฟอร์เนียเบร็ริงเรโซของดินลูกรังในอัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ร้อยละ 2 ถึง 5 และอัตราส่วนปูนซีเมนต์ร้อยละ 5 และเถ้าปลาล์มน้ำมันร้อยละ 5 เพื่อนำมาพิจารณาในการนำไปใช้เป็นวัสดุในชั้นรองพื้นทางดินซีเมนต์สำหรับงานก่อสร้างถนนต่อไป

### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สำหรับทุนบัณฑิตศึกษา พ.ศ.2562

และทุนอุดหนุนวิจัย พ.ศ. 2564 บริษัท นามหงส์ น้ำมันปาล์ม จำกัด สำหรับเถ้าปลาล์มน้ำมัน และเจ้าหน้าที่ส่วนตรวจสอบและวิเคราะห์ทางวิศวกรรมสำนักงานทางหลวงที่ 18 ที่ช่วยเหลือในการทำวิจัยครั้งนี้

### เอกสารอ้างอิง

- Ahmad, J., Rahman, A.S.A., Ali, M.R.M. and Rahman, K.F.A. 2011. Peat soil treatment using POFA, pp. 66-70. *In IEEE Colloquium on Humanities, Science and Engineering Research*. Penang, Malaysia.
- Alexander, L.T. and Cady, J.G. 1962. Genesis and hardening of laterite in soils. *Soil Science* 96(1): 7-8.
- ASTM. 2019. **ASTM C618-19 Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in concrete**. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA.
- DOH. 1972a. **Abrasion test Standard (DH-T 202/2515)**. Department of Highways, Ministry of Transport, Bangkok. (in Thai)
- DOH. 1972b. **Atterberg limits test standard (DH-T 102/2515 and 103/2515)**. Department of Highways, Ministry of Transport, Bangkok. (in Thai)
- DOH. 1972c. **Unconfined compressive strength test standard (DH-T 105/2515)**. Department of Highways, Ministry of Transport, Bangkok. (in Thai)

- DOH. 1974a. **Sieve analysis test standard (DH-T 205/2517)**. Department of Highways, Ministry of Transport, Bangkok. (in Thai) Available Source: <https://motoc.mot.go.th/infiras>, March 6, 2023. (in Thai)
- DOH. 1974b. **Modified proctor test standard (DH-T 108/2517)**. Department of Highways, Ministry of Transport, Bangkok. (in Thai) Nnochiri, E.S., Ogundipe, O.M. and Oluwatuyi, O.E. 2017. Effects of palm kernel shell ash on lime-stabilized lateritic soil. **Slovak Journal of Civil Engineering** 25(3): 1-7.
- DOH. 1974c. **California bearing ratio test standard (DH-T 109/2517)**. Department of Highways, Ministry of Transport, Bangkok. (in Thai) Office of Agricultural Economics. 2020. **Information on the production of agricultural products**. Palm oil product details. Available Source: <https://www.oae.go.th>, March 6, 2023. (in Thai)
- DOH. 1989. **Soil aggregate subbase standard for road construction (DH-S 205/2532)**. Department of Highways, Ministry of Transport, Bangkok. (in Thai) Oke, J. and Kolawole, O. 2020. Effects of Compactive Effort on Laterite -Oil Palm Empty Fruit Bunch Ash Mixture. **Covenant Journal of Engineering Technology** 4(1): 30-48.
- DOH. 2021. **Soil - cement subbase standard for road construction (DH-S 206/2564)**. Department of Highways, Ministry of Transport, Bangkok. (in Thai) Onyelowe, K.C. 2019. Nanosized palm bunch ash (NPBA) stabilization of lateritic soil for construction purposes. **International Journal of Geotechnical Engineering** 13(1): 83-91.
- Ivanic, M., Vdovic, N., Barreto, S.D.B., Bermanec, V. and Sondi, I. 2015. Mineralogy, surface properties and electrokinetic behavior of kaolin clays from the naturally occurring pegmatite deposits. **Geologia Croatica** 68(2): 139-145.
- Jaturapitakkul, C. 2012. Biomass ash from industry: Problems, Limitations and Applications. **Concrete Journal TCA e-magazine** 17: 14-23. (in Thai) Otunyo, A.W. and Chukuigwe, C.C. 2018. Investigation of the impact of palm bunch ash on the stabilization of poor lateritic soil. **Nigerian Journal of Technology** 37(3): 600-604.
- Land Development Department. 2020. **Management of laterite soil**. LDD E-library. Available Source: <http://library. ldd.go.th>, February 16, 2020. (in Thai) Phudphong, W. and Hormdee, D. 2022. Utilization of geopolymer on improvement of loess soil using palm oil fuel ash and granulated blast furnace slag. **Engineering Journal of Research and Development** 33(1): 49-59.
- Ministry of Transport Operation Center. 2021. **Road infrastructure**. Road infrastructure. Pourakbar, S., Asadi, A., Huat, B.B.K. and Fasihnikoutalab, M.H. 2015. Soil stabilization with alkali-activated agro-waste. **ICE Environmental Geotechnics** 2(6): 359-370.

Rakson, S., Chaturapitakkul, C., Chucheeepsakul, S.  
and Chindaprasert, P. 2005. Use of palm  
oil fuel ash in concrete. **Engineering  
Research and development Journal**  
16(2): 38-43. (in Thai)

# การพัฒนาระบบอบแห้งด้วยสุญญากาศแบบพัลส์ร่วมกับรังสีอินฟราเรดต้นทุนต่ำ

## Development of a Low-Cost Pulsed Vacuum Infrared (PVI) Drying System

วัชรพล ชยประเสริฐ<sup>1</sup> ศิวลักษณ์ ปฐวีรัตน์<sup>1</sup> และ ชุกเกียรติ โชติกเสถียร<sup>2\*</sup>

Watcharapol Chayaprasert<sup>1</sup>, Siwalak Pathaveerat<sup>1</sup> and Chukiat Chotikasatian<sup>2\*</sup>

Received: 6 September 2023, Revised: 12 November 2023, Accepted: 20 December 2023

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ ผู้วิจัยต้องการที่จะพัฒนาระบบอบแห้งด้วยสุญญากาศแบบพัลส์ร่วมกับอินฟราเรด โดยใช้วัสดุและอุปกรณ์ต้นทุนต่ำ เพื่อเป็นต้นแบบให้ผู้สนใจนำไปพัฒนาสร้างใช้งานได้ด้วยตนเอง การทำงานของสุญญากาศแบบพัลส์ร่วมกับการให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรด (Pulsed vacuum infrared - PVI) ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ถูกใช้ในการควบคุม โซลินอยด์วาล์วอากาศ, โซลินอยด์วาล์วสุญญากาศ, หลอดไฟอินฟราเรด และปั๊มสุญญากาศ ทดสอบอบแห้งตะไคร้แห้งที่อัตราส่วนพัลส์ (ระยะเวลาช่วงรักษาสุญญากาศ ( $t_{VP}$ ): ระยะเวลาช่วงคงความดันบรรยากาศ ( $t_{AP}$ )) เท่ากับ 8:4, 13:4 และ 18:4 ตามลำดับ ปริมาณความชื้น, น้ำหนักของตะไคร้แห้ง และค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) ของระบบถูกบันทึกในระหว่างการทดลอง ในการทดลองพบว่า ที่อัตราส่วนพัลส์  $t_{VP}:t_{AP}$  เท่ากับ 8:4 เป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดกับการอบแห้ง โดยตะไคร้แห้งมีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 55%<sub>d.b.</sub> ระบบใช้ระยะเวลาอบแห้งเพียง 180 min และผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความชื้นสุดท้ายต่ำกว่า 11%<sub>d.b.</sub> ค่าเฉลี่ยความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีค่า 0.019 MJ/g<sub>water</sub> และมีค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าประมาณ 0.6 kW·h/batch งบประมาณในการสร้างเครื่องต้นแบบคิดเป็น 10,450 baht และมีระยะเวลาในการคืนทุนเท่ากับ 6.48 year ผลการทดลองทั้งหมดแสดงให้เห็นว่า ระบบอบแห้งด้วยสุญญากาศแบบพัลส์ร่วมกับรังสีอินฟราเรดต้นทุนต่ำสามารถอบแห้งผลิตภัณฑ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม การเพิ่มจำนวนชั้นและปริมาตรภายในโครงสร้างระบบสุญญากาศ จะทำให้ปริมาณผลผลิตจากการอบแห้งมีปริมาณมากขึ้น

**คำสำคัญ:** การอบแห้ง, สุญญากาศแบบพัลส์, อินฟราเรด, ตะไคร้

<sup>1</sup> ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม 73140

<sup>1</sup> Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaeng Saen, Kasetsart University, Kamphaeng Saen Campus, Kamphaeng Saen, Nakhon Pathom 73140, Thailand.

<sup>2</sup> สาขาวิชาอุตสาหกรรมศิลป์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม อำเภอเมืองนครปฐม จังหวัดนครปฐม 73000

<sup>2</sup> Industrial Arts, Faculty of Science and Technology, Nakhon Pathom Rajabhat University, Muang, Nakhon Pathom 73000, Thailand.

\* ผู้มีพันธะประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): chukiat@npru.ac.th

## ABSTRACT

In this study, a low-cost pulsed vacuum infrared (PVI) drying system was developed using locally available parts, allowing interested individuals to build and use it themselves. The ESP32 microcontroller, in conjunction with solenoid valves, infrared lamps and vacuum pumps, monitored and controlled the PVI drying process. The product used for testing the system was sliced lemongrass. The ratios between the time periods of vacuum and atmospheric pressures ( $t_{VP}:t_{AP}$  pulse ratios) used in the tests were 8:4, 13:4 and 18:4. The specific energy consumption (SEC) of the system, as well as the weight and moisture content of the dried product, were recorded. It was found that the  $t_{VP}:t_{AP}$  pulse ratio of 8:4 was optimal for drying with the developed system. The dried lemongrass had a final moisture content of less than 11%<sub>db</sub>, despite having the highest initial moisture content (roughly 55%<sub>db</sub>) and the quickest drying time (roughly 180 min). The electrical energy consumption was roughly 0.6 kW·h, and the mean SEC was 0.019 MJ/g<sub>water</sub>. The total cost of the parts and materials was 10,450 baht and the payback period was 6.48 years. With the developed system, drying of agricultural products can be done efficiently using PVI. Nevertheless, the drying yield can be increased by increasing the number of trays and volume of the vacuum chamber.

**Key words:** drying, pulsed vacuum, infrared, lemongrass

### บทนำ

การอบแห้งเป็นกระบวนการสำคัญในอุตสาหกรรมหลายประเภทรวมถึงการแปรรูปและถนอมอาหาร ปัจจุบัน สมุนไพร (Herb) เป็นพืชที่นิยมนำมาใช้ทำเป็นชาสมุนไพรสำหรับการบริโภค โดยองค์ประกอบภายในสมุนไพรจะมีปริมาณน้ำมันหอมระเหย (Essential oil) เช่น ตะไคร้, ใบบัวบก, สะระแหน่, จิง เป็นต้น (Syafitri *et al.*, 2018; Thamkaew *et al.*, 2021) หลายงานวิจัยได้แสดงการเปรียบเทียบปริมาณน้ำมันหอมระเหยจากตะไคร้ซึ่งได้จากวิธีการอบแห้งที่แตกต่างกัน เช่น ตากแห้งด้วยแสงแดด, การตากแห้งในที่ร่ม, การอบแห้งด้วยลมร้อน, การแผ่รังสีอินฟราเรด เป็นต้น การอบแห้งด้วยลมร้อนและการแผ่รังสีอินฟราเรดจะทำให้ได้ปริมาณน้ำมันหอมระเหยสูงกว่าการตากแห้งด้วยแสงแดดและการตากแห้งในที่ร่ม (Mohamed Hanaa

*et al.*, 2012; Dutta *et al.*, 2014; Setareh *et al.*, 2023) นอกจากนี้ การใช้อุณหภูมิสูงในการอบแห้งมักจะทำให้เกิดการสลายของน้ำมันหอมระเหย และมีความเสี่ยงต่อการเกิดรอยแตกหักของสมุนไพรซึ่งนำไปสู่การระเหยของน้ำมันหอมระเหยได้เช่นกัน (Argyropoulos and Müller, 2014) Tirawanichakul *et al.* (2013) สรุปผลการทดลองได้ว่าตะไคร้ที่อบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดที่อุณหภูมิไม่เกิน 60°C จะมีกลิ่นหอมมากกว่าการตากแห้งด้วยแสงแดด อย่างไรก็ตาม มีงานวิจัยที่ให้ผลในทางตรงกันข้าม ว่าการทำแห้งใบ Lemon myrtle ด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิการอบแห้ง 50°C ส่งผลให้ปริมาณซิทรัล (Citral) ซึ่งเป็นสารที่พบได้ในส่วนประกอบของน้ำมันหอมระเหย มีปริมาณสูงกว่าที่อุณหภูมิของการอบแห้ง 30°C และ 40°C (Buchailot *et al.*, 2009) นอกจากนี้ การลดระยะเวลาในการทำแห้งยังส่งผลดี

ต่อองค์ประกอบทางเคมีและคุณภาพของพืช (Figiel and Michalska, 2016) โดย Tirawanichakul *et al.* (2013) พบว่าการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดใช้ระยะเวลาสั้นกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อน 30% อย่างไรก็ตาม วิธีการเหล่านี้มีข้อจำกัดเนื่องจากใช้เวลานานในการอบแห้ง การกระจายความร้อนที่ไม่สม่ำเสมอ และการใช้พลังงานสูง เทคโนโลยีการอบแห้งด้วยสุญญากาศแบบพัลส์ร่วมกับการให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรด (Pulsed vacuum infrared - PVI) ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อแก้ไขข้อจำกัดเหล่านี้ ในการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด ฮีตเตอร์อินฟราเรดจะแผ่รังสีอินฟราเรดไปยังผลิตภัณฑ์ที่ต้องการอบแห้ง ซึ่งผลิตภัณฑ์จะมีอุณหภูมิสูงขึ้นเมื่อดูดซับรังสีอินฟราเรด และทำให้ความชื้นภายในระเหยออกไป เนื่องจากรังสีอินฟราเรดทำให้วัสดุร้อนขึ้นโดยตรง จึงใช้พลังงานน้อยกว่าและยังเป็นที่ระบอบการที่รวดเร็วกว่าวิธีการอบแห้งที่อาศัยการพาความร้อนหรือการนำความร้อน การอบแห้งด้วยสุญญากาศแบบพัลส์เป็นการทำให้ ผลิตภัณฑ์อบแห้งอยู่ในสถานะสุญญากาศสลับกับสถานะความดันบรรยากาศสลับกันอย่างต่อเนื่องเป็นวัฏจักร ในช่วงสถานะสุญญากาศ ความชื้นภายในห้องอบแห้งจะลดลง ซึ่งทำให้ความชื้นภายในผลิตภัณฑ์เปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นก๊าซและถ่ายเทออกจากผลิตภัณฑ์ไปเป็นไอน้ำอยู่ในบรรยากาศภายในห้องอบแห้ง จากนั้นไอน้ำจะถูกกำจัดออกจากห้องอบแห้งด้วยปั๊มสุญญากาศ การเปลี่ยนแปลงความดันในห้องอบแห้งระหว่างสุญญากาศกับความดันบรรยากาศทำให้ช่องว่างหรือรูพรุนขนาดเล็กในผลิตภัณฑ์ ซึ่งมีลักษณะเป็นวัสดุพรุน (Porous media) ขยายตัวส่งผลให้น้ำภายในสามารถแพร่ออกไปยังผิวของผลิตภัณฑ์ได้รวดเร็วขึ้น นำไปสู่อัตราการอบแห้งที่สูงขึ้น (Manangan and Witinantakit, 2020) การอบแห้งแบบ PVI สามารถทำได้ที่อุณหภูมิต่ำจึงเหมาะสมสำหรับ

ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการลดการสูญเสียปริมาณองค์ประกอบทางเคมีบางชนิด

การอบแห้งแบบ PVI เป็นเทคนิคการอบแห้งที่รวมข้อได้เปรียบของการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดและการอบแห้งด้วยสุญญากาศแบบพัลส์เข้าไว้ด้วยกัน ซึ่งใช้การแผ่รังสีอินฟราเรดในช่วงเวลาสั้น ๆ ในสถานะสุญญากาศเพื่อขจัดความชื้นออกจากผลิตภัณฑ์ Wang *et al.* (2018); Jiang *et al.* (2022); Xie *et al.* (2017a) ใช้เครื่องอบแห้งและวิธีการทดลองคล้ายกัน ทำการศึกษาการอบแห้งเลมอน (*Citrus limon* (L.) Burm. f) หั่นแว่น, สับปะรด (*Ananas comosus* L.) หั่นแว่น และโกจิเบอร์รี่ (*Lycium barbarum* L.) ตามลำดับ ทั้งสามการศึกษาได้ข้อสรุปเป็นไปในทิศทางเดียวกันคือ เทคโนโลยีอบแห้งแบบ PVI สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้งได้ ในขณะที่ยังคงรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้อย่างเหมาะสม Manangan and Witinantakit (2020) ทดสอบอบแห้งดอกบัวด้วยวิธีการแบบ PVI โดยออกแบบเครื่องอบแห้งที่ประกอบด้วยห้องอบแห้งทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 cm สูง 60 cm ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม, ปั๊มสุญญากาศขนาด 350 W, เซ็นเซอร์วัดความดัน, โซลินอยด์วาล์ว, หลอดไฟอินฟราเรดจำนวน 4 หลอด ให้กำลัง 250 W ต่อหลอด, เทอร์โมคัปเปิล, อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ PID (proportional-integral-derivative temperature controller), แผงสวิทช์ควบคุม และอุปกรณ์ควบคุม PLC (programmable logic controller) ผลการทดลองอัตราส่วนพัลส์ (i.e., ระยะเวลาช่วงรักษาสุญญากาศ ( $t_{vp}$ ) : ระยะเวลาช่วงคงความดันบรรยากาศ ( $t_{ap}$ )) ที่ 15:4 ใช้เวลาในการอบแห้ง 8 h ซึ่งมีค่าน้อยที่สุดและมีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำสุดที่ 0.74 MJ/g<sub>water</sub> Zhang *et al.* (2020) ทำการออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งแบบ PVI ซึ่งมีห้องอบแห้งทรงเหลี่ยมทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมขนาดกว้าง 80 cm

ยาว 100 cm และสูง 150 cm จากนั้น จึงทำการทดสอบประสิทธิภาพการอบแห้งผลองุ่นและโกจิเบอร์รี่ เครื่องอบแห้งยังประกอบด้วยชุดอุปกรณ์ให้ความร้อน, บั๊มสุญญากาศ, ชุดอุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิ ความดันและความชื้นสัมพัทธ์, ชุดอุปกรณ์บันทึกข้อมูล และชุดอุปกรณ์ควบคุมระบบ ผู้ใช้งานสามารถควบคุมเครื่องด้วยการสั่งงานผ่านจอสัมผัส (touch screen) งานวิจัยดังกล่าวพบว่า ระยะเวลาใน ช่วงสภาวะความดันบรรยากาศและความดันสุญญากาศ และอุณหภูมิอบแห้ง ส่งผลกระทบท่อระยะเวลาอบแห้งและคุณภาพของโกจิเบอร์รี่อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งการอบแห้งผลองุ่นและโกจิเบอร์รี่ที่อุณหภูมิ 65°C และที่อัตราส่วนพัลส์เป็น 15:4 และ 15:2 ตามลำดับ เป็นสภาวะที่ให้ผลการอบแห้งดีที่สุด โดยมีลักษณะของสีผลิตภัณฑ์ที่ดีกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อน

งานวิจัยต่าง ๆ ที่กล่าวถึงข้างต้นชี้ให้เห็นว่าการอบแห้งแบบ PVI สามารถใช้กับผลิตภัณฑ์ได้หลากหลายชนิด และเป็นเทคโนโลยีที่มีศักยภาพ ซึ่งได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตาม เทคโนโลยีอบแห้งดังกล่าวจำเป็นต้องมีการควบคุมอุณหภูมิและสุญญากาศอย่างเป็นวัฏจักร ซึ่งจะเห็นได้ว่าอุปกรณ์สำคัญที่จำเป็นสำหรับการทำงานของระบบอบแห้ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งชุดอุปกรณ์ควบคุมระบบ เช่น PLC เป็นอุปกรณ์ที่มีราคาค่อนข้างสูง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบอบแห้งด้วยสุญญากาศแบบพัลส์ร่วมกับอินฟราเรด โดยใช้วัสดุและอุปกรณ์ต้นทุนต่ำ เพื่อเป็นต้นแบบให้ผู้สนใจสามารถพัฒนาสร้างใช้งานได้ด้วยตนเอง

## วิธีดำเนินการวิจัย

ในการพัฒนาระบบอบแห้งในการศึกษานี้ ผู้วิจัยมุ่งหวังให้ระบบมีต้นทุนต่ำและสามารถนำองค์ความรู้ไปพัฒนาต่อได้ โดยได้กำหนดเงื่อนไขการออกแบบโดยรวม (Overall design criteria) ไว้คือ

1) ระบบต้องสามารถควบคุมอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งให้อยู่ระหว่าง 55 - 65°C ซึ่งเป็นช่วงเหมาะสมสำหรับการอบแห้งผลิตภัณฑ์เกษตรแปรรูปที่ไม่ทนความร้อน, 2) ระบบต้องสามารถอบแห้งตะไคร้ (*Cymbopogon citratus*) หั่นเป็นแว่นปริมาณไม่เกิน 200 g ซึ่งมีความชื้นไม่เกิน 50%<sub>db</sub> ให้ลดได้ต่ำกว่า 15%<sub>db</sub> ภายในเวลาไม่เกิน 3 h และ 3) งบประมาณรวมทั้งระบบไม่เกิน 15,000 baht เนื่องด้วยในบทความวิจัยต่าง ๆ (Wang *et al.*, 2018; Manangan and Witinantakit, 2020; Pei *et al.*, 2021) จะใช้คำว่า Pulsed vacuum drying เมื่อกล่าวถึง การอบแห้งในสภาวะสุญญากาศบางส่วน (Partial vacuum) ดังนั้นคำว่า “สุญญากาศ” ตลอดทั้งบทความวิจัยนี้หมายถึง Partial vacuum เท่านั้น

## 1. โครงสร้างและองค์ประกอบของระบบอบแห้ง

Figure 1 แผนภาพ โครงสร้างและ องค์ประกอบของระบบอบแห้งแบบ PVI หลอดไฟอินฟราเรดขนาด 250 W จำนวน 2 หลอดถูกติดตั้งในตำแหน่งตรงข้ามกันในกล่องไม้อัดเคลือบสีดำทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากกว้าง 52 cm ยาว 84 cm และสูง 52 cm หลอดไฟอยู่สูงจากพื้นกล่อง 40 cm โถแก้ว (Desiccator) ปริมาณ 9,500 cm<sup>3</sup> ทำหน้าที่เป็นห้องอบแห้งสุญญากาศ (Vacuum drying chamber) ถูกจัดวางที่กึ่งกลางภายในกล่อง ภายในโถแก้วมีฉาดตะแกรงสำหรับวางผลิตภัณฑ์อบแห้ง ท่อลม PU (Polyurethane) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 6.5 mm ถูกสอดผ่านจุกยาง (Rubber stopper) ที่ฝาโถแก้ว เซ็นเซอร์ (DS18B20) ทำหน้าที่วัดอุณหภูมิภายในห้องอบแห้ง ซึ่งสายสัญญาณของเซ็นเซอร์ถูกสอดผ่านจุกยางไปเชื่อมต่อเข้ากับกล่องควบคุม (Control box) ซึ่งถูกติดตั้งที่ผนังด้านนอกกล่องไม้ ผู้ใช้งานสามารถทราบความดันในห้องอบแห้งได้จากเกจวัดความดันสุญญากาศ (Vacuum pressure gauge) ซึ่งติดตั้งอยู่บนบั๊มสุญญากาศขนาด 1/3 HP

(VE225N, Value Mechanical & Electrical Product Co. Ltd., Zhejiang, China) เมื่อโซลินอยด์วาล์วอากาศเปิดออก ในขณะที่โซลินอยด์วาล์วสุญญากาศปิดอยู่ ห้องอบแห้งมีสถานะความดันบรรยากาศ ในทางตรงกันข้าม เมื่อปั๊มสุญญากาศทำงานและวาล์วสุญญากาศเปิดออกในขณะที่วาล์วอากาศปิดอยู่

ห้องอบแห้งมีสถานะสุญญากาศ ห้องควบแน่น (Condenser) เป็นขวดแก้วในอ่างน้ำแข็ง อากาศที่ถูกปั๊มดูดจากห้องอบแห้งจะผ่านห้องควบแน่นก่อนเข้าสู่ปั๊มและออกสู่บรรยากาศ ไอน้ำในอากาศจากห้องอบแห้งจะควบแน่นเป็นของเหลวในห้องควบแน่น

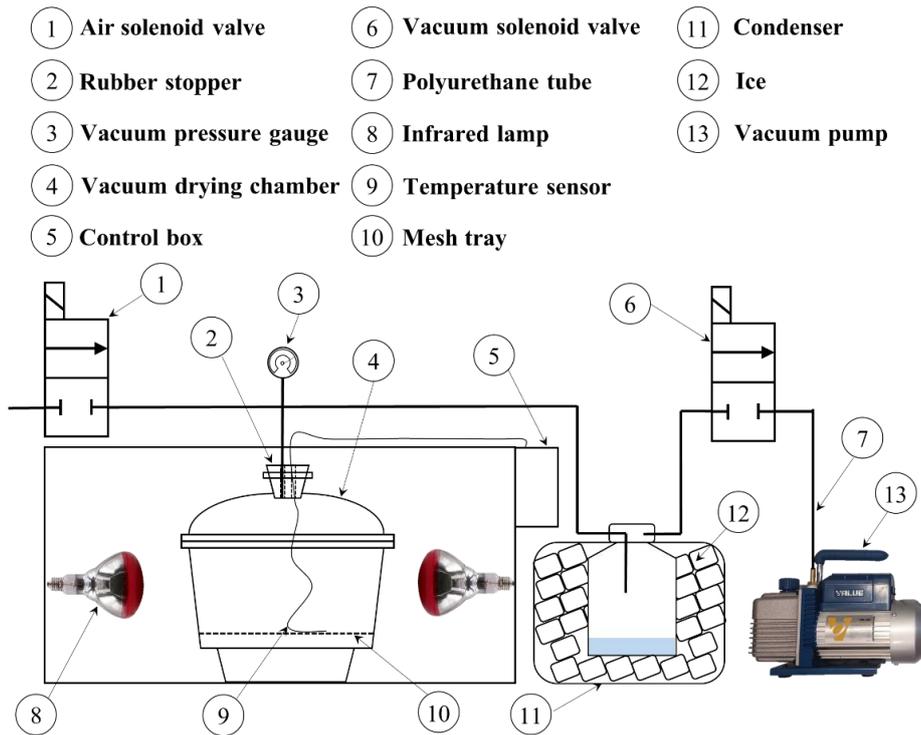


Figure 1 Schematic of the PVI drying system.

## 2. วงจรไฟฟ้าและการควบคุมอุปกรณ์

Figure 2 แผนภาพวงจรไฟฟ้าสำหรับเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่างๆ ในระบบอบแห้ง ในส่วนของวงจรแรงดันต่ำ (Low-voltage circuit) ซึ่งถูกติดตั้งในกล่องควบคุม (Control box ใน Figure 1) มีแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 12 VDC (12 VDC power supply) เป็นแหล่งพลังงานให้กับโซลินอยด์วาล์วอากาศ, โซลินอยด์วาล์วสุญญากาศ และตัวลดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (LM2596) จำนวน 2 ตัว แรงดันไฟฟ้า 12 VDC จะถูกลดลงเป็น 3 VDC และ 5 VDC แรงดัน 3 VDC ถูกจ่ายให้กับบอร์ดประมวลผล

ซึ่งมีไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 (ESP32-WROOM32, Espressif Systems Co. Ltd., Shanghai, China) เป็นหน่วยประมวลผลกลางและบอร์ดรีเลย์ 4 ช่อง แรงดัน 5 VDC ถูกจ่ายให้กับบอร์ดรีเลย์ 1 ช่อง, เช่น เซอร์วิคิตอสมิก (DS18B20), บอร์ด RTC (Real time clock) (DS3231), หน้าจอ LCD (LCD1602+1°C) และ โซลิดสเตตรีเลย์ (Solid state relay) (SSR-40 DA, Fotek Controls Co. Ltd., Taipei, Taiwan) ในส่วนของวงจรแรงดันสูง (High-voltage circuit) ประกอบด้วยหลอดไฟอินฟราเรด และปั๊มสุญญากาศ ซึ่งใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 1-phase 220 VAC

Figure 3 แผนผังเงื่อนไขการควบคุมระบบอบแห้ง ซึ่งประกอบด้วยแผนผังการควบคุมการให้ความร้อน (Figure 3a) และแผนผังการควบคุมการทำสุญญากาศ (Figure 3b) แยกอิสระต่อกัน ในการควบคุมการให้ความร้อน เมื่อระบบอบแห้งเริ่มทำงานระบบจะวัดและแสดงอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งบนหน้าจอ LCD เมื่อระบบตรวจพบว่าอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งต่ำกว่า  $60^{\circ}\text{C}$  หลอดไฟอินฟราเรดจะถูกเปิดให้ส่องสว่างเป็นเวลา 2 min แล้วจึงดับลงโดยอัตโนมัติ ในการควบคุมการทำสุญญากาศ ปั๊มและโซลินอยด์วาล์วจะถูกควบคุมการทำงานให้สร้างวัฏจักรการทำสุญญากาศแบบพัลส์ดังกล่าวจะทำให้ความดันภายในห้องอบแห้งเปลี่ยนแปลงดังกราฟใน Figure 4 โดยใน 1 วัฏจักรประกอบด้วย 4 ช่วงการทำงานได้แก่

1. ช่วงลดความดัน หรือ ช่วงเวลา  $t_s$  เป็นช่วงที่ระบบอบแห้งลดความดันในห้องอบแห้งจากความดันบรรยากาศ ( $P_A$ ) ลงเป็นสุญญากาศ ( $P_V$ ) โดยสั่งงานให้โซลินอยด์วาล์วสุญญากาศเปิด, ปั๊มทำงาน และโซลินอยด์วาล์วอากาศปิด ในงานวิจัยนี้

กำหนดให้ช่วงเวลาลดความดันเท่ากับ 15 s ในทุกเงื่อนไขการทดสอบ

2. ช่วงรักษาสุญญากาศ หรือ ช่วงเวลา  $t_{VP}$  เป็นช่วงที่โซลินอยด์วาล์วทั้ง 2 ตัวปิด และปั๊มหยุดการทำงาน โดยที่ความดันในห้องอบแห้งจะถูกรักษาให้อยู่ในสภาวะสุญญากาศ ซึ่งในงานวิจัยนี้ความดันเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง -57.0 ถึง -46.2 kPa

3. ช่วงกลับสู่บรรยากาศ หรือ ช่วงเวลา  $t_u$  เป็นช่วงที่โซลินอยด์วาล์วอากาศเปิด ในขณะที่โซลินอยด์วาล์วสุญญากาศปิด และปั๊มยังคงไม่ทำงาน ทำให้ความดันในห้องอบแห้งเพิ่มขึ้นกลับเข้าสู่ความดันบรรยากาศ เวลาที่ความดันในห้องอบแห้งกลับสู่ความดันบรรยากาศในทุกเงื่อนไขการทดลองอยู่ที่ 3 s

4. ช่วงคงความดันบรรยากาศ หรือ ช่วงเวลา  $t_{AP}$  เป็นช่วงที่ความดันในห้องอบแห้งถูกรักษาไว้ที่ความดันบรรยากาศ ในงานวิจัยนี้กำหนดให้ช่วงความดันบรรยากาศเท่ากับ 3 min 57 s ในทุกเงื่อนไขการทดสอบ ดังนั้น ที่เงื่อนไขการทดสอบอัตราส่วนพัลส์  $t_{VP}:t_{AP}$  เท่ากับ 8:4, 13:4 และ 18:4 ช่วงรักษาสุญญากาศ ( $t_{VP}$ ) จะเท่ากับ 7 min 45 s, 12 min 45 s และ 17 min 45 s ตามลำดับ

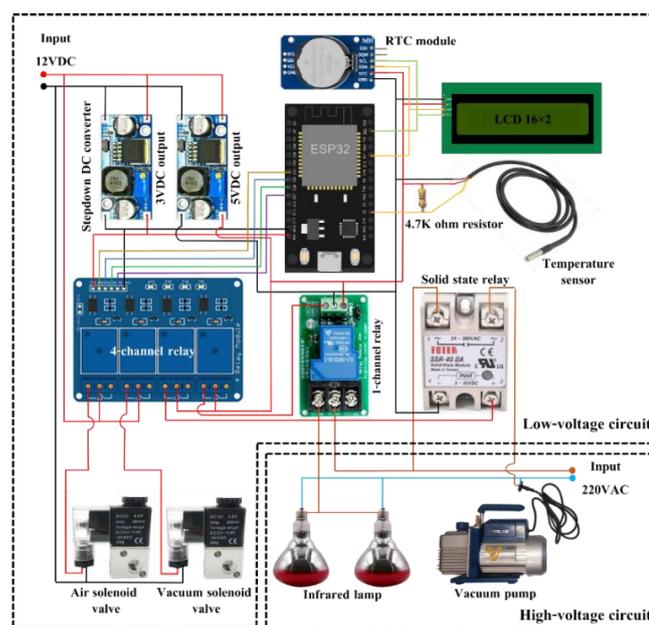


Figure 2 Wiring diagram of electrical components of the PVI drying system.

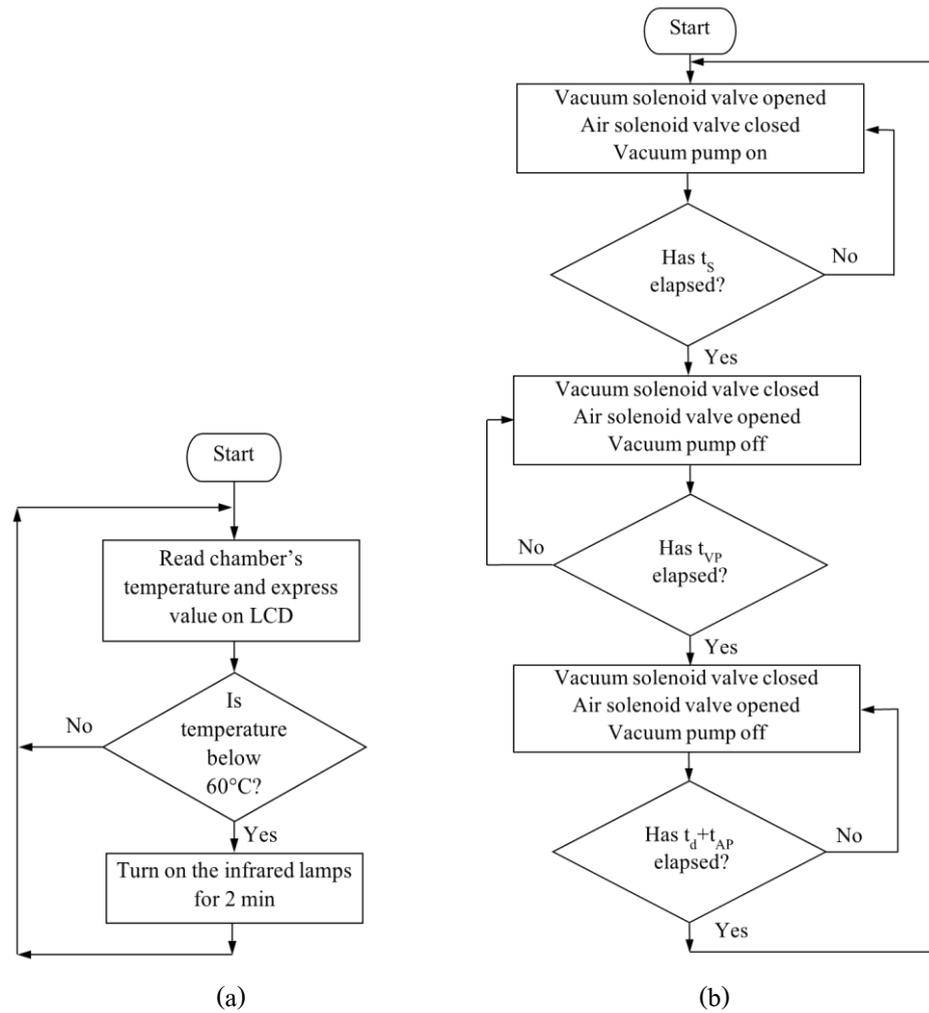


Figure 3 Flow chart of the (a) temperature and (b) vacuum control schemes.

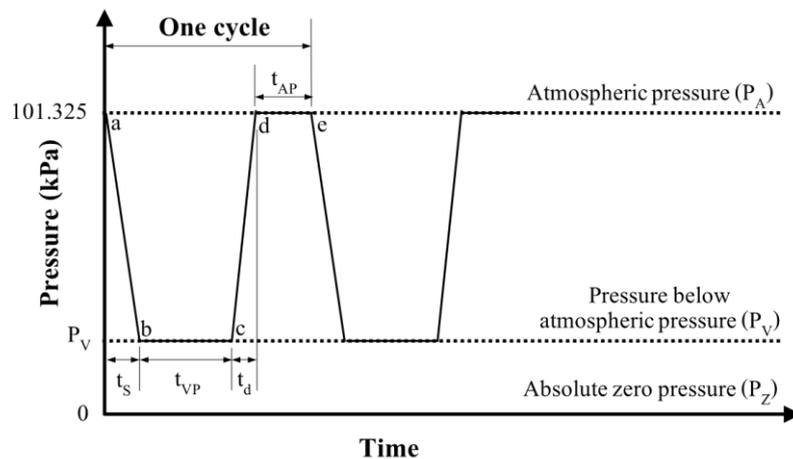


Figure 4 Pressure cycle diagram of the pulsed vacuum drying process in which a cycle consists of evacuation ( $t_s$ ), vacuum-holding ( $t_{VP}$ ), releasing ( $t_d$ ) and atmospheric-pressure ( $t_{AP}$ ) periods. (Adapted from Zhou *et al.* (2022))

### 3. แผนการทดสอบและประเมินสมรรถนะของระบบ

งานวิจัยนี้เลือกใช้ตะไคร้ (*Cymbopogon citratus*) เป็นตัวอย่างผลิตภัณฑ์อบแห้ง ทำการทดสอบและประเมินสมรรถนะของระบบอบแห้ง PVI โดยการอบแห้งตะไคร้หั่นที่ 3 อัตราส่วนพัลส์  $t_{VP}:t_{AP}$  เท่ากับ 8:4, 13:4 และ 18:4 อย่างละ 3 ชั่วโมงเปรียบเทียบกับเงื่อนไขการตากแห้งด้วยแสงแดด ต้นตะไคร้สดถูกชั่งจากตลาดในพื้นที่ อ.บางแพ จ.ราชบุรี ต้นตะไคร้จะถูกล้างด้วยน้ำประปา, ซับด้วยกระดาษทิชชู และผึ่งไว้ให้แห้งในสภาวะห้องประมาณ 30 min จากนั้น จะถูกหั่นเป็นแว่นแต่ละชิ้นหนา 2 - 3 mm โดยเริ่มหั่นจากส่วนโคนเป็นระยะประมาณ 20 cm ต้นตะไคร้จะถูกชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 2 ตำแหน่ง (WT2002N, Want Balance Instrument Co. Ltd., Jiangsu, China) ให้ได้ 150 g ซึ่งจะถูกใช้เป็นตัวอย่างเป็นการทดสอบอบแห้ง 1 ชั่วโมง ซึ่งจะถูกวางกระจายบนถาดตะแกรง (Figure 1) และจะถูกวัดความชื้นด้วยเครื่องวัดความชื้น (Electromagnetic moisture meter) (Smart

$$\text{Moisture ratio} = \frac{M_t}{M_0} \quad (2)$$

ในส่วนการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบอบแห้ง PVI ผู้วิจัยกำหนดพารามิเตอร์สำหรับการศึกษาเปรียบเทียบได้แก่ 1. อัตราการทำแห้ง (Drying rate,  $\text{g}_{\text{water}}/\text{g}_{\text{dry matter}} \cdot \text{min}$ ) ของตะไคร้ซึ่งคำนวณได้ตามสมการ (3) (Demiray and Tulek, 2012)

$$\text{Drying rate} = \frac{M_{t+dt} - M_t}{dt} \quad (3)$$

โดยที่  $M_{t+dt}$  คือ ค่าความชื้นของตะไคร้ที่เวลา  $t+dt$  (%<sub>db.</sub>) และ  $dt$  คือ ช่วงเวลาที่เพิ่มขึ้น (min) 2. ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy

Sensor AS981, Dongguan Wanchuang Electronic Products Co., Ltd, Dongguan, China) ทำการอบแห้งด้วยอัตราส่วนพัลส์ที่กำหนดจนกระทั่งวัดความชื้นต้นตะไคร้หั่นได้ต่ำกว่า 11%<sub>db.</sub> ในขณะที่อบแห้งในทุก ๆ วัฏจักรการทำสุญญากาศ ช่วงเวลาคงความดันบรรยากาศ  $t_{AP}$  ผู้วิจัยเปิดฝาท้องอบแห้งเพื่อวัดความชื้นของต้นตะไคร้ด้วยเครื่องวัดความชื้น การคำนวณหาอัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio) สามารถประยุกต์ใช้สมการ (1)

$$\text{Moisture ratio} = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (1)$$

โดยที่  $M_t$  คือ ค่าความชื้นของตะไคร้ที่เวลา  $t$  (%<sub>db.</sub>),  $M_0$  คือ ค่าความชื้นเริ่มต้นของตะไคร้ (%<sub>db.</sub>) และ  $M_e$  คือ ค่าความชื้นสมดุลของตะไคร้ (%<sub>db.</sub>) เนื่องจากค่า  $M_e$  มีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับ  $M_t$  และ  $M_0$  (Deng *et al.*, 2021; Dissa *et al.*, 2011) ดังนั้น ค่าอัตราส่วนความชื้นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2)

consumption - SEC) ในหน่วย  $\text{MJ}/\text{g}_{\text{water}}$  ของระบบอบแห้งสามารถคำนวณได้จากสมการ (4) (Srivichai, 2016)

$$\text{SEC} = \frac{3.6E_p}{m_{in} - m_f} \quad (4)$$

เมื่อ  $E_p$  คือ ปริมาณพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง ( $\text{kW} \cdot \text{h}$ ),  $m_{in}$  และ  $m_f$  คือ น้ำหนักของต้นตะไคร้หั่น (g) ก่อนและหลังอบแห้ง ตามลำดับ ปริมาณพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งแต่ละชั่วโมงวัดโดยมิเตอร์ไฟฟ้า (Watt-hour meter) (MF-33E, Mitsubishi Electric Automation (Thailand) Co. Ltd., Bangkok, Thailand)

การทดสอบตากแห้งถูกดำเนินการไปพร้อม ๆ กับการทดสอบอบแห้ง โดยที่ชิ้นตะไคร้หั่นน้ำหนัก 150 g จะถูกวางบนถาดตะแกรงเช่นเดียวกับเงื่อนไขอบแห้ง แล้วจึงถูกนำไปตากแดดตั้งแต่วันที่ 10:00 น. เป็นต้นไป ชิ้นตะไคร้หั่นถูกวัดความชื้นทุก ๆ 1 h และจะเสร็จสิ้นการตากแดดเมื่อวัดความชื้นชิ้นตะไคร้หั่นได้ต่ำกว่า 11%<sub>db</sub>.

#### 4. วิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม

ค่าใช้จ่ายคงที่ (Fixed cost) ในงานวิจัยนี้ ประกอบไปด้วยค่าเสื่อมราคา (Depreciation) (i.e., ค่าเสื่อมของระบบอบแห้งแบบ PVI มีอายุการใช้งาน 10 years คัดการณ์จากอายุการใช้งานปั๊มสุญญากาศ) และราคาของหลอดไฟอินฟราเรดที่มีอายุการใช้งาน 5,000 h โดยกำหนดให้เปลี่ยนใหม่ทุก ๆ 1 year เป็นต้น ค่าใช้จ่ายผันแปร (Variable cost) เป็นค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นระหว่างการใช้งาน โดยประกอบไปด้วยค่าการใช้พลังงาน, ค่าบำรุงรักษา (i.e., เปลี่ยนถ่ายน้ำมันปั๊มสุญญากาศทุก ๆ 1 year), ค่าตะไคร้สด และค่าแรง เป็นต้น การคำนวณหาจุดคุ้มทุน (Break-even point - BEP) ในหน่วย Baht/year สามารถคำนวณได้จากสมการ (5)

$$\text{BEP} = \frac{\text{Fixed cost}}{\text{Contribution margin}} \quad (5)$$

โดยที่ Contribution margin คือกำไรส่วนเพิ่ม (day/year) ซึ่งคิดจากผลต่างระหว่างรายได้และต้นทุนต่อวัน ระยะเวลาคืนทุน (Payback period - PB) ในหน่วย year สามารถคำนวณได้จากสมการ 6

$$\text{PB} = \frac{\text{Initial investment}}{\text{Cash inflow per period}} \quad (6)$$

โดยที่ Initial investment คือต้นทุนสุทธิเริ่มต้นหรือราคาต้นทุนของระบบอบแห้งแบบ PVI (Baht) และ

Cash inflow per period คือเงินสดรับสุทธิรายปี (Baht/year)

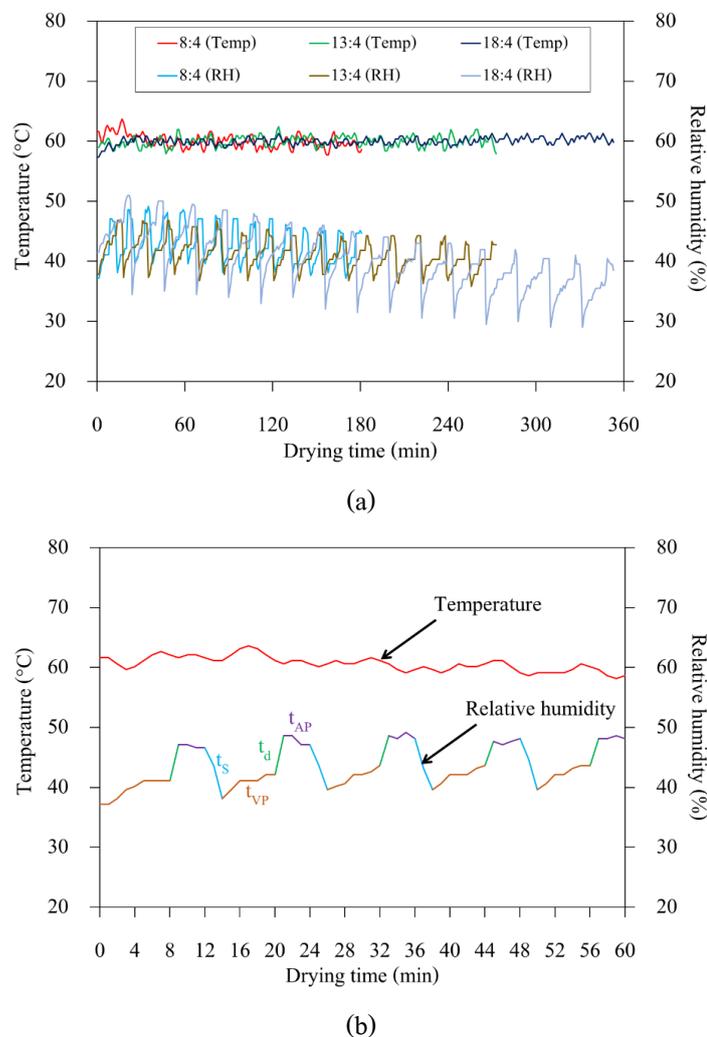
#### ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

ตัวอย่างกราฟอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในห้องอบแห้งสุญญากาศในระหว่างการทดสอบ 1 ชั่วโมงจากทั้ง 3 เงื่อนไขการทดสอบระบบอบแห้งถูกแสดงอยู่ใน Figure 5a ภาพขยายของกราฟอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในห้องอบแห้งในระหว่างการทดสอบที่เงื่อนไขอัตราส่วนพัลส์  $t_{VP}:t_{AP}$  เท่ากับ 8:4 ถูกแสดงอยู่ใน Figure 5b จะเห็นได้ว่าที่ทุกเงื่อนไขการทดสอบ ระบบอบแห้งสามารถควบคุมอุณหภูมิในห้องอบแห้งอยู่ในช่วง 57 - 63°C ตั้งแต่ต้นจนกระทั่งสิ้นสุดการทดสอบ ซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไขการออกแบบที่กำหนดไว้ นอกจากนี้ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในห้องอบแห้งมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 30 - 50% โดยจะเพิ่มขึ้นและลดลงเป็นวัฏจักรตามวัฏจักรการทำสุญญากาศแบบพัลส์อย่างชัดเจน (Figure 5b) กล่าวคือ ใน 1 วัฏจักรการทำสุญญากาศแบบพัลส์ประกอบด้วย ช่วงที่ความชื้นสัมพัทธ์ลดลงอย่างรวดเร็ว (ช่วงเวลาลดความดัน  $t_d$ ), ช่วงที่ความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ (ช่วงเวลารักษาสุญญากาศ  $t_{VP}$ ), ช่วงที่ความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว (ช่วงเวลากลับสู่บรรยากาศ  $t_r$ ) และช่วงที่ความชื้นสัมพัทธ์ค่อนข้างคงที่ (ช่วงเวลาคงความดันบรรยากาศ  $t_{AP}$ ) ทั้งนี้ ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยของแต่ละชั่วโมงการทดสอบมีแนวโน้มลดลงอย่างช้า ๆ เมื่อระยะเวลาอบแห้งเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกับความชื้นของตัวอย่างตะไคร้ (Figure 7)

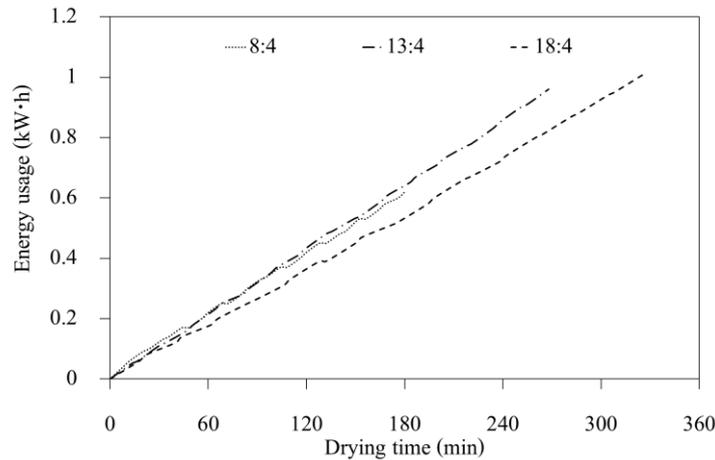
Figure 6 กราฟปริมาณการใช้พลังงานของระบบอบแห้งในระหว่างการทดสอบ 1 ชั่วโมงจากทั้ง 3 เงื่อนไขการทดสอบ ซึ่งจะเห็นได้ว่าอัตราการใช้พลังงานของระบบค่อนข้างคงที่ (ปริมาณการใช้

พลังงานเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเส้นตรง) โดยที่เงื่อนไข  $t_{VP}:t_{AP}$  เท่ากับ 8:4 และ 13:4 ระบบใช้พลังงานในอัตราใกล้เคียงกัน แต่ที่เงื่อนไข  $t_{VP}:t_{AP}$  เท่ากับ 18:4 ระบบใช้พลังงานในอัตราที่ต่ำกว่า ค่าเฉลี่ยความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ทั้ง 3 เงื่อนไขมีค่าเท่ากับ 0.019, 0.029 และ 0.031 MJ/g<sub>water</sub> ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Kusuma *et al.* (2023) ที่อบแห้งตะไคร้ด้วยไมโครเวฟขนาด 264 W และพบว่าค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะอยู่ในช่วง 0.012 - 0.025 MJ/g<sub>water</sub> (คำนวณมาจาก 3.3835 - 6.9772 kW·h/kg<sub>water</sub>) ในงานวิจัยดังกล่าวยังพบว่าความ

สิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีแนวโน้มน้อยลงเมื่อใช้ตะไคร้หั่น ในปริมาณที่มากสำหรับอบแห้ง นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบกับผลของ Manangan and Witinantakit (2020) ซึ่งอบแห้งดอกบัวด้วยวิธีการแบบ PVI ที่เงื่อนไข  $t_{VP}:t_{AP}$  เท่ากับ 15:4 พบว่ามีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ 0.74 MJ/g<sub>water</sub> โดยมีความสูงกว่าหลายเท่า เนื่องจากใช้ระยะเวลาในการอบแห้งนานกว่า (ประมาณ 9 h) และความแตกต่างของผลิตภัณฑ์ที่อบแห้ง



**Figure 5** (a) Air temperature and relative humidity in the vacuum drying chamber during one replicate of each of the three  $t_{VP}:t_{AP}$  test conditions, and (b) the temperature and relative humidity data of the 8:4 test condition with the horizontal time scale magnified between 0 and 60 min.



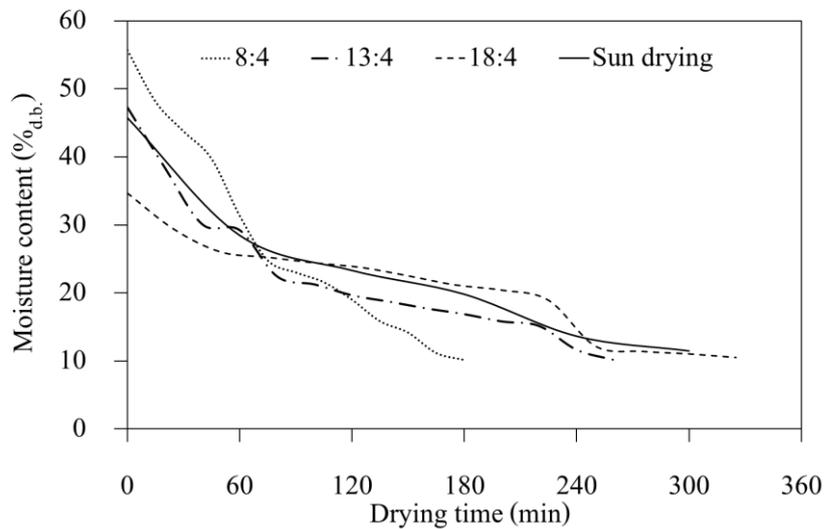
**Figure 6** Energy consumption during one replicate of each of the three drying test conditions.

Figure 7a กราฟความชื้นของชิ้นตะไคร้หั่น ในระหว่างการอบแห้งและการตากแดด ในระหว่างการการอบแห้งทุกเงื่อนไขและการตากแดด อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายนอกห้องอบแห้งเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 35 – 45°C และ 44 – 65% ตามลำดับ สำหรับเงื่อนไขการตากแดด ตะไคร้มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 45%<sub>db</sub> และใช้ระยะเวลาตากแห้งประมาณ 300 min ถึงแม้ว่า ความชื้นเริ่มต้นของตะไคร้ที่แต่ละเงื่อนไขการทดสอบระบบอบแห้งมีค่าแตกต่างกัน ในช่วง 60 min แรกของการทำแห้ง ความชื้นตะไคร้จะลดลงอย่างรวดเร็ว (กราฟมีความชันมากกว่าช่วงหลัง 60 min เป็นต้นไป) นอกจากนี้ ข้อมูลอัตราการทำให้แห้งของตะไคร้หั่นที่แต่ละเงื่อนไขการทดสอบ (Figure 7c) มีอัตราการทำให้แห้งเพิ่มขึ้นก่อนในช่วงต้นของการทำแห้ง (ช่วง 60 min) แล้วจึงลดลง เนื่องจากวัสดุมีปริมาณน้ำเป็นองค์ประกอบอยู่มากทำให้ง่ายต่อการดึงน้ำออกในช่วงต้น (Jiang *et al.*, 2022) ในขณะที่ Figure 7b กราฟอัตราส่วนความชื้นของตะไคร้หั่น โดยเส้นแนวโน้มของอัตราส่วนความชื้นของตะไคร้หั่นที่ทุกเงื่อนไขจะลดลงถึงจุดหนึ่ง แล้วจะมีแนวโน้มการลดลงที่น้อยลงยกตัวอย่าง ที่เงื่อนไขอัตราส่วนพัลส์  $t_{VP}:t_{AP}$  เท่ากับ 18:4 ซึ่งตะไคร้มีอัตราส่วนความชื้นลดลงถึง 0.35

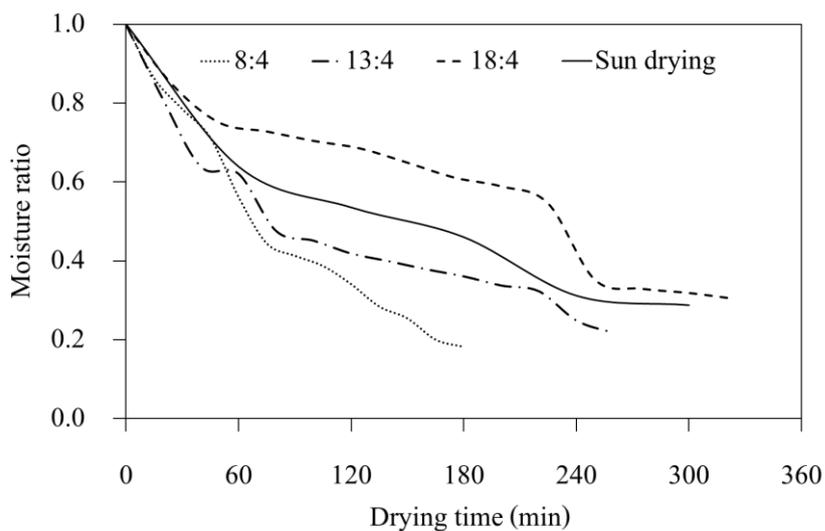
ที่เวลา 240 min จากนั้น การลดลงจะเปลี่ยนแปลงน้อยมากซึ่งพบว่าอัตราส่วนความชื้นเป็น 0.32 ที่เวลา 300 min เป็นต้น Figure 7a ที่เงื่อนไขอัตราส่วนพัลส์  $t_{VP}:t_{AP}$  เท่ากับ 8:4 ซึ่งตะไคร้มีความชื้นเริ่มต้นสูงสุด (ประมาณ 55%<sub>db</sub>) ระบบใช้ระยะเวลาอบแห้งสั้นที่สุด (ประมาณ 180 min) ซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไขการออกแบบที่กำหนดไว้ แต่ที่เงื่อนไขอัตราส่วนพัลส์  $t_{VP}:t_{AP}$  เท่ากับ 18:4 ซึ่งตะไคร้มีความชื้นเริ่มต้นต่ำสุด (ประมาณ 35%<sub>db</sub>) ระบบใช้ระยะเวลาอบแห้งนานที่สุด (ประมาณ 330 min) ในขณะเดียวกัน ที่เงื่อนไข  $t_{VP}:t_{AP}$  เท่ากับ 13:4 และการตากแห้ง ความชื้นเริ่มต้นของตะไคร้ใกล้เคียงกันที่ประมาณ 45 - 47%<sub>db</sub> และใช้ระยะเวลาทำแห้งใกล้เคียงกันที่ประมาณ 270 min สังเกตว่า การใช้ช่วงเวลารักษาสุญญากาศ ( $t_{VP}$ ) นานที่สุดไม่ได้ทำให้ระบบใช้ระยะเวลาอบแห้งสั้นที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Xie *et al.* (2017a) ที่พบว่าการทำแห้งโกลจิเบอร์รี่ที่เงื่อนไข  $t_{VP}$  เท่ากับ 20 min ให้ระยะเวลาการทำแห้งนานกว่าที่เงื่อนไข  $t_{VP}$  เท่ากับ 15 min วัฏจักรสุญญากาศแบบพัลส์ (Pulsed vacuum cycle) เป็นการทำลายสมดุลของความดันไอน้ำระหว่างภายในและภายนอกวัสดุอบแห้งอย่างฉับพลัน ทำให้ช่องว่างหรือรูพรุนขนาดเล็กในวัสดุขยายตัวเชื่อมต่อกัน (Xie *et al.*, 2017b) ซึ่ง

เรียกปรากฏการณ์นี้เรียกว่า “Tunneling effect” (Liu *et al.*, 2021) ส่งผลให้น้ำภายในวัสดุสามารถแพร่ออกไปยังผิวของวัสดุได้ง่ายขึ้น ทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาจำนวนรอบของวัฏจักรสุญญากาศแบบพัลส์ตั้งแต่เริ่มจนถึงสิ้นสุดการอบแห้ง ที่เงื่อนไขอัตราส่วนพัลส์  $t_{VP}:t_{AP}$  เท่ากับ 8:4, 13:4 และ 18:4 ระบบอบแห้งใช้จำนวนรอบของวัฏจักรใกล้เคียงกันคือ 15, 16 และ 16 รอบ ตามลำดับ จึงเป็นไปได้ว่า เมื่อความดันไอน้ำระหว่างภายในและภายนอกชั้นตะไคร้เข้าสู่สภาวะสมดุล การคงสภาวะ

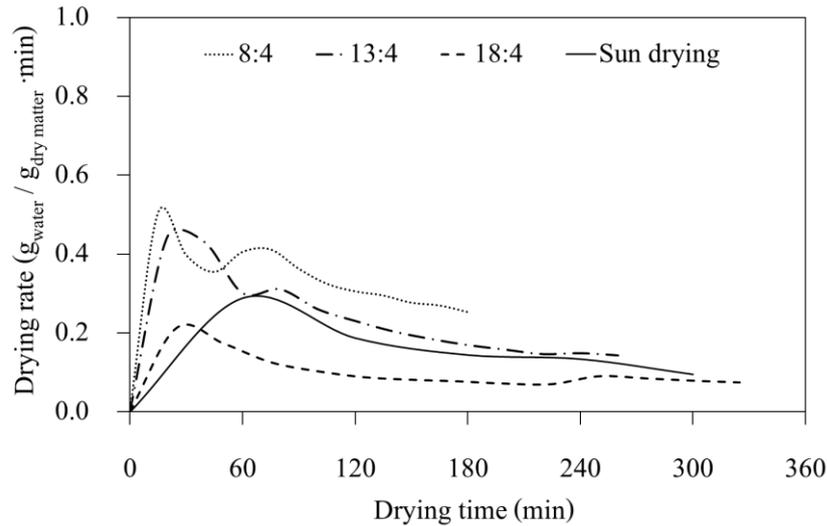
สุญญากาศไว้ไม่ส่งผลต่อการอบแห้งเพิ่มขึ้น แต่เมื่อสมดุลดังกล่าวถูกทำลายลง โดยการเริ่มวัฏจักรสุญญากาศถัดไปทำให้ช่องว่างรูพรุนในชั้นตะไคร้เชื่อมต่อกันมากขึ้น นำไปสู่อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นอีกครั้ง ดังนั้น การใช้ระบบอบแห้ง PVI ในงานวิจัยนี้ จำเป็นต้องเลือกอัตราส่วนพัลส์ที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ระบบที่เหมาะสมที่สุด (ระยะเวลาอบแห้งสั้นสุด และใช้พลังงานต่ำสุด) ซึ่งหากเลือกอัตราส่วนพัลส์ที่เหมาะสม ระบบอบแห้ง PVI สามารถลดระยะเวลาอบแห้งได้อย่างเห็นได้ชัด เมื่อเทียบกับการตากแดด



(a)



(b)



(c)

**Figure 7** (a) Moisture contents, (b) moisture ratios and (c) drying rates of *Cymbopogon citratus* samples during pulsed vacuum infrared (PVI) drying and sun drying.

ต้นทุนค่าวัสดุอุปกรณ์สำหรับจัดสร้างระบบอบแห้งแบบ PVI ที่ถูกพัฒนาขึ้นในการวิจัยนี้คิดเป็น 10,450 baht (Table 1) ซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไขการออกแบบที่กำหนดไว้ จะเห็นได้ว่า ต้นทุนค่าปั๊มสุญญากาศและโถแก้วรวมกันคิดเป็นประมาณ 70% ของทุนทั้งหมดและต้นทุนอุปกรณ์ควบคุมระบบคิดเป็นต้นทุนต่ำกว่า 30% สำหรับการทดสอบอบแห้งชิ้นตะไคร้หั่น ระบบอบแห้งใช้พลังงานไฟฟ้าอยู่ในช่วง 0.6 - 1.2 kW·h/batch (Figure 6) คิดเป็นค่าไฟฟ้าประมาณ 2 - 4 Baht ผลการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมถูกแสดงใน Table 2 โดยค่าเสื่อมราคาของระบบอบแห้งแบบ PVI ที่มีอายุการใช้งาน (Useful life) 10 years ถูกคำนวณตามสมการที่ 7 และมีค่าเท่ากับ 900 Baht/year

$$\text{Depreciation} = \frac{\text{Initial investment} - \text{Salvage value}}{\text{Useful life}} \quad (7)$$

โดยที่ Salvage value คือ ราคาซากซึ่งมีค่าเท่ากับ 1,045 Baht ดังนั้น ค่าใช้จ่ายคงที่ซึ่งเป็นผลรวม

ระหว่างค่าเสื่อมราคาของระบบอบแห้งและราคาของหลอดไฟ 2 หลอด มีค่าเป็น 1,198 Baht/year ในงานวิจัยนี้ กำหนดให้ระยะเวลาในการทำงานต่อวันของระบบอบแห้งเป็น 4 batch/day และจำนวนวันในการทำงานต่อปีเป็น 300 days /year อัตราส่วนพัลส์ที่เหมาะสมในงานวิจัยนี้คือ  $t_{VP}:t_{AP}$  เท่ากับ 8:4 โดยมีระยะเวลาในการทำแห้งต่อ 3 h/batch และมีค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำสุดเป็น 0.6 kW·h/batch ต้นทุนค่าพลังงานไฟฟ้าเป็น 3.25 Baht/unit (1 unit เท่ากับ 1 kW·h) ดังนั้น ค่าใช้จ่ายด้านการใช้พลังงานมีค่าเป็น 2,340 Baht/year ค่าใช้จ่ายด้านวัตถุดิบซึ่งเป็นตะไคร้สดมีค่าเป็น 3,960 Baht/year (คิดจากราคาตามท้องตลาด 22 Baht/kg) ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาเป็นค่าเปลี่ยนถ่ายน้ำมันปั๊มสุญญากาศปีละ 1 ครั้ง เป็น 138 Baht/year ค่าจ้างแรงงานคนบรรจุและเก็บตะไคร้แห้งซึ่งใช้เวลาอย่างมากโดยรวมทั้ง 4 batch ใช้เวลาเพียง 15 min ด้วยเหตุนี้ ค่าจ้างแรงงานจึงคิดค่าแรงเป็นนาที โดยมีค่าเป็น 10.37 Baht/day ซึ่งอ้างอิงจากประกาศราชกิจจานุเบกษา ประกาศคณะกรรมการค่าจ้างเรื่องอัตราค่าจ้างขั้นต่ำ

ซึ่งมีค่าเท่ากับ 332 Baht/8 h ดังนั้น ค่าใช้จ่ายผันแปร มีค่าเป็น 9,549 Baht/year จุดคุ้มทุนและระยะเวลาคืนทุนของระบบอบแห้งแบบ PVI มีค่าเป็น 205.15 day/year และ 6.48 year ตามลำดับ Saengsuwan (2021) ได้วิเคราะห์การคืนทุนเครื่องอบแห้งป้อนความร้อนสำหรับอบแห้งดอกเก๊กฮวย โดยมีต้นทุน 150,000 Baht และการคืนทุนอยู่ที่ 3 month กับ 17 day เครื่องอบแห้งดังกล่าวใช้เวลา 8 h ในการอบแห้ง และได้ปริมาณดอกเก๊กฮวยแห้ง 9 kg โดยมีราคาจำหน่ายกิโลกรัมละ 500 Baht Amornnantasiri (2021) ได้วิเคราะห์การคืนทุนเครื่องอบแห้งแบบมัทโทพล์ต้นแบบสำหรับการอบแห้งหอมแดง โดยมีต้นทุน 200,000 Baht และระยะเวลาคืนทุนเท่ากับ 4 years กับ 2 months เครื่องอบแห้งดังกล่าวใช้เวลาในการอบแห้ง 3 h และในระยะเวลา 1 day สามารถผลิตหอมแดงแห้งได้ 1.2 kg โดยมีราคาจำหน่ายกิโลกรัมละ 700 Baht Amornnantasiri (2021) ได้ให้เหตุผลว่าเนื่องจากต้นทุนด้านพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งหอมแดงที่สูงและกำลังการผลิตที่ค่อนข้างต่ำ จึงส่งผลให้มีระยะเวลาในการคืนทุนที่ช้า ในขณะที่เครื่องอบแห้งของ Saengsuwan (2021) ให้กำลังการผลิตต่อวันที่ค่อนข้างสูง และสามารถผลิตได้ 2 รอบต่อวัน จึงทำให้ระยะเวลาในการคืนทุนที่เร็วกว่า ดังนั้น เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยต่าง ๆ พบว่าระบบอบแห้งแบบ PVI นี้ยังมีต้นทุนของเครื่องที่ต่ำกว่า อย่างไรก็ตาม เนื่องจากราคาของผลิตภัณฑ์ได้ในงานวิจัยนี้มีราคาสูงกว่า และปริมาณผลผลิตที่ได้รับที่น้อย จึงส่งผลให้ระยะเวลาในการคืนทุน

ช้ากว่าอย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้ในทางปฏิบัติ ผู้สนใจอาจจะเพิ่มขนาดของภาชนะในการบรรจุหรือจำนวนถาดที่ใช้ในการวางผลผลิตเพื่อเพิ่มปริมาณผลผลิต โดยจะทำให้ระยะเวลาในการคืนทุนลดลงได้นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบราคาเครื่องอบแห้งตามท้องตลาด เช่น เครื่องอบลมร้อนซึ่งมีชั้นวางจำนวน 10 ชั้น (ขนาด  $0.4 \times 4.7 \times 4.3$  cm) และใช้กำลังไฟฟ้า 1,000 W มีราคา 4,590 Baht (Anonymous, 2023) ซึ่งถูกกว่าต้นทุนการผลิตระบบอบแห้งแบบ PVI อย่างไรก็ตาม ข้อมูลของ Tirawanichakul *et al.* (2013) ได้แสดงการเปรียบเทียบการอบแห้งตะไคร้หั่นระหว่างการอบด้วยลมร้อนอย่างเดียวและการอบด้วยรังสีอินฟราเรด (1,000 W) อย่างเดียวที่อุณหภูมิเดียวกัน ( $60^{\circ}\text{C}$ ) พบว่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้งตะไคร้หั่นด้วยลมร้อนมีค่ามากกว่าประมาณ 2 เท่า และ Tirawanichakul *et al.* (2011) ทดลองเปรียบเทียบการอบขนุนแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด (1,000 W) อย่างเดียวและการอบแห้งด้วยลมร้อนอย่างเดียวที่อุณหภูมิ  $59.7^{\circ}\text{C}$  พบว่าการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดใช้เวลาน้อยกว่า 30% ดังนั้น เครื่องอบแห้งผลไม้มีแนวโน้มที่จะใช้ระยะเวลาในการอบแห้งนานกว่า แต่จะได้ผลผลิตที่สูงกว่าเนื่องจากจำนวนของถาดที่มากกว่า ในงานวิจัยนี้สามารถกล่าวได้ว่าระบบอบแห้งด้วยสุญญากาศแบบพัลส์ร่วมกับรังสีอินฟราเรดต้นทุนต่ำสามารถอบแห้งผลผลิตเกษตรได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยผู้สนใจสามารถจัดหาอุปกรณ์เพื่อสร้างใช้งานได้ด้วยตนเอง

**Table 1** Summary of the cost of each component of the PVI drying system.

<b>Equipment</b>	<b>Quantity</b>	<b>Unit</b>	<b>Cost (Baht per unit)</b>	<b>Total cost (Baht)</b>
Air solenoid valve	1	Piece	390	390
Vacuum solenoid valve	1	Piece	390	390
Rubber stopper	1	Piece	20	20
Vacuum pump	1	Piece	4,290	4,290
Desiccator (9,500 cm <sup>3</sup> )	1	Piece	3,290	3,290
Control box (19×23 cm)	1	Piece	139	139
Polyurethane (PU) tube (Ø.in 6.5 mm)	2	Meter	8	16
Ice bucket (26×38×32.5 cm <sup>3</sup> )	1	Piece	129	129
Glass bottle (650 cm <sup>3</sup> )	1	Piece	20	20
Infrared lamp (250 W)	2	Piece	149	298
lamp holder (E27)	2	Piece	34	68
Temperature sensor + 4.7K ohm resistor	1	Piece	39	39
12 VDC Power supply	1	Piece	118	118
DC to DC converter	2	Piece	28	56
ESP32 module	1	Piece	198	198
RTC module	1	Piece	98	98
Relay 1 channel 5VDC	1	Piece	100	100
Relay 4 channels 3VDC	1	Piece	128	128
Solid state relay	1	Piece	98	98
Black film faced plywood (120×240×15 cm)	1	Plate	465	465
Wires			100	100
			<b>Total (Baht)</b>	<b>10,450</b>

**Table 2** Economy engineering for the PVI drying system.

<b>Lists</b>	<b>Amount</b>	<b>Unit</b>
Initial investment for PVI drying system	10,450	Baht
Useful life	10	year
Salvage value	1,045	Baht
Depreciation	900	Baht/year
Lifetimes of infrared lamps (5,000 h)	298	Baht/year

Table 2 (Continuous)

Lists	Amount	Unit
<b>Fixed cost</b>	<b>1,198</b>	<b>Baht/year</b>
Working time per day	4	batch/day
Working time per year	300	day/year
Electricity bill	3.25	Baht/unit
Energy usage	0.6	kW·h/batch
	or 2,340	Baht/year
Fresh <i>Cymbopogon citratus</i> cost	22	Baht/kg
	or 3,960	Baht/year
Maintenance (i.e., draining the fluid from the vacuum pump)	0.46	Baht/day
	or 138	Baht/year
Wages (15 min/4 batch)	10.37	Baht/day
	or 3,111	Baht/year
<b>Variable cost</b>	<b>9,549</b>	<b>Baht/year</b>
<b>Break-even point (BEP)</b>	<b>205.15</b>	<b>day/year</b>
<b>Cash inflow per period</b>	<b>1,613.88</b>	<b>Baht/year</b>
<b>Payback period (PB)</b>	<b>6.48</b>	<b>year</b>

## สรุป

ในการพัฒนาระบบอบแห้งด้วยสุญญากาศแบบพัลส์ร่วมกับรังสีอินฟราเรดต้นทุนต่ำนี้ ผู้วิจัยมุ่งหวังให้ผู้สนใจนำองค์ความรู้ไปพัฒนาต่อยอดได้จากการทดสอบระบบพบว่า 1) ระบบอบแห้งสามารถควบคุมความอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งให้อยู่ในช่วงไม่เกิน 55 - 65°C ซึ่งเป็นช่วงเหมาะสำหรับการอบแห้งผลิตภัณฑ์เกษตรแปรรูปที่ไม่ทนความร้อน, 2) เมื่อพิจารณาระยะเวลาอบแห้งที่เงื่อนไขอัตราส่วนพัลส์  $t_{VP}:t_{AP}$  เท่ากับ 8:4, 13:4 และ 18:4 พบว่าที่เงื่อนไขอัตราส่วนพัลส์  $t_{VP}:t_{AP}$  เท่ากับ 8:4 ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นที่สุด โดยใช้เวลาเพียง 180 min และปริมาณความชื้นสุดท้ายต่ำกว่า 11%<sub>d.b.</sub> ในขณะที่ ระยะเวลาอบแห้งที่เงื่อนไขอัตราส่วนพัลส์  $t_{VP}:t_{AP}$  เท่ากับ 13:4 และ 18:4 ใช้ระยะเวลาที่นานกว่า

โดยมีระยะเวลาการอบแห้งเป็น 270 และ 330 min ตามลำดับ นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบปริมาณการใช้พลังงาน พบว่าค่าเฉลี่ยความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่เงื่อนไข  $t_{VP}:t_{AP}$  เท่ากับ 8:4 มีค่าน้อยที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 0.019 MJ/g<sub>water</sub> และมีค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าประมาณ 0.6 kW·h ดังนั้น อัตราส่วนพัลส์ที่เหมาะสมที่สุดกับการอบแห้งในการศึกษาครั้งนี้ (ระยะเวลาอบแห้งสั้นสุด และใช้พลังงานต่ำสุด) คือเงื่อนไข  $t_{VP}:t_{AP}$  เท่ากับ 8:4 และ 3) เมื่อพิจารณาต้นทุนค่าวัสดุอุปกรณ์ของระบบอบแห้ง พบว่างบประมาณจัดซื้อวัสดุอุปกรณ์รวมทั้งระบบคิดเป็น 10,450 baht (ไม่เกิน 15,000 baht) และมีระยะเวลาในการคืนทุนเท่ากับ 6.48 year จากผลการทดลองทั้งหมดแสดงให้เห็นว่า ระบบอบแห้งด้วยสุญญากาศแบบพัลส์ร่วมกับรังสีอินฟราเรดต้นทุนต่ำสามารถอบแห้ง

ผลิตผลเกษตรได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม การเพิ่มพื้นที่หน้าตัดภายในโครงสร้างระบบ สูญญากาศจะทำให้ปริมาณผลผลิตจากการอบแห้งมี ปริมาณมากขึ้น

### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณนางสาวเกษราภรณ์ เกตุรัตน์ สำหรับความช่วยเหลือในการเตรียมตะไคร้และ ติดตั้งอุปกรณ์

ขอขอบคุณสาขาวิชาอุตสาหกรรมศิลป์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม สำหรับความอนุเคราะห์สถานที่ และความอนุเคราะห์อื่น ๆ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สำหรับความอนุเคราะห์อุปกรณ์การทดลอง

### เอกสารอ้างอิง

- Amornnantasiri, A. 2021. Development of must flow dryer for drying process of shallot. Master of Engineering (Mechanical Engineering), Srinakharinwirot University.
- Anonymous. 2023. **Hot air dryer**. Available Source: <https://shorturl.asia/IG0eL>, November 12,2023.
- Argyropoulos, D. and Müller, J. 2014. Changes of essential oil content and composition during convective drying of lemon balm (*Melissa officinalis* L.). **Industrial Crops and Products** 52: 118-124.
- Buchailot, A., Caffin, N. and Bhandari, B. 2009. Drying of Lemon Myrtle (*Backhousia citriodora*) Leaves: Retention of Volatiles and Color. **Drying Technology** 27(3): 445-450.

- Demiray, E. and Tulek, Y. 2012. Thin-layer drying of tomato (*Lycopersicum esculentum* Mill. cv. *Rio Grande*) slices in a convective hot air dryer. **Heat Mass Transfer** 48: 841-847.
- Deng, Z., Li, M., Xing, T., Zhang, J., Wang, Y. and Zhang, Y. 2021. A literature research on the drying quality of agricultural products with using solar drying technologies. **Solar Energy** 229: 69-83.
- Dissa, A.O., Bathiebo, D.J., Desmorieux, H., Coulibaly, O. and Kouliadiati, J. 2011. Experimental characterisation and modelling of thin layer direct solar drying of Amelie and Brooks mangoes. **Energy** 36(5): 2517-2527.
- Dutta, D., Kumar, P., Nath, A., Verma, N. and Gangwar, B. 2014. Qualities of lemongrass (*Cymbopogon citratus*) essential oil at different drying conditions. **International Journal of Agriculture, Environment & Biotechnology** 7(4): 903-909.
- Figiel, A. and Michalska, A. 2016. Overall Quality of Fruits and Vegetables Products Affected by the Drying Processes with the Assistance of Vacuum-Microwaves. **International Journal of Molecular Sciences** 18(1): 71.
- Jiang, D., Li, C., Lin, Z., Wu, Y. and Pei, H. 2022. Effects of pulsation ratio on center temperature and drying characteristics of pineapple slices with pulsed vacuum drying. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering** 15(6): 242-253.
- Kusuma, H.S., Sembiring, L.I. and Aisahasnati, S. 2023. Microwave-assisted drying of *Cymbogopon nardus* leaves: Kinetics,

- moisture diffusivity, energy, and emission study. **Journal of Stored Products Research** 102: 102130.
- Liu, Z.L., Xie, L., Zielinska, M., Pan, Z., Wang, J., Deng, L.Z., Wang, H. and Xiao, H.W. 2021. Pulsed vacuum drying enhances drying of blueberry by altering micro-, ultrastructure and water status and distribution. **LWT** 142: 111013.
- Manangan, W. and Witinantakit, K. 2020. Water lily drying using pulsed vacuum-infrared combined with silica sand embedding. **Kasem Bundit Engineering Journal** 10(3): 84-97. (in Thai)
- Mohamed Hanaa, A.R., Sallam, Y.I., El-Leithy, A.S. and Aly, S.E. 2012. Lemongrass (*Cymbopogon citratus*) essential oil as affected by drying methods. **Annals of Agricultural Sciences** 57(2): 113-116.
- Pei, Y.P., Vidyarthi, S.K., Wang, J., Deng, L.Z., Wang, H., Li, G.F., Zheng, Z.A., Wu, M. and Xiao, H.W. 2021. Effect of vacuum-steam pulsed blanching (VSPB) on drying characteristics and quality properties of garlic slices. **Drying Technology** 40(6): 1232-1246.
- Saengsuwan, T. 2021. Heat pump oven for drying chrysanthemum flower. **Journal of Energy and Environment Technology** 8(1): 32-41. (in Thai)
- Setareh, R., Mohammadi-Ghermezgoli, K., Ghaffari-Setoubadi, H. and Alizadeh-Salteh, S. 2023. The effectiveness of hot-air, infrared and hybrid drying techniques for lemongrass: appearance acceptability, essential oil yield, and volatile compound preservation. **Scientific Reports** 13(1): 18820.
- Srivichai, G. 2016. A study of performance of the induction heating dryer. **The Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok** 26(3): 375-383. (in Thai)
- Syafitri, D.M., Levita, J., Mutakin, M. and Diantini, A. 2018. A review: is ginger (*Zingiber officinale* var. roscoe) potential for future phytomedicine? **Indonesian Journal of Applied Sciences** 8(1): 1-6.
- Thamkaew, G., Sjöholm, I. and Galindo, F.G. 2021. A review of drying methods for improving the quality of dried herbs. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition** 61(11): 1763-1786.
- Tirawanichakul, S., Tasara, J., Parnma, C., Numcha, R. and Tirawanichakul, Y. 2011. Effect of drying condition on kinetic and quality of jackfruit drying. **Thaksin University Journal** 14(3): 83-91. (in Thai)
- Tirawanichakul, S., Tasara, J., Suriyoung, J., Pankamnerd, P. and Tirawanichakul, Y. 2013. Drying pandan and lemongrass leaves to produce herbal tea using various heat sources, pp. 570-577. *In The 14<sup>th</sup> TSAE National Conference and the 6<sup>th</sup> TSAE International Conference*. Huahin Grand Hotel and Plaza, Prachuap Khiri Khan. (in Thai)
- Wang, J., Law, C.L., Nema, P.K., Zhao, J.H., Liu, Z.L., Deng, L.Z., Gao, Z.J. and Xiao, H.W. 2018. Pulsed vacuum drying enhances

- drying kinetics and quality of lemon slices. **Journal of Food Engineering** 224: 129-138.
- Xie, L., Mujumdar, A.S., Fang, X.M., Wang, J., Dai, J.W., Du, Z.L., Xiao, H.W., Liu, Y. and Gao, Z.J. 2017a. Far-infrared radiation heating assisted pulsed vacuum drying (FIR-PVD) of wolfberry (*Lycium barbarum* L.): Effects on drying kinetics and quality attributes. **Food and Bioproducts Processing** 102: 320-331.
- Xie, Y., Gao, Z., Liu, Y. and Xiao, H. 2017b. Pulsed vacuum drying of rhizoma dioscoreae slices. **LWT** 80: 237-249.
- Zhang, W.P., Chen, C., Pan, Z., Xiao, H.W., Xie, L., Gao, Z.J. and Zheng, Z.A. 2020. Design and performance evaluation of a pilot-scale pulsed vacuum infrared drying (PVID) system for drying of berries. **Drying Technology** 38(10): 1340-1355.
- Zhou, Y.H., Pei, Y.P., Sutar, P.P., Liu, D.H., Deng, L.Z., Duan, X., Liu, Z.L. and Xiao, H.W. 2022. Pulsed vacuum drying of banana: Effects of ripeness on drying kinetics and physicochemical properties and related mechanism. **LWT** 161: 113362.

การทดสอบเพื่อตรวจสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปที่มีเหล็กข้ออ้อย  
เชื่อมกับแผ่นเหล็กฝังที่ส่วนรองรับภายใต้แรงกระทำเป็นจุดแบบตามขวาง

**Experimental Investigation on Precast Reinforced Concrete Beams with  
Deformed Bars Welded to Steel Plates and Embedded at Support  
Sections under Transverse Point Loads**

ชูชง กงแก้ว<sup>1</sup> สิทธิชัย แสงอาทิตย์<sup>1\*</sup> และ จักษดา ชำรงวุฒิ<sup>2</sup>

Chuthong Kongkaew<sup>1\*</sup> Sittichai Seangatith<sup>1\*</sup> and Jaksada Thumrongwut<sup>2</sup>

Received: 13 January 2023, Revised: 28 March 2023, Accepted: 4 September 2023

### บทคัดย่อ

บทความนี้กล่าวถึงการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปที่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กฝังที่ส่วนรองรับ โดยทดสอบแบบแรงกระทำ 4 จุด เพื่อศึกษาพฤติกรรมทางกล ลักษณะการวิบัติ และผลของระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กที่ฝังที่ส่วนรองรับที่มีผลต่อกำลังของคาน และเปรียบเทียบผลกับค่าที่คำนวณจากสมการการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็ก วสท. 1008-38 ตัวอย่างเป็นคานขนาด full scale กว้าง 0.175 ม. ลึก 0.35 ม. และ span ยาว 4.0 ม. จุดเชื่อมต่อทำด้วยแผ่นเหล็กกว้าง 0.25 ม. ลึก 0.15 ม. และหนา 0.02 ม. เชื่อมด้วยเหล็กข้ออ้อย DB16 ที่มีระยะฝังยาว 500 (คานอ้างอิง) 1,000 และ 1,500 มม. จากการทดสอบพบว่า คานมีพฤติกรรม bilinear โดยช่วงแรกมีพฤติกรรม linear elastic จนแรงกระทำมีค่าประมาณ 80-90 เปอร์เซ็นต์ของแรงกระทำสูงสุด คานจะเข้าสู่พฤติกรรม non-linear จากนั้น คานจะเกิดการแอ่นตัวอย่างรวดเร็ว และเกิดการวิบัติที่สภาวะใช้งาน (ที่ค่าการโก่งตัว  $L/240$ ) โดยคานที่ใช้เหล็กข้ออ้อยยาว 1,000 และ 1,500 มม. มีกำลังต้านทานแรงกระทำสูงกว่าคานอ้างอิงอยู่ในช่วง 4.27 ถึง 17.45% โดยการวิบัติของคานเปลี่ยนจากการวิบัติแบบแตกร้าวในแนวตั้งของคอนกรีตเนื่องจากการเลื่อนของแผ่นเหล็กที่จุดรองรับ เป็นการวิบัติแบบ flexural failure บริเวณกึ่งกลางคานและ diagonal shear failure ตามที่ได้ออกแบบไว้ เมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนกำลังรับแรงกระทำช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้นจากการทดสอบ

<sup>1</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

<sup>1</sup> School of Civil Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Muang, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand.

<sup>2</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

<sup>2</sup> Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Isarn, Muang, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand.

\* ผู้นิพนธ์ประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): sitichai@sut.ac.th

ต่อแรงกระทำช่วงยึดหย่อนจากสมการของ วสท. 1008-38 พบว่า อยู่ในช่วง 1.70 ถึง 2.86 ขึ้นอยู่กับความยาวของระยะฝังของเหล็กข้ออ้อย

**คำสำคัญ:** คานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูป, จุดต่อ, ความยาวระยะฝังเหล็กเสริม

## ABSTRACT

This paper presents an experimental investigation on precast reinforced concrete beams with connections in the form of deformed bars welded to a steel plate and embedded at the support sections, using a four-point loading test. The objectives are to study the mechanical behaviors, failure modes and effects of the embedded length of the deformed bars on the strength of the beams, and to compare the results with those calculated using the EIT 1008-38 RC beam design equations. The beams have a cross section of 0.175 m in width and 0.35 m in depth, with a span of 4.0 m. The beam's connections were made of steel plates with a cross section of 0.25 m in width, 0.15 m in depth, and 0.02 m in thickness, and were welded to DB16 bars with embedded lengths of 500 (reference beam), 1,000 and 1,500 mm. From the experiments, all of the beams exhibited bilinear behaviors. They behaved linearly elastic up to about 80-90 percent of their maximum load-carrying capacity, and then they behaved non-linearly with a rapid increase in deflection until failure. Under service conditions (at a deflection of  $L/240$ ), the beams with embedded lengths of 1,000 and 1,500 mm had a load-carrying capacity 4.27 to 17.45% higher than that of the reference beams. The failure modes can be separated into two patterns. The beams exhibited vertical cracks in the concrete at the support sections due to the slip of the steel plate, and then they failed either in flexural failure or diagonal shear failure, in accordance with the experimental design. Finally, when comparing the ratios between the linear elastic load-carrying capacity of the beams from the experiments and that from EIT 1008-38's equations, the ratios are in the range of 1.70 to 2.86, depending on the embedded length of the deformed bars.

**Key words:** precast reinforced concrete beam, connection, embedded length

## บทนำ

ในอดีตที่ผ่านมา โครงการก่อสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กส่วนใหญ่ในประเทศไทยเป็นโครงสร้างแบบระบบเสา-คาน โดยก่อสร้างแบบหล่อในที่ (cast-in-place) ซึ่งใช้แบบหล่อ แรงงานคน ค่าใช้จ่ายในโครงการ และเวลาในการก่อสร้างมาก อีกทั้งยังเป็นการยากที่จะควบคุมคุณภาพในการก่อสร้างเนื่องจากคุณภาพฝีมือแรงงานของคนงานมักแตกต่างกัน

กันไปรายบุคคล เพื่อที่จะแก้ปัญหาดังกล่าว ในปัจจุบัน จึงได้มีการพัฒนาระบบการก่อสร้างแบบสำเร็จรูป (precast) โดยพบว่า มีข้อดีหลายประการ เช่น การก่อสร้างทำได้อย่างรวดเร็ว ประหยัดงบประมาณในการก่อสร้าง และสามารถควบคุมคุณภาพการก่อสร้างได้ดีขึ้น และที่สำคัญระบบก่อสร้างดังกล่าวช่วยลดขยะจากงานก่อสร้างเนื่องจากเศษปูนและไม้แบบได้ ช่วยส่งเสริมการ

รักษาสภาพแวดล้อมที่ดีในสถานที่ก่อสร้างและชุมชนใกล้เคียงซึ่งสอดคล้องกับแนวความคิดอาคารเขียว (Yip *et al.*, 1999; Thumrongvut and Seangatith, 2005)

ในปัจจุบัน ผู้รับเหมาก่อสร้างได้นำระบบการก่อสร้างแบบสำเร็จรูปมาใช้ กับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กขนาดเล็ก เช่น บ้านพักอาศัย โรงงาน และอาคารพาณิชย์ เป็นต้น มากขึ้นอย่างมาก ทั้งในส่วน of พื้นสำเร็จรูป คานสำเร็จรูป เสาสำเร็จรูป และผนังสำเร็จรูป โดยมีการวิจัยและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ในช่วงสิบกว่าปีที่ผ่านมา แต่สิ่งที่สำคัญที่สุดสิ่งหนึ่งของการก่อสร้างแบบสำเร็จรูปคือ จุดต่อระหว่างโครงสร้าง เช่น ในกรณีของการก่อสร้างระบบเสา-คาน เป็นต้น ที่จะต้องมีความแข็งแรงและความแกร่งเพียงพอในการรองรับแรงกระทำ โดยที่จุดต่อจะต้องเกิดการวิบัติหลังจากการวิบัติขององค์อาคาร (Guo *et al.*, 2018) นอกจากนั้นแล้ว จากการศึกษาคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปที่มีเหล็กวางน้ำฝิ่งที่ส่วนรองรับพบว่า ระยะฝิ่งมีผลต่อกำลังของคาน โดยคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปที่มีเหล็กวางน้ำฝิ่งที่ส่วนรองรับมีกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกสูงกว่าคานอ้างอิง และความสามารถในการรับแรงเฉือนของคานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อระยะฝิ่งของเหล็กวางน้ำฝิ่งมีค่าเพิ่มขึ้น (Thumrongvut and Seangatith, 2005)

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปที่มีจุดเชื่อมต่อเป็นเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กฝิ่งที่ส่วนรองรับ โดยใช้การทดสอบแบบแรงกระทำ 4 จุด (four-point loading test) เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรง ลักษณะการวิบัติ (modes of failure) และผลของระยะฝิ่ง (embedded length,  $l_e$ ) ของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก เปรียบเทียบกับคานตัวอย่างทดสอบอ้างอิง ที่มีแผ่นเหล็กเชื่อมกับเหล็กข้ออ้อยที่ระยะฝิ่งเท่ากับ 500 มม. และสมการการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยฯ วสท.

1008-38 (Engineering Institute of Thailand, 1995) โดยตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ ความยาวระยะฝิ่งของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก (embedded length,  $l_e$ ) ทั้งหมด 3 ค่า ได้แก่ 500 (คานตัวอย่างทดสอบอ้างอิง) 1,000 และ 1,500 มม. และระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมรับแรงเฉือน (spacing,  $S$ ) ได้แก่ 100, 300 และ 500 มม.

## วิธีดำเนินการวิจัย

### 1. การทดสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

การทดสอบหาคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการวิจัยนี้เป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไทย (มอก.) ประกอบด้วย (1) การทดสอบเหล็กเสริม (เหล็กเส้นกลม) ตามมาตรฐาน มอก. 20-2559 (Thai Industrial Standards Institute, 2016a) และ (เหล็กข้ออ้อย) มอก. 24-2559 (Thai Industrial Standards Institute, 2016b) (2) การทดสอบแผ่นเหล็ก ดำตามมาตรฐาน มอก. 1479-2541 (Thai Industrial Standards Institute, 1998) และ (3) การทดสอบคอนกรีตตามมาตรฐาน มอก. 409-2525 (Thai Industrial Standards Institute, 1982) ซึ่งได้ผลการทดสอบหาคุณสมบัติทางกล ดังแสดงในตารางที่ 1 และพบว่า วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นไปตามที่ มอก. ที่เกี่ยวข้องกำหนด

**Table 1** Mechanical properties of materials, used in the experimental investigation.

Materials	Averaged yielding stress (MPa)	Averaged ultimate stress (MPa)	Averaged modulus of elasticity (GPa)	Percent elongation (%)
Concrete (380 kg/cm <sup>2</sup> , cylinder)	-	40.33	29.85	-
Deformed bar (DB16, SD40)	590.10	645.21	198.5	20.29
Round bar (RB6, SR24)	370.20	493.46	195.3	23.86
Steel plate (SS400)	404.74	568.42	196.3	19.88

## 2. คานตัวอย่างทดสอบ

ตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในการวิจัยนี้เป็นคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูป ซึ่งออกแบบโดยวิธีกำลัง (strength design method) ตามมาตรฐานการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยฯ (วสท. 1008-38) โดยที่ไม่นำเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กมาพิจารณาในการออกแบบ คานตัวอย่างทดสอบมีขนาดหน้าตัดกว้าง 0.175 ม. ลึก 0.35 ม. และยาว 4.0 ม. (clear span) จำนวนทั้งหมด 24 ตัวอย่าง แบ่งออกเป็น 3 กลุ่มโดยมีกลุ่มละ 8 ตัวอย่าง ได้แก่ (1) คานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1 แบ่งออกเป็น 2 กลุ่มย่อย ได้แก่ คานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กจำนวน 2 ตัวอย่าง และคานตัวอย่างทดสอบที่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กจำนวน 6 ตัวอย่าง ดังแสดงในตารางที่ 2 โดยมีเหล็กเสริมรับแรงดึงเป็นเหล็กข้ออ้อย (5-DB16 เกรด SD40) เหล็กเสริมด้านรับแรงอัดเป็นเหล็กข้ออ้อย (2-DB16 เกรด SD40) เหล็กเสริมรับแรงเฉือนเป็นเหล็กเส้นกลม (RB6 เกรด SR24) มีระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมรับแรงเฉือนเท่ากับ 100 มม. และแผ่นเหล็กที่ใช้เชื่อมต่อกานเข้ากับคอนกรีตที่ปลายคานในส่วนของจุดรองรับของคานมีขนาด กว้าง 0.25 ม. ลึก 0.15 ม. หนา 0.02 ม. (เกรด SS400) ดังแสดงในภาพที่ 1 โดยออกแบบให้แผ่นเหล็กยื่นออกมาจากปลายคาน

ตัวอย่างทดสอบด้านละ 0.1 ม. และให้มีเหล็กข้ออ้อยขนาด DB16 มาเชื่อมต่อกตามความยาวระยะฝั่งที่กำหนด (2) คานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2 แบ่งออกเป็น 2 กลุ่มย่อย ได้แก่ คานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กจำนวน 2 ตัวอย่าง และคานตัวอย่างทดสอบที่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กจำนวน 6 ตัวอย่าง ดังแสดงในตารางที่ 2 โดยมีเหล็กเสริมรับแรงดึงเป็นเหล็กข้ออ้อย (6-DB16 เกรด SD40) เหล็กเสริมด้านรับแรงอัดเป็นเหล็กข้ออ้อย (2-DB16 เกรด SD40) เหล็กเสริมรับแรงเฉือนเป็นเหล็กเส้นกลม (RB6 เกรด SR24) มีระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมรับแรงเฉือนเท่ากับ 300 มม. และแผ่นเหล็กที่ใช้เชื่อมต่อกานเข้ากับคอนกรีตที่ปลายคานในส่วนของจุดรองรับของคานมีขนาด กว้าง 0.25 ม. ลึก 0.15 ม. หนา 0.020 ม. (เกรด SS400) โดยออกแบบให้แผ่นเหล็กยื่นออกมาจากปลายคานตัวอย่างทดสอบด้านละ 0.1 ม. และให้มีเหล็กข้ออ้อยขนาด DB16 มาเชื่อมต่อกตามความยาวระยะฝั่งที่กำหนด และ (3) คานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 3 แบ่งออกเป็น 2 กลุ่มย่อย ได้แก่ คานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กจำนวน 2 ตัวอย่าง และคานตัวอย่างทดสอบที่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กจำนวน 6 ตัวอย่าง ดังแสดงในตารางที่ 2 โดยมีเหล็กเสริมรับแรงดึงเป็นเหล็กข้ออ้อย (6-DB16 เกรด SD40) เหล็กเสริม

ด้านรับแรงอัดเป็นเหล็กข้ออ้อย (2-DB16 เกรด SD40) เหล็กเสริมรับแรงเฉือนเป็นเหล็กเส้นกลม (RB6 เกรด SR24) มีระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมรับแรงเฉือนเท่ากับ 500 มม. และแผ่นเหล็กที่ใช้เชื่อมต่อกันเข้ากับคอนกรีตที่ปลายคานในส่วนของจุดรองรับของคานมีขนาด กว้าง 0.25 ม. ลึก 0.15 ม. หนา

0.020 ม. (เกรด SS400) ดังแสดงในภาพที่ 1 โดยออกแบบให้แผ่นเหล็กยื่นออกมาจากปลายคาน ตัวอย่างทดสอบด้านละ 0.1 ม. และให้มีเหล็กข้ออ้อยขนาด DB16 มาเชื่อมต่อตามความยาวระยะฝั่งที่กำหนด



**Figure 1** Deformed bars welded to steel plate, used in the experimental investigation.

ตารางที่ 2 แสดงรายละเอียดของคานตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในงานวิจัย โดยชื่อของคานตัวอย่างทดสอบถูกกำหนดในรูปแบบ XX-YYYY-ZZZ โดยที่ XX หมายถึง ตัวอย่างทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็ก สำเร็จรูปแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ ได้แก่ RC คือ คานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่น

เหล็ก และ PC คือ คานตัวอย่างทดสอบที่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กฝั่งที่ส่วนรองรับ YYYY หมายถึง ความยาวระยะฝั่งเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร และ ZZZ หมายถึง ระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมรับแรงเฉือน มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร

**Table 2** Details of the beam specimens, used in the experimental investigation.

Group	Code of beam specimen	Steel embedded length (mm)	Stirrup spacing (mm)	Span (m)	Number of tensile steel reinforcement	Number of compressive steel reinforcement	Mode of failure
1	RC-0000-100	0	100	4.0	5-DB16	2-DB16	Flexural
	PC-0500-100	500	100	4.0	5-DB16	2-DB16	Flexural
	PC-1000-100	1000	100	4.0	5-DB16	2-DB16	Flexural
	PC-1500-100	1500	100	4.0	5-DB16	2-DB16	Flexural
2	RC-0000-300	0	300	4.0	6-DB16	2-DB16	Shear
	PC-0500-300	500	300	4.0	6-DB16	2-DB16	Shear
	PC-1000-300	1000	300	4.0	6-DB16	2-DB16	Shear
	PC-1500-300	1500	300	4.0	6-DB16	2-DB16	Shear

Table 2 Continuous

Group	Code of beam specimen	Steel embedded length (mm)	Stirrup spacing (mm)	Span (m)	Number of tensile steel reinforcement	Number of compressive steel reinforcement	Mode of failure
3	RC-0000-500	0	500	4.0	6-DB16	2-DB16	Shear
	PC-0500-500	500	500	4.0	6-DB16	2-DB16	Shear
	PC-1000-500	1000	500	4.0	6-DB16	2-DB16	Shear
	PC-1500-500	1500	500	4.0	6-DB16	2-DB16	Shear

ภาพที่ 2 แสดงลักษณะของคานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กทั้ง 3 กลุ่ม ภาพที่ 3 แสดงลักษณะของคานตัวอย่างทดสอบที่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กทั้ง 3 กลุ่ม ซึ่งขอให้สังเกตตำแหน่งของแผ่นเหล็กและเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก ภาพที่ 4 แสดงหน้าตัดคานที่จุดฝังแผ่นเหล็กที่จุดเชื่อมต่อของปลายคาน (section A-A) และจุดรองรับและที่จุดกึ่งกลางของความยาวคาน (section B-B) ของคานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กทั้ง 3 กลุ่ม ภาพที่ 5 แสดงหน้าตัดคานที่จุดฝังแผ่นเหล็กที่จุดเชื่อมต่อของปลายคาน (section A-A) และจุดรองรับและที่จุดกึ่งกลางของความยาวคาน (section B-B) ของคานตัวอย่างทดสอบ

ที่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กทั้ง 3 กลุ่ม โดยคานตัวอย่างทดสอบถูกผลิตขึ้นโดยช่างฝีมือแรงงานตามแบบที่กำหนด โดยมีการติดมาตรวัดความเครียด (strain gauge) ที่เหล็กส่วนที่รับแรงดึงบริเวณกึ่งกลางของคานตัวอย่างทดสอบ เพื่อใช้ในการตรวจสอบความเครียดของเหล็กเสริมภายใต้แรงกระทำ เพื่อตรวจสอบว่าเหล็กเสริมเกิดการคราก (yielding) ระหว่างการทดสอบหรือไม่ และได้รับการบ่มคอนกรีตตามที่ วสท.1008-38 กำหนด (Engineering Institute of Thailand, 1995) เมื่อแกะแบบหล่อคานตัวอย่างทดสอบแล้ว จะมีการหล่อคอนกรีตหุ้มแผ่นเหล็กที่เหลือเพื่อจำลองคอนกรีตส่วนที่หล่อแทนเสา โดยคอนกรีตส่วนนี้จะวางอยู่บนจุดรองรับ

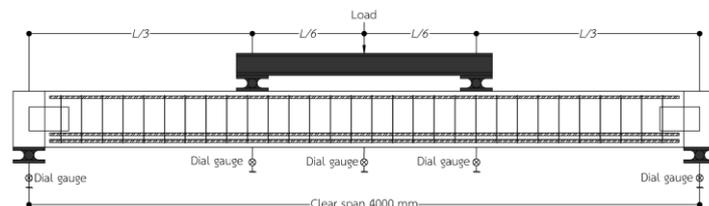


Figure 2 Details of the beam specimen without deformed bars welded to steel plate.

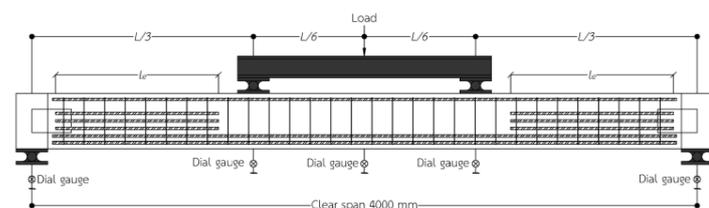
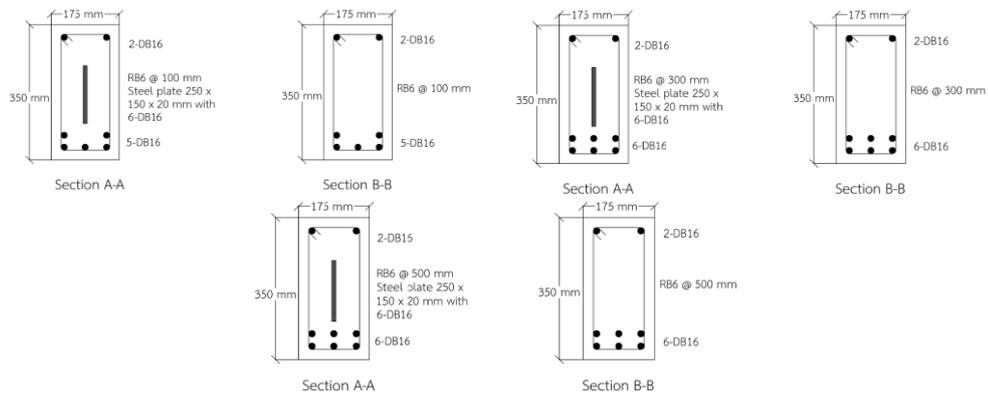
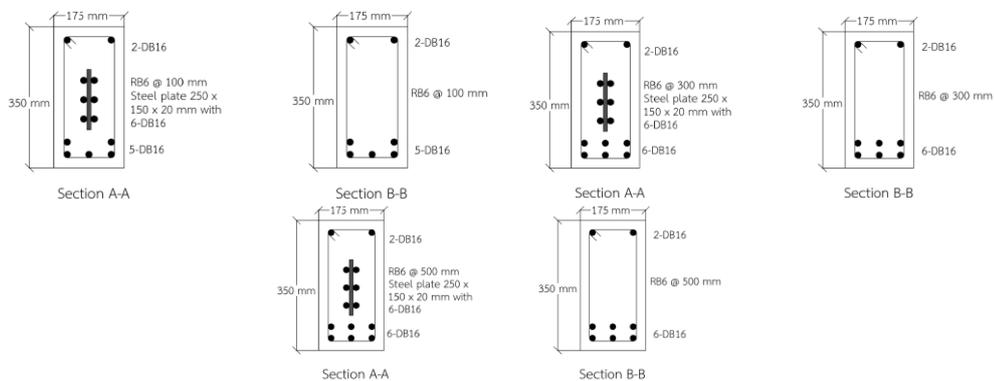


Figure 3 Details of the beam specimen with deformed bars welded to steel plate.



**Figure 4** Cross-section of the beam specimen without deformed bars welded to steel plate: Group 1 to 3.



**Figure 5** Cross-section of the beam specimen with deformed bars welded to steel plate: Group 1 to 3.

### 3. การทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูป

ขั้นตอนการทดสอบคานตัวอย่างทดสอบมีดังนี้ (1) ติดตั้งคานตัวอย่างทดสอบเข้ากับ loading frame ดังแสดงในภาพที่ 6 โดยวางคานตัวอย่างทดสอบในรูปแบบคานบนจุดรองรับอย่างง่าย (simple supported beam) โดยให้คอนกรีตส่วนที่หล่อแทนเสาวางอยู่ที่จุดรองรับทั้งสองด้านและรอยต่ออยู่ตรงตำแหน่งของขอบจุดรองรับ (2) นำคานถ่ายแรงวางบนหลังคานตัวอย่างทดสอบจากนั้นนำกระบอกลไฮดรอลิก (hydraulic cylinder) วางบนคานถ่ายแรงและปรับให้อยู่ในตำแหน่งที่หัว hydraulic cylinder ชนกับ loading frame ในรูปแบบการทดสอบแรงกระทำสี่จุด (4-point loading test) (3) ติดตั้ง dial gauge ที่กึ่งกลางคานตัวอย่างทดสอบ 1 ตัว ที่ระยะ L/6 โดยวัดจากกึ่งกลางคานไปทั้งทางด้านซ้ายและ

ขวาด้านละ 1 ตัว และที่จุดรองรับของคานตัวอย่างทดสอบด้านละ 1 ตัว รวมทั้งหมดจำนวน 5 ตัว เพื่อวัดระยะการแอ่นตัวของคานตัวอย่างทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ 7 (4) เชื่อมต่อ strain gauge เข้ากับ strain gauge indicator (5) ทำการ pre-loading ให้กับคานตัวอย่างทดสอบ เพื่อให้คานตัวอย่างทดสอบ dial gauge และ strain gauge อยู่ในสภาพพร้อมทดสอบ (6) เริ่มทำการทดสอบแบบ displacement-controlling test โดยให้แรงกระทำผ่าน hydraulic pump และบันทึกค่าแรงกระทำที่ค่าการแอ่นตัวที่กลางคานทุก ๆ 0.5 มม. พร้อมกับการบันทึกค่าการแอ่นตัวจาก dial gauge อีก 4 ตัว บันทึกค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริมจาก strain gauge indicator และตรวจสอบรอยร้าวที่เกิดขึ้นกับคานตัวอย่างทดสอบ (7) ทำซ้ำข้อที่ 6 จนคานตัวอย่างทดสอบจนกระทั่งคาน

ตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติ จากนั้น ทำการถอด dial gauge ทั้งหมดออกจากคานตัวอย่างทดสอบ เพื่อป้องกันการเสียหายจากการทดสอบ และทำการให้แรงกระทำจนตัวอย่างมีความเสียหายในระดับที่มากพอ บันทึกค่าแรงและค่าความเครียดสุดท้าย

สังเกตลักษณะการวิบัติของคานตัวอย่างทดสอบอย่างละเอียดใช้ปากกาขีดตามรอยร้าวที่เกิดจากแรงที่กระทำ และถ่ายรูปเพื่อเก็บเป็นข้อมูลในการวิเคราะห์ผลการทดสอบต่อไป



Figure 6 Installation of a beam specimen into the loading frame.

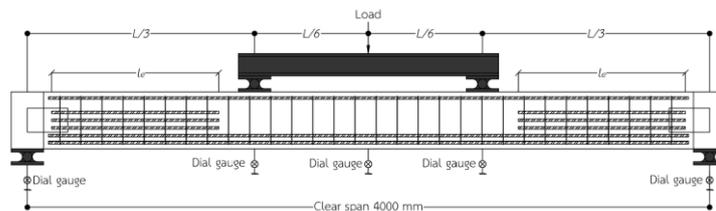


Figure 7 Details of locations of dial gauges on beam specimens.

## ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

### 1. พฤติกรรมรับแรงของคานตัวอย่างทดสอบ

ภาพที่ 8 แสดงแผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการรับแรงกระทำและค่าการแอ่นตัวที่กึ่งกลางความยาวคานตัวอย่างทดสอบ จากแผนภาพความสัมพันธ์ พบว่า ในภาพรวม คานตัวอย่างทดสอบทั้ง 24 ตัวอย่างมีพฤติกรรมการรับแรงกระทำที่คล้ายคลึงกัน โดยมีพฤติกรรมแบบ bilinear แบ่งออกเป็น 2 ช่วงที่ชัดเจน ในช่วงแรกคานตัวอย่างทดสอบมีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น (linear elastic) จนกระทั่งแรงกระทำมีค่าประมาณ 80-90% ของแรงกระทำสูงสุดที่ทดสอบได้ ( $P_{max}$ )

โดยเริ่มเกิดรอยร้าวทำมุมประมาณ 90 องศากับแนวของคานตัวอย่างทดสอบขนาดเล็กบริเวณกึ่งกลางความยาวและที่รอยต่อระหว่างคานและคอนกรีตที่หล่อแทนเสา จากนั้น ตัวอย่างจะมีพฤติกรรมเข้าสู่ช่วงที่สอง ซึ่งความชันของเส้นกราฟจะลดลงอย่างรวดเร็ว โดยมีพฤติกรรมแบบไร้เชิงเส้น (non-linear) โดยแรงกระทำมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ขณะที่ระยะการแอ่นตัวมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และมีรอยร้าวปรากฏเพิ่มจำนวนมากขึ้นและขยายตัวมากขึ้นจนถึงจุดที่คานตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติ โดยสังเกตที่คานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กทั้ง 3 กลุ่ม พบว่า คานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กไม่สามารถต้านทาน

แรงกระทำได้เกินกว่า ความสามารถในการรับแรงกระทำที่สภาวะใช้งานหรือ  $P_{L/240}$  เนื่องจากการไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กฝิ่งที่ส่วนรองรับ ส่งผลให้คานตัวอย่างทดสอบดังกล่าวมีค่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคานตัวอย่างทดสอบกับคอนกรีตที่

หล่อแทนเสาข้อข้างต่ำ ทำให้แผ่นเหล็กที่ฝังบริเวณส่วนรองรับเกิดการรูดออกจากคานตัวอย่างทดสอบ และส่งผลให้คานตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติแบบทันทีทันใดที่บริเวณส่วนรองรับ

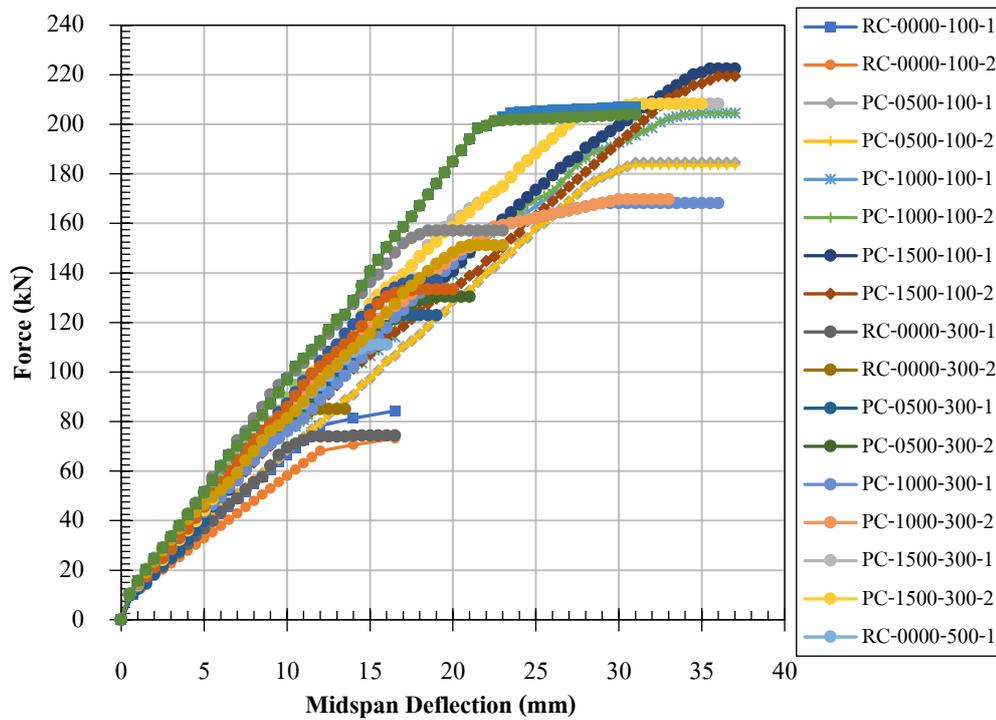


Figure 8 Diagram of the force versus midspan deflection of the beam specimens.

ตารางที่ 3 แสดงค่าความสามารถในการรับแรงกระทำของคานตัวอย่างทดสอบที่วัดได้เมื่อคานตัวอย่างทดสอบมีค่าการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานตัวอย่างทดสอบเท่ากับ  $L/240$  หรือ  $P_{L/240}$  ซึ่งเป็นค่าการแอ่นตัวที่สภาวะใช้งานของมาตรฐานการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ วสท. 1008-38 กำหนด (Engineering Institute of Thailand, 1995) (กรณี ไม่มีผนังใต้ท้องคาน) จากตารางเมื่อเปรียบเทียบกับคานตัวอย่างทดสอบอ้างอิง พบว่าคานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กทั้ง 3 กลุ่ม มีความสามารถในการรับแรงกระทำต่ำกว่าอยู่ในช่วง 15.76-38.76 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่คานตัวอย่างทดสอบที่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กมี

ความสามารถในการรับแรงกระทำเพิ่มขึ้นตามความยาวระยะฝิ่งของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กอยู่ในช่วง 8.36-13.93 เปอร์เซ็นต์ สำหรับคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1 อยู่ในช่วง 4.27-12.23 เปอร์เซ็นต์ สำหรับคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2 และอยู่ในช่วง 12.39-17.45 เปอร์เซ็นต์ สำหรับคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 3 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า คานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็ก มีความสามารถในการรับแรงกระทำช่วงสภาวะใช้งาน (service load) ที่ต่ำมาก ในขณะที่การเพิ่มความยาวระยะฝิ่งของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก ช่วยเพิ่มความสามารถในการต้านทานแรงกระทำช่วงใช้งานได้เล็กน้อย

**Table 3** Applied forces when the beam specimens have the midspan deflection of  $L/240$  ( $P_{L/240}$ ) and % of increase/decrease of  $P_{L/240}$ .

Group	Code of beam specimen	Steel embedded length (mm)	$P_{L/240}$ (kN)	% of increase/decrease of $P_{L/240}$ (%)
1	RC-0000-100	0	84.33	-20.90
	PC-0500-100	500	106.60	-
	PC-1000-100	1000	115.51	+8.36
	PC-1500-100	1500	121.45	+13.93
2	RC-0000-300	0	74.38	-38.76
	PC-0500-300	500	121.45	-
	PC-1000-300	1000	126.64	+4.27
	PC-1500-300	1500	136.30	+12.23
3	RC-0000-500	0	72.45	-45.05
	PC-0500-500	500	131.84	-
	PC-1000-500	1000	148.17	+12.39
	PC-1500-500	1500	154.85	+17.45

Remark: The + and – signs indicate the increase and decrease of the force  $P_{L/240}$ , respectively.

ตารางที่ 4 แสดงถึงการเปรียบเทียบความสามารถในการรับแรงกระทำสูงสุด ( $P_{max}$ ) ที่ได้จากการทดสอบ จากตาราง เมื่อเปรียบเทียบกับคานตัวอย่างทดสอบอ้างอิง พบว่า คานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กทั้ง 3 กลุ่มมีความสามารถในการรับแรงกระทำต่ำกว่าอยู่ในช่วง 18.96-54.31 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่คานตัวอย่างทดสอบที่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กมีความสามารถในการรับแรงกระทำเพิ่มขึ้นตามความยาวระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กอยู่

ในช่วง 10.86-20.51 เปอร์เซ็นต์ สำหรับคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1 อยู่ในช่วง 36.84-69.45 เปอร์เซ็นต์ สำหรับคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2 และอยู่ในช่วง 14.62-51.13 เปอร์เซ็นต์ สำหรับคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 3 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า คานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็ก มีความสามารถในการรับแรงกระทำสูงสุดที่ต่ำมาก ในขณะที่การเพิ่มความยาวระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก ช่วยเพิ่มความสามารถในการต้านทานแรงกระทำสูงสุดได้ค่อนข้างมาก

**Table 4** Maximum applied forces at the failure of the beam specimens ( $P_{max}$ ) and % of increase/decrease of  $P_{max}$ .

Group	Number of beam specimen	Steel embedded length (mm)	$P_{max}$ (kN)	% of increase/decrease of $P_{max}$ (%)
1	RC-0000-100	0	84.33	-54.31
	PC-0500-100	500	184.55	-
	PC-1000-100	1000	204.59	+10.86
	PC-1500-100	1500	222.41	+20.51
2	RC-0000-300	0	74.38	-39.49
	PC-0500-300	500	122.93	-
	PC-1000-300	1000	168.22	+36.84
	PC-1500-300	1500	208.30	+69.45
3	RC-0000-500	0	72.45	-47.13
	PC-0500-500	500	137.04	-
	PC-1000-500	1000	157.08	+14.62
	PC-1500-500	1500	207.11	+51.13

Remark: The + and – signs indicate the increase and decrease of the force  $P_{L/240}$ , respectively.

## 2. ลักษณะการวิบัติของคานตัวอย่างทดสอบ

ภาพที่ 9 แสดงลักษณะการวิบัติของคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1 จะเห็นได้ว่า คานตัวอย่างทดสอบมีลักษณะการวิบัติแบ่งออกเป็นทั้งหมด 2 รูปแบบ ได้แก่ (1) คานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็ก พบว่า คานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กเกิดการวิบัติขึ้นแบบทันทีทันใด (abrupt failure) โดยเกิดการแตกร้าวในแนวตั้งของคานคอนกรีตที่จุดต่อระหว่างคานตัวอย่างทดสอบและคานคอนกรีตที่บริเวณปลายจุกรองรับ เนื่องจากการเลื่อนของแผ่นเหล็ก (slip mode) ดังแสดงในภาพที่ 9(a) และ (2) คานตัวอย่างทดสอบที่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กที่ระยะฝังเท่ากับ 500, 1000 และ 1500 มม. พบว่า ช่วงแรก คานจะเกิดรอยแตกร้าวของคานคอนกรีตทำมุมประมาณ 90 องศากับแนวระดับที่บริเวณกึ่งกลางคานตัวอย่างทดสอบในรูปแบบ

flexural failure จากนั้นจึงเกิดรอยแตกร้าวในแนวตั้งของคอนกรีตเนื่องจากการเลื่อน (slip) ของแผ่นเหล็ก โดยที่รอยร้าวลดลงตามความยาวระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก ดังแสดงในภาพที่ 9(b)

ภาพที่ 10 แสดงลักษณะการวิบัติของคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2 จะเห็นได้ว่า คานตัวอย่างทดสอบมีลักษณะการวิบัติแบ่งออกเป็นทั้งหมด 2 รูปแบบ ได้แก่ (1) คานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็ก พบว่า คานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กเกิดการวิบัติขึ้นแบบทันทีทันใด โดยการแตกร้าวในแนวตั้งของคอนกรีตที่จุดต่อระหว่างคานตัวอย่างทดสอบและจุกรองรับที่ปลายคานตัวอย่างทดสอบเนื่องจากการเลื่อนของแผ่นเหล็ก ดังแสดงภาพที่ 10(a) และ (2) คานตัวอย่างทดสอบที่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กเท่ากับ 500, 1000 และ 1500 มม. พบว่า ช่วงแรก คานตัวอย่างทดสอบจะเกิดรอยร้าว

ของคอนกรีตทำมุมประมาณ 40-45 องศากับแนวระดับที่บริเวณจุดรองรับจนถึงช่วงประมาณ  $L/3$  ของคานตัวอย่างทดสอบทั้งหมดในรูปแบบเฉือนทแยง (diagonal shear failure) จากนั้น จึงเกิดรอยร้าวใน

แนวตั้งของคอนกรีตเนื่องจากการเลื่อนของแผ่น โดยที่รอยร้าวลดลงตามความยาวระยะฝั่งของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก ดังแสดงในภาพที่ 10(b)



**Figure 9** Failure of the beam specimen Group 1:

(a) specimen without deformed bars welded to steel plate. (b) specimen with deformed bars welded to steel plate



**Figure 10** Failure of the beam specimen Group 2:

(a) specimen without deformed bars welded to steel plate. (b) specimen with deformed bars welded to steel plate

จากการสังเกตลักษณะการวิบัติของคานตัวอย่างทดสอบ พบว่า คานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กส่งผลให้คานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กเกิดการวิบัติที่บริเวณรอยต่อ โดยที่บริเวณคานตัวอย่างทดสอบนั้นไม่เกิดการวิบัติขึ้นเลย เมื่อมีเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กฝังเข้าไปในคานตัวอย่างทดสอบ ส่งผลให้คานตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติขึ้นที่บริเวณคานตัวอย่างทดสอบก่อน หลังจากนั้นเมื่อแรง

กระทำเพิ่มขึ้นจึงเริ่มเกิดรอยร้าวที่เกิดจากการแยกตัวกันระหว่างคานตัวอย่างทดสอบกับคอนกรีตที่หล่อแทนเสา โดยที่รอยร้าวบริเวณจุดเชื่อมต่อมีแนวโน้มลดลงตามความยาวระยะฝั่งของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การเพิ่มระยะฝั่งของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก ส่งผลให้คานตัวอย่างทดสอบมีลักษณะการวิบัติที่มีความค่อยเป็นค่อยไป (progressive failure) มากยิ่งขึ้น



**Figure 11** Failure of the beam specimen Group 3:

(a) specimen without deformed bars welded to steel plate. (b) specimen with deformed bars welded to steel plate

### 3. ผลของระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบกำลังรับแรงกระทำช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้นที่ได้จากการทดสอบ ( $P_{y, test}$ ) กำลังรับแรงกระทำจากสมการการออกแบบของ วสท. 1008-38 ( $P_{y, calculated}$ ) พบว่า คานตัวอย่างทดสอบมีค่าอัตราส่วน  $P_{y, test}$  ต่อ  $P_{y, calculated}$  (ที่แสดงถึงระดับความปลอดภัยในการใช้งานรับน้ำหนักบรรทุก) เพิ่มขึ้นตามความยาวระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก จากตารางสามารถแบ่งรูปแบบความปลอดภัยในการใช้งานรับน้ำหนักบรรทุกได้ทั้งหมด 3 รูปแบบ ได้แก่ (1) รูปแบบที่ไม่มีความปลอดภัยในการใช้งานรับน้ำหนักบรรทุก คานตัวอย่างทดสอบที่อยู่ในกลุ่มนี้ ได้แก่ คานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็ก และคานตัวอย่างทดสอบอ้างอิงทั้ง 3 กลุ่ม พบว่า คานตัวอย่างทดสอบดังกล่าวมีค่าอัตราส่วน  $P_{y, test}$  ต่อ  $P_{y, calculated}$  ก่อนข้างต่ำกว่าค่าที่ยอมให้ใช้งานรับน้ำหนักบรรทุกได้ (ค่าที่ยอมให้ใช้งานประมาณ 2.0) เนื่องจากคานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กเกิดการวิบัติที่บริเวณเชื่อมต่อก่อนที่จะเกิดการวิบัติตามที่ได้ออกแบบไว้ และคานตัวอย่างทดสอบอ้างอิงเกิดการวิบัติตามที่ได้ออกแบบไว้เพียงเล็กน้อย เมื่อแรงกระทำเพิ่มขึ้นคานจะเกิดการวิบัติที่บริเวณจุดเชื่อมต่อแทน ซึ่งลักษณะการวิบัติที่บริเวณจุดเชื่อมต่อ

เกิดขึ้นแบบทันทีทันใด ส่งผลให้คานตัวอย่างทดสอบมีกำลังต้านทานแรงกระทำที่ค่อนข้างต่ำ (2) รูปแบบที่มีความปลอดภัยปานกลาง คานตัวอย่างทดสอบที่อยู่ในกลุ่มนี้ ได้แก่ คานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1 ที่มีความยาวระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กเท่ากับ 1000 และ 1500 มม. ที่ออกแบบให้เกิดการวิบัติแบบ flexural failure พบว่า คานตัวอย่างทดสอบกลุ่มนี้มีอัตราส่วน  $P_{y, test}$  ต่อ  $P_{y, calculated}$  ใกล้เคียงกับค่าที่ยอมให้ใช้งานรับน้ำหนักบรรทุก เนื่องจากเมื่อแรงกระทำเพิ่มขึ้นคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มดังกล่าวเกิดการวิบัติตามที่ได้ออกแบบไว้ โดยที่รอยร้าวที่บริเวณจุดเชื่อมต่อลดน้อยลงตามความยาวระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก และ (3) รูปแบบที่มีความปลอดภัยเพียงพอต่อการใช้งาน คานตัวอย่างทดสอบที่อยู่ในกลุ่มนี้ ได้แก่ คานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2 และ 3 ที่มีความยาวระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กเท่ากับ 1000 และ 1500 มม. ที่ออกแบบให้เกิดการวิบัติแบบ shear failure พบว่า คานตัวอย่างทดสอบกลุ่มนี้จะมีอัตราส่วน  $P_{y, test}$  ต่อ  $P_{y, calculated}$  อยู่ในช่วงของค่าที่ยอมให้ใช้งานรับน้ำหนักบรรทุก เนื่องจากเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กที่ฝังเข้าไปในแนวขวางมีส่วนช่วยในการต้านทานแรงเฉือนได้ค่อนข้างมาก ส่งผลให้คานตัวอย่างทดสอบดังกล่าวมีอัตราส่วน  $P_{y, test}$  ต่อ  $P_{y, calculated}$  ที่สามารถใช้งานรับน้ำหนักบรรทุกได้ ซึ่ง

แสดงให้เห็นว่า คานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กหรือมีความยาวระยะฝั่งที่ไม่มีเพียงพอส่งผลให้คานตัวอย่างทดสอบมีอัตราส่วน  $P_{y, test}$  ต่อ  $P_{y, calculated}$  ที่ไม่เพียงพอต่อการใช้งานรับน้ำหนักบรรทุก ในขณะที่เมื่อคานตัวอย่างทดสอบมี

ความยาวระยะฝั่งของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กเพียงพอส่งผลให้คานตัวอย่างทดสอบมีอัตราส่วน  $P_{y, test}$  ต่อ  $P_{y, calculated}$  เพียงพอต่อการใช้งานรับน้ำหนักบรรทุก

**Table 5** Applied forces when the beam specimens reach linear elastic limit ( $P_{y, test}$ ), calculated strength of the beam specimens from EIT equations ( $P_{y, calculated}$ ) and ratio of  $P_{y, test}/P_{y, calculated}$

Group	Number of beam specimen	$P_{y, test}$ (kN)	$P_{y, calculated}$ (kN)	Ratio of $P_{y, test}/P_{y, calculated}$
1	RC-0000-100	78.39	116.86	0.67
	PC-0500-100	180.09	116.86	1.54
	PC-1000-100	198.65	116.86	1.70
	PC-1500-100	217.95	116.86	1.87
2	RC-0000-300	73.94	77.49	0.95
	PC-0500-300	118.48	77.49	1.53
	PC-1000-300	159.31	77.49	2.06
	PC-1500-300	200.14	77.49	2.58
3	RC-0000-500	72.16	69.62	1.04
	PC-0500-500	130.36	69.62	1.87
	PC-1000-500	148.17	69.62	2.13
	PC-1500-500	199.39	69.62	2.86

ภาพที่ 12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือน และความยาวระยะฝั่งของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก พบว่า เมื่อความยาวระยะฝั่งของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กมีค่าเพิ่มขึ้นหน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความยาวระยะฝั่งของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก

ตารางที่ 6 เปรียบเทียบหน่วยรับแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในคานตัวอย่างทดสอบทั้ง 3 กลุ่ม เมื่อเปรียบเทียบกับคานตัวอย่างทดสอบอ้างอิง พบว่า คานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กมีหน่วยแรงเฉือนลดลงอยู่ในช่วง 17.19-56.20

เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่เมื่อความยาวของเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กเพิ่มขึ้นหน่วยแรงเฉือนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 10.73-20.90 เปอร์เซ็นต์ สำหรับคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1 อยู่ในช่วง 34.19-68.38 เปอร์เซ็นต์ สำหรับคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2 และอยู่ในช่วง 14.06-53.13 เปอร์เซ็นต์ สำหรับคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 3 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า คานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กมีหน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นต่ำมาก ในขณะที่การเพิ่มความยาวระยะฝั่งของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก ส่งผลให้หน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในคาน

ตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยสำหรับคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1 เนื่องจากเหล็กเสริมรับแรงเฉือนมีระยะห่างที่เพียงพอในการต้านทานแรงเฉือนที่เกิดขึ้น และมีหน่วยแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นค่อนข้างมาก

สำหรับคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2 และ 3 เนื่องจากเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กช่วยเสริมกำลังต้านทานแรงเฉือนร่วมกับเหล็กเสริมรับแรงเฉือนที่มีระยะห่างไม่เพียงพอ

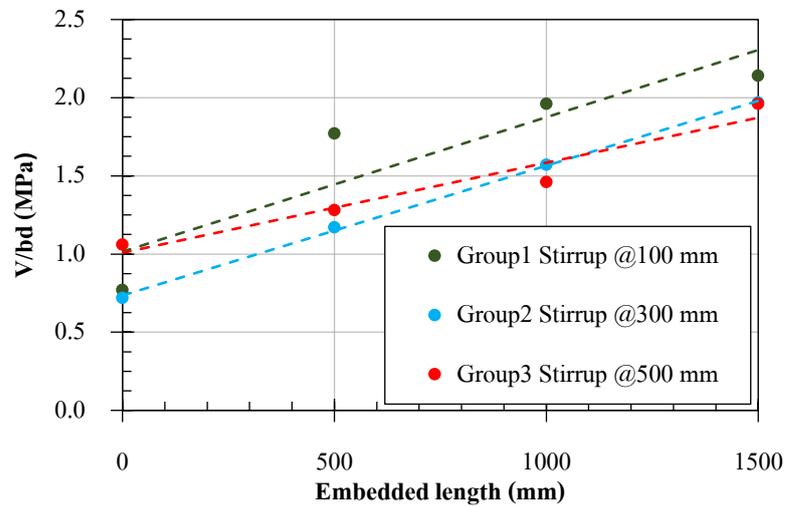


Figure 12 Shear stress in the beam specimen versus steel embedded length.

Table 6 Shear stress in the beam specimen.

Group	Code of beam specimen	Steel embedded length (mm)	Shear stress (MPa)	% of increase/decrease of shear stress (%)
1	RC-0000-100	0	0.77	-56.50
	PC-0500-100	500	1.77	-
	PC-1000-100	1000	1.96	+10.73
	PC-1500-100	1500	2.14	+20.90
2	RC-0000-300	0	0.73	-37.61
	PC-0500-300	500	1.17	-
	PC-1000-300	1000	1.57	+34.19
	PC-1500-300	1500	1.97	+68.38
3	RC-0000-500	0	0.74	-42.19
	PC-0500-500	500	1.28	-
	PC-1000-500	1000	1.46	+14.06
	PC-1500-500	1500	1.96	+53.13

Remark: The + and – signs indicate the increase and decrease of the force  $P_{L/240}$ , respectively.

## สรุป

จากการทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรง ลักษณะการวิบัติ และผลของระยะฝั่งของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กพบว่า

(1) จากความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการต้านทานแรงกระทำ และค่าการแอนตัวที่กึ่งกลางของคานตัวอย่างทดสอบทั้ง กลุ่ม 3 พบว่า คานตัวอย่างทดสอบส่วนใหญ่มีพฤติกรรมการรับแรงแบบ bilinear โดยในช่วงแรกคานตัวอย่างทดสอบจะมีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น (linear elastic) จนกระทั่งเมื่อแรงกระทำมีค่าประมาณ -80 เปอร์เซ็นต์ของความสามารถในการ 90 ต้านทานแรงกระทำสูงสุด ( $P_{max}$ ) คานตัวอย่างทดสอบจะเริ่มเข้าสู่ช่วงพฤติกรรมที่ ซึ่งเป็นพฤติกรรมแบบไร้เชิงเส้น 2 (nonlinear) โดยที่ค่าการแอนตัวของคานตัวอย่างทดสอบมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ในขณะที่ความสามารถในการต้านทานแรงกระทำมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย จนกระทั่งคานตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติ โดยที่ค่าความสามารถในการต้านทานแรงกระทำเพิ่มขึ้นตามความยาวระยะฝั่งของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก

(2) เมื่อเปรียบเทียบกับคานตัวอย่างทดสอบอ้างอิง พบว่า ที่ความสามารถในการต้านทานแรงกระทำที่สภาวะใช้งานหรือ  $P_{L240}$  พบว่า คานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กมีความสามารถในการรับแรงกระทำที่สภาวะใช้งานลดลงอยู่ในช่วง 15.76-38.76 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่การเพิ่มความยาวระยะฝั่งของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก ช่วยเพิ่มความสามารถในการต้านทานแรงกระทำช่วงใช้งานได้อยู่ในช่วง 8.36-13.93 เปอร์เซ็นต์ สำหรับคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1 อยู่ในช่วง 4.27-12.23 เปอร์เซ็นต์ สำหรับคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2 และอยู่ในช่วง 12.39-17.45 เปอร์เซ็นต์ สำหรับคานตัวอย่างทดสอบ

กลุ่มที่ 3 และเมื่อเปรียบเทียบกับคานตัวอย่างทดสอบอ้างอิง ที่ความสามารถในการต้านทานแรงกระทำสูงสุดหรือ  $P_{max}$  พบว่า คานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กมีความสามารถในการรับแรงกระทำที่สภาวะใช้งานลดลงอยู่ในช่วง 18.96-54.31 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่การเพิ่มความยาวระยะฝั่งของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก ช่วยเพิ่มความสามารถในการต้านทานแรงกระทำช่วงใช้งานได้อยู่ในช่วง 10.86-20.51 เปอร์เซ็นต์ สำหรับคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1 อยู่ในช่วง 36.84-69.45 เปอร์เซ็นต์ สำหรับคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2 และอยู่ในช่วง 14.62-51.13 เปอร์เซ็นต์ สำหรับคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 3 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า คานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กมีความสามารถในการต้านทานแรงกระทำช่วงสภาวะใช้งาน และความสามารถในการต้านทานแรงกระทำสูงสุดต่ำลงมา ในขณะที่การเพิ่มความยาวระยะฝั่งของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กช่วยเพิ่มความสามารถในการต้านทานแรงกระทำที่สภาวะใช้งานได้เล็กน้อย และช่วยเพิ่มความสามารถในการต้านทานแรงกระทำสูงสุดได้ค่อนข้างมาก

(3) การมีเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก และการเพิ่มความยาวระยะฝั่งของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก ช่วยเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวที่เกิดขึ้นระหว่างคานตัวอย่างทดสอบกับคอนกรีตที่หล่อแทนเสา ส่งผลให้คานตัวอย่างทดสอบเปลี่ยนรูปแบบการวิบัติจากการวิบัติแบบแตกร้าวในแนวตั้งของคอนกรีตที่เป็นจุดต่อระหว่างคานตัวอย่างทดสอบ และจุดรองรับเนื่องจากการเลื่อนของแผ่นเหล็ก (slip mode) เป็นการวิบัติแบบ flexural failure ที่บริเวณกึ่งกลางคานตัวอย่างทดสอบ สำหรับคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1 และการวิบัติแบบ diagonal shear failure ที่บริเวณจุดรองรับไปจนถึงระยะประมาณ  $L/3$  ของคานตัวอย่างทดสอบสำหรับคานตัวอย่างทดสอบ

กลุ่มที่ 2 และ 3 จากนั้นจึงเกิดรอยแตกร้าวในแนวตั้งของคอนกรีตเนื่องจากการเลื่อนของแผ่นเหล็ก โดยที่รอยร้าวลดลงตามความยาวระยะฝั่งของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การมีเหล็กข้ออ้อย และการเพิ่มความยาวระยะฝั่งของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก ส่งผลให้คานตัวอย่างทดสอบเปลี่ยนลักษณะการวิบัติจากแบบทันทีทันใดให้มีการวิบัติแบบค่อยเป็นค่อยไปมากยิ่งขึ้น

(4) เมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างกำลังต้านทานแรงกระทำช่วงยึดหยุ่นเชิงเส้นที่ได้จากการทดสอบ ( $P_{y, test}$ ) ต่อกำลังต้านทานแรงกระทำช่วงยึดหยุ่นเชิงเส้นที่ได้จากสมการของ วสท.1008-38 ( $P_{y, calculated}$ ) พบว่า คานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็ก และคานตัวอย่างทดสอบอ้างอิงทุกกลุ่มมีอัตราส่วน  $P_{y, test}$  ต่  $P_{y, calculated}$  ที่ไม่เพียงพอต่อการใช้งานรับน้ำหนักบรรทุก เนื่องจากเกิดการวิบัติที่บริเวณจุดเชื่อมต่อเป็นหลัก คานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1 ที่มีความยาวระยะฝั่งของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กเท่ากับ 1000 และ 1500 มม. ที่ออกแบบให้เกิดการวิบัติแบบ flexural failure มีอัตราส่วน  $P_{y, test}$  ต่  $P_{y, calculated}$  ที่ใกล้เคียงต่อการใช้งานรับน้ำหนักบรรทุก เนื่องจากเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กมีส่วนช่วยเพิ่มกำลังต้านทานแรงเฉือนเพียงเล็กน้อย และคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2 และ 3 ที่มีความยาวระยะฝั่งของเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กเท่ากับ 1000 และ 1500 มม. ที่ออกแบบให้เกิดการวิบัติแบบ shear failure มีอัตราส่วน  $P_{y, test}$  ต่  $P_{y, calculated}$  ที่เพียงพอต่อการใช้งานรับน้ำหนักบรรทุก เนื่องจากเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กมีส่วนช่วยเพิ่มกำลังต้านทานแรงเฉือนได้ค่อนข้างมาก

(5) เมื่อเปรียบเทียบหน่วยแรงเฉือนกับคานตัวอย่างทดสอบอ้างอิง พบว่า คานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กมี

หน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นลดลงอยู่ในช่วง 17.19-56.50 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่เมื่อความยาวระยะฝั่งของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กมีค่าเพิ่มขึ้นหน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 10.73-20.90 เปอร์เซ็นต์ สำหรับคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1 อยู่ในช่วง 34.19-68.38 เปอร์เซ็นต์ สำหรับคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2 และ อยู่ใน ช่วง 14.06-53.13 เปอร์เซ็นต์ สำหรับคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 3 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความยาวระยะฝั่งของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก ช่วยเพิ่มหน่วยแรงเฉือนให้กับคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1 เล็กน้อย เนื่องจากคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1 มีระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมรับแรงเฉือนที่เพียงพอในการต้านทานแรงเฉือน และช่วยเพิ่มหน่วยแรงเฉือนให้กับคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2 และ 3 ได้ค่อนข้างมาก เนื่องจากคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2 และ 3 มีระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมรับแรงเฉือนไม่เพียงพอในการต้านทานแรงเฉือน การเพิ่มความยาวระยะฝั่งของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กจึงช่วยเสริมหน่วยแรงเฉือนเพื่อชดเชยระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมรับแรงเฉือนที่ไม่เพียงพอ นอกจากนั้นแล้ว ตัวแปรที่สำคัญอีกตัวแปรหนึ่งคือ ระยะห่างของเหล็กปลอกที่ต่างกันตั้งแต่ 100 300 และ 500 มม. ที่ส่งผลต่อลักษณะการวิบัติ (mode of failure) ของคานจากรูปแบบ flexural ไปสู่ shear โดยพบว่า คานตัวอย่างทดสอบในการศึกษานี้ จำเป็นต้องปฏิบัติตามข้อกำหนดของเหล็กปลอกรับแรงเฉือนของ วสท 1008-38 เพื่อให้คานมีการวิบัติในรูปแบบ flexural ที่เหมาะสม

### ข้อเสนอแนะ

จากการทดสอบคานตัวอย่างทดสอบในการศึกษานี้ ผู้วิจัยขอเสนอข้อเสนอแนะในการนำผลการศึกษาไปใช้งานตามรูปแบบความปลอดภัยในการใช้งานรับน้ำหนักบรรทุก ดังนี้

(1) รูปแบบที่มีความปลอดภัยในการใช้งานรับน้ำหนักบรรทุกทุก ได้แก่ คานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2 และ 3 ที่มีระยะฝั่งของเหล็กข้ออ้อย 1000 และ 1500 มม. ที่ออกแบบให้วิบัติแบบ shear failure พบว่าเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก ที่ฝั่งในแนวขวางมีส่วนช่วยในการรับแรงเฉือนของคานและทำให้มีอัตราส่วนระหว่างกำลังต้านทานแรงกระทำช่วงยึดหยุ่นเชิงเส้นที่ได้จากการทดสอบต่อกำลังต้านทานแรงกระทำช่วงยึดหยุ่นจากสมการของ วสท. 1008-38 พบว่า อยู่ในช่วง 2.06 ถึง 2.86 ซึ่งถือว่า อยู่ในช่วงที่ยอมรับให้ใช้งานได้

(2) รูปแบบที่มีความปลอดภัยในการใช้งานรับน้ำหนักบรรทุกทุกปานกลาง ได้แก่ คานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1 ที่มีระยะฝั่งของเหล็กข้ออ้อย 1000 และ 1500 มม. ที่ออกแบบให้วิบัติแบบ flexural failure นั้น พบว่า คานตัวอย่างทดสอบดังกล่าวเกิดการวิบัติตามลักษณะที่กำหนด จากนั้น จึงเกิดการวิบัติที่บริเวณจุดเชื่อมต่อ ดังนั้น ถ้าหากต้องการนำไปใช้งานแล้ว วิศวกรควรพิจารณาลดความสามารถในการต้านทานแรงกระทำของคานโดยใช้ตัวคูณลดกำลังที่เหมาะสม เพื่อให้เกิดความปลอดภัยในการใช้งานมากขึ้น

(3) รูปแบบที่ไม่มีความปลอดภัยในการใช้งานรับน้ำหนักบรรทุกทุก ได้แก่ คานตัวอย่างทดสอบทุกกลุ่ม ที่ไม่มีระยะฝั่งของเหล็กข้ออ้อย และที่มีระยะฝั่งของเหล็กข้ออ้อย 500 มม. พบว่า ไม่ควรมาใช้งานรับแรงกระทำตามสมการการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย 1008-38 เนื่องจากคานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีระยะฝั่งของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กเกิดการวิบัติที่บริเวณจุดเชื่อมต่อ ก่อนที่จะเกิดการวิบัติในลักษณะที่กำหนด คานตัวอย่างทดสอบอ้างอิงเกิดการวิบัติตามรูปแบบเพียงเล็กน้อย เมื่อแรงกระทำเพิ่มขึ้นจะเกิดการวิบัติที่บริเวณจุดเชื่อมต่อ และทำให้

มีความสามารถในการต้านทานแรงกระทำต่ำกว่าที่สมการออกแบบ ทำนาย

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่สนับสนุนงบประมาณ สถานที่ และเครื่องมือทดสอบ

## เอกสารอ้างอิง

- Engineering Institute of Thailand. 1995. **Reinforced Concrete Design: Strength Design Method (EIT Standard 1008-38)**. Engineering Institute of Thailand under His Majesty the King's Patronage, Bangkok.
- Guo, X., Gao, S., Wang, L. and Bui, T.N. 2018. Bearing capacity of embedded channel-shaped steel connections at precast concrete beam end. **Engineering Structures** 175(1): 177-190.
- Thai Industrial Standards Institute. 1982. **Notification of the Ministry of Industry (TIS 409-2525) 1982 Title: Test method for compressive strength of concrete specimens**. Government Gazette vol.99, Special Part 51 (dated April 9, 1982). (in Thai)
- Thai Industrial Standards Institute. 1998. **Notification of the Ministry of Industry (TIS 1479-2541) 1998 Title: Hot-rolled flat steel of commercial and drawing qualities**. Government Gazette vol.116, Special Part 107 (dated December 24, 1999). (in Thai)
- Thai Industrial Standards Institute. 2016a. **Notification of the Ministry of Industry (TIS 20-2559)**

**2016 Title: Steel bars for reinforcing concrete: Round bar.** Government Gazette vol.133, Special Part 87 (dated May 24, 2016).  
(in Thai)

Thai Industrial Standards Institute. 2016b. **Notification of the Ministry of Industry (TIS 24-2559)**

**2016 Title: Steel bars for reinforcing concrete: Deformed bar.** Government Gazette vol.133, Special Part 87 (dated May 24, 2016). (in Thai)

Thumrongvut, J. and Seangatith, S. 2005. Precast Reinforced Concrete Beams with Steel Channel Sections Embedded at the Support Sections under Transverse Point Loads, pp. 1-6. **In Tenth National Convention on Civil Engineering.** Engineering Institute of Thailand under His Majesty the King's Patronage.

Yip, W.K., Teng, S., Ting, S.K. and Hu, H.B. 1999. Behaviour of precast reinforced concrete beams with structural steel I-section embedded at the support section, pp. 973-978. **In Seventh East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction.** Kochi University of Technology, Kochi, Japan.

# การพัฒนาอัลกอริทึมสำหรับระบบฟาร์มอัจฉริยะด้วยโหมดประหยัดพลังงาน

## Development of Algorithm for Smart Cricket Farms with Deep Sleep Mode

เอกรัฐ ชะอู่มเอียด<sup>1</sup> สิทธิพงษ์ เพ็งประเดิม<sup>2</sup> และ เดือนแรม แผงเกี้ยว<sup>1\*</sup>  
Accarat Chaoumead<sup>1</sup>, Sittipong Pengpraderm<sup>2</sup> and Duanraem Phaengkio<sup>1\*</sup>

Received: 30 June 2022, Revised: 25 June 2023, Accepted: 7 July 2023

### บทคัดย่อ

นวัตกรรมฟาร์มอัจฉริยะเป็นนวัตกรรมที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้กับงานด้านการเกษตรสมัยใหม่มากขึ้น เนื่องจากสามารถเพิ่มประสิทธิภาพด้านการผลิต ลดต้นทุน และการควบคุมคุณภาพการผลิต ใช้สำหรับการตรวจสอบข้อมูลและควบคุมสถานะแวดล้อมที่เป็นตัวแปรสำคัญในการเพาะปลูกพืช การใช้งานลักษณะดังกล่าวทำให้เกิดการใช้พลังงานไฟฟ้าค่อนข้างมาก เนื่องจากระบบควบคุมฟาร์มอุปกรณ์ถูกใช้งานตลอด 24 ชั่วโมง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาอัลกอริทึมที่สามารถลดการพลังงานไฟฟ้าได้ไม่น้อยกว่าร้อยละ 20 สำหรับใช้งานในระบบสมาร์ตฟาร์ม โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงหรือเพิ่มอุปกรณ์จากระบบสมาร์ตฟาร์มเดิม ใช้วิธีการปรับปรุงชุดคำสั่งควบคุมการทำงานของเอาต์พุตจากระบบฟาร์มอัจฉริยะเดิมด้วยอัลกอริทึมตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงข้อมูลของอินพุต ได้แก่ อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ ตามช่วงเวลาในแต่ละฤดูกาลร่วมกับโหมดประหยัดพลังงาน (Deep Sleep Mode; DSM) นอกจากนั้นยังออกแบบให้สามารถทำงานร่วมกับระบบฐานข้อมูลและแสดงผลผ่านหน้าเว็บเบราว์เซอร์ผ่านเครือข่ายไร้สาย เพื่อตรวจสอบการทำงานแบบเรียลไทม์ จากผลการทดสอบเปรียบเทียบด้านการใช้พลังงานไฟฟ้าระหว่างระบบฟาร์มอัจฉริยะทั่วไปกับระบบสมาร์ตฟาร์มที่พัฒนาขึ้นระยะเวลา 40 วัน กรณีศึกษาเลี้ยงจิ้งหรีด พบว่า ระบบสมาร์ตฟาร์มอัจฉริยะทั่วไปใช้พลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 42.25 kWh และระบบสมาร์ตฟาร์มที่พัฒนาขึ้นใช้พลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 21.04 kWh ซึ่งการใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบสมาร์ตฟาร์มที่พัฒนาขึ้นลดลง 21.21 kWh เมื่อเทียบกับสมาร์ตฟาร์มเดิมคิดเป็นร้อยละ 50.20 และการเจริญเติบโตของจิ้งหรีดที่เลี้ยงในทั้งสองระบบมีการเจริญเติบโตใกล้เคียงกัน ดังนั้น จึงสามารถสรุปได้ว่าอัลกอริทึมที่พัฒนาขึ้นเมื่อนำไปใช้ควบคุมการทำงานของระบบสมาร์ตฟาร์มสามารถช่วยลดการใช้พลังงานไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ

**คำสำคัญ:** ฟาร์มอัจฉริยะ, ประหยัดพลังงาน, อัลกอริทึม, โหมดประหยัดพลังงาน

<sup>1</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา พิษณุโลก อำเภอเมืองพิษณุโลก จังหวัดพิษณุโลก 65000

<sup>1</sup> Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna Phitsanulok, Muang Phitsanulok, Phitsanulok 65000, Thailand.

<sup>2</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก อำเภอเมือง จังหวัดตาก 63000

<sup>2</sup> Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna Tak, Muang, Tak 63000, Thailand.

\* ผู้นิพนธ์ประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): duanraem@rmul.ac.th, duanraemp@gmail.com

## ABSTRACT

Smart farming is an agricultural innovation that has been increasingly applied to modern agriculture because it can increase production efficiency, reduce costs, and control production quality. It can also be used for monitoring environmental control data which is an important variable in plant cultivation. Since the control system is operated 24 hours a day, such applications consume a lot of electricity. Therefore, this research aimed to develop an algorithm that could reduce power consumption by at least 20% for use in a smart farm system without changing or adding equipment from the original smart farm. An improved algorithm was used to control the output from the original smart farm system with an algorithm to monitor changes in inputs such as temperature and humidity over time in each season, in combination with Deep Sleep Mode (DSM). In addition, it was designed to be compatible with database systems and to display web pages through a wireless network browser to monitor the operation in real time. From a 40-day comparative test on electricity usage between the original smart farm system and the developed smart farm system, it was found that the original smart farm system consumed 42.25 kWh of electricity and the proposed smart farm system consumed 21.04 kWh. The electric power consumption of the developed smart farms system decreased by 21.21 kWh, representing a 50.20% reduction compared to the original smart farms system. In addition, crickets raised in both systems showed similar growth. Therefore, it can be concluded that the algorithm developed, when applied to control the operation of the smart farm system, can effectively reduce electricity consumption.

**Key words:** smart farm, energy saving, algorithm, deep sleep mode (DSM)

### บทนำ

ปัจจุบันเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ เทคโนโลยีการสื่อสาร โทรคมนาคมและเครือข่ายคอมพิวเตอร์มีความเจริญก้าวหน้าไปมาก รวมถึงมีการใช้งานเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายอย่างแพร่หลาย และมีการประยุกต์ใช้งานด้านการเกษตร โดยเฉพาะอย่างยิ่งการนำเครือข่ายไร้สายมาประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบสภาพแวดล้อม อาทิ อุณหภูมิ ความชื้น สัมพัทธ์ ปริมาณแสง ความร้อน ฯลฯ ซึ่งทำให้การตรวจสอบสภาพแวดล้อมมีประสิทธิภาพมากขึ้น (Zhang *et al.*, 2002; Lakshmisudha *et al.*, 2016; Ahmed *et al.*, 2018; Thongpan and Therengphak, 2020) วิทยาการของการสื่อสารไร้สายถูกรวมเข้ากับ

อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เน้นการลดต้นทุนของอุปกรณ์ให้มีต้นทุนต่ำลง ขนาดเล็กลง และใช้พลังงานต่ำ ระบบฟาร์มอัจฉริยะเป็นหนึ่งในนวัตกรรมทางการเกษตรที่ประยุกต์และบูรณาการหลายศาสตร์ร่วมกันอย่างเป็นระบบเพื่อนำไปใช้งานในภาคเกษตรกรรมให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นในด้านการลดต้นทุน การเพิ่มผลผลิต และเพิ่มศักยภาพด้านการควบคุมคุณภาพการผลิต ใช้สำหรับการตรวจสอบข้อมูลและควบคุมสถานะแวดล้อมที่เป็นตัวแปรสำคัญในการเพาะปลูกพืช การเลี้ยงสัตว์ หรือฟาร์มอัจฉริยะอื่น ๆ การใช้พลังงานไฟฟ้าในการควบคุมฟาร์มแบ่งการใช้พลังงานเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนของอุปกรณ์อินพุต อุปกรณ์เอาต์พุตและส่วนของชุด

ประมวลผล การใช้งานลักษณะดังกล่าวทำให้เกิดการใช้พลังงานไฟฟ้าค่อนข้างมาก เนื่องจากอุปกรณ์ในระบบควบคุมถูกใช้งานตลอด 24 ชั่วโมง (Jeepet and Sudharatna, 2017; Boonchieng *et al.*, 2018; Kanjanawanishkul *et al.*, 2020) ที่ผ่านมามีการใช้วิธีการที่หลากหลายสำหรับการจัดการฟาร์มอัจฉริยะเพื่อลดการใช้พลังงานไฟฟ้า ส่วนใหญ่เน้นการติดตามการทำงานและปรากฏการณ์ทางกายภาพ (Namhormchan and Muangchan, 2020) เช่น การลดใช้พลังงานของโรงเรือนเพาะปลูกพืชระบบปิดด้วยเทคนิคทางความเย็นและการออกแบบอุปกรณ์ที่เหมาะสมกับการใช้งานในโรงเรือนเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพด้านพลังงานไฟฟ้าสูงสุด (Tudose *et al.*, 2016; Xu *et al.*, 2017) การควบคุมการรับค่าของเซนเซอร์ด้วยวิธีการกำหนดค่าของ duty cycle สำหรับอุปกรณ์ที่แตกต่างกัน และการควบคุมการทำงานด้วยโหมดประหยัดพลังงาน (Deep Sleep Mode; DSM) เป็นรูปแบบการควบคุมการจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับระบบควบคุมที่สามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าได้ โดยมีเพียงส่วนของนาฬิกาแบบเรียลไทม์ (Real Time Clock; RTC) เท่านั้นที่ใช้พลังงาน (Doshi *et al.*, 2019) ซึ่งการใช้โหมดประหยัดพลังงานสำหรับการอ่านค่าสภาพแวดล้อมในฟาร์มของแต่ละช่วงเวลาเพื่อเก็บข้อมูลค่าสภาพแวดล้อมของโรงเรือนและการใช้โหมดทำงานดังกล่าวสามารถช่วยลดการใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบได้ เนื่องจากการควบคุมการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ด้วยโหมดประหยัดพลังงานจะใช้กระแสไฟฟ้าเพียง 0.02 mA เท่านั้น ซึ่งระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ปกติจะใช้กระแสไฟฟ้า 120 mA – 170 mA (CircuitDigest, 2019)

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาอัลกอริทึมที่สามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าสำหรับใช้งานในระบบฟาร์มอัจฉริยะ กระจกศึกษาฟาร์มอัจฉริยะ

โดยไม่มีมีการเปลี่ยนแปลงหรือเพิ่มอุปกรณ์จากระบบฟาร์มอัจฉริยะเดิม ใช้วิธีการปรับปรุงชุดคำสั่งควบคุมการทำงานของเอาต์พุตจากระบบฟาร์มอัจฉริยะเดิมด้วยอัลกอริทึมตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของอินพุต ได้แก่ อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ ตามช่วงเวลาในแต่ละฤดูกาลร่วมกับโหมดประหยัดพลังงาน ซึ่งทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการควบคุมสภาพแวดล้อม ค่าพลังงานไฟฟ้าและการเจริญเติบโตของพืชระหว่างระบบควบคุมฟาร์มอัจฉริยะทั่วไป (Simple Mode; SM) กับระบบควบคุมฟาร์มอัจฉริยะด้วยโหมดประหยัดพลังงาน (Deep Sleep Mode; DSM) นอกจากนั้นยังออกแบบให้สามารถทำงานร่วมกับระบบฐานข้อมูลและแสดงผลผ่านหน้าเว็บเบราว์เซอร์ผ่านเครือข่ายไร้สาย เพื่อตรวจสอบสถานะการทำงานและความแม่นยำของระบบฟาร์มอัจฉริยะอีกด้วย

## วิธีดำเนินการวิจัย

ในงานวิจัยนี้นำเสนออัลกอริทึมสำหรับลดการใช้พลังงานไฟฟ้าในฟาร์มอัจฉริยะ กระจกศึกษาฟาร์มอัจฉริยะ โดยมีปัจจัยที่ควบคุมได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ สายพันธุ์พืช ปริมาณน้ำ การทดสอบเปรียบเทียบประสิทธิภาพการควบคุมสภาพแวดล้อม ค่าพลังงานไฟฟ้าและการเจริญเติบโตของพืชระหว่างระบบควบคุมฟาร์มอัจฉริยะทั่วไปกับระบบควบคุมฟาร์มอัจฉริยะด้วยโหมดประหยัดพลังงาน แสดงรายละเอียดดังนี้

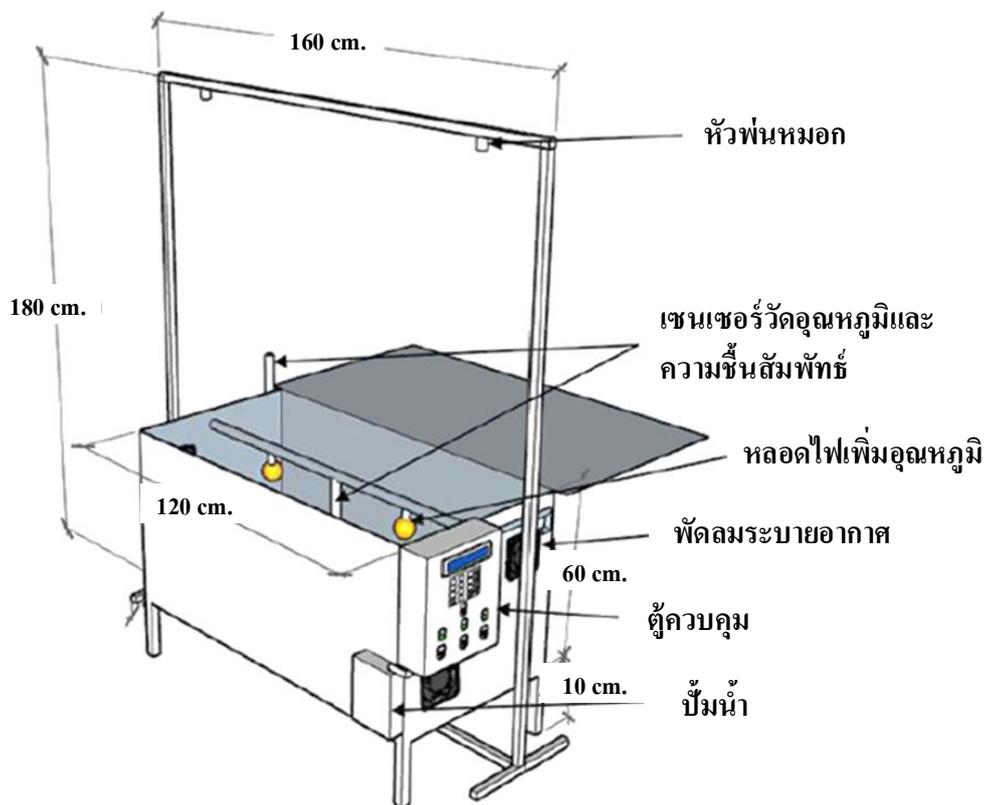
### 1. ต้นแบบระบบเลี้ยงจิ้งหรีดในงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ทำการพัฒนาอัลกอริทึมจากระบบควบคุมฟาร์มอัจฉริยะทั่วไปและทำการทดสอบกับต้นแบบระบบเลี้ยงจิ้งหรีดขนาดมาตรฐาน 120 x 60 เซนติเมตร แสดงดังภาพที่ 1 โดยระบบควบคุมทั้งสองระบบมีอุปกรณ์อินพุตจำนวน 8 อินพุต ประกอบด้วย เซนเซอร์วัดอุณหภูมิภายใน

ตัวที่ 1 เซนเซอร์วัดอุณหภูมิภายในตัวที่ 2 เซนเซอร์วัดอุณหภูมิภายในตัวที่ 3 เซนเซอร์วัดอุณหภูมิภายนอก เซนเซอร์วัดความชื้นสัมพัทธ์ภายในตัวที่ 1 เซนเซอร์วัดความชื้นสัมพัทธ์ภายในตัวที่ 2 เซนเซอร์วัดความชื้นสัมพัทธ์ภายในตัวที่ 3 และเซนเซอร์วัดความชื้นสัมพัทธ์ภายนอก และอุปกรณ์เอาต์พุต จำนวน 3 เอาต์พุต ประกอบด้วย หลอดเพิ่มอุณหภูมิ บีมพ่นหมอก และพัดลม แสดงอุปกรณ์รับข้อมูล อุปกรณ์ประมวลผล และอุปกรณ์เอาต์พุตดังตารางที่ 1 โดยทั้งสองระบบกำหนดตัวแปรและเงื่อนไขของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ดังนี้

- อุณหภูมิเฉลี่ยภายในมากกว่า 30 องศาเซลเซียสและความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยภายในน้อยกว่า 50 %RH จะสั่งให้อุปกรณ์เอาต์พุต ได้แก่ พัดลมและบีมพ่นหมอกทำงาน เพื่อลดอุณหภูมิและเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์

- อุณหภูมิเฉลี่ยภายในน้อยกว่า 25 องศาเซลเซียสและความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยภายในมากกว่า 60 %RH จะสั่งให้อุปกรณ์เอาต์พุต ได้แก่ หลอดเพิ่มอุณหภูมิและพัดลมทำงาน เพื่อเพิ่มอุณหภูมิและลดความชื้นสัมพัทธ์



ภาพที่ 1 ต้นแบบระบบควบคุมฟาร์มอัจฉริยะทั่วไป กรณีศึกษา ฟาร์มจิ้งหรีด

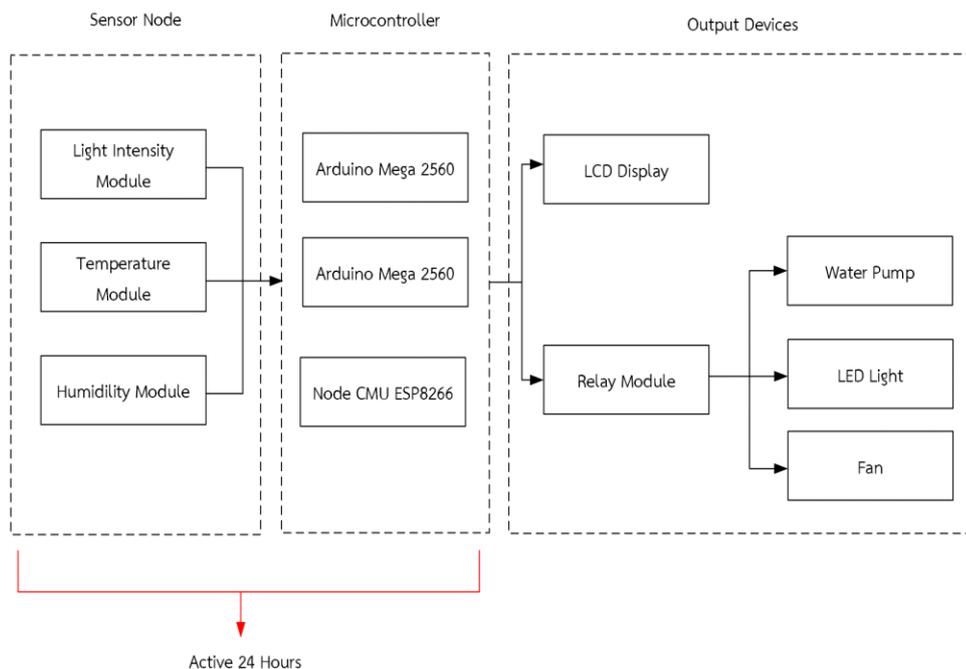
ตารางที่ 1 คุณลักษณะของอุปกรณ์ระบบควบคุมฟาร์มอัจฉริยะทั่วไป

อุปกรณ์	คุณลักษณะ
เซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้นรุ่น DHT 22	แรงดันไฟฟ้า 3.3-6 Vdc , กระแสไฟฟ้า 1-1.5 mA ความชื้นสัมพัทธ์ 0-100% RH ( $\pm 2\%$ RH) อุณหภูมิอากาศ -40 – 80 °C ( $\pm 0.5$ °C)
บอร์ดคอมพิวเตอร์ รุ่น ESP8266 Node MCU V3	ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP-8266 32 bit แรงดันไฟฟ้า 4.5-10 Vdc ADC Range 0-3.3 V
หลอดเซรามิกให้ความร้อน	แรงดันไฟฟ้า 220 Vac, กำลังไฟฟ้า 100 W
พัดลมระบายอากาศ	แรงดันไฟฟ้า 12 Vdc, กระแสไฟฟ้า 100 mA, กำลังไฟฟ้า 1.2 W
ปั๊มน้ำ	แรงดันไฟฟ้า 12 Vdc, กระแสไฟฟ้า 5 A, กำลังไฟฟ้า 60 W แรงดันน้ำสูงสุด 8 บาร์

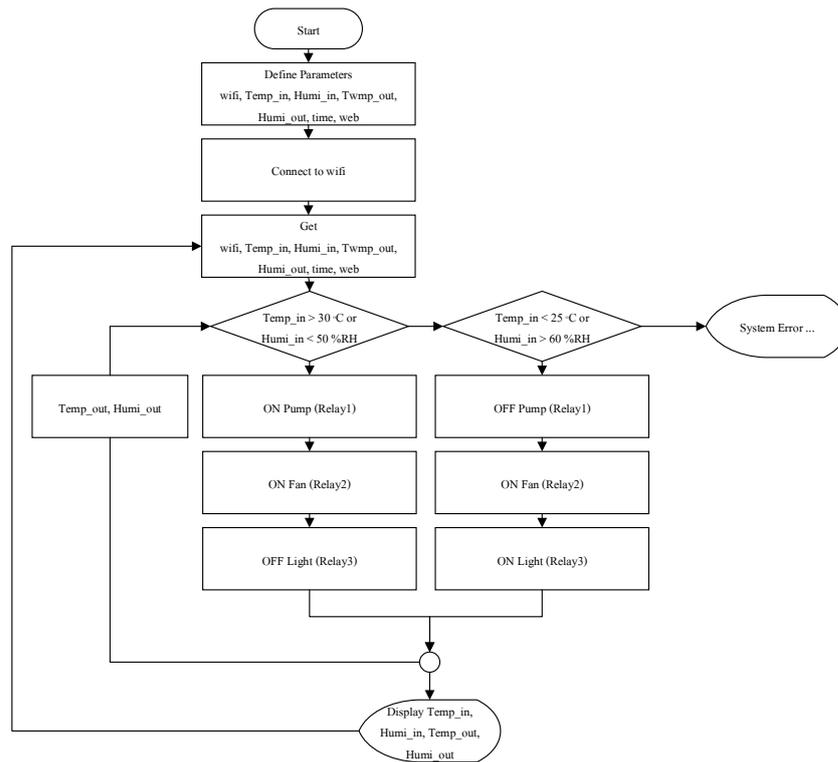
## 2. อัลกอริทึมของระบบควบคุมฟาร์มอัจฉริยะทั่วไป

ระบบควบคุมฟาร์มอัจฉริยะทั่วไปแสดงผังการทำงานดังภาพที่ 2 (ก) ซึ่งแบ่งอุปกรณ์เป็น 3 ส่วน ได้แก่ อุปกรณ์รับข้อมูล อุปกรณ์ประมวลผลและอุปกรณ์เอาต์พุต และแผนผังการไหลของอัลกอริทึม

ระบบควบคุมฟาร์มอัจฉริยะทั่วไปดังภาพที่ 2 (ข) ซึ่งระบบจะทำงานตลอด 24 ชั่วโมง เพื่อรักษาอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของสภาพแวดล้อมภายในตามเงื่อนไขที่กำหนด



(ก) ผังการทำงานการทำงานของระบบควบคุมฟาร์มอัจฉริยะทั่วไป



(ข) แผนผังการไหลของอัลกอริทึม

ภาพที่ 2 ระบบควบคุมฟาร์มอัจฉริยะทั่วไป กรณีศึกษา ฟาร์มจังหวัด

### 3. อัลกอริทึมสำหรับระบบฟาร์มอัจฉริยะด้วยโหมดประหยัดพลังงาน

ในส่วนนี้นำเสนอวิธีการปรับปรุงชุดคำสั่งควบคุมการทำงานของเอาต์พุตจากระบบฟาร์มอัจฉริยะเดิมด้วยอัลกอริทึมตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของอินพุต ได้แก่ อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ตามช่วงเวลาในแต่ละฤดูกาลร่วมกับโหมดประหยัดพลังงาน (Deep Sleep Mode; DSM) ที่มีไมโครคอนโทรลเลอร์ นอกจากนั้นยังออกแบบให้สามารถทำงานร่วมกับระบบฐานข้อมูลและแสดงผลผ่านหน้าเว็บเบราว์เซอร์ผ่านเครือข่ายไร้สาย เพื่อตรวจสอบการทำงานแบบเรียลไทม์ แสดงผังการทำงานดังภาพที่ 3 (ก) และแผนผังการไหลของอัลกอริทึมระบบฟาร์มอัจฉริยะด้วยโหมดประหยัดพลังงานดังภาพที่ 3 (ข) โดยทางคณะผู้จัดทำอ้างอิงค่าสภาพแวดล้อมจากเกณฑ์การเลี้ยงจิ้งหรีดอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเลี้ยงจิ้งหรีด คืออุณหภูมิ

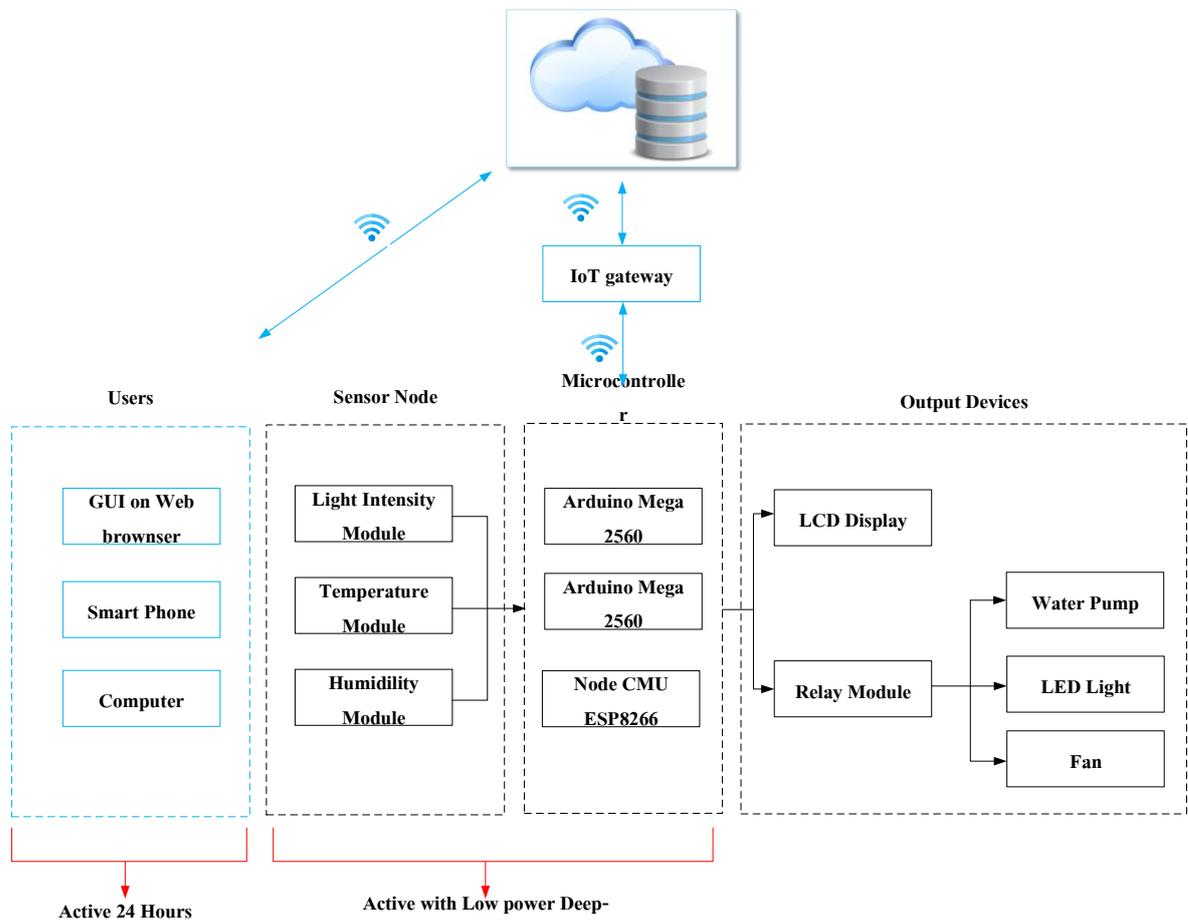
25-30 องศาเซลเซียส ซึ่งจิ้งหรีดจะสามารถกินและวางไข่ได้ หากอุณหภูมิต่ำหรือสูงกว่าข้อมูลข้างต้นจิ้งหรีดจะกินอาหารได้น้อย ซึ่งส่งผลกระทบต่อเจริญเติบโต (Department of Livestock Development, 2021) จากการศึกษาค่าอุณหภูมิและความชื้นย้อนหลังของจังหวัดพิจิตรโลกในเดือนตุลาคมปี 2563 ถึง เดือนตุลาคม ปี 2564 (Meteorological Department, 2021) สามารถสรุปการเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ได้ คือ ฤดูร้อนและฤดูหนาวมีการเปลี่ยนแปลงของค่าอุณหภูมิและความชื้นที่อยู่ในช่วงใกล้เคียงกันมีช่วงเวลาการเปลี่ยนแปลงแตกต่างกันไม่เกิน 3 ชั่วโมงต่อวัน ต่างจากฤดูฝนที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์แตกต่างกันเกิน 7 ชั่วโมงต่อวัน ดังนั้น จึงพัฒนาอัลกอริทึมส่วนของเงื่อนไขเวลาในการเข้าสู่โหมดประหยัดพลังงาน โดยแบ่งออกเป็น 2 ฤดูกาล ได้แก่ ฤดูร้อนและฤดูฝน แสดงช่วงเวลาดังนี้

ฤดูร้อน :

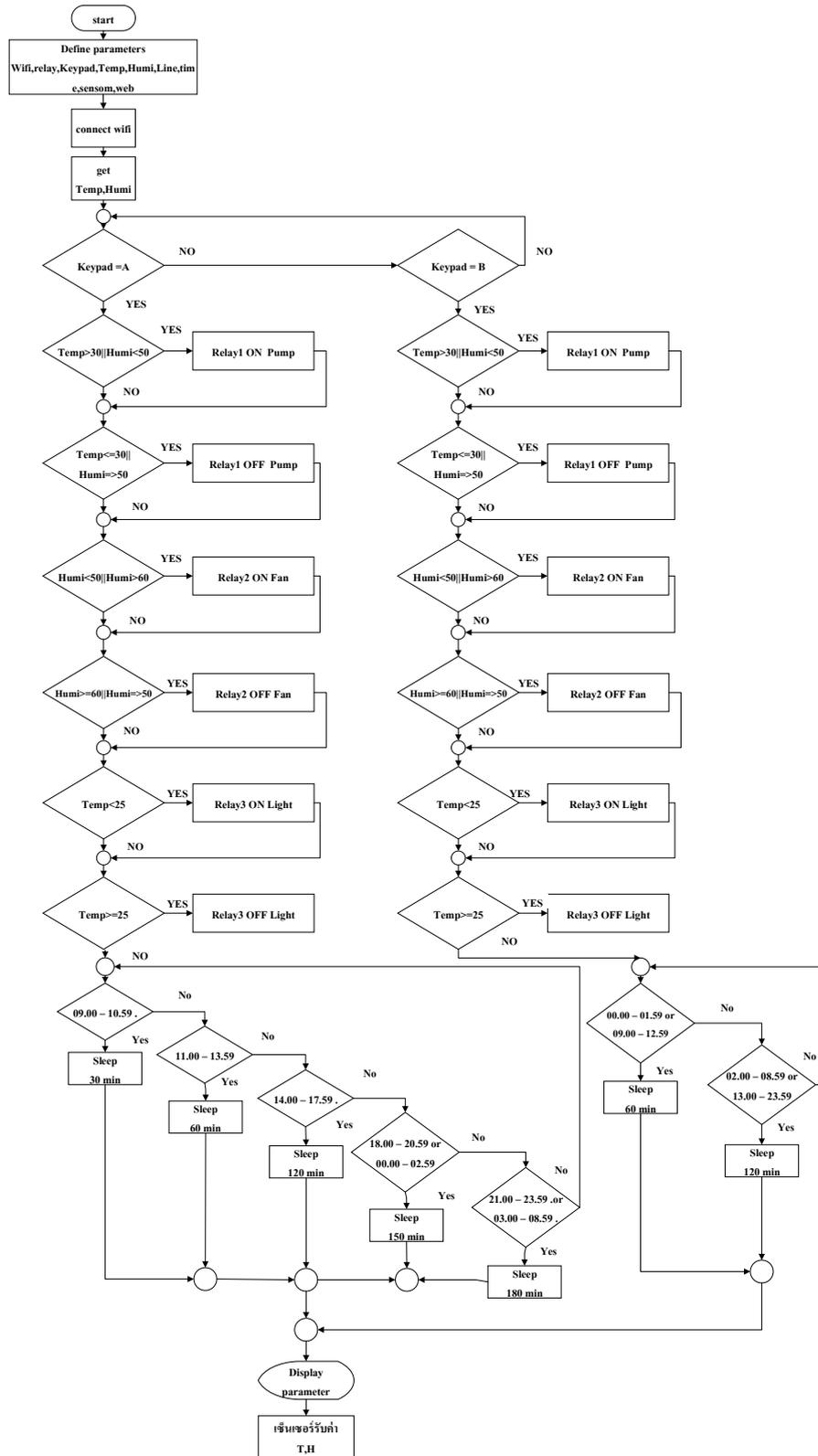
- เวลา 09.00 - 10.59 น. เข้าสู่ DSM 30 minutes
- เวลา 11.00 - 13.59 น. เข้าสู่ DSM 60 minutes
- เวลา 14.00 - 17.59 น. เข้าสู่ DSM 120 minutes
- เวลา 18.00 - 20.59 น. และ 00.00 - 02.59 น. เข้าสู่ DSM 150 minutes
- เวลา 21.00 - 23.59 น. และ 03.00 - 08.59 น. เข้าสู่ DSM 180 minutes

ฤดูฝน :

- เวลา 00.00 - 01.59 น. และ 09.00 - 12.59 น. เข้าสู่ DSM 60 minutes
- เวลา 02.00 - 08.59 น. และ 13.00 - 23.59 น. เข้าสู่ DSM 120 minutes



(ก) ผังการทำงานของระบบฟาร์มอัจฉริยะด้วยโหมดประหยัดพลังงาน



(ข) แผนผังการไหลของอัลกอริทึมระบบฟาร์มอัจฉริยะด้วยโหมดประหยัดพลังงาน  
 ภาพที่ 3 ระบบฟาร์มอัจฉริยะด้วยโหมดประหยัดพลังงาน กรณีศึกษา ฟาร์มจิ้งหรีด

#### 4. การวัดการเจริญเติบโตของจิ้งหรีด

ในงานวิจัยนี้ทำการวัดการเจริญเติบโตของจิ้งหรีดเปรียบเทียบระหว่างระบบฟาร์มอัจฉริยะทั่วไปกับระบบฟาร์มอัจฉริยะด้วยโหมดประหยัดพลังงานกรณีฟาร์มเลี้ยงจิ้งหรีด ซึ่งใช้จิ้งหรีดสายพันธุ์ทองคำ และทำการวัดการเจริญเติบโตของจิ้งหรีดเป็นระยะเวลา 40 วัน ดังนี้

- การวัดขนาดตัวจิ้งหรีดด้วยเครื่องวัดคาลิเปอร์ดิจิตอล (Digimatic Caliper) มีค่าความแม่นยำ  $\pm 0.02$  mm. สุ่มครั้งละ 27 ตัว แบ่งการวัดขนาดตัวออกเป็น 4 ระยะ ได้แก่ ระยะที่ 1 วันที่ 10 ของการเลี้ยง ระยะที่ 2 วันที่ 20 ของการเลี้ยง ระยะที่ 3 วันที่ 30 ของการเลี้ยง และระยะที่ 4 วันที่ 40 ของการเลี้ยง

- การชั่งน้ำหนักตัวจิ้งหรีดด้วยเครื่องชั่งดิจิตอล รุ่น GR-200 ค่าความผิดพลาด  $\leq 0.1$  mg สุ่มครั้งละ 27 ตัว แบ่งการวัดขนาดตัวออกเป็น 4 ระยะ ได้แก่ ระยะที่ 1 วันที่ 10 ของการเลี้ยง ระยะที่ 2 วันที่ 20 ของการเลี้ยง ระยะที่ 3 วันที่ 30 ของการเลี้ยง และระยะที่ 4 วันที่ 40 ของการเลี้ยง

- การชั่งน้ำหนักรวมของจิ้งหรีด โดยทำการชั่ง ณ วันที่ 40 ของการเลี้ยง



(ก) การติดตั้งอุปกรณ์ต้นแบบระบบควบคุมฟาร์มอัจฉริยะ

#### ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

การพัฒนาอัลกอริทึมสำหรับระบบฟาร์มอัจฉริยะด้วยโหมดประหยัดพลังงานที่นำเสนอแบ่งผลการวิจัยออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการควบคุมสภาพแวดล้อม ผลการทดสอบเปรียบเทียบค่าพลังงานไฟฟ้า และผลการเปรียบเทียบการเจริญเติบโตของจิ้งหรีด ระหว่างระบบควบคุมฟาร์มอัจฉริยะทั่วไป (Simple Mode; SM) กับระบบควบคุมฟาร์มอัจฉริยะด้วยโหมดประหยัดพลังงาน (Deep Sleep Mode; DSM) ซึ่งจากการออกแบบระบบดังกล่าวผู้ใช้งานสามารถติดตามผลจากสภาพแวดล้อมและสามารถตรวจสอบข้อมูลผ่านมือถือสมาร์ทโฟนได้แบบเรียลไทม์บนเว็บไซต์ ThinkSpeak โดยทำการทดสอบเป็นระยะเวลา 40 วัน ภาพที่ 4(ก) แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ต้นแบบระบบควบคุมฟาร์มอัจฉริยะทั้งสองระบบ และภาพที่ 4(ข) แสดงลักษณะการแสดงผลข้อมูลค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่วัดบน ThinkSpeak โดยสร้างช่องรับค่าเซนเซอร์จาก API keys ของเซนเซอร์วัดค่าเฉลี่ยอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ การเชื่อมต่อเซนเซอร์และระบบแสดงผลข้อมูลออนไลน์บน ThinkSpeak เชื่อมต่อแบบ HTTP การส่งข้อมูลทุก ๆ 10 นาที และแสดงผลข้อมูลในรูปแบบกราฟเส้น



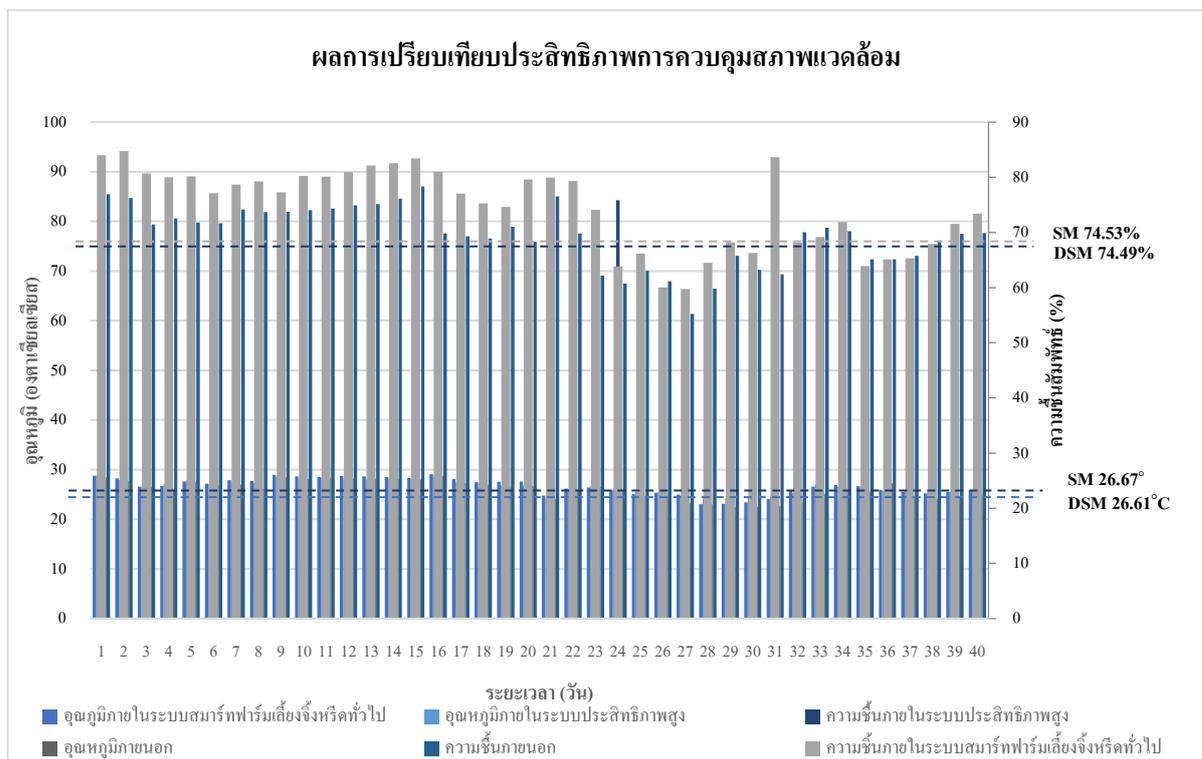
(ข) การแสดงผลข้อมูลออนไลน์ผ่านเว็บเบราว์เซอร์

ภาพที่ 4 ผลการพัฒนาอัลกอริทึมสำหรับระบบฟาร์มอัจฉริยะด้วยโหมดประหยัดพลังงาน

## 1. ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการควบคุมสภาพแวดล้อม

ในส่วนนี้ทำการทดสอบเปรียบเทียบประสิทธิภาพการควบคุมสภาพแวดล้อมระหว่างระบบควบคุมฟาร์มอัจฉริยะทั่วไป (Simple Mode; SM) กับระบบควบคุมฟาร์มอัจฉริยะด้วยโหมดประหยัดพลังงาน (Deep Sleep Mode; DSM) ระยะเวลา 40 วัน แสดงผลดังภาพที่ 5 โดยค่าเฉลี่ยอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ภายในด้วยการควบคุมระบบฟาร์มอัจฉริยะทั่วไปมีค่าเท่ากับ 26.67 องศาเซลเซียส และ 74.53% ตามลำดับ และค่าเฉลี่ยอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ภายในของระบบควบคุมฟาร์มอัจฉริยะด้วยโหมดประหยัดพลังงาน มีค่าเท่ากับ 26.61 องศาเซลเซียส และ 74.49%

ตามลำดับ ซึ่งทั้งสองระบบมีค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ใกล้เคียงกันและเมื่อพิจารณาจากเงื่อนไขที่กำหนดสำหรับการควบคุมสภาพแวดล้อม ภูมิศึกษา ฟาร์มเลี้ยงจิ้งหรีด พบว่าทั้งสองระบบมีประสิทธิภาพสำหรับการควบคุมสภาพแวดล้อมดังกล่าว ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Antony *et al.* (2020) ซึ่งรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับการใช้งาน IoT สำหรับการวัดผลในฟาร์ม ภูมิของการนำ IoT ที่ประสบความสำเร็จไปใช้ในประเทศต่าง ๆ ซึ่งแสดงถึงความสำเร็จในการนำไปประยุกต์ใช้กับการควบคุมสภาพแวดล้อม เพื่อรักษาอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ปริมาณแสง ฯลฯ ได้ตามความต้องการของผู้ใช้งานหรือลักษณะฟาร์มนั้น ๆ ได้เหมาะสม

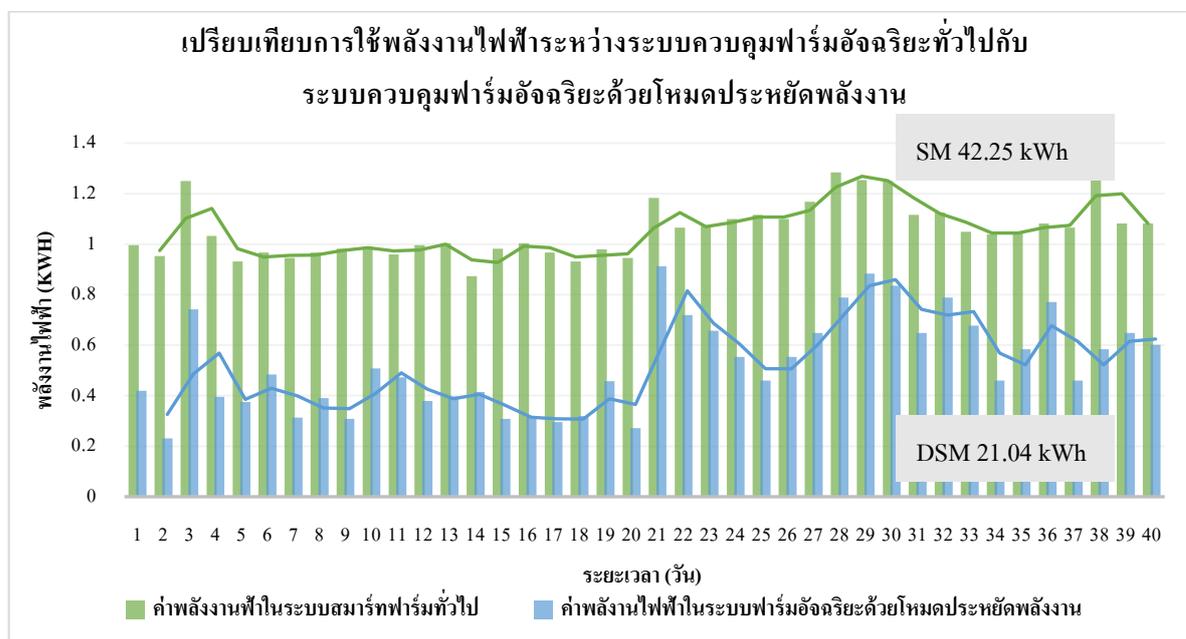


ภาพที่ 5 การควบคุมสภาพแวดล้อมระหว่างระบบควบคุมฟาร์มอัจฉริยะทั่วไป (SM) กับระบบควบคุมฟาร์มอัจฉริยะด้วยโหมดประหยัดพลังงาน (DSM)

## 2. ผลการเปรียบเทียบค่าพลังงานไฟฟ้า

จากผลการวัดค่าพลังงานไฟฟ้าในระบบควบคุมฟาร์มอัจฉริยะทั่วไปกับระบบควบคุมฟาร์มอัจฉริยะที่พัฒนาอัลกอริทึมขึ้นด้วยวัตต์อวาร์มิเตอร์ (Watt-hour Meter) ความแม่นยำ  $\pm 5\%$  ระยะเวลา รวม 40 วัน พบว่า ระบบควบคุมฟาร์มอัจฉริยะทั่วไป ใช้พลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 42.25 kWh และระบบควบคุมฟาร์มอัจฉริยะที่พัฒนาอัลกอริทึมขึ้นใช้พลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 21.04 kWh และเมื่อเปรียบเทียบค่าพลังงานไฟฟ้าระหว่างระบบควบคุมฟาร์มอัจฉริยะทั่วไปกับระบบควบคุมฟาร์มอัจฉริยะด้วยโหมดประหยัดพลังงาน พบว่า ระบบควบคุมฟาร์มอัจฉริยะด้วยโหมดประหยัดพลังงานใช้พลังงานไฟฟ้าลดลง 21.21 kWh คิดเป็น 50.20 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับค่าพลังงานไฟฟ้าของระบบ

ควบคุมฟาร์มอัจฉริยะทั่วไป แสดงผลการเปรียบเทียบค่าพลังงานไฟฟ้าของทั้งสองระบบ ดังภาพที่ 6 ซึ่งผลการลดการใช้พลังงานไฟฟ้าเมื่อควบคุมการทำงานด้วยอัลกอริทึมด้วยโหมดประหยัดพลังงานให้ผลสอดคล้องกับงานวิจัยประยุกต์ใช้โหมดประหยัดพลังงานเพื่อลดการใช้พลังงานของอุปกรณ์ IoT สำหรับระบบอัตโนมัติในบ้านเพื่อตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของการสื่อสารไร้สายและกำลังไฟฟ้าของอุปกรณ์ (Kuzminykh *et al.*, 2019) และศึกษาการใช้ RESTful เพื่อส่งข้อมูลจากอุปกรณ์ไปยัง IoT Ticket และใช้โหมดประหยัดพลังงานเพื่อลดการใช้พลังงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ เนื่องจากโหมดทำงานดังกล่าวใช้กระแสไฟฟ้าเพียง  $20 \mu A$  ซึ่งทำให้สามารถลดการใช้พลังงานจาก 4.5 วัตต์ต่อชั่วโมงเหลือเพียง 0.031 วัตต์ต่อชั่วโมงเท่านั้น (Giang, 2020)



ภาพที่ 6 เปรียบเทียบการใช้พลังงานไฟฟ้าระหว่างระบบควบคุมฟาร์มอัจฉริยะทั่วไป (SM) กับระบบควบคุมฟาร์มอัจฉริยะด้วยโหมดประหยัดพลังงาน (DSM)

### 3. ผลการเปรียบเทียบการเจริญเติบโตของจิ้งหรีด

การวัดการเจริญเติบโตของจิ้งหรีดใช้การวัดขนาดและน้ำหนักตัวของจิ้งหรีด ทำการวัดขนาดด้วยเครื่องวัดคาลิเปอร์ดิจิตอล (Digimatic Caliper) มีค่าความแม่นยำ  $\pm 0.02$  mm. และชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งดิจิตอล รุ่น GR-200 ค่าความผิดพลาด  $\leq 0.1$  mg ในแต่ละระยะการเจริญเติบโตด้วยวิธีการสุ่ม (Jansom, 2020) เมื่อเปรียบเทียบค่าความแตกต่างของ

ขนาดตัวจิ้งหรีดและน้ำหนักตัวจิ้งหรีดระหว่างระบบควบคุมฟาร์มอัจฉริยะทั่วไปกับระบบควบคุมฟาร์มอัจฉริยะด้วยโหมคประหยัดพลังงานในแต่ละระยะการเจริญเติบโต ได้แก่ ระยะที่ 1 (วันที่ 0-10) ระยะที่ 2 (วันที่ 11-20) ระยะที่ 3 (วันที่ 21-30) และระยะที่ 4 (วันที่ 31-40) แสดงลักษณะของขนาดตัวและน้ำหนักดังภาพที่ 7 และผลการทดลองดังตารางที่ 2

การสุ่มวัดขนาดตัวของจิ้งหรีดที่เลี้ยงระบบการเพาะเลี้ยง			ช่วงวัย	ระบบสมาร์ฟาร์มเลี้ยงจิ้งหรีดทั่วไป (กรัม)	ระบบเลี้ยงจิ้งหรีดแบบประหยัดพลังงานสูง (กรัม)
ระยะวัย	ระบบสมาร์ฟาร์มเลี้ยงจิ้งหรีดทั่วไป (มิลลิเมตร)	ระบบเลี้ยงจิ้งหรีดแบบประสิทธิภาพสูง (มิลลิเมตร)			
ระยะที่ 1	ระยะ 10 วัน		ระยะ 10 วัน		
ระยะที่ 2	ระยะ 20 วัน		ระยะ 20 วัน		
ระยะที่ 3	ระยะ 30 วัน		ระยะ 30 วัน		
ระยะที่ 4	ระยะ 40 วัน		ระยะ 40 วัน		

ภาพที่ 7 ผลการวัดการเจริญเติบโตของจิ้งหรีดระยะเวลา 40 วัน

ตารางที่ 2 ผลการเปรียบเทียบการเจริญเติบโตของจิ้งหรีด

ระยะการเจริญเติบโต	ขนาด					น้ำหนัก				
	ระบบ SM		ระบบ DSM		ผลต่าง (cm.)	ระบบ SM		ระบบ DSM		ผลต่าง (cm.)
	(cm.)	(cm.)	(g.)	(g.)						
$\bar{x}$	S.D.	$\bar{x}$	S.D.		$\bar{x}$	S.D.	$\bar{x}$	S.D.		
ระยะที่ 1	0.59	0.05	0.61	0.05	0.02	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.00
ระยะที่ 2	1.96	0.18	1.99	0.15	0.03	0.30	0.09	0.30	0.08	0.00
ระยะที่ 3	2.79	0.50	2.97	0.43	0.18	0.46	0.20	0.53	0.19	0.07
ระยะที่ 4	3.49	0.42	3.59	0.48	0.10	0.70	0.23	0.72	0.21	0.02

จากผลการสุ่มวัดการเจริญเติบโตของกลุ่มตัวอย่างทั้งหมด 4 ระยะ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการเจริญเติบโตของจิ้งหรีดที่เลี้ยงในระบบควบคุมฟาร์มอัจฉริยะทั่วไปกับระบบควบคุมฟาร์มอัจฉริยะด้วยโหมดประหยัดพลังงานมีความต่างของขนาดตัวเฉลี่ย ( $\bar{x}$ ) เท่ากับ 0.02, 0.03, 0.18 และ 0.10 เซนติเมตร ตามลำดับ และมีความต่างของน้ำหนักตัวเฉลี่ย ( $\bar{x}$ ) เท่ากับ 0.00, 0.00, 0.07 และ 0.02 กรัม ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาน้ำหนักรวมของจิ้งหรีดที่เลี้ยงในระบบทั้งสองระบบ พบว่า น้ำหนักรวมของจิ้งหรีดในระบบควบคุมฟาร์มอัจฉริยะทั่วไป น้ำหนักรวม 1.98 กิโลกรัม และระบบควบคุมฟาร์มอัจฉริยะด้วยโหมดประหยัดพลังงานน้ำหนักรวม 1.86 กิโลกรัม ซึ่งมีน้ำหนักรวมใกล้เคียงกัน

## สรุป

การพัฒนาอัลกอริทึมสำหรับระบบฟาร์มอัจฉริยะด้วยโหมดประหยัดพลังงาน กรณีศึกษาฟาร์มจิ้งหรีด มีวัตถุประสงค์เพื่อลดการใช้พลังงานไฟฟ้าได้ไม่น้อยกว่าร้อยละ 20 เมื่อเปรียบเทียบกับระบบฟาร์มอัจฉริยะทั่วไป งานวิจัยแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการควบคุมสภาพแวดล้อม การเปรียบเทียบค่าพลังงานไฟฟ้า และการเปรียบเทียบการเจริญเติบโตของจิ้งหรีดระหว่างระบบควบคุมฟาร์มอัจฉริยะทั่วไป (Simple Mode; SM) กับระบบควบคุมฟาร์มอัจฉริยะด้วยโหมดประหยัดพลังงาน (Deep Sleep Mode; DSM) ผลการทดสอบประสิทธิภาพการควบคุมสภาพแวดล้อม พบว่า ระบบทั้งสองมีประสิทธิภาพในการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ได้ตามเงื่อนไขที่กำหนด โดยมีค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ใกล้เคียงกัน และเมื่อเปรียบเทียบด้านการใช้พลังงานไฟฟ้า พบว่า ระบบฟาร์มอัจฉริยะที่ใช้อัลกอริทึมที่พัฒนาขึ้นสามารถลด

การใช้พลังงานไฟฟ้าลง 21.21 kWh คิดเป็น 50.20 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับค่าพลังงานไฟฟ้าของระบบควบคุมฟาร์มอัจฉริยะทั่วไป พลังงานลดลงเนื่องจากในช่วงที่ระบบเข้าสู่การทำงานด้วยโหมดประหยัดพลังงาน นอกจากนั้นเมื่อพิจารณาการเจริญเติบโตของจิ้งหรีดจากการทดสอบเลี้ยงทั้งหมด 40 วัน ในระบบควบคุมฟาร์มอัจฉริยะทั่วไปและระบบควบคุมฟาร์มอัจฉริยะด้วยโหมดประหยัดพลังงานพบว่า ขนาดของจิ้งหรีดของการเลี้ยงทั้งสองระบบมีการเจริญเติบโตใกล้เคียงกัน และเมื่อเปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้ารวมที่ใช้เลี้ยงจิ้งหรีดต่อน้ำหนักจิ้งหรีดระบบควบคุมฟาร์มอัจฉริยะทั่วไปกับระบบควบคุมฟาร์มอัจฉริยะด้วยโหมดประหยัดพลังงานใช้พลังงานไฟฟ้าต่อกิโลกรัมเท่ากับ 21.34 kWh/kg. และ 11.56 kWh/kg ตามลำดับ เมื่อคิดเป็นค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ต่อกิโลกรัมแล้ว พบว่า ระบบควบคุมฟาร์มอัจฉริยะด้วยโหมดประหยัดพลังงานใช้พลังงานไฟฟ้าต่อกิโลกรัม ลดลง 9.78 kWh/kg คิดเป็น 45.83 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ต่อกิโลกรัมของระบบควบคุมฟาร์มอัจฉริยะทั่วไป ดังนั้น จึงสามารถสรุปได้ว่าอัลกอริทึมที่พัฒนาขึ้นเมื่อนำไปใช้ควบคุมการทำงานของระบบฟาร์มอัจฉริยะสามารถช่วยลดการใช้พลังงานไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพและอัลกอริทึมที่พัฒนาขึ้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับฟาร์มเกษตรอัจฉริยะอื่น ๆ เช่น ฟาร์มเลี้ยงสุกร ฟาร์มเลี้ยงไก่ ฟาร์มปลูกผัก เพื่อลดการใช้พลังงานในระบบฟาร์มอัจฉริยะได้

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา พิชณ โลก และหน่วยวิจัยเทคโนโลยีและนวัตกรรมการเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา พิษณุโลก  
ที่สนับสนุนวัสดุอุปกรณ์ และสถานที่ดำเนินงานวิจัย

## เอกสารอ้างอิง

- Ahmed, N., De, D. and Hussain, I. 2018. Internet of Things (IoT) for smart precision agriculture and farming in rural areas. **IEEE Internet of Things Journal** 5(6): 4890-4899.
- Antony, A.P., Leith, K., Jolley, C., Lu, J. and Sweeney, D.J. 2020. A Review of Practice and Implementation of the Internet of Things (IoT) for Smallholder Agriculture. **Sustainability** 12(9): 1-19.
- Boonchieng, E., Chieochan, O. and Soakeaeew, A. 2018. Smart Farm: Applying the use of NodeMCU, IOT, NETPIE and LINE API for a Lingzhi Mushroom Farm in Thailand. **The IEICE Transactions on Communication** 101(B): 16-23.
- CircuitDigest. 2019. **Arduino Sleep Modes and How to use them to Save the Power.** How to use arduino sleep modes. Available Source: <https://circuitdigest.com/microcontroller-projects/arduino-sleep-modes-and-how-to-use-them-to-reduce-power-consumption>, December 10, 2021.
- Department of Livestock Development. 2021. **The People's Guide to Raising Crickets.** Available Source: <https://region6.dld.go.th/webnew/images/Z016.pdf>, May 29, 2023.
- Doshi, J., Patel, T. and Bharti, S.K. 2019. Smart Farming using IoT, a solution for optimally monitoring farming conditions. **Procedia Computer Science** 160: 746-751.
- Giang, L.T.H. 2020. IoT Ticket Using RESTful. Bachelor of Engineering (Technology and Communication), Vaansan Ammattikorkeakoulu, VAMK University of Applied Sciences.
- Jansom, T. 2020. The Effect of Different Diets on the Growth, Reproductive Rate and Protein Content of the Two-spotted Cricket (*Gryllus bimaculatus* de Geer). Master of Science (Entomology), Kasetsart University.
- Jeepet, S. and Sudharatna, Y. 2017. Industrial 4.0 technology adoption applying to small agriculture farm. Master of Business Administration, Kasetsart University. (in Thai)
- Kanjanawanishkul, K., Kaewsihawong, J., Uttaracha, W. and Yangyuen, S. 2020. Smart Cricket Farming Based on Internet of Things. **Farm Engineering and Automation Technology Journal** 6(2): 98-112. (in Thai)
- Lakshmisudha, K., Hegde, S., Kale, N. and Iyer, S. 2016. Smart Precision Based Agriculture Using Sensors. **International Journal of Computer Applications** 146(11): 36-38.
- Kuzminykh, I., Carlsson, A. and Yevdokymenko, M. 2019. A Performance Evaluation of Sensor Nodes in the Home Automation System based on Arduino, pp. 1-6. *In Problems of Informatics. Science and Technology 2019 International Scientific-Practical Conference.* Kyiv, Ukraine.
- Meteorological Department. 2021. **Agrometeorological Report October 2020.** Weather Report No. 551.586-02-2021. Available Source: <http://www.arcims.tmd.go.th>, October, 20, 2021.

- Namhormchan, T. and Muangchan, N. 2020. Energy Conservation in the Closed-System Greenhouse. **EDU Heritage Journal Science and Technology** 14(1): 1-13. (in Thai)
- Thongpan, N. and Therengphak, T. 2020. Automatic Watering Systems via Wireless Sensor Network. **Journal of Inovative Technology Management Rajabhat Maha Sarakham University** 3(1): 36-43. (in Thai)
- Tudose, D. S., Marin, A. and Geanta, M. 2016. Adaptive duty- cycling algorithms for efficient energy harvesting in wireless sensor networks, pp. 1-6. *In 2016 15<sup>th</sup> RoEduNet Conference: Networking in Education and Research.* University Politehnica Bucharest, Romania.
- Xu, L., O’Hare, G.M.P. and Collier, R. 2017. A smart and balanced energy-efficient multihop clustering algorithm (smart-beem) for mimo iot systems in future networks. **M D P I Sensors (Basel)** 17(7): 1574-1597.
- Zhang, N., Wang, M. and Wang, N. 2002. Precision agriculture-a worldwide overview. **Computers and electronics in agriculture** 36 (2-3): 113-132.

# อิทธิพลของความหนาวัสดุด้านการแทงจากเส้นใยพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งที่มีต่อความลึกกรอยแทง

## Impact of Anti-stabbing Material Thickness from Ultra-high Molecular Weight Polyethylene Fabric on Penetration Depth

ศศิริดี จันทสี<sup>1</sup> ปกรณ์ จันทะยาสาคร<sup>2</sup> และ ไชยยันต์ ไชยยะ<sup>1\*</sup>

Sasiradee Jantasee<sup>1</sup> Pakorn Chantayasakorn<sup>2</sup> and Chaiyan Chaiya<sup>1\*</sup>

Received: 22 April 2023, Revised: 26 July 2023, Accepted: 3 August 2023

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสามารถด้านการแทงของเส้นใยพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่ง (Ultra-high molecular weight polyethylene; UHMWPE) ที่ถูกขึ้นรูปเป็นแผ่นบางด้วยกระบวนการอัดร้อน (Hot compression molding) โดยมีเทอร์โมพลาสติกเรซินเป็นตัวประสาน ซึ่งมีชื่อเรียกในงานวิจัยนี้คือ “UPE” แผ่นด้านการแทงที่เตรียมได้จะถูกนำมาประกบกันหลายแผ่นจนมีความหนาหลายระดับตามที่กำหนดไว้ ก่อนนำไปทดสอบความต้านการแทงตามมาตรฐาน National Institute of Justice (NIJ)-0115.00 ด้วยใบมีด 2 ชนิด ได้แก่ ใบมีด 1 ซม. ซึ่งเป็นใบมีดขนาดเล็ก และใบมีด 2 ซม. หรือมีดคอมมานโด ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าใบมีด 1 ซม. มีดทั้ง 2 ชนิดมีชื่อเรียกตามมาตรฐาน NIJ คือ P1 และ S1 ตามลำดับ จากผลการวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงกลพบว่าแผ่น UPE มีค่าความความต้านทานแรงดึงสูงสุดและค่าความต้านทานการฉีกขาดเท่ากับ 162.50 MPa และ 360.74 N/mm ตามลำดับ โดย UPE ที่เรียงตัวจำนวน 20 แผ่น หรือความหนา 4.8 mm เป็นความหนาขั้นต่ำสุดที่สามารถต้านการแทงที่ระดับพลังงาน E1 (Energy level 1) ได้ทั้งจากใบมีดชนิด P1 และ S1 โดยที่ระดับพลังงาน E1 มีค่าพลังงานเท่ากับ  $24 \pm 0.50$  J เป็นระดับพลังงานแรกที่ใช้ในการทดสอบการต้านการแทงตามมาตรฐาน NIJ ดังนั้น UPE ที่เรียงตัวจำนวน 20 แผ่น จึงมีความเหมาะสมสำหรับใช้เป็นวัสดุด้านการแทง เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุด้านการแทงจากงานวิจัยอื่นพบว่าที่ระยะความลึกกรอยแทงเท่ากัน UPE มีความหนาและความหนาแน่นเชิงพื้นที่ต่ำกว่าวัสดุจาก

<sup>1</sup> ภาควิชาวิศวกรรมเคมีและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12110

<sup>1</sup> Department of Chemical and Materials Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Klong Luang, Pathum Thani 12110, Thailand.

<sup>2</sup> บริษัท แกรนด์ พาราگون จำกัด เขตพญาไท กรุงเทพมหานคร 10400

<sup>2</sup> Grand Paragon Company Limited, Phaya Thai, Bangkok 10400, Thailand.

\* ผู้นิพนธ์ประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): chaiyan\_c@rmutt.ac.th

งานวิจัยอื่น แสดงให้เห็นว่า UPE มีความเบาและบางกว่าวัสดุด้านการแทงจากงานวิจัยอื่น ซึ่งความเบาและบางถือเป็นจุดเด่นที่สำคัญของ UPE ในการพัฒนาเป็นชุดเกราะด้านการแทง

**คำสำคัญ:** วัสดุด้านการแทง, พอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่ง, การอัดรีด

## ABSTRACT

The purpose of this research is to investigate the stab-resistant performance of ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) fabric molded into a sheet using a hot compression molding process with a thermoplastic resin, referred to as "UPE" in this study. The stab-resistant sheets were layered to the various specified thickness and tested for stab resistance performance using two types of blades: P1, a typical small knife, and S1, a commando-style blade or larger kitchen knife, following the National Institute of Justice (NIJ)-0115.00 standard. Mechanical properties characterizations revealed that the UPE sheet had maximum tensile and tear strengths of 162.50 MPa and 360.74 N/mm, respectively. The minimal thickness that could withstand stabs at E1 (Energy level 1) for both P1 and S1 type blades was 20 layers of UPE, or thickness of 4.8 mm. The E1 is the first energy level of the NIJ stab resistance testing, with an energy of  $24 \pm 0.50$  J. Thus, it is appropriate for use as a stab-resistant material. When UPE was compared to other stab-resistant materials studied, it was discovered that the UPE had lower thickness and areal density than other materials at the same penetration depth. This indicates that the UPE was lighter and thinner than other materials. The light weight and thinness of UPE are significant factors in its development into stab-resistant armor.

**Key words:** anti-stabbing material, ultra-high molecular weight polyethylene, hot compression molding

## บทนำ

วัสดุที่นิยมนำมาใช้เป็นวัสดุด้านการแทง (Anti-stabbing material) มักเป็นวัสดุที่มีความเหนียว และมีความแข็งแรงสูง เช่น เส้นใยปะชอลท์ (Basalt fabric) และเส้นใยโลหะ (Metal fabric) (Tien *et al.*, 2011) ในการพัฒนาวัสดุเพื่อใช้เป็นเสื้อเกราะด้านการแทงนั้นนอกจากจะพิจารณาถึงความสามารถในการด้านการแทงของวัสดุแล้ว ยังต้องคำนึงถึงปัจจัยสำคัญอีก 2 ปัจจัย ได้แก่ ความยืดหยุ่นและมวลของวัสดุ เนื่องจากวัสดุด้านการแทงเหล่านี้จะต้องถูกนำไปประกอบกับโครงเสื้อเกราะอ่อน ดังนั้นความ

ยืดหยุ่นและมวลที่เหมาะสมจะส่งผลต่อความสะดวกสบายในการสวมใส่ แม้ว่าเส้นใยปะชอลท์ และเส้นใยโลหะจะสามารถด้านการแทงได้ดี แต่วัสดุเหล่านี้มีมวลค่อนข้างมากและมีความยืดหยุ่นน้อย ทำให้ผู้สวมใส่เคลื่อนไหวลำบากและเกิดความเมื่อยล้าเมื่อสวมใส่เป็นเวลานาน ต่อมาจึงได้มีการพัฒนาวัสดุเส้นใยชนิดอื่นที่มีน้ำหนักเบากว่าสำหรับใช้เป็นวัสดุป้องกันกระสุนและวัสดุด้านการแทงจากมิดหรือของมีคม อาทิเช่น เส้นใยคาร์บอน (Carbon fiber) (Yashiro *et al.*, 2014) เส้นใยแก้ว (Glass fiber) (Chen *et al.*, 2021) และเส้นใยอะรามิด (Aramid

fiber) (Huh *et al.*, 2010; Sapozhnikov *et al.*, 2015) หรือที่รู้จักในชื่อทางการค้าว่า เคพลา (Kevlar®) วัสดุเหล่านี้มีคุณสมบัติทนต่อการขีดข่วนและแรงกระแทกได้เป็นอย่างดี มีความสามารถในการดูดซับแรงสูง ทนต่อความร้อน และมีน้ำหนักเบากว่าเส้นใยโลหะและเส้นใยอะรามิด จึงทำให้วัสดุเหล่านี้ได้รับการศึกษาในวงกว้าง มีการศึกษาเกี่ยวกับการนำเส้นใยดังกล่าวมาขึ้นรูปร่วมกับเส้นใยธรรมชาติเป็นเส้นด้าย แล้วทอเป็นผ้าเพื่อให้เกิดความยืดหยุ่นและเกิดความสบายเวลาการสวมใส่มากขึ้น Huh *et al.* (2010) ได้นำเส้นใยอะรามิดมาขึ้นรูปเป็นเส้นด้ายร่วมกับเส้นใยฝ้าย จากนั้นทอเป็นผืนผ้าสำหรับตัดเย็บเป็นชุดเกราะอ่อน ซึ่งผลการทดสอบการแทงแสดงให้เห็นว่าผ้าทอผสมระหว่างเส้นใยอะรามิดและฝ้ายสามารถต้านการแทงได้ที่ระดับพลังงาน E1 ตามมาตรฐาน NIJ-0115.00 (Nayak *et al.*, 2018) แม้ว่าวัสดุคอมโพสิตเส้นใยอะรามิดจะสามารถต้านการแทงได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ก็ยังมีมวลและความหนาแน่นค่อนข้างมาก เนื่องจากความสามารถในการรับแรงกระแทกของเส้นใยอะรามิดแปรผันตรงตามความหนาของวัสดุ (Pundhir *et al.*, 2021) นอกจากนี้ในการผลิตวัสดุคอมโพสิตเส้นใยอะรามิดต้องผ่านกระบวนการทางสิ่งทอหลายขั้นตอน รวมทั้งเส้นใยอะรามิดถือเป็นวัสดุทางการค้าที่ถูกควบคุมด้วยสิทธิบัตรที่แตกต่างกันในแต่ละประเทศ ส่งผลให้ต้นทุนในการผลิตเสื้อเกราะอ่อนผันแปรไปตามต้นทุนของเส้นใยอะรามิดด้วย จึงทำให้เกิดแนวคิดในการพัฒนาพอลิเมอร์ชนิดอื่นเป็นวัสดุต้านการแทงโดยมุ่งเน้นวัสดุที่มีราคาถูกกว่าและไม่มีสิทธิทางการค้าคุ้มครอง Guo *et al.* (2020) ได้นำพอลิเมอร์เกรดการค้า 5 ชนิด ได้แก่ พอลิเอไมด์ 6 พอลิเอไมด์ 11 พอลิเอไมด์ 12 พอลิคาร์บอนเนต และพอลิเอทิลีน มาทดสอบความต้านการแทงตามมาตรฐาน NIJ การทดสอบพบว่าความหนาขั้นต่ำที่สุดของพอลิเมอร์

แต่ละชนิดที่สามารถต้านการแทงด้วยใบมีดแบบ 1 ซม. ที่ระดับพลังงาน 24 J ได้ คือ 7.61 5.64 6.12 5.54 และ 10.13 mm ตามลำดับ พอลิเมอร์ทั้ง 5 ชนิดนี้มีค่า Rockwell R hardness (HRR) เท่ากับ 110.3 122.1 97.3 126.6 และ 70.0 ตามลำดับ นอกจากนี้ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (Young's modulus) ของพอลิเมอร์ทั้ง 5 ชนิดนี้มีค่าเท่ากับ 900 1,300 1,280 2,400 และ 650 MPa ตามลำดับ จะเห็นว่าพอลิคาร์บอนเนตมีประสิทธิภาพต้านการแทงได้ดีที่สุดในงานวิจัยนี้เนื่องจากมีความแข็งแรงมาก ส่วนพอลิเอทิลีนมีประสิทธิภาพต้านการแทงน้อยที่สุด โดยต้องใช้ความหนาเป็น 2 เท่าของพอลิคาร์บอนเนตจึงจะมีประสิทธิภาพต้านการแทงเท่ากัน แม้ว่าพอลิคาร์บอนเนตจะมีประสิทธิภาพต้านการแทงดีที่สุดแต่สามารถโค้งงอได้น้อยเมื่อเทียบกับพอลิเอทิลีน ทำให้บิดงอได้ยาก ขาดความยืดหยุ่น จึงไม่เหมาะสมที่จะพัฒนาเป็นวัสดุต้านการแทงในเสื้อเกราะเพราะจะทำให้ผู้สวมใส่เคลื่อนไหวไม่สะดวก

เส้นใยพอลิเอทิลีนมวลโมเลกุลสูงยิ่ง หรือเส้นใย UHMWPE เป็นอีกหนึ่งวัสดุที่ได้รับการสนใจนำมาพัฒนาเป็นวัสดุกันกระสุนและของมีคม เนื่องจากมีความแข็งแรงสูง มีค่าความเหนียวต่อการแตกหัก (Fracture toughness) สูงถึง 30 kJ/m<sup>2</sup> (Zaribaf, 2018) สามารถทนต่อแรงกระแทกได้ดี มีความสามารถในการดูดซับพลังงานสูง จาก Table 1 จะเห็นว่าเส้นใย UHMWPE มีความหนาแน่น 0.97 g/cm<sup>3</sup> ซึ่งมีค่าต่ำกว่าเส้นใยชนิดอื่น ๆ ในขณะที่เส้นใยอะรามิดมีความหนาแน่น 1.44-1.47 g/cm<sup>3</sup> หากพิจารณาที่ปริมาตรของเส้นใยที่เท่ากัน เส้นใย UHMWPE มีมวลเบากว่าเส้นใยชนิดอื่น ๆ นอกจากนี้เส้นใย UHMWPE มีความยืดหยุ่นมากกว่าเส้นใยอะรามิด เส้นใยอะรามิด เส้นใยแก้ว เส้นใยพอลิเอไมด์ และโลหะ (Bogetti *et al.*, 2017) เนื่องจากโครงสร้างของเส้นใย UHMWPE มีลักษณะการเชื่อมสานกันอย่างหลวม ๆ ทำให้โครงสร้างสามารถเคลื่อนตัวได้

เมื่อได้รับแรงกระทำ (Pundhir *et al.*, 2021) และเมื่อเทียบความแข็งแรงของเส้นใย UHMWPE กับเส้นใยอะรามิด พบว่าเส้นใย UHMWPE มีความแข็งแรงสูงกว่า ทำให้เส้นใย UHMWPE สามารถทนต่อแรงกระแทกได้ดีกว่า (Sapozhnikov *et al.*, 2015) แม้ว่าเส้นใย UHMWPE จะมีความแข็งแรงน้อยกว่าเส้นใยคาร์บอนและเส้นใย Poly(p-phenylene benzobisox-azole) หรือ PBO แต่เส้นใย UHMWPE

มีค่าความเครียดที่ทำให้เสื่อมสภาพ (Failure strain) มากกว่าเส้นใยคาร์บอนเส้นใย PBO และเส้นใยอะรามิด ดังนั้นภายใต้สภาวะเดียวกันเส้นใย UHMWPE สามารถดูดซับพลังงานได้มากกว่าเส้นใยคาร์บอนเส้นใย PBO และเส้นใยอะรามิด นอกจากนี้เส้นใย UHMWPE มีความต้านทานการกัดกร่อนและความต้านทานการย่อยสลายสูงกว่าเส้นใย PBO (Chen *et al.*, 2021)

**Table 1** Mechanical properties of various commercial fibers

Fiber	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Young's modulus (GPa)	Tensile strength (GPa)	Failure strain (%)	Ref.
<b>Basalt</b>	2.56-2.66	53-62	1.6-2.0	2.7-3.6	(Deák and Czigány, 2009)
<b>Aramid</b>					
Kevlar 149	1.47	185	3.4	2.0	(Afshari <i>et al.</i> , 2008)
Twaron <sup>®</sup> 709	1.44	100	2.5	-	(Sapozhnikov <i>et al.</i> , 2015)
<b>Carbon</b>					
Toray M60J	1.93	588	3.9	2.0	(O'Masta <i>et al.</i> , 2014)
<b>Glass</b>					
S2	2.46	87	4.6	5.3	(O'Masta <i>et al.</i> , 2014)
<b>PBO</b>					
Zylon HM	1.56	270	5.8	2.5	(Afshari <i>et al.</i> , 2008)
<b>Polyamide</b>					
Nylon	1.14	10	0.9	9.5-28	(O'Masta <i>et al.</i> , 2014)
<b>UHMWPE</b>					
Dyneema <sup>®</sup> SK76	0.97	116	3.6	3.7	(Afshari <i>et al.</i> , 2008)
Dyneema <sup>®</sup> HB80	0.97	200	2.8	-	(Sapozhnikov <i>et al.</i> , 2015)
Spectra 3000	0.97	115-122	3.2-3.4	3.3	(O'Masta <i>et al.</i> , 2014)

นอกจากคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุแล้ว วิธีการขึ้นรูปเส้นใยเป็นแผ่นด้านการแทงก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ต้องพิจารณา การขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดร้อนเป็นกระบวนการขึ้นรูปพอลิเมอร์ภายใต้การให้อุณหภูมิและความดันที่เหมาะสม โดยทั่วไปแล้วการขึ้นรูปแบบอัดร้อนใช้เวลาในการดำเนินการน้อยกว่าการขึ้นรูปด้วยวิธีอื่น เช่น การฉีดขึ้นรูป (Injection molding) และการเป่าขึ้นรูป (Extrusion blow molding) ซึ่งช่วยลดระยะเวลาที่พอลิเมอร์สัมผัสกับอุณหภูมิสูง จึงลดโอกาสของการเสื่อมสภาพของวัสดุเนื่องจากความร้อนได้ นอกจากนี้การใช้ความร้อนและแรงดันสูงในการขึ้นรูปแบบอัดร้อนช่วยเพิ่มความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ ทำให้พอลิเมอร์มีคุณสมบัติเชิงกลดีขึ้น เนื่องจากสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์สามารถจัดระเบียบตัวเองเป็นโครงสร้างที่เป็นระเบียบระหว่างกระบวนการอัดร้อนนำไปสู่ระดับของผลึกที่สูงขึ้นและการใช้แรงดันสูงในกระบวนการอัดขึ้นรูปทำให้โครงสร้างของพอลิเมอร์แน่นขึ้นช่วยลดจำนวนช่องว่างในโครงสร้างพอลิเมอร์ได้ (Li *et al.*, 2023; Mejia *et al.*, 2021; Shamloo *et al.*, 2018) ดังนั้นการนำเส้นใย UHMWPE มาเรียงตัวแล้วขึ้นรูปเป็นแผ่นด้วยวิธีการอัดร้อนโดยใช้เทอร์โมพลาสติกเรซินเป็นตัวเชื่อมประสานจึงเป็นวิธีที่ขึ้นรูปได้อย่างรวดเร็ว และได้แผ่นวัสดุที่มีคุณสมบัติเชิงกลที่ดี จากงานวิจัยของ Mudzi *et al.* (2022) ได้นำเส้นใย UHMWPE มาขึ้นรูปเป็นแผ่นด้วยวิธีการอัดร้อนสำหรับใช้เป็นวัสดุกันกระสุน พบว่าวัสดุดังกล่าวมีประสิทธิภาพในการต้านกระสุนปืนขนาด 0.357 ที่ความเร็ว  $435.9 \pm 9$  m/s ได้โดยที่วัสดุไม่เสียหายและยังคงความยืดหยุ่นไว้ได้ ซึ่งแนวทางของงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการพัฒนาวัสดุด้านการแทงโดยคำนึงถึงประสิทธิภาพการต้านการแทงตามมาตรฐานของ NIJ วัสดุสามารถผลิตได้ง่าย มีต้นทุนการผลิตต่ำกว่าผลิตภัณฑ์ในท้องตลาด โดยมีการประยุกต์ที่จะศึกษาประสิทธิภาพด้านการแทง

ของแผ่น UPE ที่ถูกขึ้นรูปเป็นแผ่นด้วยวิธีการอัดร้อนตามมาตรฐาน NIJ-0115.00 ซึ่งเป็นมาตรฐานการทดสอบวัสดุด้านการแทงที่ได้รับการยอมรับในระดับสากล และศึกษาผลของความหนาของแผ่น UPE ต่อความถี่รอยแตก ชนิดของใบมีดที่มีผลต่อความถี่รอยแตก รวมถึงเปรียบเทียบมวลของวัสดุกับวัสดุจากงานวิจัยอื่น และเปรียบเทียบราคากับผลิตในท้องตลาด เพื่อประเมินศักยภาพสำหรับการนำไปต่อยอดผลิตเป็นวัสดุด้านการแทงเชิงพาณิชย์ได้ต่อไป

## วิธีดำเนินการวิจัย

### 1. วัสดุและอุปกรณ์

วัสดุด้านการแทงที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท แกรนด์ พาราคอน จำกัด มีชื่อเรียกในงานวิจัยนี้คือ UPE เป็นวัสดุที่ผลิตจากการนำเส้นใยพอลิเอทิลีนมวลโมเลกุลสูงยิ่ง ขนาดโมเลกุล  $5.5 \times 10^6$  amu มาขึ้นรูปเป็นแผ่นบางด้วยวิธีการอัดร้อน โดยแผ่น UPE 1 แผ่น มีมวล  $170 \text{ g/m}^2$  และความหนา 0.21 mm วัสดุด้านการแทงที่ความหนาต่าง ๆ ถูกเตรียมขึ้น โดยการนำแผ่น UPE มาเรียงซ้อนกันจำนวน 15 แผ่น 20 แผ่น 25 แผ่น และ 30 แผ่น ตามลำดับ โดยเรียงซ้อนกันแบบไม่มีสารเคลือบยึดติดครีดีให้แต่ละแผ่นเรียงชิดกันด้วยมวลคงที่เพื่อให้ช่องว่างระหว่างแผ่นที่วางซ้อนกันมีระยะเท่ากันในการเตรียมแต่ละครั้ง ในงานวิจัยนี้ใช้สัญลักษณ์ของวัสดุด้านการแทงที่ความหนาต่าง ๆ คือ UPE-(X) โดยที่ X คือ จำนวนแผ่น UPE ที่เรียงซ้อนกัน หลังจากนั้นตัดวัสดุด้านการแทงให้มีขนาดกว้าง x ยาว เท่ากับ  $20 \times 20 \text{ cm}$  รูปตัวอย่างของ UPE แสดงดัง Figure 1(A)

การทดสอบประสิทธิภาพความต้านการแทงตามมาตรฐาน NIJ-0115.00 ทำการทดสอบโดยใช้ใบมีด 2 ชนิด ได้แก่ ใบมีดแบบคมเดี่ยว (P1) และใบมีดแบบสองคม (S1) ใบมีดทั้ง 2 ชนิดมีความยาวใบมีด 10 cm หนา 0.2 และ 0.4 cm ตามลำดับ ดังแสดง

ตาม Figure 1(B) นอกจากนี้การทดสอบต้องมีการใช้วัสดุรองหลัง (Backing materials) ซึ่งทำหน้าที่เสมือนผิวหนังของมนุษย์ โดยตามมาตรฐาน NIJ นั้นวัสดุรองหลังประกอบไปด้วยวัสดุ 3 ชนิด เรียงตัวกันตามลำดับดังนี้ ชั้นบนสุดใช้วัสดุเป็นแผ่นฟองน้ำนีโอพรีน (Neoprene sponge) ความหนาไม่น้อยกว่า 5.8 mm

จำนวน 4 ชั้น ระหว่างชั้นของฟองน้ำนีโอพรีนรองด้วยแผ่นอะลูมิเนียม ชั้นกลางใช้วัสดุเป็นพอลิเอทิลีนโฟม (Polyethylene foam) ความหนาไม่น้อยกว่า 31 mm จำนวน 1 ชั้น และชั้นล่างสุดใช้วัสดุเป็นแผ่นยางธรรมชาติ ความหนาไม่น้อยกว่า 6.4 mm จำนวน 2 ชั้น ดังแสดงใน Figure 2

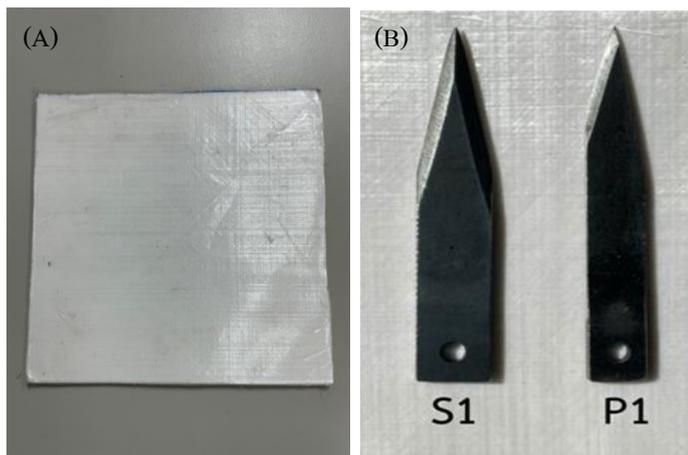


Figure 1 (A) Anti-stabbing material UPE. (B) Types of blades

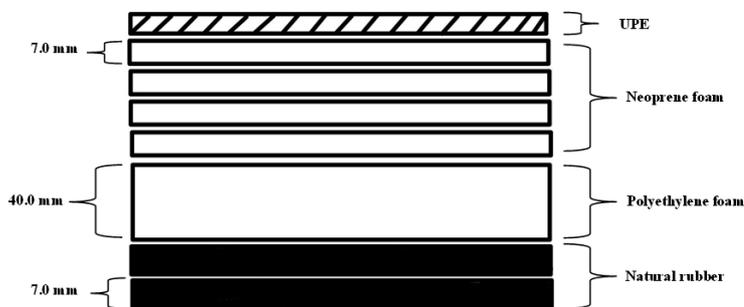


Figure 2 Backing materials

2. การวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงกลของ UPE

วัสดุต้านการแทง UPE-(1) ถูกวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงกลประกอบด้วยวิเคราะห์ความต้านทานแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D638 Type IV แผ่น UPE-(1) ถูกนำมาตัดเป็นรูปดัมเบลล์ตามขนาดมาตรฐาน ASTM D638 Type IV ในการทดสอบใช้อัตราการดึงตัวอย่าง 50 mm/min ใช้โหลดเซลล์ (Load

cell) ขนาด 10 kN และการวิเคราะห์ความต้านทานการฉีกขาดตามมาตรฐาน ASTM D1004 ด้วยอัตราการดึง 50 mm/min โดยการดำเนินการทดสอบอยู่ในสภาวะอุณหภูมิ 23±2°C และร้อยละความชื้นที่ 50±2 นอกจากนี้วัสดุต้านการแทงทั้งหมดถูกนำไปวัดหาความหนา มวล และคำนวณมวลต่อหน่วยพื้นที่

### 3. การทดสอบความต้านการแทง

แผ่น UPE ที่ถูกเตรียมขึ้นทั้ง 4 แบบ ได้แก่ UPE-(15) UPE-(20) UPE-(25) UPE-(30) ถูกนำมาทดสอบความต้านการแทงเพื่อหาจำนวนชั้นที่เหมาะสม โดยใช้ชุดทดสอบการแทงดัง Figure 3 ซึ่งเป็นการแทงแบบปล่อยอิสระ (Drop test) ปล่อยให้ใบมีดตกกระทบกับแผ่น UPE ตามแรงโน้มถ่วงของโลก ใบมีดจะถูกติดตั้งพร้อมกับมวลถ่วงน้ำหนัก (Drop mass) ขนาด 5 kg การปล่อยใบมีดให้ตกลงมาตามแรงโน้มถ่วงของโลกนั้นจะปล่อยลงมาจากในท่อปล่อย (Drop tube) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่าขนาดของมวลถ่วงน้ำหนักเพียงเล็กน้อยเพื่อให้มวลถ่วงน้ำหนัก สามารถเคลื่อนที่ลงในแนวตั้งอย่างอิสระตามแรงโน้มถ่วงของโลกได้ ในการทดลองนี้ ใบมีดจะถูกปล่อยลงมาจากชุดทดสอบที่ระยะความสูง 0.49 m ทำมุมตั้งฉาก 90° กับวัสดุต้านการแทง เมื่อคำนวณโดยใช้สมการพลังงานศักย์ ดังสมการที่ (1) จะเกิดค่าพลังงานเท่ากับ  $24 \pm 0.50$  J ตามข้อกำหนดของระดับพลังงาน E1 หรือ Energy level 1 ซึ่งมีค่าพลังงานเท่ากับ  $24 \pm 0.50$  J ตามมาตรฐาน NIJ-0115.00 (Olszewska *et al.*, 2013)

$$E_p = mgh \quad (1)$$

โดยที่  $E_p$  คือ ค่าพลังงานศักย์ หน่วยเป็น J  
 $m$  คือ มวลใบมีดจะถูกติดตั้งพร้อมกับมวลถ่วงน้ำหนัก หน่วยเป็น kg  
 $g$  คือ ความเร่งตามแรงโน้มถ่วงโลก มีค่าเท่ากับ  $9.81 \text{ m/s}^2$   
 $h$  คือ ระยะความสูงแนวตั้งที่ปล่อยใบมีดลงมา หน่วยเป็น m

แผ่น UPE ที่ได้รับการทดสอบจะต้องพิจารณา 2 ประเด็น คือ 1) ต้องสามารถต้านทานไม่ให้ใบมีด P1 และ S1 ทะลุผ่านด้านหลังของวัสดุต้านการแทงจน

สัมผัสกับวัสดุรองหลังได้ และ 2) ถ้าใบมีดทั้ง 2 ชนิด มีการทะลุผ่านด้านหน้าแต่ไม่ทะลุผ่านด้านหลังของวัสดุต้านการแทง จะต้องทะลุเข้าไปไม่เกิน 7 mm จึงจะถือว่าผ่านมาตรฐาน

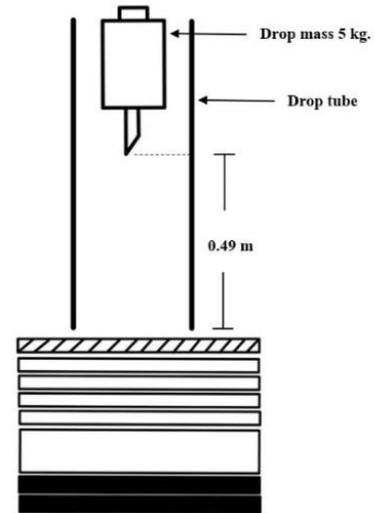


Figure 3 Stab-resistant testing setup

## ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

### 1. คุณสมบัติเชิงกลของ UPE

UPE-(1) ถูกนำมาทดสอบความต้านทานแรงดึงสูงสุดและความต้านทานการฉีกขาด ตามมาตรฐาน ASTM D638 Type IV และ ASTM D1004 ตามลำดับ ผลจากการทดสอบพบว่า UPE-(1) มีค่าต้านทานแรงดึงสูงสุด และความต้านทานการฉีกขาดเท่ากับ 162.50 MPa และ 360.74 N/mm ตามลำดับ ดังแสดงใน Table 2

UPE-(1) มีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 162.50 MPa ซึ่งมีความทนต่อแรงดึงในทิศทางเดียวมากกว่าเส้นใยพอลิเมอร์เกรดการค้าที่เคมีการศึกษาสำหรับใช้เป็นวัสดุต้านการแทง ได้แก่ พอลิเอทิลีน พอลิคาร์บอนเนต และพอลิเอไมด์ 11 ซึ่งขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดรีดเช่นเดียวกัน แต่มีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดเพียง 2.1 43.7 และ 17.6 MPa ตามลำดับ (Guo *et al.*, 2020) นอกจากนี้ความ

ต้านทานการฉีกขาดของ UPE-(1) มีค่าเท่ากับ 360.74 N/mm ซึ่งมีความสูงกว่าเส้นใยโพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงและเส้นใยโพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่นำมาใช้เป็นวัสดุสำหรับการแทง มีค่าความต้านทานการฉีกขาดประมาณ 100-200

N/mm แต่อย่างไรก็ตามค่าความต้านทานการฉีกขาดของ UPE-(1) มีค่าน้อยกว่าเส้นใยโพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่มีค่าความต้านทานการฉีกขาดสูงถึง 1,200 N/mm (Tien *et al.*, 2011)

**Table 2** Mechanical properties of UPE

Material	Tensile strengths (MPa)	Tear strengths (N/mm)
UPE-(1)	162.50 (29.42)	360.74 (38.10)

**Table 3** Results of Stab-resistant testing by P1 and S1 blade.

Materials	Thickness (mm)	Blade types	Front penetration	Back penetration	Penetration depth (mm)	NIJ standard
UPE-(15)	3.80	P1	yes	No	3.70 (0.00)	Pass
		S1	yes	Yes	> 7.00	Fail
UPE-(20)	4.80	P1	yes	No	4.35 (0.05)	Pass
		S1	yes	No	4.00 (0.10)	Pass
UPE-(25)	5.80	P1	yes	No	5.20 (0.10)	Pass
		S1	yes	No	4.65 (0.05)	Pass
UPE-(30)	6.80	P1	yes	No	6.10 (0.00)	Pass
		S1	yes	No	5.10 (0.06)	Pass

## 2. ความสัมพันธ์ของจำนวนแผ่น UPE กับความลึกรอยแทง

การทดสอบความต้านทานการแทงของ UPE ถูกดำเนินการในห้องปฏิบัติการที่สภาวะอุณหภูมิห้อง 32°C ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ 47% โดยการปล่อยใบมีดที่ติดตั้งอยู่กับมวลถ่วงน้ำหนัก 5 kg จากกระยะความสูง 0.49 m ให้ตกกระทบวัสดุสำหรับการแทงอย่างอิสระตามแรงโน้มถ่วงของโลก ความเร็วก่อนการตกกระทบของใบมีด สามารถคำนวณได้จากสมการพลังงานจลน์ ดังสมการที่ (2) (Guo *et al.*, 2020) พบว่าความเร็วของใบมีดก่อนกระทบวัสดุสำหรับการแทงมีค่าเท่ากับ 3.10 m/s

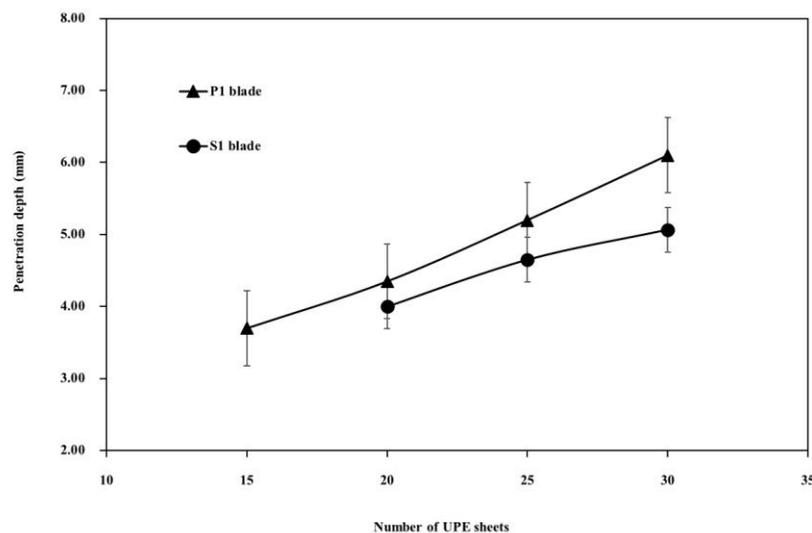
$$E_k = \frac{1}{2} mU^2 \quad (2)$$

โดยที่  $E_k$  คือ ค่าพลังงานจลน์ หน่วยเป็น J  
 $m$  คือ มวลใบมีดจะถูกติดตั้งพร้อมกับมวลถ่วงน้ำหนัก หน่วยเป็น kg  
 $U$  คือ ความเร็วของใบมีดก่อนกระทบกับแผ่น UPE หน่วยเป็น m/s

ความลึกรอยแทงวัดจากพื้นผิวด้านบนของวัสดุสำหรับการแทงถึงปลายมีดซึ่งเจาะผ่านวัสดุสำหรับการแทง ความลึกรอยแทงสัมพันธ์กับจำนวนแผ่นและความหนาของ UPE โดยความลึกรอยแทงของ

UPE ที่จำนวนแผ่นแตกต่างกันหลังถูกทดสอบการแทงด้วยมีดแบบ P1 และแบบ S1 แสดงใน Table 3 เมื่อพิจารณาการแทงด้วยใบมีดชนิด P1 จะเห็นว่าใบมีด P1 สามารถแทงทะลุด้านหน้าแต่ไม่สามารถแทงทะลุผ่านด้านหลังของ UPE-(15) UPE-(20) UPE-(25) และ UPE-(30) ได้ และมีความลึกของรอยแทงไม่เกิน 7 mm ถือว่า UPE ที่เรียงตัวกัน 15-30 แผ่น ผ่านมาตรฐาน NIJ ที่ระดับพลังงาน E1 ของใบมีด P1 ทั้งหมด แต่สำหรับการทดสอบการแทงด้วยใบมีดชนิด S1 พบว่า UPE-(15) ถูกใบมีดชนิด S1 แทงทะลุผ่านทั้งด้านหน้าและด้านหลังของวัสดุไป

จนถึงวัสดุรองหลังและมีความลึกรอยแทงมากกว่า 7 mm แต่เมื่อใช้ UPE ที่จำนวน 20 แผ่นขึ้นไป ใบมีด S1 สามารถแทงทะลุเฉพาะด้านหน้าแต่ไม่สามารถแทงทะลุผ่านด้านหลังของ UPE และมีความลึกของรอยแทงไม่เกิน 7 mm ซึ่งถือว่าผ่านมาตรฐาน NIJ (E1) ดังนั้น จำนวนแผ่นของ UPE ที่เหมาะสมสำหรับพัฒนาเป็นวัสดุสำหรับเสื้อเกราะอ่อนเพื่อด้านการแทง คือ 20 แผ่น เพราะเป็นจำนวนที่น้อยที่สุดที่สามารถต้านการแทงที่ระดับพลังงาน E1 ได้ทั้งใบมีดชนิด P1 และ S1



**Figure 4** Penetration depths of UPE relative to the number of sheets

จาก Figure 4 จะเห็นว่าเมื่อจำนวนแผ่นของ UPE เพิ่มขึ้นจาก 15 ถึง 30 แผ่น ส่งผลให้เกิดความลึกของรอยแทงมากขึ้น แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มจำนวนแผ่น UPE ทำให้ความต้านการแทงของ UPE ลดลง ซึ่งแตกต่างจากงานวิจัยที่ผ่านมาที่พบว่าเมื่อจำนวนแผ่นของวัสดุต้านการแทงมากขึ้นจะมีผลให้ระยะรอยแทงลดลงเนื่องจากมวลของวัสดุที่มากขึ้น (Guo *et al.*, 2020; Huh *et al.*, 2010; Tien *et al.*, 2011) ปรัชญาการค้นพบที่เกิดขึ้นกับงานวิจัยนี้ สามารถอธิบายได้จากทฤษฎี

การเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมในช่วงเวลา ( $\Delta t$ ) หรือแรงดล (Impulsive force) จากสมการ

$$I = \frac{m(V-U)}{\Delta t} \quad (3)$$

โดยที่ I คือ แรงดล หน่วยเป็น N  
 m คือ มวลของวัตถุที่ชน หน่วยเป็น kg  
 V คือ ความเร็วสุดท้ายของวัตถุ หน่วยเป็น m/s  
 U คือ ความเร็วเริ่มต้นของวัตถุ หน่วยเป็น m/s

$\Delta t$  คือ ช่วงเวลาที่ความเร็ววัตถุเปลี่ยนแปลง ตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงสุดท้าย หน่วยเป็น s

จากสมการที่ (3) จะเห็นว่าแรงคลมีค่าน้อย เมื่อวัตถุใช้เวลาในการเปลี่ยนแปลงความเร็วตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงสุดท้ายมาก

จากการทดลองปล่อยลูกเหล็กทรงกลมมวล 1 kg ให้ตกอย่างอิสระลงบนแผ่น UPE-(15) พบว่าหลังจากที่ลูกเหล็กกระทบกับ UPE-(15) ครั้งแรกแล้ว ลูกเหล็กกระดอนขึ้นไปบนอากาศเป็นระยะทาง 36 cm แต่เมื่อใช้แผ่น UPE-(30) ลูกเหล็กกระดอนขึ้นไปบนอากาศเป็นระยะทาง 34 cm แสดงให้เห็นว่าช่วงเวลาการเปลี่ยนแปลงความเร็วจากความเร็วเริ่มต้นจนถึงความเร็วสุดท้ายของ UPE-(15) มีค่ามากกว่า UPE-(30) จึงส่งผลให้แรงคลที่เกิดบน UPE-(15) มีค่าน้อยกว่าบน UPE-(30) ซึ่งอาจจะเป็นผลมาจาก UPE-(15) มีความยืดหยุ่นมากกว่า UPE-(30) จึงสามารถสะท้อนแรงจากลูกเหล็กกลับไปได้มากกว่า ผลการทดสอบนี้สอดคล้องกับการที่ความถี่การสั่นของแผ่น UPE-(15) มีค่าน้อยกว่า UPE-(30) ดัง Table 3 และ Figure 4 เนื่องจาก UPE-(15) ได้รับแรง

กระทำจากใบมีดน้อยกว่า UPE-(30) ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวถูกสนับสนุนเพิ่มเติมจากรอยพับที่เกิดขึ้นบนแผ่น UPE-(15) จะมีมากกว่าบนแผ่น UPE-(30) อย่างชัดเจน หลังจากได้รับแรงกระทบจากใบมีด ดังแสดงใน Figure 5

นอกจากนี้ในการขึ้นรูป UPE-(X) เป็นการนำแผ่น UPE มาเรียงซ้อนกันแล้วกดรีดให้แต่ละแผ่นอยู่ชิดกันมากที่สุด โดยไม่ได้มีการเชื่อมรอยต่อระหว่างแผ่นด้วยสารยึดติดใด ๆ จึงอาจจะมีช่องว่างระหว่างแผ่น UPE แต่ละแผ่นเกิดขึ้นได้เล็กน้อย ซึ่งช่องว่างนี้มีผลทำให้วัสดุเกิดการบิดงอได้จากการวัดความหนาของชิ้นงาน (Table 3) พบว่าเมื่อจำนวนแผ่น UPE ที่เรียงซ้อนกันมีจำนวนน้อย ชิ้นงานจะมีช่องว่างภายในชิ้นงานมากกว่า ทำให้เมื่อแผ่นด้านบนของ UPE-(15) ได้รับการแทงด้วยใบมีดจากการปล่อยมวลถ่วงน้ำหนักที่มีพลังงาน 24 จูล จึงเกิดการบิดงอได้จากจำนวนช่องว่างที่มีอยู่มากกว่า อีกทั้งช่องว่างระหว่างรอยต่อของแผ่น UPE แต่ละแผ่นจะส่งผลต่อการถ่ายโอนแรงจากใบมีดไปยังแผ่นชิ้นงานด้านล่างได้น้อยลง ทำให้ชิ้นงานที่มีจำนวนแผ่น UPE น้อยกว่า เกิดความถี่การสั่นของแผ่นน้อยกว่า

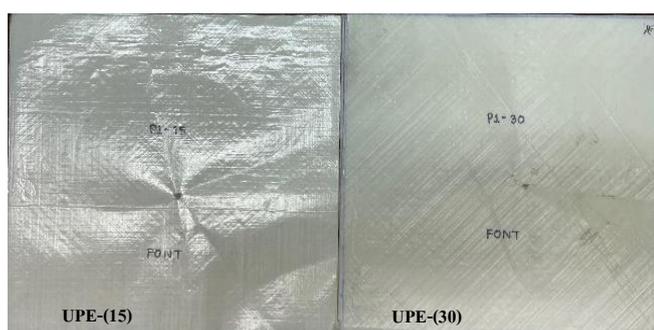


Figure 5 UPE-(15) and UPE-(30) after testing by P1 blade

### 3. ความสัมพันธ์ของความหนาของ UPE กับความถี่การสั่น

ความหนาของวัสดุต้านทานการแทงเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความสะดวกสบายในการ

สวมใส่ (Sitotaw *et al.*, 2022) หากวัสดุที่ใช้มีความหนามากเกินไปจะทำให้ผู้สวมใส่เคลื่อนไหวลำบาก ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาความสัมพันธ์ของความหนาของ UPE จำนวน 4 ระดับ ได้แก่ 3.80 4.80 5.80 และ

6.80 mm ต่อความลึกรอยแทง ผลของความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของ UPE กับความลึกรอยแทงจากการแทงด้วยมีดชนิด P1 และ S1 แสดงดัง Figure 6 จากข้อมูลแสดงให้เห็นว่าความหนาของ UPE มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับความลึกรอยแทงที่เกิดขึ้นจากทั้งใบมีดแบบ P1 และ S1 โดยเมื่อความหนาของ UPE เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความลึกรอยแทงเพิ่มขึ้น ซึ่งมีสาเหตุมาจาก UPE ที่มีความหนาน้อยกว่าจะสามารถสะท้อนแรงจากใบมีดกลับไปได้มากกว่าดังที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 2 และ UPE ที่มีความหนาน้อยกว่าจะมีช่องว่างภายในชิ้นงานมากกว่า เมื่อได้รับการแทงด้วยใบมีดจึงเกิดการบิดงอได้ง่ายกว่า

นอกจากนี้ผลของความชันเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของ UPE กับความลึกรอยแทงจากใบมีด P1 มีค่าเท่ากับ 0.805 และจากใบมีด S1 มีค่าเท่ากับ 0.533 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเปรียบเทียบที่ความหนาของ UPE เท่ากัน ใบมีดแบบ P1 สามารถทำให้เกิดรอยแทงที่มีความลึกมากกว่าใบมีด S1 เนื่องจากใบมีดแบบ S1 เป็นใบมีดแบบ 2 คม และมีขนาดใหญ่กว่าใบมีดแบบ P1 ซึ่งเป็นใบมีด

แบบ 1 คม ซึ่งใบมีดแบบ S1 น่าจะสามารถทำให้เกิดรอยแทงบนชิ้นงานที่มีความลึกมากกว่าใบมีดแบบ P1 แต่เนื่องจากใบมีดแบบ S1 มีความหนา 0.4 cm ซึ่งหนากว่าใบมีดแบบ P1 ที่มีความหนา 0.2 cm ใบมีดที่บางกว่าจะมีแรงต้านจากชิ้นงานที่แทงน้อยกว่า จึงทำให้ใบมีดแบบ P1 แทงวัสดุได้ลึกกว่าใบมีดแบบ S1

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการด้านการแทงกับวัสดุชนิดอื่นพบว่าความหนาขั้นต่ำสุดของ UPE ที่สามารถด้านการแทงด้วยใบมีดแบบ 1 คม ที่ระดับพลังงาน 24 จูล ได้ มีค่าเท่ากับ 4.80 mm ซึ่งน้อยกว่าความหนาของพอลิเอไมด์ 6 พอลิเอไมด์ 11 พอลิเอไมด์ 12 พอลิคาร์บอนเนต และพอลิเอทิลีน ที่ต้องใช้ความหนาลงถึง 7.61 5.64 6.12 5.54 และ 10.13 mm ตามลำดับ (Guo *et al.*, 2020) ดังนั้นแผ่น UPE ความหนา 4.80 mm เป็นความหนาที่เหมาะสมที่สุดสำหรับพัฒนาเป็นวัสดุด้านการแทงที่ระดับพลังงาน E1 ทั้งจากใบมีดแบบ P1 และ S1 ด้วยความหนาที่ไม่มากจนเกินไปจึงน่าจะส่งผลดีเวลาสวมใส่ ทำให้ผู้สวมใส่สามารถเคลื่อนไหวร่างกายได้สะดวกกว่าการใช้วัสดุด้านการแทงที่มีความหนามาก

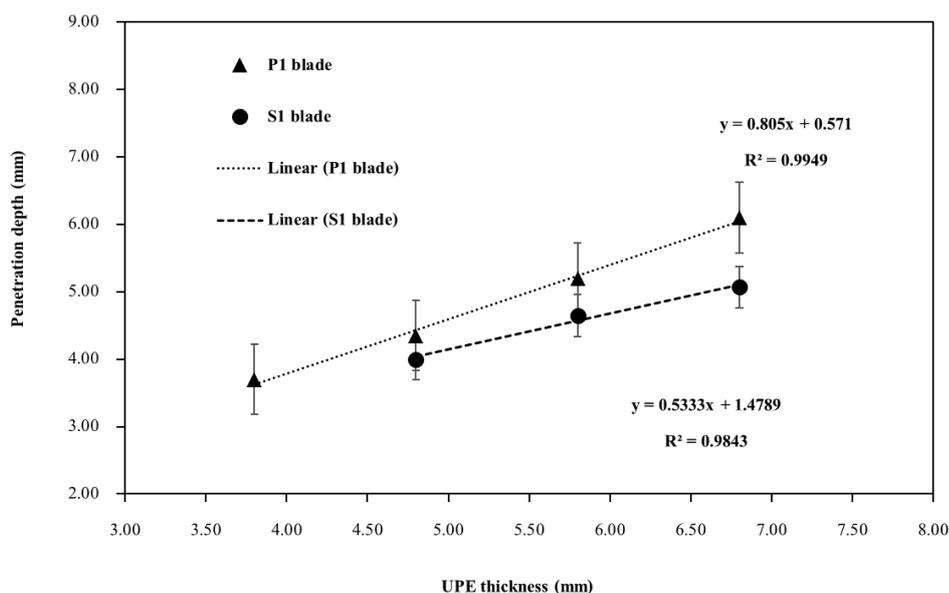


Figure 6 Penetration depths of UPE relative to anti-stabbing material thickness

#### 4. ความสัมพันธ์ของมวลของ UPE กับความลึกรอย แหวง

ในการออกแบบชุดเกราะอ่อนเพื่อด้านการ  
แหวง นอกจากประสิทธิภาพในความสามารถที่  
ดีแล้ว มวลของชุดก็เป็นอีกปัจจัยสำคัญที่ต้อง  
ให้ความสำคัญเพราะผู้สวมใส่ต้องใส่ชุดเกราะอ่อน  
ตลอดเวลาในระหว่างปฏิบัติการจริง ดังนั้นชุดเกราะ  
อ่อนจึงไม่ควรมียาวที่มากเกินไปเพราะจะทำให้  
ผู้สวมใส่ไม่สามารถเคลื่อนไหวร่างกายได้อย่าง  
คล่องตัวและก่อให้เกิดความเมื่อยล้าระหว่างการสวม  
ใส่ (Sitotaw *et al.*, 2022; Yuan *et al.*, 2017) งานวิจัย  
นี้จึงได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างมวลของวัสดุด้าน  
การแหวงกับความลึกรอยแหวง โดยมวลของวัสดุจะ  
แสดงอยู่ในรูปของค่าความหนาแน่นเชิงพื้นที่ ซึ่งเป็น  
มวลของวัสดุต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ โดยที่ค่าความ  
หนาแน่นเชิงพื้นที่ของ UPE-(15) UPE-(20) UPE-  
(25) และ UPE-(30) มีค่าเท่ากับ 2.55 3.40 4.25 และ  
5.10 kg/m<sup>2</sup> ตามลำดับ Figure 7 แสดงให้เห็นว่าความ  
หนาแน่นเชิงพื้นที่ของ UPE สัมพันธ์กับความลึกรอย  
แหวงตามสมการเส้นตรงเช่นเดียวกับความหนาของ  
วัสดุ โดยพบว่าเมื่อความหนาแน่นเชิงพื้นที่เพิ่มขึ้น  
ส่งผลให้ความลึกรอยแหวงเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณากราฟ  
ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นเชิงพื้นที่ของ  
UPE กับความลึกรอยแหวง (Figure 7) จะเห็นว่า  
มีความชันมากกว่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างความ  
หนาของ UPE กับความลึกรอยแหวงทั้งจากการแหวง  
ด้วยใบมีด P1 และ S1 (Figure 6) บ่งบอกได้ว่า  
การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นเชิงพื้นที่ของ UPE มีผล  
ต่อความลึกรอยแหวงมากกว่าการเปลี่ยนแปลงความหนา

ตัวอย่าง UPE-(20) มีความหนา 4.80 mm  
และมีความหนาแน่นเชิงพื้นที่มีค่าเท่ากับ 3.40 kg/m<sup>2</sup>  
มีความเหมาะสมสำหรับพัฒนาเป็นชุดเกราะอ่อน  
ด้านการแหวง เนื่องจากเป็นวัสดุที่ผ่านมาตรฐานการ  
ด้านการแหวงและมีความหนาแน่นเชิงพื้นที่น้อยที่สุด  
ในงานวิจัยนี้ รวมถึงมีความหนาแน่นเชิงพื้นที่น้อยกว่า  
วัสดุจากงานวิจัยอื่นที่เคยมีการนำมาใช้เป็นวัสดุ  
ด้านการแหวง อาทิเช่น พอลิเมอร์เกรดการค้าต่าง ๆ  
ได้แก่ พอลิเอทิลีนที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดร้อน  
พอลิคาร์บอเนต (Guo *et al.*, 2020) รวมไปถึงกลุ่ม  
เส้นใยที่มีความแข็งแรงสูง เช่น เส้นใยอะรามิด  
เส้นใยโลหะ เส้นใยจากหินแร่ เส้นใยคาร์บอน เป็นต้น  
(Huh *et al.*, 2010; Olszewska *et al.*, 2013; Tien *et al.*,  
2011; Yuan *et al.*, 2017) ล้วนมีมวลต่อหนึ่งหน่วย  
พื้นที่สูงกว่า UPE-(20) จากงานวิจัยก่อนหน้านี้มีการ  
รายงานว่าเส้นใย พอลิเอไมด์ผสมคาร์บอนที่ความ  
หนา 6.50 mm มีค่าความหนาแน่นเชิงพื้นที่เท่ากับ  
6.58 kg/m<sup>2</sup> ซึ่งเป็นวัสดุด้านการแหวงที่มีความเบา  
กว่าชุดเกราะเกรดการค้าถึง 43% (Yuan *et al.*, 2017) และ  
สามารถต้านทานการแหวงได้ที่ระดับพลังงาน E1  
ในขณะที่ UPE-(20) จากงานวิจัยนี้สามารถต้านทาน  
การแหวงได้ที่ระดับพลังงาน E1 เช่นเดียวกัน แต่มี  
ความหนาและความหนาแน่นเชิงพื้นที่น้อยกว่า  
เส้นใยพอลิเอไมด์ผสมคาร์บอนประมาณ 50% จึงอาจ  
กล่าวได้ว่า UPE-(20) เป็นวัสดุที่มีประสิทธิภาพใน  
การต้านทานการแหวงเทียบเท่าวัสดุอื่น แต่มีมวลต่อ  
หน่วยพื้นที่และความหนาน้อยกว่า ซึ่งถือเป็นจุดเด่น  
ของวัสดุชนิดนี้ในการพัฒนาเป็นชุดเกราะอ่อนต่อไป

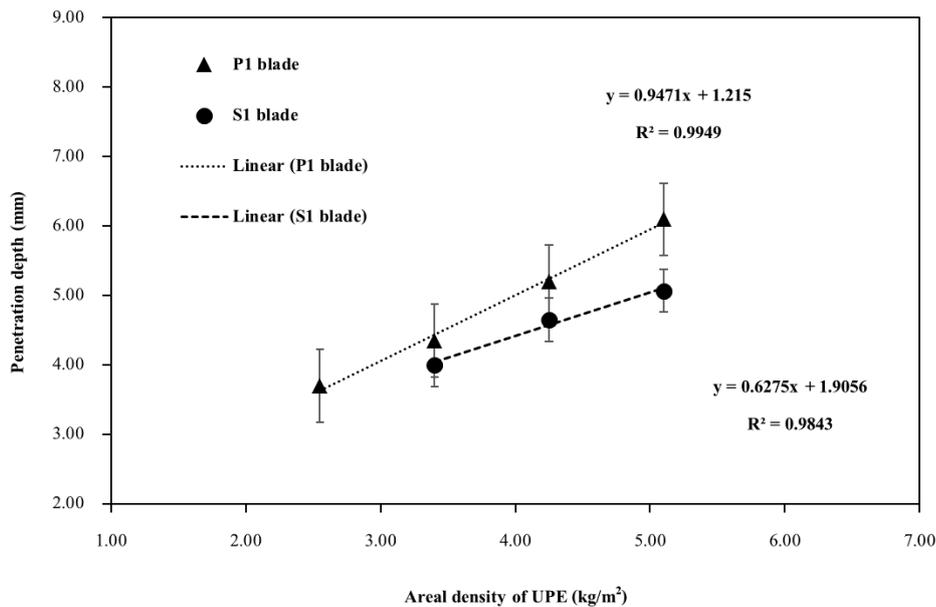


Figure 7 Penetration depths of UPE relative to areal density of anti-stabbing material

### 5. ดัชนีด้านการแทง (Anti-stabbing index; ASI)

โดยทั่วไปประสิทธิภาพด้านการแทงของวัสดุ จะพิจารณาจากความลึกรอยแทง แต่อย่างไรก็ตาม การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวัสดุแต่ละชนิด โดยใช้ระยะรอยแทงเพียงอย่างเดียวอาจจะไม่ค่อยแม่นยำนัก เนื่องจากปัจจัยอื่นเช่นความหนาหรือมวลของวัสดุมีผลต่อความลึกรอยแทงของวัสดุแต่ละชนิด แตกต่างกันไป เพื่อให้การเปรียบเทียบประสิทธิภาพ ความต้านการแทงของวัสดุแต่ละชนิดมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น จึงมีการกำหนดค่าที่เรียกว่าดัชนีด้านการแทง หรือ ASI ขึ้นมา (Tien *et al.*, 2011) ซึ่งเป็นค่าที่เปรียบเทียบประสิทธิภาพของวัสดุ ณ ความลึกรอยแทงเท่ากัน หาก ASI ยิ่งมีค่าน้อย แสดงว่าวัสดุด้านการแทงชนิดนั้นมีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นวัสดุด้านการแทง ทั้งในแง่ของประสิทธิภาพด้านการแทงที่ดี มีความเบา และมีความหนาน้อย ตามมาตรฐาน NIJ กำหนดไว้ว่าความลึกรอยแทงจะต้องไม่เกิน 7 mm วัสดุนั้นจึงจะถือว่ามีประสิทธิภาพด้านการแทง นิยามของดัชนีด้านการแทงแสดงได้ดังสมการที่ (3)

$$ASI = (TH)_{STD} \times (AD)_{STD} \quad (3)$$

โดย  $(TH)_{STD}$  คือ ความหนาของวัสดุที่ทำให้เกิดความลึกรอยแทง 7 mm (Thickness of material required for the standard penetration depth) และ  $(AD)_{STD}$  คือ ความหนาแน่นเชิงพื้นที่ของวัสดุที่ทำให้เกิดความลึกรอยแทง 7 mm (Areal density of material required for the standard penetration depth)

$(TH)_{STD}$  และ  $(AD)_{STD}$  ของ UPE สามารถคำนวณได้จากสมการเส้นตรงของ Figure 6 และ Figure 7 ตามลำดับ ผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่า ใบบีมัดแบบ P1 มีค่า  $(TH)_{STD}$  และ  $(AD)_{STD}$  เท่ากับ 7.99 mm และ 6.11 kg/m<sup>2</sup> ตามลำดับ ในขณะที่ใบบีมัดแบบ S1 มีค่า  $(TH)_{STD}$  และ  $(AD)_{STD}$  เท่ากับ 10.19 mm และ 7.98 kg/m<sup>2</sup> ตามลำดับ ดังนั้นเมื่อคำนวณตามสมการที่ (3) ค่า ASI ของ UPE สำหรับใบบีมัด P1 มีค่าเท่ากับ 48.82 และค่า ASI ของ UPE สำหรับใบบีมัด S1 มีค่าเท่ากับ 81.31 เมื่อเปรียบเทียบกับค่า ASI ของวัสดุอื่นใน Table 4 พบว่า UPE มีค่า ASI ต่ำกว่าวัสดุไฮบริดที่ขึ้นรูปจากเส้นใยอะคริลิก ใยโพลีเอสเตอร์ และใยคาร์บอน การทดสอบแสดงให้เห็นว่า UPE สามารถด้านการ

แท่งตามมาตรฐาน NIU ในระดับ E1 ได้เช่นเดียวกันกับวัสดุชนิดอื่น แต่มีมวลและความหนาน้อยกว่าวัสดุอื่น จึงทำให้ UPE เป็นอีกวัสดุหนึ่งที่มีความน่าสนใจในการนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุด้านการแทงในเสื่อเกราะอ่อน เพราะจะทำให้เสื่อเกราะมีความบาง ความเบา มีความยืดหยุ่นที่ดี ทำให้ผู้สวมใส่เคลื่อนไหวได้สะดวกขณะสวมใส่และไม่ต้องแบกรับน้ำหนักเสื่อเกราะมากเกินไป

สำหรับต้นทุนการผลิตแผ่น UPE มีต้นทุนการผลิตเฉลี่ยกิโลกรัมละ 350 บาท ในขณะที่ต้นทุน

การผลิตแผ่นเคฟลาจากเส้นใยอะรามิดซึ่งเป็นวัสดุที่นิยมใช้ผลิตเป็นเสื่อเกราะกันกระสุนและเสื่อเกราะกันแทงในท้องตลาดปัจจุบันมีราคาเฉลี่ยอยู่ที่กิโลกรัมละ 3,600 บาท ซึ่งการผลิตแผ่น UPE มีต้นทุนการผลิตต่ำกว่าแผ่นเคฟลาประมาณ 10 เท่า ดังนั้น แผ่น UPE จึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจเพราะเป็นวัสดุที่ราคาไม่สูง น้ำหนักเบา และสามารถต้านทานการแทงตามมาตรฐานได้

**Table 4** Comparison of anti-stabbing index (ASI) of several materials

Material	Number of sheets	Thickness (mm)	Areal density (kg/m <sup>2</sup> )	Anti-stabbing index (ASI)	Ref.
UPE-P1 blade	33	7.99	6.11	48.82	This work
UPE-S1 blade	42	10.19	7.98	81.32	This work
Basalt	29	17.30	7.70	133.21	(Tien <i>et al.</i> , 2011)
Aramid	17	17.60	10.60	186.56	(Tien <i>et al.</i> , 2011)
Metal	12	14.20	11.60	164.72	(Tien <i>et al.</i> , 2011)

## สรุป

UPE เป็นวัสดุที่ผลิตจากการขึ้นรูปเส้นใยพอลิเอทิลีนมวลโมเลกุลสูงยังเป็นแผ่นบางแบบไม่ถักทอด้วยวิธีอคร้อน ซึ่งเป็นวิธีที่ง่าย ต้นทุนต่ำ ได้แผ่นด้านการแทงที่มีความบางและมีมวลต่อพื้นที่ต่ำ UPE-(1) มีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดและความต้านทานการฉีกขาดเท่ากับ 162.50 MPa และ 360.74 N/mm ตามลำดับ ซึ่งถือว่าเป็นวัสดุที่ค่อนข้างเหนียวเมื่อเทียบกับวัสดุด้านการแทงชนิดอื่น ในส่วนของการทดสอบประสิทธิภาพด้านการแทงนั้น UPE-(20) เป็นความหนาที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้เป็นวัสดุด้านการแทงที่ระดับพลังงาน E1 เนื่องจากเป็นความหนาขั้นต่ำสุดที่สามารถต้านทานการแทงทั้งจากโม่ P1 และ S1 ตามมาตรฐาน NIU ได้ รวมถึงมีความ

หนาแน่นเชิงพื้นที่น้อยที่สุดในงานวิจัยนี้ การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นเชิงพื้นที่ของ UPE มีผลต่อความลึกรอยแทงมากกว่าการเปลี่ยนแปลงความหนา นอกจากนี้ UPE มีค่าดัชนีด้านการแทงและความหนาแน่นเชิงพื้นที่ต่ำกว่าวัสดุจากงานวิจัยอื่น แสดงให้เห็นว่า UPE มีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นวัสดุด้านการแทงทั้งในแง่ของการมีประสิทธิภาพด้านการแทงที่ดี เตรียมได้จากวิธีที่ไม่ซับซ้อน เป็นวัสดุด้านการแทงที่มีน้ำหนักเบาและบาง ช่วยให้ผู้สวมใส่สามารถเคลื่อนไหวได้สะดวกขณะสวมใส่

## กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเคมี และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย

เทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ที่ให้ความอนุเคราะห์  
เครื่องมือและสถานที่ในการทำวิจัยครั้งนี้

## เอกสารอ้างอิง

- Afshari, M., Sikkema, D.J., Lee, K. and Bogle, M. 2008. High performance fibers based on rigid and flexible polymers. **In Polymer Reviews** 48(2): 230-274.
- Bogetti, T.A., Walter, M., Staniszewski, J. and Cline, J. 2017. Interlaminar shear characterization of ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) composite laminates. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing** 98: 105-115.
- Chen, L., Cao, M. and Fang, Q. 2021. Ballistic performance of ultra-high molecular weight polyethylene laminate with different thickness. **International Journal of Impact Engineering** 156: 1-11.
- Deák, T. and Czigány, T. 2009. Chemical Composition and Mechanical Properties of Basalt and Glass Fibers: A Comparison. **Textile Research Journal** 79(7): 645-651.
- Guo, Y., Yuan, M., Qian, X., Wei, Y. and Liu, Y. 2020. Rapid prediction of polymer stab resistance performance. **Materials and Design** 192: 108721.
- Huh, Y., Tien, D.T. and Kim, J.S. 2010. Stab-resistant property of the fabrics woven with the aramid/cotton core-spun yarns. **Fibers and Polymers** 11(3): 500-506.
- Li, T., Song, Z., Yang, X. and Du, J. 2023. Influence of Processing Parameters on the Mechanical Properties of Peek Plates by Hot Compression Molding. **Materials** 16(1): 36.
- Mejia, E., Cherupurakal, N., Mourad, A.H.I., Hassanieh, S.A.I. and Rabia, M. 2021. Effect of processing techniques on the microstructure and mechanical performance of high-density polyethylene. **Polymers** 13(19): 3346.
- Mudzi, P., Wu, R., Firouzi, D., Ching, C.Y., Farncombe, T.H. and Ravi Selvaganapathy, P. 2022. Use of patterned thermoplastic hot film to create flexible ballistic composite laminates from UHMWPE fabric. **Materials and Design** 214: 110403.
- Nayak, R., Crouch, I., Kanesalingam, S., Wang, L., Ding, J., Tan, P., Lee, B., Miao, M., Ganga, D. and Padhye, R. 2018. Body armor for stab and spike protection, Part 2: a review of test methods. **Textile Research Journal** 89(16): 3411-3430.
- O'Masta, M.R., Deshpande, V.S. and Wadley, H.N.G. 2014. Mechanisms of Projectile Penetration in Dyneema® Encapsulated Aluminum Structures. **International Journal of Impact Engineering** 74: 16-35.
- Olszewska, K., Polak, J., Zielińska, D., Struszczyk, M.H., Kucińska, I., Wierzbicki, Ł., Kozłowska, J., Leonowicz, M. and Wiśniewski, A. 2013. Textile multilayered systems with magnetorheological fluids for potential application in multi-threat protections. Preliminary stab - Resistance studies. **Fibres and Textiles in Eastern Europe** 21(5): 112-116.

- Pundhir, N., Pathak, H. and Zafar, S. 2021. Ballistic impact performance of ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) composite armour. **Sādhanā** 46: 194.
- Sapozhnikov, S.B., Kudryavtsev, O.A. and Zhikharev, M.V. 2015. Fragment ballistic performance of homogenous and hybrid thermoplastic composites. **International Journal of Impact Engineering** 81: 8-16.
- Shamloo, A., Fathi, B., Elkoun, S., Rodrigue, D. and Soldera, A. 2018. Impact of compression molding conditions on the thermal and mechanical properties of polyethylene. **Journal of Applied Polymer Science** 135(15): 46176.
- Sitotaw, D.B., Ahrendt, D., Kyosev, Y. and Kabish, A.K. 2022. A Review on the Performance and Comfort of Stab Protection Armor. **Autex Research Journal** 22(1): 96-107.
- Tien, D.T., Kim, J.S. and Huh, Y. 2011. Evaluation of anti-stabbing performance of fabric layers woven with various hybrid yarns under different fabric conditions. **Fibers and Polymers** 12(6): 808-815.
- Yashiro, S., Ogi, K., Yoshimura, A. and Sakaida, Y. 2014. Characterization of high-velocity impact damage in CFRP laminates: Part II - Prediction by smoothed particle hydrodynamics. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing** 56: 308-318.
- Yuan, M.Q., Liu, Y., Gong, Z. and Qian, X.M. 2017. The application of PA/CF in stab resistance body armor. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering** 213(1): 12027.
- Zaribaf, F.P. 2018. Medical-grade ultra-high molecular weight polyethylene: past, current and future. **In Materials Science and Technology (United Kingdom)** 34(16): 1940-1953.

# จีโอพอลิเมอร์จากดินขาวผสมน้ำยางพาราเพื่อป้องกัน

## คอนกรีตเสริมเหล็กจากการกัดกร่อน

### Geopolymer from Metakaolin containing Field Para Rubber Latex Coating for Protecting Reinforced Concrete against Corrosion

อาบีเด็น ฮาวา<sup>1\*</sup>, ปรีชา สะแลแม<sup>1</sup> และ วรพจน์ ประชาเสรี<sup>2</sup>

Abideng Hawa<sup>1\*</sup>, Preecha Salaemae<sup>1</sup> and Woraphot Prachasaree<sup>2</sup>

Received: 4 July 2022, Revised: 17 August 2023, Accepted: 4 September 2023

#### บทคัดย่อ

ในการศึกษาครั้งนี้เป็นการศึกษาจีโอพอลิเมอร์เพสต์จากดินขาวผสมน้ำยางพารา และกระตุ้นด้วยโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์ ในการเคลือบตัวอย่างคอนกรีตเพื่อตรวจสอบการกัดกร่อนของเหล็กจีโอพอลิเมอร์เพสต์ถูกเตรียมด้วยดินขาวแทนที่ด้วยน้ำยางพาราร้อยละ 1, 3, 5 และ 10 โดยน้ำหนัก โดยมีกระบวนการผลิตคอนกรีตด้วยจีโอพอลิเมอร์เพสต์ 1 และ 2 ชั้น และมีการบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทดสอบกำลังดึงผ่าซีกและการเกิดสนิมในเหล็ก จากการเร่งด้วยกระแสไฟฟ้า 12 โวลต์ โดยการให้กระแสไฟฟ้า 8 ชั่วโมง หยุด 8 ชั่วโมง เป็นเวลา 14 วัน ทดสอบก่อนตัวอย่างที่กำลังแช่ในน้ำทะเล ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างเคลือบจีโอพอลิเมอร์เพสต์ที่ผสมน้ำยางพาราร้อยละ 1, 3 และ 5 โดยน้ำหนัก สามารถลดการกัดกร่อนได้อย่างชัดเจน ทั้งการเคลือบ 1 และ 2 ชั้น พร้อมทั้งวิเคราะห์ตรวจสอบโครงสร้างระดับจุลภาคบริเวณรอยต่อระหว่างคอนกรีตและจีโอพอลิเมอร์เพสต์

**คำสำคัญ:** จีโอพอลิเมอร์, ดินขาว, น้ำยางพารา, การเคลือบ, การกัดกร่อน

<sup>1</sup> หน่วยวิจัยโครงสร้างพื้นฐานและนวัตกรรมวัสดุ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครราชสีมา นครราชสีมา อำเภอเมืองนครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา 96000

<sup>1</sup> Infrastructure and Materials Innovation Research Unit, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Princess of Naradhiwas University, Muang Narathiwat, Narathiwat 96000, Thailand.

<sup>2</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90110

<sup>2</sup> Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90110, Thailand.

\* Corresponding author, email: abideng.hawa@gmail.com

## ABSTRACT

In this study, geopolymers were synthesized from metakaolin containing field Para rubber latex and activated with sodium silicate and sodium hydroxide. The concrete samples were coated with these geopolymers to assess their corrosion resistance. Geopolymers were prepared by substituting metakaolin with field Para rubber latex at weight percentages of 1%, 3%, 5%, and 10%. The concrete specimens were coated with single or double layers of the geopolymers and then cured for 24 hours. Tensile strength and corrosion performance of the steel were evaluated through an accelerated corrosion test with a 12-volt electric current, applied for 8 hours and paused for 8 hours, over a duration of 14 days. Additionally, samples submerged in seawater were tested. The results demonstrated that the samples coated with geopolymers containing 1%, 3%, and 5% natural rubber latex by weight exhibited a significant reduction in corrosion, evident in both single and double-coated specimens. Structural analysis at the micro level was also conducted at the interfacial transition zone between concrete and geopolymers paste.

**Key words:** geopolymer, metakaolin, field Para rubber latex, coating, corrosion

## INTRODUCTION

The corrosion of reinforcing steel in concrete structures causes severe deterioration of infrastructure in concrete elements exposed to chloride ions in seawater, brackish water, or waste water from factories. Several previous studies (Jacek *et al.*, 2018; Jhutan *et al.*, 2021; Marilene *et al.*, 2021; Mostafa *et al.*, 2020) have reported that geopolymer binders have excellent materials properties, especially acid resistance and durability. Therefore, geopolymers have been used as coatings in prior studies.

Coatings can effectively protect concrete structures against steel corrosion from chemical exposures. The coatings on concrete surfaces need to be designed for ease of application and good adhesion. Brenna *et al.* (2013) studied polymer modified mortar and polymeric coating of reinforced concrete with long-term chloride induced corrosion. Christodoulou *et al.* (2013) used silane coating of reinforced concrete in an assessment of performance of the surface. Geopolymer coatings in particular have been widely applied to coat steel or structural concrete for corrosion

protection (Shahedan *et al.*, 2014; Chindaprasirt and Rattanasak, 2016). Regarding geopolymer coatings, Aguirre-Guerrero *et al.* (2017) reported that geopolymers were prepared with fly ash and metakaolin as protective coatings against chloride-induced corrosion in reinforced concrete. The samples were immersed in a 3.5% NaCl solution with wetting/drying cycles and a constant 5 V potential. The results showed that metakaolin based geopolymer coating exhibited the best performance, reducing the corrosion rate compared to concrete without coating. Wiyono *et al.* (2015) used geopolymer coatings prepared from fly ash and calcined volcanic mud. The concrete substrates were exposed to 10% sulfuric acid in wet-dry cycles, and to chloride solution to evaluate its penetration depth. The results showed that geopolymer coating improved the durability of concrete samples.

In 2019, global production of Para rubber was approximately 13,841,000 tons. Thailand produced approximately 4,852,000 tons or 35% of this total (Rubber Economic Research and Development Division, 2020). In fresh or field state, the latex raw form of rubber (field Para rubber latex,

FPRL) annual amount in Thailand is estimated as 10.78 to 19.41 million tons, because FPRL contains also 55-75% water and non-rubber substances such as sludge, proteins, and some inorganic materials, along with 25-45% of rubber particles (Knowledge Management, 2017). In FPRL the rubber particle size ranges within 0.04-4.0 micron with mean particle size of 1.0 micron (Blackley, 1997), for the clonal variety RRIM 600 (Rubber Research Institute of Malaysia 600) of rubber trees.

Limited research exists concerning the utilization of FPRL in geopolymer binders, particularly regarding the application of geopolymer coatings for safeguarding against steel corrosion. Consequently, further investigation is necessary to thoroughly assess the impacts of FPRL in geopolymer composite materials. This present study seeks to examine the splitting tensile strength, steel weight loss, and the microstructure of the interfacial transition zone between the concrete surface and geopolymer binder paste coatings containing field Para rubber latex. The samples, incorporating FPRL contents of 0%, 1%, 3%, 5%, and 10% by weight, were submerged in seawater at ambient temperature for 14 days, with 12 V excitation alternating every 8 hours. These samples featured either one or two coating layers on concrete substrates, characterized by either a flat or rugged surface. The objective of this study is to analyze the influence on splitting tensile strength and

steel weight loss, while evaluating the ITZ microstructure through scanning electron microscopy (SEM). Significantly, this paper offers a candid discussion on the challenges encountered during the geopolymer application process.

## MATERIALS AND METHODS

### 1. Materials

Metakaolin (MK) and field Para rubber latex (FPRL) were sourced from the Narathiwat province in southern Thailand. The kaolin used in this study was calcined at 750 °C for 2 h. The chemical compositions and particle size distribution are presented in Table 1 and Figure 1, respectively. The chemical composition of MK was analyzed via X-ray fluorescence (XRF). According to ASTM C618 (2019), the MK utilized in this study falls under class F. The total proportion of the major oxides (SiO<sub>2</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) amounted to 91.32%, while the CaO content stood at 0.33%. Figure 1 illustrates the particle size distribution of MK, revealing an average particle size of approximately 9 μm, with 96% of the MK passing through the 45-micron sieve.

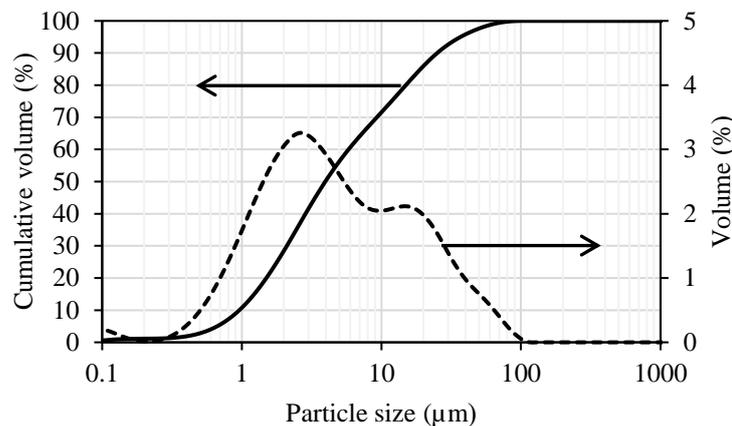
Field Para rubber latex (from rubber tree clonal variety RRIM 600) used in this study was collected from Narathiwat province in Thailand. The FPRL is a suspension with 35-40% total solids content. The particle sizes in FPRL are in the range 0.04-4.0 μm. Kaesaman *et al.* (2014) reported that the total solids content in FPRL was 36.9%.

**Table 1** The chemical composition of MK

Component	% by weight
SiO <sub>2</sub>	50.30
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	41.02
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.05
CaO	0.33
TiO <sub>2</sub>	1.05
K <sub>2</sub> O	4.08

The alkaline activators for geopolymerization reactions were prepared using sodium silicate ( $\text{Na}_2\text{O} = 14.85\%$ ,  $\text{SiO}_2 = 29.45$  and  $\text{H}_2\text{O} = 55.7\%$ ), sodium hydroxide (NaOH) flakes of 99% purity, and water for the geopolymer paste. Natural river sand for ordinary Portland cement concrete passing

through ASTM sieve No. 4, with particle size below 4.75 mm, specific gravity 2.56, and fineness modulus 2.59, was used to prepare the concrete substrate. The coarse aggregate used in this work was compliant with ASTM C33/C33M (2013).



**Figure 1** Particle size distribution of metakaolin

## 2. Mixture proportion and curing of samples

Geopolymer paste was created by blending MK with FPRL and mixing them with sodium silicate, sodium hydroxide, and water in accordance with the experimental design. Field Para rubber latex was incorporated as a stabilizing agent. The specific mixture proportions are detailed in Table 2. These proportions were selected to optimize both the enhancement and reduction of corrosion in the reinforcing steel with coatings. The ratios of powder and alkaline activator were kept constant for a robust formulation. MK, sodium silicate, sodium hydroxide, and water were mixed for 3 minutes until achieving a homogenous, viscous liquid. Geopolymer

binders were mixed for 3 minutes before being applied onto the concrete substrate using a paintbrush. The concrete samples received either 1 or 2 coating layers, were not enveloped in polyvinyl, and were cured at ambient temperature for 24 hours for a single-layer coating. In the case of a double-layer coating, after the initial layer was applied, the samples were cured at ambient temperature for 7 days. Subsequently, the second layer was applied and allowed to cure at ambient temperature for an additional 24 hours. Following this, the samples were immersed in seawater for the steel corrosion test.

**Table 2** Mix proportions of geopolymer binder pastes (by weight)

MK (%)	FPRL (%)	(MK+FPRL) : SS (g)	SS : SH (g)	B : W (g)
100	0			
99	1			
97	3	1 : 0.75	2.5 : 1	1 : 0.3
95	5			
90	10			

Abbreviations used: MK = metakaolin; FPRL = field Para rubber latex; SS = sodium silicate; SH = sodium hydroxide; B=binder (MK+FPRL) ; W = water

### 3. Methods

#### 3.1 Reinforced concrete substrate

In order to create concrete samples (substrates), commercially available raw materials from Thailand were chosen, which encompassed a general-use Portland cement, reinforcing steel bars, river sand, and rocks. Two distinct types of concrete samples were prepared, distinguished by water-to-cement ratios of 0.5 and 0.65, and a cement-to-river sand-to-rock ratio of 1:2:4 by weight. These samples were subsequently submerged in water for a 28-day curing period. Each specimen contained a centrally embedded reinforcing steel bar, positioned 5 cm away from the bottom. The samples featuring a water-to-cement ratio of 0.5 exhibited sizable pores and rugged surfaces, whereas those with a water-to-cement ratio of 0.65 displayed a uniform matrix and smooth surfaces. The strength and surface conditions of these samples are concisely outlined in Table 3.

#### 3.2 Geopolymer coating

The coatings were manually applied using a paintbrush. Initially, the concrete surface was wiped with a damp cloth to saturate the pores and prevent or limit the undesired absorption of water from the coating geopolymer paste. Following this, the geopolymer coating was prepared and subsequently applied.

In the context of concrete coatings, there are at least two primary factors that significantly contribute to the permeability of seawater, primarily chloride ions, as illustrated in Figure 2. The mechanism involving chloride ions entails the dispersion of seawater through the geopolymer coating layer and into the concrete substrate.

#### 3.3 Steel corrosion

The concrete samples underwent steel corrosion testing. These samples had a diameter of 100 mm and a height of 200 mm, featuring an embedded steel bar with a diameter of 12 mm and a length of 200 mm. The weight of the steel bars was measured

to ascertain the extent of weight loss caused by corrosion.

#### 3.4 Imposed voltage

The imposed voltage test was conducted 24 hours after the application of the geopolymer paste coating. The aim of this test was to evaluate the corrosion of the steel bars embedded within the concrete samples in the presence of chlorides, as well as to determine the impact of the coatings on this corrosion process. The concrete specimens were immersed in seawater, and a voltage of 12 V was intermittently applied every 8 hours from an external power source (as shown in Figure 3), between the steel bar and a steel sheet placed in the seawater, over a duration of up to 14 days. Subsequently, the samples were subjected to a splitting tensile strength test after undergoing a 24-hour drying period at ambient temperature.

#### 3.5 Splitting tensile strength

The splitting tensile strength of the concrete coating was determined through the application of the test method outlined in ASTM C496/C496M (2017). In the splitting tensile strength test, a 100 mm x 200 mm cylinder is subjected to axial compression. The results of the splitting tensile strength test for the samples are shown in Figure 4. To calculate the splitting tensile strength of the specimen, follow the steps below:

$$T = \frac{2P}{\pi ld} \quad (1)$$

T = Splitting tensile strength, (MPa)

P = Maximum applied load indicated by the testing machine, (N)

l = Length, (mm)

d = Diameter, (mm)

#### 3.6 Scanning electron microscopy (SEM) analysis

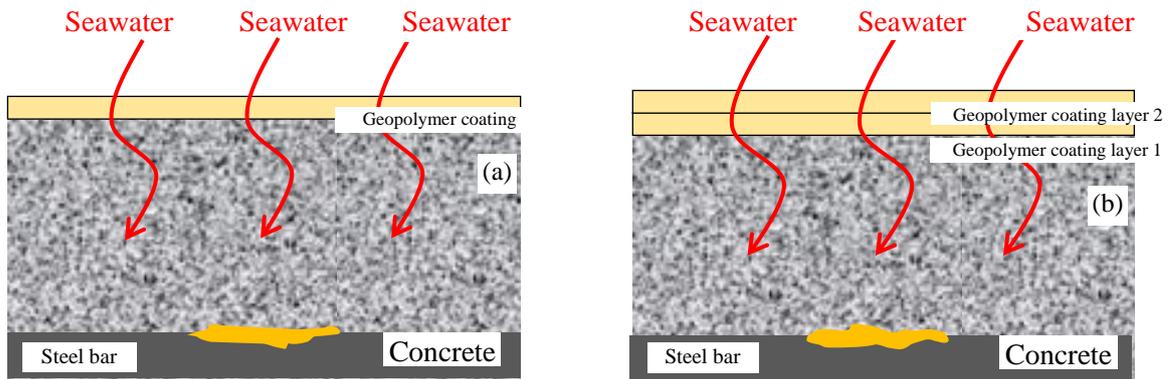
For microscopic analysis, small fragments of the samples from the steel

corrosion tests (conducted subsequent to the splitting tensile test) underwent examination via scanning electron microscopy. The JMS-5800 LV model scanning electron

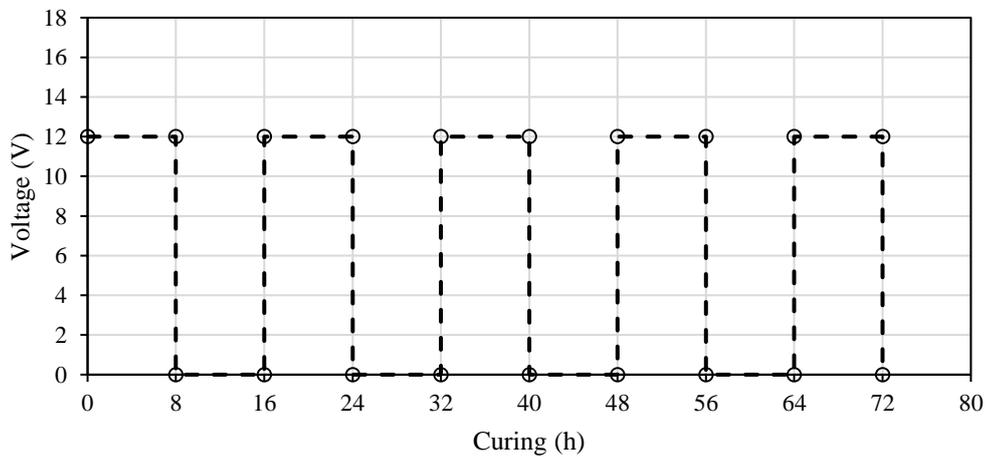
microscope (JEOL, Japan) was employed to scrutinize the microstructure within the concrete samples.

**Table 3** The two types of concrete substrate

W/C	Ambient temperature	Curing (days)	Surface	Compressive strength (MPa)
0.50	30±3	28	rough	26.87
0.65	30±3	28	smooth	19.81



**Figure 2** Illustration of the seawater penetration mechanisms with geopolymer coatings on concrete substrates (a) 1 coating layer, and (b) 2 coating layers



**Figure 3** Impose voltage of samples



**Figure 4** Splitting tensile strength of samples

## RESULTS AND DISCUSSION

### 1. Physical characteristics

The application of coatings was done manually with the experimental mixtures. The physical characteristics of the coatings were determined after 12 V excitation under seawater for 14 days, with on/off switching each 8 hours. Figure 5 shows the results for concrete specimens without coating having both types of surfaces (rough or smooth) and clear rust stains are seen in Figures 5(a) and 5(b). On the other hand, single or double layers of geopolymer paste coating protected the steel bars in the concrete specimens, especially with 2 coating layers.

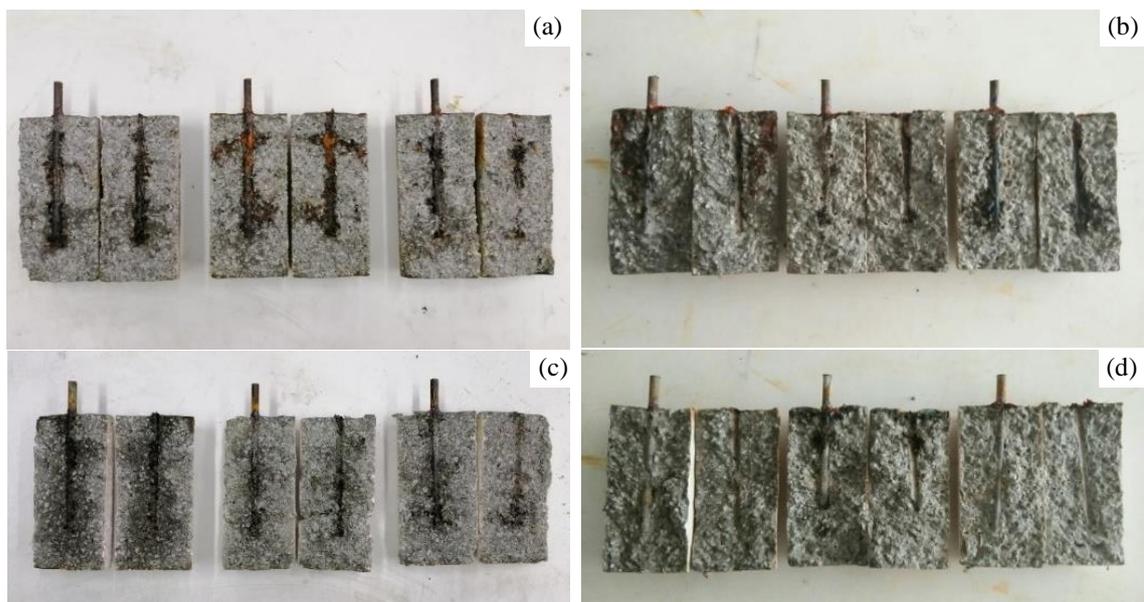
### 2. Splitting tensile strength

The splitting tensile strength of concrete samples was determined for cases coated with double layers. The samples were measured in applied test with ASTM C496/C496M (2017), except for using 100 mm x 200 mm sample size with steel bar embedded in the axial center. Only small amounts of steel loss were observed in this study because of the relatively short corrosion period of 14 days. The condition of steel in concrete after the corrosion test is shown in Figure 6, with subjectively obvious corrosion. While samples without coatings had clear corrosion on surfaces, those with 2 coating layers had only slight surface corrosion, both with rough and smooth concrete cases. The results of splitting tensile strength for the two surface types are shown in Figures 7 and 8. The splitting tensile

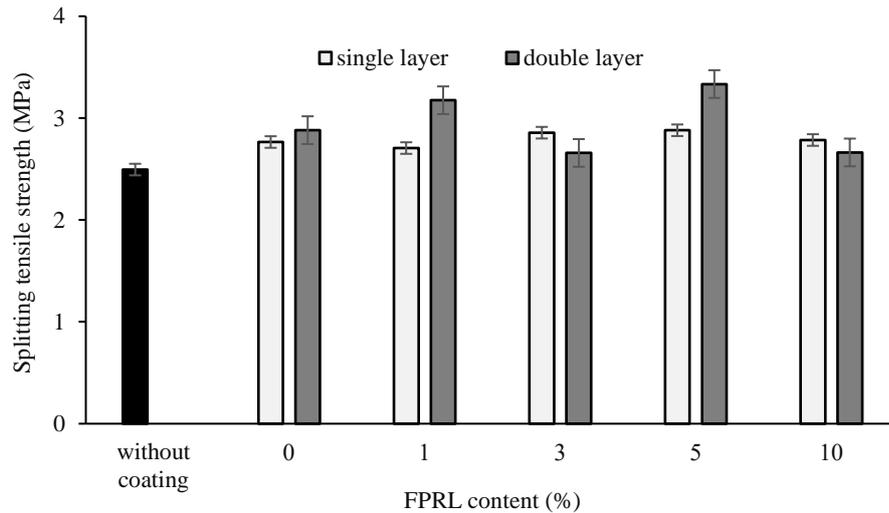
strengths ranged in 2.66-3.34 MPa (see Figure 7) and in 1.49-2.29 MPa (see Figure 8) for rough and smooth cases, respectively. It is observed that rough surface cases gave higher splitting tensile strength than smooth surface cases. This is because cases with rough surfaces had water-to-cement ratio of 0.5, lower than the 0.65 for smooth surfaces. It is known that concrete with lower water to cement ratio has higher strength. Moreover, the increase of split tensile strength due to the geopolymerization process, where aluminosilicate oxides react with alkali polysilicates to produce Si-O-Al polymeric bonds. Aluminosilicate polymeric bonds were more stable when submerged in seawater (Zhang *et al.*, 2010a). The splitting tensile strength of the specimens was determined at the age of 14 days. In Figure 8, the results indicate that the splitting tensile strength of samples with geopolymer coating was slightly increased relative to cases without coating. The cases with smooth surfaces had approximately similar splitting tensile strengths with and without coating. The test results show that geopolymer paste coatings with and without FPRL on concrete substrate gave only slight differences in splitting tensile strength after immersion in sea water. This is because of the short curing/corrosion time (14 days) under seawater. Nastiti and Ekaputri (2020) reported that the concrete samples were coated with fly ash geopolymer mortar of the difference thickness. The results shown that immersion in seawater for 30 days slightly affected the compressive strength.



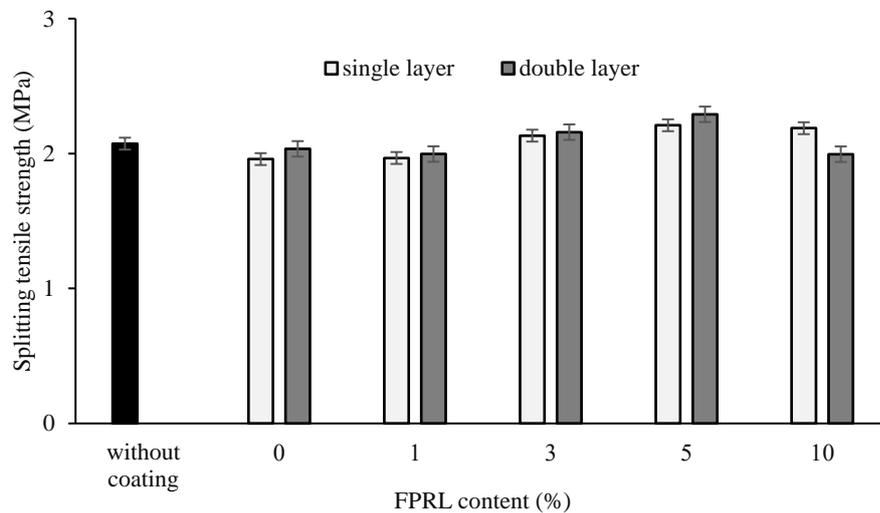
**Figure 5** Geopolymer concrete samples (a) without coating on rough surface, (b) without coating on smooth surface, (c) 5% FPRL single layer, rough surface, (d) 5% FPRL single layer, smooth surface, (e) 5% FPRL double layers, rough surface, and (f) 5% FPRL double layers, smooth surface



**Figure 6** The splitting tensile strength of concrete samples (a) without coating on rough surface, (b) without coating on smooth surface, (c) 5% FPRL double layers, rough surface, and (d) 5% FPRL double layers, smooth surface.



**Figure 7** Effect of FPRL content on splitting tensile strength, rough surface.



**Figure 8** Effect of FPRL content on splitting tensile strength, smooth surface.

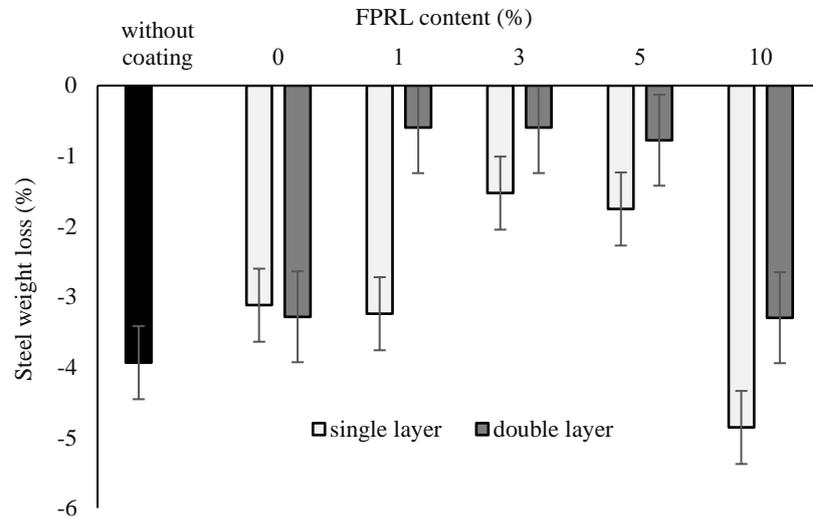
### 3. Imposed voltage

Figures 9 and 10 show the steel bar weight loss from corrosion during immersion in seawater with 12 V cycled on/off every 8 hours. The effects of FPRL content on the steel weight loss from the samples are shown in Figure 9 for rough surface cases and in Figure 10 for smooth surface cases. The steel weight loss by FPRL content in the geopolymer coating on rough surface is presented in Figure 9. The specimens with 1%, 3%, and 5% FPRL reduced corrosion of the reinforcing bars in the concrete samples, while geopolymer binder pastes without FPRL gave poorer protection against corrosion. This is because FPRL had fine

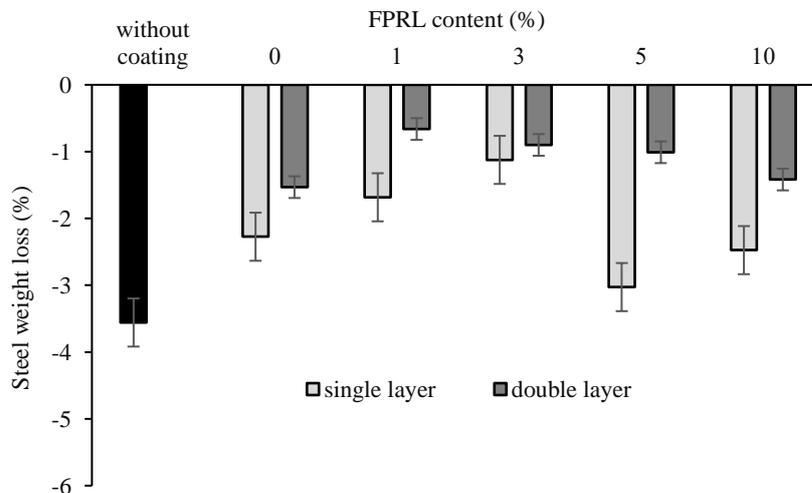
particles of 0.4-4 micron sizes that plugged pores in the matrix, reducing its permeability and preventing the penetration by chloride ions. However, it was observed that geopolymer binder pastes containing 10% FPRL had increased weight loss, due to the large FPRL content in geopolymer system inducing large pores in the coating. Hawa *et al.* (2017) assessed fly ash geopolymer mortars containing field Para rubber latex. SEM imaging showed that high content of FPRL gave a highly porous microstructure. Both concrete surface types (rough and smooth) behaved similarly in this respect. A similar phenomenon was presented by Tittarelli *et al.* (2018) who found that the higher total

porosity of geopolymer compared other geopolymeric matrices favors the ingress and thus the attack of chloride ions. Zhang *et al.* (2010b) investigated the use of geopolymers as coating materials for the

anticorrosion protection of reinforce concrete. The results shows that geopolymer had low permeability and excellent anticorrosion.



**Figure 9** Effect of FPRL content on steel weight loss, rough surface.



**Figure 10** Effect of FPRL content on steel weight loss, smooth surface.

When comparing 1 and 2 coating layers, double layers protected steel well against weight loss, because the geopolymer had a dense compact microstructure that protected against seawater penetration and chloride exposure. SEM images were taken for morphological and elemental analysis of the interfacial transition zone. The smooth surfaces resulted in less steel weight loss

than the rough surfaces, because the smooth texture of concrete was associated with a dense and compact homogeneous matrix, i.e. low permeability in the concrete. For cases with rough surfaces, double layers of coating clearly provided better protection than a single layer.

The samples were coated with geopolymer pastes containing metakaolin

as a partial replacement for field Para rubber latex with single or double layers, showing a slight increase in splitting tensile strength. It was shown that the coating of metakaolin-based geopolymer paste had no effect on the splitting tensile strength of the concrete substrate. However, in this study of corrosion with immerse samples in seawater, it is clear that the steel corrosion resistance is improving. Especially, the samples were coated geopolymer paste containing FPRL ranging from 1 to 5%. Zhang *et al.* (2012) reported that geopolymer coating materials have been proposed for protecting concrete structures exposed to marine environment. The systematical experiments from laboratory and field applications have demonstrated that the coating possesses excellent anti corrosion properties.

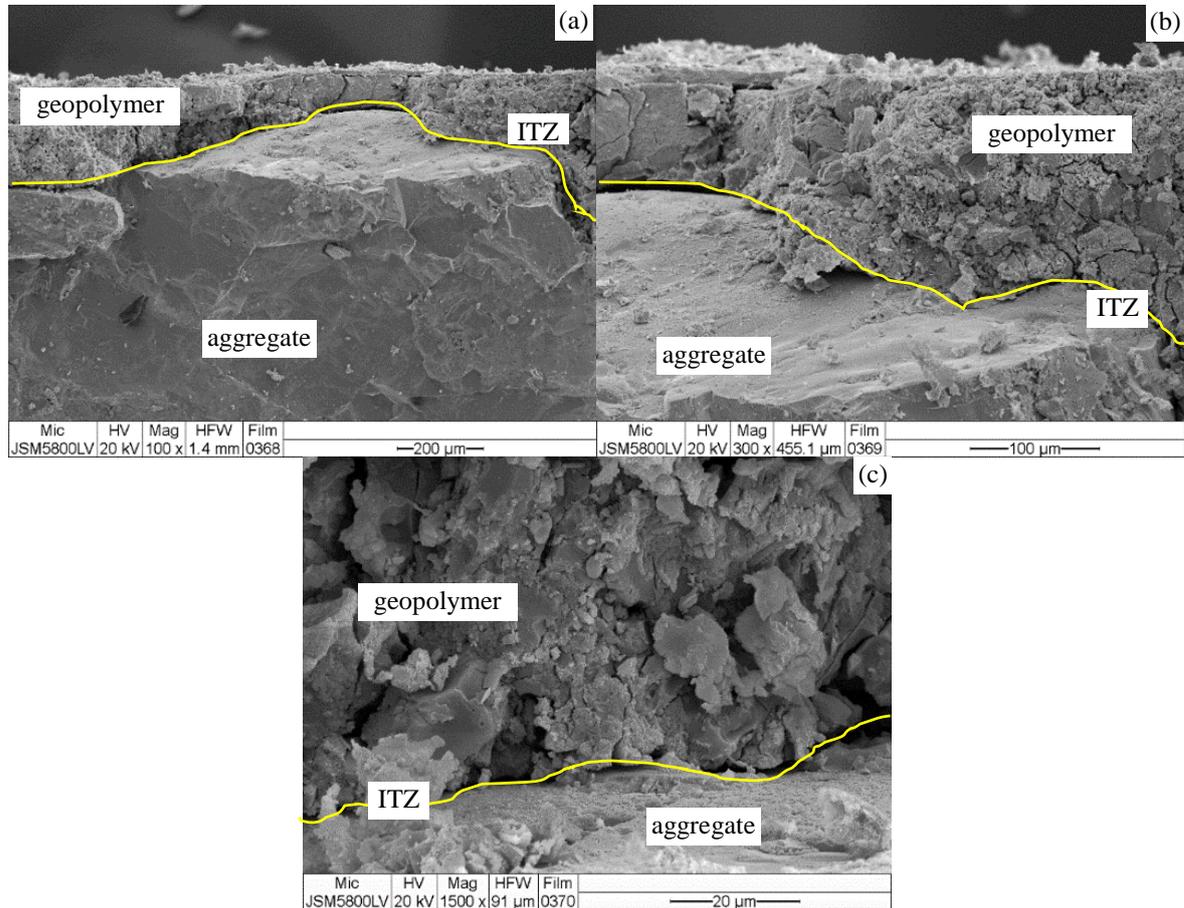
Yoon *et al.* (2018) presented that fly ash and blast furnace slag were used as binder materials, and sodium hydroxide and sodium silicate were used as alkali activators. The results showed that the chloride penetration depth of alkali-activated sample was much lower than that of the OPC sample. The presence of alkali activated was effective in improving the chloride penetration resistance. Hence, the samples coating with geopolymer paste can protect against corrosion in the steel bars. The chloride binding capacity of geopolymer samples under standard curing is better than that of OPC sample under the same conditions. It was reported that the high alumina content promoted the chloride binding capacity (Tong *et al.*, 2021). Moreover, Ross *et al.* (2022) reported that geopolymer with fly ash, when tested, was found to have low permeability compared to portland cement paste and slurries. The chloride diffusion coefficient of alkali activator materials was generally lower than that of ordinary Portland cement due to the increased tortuosity, lower total porosity and water absorption properties, which could be also affected by precursor chemistry (Tahri *et al.*, 2021).

#### 4. Morphological and elemental analysis of interfacial transition zone

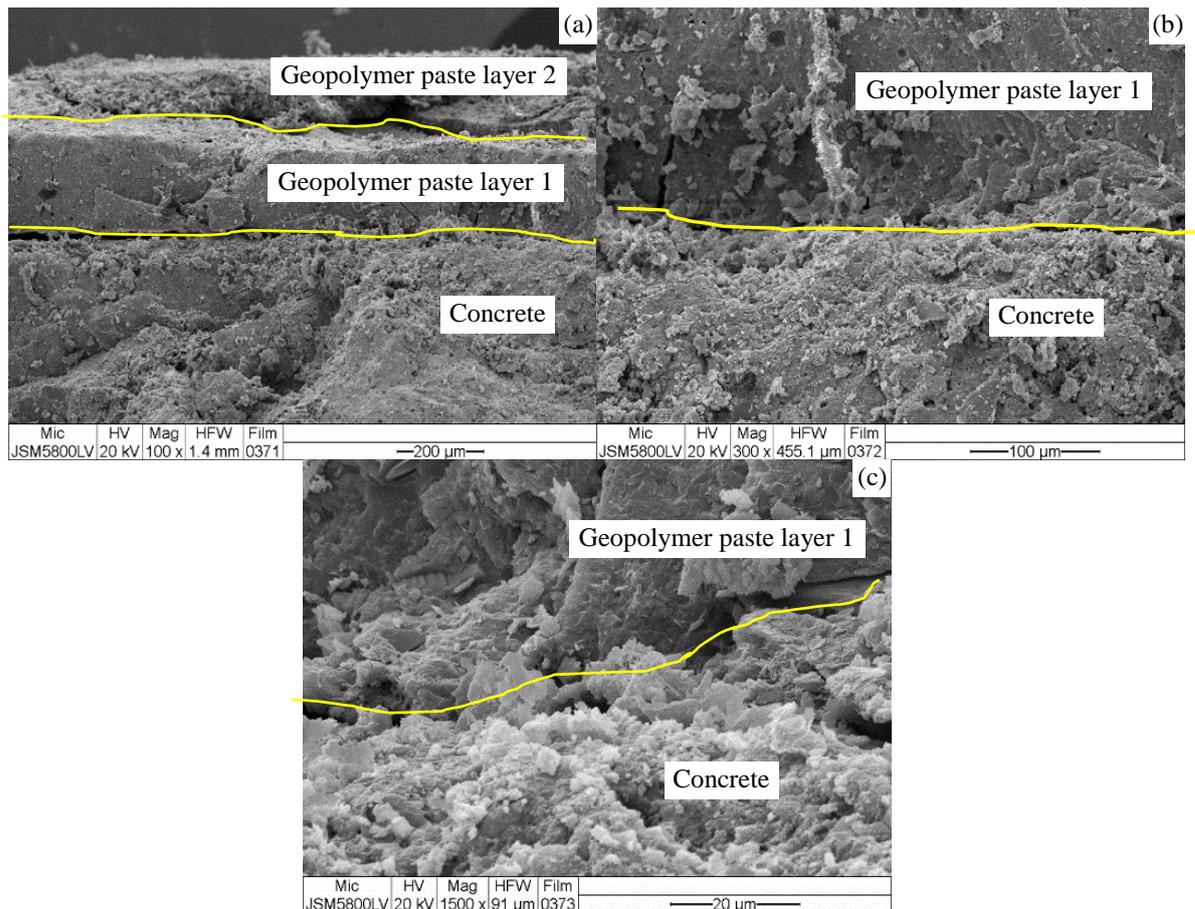
Microstructural characteristics of the interfacial transition zone (ITZ) between geopolymer paste and the concrete surface were assessed using scanning electron microscopy (SEM). SEM images were taken of cross sections of geopolymer coatings from low FPRL content to high FPRL content, and with 1 or 2 coating layers. Figures 11 and 12 show representative images of ITZ and geopolymerization product morphology. In Figure 11, geopolymer coating with 5% FPRL and 1 coating layer had small lacunae in the ITZ between the geopolymer binder paste and the concrete surface. The binder had small pores in the cross section. It was observed that the samples were not connected in a matrix concrete surface and geopolymer paste. This is because the samples with 1 coating layer of viscous geopolymer were cured at ambient temperature for 24 hours, and the short curing time cannot produce geopolymerization products on the concrete surface, resulting in the lack of connection in the matrix structures. Figures 11(b) and 11(c) clearly show unreacted raw materials. On the other hand, the samples with 2 coating layers show geopolymerization products at the interfacial transition zone between the concrete surface and geopolymer paste. The SEM imaging shows a homogenous microstructure and continuous matrix with concrete surface and geopolymer paste in the microstructure (see Figure 12(c)). The MK particles were combined through cementitious reactions that provided a dense compact microstructure, offering good protection against chloride in seawater (see Figure 9 and 10). The reaction extent in geopolymer binder paste was higher in samples with 2 coating layers, because after first coating, they were cured for 7 days at ambient temperature. Samples with 1 coating layer only were cured for 24 hours. However, it was observed that the geopolymer binder paste containing 10% FPRL couldn't protect against weight loss of steel. This is because high FPRL in the geopolymer

causes high porosity. In a study on geopolymer with fly ash partial replacement by field Para rubber latex, Hawa *et al.* (2017) showed that geopolymer with a high FPRL content had large pores in the matrix. The large pores in the geopolymer matrix allow

seawater to penetration the concrete. Moreover, Hawa and Prachasaree (2020) reported that fly ash-based geopolymer partial replacement of FPRL at 1% and 3% had few pores in the matrix.



**Figure 11** SEM images of geopolymer coatings with 5% FPRL single layer (a) 100x, (b) 300x, and (c) 1,500x



**Figure 12** SEM images of geopolymer coatings with 5% FPRL double layers (a) 100x, (b) 300x, and (c) 1,500x

## CONCLUSION

The use of geopolymer coatings with added field Para rubber latex was proposed for protecting reinforced concrete against corrosion from exposure to seawater with chloride ions. Based on the results presented in this study, the following conclusion can be stated:

1. The results indicate that the splitting tensile strength of concrete samples with geopolymer coating was higher than of concrete samples without coating.

2. The metakaolin-based geopolymer binder paste containing 1-5% field Para rubber latex gave slightly higher splitting tensile strength than the other cases tested.

3. The corrosion protection against steel weight loss by coatings with 1-5% field Para rubber latex in geopolymer was superior to that of the other cases.

4. The concrete specimens with 2 geopolymer coatings protected steel better than a single coating layer. This is partly due to each coating acting as a barrier, and partly due to the different curing required with two coatings compared to one coating.

5. Evaluation of accelerated corrosion tests suggests that geopolymer binder pastes can be used as protective coatings for concrete substrates exposed to seawater (chloride ions). Among the coatings evaluated, metakaolin powder combined with 1 to 5% field Para rubber latex exhibited the best performance. The accelerated testing for up to 14 days involved switching the 12 V potential on/off every 8 hours under seawater.

## ACKNOWLEDGEMENT

The authors gratefully acknowledge the financial support from the National

Research Council of Thailand, as well as the use of facilities of the Department of Civil Engineering, Princess of Naradhiwas University, Amphur Muang, Narathiwat, Thailand. Dr. Seppo Karrila, from the Faculty of Science and Industrial Technology, Prince of Songkla University, is also acknowledged for comments and suggestions, as is the copyediting service of the Research and Development Office of PSU.

## REFERENCES

- Aguirre-Guerrero, A.M., Robayo-Salazar, R.A. and de Gutiérrez, R.M. 2017. A Novel Geopolymer Application: Coatings to Protect Reinforced Concrete Against Corrosion. **Applied Clay Science** 135: 437-446.
- ASTM C33/C33M. 2013. **Standard Specification for Concrete Aggregates**. ASTM International: West Conshohocken, PA.
- ASTM C496/C496M. 2017. **Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens**. ASTM International: West Conshohocken, PA.
- ASTM C618. 2019. **Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete**. ASTM International: West Conshohocken, PA.
- Blackley, D.C. 1997. **Polymer Latices, Science and Technology, Type of Latices Chapter 9 Natural Latices**. Chapman & Hall.
- Brenna, A., Bolzani, F., Beretta, S. and Ormellese, M. 2013. Long-term Chloride-induced Corrosion Monitoring of Reinforced Concrete Coated with Commercial Polymer-modified Mortar and Polymeric Coating. **Construction and Building Materials** 48: 734-744.
- Christodoulou, C., Goodier, C.I. Austin, S.A., Webb, J. and Glass, G.K. 2013. Long-term Performance of Surface Impregnation of Reinforced Concrete Structures with Silane. **Construction and Building Materials** 48: 708-716.
- Chindaprasirt, P. and Rattanasak, U. 2016. Improvement of Durability of Cement Pipe with High Calcium Fly Ash Geopolymer Covering. **Construction and Building Materials** 112: 956-961.
- Hawa, A., Salaemae, P., Prachasree, P. and Tonnayopas, D. 2017. Compressive Strength and Microstructural Characteristics of Fly Ash based Geopolymer with High Volume Field Para Rubber Latex. **Romanian Journal of Materials** 47(4): 462-469.
- Hawa, A. and Prachasree, W. 2020. The Development of Compressive Strength, Drying Shrinkage and Microstructure of Fly Ash Geopolymer with Field Para Rubber Latex,” **Romanian Journal of Materials** 50(1): 59-68.
- Jacek, K., Timothy, A.A., Marios, N.S., John A.M. and David, J.C. 2018. Sulfate and Acid Resistance of Lithomarge-based Geopolymer Mortars. **Construction and Building Materials** 166: 537-553.
- Jhutan, C.K., Prabir, K.S. and Faiz, U.A.S. 2021. Sulphuric Acid Resistance of Ground Ferronickel Slag Blended Fly Ash Geopolymer Mortar. **Construction and Building Materials** 313: 125505.
- Kaesaman, A., Nakason, C., Rungvichaniwit, A., Srisuwun, S. and Umae, N. 2014. **From “Latex” to “Rubber Product**. 2<sup>nd</sup> ed. Research and Development Office, Prince of Songkla University, Hat Yai.
- Knowledge Management. 2017. **Knowledge of Latex and Component in Latex**. Rubber Authority of Thailand. Available Source: <https://km.raot.co.th/km-knowledge/detail/259>, 22 March, 2022.
- Marilene, G.S.R., Marilia, G.S.R., Patrick, F.K., Mauro, R.S., Waltraud, M.K. and Ruy, A.S.R. 2021. Acid Resistance of Metakaolin-based, Bamboo Fiber Geopolymer Composites. **Construction and Building Materials** 302: 124194.
- Mostafa, V., Ali, A., Peng, D., Nabil, B. and Mostafa, M. 2020. Resistance of Red Clay Brick Waste/Phosphorus

- Slag-based Geopolymer Mortar to Acid Solutions of Mild Concentration. **Journal of Building Engineering** 34: 102066.
- Nastiti, S.F. and Ekaputri, J.J. 2020. Effect of Chloride Ions on Concrete with Geopolymer Coatings in Coastal Area. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science** 506(1): 012043.
- Ross, J.H., Geneby, M., Juenger, M.C.G. and Oort, E.V. 2022. Permeability Recovery by Self-healing of Class F Fly Ash-based Geopolymer. **CEMENT** 10: 100048.
- Rubber Economic Research and Development Division. 2020. **Situation of Para rubber in 2020 and Trend in 2021**. Available Source: [http://www.raot.co.th/ewt\\_dl\\_link.php?nid=6750](http://www.raot.co.th/ewt_dl_link.php?nid=6750), 22 March, 2022.
- Shahedan, N.F., Abdullah, M.M.A.B., Hussin, K., Sandu, I., Ghazali, C.M.R., Binhussain, M., Yahya, Z.A. and Sandu, V. 2014. Characterization and Design of Alkali Activated Binder for Coating Application. **Materiale Plastice** 51(3): 258-262.
- Tahri, W., Hu, X., Shi, C. and Zhang, Z. 2021. Review on Corrosion of Steel Reinforcement in Alkali-Activated Concretes in Chloride-containing Environments. **Construction and Building Materials** 293: 123484.
- Tittarelli, F., Mobili, A., Giosue, C., Belli, A. and Bellezze, T. 2018. Corrosion Behaviour of Bare and Galvanized Steel in Geopolymer and Ordinary Portland Cement based Mortars with the Same Strength Class Exposed to Chlorides. **Corrosion Science** 134: 64-77.
- Tong, L., Zhao, J. and Cheng, Z. 2021. Corrosion Resistance of Geopolymer Materials Prepared with Seawater and Coral Sand. **Construction and Building Materials** 309: 125126.
- Wiyono, D., Antoni, A. and Hardjito, D. 2015. Improving the Durability of Pozzolan Concrete using Alkaline Solution and Geopolymer Coating. **Procedia Engineering** 125: 747-753.
- Yoon, H.N., Park, S.M. and Lee, H.K. 2018. Effect of MgO on Chloride Penetration Resistance of Alkali-Activated Binder. **Construction and Building Materials** 178: 584-592.
- Zhang, Z., Yao, X. and Zhu, H. 2010a. Potential Application of Geopolymers as Protection Coatings for Marine Concrete: I. Basic Properties. **Applied Clay Science** 49(1-2): 1-6.
- Zhang, Z., Tao, X. and Zhu, H. 2010b. Potential Application of Geopolymers as Protection Coatings for Marine Concrete: II. Microstructure and Anticorrosion Mechanism. **Applied Clay Science** 49(1-2): 7-12.
- Zhang, Z., Yao, X. and Wang, H. 2012. Potential Application of Geopolymers as Protection Coatings for Marine Concrete III. Field Experiment. **Applied Clay Science** 67-68: 57-60.

# ผลกระทบของการจัดเรียงแนวเส้นใยที่มีต่อความแข็งแรง ของแผ่นเกราะกันกระสุนที่ผลิตจากใยแก้วผ้าทอ

## Effect of Fiber Alignments on the Strength of Bulletproof Armor Plates Produced from Fiberglass Fabrics

ปฐมภรณ์ ชัยกุล<sup>1\*</sup> อภิพัฒน์ ศกุนตนา<sup>1</sup> นนทวัฒน์ จันทร์เพ็ญ<sup>1</sup> และ ธีรวัฒน์ เหล่านภากุล<sup>2</sup>  
Patamaporn Chaikool<sup>1\*</sup>, Aphiphat Sakuntanak<sup>1</sup>, Nontawat Junpeng<sup>1</sup> and Teerawat Laonapakul<sup>2</sup>

Received: 16 October 2023, Revised: 9 June 2024, Accepted: 12 June 2024

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเชิงทดลองเกี่ยวกับผลกระทบของการจัดเรียงแนวเส้นใยต่อความแข็งแรงของแผ่นเกราะกันกระสุนที่ผลิตจากวัสดุคอมโพสิตที่ใช้ใยแก้วผ้าทอเป็นตัวเสริมแรงห่อหุ้มด้วยโพลีเอสเตอร์เรซิน การจัดเรียงแนวเส้นใยของแผ่นใยแก้วมีสองลักษณะคือ แบบวางเรียงซ้อนกันตามแนวเส้นใยทำมุม 0 องศา และแบบวางเรียงสลับแนวเส้นใยทำมุม 45 องศา จากการทดสอบความแข็งแรงของแผ่นเกราะเมื่อถูกแรงดึงและแรงกระแทกกระทำ พบว่า แผ่นเกราะที่วางเรียงเส้นใยแบบสลับแนวทำมุม 45 องศา มีความต้านทานต่อแรงดึงน้อยกว่าแผ่นเกราะที่วางเรียงเส้นใยแบบตามแนวทำมุม 0 องศา แต่สามารถต้านทานแรงกระแทกได้มากกว่า นอกจากนี้ยังได้ทำการทดสอบแผ่นเกราะกับกระสุนปืนจริงขนาด .357 Magnum ระยะยิง 5 เมตร ตามมาตรฐาน NIJ (National Institute of Justice) Standard-0101.06 สำหรับเสื้อเกราะระดับ 2 และทำการทดสอบแรงปะทะที่เกิดขึ้นด้านหลังแผ่นเกราะที่เกิดจากการถูกยิง (Back Face Signature: BFS) จากการทดสอบพบว่า แผ่นเกราะที่ใช้ใยแก้วผ้าทอ 30 ชั้น ทั้งแบบวางเรียงเส้นใยตามแนวทำมุม 0 องศา และแบบวางเรียงเส้นใยสลับแนวทำมุม 45 องศา สามารถหยุดหัวกระสุนไม่ให้ทะลุผ่านได้ โดยสามารถวัดค่าเฉลี่ยการยุบตัวของดินที่เป็นวัสดุหนุนรองด้านหลังแผ่นเกราะได้เท่ากับ 8 มิลลิเมตร และ 6.33 มิลลิเมตร ตามลำดับ ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน

คำสำคัญ: เสื้อเกราะกันกระสุน, แผ่นเกราะ, มาตรฐานเอ็นไอเจ, ใยแก้วผ้าทอ

<sup>1</sup> สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40000

<sup>1</sup> Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Isan, Khon Kaen Campus, Muang, Khon Kaen 40000, Thailand.

<sup>2</sup> สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40000

<sup>2</sup> Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Muang, Khon Kaen 40000, Thailand.

\* ผู้รับผิดชอบประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): patamaporn.ch@rmuti.ac.th

## ABSTRACT

This research aims to experimentally investigate the impact of fiber orientation on the strength of bulletproof armor made from composite materials, using fiberglass fabrics as reinforcement encased in polyester resin. The fiber orientation of the woven fiberglass sheets was arranged in two configurations: aligned at 0 degrees and alternately arranged at 45 degrees. Tensile and impact tests revealed that armor with fibers arranged at 45 degrees exhibited lower tensile strength but higher impact resistance compared to armor with fibers aligned at 0 degrees. Additionally, the armor plates were tested against .357 Magnum bullets fired from a distance of 5 meters, following the NIJ (National Institute of Justice) Standard-0101.06 for Level II body armor. The Back Face Signature (BFS) was also measured to assess the impact force on the back of the armor upon bullet impact. The results showed that the armor made from 30 layers of woven fiberglass sheets, both aligned at 0 degrees and alternately arranged at 45 degrees, successfully stopped the bullets without penetration. The average deformation depth of the backing material behind the armor was 8 mm and 6.33 mm, respectively, which is within the standard limits.

**Key words:** bulletproof vest, armor plate, NIJ Standard, fiberglass fabric

### บทนำ

เสื้อเกราะกันกระสุนเป็นอุปกรณ์ป้องกันภัยส่วนบุคคลที่ใช้สำหรับป้องกันอันตรายที่เกิดจากกระสุนปืน ซึ่งมีความจำเป็นอย่างมากสำหรับเจ้าหน้าที่ทหารและตำรวจที่ปฏิบัติงานป้องกันและปราบปรามอาชญากรรม เสื้อเกราะกันกระสุนที่นิยมใช้โดยมากมักผลิตจากวัสดุคอมโพสิตที่ใช้ใยแก้วเป็นวัสดุเสริมแรง เนื่องจากมีน้ำหนักเบา มีความเหนียว และสามารถดูดซับแรงกระแทกได้ดี

มีงานวิจัยหลายชิ้นที่ศึกษาเกี่ยวกับวัสดุที่นำมาใช้สำหรับทำเป็นเสื้อเกราะกันกระสุน ทั้งที่ผลิตจากวัสดุคอมโพสิตที่เป็นโลหะ เซรามิกส์ โพลีเมอร์ เส้นใยสังเคราะห์ รวมถึงวัสดุจากธรรมชาติอย่างรังไหม เก็ดปลา หรือยางพารา รวมทั้งศึกษาตัวแปรต่างๆ ที่ส่งผลต่อความสามารถในการป้องกันกระสุนของแผ่นเกราะ ตัวอย่างเช่น Amatariyakul and Amatariyakul (2016) พัฒนาแผ่นเกราะกันกระสุนที่ผลิตจากสแตนเลสเกรด 304 และอลูมิเนียมเกรด

5083 ที่ผ่านกระบวนการอบชุบ สามารถป้องกันกระสุนปืนขนาด 9 มิลลิเมตร ที่ระยะยิง 5 เมตร และกระสุนปืน M16A1 ที่ระยะยิง 25 เมตร มีการยุบตัวของแผ่นเกราะ 5.56 มิลลิเมตร โดยเสื้อเกราะที่พัฒนาขึ้นมีน้ำหนัก 10.5 กิโลกรัม Jearanaasilawong and Phungsara (2020) ศึกษาผลของการเรียงตัวของแผ่นเกราะต่อประสิทธิภาพการกันกระสุน โดยใช้แผ่นเกราะที่ทำจากเหล็กกล้าประเภท Armox500T และทดสอบยิงด้วยกระสุนตามมาตรฐาน National Institute of Justice (NIJ) ระดับ III ผลการศึกษาพบว่าแผ่นเกราะที่ทำจากเหล็กกล้าสองชั้นมีความสามารถในการลดพลังงานการกระแทกของกระสุนได้มากกว่าเหล็กกล้าชั้นเดียวที่ความหนาเท่ากัน Saicharoen *et al.* (2022) วิเคราะห์พารามิเตอร์ที่มีผลต่อความสามารถในการต้านทานการเจาะทะลุของกระสุนบนผิวเกราะด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ทดสอบการยิงกระสุนตามมาตรฐาน NIJ ระดับ III วัสดุที่ใช้ทำแผ่นเกราะมี 2 ชนิด คือ SKD11 และ

อะลูมิเนียม AL-7075T6 ผลจากการจำลองแสดงให้เห็นว่าความหนาของแผ่นเกราะกันกระสุนที่เพิ่มขึ้นและมุมในการยิงที่มากขึ้นส่งผลให้สามารถต้านทานการเจาะทะลุได้มากขึ้น Kangwantrakool (2010) ปรับปรุงสมบัติเชิงกลของวัสดุอะลูมินา-โครเมียม ด้วยอนุภาคเซอร์โคเนีย โดยสามารถเพิ่มคุณสมบัติทางกลด้านความทนต่อการดัดโค้งและค่าความเหนียวของชิ้นงานได้ ในขณะที่การลดความหนาของวัสดุส่งผลให้ความต้านทานการเจาะทะลุลดลง ทดสอบโดยใช้อาวุธปืน M16A1 กระสุนขนาด 5.56 x 45 มิลลิเมตร ความเร็วประมาณ 900 เมตรต่อวินาที ที่ระยะยิง 15 เมตร ตามมาตรฐาน NIJ ระดับ III Sungkapun (2013) ศึกษาและพัฒนาการผลิตแผ่นเกราะกันกระสุนจากวัสดุผสมเนื้ออะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยซิลิกอนคาร์ไบด์เซรามิกซ์ โดยกระบวนการหล่ออัดขึ้นรูปในสภาวะกึ่งของเหลว ทำให้แผ่นเกราะมีน้ำหนักลดลง ทดสอบการยิงโดยใช้กระสุนขนาด 7.62 x 51 มิลลิเมตร และผ่านการทดสอบตามมาตรฐาน NIJ ระดับ III นำไปประกอบเป็นเรือลาดตระเวนของกองทัพเรือไทย Xianglin *et al.* (2017) วิจัยเชิงทดลองเกี่ยวกับความต้านทานกระสุนของแผ่นลามิเนตโพลีเมอร์-อะลูมิเนียม โดยใช้แผ่นเกราะ 7 รูปแบบที่ผลิตจากโพลีคาร์บอเนต โพลีเมทิลเมทาคริเลต และอะลูมิเนียมอัลลอยด์ AA2024-T4 ที่ความหนาต่างกัน พบว่าความแตกต่างของวัสดุโพลีเมอร์มีผลต่อประสิทธิภาพของแผ่นลามิเนตแผ่นลามิเนตที่มีโพลีคาร์บอเนตอยู่ด้านหน้าสามารถรองรับแรงกระแทกได้ดีกว่ารูปแบบอื่น Zhu *et al.* (2024) นำเสนอเทคนิคการจับภาพเชิงดิจิทัลสามมิติเพื่อศึกษาการตอบสนองด้านหลังแผ่นเกราะกับร่างกาย ของแผ่นเกราะคอมโพสิตเซรามิกโพลีเอทิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงพิเศษ (ultra-high molecular weight polyethylene) ซึ่งถูกยิงด้วยกระสุนปืนไรเฟิลขนาด 7.62 มิลลิเมตร ทำให้ทราบ

ประสิทธิภาพในการต้านทานกระสุนปืนและการบาดเจ็บจากแรงปะทะบนร่างกายด้านหลังแผ่นเกราะ Pumkaew *et al.* (2011) ออกแบบเกราะกันกระสุนโดยใช้เซรามิกซ์ เส้นใย และโลหะ วางเรียงซ้อนกัน และศึกษาความหนาที่เหมาะสมของแผ่นเกราะแต่ละชั้น ทดสอบยิงตามมาตรฐาน NIJ ระดับ III สามารถป้องกันกระสุนปืน M16 และ AK-47 ได้ โดยมีน้ำหนักรวมของแผ่นเกราะคือ 7 กิโลกรัม Khojimet *et al.* (2010) พัฒนาและผลิตเกราะอ่อนที่สามารถป้องกันอันตรายจากสะเก็ดระเบิดสังหารบุคคลโดยใช้เส้นใยสังเคราะห์เรียงตัวกันจำนวน 17 ชั้น เป็นชนิด TWARON FABRIC T-750 จำนวน 5 ชั้น อยู่ด้านนอก และ UHMWPE จำนวน 12 ชั้น อยู่ด้านใน ทดลองยิงด้วยกระสุนขนาด 0.22 นิ้ว น้ำหนัก 40 เกรน ที่ความเร็วปะทะเฉลี่ย 330 เมตรต่อวินาที ระยะการยิง 5 เมตร Parsapratet *et al.* (2010) ศึกษาการผลิตเสื้อเกราะกันกระสุนจากผ้าใยประดิษฐ์เพื่อนำไปใช้ผลิตในเชิงพาณิชย์ โดยผลิตเป็นแผ่นเกราะจากผ้าทอผ้าถักแนวเส้นยืน ผ้าทอ 3 มิติ และแผ่นเกราะจากผ้าไม่ทอ ซึ่งทุกตัวอย่างผ่านการทดสอบการยิงตามมาตรฐาน NIJ ระดับ IIIa Sikarwar *et al.* (2014) ศึกษาผลกระทบของการวางเรียงแนวเส้นใยและความหนาของเส้นใยต่อความสามารถในการป้องกันกระสุนปืนและการดูดซับพลังงานของแผ่นเกราะที่ทำจากใยแก้วและอีพ็อกซีด้วยวิธีการอัดขึ้นรูป ทดสอบโดยใช้ปืนลมและกระสุนขนาด 9.5 มิลลิเมตร มวล 7.5 กรัม พบว่าการเรียงแนวเส้นใยแบบ 0/90 มีความต้านทานต่อแรงกระแทกมากที่สุด โดยความสามารถในการป้องกันและดูดซับพลังงานจะขึ้นอยู่กับค่ามอดูลัสของยังและความเครียดของชิ้นงาน Wang *et al.* (2023) นำเสนอวิธีการปรับปรุงผ้าเส้นใยอะรามิดด้วยโพลีเอทิลีน (LDPE) และกราฟีน/โพลีเอทิลีน (GR/LDPE) ทำให้สามารถต้านทานกระสุนปืนที่มีความเร็วเพิ่มขึ้น 2 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับผ้า

เส้นใยอะรามิดแบบเดิม การปรับปรุงนี้ไม่ได้เปลี่ยนแปลงความต้านทานแรงดึงและโมดูลัสของยังมากนัก แต่ช่วยเพิ่มแรงเสียดทานระหว่างเส้นด้ายของผ้าอย่างมาก จึงทำให้สามารถต้านทานกระสุนปืนที่มีความเร็วเพิ่มขึ้นและผลิตสะเก็ดที่มีน้ำหนักเบาลง อย่างไรก็ตาม แรงเสียดทานระหว่างเส้นด้ายที่มากเกินไปอาจนำไปสู่ความเสียหายที่เร็วกว่าปกติ Prakash *et al.* (2023) ศึกษาการตอบสนองของแบบจำลองเกราะคอมโพสิตต่อกระสุนความเร็วสูงโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้แผ่นเกราะที่ทำจากโบรอนคาร์ไบด์และเคฟลาร์อีพ็อกซีที่ถูกยึดเข้าด้วยกัน เพื่อพัฒนาแผ่นเกราะที่มีน้ำหนักเบาและสามารถต้านทานกระสุนเจาะเกราะขนาด 7.62 AP ที่ความเร็ว 1500 เมตรต่อวินาที การศึกษาพบว่าแบบจำลองคอมโพสิตสามารถดูดซับพลังงานและทนต่อแรงกระแทกสูงมากได้ Bangkokbiznews (2020) นำเสนอข่าวนักวิจัยจากมหาวิทยาลัยขอนแก่นได้พัฒนาแผ่นเกราะที่สามารถรับแรงของกระสุนปืน M16 ขนาด 5.56 มิลลิเมตร โดยผลิตจากรังไหมที่มีความยืดหยุ่น น้ำหนักเบา ต้านทานแรงกระแทกได้ดีและเพิ่มวัสดุที่สามารถรับและกระจายแรงเข้าไป พร้อมทั้งพัฒนาน้ำยาชนิดพิเศษเพื่อให้วัสดุต่าง ๆ ยึดเกาะกันมีประสิทธิภาพมากขึ้น สามารถหยุดกระสุนไม่ให้แล่นไปโดนอวัยวะอื่น หรือผู้อื่นที่อยู่ข้างเคียง โดยมี 2 รุ่น ได้แก่ รุ่นน้ำหนักประมาณ 2 กิโลกรัม และรุ่นน้ำหนักประมาณ 1.6 กิโลกรัม Chokchalerm and Sriseubsai (2017) พัฒนาวัสดุเชิงประกอบโพลีเอสเตอร์เรซิน โดยใช้เกลือปลาเป็นวัสดุเสริมแรงสำหรับเสื้อเกราะกันกระสุนตามมาตรฐาน NIJ ระดับ I ผลการศึกษาพบว่าโพลีเอสเตอร์เรซินกับจำนวนชั้นของเกลือปลาที่มีความสัมพันธ์กับความทนทานต่อแรงกระแทก โดยการเสริมแรงด้วยเกลือปลา 2 ชั้น สามารถรับแรงกระแทกได้ดีที่สุด โดยมีความหนารวมของแผ่นเกราะคือ 10 มิลลิเมตร

Jongpairajcosit *et al.* (2020) ศึกษาผลกระทบเชิงพฤติกรรมการป้องกันกระสุนโดยแผ่นยางพาราและยางพาราเสริมเส้นใยเคฟลาร์ ในลักษณะโครงสร้างวัสดุผสมแบบแซนด์วิช (Sandwich Composite Structure) ด้วยการจำลองการวิเคราะห์ยางและวิเคราะห์เปรียบเทียบกับผลการทดสอบด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ผลการยิงกระสุน M193 ใส่ยางหนา 30 มิลลิเมตร แสดงให้เห็นว่ากระสุนทะลุผ่านยางไปได้โดยง่ายและก่อความเสียหายต่ออย่างมาก ในขณะที่ยางที่มีเคฟลาร์แทรกระหว่างกลาง กระสุนสามารถทะลุชิ้นงานได้โดยยางและเคฟลาร์เกิดการแยกชั้นกันอย่างชัดเจน

งานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นล้วนแล้วแต่มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาคุณสมบัติของเสื้อเกราะให้มีความสามารถในการต้านทานหัวกระสุนปืนลักษณะต่าง ๆ ลดความอันตรายต่อผู้สวมใส่ ลดภาระค่าน้ำหนัก รวมทั้งลดราคาค่าใช้จ่ายในการผลิต อย่างไรก็ตาม เสื้อเกราะที่ได้มาตรฐานยังมีราคาสูงเกินไปสำหรับเจ้าหน้าที่ตำรวจที่ปฏิบัติงานในเขตเมือง เนื่องจากมีการใช้วัสดุชนิดพิเศษและมีขั้นตอนการผลิตที่ซับซ้อน เจ้าหน้าที่ตำรวจส่วนมากในปัจจุบันจึงมักนิยมซื้อแผ่นเกราะที่ผลิตจากสแตนเลสแผ่นมาใช้งานแทน ถึงแม้แผ่นเกราะที่ผลิตจากสแตนเลสจะมีราคาถูกแต่ก็มีความเสี่ยงที่จะได้รับอันตรายหากถูกยิง เนื่องจากหัวกระสุนที่ยิงมาจะไม่ฝังลงบนแผ่นเกราะแต่อาจจะแล่นไปโดนอวัยวะส่วนอื่นของร่างกายหรือผู้ปฏิบัติงานที่อยู่ใกล้เคียงจนทำให้ได้รับบาดเจ็บ รวมไปถึงอันตรายที่เกิดจากการยุบตัวของแผ่นเกราะจนไปโดนอวัยวะสำคัญในร่างกายทำให้เกิดอาการฟกช้ำตามร่างกายของผู้สวมใส่ได้

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการผลิตวัสดุที่นำมาใช้เป็นแผ่นเกราะกันกระสุนที่มีราคาถูก ขั้นตอนการผลิตไม่ซับซ้อน สามารถป้องกันอันตรายจากปืนพกสั้นได้ เพื่อให้เจ้าหน้าที่ตำรวจที่ปฏิบัติงาน

ในเขตเมืองมีความปลอดภัยมากยิ่งขึ้น โดยมุ่งเน้น  
ศึกษาการใช้ใยแก้วฟ้ายทอเป็นวัสดุเสริมแรง และ  
ศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของการจัดเรียงเส้นใยแก้วที่  
มีต่อความแข็งแรงและความสามารถในการดูดซับ  
แรงกระแทกบนแผ่นเกราะกันกระสุน

## วิธีดำเนินการวิจัย

### 1. การเตรียมแผ่นเกราะกันกระสุน

แผ่นเกราะกันกระสุนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ผลิต  
จากวัสดุคอมโพสิตที่ใช้ใยแก้วฟ้ายทอ หรือใยฟ้ายสาน

เบอร์ 400 Class-E เป็นตัวเสริมแรง ซึ่งหาซื้อได้ง่าย  
และนิยมใช้ในงานหล่อไฟเบอร์กลาสและงาน  
ก่อสร้าง มีลักษณะคล้ายงานจักรสาน โดยเส้นใยจะ  
ทำมุมต่อกัน 90 องศา ทำให้มีเส้นแนวการรับแรงได้  
2 ทิศทาง ดังแสดงใน Figure 1 ในการผลิตเป็นแผ่น  
เกราะ จะทำการวางแผ่นใยแก้วซ้อนกัน โดยจัดเรียง  
แนวเส้นใยให้มีความแตกต่างกัน 2 ลักษณะ คือ (1)  
ลักษณะการวางให้เส้นใยซ้อนไปในแนวทางเดียวกัน  
และ (2) ลักษณะการวางให้เส้นใยซ้อนสลับแนวทำ  
มุมกัน 45 องศา ดังแสดงใน Figure 2



Figure 1 Fiberglass fabric

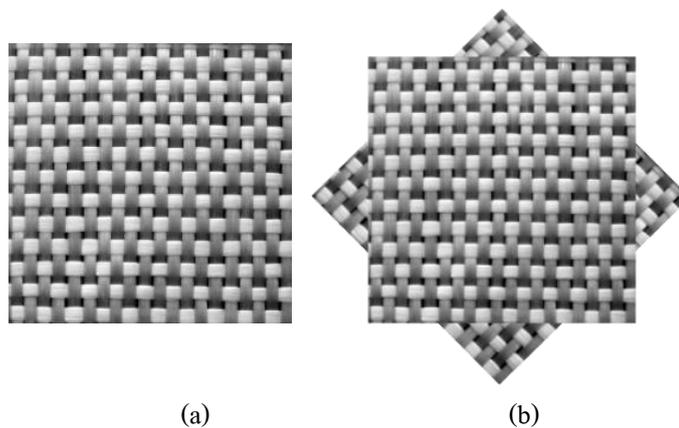


Figure 2 Fiberglass fabrics alignments (a) 0-degree (b) 45-degree

ส่วนเมทริกซ์ที่ใช้ห่อหุ้มใยแก้วเป็น โพลีเอสเตอร์เรซินสำหรับงานหล่อไฟเบอร์กลาส ของบริษัท 3M รุ่น 355e โดยหลังจากวางเรียงแผ่นใยแก้วแต่ละชั้นลงในแม่พิมพ์ จะใช้แปรงจุ่มน้ำยาเรซินที่ผสมตัวทำปฏิกิริยาแล้วทาลงบนแผ่นใยแก้วแต่ละ

แผ่นจนทั่ว แล้วใช้ลูกกลิ้งกดทับรีดให้ทั่วชั้นงานจนได้จำนวนชั้นตามที่ต้องการ แล้วจึงปล่อยให้แห้งและนำชิ้นงานที่ได้ไปทำการทดสอบต่อไป Table 1 แสดงสมบัติเชิงกลของเส้นใยแก้ว Class-E และโพลีเอสเตอร์เรซิน

**Table 1** Mechanical properties of class-E fiber glass and polyester resin (Bagherpour, 2012)

	E-Glass	Polyesters resin
Density (gr/cm <sup>3</sup> )	2.58	1.1 – 1.4
Tensile strength (at 23°C) (MPa)	3445	40 – 45
Modulus of elasticity (at 23°C) (GPa)	72.3	1.3 – 4.5
Elongation (%)	4.8	5

งานวิจัยนี้ใช้แผ่นเกราะที่มีจำนวนแผ่นใยแก้ววางเรียงซ้อนกัน ตั้งแต่ 25 ชั้น ไปจนถึง 40 ชั้น ทั้งแบบวางเส้นใยซ้อนไปในแนวทางเดียวกัน และแบบวางเส้นใยซ้อนสลับแนวทำมุมกัน 45 องศา ในการทดสอบเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกลของแผ่นเกราะ และทดสอบความสามารถในการป้องกัน

กระสุนปืนจริง โดยแผ่นเกราะขนาดความหนา 25 ชั้นจะใช้สำหรับการทดสอบคุณสมบัติทางกล และแผ่นเกราะที่มีความหนา 30 35 และ 40 ชั้น จะใช้สำหรับการทดสอบยิงด้วยกระสุนปืนจริง ดังแสดงใน Table 2

**Table 2** Test conditions

	No. of fiber glass sheets	Equipment	Standard
Tensile strength	25	Tensile strength test	ASTM D3039
Impact strength	25	Charpy impact test	ASTM D4812
Ballistic resistance	40	.357 magnum JHP bullet, .357 magnum AP bullet, 9 mm FMJ bullet	-
Damage of armor plate	35	.357 Magnum FMJ bullets	NIJ
Backface signature	30	.357 Magnum FMJ bullets	NIJ

## 2. การทดสอบคุณสมบัติทางกลของแผ่นเกราะ

แผ่นเกราะกันกระสุนที่หล่อขึ้นรูปแล้วทั้ง 2 แบบ คือ แบบวางเรียงเส้นใยตามแนว และแบบวางเรียงเส้นใยสลับแนวทำมุม 45 องศา ถูกนำมาตัดเป็น

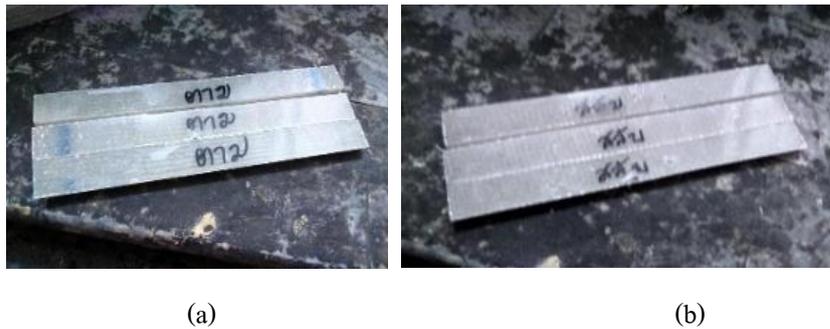
ชิ้นงานสำหรับทดสอบขนาดประมาณ 20 x 200 ตารางมิลลิเมตร จำนวน 3 ตัวอย่าง ต่อ 1 การทดสอบ ดังแสดงใน Figure 3 เพื่อทดสอบคุณสมบัติทางกลด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile Strength Test)

และเครื่องทดสอบแรงกระแทกแบบชาร์ปี (Charpy Impact Test)

การทดสอบความแข็งแรงของแผ่นเกราะเมื่อถูกแรงดึงมากระทำ ดำเนินการโดยอ้างอิงมาตรฐาน ASTM D3039 ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile Strength Test) แบบไฮดรอลิกส์ของบริษัท Dartec Ltd. รุ่น PC1653.1 น้ำหนักโหลดเซลล์สูงสุด 100 กิโลนิวตัน ดึงด้วยอัตราความเร็ว 10 มิลลิเมตรต่อนาที ส่วนการทดสอบความแข็งแรงของ

แผ่นเกราะเมื่อถูกแรงกระแทกมากระทำ ดำเนินการโดยอ้างอิงมาตรฐาน ASTM D4812 ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงกระแทกแบบชาร์ปี (Charpy impact Test) ของบริษัท Otto Wolpert-Werke GmbH รุ่น PW30/15K โดยจะทำการตีกระแทกชิ้นงานที่ทดสอบหนึ่งครั้งด้วยการเหวี่ยงให้หัก ค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกของชิ้นงานที่ทดสอบสามารถคำนวณได้ดังสมการ (1)

$$\text{Impact strength} = \frac{\text{Impact energy}}{\text{Cross section area}} \quad (1)$$



**Figure 3** Specimens for tensile and impact tests (a) 0-degree alignment and (b) 45-degree alignment

### 3. การทดสอบโดยการยิงด้วยกระสุนปืนจริง

NIJ Standard-0101.06 (National Institute of Justice, 2008) ได้แบ่งประเภท ของเสื้อเกราะกันกระสุน ตั้งแต่ Level I จนถึง Level IV ตามความสามารถในการป้องกันกระสุนปืนชนิดต่าง ๆ แต่เนื่องจากงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการพัฒนาแผ่นเกราะสำหรับเจ้าหน้าที่ตำรวจที่ปฏิบัติงานในเขตเมือง จึงเลือกใช้กระสุนปืนสำหรับปืนพกสั้นมาใช้ในการทดสอบ ซึ่งเทียบเท่ากับมาตรฐานเสื้อเกราะ Level II ตามมาตรฐาน NIJ

Table 3 แสดงน้ำหนัก ความเร็ว และพลังงานจลน์ของหัวกระสุนสำหรับปืนพกสั้นที่พบ

ได้มากในประเทศไทย จาก Table 3 กระสุนปืนขนาด .357 Magnum มีแรงปะทะเมื่อพุ่งเข้าชนกับแผ่นเกราะมากที่สุดเมื่อเทียบกับกระสุนปืนพกสั้นชนิดอื่น ๆ เนื่องจากหัวกระสุนมีความเร็วและมีน้ำหนักมาก ในงานวิจัยนี้ จึงเลือกใช้กระสุนปืนขนาด .357 Magnum เป็นกระสุนปืนหลักในการทดสอบแผ่นเกราะกันกระสุน นอกจากนี้ยังมีการใช้กระสุนปืนขนาด 9 มิลลิเมตร ในการทดสอบด้วยบางส่วน เนื่องจากเป็นกระสุนปืนสำหรับทดสอบเสื้อเกราะ Level II ตามมาตรฐาน NIJ ด้วยเช่นกัน แต่เป็นที่นิยมนมากกว่าขนาด .357 Magnum

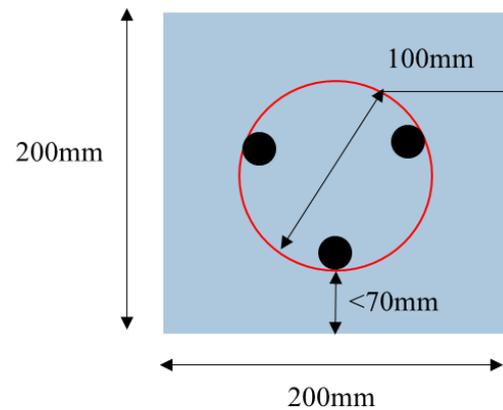
**Table 3** Comparative calculation of bullet kinetic energies commonly used in urban areas (National Institute of Justice, 2008)

Bullet Type	Mass [g]	Velocity [m/s] $\pm 9.1$ m/s	Kinetic Energy [J]
.38 Special	10.2	259	342.11
.45 ACP	14.9	302	679.47
9 mm. FMJ	8	398	633.62
.357 Magnum JSP	10.2	436	969.49

### 3.1 การตรวจสอบความเสียหายของแผ่นเกราะเมื่อถูกยิง

NIJ Standard-0101.06 กำหนดหลักเกณฑ์และตำแหน่งการยิงทดสอบเสื้อเกราะกันกระสุนสำหรับเสื้อเกราะ Level II ที่ระยะยิง 5 เมตร จำนวน 6 ตำแหน่ง โดยตำแหน่งที่ 1-3 เป็นการยิงบริเวณขอบของแผ่นเกราะ (shot-to-edge) กระสุนแต่ละนัดมีระยะห่างจากขอบไม่เกิน 70 มิลลิเมตร ส่วนตำแหน่งที่ 4-6 เป็นการยิงบริเวณกึ่งกลางแผ่นเกราะ (shot-to-shot) โดยกลุ่มของกระสุนทั้ง 3 นัด ต้องกระจายตัวอยู่ในวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 100 มิลลิเมตร

เนื่องจากแผ่นเกราะที่ใช้ในการทดสอบมีขนาด 200 x 200 ตารางมิลลิเมตร ซึ่งเล็กกว่าเสื้อเกราะกันกระสุนจริงตามที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน ผู้วิจัยจึงได้กำหนดวิธีการทดสอบขึ้นใหม่โดยให้ใกล้เคียงกับมาตรฐานมากที่สุด กล่าวคือ เป็นการยิงจากระยะ 5 เมตร จำนวน 3 นัด โดยทั้ง 3 นัด ต้องอยู่ในวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 100 มิลลิเมตร และต้องมีอย่างน้อย 1 นัด ที่ห่างจากขอบของแผ่นเกราะไม่เกิน 70 มิลลิเมตร เพื่อให้ครอบคลุมทั้งการทดสอบแบบ shot-to-edge และ shot-to-shot ดังแสดงใน Figure 4

**Figure 4** Impact locations

### 3.2 การตรวจสอบแรงปะทะด้านหลังแผ่นเกราะที่ถูกยิง

แม้ว่าหัวกระสุนจะไม่สามารถทะลุผ่านแผ่นเกราะได้ แต่แรงปะทะที่เกิดขึ้นด้านหลังแผ่นเกราะยังสามารถทำอันตรายต่อผู้สวมใส่เสื้อเกราะได้เช่นกัน เนื่องจากเมื่อถูกยิงด้วยกระสุนปืน เสื้อเกราะจะเกิดการยุบตัวจนกระแทกโดนอวัยวะสำคัญในร่างกายทำให้เกิดอาการฟกช้ำจากแรงปะทะของกระสุนปืน ซึ่งเรียกว่า บลันท์ทรอมา (Blunt Trauma)

การทดสอบหาแรงปะทะที่เกิดจากกระสุนปืนตาม NIJ Standard-0101.06 ทำได้โดยการวัดความลึกของหลุมที่เกิดบนดินเหนียวที่นำมาหุนรองด้านหลังของแผ่นเกราะ ซึ่งเรียกว่า แบ็คเฟซซิกเนเจอร์ (Backface signature: BFS) ซึ่งกำหนดไว้ว่า เสื้อเกราะที่ผ่านมาตรฐานจะต้องมีรอยยุบตัวของวัสดุหุนรอง

ด้านหลังแผ่นเกราะที่มีค่าความลึกไม่เกิน 44 มิลลิเมตร (National Institute of Justice, 2008)

ดินที่นำมาเป็นวัสดุหนุนรองด้านหลังของแผ่นเกราะในงานวิจัยนี้ เป็นดินสำหรับงานปืนซึ่งผ่านการทดสอบการยุบตัวด้วยการทิ้งลูกเหล็กทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 63.5 มิลลิเมตร  $\pm$  0.05 มิลลิเมตร น้ำหนัก 1043 กรัม  $\pm$  5 กรัม จากระยะความสูง 2 เมตร และมีค่าการยุบตัวของดินเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด คือ ไม่เกิน 19 มิลลิเมตร  $\pm$  2 มิลลิเมตร

Figure 5 แสดงลักษณะการติดตั้งแผ่นเกราะเข้ากับชุดทดสอบ โดยแผ่นเกราะที่ทำจากใยแก้วผ้าทอความหนา 30 ชั้น ทั้งแบบวางเรียงตามแนว และแบบวางเรียงสลับแนวทำมุม 45 องศา จะถูกนำไปวางและยึดไว้ด้านหลังของกล่องไม้ขนาด 250 x 250 x 100 ลูกบาศก์มิลลิเมตร ที่ด้านในบรรจุดินที่มีค่าการยุบตัวตามมาตรฐาน จากนั้นจึงยิงทดสอบด้วยกระสุนปืนขนาด .357 Magnum FMJ ในระยะ 5 เมตร

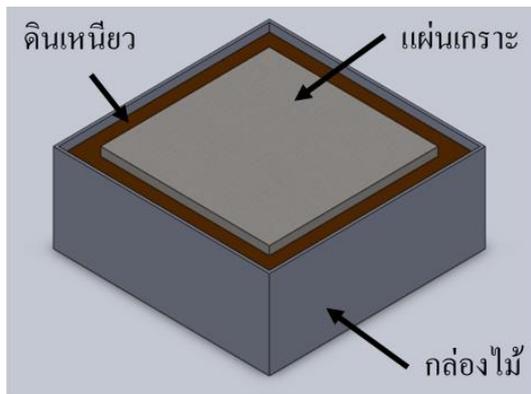


Figure 5 Installation model of armor plate and test box

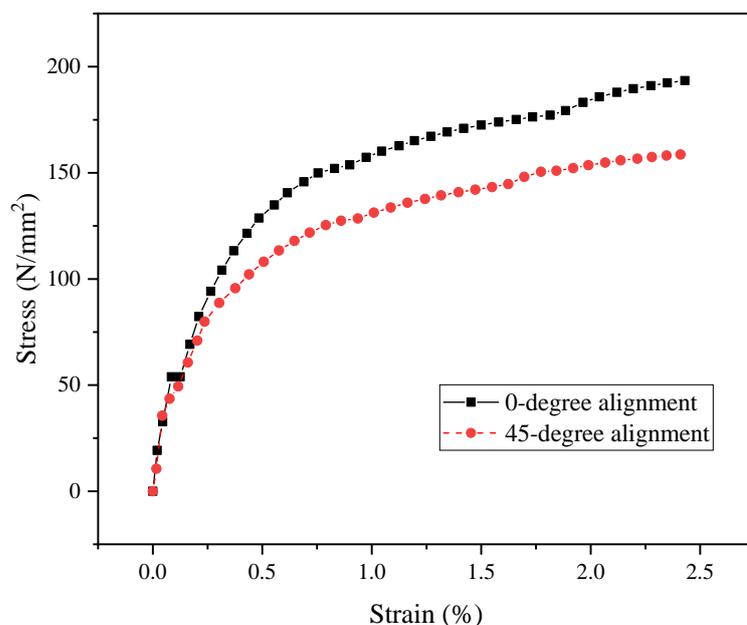
## ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

### 1. ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกลของแผ่นเกราะ

ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกลด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงและเครื่องทดสอบแรงกระแทกแบบชาร์ปี แสดงดัง Figure 6 และ Table 4

จากผลการทดสอบความแข็งแรงของชิ้นงานทดสอบเมื่อถูกแรงดึงมากระทำพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเฉลี่ยของตัวอย่างแต่ละแบบมีทิศทางไปในแนวทางเดียวกัน ดังแสดงใน Figure 6 และมีการกระจายตัวของข้อมูลค่อนข้างน้อย แสดงให้เห็นถึงความสม่ำเสมอของการเตรียมชิ้นงานในแต่ละรูปแบบ จาก Table 4 ค่าเฉลี่ยความเค้นสูงสุด (Average ultimate strength) ของชิ้นงานทดสอบแบบจัดเรียงเส้นใยตามแนวและสลับแนว มีค่า 197.42 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร และ 161.57 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร ตามลำดับ เนื่องจากชิ้นงานทดสอบแบบจัดเรียงเส้นใยตามแนวมีจำนวนเส้นใยที่รับแรงในทิศทางของแรงดึงที่มากกว่าชิ้นงานทดสอบแบบสลับแนว จึงมีความต้านทานต่อแรงดึงมากกว่า

จากผลการทดสอบความแข็งแรงของชิ้นงานทดสอบเมื่อถูกแรงกระแทกกระทำ ดังแสดงใน Table 4 พบว่าค่าต้านทานต่อแรงกระแทกเฉลี่ย (Average impact strength) ของชิ้นงานทดสอบแบบจัดเรียงเส้นใยตามแนวและสลับแนว มีค่า 0.807 จูลต่อตารางมิลลิเมตร และ 0.894 จูลต่อตารางมิลลิเมตร ตามลำดับ เนื่องจากชิ้นงานทดสอบแบบจัดเรียงเส้นใยสลับแนวมีการจัดวางแผ่นใยแก้วผ้าทอแต่ละแผ่นทำมุมต่อกัน 45 องศา ทำให้เส้นใยมีการเรียงตัวในทิศทางที่หลากหลาย จึงสามารถกระจายแรงและต้านทานแรงกระแทกได้ดีกว่า



**Figure 6** Relationship between average stress and strain

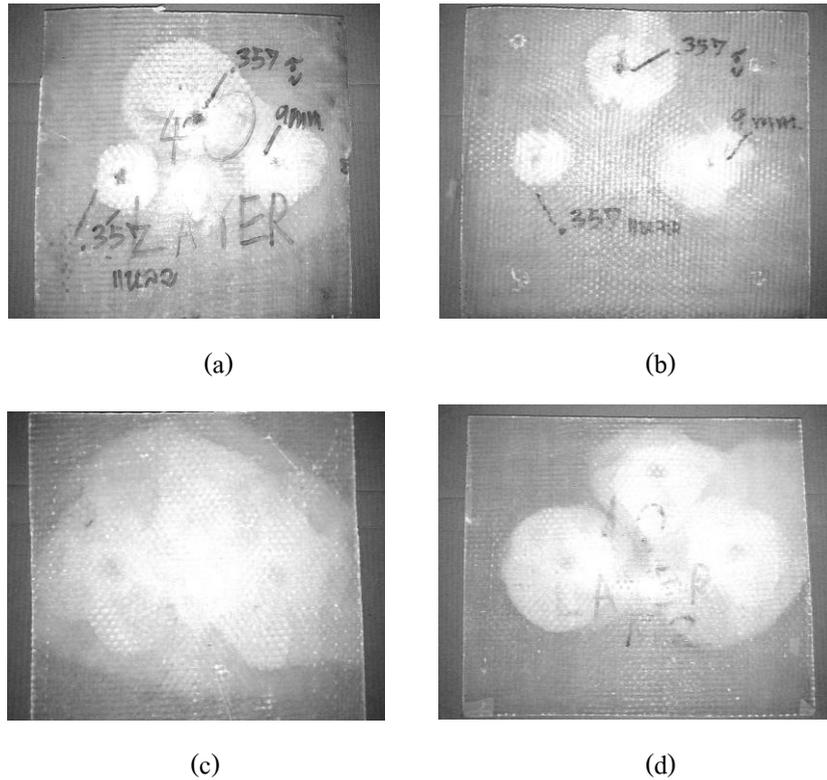
**Table 4** Results of tensile and impact tests

		Density [g/mm <sup>3</sup> ]	Yield Strength [N/mm <sup>2</sup> ]	Ultimate Strength [N/mm <sup>2</sup> ]	Impact Strength [J/mm <sup>2</sup> ]
0-degree alignment	Average	1.60 x 10 <sup>-3</sup>	53.93	197.42	0.807
	S.D.	11.55	10.89	3.07	0.005
45-degree alignment	Average	1.53 x 10 <sup>-3</sup>	49.39	161.57	0.895
	S.D.	10.83	3.74	5.26	0.001

## 2. ความเสียหายของแผ่นเกราะเมื่อถูกยิง

Figure 7 แสดงลักษณะของแผ่นเกราะที่ผลิตจากใยแก้วผ้าทอวางเรียงซ้อนกันจำนวน 40 ชั้น ทั้งแบบจัดเรียงเส้นใยตามแนว และแบบจัดเรียงเส้นใยสลับแนวทำมุม 45 องศา เมื่อถูกยิงด้วยกระสุนปืน 3 ชนิด คือ (1) กระสุนปืนขนาด .357 Magnum JHP

(กระสุนหัวรู) (2) กระสุนปืนขนาด .357 Magnum AP (กระสุนหัวแหลมหรือหัวเจาะเกราะ) และ (3) กระสุนปืนขนาด 9 มิลลิเมตร FMJ (กระสุนหัวบอล) เพื่อเป็นการทดสอบความสามารถเบื้องต้นในการหยุดยิงหัวกระสุน และสังเกตลักษณะความเสียหายของแผ่นเกราะเมื่อได้รับแรงปะทะจากกระสุนปืน

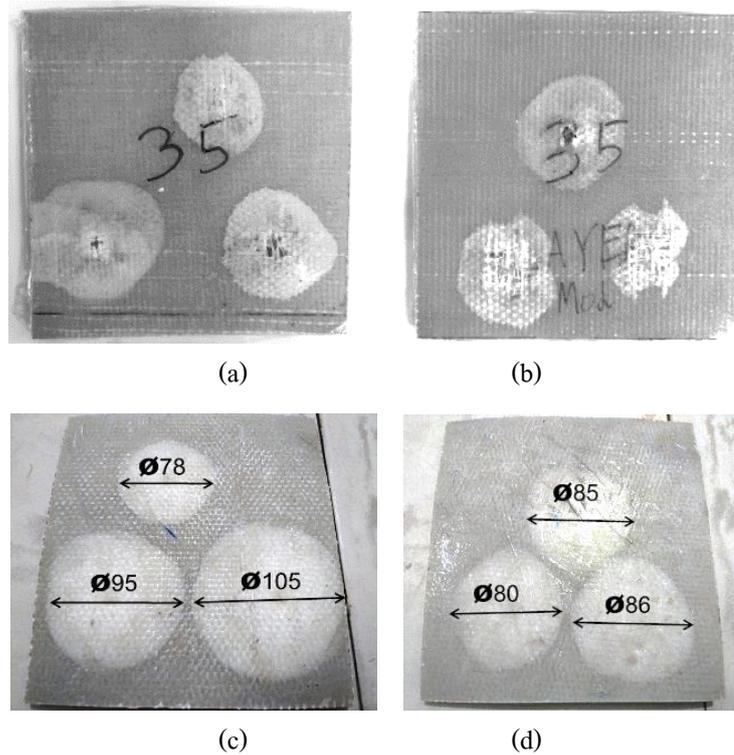


**Figure 7** Characteristics of 40-layers armor plates after hit by various types of bullets (a) 0-degree alignment (front) (b) 45-degree alignment (front) (c) 0-degree alignment (back) (d) 45-degree alignment (back)

จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าแผ่นเกราะที่ผลิตจากใยแก้วผ้าทอทั้ง 2 แบบ สามารถต้านทานและหยุดยั้งหัวกระสุนไม่ให้ทะลุผ่านได้ โดยหัวกระสุนทั้ง 3 นัด จมฝังอยู่ในแผ่นเกราะ และไม่มีร่องรอยการแฉลบออกด้านข้าง แต่พบการแตกร่อนของเรซินที่ประสานแผ่นใยแก้วแต่ละชั้นเข้าด้วยกันบริเวณโดยรอบหัวกระสุนที่ฝังอยู่ โดยมีลักษณะเป็นวงกลมสีขาว เกิดขึ้นจากแรงปะทะของกระสุนปืนที่กระจายออกไปตามแนวเส้นใย จากการสังเกต แผ่นเกราะที่วางใยแก้วผ้าทอแบบสลับแนวทอมุม 45 องศา มีพื้นที่ที่แสดงถึงความเสียหายจากแรงปะทะที่มีขนาดเล็กกว่าเมื่อเทียบกับแผ่นเกราะที่ผลิตจากใยแก้วผ้าทอแบบวางเรียงตามแนวอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบแรงกระแทกในหัวข้อก่อนหน้า ที่พบว่าการจัดเรียงเส้นใยสลับแนวทอมุม

45 องศา สามารถรับพลังงานจากการกระแทกต่อหน่วยพื้นที่ได้ดีกว่า เนื่องจากแนวเส้นใยที่มีการเรียงตัวในทิศทางหลากหลายมากกว่า

Figure 8 แสดงแผ่นเกราะใยแก้วผ้าทอความหนา 35 ชั้น ทั้งแบบวางเรียงตามแนว และแบบวางเรียงสลับแนวทอมุม 45 องศา ที่ถูกยิงด้วยกระสุนปืนขนาด .357 Magnum FMJ ซึ่งมีราคาถูก และถูกนำมาใช้แพร่หลายกว่า ผลการทดสอบพบว่าหัวกระสุนไม่สามารถทะลุผ่านแผ่นเกราะได้ และพบการเสียหายของแผ่นเกราะโดยรอบหัวกระสุนอันเนื่องมาจากแรงปะทะที่กระจายออกตามแนวเส้นใย ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 92.667 มิลลิเมตร และ 83.667 มิลลิเมตร สำหรับแผ่นเกราะแบบจัดเรียงเส้นใยตามแนวและแบบจัดเรียงเส้นใยสลับแนว ตามลำดับ ดังแสดงใน Table 5



**Figure 8** Characteristics of 35-layers armor plates after hit by .357 Magnum FMJ bullets (a) 0-degree alignment (front) (b) 45-degree alignment (front) (c) 0-degree alignment (back) (d) 45-degree alignment (back)

**Table 5** Sizes of average damage area around the bullets

Type	Diameter [mm]			Average [mm]
0-degree alignment	78	95	105	92.667
45-degree alignment	80	85	86	83.667

### 3. แรงปะทะด้านหลังแผ่นเกราะที่ถูกยิง

Figure 9 แสดงผลการทดสอบรอยยุบที่เกิดขึ้นบนวัสดุหนุนรองด้านหลังแผ่นเกราะใยแก้วผ้าทอความหนา 30 ชั้น ที่ถูกยิงด้วยกระสุนปืนขนาด .357 Magnum FMJ พบว่าหัวกระสุนไม่สามารถทะลุผ่านแผ่นเกราะได้ โดยสามารถวัดค่าเฉลี่ยการยุบตัวของดินที่เป็นวัสดุหนุนรองด้านหลังแผ่นเกราะได้เท่ากับ 6.33 มิลลิเมตร และ 8 มิลลิเมตร สำหรับแผ่นเกราะแบบวางเรียงเส้นใยตามแนวและแบบวางเรียงเส้นใยสลับแนว

ตามลำดับ ดังแสดงใน Table 6 ซึ่งความลึกที่น้อยกว่า 44 มิลลิเมตร จัดว่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ผลการทดลองนี้สอดคล้องกันกับผลการทดลองก่อนหน้าที่แสดงให้เห็นว่าแผ่นเกราะแบบจัดเรียงเส้นใยสลับแนวทำมุม 45 องศา สามารถซึมซับแรงกระแทกได้ดีกว่าเนื่องจากสามารถกระจายแรงไปตามทิศทางของแนวเส้นใยที่มีการเรียงตัวในทิศทางที่หลากหลายกว่า จึงมีค่าการยุบตัวของดินด้านหลังแผ่นเกราะน้อยกว่าแผ่นเกราะแบบจัดเรียงเส้นใยตามแนว



**Figure 9** Indentations of backing materials behind 30-layers armor plates after hit by .357 Magnum FMJ bullets  
(a) 0-degree alignment (b) 45-degree alignment

**Table 6** Average indentations in the backing material

Type	Depth [mm]			Average [mm]
0-degree alignment	8	8	8	8.00
45-degree alignment	7	6	6	6.33

## สรุป

จากการศึกษาผลกระทบของการจัดเรียงแนวเส้นใยที่มีต่อความแข็งแรงของแผ่นเกราะกันกระสุนที่ผลิตจากการวางซ้อนกันของใยแก้วผ้าทอแล้วหล่อขึ้นรูปด้วยเรซิน โดยมีลักษณะการวางซ้อนกันของแผ่นใยแก้ว 2 ลักษณะ คือ การวางเรียงซ้อนกันตามแนวเส้นใย และการวางเส้นใยสลับแนวทำมุมกัน 45 องศา เมื่อนำตัวอย่างมาทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงพบว่า ตัวอย่างที่ใช้ทดสอบแบบจัดเรียงเส้นใยตามแนวมีค่าเฉลี่ยความเค้นสูงสุดมากกว่าแบบจัดเรียงเส้นใยสลับแนวคิดเป็น 22.19% ทำให้สามารถสรุปได้ว่าแนวการจัดเรียงเส้นใยส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดึงในแนวแกนของแผ่นเกราะ ซึ่งชิ้นงานทดสอบแบบจัดเรียงเส้นใยตามแนวมีจำนวนเส้นใยที่รับแรงในทิศทางของแรงดึงมากกว่า จึงทำให้มีค่าความแข็งแรงดึงมากกว่า อย่างไรก็ตาม จากผลการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงกระแทกแบบชาร์ป พบว่าชิ้นงานทดสอบแบบจัดเรียงเส้นใยสลับแนวมีค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกเฉลี่ยมากกว่า

ชิ้นงานแบบจัดเรียงเส้นใยตามแนวคิดเป็น 10.78% การจัดเรียงเส้นใยสลับแนวสามารถรับพลังงานจากการกระแทกต่อหน่วยพื้นที่ได้ดีกว่า อาจมีผลมาจากการกระจายแรงที่ดี เนื่องจากแนวเส้นใยที่มีการเรียงตัวในทิศทางหลากหลายกว่าการจัดเรียงเส้นใยตามแนว จึงทำให้มีค่าความต้านทานแรงกระแทกมากกว่า นอกจากนี้ เมื่อทำการทดสอบยิงแผ่นเกราะด้วยกระสุนปืนสำหรับมาตรฐานเสื้อเกราะ Level II พบว่าหัวกระสุนฝังอยู่ในแผ่นเกราะไม่สามารถทะลุผ่านได้ แต่พบการแตกร่อนของเรซินโดยรอบหัวกระสุนที่ฝังอยู่ซึ่งเกิดจากแรงปะทะของหัวกระสุนโดยแผ่นเกราะที่จัดเรียงแนวเส้นใยแบบสลับแนวมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของความเสียหายโดยรอบหัวกระสุนเล็กกว่าแบบวางเรียงตามแนวคิดเป็น 9.71% และเมื่อพิจารณารอยยุบตัวบนวัสดุหนุนรองด้านหลังแผ่นเกราะพบว่ารอยยุบตัวเฉลี่ยของด้านหลังแผ่นเกราะที่วางเรียงเส้นใยแบบสลับแนวมีค่าความลึกน้อยกว่าแผ่นเกราะแบบจัดเรียงเส้นใยตามแนวคิดเป็น 20.88% สอดคล้องกับผลการ

ทดลองก่อนหน้าที่แสดงให้เห็นว่าแผ่นเกราะแบบจัดเรียงเส้นใยสลับแนวทำมุม 45 องศา สามารถดูดซับแรงกระแทกได้ดีกว่า จึงมีค่าการยุบตัวของดินด้านหลังแผ่นเกราะน้อยกว่าแผ่นเกราะแบบจัดเรียงเส้นใยตามแนว ทั้งนี้ แม้ว่าการทดสอบคุณสมบัติทางกลด้านความแข็งแรงดึงของแผ่นเกราะ จะให้ผลการทดลองที่สอดคล้องไปในแนวทางเดียวกันกับงานวิจัยที่เสนอโดย Sikarwar *et al.* (2014) แต่ความสามารถในการดูดซับแรงกระแทกและขนาดของความเสียหายโดยรอบหัวกระสุน ยังคงมีความขัดแย้งกันในบางประเด็น ซึ่งอาจเกิดขึ้นจากวิธีดำเนินการทดลองที่ต่างกันและการควบคุมกระบวนการผลิตแผ่นเกราะ อย่างไรก็ตาม จากผลการทดสอบ การจัดเรียงแนวเส้นใยของแผ่นใยแก้วผ้าทอส่งผลโดยตรงต่อความสามารถในการต้านทานแรงปะทะของแผ่นเกราะกันกระสุน การวางแผ่นใยแก้วแบบสลับแนวทำมุมกัน 45 องศา ทำให้แผ่นเกราะสามารถรองรับแรงกระทำของกระสุนปืนได้ดีขึ้น โดยแผ่นเกราะที่ผลิตจากแผ่นใยแก้วผ้าทอจำนวน 30 ชั้น เป็นแผ่นเกราะที่เหมาะสมในการนำไปใช้งาน เนื่องจากมีน้ำหนักไม่มากเกินไปนัก โดยแผ่นเกราะจะมีความหนาประมาณ 13 มิลลิเมตร หากผลิตเป็นแผ่นเกราะขนาด 267 x 300 ตารางมิลลิเมตร จะมีน้ำหนักประมาณ 2 กิโลกรัมต่อแผ่น และมีราคาประมาณ 2,000 บาทต่อแผ่น ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยแผ่นเกราะกันกระสุนอื่น ๆ ที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น แผ่นเกราะกันกระสุนที่ผลิตจากใยแก้วผ้าทอที่จัดวางเส้นใยสลับแนวทำมุมกัน 45 องศา นั้นมีจุดเด่นที่สำคัญคือการใช้วัสดุที่หาซื้อได้ง่าย ขั้นตอนการผลิตไม่ยุ่งยากซับซ้อน มีราคาถูก น้ำหนักเบาสามารถป้องกันอันตรายจากอาวุธปืนพกสั้นตามมาตรฐาน NIJ ระดับ II รวมทั้งสามารถดูดซับแรงกระแทกได้ดี และไม่มีอาการถลอกของหัวกระสุน จึงไม่ทำอันตรายต่อผู้สวมใส่และผู้ปฏิบัติงานใกล้เคียง

## กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณสนามยิงปืนตำรวจภูธรภาค 4 ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการยิงทดสอบขอขอบพระคุณ ค.ต.วิหค รัชโพธิ์ ครูฝึกประจำสนามยิงปืนฯ ที่กรุณาอำนวยความสะดวกและให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ตลอดการทำงานวิจัย

## เอกสารอ้างอิง

- Amatariyakul, J. and Amatariyakul, W. 2016. Analysis of the Material for Making Bulletproof Vest Armor Efficient Level II. **RMUTI Journal** 9(2): 161-176. (in Thai)
- Bagherpour, S. 2012. Fiber Reinforced Polyester Composites, pp. 135-166. *In* Saleh, H., eds. **Polyester**. IntechOpen, London.
- Bangkokbiznews. 2020. **Khon Kaen University shows a silk cocoon-based armor plate that can withstand M16 rifle bullets without penetration**. Bangkokbiznews. Available Source: <https://www.bangkokbiznews.com/tech/896119>, June 5, 2024. (in Thai)
- Chokchalerm, D. and Sriseubsai, W. 2017. Feasibility Study on The Development of Bulletproof Vest with Fish Scale by Dart Impact Method. **Ladkrabang Engineering Journal** 34(3): 9-14. (in Thai)
- Jearanaisilawong, P. and Phungsara, B. 2020. Effects of Layer Arrangements on Bullet Protection Capability of Armor Plate. **Defence Technology Academic Journal** 2(6): 56-65. (in Thai)
- Jongpairojcosit, N., Julniphitwong, A., Charoenpon, A., Lekthamrong, C., Hutacharoen, N. and Ridluan, A. 2020. The Analysis of Military

- Tire Concept using Sandwich Composite Structure made from Kevlar and Natural Rubber Using Finite Element Method and Experiment. **Defence Technology Academic Journal** 2(5): 90-99. (in Thai)
- Kangwantrakool, S. 2010. **Research Report on Improvement of Mechanical Properties of Alumina-Chromia with Zirconia Particles.** University of Technology, Nakhon Ratchasima. (in Thai)
- Khojimet, S., Kiatprajak, J., Ruangrit, D. and Timsuwan, A. 2010. Development of Protective Body-Shield Against Explosive Fractions and Shrapnel of Small Bomb. **Journal of Engineering RMUTT** 1: 9-18. (in Thai)
- National Institute of Justice. 2008. **Ballistic Resistance of Body Armor: NIJ Standard-0101.06.** U.S. Department of Justice, Washington, DC, USA.
- Parsapratet, S. , Amornsakchai, T. , Sungnoo, S. , Suppitaksakul, C. , Kwankhao, B. and Chaiyalak, C. 2010. A Study of Producing Bullet Proof Vest from Man Made Fiber for Commercial Purposes. **Journal of Engineering RMUTT** 1: 19-27. (in Thai)
- Prakash, A., Fasil, M. and Anandavalli, N. 2023. Ballistic performance of optimized light weight composite armour. **Forces in Mechanics** 12: 100216.
- Pumkaew, M., Srikunwong, C. and Watanasriyakul, S. 2011. Development of Ceramic/ Fabric/ Metal Composite Armor System, AEC14, pp. nd. *In The 25<sup>th</sup> Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand.* Thai Society of Mechanical Engineers, Kasetsart University, Bangkok. (in Thai)
- Saicharoen, A., Tinprabath, P. and Chartpuk, P. 2022. Parameter Analysis that Affects the Ability to Resistance Penetration of Ammunition on the Aluminum Armor Surface Using Finite Element Method. **RMUTP Research Journal** 16(1): 177-191. (in Thai)
- Sikarwar, R.S., Velmurugan, R. and Gupta, N.K. 2014. Influence of fiber orientation and thickness on the response of glass/epoxy composites subjected to impact loading. **Composites Part B: Engineering** 60: 627-636.
- Sungkapun, T. 2013. Development and production of armor from aluminum matrix composite. Master Thesis of Engineering, Prince of Songkla University. (in Thai)
- Wang, Z., Zhang, H., Dong, Y., Zhou, H. and Huang, G. 2023. Ballistic performance and protection mechanism of aramid fabric modified with polyethylene and graphene. **International Journal of Mechanical Sciences** 237: 107772.
- Xianglin, H., Wei, Z., Yunfei, D. and Xiongwen, J. 2017. Experimental investigation on the ballistic resistance of polymer-aluminum laminated plates. **International Journal of Impact Engineering** 113: 212-221.
- Zhu, Y., Ma, J., Fan, Z., Wen, Y., Xu, C. and Xia, M. 2024. Ballistic impact performance and blunt injury assessment of ceramic/UHMWPE laminate composite body armor. **Journal of Materials Research and Technology** 29: 1703-1728.

# คุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนในช่องการไหลที่มีพินรูปตัววี เอียงแถวเดียวติดตั้งอยู่บนพื้นผิว

## Heat Transfer Characteristics in a Flow Channel Having a Single Row of Inclined V-Shaped Pins Mounted on the Endwall Surface

เสรี ทองชุม<sup>1</sup> ปฐมพร นระระโต<sup>1\*</sup> ประทีป ทิพย์ประชา<sup>1</sup> นิโอะ ปูซุ<sup>2</sup> และ ชยุด นันทคุสิต<sup>3</sup>  
Saree Tongchom<sup>1</sup>, Pathomporn Narato<sup>1\*</sup>, Prateep Tippracha<sup>1</sup>, Ni-oh Puzu<sup>2</sup> and Chayut Nuntadusit<sup>3</sup>

Received: 13 October 2023, Revised: 1 July 2024, Accepted: 2 July 2024

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนและสมรรถนะเชิงความร้อนด้วยพินรูปตัววีเอียงแถวเดียวในช่องการไหล โดยที่ลักษณะของพินเป็นแท่งทรงกระบอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางพิน  $D=10\text{mm}$  ถูกติดตั้งบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนภายในอุโมงค์ลม ความสูงของพินถูกศึกษาที่  $H=3.2D$  และ  $H=2D$  ระยะห่างในแนวขวางกระแสการไหลกำหนดให้  $S_y=2D$  ผลของมุมเอียงได้ศึกษาที่  $\theta=30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 135^\circ$ , และ  $150^\circ$  การวัดการกระจายตัวของอุณหภูมิบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนได้ใช้กล้องอินฟราเรดผลการทดลองกรณี  $H/D=2$  แสดงถึงมุมพินรูปตัววีเอียง  $\theta=30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 120^\circ$ , และ  $135^\circ$  สามารถเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อนในด้านกระแสการไหลหลังผ่านแถวพินเมื่อเปรียบเทียบกับพินตั้งตรงมุม  $90^\circ$  กรณี  $H/D=3.2$  การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวด้วยพินรูปตัววีเอียงต่ำกว่าพินตั้งตรงมุม  $90^\circ$  ความดันสูญเสียในกรณี  $H/D=2$  และ  $H/D=3.2$  ลดลงด้วยการติดตั้งพินรูปตัววีเอียงเมื่อเปรียบเทียบกับพินตั้งตรงมุม  $90^\circ$

**คำสำคัญ:** มุมเอียงของพินรูปตัววี ( $\theta$ ), คุณลักษณะการถ่ายเทความร้อน, สมรรถนะเชิงความร้อน

<sup>1</sup> สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา 90000

<sup>1</sup> Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Muang, Songkhla 90000, Thailand.

<sup>2</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์ อำเภอเมือง จังหวัดนราธิวาส 96000

<sup>2</sup> Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Princess of Naradhiwas University, Muang, Narathiwat 96000, Thailand.

<sup>3</sup> ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและเมคาทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90112

<sup>3</sup> Department of Mechanical and Mechatronics Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90112, Thailand.

\* ผู้รับผิดชอบประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): Pathomporn.n@rmutsv.ac.th Tel: 08 4633 3795

## ABSTRACT

The objective of this research is to study heat transfer characteristics and thermal performance with a single row of inclined V-shaped pins in a flow channel. The cylindrical pins, each having a diameter of  $D=10$  mm, were mounted on the heat transfer surface in a wind tunnel. The height of the pin was investigated at  $H=3.2D$  and  $H=2D$ . The pin-to-pin distance was fixed at  $S_y=2D$  in the spanwise direction. The effects of pin inclined angle were investigated at  $\theta=30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 135^\circ$ , and  $150^\circ$ . The temperature distributions on the heat transfer surface were measured by using an infrared camera. Results for the case  $H/D=2$  show that the V-shaped pin inclined angle of  $\theta=30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 120^\circ$ , and  $135^\circ$  could enhance heat transfer downstream of the pin row when compared to the case of vertical pins with  $\theta=90^\circ$ . In the case where  $H/D=3.2$ , the heat transfer on the endwall surface with inclined V-shaped pins was poorer than that with vertical pins with  $\theta=90^\circ$ . The pressure drops in cases where  $H/D=2$  and  $H/D=3.2$  were reduced with mounting inclined V-shaped pins when compared to the case of vertical pins with  $\theta=90^\circ$ .

**Key words:** Inclined angle of V-shaped pin ( $\theta$ ), heat transfer characteristics, thermal performance

## บทนำ

การติดตั้งกลุ่มของพินบนพื้นผิวเพื่อเพิ่มการระบายความร้อนภายในใบกังหันแก๊สทำให้ใบกังหันแก๊สสามารถทนอุณหภูมิที่สูงได้ส่งผลต่อการปรับปรุงประสิทธิภาพเชิงความร้อนของชุดกังหันแก๊ส โดยที่ความสูงของพินต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางพิน ( $H/D$ ) อยู่ในช่วง 0.5 ถึง 4 ได้ถูกนำมาใช้ติดตั้งภายในใบกังหันแก๊ส (Lau *et al.*, 1985) การไหลของอากาศผ่านพินจะช่วยสร้างความปั่นป่วนในกระแสการไหลส่งผลต่อการระบายความร้อนบนพื้นผิว (Webb, 1980) กลไกการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนจากการติดตั้งกลุ่มพินแบ่งออกเป็นสองกลไกคือ (1) กลไกการเพิ่มสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวที่ติดตั้งพินและ (2) กลไกการเพิ่มพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนจากการติดตั้งกลุ่มพิน ลักษณะการไหลของอากาศผ่านแท่งพินตั้งตรงวางเต็มช่องการไหลเพียงแท่งเดียวได้แสดงไว้ใน Figure 1 จะพบว่าอากาศจะไหลจากทางซ้ายมือไปทาง

ขวามือ เมื่อกระแสการไหลของอากาศวิ่งผ่านตัวแท่งพินจะเกิดคุณลักษณะการไหลดังนี้ ในส่วนของด้านหน้าพินเกิดการไหลหมุนวนรูปเกือกม้า (horseshoe vortex) ทั้งพื้นผิวบนและพื้นผิวล่างในตำแหน่งรอยต่อระหว่างหัวของแท่งพินกับพื้นผิว ถัดจากส่วนของด้านหน้าพินมาที่ส่วนของด้านข้างพินพบว่าเกิดกระแสการไหลของอากาศแยกตัวออกจากด้านข้างของพิน ถัดจากส่วนของด้านข้างพินมาถึงด้านหลังของพินเกิดการไหลหมุนวนอยู่กับที่ด้วยความเร็วต่ำกว่าบริเวณรอบ ๆ ซึ่งลักษณะการไหลแบบนี้เรียกว่าการไหลแบบเวด (wakes) ถัดจากการไหลแบบเวดในด้านหลังของพินจะพบกับบริเวณที่มีการไหลของอากาศมารวมกันในด้านหลังของพินซึ่งมีความปั่นป่วนของการไหลที่สูงและเกิดเป็นบริเวณที่มีการผสมกัน (region of high mixing) ของการไหล ผลของการไหลที่เกิดขึ้นด้านหน้าพินด้วยการไหลหมุนวนรูปเกือกม้าและด้านหลังพินเป็นการไหลมารวมกันเกิดเป็นการไหลผสมกันเป็นตัวช่วย

ในการพัฒนาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวด้วยการเพิ่มความปั่นป่วนของการไหล สำหรับการไหลของอากาศผ่านกลุ่มฟินพบว่าการระบายความร้อนค่อย ๆ เพิ่มขึ้นก่อนเกิดการไหลแบบพัฒนาตัวเต็มที่ด้วยแถวของฟินซึ่งการไหลในบริเวณที่พัฒนาตัว

เต็มที่เกิดจากพฤติกรรมการไหลระหว่างการไหลหมุนวนรูปเกือกม้าในด้านกระแสการไหลก่อนชนฟินและกระแสการไหลหลังผ่านฟิน (Metzger *et al.*, 1982)

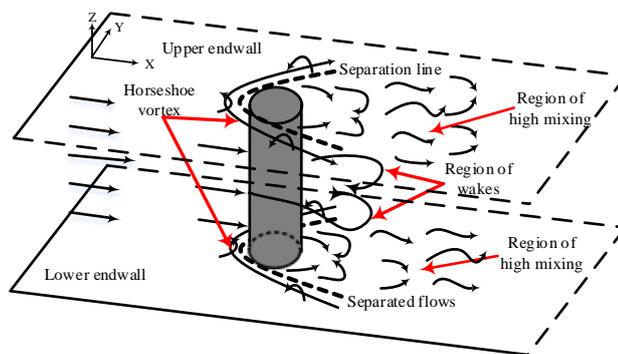


Figure 1 Air flow characteristics through the upright pin. (Narato *et al.*, 2021)

Moon and Kim (2014) ศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงความสูงของแท่งฟินต่อค่าการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวพบว่าฟินที่มีอัตราส่วนความสูงของฟินต่อขนาดความสูงของช่องการไหลที่สูงยอมให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่ดี Chang *et al.* (2008) ศึกษาคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนและความดันสูญเสียจากการติดตั้งกลุ่มฟินแถวสลับพบว่าความสูงฟินที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์ที่สูงไม่ส่งผลให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนในช่องการไหลสูงตามไปด้วยเนื่องจากผลของความดันสูญเสียที่เพิ่มขึ้น Jubran *et al.* (1993); Lawson *et al.* (2011) ศึกษาผลของระยะห่างระหว่างฟินต่อค่าการถ่ายเทความร้อนและความดันสูญเสียพบว่า การติดตั้งกลุ่มฟินเรียงกันแบบแถวสลับด้วยระยะห่างระหว่างฟินในแนวตามกระแสการไหลและในแนวขวางกระแสการไหลที่แคบทำให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนในช่องการไหลเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับระยะห่างที่กว้างกว่า Do *et al.* (2022) ศึกษาคุณลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนของกลุ่มฟินตรงผสมกับพื้นผิวนูนและพื้นผิวเว้าด้วย

ตัวเลขเรย์โนลด์ส์ของการไหลอยู่ในช่วง 7,400 ถึง 36,000 โดยโปรแกรมจำลองทางพลศาสตร์ของไหลจากผลการจำลองการไหลพบว่ากรณีกลุ่มฟินตรงผสมกับพื้นผิวนูนและพื้นผิวเว้าให้การกระจายตัวของค่าการถ่ายเทความร้อนใกล้เคียงกับตัวฟินได้สูงเป็นบริเวณที่กว้างกว่ากลุ่มฟินตั้งตรงพื้นผิวเรียบ Choi *et al.* (2007) ศึกษาคุณลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวด้วยการติดตั้งแท่งทรงกระบอกเอียงแท่งเดียวบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนในช่องการไหล ความสูงของแท่งทรงกระบอกเท่ากับความสูงของช่องการไหล พบว่าผลของมุมเอียงของแท่งทรงกระบอกช่วยเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวด้านบนด้วยคุณลักษณะของการไหลแบบหมุนควงคู่ (Counter rotating vortices) ที่เกิดขึ้นด้านหลังของแท่งทรงกระบอก การไหลหมุนควงคู่นี้จะดึงอากาศด้านหลังแท่งทรงกระบอกพุ่งชนพื้นผิวและทำให้ความปั่นป่วนของการไหลเพิ่มขึ้น Narato *et al.* (2020) ศึกษาคุณลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวจากการติดตั้งฟินเอียงหนึ่งแถว

ในช่องการไหล โดยมีระยะห่างระหว่างพินในแนวขวางกระแสการไหลอยู่ที่  $S=2D$  ความสูงของพินถูกศึกษาที่  $H=2D$  และ  $H=3.2D$  ผลของมุมเอียงได้ศึกษาที่  $\theta=30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 135^\circ$ , และ  $150^\circ$  ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่า กรณีพินมีความสูง  $H=2D$  ซึ่งมีมุมเอียงอยู่ที่  $\theta=30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$  สามารถช่วยเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวและลดความดันสูญเสียในช่องการไหลลงได้เมื่อเปรียบเทียบกับพินตั้งตรงปกติที่ความสูงเดียวกัน ส่งผลให้พินเอียงในมุมดังกล่าวช่วยปรับปรุงค่าสมรรถนะเชิงความร้อนให้สูงขึ้นได้ ผลของพินเอียงในมุมดังกล่าวช่วยสร้างการไหลแบบหมุนควงคู่ (Counter rotating vortices) ในด้านหลังของพินใกล้พื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนมีผลให้ค่าการถ่ายเทความร้อนถูกปรับปรุงให้ดีขึ้น ในส่วนของกรณีพินมีความสูง  $H=3.2D$  ผลของมุมเอียงไม่ส่งผลต่อค่าการถ่ายเทความร้อนให้เพิ่มขึ้นได้เมื่อเปรียบเทียบกับพินตั้งตรงปกติที่ความสูงพินเดียวกัน เนื่องด้วยการไหลแบบหมุนควงคู่ (Counter rotating vortices) ในด้านหลังพินอยู่ไกลพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนออกมาไม่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าการถ่ายเทความร้อน Chyu *et al.* (2007) ศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวดังกลุ่มพินเอียงวางแบบแถวสลับ 5 แถว โดยที่พินแถวคู่มี 6 ตัว ส่วนพินแถวคี่มี 5 ตัว ความสูงของพินเท่ากับความสูงของช่องการไหล ผลของมุมเอียงได้ศึกษาที่  $\theta=40^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ , และ  $90^\circ$  ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่าค่าการถ่ายเทความร้อนและความดันสูญเสียลดลงเมื่อติดตั้งกลุ่มพินเอียงเทียบกับกลุ่มพินตั้งตรงปกติ Takeishi *et al.* (2012) ศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวดังกลุ่มพินเอียงวางแบบแถวสลับ 6 แถวร่วมกับพื้นผิวหยักและพื้นผิวเรียบเปรียบเทียบกับพินตั้งตรงปกติพื้นผิวเรียบ ผลของมุมเอียงได้ศึกษาที่  $\theta=-45^\circ$ , และ  $45^\circ$  จากผลการทดลองพบว่าการติดตั้งพินตั้งตรงปกติให้ค่าการ

ถ่ายเทความร้อนและความดันสูญเสียสูงสุด Narato *et al.* (2021) ศึกษาคุณลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวจากการติดตั้งกลุ่มพินเอียงวางแบบแถวสลับ 10 แถว โดยที่พินแถวคู่มี 8 ตัว ส่วนพินแถวคี่มี 9 ตัว ระยะห่างระหว่างพินในแนวขวางกระแสการไหลและในแนวตามกระแสการไหลอยู่ที่  $S_y=2D$ , และ  $S_x=2.5D$  ความสูงของพินถูกศึกษาที่  $H=3.2D$  ผลของมุมเอียงได้ศึกษาที่  $\theta=30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 135^\circ$ , และ  $150^\circ$  ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่าการติดตั้งกลุ่มพินเอียงในมุม  $\theta=120^\circ$ , และ  $135^\circ$  สามารถเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อนและปรับปรุงค่าสมรรถนะเชิงความร้อนให้สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มพินตั้งตรงปกติ เนื่องด้วยกลุ่มพินเอียงในมุมดังกล่าวสร้างการไหลแบบหมุนควงคู่ความเร็วสูง (Counter-rotating vortex with high velocity) ใกล้พื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนมีผลต่อการพัฒนาค่าการถ่ายเทความร้อน Luo *et al.* (2022) ศึกษาคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนจากการติดตั้งกลุ่มของพินโค้งแบบใหม่สำหรับช่องการไหลอยู่กับที่และช่องการไหลแบบหมุนด้วยโปรแกรมจำลองทางพลศาสตร์ของไหล ผลของมุมโค้งของพินที่ถูกศึกษาอยู่ที่  $45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ , และ  $90^\circ$  ตามลำดับ จากผลการจำลองสำหรับกรณีช่องการไหลอยู่กับที่พบว่ากลุ่มของพินโค้งที่มีมุมโค้งน้อยส่งผลต่อการเพิ่มค่าสมรรถนะเชิงความร้อนในช่องการไหลด้วยผลของความดันสูญเสียที่ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีติดตั้งกลุ่มพินตรงปกติ Yang *et al.* (2024) ศึกษาคุณลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวดังการติดตั้งกลุ่มพินโค้งวางแบบแถวสลับร่วมกับพื้นผิวนูนด้วยการจำลองทางพลศาสตร์ของไหลทั้งช่องการไหลอยู่กับที่และช่องการไหลแบบหมุน จากผลการจำลองในกรณีของช่องการไหลอยู่กับที่พบว่ากลุ่มพินโค้งร่วมกับพื้นผิวนูนช่วยเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อนเมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มพินโค้ง

พื้นผิวเรียบเนื่องด้วยกลุ่มพิน โค้งร่วมกับพื้นผิวนูน ช่วยสร้างการไหลวนเพิ่มการไหลแบบผสมผสานของอากาศกับพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนส่งผลให้ค่าการถ่ายเทความร้อนถูกพัฒนาขึ้น

จากการทบทวนเอกสารพบว่า การไหลของอากาศผ่านพินทำให้ความปั่นป่วนของกระแสการไหลเพิ่มขึ้น ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่เพิ่มขึ้นและการติดตั้งพินยังช่วยเพิ่มพื้นผิวถ่ายเทความร้อน ในส่วนของการติดตั้งพินตั้งตรงปกติพบว่าค่าการถ่ายเทความร้อนที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อค่าความดันสูญเสียที่เพิ่มขึ้นด้วย ทำให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนลดลง จึงมีการศึกษาการติดตั้งพินเอียงมุมต่าง ๆ เพื่อเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อนและลดความดันสูญเสียในระบบซึ่งจะเห็นได้จากงานวิจัยที่ผ่านมา ในส่วนของการติดตั้งพินรูปตัววีเอียงพร้อมกับเปลี่ยนแปลงความสูงของพินจากการทบทวนเอกสารยังมีการศึกษากันน้อยมากและยังพบว่ามุมเอียงของพินช่วยสร้างการไหลแบบหมุนควงคู่ (Counter rotating vortices) ในด้านหลังของพินซึ่งเป็นตัวทำลายการไหลแบบเวกสามารถพัฒนาค่าการถ่ายเทความร้อนและลดความดันสูญเสียในระบบลงได้ จึงเป็นที่มาของวัตถุประสงค์ในบทความนี้ โดยการศึกษาคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนและสมรรถนะเชิงความร้อนในช่องการไหลด้วยการติดตั้งพินรูปตัววีเอียงเดี่ยวในมุมต่าง ๆ บนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนพร้อมกับเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความสูงของพินที่  $H/D=2$  และ  $H/D=3.2$

ระยะห่างในแนวขวางกระแสการไหลกำหนดให้  $S_y=2D$  ผลของมุมเอียงได้ศึกษาที่  $\theta=30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 135^\circ$ , และ  $150^\circ$  ตามลำดับ

## วิธีดำเนินการวิจัย

### 1. โมเดลและตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

Figure 2 แสดงการติดตั้งแถวพินรูปตัววีเอียงบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนภายในอุโมงค์ลม พินที่ใช้ทำมาจากแท่งอะคริลิกทรงกระบอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $D=10$  mm พินรูปตัววีเอียงถูกจัดเรียงเพียงแถวเดียวมี 9 ตัวที่กึ่งกลางบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนในลักษณะวางขวางการไหล เพื่อศึกษาผลของมุมเอียงที่เปลี่ยนไปต่อค่าการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวโดยใช้สองอัตราส่วนของความสูงพินในการทดลองที่  $H/D=2$  (หรือที่ความสูงพิน  $H=2D$ ) และ  $H/D=3.2$  (หรือที่ความสูงพิน  $H=3.2D$ ) ระยะห่างระหว่างพินในแนวขวางการไหล  $S_y=2D$  มุมพินเอียงที่ใช้ศึกษาที่  $\theta=30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 135^\circ$ , และ  $150^\circ$  ตามลำดับ ดังแสดงไว้ใน Figure 3(a) และ Figure 3(b) ซึ่งพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนคือพื้นผิวด้านบน (สีเทา) แถวพินรูปตัววีเอียงถูกติดตั้งทำมุมกับพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนและพื้นผิวด้านล่างของอุโมงค์ลม ในส่วนของ Figure 3(c) และ Figure 3(d) แสดงลักษณะการติดตั้งพินมุมแหลมและพินมุมป้านของพินรูปตัววีเมื่อติดตั้งในช่องการไหล

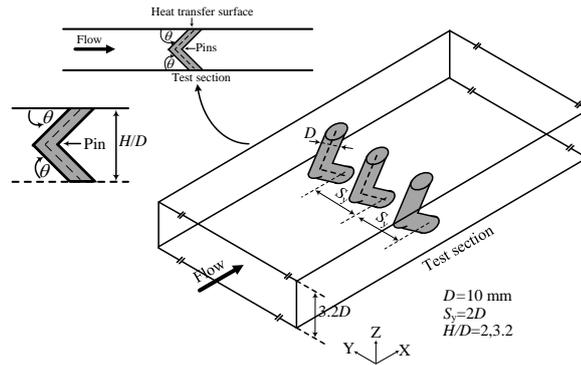


Figure 2 The inclined V-shaped pin model in the rectangular flow channel.

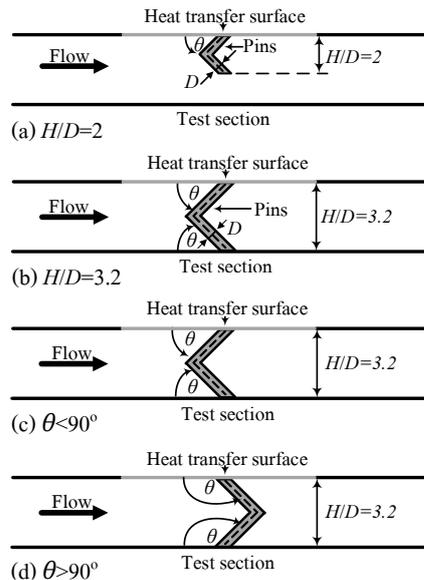


Figure 3 Inclined V-shape pins at various installed angles and pin heights.

## 2. ชุดทดลอง

Figure 4 แสดง ไดอะแกรมชุดทดลอง สำหรับการศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนและ สมรรถนะเชิงความร้อนในช่องการไหล โดยการ ติดตั้งแถวพินรูปตัววีเอียง จากรูปอุโมงค์ลมมีหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดความกว้าง 300 mm มีความสูง 32 mm อุโมงค์ลมแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ (1) ส่วนทางเข้าอุโมงค์ลมก่อนเข้าสู่ส่วนทดสอบจะออกแบบให้มีความยาวเพียงพอต่อการไหลที่พัฒนาตัวเต็มที่แล้ว (Fully develop flow) ซึ่งที่ด้านหน้าของอุโมงค์ลมจะติดตั้งชุดฮีตเตอร์สำหรับควบคุมอุณหภูมิของอากาศขาเข้าอุโมงค์ลมให้คงที่ที่  $25.7^{\circ}\text{C}$  และติดตั้ง Pitot tube ก่อนผ่านส่วนทดสอบเพื่อใช้สำหรับวัด

ความเร็วของกระแสการไหลที่กึ่งกลางของช่องการไหล ซึ่งใช้คำนวณค่าเรย์โนลด์ส์ให้อยู่ในช่วง 14,000 ถึง 33,000 สำหรับการวัดอุณหภูมิของอากาศขาเข้าได้ใช้สายเทอร์โมคัปเปิลชนิด k วางกระจาย 4 ตำแหน่งที่กึ่งกลางของช่องการไหลตามความกว้างของอุโมงค์ลมก่อนเข้าสู่ส่วนทดสอบเป็นระยะออกไป 400 mm จากส่วนทดสอบเพื่อให้ได้ผลของอุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศขาเข้าได้แม่นยำขึ้น ซึ่งในส่วนนี้มีความยาว 1,800 mm (2) ส่วนทดสอบจะออกแบบให้ผนังอุโมงค์ลมด้านบนสามารถติดตั้งแถวพินรูปตัววีเอียงในมุมต่าง ๆ บนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งในส่วนนี้มีความยาว 550 mm โดย tap วัดความดันสูญเสียจะถูกติดตั้งในส่วนนี้ ในส่วนของ

อุณหภูมิห้องจะติดตั้งสายเทอร์โมคัปเปิลชนิด  $k$  วางกระจาย 4 ตำแหน่งเหนือพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนขึ้นมาเป็นระยะ 10 mm เพื่อให้ได้ผลของอุณหภูมิห้องเฉลี่ยได้แม่นยำขึ้น และ (3) ส่วนของอุโมงค์ลมหลังส่วนทดสอบจะต่อเข้ากับออร์ฟิสเพื่อควบคุมอัตราการไหลของอากาศผ่านอุโมงค์ลมให้เท่ากันในกรณีเรย์โนลด์ส์เดียวกัน สำหรับการวัดอุณหภูมิของอากาศออกจากส่วนทดสอบได้ใช้สายเทอร์โมคัปเปิลวางกระจาย 4 ตำแหน่งที่กึ่งกลางของช่องการไหลตามความกว้างของอุโมงค์ลมหลังส่วนทดสอบซึ่งติดตั้งที่ระยะห่างจากส่วนทดสอบในด้านหลังออกมาเป็นระยะ 260 mm

ในส่วนของการเดินเครื่องจะปรับความถี่อินเวอร์เตอร์ของมอเตอร์ให้ความเร็วลมดูดกึ่งกลางช่องการไหลเท่ากับเลขเรย์โนลด์ส์ที่ต้องการศึกษา จากนั้นอากาศก็ไหลผ่านแถวพินรูปตัววีเอียงที่ติดตั้งไว้บนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นแผ่นสแตนเลสบางโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านแผ่นสแตนเลสทำให้เกิดความร้อนขึ้นด้วยฟลักซ์ความร้อนคงที่ อีกด้านของแผ่นสแตนเลสบางได้พันลวดค่าด้านเหนือแผ่นสแตนเลสค่าขึ้นไป 500 mm ได้ติดตั้งกล้องอินฟราเรด (Flir-T420) เพื่อวัดอุณหภูมิมบนพื้นผิวเมื่ออากาศไหลผ่านแถวพินรูปตัววีเอียงทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวไปยังอากาศ กล้องอินฟราเรดจึงจับภาพอุณหภูมิมบนพื้นผิว ซึ่งก่อนบันทึกข้อมูลการกระจายตัวของอุณหภูมิมบนพื้นผิวนั้น ต้องรอให้อุณหภูมิอากาศเข้าเฉลี่ย ( $T_{in}$ ) คงที่ที่  $25.7 \pm 0.2^{\circ}\text{C}$  และอุณหภูมิห้องเฉลี่ย ( $T_{\infty}$ ) คงที่ที่  $24.7 \pm 0.2^{\circ}\text{C}$  ทุกการทดลอง เมื่อการกระจายตัวของอุณหภูมิมบนพื้นผิวคงที่ ข้อมูลการกระจายตัวของอุณหภูมิจึงถูกบันทึกด้วยจำนวน 20 ครั้งต่อหนึ่งกรณีของการทดลอง ซึ่งการบันทึกข้อมูลกระจายตัวของอุณหภูมิม

ในการบันทึก 1 ครั้งใช้เวลาในการบันทึก 1 วินาทีทำให้การบันทึกข้อมูลในแต่ละครั้งยังเป็นสถานะเดิมอยู่เสมอต่อกรณีของการทดลองเพื่อให้ผลของข้อมูลที่ได้อแม่นยำขึ้น ข้อมูลการกระจายตัวของอุณหภูมิมจะถูกนำไปวิเคราะห์ผลการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวต่อไป ในการทดลองจะคงที่กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้แผ่นสแตนเลสไว้ที่ 30A

### 3. การศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวโดยใช้กล้องอินฟราเรด

จาก Figure 4 แสดงรายละเอียดของผนังสำหรับวัดสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นผิวซึ่งอีกด้านจะติดตั้งแถวพินรูปตัววีเอียงเอาไว้ โดยอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับวัดการกระจายตัวของอุณหภูมิมบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนประกอบด้วยแผ่นสแตนเลสบางที่มีความหนา 0.03 mm สำหรับใช้เป็นพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนและผนังอุโมงค์ลมที่ทำจากแผ่นอะคริลิกหนา 10 mm ที่บริเวณตรงกลางเจาะช่องหน้าต่างสำหรับติดตั้งแผ่นสแตนเลสบางโดยการจึงให้เรียงตั้งด้วยแท่งทองแดง ด้านบนของแผ่นสแตนเลสบางที่ถูกขึงจนเรียงตั้งได้พันลวดค่าด้านเอาไว้ ส่วนด้านล่างของแผ่นสแตนเลสบางเป็นพื้นผิวสำหรับติดตั้งแถวพินรูปตัววีเอียง ในการทดลองจะจ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านแท่งทองแดงเพื่อให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านแผ่นสแตนเลสได้อย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งพื้นผิว จากนั้นวัดค่ากระแสไฟฟ้าและค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ไหลผ่านแผ่นสแตนเลสเพื่อที่จะคำนวณกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับแผ่นสแตนเลสบาง ซึ่งสามารถคำนวณหาฟลักซ์ความร้อนที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนได้ สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉพาะจุดบนพื้นผิว ( $h$ ) สามารถได้จากสมการที่ (1)

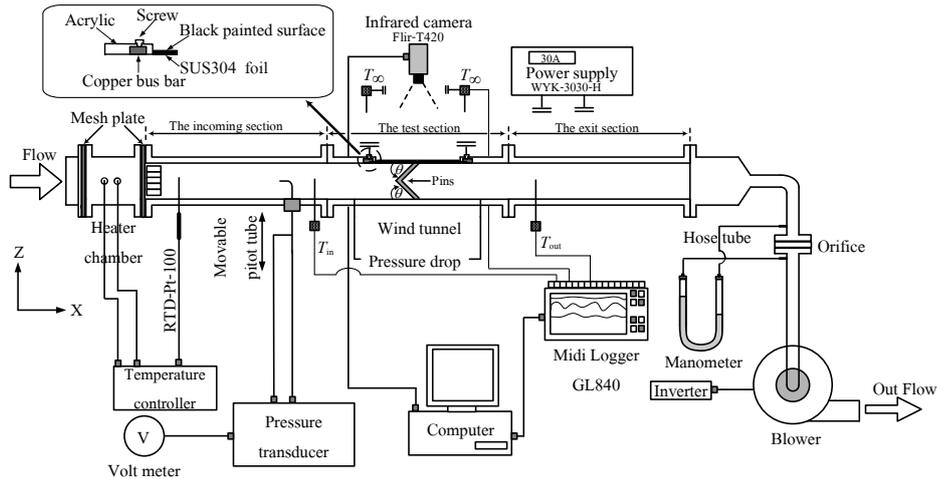


Figure 4 Schematic diagram of the experimental apparatus.

$$h = \frac{\dot{Q}_{input} - \dot{Q}_{losses}}{(T_w - T_m)A} \quad (1)$$

$$\dot{Q}_{input} = IV \quad (2)$$

$$\dot{Q}_{losses} = \dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{rad} \quad (3)$$

เมื่อ  $\dot{Q}_{input}$ ,  $I$ ,  $V$ , และ  $A$  คืออัตราการเกิดความร้อนในแผ่นสแตนเลสจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าแผ่นสแตนเลส, กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับแผ่นสแตนเลส, ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านแผ่นสแตนเลส, และพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนตามลำดับ  $\dot{Q}_{losses}$  คืออัตราการสูญเสียความร้อนโดยรวมซึ่ง  $\dot{Q}_{losses}$  มีค่าสูงสุดคิดเป็น 17% จาก  $\dot{Q}_{input}$ ,  $\dot{Q}_{conv}$ , และ  $\dot{Q}_{rad}$  คืออัตราการสูญเสียความร้อนที่เกิดจากการพาความร้อนแบบธรรมชาติและอัตราการสูญเสียความร้อนที่เกิดจากการแผ่รังสีความร้อนบนผนังด้านไปสู่อากาศในห้องทดลองคำนวณได้จาก

$$\dot{Q}_{conv} = h_c A (\bar{T}_w - \bar{T}_\infty) \quad (4)$$

$$\dot{Q}_{rad} = \sigma \varepsilon_b A (\bar{T}_w^4 - \bar{T}_\infty^4) \quad (5)$$

เมื่อ  $h_c$  คือสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติ,  $\sigma$  คือค่าคงที่ของสเตฟาน-โบลทซ์มานน์,  $\varepsilon_b$  คือค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของพื้นผิวสีดำ ( $\varepsilon_b=0.95$ ),  $T_w$  คืออุณหภูมิที่กระจายตัวบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน,  $\bar{T}_w$  คืออุณหภูมิบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนเฉลี่ยและ  $\bar{T}_\infty$  คือค่าเฉลี่ยอุณหภูมิห้องโดยเฉลี่ย ในส่วนของอุณหภูมิอากาศเฉลี่ยใกล้พื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน ( $T_m$ ) สามารถประเมินได้จากสมการที่ (6)

$$T_m = \left( \frac{T_{out} + T_{in}}{2} \right) \quad (6)$$

เมื่อ  $T_{in}$  คืออุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศขาเข้าส่วนทดสอบ, และ  $T_{out}$  คืออุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศขาออกจากส่วนทดสอบ จากนั้นสามารถคำนวณเลขนัสเซิลต์นัมเบอร์ (Nusselt number) เฉพาะจุดบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนได้จากสมการที่ (7)

$$Nu = \frac{h D_h}{k} \quad (7)$$

ในที่นี้  $D_h$  คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกของช่องการไหลและ  $k$  คือค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอากาศใกล้พื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนที่

ติดตั้งแถวพินรูปตัววีเอียง สำหรับเลขเรย์โนลด์ส์ของการไหลภายในอุโมงค์ลมคำนวณได้จากสมการที่ (8) จากความเร็วที่ตำแหน่งกึ่งกลางของช่องการไหลก่อนเข้าส่วนทดสอบ

$$Re_{D_h} = \frac{\rho V_c D_h}{\mu} \quad (8)$$

ในส่วนค่าตัวประกอบความเสียดทานในช่องการไหลจากการติดตั้งแถวพินรูปตัววีเอียงในมุมต่าง ๆ คำนวณได้จากสมการที่ (9) จากความเร็วกึ่งกลางในช่องการไหล, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกของช่องการไหล, ความยาวของส่วนทดสอบ, ความดันสูญเสียที่เกิดขึ้น, และค่าความหนาแน่นของอากาศ คำนวณเสียดทานพื้นผิวเรียบ คำนวณจากสมการความสัมพันธ์ของ Dittus-Boelter ในสมการที่ (10) โดยที่ค่าตัวประกอบความเสียดทานของพื้นผิวเรียบได้จากสมการความสัมพันธ์ของ Petukhov ในสมการที่ (11)

$$f = \left( \frac{2\Delta P}{\rho V_c^2} \right) \left( \frac{D_h}{L} \right) \quad (9)$$

$$\overline{Nu}_0 = 0.023 Re_{D_h}^{0.8} Pr^{0.4} \quad (10)$$

$$f_0 = 2(2.236 \ln Re - 4.639)^{-2} \quad (11)$$

ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนเกิดจากการเพิ่มขึ้นของค่าการถ่ายเทความร้อนต่อการเพิ่มขึ้นของค่าความดันสูญเสียหาได้จากสมการที่ (12)

$$\eta = \frac{(\overline{Nu}/\overline{Nu}_0)}{(f/f_0)^{1/3}} \quad (12)$$

#### 4. การวิเคราะห์ค่าความผิดพลาด

กระบวนการวิเคราะห์ค่าความผิดพลาดของการทดลองใช้โมเดลการวิเคราะห์ของ Kline and McClintock (1953) ซึ่งเป็น โมเดล ที่ใช้กัน อยู่แพร่หลายสำหรับงานทางด้าน การถ่ายเทความร้อน สามารถคำนวณค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์จากการวัดได้ในสมการที่ (13)

$$\frac{\delta y}{y} = \left[ \left( \frac{\delta y}{\delta x_1} \delta x_1 \right)^2 + \left( \frac{\delta y}{\delta x_2} \delta x_2 \right)^2 + \left( \frac{\delta y}{\delta x_3} \delta x_3 \right)^2 + \dots + \left( \frac{\delta y}{\delta x_n} \delta x_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (13)$$

เมื่อ  $\frac{\delta y}{y}$  คือค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์,  $\delta x_n$  คือค่าความผิดพลาดจากการวัดของ  $x_n$ , และ  $\delta y$  คือค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์ จากการวิเคราะห์โดยใช้โมเดลนี้ทำให้ได้ค่าความผิดพลาดของการหาเลขนัสเซิลต์นัมเบอร์อยู่ระหว่าง 6% ถึง 6.8% ในส่วน of ค่าความผิดพลาดในการหาค่าตัวประกอบความเสียดทานในช่องการไหลอยู่ระหว่าง 2% ถึง 10%

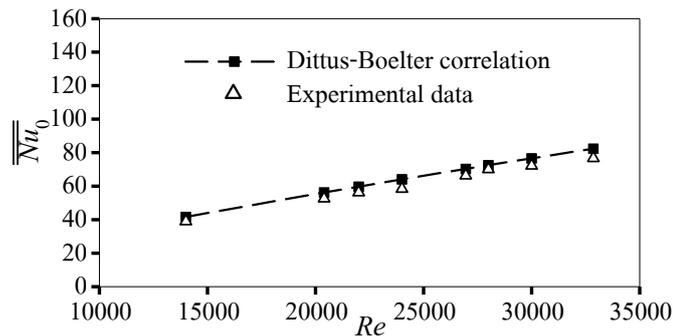
#### ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

##### 1. การเปรียบเทียบผลของเลขนัสเซิลต์เฉลี่ยและค่าตัวประกอบความเสียดทานจากช่องการไหลพื้นผิวเรียบ

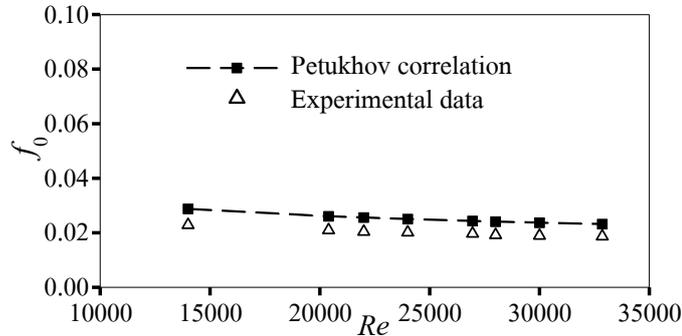
Figure 5 เปรียบเทียบผลของค่านัสเซิลต์เฉลี่ยทั้งพื้นผิวเรียบในทุกช่วงของเลขเรย์โนลด์ส์ที่ทดลองกับสมการความสัมพันธ์ของ Dittus-Boelter ซึ่งผลแสดงให้เห็นว่าค่าใกล้เคียงกันมากและแนวโน้มก็ไปในทิศทางเดียวกัน ในงานวิจัยนี้เลือกใช้สมการความสัมพันธ์ของ Dittus-Boelter ในการประเมินเลขนัสเซิลต์เฉลี่ยบนพื้นผิวเรียบและพบว่า

กระบวนการวัดค่าการถ่ายเทความร้อนในบทความนี้ สามารถประเมินได้โดยมีความคลาดเคลื่อนสูงสุด จากสมการความสัมพันธ์ของ Dittus-Boelter อยู่ที่ 9% ในส่วนของผลการทดลองของค่าตัวประกอบ ความเสียหายจากช่องการไหลพื้นผิวเรียบมีค่าและ แนวโน้มใกล้เคียงกับสมการความสัมพันธ์ของ Petukhov โดยมีความคลาดเคลื่อนสูงสุด 0.0059 หรือ

ประมาณ 20% ดังแสดงไว้ใน Figure 6 และไม่แตกต่างจากงานวิจัยก่อนหน้าของ Narato *et al.* (2021) จึงเลือกใช้ค่าตัวประกอบความเสียหายจากสมการความสัมพันธ์ของ Petukhov มาใช้ในการประเมินค่าสมรรถนะเชิงความร้อนในช่องการไหลต่อไป



**Figure 5** Overall average Nusselt number vs. Reynolds number for smooth channel: Comparison between experimental and theoretical data.



**Figure 6** Friction factor vs. Reynolds number for smooth channel: Comparison between experimental and theoretical data.

## 2. ลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวด้วยการ ติดตั้งแถวพินรูปตัววีเรียงในมุมต่าง ๆ

Figure 7 แสดงการกระจายตัวของ ค่านัสเซิลต์บนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนที่จัดวางตัวพินรูปตัววีเรียงแถวเดียวในช่องการไหลจากการเปลี่ยนแปลงมุมเอียงต่าง ๆ ซึ่งคงที่ระยะห่างในแนวขวางกระแสการไหลไว้ที่  $S_y=2D$  ความสูงของพินรูปตัววีเรียงอยู่ที่  $H/D=2$  ตัวเลขเรย์โนลด์ส์

ของการไหลที่  $Re=33,000$  การไหลของอากาศจะไหลจากทางซ้ายมือไปขวามือ จากผลการทดลองพบว่า ในกรณีพินตั้งตรงมุม  $90^\circ$  ค่านัสเซิลต์บนพื้นผิวจะสูงบริเวณรอบ ๆ ด้านหน้าของพินเนื่องด้วยผลของการไหลหมุนวนรูปเกือกม้าจากนั้น ค่านัสเซิลต์จะค่อย ๆ เพิ่มสูงขึ้นอีกครั้งเมื่อกระแสการไหลของอากาศไหลผ่านพินมาแล้วในตำแหน่ง  $X/D=1$  ต่อจากนั้นค่านัสเซิลต์บนพื้นผิวแผ่ออกเป็น

บริเวณที่กว้างขึ้นด้วยผลของการไหลผสมกันใน ด้านหลัง กรณีติดตั้งพินรูปตัววีเอียงในมุมแหลม  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  และ  $60^\circ$  ค่าสัมประสิทธิ์บนพื้นผิวด้านหน้าพินและ ด้านหลังของพินมีค่าสูงและแผ่ออกเป็นบริเวณที่ กว้างกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับพินตั้งตรงมุม  $90^\circ$  เมื่อ พิจารณา โดยภาพรวมทั้งหมดการติดตั้งพินรูปตัววี เอียงในมุมแหลมส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าการ ถ่ายเทความร้อนเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีติดตั้งพินตรง มุม  $90^\circ$  กรณีติดตั้งพินรูปตัววีเอียงในมุมป้าน  $120^\circ$ ,  $135^\circ$ , และ  $150^\circ$  ค่าสัมประสิทธิ์บนพื้นผิวด้านหน้าพินมี ค่าสูงและ ในบริเวณด้านหลังของพินพื้นที่ที่มี ค่าสัมประสิทธิ์ต่ำจะมีบริเวณที่น้อยลงเมื่อ เปรียบเทียบกับการติดตั้งพินตรงมุม  $90^\circ$  เมื่อพิจารณา โดยภาพรวมทั้งหมดการติดตั้งพินรูปตัววีเอียงในมุม ป้านส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าการถ่ายเทความร้อน เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีติดตั้งพินตรงมุม  $90^\circ$  การ ติดตั้งพินรูปตัววีเอียงส่งผลให้ค่าการถ่ายเทความร้อน เพิ่มขึ้นเนื่องด้วยผลของการไหลแบบหมุนควงคู่ (Counter rotating vortices) (Narato *et al.*, 2020) ที่ เกิดขึ้นด้านหลังของพินรูปตัววีเอียง

Figure 8 แสดงการกระจายตัวของ ค่าสัมประสิทธิ์บนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนที่จัด วางตัวพินรูปตัววีเอียงแถวเดียวในช่องการไหลจาก การเปลี่ยนแปลงมุมเอียงต่าง ๆ ซึ่งคงที่ระยะห่างใน แนวขวางกระแสการไหลไว้ที่  $S_y=2D$  ความสูง ของพินรูปตัววีเอียงอยู่ที่  $H/D=3.2$  (เต็มช่องการไหล)

ตัวเลขเรย์โนลด์ส์ของการไหลอยู่ที่  $Re=33,000$  การ ไหลของอากาศจะไหลจากทางซ้ายมือไปขวามือ จาก ผลการทดลองพบว่า ในกรณีพินตั้งตรงมุม  $90^\circ$  ลักษณะการกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์จะคล้าย กับพินตั้งตรงมุม  $90^\circ$  ที่  $H/D=2$  แต่กรณีของ  $H/D=3.2$  จะให้ค่าของสัมประสิทธิ์ที่ต่ำกว่าและบริเวณที่มี ค่าสัมประสิทธิ์ต่ำจะน้อยลง กรณีติดตั้งพินรูปตัววีเอียง ในมุมแหลม  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  และ  $60^\circ$  ค่าสัมประสิทธิ์บนพื้นผิว ด้านหน้าของพินมีค่าใกล้เคียงกับกรณีพินตั้งตรงมุม  $90^\circ$  ส่วนในบริเวณด้านหลังของพินค่าสัมประสิทธิ์จะสูง เฉพาะจุดโดยมีบริเวณที่มีค่าสัมประสิทธิ์ต่ำเป็นบริเวณที่ กว้างกว่ากรณีของพินตั้งตรงมุม  $90^\circ$  เมื่อพิจารณาโดย ภาพรวมการติดตั้งพินรูปตัววีเอียงในมุมแหลมไม่ ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าการถ่ายเทความร้อนเมื่อ เปรียบเทียบกับการติดตั้งพินตรงมุม  $90^\circ$  กรณีติดตั้ง พินรูปตัววีเอียงในมุมป้าน  $120^\circ$  และ  $135^\circ$  ค่าสัมประสิทธิ์ บนพื้นผิวด้านหน้าพินมีค่าใกล้เคียงกับกรณีพินตั้ง ตรงมุม  $90^\circ$  ส่วนในบริเวณด้านหลังพินค่าสัมประสิทธิ์จะ สูงเฉพาะจุดและยังมีบริเวณที่มีค่าสัมประสิทธิ์ต่ำเป็น บริเวณที่กว้างกว่ากรณีของพินตั้งตรงมุม  $90^\circ$  กรณี ติดตั้งพินรูปตัววีเอียงในมุมป้าน  $150^\circ$  ให้ค่าสัมประสิทธิ์ บนพื้นผิวด้านหน้าพินและด้านหลังพินต่ำกว่ากรณี ของพินตั้งตรงมุม  $90^\circ$  เมื่อพิจารณาโดยภาพรวมการ ติดตั้งพินรูปตัววีเอียงในมุมป้านไม่ส่งผลต่อการ เพิ่มขึ้นของค่าการถ่ายเทความร้อนเมื่อเปรียบเทียบกับ การติดตั้งพินตรงมุม  $90^\circ$

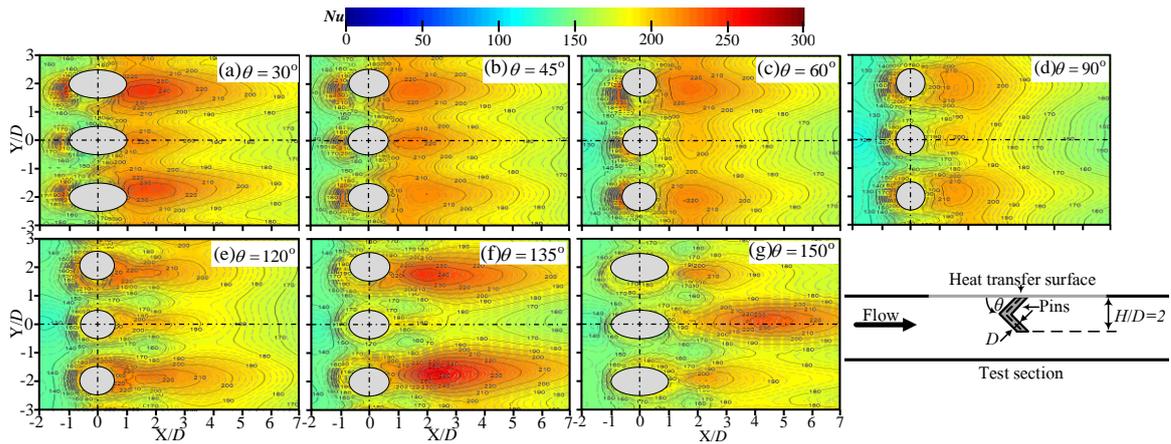


Figure 7 Nusselt number distributions with  $H/D=2$  for various pin inclination angles, at  $Re=33,000$ .

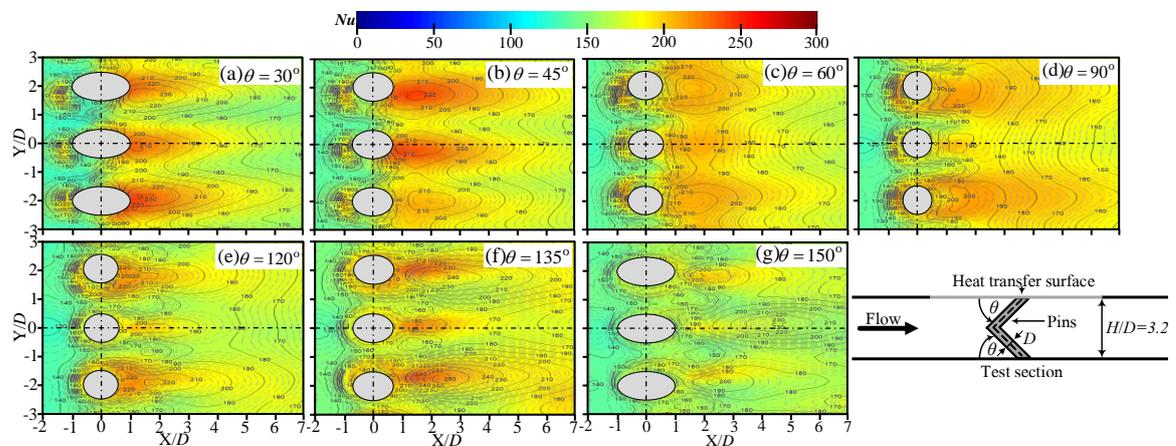


Figure 8 Nusselt number distributions with  $H/D=3.2$  for various pin inclination angles, at  $Re=33,000$ .

### 3. คำนวณเชลล์เฉลี่ยทั้งพื้นผิว, ค่าตัวประกอบความเสียดทานและค่าสมรรถนะเชิงความร้อนต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าเรย์โนลด์ส์ด้วยการติดตั้งแถวพินรูปตัววีเอียง

จาก Figure 9 และ Figure 10 ผลของ คำนวณเชลล์เฉลี่ยทั้งพื้นผิวจาก Figure 7 และ Figure 8 ตามการเปลี่ยนแปลงของค่าเรย์โนลด์ส์ของการไหล ซึ่งไม่พิจารณาคำนวณเชลล์ใต้พื้นผิวของพินในกรณี  $H/D=2$  และ  $3.2$  จากผลการทดลองพบว่าแนวโน้มของค่าน์สเชลล์เฉลี่ยทั้งพื้นผิวเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของค่าเรย์โนลด์ส์ของการไหลในทุกการทดลอง กรณี  $H/D=2$  (Figure 9) ผลของการติดตั้งพินรูปตัววีเอียงในมุมแหลมและมุมป้านช่วยเพิ่มค่าน์สเชลล์

เฉลี่ยทั้งพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนเมื่อเปรียบเทียบกับ การติดตั้งพินตรงมุม  $90^\circ$  และจะเห็นได้ชัดเจนเมื่อค่าเรย์โนลด์ส์ของการไหลเพิ่มสูงขึ้น ในส่วนของกรณี  $H/D=3.2$  (Figure 10) ผลของการติดตั้งพินรูปตัววีเอียงในมุมแหลมและมุมป้านไม่ส่งผลให้ค่าน์สเชลล์เฉลี่ยทั้งพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับพินตั้งตรงมุม  $90^\circ$  ผลของการติดตั้งพินรูปตัววีเอียงมุม  $135^\circ$  ที่  $H/D=2$  ให้ค่าน์สเชลล์เฉลี่ยทั้งพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนสูงกว่าการติดตั้งพินตรงมุม  $90^\circ$  ที่  $H/D=3.2$  ในทุกค่าเรย์โนลด์ส์และพบว่าผลของการติดตั้งพินรูปตัววีเอียงสามารถเพิ่มค่าน์สเชลล์เฉลี่ยได้ขึ้นเป็นหลายเท่าเมื่อเปรียบเทียบกับพื้นผิวเรียบที่ไม่ได้ติดตั้งพิน

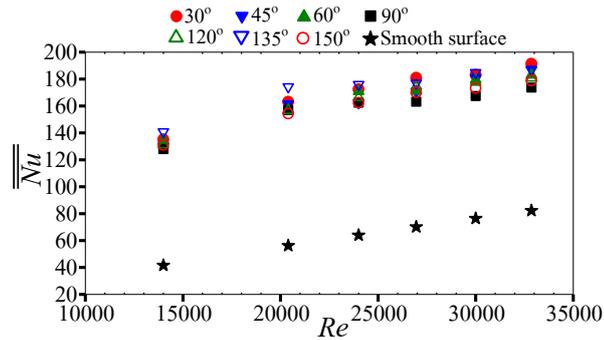


Figure 9 Overall average Nusselt number vs. Reynolds number with  $H/D=2$  for different pin inclinations.

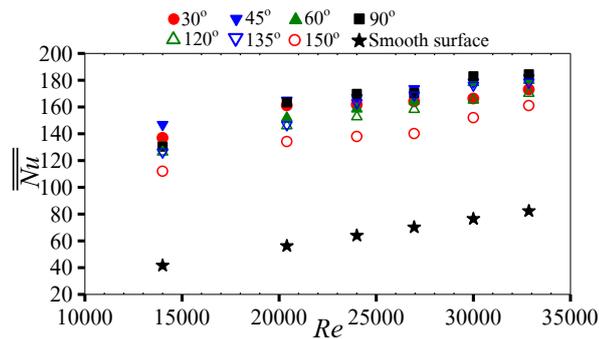


Figure 10 Overall average Nusselt number vs. Reynolds number with  $H/D=3.2$  for different pin inclinations

จาก Figure 11 และ Figure 12 แสดงค่าตัวประกอบความเสียหายในช่องการไหลด้วยการติดตั้งแถวของพินรูปตัววีเอียงในกรณี  $H/D=2$  และ 3.2 จากผลการทดลองพบว่าแนวโน้มของค่าตัวประกอบความเสียหายในช่องการไหลเกือบคงที่ไม่เพิ่มขึ้นตามค่าเรย์โนลด์ส์ของการไหลที่เพิ่มขึ้น เนื่องด้วยช่วงเรย์โนลด์ส์ที่ทดลองให้ค่าตัวประกอบความเสียหายเปลี่ยนแปลงน้อยมาก การติดตั้งพินรูปตัววีเอียงในมุมแหลมและมุมป้านช่วยลดค่าตัวประกอบความเสียหายในช่องการไหลเมื่อเปรียบเทียบกับ การติดตั้งพินตรงมุม  $90^\circ$  ยกเว้นกรณีติดตั้งพินรูปตัววีเอียงมุม  $120^\circ$  ไม่ช่วยให้ค่าตัวประกอบความเสียหายลดลงทั้งในกรณี  $H/D=2$  และ 3.2 ตามลำดับค่าตัวประกอบความเสียหายกรณี  $H/D=2$  ต่ำกว่ากรณี  $H/D=3.2$  ในทุกกรณีที่ทดลอง

จาก Figure 13 และ Figure 14 แสดงค่าสมรรถนะเชิงความร้อนในช่องการไหลด้วยการ

ติดตั้งแถวพินรูปตัววีเอียงกรณี  $H/D=2$  และ 3.2 สมรรถนะเชิงความร้อนคือผลของการเพิ่มขึ้นของค่าการถ่ายเทความร้อนต่อผลของการเพิ่มขึ้นของค่าความดันสูญเสียในช่องการไหลซึ่งการเพิ่มขึ้นในที่นี้เปรียบเทียบกับช่องการไหลพื้นผิวเรียบ จากผลการทดลองพบว่าแนวโน้มของค่าสมรรถนะเชิงความร้อนลดลงตามการเพิ่มขึ้นของค่าเรย์โนลด์ส์ของการไหลเนื่องด้วยผลของความดันสูญเสียในช่องการไหลที่เพิ่มขึ้น กรณี  $H/D=2$  (Figure 13) การติดตั้งพินรูปตัววีเอียงในมุมแหลมและมุมป้านส่งผลให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนในช่องการไหลเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับพินตั้งตรงมุม  $90^\circ$  ในทุกค่าเรย์โนลด์ส์ของการไหล ที่  $Re=33,000$  ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสามารถเพิ่มขึ้นได้ 26%, 16%, 8%, 5%, 12% และ 19% จากการติดตั้งพินรูปตัววีเอียงในมุม  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $135^\circ$ , และ  $150^\circ$  ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับพินตั้งตรงมุม  $90^\circ$

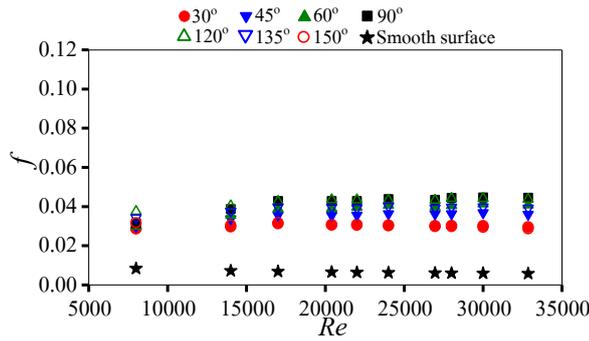


Figure 11 Friction factor vs. Reynolds number with  $H/D=2$  for different pin inclinations

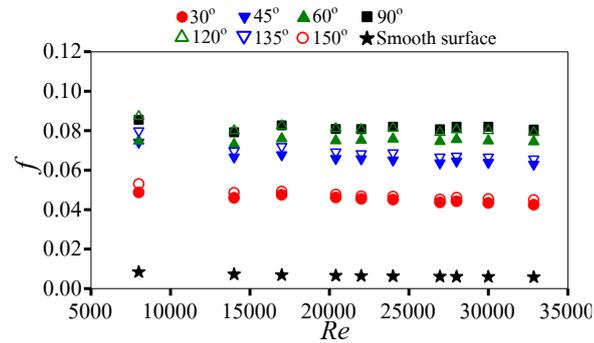


Figure 12 Friction factor vs. Reynolds number with  $H/D=3.2$  for different pin inclinations

กรณี  $H/D=3.2$  (Figure 14) การติดตั้งพินรูปตัววีเอียงในมุม  $30^\circ$ , และ  $45^\circ$  ส่งผลให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนในช่องการไหลเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับพินตั้งตรงมุม  $90^\circ$  ในทุกค่าเรย์โนลด์ส์ของการไหลที่  $Re=33,000$  ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสามารถ

เพิ่มขึ้นได้ 16%, และ 7% จากการติดตั้งพินรูปตัววีเอียงในมุม  $30^\circ$ , และ  $45^\circ$  ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับพินตั้งตรงมุม  $90^\circ$  การติดตั้งพินรูปตัววีเอียงในมุม  $120^\circ$  ให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนต่ำสุด

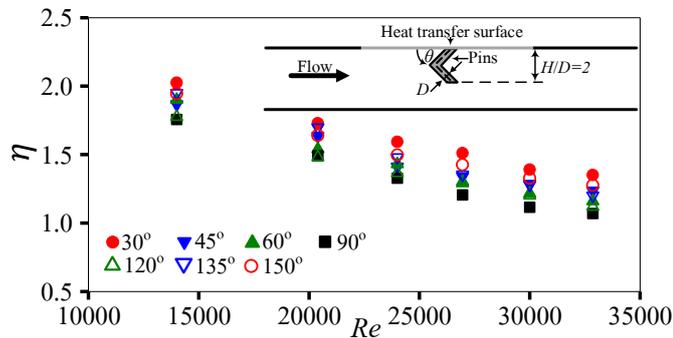


Figure 13 Thermal performance factor vs. Reynolds number with  $H/D=2$  for different pin inclinations

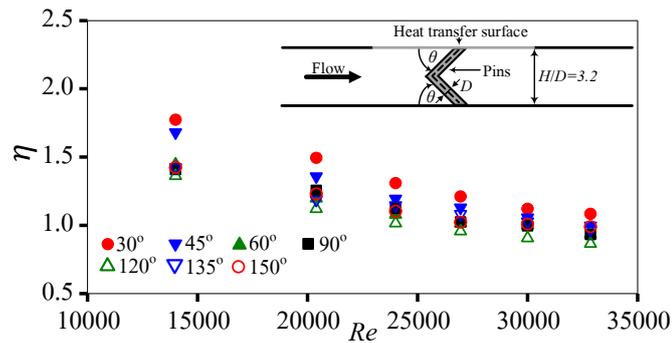
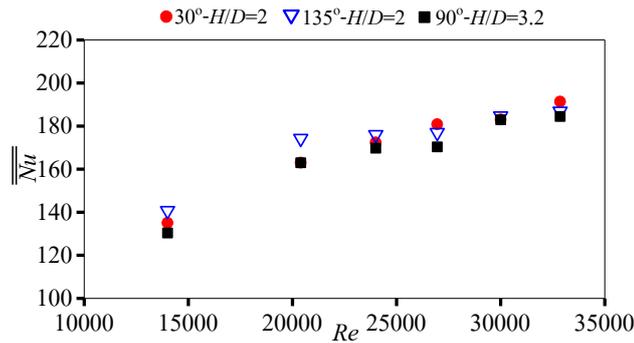


Figure 14 Thermal performance factor vs. Reynolds number with  $H/D=3.2$  for different pin inclinations

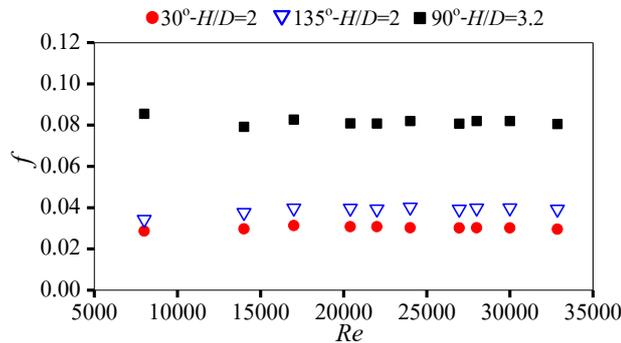
#### 4. เปรียบเทียบกรณีที่ทำให้ค่าการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นได้สูงสุด

Figure 15 แสดงค่าประสิทธิภาพเฉลี่ยทั้งพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนตามการเปลี่ยนแปลงของตัวเลขเรย์โนลด์สของการไหลเป็นการเปรียบเทียบกรณีติดตั้งพินรูปตัววีเอียงให้ค่าการถ่ายเทความร้อนดีที่สุดในแต่ละอัตราส่วนของความสูงพินซึ่งในที่นี้มีสองอัตราส่วนความสูงพินคือ  $H/D=2$  และ  $H/D=3.2$  (เต็มช่องการไหล) จากผลการเปรียบเทียบพบว่ากรณีติดตั้งพินรูปตัววีเอียงในมุม  $135^\circ$  ด้วย  $H/D=2$  ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าพินตั้งตรงมุม  $90^\circ$  ด้วย  $H/D=3.2$  ในทุกค่าของเรย์โนลด์สที่ทดลองและการติดตั้งพินรูปตัววีเอียงในมุม  $30^\circ$  ด้วย  $H/D=2$  ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงในบางเรย์โนลด์สและมีค่าใกล้เคียงกันในบางเรย์โนลด์สเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีติดตั้งพินตรงมุม  $90^\circ$  ด้วย  $H/D=3.2$  การเพิ่มขึ้นของค่าการถ่ายเทความร้อนของพินรูปตัววีเอียงในมุม  $30^\circ$  และ  $135^\circ$  เป็นผลมา

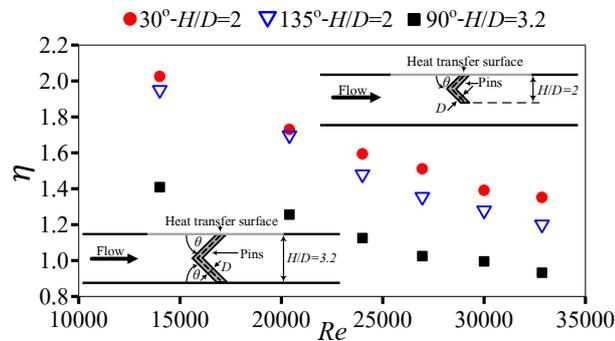
จากการไหลแบบหมุนควงคู่ (Counter rotating vortices) ในด้านหลังของพินใกล้พื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งพินตั้งตรงไม่มีคุณลักษณะการไหลดังกล่าวเกิดขึ้นและใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Narato *et al.* (2020) เมื่อพิจารณาถึงความดันสูญเสียมองในด้านของตัวประกอบความเสียดทานใน Figure 16 พบว่าการติดตั้งพินรูปตัววีเอียงในมุม  $30^\circ$  และ  $135^\circ$  ด้วย  $H/D=2$  สามารถช่วยลดความดันสูญเสียลงได้เป็นอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีติดตั้งพินตรงมุม  $90^\circ$  ด้วย  $H/D=3.2$  ส่งผลให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนของการติดตั้งพินรูปตัววีเอียงในมุม  $30^\circ$  และ  $135^\circ$  ด้วย  $H/D=2$  มีค่ามากกว่าการติดตั้งพินตรงมุม  $90^\circ$  ด้วย  $H/D=3.2$  ดังแสดงใน Figure 17 ดังนั้นในการพัฒนาการถ่ายเทความร้อน ลดความดันสูญเสียเพื่อเพิ่มค่าสมรรถนะเชิงความร้อนในช่องการไหล การติดตั้งพินรูปตัววีเอียงในมุม  $30^\circ$  และ  $135^\circ$  ด้วย  $H/D=2$  เป็นทางเลือกที่ดีเพื่อใช้แทนการติดตั้งพินตรงมุม  $90^\circ$  ด้วย  $H/D=3.2$



**Figure 15** Overall average Nusselt number vs. Reynolds number: Comparison between the best case of  $H/D=2$  and  $H/D=3.2$ .



**Figure 16** Friction factor vs. Reynolds number: Comparison between the best case of  $H/D=2$  and  $H/D=3.2$ .



**Figure 17** Thermal performance factor vs. Reynolds number: Comparison between the best case of  $H/D=2$  and  $H/D=3.2$ .

**สรุป**

จากผลการศึกษาคูณลักษณะการถ่ายเทความร้อนและค่าสมรรถนะเชิงความร้อนในช่องการไหลจากการติดตั้งแถวพินรูปตัววีเรียงหนึ่งแถว โดยในหนึ่งแถวประกอบไปด้วยพิน 9 ตัว ระยะห่างในแนวขวางกระแสการไหลกำหนดไว้ที่  $S_y=2D$  อัตราส่วนของความสูงพิน  $H/D=2$  และ  $3.2$  ถูกใช้ในการทดลอง ผลของมุมเอียงได้ศึกษาที่  $\theta=30^\circ, 45^\circ,$

$60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 135^\circ,$  และ  $150^\circ$  ตามลำดับ ช่วงของตัวเลขเรย์โนลด์ส์อยู่ระหว่าง 14,000 ถึง 33,000 พบว่า

1. กรณี  $H/D=2$  ผลของการติดตั้งพินรูปตัววีเอียงทั้งมุมแหลมและมุมป้านช่วยเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวได้เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีติดตั้งพินตรงมุม  $90^\circ$  แต่ในกรณี  $H/D=3.2$  ผลของการติดตั้งพินรูปตัววีเอียงทั้งมุมแหลมและมุมป้านไม่สามารถ

ช่วยเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวได้เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีติดตั้ง핀ตรงมุม  $90^\circ$

2. การติดตั้งฟินรูปตัววีเอียงทั้งมุมแหลมและมุมป้านในกรณี  $H/D=2$  และ  $3.2$  สามารถช่วยลดความดันสูญเสียได้อย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีติดตั้งฟินตรงมุม  $90^\circ$  ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากค่าตัวประกอบความเสียดทานด้วยการติดตั้งฟินรูปตัววีเอียงเปรียบเทียบกับฟินตั้งตรงกรณี  $H/D=2$  และ  $H/D=3.2$  สามารถลดลงได้สูงสุดอยู่ที่  $33\%$  และ  $47\%$  ตามลำดับ

3. กรณี  $H/D=2$  ผลของการติดตั้งฟินรูปตัววีเอียงทั้งมุมแหลมและมุมป้านช่วยเพิ่มค่าสมรรถนะเชิงความร้อนในช่องการไหลได้ซึ่งสามารถเพิ่มขึ้นได้สูงสุดอยู่ที่  $26\%$  เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีติดตั้งฟินตรงมุม  $90^\circ$  แต่ในกรณี  $H/D=3.2$  ผลของการติดตั้งฟินรูปตัววีเอียงในมุม  $30^\circ$  และ  $45^\circ$  เท่านั้นที่สามารถช่วยเพิ่มค่าสมรรถนะเชิงความร้อนในช่องการไหลได้เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีติดตั้งฟินตรงมุม  $90^\circ$

4. การติดตั้งฟินรูปตัววีเอียงในมุม  $30^\circ$  และ  $135^\circ$  ด้วยอัตราส่วนความสูงฟินที่  $H/D=2$  สามารถใช้แทนการติดตั้งฟินตรงมุม  $90^\circ$  ด้วยอัตราส่วนความสูงฟินที่  $H/D=3.2$  ได้ เนื่องด้วยฟินรูปตัววีเอียงในกรณีดังกล่าวเป็นตัวพัฒนาการถ่ายเทความร้อนลดความดันสูญเสียเพื่อเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนในช่องการไหล

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและเมคาทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องมือ สถานที่ รวมไปถึง รศ.ดร.ชยุต นันทคุติ ในการให้คำปรึกษากับผู้วิจัยมาโดยตลอด และขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย

เทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ที่ให้ทุนสนับสนุนการนำเสนองานวิจัย

## เอกสารอ้างอิง

- Chang, S.W., Yanng, T.L., Huang, C.C. and Chiang, K.F. 2008. Endwall heat transfer and Pressure drop in rectangular channels with attached and detached circular pin-fin array. **International Journal of Heat and Mass Transfer** 51(21-22): 5247-5259.
- Choi, I.K., Kim, T., Song, S.J. and Lu, T.J. 2007. Endwall heat transfer and fluid flow around an inclined short cylinder. **International Journal of Heat and Mass Transfer** 50(5-6): 919-930.
- Chyu, M.K., Oluyede, E.O. and Moon, H.K. 2007. Heat transfer on convective surface with pin-fins mounted in inclined angles, pp. 861-869. *In ASME Turbo Expo 2007: Power for Land, Sea, and Air.* The American Society of Mechanical Engineers, Montreal, Canada.
- Do, K.D.C., Chung, D.H., Tran, D.Q., Dinh, C.T., Nguyen, Q.H. and Kim, K.Y. 2022. Numerical investigation of heat transfer characteristics of pin-fins with roughed endwalls in gas turbine blade internal cooling channels. **International Journal of Heat and Mass Transfer** 195: 123125.
- Jubran, B.A., Hamdan, M.A. and Abdualh, R.M. 1993. Enhanced Heat Transfer Missing Pin and Optimization for Cylindrical Pin Fin Arrays. **ASME Journal of Heat Transfer** 115(3): 576-583.

- Kline, S.J. and McClintock, F.A. 1953. Describing uncertainties in single-example experiments. **Mechanical Engineering** 75: 3-8.
- Lau, S.C., Kim, Y.S. and Han, J.C. 1985. **Effects of Fin Configuration and Entrance Length on Local Endwall Heat/Mass Transfer in a Pin Fin Channel**. ASME Paper 85-WA/HT-62, The American Society of Mechanical Engineers, Houston, USA.
- Lawson, S.A., Thrift, A.A., Thole, K.A. and Kohli, A. 2011. Heat transfer from multiple row arrays of low aspect ratio pin fin. **International Journal of Heat and Mass Transfer** 54(17-18): 4099-4109.
- Luo, L., Yan, H., Du, W., Su, W., Wang, S. and Huang, D. 2022. Numerical study of a novel curved pin fin for heat transfer enhancement within aeroengine turbine blade. **Aerospace Science and Technology** 123: 107436.
- Metzger, D.E., Berry, R.A. and Bronson, J.P. 1982. Developing Heat Transfer in Rectangular Ducts with Staggered Arrays of Short Pin Fins. **ASME Journal of Heat Transfer** 104(4): 700-706.
- Moon, M.A. and Kim, K.Y. 2014. Analysis and optimization of fan-shaped pin-fin in a rectangular cooling channel. **International Journal of Heat and Mass Transfer** 72: 148-162.
- Narato, P., Wae-hayee, M., Abdullah, M.Z. and Nuntadusit, C. 2020. Effect of pin inclination angle on flow and heat transfer characteristics for a row of pins in a flow channel. **International Communications in Heat and Mass Transfer** 110: 104396.
- Narato, P., Wae-hayee, M., Kaewchoothong, N. and Nuntadusit, C. 2021. Heat transfer enhancement and flow characteristics in a rectangular channel having inclined pin arrays mounted on the endwall surface. **International Communications in Heat and Mass Transfer** 122: 105162.
- Takeishi, K., Oda, Y., Miyake, Y. and Motoda, Y. 2012. Experimental and numerical study on the convective heat transfer and pressure drop in rectangular ducts with inclined pin-fin on a wavy endwall, pp. 1061-1072. *In ASME Turbo Expo 2012: Turbine Technical Conference and Exposition*. The American Society of Mechanical Engineers, Copenhagen, Denmark.
- Webb, R.L. 1980. Air-Side Heat Transfer in Finned Tube Heat Exchangers. **Heat Transfer Engineering** 1(3): 33-49.
- Yang, Z., Luo, L., Cheng, H., Yan, H., Du, W. and Zhou, X. 2024. Numerical study of heat transfer enhancement by using protrusions in curved pin-fin arrays. **Physics of Fluids** 36(5): 055132.

การพัฒนาและการยอมรับเว็บแอปพลิเคชันการลงเวลาโดยใช้การระบุตัวตน  
ด้วยภาพและตำแหน่งของบุคลากรมหาวิทยาลัยเอกชน  
**Development and Acceptance of Time Attendance Web  
Application Using Identity Verification with Picture and Location  
of Personnel in Private Universities**

ปราโมทย์ สิทธิจักร<sup>1</sup> และ วิไรวรรณ แสนชนะ<sup>2\*</sup>

Pramote Sittijuk<sup>1</sup> and Wiraiwan Sanchana<sup>2\*</sup>

Received: 7 May 2022, Revised: 7 April 2023, Accepted: 21 June 2023

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันบันทึกเวลา (TAW) โดยใช้การยืนยันตัวตนพร้อมรูปภาพและตำแหน่งในมหาวิทยาลัยเอกชน และเพื่อศึกษาการยอมรับของบุคลากรต่อ TAW ประชากรเป็นหัวหน้าแผนกทรัพยากรมนุษย์และอาจารย์ 94 คนในมหาวิทยาลัยพิษณุโลก การเก็บรวบรวมข้อมูลใช้การสัมภาษณ์เชิงลึกและแบบสอบถาม ข้อมูลถูกวิเคราะห์ทางสถิติโดยการวิเคราะห์เนื้อหา สถิติเชิงพรรณนา และสถิติเปรียบเทียบ เว็บแอปพลิเคชันที่พัฒนาแล้วจะอยู่ในรูปแบบของเว็บที่ตอบสนองการแสดงผลบนคอมพิวเตอร์และอุปกรณ์พกพา โดยใช้ภาษาโปรแกรมแบบรหัสเปิดในการพัฒนา ได้แก่ ฟิเชซพี จาวาสคริปต์ และเจคิววี ประกอบด้วย 3 ฟังก์ชัน ได้แก่ การยืนยันตัวตนด้วยภาพถ่าย และตำแหน่งของพนักงานทางภูมิศาสตร์ บันทึกการทำงาน และรายงานสรุปการลงชื่อเข้าทำงานรายเดือน โดยภาพรวมบุคลากรมีความพึงพอใจต่อ TAW ในระดับสูง ( $\bar{X} = 4.46, SD=0.68$ ) บุคลากรตอบรับ TAW ในระดับสูง ( $\bar{X} = 4.08, SD=0.63$ ) บุคลากรที่มีเพศ อายุ และตำแหน่งต่างกันมีระดับการยอมรับที่แตกต่างกันของ TAW ในปัจจัยภายในและปัจจัยเสริมที่มีนัยสำคัญทางสถิติ .05

**คำสำคัญ:** การยอมรับ, เว็บแอปพลิเคชัน, การลงเวลา, มหาวิทยาลัยเอกชน

---

<sup>1</sup> คณะบริหารธุรกิจและการบัญชี มหาวิทยาลัยพิษณุโลก อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก 65000

<sup>1</sup> Faculty of Business and Accounting, Phitsanulok University, Mueang, Phitsanulok 65000, Thailand.

<sup>2</sup> คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก 65000

<sup>2</sup> Faculty of Science and Agricultural technology, Rajamangala University of Technology Lanna, Mueang, Phitsanulok 65000, Thailand.

\* Corresponding author, e-mail: Wiraiwans@gmail.com

## ABSTRACT

This research aims to develop a time attendance web application (TAW) by using identity verification with picture and location in private universities, as well as to study personnel's acceptance of the TAW. The population consisted of the Head of the Human Resource department and 94 instructors in Phitsanulok University. Data were collected through in-depth interviews and questionnaires, and were statistically analyzed using content analysis, descriptive statistics, and comparable statistics. The developed web application took the form of a responsive web, accessible on both computer and portable devices which was developed with open-source web programming languages: PHP, Java script, and JQuery. It consisted of 3 main functions: identity verification through personnel pictures and geographical location for sign-in and sign-out work attendance points, work-in record, and monthly work attendance summary reports. Overall, the personnel showed a high level of satisfaction with the TAW ( $\bar{x}=4.46$ ,  $SD=0.68$ ) and also accepted it at a high level ( $\bar{x}=4.08$ ,  $SD=0.63$ ). Personnel of different sexes, ages, and position levels showed varying levels of acceptance of the TAW in both the internal and supplemented factors, with statistical significance at .05.

**Key words:** acceptance, web application, time attendance, private university

## INTRODUCTION

The changes in smart organization and the effects of the pandemic Covid-19 situation have changed personnel's ways of working, shifting from traditional document-based methods to the use of modern technologies and touchless methods in various public environments (Wibirama *et al.*, 2020). Specifically, in the routine duty of personnel in most organizations, they have to sign their names for daily attendance. In the traditional process of the Human Resource Department Phitsanulok University, names are signed on documents. Therefore, it is difficult to compile a monthly report with useful information that can be used to consider personnel's salaries and monitor their responsibilities within the organization (Human Resource Department, 2022). This is because most private universities focus on hiring personnel who can work to justify their salary. Implementing modern technology for personnel signing will improve the document process and enable effective summarization into monthly work reports. It can also immediately calculate and notify the number of personal leave days for both personnel and human resource officers.

Web application is an effective tool that can widely support many services for personnel in an organization. The web

application also delivers information and services to users in other organizations in order to build socialization and collaboration (Yusufu *et al.*, 2022). A The Time Attendance Web application (Taw) is a form of web application integrated with identity verification using picture and location technique to service time attendance for personnel staying around the university area. Personnel no longer need to queue up to sign their names on a document.

On the contrary, they can sign their names faster via this developed web application. Moreover, in implementing new technology in all organization, it often suffers from the problem of narrow technology usage among aged personnel who may often encounter biophysical and psychosocial changes that affect how they interact and react to the adopted technologies (Kaufman and Elder Jr, 2002; Moschis, 1992). This is an important cause of failure for technologies in private universities. Therefore, developing an effective web application should be simultaneously performed along with studying and building personnel's acceptance of the web application. The Technology Acceptance Model theory (TAM) was used to study the personnel's perception and attitude towards the developed time attendance software in external, internal, and supplemented factors.

TAM posits that users will directly decide to use technology by themselves based on their individual intentions and behaviors after perceiving technology's usefulness, ease of use, and user-friendliness (Natasia *et al.*, 2022). It is expected that this research and innovation development will achieve the goal of changing the university to a smart university in the near future. It also creates an effective innovation product that will be widely used and accepted by personnel of all ages.

## MATERIALS AND METHODS

This research used the following effective methodology and related resources to achieve the research objectives.

### 1. Population

The population consisted of the head of the Human Resource department and 94 instructors the Phitsanulok University.

### 2. Research method

The research methods were defined according to the research objectives into 2 main parts as follows:

#### 2.1 Developing the TAW

This stage was divided into 3 parts.

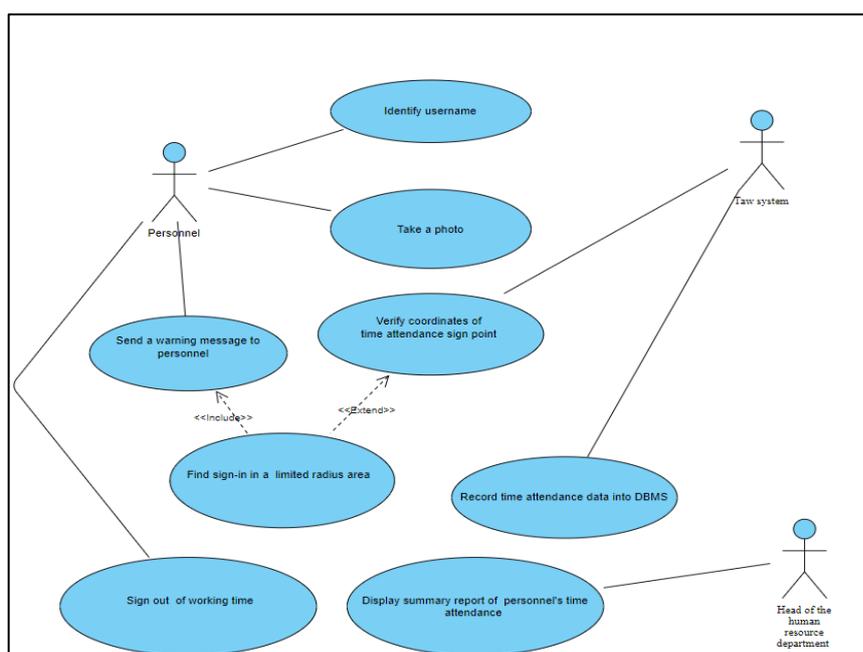
2.1.1 Surveying system requirement from the head of Human Resource department

An in-depth interview was used with the head of Human Resource department at Phitsanulok University to study the problems of the traditional sign-on-document system and to gather requirements for the work signing system from officers. Basic data were collected to be used for designing and developing a better system with web-based technology.

2.2.2 Developing and implementing the TAW in a real working process at Phitsanulok university

The developed web application architecture was designed to integrate with the main personal database to access each personnel's profile and permission in the work signing process. The open-source software - PHP, Java script, JQuery – was chosen for developing this web application and building the web user interfaces that support adaptive display on devices with different sizes, such as computers, laptops, smartphones, and other portable devices, using the responsive web techniques. After the web application was completed, the web application service was continuously implemented and promoted to the 94 Phitsanulok university's instructors and officers via electronic media and training.

TAW's processing functions can be explained by using a case diagram as follows.

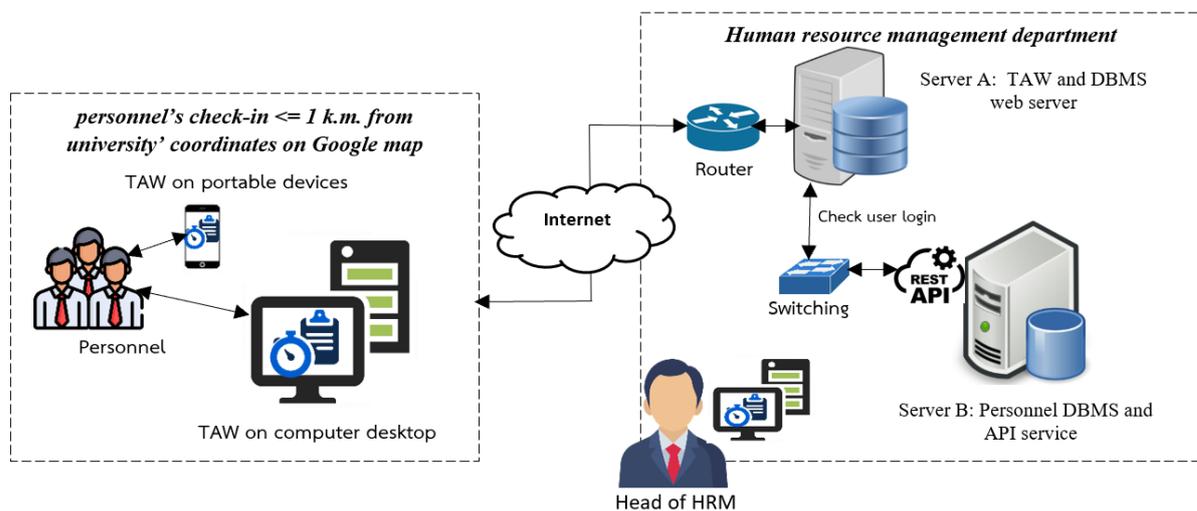


**Figure 1** Case diagram of TAW's processing functions

From Figure 1, TAW consists of 4 sub-processing functions: 1) identifying personnel's username and take a photo; 2) verifying coordinates of time attendance sign-in point; 3) recording sign-in and sign-out of time attendance data into the database management system (DBMS); and 4) displaying summary report of personnel's time attendance. when verifying the coordinates and distance from the university to the personnel's sign-in point, TAW will calculate the latitudes and longitudes of the university and personnel's points to determine the distance in kilometers. If some personnel's distance is more than one kilometer from the

university's coordinates on Google map, the TAW system will setup a point on the computer desktop or personnel's mobile devices. Then it will send a warning message about incorrect sign-in or sign-out of time attendance via the web user interface.

The TAW's system architecture was designed to connect with personnel's account database via API service of the Human Resource Management (HRM) department operating on the university's network infrastructure for effective management of personnel's work attendance information as follows:

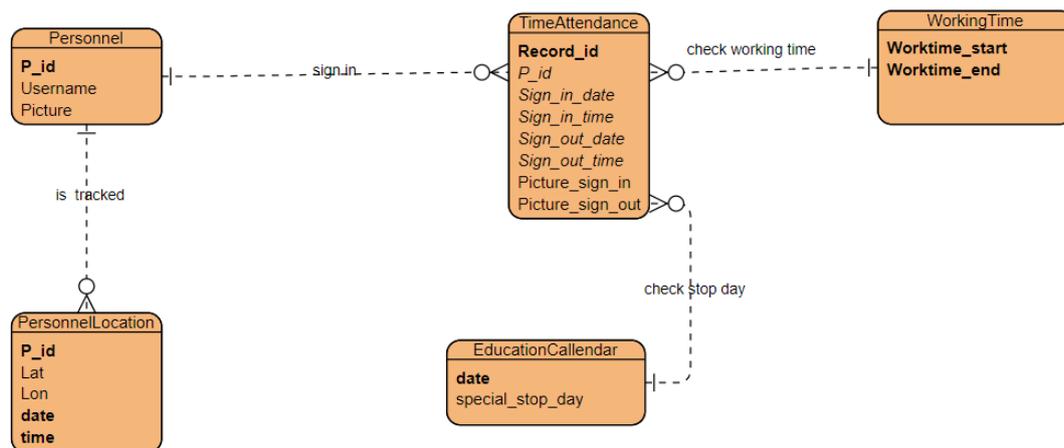


**Figure 2** TAW's system architecture

From Figure 2, Server A of TAW and DBMS receives requesting services from personnel who signs in to work attendance via their computer desktop or mobile device within a limited radius area on the internet network. Then, the Server A sends the personnel's user login to Server B of the API service to identify their authentication. The Server B sends a response indicating correct or incorrect user authentication to approve and record

personnel's time attendance data into TAW's DBMS. The head of HRM can access TAW on Server A via the Internet working as WAN (wide area network) to summarize monthly reports and update personnel's profiles on the DBMS on Server B through a local area network (LAN).

The TAW's DBMS was designed based on relational database concept and presented by the entity relationship diagram (E-R diagram) as follows.



**Figure 3** E-R diagram of TAW's DBMS

From Figure 3, TAW's DBMS consists of 5 entities or data tables that track personnel through their geographical location (Personnellocation) for sign-in time attendance in a limited radius area. The personnel's sign-in and sign-out date and time data are checked in EducationalCalendar and WorkingTime table to correctly store data into TimeAttendance table. If the system finds that the personnel signs in on

a holiday or before working hours, it will send a warning message to them via a web user interface.

To calculate the distance between the personnel's sign-in coordinates point (mk1) and the university coordinates point (mk2), a function was developed using Javascript language to track both coordinates and convert to units of kilometers (return d) as follows:

```

function haversine_distance(mk1, mk2) {
    var R = 6371.0710; // Radius of the Earth in miles
    var rlat1 = mk1.position.lat() * (Math.PI/180); // Convert degrees to radians
    var rlat2 = mk2.position.lat() * (Math.PI/180); // Convert degrees to radians
    var difflat = rlat2-rlat1; // Radian difference (latitudes)
    var diffllon = (mk2.position.lng()-mk1.position.lng()) * (Math.PI/180); // Radian difference (longitudes)
    var
        d
        =
        2
        *
        R
        *
        Math.asin(Math.sqrt(Math.sin(difflat/2)*Math.sin(difflat/2)+Math.cos(rlat1)*Math.cos(rlat2)*Math.sin(diffllon/2)*Math.sin(diffllon/2)));
    return d;
}
    
```

**Figure 4** Source code for converting coordinates to kilometers

2.2.3 Assessing users' satisfaction with the web application's form and performance

In the user training process, the web application performance was assessed with a questionnaire to gather users' feedback for use in editing and developing a more effective system.

2.2 Studying personnel's acceptance of the web application

When the web application was used in the period of 2 weeks, questionnaires were used for studying the personnel's acceptance of the web application. Results of this process will be a guideline to adjust the servicing process and the web application's function form to specially support the users' needs, based on different personal factors.

### 3. Research instruments

The research instruments were in-depth interviews and questionnaires for collecting data that can be explained in details according to the research objectives as follows:

#### 3.1 Developing the Taw

This step used the following 2 instruments for collecting data.

3.1.1 An in-depth interview for studying problems of the traditional sign-on-document and an officer's requirements for the work signing system.

It collected data in 2 parts: 1) personal data of the sample, and 2) users' opinions about the work signing processes, based on 3 questions relating to work signing regularities and documents, problems of the traditional work signing system, and new requirements for improving and developing the web application to replace the document method.

3.1.2 A questionnaire for assessing users' satisfaction of the web application performance.

It collected data in 2 parts: 1) personal data of the sample, and 2) users' satisfaction with the web application based on 3 aspects: function's performance, user-friendliness, and security.

3.2 Studying personnel's acceptance of the web application

A questionnaire was used to collect data in 2 parts: 1) personal data of the sample, and 2) personnel's acceptance of the web application for work signing in the following 3 factors.

3.2.1 External factors, including quality of the software, information service, and building users' motivation in using the software (Chen and Tseng, 2012; Motaghian *et al.*, 2013; Sánchez and Hueros, 2010)

3.2.2 Internal factors, including user's anxiety, self-efficacy, perceived usefulness and perceived ease of use, intention to use, and learning styles

3.2.3 Supplemented factors, including personal knowledge and skills, speed of internet signal, and comfortable internet assessing (Bhrommalee, 2011).

The preciseness of both questionnaires (in topic 3.1.2 and 3.2) was assessed with IOC values by three information management specialists. It was found that all questions in both questionnaires have IOC values between 0.60 – 1.00, which meet the standard quality criteria and can be used for collecting data with samples in the next step.

### 4. Data collection

This research gathered data with in-depth interviews to study the state of work signing operations and problems from the head of Human Resource department, and questionnaires were used to study the level of satisfaction and acceptance of the web application from 94 instructors and officers at Phitsanulok university.

### 5. Data analysis

5.1 The data from the in-depth interview, which aimed to study the problems of the traditional sign-on-document and the requirements of officers for the work signing system, were analyzed with the content analysis method.

5.2 The data from the questionnaire for studying satisfaction and acceptance of the web application were analyzed using descriptive statistics for frequency, percentage, mean, standard deviation, as well as inferential statistics such as t-tests and f-tests for comparison.

## RESULTS AND DISCUSSION

Results of this research can be showed as follows:

### 1. Results of developing and implementing the TAW

1.1 Results of surveying system requirement from the head of Human Resource department.

The new web-based signing system supported distancing in the Covid 19 pandemic situation. It could manage queues in daily work and reduce the risk of spreading the Covid 19 infection (Sun *et al.*, 2020). It could also summarize reports necessary for effectively considering personnel's salaries and disciplined penalties. The TAW applied a responsive web technique design and selected to use open-source web programming languages.

It could support flexible access on both computers and portable devices, such as smartphones, iPads, and tablets (Jiang *et al.*, 2014) for

signing in within the limited area zone. It also reduced excessive and continuous budget (Chigwada, 2022).

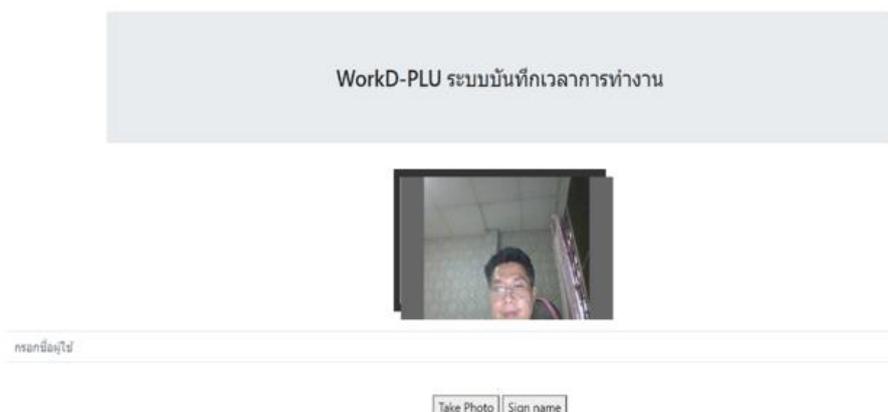
**Table 1** Results from survey of system requirement from the head of human resource department

Question	Results from interviewing
1. Problem states of the traditional sign-on-document system	<ul style="list-style-type: none"> <li>- It was difficult to summarize the monthly signing report.</li> <li>- Most personnel often forget to sign out from work time.</li> <li>- The traditional document system could not immediately notify personnel of their remaining number of leave days.</li> <li>- Too much time was spent queuing to sign in, with a possible risk of the Covid-19 infection from touching the document.</li> </ul>
2. User's requirements of the work signing system.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- The system can print out summary reports for administrators' decisions.</li> <li>- The system can warn the personnel who forget to sign-in and sign-out of work each day.</li> <li>- The system can notify personnel of their leave day data.</li> <li>- The system will allow personnel to sign name within a radius of 1 kilometer in the university area.</li> </ul>
3. Related documents and rules of signing process needed in developing the system.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- The system must record personnel who come to work late after 09.00 a.m. or do not sign their name for work, marking them as absentees.</li> <li>- Personnel who are absent from work three times or more in a month will receive a warning document from the Human Resource department.</li> <li>- Results of signing in for work will be used to consider personnel rewards for adjusting their salary and position each year.</li> </ul>

1.2 Results of developing and implementing the TAW's user interfaces and functions.

The web application was provided on a public server at <https://ojs.plu.ac.th/workio>.

It consisted of many functions that supported the collection of users' requirements, as shown in Table 1.

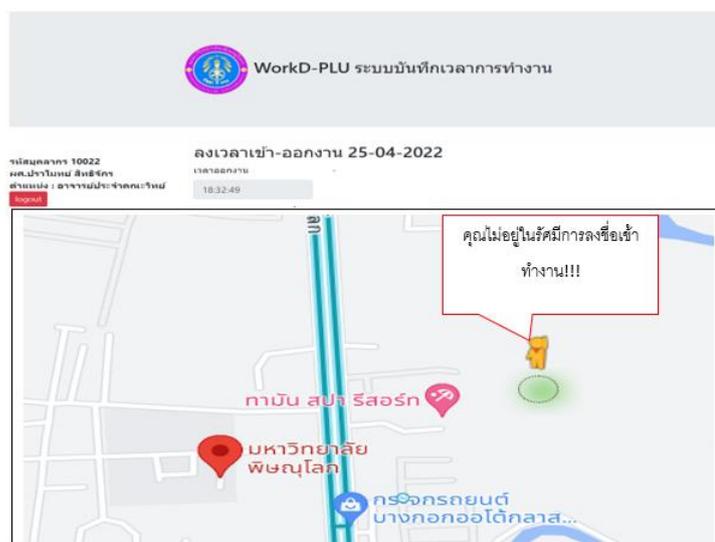


**Figure 5** Enter the personnel's username and take the photo

From Figure 5, the personnel within the radius of university area enter their official usernames assigned by the university, then take their photos for signing in and validation by the system. In this process, the system also verifies the coordinates of each personnel as latitude and longitude of each

personnel for validating เป็น to validate their sign-in points.

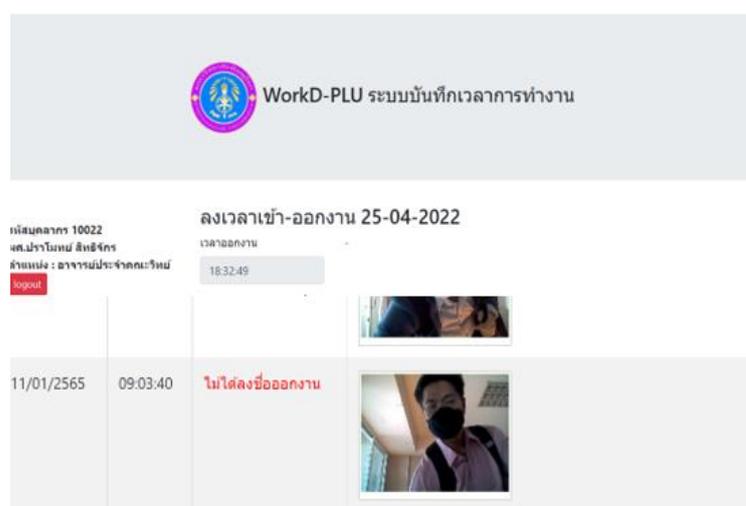
When the system detects an incorrect sign-in point, it will immediately warn the personnel and not allow them to sign-in for work attendance, as shown in Figure 6.



**Figure 6** Verify and warn about out-of-radius signing

From Figure 6, the system detects the personnel's check-in distance between the university location and the personnel location. If it finds that they are over a

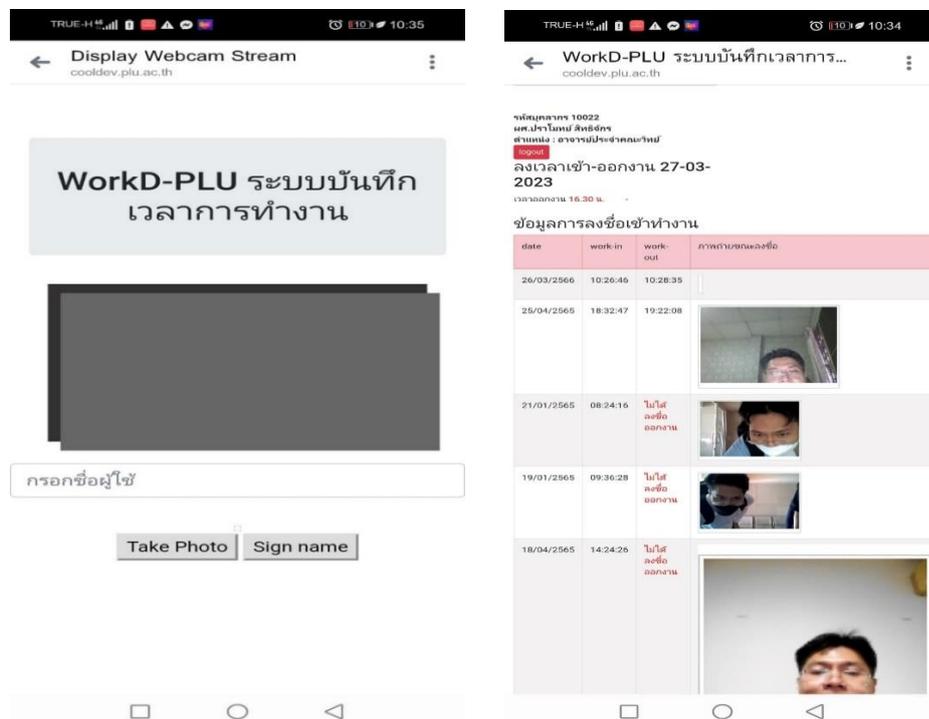
radius of 1 kilometer (personnel's check-in > 1 k.m.), it will send a warning to them via the web user interface and record their incorrect work attendance sign-in.



**Figure 7** Show private signing records

From Figure 7, the personnel can access their private time attendance report and search by day, week, and month and they can also sign out from this function.

The TAW’s user interfaces can use responsive web techniques to display on mobile devices as follows:



**Figure 8** Display TAW’s user interfaces on mobile devices

From Figure 8, TAW’s user interfaces support both computer desktops and mobile devices, such as smartphones, tablets, and

iPads. They will build responsive frames with HTML and CSS language.

**รายงานสรุปข้อมูลการลงชื่อเข้าทำงานของบุคลากร**

รายงาน  ถึง

รายการที่	ชื่อ - นามสกุลบุคลากร	วันที่ลงชื่อเข้างาน	เวลาที่ลงชื่อเข้างาน	เวลาที่ลงชื่อออกงาน	รูปขณะลงชื่อ
1	mr.birth namuang	31/01/2565	07:51:57		
2	อาจารย์ชาติ จำลองกุล	31/01/2565	08:00:41		
3	Mrs.kedsarin ggggg	31/01/2565	08:03:26		
4	Misssoisinee khammai	31/01/2565	08:04:11		
5	missapinya permboom	31/01/2565	08:10:25		
6	อาจารย์วิรัช ธีระพลิน	31/01/2565	08:13:32		
7	Missnamphet char	31/01/2565	08:14:03		

**Figure 9** TAW’s Report function

From Figure 9, the TAW's report function serves to identify search criteria lists and print reports according to day, month, personnel identity number, first name, last name, and personnel's department.

It supports printing on A4-size paper in both vertical and horizontal orientations.

1.3 The results of assessing 94 users' satisfaction of TAW's performance are resented in Table 2.

**Table 2** Results of assessing users' satisfaction with the web application

Assessment topic	Satisfaction level		Interpretation	Ranking
	$\bar{x}$	SD		
<b>Function' s performance aspect</b>				
1. The recording of the sign-in and sign-out times is accurate according to the real clock.	4.82	0.65	Very high	1*
2. The daily reporting name list of personnel who are present or absent from work is correct, aiding in the decision-making of the university's executive administrators.	4.75	0.78	Very high	2
3. The private signing statistics data of each personnel are correctly reported to support future leave day plans.	4.20	0.74	High	3
<b>Average of Function' s performance aspect</b>	<b>4.59</b>	<b>0.72</b>	<b>Very high</b>	<b>1</b>
<b>User-friendliness aspect</b>				
4. Proper categorization of the menu to access the application's functions	4.32	0.58	High	1*
5. Insertion of data into the application's input form	4.15	0.61	High	3
6. Displaying and printing of summary reports	4.25	0.81	High	2
<b>Average of User-friendliness</b>	<b>4.24</b>	<b>0.67</b>	<b>High</b>	<b>3</b>
<b>Security aspect</b>				
7. Login to the personnel's private functions	4.52	0.54	Very high	2
8. Safe keeping of private personal information, such as username, password, and telephone number	4.72	0.74	Very high	1*
9. Accurate assignment of roles for accessing private report data to the correct users.	4.41	0.65	High	3
<b>Average of Security</b>	<b>4.55</b>	<b>0.64</b>	<b>Very high</b>	<b>2</b>
<b>Overall average</b>	<b>4.46</b>	<b>0.68</b>	<b>High</b>	

From Table 2, the overall satisfaction level of personnel with the TAW is high ( $\bar{x}=4.46$ ,  $SD=0.68$ ). The level of users' satisfaction can be ranked in descending order according to the average satisfaction score as follows: 1) Performance aspect is at a very high level ( $\bar{x}=4.59$ ,  $SD=0.72$ ). The highest average is for recording the sign-in and sign-out time is accurate เป็น accurately according to real clock. 2) User-friendliness

aspect is also at a very high level ( $\bar{x}=4.55$ ,  $SD=0.64$ ). The highest average is for the proper categorization of the menu to access the application's functions. 3) security aspect is at a high level ( $\bar{x}=4.24$ ,  $SD=0.67$ ). The highest average is for the safekeeping of private personal information, such as username, password, and telephone number.

2. Results from studying personnel's acceptance of TAW can be presented in Table 3.

**Table 3** Level of personnel's acceptance of the web application

Acceptance factors	Acceptance level		Interpretation	Ranking
	$\bar{x}$	SD		
<b>External factors</b>				
1. Quality of the signing web application	4.02	.455	High	1*
2. Quality of problem-solving service about the signing web application by the administrator team	3.95	.564	High	2
3. Motivation building in using the signing web application in replace of the traditional documentary signing system	3.75	.955	High	3
<b>Average of External factors</b>	<b>3.91</b>	<b>0.66</b>	<b>High</b>	<b>3</b>
<b>Internal factors</b>				
4. Elimination of user's anxiety to use the signing web application	3.78	.666	High	3
5. Personal knowledge and skills in using the signing web application	3.54	.666	High	4
6. Perceived usefulness and ease of use for the signing web application	4.24	.766	High	2
7. Intention to use the signing web application	4.35	.654	High	1*
<b>Average of Internal factors</b>	<b>3.98</b>	<b>0.69</b>	<b>High</b>	<b>2</b>
<b>Supplemented factors</b>				
8. Speed of internet signal in the university area for accessing the signing web application	4.45	.654	High	2
9. Suitability of setting the signing system's point where personnel can access comfortably	4.52	.456	Very high	1*

**Table 3** (Continuous)

Acceptance factors	Acceptance level		Interpretation	Ranking
	$\bar{x}$	SD		
10. Training personnel for use of the signing system before using it in the real work process	4.07	.554	High	3
<b>Average of Supplemented factors</b>	<b>4.35</b>	<b>0.55</b>	<b>High</b>	<b>1</b>
<b>Overall average</b>	<b>4.08</b>	<b>0.63</b>	<b>High</b>	

From Table 3, the overall acceptance level of personnel toward TAW is high ( $\bar{x}=4.08$ ,  $SD=0.63$ ). The level of personnel's acceptance of the web application in all aspects is high and can be sorted in descending order according to the acceptance average as follows: 1) Supplemented factors ( $\bar{x}=4.35$ ,  $SD=0.55$ ) have the highest average for accepting the quality of the signing web application. 2) Internal factors ( $\bar{x}=3.98$ ,  $SD=0.69$ ) have the highest average for the intention to use the signing web application.

3) External factors ( $\bar{x}=3.91$ ,  $SD=0.66$ ) have the highest average for the suitability of setting the signing system's point where personnel can access comfortably.

The personnel's acceptance of the web application was also analyzed with comparable statistics using t-tests and f-tests to test the research hypothesis that personnel with different basic data also have different levels of acceptance of the web application. Results of the analysis are shown in Table 4.

**Table 4** Comparing personnel's acceptance of the web application according to gender with t-test

Gender	N	$\bar{x}$	SD	t	df	sig
Male	94	4.12	0.61	3.67	9	0.01*
Female	94	3.91	0.85			

\* Statistically significant at .05

From Table 4, personnel of different genders have different levels of acceptance of the TAW (sig = 0.01) with statistical significance. Male personnel have a higher acceptance of the web application than female personnel ( $\bar{x} = 4.12 > \bar{x} = 3.91$ ).

When considering each acceptance list, it was found that both male and female personnel were different in the internal factor aspect of eliminating user anxiety to use the TAW (sig=0.04).

**Table 5** Comparing personnel's acceptance of the web application according to other personal factors with f-test

personal factors	N	$\bar{x}$	SD	f	sig
<b>Age</b>					
Lower 30 years	94	4.15	0.58		
30 – 39 years	94	4.12	0.51		
40 – 49 years	94	4.09	0.74		
50 – 59 years	94	3.75	0.84	<b>3.12</b>	0.03*
Equal to or more than 60 years	94	3.52	0.79		
<b>Education level</b>					
Bachelor degree	94	4.08	0.81		
Master degree	94	4.15	0.75		
Doctoral degree	94	4.05	0.76	2.54	0.15

**Table 5** (Continuous)

personal factors	N	$\bar{x}$	SD	f	sig
<b>Position</b>					
Administrator	94	3.85	0.89	3.25	0.03*
Teacher	94	4.01	0.68		
Officer	94	4.19	0.64		
<b>Number of experience years</b>					
Lower 5 years	94	4.15	0.65	2.65	0.06
5 – 10 years	94	4.08	0.52		
More 10 years	94	4.02	0.74		

\* Statistically significant at .05

From Table 5, personnel who are different in age and position have different levels of acceptance of the web application with statistical significance at .05. Younger personnel have higher acceptance of the web application than older personnel (lower age's  $\bar{x}$  = 4.15 to higher age's  $\bar{x}$  = 3.52). When considering each acceptance factor, it was found that younger and older personnel were different in the internal factors of eliminating user anxiety to use the signing web application and personal knowledge and skills in using the signing web application (sig=0.03). The personnel who hold different positions have different levels of acceptance of the web application in the supplemented factor of training personnel for use of the signing system before using it in the real work process (Administrator's  $\bar{x}$  = 3.85, Teacher's  $\bar{x}$  = 4.01, and Officer's  $\bar{x}$  = 4.19, sig =0.03).

The developed web application received high satisfaction in all aspects from users because it was designed and developed based on users' requirements, documentary reviews, and related technology surveys. After the development was completed, users' technology skills were enhanced through training that provided web application knowledge in the form of a brief infographic manual. These methods led to high overall users' acceptance of the web application. When comparing personnel's acceptance of the web application according to personal factors, it was found that personnel who differ in gender, age, and position have varying levels of acceptance of the web application in both the internal and

supplemented factors, with statistical significance. This is because most female users often experience more anxiety when starting to use the new signing system than male users, as mentioned in the research by Somporn Rungreangkulkij and Phunnapa Kittirattanapaiboon (Rungreangkulkij and Kittirattanapaiboon, 2021), which states that most women suffer from depression and anxiety more than men. Therefore, the developer team should continuously provide recommendations and monitor users with different requirements and skills in order to reduce their anxiety when transitioning to the new technology.

## CONCLUSION

The TAW developed with responsive web application development consists of 3 main functions: identity verification by picture and location, work-in record, and monthly summary report. The proposed TAW can reduce time spent managing work attendance queues and support personnel in checking their leave days. After the web application was finished, the related TAW usage knowledge was provided to the personnel in the form of a brief infographic manual and training to improve the personnel's technology skills and acceptance of the TAW. To enhance the performance of time attendance technological innovation in the near future, image processing abilities and deep learning techniques should be applied to detect personnel's faces instead of typing usernames. Moreover, Internet-of-things (IoT) technology and medical sensors can also be integrated into this software to

measure personnel's vital health signs and assess their health states related to working competency in future research.

## REFERENCES

- Bhrommalee, P. 2011. Student acceptance of webbased learning: A quantitative analysis within a public University in Thailand. Doctor of Philosophy (Applied Management and Decision Sciences, Walden University.
- Chen, H.R. and Tseng, H.F. 2012. Factors that influence acceptance of web-based e-learning systems for the in-service education of junior high school teachers in Taiwan. **Evaluation and program planning** 35(3): 398-406.
- Chigwada, J.P. 2022. Open-Source Software Use in Libraries in Developing Countries, p. 22. *In* Lamba, M., eds. **Technological Advancements in Library Service Innovation**. IGI Global, United States.
- Human Resource Department. 2022. **Interviewing Results About the Signing Problems and Requirements**. Publish documents, Human resource department, Phitsanulok University.
- Jiang, W., Zhang, M., Zhou, B., Jiang, Y. and Zhang, Y. 2014. Responsive web design mode and application, pp. 1303-1306. *In* **2014 IEEE Workshop on Advanced Research and Technology in Industry Applications (WARTIA)**. IEEE, Ottawa, Canada.
- Kaufman, G. and Elder Jr, G.H. 2002. Revisiting age identity: A research note. **Journal of Aging Studies** 16(2): 169-176.
- Moschis, G. 1992. **Marketing to Older Consumers: A Handbook of Information for Strategy Development**. Bloomsbury Academic, England.
- Motaghian, H., Hassanzadeh, A. and Moghadam, D.K. 2013. Factors affecting university instructors' adoption of web-based learning systems: Case study of Iran. **Computers & Education** 61: 158-167.
- Natasia, S.R., Wiranti, Y.T. and Parastika, A. 2022. Acceptance analysis of NUADU as e-learning platform using the Technology Acceptance Model (TAM) approach. **Procedia Computer Science** 197: 512-520.
- Rungreangkulkij, S. and Kittirattanapaiboon, P. 2021. The impact of gender on mental health and concepts of gender approach mental health policy. **Journal of Mental Health of Thailand** 29(3): 259-272. (in Thai)
- Sánchez, R.A. and Hueros, A.D. 2010. Motivational factors that influence the acceptance of Moodle using TAM. **Computers in Human Behavior** 26(6): 1632-1640.
- Sun, H.C., Liu, X.F., Xu, X.K. and Wu, Y. 2020. Analysis of COVID-19 spreading and prevention strategy in schools based on continuous infection model. **Wuli Xuebao/Acta Physica Sinica** 9(24): 1-23.
- Wibirama, S., Santosa, P.I., Widayarani, P., Brilianto, N. and Hafidh, W. 2020. Physical discomfort and eye movements during arbitrary and optical flow-like motions in stereo 3d contents. **Virtual Reality** 24(1): 39-51.
- Yusufu, S.O., Elizabeth, A.Q. and Abel, O.A. 2022. Information Communication Technology and The Performance of Selected Retail Business Outlets in Abuja Nigeria. **Asian Journal of Management, Entrepreneurship and Social Science** 2(1): 87-97.

## การพัฒนาแพลตฟอร์มดิจิทัลสำหรับธุรกิจการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืดในท้องถิ่น

## Digital Platform Development for Local Freshwater

## Aquaculture Businesses

อภิรักษ์ จุ่นกรณ์<sup>1</sup> รุจิราวดี ธรรมแสง<sup>2</sup> และ ภรณ์ยา ปาลวิสุทธิ์<sup>1\*</sup>Apinan Junkorn<sup>1</sup>, Rujirawadee Thammasang<sup>2</sup> and Paranya Palwisut<sup>1\*</sup>

Received: 1 February 2023, Revised: 15 July 2023, Accepted: 26 July 2023

## บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์คือ 1) เพื่อออกแบบและพัฒนาแพลตฟอร์มดิจิทัลสำหรับธุรกิจการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืดในท้องถิ่น 2) เพื่อประเมินแพลตฟอร์มดิจิทัลสำหรับธุรกิจการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืดในท้องถิ่นตามมาตรฐานแอปพลิเคชันสำหรับอุปกรณ์เคลื่อนที่ และ 3) เพื่อประเมินความพึงพอใจการใช้งานแพลตฟอร์มกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษา คือ เกษตรกรประมงน้ำจืดในท้องถิ่น จำนวน 20 คน เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยได้แก่ แพลตฟอร์มดิจิทัลสำหรับธุรกิจการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืดในท้องถิ่น แบบประเมินแพลตฟอร์มดิจิทัลตามมาตรฐานแอปพลิเคชันสำหรับอุปกรณ์เคลื่อนที่ และแบบประเมินประสิทธิภาพของแพลตฟอร์มดิจิทัล สถิติที่ใช้ในการวิจัยได้แก่ ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ผลการวิจัย พบว่า 1) แพลตฟอร์มดิจิทัลสำหรับธุรกิจการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืดในท้องถิ่นสามารถแสดงผลได้ทั้งคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลและอุปกรณ์พกพา การทำงานของระบบแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ เว็บแอปพลิเคชันด้าน Front-End และเว็บแอปพลิเคชันด้าน Back-End 2) ผลการประเมินแพลตฟอร์มตามมาตรฐานแอปพลิเคชันสำหรับอุปกรณ์เคลื่อนที่ โดยผู้เชี่ยวชาญ ในภาพรวมอยู่ในระดับมาก ( $\bar{X} = 4.32, SD = 0.48$ ) และ 3) ผลประเมินความพึงพอใจการใช้งานแพลตฟอร์มจากกลุ่มผู้ใช้งาน ในภาพรวมอยู่ในระดับมาก ( $\bar{X} = 4.40, SD = 0.74$ )

คำสำคัญ: เทคโนโลยีดิจิทัล, แพลตฟอร์มดิจิทัล, การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืด

<sup>1</sup> สาขาวิชาวิทยาการข้อมูล คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม อำเภอเมือง จังหวัดนครปฐม 73000

<sup>1</sup> Department of Data Science, Faculty of Science and Technology, Nakhon Pathom Rajabhat University, Muang, Nakhon Pathom 73000, Thailand.

<sup>2</sup> สาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม อำเภอเมือง จังหวัดนครปฐม 73000

<sup>2</sup> Department of Computer Science, Faculty of Science and Technology, Nakhon Pathom Rajabhat University, Muang, Nakhon Pathom 73000, Thailand.

\* ผู้นิพนธ์ประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): paranya@npru.ac.th Tel: 08 6768 4979

## ABSTRACT

This research aims to: 1) design and develop a digital platform for local freshwater aquaculture businesses, 2) evaluate the digital platform for local freshwater aquaculture businesses based on mobile application standards, and 3) assess user satisfaction. The sample group also included 20 local inland fishermen. The research tools were the digital platform, the digital platform evaluation form based on mobile application standards, and a satisfaction questionnaire. The statistics used in this research are average ( $\bar{X}$ ) and standard deviation (*S.D.*). The research findings showed that: 1) the digital platform for local freshwater aquaculture businesses is divided into two parts: front-end web applications and back-end web applications, 2) the level of digital platform evaluation results by five experts is high ( $\bar{X}$  = 4.32, *S.D.* = 0.48), and 3) the level of user satisfaction with the digital platform is high ( $\bar{X}$  = 4.40, *S.D.* = 0.78).

**Key words:** digital technology, digital platform, freshwater aquaculture

### บทนำ

ในสถานการณ์ปัจจุบัน การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำมีความสำคัญเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเกษตรกรได้แจ้งขึ้นทะเบียนเกษตรกรผู้เพาะเลี้ยงสัตว์น้ำมากขึ้นต่อเนื่องจากปี 2564 จากการศึกษาที่ภาครัฐให้ความช่วยเหลือเกษตรกรที่ประสบเหตุอุทกภัย รวมถึงสภาพอากาศโดยทั่วไปที่เอื้ออำนวย ทำให้เกษตรกรขยายพื้นที่เพาะเลี้ยงมากขึ้น ประกอบกับราคาสัตว์น้ำหลายชนิดในช่วงปีที่ผ่านมาอยู่ในเกณฑ์ดี จึงทำให้เกษตรกรเพิ่มการผลิตและมีการบำรุงดูแลรักษามากขึ้น การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจึงมีการเลี้ยงหลายรูปแบบ เช่น การเลี้ยงปลาชนิดเดียว (Monoculture) หรือเลี้ยงหลายชนิดรวมกัน (Polyculture) นอกจากนี้ยังมีการเลี้ยงปลาน้ำจืดร่วมกับกิจกรรมเกษตรอย่างอื่น (Integrated) เช่น เลี้ยงร่วมกับการเลี้ยงปศุสัตว์ การปลูกพืช/ผลไม้ หรือร่วมกับการทำนา ส่วนใหญ่เป็นการเพาะเลี้ยงปลากินพืช รองลงมาเป็นปลากินเนื้อ ผลผลิตจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืดในช่วงเวลาที่ผ่านมา มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในช่วงเวลา 10 ปี ที่ผ่านมา (พ.ศ. 2555-2564) มีจำนวนฟาร์มเลี้ยงเฉลี่ย 522,855

ฟาร์มต่อปี (ร้อยละ 92.79) เนื้อที่ 825,665 ไร่ต่อปี (ร้อยละ 65.30) มีผลผลิตเฉลี่ย 428,022 ตันต่อปี (ร้อยละ 43.85) คิดเป็นมูลค่า 25,183 ล้านบาทต่อปี (ร้อยละ 27.10) โดยผลผลิตและมูลค่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในอัตราร้อยละ 1.88 และ 2.74 ต่อปี ผลผลิตและมูลค่าสัตว์น้ำจืดจากการเพาะเลี้ยง พ.ศ. 2565-2568 คาดการณ์ว่าจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในอัตราร้อยละ 0.89 และ 1.10 ต่อปี ตามลำดับ (Fishery Statistics Group, 2023) การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืด ได้พบปัญหาการขาดแคลนลูกพันธุ์คุณภาพ ปัญหาต้นทุนการผลิตสูงในการเพาะเลี้ยงทำให้การส่งออกไม่สามารถแข่งขันได้ และปัญหาสภาพอากาศแปรปรวน ส่งผลให้อัตราการเจริญเติบโตช้า จึงใช้เวลาในการเพาะเลี้ยงนานขึ้น นอกจากนี้จากการที่เกษตรกรส่วนใหญ่เป็นรายย่อยทำให้ไม่สามารถเข้าถึงแหล่งเงินทุน ขาดความสามารถในการต่อรองด้านราคากับพ่อค้าคนกลาง (Fishery Economy Group, 2018)

สำนักงานสถิติแห่งชาติ (สศช.) เผยผลการสำรวจการใช้ ICT ของประชาชนในประเทศไทยปี 2565 (ไตรมาส 1) (National Statistical Office, 2022)

พบว่า มีผู้ใช้อินเทอร์เน็ต 56.7 ล้านคน คิดเป็น 86.6% ผู้ใช้โทรศัพท์มือถือ 62.3 ล้านคน คิดเป็น 95.2% และมีโทรศัพท์มือถือ 57.5 ล้านคน คิดเป็น 87.9% แบ่งเป็น โทรศัพท์มือถือสมาร์ทโฟน 94.1% และ โทรศัพท์มือถือระดับกลาง 6% ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นวงกว้างต่อองค์กรต่าง ๆ รวมถึงการปรับให้เหมาะสมกับท้องถิ่น และจากนโยบายรัฐบาล ได้มีนโยบายที่จะนำพาประเทศไทยก้าวสู่ “ไทยแลนด์ 4.0” ด้วยการนำเทคโนโลยีดิจิทัลเข้ามามีบทบาทสำคัญในการขับเคลื่อนเศรษฐกิจและสังคม เพื่อส่งเสริมเศรษฐกิจจากฐานของประเทศให้เข้มแข็ง และเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันในเวทีโลก

โดยจะเห็นได้ชัดเกี่ยวกับความเปลี่ยนแปลงของ Digital transformation ยกตัวอย่างเช่น การเพิ่มขึ้นของ Platform Market place หรือเว็บไซต์สื่อกลางการติดต่อซื้อ - ขายผ่านโครงข่ายระบบอินเทอร์เน็ต (Internet) ที่หลากหลาย ดังภาพที่ 1 (Beyond Now, 2022) และหลากหลายธุรกิจต่างพากันเปลี่ยนโครงสร้างหรือรากฐานการให้บริการและการขายสินค้าไปสู่ดิจิทัลแพลตฟอร์ม ปัจจุบันนี้เทคโนโลยีมีความสำคัญกับมนุษย์มากขึ้น อีกทั้งความสนใจและความต้องการของผู้บริโภคก็มากขึ้นเช่นเดียวกัน ดังนั้น การใช้ความก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยีกับธุรกิจเป็นสิ่งที่ขาดไม่ได้

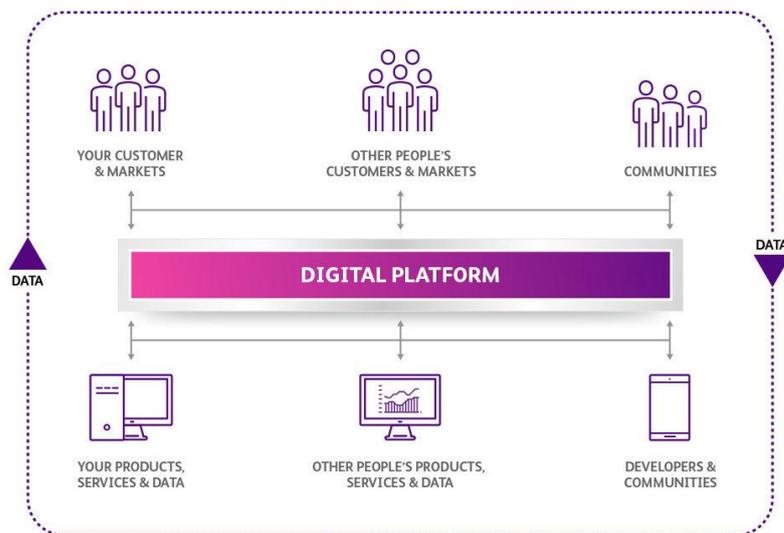


Figure 1 Digital Platform (Beyond Now, 2022)

จากการขยายตัวและเติบโตทางด้านเศรษฐกิจ การเกษตร โดยเฉพาะการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืดที่มีการขยายตัวที่เติบโตยิ่งขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้เกษตรกรมีรายได้เพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่ด้วยปัจจัยทางการตลาด การค้าขายที่ยังมีปัญหาในการติดต่อสื่อสารระหว่างผู้ขายและผู้ซื้อโดยตรง การแลกเปลี่ยนข้อมูลที่มีความชัดเจน จะสามารถลดปัญหาการค้าขายที่ไม่มีประสิทธิภาพได้ ซึ่งจะเป็นปัจจัยสนับสนุนที่จะช่วยในการตัดสินใจ ของผู้ขายและผู้ซื้อ ดังนั้น จาก

ประโยชน์ของเทคโนโลยีดิจิทัลขณะนี้ผู้วิจัยจึงได้นำมาใช้ในการพัฒนาแพลตฟอร์มดิจิทัลสำหรับธุรกิจการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืดในท้องถิ่น ซึ่งพื้นที่ในการทำวิจัยคือ ในเขตจังหวัดนครปฐม โดยเน้นที่กลุ่มเกษตรกรเพาะเลี้ยงปลาน้ำจืด เพื่อช่วยเพิ่มรายได้ให้เกษตรกรประมงน้ำจืดในท้องถิ่น เพื่อช่วยแก้ปัญหาและสนับสนุนปัจจัยที่สำคัญในการค้าขายของผู้ขายและผู้ซื้อ

## วิธีดำเนินการวิจัย

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ เป็นการนำเสนอการ  
พัฒนาแพลตฟอร์มดิจิทัลสำหรับธุรกิจการเพาะเลี้ยง

สัตว์น้ำจืดในท้องถิ่น โดยคณะผู้วิจัยมีกรอบแนวคิด  
ในการทำงาน แสดงดังภาพที่ 2

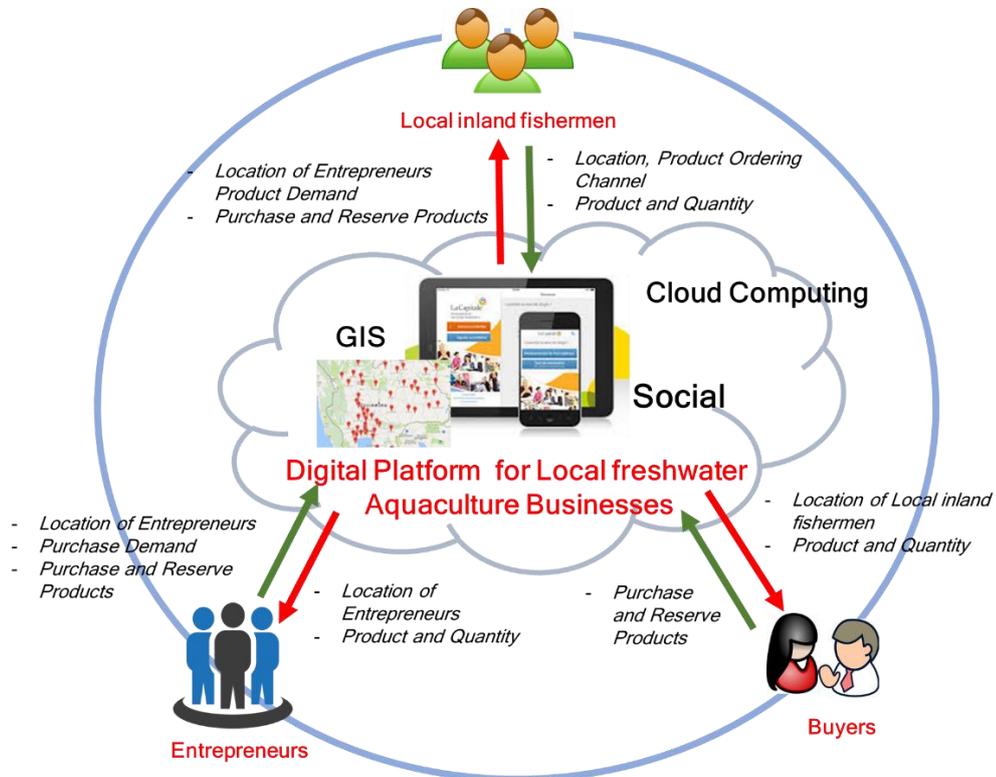


Figure 2 Conceptual Framework

จากภาพที่ 2 กรอบแนวคิดในการพัฒนา  
แพลตฟอร์มดิจิทัลสำหรับธุรกิจการเพาะเลี้ยงสัตว์  
น้ำจืดในท้องถิ่น โดยมีรายละเอียดหลัก ๆ ดังนี้

- ระบบสามารถแสดงข้อมูล การค้นหา พิกัด  
ต่าง ๆ ของเกษตรกรประมงน้ำจืดในรูปแบบแผนที่  
ภูมิศาสตร์

- ระบบมีการแสดงข้อมูล หรือพิกัดของ  
แหล่งรับซื้อผลผลิต เช่น ตลาดสัตว์น้ำจืด ตั้งแต่ขนาด  
เล็ก จนถึงขนาดใหญ่ในรูปแบบแผนที่ภูมิศาสตร์

- การแสดงจำนวนผลผลิตที่ต้องการ  
จำหน่ายของเกษตรกรประมงน้ำจืด เพื่อช่วยในการ  
ตัดสินใจของผู้ซื้อ

- การที่เกษตรกรประมงน้ำจืดสามารถหา  
แหล่งจำหน่ายผลผลิตได้จากการใช้งานระบบ

- ผู้ซื้อสามารถสั่งจอง หรือสั่งซื้อผ่านระบบ  
ได้โดยตรง ซึ่งจะเป็นการแลกเปลี่ยนข้อมูลที่ชัดเจน  
ระหว่างผู้ขายและผู้ซื้อ

จากกรอบแนวคิดคณะผู้วิจัย ได้มีการดำเนินการวิจัย  
รายละเอียดดังต่อไปนี้

### 1. กำหนดวัตถุประสงค์การวิจัย

1.1 เพื่อออกแบบและพัฒนาแพลตฟอร์ม  
ดิจิทัลสำหรับธุรกิจการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืดใน  
ท้องถิ่น

1.2 เพื่อประเมินแพลตฟอร์มดิจิทัลสำหรับ  
ธุรกิจการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืดในท้องถิ่นตาม

มาตรฐานแอปพลิเคชันสำหรับอุปกรณ์เคลื่อนที่ (Digital Government Development Agency (DGA), 2015)

1.3 เพื่อประเมินความพึงพอใจการใช้งาน แพลตฟอร์มดิจิทัลสำหรับธุรกิจการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืดในท้องถิ่น

## 2. กำหนดประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

กลุ่มเป้าหมาย คัดเลือกจากเกษตรกรประมงน้ำจืดในท้องถิ่น ในเขตจังหวัดนครปฐม จำนวน 20 คน เป็นการคัดเลือกแบบเจาะจง (Purposive Sampling)

## 3. เครื่องมือที่ใช้การวิจัย

3.1 แพลตฟอร์มดิจิทัลสำหรับธุรกิจการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืดในท้องถิ่น

3.2 แบบประเมินแพลตฟอร์มดิจิทัลตามมาตรฐานแอปพลิเคชันสำหรับอุปกรณ์เคลื่อนที่

3.3 แบบประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานแพลตฟอร์มดิจิทัลสำหรับธุรกิจการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืดในท้องถิ่น

## 4. ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ เป็นการนำเสนอการพัฒนาแพลตฟอร์มดิจิทัลสำหรับธุรกิจการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืดในท้องถิ่นการดำเนินการวิจัยมีขั้นตอนการดำเนินการ ดังนี้

4.1 ศึกษาความต้องการของระบบ คณะผู้วิจัยได้ทำการกำหนดปัญหาและวางแผนงานโดย กำหนดรูปแบบของแพลตฟอร์มดิจิทัลสำหรับธุรกิจการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืดในท้องถิ่นร่วมกับกลุ่มเกษตรกรและหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง กำหนดแนวทางของการพัฒนาระบบ กำหนดระยะเวลา

4.2 การวิเคราะห์ระบบ ประชุมโดยใช้หลักการมีส่วนร่วมเพื่อค้นหาความต้องการของแพลตฟอร์มดิจิทัลสำหรับธุรกิจการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืดในท้องถิ่นและวิเคราะห์ความต้องการนั้น เพื่อให้เข้าใจภาพรวมและหน้าที่การทำงานของระบบร่วมกัน

4.3 การออกแบบระบบ การออกแบบส่วนประกอบต่าง ๆ ของแพลตฟอร์มดิจิทัลสำหรับธุรกิจการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืดในท้องถิ่นเพื่อให้ตรงกับความต้องการที่ได้วิเคราะห์มาแล้ว โดยนำผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ มาทำการออกแบบระบบประกอบด้วย การออกแบบฐานข้อมูล ออกแบบส่วนต่อประสาน (User Interface)

1) การออกแบบระบบงานเพื่อสามารถรองรับทรานแซกชันที่เกิดขึ้นในแต่ละวันหรือในแต่ละช่วง ทั้งการเพิ่มข้อมูล การลบข้อมูล การแก้ไข/เปลี่ยนแปลงข้อมูล และการออกแบบการจัดเก็บระบบฐานข้อมูลโดยใช้ฐานข้อมูลแบบ Relation Data Model เป็นฐานข้อมูล

2) การออกแบบส่วนต่อประสาน ในการพัฒนาแพลตฟอร์มต้องคำนึงถึงปัจจัยที่มีผลต่อความสำเร็จ เช่น รูปแบบการนำเสนอที่เข้าใจง่าย สามารถตอบสนองความต้องการของกลุ่มผู้ใช้ รวมถึงการออกแบบอย่างเหมาะสมกับความสามารถในการเข้าใจและแก้ปัญหาของผู้ใช้ โดยขั้นตอนการออกแบบเพื่อกำหนดแนวทางในการสร้างส่วนต่อประสานตัวอย่างการออกแบบเพื่อรองรับการทำงานทั้งในรูปแบบ Web Application และ Mobile Application

4.4 การพัฒนาระบบ เป็นขั้นตอนการสร้างแพลตฟอร์มดิจิทัลสำหรับธุรกิจการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืดในท้องถิ่นตามแนวทางการออกแบบจากขั้นตอนที่ผ่านมาโดยแบ่งการทำงานออกเป็น 2 ส่วน คือ

ส่วนที่ 1 แอปพลิเคชันฝั่ง Front-End สำหรับผู้ใช้ทั่วไป ทั้งในส่วนของเว็บแอปพลิเคชันและสมาร์ตโฟนแอปพลิเคชัน

ส่วนที่ 2 แอปพลิเคชันฝั่ง Back-End สำหรับผู้ดูแลระบบ เพื่อไปทำการเพิ่มข้อมูล ลบข้อมูล อัปเดตข้อมูล

4.5 การทดสอบระบบ ในการสรุป วิเคราะห์ การทดสอบระบบ โดยแบ่งการทดสอบระบบออกเป็น 3 ตอน ดังนี้

1) การทดสอบระบบโดยคณะผู้วิจัย เป็นการทดสอบฟังก์ชันการทำงานของระบบทั้งหมด เพื่อนำไปปรับปรุงระบบให้มีความเหมาะสมตรงตามที่ได้วิเคราะห์และออกแบบไว้ คณะผู้วิจัยใช้วิธีการแบบแบล็กบ็อกซ์ (Srinivas, 2012)

2) การทดสอบโดยผู้เชี่ยวชาญ คณะผู้วิจัยได้นำระบบมาให้ผู้เชี่ยวชาญจำนวน 5 ท่าน เพื่อทำการทดสอบระบบตามมาตรฐานแอปพลิเคชันสำหรับอุปกรณ์เคลื่อนที่

3) การประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งาน ได้แก่ เกษตรกรประมงน้ำจืดในท้องถิ่น ซึ่งเป็นกลุ่มเป้าหมายจำนวน 20 คน

สถิติที่ใช้ในการวิจัย ได้แก่ ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Tumman, and Asanok, 2018) โดยนำค่าเฉลี่ยที่ได้เทียบกับเกณฑ์การประเมิน ดังนี้

ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.51 – 5.00

หมายความว่า ระดับมากที่สุด

ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.51 – 4.50

หมายความว่า ระดับมาก

ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.51 – 3.50

หมายความว่า ระดับปานกลาง

ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.51 – 2.50

หมายความว่า ระดับน้อย

ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.01 – 1.50

หมายความว่า ระดับน้อยที่สุด

## ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

### 1. ผลการพัฒนาแพลตฟอร์มดิจิทัลสำหรับธุรกิจการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืดในท้องถิ่น

ผู้วิจัยได้ดำเนินการพัฒนาแพลตฟอร์มดิจิทัลสำหรับธุรกิจการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืดในท้องถิ่นโดยระบบที่พัฒนาสามารถแสดงผลทั้งในส่วนของคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลและอุปกรณ์พกพา โดยมีการทำงานของระบบได้ ประกอบด้วย 2 ส่วนด้วยกัน คือ ส่วนที่ 1 ระบบในส่วนของผู้ใช้พัฒนาโดยใช้ภาษา HTML5, Bootstrap4, jQuery ในการออกแบบและเขียนโปรแกรม ระบบในส่วนของผู้ใช้ทั้งในส่วนของคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลและอุปกรณ์พกพา ซึ่งระบบสามารถทำงาน ได้ดังนี้

- สามารถแสดงข้อมูล การค้นหา พิกัดต่าง ๆ ของเกษตรกรประมงน้ำจืดในรูปแบบแผนที่ภูมิศาสตร์

- ระบบมีการแสดงข้อมูล หรือพิกัดของแหล่งรับซื้อผลผลิต เช่น ตลาดสัตว์น้ำจืด ตั้งแต่ขนาดเล็ก จนถึงขนาดใหญ่ในรูปแบบแผนที่ภูมิศาสตร์

- การแสดงจำนวนผลผลิตที่ต้องการจำหน่ายของเกษตรกรประมงน้ำจืด เพื่อช่วยในการตัดสินใจของผู้ซื้อ

- การที่เกษตรกรประมงน้ำจืดสามารถหาแหล่งจำหน่ายผลผลิตได้จากการใช้งานระบบ

- ผู้ซื้อสามารถสั่งจอง หรือสั่งซื้อผ่านระบบได้โดยตรง ซึ่งจะเป็นการแลกเปลี่ยนข้อมูลที่ชัดเจนระหว่างผู้ขายและผู้ซื้อ

ส่วนที่ 2 ระบบในส่วนของผู้ดูแลระบบทั้งในส่วนของคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลและอุปกรณ์พกพา ซึ่งระบบสามารถเพิ่มข้อมูล การลบข้อมูล การแก้ไข/เปลี่ยนแปลงข้อมูล และการออกแบบการจัดเก็บระบบฐานข้อมูล โดยใช้ฐานข้อมูลแบบ Relation Data Model เป็นฐานข้อมูล

ตัวอย่างแพลตฟอร์มดิจิทัลสำหรับธุรกิจการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืดในท้องถิ่นที่พัฒนาขึ้น แสดงดังภาพที่ 3

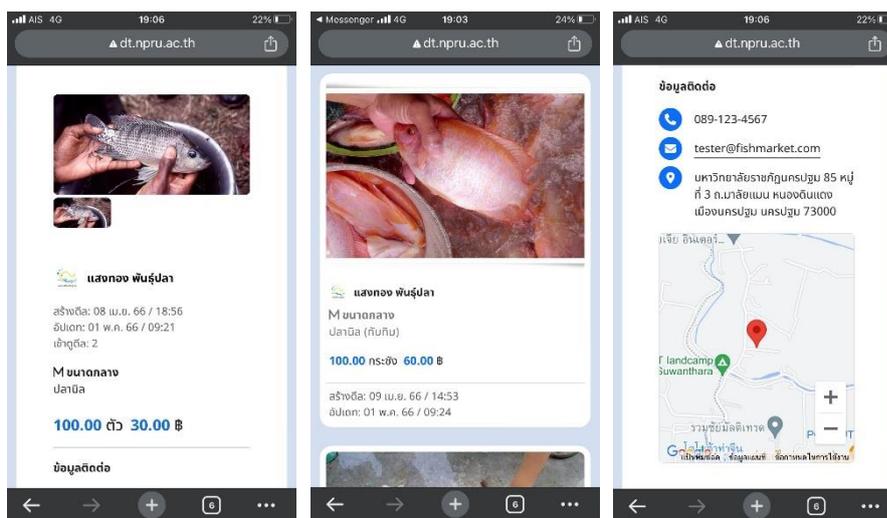


Figure 3 Screenshot Example

2. ผลการประเมินแพลตฟอร์มดิจิทัลสำหรับธุรกิจ  
การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืดในท้องถิ่นตามมาตรฐาน  
แอปพลิเคชันสำหรับอุปกรณ์เคลื่อนที่โดยผู้เชี่ยวชาญ

ผู้วิจัยได้นำแพลตฟอร์มดิจิทัลสำหรับธุรกิจ  
การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืดในท้องถิ่นไปให้ผู้เชี่ยวชาญ  
ทำการประเมิน ผลประเมินแสดงดังตารางที่ 1

Table 1 Results of application evaluation by experts.

Evaluation Items	$\bar{X}$	SD.	Level
<b>User Interface and Usability</b>			
1. The user interface is designed based on the User Interface Guideline (UIG).	4.20	0.40	High
2. The user interface considers the user's ease of use, clarity, and familiarity.	4.60	0.49	High
3. The application prioritizes screens with consideration of user needs.	4.20	0.40	High
4. Application screens are clearly labeled.	4.40	0.49	High
5 The application uses native icons to convey standard operations and functions.	4.20	0.40	High
6. Graphics images support all screen resolutions.	4.20	0.40	High
7. Buttons and tactile control elements are not too small.	4.40	0.49	High
8. Buttons and tactile control elements have been disabled under certain conditions at that time and must still be visible on the screen, but with a different color to indicate their status.	4.20	0.40	High
9. The size of the elements is calculated to fit the content without unnecessary clipping.	4.00	0.63	High

**Table 1** (Continuous)

<b>Evaluation Items</b>	$\bar{x}$	<b>SD.</b>	<b>Level</b>
10. The rendering of images, text, and user interface elements is rendered without aspect ratio distortion.	4.40	0.49	High
11. While loading data, there is a clear indicator of loading status.	4.40	0.49	High
12. If the server system fails, the application responds appropriately.	4.40	0.80	High
13. Users can turn off notifications directly from within the app.	4.40	0.80	High
14. The application displays location information or various places that can be contacted.	4.20	0.40	High
15. The application displays the address of the agency's website (Website URL) and related service websites.	4.20	0.40	High
16. Website URL information is displayed clearly and can be clicked to visit the website.	4.20	0.40	High
17. The form must be clearly labeled and this label should be visible at all times.	4.60	0.49	Highest
18. Restricted fields have the proper keyboard display, e.g., numeric data should display a numeric keyboard.	4.60	0.49	Highest
19. When the password is replaced with another character, there must be a button that can show the hidden password for the user to see and confirm.	4.40	0.49	High
20. Users cannot enter impossible data (e.g., cannot enter the year of birth in the future).	4.40	0.49	High
<b>User interface and usability evaluation results</b>	<b>4.33</b>	<b>0.49</b>	<b>High</b>
<b>Privacy</b>			
1. The content displayed in the application does not violate the privacy laws of individuals.	4.20	0.40	High
2. The collection of information related to the user's privacy must be done with the consent of the user.	4.60	0.49	Highest
3. The user's privacy data collection must be data related to the work and use of the application only.	4.20	0.40	High
4. Users can delete or correct any personal information that is inaccurate, incomplete, or out of date.	4.40	0.49	High

**Table 1** (Continuous)

Evaluation Items	$\bar{X}$	SD.	Level
5. Any changes to user rights, user privacy, or terms of use are always clearly notified to users.	4.20	0.40	High
6. The application provides a means for contacting relevant parties to inquire about or verify their rights and data usage related to their privacy.	4.20	0.40	High
<b>Privacy evaluation results</b>	<b>4.30</b>	<b>0.44</b>	<b>High</b>
<b>Overall Mean</b>	<b>4.32</b>	<b>0.48</b>	<b>High</b>

จากตารางที่ 1 ผลการประเมินแพลตฟอร์มตามมาตรฐานแอปพลิเคชันสำหรับอุปกรณ์เคลื่อนที่โดยผู้เชี่ยวชาญ มีความคิดเห็นในภาพรวมอยู่ในระดับมาก ( $\bar{X}=4.32$ , SD = 0.48) เมื่อพิจารณาแต่ละด้าน พบว่า ด้านส่วนติดต่อผู้ใช้งานและการใช้งานแอปพลิเคชัน โดยรวมอยู่ในระดับมาก ( $\bar{X}=4.33$ , SD = 0.49) และ ด้านการรักษาข้อมูลส่วนบุคคล อยู่ในระดับมาก ( $\bar{X}=4.30$ , SD = 0.44) ซึ่งผู้เชี่ยวชาญได้ให้ข้อเสนอแนะในการพัฒนาและปรับปรุงส่วนข้อที่ได้คะแนนน้อย เช่น ในด้านส่วนติดต่อผู้ใช้งานและการใช้งานแอปพลิเคชัน เมื่อพิจารณารายข้อ พบว่าหัวข้อขนาดขององค์ประกอบต่าง ๆ ถูกคำนวณให้มีขนาดเหมาะสมกับเนื้อหาไม่ทำให้เนื้อหาถูกตัดโดยไม่จำเป็น คะแนนอยู่ในระดับมาก ( $\bar{X}=4.00$ ,

SD = 0.49) ซึ่งผู้วิจัยจะตรวจสอบและปรับปรุงแพลตฟอร์มให้ดียิ่งขึ้นก่อนนำไปให้กลุ่มเป้าหมายทดสอบและใช้งาน

### 3. ผลการประเมินความพึงพอใจแพลตฟอร์มดิจิทัลสำหรับธุรกิจการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืดในท้องถิ่นของผู้ใช้งาน

ผู้วิจัยได้นำแพลตฟอร์มดิจิทัลสำหรับธุรกิจการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืดในท้องถิ่นไปทดลองใช้กับกลุ่มเป้าหมาย โดย คัดเลือกจากประชากรที่เป็นเกษตรกรประมงน้ำจืดในท้องถิ่น ในเขตจังหวัดนครปฐม จำนวน 20 คน เป็นการคัดเลือกแบบเจาะจง โดยได้ทดลองใช้เป็นเวลา 15 วันและทำการประเมินแพลตฟอร์ม ผลการประเมินแสดงดังตารางที่ 2

**Table 2** Results of satisfaction evaluation from the sample group.

Evaluation Items	$\bar{X}$	SD.	Level
<b>Function</b>			
1. Accuracy of display of local inland aquaculture businesses' information.	4.42	0.84	High
2. Accuracy of display of freshwater animals' price information.	4.36	0.81	High
3. Accuracy of display of trading information.	4.40	0.80	High
4. Accuracy of display of fish market information.	4.41	0.69	High
5. Accuracy of overall display of information.	4.41	0.77	High

Table 2 (Continuous)

Evaluation Items	$\bar{X}$	SD.	Level
<b>Function test evaluation results</b>	<b>4.40</b>	<b>0.78</b>	<b>High</b>
<b>Usability</b>			
1. Clarity of the text displayed on the monitor.	4.39	0.70	High
2. Appropriate use of colors, characters, backgrounds, and illustrations.	4.34	0.67	High
3. Appropriate placement of parts on the screen.	4.43	0.72	High
4. An appropriate amount of information is presented on the screen.	4.49	0.64	High
5. Application command buttons clearly communicate their purpose to the user.	4.42	0.66	High
6. Application processing speed.	4.36	0.76	High
7. Ease of use of the application.	4.42	0.73	High
<b>Usability evaluation results</b>	<b>4.41</b>	<b>0.70</b>	<b>High</b>
<b>Overall Mean</b>	<b>4.40</b>	<b>0.74</b>	<b>High</b>

จากตารางที่ 2 กลุ่มเป้าหมายที่ใช้งานแพลตฟอร์มมีความพึงพอใจในภาพรวมอยู่ในระดับมาก ( $\bar{X}=4.40$ , SD = 0.74) เมื่อพิจารณาแต่ละด้านพบว่า ด้านสามารถทำงานได้ตามหน้าที่ (Function) โดยรวมอยู่ในระดับมาก ( $\bar{X}=4.40$ , SD = 0.78) เมื่อพิจารณารายข้อ พบว่า ความถูกต้องในการแสดงผลข้อมูลผู้ประกอบการประมงน้ำจืดในท้องถิ่นมีผลประเมินมากที่สุด อยู่ในระดับมาก ( $\bar{X}=4.42$ , SD = 0.84) รองลงมา คือ ความถูกต้องของการแสดงผลข้อมูลเกี่ยวกับข้อมูลตลาดซื้อขายสัตว์น้ำอยู่ในระดับมาก ( $\bar{X}=4.41$ , SD = 0.69) และความถูกต้องของการแสดงผลข้อมูลที่ต้องการในภาพรวมอยู่ในระดับมาก ( $\bar{X}=4.41$ , SD = 0.77) และด้านความง่ายต่อการใช้งาน (Usability) โดยรวมอยู่ในระดับมาก ( $\bar{X}=4.41$ , SD = 0.70) เมื่อพิจารณารายข้อพบว่า ความเหมาะสมของปริมาณข้อมูลที่นำเสนอในแต่ละจอภาพมีผลประเมินมากที่สุด อยู่ในระดับมาก

( $\bar{X}=4.49$ , SD = 0.64) รองลงมา คือ ปุ่มคำสั่งของโปรแกรมเป็นคำสั่งที่ใช้สื่อสารกับผู้ใช้ได้ตรงตามวัตถุประสงค์อยู่ในระดับมาก ( $\bar{X}=4.42$ , SD = 0.66) และความง่ายในการใช้งานอยู่ในระดับมาก ( $\bar{X}=4.42$ , SD = 0.66)

จากการพัฒนาแพลตฟอร์มดิจิทัลสำหรับธุรกิจการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืดในท้องถิ่น ได้ทดลองใช้กับกลุ่มเป้าหมายในเขตพื้นที่จังหวัดนครปฐม เป็นแพลตฟอร์มเพื่อช่วยเพิ่มรายได้เกษตรกรประมงน้ำจืดในท้องถิ่น แก้ปัญหาและสนับสนุนในกระบวนการซื้อขายระหว่างผู้ขายและผู้ซื้อให้สะดวกยิ่งขึ้น เนื่องจากระบบมีลักษณะเป็นเว็บแอปพลิเคชันเชื่อมต่อผ่านระบบอินเทอร์เน็ตผู้ใช้สามารถใช้งานได้ทุกที่ทุกเวลา ซึ่งในการใช้งานได้นำไปใช้กับกลุ่มเกษตรกรประมงน้ำจืด กลุ่มวิสาหกิจชุมชนเพาะปลาน้ำจืดในท้องถิ่น และได้มีการประชาสัมพันธ์ให้กับแฟรนไชส์สัตว์น้ำจืด พ่อค้าคนกลาง ผู้รวบรวมสัตว์น้ำ

ผู้ประกอบการเกี่ยวกับสัตว์น้ำอื่น ๆ เช่น ร้านอาหาร ได้รู้จักและได้ทดลองใช้แพลตฟอร์มผลการวิจัยครั้งนี้พบว่า กลุ่มเกษตรกรประมงน้ำจืดในท้องถิ่นที่เป็นกลุ่มเป้าหมายในการใช้งานแพลตฟอร์มมีความพึงพอใจในภาพรวมอยู่ในระดับมาก สอดคล้องกับงานวิจัยที่ได้ศึกษา ตัวอย่างเช่น Ketmaneechairat *et al.* (2019) ได้พัฒนาแอปพลิเคชันการตลาดออนไลน์บนระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ วิทยาลัยศึกษา บริษัท สวรา อินทิเกรชั่น จำกัด ซึ่งเป็นบริษัทขายเสื้อผ้าสำเร็จรูป พบว่า แอปพลิเคชันสามารถอำนวยความสะดวกในการสั่งซื้อสินค้าให้แก่ลูกค้า และจากการนำแอปพลิเคชันการตลาดออนไลน์มาใช้ทำให้มีลูกค้าใหม่เพิ่มขึ้นจากลูกค้าเก่าคิดเป็น 30 % และบริษัทมีผลกำไรเพิ่มขึ้น เมื่อนำไปประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานต่อแอปพลิเคชัน ผลการประเมินอยู่ในระดับมาก ( $\bar{X}$  = 4.24, SD = 0.60) Limsuwan and Vihokto (2020) ได้พัฒนาระบบการบริหารสิ่งประดิษฐ์และนวัตกรรมอาชีวศึกษาสู่เชิงพาณิชย์ในยุคดิจิทัลด้วยแพลตฟอร์ม สามารถนำสู่การบริหารจัดการสิ่งประดิษฐ์และนวัตกรรมอาชีวศึกษาในสถานศึกษาสังกัดสำนักงานคณะกรรมการการอาชีวศึกษา ซึ่งส่งผลให้สามารถจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ สร้างความรู้ สร้างรายได้ให้แก่ผู้ผลิตและสถานศึกษาได้ และ Gulati *et al.* (2018) ได้ศึกษาปัจจัยการตลาดดิจิทัลที่มีอิทธิพลต่อการสร้างความพึงพอใจและความภักดีแก่ลูกค้าในธุรกิจโรงแรมกลุ่มจังหวัดสามเหลี่ยมอันดามัน ประเทศไทย พบว่า การตลาดผ่านสื่อสังคมออนไลน์และสื่อเชิงเนื้อหาที่มีอิทธิพลทางตรงต่อการสร้างความภักดีให้แก่ลูกค้า การตลาดผ่านสื่อเว็บไซต์มีอิทธิพลต่อการสร้างความพึงพอใจและความภักดีให้แก่ลูกค้าก็ต่อเมื่อลูกค้าได้รับรู้ถึงคุณค่าในการบริการที่ดีของโรงแรม และความพึงพอใจในการบริการมีอิทธิพลทางตรงต่อการสร้างความภักดีแก่ลูกค้าโรงแรมใน

กลุ่มจังหวัดสามเหลี่ยมอันดามัน จึงสามารถสรุปได้ว่าการตลาดผ่านเว็บไซต์ การตลาดผ่านสื่อสังคมออนไลน์ สื่อเชิงเนื้อหา และการสร้างคุณค่าที่รับรู้ถึงการบริการ มีอิทธิพลทางตรงและการอ้อมต่อการสร้างความพึงพอใจและความภักดีให้แก่ลูกค้าในธุรกิจโรงแรม

## สรุป

การพัฒนาแพลตฟอร์มดิจิทัลสำหรับธุรกิจการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืดในท้องถิ่นสามารถสรุปผลการวิจัย โดยสรุปตามวัตถุประสงค์ ได้ดังนี้คือ 1) ผลการพัฒนาแพลตฟอร์มดิจิทัลสำหรับธุรกิจการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืดในท้องถิ่นได้ระบบในการเพิ่มช่องทางระหว่างเกษตรกรประมงน้ำจืด ผู้ซื้อ พ่อค้าคนกลาง ผู้ประกอบการเกี่ยวกับสัตว์น้ำอื่น ๆ เป็นต้น 2) ผลการประเมินแพลตฟอร์มตามมาตรฐานแอปพลิเคชันสำหรับอุปกรณ์เคลื่อนที่โดยผู้เชี่ยวชาญสามารถสรุปผลได้ คือ กลุ่มผู้เชี่ยวชาญมีความคิดเห็นในภาพรวมอยู่ในระดับมาก และให้ข้อเสนอแนะในการพัฒนาและปรับปรุงส่วนหัวข้อที่ได้คะแนนน้อยทั้งในด้านส่วนติดต่อผู้ใช้งานและการใช้งานและด้านการรักษาข้อมูลส่วนบุคคลให้ดียิ่งขึ้น และ 3) ผลประเมินความพึงพอใจการใช้งานแพลตฟอร์มเมื่อนำแพลตฟอร์มดิจิทัลสำหรับธุรกิจการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืดในท้องถิ่นที่พัฒนานี้ไปทดสอบเพื่อประเมินความพึงพอใจการใช้งานระบบ สามารถสรุปผลได้คือ กลุ่มตัวอย่างผู้ใช้งานระบบมีความคิดเห็นในภาพรวมอยู่ในระดับมาก เมื่อพิจารณาแต่ละด้านพบว่า ด้านทำงานตรงความต้องการโดยรวมอยู่ในระดับมาก โดยที่ข้อความถูกต้องในการแสดงข้อมูล ผู้ประกอบธุรกิจการประมงน้ำจืดในท้องถิ่นมีผลประเมินมากที่สุด และด้านการใช้งานระบบ โดยรวมอยู่ในระดับมาก โดยที่ข้อความเหมาะสมของปริมาณ

ข้อมูลที่น่าสนใจในแต่ละจอภาพมีผลประเมินมากที่สุด อยู่ในระดับมาก

จากการนำแพลตฟอร์มดิจิทัลสำหรับธุรกิจการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืดมาทดลองใช้ในพื้นที่ทดลองพบว่า ทำให้เกิดการจัดเก็บสารสนเทศของเกษตรกรประมงน้ำจืดภายในท้องถิ่นอย่างเป็นระบบ สามารถสืบค้นข้อมูลและอัปเดตข้อมูลได้ทันทีผ่านคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลและอุปกรณ์พกพาจากผู้ดูแลระบบที่กลุ่มเกษตรกรในท้องถิ่นแต่งตั้งให้เป็นผู้ดูแลเกษตรกรประมงน้ำจืดได้ช่องทางการประชาสัมพันธ์และเพิ่มช่องทางการจำหน่ายผลผลิตแบบออนไลน์ สมาชิกวิสาหกิจชุมชนเพาะปลาน้ำจืดในท้องถิ่นสามารถนำผลผลิตที่ตนมีมาจำหน่ายผ่านกลุ่ม โดยมีผู้ดูแลระบบช่วยจัดทำรายละเอียดผลผลิตเพื่อจำหน่ายผ่านแพลตฟอร์มก่อให้เกิดรายได้จากแพลตฟอร์ม และเกิดการรวมกลุ่มผู้เพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืดในท้องถิ่นเมื่อมีแนวคิดพัฒนาผลิตภัณฑ์โดยนำผลผลิตมาแปรรูปสามารถทำได้โดยไม่ต้องซื้อจากแหล่งอื่นหรือจากนอกท้องถิ่นทำให้ลดต้นทุนการผลิตและสามารถผลิตสินค้าได้ต่อเนื่องทำให้สมาชิกในกลุ่มมีรายได้เพิ่มขึ้น

### ข้อเสนอแนะ

ในการพัฒนาแพลตฟอร์มดิจิทัลสำหรับธุรกิจการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืดในท้องถิ่นซึ่งเป็นการนำเทคโนโลยีที่พัฒนาขึ้นไปใช้เพื่อส่งเสริมการประมงน้ำจืดในท้องถิ่น เพื่อเพิ่มช่องทางและรายได้เกษตรกรประมงน้ำจืดในท้องถิ่น พบว่า การส่งเสริมให้ใช้แพลตฟอร์มดิจิทัลในการจำหน่ายและซื้อขายสินค้าทำให้มีการเข้าถึงกลุ่มเป้าหมายได้ง่าย และที่สำคัญกลุ่มเกษตรกรประมงน้ำจืด ต้องพร้อมรับการนำเทคโนโลยีมาใช้ มีการเรียนรู้เทคโนโลยีใหม่ ๆ และในการสร้างช่องทางการจำหน่ายผลผลิตผ่านทางเทคโนโลยีจะสามารถช่วยผลักดันให้

สามารถเพิ่มรายได้ได้อีกส่วนหนึ่ง ปัญหาและอุปสรรคในการนำเทคโนโลยีไปใช้ ส่วนใหญ่จะเป็นด้านทักษะความสามารถในการใช้เทคโนโลยี ซึ่งล้วนส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของการใช้เทคโนโลยีในการปฏิบัติงาน ดังนั้น จะต้องเน้นให้ความรู้และการควมมีการฝึกอบรมให้ทั่วถึง เพื่อให้กลุ่มเกษตรกรประมงน้ำจืดได้พัฒนาความรู้ ความสามารถในการใช้เทคโนโลยีให้ เพื่อนำไปเป็นตัวช่วยในการเพื่อรายได้ให้กับตนเองได้อย่างเหมาะสม

### กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณประจำปี 2563 มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และขอขอบคุณเกษตรกรประมงน้ำจืดในท้องถิ่น กรณีศึกษา อำเภอเมือง จังหวัดนครปฐม ที่อำนวยความสะดวกในการทำวิจัยครั้งนี้

### เอกสารอ้างอิง

- Beyond Now. 2022. **How to adopt a digital platform business model.** Beyond Now. Available Source: <https://www.beyondnow.com/en/insights/market-insights/how-to-adopt-a-digital-platform-business-model/>, August 20, 2022.
- Digital Government Development Agency (DGA). 2015. **Government Mobile Application Standard Version 1.0.** P.M. Media Print Company Limited, Thailand. (in Thai)
- Fishery Economy Group. 2018. **Fisheries Economic Situation in 2017 and Trend in 2018.** Department of Fisheries. Available Source:

- <https://www.fisheries.go.th/strategy/UserFiles/files/16-2-61.pdf>, March 12, 2019. (in Thai)
- Fishery Statistics Group. 2023. **Estimation of productivity and value of Thailand's fisheries 2022-2025**. Department of Fisheries. Available Source: [https://www4.fisheries.go.th/local/file\\_document/20230322114403\\_1\\_file.pdf](https://www4.fisheries.go.th/local/file_document/20230322114403_1_file.pdf), June 9, 2023. (in Thai)
- Gulati, S., Verayangkura, M. and Sirirak, S. 2018. Causal of Digital Marketing Influencing Hotel Customers' Satisfaction and Loyalty in the Andaman Triangle Cluster, Thailand. **Journal of the Association of Researchers** 23(3): 217-228. (in Thai)
- Ketmaneechairat, H., Dadpoo, S., Songsang, C. and Jantiva, P. 2019. Digital Marketing Application on Android Operating System Case Study: Sawara Integration co., ltd. **Research Journal Rajamangala University of Technology Thanyaburi** 18(2): 52-62. (in Thai)
- Limsuwan, T. and Vihokto, P. 2020. The Development of Administration System for Assisting Invention and Innovation Vocational to Commercial in the Digital Age by Platform. **Journal of MCU Peace Studies** 8(2): 459-473. (in Thai)
- National Statistical Office. 2022. **ICT use of People in Thailand 2022 (Quarter 1)**. National Statistical Office. Available Source: [http://www.nso.go.th/sites/2014/Lists/Infographic/Attachments/147/info\\_ict\\_65.pdf](http://www.nso.go.th/sites/2014/Lists/Infographic/Attachments/147/info_ict_65.pdf), June 9, 2022. (in Thai)
- Srinivas, N. 2012. Black Box and White Box Testing Techniques - A Literature Review. **International Journal of Embedded Systems and Applications** 2012(2): 29-50.
- Tumman, J. and Asanok, M. 2018. A Study on Components of the Information System for Promoting Research and Academic Services, Faculty of Information Technology, Rajabhat Maha Sarakham University. **Journal of Technology Management Rajabhat Maha Sarakham University** 5(1): 122-132. (in Thai)

# การพัฒนาเหมืองความรู้เชิงความหมายสมุนไพรไทยเพื่อการบำบัดรักษา

## The Development of Semantic Thai Herb Knowledge Mining for Treatment

อนุพงษ์ สุขประเสริฐ<sup>1</sup> ดวงจันทร์ สีหาราช<sup>2\*</sup> เจษฎาพร ปากำวัง<sup>2</sup> สุภาพร วิสูงเร<sup>3</sup> และ จิตรนันท์ ศรีเจริญ<sup>2</sup>  
Anupong Sukparseart<sup>1</sup>, Duangchan Siharad<sup>2\*</sup>, Jetsadaporn Pakamwang<sup>2</sup>, Supaporn Wisungre<sup>3</sup>  
and Jitranan Sricharoen<sup>2</sup>

Received: 20 June 2022, Revised: 28 January 2023, Accepted: 18 August 2023

### บทคัดย่อ

การใช้สมุนไพรไทยเพื่อการบำบัดรักษานับเป็นการแพทย์ทางเลือก ที่ช่วยดูแลสุขภาพเบื้องต้นให้แก่ประชาชน ให้บรรเทาจากอาการ โรคต่าง ๆ ได้ ประเด็นสำคัญนี้ นำไปสู่การวิจัย โดยมีวัตถุประสงค์ 1) เพื่อสร้างออนโทโลยีและกฎในการสืบค้นความรู้เชิงความหมายสมุนไพรไทย 2) เพื่อพัฒนาเหมืองความรู้เชิงความหมายสมุนไพรไทย และ 3) เพื่อประเมินประสิทธิภาพในการสกัดความรู้เชิงความหมาย และจำแนกข้อมูลสมุนไพรไทย ทำการรวบรวมองค์ความรู้สมุนไพรไทยจาก 100 เว็บไซต์ เพื่อนำมาสร้างออนโทโลยี และทำการสกัดความรู้เชิงความหมายด้วยภาษาเอสดีบีบลิวอาร์แอล ร่วมกับการประมวลผลภาษาธรรมชาติ ทำการวัดประสิทธิภาพในการสกัดความรู้เชิงความหมาย และประสิทธิภาพการทำนายเพื่อจำแนกชื่อสมุนไพร ด้วยอัลกอริทึมการเรียนรู้ของเครื่อง ได้แก่ นิวรอลเน็ตเวิร์ค เอสวีเอ็ม เคเนียร์สนเนสเซอร์ และแผนผังต้นไม้เพื่อการตัดสินใจ ผลการวิจัยพบว่า ออนโทโลยีสมุนไพรไทย แบ่งเป็น 2 ชั้นความรู้ และมีคลาสความรู้จำนวนทั้งหมด 8 คลาส สามารถสร้างกฎ เพื่อดึงโครงสร้างความรู้ที่ช่วยระบุรูปแบบข้อมูลของคลาสดำเนินสมุนไพร 3 ชนิด ได้แก่ ไพล ย่านาง และฟ้าทะลายโจร กระบวนการเรียนรู้ของเครื่องบนเหมืองความรู้เชิงความหมายสมุนไพรไทย ประกอบด้วย 4 ส่วน ได้แก่ 1) การประมวลผลเชิงความหมายด้วยออนโทโลยี 2) การสกัดเหมืองความรู้ 3) การสร้างชุดข้อมูลสมุนไพร และ 4) การทำนายผลลัพธ์ด้วยการเรียนรู้ของเครื่อง ผลการประเมินประสิทธิภาพในการค้นคืนความรู้เชิงความหมายสมุนไพร

<sup>1</sup> สาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ อำเภอเมือง จังหวัดเพชรบูรณ์ 67000

<sup>1</sup> Major of Information Technology and Communication, Faculty of Science and Technology, Phetchabun Rajabhat University, Mueang, Phetchabun 67000, Thailand.

<sup>2</sup> สาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ อำเภอเมือง จังหวัดเพชรบูรณ์ 67000

<sup>2</sup> Major of Computer Science, Faculty of Science and Technology, Phetchabun Rajabhat University, Mueang, Phetchabun 67000, Thailand.

<sup>3</sup> สาขาวิชาแพทย์แผนไทย คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ อำเภอเมือง จังหวัดเพชรบูรณ์ 67000

<sup>3</sup> Major of Thai Traditional Medicine, Faculty of Science and Technology, Phetchabun Rajabhat University, Mueang, Phetchabun 67000, Thailand.

\* ผู้นิพนธ์ประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): kob\_siharad@pcru.ac.th

ไทยโดยใช้ออนโทโลยี และกฎ ได้ค่าเอฟเมสเซอร์ เท่ากับ 94.8% และประสิทธิภาพในการทำนาย เพื่อจำแนกคลาสคำตอบสมุนไพร ด้วยอัลกอริทึมนิเวรอลเนตเวิร์ค ได้ค่าความถูกต้องสูงสุด เท่ากับ 90.0% ส่วนอัลกอริทึมเคเนียร์เนสเบออร์ ได้ค่าความถูกต้องต่ำที่สุด เท่ากับ 82.2%

**คำสำคัญ:** เหมืองความรู้, ออนโทโลยี, การเรียนรู้ของเครื่อง, สมุนไพรไทย

## ABSTRACT

Using Thai herbs for treating is an alternative medicine that helps take care of people's preliminary health and relieves them from diseases and symptoms. This is an important topic that leads to operating this research aimed at: 1) creating the ontology and the rules for searching the semantic Thai herb knowledge, 2) developing semantic Thai herb knowledge mining, and 3) assessing the efficiency of extracting Thai herb semantic knowledge and classifying the Thai herbs' class. The Thai herb knowledge was collected from 100 websites to build an ontology and extract the semantic knowledge using SWRL with natural language processing. The performance is measured in extracting the semantic knowledge and predicting the classification of herb classes using the neural network (NN), the support vector machine (SVM), the K-nearest neighbor (KNN), and the decision tree (DT). The results show that Thai herb ontology was divided into 2 knowledge classes and comprised eight knowledge nodes. SWRL rules were created to extract the knowledge structures identifying the herb data pattern in 3 types: Zingiber montanum, Tiliacora triandra, and Andrographis paniculate. The ML processing on semantic Thai herb knowledge mining consisted of 4 parts: 1) semantic processing on ontology, 2) extracting the knowledge mining, 3) creating the Thai herb dataset, and 4) predicting the results using ML. The results of assessing the semantic Thai herb knowledge retrieval performance using the ontology and the SWRL rules yielded an F-measure value of 94.8%. The NN had the highest accuracy in predicting Thai herb classes at 90.0% and the KNN had the lowest accuracy at 82.2%.

**Key words:** knowledge mining, ontology, machine learning, Thai herb

## บทนำ

องค์ความรู้สมุนไพรไทยมีความสำคัญเป็นอย่างมากในทางการรักษาโรคและการดูแลสุขภาพ องค์ความรู้เหล่านี้จะทำให้ผู้ที่ประสงค์จะใช้สมุนไพรมีความเข้าใจและสามารถนำสมุนไพรไปใช้ได้อย่างถูกต้องและปลอดภัย ซึ่งในปัจจุบันผู้คนได้หันมาให้ความสำคัญและมีความสนใจเกี่ยวกับ

การใช้สมุนไพรมากขึ้น โดยกระทรวงสาธารณสุขมีนโยบายส่งเสริมการใช้ประโยชน์จากสมุนไพรในงานสาธารณสุขมูลฐาน (Ministry of Public Health, 2008) ตามพระราชบัญญัติคุ้มครองและส่งเสริมภูมิปัญญาแพทย์แผนไทย ให้มีการคุ้มครองภูมิปัญญาด้านการใช้สมุนไพรไทยที่ระบุไว้ในพระราชบัญญัติปี พ.ศ. 2542 จึงทำให้อำเภอมหาวิทยาลัยและสถาบัน

ทางด้านสาธารณสุขต่าง ๆ ได้มีการวิจัยพืชสมุนไพรอย่างต่อเนื่อง ทำให้เนื้อหาและข้อมูลด้านสมุนไพรไทยมีจำนวนมากอยู่ในอินเทอร์เน็ต ซึ่งมาจากแหล่งข้อมูลที่หลากหลาย ทำให้ข้อมูลมีการกระจัดกระจาย และมีความขัดแย้งกัน โดยที่บางแหล่งข้อมูลให้ข้อมูลข้อห้ามการใช้สมุนไพรในปริมาณที่มากเกินไปจนเกินไป แต่ในขณะที่เดียวกันบางแหล่งข้อมูลไม่ได้แนะนำวิธีการใช้และข้อห้ามของสมุนไพรต่าง ๆ จึงทำให้เกิดการสื่อสารที่ผิดพลาดไปยังผู้ใช้ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากข้อมูลด้านสมุนไพรไทยที่ถูกเผยแพร่ออกไปอาจยังไม่ได้ได้รับการตรวจสอบอย่างเป็นระบบจากผู้เชี่ยวชาญหรือวิธีการคัดกรององค์ความรู้ด้วยกระบวนการทางคอมพิวเตอร์ ส่งผลให้การสืบค้นข้อมูลผ่านระบบเสิร์ชเอ็นจินโดยทั่วไปอาจจะทำให้ได้ข้อมูลไม่ตรงกับความต้องการของผู้สืบค้น และองค์ความรู้ด้านสมุนไพรไทยส่วนใหญ่ที่พบบนเว็บไซต์ มักจะขาดการเชื่อมโยงและการจัดหมวดหมู่เพื่อให้ผู้ใช้เกิดความเข้าใจที่ชัดเจนอย่างครอบคลุมในการนำองค์ความรู้ไปใช้ประโยชน์ได้เบ็ดเสร็จในแหล่งความรู้เดียว

การแก้ไขปัญหาเหล่านี้ จะสามารถประยุกต์ใช้ออนโทโลยี ในการระบุแนวคิดหลักและความสัมพันธ์ระหว่างแนวคิดในโดเมนความรู้ของสมุนไพรไทย (Tungkwampian *et al.*, 2015) ร่วมกับการนำเทคนิคการทำเหมืองข้อมูลมาใช้ค้นหาความรู้ใหม่จากข้อมูลที่มีปริมาณมาก โดยมีการสกัดข้อมูลต่าง ๆ เพื่อให้สามารถนำข้อมูลเหล่านี้ไปใช้ประโยชน์ได้ ดังงานวิจัยของ Prompukdee *et al.* (2017) ได้นำเทคนิคเหมืองข้อมูลมาประยุกต์ใช้ในการแพทย์แผนไทย โดยสกัดชุดข้อมูลการรักษาอาการของผู้ป่วยที่แตกต่างกัน และใช้การค้นหากฎการเชื่อมโยงเพื่อนำไปใช้สร้างแบบจำลอง เพื่อวินิจฉัยผู้ป่วยจากอาการที่บันทึกไว้ จากการวิเคราะห์ถึงข้อจำกัดในการสกัดองค์ความรู้จากเหมืองข้อมูลแบบเดิม มาสร้างชุด

ข้อมูลเพื่อส่งต่อให้อัลกอริทึมการเรียนรู้ของเครื่อง (ML : Machine learning) ใช้ในการทำนายเชิงจำแนกและจัดกลุ่มข้อมูลความรู้ พบว่า การสกัดข้อมูลยังขาดคุณภาพที่ดี และคุณลักษณะของข้อมูลบางตัวไม่ได้มีความเกี่ยวข้อง/ไม่เกิดประโยชน์ที่แท้จริงในการบ่งบอกถึงคลาสคำตอบได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้โมเดล ML ที่นำไปใช้ประโยชน์ขาดคุณภาพและมีอัตราความแม่นยำในการทำนายที่ไม่เป็นที่น่าพอใจตามไปด้วย ในปัจจุบันมีการนำ ML มาใช้สร้างวิธีการที่ทำให้คอมพิวเตอร์เรียนรู้ได้จากข้อมูลตัวอย่างหรือสภาพแวดล้อม เพื่อสร้างตัวแบบและนำไปใช้ทำนายข้อมูลใหม่ได้ และ ML สามารถใช้ในการทำเหมืองข้อมูลในด้านธุรกิจ ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลและค้นหารูปแบบการดำเนินธุรกิจต่าง ๆ ได้ (Xiuyi and Yuxia, 2018) และการทำเหมืองข้อมูลเชิงความหมาย (Semantic Mining) เป็นวิธีการสกัดและวิเคราะห์ความรู้จากข้อมูลตัวอักษร เพื่อให้คอมพิวเตอร์นำไปใช้ได้โดยตรง โดยจะสกัดคุณสมบัติและความสัมพันธ์ทางความหมายระหว่างข้อความ โดยใช้เทคนิคการประมวลผลภาษาธรรมชาติออนโทโลยี ร่วมกับการสร้างฐานกฎเชิงความหมาย และทำการประยุกต์ใช้การเรียนรู้ของเครื่องมาช่วยจำแนกหรือจัดกลุ่มคำตอบเป้าหมายที่ผู้ใช้ต้องการทราบจากคุณลักษณะ (Feature) ของข้อความต่าง ๆ ที่สกัดออกมาได้ (Tian *et al.*, 2023)

การพัฒนาเหมืองความรู้เชิงความหมาย (Semantic Mining) จะช่วยให้เข้าถึงความรู้จากแหล่งต่าง ๆ บนเครือข่ายอินเทอร์เน็ตอย่างเป็นระบบ ส่งผลให้การทำเหมืองข้อมูลเพื่อการสืบค้นข้อมูลมาทำการวิเคราะห์และทำนายผลลัพธ์ได้ถูกต้องและตรงกับความต้องการของผู้ใช้มากยิ่งขึ้น ทั้งนี้การประมวลผลข้อมูลเชิงความหมายจะช่วยให้การสกัดข้อมูลจากแหล่งข้อมูลหลายแหล่ง เพื่อนำมาสร้างชุดข้อมูลที่มีคุณลักษณะที่ครบถ้วน พร้อมส่งต่อเข้าสู่การวิเคราะห์

ด้วยวิธีการทางสถิติ และการทำนายข้อมูลด้วยเทคนิค ML ให้มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น เพื่อนำไปสู่การพัฒนาซอฟต์แวร์ที่สามารถใช้ประโยชน์ในชุมชนท้องถิ่นได้อย่างแท้จริง

## วิธีดำเนินการวิจัย

การดำเนินงานวิจัยนี้ ได้กำหนดวิธีดำเนินการวิจัยที่สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการวิจัย ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ดังนี้

### 1. การสร้างออนโทโลยีและกฎในการสืบค้นความรู้เชิงความหมายสมุนไพรรไทย

ทำการศึกษารวบรวมองค์ความรู้สมุนไพรรไทยจากแหล่งความรู้ออนไลน์บนเว็บไซต์จำนวน 100 แหล่ง อาทิ 1) wikipedia.com 2) ananhosp.go.th 3) mnre.go.th 4) rspg.or.th 5) nittm.com 6) hsri.or.th 7) rama.mahidol.ac.th 8) thaihealth.or.th 9) hfocus.org และ 10) saranukromthai.or.th โดยการคัดเลือกเว็บไซต์เหล่านี้ จากผู้เชี่ยวชาญด้านสมุนไพรรไทยจำนวน 3 ท่าน ที่ผ่านตามเกณฑ์การนำเสนอข้อมูลสารสนเทศที่มีความถูกต้องและเชื่อถือได้ เพื่อนำมาสร้างออนโทโลยี โดยใช้โปรแกรม Protégé สำหรับรวบรวมและนิยามข้อมูลเชิงความหมายเกี่ยวกับสมุนไพรรไทย โดยมีขั้นตอนการสร้างออนโทโลยีจำแนกได้ 4 ขั้นตอน ได้แก่ 1) กำหนดโดเมน และขอบเขตของออนโทโลยีจากองค์ความรู้ที่สืบค้นได้จากเว็บไซต์ต่าง ๆ 2) แจกแจงคำสำคัญเพื่อกำหนดเป็นคลาส และแอทริบิวต์ในออนโทโลยี 3) กำหนดคุณสมบัติของคลาส และความสัมพันธ์ระหว่างคลาส และ 4) สร้างรายการข้อมูล (Instant) เพื่อเก็บรวบรวมในคลาสต่าง ๆ ทั้งนี้วิธีการสร้างออนโทโลยีดังกล่าว มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Noy and McGuinness (2001) และออนโทโลยีได้รับการตรวจสอบความถูกต้องครบถ้วน และความสอดคล้องกับองค์ความรู้ต้นฉบับจากเว็บไซต์ โดย

ผู้เชี่ยวชาญ 3 ท่านในข้างต้น จากนั้นทำการสร้างกฎเพื่อสืบค้นความรู้ด้วยภาษา SWRL (Semantic web rule language) โดยใช้เครื่องมือส่วนขยาย (Extension) ที่เปิดให้ติดตั้งเพิ่มเติม และใช้งานบนโปรแกรม Protégé ทั้งนี้ SWRL เป็นภาษาที่มีความสามารถเข้าถึงความรู้ และแสดงกฎสำหรับการอนุมานความรู้ทำให้เกิดข้อมูลใหม่ (Kliangkhlao et al., 2015) ซึ่งสามารถนำมาใช้ในการสืบค้นข้อมูลเชิงความหมายได้อย่างมีประสิทธิภาพ

### 2. การพัฒนาระบบการเรียนรู้ของเครื่องบนเหมืองความรู้เชิงความหมายสมุนไพรรไทย

นำผลลัพธ์ของคำสำคัญที่เกี่ยวข้องกันเชิงความหมาย จากการสืบค้นความรู้ในออนโทโลยีด้วยกฎ SWRL ในขั้นตอนที่ 1 ไปใช้สกัดข้อมูลเพื่อสร้างเหมืองความรู้จากแหล่งความรู้บนเว็บไซต์ 100 แหล่ง โดยใช้ Web Scraping บนภาษา Python ในการดึงข้อมูล (Hillen, 2019; Yaiprasert and Yusakul, 2022) ตามโครงสร้างเชิงความหมายที่สร้างด้วยออนโทโลยี ซึ่งในขั้นตอนนี้จะใช้การประมวลผลภาษาธรรมชาติ (NLP : Natural Language Processing) เพื่อตัดข้อความจากประโยคความรู้บนเว็บไซต์ แล้วใช้อัลกอริทึม Name Matching Algorithm ด้วยเทคนิค Levenshtein Distance ซึ่งเป็นวิธีการวัดหาค่าความต่างกันของ 2 ข้อความ โดยวัดจากจำนวนอักขระที่จะต้องทำการตัดออก แทรก และแทนที่อักขระในข้อความ จนได้อักขระเหมือนข้อความต้นแบบ (Po, 2020) ในการคัดเลือกเฉพาะคำสำคัญที่มีอัตราความคล้าย (Similarity rate) กับชื่อคลาสความรู้จากออนโทโลยี ในอัตราค่า ratio 0.7 (70%) ขึ้นไป เพื่อนำมาใช้สร้างคุณลักษณะ (Feature) และค่าในแต่ละคุณลักษณะ (Value) บนชุดข้อมูล (Dataset) สมุนไพรรไทย ซึ่งประกอบด้วย Feature ต่าง ๆ อาทิ ส่วนประกอบที่ใช้ประโยชน์ได้ อาการ/โรค วิธีการนำมาใช้ประโยชน์ ห้ามรับประทานเกินกี่วัน และปริมาณที่

แนะนำให้รับประทาน เพื่อระบุไปยังคลาสคำตอบ คือ ชื่อสมุนไพร ที่นำไปใช้ในกระบวนการทำนายเชิงการจำแนกด้วยอัลกอริทึม ML ใน 4 เทคนิค ดังนี้

$$a = g(z) = g(\sum_{i=1}^n x_i w_i + b), \quad a = g(z) = \frac{1}{1+e^{-z}}, \quad a = g(z) \begin{cases} 0 & \text{if } z \leq 0 \\ 1 & \text{if } z > 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$\frac{\partial E_{total}}{\partial w_5}, \frac{\partial E_{total}}{\partial w_5} = \frac{\partial E_{total}}{\partial out_{o1}} * \frac{\partial out_{o1}}{\partial net_{o1}} * \frac{\partial net_{o1}}{\partial w_5} \quad (2)$$

จากสมการ (1) ให้ a เป็น perceptron ที่คำนวณผลรวมของค่า input ( $x_i$ ) คูณด้วยค่าน้ำหนัก ( $w_i$ ) และรวมด้วยค่าไบแอส ( $b$ ) ในชั้นโครงข่าย (Layer) ต่าง ๆ ตามโครงสร้างของ Neural network จากนั้นค่า Output ในชั้นสุดท้าย จะถูกนำมาคำนวณค่าความน่าจะเป็นตั้งแต่ค่า 0 ถึง 1 ด้วยฟังก์ชัน Sigmoid คือ  $z = 1/(1+e^{-z})$  เพื่อตัดสินใจคลาสคำตอบ โดยจะตรวจสอบว่า ถ้า  $z \leq 0$  ทำนายคลาส 0,  $z > 0$  ทำนายคลาส 1 ในกระบวนการ Feed forward หากได้ผลลัพธ์ที่ผิดพลาดจากคลาสคำตอบจริง จะทำการ Back propagation ดังสมการ (2) เพื่อกระจายค่าความผิดพลาดย้อนกลับด้วยกฎ Chain rule เพื่อทำการปรับ  $w_i$  และ  $b$  ในชั้นต่าง ๆ และวนรอบทำซ้ำในกระบวนการ Feed forward จนครบจำนวนรอบการประมวลผลที่กำหนดไว้

2.2 Support Vector Machine (SVM) เป็นเทคนิคในการจัดจำรูปแบบเพื่อแก้ปัญหาการจัดกลุ่ม (classification problem) (Wang *et al.*, 2009) โดยใช้ในการหาสัมประสิทธิ์ของสมการเพื่อสร้างเส้นแบ่งที่สุุดในการแยกกลุ่มข้อมูลที่ถูกป้อนเข้าสู่อัลกอริทึม (optimal separating hyper plane) เมื่อเราพิจารณาข้อมูลที่ประกอบด้วยข้อมูล 2 กลุ่มดังสมการที่ 3

$$D = \{(x_i, y_i); i = 1, 2, \dots, n\} \quad (3)$$

2.1 Neural Network (NN) เป็น Algorithm หลักของการเรียนรู้แบบ Deep learning ซึ่งมีกระบวนการประมวลผลดังสมการ 1 และ 2 (Jordan, 2017)

เมื่อ  $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im}) \in R^m$   
 $y_i \in \{1, -1\}$  โดย 1 คือ ข้อมูลกลุ่ม 1 และ -1 คือ ข้อมูลกลุ่ม 2

ซึ่งเป็นการกำหนดกลุ่มเป้าหมายให้ SVM โดยที่ SVM นั้นมุ่งเป้าเพื่อหาฟังก์ชันการตัดสินใจที่สามารถแบ่งแยกค่าที่ไม่ทราบได้ ดังสมการที่ 4

$$f(x) = \text{sign}\{\sum_{k=1}^{n_v} w_k \varphi_k(x) \varphi_k(x_k) + b\} \quad (4)$$

$$\varphi(x) = [\varphi_1(x_1), \varphi_2(x_2), \dots, \varphi_n(x_{n_v})]^T \quad (5)$$

กลุ่มข้อมูล  $x$  จากสมการที่ 5 ไม่สามารถแบ่งแยกได้ด้วยสมการเส้นตรงแต่จะถูกแปลงให้อยู่ในรูปแบบที่สามารถใช้สมการเส้นตรงแบ่งแยกได้ โดยใช้เคอร์เนลฟังก์ชัน (kernel function) ดังสมการที่ 6

$$K(x, x_k) = \varphi(x) \varphi(x_k) \quad (6)$$

เมื่อ  $\varphi(x)$  แทน ฟังก์ชันสำหรับแปลงข้อมูลที่ไม่เป็นเชิงเส้นให้เป็นข้อมูลที่อยู่ในรูปเชิงเส้นสามารถแบ่งแยกได้

$w_k$  แทน ค่าน้ำหนักที่เชื่อมโยงจาก feature space ไปสู่ output space

$B$  แทน ค่าโน้มเอียง (bias)

$x_k$  แทน ซัพพอร์ตเวกเตอร์

โดย  $k = 1, 2, \dots, n_v$

$n_v$  แทน จำนวนซัพพอร์ตเวกเตอร์

วิธีการที่ใช้ในการหาเส้นแบ่งที่ดีที่สุด คือ การเพิ่มเส้นขอบ (margin) ให้กับเส้นแบ่งทั้งสองข้าง และ สร้างเส้นขอบที่สัมผัสกับค่าข้อมูลใน feature space ที่ใกล้ที่สุด ดังนั้นเส้นแบ่งที่มีเส้นขอบกว้างที่สุดจึงเป็นเส้นแบ่งที่ดีที่สุดและเรียกตำแหน่งการสัมผัสข้อมูลที่ใกล้ที่สุดจากการเพิ่มขอบนี้ว่า “ซัพพอร์ต เวกเตอร์” (support vector) เนื่องจากในบางกรณีการแบ่งแยกกลุ่มไม่สามารถทำได้ถูกต้องโดยสมบูรณ์

ดังนั้น จึงต้องมีการกำหนดตัวแปรสำหรับยอมรับค่าความผิดพลาดโดยการเพิ่มตัวแปร  $\xi$  (slack variable) ดังสมการที่ 7 และ 8 ดังนี้

$$W^T x + b \geq y - \xi_i \text{ เมื่อกำหนดให้ } y = 1 \quad (7)$$

$$W^T x + b \leq y + \xi_i \text{ เมื่อกำหนดให้ } y = -1 \quad (8)$$

จากการกำหนดค่า  $\xi_i > 0$  ทำให้โครงสร้างของซัพพอร์ตเวกเตอร์เมทซึนบรรลู่วัตถุประสงค์ใน 2 ส่วนคือการเพิ่มระยะแบ่งแยกให้มากที่สุดและลดข้อผิดพลาดในการทำนายให้ต่ำที่สุด ดังสมการที่ 9

$$\text{Minimize } \frac{1}{2} \|w\|^2 + c \sum_{i=1}^N \xi_i \quad (9)$$

$$\text{โดยที่ } \begin{aligned} &: y_i(W^T \varphi(x) + b) + \xi_i - 1 \geq 0 \\ &\xi_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, N \end{aligned}$$

2.3 K-Nearest Neighbor (KNN) เป็น อัลกอริทึมการเรียนรู้ที่ไม่ซับซ้อน และมีประสิทธิภาพสำหรับการจำแนกข้อมูลและการรับรู้วัตถุซึ่ง KNN จะคำนวณระยะทางโดยปริภูมิแบบยูคลิด (Sun *et al.*, 2009) ดังสมการที่ 10

$$D(p, q) = \frac{1}{\sqrt{(p_1 - q_1)^2 + (p_2 - q_2)^2 + \dots + (p_n - q_n)^2}} \quad (10)$$

2.4 Decision Tree (DT) สามารถนำเสนอชุดข้อมูล และกระบวนการประมวลผลเพื่อสร้างเหมือนความรู้ในแผนภาพผังงาน ดังนี้

ตารางที่ 1 ชุดข้อมูลสร้างโมเดล Decision Tree

Feature 1	Feature 2	Feature 3	Class
T	T	T	Y
F	F	F	N
T	T	F	Y
F	F	T	N

จากตารางที่ 1 สามารถสร้างกฎของเงื่อนไขการตัดสินใจด้วยโมเดล Decision Tree ดังนี้

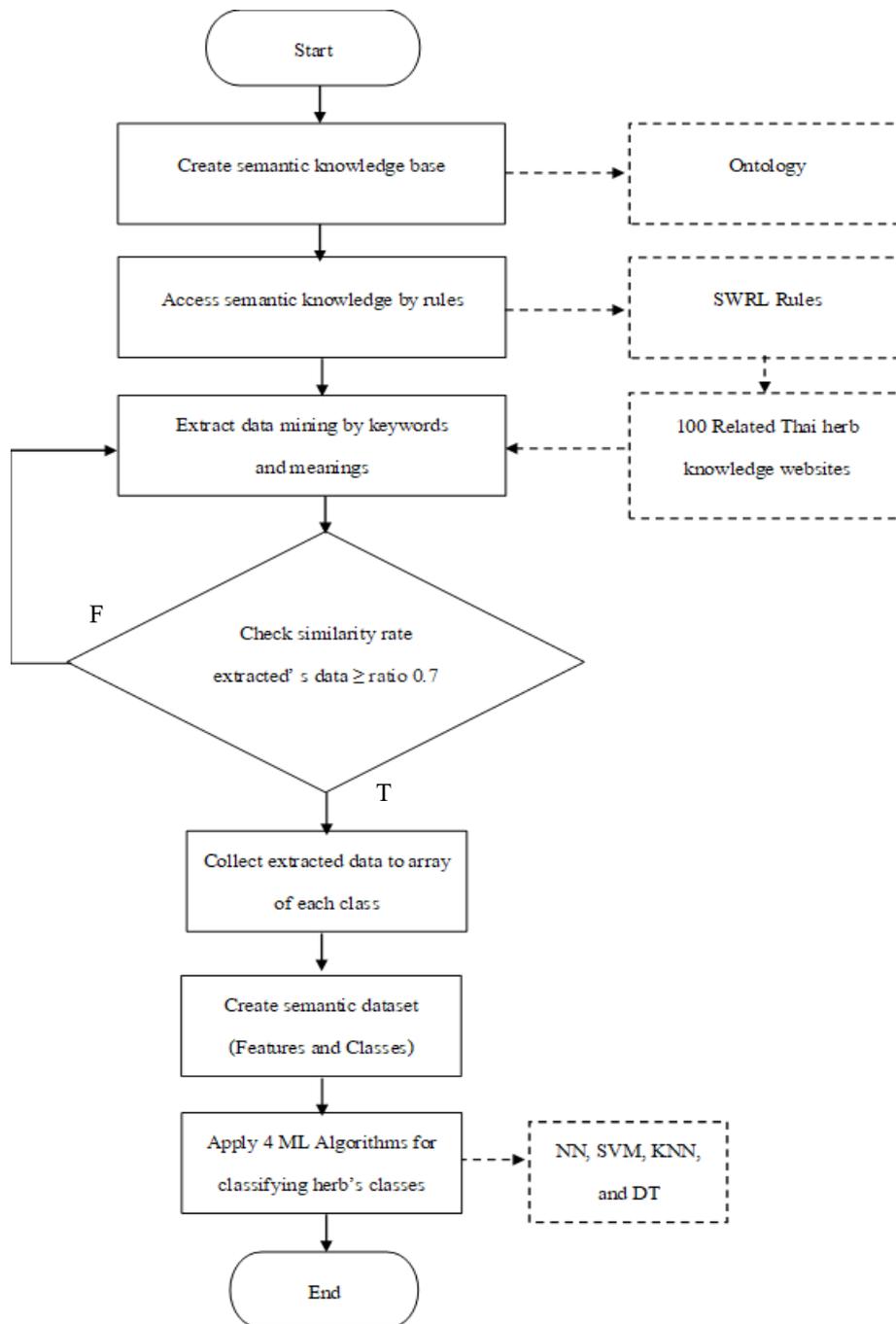
R1 = IF (Feature 1 = T) AND (Feature 2 = T) THEN CLASS = Y

R2 = IF (Feature 1 = T) AND (Feature 2 = F) THEN CLASS = N

R3 = IF (Feature 1 = F) AND (Feature 2 = F) THEN CLASS = N

จากขั้นตอนการดำเนินงานข้างต้น สามารถ  
นำเสนอขั้นตอนวิธีการพัฒนาระบบการเรียนรู้

ของเครื่องบนเหมืองความรู้เชิงความหมายสมุนไพร  
ไทย ในรูปแบบผังงาน (Flowchart) ดังนี้



ภาพที่ 1 Flowchart ของกรอบแนวคิดกระบวนการเรียนรู้ของเครื่องบนเหมืองความรู้เชิงความหมายสมุนไพรไทย

จากภาพที่ 1 สามารถอธิบายกรอบแนวคิด  
ของกระบวนการเรียนรู้ของเครื่องบนเหมืองความรู้  
เชิงความหมายสมุนไพรไทย ได้ 4 ขั้นตอน ดังนี้

1. สร้างไอออนโทโลยีโดยใช้โปรแกรม  
Protégé เพื่อรวบรวมองค์ความรู้สมุนไพรไทยเพื่อ  
การบำบัดรักษา

2. สร้างฐานกฎเชิงความหมาย SWRL สำหรับคลาสโพล ย่านาง และฟ้าทะลายโจร โดยใช้ Library บนโปรแกรม Protégé ในการอนุมานความรู้ในออนโทโลยี แล้วนำไปสกัดความรู้สมุนไพร จาก 100 เว็บไซต์ ทั้งนี้ในขั้นตอนการสกัดความรู้จะใช้ Name Matching Algorithm ด้วยเทคนิค Levenshtein Distance เป็นวิธีการวัดหาค่าความต่างกันของ 2 ข้อความ โดยวัดจากจำนวนอักขระที่จะต้องทำการตัดออก แทรก และแทนที่อักขระในข้อความ จนได้ อักขระเหมือนข้อความต้นแบบ (Po, 2020) จากนั้น นำทั้งสอง 2 ข้อความมาเปรียบเทียบกันด้วยอัตรา ความคล้าย  $\geq$  ratio 0.7 เพื่อคัดเลือกคำสำคัญหรือ ข้อความบนเว็บไซต์ ที่มีความคล้ายกับชื่อคลาสหรือ ข้อมูลที่เก็บไว้ในคลาสต่าง ๆ ของออนโทโลยีตาม ที่อนุมานได้

3. สร้างชุดข้อมูลเชิงความหมาย (semantic dataset) ซึ่งประกอบด้วยคุณลักษณะ (feature) และ ค่าความถี่ในการค้นพบคำสำคัญ (value) ของแต่ละ คุณลักษณะ

4. ส่งชุดข้อมูลให้กับอัลกอริทึมการเรียนรู้ ของเครื่อง (ML) ได้แก่ Neural network, SVM, KNN และ Decision tree เพื่อใช้ในการจำแนกคลาสคำตอบ โดยที่อัลกอริทึม ML ทั้ง 4 ชนิด จะถูกตั้ง ค่าพารามิเตอร์เพื่อให้กระบวนการเรียนรู้และทำนาย เกิดประสิทธิภาพที่ดี ดังนี้

4.1 Neural network ตั้งค่าพารามิเตอร์ hidden\_layer\_sizes = (3,3), activation='relu', optimizer = 'adam' และวนรอบฝึกสอนโมเดล จำนวน 500 รอบ

4.2 SVM ตั้งค่าพารามิเตอร์ kernel='linear' และการกำหนดระยะขอบในการ จำแนกข้อมูล (C=1.0)

4.3 KNN ตั้งค่าพารามิเตอร์ ที่ k=3

4.4 Decision tree ตั้งค่าพารามิเตอร์ criterion="entropy" และ max\_depth=3

3. การประเมินประสิทธิภาพในการสกัดความรู้เชิง ความหมาย และจำแนกข้อมูลสมุนไพรไทย แบ่งขั้นตอนการดำเนินงานเป็น 2 ส่วน ดังนี้

3.1 การประเมินประสิทธิภาพในการสกัด ความรู้เชิงความหมาย

ใช้คำสำคัญเชิงความหมายที่สืบค้นได้จาก ออนโทโลยี นำไปใช้สกัด/ค้นคืนข้อมูลสมุนไพรไทย 3 ชนิด ได้แก่ โพล ย่านาง และฟ้าทะลายโจร บน เว็บไซต์ 100 แหล่ง ซึ่งในการเลือกสมุนไพรไทย 3 ชนิด มาใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพในครั้งนี้ เนื่องจากเป็นสมุนไพรที่เป็นที่รู้จักของประชาชน อย่างแพร่หลาย และสามารถนำมาใช้ในการ บำบัดรักษาโรคที่พบได้ทั่ว ๆ ไป ซึ่งประชาชน สามารถนำองค์ความรู้ที่สกัดได้จากเหมืองความรู้เชิง ความหมายไปใช้ได้ในชีวิตประจำวัน จากนั้นนำ ผลลัพธ์ที่ได้มาคำนวณหาประสิทธิภาพ โดยแทน สูตรของรายการผลลัพธ์ ดังนี้ A คือ จำนวนข้อมูล สมุนไพรที่สืบค้นได้และถูกต้องตามความสนใจ B คือ จำนวนข้อมูลสมุนไพรที่ถูกต้องตามความสนใจ แต่ไม่ถูกสืบค้น และ C คือ จำนวนข้อมูลสมุนไพรที่ สืบค้นได้ แต่ไม่ถูกต้องตามความสนใจ (Miao and Zhu, 2021) จากนั้นนำค่าต่าง ๆ เหล่านี้ มาคำนวณหา ค่าต่าง ๆ เพื่อสรุปผลคุณภาพในการสกัดความรู้ใน 3 ส่วน ดังนี้

3.1.1 ค่าความแม่นยำ (Precision)

คือ การหาค่าความแม่นยำของโมเดล โดยทำการ พิจารณาแยกทีละคลาส ดังสมการที่ 11

$$\text{Precision} = A/(A+C) \times 100 \quad (11)$$

3.1.2 ค่าความระลึก (Recall) คือ การวัดค่าความถูกต้องของโมเดล โดยทำการพิจารณา แยกทีละคลาส ดังสมการที่ 12

$$\text{Recall} = A/(A+B) \times 100 \quad (12)$$

3.1.3 ค่าอัตราความถูกต้องในภาพรวม (F-measure) คือ ความสามารถในการทำนายของโมเดลจากการเฉลี่ยค่า Precision และ Recall ดังสมการที่ 13

$$F\text{-measure} = 2 \times (\text{Precision} \times \text{Recall}) / (\text{Precision} + \text{Recall}) \quad (13)$$

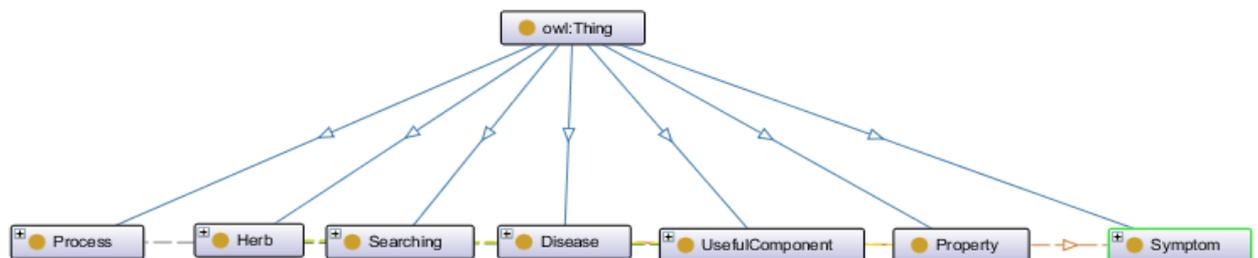
3.2 การประเมินประสิทธิภาพในการทำนายเพื่อจำแนกชื่อสมุนไพร

จากข้อมูลคุณลักษณะเชิงความหมายดังที่นำเสนอในข้อ 2 เพื่อทำนายคลาสคำตอบชื่อสมุนไพรด้วยการเรียนรู้ของเครื่อง โดยทำการทดสอบใน 4 อัลกอริทึม ได้แก่ Neural Network, SVM, KNN และ Decision Tree โดยกระบวนการฝึกสอนและทดสอบความถูกต้องในการทำนาย โดยใช้วิธีการแบ่งข้อมูล

(Split Test) ในอัตรา 70:30 (Pongsanguan *et al.*, 2018; Ibrahim, 2022) จากตัวอย่างข้อมูลในเหมืองความรู้ที่สืบค้นบนเว็บไซต์ 100 แหล่ง จำนวนทั้งหมด 300 ตัวอย่าง จาก 3 คลาสคำตอบ ได้แก่ ใพล (Zingiber montanum) ย่านาง (Tiliacora triandra) และ ฟ้าทะลายโจร (Andrographis paniculata) โดยได้ข้อมูลที่ใช้ฝึกสอน จำนวน 210 ตัวอย่าง และข้อมูลทดสอบจำนวน 90 ตัวอย่าง จากนั้นทำการวัดค่าความถูกต้องของแบบจำลองโดยใช้ค่าความถูกต้องของข้อมูล (Accuracy)

## ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

### 1. การสร้างออนโทโลยีและกฎในการสืบค้นความรู้เชิงความหมายสมุนไพรไทย



ภาพที่ 2 ฐานความรู้ออนโทโลยีในการสืบค้นความรู้เชิงความหมายสมุนไพร

ภาพที่ 2 ฐานความรู้ออนโทโลยีในการสืบค้นความรู้เชิงความหมายสมุนไพร แบ่งเป็น 2 ชั้นความรู้ และมีคลาสความรู้จำนวนทั้งหมด 8 คลาส ประกอบด้วย 1) คลาส Process อธิบายเกี่ยวกับวิธีการปรุงสมุนไพรเพื่อใช้ในการบำบัดรักษาโรค 2) คลาส Herb อธิบายเกี่ยวกับรายละเอียดต่าง ๆ ของสมุนไพร เช่น ชื่อสมุนไพรท้องถิ่น ชื่อสมุนไพรทางวิทยาศาสตร์ พื้นที่ ๆ พบ คำอธิบายรูปลักษณะของสมุนไพร และลิงค์เชื่อมโยงไปยังภาพถ่ายสมุนไพร

เป็นต้น 3) คลาส Searching รวบรวมสถิติในการค้นหาข้อมูลสมุนไพรชนิดต่าง ๆ จากผู้ใช้งานผ่าน Google Search engine เพื่อใช้ระบุความสำคัญในการสกัดข้อมูลผ่านกฎที่สอดคล้องกับความต้องการรับรู้ข้อมูลของผู้ใช้งาน 4) คลาส Disease และ Symptom อธิบายเกี่ยวกับโรคและอาการที่สามารถใช้สมุนไพรบำบัดรักษาได้ เช่น โรคอหิวาต์ โรคความดันโลหิตสูง และอาการเลือดกำเดาไหล เป็นต้น 5) คลาส UseFulComponent อธิบายเกี่ยวกับส่วนประกอบของ

สมุนไพรที่ใช้ประโยชน์ในการรักษาโรคและอาการต่าง ๆ ได้ (Chamnongsri, 2019) เช่น ย่านางมีสรรพคุณในการรักษาโรคอีสุกอีใส เป็นต้น และในส่วนของส่วนประกอบที่ใช้ประโยชน์ได้ จะมีการปรุง เช่น ย่านางมีส่วนประกอบของใบ และรากสามารถนำไปใช้ปรุงยาสมุนไพรได้ และ 6) คลาส Property อธิบายเกี่ยวกับสรรพคุณและผลข้างเคียงของสมุนไพรชนิดต่าง ๆ ที่ผู้ใช้ควรต้องศึกษาก่อนการใช้

โครงสร้างออนโทโลยีที่พัฒนาขึ้น มีความสอดคล้องกับโครงสร้างออนโทโลยีในงานวิจัยของ Chamnongsri (2019) ที่ให้ความหมายเกี่ยวกับชื่อสมุนไพรท้องถิ่น ชื่อทางวิทยาศาสตร์ สรรพคุณ และส่วนประกอบที่ใช้ประโยชน์ในการรักษาโรคและอาการต่าง ๆ ได้ แต่จะมีความแตกต่างตรงที่งานวิจัยในครั้งนี้ มีการสร้างคลาสความรู้เพิ่มเติมในการ

รวบรวมสถิติการค้นหาข้อมูลสมุนไพรจากผู้ใช้ เพื่อให้ระบบสามารถสกัดความรู้จากเหมืองบนเว็บ (Web Mining) ที่ตอบสนองต่อความต้องการของผู้ใช้บนพื้นฐานของค่าคะแนนความนิยมในการสืบค้นและงานวิจัยของ Tungkwampian *et al.* (2015) ได้สรุปว่า การประยุกต์ใช้ออนโทโลยี จะช่วยระบุความสัมพันธ์ในเชิงความหมายระหว่างแนวคิดในโดเมนความรู้ของสมุนไพรไทย ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นออนโทโลยีจึงนับเป็นแนวคิดที่มีความเหมาะสมอย่างยิ่งในการนำมาใช้พัฒนาเครื่องมือสกัด หรือขุดเจาะความรู้ที่เกี่ยวข้องกันในเชิงความหมายที่อยู่กระจายในหลายแหล่งข้อมูล

จากภาพที่ 2 สามารถสร้างกฎ SWRL เพื่อเข้าถึงโครงสร้างความรู้เชิงความหมายสมุนไพรไทยบนออนโทโลยี ได้ดังนี้

```
Herb(?h) ^ UsefulComponent(?c) ^ Process(?pc) ^ Interdict(?ir) ^ HasComp(?h, ?c)
^ IsProceeded(?c, ?pc) ^ Interdict(?h, ?ir) ^
Disease_name(?h, ?ds) ^ Symptom_name(?h, ?st) ^
RecommendedQuantity(?h, ?rq) -> sqwrl:select(?h, ?c, ?pc, ?ir, ?ds, ?st, ?rq) ^ sqwrl:orderBy(?c)
```

ภาพที่ 3 กฎ SWRL เพื่อเข้าถึงโครงสร้างความรู้เชิงความหมายสมุนไพรไทย

จากภาพที่ 3 กฎ SWRL ใช้ดึงโครงสร้างฐานความรู้ออนโทโลยีเพื่อระบุว่าสมุนไพรแต่ละชนิดมีสรรพคุณและวิธีการนำส่วนประกอบต่าง ๆ ไปปรุงใช้ประโยชน์ จากนั้นนำผลลัพธ์ที่ได้ส่งออกเป็นไฟล์ CSV จากนั้นส่งไฟล์เข้าสู่การประมวลผลเพื่อสกัดความรู้ในเหมืองความรู้เชิงความหมาย สร้างชุดข้อมูล และใช้ ML ในการทำนายผลลัพธ์ ตามขั้นตอนวิธีที่สร้างไว้ในขั้นตอนที่ 2 โดยสามารถอธิบายโครงสร้างกฎ SWRL ได้ดังนี้

1. Herb(?h) ^ UsefulComponent(?c) ^ Process(?pc) ^ Interdict(?ir) คือ การประกาศตัวแปร ?h เพื่อเข้าถึงข้อมูลสมุนไพร ?c เพื่อเข้าถึงข้อมูลส่วนประกอบของสมุนไพรที่นำมาใช้ประโยชน์ ?pc เพื่อเข้าถึงข้อมูลวิธีการปรุงสมุนไพร และ ?ir เพื่อเข้าถึงข้อมูลผลข้างเคียงของสมุนไพร

2. HasComp(?h, ?c) คือ การนิยามความหมายว่า สมุนไพรแต่ละชนิดมีส่วนประกอบที่นำมาใช้ประโยชน์ได้แตกต่างกันออกไป

3. IsProceeded(?c, ?pc) คือ การนิยามความหมายว่า ส่วนประกอบที่นำมาใช้ประโยชน์ของสมุนไพร มีวิธีการปรุงเพื่อนำมาใช้บำบัดรักษาโรคและอาการต่างๆ

4. Interdict (?h, ?ir) คือ การนิยามความหมายว่า สมุนไพรแต่ละชนิดมีผลข้างเคียงที่ผู้ใช้ควรระมัดระวังในการใช้

5. Disease\_name(?h,?ds)^Symptom\_name(?h, ?st) คือ การนิยามความหมายว่า สมุนไพรแต่ละชนิด สามารถใช้บำบัดรักษาโรคและอาการต่างๆ ได้แตกต่างกันออกไป

6. RecommendedQuantity(?h, ?rq) คือ การนิยามความหมายว่า สมุนไพรแต่ละชนิดจะถูกแนะนำปริมาณการใช้หรือรับประทานในแต่ละวัน และไม่ควรเกินกี่วัน เพื่อไม่ให้ส่งผลเสียต่อร่างกาย

7. sqwrl:select(?h, ?c, ?pc, ?ir, ?ds, ?st, ?rq) ^sqwrl:orderBy(?c) คือ การแสดงผลลัพธ์ที่ได้จากการอนุมานด้วยกฎตามองค์ประกอบข้อ 1-6 ด้านบน โดยจะแสดงข้อมูลในฟิลด์ต่างๆ ได้แก่ ชื่อสมุนไพร ส่วนประกอบ วิธีปรุง ผลข้างเคียง โรคและอาการ และคำแนะนำเกี่ยวกับปริมาณการใช้หรือรับประทานในแต่ละวัน โดยจะแสดงผลลัพธ์เรียงตามกลุ่ม (orderBy) ของส่วนประกอบของสมุนไพร

## 2. การพัฒนากระบวนการเรียนรู้ของเครื่องบนเหมือนความรู้เชิงความหมายสมุนไพรไทย

สามารถนำเสนอขั้นตอนวิธีการประมวลผลด้วยซูโดโค้ด (Pseudo code) ดังนี้

```

Ontology = herb.owl
Rule = SWRL command
WordsfromWeb = words on 100 herb knowledge websites
Keywords = SemanticProcess(Ontology, Rule)
Features, Value= KnowledgeMiningProcess(Keywords, WordsfromWeb )
HerbDataset = CreateDataset(Features, Value)
HerbdatasetTrain, HerbdatasetTest = TrainTest_Split(HerbDataset, 70, 30)
ML(HerbdatasetTrain, HerbdatasetTest)

SemanticProcess(Ontology, Rule):
    Results = Rule -> Ontology
    For Keyword in Results :
        i += 1
        Keywords[i] = Keyword
    Return Keywords

KnowledgeMiningProcess(Keywords, WordsfromWeb_TH) :
    WordsfromWeb = Eng(WordsfromWeb_TH)
    Sim = LVDistanct(Keywords, WordsfromWeb)
    if(Sim>=0.7) then
        Features = WordsfromWeb
        Value = count(Features)
    Return Features, Value

CreateDataset(Features, Value) :
    HerbDataset <- Add(Features, Value)
    Return HerbDataset

TrainTest_Split(HerbDataset, TrainingProportion, TestingProportion) :
    Train, Test = train_test_split (HerbDataset, TrainingProportion,TestingProportion)
    Return Train, Test

ML(Train, Test) :
    NN(Train, Test)
    SVM(Train, Test)
    KNN(Train, Test)
    DT(Train, Test)

```

ภาพที่ 4 Pseudo code กระบวนการเรียนรู้ของเครื่องบนเหมืองความรู้เชิงความหมายสมุนไพรไทย

จากภาพที่ 4 Pseudo code แบ่งฟังก์ชันการประมวลผลออกเป็น 4 ส่วน ดังนี้

1. Semantic process ทำหน้าที่ในการใช้กฎ SWRL ดึงข้อมูลจากออนโทโลยี เพื่อให้ได้คำสำคัญจากคลาสความรู้เชิงความหมาย ซึ่งงานวิจัยของ Polenghi *et al.* (2022) ได้ใช้กฎ SWRL ดำเนินการอัตโนมัติกับออนโทโลยีในการให้เหตุผลขององค์ความรู้เชิงความหมาย งานวิจัยของ Aldana Martín *et al.* (2022) ได้ใช้ SWRL ในการระบุความสัมพันธ์ระหว่างแต่ละคลาสความรู้ เพื่อให้เกิดการเชื่อมโยงสาเหตุไปยังผลที่ตามมาขององค์ความรู้ที่สนใจได้อย่างมีประสิทธิภาพ และงานวิจัยของ Ruger *et al.* (2022) ได้ใช้ภาษา SWRL สำหรับการสร้างกฎการอนุมานแบบมีเงื่อนไข เพื่อดึงความรู้เชิงความหมายในออนโทโลยี แสดงเป็นคำแนะนำด้านการให้บริการข้อมูลงานวิจัยตามโดเมนความรู้ที่ผู้สนใจได้อย่างถูกต้องและครอบคลุม

2. Knowledge mining process ทำหน้าที่ในการรับคำสำคัญ เพื่อนำมาเปรียบเทียบค่าความคล้ายกับข้อความที่อยู่บนเว็บไซต์สมุนไพรไทย จำนวน 100 แหล่ง โดยข้อมูล/ข้อความต่าง ๆ จะผ่านขั้นตอนการแปลข้อมูลจากภาษาไทยเป็นภาษาอังกฤษก่อนโดยใช้ไลบรารี Python googletrans แล้วทำการตัดข้อความในประโยคโดยใช้ไลบรารี Python wordsegment เพื่อนำข้อมูลมาเปรียบเทียบความคล้ายกัน ตามแนวคิด Levenshtein distance จากนั้นเลือกข้อความที่มีความคล้ายมากกว่าค่า ratio 0.7 นำมาสร้างคุณลักษณะ และกำหนดค่าของคุณลักษณะ (value) โดยการนับคุณลักษณะ (คำสำคัญ) ที่พบในองค์ความรู้บนเว็บไซต์ต่าง ๆ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ghosh *et al.* (2022) ได้ใช้อัลกอริทึม Levenshtein distance ในการสกัดระหว่าง 2 ข้อความที่มีอัตราความคล้ายกันในระดับ ratio ที่กำหนดไว้

3. Create Dataset โดย feature และ value จากการสืบค้นเหมืองข้อมูล (ส่วนที่ 2) ถูกส่งมาเพื่อสร้างชุดข้อมูลสมุนไพร ยกตัวอย่างเช่น การสร้างชุดข้อมูลจากเหมืองความรู้เกี่ยวกับคลาสไพล (Zingiber montanum) มีความหมายเกี่ยวกับการมีสรรพคุณรักษาอาการเลือดดำเดาไหล โดยใช้เหง้า (Rhizome/Rhizomes) มาทำการต้ม (Boil) คลาสไบบ่านาง (Tiliacora triandra) ใช้ใบนำมาต้มเพื่อรักษาอาการโรคอีสุกอีใส (Chickenpox) และคลาสฟ้าทะลายโจร (Andrographis paniculata) ใช้ใบนำมาต้มเพื่อรักษาอาการเป็นไข้ตัวร้อน (Flu) โดยไม่ควรรับประทานเกิน 7 วัน (EatDays) และใช้ไม่เกิน 2 เม็ดต่อวัน (EatTablets)

4. Machine learning (ML) ทำการแบ่งข้อมูลเพื่อใช้ในกระบวนการฝึกสอนและทดสอบความถูกต้องในการทำนาย ในอัตรา 70:30 (Pongsanguan *et al.*, 2018; Ibrahim, 2022) จากนั้นส่งให้อัลกอริทึม Neural network, SVM, KNN และ Decision tree เพื่อประมวลผลและทดสอบประสิทธิภาพ ทั้งนี้ในการประยุกต์ใช้เทคนิคเหมืองข้อมูลเชิงความหมาย ร่วมกับการทำนายผลลัพธ์ด้วยการเรียนรู้ของเครื่องในงานวิจัยนี้ สามารถสร้างระบบการแนะนำสมุนไพรไทยเพื่อบำบัดรักษาอาการโรคบนข้อมูลแบบไร้โครงสร้างได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Prompukdee *et al.* (2017) ที่ได้นำเทคนิคเหมืองข้อมูลมาประยุกต์ใช้ในการแพทย์แผนไทย โดยสกัดชุดข้อมูลการรักษาอาการของผู้ป่วยที่แตกต่างกัน และใช้การค้นหากฎการเชื่อมโยง เพื่อนำไปใช้สร้างแบบจำลองด้วยอัลกอริทึมการเรียนรู้ของเครื่อง (ML : Machine learning) เพื่อใช้ในการทำนายเชิงจำแนกและจัดกลุ่มข้อมูลความรู้ ทั้งนี้สามารถนำเสนอโครงสร้างชุดข้อมูลที่สร้างได้จากการทำสกัดเหมืองความรู้เชิงความหมายสมุนไพรไทย ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ชุดข้อมูลที่สกัดได้จากเหมืองความรู้สมุนไพรไทย

Rhizom	Rhizome	Boi	Noseblee	lea	Chickenpo	EatDay	EatTablet	fl	class
e	s	l	d	f	x	s	s	u	class
									Zingiber
4	1	1	1	0	0	0	0	0	montanum
									Tiliacora
0	0	3	2	0	1	0	0	0	triandra
									Andrographi
0	0	1	0	1	0	7	2	1	s paniculata

IsProceeded
IsProceeded
Herb->HasProp-> Property-> TreatD-> Disease, ->TeatS->Symptom

3. ผลการประเมินประสิทธิภาพของกระบวนการเรียนรู้ของเครื่องบนเหมืองความรู้เชิงความหมายสมุนไพรไทย

แบ่งเป็น 2 ส่วน ดังนี้

3.1 ผลการประเมินประสิทธิภาพในการสกัดความรู้เชิงความหมาย สรุปได้ดังนี้

ตารางที่ 3 ประสิทธิภาพในการสกัด/ค้นคืนความรู้เชิงความหมายสมุนไพรไทยแหล่งความรู้บนเว็บไซต์ 100 แหล่ง

รายการทดสอบ	ผลลัพธ์ในการสกัด/ค้นคืนความรู้ด้วยคำเป้าหมายที่กำหนด		
	จำนวนข้อมูลสมุนไพรที่สืบค้นได้และถูกต้องตามความสนใจ	จำนวนข้อมูลสมุนไพรที่ถูกต้องตามความสนใจแต่ไม่ถูกสืบค้น	จำนวนข้อมูลสมุนไพรที่สืบค้นได้ แต่ไม่ถูกต้องตามความสนใจ
	(A)	(B)	(C)
1. ไพล (Zingiber montanum) คำเป้าหมาย ได้แก่ เหง้า (rhizome), ต้ม (boil), ผ่น (sting), กำเดาไหล (nose bleed)	300 (rhizome, boil, nose bleed)	95 (sting)	0
2. ย่านาง (Tiliacora triandra) คำเป้าหมาย ได้แก่ ใบ (leaf), ต้ม (boil), อีสุกอีใส (chickenpox)	300 (leaf, boil, chickenpox)	0	0

ตารางที่ 3 (ต่อ)

รายการทดสอบ	ผลลัพธ์ในการสกัด/ค้นคืนความรู้ด้วยค่าเป้าหมายที่กำหนด		
	จำนวนข้อมูลสมุนไพรที่สืบค้นได้และถูกต้องตามความสนใจ (A)	จำนวนข้อมูลสมุนไพรที่ถูกต้องตามความสนใจแต่ไม่ถูกสืบค้น (B)	จำนวนข้อมูลสมุนไพรที่สืบค้นได้แต่ไม่ถูกต้องตามความสนใจ (C)
3. พื้ทะเลลายโจร ( <i>Andrographis paniculata</i> ) ค่าเป้าหมาย ได้แก่ ใบ (leaf), ต้ม (boil), ไม่ควรทานเกิน 7 วัน (should not eat more 7 days), ไข้หวัด (flu), 2 เม็ด (2 tablets)	300 (leaf, boil, flu)	70 (should not eat more 7 days, 2 tablets )	0
4. ส่วนประกอบของสมุนไพรที่ช่วยบำบัดโรคความดันโลหิตสูงได้ ค่าเป้าหมาย ได้แก่ ใบ (leaf), ย่านาง( <i>Tiliacora triandra</i> )	300 (leaf, <i>Tiliacora triandra</i> )	0	0
5. สมุนไพรที่นิยมสืบค้นและช่วยบำบัดโรคได้มากกว่า 1 โรค ค่าเป้าหมาย ได้แก่ ย่านาง ( <i>Tiliacora triandra</i> ), ใบ (leaf), จำนวนครั้งที่สืบค้น ย่านาง (Searching), โรคความดันโลหิตสูง (High blood pressure), โรค อีสุกอีใส (Chickenpox)	300 ( <i>Tiliacora triandra</i> , Leaf, Searching, High blood pressure, Chickenpox)	0	0
<b>Mean</b>	<b>300</b>	<b>33</b>	<b>0</b>
<b>Precision</b>		100%	
<b>Recall</b>		90.1%	
<b>F-measure</b>		94.8%	

จากตารางที่ 3 ประสิทธิภาพในการสกัด/ค้นคืนความรู้เชิงความหมายเกี่ยวกับสมุนไพรไทย โดยใช้ออนโทโลยี และกฎ SWRL ทำให้ได้ข้อมูล/ค่าสำคัญที่สามารถนำมาใช้สร้าง Feature และ Value ในชุดข้อมูลเชิงความหมายของสมุนไพรทั้ง 3 ชนิด เพื่อ

ส่งไปประมวลผลด้วยอัลกอริทึม ML ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีค่า F-measure เท่ากับ 94.8%

3.2 ผลการประเมินประสิทธิภาพในการทำนาย เพื่อจำแนกคลาสคำตอบชื่อสมุนไพรด้วย ML สรุปได้ดังนี้

ตารางที่ 4 ค่าร้อยละความถูกต้องของการทำนายเชิงจำแนกชื่อสมุนไพร จาก 4 อัลกอริทึม

รายการทดสอบ	ค่าร้อยละความถูกต้องในการทำนาย			
	Neural network	SVM	KNN	Decision tree
1. ใพล (Zingiber montanum)	91.1%	88.8%	83.3%	85.5%
2. ย่านาง (Tiliacora triandra)	90.0%	91.1%	83.3%	85.5%
3. ฟ้าทะลายโจร (Andrographis paniculata)	88.9%	87.8%	80.0%	82.2%
<b>Average percentage</b>	<b>90.0%</b>	<b>89.2%</b>	<b>82.2%</b>	<b>84.4%</b>
	<b>(1)</b>	<b>(2)</b>	<b>(4)</b>	<b>(3)</b>

จากตารางที่ 4 ประสิทธิภาพในการทำนายเพื่อจำแนกคลาสคำตอบสมุนไพร 3 ชนิด ด้วย Neural network ได้ค่าความถูกต้อง (Accuracy) สูงที่สุดเท่ากับ 90.0% รองลงมาคือ SVM ค่าความถูกต้องเท่ากับ 89.2% Decision tree ค่าความถูกต้องเท่ากับ 84.4% และ KNN ค่าความถูกต้องเท่ากับ 82.2% ตามลำดับ

## สรุป

ออนโทโลยีสมุนไพรไทย แบ่งเป็น 2 ชั้นความรู้ และมีคลาสความรู้จำนวนทั้งหมด 8 คลาส และในงานวิจัยนี้ได้สร้างกฎ SWRL เพื่อดึงโครงสร้างความรู้ที่ช่วยระบุรูปแบบ (Pattern) ข้อมูลที่คลาสคำตอบชนิดสมุนไพร 3 ชนิด ได้แก่ ใพล ย่านาง และฟ้าทะลายโจร ได้อย่างเป็นระบบ และสอดคล้องกับขอบเขตความสนใจที่แท้จริง จากนั้นโครงสร้างเชิงความหมาย จะถูกส่งเข้าสู่กระบวนการ

ประมวลผลเพื่อสกัดความรู้ในเหมืองความรู้เชิงความหมาย สร้างชุดข้อมูล และใช้ ML ในการทำนายผลลัพธ์ ซึ่งวิธีการบูรณาการออนโทโลยี และ ML เพื่อสร้างเหมืองความรู้เชิงความหมายสมุนไพรไทย ทั้งนี้ผลจากการบูรณาการเทคนิคที่โดดเด่นเข้าด้วยกัน ส่งผลให้ผลการประเมินประสิทธิภาพในการสกัด/ค้นคืนความรู้เชิงความหมายเกี่ยวกับสมุนไพรไทย ได้ค่า F-measure ในระดับที่น่าพอใจ โดยมีค่าเท่ากับ 87.9% ซึ่งผลจากความสามารถและความแม่นยำในระดับสูงของการสกัดและจำแนกผลลัพธ์บนเหมืองข้อมูลเชิงความหมายที่พัฒนาขึ้น จะช่วยให้นักพัฒนาสามารถใช้อัลกอริทึมที่คิดค้นขึ้นไปใช้สร้างเหมืองข้อมูลทางสุขภาพในด้านต่าง ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถสร้างชุดข้อมูล (Dataset) เชิงความหมายที่มีคุณภาพขึ้นมาใช้กับงานต่าง ๆ ได้เอง

## กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ที่สนับสนุนทุนวิจัยในครั้งนี้ รวมถึงผู้เชี่ยวชาญที่ให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีที่ทันสมัยและมีประสิทธิภาพ

## เอกสารอ้างอิง

- Aldana Martín, J.F., García Nieto, J., Roldán García, M.M. and Aldana Montes, J.F. 2022. Semantic modelling of Earth Observation remote sensing. **Expert Systems with Applications** 187(C): 115838.
- Chamnongsri, N. 2019. Ontology Development for Thai Herbal Medicine Recorded in Ancient Documents. **Journal of Information Science** 37(4): 18-43. (in Thai)
- Ghosh, S., Ghosh, A., Ghosh, B. and Roy, A. 2022. Plagiarism Detection in the Bengali Language: A Text Similarity-Based Approach, pp. 1-4. **In 3<sup>RD</sup> International Conference on Engineering and Advancement in Technology (ICEAT 2022)**. Lisbon, Portugal.
- Hillen, J. 2019. Web scraping for food price research. **British Food Journal** 121(12): 3350-3361.
- Ibrahim, A.F. 2022. Application of various machine learning techniques in predicting coal wettability for CO2 sequestration purpose. **International Journal of Coal Geology** 252(14): 103951.
- Jordan, J. 2017. **Neural networks: training with backpropagation**. Available Source: <https://www.jeremyjordan.me/neural-networks-training>, June 9, 2022.
- Kliangkhlao, M., Kochakomjarupong, D. and Boonchoom, V. 2015. An Ontology Development for Personal Health Adaptation Related to Climate Change. **Thaksin University Journal** 18(1): 23-31. (in Thai)
- Miao, J. and Zhu, W. 2021. Precision–recall curve (PRC) classification trees. **Evolutionary Intelligence** 15(3): 1545-1569.
- Ministry of Public Health. 2008. **Notification of Ministry of Public Health 2008 Title: Management plan to protect herbs in Phu Pha Kood Conservation Area Mukdahan Province According to the Protection and Promotion of Thai Traditional Medicine Knowledge Act the Protection and Promotion of Thai Traditional Medicine Wisdom Act 1999**. Government Gazette vol.125, Special Part 42. (dated February 28, 2008). (in Thai)
- Noy, N. and McGuinness, D. 2001. **Ontology development 101: A guide to creating your first ontology**. Stanford University, Stanford.
- Po, D.K. 2020. Similarity Based Information Retrieval Using Levenshtein Distance Algorithm. **International Journal of Advances in Scientific Research and Engineering** 6(4): 6-17.
- Polenghi, A., Roda, I., Macchi, M. and Pozzetti, A. 2022. An ontological modelling of multi-attribute criticality analysis to guide Prognostics

- and Health Management program development. **Autonomous Intelligent Systems** 2(1): 1-16.
- Pongsanguan, W., Thinsungnoen, T. and Thinsungnoen, M. 2018. Development of Model for Diabetes Mellitus Using Decision Tree Technique. **Journal of Science and Technology** 1(1): 1-8. (in Thai)
- Prompukdee, C., Rungrattanaubol, J. and Na-udom, A. 2017. Applying Data Mining Techniques on Thai Traditional Medicine Treatment. **NU. International Journal of Science** 14(1): 24-36. (in Thai)
- Ruger, Y., Kabmala, M. and Chansanam, W. 2022. Ontology Rules for Library Research Services Recommendation System. **International Journal of Information and Education Technology** 12(9): 831-839.
- Sun, B., Du, J. and Gao, T. 2009. Study on the Improvement of K-Nearest-Neighbor Algorithm, pp. 390-393. *In International Conference on Artificial Intelligence and Computational Intelligence 2009*. Shanghai, China.
- Tian, D., Li, M., Zhang, X., Han, S. and Shen, Y. 2023. Intelligent Question Answering Method for Construction Safety Hazard Knowledge Based on Deep Semantic Mining. **Automation in Construction** 145: 1-13.
- Tungkwampian, W., Theerarungchaisri, A. and Buranarach, M. 2015. Development of Thai herbal medicine knowledge base using ontology technique. **The Thai Journal of Pharmaceutical Sciences** 39(3): 102-109.
- Wang, S., Mathew, A., Chen, Y., Xi, L., Ma, L. and Lee, J. 2009. Empirical analysis of support vector machine ensemble classifiers. **Journal of Expert Systems with Applications** 36(3): 6466-6476.
- Xiuyi, T. and Yuxia, G. 2018. Research on Application of Machine Learning in Data Mining. **Journal of Materials Science and Engineering** 6(392): 1-4.
- Yaiprasert, C. and Yusakul, G. 2022. Artificial intelligence for target symptoms of Thai herbal medicine by web scraping. **International Journal of Data and Network Science** 6(3): 1013-1022. (in Thai)

การหาปริมาณ *Escherichia coli* O26, O104, O111, และ O157 จากเนื้อวัวใน  
ประเทศไทยและเนื้อวัวนำเข้าจากประเทศมาเลเซียด้วยวิธี Most Probable  
Number-Polymerase Chain Reaction  
Most Probable Number-Polymerase Chain Reaction-based  
Quantification of *Escherichia coli* O26, O104, O111, and O157  
from Thai and Imported Malaysian Beef

ปฐมรัตน์ รัตนช่วย<sup>1</sup> วรลภย์ โหมดแหละหมัน<sup>2</sup> สุนิสา เย็นใส<sup>2</sup> และ ภรณ์ สุขุมังกูร<sup>2\*</sup>

Pattamarat Rattanachuy<sup>1</sup>, Woralop Modleahman<sup>2</sup>, Sunisa Yensai<sup>2</sup>  
and Pharanai Sukhumungoon<sup>2\*</sup>

Received: 30 January 2023, Revised: 4 April 2023, Accepted: 19 June 2023

### บทคัดย่อ

มีรายงานถึงทำให้เกิดการติดเชื้ออย่างประปรายไปจนถึงการระบาดเป็นวงกว้าง ส่งผลให้เกิดความสูญเสียทางเศรษฐกิจและสังคมอย่างมหาศาลทั่วโลก ในการศึกษาี้ได้ทำการตรวจสอบความชุกและหาปริมาณเชื้อ *E. coli* O26, O104, O111 และ O157 จากตัวอย่างเนื้อวัวขายปลีกทั้งเนื้อวัวไทยและเนื้อวัวที่นำเข้ามาจากประเทศมาเลเซีย โดยวิธี MPN-PCR จากการตรวจตัวอย่างเนื้อวัวจำนวน 102 ตัวอย่าง พบความชุกของเชื้อ *E. coli* O26, O104, O111, และ O157 เท่ากับ 57%, 6%, 0% และ 17% ตามลำดับ โดยพบว่าตัวอย่างเนื้อวัวปนเปื้อนด้วยเชื้อซีโรไทป์ O26 ในความชุกที่สูงที่สุด ( $P$ -value < 0.05) ในจำนวนตัวอย่างที่ให้ผลบวกนั้น ค่า MPN/g ที่น้อยที่สุดที่พบคือ < 3 MPN/g ในทุกซีโรไทป์ที่ตรวจ ในขณะที่ค่า MPN/g สูงสุดของเชื้อ *E. coli* O26, O104, O111 และ O157 เท่ากับ 75, 93, < 3, และ 27 ตามลำดับ นอกจากนี้มีการใช้เทคนิค Immuno-magnetic separation เพื่อยืนยันการตรวจไม่พบเชื้อ *E. coli* O111 ในตัวอย่างเนื้อวัวอีกด้วย ในการศึกษาี้แสดงให้เห็นว่าการปนเปื้อนเชื้อ *E. coli* O157 และ non-O157 ในตัวอย่างเนื้อวัวในความชุกที่สูง และปนเปื้อนในปริมาณมากก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อสุขภาพของผู้บริโภคและสิ่งนี้มีความสำคัญด้านสาธารณสุข

คำสำคัญ: เนื้อวัว, Shiga toxin, *Escherichia coli*, การปนเปื้อน, O157, MPN-PCR

<sup>1</sup> สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อำเภอเมือง จังหวัดปัตตานี 94000

<sup>1</sup> Department of Science, Faculty of Science and Technology, Prince of Songkla University, Muang, Pattani, 94000, Thailand.

<sup>2</sup> ภาควิชาจุลชีววิทยา สาขาวิทยาศาสตร์ชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90110

<sup>2</sup> Department of Microbiology, Division of Biological Science, Faculty of Science, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla, 90110, Thailand.

\* Corresponding author e-mail: pharanai82@gmail.com

## ABSTRACT

The contamination of *Escherichia coli* O157 and non-O157 groups in foods has been reported to cause sporadic cases and outbreaks, resulting in significant economic and social losses worldwide. In this study, the prevalence of *E. coli* O26, O104, O111, and O157 in retail beef samples from either domestic Thai or imported Malaysian sources was investigated and their amounts were quantified using the MPN-PCR approach. Of the 102 samples, *E. coli* O26, O104, O111, and O157, were found in beef at rates of 57%, 6%, 0%, and 17%, respectively, with serotype O26 showing the highest contamination rate among the sample ( $P$ -value < 0.05). Among the positive samples investigated, the lowest MPN/g value were less than 3 for all serotypes, while the highest MPN/g values of *E. coli* O26, O104, O111, and O157, were 75, 93, < 3, and 27, respectively. Immuno-magnetic separation technique was also employed to confirm the lack of *E. coli* O111 in beef. The high level of *E. coli* O157 and non-O157 contamination in beef observed in this study are thought to pose health risks to consumers, making the finding crucial from a public health standpoint.

**Key words:** meat, Shiga toxin, *Escherichia coli*, contamination, O157, MPN-PCR

## INTRODUCTION

Diarrheagenic *Escherichia coli* (DEC) play a role as causative agents of gastrointestinal illnesses around the world. A report on global child mortality demonstrates that diarrhea was responsible for 9.9% of 7.6 million deaths among children aged 1-59 months in 2010 and the situation in Southeast Asia follows a similar pattern (Liu *et al.*, 2012).

Among the 6 DEC pathotypes, enterohaemorrhagic *E. coli* (EHEC) exhibits the most devastating ability to human cells since it is capable of producing the principal virulence factor called Shiga toxin (Stx) (Nataro and Kaper, 1998). EHEC may contain Stx1 or Stx2 or both. Once Stx enters the human blood circulation, it binds to a receptor on renal cells called globotriaosylceramide (Gb3) (de Sablet *et al.*, 2008) and internalizes into the cell. Stx then causes the elimination of an adenine residue from 28S ribosomal RNA, resulting in inhibition of protein biosynthesis and cell death (Nataro and Kaper, 1998).

The most important EHEC serotype causing food poisoning outbreaks worldwide is EHEC O157:H7 (Themphachana *et al.*, 2014). The carriers for this O157 serotype are commonly meats, especially beef, since the natural reservoir host of this bacterial species is cattle. Massive outbreaks of this agent are reported from both eastern and

western hemispheres (Michino *et al.*, 1999; Riley *et al.*, 1983). Nevertheless, EHEC in the non-O157 group has lately been considered important and has gradually attracted attention from researchers all around the world. Among the EHEC non-O157 group, EHEC serotype O26 constitutes the most common serotype causing haemorrhagic colitis (HC) and hemolytic uremic syndrome (HUS) in Europe (European Food Safety Authority (EFSA), 2007; Bugarel *et al.*, 2011). Moreover, many outbreaks caused by *E. coli* O26 have been reported (Ethelberg *et al.*, 2009; Brown *et al.*, 2012). While EHEC O26 is the most common in Europe, EHEC O111, carrying at least one *stx* gene, is one of the most common cause of HC and HUS in United States (Brooks *et al.*, 2005). Furthermore, it also causes diseases in Europe (Karch *et al.*, 1999), Australia (Paton *et al.*, 1996), and Asia (Jeon *et al.*, 2006). In the past decade, Shiga toxin-producing *E. coli* O104 has exhibited a striking capability for causing sporadic infections and outbreaks worldwide, especially the latter that led to the largest outbreak in Germany in 2011. This outbreak resulted in 3,816 cases of gastroenteritis, 845 cases of HUS, and 54 deaths (Frank *et al.*, 2011). Thus, these data indicate that *E. coli* in the non-O157 group should be a greater concern.

Southern Thailand shares a partial border with Malaysia, and food products, especially beef, are imported from Malaysia to Thailand through this border due to high consumer demand. However, it is not clearly understood how much *E. coli* O157 and non-O157 are imported through the import process. To investigate this possibility, we aimed to estimate the prevalence and quantify the natural contamination of *E. coli* O26, O104, O111, and O157 in Thai and imported Malaysian beef sold in retail markets in Southern Thailand using MPN-PCR. This information is beneficial for the risk assessment of food-borne outbreaks caused by *E. coli* in both O157 and non-O157 groups in southern Thailand.

## MATERIALS AND METHODS

### 1. Sample collection

To obtain data on the prevalence and quantity of *E. coli* O26, O104, O111, and O157 in beef, a total of 102 beef samples were collected from eight open markets throughout Hat-Yai city, Songkhla, Thailand. The beef samples were kept at room temperature and processed and analyzed within 2 hours after collection.

### 2. MPN-PCR-based quantification of *E. coli* O26, O104, O111, and O157

MPN-PCR was performed as described previously (Phetkhajorn *et al.*, 2014) with slight modifications. Briefly, a 25 g of beef was homogenized with 225 ml of tryptic soy broth (TSB) (Becton Dickinson, Sparks, MD). The liquid portion was used to perform the three-tube MPN method, 10-fold, 100-fold, and 1,000-fold dilutions. One ml of the aliquot from each dilution was transferred into triplicate MPN tubes, and then incubated at 37°C for 18 hours. One ml of culture from the turbid tube was then subjected to PCR template preparation using the boiling method. The boiled bacterial culture was immersed on ice for 10 minutes prior to be centrifuged at 11,000 × *g* for 5 minutes. A ten-fold dilution of the boiled supernatant in sterile deionized water was prepared and used as the PCR

template. Four O-serotype-specific gene targets, *wzx-wzy*<sub>O26</sub>, *rfb*<sub>O104</sub>, *rfb*<sub>O111</sub>, and *rfb*<sub>O157</sub>, were investigated by singleplex PCR (GoTaq Flexi system, Promega, USA) (Figure 1). The oligonucleotide primers used for amplifications and their annealing temperatures are shown in Table 1. PCR amplification was performed in a 25 µl reaction mixture comprising 1X GoTaq Flexi Green buffer, 3.0 mM MgCl<sub>2</sub>, 0.1 mM dNTPs, 0.4 µM of each primer pair, 0.5 unit of GoTaq DNA polymerase, and 2 µl of DNA template. The thermocycling condition (conducted in a T100™ Thermal Cycler, Bio-Rad, Hercules, CA, USA) was as follows: 95°C for 3 minutes, followed by 35 cycles of 94°C for 1 minute, 50°C for 1 minute, and 72°C for 1 minute, with a final step at 72°C for 5 minutes. The amplicons were analyzed using 1.0 % agarose gel electrophoresis, stained with ethidium bromide, and images were captured using the WSE-5200 Printgraph 2M gel imaging system (ATTO Corp., Tokyo, Japan). *E. coli* O26 strain PSU192, O104 strain PSU237, O111 strain PE-27, and O157 strain PSU120 were used as positive strains for amplification of *wzx-wzy*<sub>O26</sub>, *rfb*<sub>O104</sub>, *rfb*<sub>O111</sub>, and *rfb*<sub>O157</sub> genes, respectively.

### 3. Isolation of *E. coli* O111 from beef by immunomagnetic separation (IMS) method

The investigation of *E. coli* O111 was further carried out in 86 beef samples using an IMS procedure as previously described (Sirikaew *et al.*, 2015). In brief, 50 g of raw beef were mixed with 450 ml of TSB (Becton Dickinson) in a sterile plastic bag, homogenized for 1 minute in a Stomacher CIR-400 machine (Seward, UK), and the supernatant was obtained by aseptically rinsing it into a sterile bottle. The supernatant was incubated at 37°C for 6 hours, and then 1 ml aliquot was mixed with anti O111 antibody-coated magnetic beads (Dynabeads, Invitrogen, USA) and incubated at room temperature with occasional gentle inversion of the tube for 30 minutes. The immunomagnetic beads

(IMB) were washed with 500 µl phosphate buffered saline, pH 7.4 (PBS), and isolated using a magnetic concentrator following the manufacturer's instructions. IMB was then streaked on eosin methylene blue (EMB) agar (Becton Dickinson). The plate was incubated at 37°C for 18 hours. Fifteen green metallic sheen colonies from each sample were selected for genome extraction and investigated for the presence of *E. coli* O111 by PCR. Amplicons were analyzed as mentioned above.

#### 4. Statistical analysis

The data were analyzed using SPSS for Windows software, version 11.0 (SPSS, Chicago, IL, USA). One-way Analyses of Variance (ANOVA) was used to compare the significant differences in positive results among the four O serotypes. The level of significance was set at a *P*-value < 0.05.

## RESULTS AND DISCUSSION

### 1. Prevalence of *E. coli* O26, O104, O111, and O157 in beef

To examine the prevalence of these four serotypes of *E. coli* in retail beef, the MPN-PCR approach was employed for the investigation. Out of 102 samples tested, *E. coli* O26, O104, O111, and O157 were found in beef with contamination rates of 58 samples (57%), 6 samples (6%), 0 sample (0%), and 17 samples (17%), respectively (Table 2). *E. coli* O26 showed the highest contamination rate in beef (*P*-value < 0.05). The relatively high contamination rates of *E. coli* O26, O104, and O157 in this present study are concerning, as these pathogens can cause severe illness with a low infectious dose; as few as 100 cells can lead to the disease (Nataro and Kaper, 1998). Of particular concern is serotype O157, which is frequently associated with food-borne outbreaks worldwide. In this present study, we demonstrate that *E. coli* O26, O104, and O157 indeed exist in beef samples, whether domestic or imported. This information is consistent with previous studies conducted in the same geographical area. Sirikaew *et al.* (2015) investigated the presence of *E.*

*coli* O26 using the IMS approach and found that 6 out of 55 beef samples (11%) contained the target bacteria. Although those O26 strains did not carry *stx* genes, 5 strains from beef harbored *escV*, a gene component in the type III secretion system, which is a dangerous virulent factor threatening humans. Moreover, Wameadesa *et al.* (2017) explored *E. coli* O104 from Thai and Malaysian beef. They successfully obtained 31 isolates of *E. coli* O104 from 12 beef samples (16% from Thai beef and 23% from imported Malaysian beef). Most of them carried virulence genes and were resistant to some antimicrobial agents. Additionally, some were extended-spectrum beta lactamase (ESBL)-producing *E. coli*, which can exacerbate infections in patients. More importantly, the possibility of trans-border transfer of *E. coli* O104 from Malaysian to Thailand was uncovered. This raises concerns about the potential transfer of other dangerous pathogens, posing health risk to people in southern Thailand.

### 2. MPN-PCR-based quantification of *E. coli* O26, O104, O111, and O157

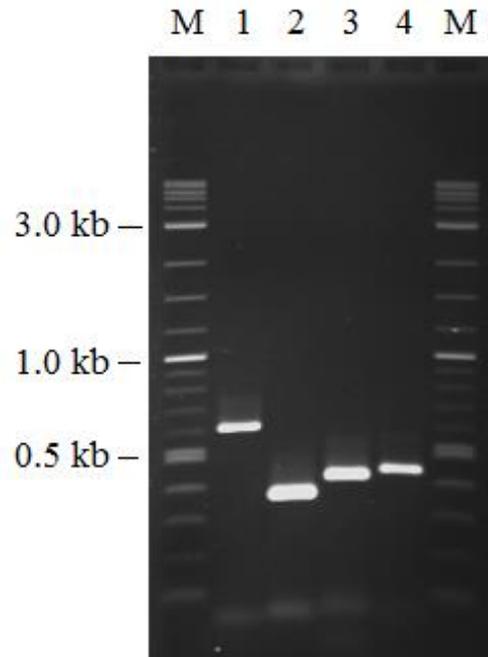
Within the positive samples observed (58 samples of O26; 6 samples of O104; 17 samples of O157), the lowest MPN/g value were less than 3 for all serotypes, while the highest MPN/g values for *E. coli* O26, O104, O111, and O157 were 75, 93, < 3, and 27, respectively (Table 2). This range of *E. coli* contamination rates is considered relatively high and could pose health risks to the consumers. Focusing on each O serotype, it was revealed that the bacterial contamination rate (percentage of positive sample detected) in Malaysian beef was higher than in Thai beef. Conversely, the highest MPN/g values in Thai beef were higher than those in Malaysian beef across all groups (Table 2). These results suggested that although all 4 serotypes were present in lower amounts in Malaysian beef, they were more widespread. MPN-PCR is derived from the combination of conventional MPN approach and polymerase chain reaction (PCR) to assess the quantity of target

microorganism in the samples. This method is widely known to be accurate, sensitive, and specific. While conventional MPN requires 4-6 days to complete the processes, MPN-PCR takes only one day (Mäntynen *et al.*, 1997; Picozzi *et al.*, 2004). Phetkhajorn *et al.* (2014) employed MPN-PCR to investigate the presence of *est*- and *elt*-carrying enterotoxigenic *E. coli* (ETEC) in meat from southern Thailand and found that ETEC contamination in poultry was significantly higher than in other types of meat. Furthermore, Shiga toxin-producing *E. coli* (STEC) and enterohaemorrhagic *E. coli* (EHEC) were detected in beef using MPN-PCR (Sirikaew *et al.*, 2016). This study not only benefits the people in that area but also activates surveillance for entero-pathogens throughout the country.

### 3. Investigation of *E. coli* O111 from beef by IMS method

Due to the absence of *E. coli* O111 contamination in both Thai and Malaysian beefs as detected by MPN-PCR, concrete confirmation of the lack of *E. coli* O111 in beef from southern Thailand was further investigated using IMS. A total of 1,141 green metallic sheen colonies on EMB agar from 86 beef samples (68 from local Thai beef and 18 from Malaysian beef) were examined. It was shown that none of them possessed the *rfb*<sub>O111</sub> gene, suggesting that they did not belong to the O111 group. This result of the absence of O111 was consistent with the MPN-PCR results, which showed

an O111 value less than 3 MPN/g (Table 2). Immuno-magnetic beads specific to the somatic O antigen of the bacterial cell wall have been clearly demonstrated to increase the isolation efficiency of target bacteria by up to 100-fold (Chapman *et al.*, 1994). The bacterial isolation efficiency of IMS towards diarrheagenic *E. coli* was well studied. Wameadesa *et al.* (2017) employed IMS specific to *E. coli* O104 to investigate its presence in both Thai and imported beef, revealing the identification of numerous *E. coli* O104 strains from beef samples. In addition, enterohaemorrhagic *E. coli* (EHEC) O157:H7, *E. coli* O103, and atypical enteropathogenic *E. coli* (EPEC) O145 were also successfully isolated by IMS (Sukhumungoon *et al.*, 2011; Sae-lim *et al.*, 2018; Sae-lim *et al.*, 2017). These studies emphasize the effectiveness of bacterial isolation using the IMS approach. In this current study, IMS specific to O111 was applied to confirm the existence of O111 in beef samples, but the target microorganism was not detected. Nevertheless, our data are not consistent with the finding of Kayali *et al.* (2015), who also used IMS (pickpen-assisted IMS) to isolate Shiga toxin-producing *E. coli* (STEC) from beef and found *stx*<sub>1</sub>-positive *E. coli* O111 in Malaysian beef. Thus, it was concluded that *E. coli* O111 was indeed absent during our investigation. Alternatively, the level of *E. coli* O111 contamination might have been below the detectable limit of IMS.



**Figure 1** PCR amplification of four target genes in positive strains of *E. coli*. Lane 1: *E. coli* O26 strain PSU192 (*wzx-wzyO26*, 596 bp), Lane 2: *E. coli* O104 strain PSU237 (*rfbO104*, 351 bp), Lane 3: *E. coli* O111 strain PE-27 (*rfbO111*, 406 bp), Lane 4: and *E. coli* O157 strain PSU120 (*rfbO157*, 400 bp). PCR reactions are performed as described in Materials and Methods and analyzed by 1% agarose gel electrophoresis. Lane M contained a 2-log DNA ladder (New England Biolabs, USA).

**Table 1** Oligonucleotide primers used in the study.

Target gene	Primer name	Sequence (5' to 3')	Amplicon size (bp)	Reference
<i>wzx-wzyO26</i>	wzx-wzyO26f	AAATTAGAAGCGCGTTCATC	596	Durso <i>et al.</i> (2005)
	wzx-wzyO26r	CCCAGCAAGCCAATTATCACT		
<i>rfbO104</i>	O104rfbO-f	TGAACTGATTTTTAGGATGG	351	Bielaszewska <i>et al.</i> (2011)
	O104rfbO-r	AGAACCTCACTCAAATTATG		
<i>rfbO111</i>	rfbO111f	AGAGAAATTATCAAGTTAGTTCC	406	Durso <i>et al.</i> (2007)
	rfbO111r	ATAGTTATGAACATCTTGTTTAGC		
<i>rfbO157</i>	O157-F	CGTGATGATGTTGAGTTG	400	Maurer <i>et al.</i> (1999)
	O157-R	AGATTGGTTGGCATTACTG		

**Table 2** MPN/g value of *E. coli* O26, O104, O111, and O157 from beef in Hat-Yai city.

Serotype	No. of positive sample/ Total sample	Percentage of positive sample	MPN/g		
			Min <sup>δ</sup>	Med	Max
O26	<sup>A</sup> 58/102	56.9	< 3	3 to 35	75
Thai beef	33/68	48.5	< 3	3 to 35	75
Malaysian beef	25/34	73.5	< 3	3 to 27	35
O104	<sup>BC</sup> 6/102	5.9	< 3	3 to 53	93
Thai beef	3/68	4.4	< 3	3	93
Malaysian beef	3/34	8.8	< 3	3	53
O111	<sup>D</sup> 0/102	0	< 3	< 3	< 3
Thai beef	0/68	0	< 3	< 3	< 3
Malaysian beef	0/34	0	< 3	< 3	< 3

**Table 2** Continuous

Serotype	No. of positive sample/ Total sample	Percentage of positive sample	MPN/g		
			Min <sup>δ</sup>	Med	Max
O157	<sup>BC</sup> 17/102	16.7	< 3	3 to 15	27
Thai beef	9/68	13.2	< 3	3 to 15	27
Malaysian beef	8/34	23.5	< 3	3 to 3.6	11

<sup>δ</sup>Min, minimum MPN value; Med, medium MPN values between minimum and maximum among positive samples; Max, maximum MPN value of the positive samples; Uppercase letters indicate significant differences in the number of positive samples among the O serotypes.

## CONCLUSION

In summary, the *E. coli* in both non-O157 and O157 groups were found to have a high prevalence contamination level in beef. These serotypes can be life-threatening, leading to sporadic outbreaks worldwide. Thus, the presence of *E. coli* O26, O104, and O157 in both domestic Thai and imported beef raises serious concerns. Therefore, periodic surveillance should be conducted for the sake of public health in Thailand.

## ACKNOWLEDGMENTS

The research was funded in part by Department of Microbiology, Division of Biological Science, Faculty of Science, Prince of Songkla University. We are grateful to Prof. Dr. Mitsuaki Nishibuchi for providing the EPEC O111 strain PE-27 as a positive strain for detecting the *rfb*<sub>O111</sub> gene. Special thanks to Ms. Aphisara Sae-lim for her technical assistance.

## REFERENCES

- Bielaszewska, M., Mellmann, A., Zhang, W., Köck, R., Fruth, A., Bauwens, A., Peters, G. and Karch, H. 2011. Characterisation of the *Escherichia coli* strain associated with an outbreak of haemolytic uraemic syndrome in Germany, 2011: a microbiological study. **Lancet Infectious Diseases** 11(9): 671-676.
- Brooks, J.T., Sowers, E.G., Wells, J.G., Greene, K.D., Griffin, P.M., Hoekstra, R.M. and Strockbine, N.A. 2005. Non-O157 Shiga-toxin-producing *Escherichia coli* infection in the United States, 1983-2002. **Journal of Infectious Diseases** 192(8): 1422-1429.
- Brown, J.A., Hite, D.S., Gillim-Ross, L.A., Maguire, H.F., Bennett, J.K., Patterson, J.J., Comstock, N.A., Watkins, A.K., Ghosh, T.S. and Vogt, R.L. 2012. Outbreak of Shiga toxin-producing *Escherichia coli* serotype O26:H11 infection at a child care center in Colorado. **Pediatric Infectious Disease Journal** 31(4): 379-383.
- Bugarel, M., Beutin, L., Scheutz, F., Loukiadis, E. and Fach, P. 2011. Identification of genetic markers for differentiation of Shiga toxin-producing, enteropathogenic, and avirulent strains of *Escherichia coli* O26. **Applied and Environmental Microbiology** 77(7): 2275-2281.
- Chapman, P.A., Wright, D.J. and Siddons, C.A. 1994. A comparison of immunomagnetic separation and direct culture for the isolation of verocytotoxin-producing *Escherichia coli* O157 from bovine faeces. **Journal of Medical Microbiology** 40(6): 424-427.
- de Sablet, T., Bertin, Y., Vareille, M., Girardeau, J.P., Garrivier, A., Gobert, A.P. and Martin, C. 2008. Differential expression of *stx*<sub>2</sub> variants in Shiga toxin-producing *Escherichia coli* belonging to seropathotypes A and C. **Microbiology** 154(Pt1): 176-186.
- Durso, L.M., Bono, J.L. and Keen, J.E. 2005. Molecular serotyping of *Escherichia coli* O26:H11. **Applied and Environmental Microbiology** 71(8): 4941-4944.

- Durso, L.M., Bono, J.L. and Keen, J.E. 2007. Molecular serotyping of *Escherichia coli* O111:H8. **Journal of Microbiological Methods** 69(2): 381-383.
- Ethelberg, S., Smith, B., Torpdahl, M., Lisby, M., Boel, J., Jensen, T., Nielsen, E.M. and Mølbak, K. 2009. Outbreak of non-O157 Shiga toxin-producing *Escherichia coli* infection from consumption of beef sausage. **Clinical Infectious Disease** 48(8): e78-81.
- European Food Safety Authority (EFSA). 2007. **Scientific opinion of the panel on biological hazards on a request from EFSA on monitoring of verotoxigenic *Escherichia coli* (VTEC) and identification of human pathogenic type.** Available Source: <http://www.efsa.europa.eu/en/efsajournal/doc/579.pdf>, May 29, 2021.
- Frank, C., Faber, M.S., Askar, M., Bernard, H., Fruth, A., Gilsdorf, A., Höhle, M., Karch, H., Krause, G., Prager, R., Spode, A., Stark, K. and Werber, D. on behalf of the HUS investigation team. 2011. Large and ongoing outbreak of haemolytic uraemic syndrome, Germany, May 2011. **Euro surveillance** 16(21): 19878.
- Jeon, B.W., Jeong, J.M., Won, G.Y., Park, H., Eo, S.K., Kang, H.Y., Hur, J. and Lee, J.H. 2006. Prevalence and characteristics of *Escherichia coli* O26 and O111 from cattle in Korea. **International Journal of Food Microbiology** 110(2): 123-126.
- Karch, H., Bielaszewska, M., Bitzan, M. and Schmidt, H. 1999. Epidemiology and diagnosis of Shiga toxin-producing *Escherichia coli* infections. **Diagnostic Microbiology and Infectious Disease** 34(3): 229-243.
- Kayali, A.Y., Escalante-Maldonado, O., Vuddhakul, V., Seto, K., Nakaguchi, Y. and Nishibuchi, M. 2015. Development of a method for detection of Shiga toxin-producing *Escherichia coli* belonging to clinically important twelve O serotypes based on the combination of PickPen-assisted immunomagnetic separation and loop-mediated isothermal amplification. **International Journal of Immunology and Immunotherapy** 2(1): 1-7.
- Liu, L., Johnson, H.L., Cousens, S., Perin, J., Scott, S., Lawn, J.E., Rudan, I., Campbell, H., Cibulskis, R., Li, M., Mathers, C. and Black, R.E. child health epidemiology reference group of WHO and UNICEF. 2012. Global, regional, and national causes of child mortality: an updated systematic analysis for 2010 with time trends since 2000. **Lancet** 379(9832): 2151-2161.
- Mäntynen, V., Niemelä, S., Kaijalainen, S., Pirhonen, T. and Lindström, K. 1997. MPN-PCR-quantification method for staphylococcal enterotoxin *c1* gene from fresh cheese. **International Journal of Food Microbiology** 36(2-3): 135-143.
- Maurer, J.J., Schmidt, D., Petrosko, P., Sanchez, S., Bolton, L. and Lee, M.D. 1999. Development of primers to O-antigen biosynthesis genes for specific detection of *Escherichia coli* O157 by PCR. **Applied and Environmental Microbiology** 65(7): 2954-2960.
- Michino, H., Araki, K., Minami, S., Takaya, S., Sakai, N., Miyazaki, M., Ono, A. and Yanagawa H. 1999. Massive outbreak of *Escherichia coli* O157:H7 infection in schoolchildren in Sakai city, Japan, associated with consumption of white radish sprouts. **American Journal of Epidemiology** 150(8): 787-796.
- Nataro, J.P. and Kaper, J.B. 1998. Diarrheagenic *Escherichia coli*. **Clinical Microbiology Reviews** 11(1): 142-201.
- Paton, A.W., Ratcliff, R.M., Doyle, R.M., Seymour-Murray, J., Davos, D., Lanser, J.A. and Paton, J.C. 1996. Molecular microbiological investigation of an outbreak of hemolytic-uremic

- syndrome caused by dry fermented sausage contaminated with Shiga-like toxin-producing *Escherichia coli*. **Journal of Clinical Microbiology** 34(7): 1622-1627.
- Phetkhajorn, S., Sirikaew, S., Rattanachua, P. and Sukhumungoon, P. 2014. Most probable number-polymerase chain reaction-based quantification of enterotoxigenic *Escherichia coli* from raw meats in southern Thailand. **Southeast Asian Journal of Tropical Medicine and Public Health** 45(6): 1385-1391.
- Picozzi, C., Foschino, R. and Di Pilato, P. 2004. Exploiting a MPN-PCR technique to quantify *Escherichia coli* in minced meat. **Annals of Microbiology** 54(3): 343-349.
- Riley, L.W., Remis, R.S., Helgerson, S.D., McGee, H.B., Wells, J.G., Davis, B.R., Hebert, R.J., Olcott, E.S., Johnson, L.M., Hargrett, N.T., Blake, P.A. and Cohen, M.L. 1983. Hemorrhagic colitis associated with a rare *Escherichia coli* serotype. **New England Journal of Medicine** 308(12): 681-685.
- Sae-lim, A., Jearanai, P., Rattanachua, P. and Sukhumungoon, P. 2017. Prevalence, virulence profiles, and genetic relationship of atypical enteropathogenic *Escherichia coli* O145 from beef, southern Thailand. **Southeast Asian Journal of Tropical Medicine and Public Health** 48(6): 1248-1259.
- Sae-lim, A., Wameadesa, N., Rattanachua, P. and Sukhumungoon, P. 2018. Prevalence, molecular characterization and genetic relatedness of *Escherichia coli* O103 from meat in southern Thailand. **Southeast Asian Journal of Tropical Medicine and Public Health** 49(4): 646-659.
- Sukhumungoon, P., Nakaguchi, Y., Ingviya, N., Pradutkanchana, J., Iwade, Y., Seto, K., Radu, S., Nishibuchi, M. and Vuddhakul V. 2011. Investigation of *stx*<sub>2</sub><sup>+</sup> *eae*<sup>+</sup> *Escherichia coli* O157:H7 in beef imported from Malaysia to Thailand. **International Food Research Journal** 18(1): 381-386.
- Sirikaew, S., Rattanachua, P., Nakaguchi, Y. and Sukhumungoon, P. 2015. Immuno-magnetic isolation, characterization and genetic relationship of *Escherichia coli* O26 from raw meats, Hat-Yai city, Songkhla, Thailand. **Southeast Asian Journal of Tropical Medicine and Public Health** 46(2): 241-253.
- Sirikaew, S., Sukkua, K., Rattanachua, P., Khiangam, S. and Sukhumungoon, P. 2016. High level of Shiga toxin-producing *Escherichia coli* and occurrence of *stx*-negative *E. coli* O157 from raw meats: characterization of virulence profile and genetic relatedness. **Southeast Asian Journal of Tropical Medicine and Public Health** 47(5): 1008-1019.
- Themphachana, M., Nakaguchi, Y., Nishibuchi, M., Seto, K., Rattanachua, P., Singkhamanan, K. and Sukhumungoon, P. 2014. First report in Thailand of a *stx*-negative *Escherichia coli* O157 from a patient with diarrhea, Thailand. **Southeast Asian Journal of Tropical Medicine and Public Health** 45(4): 881-889.
- Wameadesa, N., Sae-lim, A., Hayeebilan, F., Rattanachua, P. and Sukhumungoon, P. 2017. Enteroaggregative *Escherichia coli* O104 from Thai and imported Malaysian raw beef. **Southeast Asian Journal of Tropical Medicine and Public Health** 48(2): 338-350.

# การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา การเจริญของกลุ่มเส้นใย และการผลิต เอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์ในถั่งเช่าสีทองที่คัดเลือกจากฟาร์มต่าง ๆ

## ในภาคกลางของประเทศไทย

### Study of Morphology, Mycelial Growth and Exopolysaccharides

### Production of *Cordyceps* sp. Selected from Several Farms

### in Central Region of Thailand

สามารถ ต่ายขาว<sup>1\*</sup> กัญญา กอแก้ว<sup>2</sup> ดวงหทัย รัตนสังฆธรรม<sup>2</sup> และ สุนทรา เฟื่องฟู<sup>1</sup>

Samart Taikhao<sup>1\*</sup>, Kanya Kokaew<sup>2</sup>, Doungthai Rattanasatchatham<sup>2</sup> and Suntara Fueangfung<sup>1</sup>

Received: 18 May 2022, Revised: 31 May 2023, Accepted: 4 September 2023

#### บทคัดย่อ

ถั่งเช่าสีทอง (*Cordyceps militaris*) เป็นราปรสิตในแมลงที่สามารถผลิตสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพได้ในปริมาณสูง เช่น คอร์ไดเซปิน อะดีโนซีน และโพลีแซ็กคาไรด์ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา การเจริญของกลุ่มเส้นใย ปริมาณชีวมวล และการผลิตเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์ใน *Cordyceps* sp. ที่ได้คัดเลือก จากฟาร์มต่าง ๆ ในภาคกลางของประเทศไทย โดยมีตัวอย่างของ *Cordyceps* sp. 11 ตัวอย่างที่คัดเลือกได้จากฟาร์มต่าง ๆ 6 ฟาร์ม ได้แก่ ไอโซเลท CM-Sp01 CM-Sp02 CM-Sp03 CM-Sp04 CM-Sp05 CM-Sp06 CM-Sp07 CM-Sp08 CM-Sp09 CM-Sp10 และ CM-Sp11 โดยทำการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใยด้วยเทคนิค Slide culture และตรวจสอบภายใต้กล้องจุลทรรศน์ พบว่า ทุกไอโซเลทมีลักษณะเส้นใยแบบมีผนังกั้น มีโคนเดี่ยวรูปทรงกลม และรูปทรงรี อยู่บริเวณปลายของเส้นใย อย่างไรก็ตาม ขนาดของโคนเดี่ยวมีความแตกต่างกันในแต่ละไอโซเลทของ *Cordyceps* sp. การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาและความหนาแน่นของโคโลนีของกลุ่มเส้นใย *Cordyceps* sp. ไอโซเลทต่าง ๆ เมื่อเพาะเลี้ยงบนอาหาร PDA ผลการทดลองพบว่า Vegetative

<sup>1</sup> หลักสูตรนวัตกรรมเทคโนโลยีชีวภาพ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ อำเภอเมืองนนทบุรี จังหวัดนนทบุรี 11000

<sup>1</sup> Biotechnology Innovation Program, Division of Science, Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi, Mueang Nonthaburi, Nonthaburi 11000, Thailand.

<sup>2</sup> หลักสูตรจุลชีววิทยา สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ อำเภอพระนครศรีอยุธยา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา 13000

<sup>2</sup> Microbiology Program, Division of Science, Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi, Phra Nakhon Si Ayutthaya, Phra Nakhon Si Ayutthaya 13000, Thailand.

\* ผู้รับผิดชอบประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): samart.ta@rmutsb.ac.th Tel: 08 6615 0054

และ Aerial mycelium ในทุกไอโซเลทเป็นสีขาว ไอโซเลท CM-Sp02 มีความหนาแน่นของกลุ่มเส้นใยมากที่สุด การศึกษาการเจริญของกลุ่มเส้นใยโดยวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโคโลนีที่เพาะเลี้ยงบนอาหาร PDA พบว่า ไอโซเลท CM-Sp08 มีอัตราการเจริญสูงสุด ( $5.06 \pm 0.65$  มิลลิเมตรต่อวัน) และมีเส้นผ่านศูนย์กลางโคโลนีกว้างที่สุด ( $66.12 \pm 1.45$  มิลลิเมตร) หลังจากเพาะเลี้ยงเป็นเวลา 21 วัน ภายใต้อุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส ในที่มืด การศึกษาปริมาณชีวมวลและเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์เมื่อเพาะเลี้ยงในอาหาร PDB พบว่าไอโซเลท CM-Sp08 มีการผลิตชีวมวลสูงสุด ( $55.20 \pm 1.65$  กรัมต่อลิตร) และมีปริมาณเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์สูงสุด ( $2.86 \pm 0.05$  กรัมต่อลิตร) หลังจากเพาะเลี้ยงเป็นเวลา 14 วัน ภายใต้อุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส ในที่มืด แสดงให้เห็นว่าไอโซเลท CM-Sp08 มีศักยภาพสูงในการเจริญ การผลิตชีวมวล และการผลิตเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์

**คำสำคัญ:** ถังเช่าสีทอง, การเจริญของกลุ่มเส้นใย, ลักษณะสัณฐานวิทยาของกลุ่มเส้นใย

## ABSTRACT

*Cordyceps militaris* is an entomopathogenic fungus that can produce high levels of bioactive compounds such as cordycepin, adenosine, and polysaccharides. This research aimed to study mycelial morphology, growth, biomass, and exopolysaccharides production of *Cordyceps* sp. strains selected from several farms in central Thailand. Eleven samples of *Cordyceps* sp. were selected from six farms in Thailand. They were isolates CM-Sp01, CM-Sp02, CM-Sp03, CM-Sp04, CM-Sp05, CM-Sp06, CM-Sp07, CM-Sp08, CM-Sp09, CM-Sp10 and CM-Sp11. The hyphae morphology using the slide culture technique and microscopic examination were investigated. The results revealed that all isolates had septate hyphae. A round and an oval shape of conidia at the end of hyphae were also found. However, the size of conidia was different between *Cordyceps* sp. isolates. In addition, the study of morphology and density of mycelial colony of *C. militaris* isolates on PDA medium were determined. The results found that vegetative and aerial mycelium in all isolates were white. The isolate CM-Sp02 showed the highest mycelium density. Under determining the growth of mycelial colony by measuring colony diameter on PDA medium, isolate CM-Sp08 showed the highest growth rate ( $5.06 \pm 0.65$  mm/day) and length of diameter of mycelial colony ( $66.12 \pm 1.45$  mm) after 21 days of cultivation in PDA medium under temperature of 22 °C in dark condition. Mycelial biomass and exopolysaccharides in PDB medium were investigated. The result found that isolate CM-Sp08 showed the highest biomass production ( $55.20 \pm 1.65$  g/L) and the highest exopolysaccharide content ( $2.86 \pm 0.05$  g/L). This indicated that the isolate CM-Sp08 had high potential for growth, biomass production, and exopolysaccharide production.

**Key words:** *Cordyceps* sp., mycelial growth, mycelial morphology

## บทนำ

ถั่งเช่าสีทอง (*Cordyceps militaris*) เป็นสิ่งมีชีวิตประเภทฟังไจที่เป็นปรสิตของแมลง (Entomopathogenic fungus) โดยในธรรมชาติ *C. militaris* สามารถเจริญได้ในตัวอ่อนของแมลงในอันดับ Lepidoptera และกระจายตัวในภูมิอากาศแบบอบอุ่นทั่วโลก (Chen *et al.*, 2020a) จัดอยู่ในจันัส *Cordyceps* วงศ์ Clavicipitaceae อันดับ Hypocreales ชั้น Ascomycetes และ ไฟลัม Ascomycota (Lee *et al.*, 2013a) ซึ่งจันัสนี้มีจำนวนมากกว่า 350 สายพันธุ์ทั่วโลก (Soltani *et al.*, 2015) เมื่อเปรียบเทียบกับถั่งเช่าทิเบต (*Ophiocordyceps sinensis* ชื่อเดิม *Cordyceps sinensis*) ซึ่งเป็นสายพันธุ์ที่อยู่ในจันัสเดียวกันและได้รับความนิยมในการนำมาใช้ทางเภสัชวิทยาและทางการค้า พบว่า *C. militaris* เพาะเลี้ยงง่ายกว่า (Wu *et al.*, 2020) มีสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่สำคัญบางชนิดมากกว่า (Soltani *et al.*, 2015) และมีราคาทางการค้าที่ถูกกว่า *O. sinensis* (Yin *et al.*, 2018) ส่งผลให้ในปัจจุบันมีการเพาะเลี้ยง *C. militaris* เพื่อนำมาใช้กับงานทางด้านเภสัชวิทยาและทางการค้ามากยิ่งขึ้น (Wang *et al.*, 2017)

ได้มีรายงานการค้นพบสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพใน *C. militaris* ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อร่างกายของมนุษย์ เช่น คอรัโดเซปิน โพลีแซคคาไรด์ กรดออกซาลิก แคลโรทินอยด์ และเพนโตสเตดิน (Xia *et al.*, 2017; Nurmamat *et al.*, 2018; Kunhorm *et al.*, 2019; Lou *et al.*, 2019a; Chen *et al.*, 2020b) โดยสารหลักสำคัญใน *C. militaris* คือ คอรัโดเซปิน ซึ่งเป็นสารที่มีการศึกษาแล้วว่าสามารถรบกวนกระบวนการสังเคราะห์ RNA ที่มีผลต่อการยับยั้งการเพิ่มจำนวนเซลล์มะเร็งได้ (Lee *et al.*, 2013b) โดยสารคอรัโดเซปินจะมีปริมาณสูงในโครงสร้างของดอก (Stroma) มากกว่าในโครงสร้างของกลุ่มเส้นใย (Mycelium) ที่ยังไม่พัฒนาไปเป็นดอก (Ha *et al.*, 2022) แต่อย่างไรก็ตาม

ในโครงสร้างของกลุ่มเส้นใยของ *C. militaris* อุดมไปด้วยแร่ธาตุ วิตามิน กรดอะมิโน และเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์ในปริมาณมาก (Ha *et al.*, 2022) โดยเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์ใน *C. militaris* เป็นสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่มีคุณสมบัติที่หลากหลาย เช่น มีฤทธิ์ในการต่อต้านอนุมูลอิสระ ต่อต้านการเกิดเนื้องอก ต่อต้านการอักเสบ และช่วยลดปริมาณไขมันในเลือดได้ (Wang *et al.*, 2015; Zhao *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2019) ดังนั้นในปัจจุบันจึงมีความสนใจที่จะเพาะเลี้ยง *C. militaris* เพื่อจะผลิตกลุ่มของเส้นใยให้ได้ในปริมาณมาก โดยมีการเพาะเลี้ยงในระดับอุตสาหกรรมทั้งในอาหารแข็งและอาหารเหลว เพื่อนำกลุ่มของเส้นใยดังกล่าวไปสกัดสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป

ในประเทศไทยเริ่มมีการเพาะเลี้ยง *C. militaris* กันอย่างแพร่หลาย ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นการนำเข้าแม่พันธุ์จากต่างประเทศเป็นหลัก ทำให้ในประเทศไทยมี *C. militaris* ที่มีหลากหลายสายพันธุ์ย่อย ซึ่งอาจมีการเจริญและการผลิตสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่แตกต่างกันออกไป และเมื่อมีการต่อเชื้อไปหลาย ๆ รุ่นอาจเกิดการแปรผันทางพันธุกรรมและเกิดการกลายพันธุ์ ซึ่งอาจส่งผลต่อการเจริญและการผลิตสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่ลดลงได้ (Chokeumnuay and Owatworakit, 2021) นอกจากนี้การเพาะเลี้ยง *C. militaris* ในฟาร์มต่าง ๆ ที่อยู่ในประเทศไทยต้องเปิดเครื่องปรับอากาศในการเพาะเลี้ยง เนื่องจาก *C. militaris* เจริญได้ดีที่อุณหภูมิ 20-25 องศาเซลเซียส (Lee *et al.*, 2013a) ดังนั้นผู้เพาะเลี้ยงต้องรับภาระค่าไฟฟ้าที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลาประมาณ 3-4 เดือน จนกระทั่งเก็บเกี่ยวผลผลิต ซึ่งขั้นตอนการเพาะเลี้ยง *C. militaris* ประกอบด้วยการเพาะเลี้ยงในอาหารแข็ง 2-3 สัปดาห์ จากนั้นถ่ายเชื้อลงในอาหารเหลว เพาะเลี้ยงต่อเป็นเวลา 2 สัปดาห์ จากนั้นถ่ายเชื้อลงในอาหารเทียมเพื่อ

กระตุ้นให้เกิดการออกดอกโดยจะใช้เวลาประมาณ 2-3 เดือน ถึงจะเก็บผลผลิต (Taikhao *et al.*, 2018) ซึ่งจะเห็นได้ว่าการเพาะเลี้ยง *C. militaris* ใช้เวลาค่อนข้างนานกว่าจะเก็บเกี่ยวผลผลิตได้ ดังนั้นถ้าสามารถลดระยะเวลาในขั้นตอนใดขั้นตอนหนึ่งได้ก็จะถือว่าเป็นการประหยัดเวลาและต้นทุนในการเพาะเลี้ยง ยิ่งไปกว่านั้นได้มีรายงานที่ *Cordyceps* sp. แต่ละสายพันธุ์มีความสามารถในการผลิตชีวมวลและเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์จากกลุ่มของเส้นใยได้แตกต่างกัน ทั้งนี้ยังขึ้นกับอาหารที่ใช้ และสภาพที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงอีกด้วย (Wang *et al.*, 2019; Werapan *et al.*, 2022)

งานวิจัยนี้จึงมีความสนใจที่จะเก็บตัวอย่าง *Cordyceps* sp. ที่เพาะเลี้ยงจากฟาร์มต่าง ๆ ในภาคกลางของประเทศไทยเพื่อนำมาศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาและการเจริญของกลุ่มเส้นใยของ *Cordyceps* sp. ไอโซเลทต่าง ๆ บนอาหารแข็ง และศึกษาปริมาณชีวมวลและเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์ในกลุ่มเส้นใยของ *Cordyceps* sp. ไอโซเลทต่าง ๆ ที่เพาะเลี้ยงในอาหารเหลว ซึ่งจะเป็ข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญในการคัดเลือกไอโซเลทที่มีประสิทธิภาพสูงในการเจริญเพื่อประหยัดต้นทุนและระยะเวลาในการเพาะเลี้ยง ตลอดจนได้ไอโซเลทที่มีศักยภาพสูงในการผลิตชีวมวล และเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์ซึ่งจะสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ในอนาคต

## วิธีดำเนินการวิจัย

### 1. การเก็บตัวอย่าง *Cordyceps* sp.

เก็บตัวอย่าง *Cordyceps* sp. ในรูปดอกสดที่เพาะเลี้ยงภายในขวดแก้วจากฟาร์มต่าง ๆ ในภาคกลางของประเทศไทยจำนวน 6 ฟาร์ม ประกอบด้วยฟาร์มในเขตอำเภอหนองเสือ จังหวัดปทุมธานี จำนวน 3 ตัวอย่าง อำเภอพระประแดง จังหวัดสมุทรปราการ จำนวน 3 ตัวอย่าง อำเภอลำลูกกา จังหวัดปทุมธานี

จำนวน 1 ตัวอย่าง อำเภอบางเสาธง จังหวัดสมุทรปราการ จำนวน 1 ตัวอย่าง เขตหนองจอก จังหวัดกรุงเทพมหานคร จำนวน 1 ตัวอย่าง และอำเภอเมือง จังหวัดสมุทรปราการ จำนวน 2 ตัวอย่าง มีจำนวนตัวอย่างทั้งสิ้น 11 ตัวอย่าง โดยเก็บรักษาตัวอย่างในกล่องโฟมที่บรรจุน้ำแข็งก่อนนำไปศึกษาในห้องปฏิบัติการ

### 2. การเพาะเลี้ยง *Cordyceps* sp. บนอาหารแข็ง

ทำการตัดส่วนสโตรมา (Stroma) บริเวณก้านของ *Cordyceps* sp. ไอโซเลทต่าง ๆ โดยตัดชิ้นให้มีขนาดเท่ากันมาวางบนอาหาร Potato dextrose agar (PDA) (อาหาร PDA ประกอบด้วย มันฝรั่ง 200 กรัม น้ำตาลเดกซ์โตรส 20 กรัม น้ำตาลซูโครส 30 กรัม ผงวุ้น 20 กรัม และน้ำกลั่น 1 ลิตร ปรับ pH ให้เท่ากับ 6 ก่อนนำไปนึ่งฆ่าเชื้อด้วยหม้อนึ่งความดันไอที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นเวลา 20 นาที) (Dang *et al.*, 2018) จากนั้นนำตัวอย่าง *Cordyceps* sp. ไอโซเลทต่าง ๆ ที่อยู่บนอาหาร PDA มาบ่มในที่มืด อุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14 วัน (Singpoonga *et al.*, 2019)

### 3. การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใย *Cordyceps* sp.

นำส่วนของเส้นใย *Cordyceps* sp. ไอโซเลทต่าง ๆ ที่เพาะเลี้ยงบนอาหาร PDA บ่มในที่มืด อุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส นาน 14 วัน มาเพาะเลี้ยงด้วยเทคนิค Slide culture คัดแปลงจาก Wijedasa and Liyanapathirana (2012) บ่มที่อุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 วัน จากนั้นนำแผ่นแก้วปิดสไลด์ออกมาล้อมด้วย Lactophenol cotton blue และนำไปศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาใต้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Olympus, BX51, Japan)

### 4. การศึกษาการเจริญของกลุ่มเส้นใย *Cordyceps* sp.

นำส่วนของกลุ่มเส้นใย (mycelium) ที่เพาะเลี้ยงบนอาหาร PDA บ่มในที่มืด อุณหภูมิ 22

องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14 วัน มาตัดบริเวณรอบนอกสุดของโคโลนีด้วยเครื่องเจาะจุกคอร์ก (Cork borer) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 เซนติเมตร แล้ววางบนอาหาร PDA บ่มในที่มืด อุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส (Singpoonga *et al.*, 2019) บันทึกลักษณะโคโลนี และประเมินความหนาแน่นของกลุ่มเส้นใยโดยใช้หลักเกณฑ์การให้เครื่องหมาย ตามวิธีการของ Shrestha *et al.* (2006) (+ = กลุ่มเส้นใยบาง ไม่พบบนอาหาร PDA ++ = กลุ่มเส้นใยฟูเล็กน้อยบนอาหาร PDA +++ = กลุ่มเส้นใยฟูปานกลางบนอาหาร PDA และ ++++ = กลุ่มเส้นใยฟูมากบนอาหาร PDA) ติดตามการเจริญของกลุ่มเส้นใยโดยวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโคโลนีด้วยเครื่องเวอร์เนียคาลิเปอร์ (Vernier Caliper) ในหน่วยมิลลิเมตร ทุก ๆ 3 วัน เป็นเวลา 21 วัน และวัดอัตราการเจริญของเส้นผ่านศูนย์กลางโคโลนีตามวิธีของ ChokeUmnuay and Owatworakit (2021) โดยทำการทดลอง 3 ซ้ำ

##### 5. การศึกษาชีวมวลและเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์ในกลุ่มเส้นใยของ *Cordyceps* sp. ไอโซเลทต่าง ๆ

นำส่วนของกลุ่มเส้นใย (mycelium) ที่เพาะเลี้ยงบนอาหาร PDA บ่มในที่มืด อุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14 วัน มาตัดบริเวณรอบนอกสุดของโคโลนีด้วยเครื่องเจาะจุกคอร์ก (Cork borer) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 เซนติเมตร จำนวน 3 ชิ้นใส่ในอาหาร PDB (Potato dextrose broth) 100 มิลลิลิตร ที่ผ่านการนึ่งฆ่าเชื้อแล้วและบรรจุอยู่ในพลาสติกขนาด 250 มิลลิลิตร บ่มในที่มืด อุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส ในสภาวะเขย่า 150 รอบต่อนาที (Taikhao *et al.*, 2018) เพาะเลี้ยงเป็นระยะเวลา 14 วัน จากนั้นนำมาวัดชีวมวลโดยวัดน้ำหนักเซลล์แห้งตามวิธีของ Wang *et al.* (2019) โดยนำตัวอย่างเส้นใย *Cordyceps* sp. ในอาหารเหลว 10 มิลลิลิตร มาปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 7,000 xg เป็นเวลา 10 นาที จากนั้น

นำตะกอนเส้นใย *Cordyceps* sp. มาล้างด้วยน้ำกลั่นจำนวน 3 ครั้ง และนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จนกระทั่งน้ำหนักคงที่

การวิเคราะห์เอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์ทำตามวิธีการของ Wang *et al.* (2019) นำตัวอย่างกลุ่มเส้นใยของ *Cordyceps* sp. ที่เพาะเลี้ยงในอาหารเหลว PDB อายุ 14 วัน ปริมาตร 10 มิลลิลิตร มาปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็ว 7,000 xg เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำส่วนใสที่ได้มา 2 มิลลิลิตร ผสมกับเอทานอลความเข้มข้น 95 เปอร์เซ็นต์ (ปริมาตร/ปริมาตร) ปริมาตร 8 มิลลิลิตร จากนั้นทิ้งไว้ข้ามคืนที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เพื่อตกตะกอนเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์ จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 16,000 xg เป็นเวลา 30 นาที และนำตะกอนเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์มาล้างด้วยเอทานอลความเข้มข้น 70 เปอร์เซ็นต์ (ปริมาตร/ปริมาตร) และทำให้แห้งที่ 60 องศาเซลเซียส เพื่อกำจัดเอทานอล จากนั้นละลายตะกอนด้วยน้ำและนำไปวิเคราะห์ด้วยวิธี Phenol-sulfuric acid assay (DuBois *et al.*, 1956)

##### 6. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

การทดลองแต่ละการทดลองทำ 3 ซ้ำ และวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยโปรแกรม SPSS 13.0 (SPSS Inc.) โดยวิธี One-way ANOVA โดยเลือกวิธี Duncan's test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

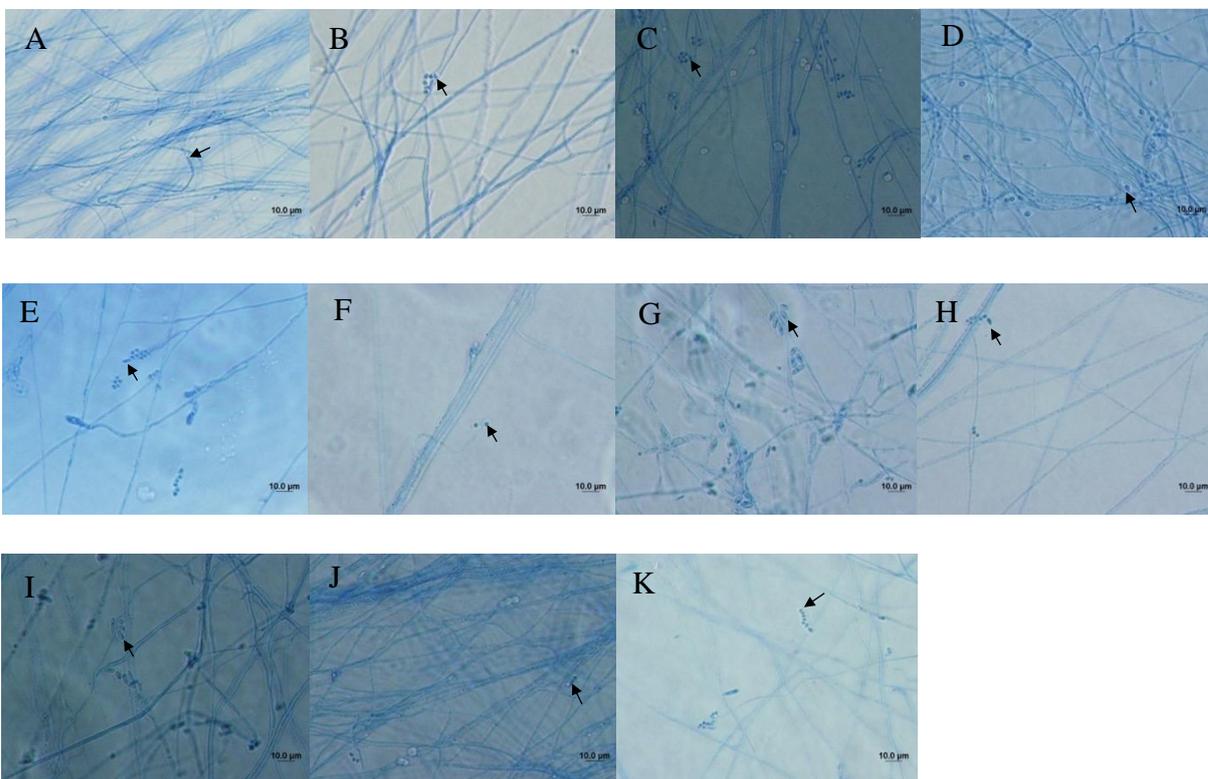
#### ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

##### 1. ผลการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใย *Cordyceps* sp. ไอโซเลทต่าง ๆ

จากการเก็บตัวอย่าง *Cordyceps* sp. ในรูปดอกสดที่เพาะเลี้ยงภายในขวดแก้วจากฟาร์มต่าง ๆ ในประเทศไทย จำนวน 6 ฟาร์ม มีจำนวนตัวอย่างทั้งสิ้น 11 ตัวอย่าง ดังนี้ ฟาร์มที่ 1 ในเขตอำเภอหนองเสือ จังหวัดปทุมธานี ได้แก่ ไอโซเลท CM-Sp01, CM-Sp02, และ CM-Sp03 ฟาร์มที่ 2 ในเขตอำเภอพระประแดง จังหวัดสมุทรปราการ ได้แก่ ไอโซเลท CM-

Sp04, CM-Sp05 และ CM-Sp06 ฟาร์มที่ 3 ในเขตอำเภอลำลูกกา จังหวัดปทุมธานี ได้แก่ ไอโซเลท CM-Sp07 ฟาร์มที่ 4 ในเขตอำเภอบางเสาธง จังหวัดสมุทรปราการ ได้แก่ ไอโซเลท CM-Sp08 ฟาร์มที่ 5 ในเขตหนองจอก จังหวัดกรุงเทพมหานคร ได้แก่ ไอโซเลท CM-Sp09 และฟาร์มที่ 6 ในเขตอำเภอเมือง จังหวัดสมุทรปราการ ได้แก่ ไอโซเลท CM-Sp10 และ CM-Sp11 จากนั้นนำตัวอย่าง *Cordyceps* sp. ไอโซเลทต่าง ๆ มาเพาะเลี้ยงในอาหาร PDA และศึกษาลักษณะ

สัณฐานวิทยาของเส้นใยภายใต้กล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า โดยการทำให้ Slide culture และย้อมด้วย Lactophenol cotton blue ผลการทดลองพบว่าทุกไอโซเลทสร้างเส้นใยแบบมีผนังกั้น (Septate hypha) มีสปอร์แบบไม่อาศัยเพศที่เรียกว่า โคนิเดียรูปทรงกลมและรูปทรงรีอยู่บริเวณปลายของเส้นใย โดยรูปร่างของโคนิเดียและขนาดของโคนิเดียมีความแตกต่างกันในแต่ละไอโซเลทแสดงดังภาพที่ 1 และตารางที่ 1



ภาพที่ 1 ลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใย *Cordyceps* sp. ไอโซเลทต่าง ๆ ภายใต้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงที่กำลังขยาย 1,000 เท่า โดยใช้เทคนิค Slide culture โดยตำแหน่งที่ลูกครีคือ โคนิเดีย (A) ไอโซเลท CM-Sp01 (B) ไอโซเลท CM-Sp02 (C) ไอโซเลท CM-Sp03 (D) ไอโซเลท CM-Sp04 (E) ไอโซเลท CM-Sp05 (F) ไอโซเลท CM-Sp06 (G) ไอโซเลท CM-Sp07 (H) ไอโซเลท CM-Sp08 (I) ไอโซเลท CM-Sp09 (J) ไอโซเลท CM-Sp10 และ (K) ไอโซเลท CM-Sp11

ตารางที่ 1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและรูปทรงโคนิเดียของ *Cordyceps* sp. ไอโซเลทต่าง ๆ

ไอโซเลท <i>Cordyceps</i> sp.	*เส้นผ่านศูนย์กลางโคนิเดีย (ไมโครเมตร)	รูปทรงโคนิเดีย
CM-Sp01	2.86 ± 0.12 <sup>c</sup>	รูปทรงกลม
CM-Sp02	2.87 ± 0.10 <sup>c</sup>	รูปทรงรี
CM-Sp03	1.43 ± 0.08 <sup>f</sup>	รูปทรงรี
CM-Sp04	1.79 ± 0.09 <sup>c</sup>	รูปทรงรี
CM-Sp05	2.51 ± 0.11 <sup>d</sup>	รูปทรงรี
CM-Sp06	2.52 ± 0.18 <sup>d</sup>	รูปทรงรี
CM-Sp07	3.57 ± 0.15 <sup>b</sup>	รูปทรงรี
CM-Sp08	1.86 ± 0.16 <sup>c</sup>	รูปทรงรี
CM-Sp09	3.59 ± 0.23 <sup>a</sup>	รูปทรงรี
CM-Sp10	2.51 ± 0.26 <sup>d</sup>	รูปทรงรี
CM-Sp11	2.50 ± 0.15 <sup>d</sup>	รูปทรงรี

หมายเหตุ: \* คือค่าเฉลี่ยจาก 3 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และตัวอักษรที่อยู่ด้านบนในแนวตั้งที่แตกต่างกัน มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ )

จากการทดลองพบว่าไอโซเลท CM-Sp01 มีโคนิเดียรูปร่างกลม ขนาดประมาณ  $2.86 \pm 0.12$  ไมโครเมตร ในขณะที่ไอโซเลทอื่น ๆ มีโคนิเดียรูปทรงรี โดยมีขนาดโคนิเดียตั้งแต่  $3.59-1.43$  ไมโครเมตร ซึ่งไอโซเลท CM-Sp09 เป็นไอโซเลทที่มีโคนิเดียขนาดใหญ่ที่สุด ( $3.59 \pm 0.23$  ไมโครเมตร) โดยทั่วไปแล้ว *C. militaris* เป็นราในไฟลัม Ascomycota ชั้น Ascomycetes อันดับ Hypocreales วงศ์ Clavicipitaceae และจีนัส *Cordyceps* (Kontogiannatos *et al.*, 2021) มีเส้นใยแบบมีผนังกัน (Septate hyphae) และสามารถสร้างสปอร์แบบไม่อาศัยเพศ (Asexual spore) ที่เรียกว่าโคนิเดียได้ที่บริเวณปลายของเส้นใย (Lou *et al.*, 2019b) จากการศึกษาลักษณะของเส้นใยและโคนิเดียในการทดลองครั้งนี้มีความสอดคล้องกับรายงานของ Shrestha *et al.* (2005) ที่ได้ศึกษาลักษณะพื้นฐานวิทยาของ *C. militaris* EFCC 11255 ได้ก่อกิ่ง

จุลทรรศน์แบบใช้แสงและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบการงอกของโคนิเดียในระยะเวลา 36 ชั่วโมง โคนิเดียมีรูปทรงกระบอกหรือรูปทรงรี ระยะเวลาต่อมา 48 ชั่วโมง จะเปลี่ยนเป็นรูปทรงกลมจนถึงทรงรี นอกจากนี้ผลการศึกษาโคนิเดียที่มีรูปร่างกลมของไอโซเลท CM-Sp01 ยังมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zheng *et al.* (2011) ที่ได้ทำการศึกษาวงจรชีวิตและฟีโนไทป์ที่มีความหลากหลายของ *C. militaris* พบว่าโคนิเดียมีรูปร่างกลมเมื่อเพาะเลี้ยงบนอาหารแข็ง อย่างไรก็ตามลักษณะพื้นฐานวิทยาของโคนิเดียตลอดจนสภาวะที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงส่งผลต่อการงอกของสปอร์ที่แตกต่างกัน ซึ่งจะส่งผลโดยตรงกับการเจริญเติบโตของกลุ่มเส้นใยได้ (Shrestha *et al.*, 2005) ในกรณีดังกล่าวต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการงอกของสปอร์ ตลอดจนระยะเวลาที่ใช้ในการงอกของสปอร์ ใน *Cordyceps* sp. ไอโซเลทต่าง ๆ เพื่อให้เข้าใจ

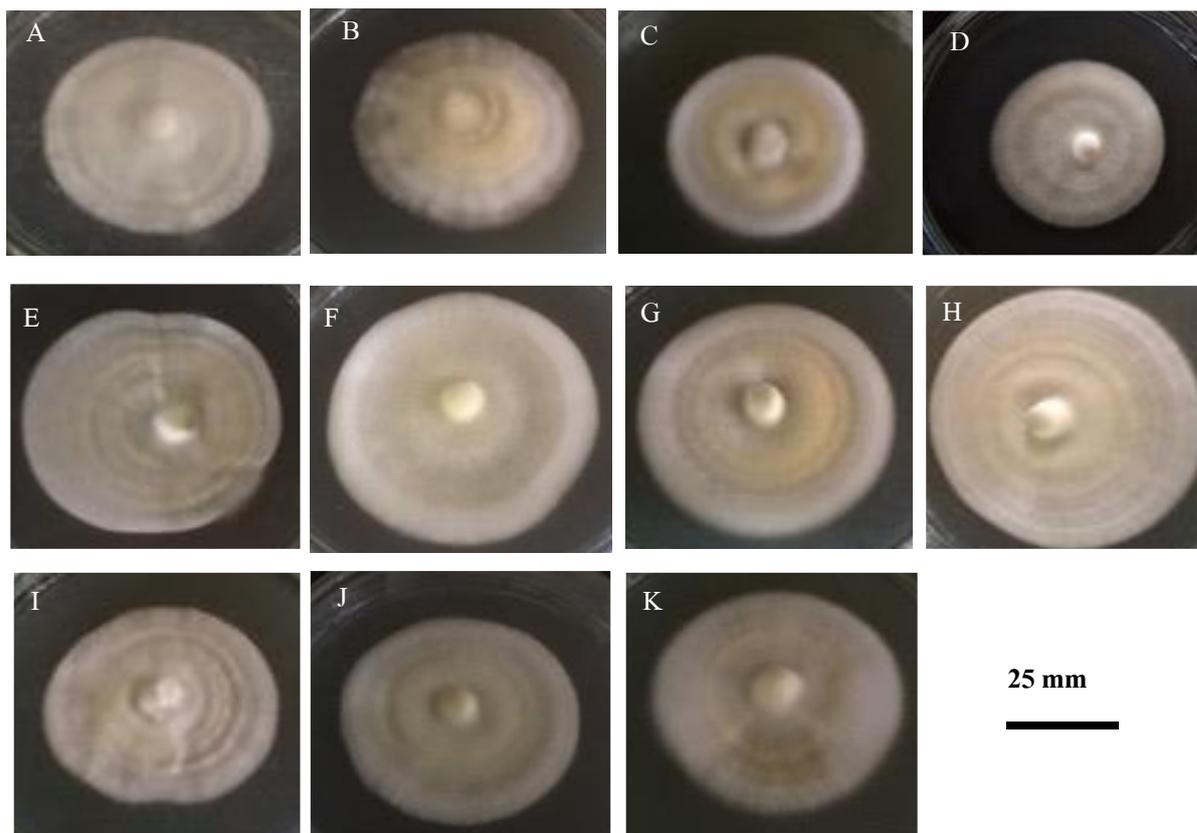
ลักษณะของโคนิเดียและการงอกของสปอร์มีความสอดคล้องกันหรือไม่

## 2. ผลการศึกษาลักษณะโคโลนีของกลุ่มเส้นใย

### *Cordyceps* sp. ไอโซเลทต่าง ๆ

การศึกษาลักษณะโคโลนีของกลุ่มเส้นใย *Cordyceps* sp. ไอโซเลทต่าง ๆ โดยการสังเกตลักษณะโคโลนีของกลุ่มเส้นใยที่เจริญบนอาหาร PDA พบว่า *Cordyceps* sp. ทุกไอโซเลทมีลักษณะโคโลนีสีขาว โคนิเดียสีขาว Vegetative mycelium และ Aerial mycelium มีสีขาว (ภาพที่ 2 และตารางที่ 2) และจะเปลี่ยนเป็นสีเหลืองเมื่อได้รับแสงสว่าง ซึ่งลักษณะการเปลี่ยนสีของเส้นใยสอดคล้องกับ

งานวิจัยของ Shrestha *et al.* (2006) ที่ได้ศึกษาลักษณะการเจริญของเส้นใย *C. militaris* EFCC C-7159 บนอาหาร PDA ที่เพาะเลี้ยงในอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 สัปดาห์ ทั้งในที่สว่างและที่มืด พบว่าเส้นใยที่เพาะเลี้ยงในที่สว่างมีลักษณะสีขาวเหลืองจนถึงเหลืองอ่อน ส่วนในที่มืดพบว่าเส้นใยมีสีขาวและยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ha *et al.* (2022) ที่ศึกษาลักษณะการเจริญของกลุ่มเส้นใย *C. militaris* KCCM 60304 บนอาหาร PDA ที่เพาะเลี้ยงในอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ในที่มืดเป็นเวลา 14 วัน พบว่ากลุ่มของเส้นใยมีลักษณะโคโลนีสีขาว มี Vegetative mycelium และ Aerial mycelium เป็นสีขาวมีลักษณะฟูเต็มผิวหน้าอาหารในจานเพาะเลี้ยง



ภาพที่ 2 ลักษณะโคโลนีของ *Cordyceps* sp. ไอโซเลทต่างๆ บนอาหารแข็ง PDA ที่อุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 21 วัน (A) ไอโซเลท CM-Sp01 (B) ไอโซเลท CM-Sp02 (C) ไอโซเลท CM-Sp03 (D) ไอโซเลท CM-Sp04 (E) ไอโซเลท CM-Sp05 (F) ไอโซเลท CM-Sp06 (G) ไอโซเลท CM-Sp07 (H) ไอโซเลท CM-Sp08 (I) ไอโซเลท CM-Sp09 (J) ไอโซเลท CM-Sp10 และ (K) ไอโซเลท CM-Sp11

นอกจากนี้เมื่อศึกษาลักษณะความหนาแน่นของกลุ่มเส้นใยเมื่อเจริญบนอาหารแข็ง PDA ที่อุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 21 วัน พบว่าแต่ละไอโซเลทมีความหนาแน่นของเส้นใยแตกต่างกัน โดยไอโซเลท CM-Sp02 มีความหนาแน่นของเส้นใยมากที่สุด โดยเส้นใยมีลักษณะฟูมากบนอาหาร PDA (ตารางที่ 2) จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการเจริญของเส้นใย *Cordyceps* sp. ไอโซเลทต่าง ๆ บนอาหารแข็ง PDA มีความแตกต่างกันในแต่ละไอโซเลททั้งลักษณะการเจริญและความหนาแน่นของเส้นใย ได้มีรายงานวิจัยของ Dang *et al.* (2018) ที่ศึกษาการเจริญและความหนาแน่นของเส้นใย *C. militaris* strain AG-1 และ *C. militaris* strain PSJ-1 พบว่าเมื่อแปรผันชนิดของอาหารที่แตกต่างกัน (อาหาร C-DOX MYPS และ PDA) ความหนาแน่นของเส้นใย *C. militaris*

strain PSJ-1 มีลักษณะที่แตกต่างกัน โดยเมื่อเพาะเลี้ยง *C. militaris* strain PSJ-1 ในอาหาร C-DOX มีความหนาแน่นของเส้นใยมากที่สุดและสูงกว่าการเพาะเลี้ยงในอาหาร PDA โดยในอาหาร C-DOX ประกอบด้วยสารอาหารต่าง ๆ มากมาย เช่น Sucrose  $\text{NaNO}_3$ ,  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ,  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  และ  $\text{KCl}$  ในขณะที่เดียวกันเมื่อเพาะเลี้ยง *C. militaris* strain AG-1 ในอาหารที่แตกต่างกันความหนาแน่นของเส้นใยไม่ได้แตกต่างกัน แต่ความหนาแน่นของเส้นใย *C. militaris* strain AG-1 มีความแตกต่างกันเมื่อแปรผันอุณหภูมิ และแหล่งคาร์บอน เป็นการแสดงให้เห็นว่าการเจริญและความหนาแน่นของเส้นใย *Cordyceps* sp. แต่ละไอโซเลทมีความแตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยแวดล้อมต่าง ๆ ที่เข้ามาเกี่ยวข้อง เช่น สารอาหาร อุณหภูมิ ความชื้น และปริมาณแสง เป็นต้น

ตารางที่ 2 ลักษณะสีและความหนาแน่นของกลุ่มเส้นใย *Cordyceps* sp. ไอโซเลทต่าง ๆ บนอาหาร PDA ที่ทำการเพาะเลี้ยงในอุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 21 วัน ในที่มืด

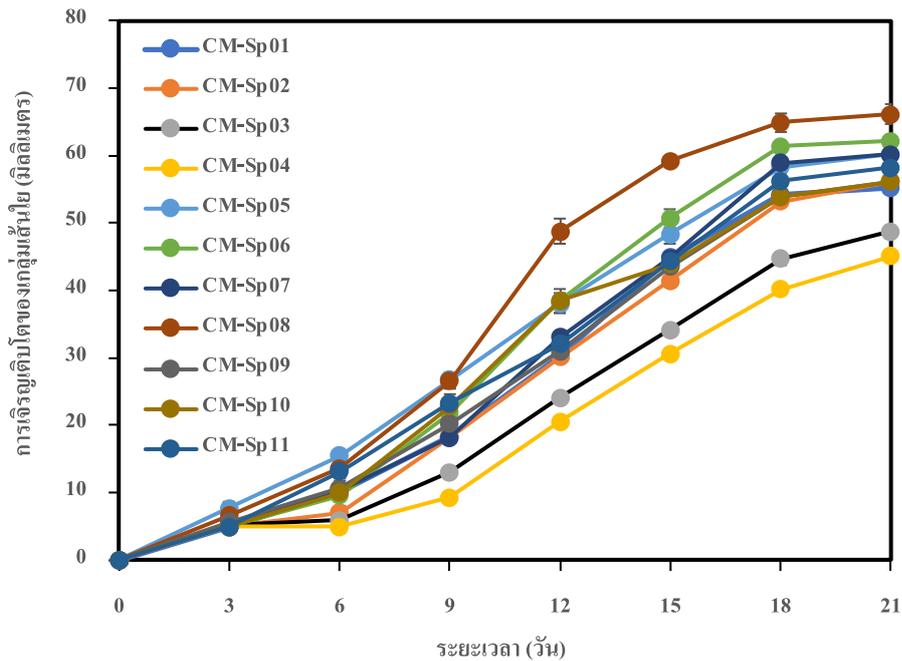
ไอโซเลท <i>Cordyceps</i> sp.	ลักษณะสีของกลุ่มเส้นใย		ความหนาแน่นของกลุ่มเส้นใย
	Vegetative mycelium	Aerial mycelium	
CM-Sp01	สีขาว	สีขาว	+++
CM-Sp02	สีขาว	สีขาว	++++
CM-Sp03	สีขาว	สีขาว	++
CM-Sp04	สีขาว	สีขาว	+++
CM-Sp05	สีขาว	สีขาว	+++
CM-Sp06	สีขาว	สีขาว	++
CM-Sp07	สีขาว	สีขาว	++
CM-Sp08	สีขาว	สีขาว	+
CM-Sp09	สีขาว	สีขาว	+
CM-Sp10	สีขาว	สีขาว	++
CM-Sp11	สีขาว	สีขาว	+++

หมายเหตุ +: เส้นใยบาง ไม่ฟูบนอาหาร PDA  
 ++: เส้นใยฟูเล็กน้อยบนอาหาร PDA  
 +++: เส้นใยฟูปานกลางบนอาหาร PDA  
 ++++: เส้นใยฟูมากบนอาหาร PDA

### 3. ผลการศึกษาการเจริญของกลุ่มเส้นใย *Cordyceps* sp. ไอโซเลทต่าง ๆ

การศึกษาการเจริญของกลุ่มเส้นใย *Cordyceps* sp. ไอโซเลทต่าง ๆ บนอาหาร PDA ที่เพาะเลี้ยงในอุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส ในที่มีดพบว่า *Cordyceps* sp. ไอโซเลท CM-Sp01 CM-Sp05 CM-Sp06 CM-Sp07 CM-Sp08 CM-Sp09 CM-Sp10 และ CM-Sp11 ในช่วงระยะเวลา 3 วันแรกกลุ่มเส้นใยมีการเจริญช้า ซึ่งจัดเป็นระยะ Lag (Lag phase) เนื่องจากเชื้อรามีการปรับตัวกับอาหารใหม่ หลังจากนั้นกลุ่มเส้นใยจึงเจริญมากขึ้นเข้าสู่ระยะ Log (Log phase) ตั้งแต่วันที่ 3 เป็นต้นไปจนถึงประมาณวันที่ 18 โดยเฉพาะไอโซเลท CM-Sp08 ที่มีการเจริญที่รวดเร็ว (ภาพที่ 3) หลังจากนั้นการเจริญจะเริ่มคงที่และเข้าสู่ระยะ Stationary (Stationary phase) (ภาพที่ 3) ในขณะที่ไอโซเลท CM-Sp02 CM-Sp03 และ CM-Sp04 ระยะ Lag จะใช้เวลานานถึงประมาณ 6 วัน จากนั้นจึงเข้าสู่ระยะ Log (ภาพที่ 3) โดยรูปแบบการเจริญของ *Cordyceps* sp. ไอโซเลท CM-Sp01 CM-Sp05 CM-Sp06 CM-Sp07 CM-Sp08 CM-Sp09 CM-Sp10 และ CM-Sp11 สอดคล้องกับการเจริญของกลุ่มเส้นใย *C. militaris* DSMZ 23612 ที่เพาะเลี้ยงในอาหาร PDA ที่อุณหภูมิ 26 องศาเซลเซียส ในที่มีดเป็นระยะเวลา 21 วัน (Soltani *et al.*, 2015) นอกจากนี้ เมื่อวัดอัตราการเจริญของกลุ่มเส้นใย พบว่าไอโซเลท CM-Sp08

เป็นไอโซเลทที่มีอัตราการเจริญสูงที่สุด (ภาพที่ 3) และแตกต่างจากไอโซเลทอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดยมีอัตราการเจริญของเส้นผ่านศูนย์กลางโคโลนีเท่ากับ  $5.06 \pm 0.65$  มิลลิเมตรต่อวัน (ตารางที่ 3) และไอโซเลท CM-Sp04 เป็นไอโซเลทที่มีอัตราการเจริญต่ำที่สุด (ภาพที่ 3) โดยมีอัตราการเจริญของเส้นผ่านศูนย์กลางโคโลนีเท่ากับ  $2.84 \pm 0.32$  มิลลิเมตรต่อวัน (ตารางที่ 3) โดยเมื่อนำอัตราการเจริญเส้นผ่านศูนย์กลางโคโลนีของไอโซเลท CM-Sp08 ไปเปรียบเทียบกับไอโซเลทอื่นที่มีรายงานพบว่า ไอโซเลท CM-Sp08 มีอัตราการเจริญเส้นผ่านศูนย์กลางโคโลนีมากกว่าไอโซเลท *C. militaris* strain 'Yedang 3' (ประมาณ 3.5 มิลลิเมตรต่อวัน) เมื่อเพาะเลี้ยงในอาหาร PDA ที่ค่า pH 6 อุณหภูมิ 24 องศาเซลเซียส ในที่มีด (Lee *et al.*, 2013a) และมากกว่า *C. militaris* strain ATCC 34165 (ประมาณ 3.5 มิลลิเมตรต่อวัน) เมื่อเพาะเลี้ยงในอาหาร PDA ที่เสริมด้วยเปปโตน 1 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ในที่มีด (ChokeUmnuy and Owatworakit, 2021) เป็นการแสดงให้เห็นว่าไอโซเลท CM-Sp08 เป็นไอโซเลทที่มีการเจริญที่อย่างรวดเร็ว เหมาะที่จะนำไปใช้ในการผลิตเส้นใยหรือมวลชีวภาพเพื่อต่อยอดในการสกัดสารต่าง ๆ จากเส้นใยมาใช้ประโยชน์ได้ เช่น เอ็กโซพอลิแซคคาไรด์ กลูแคน แมนแนน อะดีโนซีน และคอร์ไดเซปิน เป็นต้น



ภาพที่ 3 การเจริญของกลุ่มเส้นใย *C. militaris* ไอโซเลทต่าง ๆ บนอาหาร PDA โดยวัดจากเส้นผ่านศูนย์กลางโคโลนี เมื่อเพาะเลี้ยงภายใต้อุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส ในที่มีดเป็นระยะเวลา 21 วัน

นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบการเจริญของกลุ่มเส้นใย *Cordyceps* sp. ไอโซเลทต่าง ๆ เมื่อเพาะเลี้ยงบนอาหารแข็ง PDA ที่ระยะเวลา 21 วันในที่มีดที่อุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส พบว่าแต่ละไอโซเลทมีค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางโคโลนีอยู่ในช่วง 45.11-66.12 มิลลิเมตร ซึ่งไอโซเลท CM-Sp08 มีการเจริญของกลุ่มเส้นใยดีที่แตกต่างจากไอโซเลทอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดยมีค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางโคโลนีกว้างเท่ากับ  $66.12 \pm 1.45$  มิลลิเมตร และสอดคล้องกับค่าอัตราการเจริญที่สูงที่สุดเช่นกัน (ตารางที่ 3) รองลงมาได้แก่ ไอโซเลท CM-Sp06 CM-Sp07 CM-Sp05 CM-Sp11 CM-Sp02 CM-Sp10 CM-Sp089 CM-Sp01 CM-Sp03 และ CM-Sp08 โดยไอโซเลท CM-Sp01 CM-Sp02 CM-Sp10 CM-Sp09 และ CM-Sp11 มีค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางโคโลนีไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ยังพบว่าไอโซเลท CM-Sp04

มีการเจริญช้าที่สุด และสอดคล้องกับค่าอัตราการเจริญที่ต่ำที่สุดเช่นกัน (ตารางที่ 3) โดยได้มีรายงานการเจริญของกลุ่มของเส้นใย *C. militaris* พบว่าแต่ละสายพันธุ์มีการการเจริญของเส้นใยที่แตกต่างกัน (ตารางที่ 4) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสายพันธุ์อาหาร ระยะเวลา และสภาวะที่ใช้ในการเพาะเลี้ยง โดยไอโซเลท CM-Sp08 มีการเจริญของโคโลนีของกลุ่มเส้นใยมากกว่า *C. militaris* DSMZ 23612 (48.00 มิลลิเมตร) (Soltani *et al.*, 2015) และมีค่าใกล้เคียงกับ *C. militaris* strain 'Yedang 3' (67.20 มิลลิเมตร) (Lee *et al.*, 2013a) ซึ่งเพาะเลี้ยงในอาหาร PDA ที่มีสภาวะและเวลาในการเพาะเลี้ยงใกล้เคียงกัน นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบที่ระยะเวลา 12 วันในการเพาะเลี้ยงในอาหาร PDA พบว่าไอโซเลท CM-Sp08 มีการเจริญของโคโลนีของกลุ่มเส้นใยมากกว่า *C. militaris* AG-1 (48.40 มิลลิเมตร) และ *C. militaris* PSJ-1 (45.20 มิลลิเมตร) (Dang *et al.*, 2018) อย่างไรก็ตามการเจริญของโคโลนีของกลุ่มเส้นใยในไอโซเลท CM-Sp08 มีค่า

น้อยกว่า *C. militaris* DSMZ 23612 (77.00 มิลลิเมตร) (Soltani *et al.*, 2015) ที่เพาะเลี้ยงในอาหาร PDA เสริมด้วยยีสต์สกัดและมอลต์สกัดซึ่งเป็นแหล่งไนโตรเจนทำให้เส้นใยมีการเจริญได้ดีขึ้น ซึ่งการศึกษาในครั้งนี้ใช้เพียงอาหาร PDA ที่ไม่ได้เติมสารอาหารอื่น ๆ เพิ่มเติม ถือเป็นทางเลือกต้นทุนในการเพาะเลี้ยง อีกทั้งยังเป็นสูตรอาหารพื้นฐานที่เหมาะสมแล้วต่อการเจริญของกลุ่มเส้นใย *C. militaris* (Maftoun *et al.*, 2013) โดยงานวิจัยนี้ทำให้ทราบ

เบื้องต้นว่า *Cordyceps* sp. ไอโซเลท CM-Sp08 มีความสามารถในการเจริญและใช้เวลาอย่างรวดเร็วในการเจริญบนอาหาร PDA ปกติที่ไม่ได้เติมสารอาหารอื่น ๆ เพิ่มเติม เป็นการประหยัดเวลาและต้นทุนในการเพาะเลี้ยง และยังเป็นข้อมูลที่สำคัญในการคัดเลือกไอโซเลทที่มีศักยภาพดังกล่าวไปใช้ในการเจริญในอาหารเทียมเพื่อชักนำให้เกิดการออกดอกหรือสามารถนำไปต่อยอดผลิตมวลชีวภาพจากเส้นใยเพื่อสกัดสารต่าง ๆ มาใช้ประโยชน์ต่อไป

ตารางที่ 3 อัตราการเจริญและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโคโลนีของกลุ่มเส้นใย *Cordyceps* sp. ไอโซเลทต่าง ๆ เมื่อเพาะเลี้ยงบนอาหาร PDA ที่อุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส ในที่มีคเป็นระยะเวลา 21 วัน

ไอโซเลท	*อัตราการเจริญของกลุ่มเส้นใย (มิลลิเมตร/วัน)	*เส้นผ่านศูนย์กลางโคโลนีของกลุ่ม เส้นใย (มิลลิเมตร)
CM-Sp01	3.87 ± 0.31 <sup>c</sup>	55.11 ± 0.56 <sup>d</sup>
CM-Sp02	3.83 ± 0.42 <sup>d</sup>	56.15 ± 0.98 <sup>d</sup>
CM-Sp03	3.13 ± 0.66 <sup>h</sup>	48.75 ± 0.96 <sup>c</sup>
CM-Sp04	2.84 ± 0.32 <sup>i</sup>	45.11 ± 0.55 <sup>f</sup>
CM-Sp05	3.64 ± 0.67 <sup>f</sup>	60.12 ± 1.12 <sup>bc</sup>
CM-Sp06	4.56 ± 0.19 <sup>b</sup>	62.14 ± 0.98 <sup>b</sup>
CM-Sp07	3.82 ± 0.45 <sup>d</sup>	60.18 ± 0.78 <sup>bc</sup>
CM-Sp08	5.06 ± 0.65 <sup>a</sup>	66.12 ± 1.45 <sup>a</sup>
CM-Sp09	3.64 ± 0.54 <sup>f</sup>	56.12 ± 0.89 <sup>d</sup>
CM-Sp10	3.77 ± 2.98 <sup>e</sup>	56.13 ± 1.12 <sup>d</sup>
CM-Sp11	3.45 ± 1.18 <sup>e</sup>	58.23 ± 1.22 <sup>cd</sup>

หมายเหตุ: \* คือค่าเฉลี่ยจาก 3 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และตัวอักษรที่อยู่ด้านบนในแนวตั้งที่แตกต่างกันมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ )

**ตารางที่ 4** การเจริญของกลุ่มเส้นใย *Cordyceps* sp. ไอโซเลท CM-Sp08 ในการศึกษาครั้งนี้ เทียบกับ *Cordyceps* sp. สายพันธุ์อื่น ๆ ที่มีรายงานในฐานะข้อมูล

สายพันธุ์ <i>Cordyceps</i> sp.	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโคโลนีของกลุ่มเส้นใย (มิลลิเมตร)	สภาวะที่ใช้ในการเพาะเลี้ยง	เอกสารอ้างอิง
<i>Cordyceps</i> sp. CM-Sp08	66.12 ± 1.45	อาหาร PDA ที่อุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส ในที่มีดเป็นระยะเวลา 21 วัน	การศึกษาในครั้งนี้
<i>Cordyceps</i> sp. CM-Sp08	48.78 ± 1.96	อาหาร PDA ที่อุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส ในที่มีดเป็นระยะเวลา 12 วัน	การศึกษาในครั้งนี้
<i>Cordyceps militaris</i> DSMZ 23612	48.00	อาหาร PDA ที่อุณหภูมิ 26 องศาเซลเซียส ในที่มีดเป็นระยะเวลา 21 วัน	Soltani <i>et al.</i> (2015)
<i>Cordyceps militaris</i> strain 'Yedang 3'	67.2	อาหาร PDA ที่อุณหภูมิ 24 องศาเซลเซียส ในที่มีดเป็นระยะเวลา 21 วัน	Lee <i>et al.</i> (2013a)
<i>Cordyceps militaris</i> DSMZ 23612	77.00	อาหาร PDA ที่เสริมด้วยยีสต์สกัด 4 กรัมต่อลิตร และมอลต์สกัด 6 กรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 26 องศาเซลเซียส ในที่มีดเป็นระยะเวลา 21 วัน	Soltani <i>et al.</i> (2015)
<i>Cordyceps militaris</i> AG-1	48.40	อาหาร PDA ที่อุณหภูมิ 24 องศาเซลเซียส ในที่มีดเป็นระยะเวลา 12 วัน	Dang <i>et al.</i> (2018)
<i>Cordyceps militaris</i> PSJ-1	45.20	อาหาร PDA ที่อุณหภูมิ 24 องศาเซลเซียส ในที่มีดเป็นระยะเวลา 12 วัน	Dang <i>et al.</i> (2018)

#### 4. ผลการศึกษาชีวมวลและเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์ของกลุ่มเส้นใยใน *Cordyceps* sp. ไอโซเลทต่าง ๆ

จากการศึกษาปริมาณชีวมวลของกลุ่มเส้นใยใน *Cordyceps* sp. ไอโซเลทต่าง ๆ โดยวัดจากน้ำหนักแห้ง เมื่อเพาะเลี้ยงในอาหารเหลว PDB ที่อุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส ในที่มีดเป็นระยะเวลา 14 วัน พบว่า *Cordyceps* sp. ไอโซเลท CM-Sp08 ให้ปริมาณชีวมวลสูงสุดและแตกต่างจากไอโซเลทอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดยมีปริมาณชีวมวลเท่ากับ  $55.20 \pm 1.65$  กรัมต่อลิตร (ตารางที่ 5) ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับผลการวัดการเจริญบนอาหารแข็ง PDA (ภาพที่ 3 และตารางที่ 3) และจากการศึกษาปริมาณ

เอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์ของ *Cordyceps* sp. ไอโซเลทต่าง ๆ พบว่า *Cordyceps* sp. ไอโซเลท CM-Sp08 ให้ปริมาณเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์สูงสุดเท่ากับ  $2.86 \pm 0.05$  กรัมต่อลิตร (ตารางที่ 5) และยังให้ค่าผลผลิตเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์สูงสุดเท่ากับ 51.81 มิลลิกรัมต่อมิลลิกรัมน้ำหนักแห้ง (ตารางที่ 5) ซึ่งแตกต่างจากไอโซเลทอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (ตารางที่ 5) โดยได้มีรายงานการศึกษาปริมาณเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์ใน *Cordyceps* sp. สายพันธุ์ต่าง ๆ พบว่าแต่ละสายพันธุ์มีปริมาณเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์ที่แตกต่างกัน (ตารางที่ 6) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสายพันธุ์และสภาวะที่ใช้ในการเพาะเลี้ยง โดยไอโซเลท CM-Sp08 มีปริมาณเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์สูงกว่า *Cordyceps militaris*

BCC2819 (0.84 กรัมต่อลิตร) เมื่อเพาะเลี้ยงในอาหาร PDB ในพลาสติก ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ในที่มีดเป็นเวลา 11 วัน (Werapan *et al.*, 2022) และสูงกว่า *Cordyceps militaris* BCRC 33735 (2.30 กรัมต่อลิตร) เมื่อเพาะเลี้ยงในอาหารเหลวสูตรที่เหมาะสม (optimal medium) ในพลาสติกที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ในที่มีดเป็นระยะเวลา 14 วัน (Wang *et al.*, 2019) และยิ่งสูงกว่า *Cordyceps militaris* ATCC 26848 (1.5 กรัมต่อลิตร) เมื่อเพาะเลี้ยงอาหารเหลวสูตรที่เหมาะสม (optimal medium) pH 6 ในพลาสติกที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ในที่มีดเป็นระยะเวลา 16 วัน (Shih *et al.*, 2007) อย่างไรก็ตาม ปริมาณเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์ของไอโซเลท CM-Sp08 มีปริมาณน้อยกว่า *Cordyceps militaris* BCRC 33735 (5.7 กรัมต่อลิตร) เมื่อเพาะเลี้ยงในถังหมัก โดยมีหมัก

แบบกะซ้ำ (repeated batch fermentation) ในอาหารเหลวสูตรที่เหมาะสม (optimal medium) ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ในที่มีดเป็นระยะเวลา 14 วัน (Wang *et al.*, 2019) และยิ่งน้อยกว่า *Cordyceps cicadae* BCC 19788 (4.96 กรัมต่อลิตร) เมื่อเพาะเลี้ยงอาหาร PDB ในพลาสติกที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ในที่มีดเป็นเวลา 11 วัน (Werapan *et al.*, 2022) ซึ่งเป็นการแสดงให้เห็นว่าสภาวะที่ใช้ และสายพันธุ์ของ *Cordyceps* sp. มีผลต่อปริมาณการผลิตเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์ โดยในอนาคตที่ทีมผู้วิจัยวางแผนจะหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์ของไอโซเลท CM-Sp08 เพื่อให้ได้ปริมาณเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์ในปริมาณสูง และจะระบุสายพันธุ์โดยการศึกษายีน 18S rDNA และยีน ITS ต่อไป

ตารางที่ 5 ปริมาณชีวมวลและเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์ของกลุ่มเส้นใยใน *Cordyceps* sp. ไอโซเลทต่าง ๆ เมื่อเพาะเลี้ยงในอาหาร PDB ที่อุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส ในที่มีดเป็นระยะเวลา 14 วัน

ไอโซเลท	*น้ำหนักแห้ง (กรัม/ลิตร)	*เอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์ (กรัม/ลิตร)	ผลผลิตเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์ (มิลลิกรัม/มิลลิกรัมน้ำหนักแห้ง)
CM-Sp01	51.60 ± 2.79 <sup>c</sup>	2.44 ± 0.02 <sup>b</sup>	47.28 <sup>c</sup>
CM-Sp02	50.00 ± 1.32 <sup>d</sup>	2.42 ± 0.03 <sup>b</sup>	48.40 <sup>c</sup>
CM-Sp03	39.60 ± 1.56 <sup>h</sup>	1.92 ± 0.07 <sup>cd</sup>	48.48 <sup>c</sup>
CM-Sp04	38.40 ± 1.20 <sup>h</sup>	1.82 ± 0.03 <sup>d</sup>	47.39 <sup>de</sup>
CM-Sp05	44.64 ± 1.67 <sup>f</sup>	2.22 ± 0.05 <sup>bc</sup>	49.73 <sup>b</sup>
CM-Sp06	53.50 ± 4.00 <sup>b</sup>	2.48 ± 0.05 <sup>b</sup>	46.35 <sup>f</sup>
CM-Sp07	50.12 ± 1.50 <sup>cd</sup>	2.43 ± 0.06 <sup>b</sup>	48.48 <sup>c</sup>
CM-Sp08	55.20 ± 1.65 <sup>a</sup>	2.86 ± 0.05 <sup>a</sup>	51.81 <sup>a</sup>
CM-Sp09	44.60 ± 1.07 <sup>f</sup>	2.21 ± 0.03 <sup>bc</sup>	49.55 <sup>b</sup>
CM-Sp10	46.30 ± 1.30 <sup>c</sup>	2.23 ± 0.08 <sup>bc</sup>	48.16 <sup>c</sup>
CM-Sp11	42.00 ± 1.90 <sup>e</sup>	2.00 ± 0.02 <sup>cd</sup>	47.61 <sup>d</sup>

หมายเหตุ: \* คือค่าเฉลี่ยจาก 3 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และตัวอักษรที่อยู่ด้านบนในแนวตั้งที่แตกต่างกันมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ )

ตารางที่ 6 ปริมาณเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์ของกลุ่มเส้นใยใน *Cordyceps* sp. ไอโซเลท CM-Sp08 ในการศึกษาครั้งนี้ เทียบกับ *Cordyceps* sp. สายพันธุ์อื่นๆ ที่มีรายงานในฐานข้อมูล

สายพันธุ์ <i>Cordyceps militaris</i>	เอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์ (กรัมต่อลิตร)	สภาวะที่ใช้ในการเพาะเลี้ยง	เอกสารอ้างอิง
<i>Cordyceps</i> sp. CM-Sp08	2.86 ± 0.05	เพาะเลี้ยงในพลาสติก อาหาร PDB ที่อุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส ในที่มืด เป็นระยะเวลา 14 วัน	การศึกษาในครั้งนี้
<i>Cordyceps militaris</i> BCC2819	0.84	เพาะเลี้ยงในพลาสติก อาหาร PDB ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ในที่มืด เป็นเวลา 11 วัน	Werapan <i>et al.</i> (2022)
<i>Cordyceps cicadae</i> BCC 19788	4.96	เพาะเลี้ยงในพลาสติก อาหาร PDB ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ในที่มืด เป็นเวลา 11 วัน	Werapan <i>et al.</i> (2022)
<i>Cordyceps militaris</i> BCRC 33735	2.30	เพาะเลี้ยงในพลาสติก อาหารเหลว สูตรที่เหมาะสม (optimal medium) ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ในที่มืดเป็นระยะเวลา 14 วัน	Wang <i>et al.</i> (2019)
<i>Cordyceps militaris</i> BCRC 33735	5.70	เพาะเลี้ยงในถังหมัก หมักแบบกะซ้ำ (repeated batch fermentation) อาหารเหลวสูตรที่เหมาะสม (optimal medium) ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ในที่มืดเป็นระยะเวลา 14 วัน	Wang <i>et al.</i> (2019)
<i>Cordyceps militaris</i> ATCC 26848	1.50	เพาะเลี้ยงในพลาสติก อาหารเหลว สูตรที่เหมาะสม (optimal medium) pH 6 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ในที่มืดเป็นระยะเวลา 16 วัน	Shih <i>et al.</i> (2007)

## สรุป

จากการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใยและการเจริญของกลุ่มเส้นใยของ *Cordyceps* sp. จำนวน 11 ตัวอย่างที่เก็บจากฟาร์มต่าง ๆ ในประเทศไทยจำนวน 6 ฟาร์ม เมื่อศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค Slide culture พบว่า *Cordyceps* sp. ทุกไอโซเลทสร้างเส้นใยแบบมีผนังกัน มีโคนิเดียรูปทรงกลมและรูปทรงรี อยู่บริเวณปลายของเส้นใย โดยขนาดและรูปร่างของโคนิเดีย

มีความแตกต่างกันในแต่ละไอโซเลท โดยไอโซเลท CM-Sp01 มีโคนิเดียเป็นรูปทรงกลมแตกต่างจากไอโซเลทอื่นที่เป็นรูปทรงรี ในขณะที่ไอโซเลท CM-Sp09 มีขนาดโคนิเดียใหญ่ที่สุด เมื่อศึกษาลักษณะโคโลนีบนอาหาร PDA พบว่าทุกไอโซเลทมีลักษณะโคโลนีสีขาว มี Vegetative mycelium และ Aerial mycelium เป็นสีขาว โดยไอโซเลท CM-Sp02 เป็นไอโซเลทที่มีความหนาแน่นของเส้นใยมากที่สุด การศึกษาการเจริญของกลุ่มเส้นใย

บนอาหาร PDA พบว่าไอโซเลท CM-Sp08 มีอัตราการเจริญของกลุ่มเส้นใยดีที่สุด และมีค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางโคโลนีมากที่สุด โดยจากการทดลองนี้ทำให้ทราบเบื้องต้นว่า *Cordyceps* sp. ไอโซเลท CM-Sp08 ที่มีความสามารถในการเจริญในอาหารแข็งได้ดีที่สุดและใช้เวลาอย่างรวดเร็วในการเจริญ ซึ่งจะเป็นข้อมูลที่สำคัญในการคัดเลือกไอโซเลทที่มีศักยภาพในการเจริญดังกล่าวไปใช้ในการเพาะเลี้ยงในอาหารเทียมเพื่อชักนำให้เกิดการออกดอกต่อไป อีกทั้งการเจริญที่รวดเร็วของเส้นใยบนอาหาร PDA จะลดระยะเวลาในการเพาะเลี้ยงลง ซึ่งจะเป็นการประหยัดต้นทุนในการเพาะเลี้ยงถึงเข้าสู่ท้องได้ นอกจากนี้ *Cordyceps* sp. ไอโซเลท CM-Sp08 ยังมีศักยภาพในการผลิตชีวมวลและเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์ในปริมาณสูง ซึ่งสามารถนำไปต่อยอดเพื่อผลิตในระดับขนาดใหญ่ (large scale) ต่อไป

### กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับเงินสนับสนุนจากสำนักคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม (สกสว.) ประจำปีงบประมาณ 2563 ผ่านหน่วยงานมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ และขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ห้องปฏิบัติการ และเครื่องมือในการทำงานวิจัย

### เอกสารอ้างอิง

Chen, B., Sun, Y., Luo, F. and Wang, C. 2020a. Bioactive metabolites and potential mycotoxins produced by *Cordyceps* fungi: A review of safety. **Toxins** 12(6): 410-422.

Chen, B.X., Wei, T., Xue, L.N., Zheng, Q.W., Ye, Z.W., Zou, Y., Yang, Y., Yun, F., Guo, L.Q.

and Lin, J.F. 2020b. Transcriptome analysis reveals the flexibility of cordycepin network in *Cordyceps militaris* activated by L-Alanine addition. **Frontiers in Microbiology** 11: 577.

ChokeUmnuay, N. and Owatworakit, A. 2021. Effect of successive subculture of *Cordyceps militaris* on growth, metabolites production and stability of *Rhfl* gene. **Agriculture and Natural Resources** 55(4): 537-546.

Dang, H.N., Wang, C.L. and Lay, H.L. 2018. Effect of nutrition, vitamin, grains, and temperature on the mycelium growth and antioxidant capacity of *Cordyceps militaris* (strains AG-1 and PSJ-1). **Journal of Radiation Research and Applied Sciences** 11: 130-138.

DuBois, M., Gilles, K.A., Hamilton, J.K., Rebers, P.A. and Smith, F. 1956. Colorimetric method for determination of sugars and related substances. **Analytical Chemistry** 28(3): 350-356.

Ha, S.Y., Jung, J.Y., Park, H.M. and Yang, J.K. 2022. Comparison of the metabolic profile of the mycelia and fruiting bodies of artificially cultured *Cordyceps militaris*. **Journal of Mushrooms** 20(1): 13-21.

Kontogiannatos, D., Koutrotsios, G., Xekalak, S. and Zervakis, G.I. 2021. Biomass and cordycepin production by the medicinal mushroom *Cordyceps militaris*-A review of various aspects and recent trends towards

- the exploitation of a valuable fungus. **Journal of Fungi** 7(11): 986.
- Kunhorm, P., Chaicharoenaudomrung, N. and Noisa, P. 2019. Enrichment of cordycepin for cosmeceutical applications: culture systems and strategies. **Applied Microbiology and Biotechnology** 103(4): 1681-1691.
- Lee, B.J., Lee, M.A., Kim, Y.G., Lee, K.W., Choi, Y.S., Lee, B.E. and Song, H.Y. 2013a. Cultural characteristics of *Cordyceps militaris* strain 'Yedang 3' on various media and nutritional conditions. **Journal of Mushroom Science and Production** 11(3): 124-130.
- Lee, S.Y., Debnath, T., Kim, S.K. and Lim, B.O. 2013b. Anti-cancer effect and apoptosis induction of cordycepin through DR3 pathway in the human colonic cancer cell HT-29. **Food and Chemical Toxicology** 60: 439-447.
- Lou, H.W., Lin, L.F., Guo, L.Q., Wang, X.W., Tian, S., Liu C., Zhao, Y. and Zhao, R. 2019b. Advances in research on *Cordyceps militaris* degeneration. **Applied Microbiology and Biotechnology** 103(19): 7835-7841.
- Lou, H.W., Zhao, Y., Tang, H.B., Ye, Z.W., Wei, T., Lin, J.F. and Guo, L.Q. 2019a. Transcriptome analysis of *Cordyceps militaris* reveals genes associated with carotenoid synthesis and identification of the function of the cmtns Gene. **Frontiers in Microbiology** 10: 2105.
- Maftoun, P., Malek, R., Abbas, M., Aziz, R. and Enshasy, H.E. 2013. Bioprocess for semi-industrial production of immunomodulatory polysaccharide pleuran by *Pleurotus ostreatus* in submerged culture. **Journal of Scientific and Industrial Research** 72(11): 655-662.
- Nurmamat, E., Xiao, H., Zhang, Y. and Jiao, Z. 2018. Effects of different temperatures on the chemical structure and antitumor activities of polysaccharides from *Cordyceps militaris*. **Polymers** 10(4): 430.
- Shih, I.L., Tsai, K.L. and Hsieh, C. 2007. Effects of culture conditions on the mycelial growth and bioactive metabolite production in submerged culture of *Cordyceps militaris*. **Biochemical Engineering Journal** 33(3): 193-201.
- Shrestha, B., Han, S., Yoon, K. and Sung, J. 2005. Morphological characteristics of conidiogenesis in *Cordyceps militaris*. **Mycobiology** 33(2): 69-76.
- Shrestha, B., Lee, W.H., Han S.K. and Sung J.M. 2006. Observations on Some of the Mycelial Growth and Pigmentation Characteristics of *Cordyceps militaris* Isolates. **Mycobiology** 34(2): 83-91.
- Singpoonga, N., Sang-on, B. and Chaiprasart, P. 2019. Effects of preservation method on fruiting body formation and cordycepin production of *Cordyceps militaris* culture. **Agriculture and Natural Resources** 53(2): 106-113.
- Soltani, M., Al-Ali, M., Othman, N.Z., Malik, R., Elmarzugi, N., Aziz, R. and El-Enshasy, H.A. 2015. Medium composition effects on growth kinetic of *Cordyceps militaris* cells using agar

- plate method. **Journal of Pharmacy and Biological Sciences** 10(1): 79-82.
- Taikhao, S., Fueangfung, S., Leasen, S. and Lorwongtragool, P. 2018. Study of cultivation substrate materials on growth and bioactive compounds production in *Cordyceps militaris*, pp. 434-443. In Watjanatepin, N., ed. **The 3<sup>rd</sup> National Conferences Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi**. Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi. (in Thai)
- Wang, C.C., Wu, J.Y., Chang, C.Y., Yu, S.T. and Liu, Y.C. 2019. Enhanced exopolysaccharide production by *Cordyceps militaris* using repeated batch cultivation. **Journal of Bioscience and Bioengineering** 127(4): 499-505.
- Wang, F., Song, X., Dong, X., Zhang, J. and Dong, C. 2017. DASH- type cryptochromes regulate fruiting body development and secondary metabolism differently than CmWC-1 in the fungus *Cordyceps militaris*. **Applied Microbiology and Biotechnology** 101(11): 4645-4657.
- Wang, L., Xu, N., Zhang, J., Zhao, H., Lin, L., Jia, S. and Jia, L. 2015. Antihyperlipidemic and hepatoprotective activities of residue polysaccharide from *Cordyceps militaris* SU-12. **Carbohydrate Polymers** 131: 355-362.
- Werapan, B., Nutaratat, P., Ariyaphuttarat, S. and Prathumpai, W. 2022. Cordycepin production by the potential fungal strains *Cordyceps militaris* BCC 2819 and *Cordyceps cicadae* BCC 19788 in submerged culture during batch and Fed-batch fermentation. **African Journal of Biotechnology** 21(10): 483-503.
- Wijedasa, M.H. and Liyanapathirana, L.V.C. 2012. Evaluation of an alternative slide culture technique for the morphological identification of fungi species. **Sri Lanka Journal of Infectious Diseases** 2(2): 47-52.
- Wu, H., Rao, Z.C., Cao, L., De Clercq, P. and Han, R.C. 2020. Infection of *Ophiocordyceps sinensis* fungus causes dramatic changes in the microbiota of its *Thitarodes* host. **Frontiers in Microbiology** 11: 577268.
- Xia, Y., Luo, F., Shang, Y., Chen, P., Lu, Y. and Wang, C. 2017. Fungal cordycepin biosynthesis is coupled with the production of the safeguard molecule pentostatin. **Cell Chemical Biology** 24(12): 1479-1489.
- Yin, J., Xin, X.D., Weng, Y.J., Li, S.H., Jia, J.Q. and Gui, Z.Z. 2018. Genotypic analysis of degenerative *Cordyceps militaris* cultured in the pupa of *Bombyx mori*. **Entomological Research** 48(3): 137-144.
- Zhang, J., Wen, C., Duan, Y., Zhang, H. and Ma, H. 2019. Advance in *Cordyceps militaris* (Linn) Link polysaccharides: Isolation, structure, and bioactivities: A review. **International Journal of Biological Macromolecules** 132: 906-914.
- Zhao, H., Lai, Q., Zhang, J., Huang, C. and Jia, L. 2018. Antioxidant and hypoglycemic effects of acidic-extractable polysaccharides from

*Cordyceps militaris* on type 2 diabetes mice.

**Oxidative Medicine Cellular Longevity**

2018: 9150807.

Zheng, P., Xia, Y., Xiao, G., Xiong, C., Hu, X., Zhang, S., Zheng, H., Huang, Y., Zhou, Y., Wang, S., Zhao, G., Liu, X., Leger, R.J.S. and Wang, C. 2011. Genome sequence of the insect pathogenic fungus *Cordyceps militaris*, a valued traditional chinese medicine. **Genome Biology** 12(11): 1-21.

การยับยั้งเชื้อ *Staphylococcus aureus* บนผ้าฝ้ายด้วยสารสกัด  
จากลำต้นและใบฟ้าทะลายโจร

**The Inhibition of *Staphylococcus aureus* on Cotton Fabrics  
using Extracts from *Andrographis paniculata* Stems and Leaves**

ศรันยา เพ็ญพงษ์<sup>1</sup> จุฑามณี แสงสว่าง<sup>2\*</sup> และ นัตตารัตน์ อุชนะอำไพพงษ์<sup>1</sup>

Sarunya Puakpong<sup>1</sup>, Juthamane Sangsawang<sup>2\*</sup> and Nattarat Usana-ampaipong<sup>1</sup>

Received: 14 June 2023, Revised: 16 August 2023, Accepted: 25 September 2023

**บทคัดย่อ**

ศึกษาการยับยั้งเชื้อ *Staphylococcus aureus* บนผ้าฝ้ายด้วยสารสกัดจากลำต้นและใบฟ้าทะลายโจร ซึ่งสกัดด้วยเอทานอล 95% ประกอบด้วยการทดสอบประสิทธิภาพของสารสกัดฟ้าทะลายโจรต่อเชื้อ *S. aureus* ด้วยวิธี disc diffusion method โดยใช้แผ่นกระดาษกรอง (paper disc) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตรเป็นบริเวณทดสอบ พบว่า สารสกัดจากฟ้าทะลายโจรที่ความเข้มข้น 5%, 10% และ 15% มีค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นที่ยับยั้งเชื้อ *S. aureus* เท่ากับ  $6.5 \pm 0.00$ ,  $7.3 \pm 0.03$  และ  $7.5 \pm 0.00$  มิลลิเมตร ตามลำดับ (มากกว่าแผ่นทดสอบ 0.5, 1.3 และ 1.5 มิลลิเมตร ตามลำดับ) ในส่วนของการทดสอบประสิทธิภาพของผ้าฝ้ายที่ย้อมด้วยสารสกัดฟ้าทะลายโจรต่อการยับยั้งเชื้อ *S. aureus* ด้วยวิธี disc diffusion method โดยใช้แผ่นผ้าฝ้ายเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตรเป็นบริเวณทดสอบ ที่ความเข้มข้น 5%, 10% และ 15% พบว่ามีค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นที่ยับยั้งเชื้อ *S. aureus* เท่ากับ  $54.4 \pm 0.03$ ,  $54.6 \pm 0.08$  และ  $55.4 \pm 0.08$  มิลลิเมตร ตามลำดับ (มากกว่าแผ่นทดสอบ 4.4, 4.6 และ 5.4 มิลลิเมตร ตามลำดับ)

**คำสำคัญ:** การยับยั้ง, แบคทีเรีย, สแตฟิโลค็อกคัส ออเรียส, ฟ้าทะลายโจร, ผ้าฝ้าย

<sup>1</sup> ภาควิชาคหกรรมศาสตร์ คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร 10900

<sup>1</sup> Department of Home Economics, Faculty of Agriculture, Kasetsart University, Chatuchak, Bangkok 10900, Thailand.

<sup>2</sup> ศูนย์วิจัยและถ่ายทอดเทคโนโลยีการเกษตร คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร 10900

<sup>2</sup> Agricultural Research and Technology Transfer Center, Faculty of Agriculture, Kasetsart University, Chatuchak, Bangkok 10900, Thailand.

\* ผู้นิพนธ์ประสานงาน (Corresponding author, e-mail): pangjung@yahoo.com Tel 08 0935 2892

## ABSTRACT

Antibacterial activity study of creat (*Andrographis paniculata*) stem and leaf extracts on cotton fabric against *Staphylococcus aureus* included two parts. In the first part, the inhibition of creat extracts on *S. aureus* was tested using disc diffusion method with 6 mm circle paper disc. The results revealed that the diameter of the inhibition zone (clear zone) at 5%, 10% and 15% creat extracts concentration were  $6.5 \pm 0.00$  mm,  $7.3 \pm 0.03$  mm and  $7.5 \pm 0.00$  mm, respectively (0.5, 1.3 and 1.5 mm larger than the testing paper, respectively). In the second part, the inhibition of cotton fabric dyed with creat extracts on *S. aureus* was tested using the disc diffusion method with 50 mm diameter circular cotton fabric. The results showed that the diameter of the inhibition zone (clear zone) at 5%, 10% and 15% creat extracts concentration in cotton fabric were  $54.4 \pm 0.03$  mm,  $54.6 \pm 0.08$  mm and  $55.4 \pm 0.08$  mm, respectively (4.4, 4.6 and 5.4 mm larger than the testing paper, respectively).

**Key words:** inhibition, bacteria, *Staphylococcus aureus*, *Andrographis paniculata*, cotton fabric

### บทนำ

*Staphylococcus aureus* เป็นแบคทีเรียที่พบได้ตามส่วนต่าง ๆ ของร่างกายมนุษย์ เช่น จมูก มือ แผลเรื้อรัง ผิวหนัง และพบในเสื้อผ้า อากาศ และฝุ่นละออง (Nooheet, 2014) *S. aureus* เป็นแบคทีเรียแกรมบวก เชลล์รูปทรงกลม (cocci) แบคทีเรียในสกุลนี้มีขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5-1.5 ไมโครเมตร เป็นเชลล์เดี่ยว มักอยู่รวมกันเป็นกลุ่มรูปทรงวงองุ่น (grape shape cluster) เมื่ออยู่บนพื้นผิววัสดุจะสะท้อนแสงเป็นเชลล์สีทอง เป็นแบคทีเรียที่ไม่เคลื่อนที่ ไม่สร้างเอนโดสปอร์ จัดอยู่ในกลุ่ม facultative anaerobe เนื่องจากสามารถเจริญได้ดีในสภาวะมีออกซิเจนและไร้ออกซิเจน เป็นเชื้อก่อโรคที่สำคัญในมนุษย์ สามารถเพิ่มความต้านทานต่อยาปฏิชีวนะ ทั้งยังสามารถสร้างเอนไซม์ coagulase ที่เป็นสาเหตุของการแข็งตัวของเลือด (Kloos and Bannerman, 1994; Howard and Kloos, 1987; Lowy, 2000; Kloos and Musselwhite, 1975) *S. aureus* เป็นสาเหตุก่อโรคในมนุษย์ในวงกว้าง ก่อโรคผิวหนังหลายชนิด และก่อโรคร้ายแรงต่าง ๆ ทั่วโลก

(Klevens *et al.*, 2007) ในด้านการติดเชื้อที่ผิวหนังมีอาการทั้งเกิดเป็นลักษณะของหนองฝี การติดเชื้ออาจไม่รุนแรง แต่อาจก่อให้เกิดการติดเชื้อรุนแรงในกรณีที่ผิวหนังเกิดบาดแผล หรือมีแผลที่ได้รับจากการผ่าตัด ซึ่งเชื้อจะสามารถเข้าสู่เนื้อเยื่อชั้นในได้ (Artsanthia, 2006) เสื้อผ้า เครื่องนุ่งห่มเป็นสิ่งที่สัมผัสโดยตรงกับผิวหนังของมนุษย์อาจเป็นสาเหตุของการก่อโรคติดเชื้อ *S. aureus* ที่ผิวหนังได้

ฟ้าทะลายโจร (*Andrographis paniculata*) เป็นพืชสมุนไพรที่มีการวิจัยว่าสามารถใช้ในการรักษาแผลสดฝี หนอง และแก้อักเสบ โดยส่วนเนื้อดินก่อนที่จะมีดอกของฟ้าทะลายโจร สามารถรักษาโรคผิวหนังฝี การติดเชื้อ (Department of Thai Traditional and Alternative Medicine, 2021) ทั้งนี้เพราะฟ้าทะลายโจรมีสารพฤกษเคมีที่สำคัญหลายชนิด ได้แก่ สารกลุ่ม alkaloids, saponins, terpenoids, flavonoids, glycosides, tannins และ phenols (Pandey *et al.*, 2019; Najib *et al.*, 2015) สารพฤกษเคมีทั้งหมดนี้มีฤทธิ์สามารถยับยั้งเชื้อ *S. aureus* ได้ (Mgbeahuruike *et al.*, 2018; Ravi *et al.*, 2016; Kaltschmidt *et al.*, 2020;

Resende *et al.*, 2015; Anandhi *et al.*, 2014; Pereira *et al.*, 2018; Gomes *et al.*, 2018) งานวิจัยนี้ทำการทดสอบการยับยั้งเชื้อ *S. aureus* ของสารสกัดฟ้าทะลายโจร และทดสอบการยับยั้งเชื้อ *S. aureus* ของผ้าฝ้ายที่ย้อมด้วยสารสกัดฟ้าทะลายโจร เพื่อเป็นแนวทางในการวิจัยและพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ผ้าปลอดเชื้อสำหรับผู้สูงอายุต่อไป เนื่องจากผ้าฝ้ายเป็นผ้าทอจากวัสดุธรรมชาติ ระบายอากาศได้ดี ดูแลรักษาง่าย

## วิธีดำเนินการวิจัย

### 1. การเตรียมสารสกัดจากฟ้าทะลายโจร

นำลำต้นและใบฟ้าทะลายโจรสดมาหั่นเป็นชิ้นย่อย แห้งในเอทานอล 95% เป็นเวลา 7 ชั่วโมง อัตราส่วนฟ้าทะลายโจรในเอทานอล 3 ระดับ คือ ที่ความเข้มข้นของฟ้าทะลายโจรในเอทานอล 5%, 10% และ 15% (น้ำหนัก/ปริมาตร) กรองสารสกัดด้วยผ้าขาวบาง นำสารสกัดที่ได้ไประเหยด้วย rotary evaporator เพื่อเอาเอทานอลออก ได้สารสกัดเข้มข้นคิดเป็น 2 % (w/w) ของน้ำหนักสดฟ้าทะลายโจร

### 2. การย้อมผ้าฝ้ายด้วยสารสกัดจากฟ้าทะลายโจร

นำผ้าฝ้ายซึ่งผ่านการซักด้วยน้ำเปล่าไปต้มในสารสกัดที่ได้จากฟ้าทะลายโจรที่ความเข้มข้น 5%, 10% และ 15% เป็นเวลา 45 นาที ทิ้งให้เย็น นำผ้าฝ้ายที่ผ่านการต้มในสารสกัดฟ้าทะลายโจรมาผึ่งเอาน้ำออกจนหมด จากนั้นผึ่งให้แห้งในร่มในห้องปลอดเชื้อ

### 3. การเตรียมกล้าเชื้อ *S. aureus*

เลี้ยงแบคทีเรีย *S. aureus* (สายพันธุ์ ATCC6538) ในอาหารเลี้ยงเชื้อ TSB (Difco, USA) บ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปทำเป็นเซลล์แขวนลอย ใน 0.85% NaCl (normal saline) ที่ผ่านการฆ่าเชื้อ โดยปรับความขุ่นของเซลล์แขวนลอยให้เท่ากับ McFarland Standard เบอร์ 0.5 ( $1.5 \times 10^8$  CFU/ml) คัดแปลงจาก Nikokar *et al.* (2017)

## 4. การทดสอบการยับยั้งเชื้อ *S. aureus* ของสารสกัดฟ้าทะลายโจร

การทดสอบการยับยั้งเชื้อ *S. aureus* ของสารสกัดจากฟ้าทะลายโจร ด้วยวิธี disc diffusion method ใช้ paper disc ขนาด 6 มิลลิเมตร เป็นบริเวณทดสอบ โดย swap เชื้อลงบนผิวหน้าอาหารเลี้ยงเชื้อ TSA (Difco, USA) ให้เต็มผิวหน้าอาหารเลี้ยงเชื้อ หยดสารสกัดฟ้าทะลายโจรที่ความเข้มข้น 5%, 10% และ 15% ปริมาตร 10 ไมโครลิตรลงบนแผ่นกระดาษกรองที่เตรียมไว้ ก่อนนำไปวางลงบนอาหารเลี้ยงเชื้อ บ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วตรวจผลโดยวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นที่ยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย การทดสอบใช้น้ำกลั่นเป็น negative control ทำการทดลอง 6 ซ้ำ คัดแปลงจาก Nikokar *et al.* (2017); Adiguzel *et al.* (2007)

## 5. การทดสอบการยับยั้งเชื้อ *S. aureus* ของผ้าฝ้ายที่ย้อมด้วยสารสกัดฟ้าทะลายโจร

การทดสอบประสิทธิภาพของผ้าฝ้ายที่ย้อมด้วยสารสกัดฟ้าทะลายโจรต่อการยับยั้งเชื้อ *S. aureus* ด้วยวิธี disc diffusion method โดยใช้แผ่นผ้าฝ้ายรูปวงกลมซึ่งย้อมด้วยสารสกัดฟ้าทะลายโจรขนาด 50 มิลลิเมตรเป็นบริเวณทดสอบ โดย swap เชื้อลงบนผิวหน้าอาหารเลี้ยงเชื้อ TSA ให้เต็มผิวหน้าอาหารเลี้ยงเชื้อ นำผ้าฝ้ายที่ย้อมด้วยสารสกัดจากฟ้าทะลายโจรที่ความเข้มข้น 5%, 10% และ 15% มาทดสอบความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียโดยใช้ผ้าฝ้ายที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร แทนแผ่นกระดาษกรอง จุ่มผ้าฝ้ายทั้งชิ้นลงในสารสกัดฟ้าทะลายโจร นำมาวางบนอาหารเลี้ยงเชื้อที่เตรียมไว้ บ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ตรวจผลโดยวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นที่ยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย การทดสอบใช้น้ำกลั่นเป็น negative control ทำการทดลอง 6 ซ้ำ คัดแปลงจาก Nikokar *et al.* (2017); Adiguzel *et al.* (2007)

## 6. การวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ ใช้โปรแกรม SPSS-21 ค่าสถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ คือ ค่าเฉลี่ย ( $\bar{x}$ ) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) และวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยวิธี One-way ANOVA และทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี DUNCAN ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ( $p \leq 0.05$ )

## ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

### 1. ผลการทดสอบการยับยั้งเชื้อ *S. aureus* ของสารสกัดฟ้าทะลายโจร ด้วยวิธี disc diffusion method โดยใช้แผ่นกระดาษกรอง (paper disc) เป็นแผ่นทดสอบ

สารสกัดฟ้าทะลายโจรที่ความเข้มข้น 15% มีความสามารถในการยับยั้งเชื้อ *S. aureus* ได้ดีที่สุด มีค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นที่ยับยั้งเชื้อเท่ากับ 7.5 มิลลิเมตร รองลงมา คือ สารสกัดฟ้าทะลายโจรที่ความเข้มข้น 10% มีค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นที่ยับยั้งเชื้อเท่ากับ 7.3 มิลลิเมตร และสารสกัดฟ้าทะลายโจรที่ความเข้มข้น 5% มีความสามารถในการยับยั้งเชื้อ *S. aureus* ได้น้อยที่สุด มีค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นที่ยับยั้งเชื้อเท่ากับ 6.5 มิลลิเมตร จะเห็นได้ว่าทั้งความเข้มข้นที่ 5%, 10% และ 15% มีค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นที่ยับยั้งเชื้อมากกว่า

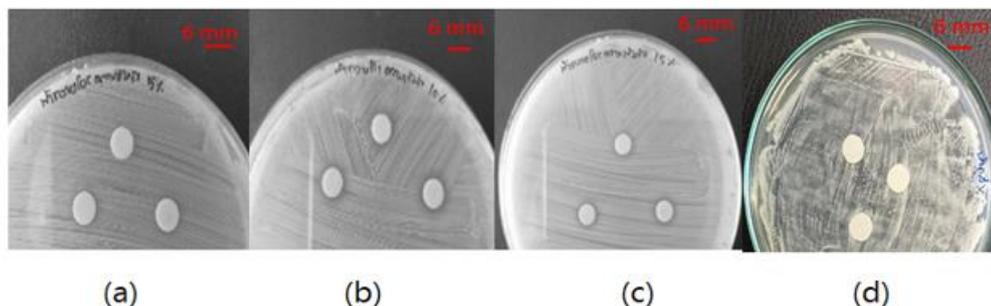
เส้นผ่านศูนย์กลางของ paper disc (>6 mm) ความเข้มข้นของสารสกัดฟ้าทะลายโจรที่สูงกว่ามีความสามารถในการยับยั้งเชื้อ *S. aureus* ได้สูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 โดยความเข้มข้นที่ 10% กับ 15% มีความสามารถในการยับยั้งเชื้อ *S. aureus* ไม่ต่างกัน แต่ที่ความเข้มข้น 10% และ 15% มีความสามารถในการยับยั้งเชื้อ *S. aureus* สูงกว่าที่ความเข้มข้น 5% (ตารางที่ 1 และภาพที่ 1)

สารสกัดฟ้าทะลายโจรมีความสามารถในการยับยั้งเชื้อ *S. aureus* ซึ่งเป็นแบคทีเรียแกรมบวก ที่มีผนังเซลล์ซับซ้อนน้อยกว่าแบคทีเรียแกรมลบ เนื่องจากพืชฟ้าทะลายโจรมีสารพฤกษเคมีหลายชนิดที่สามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้ดี เช่น tannins, terpenoids, phenolic compounds เป็นต้น ซึ่งสารกลุ่ม tannins มีสมบัติในการให้เกิด protein denature ในการทำลายหน่วยโปรตีนบนเยื่อหุ้มเซลล์ของแบคทีเรีย ทั้งสารกลุ่ม terpenoids และสารกลุ่ม phenolic compounds มีโครงสร้างเป็นวงแหวนเบนซีนและมีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) อย่างน้อย 1 แห่ง ซึ่งโครงสร้างทางเคมีทั้ง 2 ส่วนนี้ มีผลในการทำลายเยื่อหุ้มเซลล์ของแบคทีเรีย (Ali *et al.*, 2023; Olchowik-Grabarek *et al.*, 2022; Guimaraes *et al.*, 2019; Gomes *et al.*, 2018)

**Table 1** Antimicrobial activity of different creat (*Andrographis paniculata*) extracts concentration on *Staphylococcus aureus* (by disc diffusion method)

Concentration of creat ( <i>Andrographis paniculata</i> ) extracts (%)	Average diameter of Inhibition zone (mm)
5	6.5 ± 0.00 <sup>b</sup>
10	7.3 ± 0.03 <sup>a</sup>
15	7.5 ± 0.00 <sup>a</sup>
0 (Distilled water/negative control)	0.00 ± 0.00 <sup>c</sup>

( $p \leq 0.05$ )



**Figure 1** Antimicrobial activity of creat (*Andrographis paniculata*) extracts on *Staphylococcus aureus* by disc diffusion method at creat extracts concentration of (a) 5%, (b) 10%, (c) 15% and (d) 0% (negative control)

## 2. การทดสอบการยับยั้งเชื้อ *S. aureus* ของผ้าฝ้ายที่ย้อมด้วยสารสกัดฟ้าทะลายโจร ด้วยวิธี disc diffusion method โดยใช้แผ่นผ้าฝ้ายย้อมด้วยสารสกัดฟ้าทะลายโจรเป็นแผ่นทดสอบ

เมื่อนำสารสกัดจากฟ้าทะลายโจรมาย้อมผ้าฝ้าย แล้วทำการทดสอบความสามารถในการยับยั้งเชื้อ *S. aureus* พบว่า สารสกัดฟ้าทะลายโจรทั้ง 3 ระดับความเข้มข้น สามารถยับยั้งเชื้อ *S. aureus* ได้ดี เมื่อเปรียบเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางของบริเวณการยับยั้งเชื้อ (clear zone) จะเห็นได้ว่ามีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นทดสอบ (>50 mm) ผ้าฝ้ายซึ่งย้อมด้วยสารสกัดจากฟ้าทะลายโจรที่ระดับความเข้มข้น 15% มีความสามารถในการยับยั้งเชื้อ *S. aureus* ได้ไม่แตกต่างกันกับผ้าฝ้ายซึ่งย้อมด้วยสารสกัดจากฟ้าทะลายโจรที่ระดับความเข้มข้น 10% อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ส่วนผ้าฝ้ายที่ย้อมด้วยสารสกัดจากฟ้าทะลายโจรที่ระดับความเข้มข้น 5% มีความสามารถในการยับยั้งเชื้อ *S. Aureus* ต่ำกว่าผ้าฝ้ายซึ่งย้อมด้วยสารสกัดจากฟ้าทะลายโจรที่ระดับความเข้มข้น 15% และ 10% อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 (ตารางที่ 2 และภาพที่ 2-5)

เนื่องจากผ้าฝ้ายเป็นเส้นใยเซลลูโลสจากธรรมชาติ เป็นสารกลุ่มคาร์โบไฮเดรต หน่วยเซลลูโลสในเส้นใยฝ้ายมีโครงสร้างแบบ 1,4-d-glucopyranose ซึ่งสามารถจับกับพื้นผิวอื่น ๆ ได้ดี เส้นใยฝ้ายเป็นเส้นใยเชิงซ้อน มีสมบัติเป็น hydrophilic (Dochia *et al.*, 2012) จึงสามารถจับกันได้ดีกับสารสกัดฟ้าทะลายโจรซึ่งสกัดด้วยเอทานอลแล้วทำให้บริสุทธิ์ด้วยน้ำกลั่น เส้นใยฝ้ายมีทั้งประจุบวกและประจุลบ ทำให้สารสกัดจากฟ้าทะลายโจรสามารถเข้าแทรกซึมเข้าไปในเนื้อผ้าได้ด้วยแรงแวนเดอร์วาลและพันธะไฮโดรเจน (Songkroah, 1998; Chulawatanatol, 1999; Nitayapat, 2016)

สารพฤษเคมีในสารสกัดฟ้าทะลายโจรมีความสามารถในการยับยั้งแบคทีเรียได้ทั้งแกรมบวกและแกรมลบหลายชนิด รวมทั้ง *S. aureus* ซึ่งเป็นแบคทีเรียแกรมบวกชนิดหนึ่งด้วย มิงานวิจัยที่ศึกษาพบว่า สารสกัดฟ้าทะลายโจรด้วยเอทานอลที่ความเข้มข้น 100 µg/ml (10%) ทำให้เกิดส่วนใสที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของบริเวณยับยั้งเชื้อ *S. aureus* อยู่ระหว่าง 6.3-9 mm (Mishra *et al.*, 2009) เมื่อเปรียบเทียบกับยาด้านเชื้อแบคทีเรียที่ใช้โดยทั่วไป เช่น Ciprofloxacin พบว่า มีเส้นผ่านศูนย์กลางบริเวณยับยั้งเชื้อ *S. aureus* ที่ความเข้มข้น 100 µg/ml (10%)

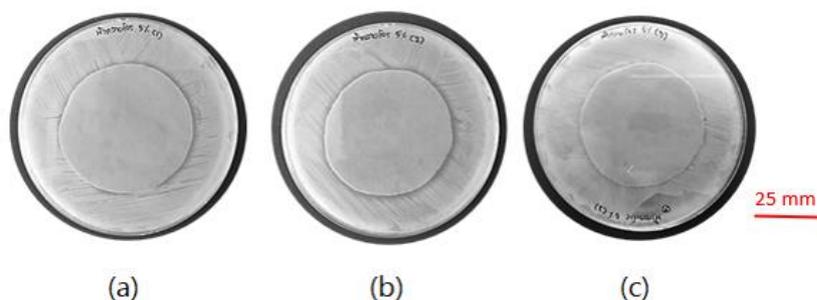
เท่ากับ 2.3 mm (Mohapatra *et al.*, 2011) จากงานวิจัยนี้จะเห็นได้ว่าผ้าฝ้ายที่ผ่านการย้อมด้วยสารสกัดฟ้าทะลายโจร เหมาะสำหรับการพัฒนาไปเป็นผ้าใช้ครั้งเดียว (single use) สำหรับยับยั้งเชื้อ *S. aureus* หากจะนำไปใช้ตัดเย็บเป็นผลิตภัณฑ์ผ้าที่มีการใช้งานเป็นประจำ ซึ่งจำเป็นต้องผ่านการซักทำความสะอาด ควรมีการพัฒนาต่อยอดไปเป็นผลิตภัณฑ์น้ำยาถนอมผ้าต่าง ๆ ซึ่งมีส่วนผสมของสารสกัดฟ้าทะลายโจร เพื่อนำมาใช้ควบคู่กับผลิตภัณฑ์ผ้าฝ้ายที่ย้อมด้วยสารสกัดฟ้าทะลายโจรจะทำให้มีประสิทธิภาพในการใช้งานมากยิ่งขึ้น ทั้งนี้เพราะสารพฤกษเคมีที่สำคัญในสารสกัดจากฟ้าทะลายโจรส่วนใหญ่จะอยู่ในกลุ่ม terpenoids เช่น andrographolide, 14-deoxyandrographolide,

14-deoxy-12-hydroxyandrographolide เป็นต้น (Tan *et al.*, 2016; Kulyal *et al.*, 2010) สารกลุ่ม terpenoids ไม่ละลายน้ำ แต่การทำมาความสะอาดด้วยสารซักล้าง (laundry detergent) ซึ่งมีสมบัติเป็น amphiphatic จะช่วยให้สารกลุ่มที่ไม่ละลายน้ำสามารถรวมกลุ่มกันเป็น detergent-micelle ในน้ำ ทำให้สามารถถูกชะล้างด้วยน้ำออกไปได้ (Yadava *et al.*, 2014; Bhairi and Mohan, 2007) การซักล้างจึงมีโอกาสนำสารสกัดฟ้าทะลายโจรซึ่งทำการย้อมไว้บนเส้นใยผ้า มีโอกาสถูกชะล้างออกไป ควรมีการศึกษาถึงการใช้ผลิตภัณฑ์น้ำยาถนอมผ้าซึ่งมีส่วนผสมของสารสกัดฟ้าทะลายโจรในการเพิ่มประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อ *S. aureus* ต่อไป

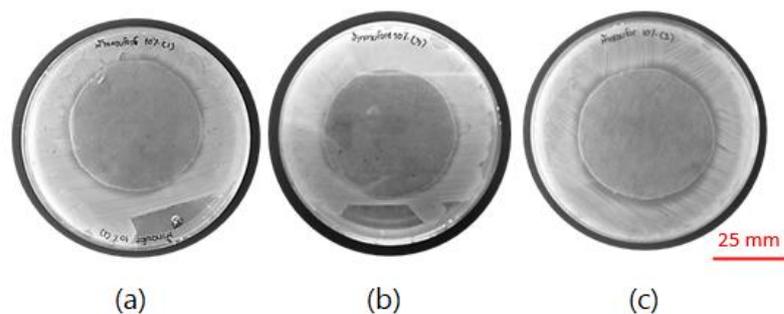
**Table 2** Antimicrobial activity of cotton fabric with different creat (*Andrographis paniculata*) extracts concentration on *Staphylococcus aureus* (by disc diffusion method)

Concentration of creat ( <i>Andrographis paniculata</i> ) extracts (%)	Diameters of inhibition zone (mm)			
	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Mean $\pm$ SD
5	54.8	54.3	54.2	54.4 $\pm$ 0.03 <sup>b</sup>
10	53.7	55.2	54.8	54.6 $\pm$ 0.08 <sup>b</sup>
15	54.7	55.2	56.3	55.4 $\pm$ 0.08 <sup>a</sup>
0 (Distilled water/negative control)	-	-	-	-

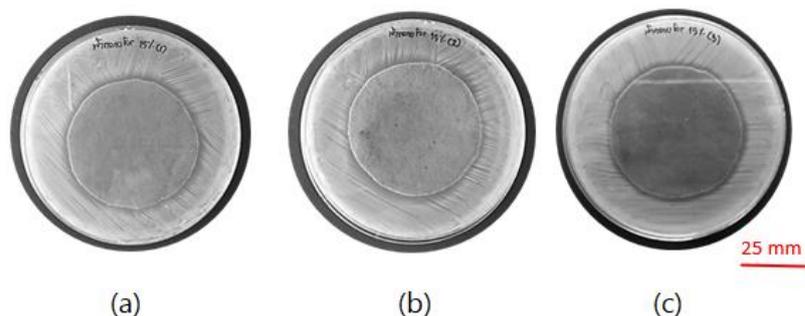
( $p \leq 0.05$ )



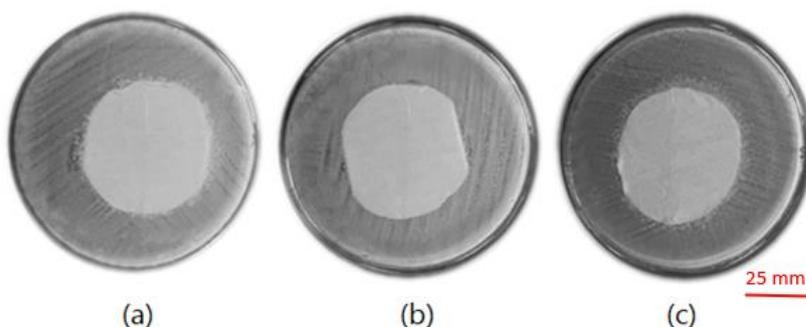
**Figure 2** Antimicrobial activity of creat (*Andrographis paniculata*) extracts on *Staphylococcus aureus* by disc diffusion method at concentration of 5%



**Figure 3** Antimicrobial activity of creat (*Andrographis paniculata*) extracts on *Staphylococcus aureus* by disc diffusion method at concentration of 10%



**Figure 4** Antimicrobial activity of creat (*Andrographis paniculata*) extracts on *Staphylococcus aureus* by disc diffusion method at concentration of 15%



**Figure 5** Antimicrobial activity of creat (*Andrographis paniculata*) extracts on *Staphylococcus aureus* by disc diffusion method at concentration of 0% (Distilled water/negative control)

## สรุป

ผลการทดสอบประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อ *S. aureus* ของสารสกัดฟ้าทะลายโจรที่ความเข้มข้น 5%, 10% และ 15% มีค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นที่ยับยั้งเชื้อ เท่ากับ  $6.5 \pm 0.00$  มิลลิเมตร  $7.3 \pm 0.03$  มิลลิเมตร และ  $7.55 \pm 0.00$

มิลลิเมตร ตามลำดับ ทั้ง 3 ระดับความเข้มข้นมีค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นที่ยับยั้งเชื้อมากกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นทดสอบ คือ paper disc ( $>6$  mm) ความเข้มข้นของสารสกัดฟ้าทะลายโจรที่ต่างกัน มีค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของบริเวณยับยั้งเชื้อ *S. aureus* ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่

ระดับ 0.05 ในส่วนของผลการทดสอบประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อ *S. aureus* ของผ้าฝ้ายที่ย้อมด้วยสารสกัดฟ้าทะลายโจรที่ความเข้มข้น 5%, 10% และ 15% มีค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นที่ยับยั้งเชื้อเท่ากับ  $54.4 \pm 0.03$  มิลลิเมตร  $54.6 \pm 0.08$  มิลลิเมตร และ  $55.4 \pm 0.08$  มิลลิเมตร ตามลำดับ ทั้ง 3 ระดับความเข้มข้นมีค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นที่ยับยั้งเชื้อมากกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นทดสอบคือ ผ้าฝ้ายที่ย้อมด้วยสารสกัดฟ้าทะลายโจร (>50 mm) ความเข้มข้นของสารสกัดฟ้าทะลายโจรที่นำมาย้อมผ้าฝ้ายต่างกัน มีค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของบริเวณยับยั้งเชื้อ *S. aureus* ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาคหกรรมศาสตร์ คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่สนับสนุนการวิจัยในครั้งนี้

### เอกสารอ้างอิง

Adiguzel, A., Ozer, H., Kilic, H. and Cetin, B. 2007. Screening of antimicrobial activity of essential oil and methanol extract of *Satureja hortensis* on foodborne bacteria and fungi. **Czech Journal of Food Sciences** 25(2): 81-89.

Ali, S.K., Makeen, H.A., Khuwaja, G., Alhazmi, H.A., Sharma, M., Koty, A., Mazahirul, I., Parveen, H., Mohammed, A., Mukhtar, S. and Alam, M.F. 2023. Assessment of the phytochemical profile, antioxidant capacity, and hepatoprotective effect of *Andrographis paniculata* against CCl<sub>4</sub>-induced liver

dysfunction in *Wistar Albino* rats. **Medicina** 59: 1-16.

- Anandhi, D., Srinivasan, P.T., Kumar, G.P. and Jagatheesh, S. 2014. Influence of flavonoids and glycosides from *Caesalpinia coriaria* (Jacq) wild as bactericidal compound. **International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences** 3(4): 1043-1051.
- Artsanthia, J. 2006. **Microbiology and Immunology for Nurse**. Bangkok Blog, Bangkok. (in Thai)
- Bhairi, S.M. and Mohan, M. 2007. **Detergent: a guide to the properties and uses of detergents in biological systems**. EMD Biosciences, Darmstadt.
- Chulawatanatol, M. 1999. **Biochemistry** (3<sup>rd</sup> ed). Chirarat Printing LTD, Bangkok. (in Thai)
- Department of Thai Traditional and Alternative Medicine. 2021. **Role of Thai Herbs and Traditional Medicine for Covid-19 Epidemics** (1<sup>st</sup> ed). S.B.K. Printing Co., Ltd., Bangkok. (in Thai)
- Dochia, M., Sirghie, C., Koztowski, R.M. and Roskwitalski, Z. 2012. Cotton fibres, pp.12-23. In Koztowski, R.M., ed. **Handbook of Natural Fibres**. Woodhead Publishing Limited, New Delhi.
- Gomes, F., Martins, N., Barros, L., Rodrigues, M.E., Oliveira, M.B.P.P., Henriques, M. and Ferreira, C.F.R.I. 2018. Plant phenolic extracts as an effective strategy to control *Staphylococcus aureus*, the dairy industry pathogen. **Industrial Crops and Products** 112: 515-520.

- Guimaraes, A.C., Meireles, L.M., Lemos, M.F., Guimaraes, M.C.C., Endringer, D.C., Fronza, F. and Scherer, R. 2019. Antibacterial activity of terpenes and terpenoids present in essential oils. **Molecules** 24(13): 1-12.
- Howard, B.J. and Kloos, W.E. 1987. Staphylococci, pp. 231-244. In Howard, B.J., Klass, J.I.I., Rubin, S.J., Weissfeld, A.S. and Tilton, R.C., eds. **Clinical and Pathogenic Microbiology**. Mosby, Washington D.C.
- Kaltschmidt, B.P., Ennen, I., Greiner, J.F.W., Dietsch, R., Patel, A., Kaltschmidt, B., Kaltschmidt, C. and Hutten, A. 2020. Preparation of terpenoid-invasomes with selective activity against *S. aureus* and characterization by Cryo transmission electron microscopy. **Biomedicine** 105(8): 1-18.
- Klevens, R.M., Morrison, M.A., Nadle, J., Petit, S., Gershman, K., Ray, S., Harrison, L.H., Lynfield, R., Dumyati, G., Townes, J.M., Craig, A.S., Zell, E.R., Fosheim, G.E., McDougal, L.K., Carey, R.B. and Fridkin, S.K. 2007. Invasive methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* infections in the United States. **The Journal of the American Medical Association** 298(15): 1763-1771.
- Kloos, W.E. and Bannerman, T.L. 1994. Update on clinical significance of coagulase-negative staphylococci. **Clinical Biological Reviews** 7(1): 117-140.
- Kloos, W.E. and Musselwhite, M.S. 1975. Distribution and persistence of *Staphylococcus* and *Micrococcus* species and other aerobic bacteria on human skin. **Journal of Applied Microbiology** 30(3): 381-385.
- Kulyal, P., Tiwari, U.K., Shukla, A. and Gaur, A.K. 2010. Chemical constituents isolated from *Andrographis paniculata*. **Indian Journal of Chemistry** 49B: 356-359.
- Lowy, F.D. 2000. Is *Staphylococcus aureus* an intracellular pathogen. **Trends Microbiology** 8(8): 341-344.
- Mgbeahuruike, E.E., Fyhrquist, P., Vuorela, H., Julkunen-Tiitto, R. and Holm, Y. 2018. Alkaloid-rich crude extracts, fractions and piperamide alkaloids of *Piper guineense* possess promising antibacterial effects. **Antibiotics** 7(98): 1-18.
- Mishra, U.S., Mishra, A., Kumari, R., Murthy, P.N. and Naik, B.S. 2009. Antibacterial Activity of Ethanol Extract of *Andrographis paniculata*. **Indian Journal of Pharmaceutical Sciences** 71(4): 436-438.
- Mohapatra, T.K., Mohapatra, T.R., Nanda, B.K., Ghosh, M.K., Nayak, R.R., Satapathy, T. and Sarangi, M.K. 2011. Evaluation of antibacterial activity of alcoholic extract of aerial parts of *Andrographis paniculata*. **International Journal of Institutional Pharmacy and Life Sciences** 1(3): 123-129.
- Najib, Y., Wan-Azemin, A., Dharmaraj, S. and Suryati, K. 2015. Phytochemical screening and prophylactic antibacterial effects of *Andrographis paniculata* extracts from Kemaman, Malaysia. **Journal of Natural Sciences Research** 5(16): 67-73.

- Nikokar, I., Ebrahim-Saraie, H.S. and Ganjian, H. 2017. Variations in Antibiotic Susceptibility Profile of *Staphylococcus aureus* after Povidone-Iodine Stress. **Pharmaceutical Sciences** 23: 72-76.
- Nitayapat, W. 2016. **Principle of Textile Dyeing**. Charansanitwong printing Co., Ltd., Bangkok. (in Thai)
- Nooheet, W. 2014. Inhibition of pathogenic bacteria contaminating exposed surfaces by extracts of zingiberaceae family. Master Thesis of Science, Prince of Songkla University. (in Thai)
- Olchowik-Grabarek, E., Sekowski, S., Kwiatek, A., Ptaczekiewicz, J., Abdulladjanova, N., Shlyonsky, V., Swiecicka, I. and Zamaraeva, M. 2022. The structural changes in the membranes of *Staphylococcus aureus* caused by hydrolysable tannins witness their antibacterial activity. **Membranes** 12: 1-18.
- Pandey, J., Vimal, K. S. and Raja, W. 2019. Evaluation of phytochemical analysis of *Andrographis paniculata* leaf and stem extracts. **World Journal of Pharmaceutical and Life Sciences** 5(2): 188-190.
- Pereira, A.V., Gois, M.B., Azevedo, T.K.B., Ferraz, F.N., Vieira, S.L.V., Cavalcanti-Dantas, V.M., Pereira, J.V., Rodrigues, O.J. and Pereira, M.S.V. 2018. Effects of associations of tannins from *Anacardium occidentale* and *Anadenanthera colubrina* with cephalosporin against bovine *Staphylococcus aureus* isolates. **Arquivos do Instituto Biologico** 85: 1-8.
- Ravi, L., Manasvi, V. and Praveena, L.B. 2016. Antibacterial and antioxidant activity of saponin from *Abutilon indicum* leaves. **Asian Journal of Pharmaceutical and Clinical Research** 9(3): 344-347.
- Resende, F.A., Nogueira, L.G., Bauab, T.M., Vilegas, W. and Varanda, A. 2015. Antibacterial potential of flavonoids with different hydroxylation patterns. **Ecletica Quimica** 40: 173-179.
- Songkroah, S. 1998. **Introductory Textile Science**. Horatnchai printing Ltd., Bangkok. (in Thai)
- Tan, M.C., Oyong, G., Shen, C.C. and Ragasa, C.R. 2016. Chemical Composition of *Andrographis paniculata* (Burm.f.) Nees. **Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences** 7(6): 2405-2408.
- Yadava, N., Yadava, R. and Goyal, A. 2014. Chemistry of Terpenoids. **International Journal of Pharmaceutical Sciences Review and Research** 45: 272-278.

## การพัฒนาผลิตภัณฑ์แผ่นเฟลกส์ผสมผงจิ้งหรีด และการประยุกต์ในกราโนล่าบอล

### Product Development of Flakes with Cricket Powder and Its Application in Granola Ball

ปาไลตา ไม้ประเสริฐ<sup>1</sup> ชนกานต์ พยัคณพันธ์<sup>1</sup> ปาริสุทธิ์ เฉลิมชัยวัฒน์<sup>1\*</sup> พรราวตา จันทโร<sup>2</sup>  
ปัทมา หิรัญโยภาส<sup>3</sup> และ ดวงกมล แสงธีรกิจ<sup>4</sup>

Palita Maiprasert<sup>1</sup>, Chanakarn Payackpunth<sup>1</sup>, Parisut Chalermchaiwat<sup>1\*</sup>, Prawta Chantaro<sup>2</sup>  
Patthama Hirunyophat<sup>3</sup> and Duangkamon Sangteerakij<sup>4</sup>

Received: 5 March 2023, Revised: 12 July 2023, Accepted: 26 July 2023

#### บทคัดย่อ

ผงจิ้งหรีดเป็นแหล่งของโปรตีนทางเลือกใหม่ที่มีศักยภาพที่สำคัญในอนาคต งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแผ่นเฟลกส์ผสมผงจิ้งหรีดเพื่อให้มีคุณค่าทางโภชนาการเพิ่มขึ้น และประยุกต์ในผลิตภัณฑ์กราโนล่าบอล จากการศึกษาอัตราส่วนของแป้งสาลีต่อผงจิ้งหรีด 3 ระดับ คือ 90:10, 80:20 และ 70:30 เปรียบเทียบกับสูตรควบคุม (แผ่นเฟลกส์ที่ไม่มีผงจิ้งหรีด) วิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพ เคมี และประสาทสัมผัส พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณผงจิ้งหรีดในแผ่นเฟลกส์ ส่งผลให้ปริมาณโปรตีนเพิ่มขึ้น แต่ปริมาณน้ำอิสระ ( $a_w$ ) ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ ) โดยอัตราส่วนของแป้งสาลีต่อผงจิ้งหรีดที่เหมาะสมต่อการผลิตแผ่นเฟลกส์ คือ 70:30 และเมื่อนำแผ่นเฟลกส์มาประยุกต์ในผลิตภัณฑ์กราโนล่าบอล โดยการศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างแผ่นเฟลกส์ เกล็ดมะพร้าว และข้าวโอ๊ตที่อัตราส่วน 70:10:20, 60:10:30, 50:20:30, 60:20:20 และ 60:15:25 ต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ พบว่า สูตรที่มีอัตราส่วน 60:15:25 ได้รับคะแนนความชอบในทุกด้านมากที่สุด กราโนล่าบอลที่พัฒนาได้นี้จัดเป็นแหล่งของโปรตีน (ร้อยละ 10.48) และเส้นใยหยาบ (ร้อยละ 8.58) มีพลังงานทั้งหมด เท่ากับ 4.36 กิโลแคลอรีต่อกรัม

คำสำคัญ: ผงจิ้งหรีด, เฟลกส์, กราโนล่าบอล, โปรตีน

<sup>1</sup> สาขาอาหารและโภชนาการ ภาควิชาคหกรรมศาสตร์ คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร 10900

<sup>1</sup> Food and Nutrition Program, Department of Home Economics, Faculty of Agriculture, Kasetsart University, Chatuchak, Bangkok 10900, Thailand.

<sup>2</sup> สาขานวัตกรรมอาหารและโภชนาการ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี อำเภอเมือง จังหวัดสุราษฎร์ธานี 84100

<sup>2</sup> Food Innovation and Nutrition Program, Faculty of Science and Technology, Suratthani Rajabhat University, Muang, Surat Thani 84100, Thailand.

<sup>3</sup> สาขาคหกรรมศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา เขตดุสิต กรุงเทพมหานคร 10300

<sup>3</sup> Home Economics Program, Faculty of Science and Technology, Suan Sunandha Rajabhat University, Dusit, Bangkok 10300, Thailand.

<sup>4</sup> สาขาวิชาการจัดการอาหาร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม อำเภอเมือง จังหวัดนครปฐม 73000

<sup>4</sup> Food Management Program, Faculty of Science and Technology, Nakhon Pathom Rajabhat University, Muang, Nakhon Pathom 73000, Thailand.

\* ผู้เขียนที่ประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): fagrpsch@ku.ac.th

## ABSTRACT

Cricket powder is an important potential source of alternative protein in the future. This research aims to develop flakes mixed with cricket powder to increase nutritional value and its application in granola ball product. The ratio of wheat flour to cricket powder was studied at 3 levels 90:10, 80:20, and 70:30 compared with the control formula (flakes without cricket powder). The result of physical, chemical quality, and sensory evaluation found that increasing the amount of cricket powder in the flakes increased the protein content, whereas the water activity ( $a_w$ ) was significantly lower ( $p \leq 0.05$ ). The optimum ratio of wheat flour to cricket powder for flakes production was 70:30. Flakes were applied in granola ball products, and the effect of the ratio of flakes, coconut flakes, and oats at ratios of 70:10:20, 60:10:30, 50:20:30, 60:20:20, and 60:15:25 on product qualities was studied. It was found that formulas with a ratio of 60:15:25 gained the highest liking scores in all attributes. The developed granola balls were considered a source of protein (10.48%) and crude fiber (8.58%). The total energy was 4.36 kcal/g.

**Key words:** cricket powder, flakes, granola ball, protein

### บทนำ

ข้อมูลจากองค์การอาหารและการเกษตรระบุว่าในอนาคตการเพิ่มขึ้นของประชากรโลกจะมากถึง 9,000 ล้านคน ในปี ค.ศ. 2050 ซึ่งคาดการณ์ว่าแหล่งอาหารและโปรตีนจะมีอย่างจำกัด แหล่งอาหารทดแทนจึงเข้ามาแทนที่อาหารหลัก เพราะประชากรที่เพิ่มขึ้นอาหารจึงไม่เพียงพอ การเลี้ยงแมลงจึงเป็นอาหารใหม่ (Novel Food) (Huis *et al.*, 2013; Vibultanakul, 2021) โดยปัจจุบันมีผู้บริโภคมแมลงมากถึง 2.5 พันล้านคนทั่วโลก ทั้งในแถบเอเชีย ยุโรป แอฟริกา และอเมริกา (Huis *et al.*, 2013) ซึ่งมูลค่าตลาดของแมลงกินได้ทั่วโลกในปี ค.ศ. 2021 เท่ากับ 3.2 ล้านดอลลาร์สหรัฐ และคาดว่าจะเพิ่มขึ้นถึง 17.6 พันล้านดอลลาร์สหรัฐภายในปี ค.ศ. 2032 (Shahbandeh, 2022) สำหรับประเทศไทยเป็นแหล่งผลิตพืชผลทางการเกษตรมีระบบนิเวศอันสมบูรณ์จึงเป็นเป้าหมายของทางเลือกผู้บริโภคมทั่วโลก ขณะเดียวกันถือเป็นโอกาสของเกษตรกรไทยรวมถึงผู้ประกอบการสามารถเพิ่มช่องทางตลาดนวัตกรรม

อาหารใหม่ โดยเฉพาะจิ้งหรีดเป็นหนึ่งในแมลงที่ได้รับความนิยมในการเลี้ยงมากที่สุด เนื่องจากมีคุณค่าทางโภชนาการสูง ประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรต (ร้อยละ 19.6-21.8) ไขมัน (ร้อยละ 23.6-29.1 ของน้ำหนักแห้ง) โปรตีน (ร้อยละ 42.0-45.8 ของน้ำหนักแห้ง) และแร่ธาตุที่สำคัญหลายชนิด ได้แก่ ทองแดง แมงกานีส และสังกะสี เท่ากับ 2.33-4.51, 4.1-12.5 และ 12.8-21.8 มิลลิกรัม/100 กรัม (Montowska *et al.*, 2019) นอกจากนี้ยังเป็นแหล่งของโปรตีนที่มีคุณภาพ (ประมาณร้อยละ 13-77 ของน้ำหนักแห้ง) (Sanom and Jangchud, 2020) อีกทั้งยังเป็นแหล่งของกรดอะมิโนที่จำเป็นต่อร่างกาย (essential amino acid) คิดเป็นร้อยละ 50.60 ของกรดอะมิโนทั้งหมด (Osimani *et al.*, 2018; Pantoa, 2020; Chuchot, 2021) ทำให้มีการนำผงจิ้งหรีดไปใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารต่าง ๆ เช่น กูกี้ (Sanom and Jangchud, 2020) ขนมปัง (Andrea *et al.*, 2018) และมัฟฟิน (Paulina *et al.*, 2018) เป็นต้น

เฟลกส์ (flakes) เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีการแปรรูปจากธัญพืชหลายชนิด เช่น ข้าวสาลี ข้าวโพด ข้าวโอ๊ต และข้าวบาร์เลย์ เป็นต้น มีลักษณะเป็นชิ้นเล็ก กรอบ และบาง (Collins English Dictionary, n.d.) ถูกนำมานำมาใช้ในเชิงพาณิชย์เพื่อผลิตอาหารได้อย่างหลากหลาย เช่น อาหารพร้อมรับประทาน ธัญชาติอาหารเช้า ขนมขบเคี้ยวอาหาร ขบเคี้ยวชนิดแท่ง และกราโนล่าบอล เป็นต้น (Bepary *et al.*, 2022) สำหรับกราโนล่า (granola) เป็นผลิตภัณฑ์อาหารอบกรอบที่เป็นกลุ่มของธัญชาติอาหารเช้ามีส่วนผสมจากธรรมชาติ เช่น ข้าวโอ๊ต แผ่นเฟลกส์ ข้าวพอง ธัญพืชต่าง ๆ เมล็ดถั่ว และผลไม้แห้ง ผ่านกระบวนการปรุงด้วยน้ำผึ้งและน้ำมัน นำไปอบแห้งแล้วขึ้นรูปเป็นแท่ง (bar) และทรงกลม (ball) ซึ่งเป็นที่นิยมของผู้บริโภคที่รักสุขภาพ (Pathare *et al.*, 2012) โดยแนวโน้มของการพัฒนาอาหารเพื่อสุขภาพในกลุ่มอาหารว่างนิยมเติมโปรตีนลงในอาหาร โดยเฉพาะแหล่งโปรตีนจากจิ้งหรีด ได้แก่ ขนมห้าง บิสกิต มัฟฟิน และคุกกี้ เป็นต้น เนื่องจากโปรตีนเป็นสารอาหารที่จำเป็นต่อร่างกาย มีบทบาทสำคัญในการเสริมสร้างกล้ามเนื้อให้แข็งแรง และเสริมสร้างระบบภูมิคุ้มกันของร่างกายให้ทำงานได้เป็นปกติ (Osimani *et al.*, 2018) อีกทั้งด้วยสถานการณ์การระบาดของโรคโควิด-19 ที่ผ่านมามีทำให้ผู้คนตระหนักในการดูแลสุขภาพของตนเองมากขึ้น ดังนั้น การพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารโปรตีนสูง

โดยใช้ผงจิ้งหรีดเป็นแหล่งโปรตีน จึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจ เพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีคุณค่าทางโภชนาการครบถ้วน และกราโนล่าบอลเป็นผลิตภัณฑ์อาหารที่เป็นที่นิยม เนื่องจากรับประทานง่าย และมีความสะดวกในช่วงเวลาเร่งรีบ จึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสมสำหรับผู้รักสุขภาพ

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแผ่นเฟลกส์ผสมผงจิ้งหรีด จากนั้นนำมาประยุกต์ในผลิตภัณฑ์กราโนล่าบอล เพื่อให้มีคุณค่าทางโภชนาการเพิ่มขึ้น และสะดวกต่อการบริโภคเป็นอาหารว่างเพื่อสุขภาพ อีกทั้งยังเป็นการสร้างความหลากหลายให้กับผลิตภัณฑ์อาหารว่างจากจิ้งหรีด และช่วยเพิ่มมูลค่าวัตถุดิบการเกษตรของไทย

## วิธีดำเนินการวิจัย

### 1. การศึกษาอัตราส่วนของแป้งสาลีต่อผงจิ้งหรีดที่เหมาะสมในการผลิตแผ่นเฟลกส์ผสมผงจิ้งหรีด

เตรียมแผ่นเฟลกส์โดยใช้อัตราส่วนของแป้งสาลีต่อผงจิ้งหรีด 4 ระดับ คือ 100:0, 90:10, 80:20 และ 70:30 ซึ่งสูตรของแผ่นเฟลกส์คัดแปลงมาจาก Theppradit (2002) โดยมีส่วนผสมต่าง ๆ แสดงดัง Table 1 ผงจิ้งหรีดที่ใช้ผลิตจากจิ้งหรีดพันธุ์ทองคำจากฟาร์มเปี่ยมสุข จังหวัดชัยนาท แป้งข้าวเหนียวต่างอก และผงโปรตีนข้าว ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทเมดิฟู้ดส์ (ประเทศไทย)

**Table 1** The ratio of wheat flour to cricket powder in flakes production

Ingredient (g)	Wheat flour : Cricket powder (percentage by weight)			
	100:0 (A)	90:10 (B)	80:20 (C)	70:30 (D)
Wheat flour	22	19.8	17.6	15.4
Cricket powder ( <i>Gryllus bimaculatus</i> )	-	2.2	4.4	6.6

Table 1 (Continuous)

Ingredient (g)	Wheat flour: Cricket powder (percentage by weight)			
	100:0 (A)	90:10 (B)	80:20 (C)	70:30 (D)
Germinated black glutinous rice flour	12	12	12	12
Rice flour	7	7	7	7
Honey	43	43	43	43
Milk powder	10	10	10	10
Rice protein powder	5	5	5	5
Salt	1	1	1	1

1.1 วิธีการเตรียมแผ่นเพลกส์ผสมผงจิ้งหรีด นำส่วนผสมทั้งหมดมาผสมกับน้ำ 10 มิลลิลิตร นวดให้เป็นเนื้อเดียวกัน แล้วนำไปขึ้นรูปเป็นแผ่นด้วยไม้นวดแบ่งให้มีขนาดหนา 1 มิลลิเมตร จากนั้นนำไปนึ่งด้วยไอน้ำ 15 นาที ตัดให้ชิ้นมีขนาด 0.5 x 0.5 เซนติเมตร นำไปอบแห้งโดยใช้เตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที (ความชื้นไม่เกินร้อยละ 3.5) จากนั้นนำออกมาบรรจุใส่ถุงซิปล็อค ชนิด โพลีเอทิลีนเพื่อรอการวิเคราะห์คุณภาพทางเคมี และการประเมินทางประสาทสัมผัสต่อไป

## 1.2 การวิเคราะห์คุณภาพทางเคมี

1.2.1 ปริมาณ โปรตีน ใช้วิธีของ Kjeldahl Method ตามวิธีการของ AOAC (2019) โดยนำตัวอย่างใส่ลงใน Kjeldahl flask เติม catalyst และกรดซัลฟิวริกเข้มข้น แล้วนำตัวอย่างไปย่อยบนเตาร้อน (รุ่น Kjeldatherm KB, ยี่ห้อ Gerhardt, ประเทศเยอรมนี) จนได้สารละลายใส จากนั้นปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นเป็น 100 มิลลิลิตร แล้วนำสารละลายที่ได้มาเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 40 แล้วนำไปกลั่นด้วยเครื่องกลั่น (รุ่น Vapodest 20, ยี่ห้อ Gerhardt, ประเทศเยอรมนี) จากนั้นไตเตรทด้วยสารละลายไฮโดรคลอริกเข้มข้น

0.1 นอร์มอล โดยวิธีนี้จะคำนวณหาปริมาณโปรตีนได้จาก ร้อยละโปรตีน = ร้อยละไนโตรเจน x Kjeldahl factor (6.25) วัดค่าตัวอย่างละ 3 ซ้ำ

1.2.2 ปริมาณน้ำอิสระ ( $a_w$ ) โดยใช้เครื่องวัดปริมาณน้ำอิสระ (รุ่น Rotronic ag, ยี่ห้อ Hydro lab, ประเทศเยอรมนี) วัดค่าตัวอย่างละ 3 ซ้ำ

## 1.3 การประเมินทางประสาทสัมผัส

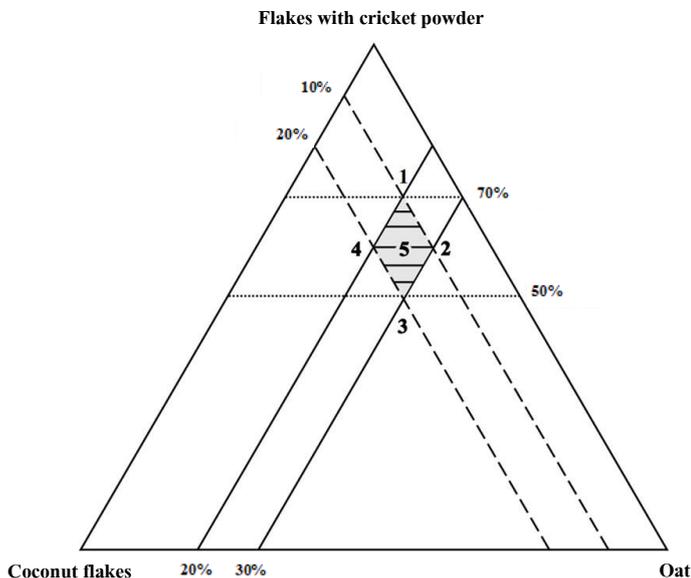
การประเมินทางประสาทสัมผัส โดยใช้กลุ่มผู้ทดสอบชิมที่ไม่ผ่านการฝึกฝนอายุระหว่าง 20-60 ปี ซึ่งเป็นนิสิตและบุคลากรในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จำนวน 30 คน มีเกณฑ์การคัดเลือก คือ ผู้ทดสอบชิมสามารถรับประทานแมลงได้ และไม่มีอาการแพ้จากส่วนผสมที่ใช้ในการผลิตแผ่นเพลกส์ผสมผงจิ้งหรีด จากนั้นให้คะแนนความชอบแบบ 9 ระดับ (9-point hedonic scale) ในด้านสี กลิ่นรส รสชาติ ความกรอบ และความชอบโดยรวม

## 2. ผลการศึกษาสูตรที่เหมาะสมของผลิตภัณฑ์กราโนล่าบอล

ศึกษาปริมาณของแผ่นเพลกส์ผสมผงจิ้งหรีด เกล็ดมะพร้าวอบแห้ง และข้าวโอ๊ตที่เหมาะสมในการผลิต กราโนล่าบอล โดยวางแผนการทดลองแบบผสม ทดลองแบบผสม (Mixture Design) ทำการศึกษา 3 ปัจจัย คือ ปริมาณแผ่นเพลกส์

ผสมผงจิ้งหรีดร้อยละ 50-70 ปริมาณเกล็ดมะพร้าว  
อบแห้งร้อยละ 10-20 และปริมาณข้าวโอ๊ตร้อยละ

20-30 (Figure 1) ได้สูตรการทดลองแตกต่างกัน  
ทั้งหมด 5 สูตร แสดงดัง Table 2



**Figure 1** Mixture design showing the overlap of flakes with cricket powder, coconut flakes and oat to produce granola ball

**Table 2** Granola ball formulation with different ratios of flakes with cricket powder, coconut flakes and oat

Formula	Flakes with cricket powder (%)	Coconut flakes (%)	Oat (%)
1	70	10	20
2	60	10	30
3	50	20	30
4	60	20	20
5	60	15	25

2.1 การเตรียมกรานอล่าบอล

นำข้าวโอ๊ต เกล็ดมะพร้าว และอัลมอนต์มา  
อบไล่ความชื้นด้วยเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 150 องศา  
เซลเซียส เป็นเวลา 10, 10 และ 35 นาที ตามลำดับ  
จากนั้นนำส่วนผสมแห้งมาผสมให้เข้ากัน พักไว้แล้ว  
เตรียมส่วนของน้ำเชื่อม โดยนำน้ำผึ้งร้อยละ 70  
แบนะแซ ร้อยละ 15 และไอโซมอลต์ผสมน้ำ  
(อัตราส่วนระหว่างไอโซมอลต์ต่อน้ำเท่ากับ 1:1)

ร้อยละ 15 มาผสมกัน ตั้งไฟอ่อนเป็นเวลา 1 นาที นำ  
ส่วนผสมแห้งมาใส่ลงไปในน้ำเชื่อม (อัตราส่วนของ  
แห้งต่อน้ำเชื่อมเท่ากับ 1:1.8) คลุกเคล้าให้เข้ากัน  
พักไว้ให้เย็น จากนั้นนำมาปั้นเป็นก้อนกลม ขนาด  
เส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร น้ำหนักลูกละ 5 กรัม  
นำไปอบด้วยตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 100 องศา  
เซลเซียส นาน 40 นาที จากนั้นนำไปบรรจุในถุง

ซีปล็อกโพลีเอทิลีนโรวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพเคมี และประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์กราโนล่าบอล

## 2.2 การวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพ

วัดคุณภาพทางเนื้อสัมผัสด้วยด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัส (Texture analyzer) (รุ่น TA.XT.Plus, สหราชอาณาจักร) ประเมินค่าความแข็ง (hardness) โดยใช้หัววัดแบบ Blade set with knife ระยะการกดสูงจากผิวหน้าตัวอย่างลงมา 15 มิลลิเมตร pre-test speed 2 mm/s; test speed 2 mm/s; post-test speed 10 mm/s วัดค่าตัวอย่างละ 10 ซ้ำ

## 2.3 การวิเคราะห์คุณภาพทางเคมี

ปริมาณน้ำอิสระ ( $a_w$ ) ตามวิธีการข้อที่ 1.2.2

## 2.4 การประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส

ประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส ตามวิธีการข้อที่ 1.3

## 3. การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์กราโนล่าบอล

นำผลิตภัณฑ์กราโนล่าบอลที่พัฒนาได้มาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณและพลังงานที่ได้รับจากการบริโภค ดังนี้

### 3.1 องค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณ

3.1.1 ปริมาณ โปรตีน ใช้วิธีของ Kjeldahl Method (AOAC, 2019) ตามวิธีการข้อ 1.2.1

3.1.2 ปริมาณไขมัน โดยใช้เครื่องวิเคราะห์หาปริมาณไขมัน (รุ่น E-816 Soxhlet, ยี่ห้อ BUCHI, ประเทศสวิสเซอร์แลนด์) คัดแปลงจาก AOAC (2019) โดยนำตัวอย่างที่ผ่านการอบไล่ความชื้นใส่ลงในกระดวยกรอง ห่อให้เรียบร้อยนำไปใส่ในทิมเบอร์ นำทิมเบอร์และขวดก้นกลมที่มีปิโตเลียมอีเทอร์ใส่ในชุดกลั่นซอห์กเลท เปิดเครื่องทำน้ำหล่อเย็นและเปิดเตาหลุมให้ความร้อนและทำการสกัดไขมัน เมื่อครบกำหนดเวลานำขวดก้นกลมมอบต่อในตู้อบลมร้อนแบบไฟฟ้าจากนั้นจึง

ชั่งน้ำหนัก และคำนวณปริมาณไขมันเป็นร้อยละของน้ำหนักตัวอย่างวัดค่าตัวอย่างละ 3 ซ้ำ

3.1.3 ปริมาณความชื้น โดยชั่งน้ำหนักตัวอย่างสดที่บดละเอียด ใส่ในถ้วยอลูมิเนียมแล้วนำไปอบในตู้อบลมร้อน (รุ่น FD-115, ยี่ห้อ Binder, ประเทศสวิสเซอร์แลนด์) ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จนกระทั่งตัวอย่างมีน้ำหนักคงที่ และคำนวณปริมาณความชื้นเป็นร้อยละของน้ำหนักตัวอย่าง (AOAC, 2019) วัดค่าตัวอย่างละ 3 ซ้ำ

3.1.4 ปริมาณเถ้า โดยใช้ตัวอย่างลงในถ้วยกระเบื้องเคลือบ (crucible) ที่ทราบน้ำหนักแน่นอน นำตัวอย่างไปเผาด้วยไฟอ่อน ๆ จนหมดควัน จากนั้นนำไปใส่เตาเผาไฟฟ้า (รุ่น EF 11/8, ยี่ห้อ Lenton, สหราชอาณาจักร) ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส จนกระทั่งได้เถ้าสีขาว และคำนวณปริมาณเถ้าเป็นร้อยละของน้ำหนักตัวอย่าง (AOAC, 2019) วัดค่าตัวอย่างละ 3 ซ้ำ

3.1.5 ปริมาณเส้นใยหยาบ โดยใช้เครื่องวิเคราะห์หาปริมาณเส้นใยหยาบ (รุ่น FT12, ยี่ห้อ Gerhardt, ประเทศเยอรมนี) ตามวิธีการของ AOAC 962.09 method (AOAC, 2019) ทำโดยวิธีการย่อยตัวอย่างด้วยสารละลายกรดและด่าง จากนั้นนำส่วนที่เหลือจากการย่อยไปอบและเผา เพื่อหาส่วนที่หายไปหลังจากการเผา ซึ่งก็คือปริมาณเส้นใยหยาบ วัดค่าตัวอย่างละ 3 ซ้ำ

3.1.6 ปริมาณคาร์โบไฮเดรต หาได้จากการนำร้อยละ 100 หักลบขององค์ประกอบอื่น ๆ จนได้เป็นปริมาณคาร์โบไฮเดรต

3.2 ค่าพลังงานทั้งหมดในอาหาร โดยใช้เครื่อง Bomb Calorimeter (รุ่น 6100, ยี่ห้อ PARR, ประเทศสหรัฐอเมริกา) รายงานหน่วยเป็นกิโลแคลต่อกรัมตัวอย่าง วัดค่าตัวอย่างละ 3 ซ้ำ

#### 4. การวิเคราะห์ทางสถิติ

วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design: CRD) ใน การศึกษาสูตรที่เหมาะสมในการผลิตแผ่นเพลกส์ และวางแผนการทดลองแบบผสม (Mixture design) ในการพัฒนาสูตรกราโนล่าบอล และวางแผนการ ทดลองแบบสุ่มในบล็อกสมบูรณ์ (Randomized Complete Block Design: RCBD) สำหรับการประเมิน ทางประสาทสัมผัส นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ความ แปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA) และ เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างสูตร ด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 วิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้ Trial Version ของ โปรแกรม IBM SPSS Statistics version 28

#### ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

##### 1. ผลการศึกษาอัตราส่วนของแป้งสาลีต่อผงจิ้งหรีดที่ เหมาะสมในการผลิตแผ่นเพลกส์ผสมผงจิ้งหรีด

ผลการวิเคราะห์คุณภาพทางเคมีของ การศึกษาอัตราส่วนของแป้งสาลีต่อผงจิ้งหรีด ที่เหมาะสมในการผลิตแผ่นเพลกส์ แสดงดัง Table 3 พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณผงจิ้งหรีด ส่งผลให้แผ่นเพลกส์ มีปริมาณโปรตีนเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ ) เนื่องจากผงจิ้งหรีดพันธุ์ทองคำที่นำมาใช้ เป็นวัตถุดิบในการทดลองมีปริมาณโปรตีนร้อยละ

57.30 (โดยน้ำหนักเปียก) และแผ่นเพลกส์ผสม ผงจิ้งหรีดสูตร D (70:30) และสูตร C (80:20) มีปริมาณโปรตีนมากที่สุด โดยทั้ง 2 สูตรนี้มีปริมาณ โปรตีนไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Zielinska *et al.* (2015) ศึกษาคุณค่าทางโภชนาการของจิ้งหรีด ชนิด *Grylloides sigillatus* (adult) พบว่ามีปริมาณ สูงสุดถึงร้อยละ 70 ซึ่งเมื่อวิเคราะห์คุณภาพของ โปรตีน โดยประเมินจากชนิดของกรดอะมิโนที่มีอยู่ ในอาหาร พบว่ามีปริมาณกรดอะมิโนที่จำเป็นต่อ ร่างกาย โดยเฉพาะทรีโอนีน (threonine) วาลีน (valine) และ ฮิสทีดีน (histidine) มีปริมาณเพียงพอ ตามที่ The Food and Agriculture Organization (2013) แนะนำให้บริโภคต่อวัน เมื่อวิเคราะห์ปริมาณ น้ำอิสระ พบว่าเมื่อปริมาณผงจิ้งหรีดเพิ่มขึ้นจะทำให้ แผ่นเพลกส์มีปริมาณน้ำอิสระ ( $a_w$ ) ลดลงอย่างมี นัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ ) โดยมีปริมาณน้ำอิสระ อยู่ ในช่วง 0.31-0.42 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ต่ำ (0.1-0.4) ทำให้อาหารปลอดภัยต่อการบริโภค (Bordoloi and Ganguly, 2014) ซึ่งการที่ปริมาณน้ำอิสระใน ผลิตภัณฑ์ลดลงเนื่องจากโปรตีนกลูเตนินในแป้งสาลี มีคุณสมบัติในการอุ้มน้ำ ดังนั้นเมื่อลดปริมาณของ แป้งสาลีและทดแทนด้วยผงจิ้งหรีด ซึ่งมีลักษณะเป็น ของแห้ง ทำให้ปริมาณความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ ลดลง จึงส่งผลให้ปริมาณน้ำอิสระลดลงตามไปด้วย (Schopf and Scherf, 2021)

**Table 3** Protein contents and water activity of flakes with different ratios of cricket powder

Formula	Protein content (%wet weight basis)	Water activity ( $a_w$ )
A (100:0)	13.55 ± 2.26 <sup>c</sup>	0.305 ± 0.006 <sup>d</sup>
B (90:10)	17.13 ± 0.04 <sup>b</sup>	0.419 ± 0.003 <sup>a</sup>
C (80:20)	19.49 ± 0.41 <sup>a</sup>	0.374 ± 0.009 <sup>b</sup>
D (70:30)	20.59 ± 0.10 <sup>a</sup>	0.351 ± 0.004 <sup>c</sup>

Mean ± SD with different lowercase superscripts in each column are significantly ( $p \leq 0.05$ ) different.

ผลการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส ด้วยวิธีการให้คะแนนความชอบแบบ 9 ระดับ (9-point hedonic scale) พบว่า ผู้ทดสอบชิมให้คะแนนความชอบในด้านสี กลิ่น กลิ่นรส และความชอบโดยรวมของแผ่นเพลกส์ผสมผงจิ้งหรีดแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ ) แต่ให้คะแนนความชอบในด้านรสชาติและความชอบโดยรวมไม่แตกต่างกันทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ ) โดยแผ่นเพลกส์สูตร A (100:0) ได้คะแนนความชอบด้านสี กลิ่น และกลิ่นรสมากที่สุด ในขณะที่คะแนนของแผ่นเพลกส์ผสมผงจิ้งหรีดสูตร D (70:30) และ B (90:10) ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) อย่างไรก็ตามแผ่นเพลกส์สูตร C (80:20) ได้คะแนนความชอบด้านความกรอบมากที่สุด (Table 4) เนื่องจากปริมาณของผงจิ้งหรีดที่สูงเกินไปอาจทำให้ผลิตภัณฑ์มีความแข็งเพิ่มขึ้น และความกรอบลดลง

แผ่นเพลกส์ผสมผงจิ้งหรีดสูตร C และสูตร D มีปริมาณโปรตีน (ร้อยละ 19.49-20.59) มากที่สุด ซึ่งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ )

แต่เมื่อพิจารณาด้านคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสพบว่าสูตร D มีคะแนนความชอบในด้านสี กลิ่น และกลิ่นรสมากกว่าสูตร C อีกทั้งปริมาณน้ำอิสระ ( $a_w$ ) ของสูตร D ยังมีค่าน้อยกว่าสูตร C ซึ่งส่งผลต่อการเก็บรักษาของแผ่นเพลกส์ผสมผงจิ้งหรีด ดังนั้นได้คัดเลือกแผ่นเพลกส์สูตรที่มีปริมาณโปรตีนสูงร่วมกับคะแนนความชอบทางด้านประสาทสัมผัสคือ แผ่นเพลกส์สูตรที่มีอัตราส่วนของแป้งสาลีต่อปริมาณผงจิ้งหรีด เท่ากับ 70:30 เพื่อนำไปศึกษาสูตรที่เหมาะสมของผลิตภัณฑ์กราโนล่าบอล แผ่นเพลกส์ผสมผงจิ้งหรีด (Figure 2) มีปริมาณโปรตีนร้อยละ 20.59 ซึ่งคิดเป็น 6.18 กรัม ต่อแผ่นเพลกส์ผสมผงจิ้งหรีด 30 กรัม หรือ 1 หน่วยบริโภค ดังนั้นแผ่นเพลกส์ผสมผงจิ้งหรีดสูตรนี้สามารถกล่าวอ้างทางโภชนาการได้ว่า “เป็นแหล่งของโปรตีน” เนื่องจากมีปริมาณโปรตีนอยู่ในช่วงร้อยละ 10-19 ของปริมาณโปรตีน (50 กรัม) ที่แนะนำให้บริโภคต่อวันสำหรับคนไทย ซึ่งคิดเป็น 5.0-9.5 กรัม (Ministry of Public Health, 1998)

**Table 4** Sensory evaluation of flakes with different ratios of cricket powder

Formula	Sensory attributes					
	Color	Smell	Flavor	Taste <sup>ns</sup>	Crispiness	Overall liking <sup>ns</sup>
A (100:0)	6.63±1.54 <sup>a</sup>	6.07±1.53 <sup>a</sup>	6.57±1.38 <sup>a</sup>	6.50±1.43	6.00±1.91 <sup>b</sup>	6.50±1.53
B (90:10)	6.13±1.25 <sup>b</sup>	5.87±1.61 <sup>ab</sup>	6.37±1.50 <sup>ab</sup>	6.43±1.48	6.10±1.92 <sup>b</sup>	6.50±1.43
C (80:20)	6.17±1.56 <sup>b</sup>	5.53±1.76 <sup>b</sup>	5.70±1.99 <sup>c</sup>	5.97±2.16	6.97±1.83 <sup>a</sup>	6.23±1.96
D (70:30)	6.37±1.40 <sup>ab</sup>	5.93±1.39 <sup>ab</sup>	5.95±1.64 <sup>bc</sup>	6.27±1.72	6.60±1.40 <sup>ab</sup>	6.57±1.50

Mean ± SD with different lowercase superscripts in each column are significantly ( $p \leq 0.05$ ) different.

ns = indicates a non-significant effect ( $p > 0.05$ ).



Figure 2 Flakes with cricket powder

## 2. ผลการศึกษาสูตรที่เหมาะสมของผลิตภัณฑ์กราโนล่าบอล

ผลการศึกษาค่าความแข็งและปริมาณน้ำอิสระ ( $a_w$ ) ของกราโนล่าบอลแสดงดัง Table 5 พบว่า ปริมาณน้ำอิสระ ( $a_w$ ) มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 0.44-0.54 ซึ่งเป็นช่วงที่จุลินทรีย์ทุกชนิดไม่สามารถเจริญได้ เนื่องจากจุลินทรีย์ทุกชนิดจะหยุดการเจริญเมื่ออาหารมีค่า  $a_w$  น้อยกว่า 0.6 (Rattanapanone, 2010) โดยสูตรที่ 2 มีปริมาณน้ำอิสระต่ำที่สุด รองลงมาเป็นสูตรที่ 5 ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณน้ำในอาหารต่ำ จะมีความแข็งของผลิตภัณฑ์มาก โดยผลิตภัณฑ์กราโนล่าบอลสูตรที่ 2 และ 4 มีค่าความแข็ง (hardness) เท่ากับ 52.71 และ 45.55 N ตามลำดับ ซึ่งมีค่าความแข็งมากกว่าสูตรที่ 1, 3 และ 5 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ ) เนื่องจากมีสัดส่วนของเกล็ดมะพร้าวในปริมาณสูง (ร้อยละ 20) ทำให้ผลิตภัณฑ์มีความแข็งเพิ่มขึ้น

เมื่อนำกราโนล่าบอลทั้ง 5 สูตร มาประเมินความชอบต่อคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสด้านสี

กลิ่นรส รสชาติ ความกรอบ และความชอบโดยรวมพบว่าผลคะแนนความชอบของกราโนล่าบอล สูตรที่ 4 มีคะแนนความชอบในด้านต่าง ๆ น้อยที่สุด และแตกต่างกับสูตรอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ ) เนื่องจากสูตรที่ 4 มีสัดส่วนของเกล็ดมะพร้าวสูง (ร้อยละ 20) ซึ่งอาจมีผลในการลดคะแนนความชอบด้านความกรอบ ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์คุณภาพทางเนื้อสัมผัส โดยสัดส่วนของเกล็ดมะพร้าวที่สูงขึ้น ทำให้ความแข็งเพิ่มขึ้น ในขณะที่เมื่อสัดส่วนของข้าวโอ๊ตเพิ่มขึ้น (ร้อยละ 25-30) ทำให้คะแนนความชอบด้านความกรอบเพิ่มขึ้น ผลการทดลองพบว่าสูตรที่ 5 ได้รับความชอบในทุกคุณลักษณะมากที่สุด ดังนั้นจึงคัดเลือกสูตรที่ได้รับคะแนนความชอบในทุกคุณลักษณะมากที่สุด คือ สูตรที่มีปริมาณแผ่นเพลกล์ผสมผงจิ้งหรีดร้อยละ 60 เกล็ดมะพร้าวร้อยละ 15 และข้าวโอ๊ตร้อยละ 25 ของส่วนผสมหลักมาศึกษาองค์ประกอบทางเคมีและพลังงานของผลิตภัณฑ์กราโนล่าบอลที่พัฒนาได้

**Table 5** Hardness and water activity of granola ball with different formula

Formula	Flakes with cricket powder (%)	Coconut flakes (%)	Oat (%)	Hardness (N)	Water activity ( $a_w$ )
1	70	10	20	25.15 ± 4.83 <sup>b</sup>	0.54 ± 0.01 <sup>a</sup>
2	60	10	30	52.71 ± 12.68 <sup>a</sup>	0.44 ± 0.02 <sup>d</sup>
3	50	20	30	24.29 ± 4.60 <sup>b</sup>	0.51 ± 0.01 <sup>b</sup>
4	60	20	20	45.55 ± 21.61 <sup>a</sup>	0.50 ± 0.02 <sup>bc</sup>
5	60	15	25	29.63 ± 2.70 <sup>b</sup>	0.48 ± 0.01 <sup>c</sup>

Mean ± SD with different lowercase superscripts in each column are significantly ( $p \leq 0.05$ ) different.

**Table 6** Sensory evaluation of granola ball with different formula

Formula	Sensory attributes				
	Color	Flavor	Taste	Crispiness	Overall liking
1	6.60 ± 1.48 <sup>a</sup>	6.50 ± 1.57 <sup>a</sup>	6.33 ± 1.71 <sup>ab</sup>	5.57 ± 2.11 <sup>a</sup>	6.20 ± 1.56 <sup>a</sup>
2	6.57 ± 1.52 <sup>a</sup>	6.63 ± 1.45 <sup>a</sup>	6.67 ± 1.56 <sup>ab</sup>	5.57 ± 2.45 <sup>a</sup>	6.37 ± 1.81 <sup>a</sup>
3	6.40 ± 1.50 <sup>a</sup>	6.57 ± 1.79 <sup>a</sup>	6.67 ± 1.97 <sup>ab</sup>	5.57 ± 2.37 <sup>a</sup>	6.37 ± 2.16 <sup>a</sup>
4	5.67 ± 1.94 <sup>b</sup>	5.43 ± 1.48 <sup>b</sup>	6.07 ± 1.36 <sup>b</sup>	3.63 ± 2.36 <sup>b</sup>	5.47 ± 1.68 <sup>b</sup>
5	6.70 ± 1.37 <sup>a</sup>	7.07 ± 1.39 <sup>a</sup>	6.87 ± 1.55 <sup>a</sup>	5.97 ± 2.34 <sup>a</sup>	6.77 ± 1.63 <sup>a</sup>

Mean ± SD with different lowercase superscripts in each column are significantly ( $p \leq 0.05$ ) different.

### 3. ผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์กราโนล่าบอลที่พัฒนาได้

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์กราโนล่าบอลที่พัฒนาได้ (Figure 3) ซึ่งมีปริมาณแผ่นเฟลกส์ผสมผงจิ้งหรีดร้อยละ 60 เกล็ดมะพร้าวร้อยละ 15 และข้าวโอ๊ตร้อยละ 25 ของส่วนผสมหลัก ประกอบด้วยปริมาณโปรตีนร้อยละ 10.48 ปริมาณไขมันร้อยละ 7.64 ปริมาณความชื้นร้อยละ 9.77 ปริมาณเถ้าร้อยละ 1.10 ปริมาณเส้นใยหยาบร้อยละ 8.58 ปริมาณคาร์โบไฮเดรตร้อยละ 62.67 และมีพลังงานสะสมในอาหาร 4.36 กิโลแคลอรีต่อกรัม (Table 7) จากการวิเคราะห์ปริมาณโปรตีน

พบว่ากราโนล่าบอลมีปริมาณโปรตีนร้อยละ 10.48 คิดเป็น 5.76 กรัม ต่อกราโนล่าบอล 55 กรัม หรือ 1 หน่วยบริโภค ดังนั้นแผ่นเฟลกส์ผสมผงจิ้งหรีดสูตรนี้สามารถกล่าวอ้างทางโภชนาการได้ว่า “เป็นแหล่งของโปรตีน” เนื่องจากมีปริมาณโปรตีนอยู่ในช่วงร้อยละ 10-19 ของปริมาณโปรตีน (50 กรัม) ที่แนะนำให้บริโภคต่อวันสำหรับคนไทย และจากการวิเคราะห์ปริมาณเส้นใยหยาบ พบว่ากราโนล่าบอลมีปริมาณเส้นใยหยาบร้อยละ 8.58 คิดเป็น 4.72 กรัม ต่อกราโนล่าบอล 55 กรัม หรือ 1 หน่วยบริโภค ดังนั้นผลิตภัณฑ์ที่พัฒนาได้จึงเป็นแหล่งของเส้นใยอาหาร ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อระบบทางเดินอาหารของมนุษย์ (The Ministry of Public Health, 1998)



Figure 3 Developed granola ball

Table 7 Chemical composition of developed granola ball

Chemical composition	Developed granola ball
Protein content (%wet weight basis)	10.48 ± 0.57
Fat (%wet weight basis)	7.64 ± 0.73
Moisture content (%wet weight basis)	9.77 ± 0.06
Ash (%wet weight basis)	1.10 ± 0.03
Crude Fiber (%wet weight basis)	8.58 ± 1.29
Total carbohydrate (%wet weight basis)	62.67 ± 1.67
Energy (Kcal/g)	4.36 ± 0.04

## สรุป

จึงจัดเป็นแหล่งอาหารที่สามารถสร้างความยั่งยืน และความมั่นคงทางอาหารได้ เนื่องจากมีคุณค่าทางโภชนาการสูง โดยเฉพาะเป็นแหล่งของโปรตีนที่สามารถทดแทนเนื้อสัตว์ได้ ซึ่งการใช้ผงจิ้งหรีดเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการให้กับผลิตภัณฑ์แผ่นเฟลทส์และกราโนล่าบอล พบว่าทำให้มีปริมาณโปรตีนสูงขึ้นโดยสูตรแผ่นเฟลทส์ผสมผงจิ้งหรีดที่เหมาะสมมีอัตราส่วนของแป้งสาลีต่อปริมาณผงจิ้งหรีดเท่ากับ 70:30 และสูตรกราโนล่าบอลที่เหมาะสมคือสูตรที่มีปริมาณแผ่นเฟลทส์ผสมผงจิ้งหรีด ร้อยละ 60 เกล็ดมะพร้าว ร้อยละ 15 และข้าวโอ๊ต ร้อยละ 25 ซึ่งผลิตภัณฑ์กราโนล่าบอลที่พัฒนาได้มีปริมาณโปรตีน และปริมาณเส้นใยหยาบมากถึง ร้อยละ 10.84 และ 8.58 ตามลำดับ

จึงจัดเป็นผลิตภัณฑ์ที่เป็นแหล่งของโปรตีนและเส้นใยอาหาร เป็นทางเลือกของอาหารสุขภาพให้แก่ผู้บริโภคได้ และยังสามารถส่งเสริมการบริโภคแมลงได้อีกทางหนึ่งด้วย เพื่อการต่อยอดผลจากงานวิจัยนี้ ผู้เชิงพาณิชย์ในอนาคต การศึกษาต่อไปควรมีการศึกษาอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ วิเคราะห์สารฮีสตามีน คุณค่าอาหารตามฉลากโภชนาการ และการทดสอบผู้บริโภคร่วมด้วย เพื่อความสมบูรณ์ของการพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาอาหารและโภชนาการ ภาควิชาคหกรรมศาสตร์ คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ เครื่องมือ และอุปกรณ์ในการทำวิจัยนี้จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

## เอกสารอ้างอิง

- Andrea, O., Vesna, M., Federica, C., Andrea, R., Cristiana, G., Francesca, C., Marina, P., Massimo, M., Roberta, F., Nadia, R., Federica, Z. and Lucia, A. 2018. Bread enriched with cricket powder (*Acheta domestica*): atecnological, microbiological and nutritional evaluation. **Innovative Food Science and Emerging Technologies** 48: 150-163.
- AOAC. 2019. **Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists: Official Methods of Analysis of AOAC International**. 21<sup>st</sup>ed. AOAC, Washington DC.
- Bepary, R.H., Wadikar, D.D. and Semwal, A.D. 2022. Optimization of temperate extrusion-assisted flaking process conditions for the production of ricebean (*Vigna umbellata*) flakes. **Innovative Food Science and Emerging Technologies** 81: 103124.
- Bordoloi, R. and Ganguly, S. 2014. Extrusion technique in food processing and a review on its various technological parameters. **Indian Journal of Scientific Research and Technology** 2(1): 1-3.
- Chuchot, S. 2021. "Cricket", a new economic animal with a future. Available Source: <http://secretary.dld.go.th/webnew/index.php/th/news-menu/dld-editorial-menu/7512-11-2564>, July 18, 2021. (in Thai)
- Collins English Dictionary. n.d. **Definition of 'flake'**. Collins. Available source: <https://www.collinsdictionary.com/dictionary/english/flake>, October 21, 2021.
- Huis, A.V., Itterbeeck, J.V., Klunder, H., Mertens, E., Halloran, A., Muir, G. and Vantomme, P. 2013. **Edible insects future prospects for food and feed security**. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- Ministry of Public Health. 1998. **Policy - Notification of the Ministry of Public Health (No. 182) B.E.1998 Re: Nutrition Labelling**. Available Source: <https://extranet.who.int/nutrition/gina/en/node/23007>, April 2, 2022.
- Montowska, M., Kowalczewski, P.L., Rybicka, I. and Fornal, E. 2019. Nutritional value, protein and peptide composition of edible cricket powders. **Food Chemistry** 289: 130-138.
- Osimani, A., Milanović, V., Cardinali, F., Roncolini, A., Garofalo, C., Clementi, F., Pasquini, M., Mozzon, M., Foligni, R., Raffaelli, N., Zamporlini, F. and Aquilanti, L. 2018. Bread enriched with cricket powder (*Acheta domestica*): A technological, microbiological and nutritional evaluation. **Innovative Food Science & Emerging Technologies** 48: 150-163.
- Pantao, T. 2020. Edible insects: nutrition value and their processing for utilization. **Food Journal** 50(1): 5-12. (in Thai)
- Pathare, P.B., Baş, N., Fitzpatrick, J.J., Cronin, K. and Byrne, E.P. 2012. Production of granola breakfast cereal by fluidized bed granulation. **Food and Bioproducts Processing** 90(3): 549-554.

- Paulina, P. , Maria, R. , Paulina, W. , Sandra, D. , Natalia, G. , Paulina, S. and Przemysław, K.Ł. 2018. Effect if the replacement of wheat flour with cricket powder on the characteristics of muffins. **Acta Scientiarum Polonorum Technologia Alimentaria** 17(3): 227-233.
- Rattanapanone, N. 2010. **Food Chemistry**. Odeon Store Publishing House, Bangkok. (in Thai)
- Sanom, P. and Jangchud, K. 2020. Effect of cricket (*Acheta Domesticus*) powder, soy protein isolate and xanthan gum on the qualities of rice flour-based cookie. **RMUTP Research Journal** 14(2): 72-84. (in Thai)
- Schopf, M. and Scherf, K.A. 2021. Water absorption capacity determines the functionality of vital gluten related to specific bread volume. **Foods** 10(2): 228.
- Shahbandeh, M. 2022. **Global edible insects market size 2021-2032**. Available Source: <https://www.statista.com/statistics/882321/edible-insects-market-size-global/#:~:text=Global%20edible%20insects%20market%20size%202021%2D2032&text=In%202021%2C%20the%20estimated%20market,billion%20U.S.%20dollars%20by%202032>, June 26, 2023.
- The Food and Agriculture Organization. 2013. **Dietary Protein Quality Evaluation in Human Nutrition**. The Food and Agriculture Organization, Rome.
- The Ministry of Public Health. 1998. **Notification of the Ministry of Public Health (No. 182) 1998 Title: Nutrition Labelling**. Government Gazette vol. 115, part 47 (Ngor). (dated June 11, 1998). (in Thai)
- Thepradit, R. 2002. Development of breakfast ready to eat cereal flake from cake obtained from soy milk production. Master of Science ( Agro- Industrial Product Development ) , Kasetsart University. (in Thai)
- Vibultanakul, S. 2021. **Insect protein food of the future Thai economic opportunity**. Marketingoops. Available Source: <https://www.marketingoops.com/exclusive/trending-exclusive/edible-bug/> , July 18, 2021. (in Thai)
- Zielinska, E. , Baraniak, B. , Karas, M. , Rybczynska, K. and Akubczyk, A. 2015. Selected species of edible insects as a source of nutrient composition. **Food Research International** 77: 460-466.

ผลของอิมัลซิไฟเออร์ต่อคุณสมบัติเนื้อสัมผัส คุณสมบัติทางเคมี  
และความคงตัวของอิมัลชันไส้กรอกหมูที่ผลิตจากเนื้อสุกรแช่เยือกแข็ง

**Effects of Emulsifier on Texture and Chemical Properties and Emulsion  
Stability of Pork Sausage Made of Frozen Pork Meat**

วารวณิชย์ นิคมพะเนาวิ เอกรินทร์ อินประมูต มาลัยพร วงศ์แก้ว รัตติยากร ชาตดนนทร์ และ สุปงกช โตไพบูลย์\*

Warawaran Shimbhano, Aekarin Inpramoon, Malaiporn Wongkaew, Rattiyakorn Chattanon  
and Subongkoj Topaiboul\*

Received: 8 February 2023, Revised: 11 August 2023, Accepted: 4 September 2023

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์เนื้อสัมผัสและคุณสมบัติของไส้กรอกอิมัลชันที่ทำจากเนื้อสุกรแช่เยือกแข็งที่  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  เป็นระยะเวลา 3 เดือนและปรับปรุงคุณสมบัติดังกล่าวด้วยการเติมอิมัลซิไฟเออร์ชนิดต่าง ๆ ประกอบไปด้วยผงถั่วเหลือง 10% และ 20% สารสกัดโปรตีนถั่วเหลือง 10% และ 20% และผงไข่ขาว 10% และ 20% เข้าทดแทนเนื้อสุกรแช่เยือกแข็ง โดยตรวจวัดค่าสี ค่าเนื้อสัมผัส ความคงตัวของอิมัลชัน ปริมาณความชื้น ปริมาณโปรตีนและไขมัน และวิเคราะห์โครงสร้างไส้กรอกด้วยภาพถ่ายจุลภาค ผลการทดลองพบว่า สีของไส้กรอกที่ผลิตจากเนื้อสุกรแช่เยือกแข็งแตกต่างกันไปตามชนิดและปริมาณอิมัลซิไฟเออร์ แต่ยังคงอยู่ในช่วงที่มีความสว่างใกล้เคียงกัน อิมัลซิไฟเออร์ทุกชนิดมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความแข็ง ค่าความยืดเคาะ และดัชนีความต้านทานต่อการบดเคี้ยวของไส้กรอก แต่ไม่มีผลต่อค่าดัชนีการกินตัว การใช้ผงไข่ขาวส่งผลให้ไส้กรอกมีความแข็งมากที่สุด ซึ่งผลจากภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาคพบความแตกต่างของขนาดโพรงและลักษณะผิวเนื้อไส้กรอกที่สอดคล้องกัน เมื่อพิจารณาคุณสมบัติทางเคมีพบว่ามีความชื้นใกล้เคียงกัน ปริมาณโปรตีนไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญแต่ตรวจพบปริมาณที่มากขึ้นเมื่อใช้ผงถั่วเหลืองและผงไข่ขาว 20% ทดแทนเนื้อสุกร การใช้ผงถั่วเหลืองที่มากกว่า 10% สามารถปรับปรุงลักษณะเนื้อสัมผัสได้ นอกจากนี้ผงถั่วเหลืองและผงไข่ขาวสามารถปรับปรุงความคงตัวของอิมัลชันในส่วนผสมไส้กรอกได้ดีเมื่อใช้ที่ปริมาณ 10% ขึ้นไป

**คำสำคัญ:** เนื้อสุกร, แช่เยือกแข็ง, ไส้กรอกอิมัลชัน, คุณสมบัติเนื้อสัมผัส, ความคงตัวของอิมัลชัน

วิทยาลัยเทคโนโลยีและสหวิทยาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา อำเภอค้อยสะเก็ด จังหวัดเชียงใหม่ 50220

College of Integrated Science and Technology, Rajamangala University of Technology Lanna, Doi Saket, Chiang Mai 50220, Thailand.

\* ผู้รับผิดชอบประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): subongkoj@rmutl.ac.th

## ABSTRACT

This study aims to analyze the texture and chemical property changes of emulsion pork sausages made from frozen pork meat after 3 months of storage at  $-40^{\circ}\text{C}$  and to improve sausage quality by replacing the meat with various emulsifiers including 10% and 20% soy protein powder, 10% and 20% isolated soy protein, and 10% and 20% egg white powder. The color, texture, emulsion stability, moisture content, protein content, fat content, and microstructure images of the sausage samples were determined. The results showed the measured sausage colors were varied with the type and amount of emulsifier added; however, overall colors were within the same lightness zone. All emulsifiers affected hardness, cohesiveness, chewiness index, but not the springiness index. Using egg white powder led to the highest hardness. The microstructure of sausage samples showed different pore size and numbers, which were consistent with the texture properties. Regarding the chemical properties, it was found that all treatments had a similar amount of water content. Protein content did not change significantly, but a higher amount of protein could be measured when using 20% of soybean protein and white egg powder. Soy protein powder could improve the sausage texture properties when used in amounts greater than 10%. Furthermore, soy protein and egg white powder could improve the emulsion stability in the sausage mixture if used at 10% or higher.

**Key words:** pork meat, frozen storage, emulsion sausage, texture properties, emulsion stability

## บทนำ

ในกระบวนการแปรรูปเนื้อสุกรหลังจากผ่านการชำแหละ เนื้อสดจะถูกเก็บรักษาไว้ในห้องเย็นแล้วจึงนำมาแปรรูปทันทีหลังการชำแหละ 24 ชั่วโมงเพื่อคงคุณภาพความสดของเนื้อและความปลอดภัยต่อการบริโภค บางกรณีที่เนื้อสดมีปริมาณมากกว่ากำลังการผลิต ผู้ผลิตมักใช้การเก็บรักษาในห้องแช่เยือกแข็งเพื่อยืดอายุของเนื้อให้คงสภาพได้ยาวนานขึ้น ซึ่งในกระบวนการผลิตไส้กรอกหมูของศูนย์วิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์สำนักงานปศุสัตว์เชียงใหม่ ในบางช่วงมีความจำเป็นต้องใช้เนื้อสุกรแช่เยือกแข็งมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ไส้กรอก และพบว่าคุณสมบัติความเป็นอิมัลชันและเนื้อสัมผัสของไส้กรอกมีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม โดยคาดว่าอาจเป็นผลมาจากระยะเวลาในการแช่เยือกแข็งเนื้อสุกรก่อนการแปรรูป

มีงานวิจัยหลายชิ้นที่ศึกษาผลของระดับการแช่เยือกแข็งอย่างรวดเร็วและระยะเวลาในการแช่เยือกแข็งที่ส่งผลต่อคุณภาพของเนื้อสัตว์ โดยพบความสอดคล้องของผลวิจัยว่าระดับการแช่เยือกแข็งและระยะเวลาทำให้คุณภาพเนื้อสัตว์แย่ลงจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเนื้อและการเสียสภาพ (denature) ของโปรตีน มีรายงานวิจัยผลของระยะเวลาการแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ  $-18^{\circ}\text{C}$  เป็นระยะเวลา 3-18 เดือน พบว่าทำให้เกิดเปลี่ยนแปลงของโปรตีน โดยทำให้เนื้อหมูมีลักษณะนุ่มและมีความยืดหยุ่นลดลง ตรวจวัดได้จากการลดลงของค่าแรงเหวี่ยงเมื่อเก็บรักษาที่ระยะเวลานานขึ้น (Medic *et al.*, 2018) นอกจากนี้ยังพบการเกิดออกซิเดชันของไขมันที่ทำให้เกิดกลิ่นหืนในเนื้อแช่เยือกแข็ง และการสูญเสียน้ำจากการทำละลายน้ำแข็ง (thawing loss) เพิ่มขึ้น ความสามารถในการอุ้มน้ำลดลงร่วมด้วย

(Medic *et al.*, 2018; Choi *et al.*, 2018) ระดับอุณหภูมิในการแช่เยือกแข็งที่สูงเกินไปจะมีผลต่อการเร่งปฏิกิริยาการเกิดออกซิเดชันของไขมันและเกิดไฮโดรเปอร์ออกไซด์ ส่งผลให้เกิดกลิ่นและรสชาติไม่พึงประสงค์ในภายหลัง อุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดในการเก็บรักษาเนื้อสัตว์แช่แข็งจึงควรอยู่ที่ประมาณ  $-40^{\circ}\text{C}$  (Estévez, 2011) และหากนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์จะส่งผลให้ลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ที่ได้เปลี่ยนแปลงไปเช่นกัน

ไส้กรอกสำหรับงานวิจัยชิ้นนี้เป็นผลิตภัณฑ์เนื้อประเภทอิมัลชันที่ทำจากเนื้อ มันแข็ง น้ำ เครื่องเทศปรุงแต่งรส และกลิ่น และสารเคมีปรุงแต่ง ได้แก่ เกลือไนไตรท์ ฟอสเฟส แอสคอเบท และโปรตีนถั่วเหลือง โดยมีไมโอไฟบริลลาร์โปรตีนที่เป็นองค์ประกอบสำคัญในเนื้อสัตว์ที่ช่วยทำหน้าที่เป็นอิมัลซิไฟเออร์ เนื้อสัมผัสที่ดีของไส้กรอกเป็นผลมาจากความเสถียรในระบบอิมัลชันของส่วนผสมซึ่งสังเกตได้จากความสม่ำเสมอเรียบเนียน ความยืดหยุ่น เนื้อแน่นไม่ยุ่ย และไม่นิ่มเกินไป ไม่มีการแยกตัวของหยดน้ำมันออกจากไส้กรอก (Rattanapanone, 2014) ดังนั้น คุณภาพ ชนิด และปริมาณของอิมัลซิไฟเออร์ และส่วนผสมจึงส่งผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของไส้กรอก (Lonergan *et al.*, 2019) ไมโอไฟบริลลาร์โปรตีนในเนื้อที่ผ่านการแช่เยือกแข็งจะมีปริมาณน้อยลง (Hoogenkamp, 2011) ส่งผลต่อความสามารถในการเป็นอิมัลชัน เจลของส่วนผสมที่ได้มีความอ่อนแอและอุ้มน้ำได้น้อยลง (Smith, 1988) นอกจากนี้เนื้อสัตว์แล้วอิมัลซิไฟเออร์ที่มักนิยมใช้เพิ่มเติมในการแปรรูปคือโปรตีนจากแหล่งอื่น เช่น โปรตีนถั่วเหลือง โปรตีนนม เป็นต้น (Lukin, 2020)

การเพิ่มความคงตัวของอิมัลชันโดยการปรับทดแทนส่วนผสมเนื้อสัตว์ด้วยโปรตีนที่ช่วยทำให้เกิดการยึดเกาะกับไขมันและน้ำได้ดีขึ้นเป็นการปรับปรุง

คุณสมบัติของเนื้อสุกรที่เปลี่ยนแปลงไปหลังการแช่แข็งและลดต้นทุนการผลิตไปในการรวบรวมน้ำ เช่น Phonpannawit *et al.* (2021) ศึกษาปริมาณที่เหมาะสมของไขมัน คาร์ราจีแนน และโปรตีนสกัดจากถั่วเหลืองในผลิตภัณฑ์ไส้กรอกไก่ลดไขมัน โดยพบว่าปัจจัยทั้งสามมีผลต่อค่าความแข็ง ค่าการแตกหัก ค่าการยึดเกาะและปริมาณไขมันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และพบว่าภายหลังจากการพัฒนาผลิตภัณฑ์ ประกอบไปด้วย เนื้อไก่ 80% น้ำแข็ง 10% ไขมัน 5.6% คาร์ราจีแนน 1.7% และโปรตีนสกัดจากถั่วเหลือง 2.7% ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีปริมาณโปรตีน 14.4% ใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์ไส้กรอกลดไขมันที่จำหน่ายในท้องตลาด

มีการนำน้ำมันถั่วเหลืองและโปรตีนถั่วเหลืองมาใช้ส่วนผสมในไส้กรอกเนื้อแพะรมควัน (Cosenza *et al.*, 2003) โดยพบว่าปริมาณโปรตีนถั่วเหลืองที่ร้อยละ 3.5 และ ปริมาณน้ำมันถั่วเหลืองร้อยละ 4 ช่วยปรับปรุงเนื้อสัมผัสของไส้กรอก โดยไม่มีความแตกต่างของคะแนนการยอมรับทางประสาทสัมผัสของ กลิ่นรส และการยอมรับโดยรวมของกลุ่มตัวแทนผู้บริโภคเมื่อเทียบกับไส้กรอกหมูรมควัน (Cosenza *et al.*, 2003)

การใช้ไขมันพืชในรูปแบบของเหลวกับผลิตภัณฑ์ไส้กรอก มีผลทำให้ผลิตภัณฑ์มีเนื้อสัมผัส นุ่มและอาจมีผลต่อความคงตัวของอิมัลชัน (emulsion stability) รวมทั้งยังทำให้ความแน่นแข็งของเนื้อสัมผัสลดลง (Muguerza *et al.*, 2004) การใช้ไขมันพืชหรืออิมัลซิไฟเออร์ด้วยโปรตีนที่ไม่ใช่เนื้อสัตว์ (non meat protein) ร่วมกับน้ำ สามารถปรับปรุงความแน่นเนื้อ (firmness) ความสามารถในการอุ้มน้ำ (water holding capacity) (Muguerza *et al.*, 2002) และลดการสูญเสียไอน้ำระหว่างทำให้สุกของไส้กรอกได้ (López-López *et al.*, 2009)

งานวิจัยนี้จึงศึกษาผลของชนิดอิมัลซิไฟเออร์ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะเนื้อสัมผัสและความเป็นอิมัลชันของไส้กรอกที่ผลิตจากเนื้อสุกรที่ผ่านการเก็บรักษาด้วยการแช่เยือกแข็งอย่างรวดเร็วเป็นเวลา 3 เดือน มีเป้าหมายเพื่อประเมินและบ่งชี้ชนิดของอิมัลซิไฟเออร์ที่จะสามารถนำมาทดแทนเนื้อสุกรเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติไส้กรอกสดเซกคุณสมบัติความเป็นอิมัลชันและลักษณะเนื้อสัมผัสเนื้อสุกรที่สูญเสียไประหว่างการแช่เยือกแข็งได้โดยยังไม่ครอบคลุมถึงการทดสอบประสาทสัมผัส

## วิธีดำเนินการวิจัย

### 1. วัตถุประสงค์

ใช้เนื้อสุกรและส่วนมันที่ผ่านการเชือดไม่เกิน 24 ชั่วโมงจากบริษัท VPF จังหวัดเชียงใหม่ เลือกเนื้อส่วนสะโพก นำมาแบ่งเป็นชิ้นตัวอย่างหนักชิ้นละ 1 กิโลกรัม บรรจุในถุงซิปล็อคครีตาอากาศออกแล้วนำไปแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -40 องศาเซลเซียสในตู้แช่แข็ง BINDER Ultra Low temperature Freezers UFV เป็นระยะเวลา 3 เดือน ก่อนนำมาผลิตไส้กรอกเนื้อสุกรที่ผ่านการแช่เยือกแข็งจะถูกนำมาละลายน้ำแข็งโดยการทิ้งไว้ในตู้แช่เย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 ชั่วโมง อิมัลซิไฟเออร์ประกอบด้วยผงถั่วเหลืองจากบริษัทนิวทรีเมท สารสกัดโปรตีนถั่วเหลืองจากบริษัทกรุงเทพเคมี และผงไข่ขาวจาก TR Food and bakery สำหรับส่วนผสมเครื่องเทศ น้ำแข็ง และไส้คอลลาเจนใช้เกรดทางค้าทั่วไป

### 2. การผลิตไส้กรอก

นำเนื้อสุกรที่ผ่านการละลายน้ำแข็งมาบดเข้ากับมันสุกรและส่วนผสมทั้งหมดตามอัตราส่วนโดยน้ำหนักของศูนย์วิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์ สำนักงานปศุสัตว์เชียงใหม่โดยมีสัดส่วน (เนื้อสุกร:มันสุกร:น้ำแข็ง:เครื่องเทศ) ที่ (15:8:8:1) ผสมด้วยเครื่องสับผสมสำหรับทำไส้กรอกและลูกชิ้นจากบริษัท SCG

เริ่มจากนำเนื้อสุกรบดผสมกับเครื่องเทศแล้วเติมน้ำแข็งทีละน้อยจนกระทั่งได้ส่วนผสมที่เข้ากันดี มีลักษณะเนื้อเนียนและมันวาว บริเวณรอบถังบดผสมภายนอกใส่น้ำแข็งให้เต็มตลอดเวลาเพื่อช่วยลดอุณหภูมิระหว่างการบดและรักษาไม่ให้โปรตีนเสียสภาพ เมื่อได้ส่วนผสมแล้วจึงบรรจุลงในไส้คอลลาเจนเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 23 มิลลิเมตร ด้วยกระบอกรัดไส้กรอกมัดความยาวท่อนละ 5 นิ้ว ส่วนผสมไส้กรอกที่ผลิตจากเนื้อสุกรแช่เยือกแข็งจะมีการเติมอิมัลซิไฟเออร์ทดแทนเนื้อสุกร ประกอบไปด้วย ผงถั่วเหลือง 10% และ 20% สารสกัดโปรตีนถั่วเหลือง 10% และ 20% และ ผงไข่ขาว 10% และ 20% สำหรับส่วนผสมไส้กรอกจากเนื้อสุกรสดและส่วนผสมไส้กรอกจากเนื้อสุกรแช่เยือกแข็ง 3 เดือน จะไม่มีการเติมอิมัลซิไฟเออร์ สรุปส่วนผสมเป็น 8 รูปแบบ ดังนี้

รูปแบบที่ 1 ส่วนผสมจากเนื้อสุกรสด

รูปแบบที่ 2 ส่วนผสมจากเนื้อสุกรแช่เยือกแข็ง

รูปแบบที่ 3 ส่วนผสมจากเนื้อสุกรแช่เยือกแข็งและผงถั่วเหลือง 10%

รูปแบบที่ 4 ส่วนผสมจากเนื้อสุกรแช่เยือกแข็งและผงถั่วเหลือง 20%

รูปแบบที่ 5 ส่วนผสมจากเนื้อสุกรแช่เยือกแข็งและสารสกัดโปรตีนถั่วเหลือง 10%

รูปแบบที่ 6 ส่วนผสมจากเนื้อสุกรแช่เยือกแข็งและสารสกัดโปรตีนถั่วเหลือง 20%

รูปแบบที่ 7 ส่วนผสมจากเนื้อสุกรแช่เยือกแข็งและผงไข่ขาว 10%

รูปแบบที่ 8 ส่วนผสมจากเนื้อสุกรแช่เยือกแข็งและผงไข่ขาว 20%

ส่วนผสมไส้กรอกจะถูกแยกออกไปวัดค่าความคงตัวของอิมัลชัน ส่วนไส้กรอกที่บรรจุเรียบร้อยแล้วจะถูกนำไปต้มในอ่างน้ำร้อนที่อุณหภูมิเป็น  $75 \pm 1$  องศาเซลเซียสเป็นเวลา 20 นาที แล้วแช่

ในน้ำเย็นที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นจึงนำมาวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี

### 3. การวิเคราะห์คุณภาพของไส้กรอก

การวิเคราะห์คุณภาพของไส้กรอกจะเน้นเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีเป็นหลักโดยนำผลเพื่อบ่งชี้ว่าอิมัลชันไฟเออร์ชนิดใดส่งผลต่อการปรับปรุงเนื้อสัมผัสและความเป็นอิมัลชันโดยมีการวิเคราะห์ดังนี้

3.1 การวิเคราะห์ค่าสี ด้วยเครื่องวัดสี (colorimeter, ColorFlex EZ, Hunter Associates Laboratory, USA) โดยวัดค่าสีบนผิวของไส้กรอกหุ้มบริเวณทั้งสองด้าน ด้านละ 5 จุด ค่าสีที่วัดได้บันทึกเป็นค่า  $L^*$  (Lightness),  $a^*$  (Redness) และ  $b^*$  (Yellowness) (McGuire, 1992)

3.2 การวิเคราะห์เนื้อสัมผัสด้วยเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (Brookfield CT3 10K, USA) โดยใช้ตัวอย่างไส้กรอกที่ผ่านการต้มแล้วตัดให้มีความหนา 1 เซนติเมตร จำนวน 30 ตัวอย่าง กดด้วยหัววัดทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 1 เซนติเมตร ด้วยวิธี Double bite test ที่ความลึก 3 มิลลิเมตร (Texture Technologies, 2023)

3.3 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค (microstructure) โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscopy, SEM, model Prisma E, Thermo scientific, USA) โดยเตรียมตัวอย่างไส้กรอกหุ้มให้มีขนาดความหนา 0.5 เซนติเมตร นำไปทำแห้งในสถานะแช่เยือกแข็ง จากนั้นตัดตัวอย่างให้มีขนาด  $1 \times 1 \times 0.1$  เซนติเมตร นำไปวางบนแท่นอะลูมิเนียม ฉาบตัวอย่างด้วยทองคำหนา 250-300 นาโนเมตร นำตัวอย่างไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1,000 เท่า

3.4 การวัดความคงตัวของอิมัลชันจากส่วนผสมเนื้อไส้กรอก (ส่วนผสมดิบ) โดยวัดค่า Total Expressible Fluid (%TEF) โดยประยุกต์จากวิธีของ Chen *et al.* (2015) และ Hughes *et al.* (1997) โดยนำตัวอย่าง 3 กรัม ไปชั่งน้ำหนัก (weight of sample) นำไปปั่นเหวี่ยงที่ 60 g เป็นเวลา 3 นาที และนำหลอดไปต้มในอ่างน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที คั่วหลอดลงบนกระดาษซับของเหลวแล้วนำกระดาษที่มีของเหลวอยู่ไปชั่งน้ำหนัก (weight of towel paper and fluid release) นำกระดาษที่ชั่งแล้วไปเข้าอบในตู้อบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง นำกระดาษที่อบแห้งแล้วออกมาชั่งน้ำหนักอีกครั้ง (weight of heating exudate) จากนั้นคำนวณผลค่าปริมาณของเหลวทั้งหมดที่ปลดปล่อยออก (total fluid release, %TFR) ปริมาณน้ำที่ปลดปล่อยออก (water release, %WR) และปริมาณไขมันที่ปลดปล่อยออกมา (fat release, %FR) ตามสมการ

$$\%TFR = \frac{w_{tf} - w_t}{w_s} \times 100$$

$$\%WR = \frac{w_{ht} - w_t}{w_s} \times 100$$

$$\%FR = TFR - WR$$

เมื่อ  $w_{tf}$  คือ น้ำหนักของกระดาษที่ซับของเหลว  
 $w_t$  คือ น้ำหนักของกระดาษ  
 $w_{ht}$  คือ น้ำหนักของกระดาษที่ผ่านการอบ  
 $w_s$  คือ น้ำหนักของตัวอย่าง

3.5 วิเคราะห์ปริมาณโปรตีนและไขมัน การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนด้วยเครื่อง Dumas combustion (5E-TCN2200, CKIC, China) (Etheridge *et al.*, 1998) โดยใช้ตัวอย่างไส้กรอกหุ้มจำนวน 250 มิลลิกรัม นำไปเผาที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ส่วน

การวิเคราะห์ปริมาณไขมันด้วยเทคนิคการสกัดแบบซอกซ์ເລດ (Soxhlet extraction) (AOAC, 2000) โดยใช้ตัวอย่างไส้กรอกหมูจำนวน 3 กรัม ทั้งสองการทดลองทำการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ

3.6 การวัดการสูญเสียน้ำหนักขณะทำให้สุกประยุกต์จากวิธีการของ Honikel (1998) โดยนำไส้กรอกดิบก่อนต้มไปชั่งน้ำหนักเริ่มต้น แล้วนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำตัวอย่างมาทำให้เย็นที่อุณหภูมิห้องที่ 21 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ภายหลังจากตัวอย่างเย็นลงนำตัวอย่างไปชั่งน้ำให้แห้งแล้วชั่งน้ำหนัก คำนวณการสูญเสียน้ำหนักขณะทำให้สุก (%cooking loss) ดังสมการ

$$\%Cooking\ loss = \frac{W_r - W_c}{W_r} \times 100$$

เมื่อ  $w_r$  คือ น้ำหนักของส่วนผสมดิบ

$w_c$  คือ น้ำหนักของส่วนผสมสุก

3.7 วิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ด้วยวิธีของ Summo *et al.* (2006) โดยนำไส้กรอกหมูที่สุกแล้วประมาณ 5 กรัม บ่นรวมกับน้ำกลั่น 25 มิลลิลิตร แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง pH meter (PHTESTR30, EUTECH, Singapore) โดยทำการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ

3.8 วิเคราะห์ปริมาณความชื้น (AOAC, 2000) โดยนำไส้กรอกหมูที่สุกแล้วประมาณ 5 กรัม ใส่ในจานอลูมิเนียมที่ทราบน้ำหนักที่แน่นอน จากนั้นนำไปอบแห้งในตู้อบลมร้อน (UF450, Memmert, Germany) ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 24 ชั่วโมงจนกระทั่งได้น้ำหนักที่คงที่ คำนวณหาร้อยละของความชื้นมาตรฐานเปียก (%MC<sub>wb</sub>) โดยทำการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ

#### 4. การวิเคราะห์ทางสถิติ

วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design; CRD) เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยในแต่ละรูปแบบที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยใช้ Tukey HSD วิเคราะห์ด้วยโปรแกรมทางสถิติ SPSS จำนวนการทดลองไม่น้อยกว่า 3 ซ้ำ

#### ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

##### 1. การเปลี่ยนแปลงค่าสี

จากผลการวัดค่าความสว่าง (L\*) ค่าสีแดง (a\*) และค่าความเป็นสีเหลืองหรือสีน้ำเงิน (b\*) ของไส้กรอกหมูด้วยเครื่องวัดค่าสี แสดงผลดังตารางที่ 1 พบว่าค่าสี L\*, a\* และ b\* ของไส้กรอกทั้ง 8 รูปแบบมีค่าสีที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05) เมื่อเปรียบเทียบเฉพาะไส้กรอกที่ผลิตจากเนื้อสุกรที่เก็บรักษาไว้ในช่องแช่เยือกแข็งเป็นเวลา 3 เดือนกับไส้กรอกที่ผลิตจากเนื้อสุกรสดแล้วพบว่าไส้กรอกมีค่าความสว่างลดลงและมีโทนสีแดงเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยพบรายงานผลที่สอดคล้องกันว่าเป็นการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ การเปลี่ยนแปลงความสว่างและโทนสีแดงเกิดจากโครงสร้างกล้ามเนื้อที่เปลี่ยนแปลงและการเสียสภาพของไมโอโกลบิน หลังจากการแช่เยือกแข็ง (Wang *et al.*, 2023; Yang *et al.*, 2022) การเติมอิมัลซิไฟเออร์ในไส้กรอกที่ผลิตจากเนื้อสุกรแช่เยือกแข็งเป็นเวลา 3 เดือน พบว่า ค่าสี L\* ของไส้กรอกมีค่าอยู่ในช่วง 46.86-51.12 ค่าสี a\* อยู่ในช่วง 2.54-4.96 และค่าสี b\* อยู่ในช่วง 9.20-16.93 ค่าทั้งหมดแสดงถึงสีของผลิตภัณฑ์ไส้กรอกที่มีความสว่างในระดับกลางและมีโทนไปในทางสีแดงและสีเหลืองเพียงเล็กน้อย การเพิ่มอิมัลซิไฟเออร์ชนิดต่าง ๆ ส่งผลต่อการปรับปรุงค่าโทนสีของไส้กรอกที่ผลิตจากเนื้อสุกรแช่เยือกแข็งแตกต่างกันไปตามชนิดและปริมาณอิมัลซิไฟเออร์ ซึ่งค่า L\* หรือ

ความสว่างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเติมสารสกัดโปรตีนถั่วเหลืองและผงไข่ขาวในขณะที่การเติมผงถั่วเหลืองทำให้ความสว่างของไส้กรอกลดลง ค่า  $a^*$  มีแนวโน้มทางบวกหรือเป็นสีแดงเพิ่มขึ้นเมื่อเติมผงถั่วเหลืองแต่จะลดลงตามการเติมสารสกัดโปรตีนถั่วเหลืองและไข่ขาว สำหรับค่า  $b^*$  มีการเพิ่มขึ้นในโทนสีเหลืองอย่างชัดเจนเมื่อเติมผงถั่วเหลืองในขณะที่สารสกัดถั่วเหลืองส่งผลต่อเพิ่มสีเหลืองที่น้อยกว่าส่วนไข่ขาวมีผลต่อการลดค่า  $b^*$  จากผลการทดลองและผลวิเคราะห์ค่าความแตกต่างของสีรวม ( $\Delta E$ ) ชี้แนะว่าค่าสีของไส้กรอกที่ผลิตจากหมูแช่เยือกแข็งเป็นระยะเวลา 3 เดือนสามารถปรับปรุงให้ใกล้เคียงกับไส้กรอกหมูสดมากที่สุดเมื่อใช้อิมัลซิไฟเออร์ใน

รูปแบบ 6 และ 7 หรือสารสกัดโปรตีนถั่วเหลือง 20% และ ผงไข่ขาว 10% ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม การปรับปรุงค่าสีอาจมีผลที่แตกต่างไปตามสีดั้งเดิมของวัตถุดิบและชนิดอิมัลซิไฟเออร์ดังอธิบายในผลงานวิจัยของ Akesowan (2008) ที่ได้ศึกษาผลของการเติมสารสกัดโปรตีนถั่วเหลืองต่อคุณภาพของไส้กรอก โดยเติมสารสกัดโปรตีนถั่วเหลือง 1.5% และ 2% พบว่าสารสกัดถั่วเหลืองมีผลต่อการลดลงของค่า  $a^*$  (3.98-3.01) และการเพิ่มขึ้นของค่า  $b^*$  (5.94-6.83) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P \leq 0.05$ ) เป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงสีของเนื้อสุกร (สีแดง) ถูกแทนที่ด้วยสารสกัดโปรตีนถั่วเหลือง (สีครีม) (Akesowan, 2008)

**Table 1** Changes in color values ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ) of pork sausage made of different pork meat

Treatment	$L^*$	$a^*$	$b^*$	$\Delta E$
1. Fresh pork	53.64±1.05 <sup>A</sup>	3.16±0.10 <sup>C</sup>	10.41±0.09 <sup>CD</sup>	-
2. 3-moth-storage frozen pork	49.93±0.89 <sup>BC</sup>	3.59±0.09 <sup>BC</sup>	10.39±0.27 <sup>CD</sup>	3.73
3. Frozen pork+10% soy protein powder	49.08±0.35 <sup>BC</sup>	3.74±0.38 <sup>B</sup>	12.25±0.41 <sup>B</sup>	4.95
4. Frozen pork+20% soy protein powder	46.86±1.47 <sup>C</sup>	4.96±0.45 <sup>A</sup>	16.98±1.78 <sup>A</sup>	9.61
5. Frozen pork+10% isolated soy protein	48.70±0.79 <sup>BC</sup>	3.48±0.11 <sup>BC</sup>	11.78±0.13 <sup>BC</sup>	5.13
6. Frozen pork+20% isolated soy protein	50.87±1.14 <sup>AB</sup>	3.21±0.04 <sup>C</sup>	10.34±0.13 <sup>CD</sup>	2.77
7. Frozen pork+10% egg white powder	51.12±1.79 <sup>AB</sup>	3.22±0.16 <sup>BC</sup>	10.00±0.24 <sup>D</sup>	2.55
8. Frozen pork+20% egg white powder	46.97±2.71 <sup>C</sup>	2.54±0.15 <sup>D</sup>	9.20±0.37 <sup>D</sup>	6.81

Data are expressed as mean values  $\pm$ SD. Values with different superscripts in the same column differ significantly at  $P \leq 0.05$ .

## 2. ลักษณะเนื้อสัมผัส

ผลการทดสอบคุณลักษณะเนื้อสัมผัสของของไส้กรอกหมูทั้ง 8 รูปแบบ แสดงดังตารางที่ 2 พบว่าเมื่อเปรียบเทียบกับไส้กรอกที่ผลิตจากหมูสดแล้วไส้กรอกที่ผลิตจากหมูแช่เยือกแข็งมีค่าความแข็ง (hardness) และดัชนีความต้านทานต่อการบดเคี้ยว (chewiness index) ลดลง เป็นผลมาจากน้ำแข็งที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการแช่เยือกแข็งทำลายเซลล์

กล้ามเนื้อของเนื้อสุกรทำให้เนื้อนุ่มขึ้น (Teuteberg *et al.*, 2021) ส่งผลให้ไส้กรอกเนื้อสุกรแช่แข็งมีลักษณะนุ่มขึ้นเช่นกันแต่ค่าความยึดเกาะ (cohesiveness) และดัชนีความยืดหยุ่น (springiness index) ยังไม่มีการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน ไส้กรอกยังมีความเหนียวและความสามารถในการคืนตัวอันเป็นผลมาจากน้ำและไขมันที่เพิ่มเติมในส่วนผสมไส้กรอกซึ่งช่วยรักษาคุณสมบัติทั้งสองไว้ได้ เมื่อพิจารณาผลของการ

ปรับปรุงคุณลักษณะเนื้อสัมผัสด้วยอิมัลซิไฟเออร์ทั้ง 3 ชนิดด้วยการแทนที่เนื้อสุกรแช่เยือกแข็ง 10-20% พบว่า อิมัลซิไฟเออร์ทุกชนิดมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความแข็ง ค่าความยืดเกาะ และดัชนีความต้านทานต่อการบดเคี้ยวของไส้กรอกตามชนิดของอิมัลซิไฟเออร์ โดยการเติมผงไข่ขาวส่งผลให้ไส้กรอกมีความแข็งมากกว่าการใช้อิมัลซิไฟเออร์ชนิดอื่น การใช้ผงไข่ขาว 10% ขึ้นไปในส่วนผสมทำให้ไส้กรอกมีเนื้อสัมผัสที่แข็งกว่าไส้กรอกเนื้อสุกรสดเกือบ 3 เท่าและเพิ่มดัชนีความต้านทานต่อการบดเคี้ยว แสดงถึงอาหารมีความแน่นแข็งต้องใช้แรงมากขึ้นในการบดเคี้ยวอาหารให้แตกออกจากกันเป็นชิ้นเล็ก แต่ใน

ขณะเดียวกันผงไข่ขาวกลับทำให้ค่าความยืดเกาะลดลงซึ่งบ่งบอกถึงไส้กรอกมีการเกาะติดกันน้อยหรือรู้สึกถึงความร่วนระหว่างการเคี้ยว การเติมผงถั่วเหลือง 10% มีผลต่อการปรับปรุงความแข็งและดัชนีความต้านทานในการบดเคี้ยวแต่หากใช้มากเกินไปกว่า 10% ไส้กรอกจะมีเนื้อสัมผัสโดยรวมที่แย่งส่วนสารสกัดโปรตีนจากถั่วเหลืองมีผลในการปรับปรุงความแข็งและความต้านทานในการบดเคี้ยวเมื่อใช้ 10% แต่หากใช้มากถึง 20% จะส่งผลลบต่อค่าความยืดเกาะเช่นเดียวกับการใช้ไข่ขาว ผลการวิเคราะห์หลักคุณลักษณะเนื้อสัมผัสนี้จะนำไปอธิบายร่วมกับภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของไส้กรอกดังภาพที่ 1

**Table 2** Changes in texture properties of pork sausage made of different pork meat

Treatment	Texture properties			
	Hardness (N)	Cohesiveness	Springiness Index	Chewiness Index
1. Fresh pork	3.79±0.38 <sup>CD</sup>	0.72±0.02 <sup>CD</sup>	0.80±0.03 <sup>BC</sup>	2.19±0.29 <sup>CD</sup>
2. 3-month-storage frozen pork	2.91±0.70 <sup>CD</sup>	0.76±0.02 <sup>AB</sup>	0.81±0.04 <sup>B</sup>	1.79±0.47 <sup>CD</sup>
3. Frozen pork+10% soy protein powder	3.09±1.13 <sup>CD</sup>	0.74±0.03 <sup>BC</sup>	0.78±0.07 <sup>C</sup>	1.84±0.79 <sup>CD</sup>
4. Frozen pork+20% soy protein powder	1.33±0.14 <sup>D</sup>	0.70±0.03 <sup>D</sup>	0.72±0.05 <sup>D</sup>	0.68±0.11 <sup>D</sup>
5. Frozen pork+10% isolated soy protein	1.88±0.26 <sup>D</sup>	0.78±0.02 <sup>A</sup>	0.83±0.03 <sup>AB</sup>	1.22±0.19 <sup>CD</sup>
6. Frozen pork+20% isolated soy protein	5.08±0.60 <sup>C</sup>	0.57±0.03 <sup>F</sup>	0.82±0.03 <sup>AB</sup>	2.36±0.35 <sup>C</sup>
7. Frozen pork+10% egg white powder	10.52±1.05 <sup>B</sup>	0.56±0.05 <sup>F</sup>	0.81±0.03 <sup>B</sup>	4.82±0.72 <sup>B</sup>
8. Frozen pork+20% egg white powder	33.94±5.99 <sup>A</sup>	0.65±0.04 <sup>E</sup>	0.85±0.04 <sup>A</sup>	18.78±2.98 <sup>A</sup>

Data are expressed as mean values ±SD. Values with different superscripts in the same column differ significantly at  $P \leq 0.05$ .

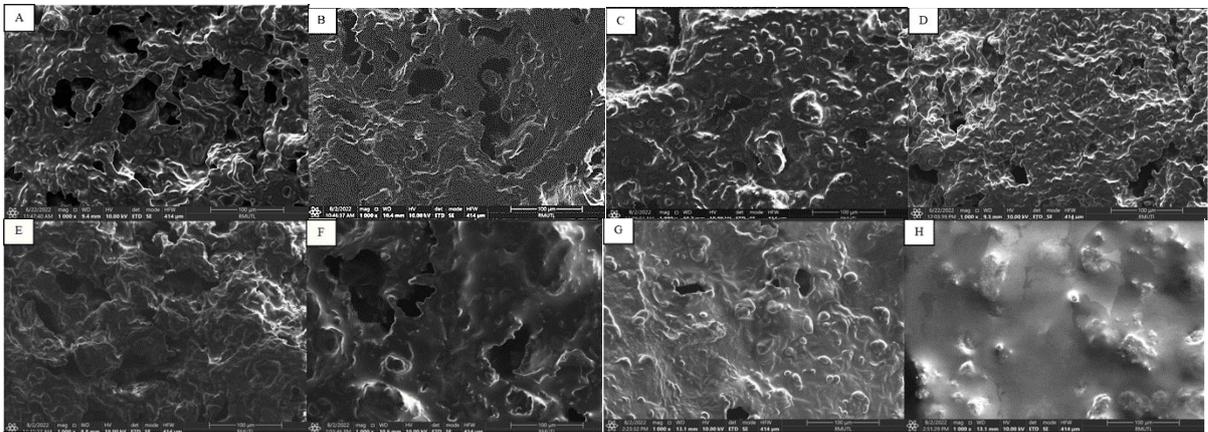
### 3. โครงสร้างจุลภาค

จากภาพถ่ายจุลภาคของเนื้อไส้กรอกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (SEM) กำลังขยาย 1000 เท่า (ภาพที่ 1) พบว่าไส้กรอกที่ผลิตจากเนื้อสุกรสด (1A) มีลักษณะเนื้อที่มีการเกาะตัวกันของส่วนผสมร่วมกับโครงขนาดใหญ่กระจายอยู่ทั่วไป ส่วนไส้กรอกที่ผลิตจากเนื้อสุกรแช่เยือกแข็ง

เป็นเวลา 3 เดือน (1B) พบลักษณะเนื้อที่มีโครงขนาดเล็กและมีจำนวนโครงน้อยลงแสดงถึงความแน่นเนื้อที่เพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับค่าความแข็งและดัชนีความต้านทานต่อการบดเคี้ยวที่สูงขึ้น การเพิ่มปริมาณอิมัลชันในส่วนผสมทำให้ลักษณะเนื้อไส้กรอกมีความละเอียดเรียบเนียนมากยิ่งขึ้น โดยที่ขนาดและปริมาณโครงอากาศน้อยลงเมื่อเติมผง

ถั่วเหลืองและผงไข่ขาวในปริมาณที่มากขึ้น (1C, 1D, 1G และ 1H) โดยเฉพาะไส้กรอกที่มีการเติมผงไข่ขาว 20% (1H) มีความเรียบเนียนมากที่สุดและไม่พบโพรงอากาศ และพบความสอดคล้องกับผลค่าความแข็งและดัชนีความต้านทานต่อการบดเคี้ยว ในกรณีของสารสกัดโปรตีนถั่วเหลืองลักษณะเนื้อไส้กรอกที่ได้คล้ายคลึงกับเนื้อสุกรแช่เยือกแข็ง (1B) เมื่อเติมที่ 10% แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเป็น 20% ลักษณะเนื้อไส้กรอกจะมีความเรียบเนียนมากขึ้นและมีโพรงขนาดใหญ่กระจายเป็นปริมาณน้อยลง ชนิดและ

ปริมาณอิมัลซิไฟเออร์ที่ใช้ นอกจากส่งผลต่อค่าคุณสมบัติเนื้อสัมผัสแล้วยังส่งผลต่อลักษณะเนื้อที่ปรากฏเช่นกัน การเพิ่มปริมาณอิมัลซิไฟเออร์มากเกินไปทำให้ลักษณะเนื้อแตกต่างไปจากเนื้อไส้กรอกหมูสดมากขึ้นและอาจส่งผลต่อรสชาติและกลิ่นของไส้กรอกในขณะที่รับประทาน มีการรายงานว่า การเติมโปรตีนถั่วเหลืองมากเกินไปจะทำให้ไส้กรอกแห้งแข็ง หรือเหนียวหนืด รวมถึงมีกลิ่นรสที่เฉพาะ และอาจทำให้เกิดกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์ (Suwonsichon, 2007)



**Figure 1** Microstructure of prok sausages at 1000x magnification; A: Fresh pork, B: 3-month-storage frozen pork and C-H: 3-month-storage frozen pork with 10% soy protein powder, 20% soy protein powder, 10% isolated soy protein, 20% isolated soy protein, 10% egg white powder and 20% egg white powder, respectively

#### 4. คุณสมบัติทางด้านความคงตัวของอิมัลชันและการสูญเสียน้ำหนักขณะทำให้สุก

จากการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางด้านความคงตัวของอิมัลชันและการสูญเสียน้ำหนักของไส้กรอกที่เตรียมจากเนื้อสุกรสด กับไส้กรอกที่เตรียมจากเนื้อสุกรแช่เยือกแข็ง 3 เดือน และไส้กรอกที่เตรียมจากเนื้อสุกรแช่เยือกแข็งและมีการเติมสารต่าง ๆ ลงในส่วนผสม ดังแสดงในตารางที่ 3 พบว่าการสูญเสียน้ำหนักขณะทำให้สุก (%Cooking loss) ของไส้กรอกทั้ง 8 รูปแบบ มีค่าอยู่ในช่วง 0.12-1.28% ซึ่ง

ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ( $P>0.05$ ) สำหรับคุณสมบัติทางด้านความคงตัวของอิมัลชันของไส้กรอกทั้ง 8 รูปแบบ มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P\leq 0.05$ ) พบว่า ไส้กรอกที่เตรียมจากหมูแช่เยือกแข็ง 3 เดือน (รูปแบบที่ 2) มีค่าปริมาณของเหลวทั้งหมดที่ปลดปล่อยออก (%TFR) เท่ากับ 10.78% ค่าปริมาณน้ำที่ปลดปล่อยออก (%WR) เท่ากับ 0.62% และค่าปริมาณไขมันที่ปลดปล่อยออก (%FR) เท่ากับ 10.15% สังเกตได้ว่าการทดแทนด้วยผงถั่วเหลือง 10% (รูปแบบที่ 3) และ

สารสกัดโปรตีนถั่วเหลือง 10 และ 20% ไม่สามารถปรับปรุงค่าความคงตัวของอิมัลชันได้ซึ่งเกิดจากปริมาณที่ใช้อย่างไม่เหมาะสม ส่วนการทดแทนด้วยผงถั่วเหลือง 20% (รูปแบบที่ 4) มีผลทำให้ค่าความคงตัวของอิมัลชันที่ดีขึ้นคือมีปริมาณของเหลวทั้งหมดที่ปลดปล่อยออก (%TFR) ลดลง เท่ากับ 3.92% และค่าปริมาณไขมันที่ปลดปล่อยออก (%FR) ลดลงเท่ากับ 3.00% และการทดแทนด้วยผงไข่ขาว 10 และ 20% (รูปแบบที่ 7 และ 8) มีผลทำให้ค่าปริมาณของเหลวทั้งหมดที่ปลดปล่อยออก (%TFR) ลดลง เท่ากับ 4.59 และ 0.4% ตามลำดับ และค่าปริมาณไขมันที่ปลดปล่อยออก (%FR) ลดลงเท่ากับ 3.88 และ 0.22% ตามลำดับ สอดคล้องรายงานของ Phonpanawit *et*

*al.* (2021) ที่ทำการศึกษาปริมาณที่เหมาะสมของคาร์ราจีแนน และโปรตีนสกัดจากถั่วเหลือง ที่เติมลงในผลิตภัณฑ์ไส้กรอกไก่ลดไขมัน ซึ่งพบว่า การเติมคาร์ราจีแนน 1.7% และโปรตีนสกัดจากถั่วเหลือง 2.7% มีผลต่อการเพิ่มการยึดเกาะของผลิตภัณฑ์ไส้กรอกลดไขมัน การสารประเภทโปรตีนลงในส่วนผสมของผลิตภัณฑ์ไส้กรอก สารประเภทโปรตีนกลุ่มนี้จะช่วยทำหน้าที่เป็นอิมัลซิไฟเออร์ (emulsifier) ช่วยให้ส่วนของไขมันกระจายตัวในส่วนผสมที่เหลือโดยไม่แยกชั้นไขมันออกมา และยังมีผลทำให้ผลิตภัณฑ์ไส้กรอกมีความคงตัวมากขึ้น และมีเนื้อสัมผัสที่แน่นขึ้นด้วย (Lecomte *et al.*, 1993)

**Table 3** Emulsion stability and cooking loss percentage of pork sausage made of different pork meat

Treatment	Emulsion stability			%Cooking loss <sup>ns</sup>
	%TFR	%WR	%FR	
1. Fresh pork	11.41±0.49 <sup>B</sup>	1.95±0.21 <sup>B</sup>	9.46±0.68 <sup>C</sup>	0.12±0.08
2. 3-month-storage frozen pork	10.78±0.91 <sup>B</sup>	0.62±0.35 <sup>BC</sup>	10.15±0.58 <sup>C</sup>	0.76±0.08
3. Frozen pork+10% soy protein powder	12.59±1.08 <sup>B</sup>	3.89±0.90 <sup>A</sup>	8.70±0.19 <sup>C</sup>	0.68±0.59
4. Frozen pork+20% soy protein powder	3.92±0.41 <sup>C</sup>	0.92±0.18 <sup>BC</sup>	3.00±0.46 <sup>D</sup>	0.65±0.39
5. Frozen pork+10% isolated soy protein	17.27±2.62 <sup>A</sup>	3.91±0.87 <sup>A</sup>	13.36±1.76 <sup>B</sup>	0.59±0.27
6. Frozen pork+20% isolated soy protein	17.97±0.57 <sup>A</sup>	1.79±0.40 <sup>B</sup>	16.18±0.30 <sup>A</sup>	1.17±0.14
7. Frozen pork+10% egg white powder	4.59±1.18 <sup>C</sup>	0.71±0.53 <sup>BC</sup>	3.88±0.65 <sup>D</sup>	1.28±0.49
8. Frozen pork+20% egg white powder	0.40±0.15 <sup>D</sup>	0.17±0.11 <sup>C</sup>	0.22±0.08 <sup>E</sup>	0.89±0.08

Data are expressed as mean values ±SD. Values with different superscripts in the same column differ significantly at  $P \leq 0.05$ .

## 5. ปริมาณโปรตีนและไขมัน

การวิเคราะห์โปรตีนของไส้กรอกทั้ง 8 รูปแบบ พบว่า ปริมาณโปรตีนของไส้กรอกอยู่ระหว่าง 13.35-21.35% และมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P \leq 0.05$ ) (ตารางที่ 4) เมื่อเปรียบเทียบปริมาณโปรตีนของไส้กรอกที่เตรียมจากเนื้อสุกรสด (รูปแบบที่ 1) และไส้กรอกที่เตรียมจาก

เนื้อสุกรแช่เยือกแข็ง 3 เดือน (รูปแบบที่ 2) จะเห็นว่า มีปริมาณโปรตีนลดลงเพียงเล็กน้อยจาก 16.30% เหลือ 15.75% ตามลำดับซึ่งจากการวิเคราะห์ทางสถิติแล้วไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนการทดแทนเนื้อสุกรแช่เยือกแข็งด้วยผงถั่วเหลือง สารสกัดถั่วเหลือง และผงไข่ขาว ลงในไส้กรอก มีผลทำให้ปริมาณโปรตีนลดลงบ้างแต่ไม่มีการเปลี่ยนแปลง

อย่างมีนัยสำคัญเช่นกัน ยกเว้นกรณี การทดแทนด้วยผงถั่วเหลือง 20% และผงไข่ขาว 20% ทำให้ได้ไส้กรอกที่มีปริมาณโปรตีนมากขึ้นคือ 17.10% และ 21.35% ตามลำดับ และสำหรับปริมาณไขมันของไส้กรอก พบว่า ไส้กรอกที่เตรียมจากเนื้อสุกรสด (รูปแบบที่ 1) และไส้กรอกที่เตรียมจากเนื้อสุกรแช่เยือกแข็ง 3 เดือน (รูปแบบที่ 2) มีปริมาณไขมันลดลงจาก 20.13% เหลือ 13.02% ตามลำดับ ปริมาณไขมันที่ลดลงอย่างต่อเนื่องในเนื้อสุกรแช่เยือกแข็งเกิดจากการสลายของลิพิดในเนื้อสัตว์ ซึ่งเกิดขึ้นโดยเอนไซม์ลิเพสและฟอสโฟลิพิดของเนื้อสัตว์ (Hussein *et al.*, 2020) การเติมผงถั่วเหลือง สารสกัดถั่วเหลือง และผงไข่ขาว ทำให้ปริมาณโปรตีนในไส้กรอกมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากสารดังกล่าวจัดเป็นสารประเภทโปรตีน (Phonpannawit *et al.*, 2021)

#### 6. ค่าความเป็นกรด-ด่าง

ค่าความเป็นกรด-ด่างของไส้กรอกทั้ง 8 รูปแบบ มีค่าอยู่ระหว่าง 5.67-6.65 โดยมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P \leq 0.05$ ) ดังแสดงใน

ตารางที่ 4 ค่าความเป็นกรด-ด่างของไส้กรอกที่เตรียมจากเนื้อสุกรแช่เยือกแข็งมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับไส้กรอกที่ผลิตจากเนื้อสุกรสด โดยค่าความเป็นกรด-ด่างของไส้กรอกที่เตรียมจากเนื้อสุกรสด (รูปแบบที่ 1) และไส้กรอกที่เตรียมจากเนื้อสุกรแช่เยือกแข็งเป็นระยะเวลา 3 เดือน (รูปแบบที่ 2) มีค่าเท่ากับ 6.65 และ 5.72 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Wei *et al.* (2017) ที่รายงานว่าระยะเวลาการแช่เยือกแข็งมีผลต่อค่าความเป็นกรด-ด่างของเนื้ออกไก่ โดยพบว่า ค่าความเป็นกรด-ด่างของเนื้อไก่สดเท่ากับ 6.09 และเมื่อผ่านการแช่เยือกแข็งเป็นเวลา 1 เดือน ค่าความเป็นกรด-ด่างลดลงเหลือ 5.96 และมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องตลอดการแช่เยือกแข็ง โดยการแช่เยือกแข็งมักทำให้เกิดการสูญเสียของเหลว (drip loss) ที่ทำให้สูญเสียน้ำของเนื้อสัตว์แช่เยือกแข็ง การที่เนื้อสัตว์สูญเสียน้ำและของแข็งที่ละลายในน้ำนั้น เป็นสาเหตุให้ความเข้มข้นของตัวทำละลายเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความเป็นกรด-ด่างในเนื้อสัตว์แช่เยือกแข็งลดลง (Wei *et al.*, 2017)

**Table 4** Chemical properties of pork sausage made of different pork meat

Treatment	pH	%Moisture content	%Protein content	%Fat content
1. Fresh pork	6.65±0.02 <sup>A</sup>	60.46±0.18 <sup>A</sup>	16.30±0.14 <sup>B</sup>	20.13±0.43 <sup>A</sup>
2. 3-month-storage frozen pork	5.72±0.01 <sup>E</sup>	57.05±0.35 <sup>D</sup>	15.75±0.07 <sup>B</sup>	13.02±0.42 <sup>CD</sup>
3. Frozen pork+10% soy protein powder	5.67±0.02 <sup>E</sup>	57.59±1.07 <sup>CD</sup>	16.65±0.07 <sup>B</sup>	15.33±0.08 <sup>B</sup>
4. Frozen pork+20% soy protein powder	6.58±0.03 <sup>A</sup>	58.31±0.54 <sup>C</sup>	17.10±3.11 <sup>AB</sup>	11.25±0.90 <sup>D</sup>
5. Frozen pork+10% isolated soy protein	6.39±0.01 <sup>B</sup>	59.30±1.02 <sup>AB</sup>	14.95±0.07 <sup>B</sup>	14.05±0.40 <sup>BC</sup>
6. Frozen pork+20% isolated soy protein	5.90±0.01 <sup>D</sup>	59.76±0.65 <sup>A</sup>	14.35±0.07 <sup>B</sup>	19.78±0.11 <sup>A</sup>
7. Frozen pork+10% egg white powder	6.21±0.02 <sup>C</sup>	57.80±0.77 <sup>CD</sup>	13.35±0.05 <sup>B</sup>	21.78±0.59 <sup>A</sup>
8. Frozen pork+20% egg white powder	6.32±0.02 <sup>B</sup>	57.16±0.59 <sup>CD</sup>	21.35±0.05 <sup>A</sup>	15.34±0.57 <sup>B</sup>

Data are expressed as mean values±SD. Values with different superscripts in the same column differ significantly at  $P \leq 0.05$ .

## 7. ปริมาณความชื้น

ปริมาณความชื้นของไส้กรอกทั้ง 8 รูปแบบ มีค่าอยู่ระหว่าง 57.05-60.46% โดยมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P \leq 0.05$ ) ดังแสดงในตารางที่ 4 จากการทดลองพบว่า การเติมสารสกัดถั่วเหลือง 10 และ 20% ลงในส่วนผสมของไส้กรอกที่เตรียมจากเนื้อสุกรแช่แข็งเป็นระยะเวลา 3 เดือน (รูปแบบที่ 5-6) มีผลทำให้ไส้กรอกที่ได้มีค่าความชื้นเพิ่มขึ้นโดยมีค่าเท่ากับ 59.30% และ 59.76% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับไส้กรอกที่เตรียมจากเนื้อสุกรแช่แข็งเป็นระยะเวลา 3 เดือน (รูปแบบที่ 2) ที่มีค่าปริมาณความชื้นเท่ากับ 57.05% ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Lecomte *et al.* (1993) ที่ได้ทำการศึกษาผลของการเติมอิมัลชันไฟเออร์ลงในส่วนผสมของไส้กรอกฟริงเฟอไรเตอร์ โดยมีการสาร 3 ชนิด ได้แก่ โปรตีน แป้งถั่วเหลือง โปรตีนถั่วเหลืองเข้มข้น และโปรตีนสกัดจากถั่วเหลือง พบว่า การเติมโปรตีนถั่วเหลืองทำให้ไส้กรอกฟริงเฟอไรเตอร์ที่ได้ มีความชื้นเพิ่มขึ้นและการค่าความสามารถในการอุ้มน้ำเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมอิมัลชันไฟเออร์ดังกล่าว (Lecomte *et al.*, 1993) เมื่อเปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพของสารทั้ง 3 ชนิดที่ใช้ในการเติม ได้แก่ ผงถั่วเหลือง สารสกัดถั่วเหลือง และผงไข่ขาว ซึ่งมีสารสกัดถั่วเหลืองชนิดเดียวที่เป็นของเหลว ในขณะที่ผงถั่วเหลืองและผงไข่ขาวเป็นของแข็ง จึงมีผลทำให้ความชื้นของไส้กรอกที่เติมด้วยสารสกัดถั่วเหลืองมีปริมาณความชื้นมากกว่าสารประเภทโปรตีนทำหน้าที่เป็นตัวดูดซับน้ำ โดยจะเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของน้ำทำให้น้ำถูกจับไว้ในโมเลกุลของโปรตีน มีความสามารถในการอุ้มน้ำได้ดี (Phonpannawit *et al.*, 2021)

## สรุป

จากการศึกษาผลของการเติมอิมัลชันไฟเออร์เพื่อทดแทนเนื้อสุกรแช่แข็งในไส้กรอก พบว่าค่าสี  $L^*$ ,  $a^*$  และ  $b^*$  อยู่ในช่วง 46.86-51.12, 2.54-4.96 และ 9.20-16.98 ตามลำดับ ( $p < 0.05$ ) ปริมาณและชนิดของอิมัลชันไฟเออร์มีผลต่อค่าสีของไส้กรอกหมู ไส้กรอกที่มีการเติมผงถั่วเหลือง 20% มีค่าสี  $a^*$  หรือค่าสีแดง และค่าสี  $b^*$  หรือค่าความเป็นสีเหลืองมากที่สุด เนื้อสัมผัสของไส้กรอกที่ใช้ผงไข่ขาว 20% มีความแข็ง และค่าความต้านทานต่อการบดเคี้ยวที่สูงที่สุดโดยมีลักษณะเนื้อสัมผัสแข็งและแน่นกว่าอิมัลชันไฟเออร์ชนิดอื่นสอดคล้องกับภาพถ่ายจุลภาคเมื่อพิจารณาความชื้น และปริมาณไขมันของไส้กรอกอยู่ในช่วง 52.16-62.78% และ 11.25-21.78% ตามลำดับ ซึ่งค่าที่ได้มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) ปริมาณโปรตีนอยู่ในช่วง 13.35-21.35% โดยรวมมีค่าลดลงแต่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ยกเว้นกรณี การทดแทนด้วยผงถั่วเหลือง 20% และผงไข่ขาว 20% ที่ทำให้โปรตีนมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ คือ 17.10% และ 21.35% ตามลำดับ สำหรับความคงตัวของอิมัลชัน พบว่า ไส้กรอกที่มีการเติมผงไข่ขาว 20% มีค่า %TFR, %WR และ %FR ต่ำที่สุด การใช้อิมัลชันไฟเออร์มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของไส้กรอกที่ผลิตจากเนื้อสุกรแช่แข็งเป็นระยะเวลา 3 เดือนในระดับที่แตกต่างกัน จากภาพรวมพบว่าการใช้ผงถั่วเหลืองที่มากกว่า 10% สามารถปรับปรุงลักษณะเนื้อสัมผัสได้ ผงถั่วเหลืองและผงไข่ขาวมีผลต่อการปรับปรุงความเป็นอิมัลชันของส่วนผสมไส้กรอกเมื่อใช้ที่ปริมาณ 10% ขึ้นไป แต่ทั้งนี้ควรศึกษาเพิ่มเติมถึงปริมาณที่เหมาะสมและทดสอบทางด้านประสาทสัมผัสเพิ่มเติมเพื่อพิจารณารสชาติและกลิ่นของไส้กรอกที่เปลี่ยนไป

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้เป็นหนึ่งในผลงานจากโครงการวิจัย รหัสโครงการ 2301875 ซึ่งได้รับทุนงบประมาณด้านวิจัยและนวัตกรรม ประเภท Fundamental Fund ประจำปีงบประมาณ 2565 จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ภายใต้งบประมาณอุดหนุนโครงการวิจัย 2565 จากสำนักงานคณะกรรมการวิทยาศาสตร์ วิจัย และ นวัตกรรม (สกอ.)

## เอกสารอ้างอิง

- Akesowan, A. 2008. Effect of soy protein isolate on quality of light pork sausages containing konjac flour. **African Journal of Biotechnology** 7(24): 4586-4590.
- AOAC. 2000. **Official Methods of Analysis of AOAC International**. 17<sup>th</sup> ed. AOAC International, Gaithersburg.
- Chen, L., Wang, P., Kang, Z.L., Li, K., Xie, C., Sun, J.X. and Xu, X.L. 2015. Effect of soybean oil emulsified and unemulsified with chicken plasma protein on the physicochemical properties of frankfurters. **CyTA – Journal of Food** 13(3): 445-455.
- Choi, M.J., Abduzokhurov, T., Park, D.H., Kim, E.J. and Hong, G.P. 2018. Effects of deep freezing temperature for long-term storage on quality characteristics and freshness of lamb meat. **Korean Journal for Food Science of Animal Resources** 38(5): 959-969.
- Cosenza, G.H., Williams, S.K., Johnson, D.D., Sims, C. and McGowan, C.H. 2003. Development and evaluation of a cabrito smoked sausage product. **Meat Science** 64: 119-124.
- Estévez, M. 2011. Protein carbonyls in meat systems: A review. **Meat Science** 89 (3): 259-279.
- Etheridge, R.D., Pesti, G.M. and Foster, E.H. 1998. A comparison of nitrogen values obtained utilizing the Kjeldahl nitrogen and Dumas combustion methodologies (Leco CNS 2000) on samples typical of an animal nutrition analytical laboratory. **Animal Feed Science and Technology** 73(1-2): 21-28.
- Hoogenkamp, H. 2011. Protein performance in emulsion stability. **Fleischwirtschaft International** 3: 54-59.
- Honikel, K. 1998. Reference Methods for the Assessment of Physical Characteristics of Meat. **Meat Science** 49: 447-457.
- Hussein, H.A., Salman, M.N. and Jawad, A.M. 2020. Effect of freezing on chemical composition and nutritional value in meat. **Drug Invention Today** 13(2): 329-333.
- Hughes, E., Cofrades, S. and Troy, D.J. 1997. Effect of fat level, oat fiber and carrageenan on frankfurters formulated with 5, 12 and 30 % fat. **Meat Science** 45(3): 273-281.
- Lecomte, N.B., Zayas, J.F. and Kastner, C.L. 1993. Soya Proteins Functional and Sensory Characteristics Improved in Cornminuted bleats. **Journal of Food Science** 58(3): 464-466.
- Lonergan, S.M., Topel, D.G. and Marple, D.N. 2019. Chapter 14 - Sausage processing and production, pp. 229-253. *In* Lonergan, S.M., Topel, D.G.

- and Marple, D.N., eds. **The Science of Animal Growth and Meat Technology**. Academic Press, Cambridge.
- López-López, I., Cofrades, S. and Jiménez-Colmenero, F. 2009. Low-fat frankfurters enriched with *n*-3 PUFA and edible seaweed: Effects of olive oil and chilled storage on physicochemical, sensory and microbial characteristics. **Meat Science** 83(1): 148-154.
- Lukin, A. 2020. Applicability of demineralized milk whey powder in cooked sausage production. **Songklanakarin Journal of Science and Technology** 42(2): 255-262.
- McGuire, R.G. 1992. Reporting of objective color measurement. **HortScience** 27(12): 1254-1255.
- Medic, H., Kusec, I.D., Pleadin, J., Kozacinski, L., Njari, B., Hengl, B. and Kusec, G. 2018. The impact of frozen storage duration on physical, chemical and microbiological properties of pork. **Meat Science** 140: 119-127.
- Muguerza, E., Fista, G., Ansorena, D., Astiasaran, I. and Bloukas, J.G. 2002. Effect of fat level and partial replacement of pork backfat with olive oil on processing and quality characteristics of fermented sausages. **Meat Science** 61(4): 397-404.
- Muguerza, E., Gimeno, O., Ansorena, D. and Astiasarán, I. 2004. New formulations for healthier dry fermented sausages: a review. **Trends in Food Science & Technology** 15(9): 452-457.
- Phonpannawit, A., Khueanphet, B. and Funcharoensak, K. 2021. Product development of reduced fat chicken emulsion-type sausage using carrageenan and soy protein isolate. **YRU Science and Technology Journal** 6(2): 126-136. (in Thai)
- Rattanapanone, N. 2014. **Food Chemistry**. Odeon store Press, Bangkok. (in Thai)
- Smith, D.M. 1988. Factors influencing texture formation in comminuted meats., pp 48-52. **In Proceedings-Annual Reciprocal Meat Conference of the American Meat Science Association**. Laramie, Wyoming.
- Suwonsichon, S. 2007. Use of tapioca starch in combination with Sodium caseinate, soy protein isolate, or carrageenan as fat replacers in low fat frankfurter. **The Science and Technology Journal** 15(2): 8-21. (in Thai)
- Summo, C., Caponio, F. and Pasqualone, A. 2006. Effect of vacuum-packaging storage on the quality level of ripened sausages. **Meat Science** 74(2): 249-254.
- Teuteberg, V., Kluth, I.K., Ploetz, M. and Krischek, C. 2021. Effects of duration and temperature of frozen storage on the quality and food safety characteristics of pork after thawing and after storage under modified atmosphere. **Meat Science** 174: 108419.
- Texture Technologies. 2023. **Overview of TPA**. Texture Technologies Corp. and Stable Micro Systems. Available Source: <https://texturetechnologies.com/resources/texture-profile-analysis#overview>, August 9, 2023.
- Wang, Q., Dong, Q., Wang, L. and Sun, D. 2023. Quality attributes of pork tenderloin frozen under different high voltage electric fields

with ultrahigh permittivity ceramic-enhanced electrodes. **LWT** 184: 114989.

Wei, R., Wang, P., Han, M., Chen, T., Xu, X. and Zhou, G. 2017. Effect of freezing on electrical properties and quality of thawed chicken breast meat. **Asian-Australasian Journal of Animal Sciences** 30(4): 569-575.

Yang, Z., Liu, S., Sun, Q, Zheng, O., Wei, S., Xia, Q., Ji, H., Deng, C., Hao, J. and Xu, J. 2022. Insight into muscle quality of golden pompano (*Trachinotus ovatus*) frozen with liquid nitrogen at different temperatures. **Food Chemistry** 374: 131737.

# ผลของรูปแบบการบรรจุต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพผลิตภัณฑ์

## ขนมไหว้พระจันทร์ระหว่างการเก็บรักษา

### Effect of Package Type on Quality Change of Mooncake during Storage

กมลทิพย์ กรรไพอเราะ \*

Kamontip Kanpaipo \*

Received: 29 December 2022, Revised: 9 August 2023, Accepted: 11 September 2023

#### บทคัดย่อ

ขนมไหว้พระจันทร์เป็นขนมอบชนิดหนึ่งที่มีความนิยม โดยเฉพาะในช่วงเทศกาลไหว้พระจันทร์ ถือเป็นขนมมงคลของชาวจีน ผลิตภัณฑ์ประเภทนี้มักเสื่อมเสียง่ายเนื่องจากการเคลื่อนย้ายของความชื้นจากไส้ มาจากเปลือกขนม ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีเนื้อสัมผัสที่เปลี่ยนไปและเกิดกลิ่นหืน การศึกษาเรื่องอายุการเก็บรักษา ผลิตภัณฑ์ขนมไหว้พระจันทร์ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของสภาวะการบรรจุ 3 รูปแบบคือ 1) บรรจุใน ถุงพลาสติกประเภทโพลีโพรพิลีน (polypropylene; PP) (ชุดควบคุม) 2) บรรจุในถุงพลาสติกประเภทโพลีโพรพิลีน ที่ภายในบรรจุสารดูดซับออกซิเจน (PP+O<sub>2</sub> absorber) 3) บรรจุในถุงสุญญากาศชนิด Nylon-linear low density polyethylene (Nylon-LLDPE) เก็บรักษา ณ สภาวะอุณหภูมิห้อง (29 ± 2 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 42 วัน ผลการศึกษาพบว่า ปัจจัยร่วมระหว่างระยะเวลาในการเก็บรักษาและสภาวะการบรรจุ 3 รูปแบบ ส่งผลต่อคุณภาพ ทางเคมี และจุลชีววิทยา ของผลิตภัณฑ์ขนมไหว้พระจันทร์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05) ผลิตภัณฑ์ขนมไหว้ พระจันทร์ที่บรรจุในถุงสุญญากาศชนิด nylon-LLDPE มีการเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางเคมี (ค่า a<sub>w</sub>, ความชื้น และ ค่า TBA) และจุลชีววิทยา (จำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดและเชื้อรา) น้อยกว่าขนมไหว้พระจันทร์ที่บรรจุในถุง PP และถุง PP+O<sub>2</sub> absorber ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า การบรรจุขนมไหว้พระจันทร์ในถุงสุญญากาศชนิด nylon-LLDPE สามารถชะลอการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์และการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันได้ ดังนั้น สภาวะการเก็บ รักษาที่เหมาะสมที่สุดคือ การบรรจุในถุงสุญญากาศ ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีอายุการเก็บรักษา 5 สัปดาห์ ณ สภาวะการเก็บ รักษาอุณหภูมิห้อง (29±2 องศาเซลเซียส) โดยที่คุณภาพยังอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน (มพช. 1454/2555)

**คำสำคัญ:** ขนมไหว้พระจันทร์, บรรจุภัณฑ์, อายุการเก็บรักษา, สารดูดซับออกซิเจน, สุญญากาศ

สาขาวิชาการประกอบอาหารฮาลาล คณะวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา อำเภอเมือง จังหวัดยะลา 95000  
Program in Halal Culinary, Faculty of Science Technology and Agriculture, Yala Rajabhat University, Mueang, Yala 95000, Thailand.

\* ผู้นิพนธ์ประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (corresponding author, e-mail): koikamontip.k@gmail.com Tel: 08 2833 9822

## ABSTRACT

Mooncakes are a popular type of pastry, particularly during the Mid-Autumn Festival. They are considered an auspicious dessert for Chinese people. However, this product tends to deteriorate easily due to the moisture movement from the filling to the outer crust, resulting in a changed texture and rancidity. A study on the shelf life of mooncake products aimed to investigate the effects of three types of packing conditions: 1) packed in polypropylene plastic bags (PP, control), 2) packed in a polypropylene plastic bag containing an oxygen absorber (PP+O<sub>2</sub> absorber), and 3) packed in a nylon-linear low-density polyethylene (nylon-LLDPE) vacuum bags, all stored at room temperature (29 ± 2 °C) for 42 days. The study found that common factors between storage times and packing conditions affected the chemical and microbiological quality of the mooncake products with statistical significance ( $p < 0.05$ ). There was a difference in chemical quality (a<sub>w</sub>, moisture content, and TBA) and microbiological quality (total viable count and mold) between mooncakes packed in nylon-LLDPE vacuum bags and those packed in PP bags and PP+O<sub>2</sub> absorbers bags. The results showed that packing mooncakes in nylon-LLDPE vacuum bags could slow down microbial growth and lipid oxidation. The most suitable storage condition was packing in nylon-LLDPE vacuum bags which resulted in the product having a shelf life of 35 days at room temperature (29 ± 2 °C), while the quality still met the Thai Industrial Standards (TIS 1454/2012).

**Key words:** moon cake, package, shelf-life, oxygen absorber, vacuum

### บทนำ

ขนมไหว้พระจันทร์เป็นขนมอบชนิดหนึ่ง ที่ได้รับความนิยม โดยเฉพาะในช่วงเทศกาลไหว้พระจันทร์ ถือเป็นขนมมงคลของชาวจีน ทำจากแป้งผสมกับน้ำเชื่อม น้ำมันพืช น้ำค้างหรือส่วนผสมอื่น มีไส้บรรจุภายใน มีขนาดต่างกัน ส่วนที่เป็นเปลือกประกอบด้วยแป้งสาลี ไขมันหรือน้ำมัน อาจมีส่วนผสมของไข่ มีทั้งไส้คาวและไส้หวาน ทำให้สุกด้วยการอบ ขนมไหว้พระจันทร์เป็นผลิตภัณฑ์ขนมอบที่มีอายุการเก็บรักษาสั้น การเสื่อมเสียของผลิตภัณฑ์ประเภทนี้สามารถแบ่งออกเป็น 1) การเสื่อมเสียทางกายภาพ ทำให้ขนมมีลักษณะแห้งแข็งจากการสูญเสียความชื้น 2) การเสื่อมเสียทางเคมี เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำให้เกิดกลิ่นหืนและเนื้อสัมผัสเปลี่ยนไป และ 3) การเสื่อมเสีย

ทางจุลินทรีย์เนื่องจากการเคลื่อนย้ายของความชื้นจากไส้มาจกเปลือกขนม ส่งผลทำให้เกิดเชื้อราได้ง่าย ซึ่งการเปลี่ยนแปลงทั้ง 3 ประเภทดังกล่าวส่งผลต่อคุณภาพด้านประสาทสัมผัสที่เปลี่ยนแปลงไปด้วย จะเห็นได้ว่าอายุการเก็บรักษาของขนมไหว้พระจันทร์ ขึ้นอยู่กับ ส่วนประกอบในสูตรและสภาวะในการเก็บรักษา (Chysirichote and Mekrawee, 2018)

จากการที่ให้นักศึกษาชั้นปีที่ 4 หลักสูตรวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอาหารออกฝึกสหกิจศึกษาร่วมกับบริษัท ชัน โพรเซ่น ฟู้ด จำกัด จังหวัดนราธิวาส ในหัวข้อวิจัยเรื่อง การศึกษาและปรับปรุงกระบวนการผลิตไส้ขนมจากทุเรียน: กรณีศึกษาบริษัท ชัน โพรเซ่น ฟู้ด จำกัด ซึ่งงานวิจัยดังกล่าวทางบริษัทได้นำไปใช้ประโยชน์โดยนำไปผลิตเป็น

ไส้ขมนม แต่พบปัญหาคือ ไส้ทุเรียนมีความชื้นสูง เมื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นไส้ขมนมไหว้พระจันทร์ ผลิตภัณฑ์มีอายุการเก็บรักษาไม่เกิน 1 สัปดาห์ พบการเกิดเชื้อราบริเวณไส้ขมนมและแป้งหุ้มขนม ซึ่งการเสื่อมเสียของขนมประเภทนี้มีสาเหตุหลายประการเช่น การเกิดกลิ่นหืน กลิ่นอับ และการเจริญเติบโตของเชื้อรา (Chaisirichote, 2011) สอดคล้องกับ Thuwawiroj (2012) ที่กล่าวว่าขนมมอบประเภทขนมเปียะ ขนมไหว้พระจันทร์ ที่ผลิตแบบครัวเรือนจะมีอายุการเก็บรักษาประมาณ 1 สัปดาห์ ส่วนการผลิตในระดับอุตสาหกรรมจะมีอายุการเก็บรักษา 2-4 สัปดาห์ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิต ชนิดของบรรจุภัณฑ์ สภาพในการเก็บรักษาและวางจำหน่าย สาเหตุสำคัญประการหนึ่งของการเสื่อมเสียคือ การเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้นในผลิตภัณฑ์เนื่องจากผลิตภัณฑ์อาหารประเภทนี้มีองค์ประกอบหลายส่วน (multidomain foods) และองค์ประกอบเหล่านี้มีระดับความชื้นที่แตกต่างกันทำให้เกิดการถ่ายเทความชื้นระหว่างตัวแป้งและไส้ขมนมในระหว่างการเก็บรักษา ส่งผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพและประสาทสัมผัส รวมทั้งการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ ซึ่งอาหารที่มีความชื้นและบรรจุในภาชนะปิด อาจมีปัญหาในเรื่องการระบายความชื้นที่เคลื่อนย้ายจากภายในภาชนะออกสู่อากาศ ทำให้อาหารมีความชื้นสูงเหมาะสมกับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ผู้วิจัยจึงเห็นความสำคัญและสนใจที่จะแก้ปัญหาดังกล่าว จึงมีแนวคิดที่จะควบคุมปริมาณความชื้นในผลิตภัณฑ์โดยศึกษา รูปแบบการบรรจุที่ช่วยชะลอการเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางกายภาพ เคมี จุลินทรีย์และทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ขนมไหว้พระจันทร์ คือ 1) การใช้สารดูดซับออกซิเจนเพื่อให้มีระดับก๊าซออกซิเจนในบรรจุภัณฑ์ที่ปิดสนิทอยู่ในระดับต่ำ ซึ่งคุณสมบัติของสารดูดซับออกซิเจนคือ

ช่วยป้องกันการเสื่อมสภาพของอาหารจากปฏิกิริยาออกซิเดชันและยืดอายุการเก็บรักษา นอกจากนี้ยังสามารถป้องกันออกซิเจนจากการเปลี่ยนสีในปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล สารดูดซับออกซิเจนสามารถใช้เก็บรักษาผลิตภัณฑ์ที่บรรจุภายใต้สภาวะดัดแปรบรรยากาศ (Modified Atmosphere Packaging; MAP) หรือสภาวะอากาศปกติ ขึ้นอยู่กับชนิดของผลิตภัณฑ์ พบว่า สามารถลดปริมาณก๊าซออกซิเจนในบรรจุภัณฑ์ให้เหลือน้อยกว่าร้อยละ 0.01 ของความเข้มข้นทั้งหมด ทำให้สามารถยับยั้งปฏิกิริยาออกซิเดชัน และการเน่าเสียของอาหาร เนื่องจากการเจริญของเชื้อราได้ ส่งผลให้ยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ได้นานขึ้น (Chuaythong and Rachtanpun, 2017) และ 2) การบรรจุแบบสุญญากาศ ซึ่งเป็นวิธีการบรรจุที่มีการกำจัดก๊าซออกซิเจน ซึ่งมีผลต่อการยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่เป็นสาเหตุของการเสื่อมเสีย นอกจากนี้ ยังสามารถลดการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันและลดปัญหาการเปลี่ยนแปลงสีในผลิตภัณฑ์อาหาร ข้อมูลจากการวิจัยสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์ประเภทขนมมอบประเภทอื่นและต่อยอดในเชิงพาณิชย์ต่อไป

## วิธีดำเนินการวิจัย

### 1. การผลิตขนมไหว้พระจันทร์

ทำการผลิตไส้ทุเรียนและขนมไหว้พระจันทร์ตามสูตรและวิธีการของบริษัทชั้นนำ เช่น ฟู้ด จำกัด จังหวัดนครราชสีมา โดยในสูตรไส้ทุเรียนประกอบด้วยเนื้อทุเรียนร้อยละ 83.50 แป้งข้าวเหนียวร้อยละ 4.80 น้ำตาลร้อยละ 8.70 และกลีเซอรอลร้อยละ 3.00 ตามลำดับ ส่วนแป้งขนมไหว้พระจันทร์ประกอบด้วย แป้งขนมปังร้อยละ 30.0 แป้งเค้กร้อยละ 22.5 น้ำมันรำข้าวร้อยละ 15.0 น้ำเชื่อมร้อยละ 32.0 และน้ำค้างร้อยละ 0.5 วิธีการผลิตแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ 1) ไส้ขมนม โดยนำเนื้อทุเรียน

มากวนกับน้ำตาล เติมแป้งข้าวเหนียว และกลีเซอรอล กวนด้วยไฟอ่อนจนกระทั่งเหนียว 2) ส่วนของแป้ง หุ้มขนมผลิตโดยผสมน้ำเชื่อม น้ำค้าง และน้ำมัน ร้าข้าว จากนั้นผสมแป้งขนมปังและแป้งเค้ก นวดให้ เข้ากัน พักแป้งไว้เป็นเวลา 1 คืน แบ่งแป้งเป็นก้อน ๆ ละ 15 กรัม ริดเป็นแผ่น ซึ่งไว้ขนมเป็นก้อน ๆ ละ 20 กรัม นำแป้งที่ริดเป็นแผ่นมาห่อไส้ขนม นำไป กดลงบนพิมพ์ขนมไหว้พระจันทร์และนำไปอบโดยใช้เตาอบไฟฟ้าี่ห้อ Elextrolux รุ่น EOT70DB อบที่ อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที นำออกมาทาน้ำขนมด้วยไข่แดงและนำไปอบต่อที่ อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที ตั้งทิ้งไว้ให้เย็น

## 2. ศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพระหว่างเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ขนมไหว้พระจันทร์

นำผลิตภัณฑ์ขนมไหว้พระจันทร์น้ำหนักบรรจุ 40 กรัม มาบรรจุภัณฑ์ในถาดขนม โดยในงานวิจัยนี้ศึกษาตัวแปร 2 ตัวแปรคือ ตัวแปรที่ 1 รูปแบบการบรรจุ 3 รูปแบบคือ 1) บรรจุในถุงพลาสติกประเภทโพลีโพรพิลีน (polypropylene; PP) (ชุดควบคุม) ขนาด 4x6 นิ้ว หน้า 40 ไมครอน ที่มีค่าการซึมผ่านไอน้ำ 0.99 กรัม/เมตร<sup>2</sup> .วัน 2) บรรจุในถุงพลาสติกประเภทโพลีโพรพิลีนที่ภายในบรรจุสารดูดซับออกซิเจนขนาดบรรจุ 2 กรัม (PP+O<sub>2</sub> absorber) 3) บรรจุในถุงสุญญากาศชนิด Nylon-linear low density polyethylene (Nylon-LLDPE) โดยกำหนดให้ขนาดของถุงเท่ากับ 4x6 นิ้ว ความหนา 50 ไมครอน ตัวแปรที่ 2) ระยะเวลาการเก็บรักษาคือ วันที่ 0, 7, 14, 21, 28, 35 และ 42 เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง 29±2 องศาเซลเซียส ศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางกายภาพ เคมีและจุลินทรีย์ สุ่มเก็บตัวอย่างทุก ๆ 5 วัน เป็นเวลา 6 สัปดาห์ หรือจนกว่าตัวอย่างมีคุณภาพเสื่อมเสีย/ไม่เป็นที่ยอมรับ วิเคราะห์คุณสมบัติต่าง ๆ ดังนี้ 1) ค่าวอเตอร์แอกทิวิตี

โดยใช้เครื่อง Novasina AG รุ่น CH-8853 2) ปริมาณความชื้นโดยวิธี (AOAC, 2000) 3) ปริมาณกรดไทโอบาบิฟูริก (Thiobarbituric acid, TBA) โดยวิธี (AOAC, 2000) 4) คุณภาพทางจุลินทรีย์ ได้แก่ จุลินทรีย์ทั้งหมด และรา ตามวิธี (AOAC, 2000)

วางแผนการทดลอง แบบ 3×7 Factorial in Completely Randomized Design (CRD) ทำการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้ โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS for Windows Version 21 โดยวิเคราะห์ความแปรปรวน ANOVA (analysis of variance) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยใช้ Duncan's Multiple Range Test

## ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

### 1. ค่า a<sub>w</sub>

จากการเก็บรักษาตัวอย่างขนมไหว้พระจันทร์ด้วยรูปแบบการบรรจุในถุง PP ถุง PP +O<sub>2</sub> absorber และ ถุง nylon-LLDPE เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 29±2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0, 7, 14, 21, 28, 35 และ 42 วัน พบว่า รูปแบบการบรรจุและระยะเวลาการเก็บรักษา มีผลต่อค่า a<sub>w</sub> ทั้งในส่วนของแป้งหุ้มขนมและไส้ขนมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05) โดยพบว่า ในวันแรกของการเก็บรักษา (วันที่ 0) แป้งหุ้มขนมไหว้พระจันทร์ที่บรรจุในถุง PP มีค่า a<sub>w</sub> เท่ากับ 0.51±0.01 ไส้ขนมมีค่า a<sub>w</sub> เท่ากับ 0.53±0.01 เมื่อเก็บรักษาเป็นเวลา 42 วัน ค่า a<sub>w</sub> ของแป้งหุ้มขนมมีค่าเท่ากับ 0.81±0.04 เพิ่มขึ้นคิดเป็นร้อยละ 60.78 ไส้ขนมมีค่าเท่ากับ 0.70±0.01 เพิ่มขึ้นคิดเป็นร้อยละ 32.08 ขนมไหว้พระจันทร์ที่บรรจุในถุง PP +O<sub>2</sub> absorber วันแรกของการเก็บรักษาแป้งหุ้มขนมมีค่า a<sub>w</sub> เท่ากับ 0.51±0.01 ไส้ขนมมีค่าเท่ากับ 0.53±0.02 เมื่อเก็บรักษาเป็นเวลา 42 วัน ค่า a<sub>w</sub> แป้งหุ้มขนมมีค่าเท่ากับ 0.71±0.01 เพิ่มขึ้นคิดเป็นร้อยละ 39.22 ไส้ขนมมีค่า a<sub>w</sub> เท่ากับ 0.68±0.01 เพิ่มขึ้นคิด

เป็นร้อยละ 28.30 ส่วนการบรรจุในถุงสุญญากาศชนิด nylon-LLDPE วันแรกของการเก็บรักษาแ่งหุ้มขนมมีค่า  $a_w$  เท่ากับ  $0.51 \pm 0.01$  ใส้ขนมมีค่า  $a_w$  เท่ากับ  $0.53 \pm 0.02$  เมื่อเก็บเป็นเวลา 42 วัน ค่า  $a_w$  แ่งหุ้มขนมมีค่าเท่ากับ  $0.64 \pm 0.01$  เพิ่มขึ้นคิดเป็นร้อยละ 25.49 ใส้ขนมมีค่า  $a_w$  เท่ากับ  $0.62 \pm 0.01$  เพิ่มขึ้นคิดเป็นร้อยละ 16.98 ตามลำดับ (ตารางที่ 1 และ ตารางที่ 2) การเปลี่ยนแปลงของค่า  $a_w$  ในแ่งหุ้มขนมที่เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเก็บรักษาเป็นผลเนื่องมาจากผลิตภัณฑ์อาหารประเภทที่มีแ่งหุ้ม จัดเป็นขนมที่มีองค์ประกอบหลายส่วน ซึ่งปัจจัยที่จะส่งผลกระทบต่อเปลี่ยนแปลงของค่า  $a_w$  คือการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของน้ำจากส่วนของใส้ขนมไปยังส่วนของแ่งหุ้มขนม ซึ่งการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของน้ำจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกและจะค่อย ๆ ช้าลงจนถึงจุดสมดุลคือองค์ประกอบทั้ง 2 ส่วนมีความชื้นใกล้เคียงกันสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chysirichote and Mekrawee (2016) ที่ศึกษาอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ขนมเปียะเล็กลดพลังงาน โดยพบว่า ตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา 2 สัปดาห์ค่า  $a_w$  ของใส้ขนมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากเกิดการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของน้ำจากส่วนของใส้ขนมไปยังส่วนของแ่งหุ้มขนม ส่วนรูปแบบการบรรจุพบว่า การบรรจุในถุงพลาสติก PP มีการเปลี่ยนแปลงของค่า  $a_w$  ทั้งในส่วนของแ่งหุ้มขนมและใส้ขนมมากที่สุด เนื่องจากถุง PP มีอัตราการซึมผ่านของไอน้ำอยู่ในช่วง 10-12 กรัม/ตารางเมตร/วัน ที่ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 90 ทำให้เกิดการถ่ายเทความชื้นจากภายนอกบรรจุภัณฑ์เข้าไปถึงตัวผลิตภัณฑ์เพื่อให้เข้าสู่สภาวะสมดุล (Thuwawiroj, 2012) ส่วนการบรรจุผลิตภัณฑ์ในถุง PP + O<sub>2</sub> absorber พบว่า สามารถจะชะลอการเปลี่ยนแปลงของค่า  $a_w$  ทั้งในส่วนของแ่งหุ้มขนมและใส้ขนมเนื่องจาก สารดูดซับออกซิเจนทำหน้าที่ดูดซับออกซิเจนในโมเลกุลของไอน้ำจากบรรยากาศ

ภายในบรรจุภัณฑ์ ทำให้ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ล้อมรอบอาหารต่ำกว่าค่า  $a_w$  ของอาหาร จึงมีการเคลื่อนย้ายความชื้นและทำให้อาหารในบรรจุภัณฑ์ที่มีสารดูดซับออกซิเจนมีค่า  $a_w$  ต่ำกว่าปกติ (Rotarwut *et al.*, 2018) ส่วนการเก็บรักษาในถุงสุญญากาศชนิด nylon-LLDPE พบการเปลี่ยนแปลงของค่า  $a_w$  ทั้งในส่วนของแ่งหุ้มขนมและใส้ขนมน้อยที่สุดเนื่องจากถุงสุญญากาศชนิด nylon-LLDPE มีอัตราการซึมผ่านของไอน้ำเท่ากับ 0.062 กรัม. มิลลิเมตร/ตารางเมตร/วัน ซึ่งมีผลทำให้เกิดการซึมผ่านของอากาศได้น้อย จึงสามารถป้องกันการสูญเสียความชื้นของผลิตภัณฑ์ซึ่งค่า  $a_w$  เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลอย่างมากต่อการเสื่อมเสียของอาหาร เพราะความชื้นจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยาทางเคมีอย่างช้า ๆ และมีการเจริญของจุลินทรีย์ ซึ่งเป็นต้นเหตุที่ทำให้อาหารเกิดการเน่าเสีย ดังนั้น การลดปริมาณน้ำในอาหารจึงเป็นการยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์และการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี (Khoshakhlagh *et al.*, 2014) ทำให้ผลิตภัณฑ์มีอายุการเก็บรักษาที่นานขึ้น

## 2. ปริมาณความชื้น

ผลการวิเคราะห์ปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์ขนมไหว้พระจันทร์พบว่า ปัจจัยร่วมระหว่างระยะเวลาในการเก็บรักษาและรูปแบบการบรรจุ 3 รูปแบบส่งผลต่อปริมาณความชื้นทั้งในส่วนของแ่งหุ้มขนมและใส้ขนมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นของขนมไหว้พระจันทร์พบว่า เมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาที่นานขึ้น ปริมาณความชื้นในส่วนของแ่งหุ้มขนมจะเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 7.31-7.39 เป็นร้อยละ 8.56-9.85 ปริมาณความชื้นของใส้ขนมมีค่าเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 7.90-8.03 เป็นร้อยละ 8.76-9.53 เมื่อเก็บรักษาเป็นเวลา 42 วัน (ตารางที่ 1 และ ตารางที่ 2) จากการทดลองจะพบว่า ปริมาณความชื้นในแ่งหุ้มขนมจะเพิ่มขึ้นทั้ง 3 รูปแบบการบรรจุ เนื่องจากเกิดการ

เคลื่อนย้ายโมเลกุลของน้ำจากส่วนของไส้ขนมไปยัง ส่วนของแป้งหุ้มขนม ส่งผลทำให้ส่วนของแป้งหุ้มขนมมีปริมาณความชื้นที่สูงขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Chumu (2010) ที่ศึกษาการพัฒนาผลิตภัณฑ์ขนมเปียะไส้สับประดโดยพบว่า ตลอดระยะเวลาการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ 6 สัปดาห์ ปริมาณความชื้นในส่วนของแป้งหุ้มขนมเพิ่มจากร้อยละ 5.15-5.75 เป็นร้อยละ 5.31-5.83 โดยการบรรจุในถุง PP มีการเพิ่มขึ้นของปริมาณความชื้นสูงสุด เนื่องจากถุง PP มีอัตราการซึมผ่านของไอน้ำอยู่ในช่วง 10-12 กรัม/ตารางเมตร/วัน ที่ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 90 ทำให้เกิดการถ่ายเทความชื้นจากภายนอกบรรจุภัณฑ์เข้าไปถึงตัวผลิตภัณฑ์เพื่อให้เข้าสู่สภาวะสมดุล (Thuwawiroj, 2012) การบรรจุในถุง PP + O<sub>2</sub> absorber พบว่า ขนมไหว้พระจันทร์ทั้งส่วนของแป้งหุ้มขนม และส่วนของไส้ขนมมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นน้อยกว่าการบรรจุในถุง PP เพียงอย่างเดียว เนื่องจากสารดูดซับออกซิเจนทำหน้าที่ดูดซับออกซิเจนในโมเลกุลของไอน้ำจากบรรยากาศภายในบรรจุภัณฑ์ ซึ่งจะสารดูดซับออกซิเจนจะช่วยชะลอการเปลี่ยนแปลงความชื้นได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น เนื่องจากคุณสมบัติหลักของสารดูดซับออกซิเจนคือช่วยจับกับออกซิเจนซึ่งส่งผลต่อการเกิดกลิ่นผิดปกติในผลิตภัณฑ์อาหาร หากต้องการลดปริมาณความชื้น อาจต้องเปลี่ยนชนิดของบรรจุภัณฑ์เช่น การบรรจุสารดูดซับออกซิเจนร่วมกับการบรรจุในถุงออลูมิเนียมฟอยล์ (Jariyawanugoon, 2013; Ramzy *et al.*, 2011) ส่วนการบรรจุในถุงสุญญากาศชนิด nylon-LLDPE พบการเปลี่ยนแปลงของความชื้นและไส้ขนมน้อยที่สุด เนื่องจากถุง nylon-LLDPE มีอัตราการซึมผ่านของไอน้ำเท่ากับ 0.062 กรัม. มิลลิเมตร/ตารางเมตร/วัน ส่งผลให้ปริมาณออกซิเจนภายในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิทมีปริมาณลดลงกว่าปกติ ซึ่งช่วยชะลอการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์และปฏิกิริยาทางเคมี

(Awoyale *et al.*, 2013) ซึ่งวิธีการดังกล่าวให้ผลดีในด้านอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ที่สามารถเก็บได้นานขึ้น แต่ส่งผลต่อเนื่องสัมพันธ์เนื่องจากตัวผลิตภัณฑ์และบรรจุภัณฑ์จะเกิดการหดตัวแนบชิดติดกัน ทำให้รูปทรงของอาหารเปลี่ยนไป ซึ่งหากต้องการยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ให้นานขึ้น อาจจะต้องวิธีการอื่น เช่น การดัดแปลงบรรยากาศร่วมกับการใช้กลีเซอรอล (Rotarwut *et al.*, 2018; Changso, 2020) เป็นต้น

### 3. ค่า TBA

ค่า TBA เป็นดัชนีบ่งบอกถึงคุณภาพที่มีความสำคัญบ่งชี้ถึงการเกิดออกซิเดชันในไขมัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในผลิตภัณฑ์ที่มีไขมันเป็นส่วนประกอบ ซึ่งจะวัดปริมาณสาร secondary oxidation products ที่เกิดจากการสลายตัวของสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ซึ่งเป็น primary oxidation products จะเกิดมากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น (Phothapaeree *et al.*, 2017) นอกจากนี้ยังมีปริมาณออกซิเจนและค่า a<sub>w</sub> เป็นปัจจัยในการเร่งให้เกิดปฏิกิริยา (Banchuen *et al.*, 2009) โดยปริมาณ TBA ซึ่งใช้เป็นดัชนีในการวัดการเสื่อมเสียคุณภาพของไขมันในอาหาร เมื่อค่า TBA ไม่เกิน 1.6 มิลลิกรัม มาโลอัลดีไฮด์/กิโลกรัม พบว่า ไขมันเสื่อมเสียเล็กน้อย (Salah *et al.*, 2022) อาหารยังเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค และผู้บริโภคยังไม่ได้รับกลิ่นเหม็นหืน ค่า TBA มากกว่า 3 มิลลิกรัมมาโลอัลดีไฮด์/กิโลกรัม ทำให้ผู้บริโภคสามารถรับรู้กลิ่นแปลกปลอมทางประสาทสัมผัสต่ออาหารได้ และค่า TBA มากกว่า 7 มิลลิกรัมมาโลอัลดีไฮด์/กิโลกรัม ทำให้ไขมันเสื่อมคุณภาพและมีกลิ่นรุนแรง (Gray, 1978) จากผลการวิเคราะห์ค่า TBA ของผลิตภัณฑ์ขนมไหว้พระจันทร์พบว่า ปัจจัยร่วมระหว่างระยะเวลาในการเก็บรักษาและรูปแบบการบรรจุ 3 รูปแบบส่งผลต่อค่า TBA ทั้งในส่วนของแป้งหุ้มขนมและไส้ขนมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) การเปลี่ยนแปลงค่า TBA ของขนม

ไหว้พระจันทร์พบว่า เมื่อเก็บรักษาผลิตภัณฑ์นาน 42 วัน ค่า TBA ในส่วนของแป้งหุ้มขนมจะเพิ่มขึ้นจาก 0.51-0.56 มิลลิกรัมมาลอนไดออลดีไฮด์ต่อกรัม เป็น 0.73-1.69 มิลลิกรัมมาลอนไดออลดีไฮด์ต่อกรัม เมื่อเก็บรักษาเป็นเวลา 42 วัน คิดเป็นร้อยละ 43.14-201.78 ส่วนค่า TBA ของไส้ขนมมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.25-0.26 มิลลิกรัมมาลอนไดออลดีไฮด์ต่อกรัม เป็น 0.79-1.07 มิลลิกรัมมาลอนไดออลดีไฮด์ต่อกรัม เมื่อเก็บรักษาเป็นเวลา 42 วัน คิดเป็นร้อยละ 216.00-311.54 (ตารางที่ 1 และ ตารางที่ 2) จากผลการทดลองพบว่า การบรรจุขนมไหว้พระจันทร์ในบรรจุภัณฑ์ที่แตกต่างกัน ส่งผลให้ค่า TBA ในผลิตภัณฑ์ต่างกัน ด้วย ขนมไหว้พระจันทร์ที่บรรจุในถุง PP พบการเปลี่ยนแปลงของค่า TBA สูงสุดทั้งส่วนของแป้งหุ้มขนมและไส้ขนม เนื่องจากถุง PP ไม่มีคุณสมบัติในการป้องกันออกซิเจน ออกซิเจนจากภายนอกสามารถแพร่เข้าสู่ภายในบรรจุภัณฑ์อย่างต่อเนื่อง ทำให้เร่งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ส่วนขนมไหว้พระจันทร์ที่บรรจุในถุง PP + O<sub>2</sub> absorber พบว่า สามารถชะลอการเปลี่ยนแปลงของค่า TBA เนื่องจากสารดูดซับออกซิเจนทำหน้าที่ลดปริมาณก๊าซออกซิเจนในบรรจุภัณฑ์ให้เหลือน้อยกว่าร้อยละ 0.1 ของความเข้มข้นทั้งหมด โดยสารดูดซับออกซิเจนสามารถใช้ในการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ที่บรรจุในสภาวะดัดแปรบรรยากาศหรือสภาวะอากาศปกติ เมื่อปริมาณออกซิเจนในบรรจุภัณฑ์อยู่ในระดับต่ำ ทำให้สามารถยับยั้งปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ (Promkhan *et al.*, 2020) แต่ข้อจำกัดของการใช้สารดูดซับออกซิเจนคือ มีประสิทธิภาพเพียงระยะหนึ่งเท่านั้น เนื่องจากออกซิเจนจากภายนอกสามารถแพร่เข้าสู่ภายในบรรจุภัณฑ์อย่างต่อเนื่องจนกระทั่งทำให้ประสิทธิภาพของสารดูดซับออกซิเจนหมดไป ผลิตภัณฑ์ก็จะเกิดกลิ่นหืน (Chaisirichote, 2011; Laohasilpsomjit, 2018) ส่วนการบรรจุในถุงสุญญากาศชนิด nylon-LLDPE

พบการเปลี่ยนแปลงของค่า TBA น้อยที่สุดเนื่องจากการบรรจุโดยดึงเอาอากาศที่อยู่ภายในบรรจุภัณฑ์ออก โดยไม่มีการพ่นก๊าซแทนที่มีวัตถุประสงค์เพื่อป้องกันการเสื่อมเสียจากจุลินทรีย์ที่ต้องการออกซิเจน ได้แก่ ราทุกชนิดและแบคทีเรียที่ต้องการออกซิเจน เช่น *Pseudomonas* sp. รวมทั้งป้องกันการเสื่อมเสียจากปฏิกิริยาทางเคมีที่ต้องการออกซิเจน เช่น การเหม็นหืนเนื่องจากปฏิกิริยาไลโปออกซิเดชัน (lipid oxidation) (Suksripaisal, 2016) เมื่อพิจารณาขนมไหว้พระจันทร์ทั้ง 3 สภาวะการบรรจุพบว่า ตลอดระยะเวลา 6 สัปดาห์ มีค่า TBA ไม่เกิน 1.6 มิลลิกรัมมาลอนไดออลดีไฮด์/กิโลกรัม ซึ่งหมายถึงไขมันเสื่อมเสียเล็กน้อย ผลิตภัณฑ์ยังเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค (Kachele *et al.*, 2017) ซึ่งค่า TBA เพียงอย่างเดียวอาจไม่เหมาะสมที่จะใช้เป็นดัชนีชี้วัดการเสื่อมเสียของขนมไหว้พระจันทร์ สาเหตุหลักของการเสื่อมเสียของขนมไหว้พระจันทร์คือการเน่าเสียจากเชื้อจุลินทรีย์ เมื่อพิจารณาค่า a<sub>w</sub> ในส่วนของแป้งหุ้มขนมและไส้ขนมพบว่า มีค่าเพิ่มขึ้นตลอดอายุการเก็บรักษา มีค่า a<sub>w</sub> อยู่ระหว่าง 0.5-0.7 ซึ่งค่า a<sub>w</sub> เป็นปัจจัยสำคัญที่สุดที่มีอิทธิพลอย่างมากต่อคุณภาพและการเน่าเสียของอาหาร โดยเฉพาะการเจริญของจุลินทรีย์ ซึ่งเป็นต้นเหตุให้เกิดการเน่าเสีย ดังนั้น ควรมีการควบคุมให้มีค่า a<sub>w</sub> ที่ต่ำกว่า 0.6 เพื่อให้สามารถเก็บรักษาได้นานขึ้น เนื่องจากสามารถช่วยลดการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากปฏิกิริยาเคมี และการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ได้ (Franceschini *et al.*, 2020)

**Table 1** Change in water activity ( $a_w$ ), Moisture content and thiobarbituric acid (TBA value) of bread during storage

Conditions	Days	water activity ( $a_w$ )	Moisture (%)	thiobarbituric acid (TBA value) (mgMAD/kg)
PP bag	0	0.51±0.01 <sup>f</sup>	7.34±0.16 <sup>d</sup>	0.51±0.05 <sup>f</sup>
PP bag	7	0.55±0.03 <sup>e</sup>	7.78±0.49 <sup>c</sup>	0.59±0.04 <sup>e</sup>
PP bag	14	0.60±0.02 <sup>d</sup>	7.86±0.21 <sup>c</sup>	0.59±0.08 <sup>e</sup>
PP bag	21	0.63±0.02 <sup>cd</sup>	7.87±0.41 <sup>c</sup>	0.71±0.10 <sup>c</sup>
PP bag	28	0.66±0.02 <sup>c</sup>	8.75±0.60 <sup>b</sup>	0.92±0.14 <sup>b</sup>
PP bag	35	0.73±0.01 <sup>b</sup>	9.07±0.39 <sup>ab</sup>	1.26±0.05 <sup>a</sup>
PP bag	42	0.81±0.04 <sup>a</sup>	9.56±0.23 <sup>a</sup>	1.69±0.18 <sup>a</sup>
PP+O <sub>2</sub> absorber bag	0	0.51±0.01 <sup>f</sup>	7.35±0.24 <sup>d</sup>	0.52±0.02 <sup>f</sup>
PP+O <sub>2</sub> absorber bag	7	0.53±0.02 <sup>ef</sup>	7.52±0.50 <sup>d</sup>	0.55±0.03 <sup>ef</sup>
PP+O <sub>2</sub> absorber bag	14	0.57±0.02 <sup>d</sup>	7.53±0.22 <sup>d</sup>	0.57±0.02 <sup>c</sup>
PP+O <sub>2</sub> absorber bag	21	0.60±0.02 <sup>d</sup>	7.98±0.20 <sup>c</sup>	0.71±0.03 <sup>c</sup>
PP+O <sub>2</sub> absorber bag	28	0.61±0.01 <sup>d</sup>	8.16±0.46 <sup>c</sup>	0.81±0.05 <sup>bc</sup>
PP+O <sub>2</sub> absorber bag	35	0.66±0.01 <sup>c</sup>	8.59±0.25 <sup>c</sup>	0.92±0.04 <sup>b</sup>
PP+O <sub>2</sub> absorber bag	42	0.71±0.01 <sup>b</sup>	9.20±0.42 <sup>a</sup>	0.92±0.10 <sup>b</sup>
Nylon-LLDPE vacuum bags	0	0.51±0.01 <sup>f</sup>	7.33±0.22 <sup>d</sup>	0.51±0.02 <sup>f</sup>
Nylon-LLDPE vacuum bags	7	0.51±0.02 <sup>f</sup>	7.39±0.32 <sup>d</sup>	0.52±0.02 <sup>f</sup>
Nylon-LLDPE vacuum bags	14	0.52±0.02 <sup>ef</sup>	7.51±0.40 <sup>d</sup>	0.55±0.0 <sup>ef</sup>
Nylon-LLDPE vacuum bags	21	0.54±0.01 <sup>e</sup>	7.87±0.50 <sup>c</sup>	0.60±0.02 <sup>e</sup>
Nylon-LLDPE vacuum bags	28	0.55±0.02 <sup>e</sup>	8.01±0.46 <sup>c</sup>	0.64±0.05 <sup>de</sup>

**Table 1** (Continuous)

Conditions	Days	water activity ( $a_w$ )	Moisture (%)	thiobarbituric acid (TBA value) (mgMAD/kg)
Nylon-LLDPE vacuum bags	35	0.61±0.02d	8.50±0.25b	0.66±0.03de
Nylon-LLDPE vacuum bags	42	0.64±0.01c	8.56±0.50b	0.73±0.02c

<sup>a-f</sup> Different letters in a column indicate significantly different level ( $p < 0.05$ ) according to Duncan's multiple range test.

**Table 2** Change in water activity ( $a_w$ ), Moisture content and thiobarbituric acid (TBA value) of durian cream filling during storage

Treatment	Days	water activity ( $a_w$ )	Moisture (%)	thiobarbituric acid (TBA value) (mgMAD/kg)
PP bag	0	0.53±0.01 <sup>e</sup>	7.65±0.38 <sup>e</sup>	0.26±0.03 <sup>f</sup>
PP bag	7	0.56±0.02 <sup>d</sup>	8.24±0.08 <sup>d</sup>	0.30±0.03 <sup>f</sup>
PP bag	14	0.56±0.02 <sup>d</sup>	8.97±0.16 <sup>b</sup>	0.33±0.08 <sup>f</sup>
PP bag	21	0.59±0.01 <sup>b</sup>	8.99±0.11 <sup>b</sup>	0.40±0.09 <sup>c</sup>
PP bag	28	0.64±0.02 <sup>b</sup>	9.01±0.03 <sup>b</sup>	0.63±0.08 <sup>c</sup>
PP bag	35	0.69±0.02 <sup>a</sup>	9.20±0.19 <sup>a</sup>	0.82±0.01 <sup>b</sup>
PP bag	42	0.70±0.01 <sup>a</sup>	9.23±0.11 <sup>a</sup>	1.07±0.12 <sup>a</sup>
PP+O <sub>2</sub> absorber bag	0	0.53±0.02 <sup>e</sup>	7.63±0.64 <sup>e</sup>	0.26±0.02 <sup>f</sup>
PP+O <sub>2</sub> absorber bag	7	0.55±0.02 <sup>d</sup>	8.06±0.75 <sup>de</sup>	0.27±0.05 <sup>f</sup>
PP+O <sub>2</sub> absorber bag	14	0.56±0.02 <sup>d</sup>	8.68±0.30 <sup>cd</sup>	0.28±0.01 <sup>f</sup>
PP+O <sub>2</sub> absorber bag	21	0.58±0.02 <sup>cd</sup>	8.80±0.70 <sup>c</sup>	0.29±0.02 <sup>f</sup>
PP+O <sub>2</sub> absorber bag	28	0.61±0.01 <sup>c</sup>	8.88±0.13 <sup>c</sup>	0.33±0.01 <sup>f</sup>
PP+O <sub>2</sub> absorber bag	35	0.65±0.01 <sup>b</sup>	8.88±0.12 <sup>c</sup>	0.51±0.02 <sup>d</sup>
PP+O <sub>2</sub> absorber bag	42	0.68±0.01 <sup>ab</sup>	9.12±0.73 <sup>ab</sup>	0.90±0.02 <sup>ab</sup>
Nylon-LLDPE vacuum bags	0	0.53±0.02 <sup>e</sup>	7.65±0.53 <sup>e</sup>	0.26±0.04 <sup>f</sup>
Nylon-LLDPE vacuum bags	7	0.53±0.05 <sup>e</sup>	7.90±0.32 <sup>de</sup>	0.26±0.03 <sup>f</sup>
Nylon-LLDPE vacuum bags	14	0.54±0.02 <sup>e</sup>	8.14±0.56 <sup>d</sup>	0.27±0.03 <sup>f</sup>
Nylon-LLDPE vacuum bags	21	0.55±0.01 <sup>d</sup>	8.25±0.62 <sup>d</sup>	0.28±0.02 <sup>f</sup>
Nylon-LLDPE vacuum bags	28	0.57±0.02 <sup>cd</sup>	8.54±0.21 <sup>cd</sup>	0.30±0.01 <sup>f</sup>
Nylon-LLDPE vacuum bags	35	0.60±0.02 <sup>c</sup>	8.69±0.26 <sup>cd</sup>	0.47±0.05 <sup>de</sup>
Nylon-LLDPE vacuum bags	42	0.62±0.01 <sup>c</sup>	8.71±0.36 <sup>c</sup>	0.78±0.25 <sup>b</sup>

<sup>a-f</sup> Different letters in a column represent significantly different level ( $p < 0.05$ ) according to Duncan's multiple range test.

#### 4. คุณภาพทางจุลินทรีย์

จากการเก็บรักษาตัวอย่างขนมไหว้พระจันทร์ด้วยบรรจุภัณฑ์ถุง PP ถุง PP+O<sub>2</sub> absorber และถุงสุญญากาศชนิด nylon-LLDPE เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 29±2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0, 7, 14, 21, 28, 35 และ 42 วัน ทำการตรวจวิเคราะห์ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดและเชื้อราทุก 7 วัน โดยเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนขนมไหว้พระจันทร์ (Thai Industrial Standards Institute, 2003) ซึ่งกำหนดเกณฑ์ในการพิจารณาดังนี้ คือ จำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดต้องน้อยกว่า 1×10<sup>4</sup> โคโลนีต่อตัวอย่าง 1 กรัม และจำนวนเชื้อราต้องน้อยกว่า 1×10<sup>2</sup> โคโลนีต่อตัวอย่าง 1 กรัม จากการทดลองพบว่า ขนมไหว้พระจันทร์ที่บรรจุในถุง PP มีปริมาณเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นเท่ากับ 1.2×10<sup>1</sup> CFU/g ปริมาณเชื้อราเท่ากับ 1.2×10<sup>1</sup> CFU/g ในวันที่ 21 พบว่า เชื้อจุลินทรีย์มีปริมาณ 2.4×10<sup>4</sup> CFU/g ส่วนเชื้อรามีปริมาณ 2.7×10<sup>2</sup> CFU/g ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐาน พบว่า จำนวนเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดและเชื้อราเกินเกณฑ์ที่กำหนด จึงสรุปได้ว่า สามารถเก็บรักษาได้ 14 วัน ขนมไหว้พระจันทร์ที่บรรจุในถุง PP+O<sub>2</sub> absorber พบว่า มีปริมาณเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นเท่ากับ 1.0×10<sup>1</sup> CFU/g เชื้อราเท่ากับ 1.3×10<sup>1</sup> CFU/g เมื่อเก็บรักษาผลิตภัณฑ์เป็นเวลา 35 วัน พบว่า เชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดเท่ากับ 8.7×10<sup>4</sup> CFU/g ส่วนเชื้อรามีปริมาณเท่ากับ 5.0×10<sup>2</sup> CFU/g ซึ่งเกินเกณฑ์ที่กำหนด สรุปได้ว่า เก็บรักษาได้ 28 วัน ส่วนขนมไหว้พระจันทร์ที่บรรจุถุงสุญญากาศชนิด nylon-LLDPE พบว่า มีปริมาณเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นเท่ากับ 1.0×10<sup>1</sup> CFU/g เชื้อราเท่ากับ 1.2×10<sup>1</sup> CFU/g เมื่อเก็บรักษาเป็นเวลา 42 วัน พบว่า เชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดเท่ากับ 6.8×10<sup>4</sup> CFU/g ส่วนเชื้อรามีปริมาณเท่ากับ 2.1×10<sup>2</sup> CFU/g ซึ่งเกินเกณฑ์ที่กำหนด สรุปได้ว่า เก็บรักษาได้ 35 วัน (ตารางที่ 3) สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ค่า a<sub>w</sub> และปริมาณ

ความชื้น โดยการใช้สารดูดซับออกซิเจนทำให้ปริมาณจุลินทรีย์และเชื้อราที่พบในผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นในอัตราที่ช้ากว่าการบรรจุในถุง PP เพียงอย่างเดียว ผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chysirichote and Mekrawee (2018) ที่ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณจุลินทรีย์ที่พบในขนมเป็ยะที่ทำจากไส้ถั่วกวนสูตรลดค่า a<sub>w</sub> โดยพบว่า สามารถเก็บรักษาได้ไม่เกิน 2 สัปดาห์ เมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง (32±2 °C) ซึ่งการเสื่อมเสียจะเกิดขึ้นบริเวณเปลือกขนมเนื่องจากมีค่า a<sub>w</sub> และปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้น ส่งผลต่อการเจริญของจุลินทรีย์ โดยเฉพาะเชื้อรา รวมถึงพืชที่เชื้อราสร้างขึ้นด้วย ส่วนการบรรจุในสภาวะสุญญากาศพบว่าสามารถเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ในนานที่สุด เนื่องจาก การบรรจุในสภาวะสุญญากาศเป็นการดึงอากาศภายในภาชนะออกไปและผนึกแน่นไม่ให้มีอากาศเข้าไปได้อีก (Kernberger *et al.*, 2017) การที่ไม่มีออกซิเจนจะช่วยป้องกันการเจริญของจุลินทรีย์ที่ต้องใช้ออกซิเจน ซึ่งมักเป็นจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดการเสื่อมเสียของอาหาร และการใช้อุณหภูมิต่ำในการเก็บรักษา สามารถชะลอการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่ไม่ต้องการออกซิเจนหรือใช้ออกซิเจนเพียงเล็กน้อยในการเจริญเติบโต ส่งผลให้ยืดอายุการเก็บรักษาได้นานขึ้น (Aday and Caner, 2013)

**Table 3** Microbiological qualities of mooncake product during storage

Treatment	Storage time (days)	Total viable count (cfu/g)	Mold (cfu/g)
PP bag	0	$1.2 \times 10^1$	$1.2 \times 10^1$
	7	$5.3 \times 10^2$	$1.7 \times 10^1$
	14	$9.3 \times 10^3$	$3.0 \times 10^1$
	21	$2.4 \times 10^4$	$2.7 \times 10^2$
	28	-	-
	35	-	-
	42	-	-
PP +O <sub>2</sub> absorber	0	$1.0 \times 10^1$	$1.3 \times 10^1$
	7	$2.2 \times 10^2$	$1.5 \times 10^1$
	14	$7.5 \times 10^2$	$2.8 \times 10^1$
	21	$2.7 \times 10^3$	$4.6 \times 10^1$
	28	$6.8 \times 10^3$	$8.7 \times 10^1$
	35	$8.7 \times 10^4$	$5.0 \times 10^2$
	42	-	-
Nylon-LLDPE	0	$1.0 \times 10^1$	$1.2 \times 10^1$
	7	$1.3 \times 10^1$	$1.5 \times 10^1$
	14	$2.7 \times 10^2$	$2.7 \times 10^1$
	21	$4.1 \times 10^2$	$3.2 \times 10^1$
	28	$1.0 \times 10^3$	$4.8 \times 10^1$
	35	$5.8 \times 10^3$	$6.8 \times 10^1$
	42	$6.8 \times 10^4$	$2.1 \times 10^2$

## สรุป

จากการศึกษาปัจจัยร่วมระหว่างระยะเวลาในการเก็บรักษาและรูปแบบการบรรจุ 3 รูปแบบ พบว่า ส่งผลต่อคุณภาพทางกายภาพ เคมี และ จุลชีววิทยา ของผลิตภัณฑ์ขนมไหว้พระจันทร์ สภาวะการบรรจุในถุง PP สามารถเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิห้องได้นาน 14 วัน สภาวะการบรรจุในถุง PP+O<sub>2</sub> absorber สามารถเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิห้องได้นาน 28 วัน และสภาวะ

การบรรจุถุงสุญญากาศชนิด nylon-LLDPE สามารถเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิห้องได้นาน 35 วัน โดยที่ยังคงมีค่า aw ปริมาณความชื้น จุลินทรีย์ทั้งหมด และเชื้อรา อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนขนมเปียะ (Thai Industrial Standards Institute, 2003) ส่วนค่า TBA พบว่า ตลอดระยะเวลา 42 วัน ขนมไหว้พระจันทร์ที่บรรจุในสภาวะการบรรจุทั้ง 3 สภาวะ มีค่า TBA ไม่เกิน 1.6 มิลลิกรัมมาโลอัลดีไฮด์/กิโลกรัม ซึ่งหมายถึงไขมันเสื่อมเสียเล็กน้อย

ผลิตภัณฑ์ยังเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค ทั้งนี้การเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ในถุงสุญญากาศชนิด nylon-LLDPE สามารถชะลอการเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางกายภาพเคมี จุลินทรีย์ ของผลิตภัณฑ์ได้ นอกจากนี้การควบคุมคุณภาพระหว่างกระบวนการผลิต การบรรจุ และการเก็บรักษาเพื่อรอจำหน่าย ก็ยังเป็นส่วนหนึ่งที่ช่วยยืดอายุการเก็บรักษา ของผลิตภัณฑ์ได้อีกด้วย

### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา ที่ให้ทุนสนับสนุนการทำวิจัยในครั้งนี้ ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและการเกษตร ที่ให้การสนับสนุนสถานที่ในการทำวิจัย

### เอกสารอ้างอิง

Aday, M.S. and Caner, C. 2013. The shelf life extension of fresh strawberries using an oxygen absorber in the biobased package. **LWT-Food Science Technology** 52(2): 102-109.

AOAC. 2000. **Official Methods of Analysis of AOAC international**. 17<sup>th</sup> ed. Association of Official Analytical Chemists, Gaithersburg, Md.

Awoyale, W., Maziya, D.B. and Menkir, A. 2013. Effect of packaging materials and storage conditions on the physicochemical and chemical properties of ogi powder. **Journal of Food Agriculture and Environment** 11: 242-248.

Banchuen, J., Thammarutwasik, P., Ooraikul, B., Wuttijumngong, P. and Sirivongpaisal, P. 2009. Effect of germinating processes on bioactive component of Sangyod Muang Phatthalung rice. **Thai Journal of Agricultural Science** 42(4): 191-199.

Chaisirichote, P. 2011. The Development of reduced-calorie flaky chinese pastry (Kha-nom pai lek) by using fat replacer and fat replacer. Doctor of philosophy Thesis of science, Kasetsart University. (in Thai)

Changso, S. 2020. Development of production process and shelf-life extension of cooked sticky rice in bamboo shoot cut (kao lam) in Amphur Muang, Nakhon Pathom province. **VRU Research and Development Journal Science and Technology** 15(2): 1-15.

Chuaythong, C. and Rachtanpun, C. 2017. Effect of packaging film and oxygen absorber on shelf life extension of chinese pastry (Kha-nom pia). **Italian Journal of Food Science** 30(5): 51-56.

Chunu, N. 2010. Development of kha-nom-Pia with pineapple paste filling. Master thesis of science, Kasetsart University. (in Thai)

Chysirichote, T. and Mekrawee, N. 2016. **Research Report on Flaky Chinese Pastry (Kha-Nom Pia Kularb) Substituted Wheat flour with Sinin rice flour**. Suan Dusit University, Bangkok. (in Thai)

Chysirichote, T. and Mekrawee, N. 2018. The Use of sinin rice flour substituted wheat flour in the crust of flaky chinese pastry (kha-nom pia kularb). **RMUTP Research Journal** 12(1): 27-39. (in Thai)

Franceschini, B., Previdi, M.P. and Schianchi, I. 2020. Food Spoilage by Bacilli: Combined Effects of pH, aw and Storage Temperature on Spore Germination and Growth in Cultural Broth Added with Solutes and Organic Acids. **Journal of Advances in Microbiology** 20(3): 49-55.

- Gray, J.I. 1978. Measurement of lipid oxidation: A review. **Journal of the American Oil Chemist's Society** 55: 539-546.
- Jariyawanugoon, U. 2013. Combined effect of honey and O<sub>2</sub> absorber packaging on storage quality of chocolate sponge cake. **Advance Journal of Food Science and Technology** 5(3): 236-243.
- Kachele, R., Zhang, M., Gao, Z. and Adhikari, B. 2017. Effect of vacuum packaging on the shelf-life of silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) fillets stored at 4°C. **LWT Food Science and Technology** 80: 163-168.
- Kernberger, F., Kehrenberg, I.C., Klein, G., Schaudien, D. and Krischek, C. 2017. Influence of modified atmosphere and vacuum packaging with and without nanosilver-coated films on different quality parameters of pork. **Journal of Food Science and Technology** 54: 3251-3259.
- Khoshakhlagh, K., Hamdami, N., Shahedi, M. and Le-Bail, A. 2014. Quality and microbial characteristics of part-baked Sangak bread packaged in modified atmosphere during storage. **Journal of Cereal Science** 60: 42-47
- Laohasilpsomjit, S. 2018. Active packaging systems for dried tea. **Rajabhat Agricultural Journal** 17: 34-41. (in Thai)
- Phothapaeree, N., Jarusaksakul, N., Somwangthanaroj, A. and Tananuwong, K. 2017. Influence of packaging and storage conditions on quality parameters and shelf life of solar-dried banana. **Songklanakarin Journal of Science and Technology** 39(2): 253-260.
- Promkhan, S., Saithi, S. and Wongbasg, C. 2020. Effect of drying conditions and shelf life of crispy cricket product. **Khon Kaen Agricultural Journal** 48(1): 1-12. (in Thai)
- Ramzy, K.A., Ashok-Babu, T.P. and Kadoli, R. 2011. Semi-analytical method for heat and moisture transfer in packed bed of silica gel. **International Journal of Heat and Mass Transfer** 54: 983-993.
- Rotarwut, B., Pongpool, C., Jiu, P. and Palakawong, C. 2018. Process Development and Shelf Life Extension of Thai Custard Bread. **Prawarun Agricultural Journal** 15(1): 168-177. (in Thai)
- Salah, R.B., Slima, S.B., Ktari, N., chouikhi, A., Trabelsi, I., Hzami, A., Taktak, M.A. and Msaddak, L. 2022. Antioxidant activities, functional properties, and application of a novel *Lepidium sativum* polysaccharide in the formulation of cake. **Food Science and Nutrition** 10: 822-832.
- Suksripaisal, C. 2016. Production and storage of ready-to-eat reduced fat chineese sausage using hurdle technology. Master Thesis of Science, Thammasat University. (in Thai)
- Thai Industrial Standards Institute. 2003. **Community product standard: Khanom-Pia (115/ 2003)**. Available source: [https://tcps.tisi.go.th/pub/tcps0115\\_5](https://tcps.tisi.go.th/pub/tcps0115_5), August 18, 2022. (in Thai)
- Thuwawiroj, W. 2012. Shelf Life Extension of Chinese Rose Pie (Kha-Nom Pie Kularb) by Using Humectant and Packaging. Master Thesis of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang. (in Thai)

# การปรับปรุงคุณภาพเลือดโคปนเพื่อใช้เป็นส่วนผสมในอาหารปลาดุกลูกผสม

## Improvement of Blood Meal as an Ingredient in Hybrid Catfish

### (*Clarias macrocephalus* × *Clarias garepinus*) Diet

พรทิสาทองสนิทกาน, ธนภัทร วรปัสสุ\*, นัฐรินทร์ ศิริรัตนันท์ และ ปิยพงษ์ บางใบ

Pornalisa Thongsanitkan, Thanaput Worapussu\*, Nuttarin Sirirustananun and Piyapong Bangbai

Received: 1 April 2022, Revised: 27 February 2023, Accepted: 4 September 2023

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณค่าทางโภชนาการ ประสิทธิภาพการย่อยได้ของเลือดโคปนที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเอนไซม์ต่างกัน และเพื่อพัฒนาอาหารปลาดุกลูกผสมจากเลือดโคปนที่ระดับแตกต่างกัน ประกอบด้วยอาหารปลาดุกลูกผสมที่มีการใช้เลือดโคปนในระดับ 0, 2.5, 5 และ 7.5% ทำการทดลองเลี้ยงปลาดุกลูกผสมด้วยอาหารทดลองทั้ง 4 สูตร โดยให้อาหารปลาดุกในปริมาณ 5% ของน้ำหนักตัวต่อวัน แบ่งให้วันละ 3 มื้อ ทำการชั่งน้ำหนักเพื่อปรับปริมาณอาหารและเก็บข้อมูลการเจริญเติบโตทุก 2 สัปดาห์ เป็นระยะเวลา 8 สัปดาห์ พบว่า เลือดโคปนที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ มีคุณค่าทางโภชนาการและค่าการย่อยได้ดีกว่าเลือดโคที่ไม่ผ่านการหมักด้วยเอนไซม์ และปลาดุกลูกผสมที่ได้รับอาหารผสมเลือดโคปนในทุกระดับ มีค่าน้ำหนักสุดท้าย น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นต่อวัน ปริมาณอาหารที่กิน อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ และอัตราการรอดตาย เทียบเท่ากับชุดควบคุม ( $P > 0.05$ ) ส่วนต้นทุนการผลิตอาหาร พบว่า อาหารผสมเลือดโคปนมีต้นทุนที่ต่ำกว่าชุดควบคุม เท่ากับ  $31.20 \pm 1.60$ ,  $27.08 \pm 0.99$ ,  $28.01 \pm 3.84$  และ  $25.40 \pm 0.83$  บาทต่อน้ำหนักปลา 1 กิโลกรัม ตามลำดับชุดการทดลอง ซึ่งอาหารปลาดุกลูกผสมที่มีการใช้เลือดโคปน 7.5% สามารถลดต้นทุนการผลิตอาหารได้ถึง 18.59% ดังนั้น การใช้เลือดโคปนในอาหารปลาดุกลูกผสม มีผลต่อการเจริญเติบโตและอัตราการรอดตายของปลาที่เทียบเท่ากับชุดควบคุม และสามารถช่วยลดต้นทุนการผลิตอาหารสัตว์น้ำได้

คำสำคัญ: เลือดโคปน, ปลาดุกลูกผสม, อาหารปลา

คณะเทคโนโลยีการเกษตรและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ อำเภอเมือง จังหวัดเพชรบูรณ์ 67000

Faculty of Agricultural Technology and Industrial Technology, Petchabun Rajabhat University, Muang, Petchabun 67000, Thailand.

\* ผู้นิพนธ์ประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): thanaput.wor@pcru.ac.th Tel: 08 9461 3395

## ABSTRACT

The purpose of this research was to study nutritional value and digestibility efficiency of quality-improved blood meal using different enzymes, and to develop feed for hybrid catfish using different levels of cow's blood meal. The study comprised hybrid catfish diet containing 0, 2.5, 5 and 7.5% blood meal. The hybrid catfish were fed with all 4 diets, with catfish feeding at 5% of body weight per day, divided into 3 meals. Weighing was conducted to adjust feed intake, and growth data were collected every 2 weeks over 8-week period. It was found that the improved blood meal had better nutritional value and digestibility compared to non-enzymatically fermented blood. Additionally, the hybrid catfish fed with blood meal at all levels had the final weight, weight gain, daily weight gain, feed intake, feed conversion ratio and survival rate equivalent to the control group ( $P > 0.05$ ). As for the cost of feed production, it was found that the diets containing blood meal had lower costs compared to the control group, at  $31.20 \pm 1.60$ ,  $27.08 \pm 0.99$ ,  $28.01 \pm 3.84$  and  $25.40 \pm 0.83$  baht per 1 kg of fish weight, respectively. The hybrid catfish diet containing 7.5% blood meal could reduce feed production costs by 18.59%. Therefore, the inclusion of blood meal in hybrid catfish diet had an effect on growth and survival rate compared to the control group and could reduce the cost of aquatic animal feed production.

**Key words:** blood meal, hybrid catfish, fish diet

## บทนำ

ปัจจุบัน รูปแบบการเลี้ยงโคเป็นการเลี้ยงเพื่อจำหน่ายเป็นโคเนื้อ ทั้งนี้เพราะความต้องการบริโภคเนื้อสัตว์เพิ่มสูงขึ้น ทั้งจากความต้องการของประชากรในประเทศและของนักท่องเที่ยวต่างประเทส ลักษณะการเลี้ยงจะเป็นการเลี้ยงครั้งละหลาย ๆ ตัว และมีรูปแบบเป็นฟาร์มมากขึ้น ในขณะที่เดียวกันรัฐบาลไทยได้มีนโยบายส่งเสริมการเลี้ยงโคเนื้อ และเป็นโครงการหนึ่งในแผนปรับโครงสร้างและระบบการผลิตการเกษตร โดยหวังจะให้การเลี้ยงโคเนื้อเป็นอาชีพที่สร้างรายได้ให้กับเกษตรกรอย่างสม่ำเสมอ (Office of Regional Livestock 5, 2018) จากปริมาณความต้องการบริโภคเนื้อสัตว์ที่เพิ่มขึ้นรวมถึงการส่งเสริมจากรัฐทำให้ในปัจจุบันเกษตรกรหันมาเลี้ยงโคเนื้อเพื่อการค้ากันมากขึ้น ดังเห็นได้จากสถิติจำนวนโคเนื้อและ

เกษตรกรรายจังหวัดในพื้นที่จังหวัดเพชรบูรณ์ของปี 2563 มีสถิติจำนวนโคเนื้อทั้งหมด 54,128 ตัว และมีจำนวนเกษตรกร 4,082 ราย ส่วนในปี 2564 มีสถิติจำนวนโคเนื้อทั้งหมด 66,254 ตัว และมีจำนวนเกษตรกร 5,053 ราย และในปี 2565 มีสถิติจำนวนโคเนื้อทั้งหมด 84,361 ตัว และจำนวนเกษตรกร 6,171 ราย (Information and Communication Technology Center, 2022) ปริมาณโคเนื้อที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดตลาดและอุตสาหกรรมต่อเนื่อง โดยที่ตลาดในประเทศมีความต้องการบริโภคสูงถึง 1.2 ล้านตัวต่อปี แต่ผลิตได้เฉลี่ยปีละ 1 ล้านตัว ส่วนการส่งออกมีประมาณ 150,000 ตัวต่อปี ตลาดหลักคือ จีนและเวียดนาม (Koobkaew, 2018) จากอุตสาหกรรมการแปรรูปและตลาดโคเนื้อที่มีการขยายตัวอย่างต่อเนื่องทำให้เกิดเศษเหลือจากการแปรรูป หรือจากโรงฆ่าสัตว์เป็นจำนวน เช่น เศษเนื้อ เลือด และกระดูก เป็นต้น

เลือด เป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้จากโรงงานฆ่าสัตว์ นำมาหนึ่งเพื่อให้ตกตะกอน จากนั้นนำไปอบให้แห้งแล้วบดละเอียด จนเป็นเลือดป่น (blood meal) นำมาใช้เป็นวัตถุดิบแหล่งโปรตีนในอาหารสัตว์ โดยมีโปรตีนสูง มากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ แต่เป็นโปรตีนที่ย่อยได้ยาก แม้ว่าจะมีกรดอะมิโนไลซีน และ ทริปโตเฟนสูง แต่มีเมทไธโอนีนและ ไอโซลิวซีนต่ำมาก แสดงถึงความไม่สมดุลของกรดอะมิโน มีแร่ธาตุแคลเซียมและฟอสฟอรัสต่ำ มีความน่ากินต่ำ ควรใช้ร่วมกับอาหารชนิดอื่นเพื่อช่วยปรับหรือเสริมปริมาณกรดอะมิโนของสูตรอาหารให้สมดุลดีขึ้นจากการที่เลือดป่นมีคุณค่าทางโภชนาการสูง แต่เมื่อนำไปใช้ประกอบอาหารสัตว์ มักมีปัญหาในเรื่องการย่อยได้ ระดับการใช้จึงไม่ควรเกิน 5% (Jeerapan, 2006) ทำให้มีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการย่อยโปรตีนจากเลือดด้วยเอนไซม์เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของโปรตีนให้ดีขึ้น (Mahmoud, 1994) เช่น Kitsavat and Khunajakr (2006) ได้ศึกษาโปรตีนไฮโดรไลเซทจากเลือดสุกร โดยนำเลือดสุกรสดมาทดสอบการย่อยผ่านกิจกรรมของเอนไซม์ โปรติเอส 3 ชนิด เพื่อคัดเลือกเอนไซม์และศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการย่อยสลายโปรตีนจากเลือดสุกร มีการศึกษาการใช้เลือดป่นเป็นวัตถุดิบในอาหารหลายชนิด ได้แก่ Njieassam (2016) ได้ศึกษาผลของการใช้เลือดป่นต่อการเจริญเติบโตและการตายของปลาดุก พบว่า การใช้เลือดป่นที่ระดับ 10% ส่งผลต่ออัตราการเจริญเติบโตดีที่สุด Aladetohun and Sogbesan (2013) ที่ได้ศึกษาการใช้เลือดป่นเป็นส่วนประกอบในอาหารปลานิล ที่ระดับ 0, 50 และ 100% พบว่าปลานิลที่ได้รับอาหารผสมเลือดป่นที่ระดับ 100% มีการเจริญเติบโตสูงกว่า ( $P < 0.05$ ) ปลากลุ่มที่เลี้ยงด้วยอาหารผสมเลือดป่นระดับ 0% และ 50%

ด้วยเหตุผลข้างต้น คณะผู้วิจัยจึงเห็นถึงคุณประโยชน์ในการนำเลือดที่เป็นเศษเหลือจากการ

แปรรูปโคเนื้อมาเป็นวัตถุดิบอาหารสัตว์น้ำ โดยนำมาทดสอบการย่อยได้ และนำเลือดป่นมาไฮโดรไลเซทโปรตีนให้มีค่าการย่อยได้เพิ่มขึ้น ด้วยวิธีการหมักเลือดโคด้วยเอนไซม์ แล้วนำเลือดป่นที่ได้ไปพัฒนาสูตรอาหารสำหรับเลี้ยงปลาดุกผสมต่อไป เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาสูตรอาหารสัตว์น้ำ และเพิ่มมูลค่าของเศษเหลือ เป็นแนวทางการลดต้นทุนการผลิตสัตว์น้ำได้

## วิธีดำเนินการวิจัย

### 1. ศึกษาคุณค่าทางโภชนาการของเลือดโคป่น

ทำการเก็บรวบรวมเลือดสดในกระบวนการแปรรูปโคเนื้อจากโรงฆ่าสัตว์ หรือจากเขียงเนื้อ หรือร้านขายลาบเนื้อ มาหมักแช่ในเอนไซม์ที่แตกต่างกัน ได้แก่ เลือดโคสดหมักด้วยเอนไซม์บรอมิเลนสกัดเลือดโคสดหมักด้วยเอนไซม์ปาเปนสกัด เลือดโคสดหมักด้วยแกนสับปะรด และเลือดโคสดหมักด้วยเปลือกของผลมะละกอดิบ การใช้เอนไซม์สกัด ใช้ในปริมาณร้อยละ 0.2 ของตัวอย่างโดยน้ำหนัก ส่วนการใช้เปลือกของผลมะละกอดิบและแกนสับปะรด ใช้ในสัดส่วนเลือดโคป่น 100 g ต่อเปลือกของผลมะละกอดิบหรือแกนสับปะรด 300 g หมักแช่ทิ้งไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นกรองเอาแกนสับปะรดและเปลือกของผลมะละกอดิบออก นำเลือดโคหมักทั้ง 4 สูตรที่ได้ และเลือดโคสด ไปนึ่งให้สุก ทำให้แห้ง แล้วบดละเอียดให้เป็นผง นำส่งงานศูนย์วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ เพื่อตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ ความชื้น โปรตีน ไขมัน เยื่อใย และเถ้า ตามวิธีของ AOAC (2000)

### 2. ศึกษาประสิทธิภาพการย่อยเลือดโคป่นด้วยเอนไซม์

#### 2.1 การเก็บตัวอย่างลำไส้ปลาดุกผสม

เก็บลำไส้ปลาดุก โดยการนำปลาดุกผสมในรูปแบบสด ขนาด 200-250 g มาผ่าท้องด้วยมีด

ผ่าตัดปลา แล้วใช้กรรไกรผ่าตัด ตัดลำไส้ปลาถูก  
ถูกผสม เก็บรวบรวมและรักษาสภาพตัวอย่างในตู้  
แช่แข็งที่อุณหภูมิ  $-20^{\circ}\text{C}$

## 2.2 การสกัดเอนไซม์ย่อยอาหารจากลำไส้ปลาถูก ถูกผสม

นำลำไส้ปลาถูกถูกผสมที่เก็บรักษาสภาพ  
ในตู้แช่แข็งที่อุณหภูมิ  $-20^{\circ}\text{C}$  มาสกัดเอนไซม์ย่อย  
อาหาร โดยบดลำไส้ในเครื่อง homogenizer ด้วย 50 mM  
Tris-buffer pH 8.0 ที่มี 200 mM NaCl ในอัตราส่วน  
1:3 ที่อุณหภูมิ  $4^{\circ}\text{C}$  ให้ละเอียดแล้วนำไปปั่นเหวี่ยง  
ด้วยเครื่องเหวี่ยงตกตะกอน (Centrifuge) ที่ความเร็ว  
รอบ 10,000 รอบต่อนาที นาน 20 นาที เก็บส่วนใสไว้ใน  
ตู้แช่แข็งที่อุณหภูมิ  $-20^{\circ}\text{C}$

## 2.3 การทดสอบประสิทธิภาพการย่อยด้วยเอนไซม์

นำเลือดปลาที่ผ่านวิธีการเพิ่มค่าการย่อยได้  
ด้วยวิธีต่าง ๆ ได้แก่ เลือด โคสด เลือด โคสดหมักด้วย  
เอนไซม์บรอมิเลนสกัด เลือด โคสดหมักด้วยเอนไซม์  
ปาเปนสกัด เลือด โคสดหมักด้วยแกนสับปะรด และ  
เลือด โคสดหมักด้วยเปลือกของผลมะละกอดิบ  
ตัวอย่างละ 2 ซ้ำ โดยชั่งเลือดโคปน 5 ml ผสมกับ  
สารละลาย buffer pH 8 ให้เข้ากันด้วยเครื่อง vortex  
mixer บ่มที่  $30^{\circ}\text{C}$  เขย่าเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ปั่นเหวี่ยง  
ที่ความเร็วรอบ 15,000 รอบต่อนาที เพื่อเก็บเฉพาะ  
ส่วนใส นำสารละลายที่ได้จากการปั่นเหวี่ยง 1.5 ml  
ผสมกับเอนไซม์จากลำไส้ปลาถูก 250  $\mu\text{l}$  และนำไป  
เขย่าเป็นเวลา 24 ชั่วโมง หยุดปฏิกิริยาด้วยการต้มใน  
น้ำเดือดเป็นเวลา 10 นาที ปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ  
15,000 รอบต่อนาที เก็บเฉพาะส่วนใสมาทำการ  
วิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการย่อยโปรตีน ทำได้  
โดยนำส่วนใสที่ได้จากวิธีการข้างต้น ปริมาตร 400  $\mu\text{l}$   
เติมสารละลาย 0.1% TNBS 0.5 ml และสารละลาย  
buffer pH 8 ปริมาตร 1 ml ผสมให้เข้ากันด้วยเครื่อง  
Vortex mixer บ่มในที่มืด นาน 60 นาที เติมสารละลาย  
1M HCl ปริมาตร 1 ml วัดค่าความดูดกลืนแสงด้วย

เครื่อง Spectrophotometer ความยาวคลื่น 420 nm  
ตามวิธีของ Rungruangsak-Torissen *et al.* (2002)

## 3. พัฒนาสูตรอาหารปลาถูกถูกผสมจากเลือดโคปน

### 3.1 การเตรียมอาหารทดลอง

จากผลการทดสอบประสิทธิภาพการย่อย  
ด้วยเอนไซม์ จึงเลือกเลือดโคสดหมักด้วยเปลือกของ  
ผลมะละกอดิบ มาทำเลือดโคปนเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบ  
ลดต้นทุนในการผลิตอาหารปลาถูกถูกผสม เนื่องจาก  
ให้โปรตีนสูง เยื่อใยต่ำ และมีต้นทุนต่ำที่สุด เกษตรกร  
หรือผู้ใช้ประโยชน์สามารถทำได้เองในระดับ  
ครัวเรือน โดยการนำเลือด โคสดมาหมักแช่ไว้กับ  
เปลือกของผลมะละกอดิบ ในสัดส่วนเลือดโคปน  
100 g ต่อเปลือกของผลมะละกอดิบ 300 g เป็น  
ระยะเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำเลือดโคที่ผ่านการหมัก  
ย่อยไปนึ่งให้สุก ทำให้แห้ง และบดเป็นผง ทำการ  
สร้างสูตรอาหารปลาถูกถูกผสม ที่มีโปรตีนรวมใน  
สูตรอาหารเท่ากับ 30% (ตารางที่ 1) โดยเตรียม  
วัตถุดิบที่ต้องการในปริมาณที่กำหนดไว้ตามสูตร นำ  
ส่วนผสมทั้งหมดใส่ลงในกะละมังแล้วคลุกเคล้าให้  
เข้ากัน นำใส่เครื่องอัดเม็ดอาหาร แล้วนำไปตากผึ่ง  
ลมจนแห้งสนิท เก็บรักษาไว้ในบรรจุภัณฑ์ที่ปิดสนิท

ตารางที่ 1 ปริมาณวัตถุดิบในอาหารทดลอง

วัตถุดิบ (ร้อยละ)	อาหารทดลอง			
	ชุดควบคุม	เสริมเลือดโคปน 2.5 %	เสริมเลือดโคปน 5.0 %	เสริมเลือดโคปน 7.5 %
กากถั่วเหลือง 44%	37.5	33.0	27.7	22.5
ปลาป่น 60%	15.5	15.0	15.0	15.0
รำละเอียด	25.5	26.0	27.8	28.5
ปลายข้าว	18.0	20.0	21.0	23.0
น้ำมันพืช	3.5	3.5	3.5	3.5
เลือดโคปน	-	2.5	5.0	7.5
รวม (ร้อยละ)	100.0	100.0	100.0	100.0



ภาพที่ 1 เลือดโคปนจากการหมักด้วยเปลือกของผลมะละกอดิบ

### 3.2 การเตรียมระบบทดลอง

นำถังพลาสติกกลมขนาด 700 L มาทำความสะอาด โดยฆ่าเชื้อด้วยด่างทับทิมที่ความเข้มข้น 2 mg/L ประมาณ 1-2 วัน ล้างทำความสะอาดถึง เดิมน้ำสะอาดที่ผ่านการพักแล้วให้ได้ปริมาตร 500 L จนครบทั้ง 12 ถัง จากนั้นใช้อุปกรณ์ให้อากาศต่อกับเครื่องบ่มลมและหัวทราย ถึงละ 1 อัน ปรับแรงดันลมเพื่อเติมอากาศ

### 3.3 การดำเนินการทดลอง

ดำเนินการทดลองตามแผนการทดลองแบบ สุ่มสมบูรณ์ (CRD) ประกอบด้วย 4 ชุดการทดลอง ชุดการทดลองละ 3 ซ้ำ ได้แก่

ชุดการทดลองที่ 1 อาหารไม่ผสมเลือดโคปน (ชุดควบคุม)

ชุดการทดลองที่ 2 อาหารผสมเลือดโคปนที่ระดับ 2.5%

ชุดการทดลองที่ 3 อาหารผสมเลือดโคปนที่ระดับ 5.0%

#### ชุดการทดลองที่ 4 อาหารผสมเลือดโคปน ที่ระดับ 7.5%

ใช้ปลาอุกผสมขนาดเริ่มต้น 23-24 g ทดลองเลี้ยงเป็นเวลา 8 สัปดาห์ โดยปลาทดลองในแต่ละซ้ำถูกเลี้ยงในถังพลาสติกกลมขนาดความจุ 700 L ที่ความหนาแน่น 30 ตัวต่อน้ำ 500 L ต่อถัง ด้วยอัตราการให้อาหารที่ 5% ของน้ำหนักตัวต่อวัน แบ่งให้วันละ 3 มื้อ ตลอดการเลี้ยงมีการเปลี่ยนถ่ายน้ำ 50% สัปดาห์ละ 2 ครั้ง ทำการตรวจสอบคุณภาพน้ำ สัปดาห์ละครั้ง ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำ (pH) ด้วยเครื่อง pH meter ของ APERA รุ่น PH20 Value Pocket pH Tester Kit ควบคุมไม่ให้น้ำมีสีเขียว จัดเก็บไปเพื่อป้องกันไม่ให้ pH ของน้ำสูง โดยให้น้ำที่ใช้เลี้ยงปลามีค่า pH อยู่ระหว่าง 6.5-8.5 ส่วนค่าอุณหภูมิของน้ำ และค่าปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (Dissolved oxygen : DO) เก็บข้อมูลด้วย DO meter ของ Horiba รุ่น DO210 เลี้ยงปลาในโรงเรือนเพื่อควบคุมให้มีค่าอุณหภูมิของน้ำอยู่ระหว่าง 25-32 °C และมีวาล์วท่อลมเพื่อปรับเพิ่ม-ลดอากาศควบคุมให้ค่า DO มากกว่า 5 mg/L

#### 3.4 การเก็บข้อมูล

ชั่งน้ำหนักปลาอุกผสมทุกตัวในแต่ละหน่วยทดลอง เพื่อปรับปริมาณอาหารและเก็บข้อมูลการเจริญเติบโต ทุก 2 สัปดาห์ เป็นระยะเวลา 8 สัปดาห์ ได้แก่ ค่าน้ำหนักสุดท้าย ค่าน้ำหนักเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้น ค่าน้ำหนักเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้นต่อวัน ค่าปริมาณอาหารที่กิน ค่าอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ และค่าอัตราการรอดตาย ตามสูตรการคำนวณดังนี้ (Jantrarotai, 1993)

3.4.1 น้ำหนักเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้น (weight gain; กรัมต่อตัว) = น้ำหนักสุดท้าย - น้ำหนักเริ่มต้น

3.4.2 น้ำหนักเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้นต่อวัน (daily weight gain; กรัมต่อตัวต่อวัน)

= น้ำหนักปลาเฉลี่ยเมื่อสิ้นสุดการทดลอง - น้ำหนักปลาเฉลี่ยเมื่อเริ่มต้นการทดลอง / ระยะเวลาในการทดลอง

3.4.3 ปริมาณอาหารที่กิน (Feed Intake; กรัมต่อตัวต่อวัน) = อาหารที่ปลากินทั้งหมด / ระยะเวลา

3.4.4 อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ (Feed Conversion Ratio; FCR) = อาหารที่ปลากินทั้งหมด / น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น

3.4.5 อัตราการรอดตาย (Survival; เปอร์เซ็นต์) = (จำนวนปลาสุดท้ายเมื่อสิ้นสุดการทดลอง / จำนวนปลาเริ่มต้น) x 100

#### 3.5 การคำนวณต้นทุนการผลิตอาหาร

นำสัดส่วนของวัตถุดิบอาหารแต่ละสูตร และราคาของวัตถุดิบอาหารแต่ละชนิด มาคำนวณราคาของอาหารแต่ละสูตร และต้นทุนค่าอาหารต่อปลา 1 กิโลกรัม ตามสูตรการคำนวณ ดังนี้

3.5.1 ราคาอาหาร (บาทต่อกิโลกรัม) = ราคาวัตถุดิบอาหาร / ปริมาณวัตถุดิบในสูตรอาหาร

3.5.2 ต้นทุนค่าอาหารต่อน้ำหนักตัวปลาที่เพิ่มขึ้น 1 กิโลกรัม; Cost of diets (บาทต่อกิโลกรัม) = อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ x ราคาอาหาร

#### 3.6 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

นำข้อมูลประสิทธิภาพการย่อยเลือดโคปนด้วยเอนไซม์ และข้อมูลด้านการเจริญเติบโตของปลาคูผสมที่ได้รับอาหารผสมเลือดโคปน มาวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติ โดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA) ตามแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ และเปรียบเทียบความแตกต่างทางสถิติของค่าเฉลี่ยระหว่างชุดการทดลอง ด้วยวิธี Duncan's Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ผ่านโปรแกรม IBM SPSS Statistics 21

## ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

### 1. คุณค่าทางโภชนาการของเลือดโคปน

จากการศึกษาคุณค่าทางโภชนาการของเลือดโคปน นำไปวิเคราะห์โภชนาการที่เป็นองค์ประกอบทางเคมีเบื้องต้นในเลือดโคปน ได้แก่ ค่าความชื้น โปรตีน ไขมัน เยื่อใย และเถ้า ตามวิธีของ AOAC (2000) ได้ผลการวิจัยดังแสดงค่าในตารางที่ 2 พบว่า เลือดโคปนรูปแบบต่าง ๆ ได้แก่ เลือดโคสด เลือดโคสดหมักด้วยเอนไซม์บรอมิเลนสกัด เลือดโคสดหมักด้วยเอนไซม์ปาเปนสกัด เลือดโคสดหมักด้วยแกนสับประรด และเลือดโคสดหมักด้วยเปลือกของผลมะละกอดิบ มีค่าปริมาณความชื้นเท่ากับ 12.04, 11.06, 11.12, 11.45 และ 11.38% มีค่าปริมาณโปรตีนเท่ากับ 79.02, 81.76, 81.40, 80.15 และ 80.23% มีค่าปริมาณไขมันเท่ากับ 1.07, 0.79, 0.84, 0.97 และ 0.91% มีค่าปริมาณเยื่อใยเท่ากับ 0.80, 0.65, 0.70, 0.78 และ 0.72% และมีค่าปริมาณเถ้าเท่ากับ 4.85, 4.62, 4.65, 4.81 และ 4.74% ตามลำดับ จากผลการวิจัย พบว่า เลือดโคปนที่ผ่านการหมักด้วยเอนไซม์ในทุกรูปแบบ ให้คุณค่าทางโภชนาการสามารถนำไปเป็นวัตถุดิบอาหารสัตว์น้ำได้ ซึ่งเป็น

คุณสมบัติที่เหมาะสมกับโภชนาการที่สัตว์น้ำมีความต้องการ และส่งผลต่อการย่อยได้ของสัตว์น้ำ ถือว่าเป็นโปรตีนไฮโดรไลเซตที่มีคุณสมบัติที่สามารถนำไปเป็นวัตถุดิบทดแทนหรือวัตถุดิบเสริมในการผลิตอาหารสัตว์น้ำได้ โดยวัตถุดิบที่ใช้ผลิตโปรตีนไฮโดรไลเซตควรมีปริมาณโปรตีนไม่ต่ำกว่า 30% โดยน้ำหนักแห้ง (Adler-Nissen, 1986) ซึ่งปริมาณโปรตีนจากเลือดโคปนมีมากกว่า 30% โดยน้ำหนักแห้ง ดังนั้นเลือดโคปน จึงถือเป็นแหล่งของโปรตีนสำหรับการนำมาผลิตเป็นโปรตีนไฮโดรไลเซตได้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kitsavatt and Khunajakr (2006) ที่ได้ศึกษาเรื่อง โปรตีนไฮโดรไลเซตจากเลือดสุกร พบว่า จากการวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีในเลือดสุกรพบว่า มีองค์ประกอบหลักคือน้ำ 81.95% รองลงมาคือโปรตีน 15.34% นอกจากนี้มีไขมัน เถ้าและคาร์โบไฮเดรต 0.13, 1.21 และ 1.38% โดยน้ำหนักเปียก ตามลำดับ ซึ่งเมื่อคิดปริมาณโปรตีนจากเลือดสุกรแล้วพบว่ามีปริมาณโปรตีนสูงถึง 85.26% โดยน้ำหนักแห้ง ดังนั้นเลือดสุกรจึงถือเป็นแหล่งโปรตีนสำหรับการนำมาผลิตเป็นโปรตีนไฮโดรไลเซต และสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบเสริมหรือทดแทนแหล่งโปรตีนในอาหารสัตว์น้ำได้

ตารางที่ 2 คุณค่าทางโภชนาการของเลือดโคปน

รูปแบบเลือดโค	ความชื้น (%)	โปรตีน (%)	ไขมัน (%)	เยื่อใย (%)	เถ้า (%)
เลือดโคสด	12.04	79.02	1.07	0.80	4.85
เลือดโคสดหมักด้วยเอนไซม์บรอมิเลนสกัด	11.06	81.76	0.79	0.65	4.62
เลือดโคสดหมักด้วยเอนไซม์ปาเปนสกัด	11.12	81.40	0.84	0.70	4.65
เลือดโคสดหมักด้วยแกนสับประรด	11.45	80.15	0.97	0.78	4.81
เลือดโคสดหมักด้วยเปลือกของผลมะละกอดิบ	11.38	80.23	0.91	0.72	4.74

## 2. ประสิทธิภาพการย่อยเลือดโคปนด้วยเอนไซม์สกัดจากปลาชุกชุมผสม

การศึกษาประสิทธิภาพการย่อยเลือดโคปนด้วยเอนไซม์ โดยการเก็บลำไส้ปลาชุกมาสกัดเอนไซม์ย่อยอาหาร และนำมาทดสอบการย่อยเลือดโคปนที่ผ่านวิธีการเพิ่มค่าการย่อยได้ด้วยวิธีต่าง ๆ ได้ผลการวิจัยดังแสดงค่าในตารางที่ 3 พบว่า เอนไซม์จากลำไส้ สามารถย่อยโปรตีนในเลือดโคปนที่ผ่านการเพิ่มค่าการย่อยได้ด้วยวิธีการไฮโดรไลซิสโปรตีนด้วยเอนไซม์ ได้แก่ เลือดโคสด เลือดโคสดหมักด้วยเอนไซม์บรอมิเลนสกัด เลือดโคสดหมักด้วยเอนไซม์ปาเปนสกัด เลือดโคสดหมักด้วยแกนสับปะรด และเลือดโคสดหมักด้วยเปลือกของผลมะละกอดิบ พบว่า เอนไซม์จากลำไส้ปลาชุกมีค่าความสามารถในการย่อยโปรตีนในเลือดโคปนรูปแบบต่าง ๆ มีค่าเท่ากับ  $0.046 \pm 0.17$ ,  $0.224 \pm 0.11$ ,  $0.219 \pm 0.08$ ,  $0.135 \pm 0.28$  และ  $0.157 \pm 0.21$  mg/ml ตามลำดับ โดยเอนไซม์จากลำไส้ปลาชุกผสม คือกลุ่มของเอนไซม์โปรติเอส ซึ่งเป็นเอนไซม์ย่อยโปรตีน สามารถย่อยโปรตีนในเลือดหมักได้ดีกว่าเลือดสด เป็นเช่นนี้เนื่องจากการหมักย่อยด้วยเอนไซม์สกัดจนเป็นโปรตีนไฮโดรไลเซท

เป็นการย่อยสลายโปรตีนที่บริเวณพันธะเปปไทด์ เพื่อให้ได้เปปไทด์สายสั้นและกรดอะมิโนอิสระ (Severin and Xia, 2006) ส่งผลต่อประสิทธิภาพการย่อยได้ของปลา โดยปลาชุกผสมสามารถย่อยโปรตีนในเลือดหมักทุกรูปแบบได้ดีกว่าเลือดสด ถือเป็นวิธีการปรับปรุงคุณภาพโปรตีนของเลือดโคปน ให้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ดีขึ้นต่อไป เช่นเดียวกับโปรตีนไฮโดรไลเซทจากเลือดสุกรที่พบว่า เอนไซม์ Alcalase 2.4 L มีประสิทธิภาพในการย่อยโปรตีนได้ดีกว่าเอนไซม์ Allzyme FPD และเอนไซม์ Bromelain โดยให้ระดับการย่อยสลายสูงสุดที่ 43.49% โดยเอนไซม์ทั้ง 3 ชนิดจัดอยู่ในกลุ่มของเอนไซม์โปรติเอส (Kitsavat and Khunajakr, 2006) ซึ่งในปัจจุบันการย่อยสลายโปรตีนโดยการใช้อินไซม์โปรติเอสจากแหล่งต่าง ๆ กำลังได้รับความนิยม เพราะการใช้อินไซม์โปรติเอสในการย่อยสลายโปรตีนที่บริเวณพันธะเปปไทด์จะทำให้ได้เปปไทด์ที่มีขนาดเล็ก และกรดอะมิโนอิสระปริมาณมาก สามารถควบคุมระดับการย่อย การกระจายตัวของขนาดโปรตีนไฮโดรไลเซทที่ได้ขึ้นดี และยังเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมอีกด้วย (Madman and Prasertsan, 2002)

ตารางที่ 3 ประสิทธิภาพการย่อยเลือดโคปนด้วยเอนไซม์

รูปแบบเลือดโค	การย่อยได้ (mg/ml)
เลือดโคสด	$0.046 \pm 0.17^b$
เลือดโคสดหมักด้วยเอนไซม์บรอมิเลนสกัด	$0.224 \pm 0.11^a$
เลือดโคสดหมักด้วยเอนไซม์ปาเปนสกัด	$0.219 \pm 0.08^a$
เลือดโคสดหมักด้วยแกนสับปะรด	$0.135 \pm 0.28^{ab}$
เลือดโคสดหมักด้วยเปลือกของผลมะละกอดิบ	$0.157 \pm 0.21^{ab}$
P-value	0.036

หมายเหตุ: ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ย  $\pm$  ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ที่ตามด้วยตัวอักษรที่ต่างกันในกลุ่มเดียวกันแสดงถึงความแตกต่างทางสถิติ ( $P \leq 0.05$ )

### 3. ผลของสูตรอาหารปลาอุกผสมจากเลือดโคปนต่อการเจริญเติบโต

การพัฒนาสูตรอาหารปลาอุกผสมจากเลือดโคปนที่ผ่านวิธีเพิ่มค่าการย่อยได้ที่แตกต่างกัน 4 สูตร ทั้งนี้ได้เลือกเลือดโคปนที่ผ่านการหมัก หรือการไฮโดรไลซิสโปรตีนในเลือดด้วยเอนไซม์จากเปลือกของผลมะละกอดิบ มาใช้เป็นวัตถุดิบลดต้นทุนในการผลิตอาหารปลาอุกผสม เนื่องจากเป็นสูตรการไฮโดรไลซ์เลือดโคปนที่มีต้นทุนต่ำที่สุด และ

เกษตรกรหรือผู้ใช้ประโยชน์สามารถจัดหาวัตถุดิบได้ในท้องถิ่นของตน และสามารถทำได้เองในระดับครัวเรือน มาทำการสร้างสูตรอาหารปลาอุกผสมที่มีโปรตีนรวม 30% และมีการใช้เลือดโคปนที่ผ่านการหมักด้วยเปลือกของผลมะละกอดิบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ในระดับที่แตกต่างกัน ได้แก่ 0.0, 2.5, 5.0 และ 7.5% เมื่อนำไปทดลองเลี้ยงปลาอุกผสมเป็นเวลา 8 สัปดาห์ ได้ผลการวิจัยดังแสดงค่าในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 การเจริญเติบโต อัตราการรอดตายของปลาอุกผสม ที่ได้รับอาหารผสมเลือดโคปนระดับต่างกัน เป็นเวลา 8 สัปดาห์

พารามิเตอร์	อาหารทดลอง				P-value
	ควบคุม	เลือดปน 2.5%	เลือดปน 5.0%	เลือดปน 7.5%	
น้ำหนักเริ่มต้น (กรัมต่อตัว)	23.70 ± 0.67	23.72 ± 0.42	23.70 ± 0.34	23.70 ± 0.67	0.998
น้ำหนักสุดท้าย (กรัมต่อตัว)	69.13 ± 6.20	72.20 ± 4.90	77.11 ± 8.94	76.10 ± 3.12	0.415
น้ำหนักเริ่มต้น (กรัมต่อตัว)	23.70 ± 0.67	23.72 ± 0.42	23.70 ± 0.34	23.70 ± 0.67	0.998
น้ำหนักสุดท้าย (กรัมต่อตัว)	69.13 ± 6.20	72.20 ± 4.90	77.11 ± 8.94	76.10 ± 3.12	0.415

หมายเหตุ: ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ( $P > 0.05$ )

จากผลการศึกษาการเสริมเลือดโคปนในอาหารปลาอุกผสมที่ระดับต่างกัน ได้แก่ 0.0, 2.5, 5.0 และ 7.5 เปอร์เซ็นต์ ต่อการเจริญเติบโต ประสิทธิภาพการใช้อาหาร และอัตราการรอดตาย พบว่า น้ำหนักเริ่มต้น น้ำหนักสุดท้าย น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น น้ำหนักเพิ่มขึ้นเฉลี่ยต่อวัน ปริมาณอาหารที่กิน อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ และอัตราการรอดตาย ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P > 0.05$ ) ซึ่งผลการทดลองใช้เลือดโคปนผสมในอาหารปลาในครั้งนี้ให้ผลการเจริญเติบโตของ

ปลาอุกผสมที่เทียบเท่ากับชุดควบคุม ที่ไม่มีส่วนผสมของเลือดโคปน เนื่องจาก ปลาไว้อ่อนต้องการสารอาหารประเภทโปรตีนเป็นสำคัญให้เพียงพอกับความต้องการเพื่อใช้ในการดำรงชีพและเจริญเติบโต ซึ่งควรเป็นโปรตีนที่มีคุณภาพ ย่อยง่าย ดูดซึมได้ดี มีกรดอะมิโนที่สมดุล ในปริมาณที่เพียงพอกับความต้องการของสัตว์น้ำ ซึ่งเลือดปนเป็นวัตถุดิบโปรตีนสูง แต่เป็นโปรตีนคุณภาพต่ำ ความสมดุลของกรดอะมิโนไม่ดีนัก มีผลในการลดประสิทธิภาพการย่อยโปรตีน (Hatlen *et al.*, 2015)

ทั้งนี้อาจเป็นเพราะมีหลายปัจจัยเข้ามามีบทบาทต่อความสามารถในการใช้ประโยชน์จากเลือดปลา เช่น สูตรอาหาร สายพันธุ์ อายุ การจัดการการเลี้ยง รวมถึงสถานที่ในการเลี้ยง (Ogello *et al.*, 2014) และเนื่องด้วยความสะดวกของกรดอะมิโนบางตัวในเลือดปลา ซึ่งไม่เพียงพอกับความต้องการสำหรับนำไปใช้ในการเจริญเติบโตของสัตว์น้ำ จึงควรมีการใช้เลือดปลา ร่วมกับวัตถุดิบอื่น เช่น การเสริมด้วย L-lysine ในอาหารเลี้ยงปลาตู้กัก ทำให้สามารถใช้เลือดปลาในสูตรอาหารได้มากขึ้น โดยที่ปลายังคงมีการเจริญเติบโตปกติ และช่วยประหยัดต้นทุนลงได้มาก (El-Husseiny *et al.*, 2018) เช่นเดียวกับการศึกษาในปลา gilthead seabream ที่แสดงให้เห็นค่อนข้างชัดเจน ว่าการใช้เลือดปลา ร่วมกับวัตถุดิบอื่นเป็นส่วนประกอบในสูตรอาหารในสัดส่วนที่เหมาะสม ช่วยทำให้ปลามีการใช้ประโยชน์จากอาหาร และมีการเจริญเติบโตที่ดี (Nogueira *et al.*, 2012)

#### 4. ผลการศึกษาต้นทุนการผลิตอาหาร

จากการศึกษาต้นทุนการผลิตอาหารในการเสริมเลือดปลาเพื่อเลี้ยงปลาดุกผสม พบว่า ราคาอาหารทั้ง 4 สูตร เท่ากับ 18.43, 18.15, 17.94 และ 17.76 บาทต่อกิโลกรัม ตามลำดับชุดการทดลอง และต้นทุนค่าอาหารต่อน้ำหนักตัวปลาที่เพิ่มขึ้น 1 กิโลกรัมเท่ากับ  $46.08 \pm 1.60$ ,  $45.38 \pm 0.99$ ,  $41.80 \pm 3.84$  และ  $42.62 \pm 0.83$  บาทต่อกิโลกรัม ตามลำดับชุดการทดลอง ดังตารางที่ 5 ต้นทุนการผลิตอาหารขึ้นอยู่กับสถานการณ์ราคาของวัตถุดิบในสูตรอาหารซึ่งการเลือกใช้วัตถุดิบท้องถิ่น หรือเศษเหลือจากการแปรรูปทางภาคการเกษตรและอุตสาหกรรมมาเสริมในสูตรอาหารสัตว์น้ำ จะช่วยลดต้นทุนการผลิตอาหารได้ ซึ่งการลดต้นทุนด้านอาหารลงได้ ถือว่าเป็นการลดต้นทุนในกระบวนการผลิตสัตว์น้ำได้เป็นอย่างมาก เนื่องจากต้นทุนค่าอาหารถือเป็นต้นทุนหลักในการผลิตคิดเป็น 70 – 80% ของต้นทุนการผลิตรวมทั้ง

หมด (Jintasataporn, 2010) ซึ่งการใช้วัตถุดิบเศษเหลือที่อย่างเลือดปลาในอาหารปลาดุกผสม ทำให้ได้ต้นทุนอาหารที่ต่ำลง สามารถช่วยลดต้นทุนได้ โดยต้นทุนค่าอาหารสัตว์น้ำจะมีราคาต่ำลงเมื่อมีการใช้เลือดปลาในปริมาณที่เพิ่มขึ้นในสูตรอาหาร แม้อาหารปลาดุกผสมที่มีการใช้เลือดปลา 5% ในสูตรอาหารมีต้นทุนการผลิตอาหารต่ำที่สุด แต่ไม่แตกต่างกับต้นทุนของอาหารปลาดุกผสมที่มีการใช้เลือดปลา 7.5% ในสูตรอาหาร ผลการศึกษาต้นทุนในครั้งนี้ มีผลการศึกษาที่ขัดแย้งกับงานวิจัยของ Didgrew *et al.* (2008) ที่ได้ศึกษาผลของการเสริมเอนไซม์ปาเปนในอาหารต่อสมรรถภาพการผลิตในไก่เนื้อ ที่พบว่าต้นทุนในการเสริมเอนไซม์ปาเปนมีผลทำให้ต้นทุนในด้านค่าอาหารสูงขึ้นตามระดับในการเสริมเอนไซม์ แต่ในการวิจัยครั้งนี้พบว่า ราคาต่อกิโลกรัมของอาหารที่มีการเสริมเลือดปลาที่ผ่านการย่อยโปรตีนด้วยยางมะละกามีราคาต่ำกว่าอาหารชุดควบคุมและอาหารสัตว์น้ำทางการค้า ซึ่งมีราคาจำหน่ายอยู่ระหว่าง 28 – 32 บาทต่อกิโลกรัม ทั้งนี้เนื่องจากใช้ยางมะละกอจากผิวของผลดิบมะละกอที่ได้จากท้องถิ่น โดยเป็นมะละกอดิบพันธุ์ดำเนิน จากตลาดค้าส่งพืชผักตลาดเสียดิสร อำเภอลำสัก จังหวัดเพชรบูรณ์ ราคาจำหน่ายถุงบรรจุ 10 กิโลกรัม ถุงละ 140 บาท (National news bureau of Thailand, 2023) มีราคาถูก เมื่อนำมาคิดต้นทุน ทำให้มีต้นทุนที่ต่ำลงด้วย และยังพบว่า ขัดแย้งกับงานวิจัยของ (Karaket *et al.*, 2021) ที่ได้ศึกษาการใช้เลือดปลาทดแทนปลาป่นบางส่วน ในอาหารต่อการเจริญเติบโตระยะอนุบาลปลานิลแดง (*Oreochromis spp.*) พบว่า สูตรอาหารเม็ดแบบผลิตเองมีราคาผลิตต่ำกว่าท้องตลาด โดยราคาอาหารเม็ดสำเร็จรูปที่มีโปรตีนประมาณ 30% ตามท้องตลาดทั่วไปนั้นมีราคาไม่ต่ำกว่ากิโลกรัมละ 32 บาท แต่เมื่อพิจารณาต้นทุนการผลิตต่อน้ำหนักปลา 1 กิโลกรัม จะพบว่าไม่

เหมาะกับการอนุบาลลูกปลานิลแดงขนาดน้ำหนักเริ่มต้น 0.98 กรัม และยังมีต้นทุนเพิ่มมากขึ้นถ้าใช้เลือดปนในสูตรอาหาร แต่ถ้าเป็นการเลี้ยงลูกปลานิลแดงขนาดน้ำหนักเริ่มต้น 4.50 กรัม จะมีความเหมาะสมเพราะมีต้นทุนที่ต่ำ และสามารถใช้อุณหภูมิ

ในสูตรอาหารได้ที่ระดับ 5% โดยไม่มีผลกระทบต่อ การเจริญเติบโต และต้นทุนค่าอาหาร อีกทั้งเป็นการช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมจากการใช้ของเหลือทิ้งจากโรงงานฆ่าสัตว์ให้เกิดประโยชน์

ตารางที่ 5 ต้นทุนการผลิตอาหาร

สูตรอาหาร	ราคาอาหาร (บาทต่อกิโลกรัม)	ต้นทุนค่าอาหารต่อน้ำหนักตัวปลาที่เพิ่มขึ้น 1 กิโลกรัม (บาทต่อกิโลกรัม)
ควบคุม	18.43	46.08 ± 1.60 <sup>a</sup>
เลือดปน 2.5%	18.15	45.38 ± 0.99 <sup>a</sup>
เลือดปน 5.0%	17.94	41.80 ± 1.84 <sup>b</sup>
เลือดปน 7.5%	17.76	42.62 ± 0.83 <sup>b</sup>

หมายเหตุ1: ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ที่ตามด้วยตัวอักษรที่ต่างกันในกลุ่มนี้แสดงถึงความแตกต่างทางสถิติ ( $P \leq 0.05$ )

หมายเหตุ2: ราคาวัตถุดิบอาหารรอบการซื้อในช่วงปี พ.ศ. 2564 ประกอบด้วยปลายข้าวกิโลกรัมละ 10 บาท รำละเอียดกิโลกรัมละ 8 บาท กากถั่วเหลือง (44%) กิโลกรัมละ 18 บาท ปลาป่น (60%) กิโลกรัมละ 42 บาท น้ำมันพืชลิตรละ 38 บาท และเลือดโคปนกิโลกรัมละ 20 บาท

## สรุป

เลือดโคปนมีองค์ประกอบของโภชนาที่ครบถ้วน และเมื่อผ่านกระบวนการปรับปรุงโปรตีนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยได้ ก็สามารถเป็นวัตถุดิบแหล่งโปรตีนที่สัตว์น้ำสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ ซึ่งเมื่อนำเลือดโคปนมาเป็นส่วนผสมในอาหาร และนำไปเลี้ยงปลาดุกผสมนั้น ส่งผลให้ปลาดุกผสมมีการเจริญเติบโตและอัตราการรอดตายที่ดีเทียบเท่ากับชุดควบคุมที่เป็นอาหารผสมสำเร็จ ทั้งนี้ควรเลือกใช้ส่วนผสมในอาหารให้หลากหลาย และควรเสริมกรดอะมิโนที่จำเป็นบางชนิดเพื่อให้เกิดความสมดุล การใช้เลือดปนในปริมาณที่สูงขึ้นในสูตรอาหารจะช่วยลดต้นทุนค่าอาหารได้ ฉะนั้นสามารถใช้เลือดโคปนได้ถึงระดับปริมาณ 7.5% ในอาหาร โดยไม่ส่งผลกระทบต่อการ

เจริญเติบโตและอัตราการรอดตายของปลา รวมถึงสามารถลดต้นทุนได้เป็นอย่างดี ทั้งนี้ควรเลือกใช้ส่วนผสมในอาหารให้หลากหลาย และควรเสริมกรดอะมิโนที่จำเป็นบางชนิดเพื่อให้เกิดความสมดุล ส่งผลต่อค่าเฉลี่ยผลการเจริญเติบโตของปลาที่มีแนวโน้มที่ดีขึ้น

## กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ และงบประมาณแผ่นดิน งบประมาณผ่านกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม (สกสว.) ภายใต้แผนงานยุทธศาสตร์การวิจัยและพัฒนานวัตกรรม ประจำปีงบประมาณ 2563 รหัสโครงการ PCRU\_2563\_TSRI007 เพื่อใช้ในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้

## เอกสารอ้างอิง

- Adler-Nissen, J. 1986. **Enzymic Hydrolysis of Food Protein**. Vanderbilt, New York.
- Aladetohun, N.F. and Sogbesan, O.A. 2013. Utilization of blood meal as a protein ingredient from animal waste product in the diet of *Oreochromis niloticus*. **International Journal of Fisheries and Aquaculture** 5(9): 234-238.
- AOAC. 2000. **Official Methods of Analysis**. 15<sup>th</sup> ed. Association of Official Analytical Chemists, Arlington, Virginia.
- Didgrew, A., Siriwan, P., Thongwittaya, N. and Prokati, W. 2008. Effects of Papain Supplementation on Productive Performance in Broilers. **Journal of Agricultural Research and Extension** 25(2): 17-23. (in Thai)
- El-Husseiny, O.M., Hassan, M.I., El-Haroun, E.R. and Suloma, A. 2018. Utilization of poultry by-product meal supplemented with L-lysine as fish meal replacer in the diet of African catfish *Clarias gariepinus* (Burchell, 1822). **Journal of Applied Aquaculture** 30(1): 63-75.
- Hatlen, B., Jakobsen, J.V., Crampton, V., Alm, M., Langmyhr, E., Espe, M. and Waagbø, R. 2015. Growth, feed utilization and endocrine responses in Atlantic salmon (*Salmo salar*) fed diets added poultry by-product meal and blood meal in combination with poultry oil. **Aquaculture nutrition** 21(5): 714-725.
- Information and Communication Technology Center. 2022. **Number of farmers and beef cattle by province in 2022**. Statistical data report. Department of Livestock Development, Bangkok. (in Thai)
- Jantrarotai, W. 1993. Research planning in fish feed. **Journal of Fisheries** 46(4): 323-330. (in Thai)
- Jeerapan, T. 2006. **Blood meal**. Feedstuffs. Available Source: [http://elearning.nsruc.ac.th/web\\_elearning/animal/lesson2\\_5.php](http://elearning.nsruc.ac.th/web_elearning/animal/lesson2_5.php), June 13, 2020. (in Thai)
- Jintasataporn, O. 2010. **Aquatic animal feed (251371)**. Teaching documentation. Department of Aquaculture, Faculty of Fisheries, Kasetsart University, Bangkok. (in Thai)
- Karaket, T., Seel-audom, M. and Yuangsoi B. 2021. Partial Replacement of Fish Meal with Blood Meal in Diet on Growth Performance for Nursing Red Tilapia (*Oreochromis spp.*). **Burapha Science Journal** 27(2): 801-814. (in Thai)
- Kitsavat, S. and Khunajakr, N. 2006. Protein hydrolysate from porcine blood, pp. 418-425. *In Proceedings of 59<sup>th</sup> Kasetsart University Annual Conference: Science*. Kasetsart University, Bangkok. (in Thai)
- Koobkaew, K. 2018. **Farmers boom raising "meat cattle" for export - China's big market**. Economy region. Available Source: <https://www.prachachat.net/localeconomy/news-130855>, September 3, 2020. (in Thai)
- Madman, W. and Prasertsan, P. 2002. Products from bioconversion of seafood processing wastes with biotechnology methods and application. **Songklanakarin Journal of Science and Technology** 24(2): 341-356. (in Thai)
- Mahmoud, M.I. 1994. Physicochemical and functional properties of protein hydrolysates in nutritional products. **Food Technology** 48: 89-95.

- National news bureau of Thailand. 2023. **Phetchabun Province Monitor the situation of consumer products Consumption is constantly sensitive.** Economy / Travel. Available Source: <https://thainews.prd.go.th /th/news/detail/TCATG220118134555427>, September 3, 2023. (in Thai)
- Njieassam, E.S. 2016. Effects of using Blood Meal on the Growth and Mortality of Catfish. **Journal of Ecosystem & Ecography** 6(3): 204-212.
- Nogueira, N., Cordeiro, N., Andrade, C. and Aires, T. 2012. Inclusion of low levels of blood and feathermeal in practical diets for gilthead seabream (*Sparus aurata*). **Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences** 12(3): 641-650.
- Office of Regional Livestock 5. 2018. **Strategy of cattle in the Upper Northern Thailand; 2017 – 2021.** Office of Regional Livestock 5 strategic document, Chiang Mai. (in Thai)
- Ogello, E.O., Munguti, J.M., Sakakura, Y. and Hagiwara, A. 2014. Complete replacement of fish meal in the diet of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) grow-out with alternative protein sources. A review. **International Journal of Advanced Research** 2(8): 962-978.
- Rungruangsak-Torissen, K., Rustad, A., Sunde, J., Eiane, S.A., Jensen, H.B., Opstvedt, J., Nygard, E., Samuelsen, T.A., Mundheim, H., Luzzana, U. and Venturini, G. 2002. In vitro digestibility based on fish crude enzyme extract for prediction of feed quality in growth trial. **Journal of the Science of Food and Agriculture** 82: 644-654.
- Severin, S. and Xia, W.S. 2006. Enzymatic hydrolysis of whey proteins by two different proteases and their effect on the functional properties of resulting protein hydrolysates. **Journal of Food Biochemistry** 30(1): 77-97.

# ความหลากหลายของสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกตามลำธารนอกเขตป่าอนุรักษ์ ในอำเภอธารโต และอำเภอเบตง จังหวัดยะลา

## Amphibians Diversity along the Stream Line outside Protection Area at Than To District and Betong District, Yala Province

สิทธิศักดิ์ จันทรรัตน์<sup>1</sup> อานิช โดะพงษ์<sup>2</sup> เรสเฟีย หล่าปุเต๊ะ<sup>2</sup> สมศักดิ์ บัวทิพย์<sup>1\*</sup> เทียนทิพย์ ไกรพรหม<sup>1</sup> และ พันย์ยี่สิน<sup>1</sup>  
Siththisak Jantarat<sup>1</sup>, Anis Tohpong<sup>2</sup>, Resfeeya Lamputeh<sup>2</sup>, Somsak Buatip<sup>1\*</sup>, Thaintip Kraiprom<sup>1</sup> and Pun Yeesin<sup>1</sup>

Received: 19 April 2022, Revised: 26 October 2022, Accepted: 1 December 2023

### บทคัดย่อ

ความหลากหลายของสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกตามลำธารนอกเขตป่าอนุรักษ์ ในอำเภอธารโต และอำเภอเบตง จังหวัดยะลา โดยการเดินสำรวจด้วยวิธีการสำรวจแบบพบเห็นตัว จำนวน 3 ครั้ง ในเดือนธันวาคม พ.ศ. 2562 เดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2563 และเดือนมีนาคม พ.ศ. 2564 ในเวลากลางคืนระหว่างเวลา 19.00 น. - 22.00 น. ตามลำธารที่ไหลผ่านพื้นที่เกษตรกรรม ในหมู่บ้านวังไทร อำเภอธารโต และบ้านซาโห อำเภอเบตง พบสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบก ทั้งหมด 2 อันดับ 7 วงศ์ 28 ชนิด โดยบ้านวังไทรพบ 25 ชนิด บ้านซาโหพบ 21 ชนิด ค่าดัชนีความหลากหลายชนิดที่บ้านวังไทรเท่ากับที่บ้านซาโห ( $H' = 2.50$ ) ส่วนค่าดัชนีความสม่ำเสมอ ( $E'$ ) ที่บ้านซาโหเท่ากับ 0.82 สูงกว่าที่บ้านวังไทรซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.78 บ้านวังไทรมีชนิดพันธุ์ที่พบบ่อย 2 ชนิด ปานกลาง 11 ชนิด และพบน้อย 12 ชนิด ส่วนที่บ้านซาโหมีชนิดพันธุ์ที่พบบ่อย 1 ชนิด ปานกลาง 9 ชนิด และพบน้อย 11 ชนิด และมีสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบก 2 ชนิด ที่มีสถานภาพด้านการอนุรักษ์ใกล้ถูกคุกคาม (NT) ได้แก่ กบหูด (*Limnodynastes blythii*) และกบหูกลมลาย (*Limnodynastes malesianus*) ดังนั้น ในการอนุรักษ์จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งเพื่อปกป้องรักษาชนิดพันธุ์ โดยเฉพาะการให้ความสำคัญในเรื่องการทำเกษตรแบบธรรมชาติหรือเกษตรปลอดภัย และลดการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์จากที่ดิน ลดการขยายพื้นที่เพาะปลูก รวมทั้งการลดจับชนิดพันธุ์ที่เป็นสัตว์เศรษฐกิจ

คำสำคัญ: สัตว์สะเทินน้ำสะเทินบก, ค่าดัชนีความหลากหลายชนิด, ค่าดัชนีความสม่ำเสมอ, จังหวัดยะลา

<sup>1</sup> คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี อำเภอเมือง จังหวัดปัตตานี 94000

<sup>1</sup> Faculty of Science and Technology, Prince of Songkla University, Pattani Campus, Mueng, Pattani 94000, Thailand.

<sup>2</sup> คณะศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี อำเภอเมือง จังหวัดปัตตานี 94000

<sup>2</sup> Faculty of Education, Prince of Songkla University, Pattani Campus, Mueng, Pattani 94000, Thailand.

\* ผู้รับผิดชอบประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): somsak.bu@psu.ac.th

## ABSTRACT

The study of amphibian diversity along the stream line outside protection area in Than To District and Betong District, Yala Province. The amphibians were counted using the visual encounter survey method in December 2019, July 2020, and March 2021 at 7.00 pm. – 10.00 pm. In this study, a total of 2 orders, 7 families, and 28 species were recorded: 25 species in Ban Wang Sai village, Than To district, and 21 species in Ban Saho village, Betong district. The Shannon-Wiener diversity index at both study sites was similar ( $H' = 2.50$ ). Moreover, the evenness index in Ban Saho village (0.82) was higher than in Ban Wang Sai village (0.78). The frequency of species occurrence in Ban Wang Sai village included 2 common species, 11 moderately common species, and 12 uncommon species. In Ban Saho village, there was 1 common species, 9 moderately common species, 7 uncommon species, and 2 near-threatened (*Limnodynastes dorsalis* and *L. maculata*). Therefore, in conservation, it is necessary to protect species by emphasizing natural or good agricultural practices, reducing land use changes, and limiting the expansion of cultivation areas. This includes reducing the catch of economic species.

**Key words:** amphibian, Shannon-Wiener diversity index, evenness index, Yala Province

### บทนำ

จังหวัดยะลาเป็นจังหวัดที่อยู่ใต้สุดของประเทศไทยอยู่ระหว่างเส้นรุ้งที่ 5-7 องศาเหนือและเส้นแวงที่ 100-102 องศาตะวันออก มีพื้นที่ทั้งหมด 2,796,884.02 ไร่ ภูมิประเทศมีลักษณะเป็นภูเขา เนินเขา และหุบเขา สูงกว่าระดับน้ำทะเลปานกลางถึงสูงมาก พื้นที่ส่วนใหญ่ปกคลุมด้วยป่าดงดิบ ป่าเป็นป่าดิบชื้น (Tropical rainforest) ข้อมูลในปี 2564 มีเนื้อที่ป่าทั้งหมด 907,560.15 ไร่ (32.44%) ประกอบด้วยป่าสงวนแห่งชาติ พื้นที่ป่าไม้ถาวร (ป่าตามมติ ค.ร.ม.) พื้นที่ป่าไม้ ตาม พ.ร.บ.ป่าไม้ พ.ศ. 2484 ทั้งยังมีพื้นที่อนุรักษ์ 2 แห่ง ได้แก่ อุทยานแห่งชาติบางลาง และเขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่า ฮาลา-บาลา ทำให้มีสัตว์ป่าอาศัยอยู่อย่างชุกชุม (Royal Forest Department, 2021)

จากข้อมูลปัจจุบัน ทั่วโลกมีรายงานสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกประมาณ 8,043 ชนิด ในประเทศไทยมีรายงานประมาณ 176 ชนิด โดยเป็นกลุ่มซาลาแมนเดอร์ 3 ชนิด กลุ่มเขียดงู 6 ชนิด และกลุ่ม

กบ เขียด คางคก อึ่ง และปาด 167 ชนิด (Niyomwan et al., 2019) ความสำคัญของสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกในประเทศไทยถือได้ว่าเป็นทุนทางทรัพยากรชีวภาพที่สำคัญ คือ เป็นแหล่งโปรตีนราคาถูกที่นิยมนำมาบริโภคทำให้เกิดอาชีพการทำฟาร์มและอาชีพต่อเนื่อง มีการพัฒนาสารที่หลังจากผิวหนังต่อยอดเป็นยาปฏิชีวนะของในวงศ์คางคก และมีบทบาทสำคัญในระบบนิเวศเป็นตัวถ่ายทอดพลังงานภายในห่วงโซ่อาหาร และควบคุมสมดุลในธรรมชาติ รวมทั้งเป็นตัวชี้วัดคุณภาพของสิ่งแวดล้อม (Chanard, 2003; Biodiversity-based Economy Development Office, 2016) อย่างไรก็ตาม ข้อมูลการศึกษาความหลากหลายของสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกส่วนใหญ่มาจากการศึกษาในพื้นที่อนุรักษ์ สำหรับในพื้นที่ภาคใต้ของประเทศไทยมีการศึกษาสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกในพื้นที่เขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่าคลองแสง จังหวัดสุราษฎร์ธานี พบเฉพาะกลุ่มกบ 39 ชนิด (Taksintum et al., 2006) และในพื้นที่อุทยานแห่งชาติ

น้ำตกห้วยยาง จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ พบเฉพาะกลุ่มกบ 32 ชนิด (Khamkaew *et al.*, 2021) ส่วนในพื้นที่ภาคใต้ตอนล่างมีรายงานเฉพาะในพื้นที่ป่าฮาลา-บาลา โดยสถานีวิจัยสัตว์ป่าป่าพรุ-ป่าฮาลาบาลา (Hala-Bala Wildlife Research Station, 2013) พบสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกในพื้นที่ป่า 61 ชนิด เป็นต้น แต่การศึกษาความหลากหลายชนิดในพื้นที่เกษตรกรรมซึ่งมีลักษณะพื้นที่ที่แตกต่างออกไปกลับไม่ค่อยมีการรายงาน พบเฉพาะการศึกษาในพื้นที่เกษตรกรรมในอุทยานแห่งชาติน้ำตกโยง จังหวัดนครศรีธรรมราช พบ 14 ชนิด (Meesook, 2019) และในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือในพื้นที่เกษตรกรรมบริเวณเขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่าภูหลวง จังหวัดเลย (Phochayavanich *et al.*, 2008) พบ 21 ชนิด เป็นต้น

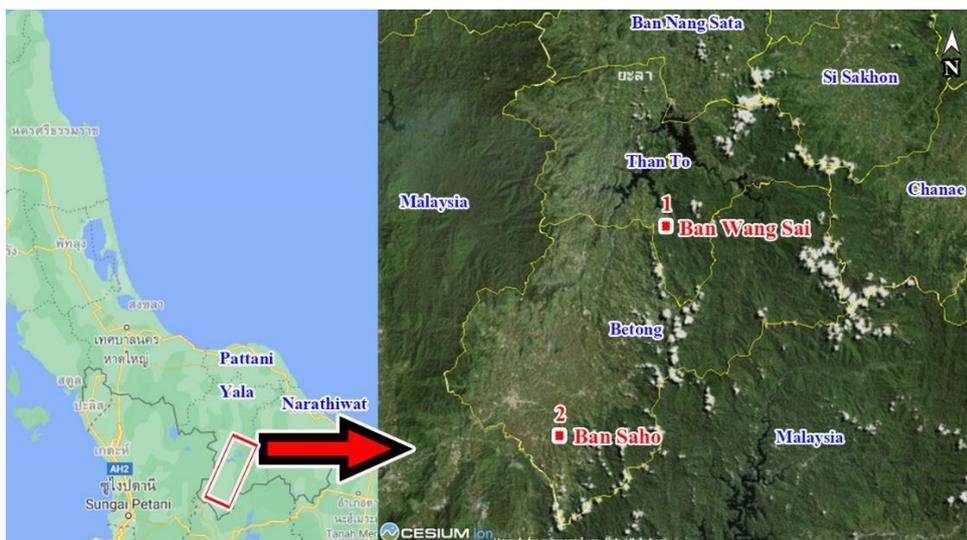
ดังนั้น ผู้วิจัยจึงเลือกศึกษาความหลากหลายของสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกตามลำธารนอกเขตป่าอนุรักษ์ ในพื้นที่บ้านวังไทร ตำบลแม่หวาด อำเภอธารโต และบ้านซาโห่ ตำบลธารน้ำทิพย์ อำเภอเบตง จังหวัดยะลา ซึ่งไม่เคยมีการศึกษาในพื้นที่มาก่อนหน้านี้ โดยผลการศึกษาในครั้งนี้จะเป็นข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญให้กับชุมชนสู่การบริหารจัดการพื้นที่และการทำเกษตรกรรมที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมเนื่องจากสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกหลายชนิดเป็นสัตว์เฉพาะถิ่นและมีความสัมพันธ์โดยตรงกับแหล่งน้ำ มีบทบาทที่สำคัญในระบบนิเวศทั้งเป็นผู้ล่าและเหยื่อเพื่อรักษาสมดุลในห่วงโซ่อาหาร

การรักษาแหล่งที่อยู่อาศัยของสัตว์ป่าให้ปลอดภัยเท่ากับเป็นการปกป้องรักษาไว้ซึ่งชนิดพันธุ์ และยังเป็น การช่วยป้องกันรักษาป่าต้นน้ำลำธารและป่าไม้ที่มีอยู่ในพื้นที่แห่งนี้ให้คงอยู่ถาวรตลอดไป

## วิธีดำเนินการวิจัย

### 1. พื้นที่ศึกษา

บ้านวังไทร หมู่ 2 ตำบลแม่หวาด อำเภอธารโต เป็นชุมชนสุดท้ายติดกับพื้นที่ป่าอนุรักษ์บริเวณเขตอุทยานแห่งชาติบางลาง มีสภาพพื้นที่เป็นภูเขา สลับซับซ้อนกระจายอยู่ทั่วไป มีพื้นที่ราบเล็กน้อย พิกัด 6° 00'39"N, 101°16'09"E มีความสูงจากระดับน้ำทะเลประมาณ 170 - 300 เมตร และบ้านซาโห่ หมู่ 4 ตำบลธารน้ำทิพย์ อำเภอเบตง เป็นชุมชนอยู่ในเขตป่าต้นน้ำอนุรักษ์และป่าต้นน้ำ นอกเขตป่าสงวนแห่งชาติป่าเบตง มีสภาพพื้นที่เป็นภูเขาสลับซับซ้อนกระจายอยู่ทั่วไป พิกัด 5° 40'20"N, 101°08'46"E มีความสูงจากระดับน้ำทะเลประมาณ 300-350 เมตร ซึ่งทั้ง 2 ชุมชน เกษตรกรใช้พื้นที่ปลูกพืชเศรษฐกิจหลายชนิด เช่น ทุเรียน เงาะ มังคุด ลองกอง และยางพารา เป็นหลัก โดยบริเวณริมและขอบของลำธารเป้าหมายเกษตรกรยังคงรักษาสภาพป่าดั้งเดิมเอาไว้เพื่อป้องกันการพังทลายของตลิ่ง (Figure 1)



**Figure 1** Study area survey of amphibian among stream and agriculture areas outside conservation forest, Yala Province

## 2. การสำรวจ

สำรวจสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกโดยวิธีการสำรวจแบบพบเห็นตัว (Visual Encounter Survey) (Heyer *et al.*, 1994) เก็บข้อมูลจำนวน 3 ครั้ง คือในเดือนธันวาคม พ.ศ. 2562 เดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2563 และเดือนมีนาคม พ.ศ. 2564 บริเวณลำธารที่กำหนดในเวลากลางคืน ตั้งแต่เวลา 19.00 น. – 22.00 น. ซึ่งลำธารเป้าหมายไหลผ่านพื้นที่เกษตรกรรมในหมู่บ้านทั้งสองแห่ง รวม 2 เส้นทาง เส้นทางละ 1,000 เมตร (บ้านวังไทรสำรวจตามลำธารแม่หวาด และที่บ้านซาไห้สำรวจตามลำธารซาไห้) ระบุชนิดและบันทึกจำนวนสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกทุกตัวที่พบการจำแนกชนิดอ้างอิงจากหนังสือสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกของประเทศไทย (Amphibian of Thailand) (Niyomwan *et al.*, 2019) และสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกป่าฮาลา-บาลา (Amphibian of Hala-Bala) (Hala-Bala Wildlife Research Station, 2013)

## 3. การวิเคราะห์ข้อมูล

1. วิเคราะห์ค่าดัชนีความหลากหลายชนิด ตามสูตรของ Shannon-Wiener Index (Shannon, 1949)

$$H' = - (\sum_{i=1}^S p_i \ln p_i)$$

$H'$  คือ ค่าดัชนีความหลากหลายชนิด

$p_i$  คือ สัดส่วนจำนวนชนิดของสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกชนิด  $i$  ต่อจำนวนของชนิดสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกทั้งหมด

$S$  คือ จำนวนชนิดสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกทั้งหมด

2. วิเคราะห์ค่าดัชนีความสม่ำเสมอ (Evenness Index)

$$E' = \frac{H'}{\ln(S)}$$

$E'$  คือ ค่าความสม่ำเสมอ

$H'$  คือ ค่าดัชนีความหลากหลายชนิดของ Shannon-Wiener

$S$  คือ จำนวนชนิดสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกทั้งหมด

3. ความชุกชุมหรือความถี่ของการปรากฏ (Frequency of species occurrence) ของสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกแต่ละชนิด โดยตัดแปลงตามวิธีของ Meesook (2019)

$$\text{ความชุกชุมของสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกชนิด } i = \frac{\text{จำนวนครั้งของการพบสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกชนิด } i \times 100}{\text{จำนวนครั้งของการสำรวจทั้งหมด}}$$

โดยใช้เกณฑ์ในการตัดสินความชุกชุมคัดแปลงจาก Meesook (2019) ดังนี้

- ค่าความถี่ของการปรากฏ มีค่าน้อยกว่า 40 หมายถึง "พบน้อย (uncommon)"  
 มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 70 หมายถึง "ปานกลาง (moderately common)"  
 มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 70 หมายถึง "พบบ่อย (common)"

## ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

จากการศึกษาพบสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกตามลำธารนอกเขตป่าอนุรักษ์ในอำเภอธารโต และอำเภอเบตง จังหวัดยะลา ทั้งหมด 28 ชนิด 2 อันดับ 7 วงศ์ โดยที่บ้านวังไทรพบสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกทั้งหมด 25 ชนิด ส่วนที่บ้านซาโห่พบสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบก 21 ชนิด (Table 1) ค่าดัชนีความหลากหลายที่บ้านวังไทรเท่ากับที่บ้านซาโห่ (2.50) ส่วนค่าดัชนีความสม่ำเสมอที่บ้านซาโห่เท่ากับ 0.82 สูงกว่าที่บ้านวังไทรซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.78 สถานภาพความชุกชุมพิจารณาตามเกณฑ์ของ Meesook (2019) สามารถแบ่งกลุ่มสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกในพื้นที่ศึกษาตามความชุกชุมได้ดัง Table 1 โดยมีรายละเอียดดังนี้

### 1) บ้านวังไทร ต.แม่หวาด อ.ธารโต จ.ยะลา

**พบบ่อย (common)** มี 2 ชนิด คือ กบหนอง (*Fejervarya limnocharis*) และ กบ ว่ากใหญ่ (*Pulchrana glandulosa*)

**ปานกลาง (moderately common)** มี 11 ชนิด คือ กบทูต (*Limnectes blythii*) กบทูตมลายู (*Limnectes malesianus*) กบห้วยขาปุมมลายู (*Limnectes utara*) กบเขาหลังตองมลายู (*Chalcorana labialis*) กบชะง่อนผาใต้ (*Odorrana hosii*) กบว่ากเล็ก (*Pulchrana laterimaculata*) คางคกแคระ (*Ingerophrynus parvus*) จงโคร่ง (*Phrynomantis asper*) ปาดเขียวตีนดำ (*Rhacophorus nigropalmatus*) อึ่งหลังขีต (*Micryletta inornata*) และ อึ่งกรายหัวแหลม (*Megophrys nasuta*)

**พบน้อย (uncommon)** มี 12 ชนิด คือ เขียดทราย (*Occidozyga martensii*) กบบัว (*Hylarana erythraea*) กบหลังจุด (*Pulchrana signata*) กบอ่องมลายู (*Sylvirana malayana*) ปาดเรียวมลายู (*Polypedates discantus*) ปาดไต้ (*Polypedates leucomystax*) อึ่งอ่างบ้าน (*Kaloula pulchra*) อึ่งแม่หนาว (*Microhyla berdmorei*) อึ่งลายเลอะ (*Microhyla butleri*) อึ่งข้างดำ (*Microhyla heymonsi*) อึ่งกรายลายจุด (*Leptobrachium hendricksoni*) และ อึ่งกรายหัวมน (*Megophrys aceras*)

### 2) บ้านซาโห่ ต.ธารน้ำทิพย์ อ.เบตง จ.ยะลา

**พบบ่อย (common)** มี 1 ชนิด คือ จงโคร่ง (*Phrynomantis asper*)

**ปานกลาง (moderately common)** มี 9 ชนิด คือ กบหนอง (*Fejervarya limnocharis*) กบทูต (*Limnectes blythii*) เขียดทราย (*Occidozyga martensii*) กบลายหินใต้ (*Amolops larutensis*) กบเขาหลังตองมลายู (*Chalcorana labialis*) กบบัว (*Hylarana erythraea*) กบชะง่อนผาใต้ (*Odorrana hosii*) กบว่ากใหญ่ (*Pulchrana glandulosa*) และ ปาดไต้ (*Polypedates leucomystax*)

**พบน้อย (uncommon)** มี 11 ชนิด คือ กบหัวโต (*Limnectes macrognathus*) กบทูตมลายู (*Limnectes malesianus*) กบห้วยขาปุมมลายู (*Limnectes utara*) กบว่ากเล็ก (*Pulchrana laterimaculata*) กบหลังจุด (*Pulchrana signata*) กบอ่องมลายู (*Sylvirana malayana*) คางคกแคระ

(*Ingerophrymus parvus*) ปาดเรียวมลายู (*Polypedates discantus*) อึ่งอ่างบ้าน (*Kaloula pulchra*) อึ่งกรายลายจุด (*Leptobrachium hendricksoni*) และเขียดงูศุภชัย (*Ichthyophis supachaii*)

ในการศึกษาคั้งนี้พบจำนวนชนิดของสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกคิดเป็น 45% ของจำนวนชนิดที่พบในป่าฮาลา-บาลา (Hala-Bala Wildlife Research Station, 2013) เนื่องจากทั้งสองพื้นที่ในอดีตเป็นผืนป่าเดียวกันกับป่าฮาลา-บาลา ซึ่งคณะผู้วิจัยคาดว่าน่าจะพบชนิดทั้งหมดเหมือนกับรายงานของสถานีวิจัยสัตว์ป่าพรุ-ป่าฮาลาบาลา แต่กลับพบว่ามียหลายชนิดที่ยังไม่มีรายงานในพื้นที่ก่อนหน้านี้ (Table 2)

มีสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบก 3 ชนิด ที่พบเฉพาะที่บ้านซาโห คือ กบหัวโต (*Limnonectes macrognathus*) กบลายหินใต้ (*Amolops larutensis*) และเขียดงูศุภชัย (*Ichthyophis supachaii*) และ 7 ชนิด พบเฉพาะที่บ้านวังไทร คือ ปาดเขี้ยวดินดำ (*Rhacophorus nigropalmatus*) อึ่งแม่หนาว (*Microhyla berdmorei*) อึ่งลายเลอะ (*Microhyla butleri*) อึ่งข้างดำ (*Microhyla heymonsi*) อึ่งหลังขีด (*Micryletta inornata*) อึ่งกรายหัวมน (*Megophrys aceras*) และอึ่งกรายหัวแหลม (*Megophrys nasuta*)

เมื่อเปรียบเทียบชนิดของสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกในคั้งนี้กับการศึกษาในพื้นที่อื่น ๆ พบว่า

จำนวนชนิดที่พบในการศึกษาคั้งนี้สูงกว่าที่มีรายงานการศึกษาในพื้นที่เกษตรกรรมในอุทยานแห่งชาติน้ำตกโยง จังหวัดนครศรีธรรมราช ซึ่งพบสัตว์กลุ่มนี้เพียง 14 ชนิด (Meesook, 2019) และพื้นที่เกษตรกรรมบริเวณเขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่าภูหลวง จังหวัดเลย พบ 21 ชนิด (Phochayavanich *et al.*, 2008) เป็นต้น และเมื่อเทียบกับการศึกษาในพื้นที่อนุรักษ์บริเวณอื่น ๆ พบว่า ในการศึกษาคั้งนี้มีจำนวนชนิดน้อยกว่าในเขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่าคลองแสง จังหวัดสุราษฎร์ธานี ซึ่งพบเฉพาะกลุ่มกบถึง 39 ชนิด (Taksintum *et al.*, 2006) และอุทยานแห่งชาติน้ำตกห้วยยาง จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ พบเฉพาะกลุ่มกบ 32 ชนิด (Khamkaew *et al.*, 2021) เป็นต้น นอกจากนี้ยังพบว่า มีชนิดของสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกที่พบในการศึกษาคั้งนี้เหมือนกับในพื้นที่เกษตรกรรมในอุทยานแห่งชาติน้ำตกโยง จังหวัดนครศรีธรรมราช (Meesook, 2019) 9 ชนิด ในพื้นที่เกษตรกรรมบริเวณเขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่าภูหลวง จังหวัดเลย (Phochayavanich *et al.*, 2008) 7 ชนิด และในพื้นที่อนุรักษ์อื่น ๆ เช่น ในเขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่าคลองแสง จังหวัดสุราษฎร์ธานี (Taksintum *et al.*, 2006) 11 ชนิด และอุทยานแห่งชาติน้ำตกห้วยยาง จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ (Khamkaew *et al.*, 2021) 9 ชนิด เป็นต้น รายละเอียดดัง Table 2

Table 1 Species, IUCN Red List, number of individual (n) and frequency of species occurrence of amphibian in stream flow across agricultural habitats outside conservation forest

Order/Family/Scientific name	Common name	Thai name	IUCN		Ban Wang Sai		Ban Saho	
			Red List	n	Frequency	n	Frequency	
<b>Order Gymnophyona</b>								
<b>Family Ichthyophiidae</b>								
<i>Ichthyophis supachaii</i>	Nakon Si Thammarat Caecilian, Supachai's Caecilian	เขียดงูสุกชาย	DD	-	-	1	uncommon	
<b>Order Anura</b>								
<b>Family Megophryidae</b>								
<i>Leptobrachium hendricksoni</i>	Spotted Litter Frog, Hendrickson's Litter Frog	อึ่งกรายลายจุด	LC	3	uncommon	2	uncommon	
<i>Megophrys aceras</i>	Perak Spadefoot Toad, Malayan Horned Frog	อึ่งกรายหัวมัน	LC	1	uncommon	-	-	
<i>Megophrys nasuta</i>	Long-nosed Horned Frog	อึ่งกรายหัวแหลม, อึ่งกรายขมูกแหลม	LC	3	moderately common	-	-	
<b>Family Bufonidae</b>								
<i>Ingerophrynus parvus</i>	Indochinese Dwarf Toad, Lesser Malacca Toad	คางคกแคระ, คางคกเล็ก, คางคกไฟ	LC	4	moderately common	1	uncommon	
<i>Phrynooidis asper</i>	Giant Asiatic Toad, Java Toad	จิ้งโครง, กง, หมาน้ำ, กะหอง, คางคกยักษ์	LC	34	moderately common	36	common	
<b>Family Microhylidae</b>								
<i>Kaloula pulchra</i>	Painted Burrowing Frog, Asian Painted Frog	อึ่งอ่างบ้าน, หลิ่ง, อึ่งยาง	LC	2	uncommon	1	uncommon	
<i>Microhyla berdmorei</i>	Pegu Rice Frog, Berdmore's Chorus Frog	อึ่งแม่หนาว, เขียดโปะ, เขียดขายา	LC	1	uncommon	-	-	
<i>Microhyla butleri</i>	Butler's Chorus Frog, Noisy Chorus Frog	อึ่งลายเดอะ, อึ่งลายแต้	LC	2	uncommon	-	-	
<i>Microhyla heymonsi</i>	Dark-sided Chorus Frog	อึ่งข้างดำ, อึ่งข้างดำ	LC	9	uncommon	-	-	
<i>Micryletta inornata</i>	Spot-backed Chorus Frog, Stripe-backed Chorus Frog	อึ่งหลังจืด	-	3	moderately common	-	-	
<b>Family Dicroglossidae</b>								
<i>Fejervarya limnocharis</i>	Grass Frog, Rice Field Frog	กบหนอง, เขียดหนอง, เขียดอีไม่	LC	16	common	11	moderately common	
<i>Limnonectes blythii</i>	Blyth's Wart Frog, Giant Mountain Frog, Blyth's Giant Frog	กบตุ๊ด, เขียดเดา, กบภูเขา, กบบดง	NT	6	moderately common	32	moderately common	
<i>Limnonectes macrognathus</i>	Big-headed Frog	กบหัวโต	LC	-	-	2	Uncommon	

Table 1 (Continous)

Order/Family/Scientific name	Common name	Thai name	IUCN		Ban Wang Sai		Ban Saho	
			Red Lis	n	Frequency	n	Frequency	n
<i>Limnonectes molestianus</i>	Singapore Wart Frog, Peat swamp frog, Malaysia Swamp Frog	กบหูตมลายู	NT	6	moderately common	2	uncommon	
<i>Limnonectes utara</i>	Malayan stream frog	กบหัวขลุ่ยมลายู	-	2	moderately common	1	uncommon	
<i>Oecidozyga martensii</i>	Marten's Oriental Frog, Martens's Puddle Frog	เขียดทราย, เขียดน้ำนองที่ราบ	LC	4	uncommon	9	moderately common	
<b>Family Ranidae</b>								
<i>Amolops larutensis</i>	Larut Sucker Frog, Larut cascade Frog	กบลายหินใต้	LC	-	-	7	moderately common	
<i>Chalcorana labialis</i>	White-lipped Frog	กบขาหลังตองมลายู	-	29	moderately common	12	moderately common	
<i>Hylarana erythraea</i>	Common Green Frog, Red-eared Frog	กบบัว, เขียดจิก, เขียดเขียว, เขียดบัว	LC	4	uncommon	7	moderately common	
<i>Odorrana hosii</i>	Hose's Frog, Hose's Rock Frog	กบชะง่อนผาใต้	LC	56	moderately common	29	moderately common	
<i>Pulchrana glandulosa</i>	Rough-sided Frog	กบว่ากัใหญ่	LC	7	common	15	moderately common	
<i>Pulchrana laterimaculata</i>	side-spotted Swamp Frog, Masked Rough-sided Frog, Lesser Rough-side Frog	กบว่ากัเล็ก	LC	4	moderately common	4	uncommon	
<i>Pulchrana signata</i>	Variable-backed Frog, Spotted stream Frog	กบหลังจุด	LC	1	uncommon	1	uncommon	
<i>Sylvirana malayana</i>	Malayan dark-side Frog	กบอ้อมมลายู	-	2	uncommon	1	uncommon	
<b>Family Rhacophoridae</b>								
<i>Polypedates discantus</i>	Malayan slender Tree Frog	ปาดเขียวมลายู	-	1	uncommon	8	uncommon	
<i>Polypedates leucomystax</i>	Common Tree Frog, Four-lined Tree Frog	ปาดใต้, ปาดบ้าน	LC	4	uncommon	18	moderately common	
<i>Rhacophorus nigropalmatus</i>	abah River Flying Frog, Wallace's Tree Frog, Black-webbed Tree Frog	ปาดเขียวตีนดำ	LC	5	moderately common	-	-	

ค่าดัชนีความหลากหลายชนิด ทั้งที่บ้านวังไทร และบ้านซาโห (2.50) เมื่ออ้างอิงตามเกณฑ์ของ Tudorance *et al.* (1975) และ Soe-been and Musigatham (2008) แสดงให้เห็นว่าแหล่งอาศัยบริเวณลำธารที่ไหลผ่านพื้นที่เกษตรกรรมของทั้ง 2 หมู่บ้านเป็นแหล่งน้ำที่มีความเหมาะสมต่อการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำเช่นเดียวกับผลการศึกษาของ Phochayavanich *et al.* (2008) ในพื้นที่เกษตรกรรมบริเวณเขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่าภูหลวง จังหวัดเลย (2.29) โดยทั้ง 2 พื้นที่ที่มีคุณภาพของสิ่งแวดล้อมดีกว่าพื้นที่เกษตรกรรมในเขตอุทยานแห่งชาติน้ำตกโยง จังหวัดนครศรีธรรมราช ซึ่งมีค่าดัชนีความหลากหลายเพียง 0.93 (Meesook, 2019) เท่านั้น ซึ่งมีค่าต่ำกว่า 1 บ่งชี้ว่าแหล่งน้ำในบริเวณดังกล่าวมีคุณสมบัติไม่เหมาะสมสำหรับการอาศัยของสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบก อาจเป็นเพราะสัตว์ถูกรบกวนจากกิจกรรมในพื้นที่เกษตรกรรม เช่น การเปลี่ยนแปลงระบบนิเวศย่อย และสิ่งปลูกสร้างต่าง ๆ เป็นต้น (Taksintum *et al.*, 2010)

ค่าดัชนีความสม่ำเสมอที่บ้านซาโห เท่ากับ 0.82 สูงกว่าที่บ้านวังไทร ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.78 อาจเนื่องมาจากที่บ้านวังไทรกิจกรรมที่เกิดขึ้นในพื้นที่เกษตรกรรมมีมากกว่าและบ่อยกว่าที่บ้านซาโห ส่งผลต่อพื้นที่อาศัยและพื้นที่หากินของสัตว์ในกลุ่มนี้ (Bishop *et al.*, 1999; Taksintum *et al.*, 2010; Niyomwan *et al.*, 2019) โดยทั้ง 2 พื้นที่จากการศึกษาครั้งนี้สูงกว่าพื้นที่เกษตรกรรมในเขตอุทยานแห่งชาติน้ำตกโยง จังหวัดนครศรีธรรมราช (0.31) (Meesook, 2019)

จากการศึกษาครั้งนี้ พบว่า มีสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกที่จัดเป็นสัตว์ป่าคุ้มครองของประเทศไทย 3 ชนิด คือ จงโคร่ง (*Phrynowis asper*) กบหูต (Limnodynastes dorsalis) และคางคกแคระ (*Ingerophrynus parvus*) (Biodiversity-based Economy Development Office, 2016) ส่วนสถานภาพด้านการอนุรักษ์จากบัญชีแดงของสหภาพเพื่อการอนุรักษ์ธรรมชาติ (The IUCN

Red List of Threatened Species. Version 2022-1) (International Union for Conservation of Nature and Natural Resources, 2022) สามารถจำแนกสถานภาพชนิดพันธุ์ด้านการอนุรักษ์ของสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกในการศึกษาครั้งนี้ ออกเป็น 3 กลุ่มสถานภาพด้านการอนุรักษ์ คือ กลุ่มสถานภาพใกล้ถูกคุกคาม (NT) 2 ชนิด คือ กบหูต (*Limnodynastes dorsalis*) และกบหูตมลายู (*Limnodynastes malesianus*) กลุ่มสถานภาพข้อมูลไม่เพียงพอที่จะประเมิน (DD) 1 ชนิด คือ เขียดงูศุกชัย (*Ichthyophis supachaii*) กลุ่มที่ยังไม่ระบุสถานภาพด้านการอนุรักษ์ 5 ชนิด คือ กบห้วยขาปุมมลายู (*Limnodynastes utara*) กบเขาหลังดองมลายู (*Chalcorana labialis*) กบอ่องมลายู (*Sylvirana malayana*) ปาดเรียวมลายู (*Polypedates discantus*) และ อิ่งหลังขีด (*Micryletta inornata*) และ นอกเหนือจากนี้อยู่ในกลุ่มเป็นกังวลน้อยที่สุด (LC) 20 ชนิด

สำหรับในกรณีกบหูต (*Limnodynastes dorsalis*) พบการกระจายในประเทศมาเลเซีย ไทย และพม่า โดยในประเทศไทยพบได้ตั้งแต่จังหวัดแม่ฮ่องสอนตลอดลงมาตามแนวด้านทิศตะวันตกจนถึงใต้สุดของประเทศที่จังหวัดยะลาและนราธิวาส ส่วนกบหูตมลายู (*Limnodynastes malesianus*) พบการกระจายเฉพาะในประเทศไทย มาเลเซีย สิงคโปร์ อินโดนีเซีย โดยในประเทศไทยพบได้เฉพาะพื้นที่จังหวัดยะลาและนราธิวาสเท่านั้น (Niyomwan *et al.*, 2019) ซึ่งทั้ง 2 ชนิด จัดอยู่ในกลุ่มสถานภาพใกล้ถูกคุกคาม (NT) ดังนั้น ในด้านการอนุรักษ์จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องติดตามและเฝ้าระวังภัยคุกคามต่าง ๆ เพื่อปกป้องรักษาชนิดพันธุ์ โดยเฉพาะการให้ความสำคัญกับแหล่งอาศัย เนื่องจากทั้ง 2 ชนิดนี้มีแหล่งอาศัยในบริเวณพื้นที่เกษตรกรรมที่เป็นแนวรอยต่อระหว่างป่าอนุรักษ์กับพื้นที่ชุมชน จึงมีความจำเป็นที่เกษตรกรที่ทำสวนผลไม้และสวนยางพารา เป็นต้น

ต้องให้ความสำคัญกับเรื่องการทำเกษตรแบบธรรมชาติหรือเกษตรปลอดภัย หรือลดการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์จากที่ดิน รักษาลักษณะของถิ่นอาศัยย่อย เช่น ลำธารที่มีความลาดชันมีหินระเกะระกะ หรือลำธารที่มีหินกรวดน้ำไหลไม่แรง ริมฝั่งมีร่มเงา หย่อมป่า พื้นป่าที่มีเศษซากใบไม้ทับถมหนาแน่น พูพอนตามใต้เศษใบไม้ร่วง บริเวณลำธารที่มีน้ำขาดเป็นช่วง ๆ บริเวณน้ำตื้นมีพืชน้ำหรือเศษใบไม้ทับถม เป็นต้น เนื่องจากเป็นพื้นที่หากิน หลบซ่อนตัวในตอนกลางวัน และเป็นแหล่งอาศัยของลูกอ๊อด (Niyomwan *et al.*, 2019) เพราะทั้งพื้นที่และตำแหน่งที่ตั้งของทั้ง 2 ชุมชน เป็นเขตป่าต้นน้ำและเป็นเขตแนวกันชนระหว่างชุมชนเมืองกับป่า มีลำธารและคลองสายย่อยต่าง ๆ ไหลผ่าน แหล่งน้ำเหล่านี้จึงเป็นพื้นที่วางไข่ เป็นที่อนุบาลในระยะลูกอ๊อดของสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบก ดังนั้น การใช้ยาฆ่าแมลงและสารเคมีที่เป็นพิษในระบบการทำเกษตรจะส่งผลโดยตรงต่อการลดลงของจำนวนชนิด ขนาดตัว และขนาดประชากร รวมทั้งชนิดอาหารของสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกด้วย (Niyomwan *et al.*, 2019) ซึ่งสอดคล้องกับกรณีการศึกษาในพื้นที่ Katavi National Park ประเทศแทนซาเนีย และป่าธรรมชาติ

ในกลุ่มน้ำ Holland ประเทศแคนาดา พบว่า ผลของสารเคมีกำจัดแมลงกลุ่ม Organochlorine ในลำธารบริเวณพื้นที่เกษตรกรรมที่มีมากเกินค่ามาตรฐาน ความปลอดภัยของสิ่งมีชีวิตในน้ำ และการเพาะปลูกส่งผลโดยตรงต่อการลดลงของจำนวนชนิดของสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกที่อยู่บริเวณเศษซากพืช และความหลากหลายของกบที่อาศัยอยู่บริเวณลำธารที่ไหลผ่านพื้นที่เกษตรกรรมจะต่ำกว่าบริเวณลำธารที่ไหลผ่านป่าธรรมชาติอย่างมีนัยสำคัญ (Bishop *et al.*, 1999; Gardner and Fitzherbert, 2007) ดังนั้น หากเกษตรกรใช้สารเคมี หรือทำลายป่ามากเกินไปเพื่อขยายพื้นที่เพาะปลูกก็จะไปทำลายแหล่งอาศัยและทำลายชนิดพันธุ์ รวมทั้งการจับชนิดที่เป็นสัตว์เศรษฐกิจมากเกินไปอัตราทดแทนของธรรมชาติ ปัจจัยคุกคามทั้งหมดเหล่านี้จะเป็นตัวเร่งให้ชนิดพันธุ์ที่มีความเสี่ยงต่อการสูญพันธุ์ โดยเฉพาะกบหูกลมลาย (*Limnonectes malesianus*) ที่กระจายอยู่เฉพาะในพื้นที่ให้สูญพันธุ์เร็วขึ้นอีกด้วย อย่างไรก็ตามจะต้องมีการศึกษาอย่างต่อเนื่องเพื่อนำข้อมูลมาใช้ในการจัดการพื้นที่เพื่อการอนุรักษ์กลุ่มที่มีความเสี่ยงที่จะสูญหายไปจากพื้นที่

**Table 2** Comparison of the amphibians found in this study with the other conservation and agricultural areas in Thailand

Family/Scientific name	This Study	Conservation areas				Agricultural areas	
		HALA	YW	KSW	HYW	YW	PHW
<b>Family Ichthyophiidae</b>							
<i>Ichthyophis larutensis</i>		/					
<i>Ichthyophis supachaii</i>	/	/				/	
<b>Family Megophryidae</b>							
<i>Leptobranchella gracilis</i>				/			
<i>Leptobranchella melanoleuca</i>					/		
<i>Leptobranchium hendricksoni</i>	/	/					
<i>Leptobranchium pullum</i>				/			

Table 2 (Continuous)

Family/Scientific name	This Study	Conservation areas				Agricultural areas	
		HALA	YW	KSW	HYW	YW	PHW
<i>Leptobranchium smithi</i>			/		/	/	/
<i>Leptolalax heteropus</i>		/					
<i>Leptolalax pelodytoides</i>							/
<i>Leptolalax solus</i>		/					
<i>Megophrys aceras</i>	/	/	/			/	
<i>Megophrys carinense</i>				/			
<i>Megophrys longipes</i>		/		/			
<i>Megophrys major</i>					/		
<i>Megophrys nasuta</i>	/	/					
<i>Megophrys parva</i>				/			/
<b>Family Bufonidae</b>							
<i>Ansonia kraensis</i>					/		
<i>Ansonia malayana</i>		/		/			
<i>Ansonia phuketensis</i>					/		
<i>Bufo parvus</i>				/			
<i>Duttaphrynus melanostictus</i>		/		/	/		/
<i>Ingerophrynus divergens</i>		/					
<i>Ingerophrynus macrotis</i>		/			/		
<i>Ingerophrynus parvus</i>	/		/		/	/	
<i>Leptophryne borbonica</i>		/					
<i>Phrynoidis asper</i>	/	/	/	/		/	
<i>Rentapia hosii</i>		/					
<b>Family Microhylidae</b>							
<i>Chaperina fusca</i>				/			
<i>Glyphoglossus guttulatus</i>					/		
<i>Glyphoglossus molossus</i>					/		
<i>Kalophrynus interlineatus</i>							/
<i>Kaloula pulchra</i>	/	/			/		/
<i>Kaloula baleata</i>		/					
<i>Microhyla berdmorei</i>	/	/	/	/		/	/
<i>Microhyla borneensis</i>				/			
<i>Microhyla butleri</i>	/	/			/		/

Table 2 (Continuous)

Family/Scientific name	This Study	Conservation areas				Agricultural areas	
		HALA	YW	KSW	HYW	YW	PHW
<i>Microhyla fissipes</i>		/			/		/
<i>Microhyla heymonsi</i>	/	/		/	/		/
<i>Microhyla mantheyi</i>		/					
<i>Microhyla mukhlesuri</i>			/			/	
<i>Micryletta inornata</i>	/	/					/
<i>Phrynella pulchra</i>		/					
<b>Family Dicroglossidae</b>							
<i>Fejervarya limnocharis</i>	/	/		/	/		/
<i>Hoplobatrachus rugulosus</i>		/			/		
<i>Limnonectes blythii</i>	/	/	/	/	/	/	
<i>Limnonectes doriae</i>				/	/		
<i>Limnonectes gyldenstolpei</i>							/
<i>Limnonectes hascheanus</i>		/	/	/	/	/	
<i>Limnonectes jarujini</i>					/		
<i>Limnonectes kuhlii</i>		/		/			/
<i>Limnonectes laticeps</i>		/					
<i>Limnonectes limborgi</i>							/
<i>Limnonectes macrognathus</i>	/		/	/		/	
<i>Limnonectes malesianus</i>	/	/					
<i>Limnonectes plicatellus</i>		/					
<i>Limnonectes utara</i>	/						
<i>Occidozyga laevis</i>		/		/			
<i>Occidozyga lima</i>				/	/		/
<i>Occidozyga martensii</i>	/		/		/		
<b>Family Ceratobatrachidae</b>							
<i>Alcalus tasanae</i>				/	/		
<b>Family Ranidae</b>							
<i>Amolops larutensis</i>	/	/		/			
<i>Amolops marmoratus</i>				/			
<i>Amolops panhai</i>					/		
<i>Bijurana nicobariensis</i>		/					

Table 2 (Continuous)

Family/Scientific name	This Study	Conservation areas				Agricultural areas	
		HALA	YW	KSW	HYW	YW	PHW
<i>Chalcorana labialis</i>	/						
<i>Clinotarsus alticola</i>				/	/		
<i>Humerana miopus</i>		/					
<i>Hylarana chalconota</i>				/			
<i>Hylarana erythraea</i>	/	/		/	/		
<i>Hylarana eschatia</i>		/	/		/	/	
<i>Hylarana macrodactyla</i>		/					
<i>Hylarana taipehensis</i>							/
<i>Meristogenys jerboa</i>				/			
<i>Odorrana hosii</i>	/	/	/	/	/	/	
<i>Odorrana livida</i>			/	/	/		
<i>Pulchrana banjarana</i>		/					
<i>Pulchrana glandulosa</i>	/	/	/			/	
<i>Pulchrana laterimaculata</i>	/	/					
<i>Pulchrana signata</i>	/	/					
<i>Sylvirana cubitalis</i>				/			/
<i>Sylvirana malayana</i>	/						
<i>Sylvirana nigrovittata</i>		/	/	/	/		/
<b>Family Rhacophoridae</b>							
<i>Kurixalus appendiculatus</i>		/					
<i>Kurixalus bisacculus</i>							/
<i>Nyctixalus pictus</i>		/		/			
<i>Philautus petersi</i>		/					
<i>Philautus vermiculatus</i>		/					
<i>Polypedates colletti</i>				/			
<i>Polypedates discantus</i>	/						
<i>Polypedates leucomystax</i>	/	/	/	/	/	/	/
<i>Polypedates macrotis</i>		/					
<i>Raorchestes parvulus</i>		/	/				
<i>Rhacophorus bipunctatus</i>				/			
<i>Rhacophorus cyanopunctatus</i>		/					

Table 2 (Continuous)

Family/Scientific name	This Study	Conservation areas				Agricultural areas	
		HALA	YW	KSW	HYW	YW	PHW
<i>Rhacophorus nigropalmatus</i>	/	/		/			
<i>Rhacophorus norhayatii</i>		/					
<i>Rhacophorus pardalis</i>		/		/			
<i>Rhacophorus reinwardtii</i>				/			
<i>Rhacophorus rhodopus</i>					/		
<i>Rhacophorus robinsonii</i>		/					
<i>Rohanixalus vittatus</i>							/
<i>Theلودerma licin</i>		/					
<i>Theلودerma horridum</i>		/					
<i>Zhangixalus feae</i>							/
<i>Zhangixalus prominanus</i>		/					

HALA : Hala-Bala (Hala-Bala Wildlife Research Station, 2013)

YW : Tropical Rain Forest and Rubber Forest at Yong Waterfall National Park, Nakhon Si Thammarat Province (Meesook, 2019)

KSW : Khlong Sang Wildlife Sanctuary, Surat Thani Province (Taksintum *et al.*, 2006)

HYW : Huai Yang Waterfall National Park, Prachuap Khiri Khan Province (Khamkaew *et al.*, 2021)

PHW : Stream Flow Across Forest and Agricultural Habitats at Phu Luang Wildlife Sanctuary (Pochayavanich *et al.*, 2008)

## สรุป

การศึกษาความหลากหลายของสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกตามลำธารในพื้นที่เกษตรกรรมนอกพื้นที่ป่าอนุรักษ์ที่บ้านวังไทร อำเภอธารโต และบ้านซาโหล อำเภอเบตง จังหวัดยะลา พบสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกทั้งหมด 28 ชนิด 2 อันดับ 7 วงศ์ โดยที่บ้านวังไทร พบสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกทั้งหมด 25 ชนิด มากกว่าที่บ้านซาโหลซึ่งพบ 21 ชนิด คำนวณความหลากหลายของทั้ง 2 พื้นที่มีค่าเท่ากัน ในขณะที่ดัชนีความสม่ำเสมอที่บ้านซาโหลมีค่าสูงกว่าที่บ้านวังไทร สำหรับสถานภาพความชุกชุมที่บ้านวังไทร สัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกที่พบบ่อย มี 2 ชนิด พบปานกลาง มี 11 ชนิด และพบน้อย มี 12 ชนิด ส่วนที่บ้านซาโหล สัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกที่พบบ่อย มี 1 ชนิด พบปานกลาง มี 9 ชนิด และพบน้อย

มี 11 ชนิด นอกจากนั้น ในการศึกษาครั้งนี้พบสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกที่จัดเป็นสัตว์ป่าคุ้มครองของไทย 3 ชนิด คือ จงโคร่ง (*Phrynoidis asper*) กบหูด (*Limnonectes blythii*) และ กวางคกแคระ (*Ingerophrynus parvus*) และสถานภาพใกล้ถูกคุกคาม (NT) 2 ชนิด คือ กบหูด (*Limnonectes blythii*) และกบหูดมลายู (*Limnonectes malesianus*) ดังนั้น ในด้านการอนุรักษ์จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ชุมชนและหน่วยงานที่เกี่ยวข้องจะต้องติดตามและเฝ้าระวังภัยคุกคามต่าง ๆ เพื่อปกป้องรักษาชนิดพันธุ์ โดยเฉพาะการให้ความสำคัญของพื้นที่เกษตรกรรมที่เป็นแนวรอยต่อระหว่างป่าอนุรักษ์กับพื้นที่ชุมชน ต้องให้ความสำคัญเรื่องการทำเกษตรแบบธรรมชาติหรือเกษตรปลอดภัย ลดการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์จากที่ดินและลดการขยายพื้นที่เพาะปลูก

เข้าไปในเขตป่า รวมทั้งการจับชนิดพันธุ์ที่เป็นสัตว์เศรษฐกิจมากเกินไป ปัจจัยคุกคามเหล่านี้จะเป็นตัวเร่งให้ชนิดพันธุ์ที่มีความเสี่ยงต่อการสูญพันธุ์ให้สูญพันธุ์เร็วขึ้น

### ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากในช่วงที่คณะผู้วิจัยทำการศึกษาเป็นช่วงของการแพร่ระบาดของโรคโควิด 19 อย่างรุนแรงต่อเนื่องหลายเดือน ทำให้ไม่สามารถเข้าพื้นที่ได้ ซึ่งหากในช่วงระยะเวลาที่ศึกษาได้เข้าพื้นที่สำรวจและเก็บข้อมูลถี่มากกว่านี้คณะผู้วิจัยคาดว่าน่าจะพบชนิดของสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกเพิ่มมากขึ้นด้วย
2. สำหรับการสำรวจในอนาคต ควรเพิ่มเส้นทางสำรวจให้มากขึ้นในแต่ละพื้นที่ศึกษา และควรศึกษาผลปัจจัยด้านปริมาณน้ำฝน จำนวนวันที่ฝนตกรายเดือนและรายปี ซึ่งอาจจะส่งผลต่อชนิดและจำนวนของสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบกด้วย

### กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณนายมนตรี สุมนทนา นักวิชาการประมงชำนาญการ ประจำศูนย์วิจัยและพัฒนาประมงทะเลระนอง ที่กรุณาร่วมลงพื้นที่สำรวจและเป็นที่ปรึกษาให้คำแนะนำในการสำรวจครั้งนี้ และขอขอบคุณแกนนำชุมชนบ้านวังไทร ตำบลแม่หวาด อำเภอธารโต และบ้านซาโห ตำบลธารน้ำทิพย์ อำเภอเบตง จังหวัดยะลา ที่อำนวยความสะดวกในเรื่องของที่พักและอาหาร ตลอดจนร่วมสำรวจเก็บข้อมูลกับทีมวิจัย สุดท้ายขอขอบคุณทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สัญญาเลขที่ SAT6202002S

### เอกสารอ้างอิง

- Biodiversity-based Economy Development Office. 2016. **Amphibians of Thailand**. 1<sup>st</sup>ed. Biodiversity-Based Economy Development Office (Public Organization), Bangkok. (in Thai)
- Bishop, C.A., Mahony, N.A., Struger, J., Ng, P. and Pettit, K.E. 1999. Anuran development, density and diversity in relation to agricultural activity in the Holland River watershed, Ontario, Canada (1990-1992). **Environmental Monitoring and Assessment** 57: 21-43.
- Chan-ard, T. 2003. **A Photographic Guide to Amphibians in Thailand**. 1<sup>st</sup>ed. Darnsutha Press Co., Ltd., Bangkok. (in Thai)
- Gardner, T.A. and Fitzherbert, E.B. 2007. Spatial and temporal patterns of abundance and diversity of an East African leaf litter amphibian fauna. **Biotropica** 39: 105-113.
- Hala-Bala Wildlife Research Station. 2013. **Amphibians of Hala-Bala**. 1<sup>st</sup>ed. Department of National Parks, Wildlife and Plant Conservation, Bangkok. (in Thai)
- Heyer, W.R., Donnelly, M.A., Mc Diarmid, R.W., Hayek, L. and Foster, M.S. 1994. **Measuring and monitoring biological diversity: Standard methods for amphibians**. 1<sup>st</sup>ed. Smithsonian Institution Press, Washington DC.
- International Union for Conservation of Nature and Natural Resources. 2022. **IUCN 2022. The IUCN Red List of Threatened Species. Version 2022-1**. Available Source: <https://www.iucnredlist.org/>, October 1, 2022.

- Khamkaew, A., Taksinham, W. and Ponpan, S. 2021. Species and Abundance of Amphibians: Anurans, at Huai Yang Waterfall National Park, Prachuap Khiri Khan Province. **PKRU SciTech Journal** 5(1): 1-11. (in Thai)
- Meesook, W. 2019. **Research Report on Herpetofaunal Species Abundance and Diversity in Tropical Rain Forest and Rubber Forest at Yong Waterfall National Park, Nakhon Si Thammarat Province.** Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Nakhon Si Thammarat. (in Thai)
- Niyomwan, P., Srisom, P. and Pawangkhanant, P. 2019. **Amphibians of Thailand.** 1<sup>st</sup> ed. Parbpim, Bangkok. (in Thai)
- Phochayavanich, R., Thirakhupt, K. and Voris, K.H. 2008. Species Diversity and Abundance of Amphibians in Stream Flow Across Forest and Agricultural Habitats at Phu Luang Wildlife Sanctuary, Loei Province. **Journal of Wildlife in Thailand** 15(1): 17-28. (in Thai)
- Royal Forest Department. 2021. **Forestry statistics data 2021.** Available Source: <https://forestinfo.forest.go.th/Content.aspx?id=10408>, October 3, 2022. (in Thai)
- Shannon, C.E. 1949. Mathematical theory of communication. **Bell System Technical Journal** 27: 379-423.
- Soe-been, S. and Musigathum, P. 2008. **Technical Paper 3/2008: Structure and distribution of fish community in Kwan Phayao, Phayao province.** Department of Fisheries, Bangkok. (in Thai)
- Taksintum, W., Lauhachinda, V. and Kanchanasaka, B. 2006. Diversity of Anurans in Khlong Sang Wildlife Sanctuary, Surat Thani Province. **Journal of Wildlife in Thailand** 13(1): 178-189. (in Thai)
- Taksintum, W., Ruamthum, W., Pulnil, B. and Lauhachinda, V. 2010. Comparison of Anuran Species and Habitat Utilization in Kui Buri National Park Area and Adjacent Agricultural Area. **Journal of Wildlife in Thailand** 17(1): 104-123. (in Thai)
- Tudorance, C., Green, R.H. and Huebner, J. 1975. Structure, Dynamics and Production of the Benthic Fauna in Lake Monitoba. **Hydrobiologia** 64(1): 59-95.

# การพยากรณ์ราคาขายปลีกเฉลี่ยรายเดือน ของน้ำมันดีเซล 91 ในเขตกรุงเทพมหานคร

## Forecasting the Average Monthly Retail Price of Diesel in Bangkok

วารางคณา เรียนสุทธิ\*

Warangkha Riansut\*

Received: 19 December 2022, Revised: 11 September 2023, Accepted: 3 October 2023

### บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ เพื่อพยากรณ์ราคาน้ำมันดีเซลโดยใช้ออนุกรมเวลาราคาขายปลีกน้ำมันดีเซลเฉลี่ยต่อเดือนในเขตกรุงเทพมหานคร จากเว็บไซต์ธนาคารแห่งประเทศไทย ตั้งแต่เดือนมกราคม 2546 ถึงเดือนตุลาคม 2565 จำนวน 238 เดือน ผู้วิจัยได้แบ่งอนุกรมเวลาออกเป็น 2 ชุด ชุดที่ 1 จำนวน 235 เดือน ตั้งแต่เดือนมกราคม 2546 ถึงเดือนกรกฎาคม 2565 ใช้ในการสร้างตัวแบบพยากรณ์ด้วยวิธีการทางสถิติ 4 วิธี ได้แก่ วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของโฮลต์ วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของบราวน์ และวิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีแนวโน้มแบบเดมปี อนุกรมเวลาชุดที่ 2 จำนวน 3 เดือน ตั้งแต่เดือนสิงหาคมถึงเดือนตุลาคม 2565 ใช้ในการเปรียบเทียบความแม่นยำของตัวแบบพยากรณ์ด้วยเกณฑ์ร้อยละของค่าคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (MAPE) และเกณฑ์รากของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ที่ต่ำที่สุด ผลการศึกษาพบว่า ตัวแบบพยากรณ์จากวิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของโฮลต์มีความแม่นยำมากที่สุด มีค่า MAPE = 0.3053 และ RMSE = 0.1158 มีตัวแบบดังนี้

$$\hat{Y}_{t+m} = 34.93997 + 0.05384(m)$$

เมื่อ  $m = 1$  แทนเดือนสิงหาคม 2565

**คำสำคัญ:** ดีเซล, การพยากรณ์, บ็อกซ์-เจนกินส์, การทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลัง

## ABSTRACT

This research aims to forecast diesel prices using the average monthly retail diesel prices in Bangkok obtained from the Bank of Thailand website from January 2003 to October 2022, totaling 238 months. The researcher divided the time series into two sets. The first set comprised 235 months from January 2003 to July 2022. It was used to create a forecasting model using four statistical methods, namely, the Box-Jenkins method, Holt's exponential smoothing method, Brown's exponential smoothing method, and the damped trend exponential smoothing method. The second set comprised the last 3 months, from August to October 2022. It was used to compare the accuracy of the forecast models based on the lowest mean absolute percentage error (MAPE) and root mean square error (RMSE). The study found that the forecasting model using Holt's exponential smoothing method was the most accurate, with MAPE = 0.3053 and RMSE = 0.1158. The model was as follows:

$$\hat{Y}_{t+m} = 34.93997 + 0.05384(m)$$

where  $m = 1$  represented August 2022.

**Key words:** diesel, forecast, Box-Jenkins, exponential smoothing

### บทนำ

ดีเซล (Diesel) คือ น้ำมันเชื้อเพลิงชนิดหนึ่งที่ได้จากกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบ โดยมีช่วงจุดเดือดอยู่ระหว่าง 150 – 350 องศาเซลเซียส ใช้สำหรับเครื่องยนต์ดีเซล มีลักษณะใสออกเหลืองเล็กน้อย มีความหนืดมากกว่าน้ำมันเบนซิน น้ำมันดีเซลที่ใช้อยู่ในประเทศไทยแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ (1) น้ำมันดีเซลหมุนเร็ว (High Speed Diesel) หรือน้ำมันโซล่า ใช้สำหรับเครื่องยนต์ที่มีรอบหมุนมากกว่า 1,000 รอบ/นาที มีจำหน่ายตามปั้มน้ำมันต่าง ๆ สำหรับใช้ในรถกระบะ รถบรรทุก รถโดยสาร และเครื่องปั้นไฟขนาดเล็ก (2) น้ำมันดีเซลหมุนช้า (Low Speed Diesel) หรือน้ำมันซีโล้ ใช้สำหรับเครื่องยนต์ที่มีรอบหมุน 300 – 1,000 รอบ/นาที มีจำหน่ายเฉพาะสำหรับเครื่องยนต์บางประเภทเท่านั้น เช่น รถไฟ เรือยนต์ และเครื่องปั้นไฟขนาดใหญ่ (iEnergyGuru, 2022) ปัจจุบันประเทศไทยมีการ

ใช้น้ำมันสำเร็จรูปเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยน้ำมันสำเร็จรูปที่ใช้ในประเทศมากที่สุด คือ น้ำมันดีเซล รองลงมา คือ น้ำมันเบนซิน (Jumlong and Nakhok, 2018) ผลการศึกษาราคาขายปลีกเฉลี่ยรายเดือนของน้ำมันดีเซลจากเว็บไซต์ธนาคารแห่งประเทศไทยย้อนหลังตั้งแต่ปี 2546 ถึงปัจจุบัน (Bank of Thailand, 2022) พบว่า ราคาน้ำมันดีเซลมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นมาก จากราคาเพียงลิตรละ 14.65 บาท ในเดือนมกราคม 2546 เพิ่มขึ้นเป็นลิตรละ 34.94 บาท ในเดือนตุลาคม 2565 รวมถึงยังมีความผันผวนของราคาซึ่งไม่ใช่ความผันผวนที่เกิดตามฤดูกาล โดยราคาน้ำมันของแต่ละประเทศมีการกำหนดโครงสร้างราคาจากนโยบายของภาครัฐนั้น ๆ สำหรับประเทศไทยมีโครงสร้างราคาน้ำมันแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ (1) ต้นทุนเนื่อน้ำมันร้อยละ 37 (2) ค่าภาษีและกองทุนร้อยละ 51 และ (3) ค่าการตลาดร้อยละ 12 องค์ประกอบของราคาน้ำมันหน้าสถานีบริการน้ำมันในประเทศไทยประกอบด้วย

ต้นทุน 8 ส่วน ได้แก่ (1) ราคาขายปลีกหน้าโรงกลั่น (2) เงินเก็บเข้ากองทุนน้ำมัน (3) ภาษีสรรพสามิต (4) ภาษีเทศบาล (5) ภาษีมูลค่าเพิ่ม (6) เงินเข้ากองทุนอนุรักษ์พลังงาน (7) ค่าการตลาด และ (8) ภาษีมูลค่าเพิ่มของค่าการตลาด (RYT9, 2022) นอกเหนือจากโครงสร้างและองค์ประกอบของราคาน้ำมัน อาจมีปัจจัยอื่น ๆ ที่ส่งผลให้ราคาน้ำมันเกิดความผันผวน เช่น โรคระบาด เงินเพื่อ ความต้องการใช้น้ำมันเพื่อการเดินทาง การตรึงราคาน้ำมันของรัฐบาล และการผลิตน้ำมันในสหรัฐอเมริกา เป็นต้น (Jumlong and Naknok, 2018; Investing.com, 2021) การพยากรณ์ราคาน้ำมันด้วยวิธีการทางสถิติเป็นเครื่องมือหนึ่งที่สำคัญ ให้ผลการทำนายที่น่าเชื่อถือสามารถนำผลการพยากรณ์ไปเป็นข้อมูลในการคาดการณ์แนวโน้มและความผันผวนของราคาน้ำมัน อีกทั้งยังเป็นเครื่องมือหนึ่งที่ช่วยตัดสินใจวางแผนด้านพลังงานและปริมาณการใช้น้ำมันภายในประเทศ

การศึกษาที่ผ่านมามีการใช้กระบวนการทางสถิติในการสร้างตัวแบบพยากรณ์ราคาน้ำมันดังนี้ Keerativibool (2013a) พยากรณ์ราคาขายปลีกรายวันของน้ำมันแก๊สโซฮอล์ 91 ในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล โดยศึกษาอนุกรมเวลาตั้งแต่วันที่ 1 มกราคมถึงวันที่ 31 ธันวาคม 2555 สร้างตัวแบบพยากรณ์ด้วยวิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของโฮลต์ วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีแนวโน้มแบบแคมป์ ผลการศึกษาพบว่าวิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ที่มีตัวแบบ ARIMA(1, 1, 1) ไม่มีพจน์ของค่าคงตัวมีความแม่นยำมากที่สุด Keerativibool (2013b) พยากรณ์ราคาขายปลีกรายวันของน้ำมันแก๊สโซฮอล์ 95 ในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล โดยศึกษาอนุกรมเวลาตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม 2555 ถึงวันที่ 25 กุมภาพันธ์ 2556 สร้างตัวแบบพยากรณ์ด้วยวิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลัง

ของโฮลต์ วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของบราวน์ และวิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีแนวโน้มแบบแคมป์ ผลการศึกษาพบว่า วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของบราวน์มีความแม่นยำมากที่สุด Jumlong and Naknok (2018) พิจารณาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อราคาน้ำมันดีเซลและพยากรณ์ราคาน้ำมันดีเซลในประเทศไทย โดยศึกษาอนุกรมเวลารายเดือนตั้งแต่เดือนมกราคม 2550 ถึงเดือนธันวาคม 2560 สร้างตัวแบบพยากรณ์ด้วยวิธีการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ (Multiple Regression Analysis) เพื่อพยากรณ์ราคาน้ำมันดีเซลในประเทศไทยอีก 5 ปีข้างหน้า ตั้งแต่เดือนมกราคม 2561 ถึงเดือนธันวาคม 2565 ด้วยวิธีการวิเคราะห์แนวโน้ม (Trend Analysis) ผลการศึกษาพบว่า อัตราภาษีสรรพสามิต (บาท/ลิตร) กองทุนน้ำมันเชื้อเพลิง ดัชนีราคาผู้บริโภค และราคาน้ำมันดีเซลในตลาดสิงคโปร์ (ดอลลาร์สหรัฐ/บาร์เรล) มีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกันกับราคาน้ำมันดีเซลในประเทศไทย ส่วนการพยากรณ์ราคาน้ำมันดีเซล พบว่า ค่าเฉลี่ยของราคาน้ำมันดีเซลตั้งแต่ปี 2561 – 2565 เท่ากับ 30.76, 30.93, 31.11, 31.28 และ 31.46 บาท/ลิตร ตามลำดับ และ Tangsai *et al.* (2019) ได้ศึกษาและเปรียบเทียบวิธีการพยากรณ์ปริมาณการใช้น้ำมันดีเซลของประเทศไทย โดยใช้อนุกรมเวลารายเดือนตั้งแต่เดือนมกราคม 2555 ถึงเดือนกันยายน 2560 สร้างตัวแบบพยากรณ์โดยวิธีแนวโน้มเชิงเส้น วิธีค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังอย่างง่าย วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังแบบสองครั้ง และวิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังแบบสามครั้ง ผลการศึกษาพบว่า วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังอย่างง่ายมีความแม่นยำมากที่สุด

จากการศึกษาที่ผ่านมา พบว่า มีการพยากรณ์ราคาน้ำมันแก๊สโซฮอล์ 91 (Keerativibool, 2013a) แก๊สโซฮอล์ 95 (Keerativibool, 2013b) และดีเซล (Jumlong and Naknok, 2018) โดยมีการสร้างตัวแบบ

เพื่อพยากรณ์ค่าในอนาคต อย่างไรก็ตาม ตัวแบบดังกล่าวเป็นแบบพยากรณ์ที่สร้างขึ้นในอดีตจึงไม่เหมาะสมสำหรับการนำมาใช้งานในปัจจุบัน เนื่องจากราคาน้ำมันดีเซลมีการปรับตัวเพิ่มขึ้น เช่น การศึกษาของ Jumlong and Naknok (2018) ได้พยากรณ์ราคาน้ำมันดีเซลในปี 2565 ว่ามีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 31.46 บาท/ลิตร แต่ราคาเฉลี่ยของน้ำมันดีเซลที่เกิดขึ้นจริง คือ 32.48 บาท/ลิตร ด้วยเหตุผลดังกล่าววัตถุประสงค์ของการศึกษานี้ คือ เพื่อสร้างตัวแบบสำหรับการพยากรณ์ราคาขายปลีกน้ำมันดีเซลในเขตกรุงเทพมหานครด้วยวิธีการพยากรณ์ทางสถิติ เมื่อได้ตัวแบบพยากรณ์ที่เหมาะสมจะเป็นประโยชน์กับหน่วยงานหรือบุคคลที่เกี่ยวข้องทั้งภาครัฐและภาคเอกชนสามารถนำไปใช้ในการพยากรณ์ทิศทางและราคาน้ำมันดีเซลในอนาคต ตลอดจนการรับมือกับความผันผวนของราคาน้ำมันที่อาจเกิดขึ้นในอนาคตต่อไป

## วิธีดำเนินการวิจัย

### 1. การสร้างตัวแบบพยากรณ์

1.1 รวบรวมอนุกรมเวลาราคาขายปลีกน้ำมันดีเซลเฉลี่ยต่อเดือน (บาท/ลิตร) จากเว็บไซต์ธนาคารแห่งประเทศไทย (Bank of Thailand, 2022) ตั้งแต่เดือนมกราคม 2546 ถึงเดือนตุลาคม 2565 จำนวน 238 เดือน ผู้วิจัยได้แบ่งอนุกรมเวลาออกเป็น 2 ชุด ชุดที่ 1 ตั้งแต่เดือนมกราคม 2546 ถึงเดือนกรกฎาคม 2565 จำนวน 235 เดือน ใช้ในการสร้างตัวแบบพยากรณ์ด้วยโปรแกรม SPSS version 17 ชุดที่ 2 ตั้งแต่เดือนสิงหาคมถึงเดือนตุลาคม 2565 จำนวน 3 เดือน ใช้ในการเปรียบเทียบความแม่นยำของตัวแบบพยากรณ์ด้วยเกณฑ์ร้อยละค่าคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean Absolute Percentage Error: MAPE) และเกณฑ์รากของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error: RMSE) ที่ต่ำที่สุด โดยสาเหตุที่

ผู้วิจัยแบ่งข้อมูลชุดที่ 2 ไว้เพียง 3 เดือน เนื่องจากการทดลองวิเคราะห์ข้อมูลครั้งแรกได้เก็บข้อมูลชุดที่ 2 ไว้จำนวน 10 เดือน ตั้งแต่เดือนมกราคมถึงเดือนตุลาคม 2565 พบว่า ตัวแบบพยากรณ์ที่ได้จากอนุกรมเวลาชุดที่ 1 จำนวน 228 เดือน ตั้งแต่เดือนมกราคม 2546 ถึงเดือนธันวาคม 2564 มีค่า MAPE และ RMSE เหมาะสม มีค่า MAPE ประมาณร้อยละ 2.78 – 3.26 และค่า RMSE ประมาณ 1.17 – 1.36 บาท/ลิตร แต่มีประสิทธิภาพในการพยากรณ์ข้อมูลชุดที่ 2 ไม่ดีเท่าที่ควร มีค่า MAPE สูงถึงร้อยละ 25.72 และค่า RMSE สูงถึง 9.84 บาท/ลิตร อาจเนื่องมาจากราคาน้ำมันดีเซลตั้งแต่เดือนมกราคมถึงเดือนตุลาคม 2565 มีค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะในเดือนเมษายน ราคาน้ำมันดีเซลเฉลี่ยจาก 29.94 บาท/ลิตร ปรับเพิ่มขึ้นเป็น 31.97 และ 34.31 บาท/ลิตร ในเดือนพฤษภาคมและมิถุนายน ตามลำดับ

1.2 ตรวจสอบแนวโน้มและอิทธิพลของฤดูกาลของอนุกรมเวลาราคาน้ำมันดีเซลชุดที่ 1 ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียวโดยลำดับที่ของครัสคัล-วอลลิส (Kruskal-Wallis's One-Way Analysis of Variance by Rank) โดยการตรวจสอบแนวโน้มจะเป็นการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียวจำแนกข้อมูลเป็นรายปี เพื่อพิจารณาว่าอนุกรมเวลาแต่ละปีมีค่ามัธยฐานแตกต่างกันหรือไม่ ถ้าพบความแตกต่างจะสรุปว่าอนุกรมเวลามีแนวโน้ม แต่ยังไม่สามารถสรุปได้ว่าเป็นแนวโน้มเพิ่มขึ้นหรือลดลง ต้องพิจารณาเพิ่มเติมจากกราฟของอนุกรมเวลาเทียบกับเวลา ขณะที่การตรวจสอบอิทธิพลของฤดูกาลจะเป็นการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียวจำแนกข้อมูลเป็นรายเดือน (ข้อมูลหลังจากกำจัดแนวโน้มออกแล้ว) เพื่อพิจารณาว่าอนุกรมเวลาแต่ละเดือนมีค่ามัธยฐานแตกต่างกันหรือไม่ ถ้าพบความแตกต่างจะสรุปว่าอนุกรมเวลามีอิทธิพลของฤดูกาล ถ้าผลการตรวจสอบพบว่า อนุกรมเวลามีเฉพาะแนวโน้ม

วิธีการพยากรณ์ที่เหมาะสม ได้แก่ วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ ที่มีตัวแบบอาร์มา (ตัวแบบรวมการถดถอยในตัวกับการเคลื่อนที่) หรือตัวแบบ ARIMA (Autoregressive Integrated Moving Average Model) วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของโฮลด์ วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของบราวน์ และวิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีแนวโน้มแบบแคมป์ อนุกรมเวลามีเฉพาะอิทธิพลของฤดูกาล วิธีการพยากรณ์ที่เหมาะสม ได้แก่ วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีฤดูกาลอย่างง่าย และอนุกรมเวลามีทั้งแนวโน้มและอิทธิพลของฤดูกาล วิธีการพยากรณ์ที่เหมาะสม ได้แก่ วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ที่มีตัวแบบซารีมา (ตัวแบบรวมการถดถอยในตัวกับการเคลื่อนที่เชิงฤดูกาล) หรือตัวแบบ SARIMA (Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average Model) วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบบวก วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบคูณ และวิธีการพยากรณ์รวม (Bowerman and O'Connell, 2000; Ket-iam, 2003; Manmin, 2006; Box *et al.*, 2015) สำหรับการศึกษาครั้งนี้พบว่า ราคาน้ำมันดีเซลมีเพียงแนวโน้ม เนื่องจากราคามีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงไป และการเพิ่มขึ้นของราคาไม่ได้ซ้ำรูปแบบเดิมในแต่ละปี ดังนั้น วิธีการพยากรณ์ที่เหมาะสม คือ วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ที่มีตัวแบบ ARIMA วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของโฮลด์ วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของบราวน์ และวิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีแนวโน้มแบบแคมป์ ซึ่งทั้ง 4 วิธีนี้ควรใช้กับข้อมูลที่มีเพียงแนวโน้มในลักษณะเส้นตรง โดยไม่มีส่วนประกอบของความผันแปรตามฤดูกาล แต่มีความแตกต่างกัน ดังนี้ วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์มีการใช้ความสัมพันธ์ของข้อมูลและค่าคลาดเคลื่อนในอดีตสร้างเป็นตัวแบบพยากรณ์ ในขณะที่อีก 3 วิธี จะใช้ค่าคงที่การทำให้เรียบในการประมาณค่าพารามิเตอร์ โดยวิธีการทำให้

เรียบด้วยเลขชี้กำลังของโฮลด์ใช้ค่าคงที่การทำให้เรียบ 2 ตัว คือ ค่าคงที่การทำให้เรียบของค่าระดับ ( $\alpha$ ) และค่าคงที่การทำให้เรียบของค่าความชัน ( $\gamma$ ) วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของบราวน์จะกำหนดให้  $\alpha = \gamma$  ดังนั้นจึงเป็นกรณีพิเศษของโฮลด์ และวิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีแนวโน้มแบบแคมป์จะใช้ค่าคงที่การทำให้เรียบ 3 ตัว คือ  $\alpha$ ,  $\gamma$  และ  $\phi$  โดย  $\phi$  แทนความชันแบบแคมป์ และกำหนดให้การเปลี่ยนแปลงของแนวโน้มช้ากว่าการเปลี่ยนแปลงของแนวโน้มของโฮลด์ กล่าวคือ วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีแนวโน้มแบบแคมป์ กำหนดให้ใช้ค่า  $\sum_{i=1}^m \phi^i$  แทน  $m$  ในวิธีของโฮลด์

1.3 ขั้นตอนการสร้างตัวแบบพยากรณ์ด้วยโปรแกรม SPSS version 17 แสดงดังนี้

1.3.1 ใช้คำสั่ง Analyze → Forecasting

→ Create Models

1.3.2 ใน Tab Variables นำตัวแปรราคาน้ำมันดีเซลใส่ในช่อง Dependent Variables: และเลือกวิธีที่จะสร้างตัวแบบพยากรณ์ในช่อง Method: โดยเลือกระหว่าง Exponential Smoothing (การทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลัง) หรือ ARIMA (บ็อกซ์-เจนกินส์) จากนั้นระบุ Criteria การศึกษาครั้งนี้เลือก Method: เป็น Exponential Smoothing และระบุ Criteria เป็น Holt's linear trend คือ วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของโฮลด์ Brown's linear trend คือ วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของบราวน์ Damped trend คือ วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีแนวโน้มแบบแคมป์ และเลือก Method: เป็น ARIMA ระบุ Criteria... เป็นตัวแบบเริ่มต้น ในส่วน Nonseasonal หมายถึง ค่า  $p$ ,  $d$ ,  $q$  และในส่วน Seasonal หมายถึง ค่า  $P$ ,  $D$ ,  $Q$  โดยที่ค่าของ  $p$  และ  $q$  คือ จำนวนแท่งสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แท่งแรก ๆ ที่มีค่าเกินจากขอบเขตความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ของกราฟฟังก์ชันสหสัมพันธ์ในตัวบางส่วน (Partial Autocorrelation

Function: PACF) และกราฟฟังก์ชันสหสัมพันธ์ในตัวเอง (Autocorrelation Function: ACF) ตามลำดับ สำหรับค่า  $d$  คือ ลำดับที่ของการหาผลต่างเพื่อกำจัดแนวโน้ม และค่าของ  $P$  และ  $Q$  คือ จำนวนแท่งสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ตามฤดูกาลที่มีค่าเกินจากขอบเขตความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ของกราฟ PACF และกราฟ ACF ตามลำดับ สำหรับค่า  $D$  คือ ลำดับที่ของการหาผลต่างฤดูกาลเพื่อกำจัดความผันแปรตามฤดูกาล

1.3.3 ใน Tab Statistics เลือก Parameter estimates เพื่อเก็บค่าประมาณพารามิเตอร์

1.3.4 ใน Tab Save ระบุที่อยู่ที่จะบันทึกค่าประมาณพารามิเตอร์ในช่อง Export Model File

1.3.5 ใน Tab Options ระบุเวลาสุดท้ายที่ต้องการให้โปรแกรมพยากรณ์ไปถึงในช่อง Forecast Period และเลือก First case after end of estimation period through a specified date สำหรับการศึกษาค้างนี้ คือ Year 2023 และ Month 12 (ธันวาคม 2566)

## 2. การตรวจสอบข้อสมมุติของตัวแบบพยากรณ์

ตรวจสอบข้อสมมุติของตัวแบบพยากรณ์ โดยพิจารณาอนุกรมเวลาของค่าคลาดเคลื่อน ( $e_t$ ) มีการเคลื่อนไหวเป็นอิสระกัน ตรวจสอบโดยการพิจารณาจากกราฟการเคลื่อนไหวของ  $e_t$  เทียบกับเวลา หากพบว่าข้อสมมุติไม่เป็นจริงจะสรุปว่าตัวแบบพยากรณ์ไม่เหมาะสม และไม่ควรรนำไปใช้ในการพยากรณ์ต่อไป

## 3. การเปรียบเทียบความแม่นยำของตัวแบบพยากรณ์

เปรียบเทียบความแม่นยำของตัวแบบพยากรณ์ โดยการเปรียบเทียบราคาน้ำมันดีเซลของอนุกรมเวลาชุดที่ 2 ตั้งแต่เดือนสิงหาคมถึงเดือนตุลาคม 2565 จำนวน 3 ค่า ( $n_2 = 3$ ) กับค่าพยากรณ์ เพื่อคำนวณค่า MAPE และ RMSE ตัวแบบพยากรณ์ที่ให้ค่า MAPE

และ RMSE ค่าที่ต่ำสุด จัดเป็นตัวแบบที่มีความแม่นยำมากที่สุด เนื่องจากให้ค่าพยากรณ์ที่มีความแตกต่างกับข้อมูลจริงน้อยที่สุด สูตร MAPE และ RMSE แสดงดังนี้

$$MAPE = \frac{100}{n_2} \sum_{t=1}^{n_2} \left| \frac{e_t}{Y_t} \right| \quad \text{และ} \quad RMSE = \sqrt{\frac{1}{n_2} \sum_{t=1}^{n_2} e_t^2}$$

เมื่อ  $e_t = Y_t - \hat{Y}_t$  แทนค่าคลาดเคลื่อนจากการพยากรณ์ ณ เวลา  $t$

$Y_t$  และ  $\hat{Y}_t$  แทนอนุกรมเวลาและค่าพยากรณ์ ณ เวลา  $t$  ตามลำดับ

## ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

### 1. ผลการสร้างตัวแบบพยากรณ์

จากการตรวจสอบลักษณะการเคลื่อนไหวของอนุกรมเวลาราคาน้ำมันดีเซลชุดที่ 1 ตั้งแต่เดือนมกราคม 2546 ถึงเดือนกรกฎาคม 2565 จำนวน 235 เดือน พบว่า อนุกรมเวลาชุดนี้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ( $\chi^2 = 192.4, p < 0.0001$ ) แต่ไม่มีอิทธิพลของฤดูกาล ( $\chi^2 = 1.831, p = 0.999$ ) (ภาพที่ 1) ดังนั้น กำจัดแนวโน้มด้วยการหาผลต่างลำดับที่ 1 ( $d = 1$ ) ได้ อนุกรมเวลามีลักษณะคงที่ จึงสร้างกราฟ ACF และ PACF (ภาพที่ 2) เพื่อสร้างตัวแบบพยากรณ์โดยวิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ พบว่า กราฟ ACF มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ในตัวเองของแท่งที่ 1 และ 5 เกินขอบเขตความเชื่อมั่นร้อยละ 95 กำหนดให้  $q = 2$  และจากกราฟ PACF มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ในตัวเองส่วนของแท่งที่ 1 และ 10 เกินขอบเขตความเชื่อมั่นร้อยละ 95 กำหนดให้  $p = 2$  จะได้ตัวแบบพยากรณ์ที่เป็นไปได้เริ่มต้น คือ ตัวแบบ ARIMA(2, 1, 2) ผลการคัดเลือกตัวแบบ ให้เหลือเฉพาะพารามิเตอร์ที่มีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 พบว่า ตัวแบบพยากรณ์ที่เหมาะสม คือ ตัวแบบ ARIMA(2, 1, 1) ไม่มีพจน์ค่าคงตัว เมื่อแทนค่าประมาณพารามิเตอร์จากโปรแกรม

SPSS จะได้ตัวแบบพยากรณ์ของแต่ละวิธีการพยากรณ์ (ตารางที่ 1) โดยมีความหมายของสัญลักษณ์ต่างๆ ในตารางดังนี้

$\hat{Y}_t$  และ  $\hat{Y}_{t+m}$  แทนค่าพยากรณ์ราคาน้ำมันดีเซล ณ เวลา  $t$  และเวลา  $t + m$  ตามลำดับ โดยที่  $m$  แทนจำนวนช่วงเวลาที่ต้องการพยากรณ์ไปข้างหน้า  
 $e_t$  แทนค่าคลาดเคลื่อนจากการพยากรณ์ ณ เวลา  $t$

$\hat{\theta} = \hat{\mu}\hat{\phi}_p(B)$  แทนค่าคงตัว (Constant) โดยที่  $\hat{\mu}$  แทนค่าเฉลี่ยของอนุกรมเวลาที่คงที่ (Stationary)

$\hat{\phi}_p(B) = 1 - \hat{\phi}_1B - \hat{\phi}_2B^2 - \dots - \hat{\phi}_pB^p$  แทนตัวดำเนินการถดถอยในตัวอันดับที่  $p$  กรณีไม่มีฤดูกาล (Non-Seasonal Autoregressive Operator of Order  $p$ : AR( $p$ ))

$\hat{\theta}_q(B) = 1 - \hat{\theta}_1B - \hat{\theta}_2B^2 - \dots - \hat{\theta}_qB^q$  แทนตัวดำเนินการเฉลี่ยเคลื่อนที่อันดับที่  $q$  กรณีไม่มี

ฤดูกาล (Non-Seasonal Moving Average Operator of Order  $q$ : MA( $q$ ))

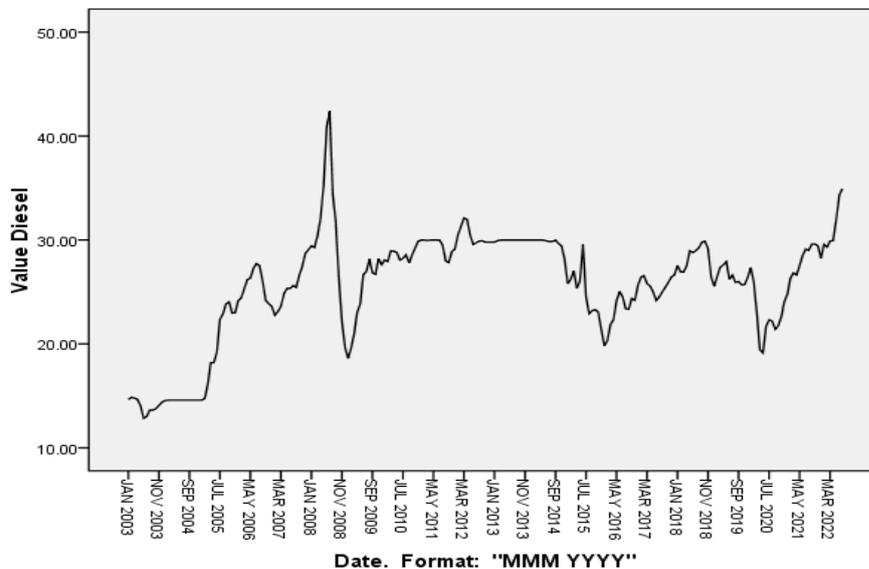
$t$  แทนช่วงเวลา ซึ่งมีค่าตั้งแต่ 1 ถึง  $n_t$  โดยที่  $n_t$  แทนจำนวนข้อมูลในอนุกรมเวลาราคาน้ำมันดีเซลชุดที่ 1 ( $n_t = 235$ )

$d$  แทนลำดับที่ของการหาผลต่างเพื่อกำจัดแนวโน้ม ณ ที่นี้  $d = 1$

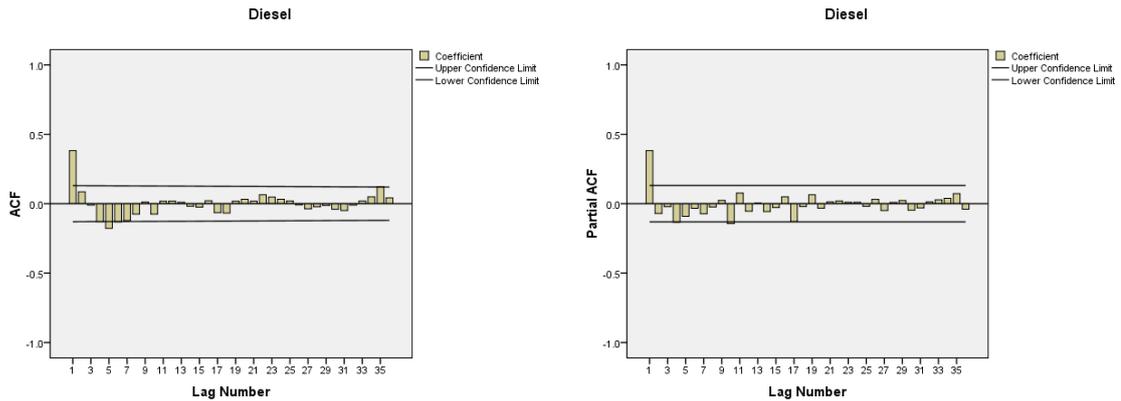
$B^j$  แทนตัวดำเนินการถอยหลัง (Backward Operator) ไป  $j$  ช่วงเวลา นั่นคือ  $B^jY_t = Y_{t-j}$

$a_t$  และ  $b_t$  แทนค่าประมาณ ณ เวลา  $t$  แสดงระยะตัดแกน  $Y$  และความชันของแนวโน้มตามลำดับ

$\alpha$ ,  $\gamma$  และ  $\phi$  แทนค่าคงตัวการทำให้อยู่ โดยที่  $0 < \alpha < 1$ ,  $0 < \gamma < 1$  และ  $0 < \phi < 1$



ภาพที่ 1 ลักษณะการเคลื่อนไหวของอนุกรมเวลาราคาน้ำมันดีเซล ตั้งแต่เดือนมกราคม 2546 ถึงเดือนกรกฎาคม 2565



ภาพที่ 2 ACF และ PACF ของอนุกรมเวลาราคาน้ำมันดีเซล เมื่อแปลงข้อมูลด้วยผลต่างลำดับที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการพยากรณ์

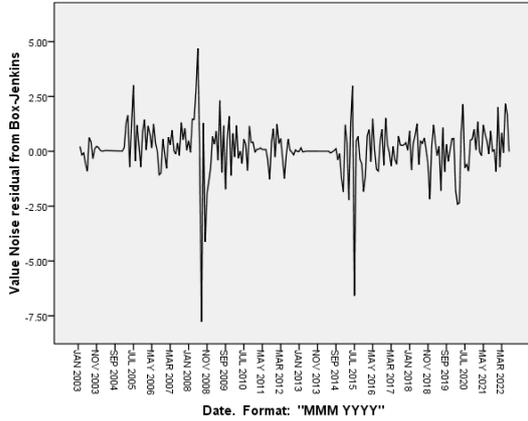
วิธี	วิธีพยากรณ์	ตัวแบบพยากรณ์	
1	บ็อกซ์- เจนกินส์	ARIMA(p, d, q) $\hat{\phi}_p(B)(1-B)^d \hat{Y}_t = \hat{\delta} + \hat{\theta}_q(B)e_t$	ARIMA(2, 1, 1) ไม่มีพจน์ค่าคงตัว $\hat{Y}_t = 2.27755Y_{t-1} - 1.6932Y_{t-2} + 0.41565Y_{t-3}$ $- 0.88796e_{t-1}$
2	โฮลต์	$\hat{Y}_{t+m} = a_t + b_t(m)$ โดยที่ $a_t = \alpha Y_t + (1-\alpha)(a_{t-1} + b_{t-1})$ , $b_t = \gamma(a_t - a_{t-1}) + (1-\gamma)b_{t-1}$	$\hat{Y}_{t+m} = 34.93997 + 0.05384(m)$
3	บราวน์	$\hat{Y}_{t+m} = a_t + b_t \left[ (m-1) + \frac{1}{\alpha} \right]$ โดยที่ $a_t = \alpha Y_t + (1-\alpha)a_{t-1}$ , $b_t = \alpha(a_t - a_{t-1}) + (1-\alpha)b_{t-1}$	$\hat{Y}_{t+m} = 34.68363 + 1.18011 \left[ (m-1) + \frac{1}{0.78907} \right]$
4	แคมป์	$\hat{Y}_{t+m} = a_t + b_t \sum_{i=1}^m \phi^i$ โดยที่ $a_t = \alpha Y_t + (1-\alpha)(a_{t-1} + \phi b_{t-1})$ , $b_t = \gamma(a_t - a_{t-1}) + (1-\gamma)\phi b_{t-1}$	$\hat{Y}_{t+m} = 34.94001 + 0.63006 \sum_{i=1}^m (0.39824)^i$

โดยที่  $Y_{t-1}$  แทนอนุกรมเวลาราคาน้ำมันดีเซล ณ เวลา  $t-1$ ,  $e_{t-1}$  แทนอนุกรมเวลาค่าคลาดเคลื่อน ณ เวลา  $t-1$  และ  $m=1$  แทนเดือนสิงหาคม 2565

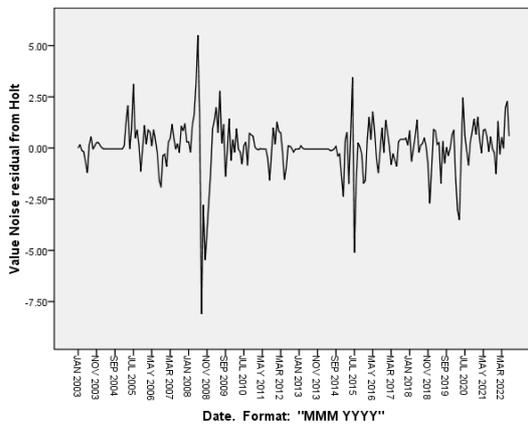
## 2. ผลการตรวจสอบข้อสมมุติของตัวแบบพยากรณ์

ผลการตรวจสอบค่าคลาดเคลื่อนของแต่ละ  
วิธีการพยากรณ์ พบว่า ค่าคลาดเคลื่อนทุกวิธีการ

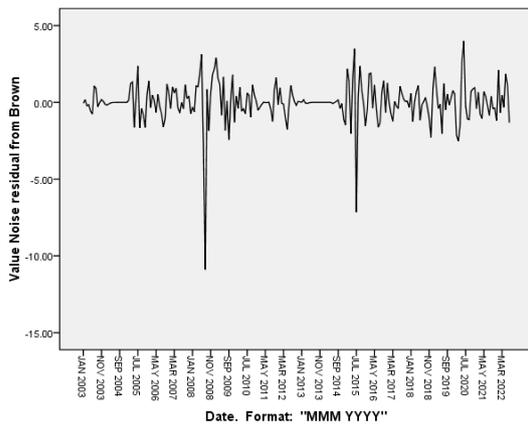
พยากรณ์มีความเป็นอิสระกัน หมายความว่า ตัวแบบ  
พยากรณ์ที่สร้างขึ้นทั้ง 4 วิธีมีความเหมาะสม (ภาพที่  
3-6)



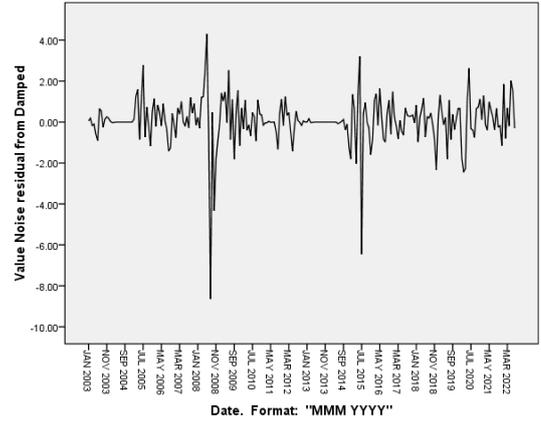
ภาพที่ 3 ค่าคลาดเคลื่อนจากวิธีบ็อกซ์-เจนกินส์



ภาพที่ 4 ค่าคลาดเคลื่อนจากวิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของโฮลต์



ภาพที่ 5 ค่าคลาดเคลื่อนจากวิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของบราวน์



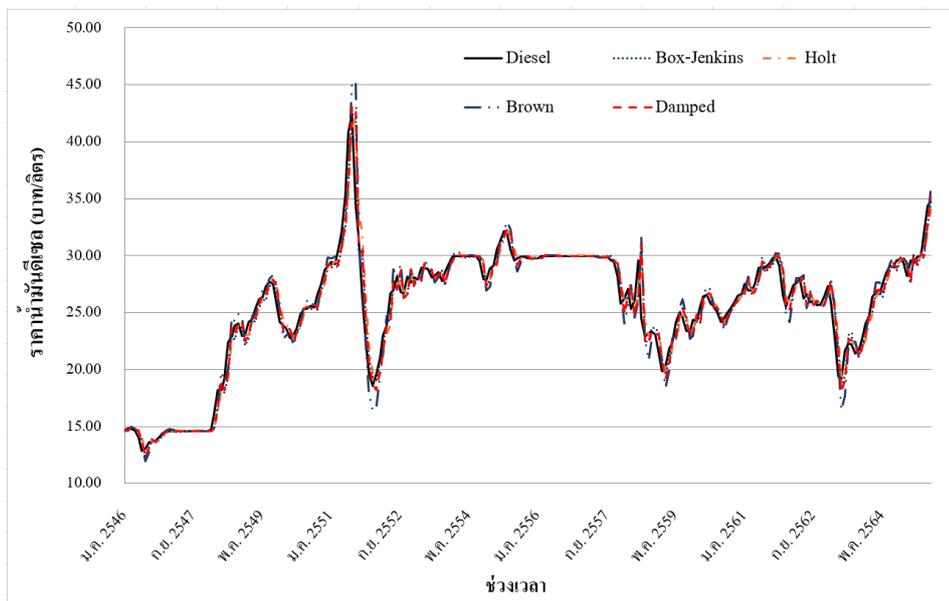
ภาพที่ 6 ค่าคลาดเคลื่อนจากวิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีแนวโน้มแบบแคมป์

### 3. ผลการเปรียบเทียบความแม่นยำของตัวแบบพยากรณ์

เมื่อใช้ตัวแบบพยากรณ์ที่สร้างขึ้น (ตารางที่ 1) สำหรับการพยากรณ์ราคาน้ำมันดีเซลชุดที่ 1 ตั้งแต่เดือนมกราคม 2546 ถึงเดือนกรกฎาคม 2565 จำนวน 235 เดือน พบว่า ทุกวิธีการพยากรณ์ที่ศึกษาให้ค่าพยากรณ์ใกล้เคียงกับข้อมูลจริงมาก (ภาพที่ 7) และเมื่อใช้พยากรณ์ราคาน้ำมันดีเซลชุดที่ 2 ตั้งแต่เดือนสิงหาคมถึงเดือนตุลาคม 2565 จำนวน 3 เดือน พบว่า วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ให้ค่าพยากรณ์ต่ำกว่าข้อมูลจริงเล็กน้อย ประมาณ 0.15 – 1.13 บาท/ลิตร วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของโฮลต์ให้ค่าพยากรณ์สูงกว่าข้อมูลจริงเล็กน้อย ประมาณ 0.05 – 0.16 บาท/ลิตร วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีแนวโน้มแบบแคมป์ให้ค่าพยากรณ์สูงกว่าข้อมูลจริงเล็กน้อย ประมาณ 0.25 – 0.39 บาท/ลิตร แต่วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของบราวน์ให้ค่าพยากรณ์สูงกว่าข้อมูลจริงค่อนข้างมากประมาณ 1.24 – 3.60 บาท/ลิตร เมื่อเปรียบเทียบค่าพยากรณ์กับข้อมูลจริงโดยการคำนวณค่า MAPE และ RMSE พบว่า วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของโฮลต์มีความแม่นยำมากที่สุด โดยมีความผิดพลาดจากการพยากรณ์ราคาน้ำมันดีเซลร้อยละ 0.31 (MAPE = 0.3053) หรือมีความ

ผิดพลาดจากการพยากรณ์ราคาน้ำมันดีเซล 0.12 บาท/ลิตร (RMSE = 0.1158) รองลงมา คือ วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีแนวโน้มแบบแคมป์

วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ และวิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของบราวน์ ตามลำดับ (ตารางที่ 2)



ภาพที่ 7 การเปรียบเทียบค่าพยากรณ์ราคาน้ำมันดีเซลของข้อมูลชุดที่ 1

ตารางที่ 2 MAPE และ RMSE ของข้อมูลชุดที่ 2

ช่วงเวลา	ราคาน้ำมัน		ค่าพยากรณ์			
	ดีเซล	บ็อกซ์-เจนกินส์	โฮลต์	บราวน์	แคมป์	
ส.ค. 2565	34.94	34.79	34.99	36.18	35.19	
ก.ย. 2565	34.94	34.33	35.05	37.36	35.29	
ต.ค. 2565	34.94	33.81	35.10	38.54	35.33	
<b>MAPE</b>		1.8031	<b>0.3053</b>	6.9262	0.9445	
<b>RMSE</b>		0.7464	<b>0.1158</b>	2.6047	0.3352	

ผลการศึกษานี้ไม่สอดคล้องกับการศึกษาของ Keerativibool (2013a) ที่พบว่า วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ที่มีตัวแบบ ARIMA(1, 1, 1) ไม่มีพจน์ของค่าคงตัวมีความแม่นยำมากที่สุดในการพยากรณ์ราคาน้ำมันแก๊สโซฮอล์ 91 ในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล (RMSE = 0.0684) และไม่สอดคล้องกับการศึกษาของ Keerativibool (2013b) ที่พบว่า วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของ

บราวน์มีความแม่นยำมากที่สุดในการพยากรณ์ราคาน้ำมันแก๊สโซฮอล์ 95 ในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล (MAPE = 0.5547) รวมถึงยังไม่สอดคล้องกับการศึกษาของ Tangsai *et al.* (2019) ที่พบว่า วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังอย่างง่ายมีความแม่นยำมากที่สุดในการพยากรณ์ปริมาณการใช้น้ำมันดีเซลของประเทศไทย (MAPE = 0.3036) เนื่องจาก การศึกษานี้ได้พยากรณ์ราคาน้ำมันดีเซล แต่

การศึกษาในอดีตเป็นการพยากรณ์ราคาน้ำมันแก๊สโซฮอล์และปริมาณการใช้น้ำมันดีเซล

## สรุป

การศึกษาค้นคว้าได้นำเสนอวิธีการสร้างและเปรียบเทียบตัวแบบพยากรณ์ที่เหมาะสมกับอนุกรมเวลาราคาขายปลีกน้ำมันดีเซลด้วยวิธีการทางสถิติ 4 วิธี ได้แก่ วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของโพลต์ วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของบราวน์ และวิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีแนวโน้มแบบแคมป์ โดยใช้อัตราการเคลื่อนที่ของราคาขายปลีกของน้ำมันดีเซลเฉลี่ยต่อเดือนจากเว็บไซต์ธนาคารแห่งประเทศไทย ตั้งแต่เดือนมกราคม 2546 ถึงเดือนตุลาคม 2565 จำนวน 238 เดือน ผู้วิจัยได้แบ่งอนุกรมเวลาออกเป็น 2 ชุด ชุดที่ 1 ตั้งแต่เดือนมกราคม 2546 ถึงเดือนกรกฎาคม 2565 จำนวน 235 เดือน ใช้สร้างตัวแบบพยากรณ์ และชุดที่ 2 ตั้งแต่เดือนสิงหาคมถึงเดือนตุลาคม 2565 จำนวน 3 เดือน ใช้เปรียบเทียบความแม่นยำของตัวแบบพยากรณ์ด้วยเกณฑ์ MAPE และ RMSE ที่ต่ำที่สุด ผลการศึกษาพบว่า ตัวแบบพยากรณ์จากวิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังของโพลต์มีความแม่นยำมากที่สุด ซึ่งมีความผิดพลาดจากการพยากรณ์ร้อยละ 0.31 หรือมีความผิดพลาดในการพยากรณ์ 0.12 บาท/ลิตร และเป็นตัวแบบพยากรณ์ที่มีข้อสมมุติเป็นจริง มีตัวแบบดังนี้

$$\hat{Y}_{t+m} = 34.93997 + 0.05384(m)$$

เมื่อ  $m = 1$  แทนเดือนสิงหาคม 2565

งานวิจัยนี้เป็นการพยากรณ์ราคาขายปลีกน้ำมันดีเซลในเขตกรุงเทพมหานคร โดยพิจารณาเพียงราคาขายปลีกน้ำมันดีเซลในอดีตเท่านั้น ซึ่งการเปลี่ยนแปลงราคาน้ำมันดีเซลอาจขึ้นอยู่กับปัจจัย

อื่น ๆ เช่น อัตราแลกเปลี่ยน วัฏจักรขาดเงินเพื่อความต้องการใช้น้ำมันเพื่อการเดินทาง การตรึงราคาน้ำมันของรัฐบาล การผลิตน้ำมันในสหรัฐอเมริกา นโยบายการเก็บภาษีของภาครัฐ หรือปัจจัยอื่น ๆ ที่ส่งผลให้ราคาน้ำมันตลาดโลกเปลี่ยนแปลง (Jumlong and Naknok, 2018; Investing.com, 2021) ดังนั้น การศึกษาค้นคว้าต่อไปควรสร้างตัวแบบพยากรณ์โดยพิจารณาปัจจัยต่าง ๆ เหล่านี้ร่วมด้วย เพื่อให้ได้ตัวแบบที่มีความแม่นยำในการพยากรณ์มากยิ่งขึ้น

## เอกสารอ้างอิง

- Bank of Thailand. 2022. **Prices of major industrial commodities.** Available Source: [https://www.bot.or.th/App/BTWS\\_STAT/statistics/ReportPage.aspx?reportID=90&language=th](https://www.bot.or.th/App/BTWS_STAT/statistics/ReportPage.aspx?reportID=90&language=th), December 8, 2022. (in Thai)
- Bowerman, B.L. and O'Connell, R.T. 2000. **Forecasting and Time Series: An Applied Approach.** 3<sup>rd</sup> ed. Duxbury Press, California.
- Box, G.E.P., Jenkins, G.M., Reinsel, G.C. and Ljung, G.M. 2015. **Time Series Analysis: Forecasting and Control.** 5<sup>th</sup> ed. Prentice Hall, New Jersey.
- iEnergyGuru. 2022. **Diesel fuel.** Available Source: <https://ienergyguru.com/knowledgebase/diesel-fuel/>, December 14, 2022. (in Thai)
- Investing.com. 2021. **6 factors causing crude oil prices to fluctuate throughout 2021.** Available Source: <https://th.investing.com/analysis/article-200438822>, December 9, 2022. (in Thai)
- Jumlong, M. and Naknok, S. 2018. A study of factors affecting and forecasting the price of diesel oil in Thailand, pp. 818-828. *In Graduate*

- School Mini- Conference 2018.** Suan Sunandha Rajabhat University, Bangkok. (in Thai)
- Keerativibool, W. 2013a. Forecasting model for the retail prices of gasohol 91 in Bangkok and peripheral areas. **Thaksin University Journal** 16(3 special issue): 1-10. (in Thai)
- Keerativibool, W. 2013b. Forecasting model for the retail prices of gasohol 95 in Bangkok and peripheral areas. **KMUTT Research and Development Journal** 36(4): 423-438. (in Thai)
- Ket-iam, S. 2003. **Forecasting Technique.** 2<sup>nd</sup> ed. Thaksin University, Songkhla. (in Thai)
- Manmin, M. 2006. **Time Series and Forecasting.** Foreprinting, Bangkok. (in Thai)
- RYT9. 2022. **In 2022 Why is the world oil price dropping? Thailand's not decreasing?** Available Source: <https://www.ryt9.com/s/prg/3307823>, December 9, 2022. (in Thai)
- Tangsai, S., Kumwong, P. and Dansawad, N. 2019. A comparison of the forecasting method for the monthly consumption of diesel in Thailand, pp. 392-400. *In the 7<sup>th</sup> Academic Science and Technology Conference 2019.* Rangsit University, Pathum Thani. (in Thai)