



Research on Modern science and Utilizing Technological Innovation Journal

RMUTI Journal

(RMUTI Journal)

Vol. 18 No. 3 September–December 2025

2025



INSTITUTE OF RESEARCH AND DEVELOPMENT
RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY ISAN

RMUTI Journal ได้รับการประเมินคุณภาพให้อยู่ในฐานข้อมูล
ของศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (TCI) กลุ่มที่ 2

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

วัตถุประสงค์

1. เพื่อเป็นสื่อกลางในการแลกเปลี่ยนองค์ความรู้ด้านวิชาการ ด้านงานวิจัย และสิ่งประดิษฐ์ระหว่างนักวิชาการ และนักวิจัยกับผู้ที่สนใจทั่วไป
2. เพื่อเผยแพร่ผลงานทางวิชาการ ผลงานวิจัย และสิ่งประดิษฐ์ของนักวิชาการและนักวิจัยสู่สาธารณชน

หลักเกณฑ์การส่งบทความ

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

ประเภทของบทความที่ตีพิมพ์ บทความวิจัย และบทความวิชาการ

กระบวนการพิจารณาบทความ ใช้กระบวนการพิจารณาบทความโดยผู้ทรงคุณวุฒิที่มาจากหลากหลายหน่วยงาน จำนวน 3 ท่าน ต่อ 1 บทความ บทความทุกบทความจะต้องผ่านการพิจารณาโดยผู้ทรงคุณวุฒิที่เกี่ยวข้องแบบผู้ทรงคุณวุฒิและผู้แต่งไม่ทราบชื่อกันและกัน (double-blind review)

เจ้าของ

สถาบันวิจัยและพัฒนา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

744 ถ.สุนทรารายณ์ ต.ในเมือง อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

โทรศัพท์ 0 - 4423 - 3063 โทรสาร 0 - 4423 - 3064

E-mail : rmuti.journal@gmail.com

ตีพิมพ์เผยแพร่ราย 4 เดือน ปีละ 3 ฉบับ

ฉบับที่ 1 ประจำเดือนมกราคม - เดือนเมษายน

ฉบับที่ 2 ประจำเดือนพฤษภาคม - เดือนสิงหาคม

ฉบับที่ 3 เดือนกันยายน - เดือนธันวาคม

ชื่อวารสารใหม่เริ่มใช้ปีที่ 16 ฉบับที่ 3 (กันยายน - ธันวาคม) เป็นต้นไป

ลิขสิทธิ์

ต้นฉบับที่ได้รับการตีพิมพ์ ถือเป็นลิขสิทธิ์ของวารสาร RMUTI Journal และบทความในวารสารเป็นแนวคิดของผู้แต่ง มิใช่เป็นความคิดของคณะกรรมการจัดทำวารสาร และมีใช่เป็นความรับผิดชอบของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

วารสารงานวิจัยด้านวิทยาศาสตร์สมัยใหม่ และการใช้ประโยชน์นวัตกรรมเทคโนโลยี
(RMUTI Journal)

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

ที่ปรึกษากองบรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.โมชิต	ศรีภูธร	อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
รองศาสตราจารย์ ดร.ศักดิ์ระวี	ระวิกุล	ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
รองศาสตราจารย์ ดร.วีรชัย	พุทวงศ์	ประธานหลักสูตรนิติวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กองบรรณาธิการ

ศาสตราจารย์เกียรติคุณ ดร.พีระศักดิ์	ศรีนิเวศน์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ศาสตราจารย์กิตติคุณ ดร.เปี่ยมศักดิ์	เมนะเศวต	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ญาณวิทย์ ดร.เมธา	วรรณพัฒน์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ศาสตราจารย์ ดร.กุลเชษฐ์	เพียรทอง	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ศาสตราจารย์ ดร.เจษฎา	ธารีบุญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ฤทธิ์	สมบัติสมภาพ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.ตะวัน	สุชน้อย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ศาสตราจารย์ ดร.ทวนทอง	จุฑาเกตุ	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ศาสตราจารย์ ดร.ปารเมศ	ชุติมา	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.พิเชษฐ	ลิ้มสุวรรณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.มนัส	ชัยจันทร์	มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์
ศาสตราจารย์ ดร.วินัย	ประหลัมภาญจน์	มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์
ศาสตราจารย์ ดร.ศุภชัย	ปทุมนากุล	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ศาสตราจารย์ ดร.ศุภชัย	สิงห์ยะบุศย์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ศาสตราจารย์ ดร.สำเริง	จักรใจ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.สุชาติ	ลิ้มกตัญญู	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ศาสตราจารย์ ดร.สมชาติ	โสภณธณฤทธิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.สุทธวัฒน์	เบญจกุล	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ศาสตราจารย์ ดร.สรวุฒิ	สุจิตจร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ศาสตราจารย์ ดร.อรอนงค์	นัยวิกุล	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.กนกอร	อินทราพิเชฐ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รองศาสตราจารย์ ดร.กนต์ธร	ชำนาญประศาสน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รองศาสตราจารย์ ดร.คงศักดิ์	ธาตุทอง	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.คณิต	มุกดาใส	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.จักรี	ศรีนันท์ฉัตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.ชนกพร	เผ่าศิริ	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.ณัฐวิวัฒน์	พลดี	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.ตรีศ	สามารถ	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.นริช	สุดสังข์	มหาวิทยาลัยนเรศวร

กองบรรณาธิการ (ต่อ)

รองศาสตราจารย์ ดร.ปราโมทย์	แพ่งคำ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รองศาสตราจารย์ ดร.ปรีชา	กอเจริญ	วิทยาลัยเทคโนโลยีจิตรลดา
รองศาสตราจารย์ ดร.วุฒิพล	สินธุนาวรัตน์	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.สุรภาพ	แก้วสวัสดิวงศ์	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.สมพงษ์	ดุ๋ยจินดาชบาพร	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.สมพร	ไชยะ	จังหวัดฉะเชิงเทรา
รองศาสตราจารย์ ดร.สิทธิชัย	แสงอาทิตย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รองศาสตราจารย์ ดร.สรายุธ	เดชะปัญญา	มหาวิทยาลัยบูรพา
รองศาสตราจารย์ อุดมศักดิ์	สาริบุตร	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นาถ	สุขศีล	มหาวิทยาลัยนครพนม
รองศาสตราจารย์ ดร.จิตติวัฒน์	นิกายจนธาร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
รองศาสตราจารย์ ดร.คมเดช	ภาพพัฒนบุรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
รองศาสตราจารย์ ดร.เชิดศักดิ์	สุขศิริพัฒน์พงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
รองศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต	กฤตาคม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
รองศาสตราจารย์ ดร.ปกิต	กำบุญมา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
รองศาสตราจารย์ ดร.รตินันท์	เหลื่อมพล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
รองศาสตราจารย์ ดร.รพีพงศ์	เปี่ยมสุวรรณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
รองศาสตราจารย์ ดร.สุจิตรา	อุ้นเรือน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
รองศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์	อัสวสุชี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไกรสิทธิ	วสุเพ็ญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักษดา	จรัสวุฒิ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาคริต	นวลฉิมพลี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพล	พิสิฐพิพัฒน์สิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เดื่อนเพ็ญ	วงศ์สอน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัฐพล	สมนา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศศิพันธ์	วงศ์สุทธาวาส	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อดิศักดิ์	หารจริง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์อนุชา	กล้าน้อย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ดร.จารุพงษ์	บรรเทา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ดร.ฉันทพิชญ์	ชามาตย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ดร.เยาวพา	ความหมั่น	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ดร.รักษาดิ	กลั่นกล้า	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ดร.วัชรินทร์	ชาติบุปผาพันธ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ดร.สุกัญญา	คำหล้า	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

บรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ศักดิ์	โยธา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
-------------------------------	------	----------------------------------

ฝ่ายจัดการและธุรการ

นางสาวรัตนา	ยี่จ่อหอ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
นางสาววลีรักษ์	ศรีศิลป์ไชย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

สารบัญ Table of Contents

บทความวิจัย (Research Articles)

Classification-based CNNs of Thai Native Chickens	1
<i>Sujitra Thipsrirach and Yingyos Thipsrirach</i>	
การออกแบบสายอากาศไมโครสตริบแบบโมโนหลายย่านความถี่สำหรับการสื่อสารไร้สาย Wi-Fi 6E	21
Design of a Multi-Band MIMO Microstrip Antenna for Wi-Fi 6E Wireless Communication	
<i>สุริย์พร เดชพันธ์, จารุวรรณ นาดสูงเนิน, ศุภนิตา แสงมณี, คมเดช ภาพัฒน์บุรี, ลำราญ สันทาลุนัย และนุชนาฏ สันทาลุนัย</i>	
<i>Suriphon Detphan, Jaruwan Nadsungnoen, Supanita Sengmanee, Khomdet Phapatanaburi, Samran Santalunai, and Nuchanart Santhalunai</i>	
การศึกษาการใช้พลังงานหมุนเวียนในอาคารอัจฉริยะ: การวิเคราะห์แนวทางสู่ Net Zero Energy Building	36
Study of Renewable Energy Utilization in Smart Buildings: An Analysis of Pathways to Net Zero Energy Building	
<i>สันติ การีสันต์ และสิทธิศักดิ์ ไรจชะยะ</i>	
<i>Santi Karisan and Sittisak Rojchaya</i>	
การวัดค่าไดอิเล็กทริกของตัวกลางด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	49
The Measurement of Dielectric Properties of Medium Using Electromagnetic Waves	
<i>วัชรพล นาคทอง, ยศวดี คำสุกร, จุฑามณี เหลวกุล, คมเดช ภาพัฒน์บุรี, ลำราญ สันทาลุนัย และนุชนาฏ สันทาลุนัย</i>	
<i>Watcharaphon Nakong, Yossawadee Khasukorn, Chuthamani Leokun, Khomdet Phapatanaburi, Samran Santalunai, and Nuchanart Santaluna</i>	
การใช้สมุนไพรเพื่อยืดอายุการเก็บรักษาและเพิ่มคุณภาพความปลอดภัยด้านจุลินทรีย์ของผลิตภัณฑ์หมูปดปรุงรส	65
Improving Microbiological Safety and Shelf-Life of Raw Seasoned Minced Pork Products Preserved by Thai-Medicinal Plants	
<i>ปัทมา ศรีน้ำเงิน, ปรีดา สิทธิศาสตร์ และฐิติกร มหิสนันท์</i>	
<i>Pattama Srinamngoen, Priyada Sittisart, and Thitikorn Mahidsanan</i>	
การลดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในฟาร์มเลี้ยงไก่ด้วยระบบชีวภาพ	81
Reduction of Hydrogen Sulfide in Chicken Farm by Biological Systems	
<i>करचित เงินคำคง, ศิริประภา ชัยเนตร, นันทน์ภัส เงินคำคง, ชินานาฏ วิทยาประภากร และรุ่งนภา เขียววิจิตร</i>	
<i>Khanchit Ngoenkhomkhong, Siraprapa Chainetr, Nannaphat Ngoenkhomkhong, Chinanat Withayaprapakorn, and Rungnapha Khiewwiji</i>	
การพัฒนาผลิตภัณฑ์ปลาหมักพร้อมบริโภคในบรรจุภัณฑ์รีทอร์ทเพาซ์	92
Product Development of Ready-to-Eat Fermented Fish Dipping Sauce in a Retort Pouch	
<i>ณัฐพงษ์ ทาราวรม, น้อมจิตต์ สุธีบุตร, เกศรินทร์ เพ็ชรรัตน์ และดวงกมล ตั้งสฤติพร</i>	
<i>Nutthapong Taraprom, Nomjit Suteebut, Kasarin Pedcharat, and Duangkamol Tungsatitporn</i>	

สารบัญ (ต่อ) Table of Contents (Cont.)

บทความวิจัย (Research Articles)

การดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 ด้วยถ่านจากเปลือกผลสำโรง	102
Adsorption of Reactive Blue 19 Dye Using Charcoal Derived from <i>Sterculia foetida</i> Fruit Rind	
วาทีณี จันมี, หทัยรัตน์ สุขเพริยบพร้อม และอารี แจ้งเรือง	
Watinee Chanmee, Hatairat Sukpreabprom, and Aree Jangruang	
การประยุกต์ใช้แพลตฟอร์มไร้โค้ดสำหรับการติดตามและประเมินผลโครงการก่อสร้างถนน	120
Application of No-Code Platforms for Monitoring and Evaluating Road Construction Projects	
เฉลิมศักดิ์ ศรีทัยแก้ว, วิศิษฐ์ศักดิ์ ทับยัง, นันทชัย ชูศิลป์ และเชิดศักดิ์ สุขศิริพัฒน์พงศ์	
Chalermsak Srithaikaew, Wisitsak Tabyang, Nuntachai Chusilp, and Cherdsak Suksiripatanapong	

Classification-based CNNs of Thai Native Chickens

Sujitra Thipsrirach¹ and Yingyos Thipsrirach^{2*}

Received: May 23, 2025; Revised: August 6, 2025; Accepted: August 7, 2025

Abstract

This paper presents the use of deep learning network-based Convolutional Neural Networks (CNNs) to enhance the efficiency of classifying purebred Thai native chickens for conservation purposes. This study specifically focuses on Thai native chicken species known as Leung Hang Khao. Due to the significant genetic diversity of the Thai native chickens, it typically requires experts to accurately identify the breeds. There are four groups of the Thai native chickens that were considered in this work; namely, purebred Leung Hang Khao male, purebred Leung Hang Khao female, crossbred male, and crossbred female. A total of 1,000 images have been collected, in which 250 images are from each group. Then, the data is divided into three sets which are training set, validation set, and testing set, in the ratios of 60:20:20, 70:20:10, and 80:10:10, respectively. Four architectures of the CNNs have been employed for verification, i.e., LeNet-5, CNN1, CNN2, and CNN3, with epochs set at 10, 20, and 50 epochs for each architecture. The results show that the CNN1 architecture with an 80:10:10 ratio and 10 epochs yielded the highest accuracy in learning, validation, testing, and prediction. Moreover, it required relatively less testing time with predicted accurate results of 100 %. The obtained results demonstrate that using the deep learning network-based convolutional neural network with a simple architecture setting can effectively classify Thai native chicken breeds.

Keywords: Deep Learning Models; Classification; Convolutional Neural Networks; Thai Native Chickens; Leung Hang Khao

¹ Department of Animal Production Technology, Rajamangala University of Technology Tawan-ok

² Department of Industrial Engineering, Rajamangala University of Technology Tawan-ok

* Corresponding Author, Tel. 08 0079 1226, E - mail: yingyos_th@rmutto.ac.th

Introduction

Thai native chickens (*Gallus gallus domesticus*) are indigenous to South and Southeast Asia, including India, southern China, Myanmar, Vietnam, and Thailand (Liu et al., 2006). Descended from the red junglefowl (*Gallus gallus*), these chickens have been raised by Thai farmers for centuries (Fumihito et al., 1994; Sawai et al., 2010; Dorji et al., 2012; Mekchay et al., 2014). They are renowned for their disease resistance and adaptability to local climates, showing significant genetic diversity. Despite this diversity, the Department of Livestock Development in Thailand has officially recognized only four native breeds: Pradu Hang Dam, Leung Hang Khao, Dang, and Chee (Mekchay et al., 2014). Surveys across various Thai provinces indicate that the Pradu Hang Dam and Leung Hang Khao breeds are the most commonly raised. These chickens are vital to rural communities, providing an affordable source of protein and supporting both primary and secondary livelihoods. In addition to being raised for consumption, they are also valued for ornamental purposes and participation in fighting competitions. Fighting chickens, particularly the Leung Hang Khao breed, were registered as a national cultural heritage in 2014, symbolizing the cultural and intellectual heritage of Phitsanulok province and Thailand. The Leung Hang Khao breed, developed specifically for combat, is known as King Naresuan's fighting rooster (Laenoi et al., 2015).

The Leung Hang Khao chicken, considered a valuable natural resource, exhibits a variety of feather colors in males, including bright dark yellow, medium yellow, light yellow (safflower or turmeric yellow), normal yellow, and ruby yellow. Their shank colors range from yellow to yellowish-black or yellowish-brown-black. This breed diversity reflects the genetic variability inherent in Thai native chickens (Katano et al., 2011). Farmers raise native chickens for various purposes, such as consumption, sale, and sport, contributing to the diversity of their physical characteristics. The practice of raising different breeds together has led to both inbreeding and crossbreeding, resulting in a mix of purebred and crossbred chickens. The Department of Livestock Development, Thailand, classifies these chickens based on physical characteristics such as feather color, beak, comb, shanks, and body shape. However, some chickens cannot be clearly classified and are grouped by male feather color into categories such as Leung, Pradu, Khiao, Dang, Chee, Thao, Dang/Lai, and Sa (Laenoi et al., 2015; Khumpeerawat et al., 2021; Wiyabot and Kiattinarueyut, 2022; Yaemkong et al., 2024).

Among native chicken breeds, Pradu Hang Dam and Leung Hang Khao are the most popular, followed by other breeds like Thao Hang Khao, Lai Hang Khao, Nok Dang Hang Dang, Khiao Hang Dam, Thao Hang Dam, Thong Dang Hang Dam, Nokgod Hang Dam, Khiao Lao Hang Khao, and Pradu Lao Hang Khao (Pramual et al., 2013; Mekchay et al., 2014; Phasouk et al., 2021). The Leung Hang Khao breed, in particular, is noted for its feather color diversity (Figure 1 and 2). Surveys in Phitsanulok province revealed that no Leung Hang Khao chickens fully met the standard perfection characteristics (beautiful face, color, shapes, shanks, and demeanor) (Yaemkong et al., 2021; Siriwadee et al., 2023). Efforts are being made to preserve purebred native chickens, with annual competitions organized to showcase these breeds. However, selecting purebred native chickens is challenging and requires significant expertise. In a case study in (Mekchay et al., 2014; Hata et al., 2021), discrepancies were observed in scoring native chickens based on standard perfection characteristics, particularly in color-related traits such as eye color, beak color, shank color, and feather color. This highlights the

difficulty in correctly identifying native chicken breeds by visual inspection, especially for those lacking sufficient experience and expertise.

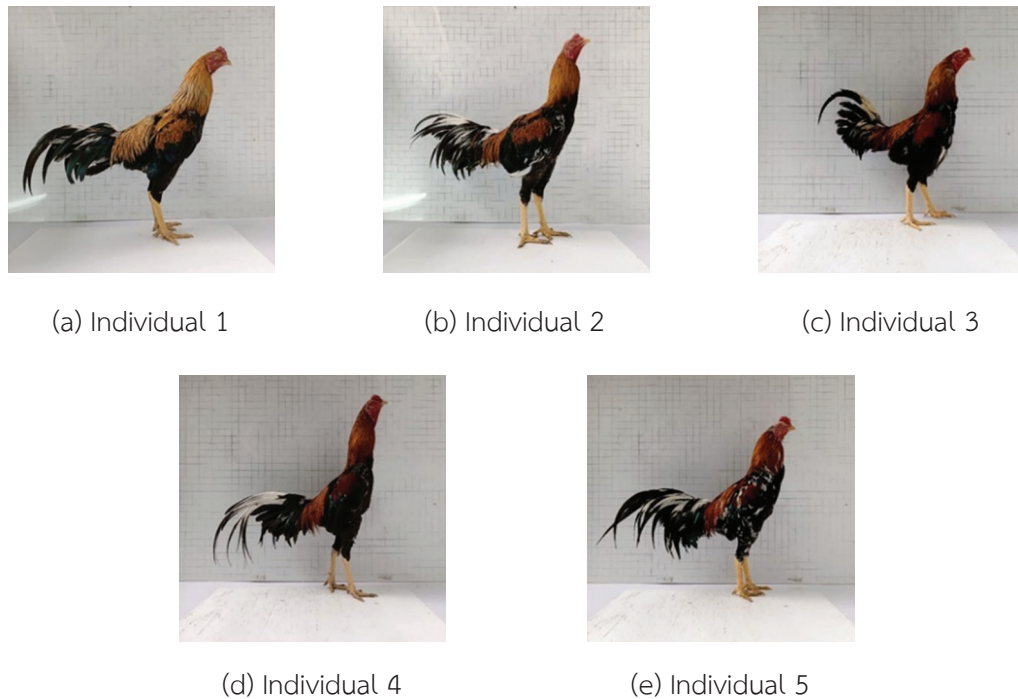


Figure 1 Samples illustrating the diversity of male Thai native chickens (Leung Hang Khao).

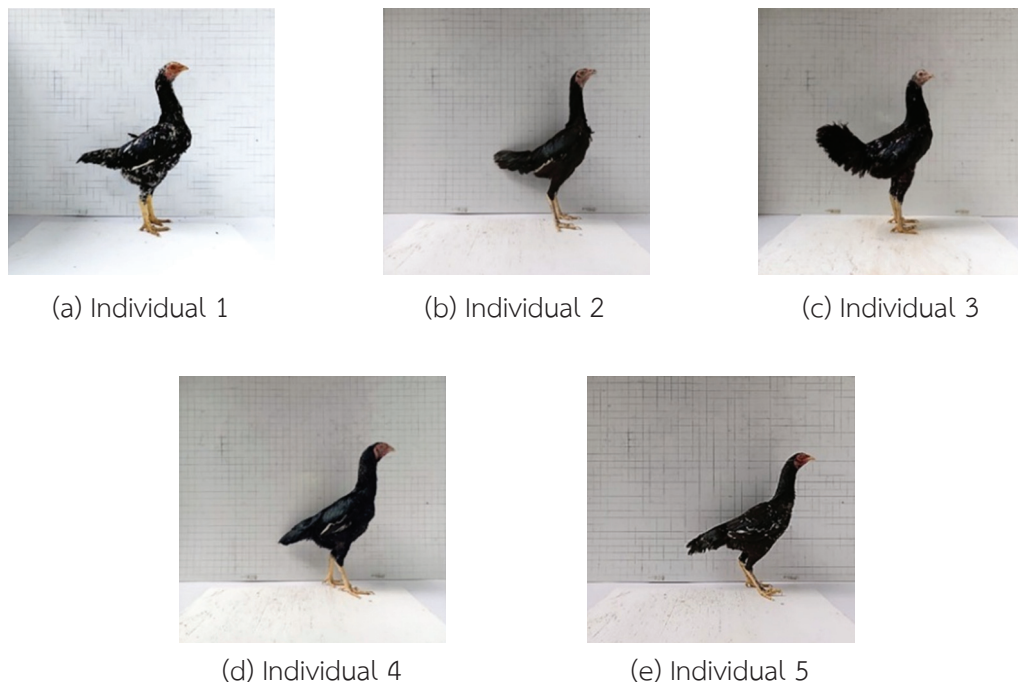


Figure 2 Samples illustrating the diversity of female Thai native chickens (Leung Hang Khao).

Despite the significance of these breeds, surveys in Phitsanulok Province have yet to identify Leung Hang Khao chickens that fully meet breed standards for both males and females. The development breeds of chickens for fighting competitions have contributed to the current diversity of Thai native chickens, with the introduction of foreign breeds from countries such as Burma and Vietnam. These

imported breeds, characterized by distinct comb shapes, feather colors, beak colors, and shank colors, have been bred with Thai native chickens to enhance their fighting abilities (Laenoi et al., 2015; Thinh et al., 2015; Rotimi et al., 2016; Buranawit et al., 2016). This genetic diversity has prompted efforts by various organizations to conserve purebred Thai native chickens for future generations, including the organization of annual native chicken competitions. Accurately selecting and classifying purebred native chickens requires significant expertise in phenotype analysis. Currently, genetic markers are used to identify gene patterns in conjunction with genetic assessments for breed verification. However, this method is both costly and time-consuming (Vanhala et al., 1998; Okumura et al., 2006; Katano et al., 2011; Shimogiri et al., 2012; Dorji and Sunar, 2014; Siriwadee et al., 2023). To address these challenges, deep learning networks-based classification methods are relatively suitable for improvement of the accuracy and efficiency of breed classification in a shorter time frame, owing current technological advancement.

Currently, one of the most important technologies is the Artificial Intelligence (AI), which involves the development of machines to be intelligent, capable of recognizing, distinguishing, and processing images, sounds, and text through a computing brain that mimics the neural network system of the human brain. The machine's computing brain is powered by machine learning, which works by learning from input-output data and applying that knowledge to analyze, predict, or drive various functions for AI. Deep learning is a sub-field of machine learning that shares the same goal but employs a learning technique characterized by an Artificial Neural Network (ANN) with multiple layers, known as a Deep Neural Network (DNN) (Samek et al., 2016). In 1998, the authors in Lecun et al. (1998) introduced a neural network with a convolutional operation by increasing the number of hidden layers in a 5-layer architectural structure called LeNet-5. This architecture enhances the efficiency of calculating image features, and this technique is also known as Convolutional Neural Networks (CNNs). The working principle involves a feature extraction process, which isolates the distinct characteristics of objects in images, such as edges, curves, and slopes. These features are then input into the neural network for classification to determine what the output image represents (Kittichai et al., 2021; Ren et al., 2022).

In recent years, machine learning algorithms have found successful applications in agriculture, particularly in animal science. For example, in (Xu et al., 2024), A multi-scale feature fusion network for Amur tiger re-identification has been developed, effectively combining global and local features to enhance accuracy without the need for prior knowledge or complex annotations. However, this model may exhibit suboptimal performance on datasets of upright animals due to its feature segmentation approach, specifically designed for large quadruped mammals like tigers. Similarly, an automated system utilizing CNNs has been proposed in (Schork et al., 2024) for monitoring and analyzing dogs' sleeping patterns, achieving an 89 % similarity to manual observations, but this system is limited by variations in image quality and environmental conditions, which can impact accuracy. Likewise, deep-learning models have been evaluated for identifying laying hens' behaviors using YOLO algorithms, showing high accuracy in detecting hens on the floor, but encountering difficulties in accurately classifying dust-bathing behaviors due to the inherent complexity of this activity (Sozzi et al., 2023). Another study introduces a deep learning model, KI-CLIP, aimed at monitoring endangered wildlife with limited data. While the model achieves high accuracy through the integration of expert knowledge,

it may face challenges in real-time adaptability and managing highly diverse environmental conditions (Mou et al., 2023). Furthermore, the work in (Zhang et al., 2023) presents the UA-MHFF-DeepLabv3+ model, a novel interactive segmentation approach that significantly reduces annotation time for dairy goat images, offering a fivefold improvement in speed over existing tools like Labelme. Nonetheless, the model still requires more than four clicks to achieve ideal segmentation accuracy, suggesting that further enhancements are necessary.

Likewise, for research related to the application of CNN techniques in animal science, the following studies are notable. Villa et al. (2017) used CNNs to classify wildlife. The authors in Hansen et al. (2018) utilized CNNs for pig face recognition. Yao et al. (2020) employed YOLOv3 for object detection to differentiate between male and female chickens from flock images and individual chicken images, then trained the data with CNNs. This method can be practically applied for gender classification of chickens to calculate the appropriate sex ratio in free-range farming. The authors in Wang et al. (2020) used the LeNet-5 architecture for pig face recognition. Khan et al. (2020) applied deep CNNs with Rectified Linear Units (ReLU) activation functions to classify animal faces. In 2020, CNNs were used to classify images of birds in the wild by Singh et al. The authors in Raj et al. (2020) modified the VGGNet architecture for bird species classification. Transfer learning techniques were employed by comparing with the architectures of VGG16, ResNet50, MobileNet, XceptionNet, and an 8-layer CNN to classify chicken droppings for disease diagnosis, finding that XceptionNet had the highest validation accuracy at 94 % (Mbelwa et al., 2021). These studies demonstrate that deep learning techniques-based CNNs continue to be researched and developed to achieve the most efficient techniques for practical applications tailored to different animal species.

From the review of related literature, no information was found regarding the use of CNN techniques for classifying Thai native chickens. Therefore, this paper proposes using this technique to classify images of Thai native chickens between purebreds and crossbreds, starting with the Leung Hang Khao breed, which is genetically diverse in plumage color and is commonly raised throughout all regions of Thailand. The objective of this study is to develop an appropriate architecture for Thai native chicken images to enhance the efficiency of selecting purebred native chickens for conservation purposes. The LeNet-5 architecture, along with three architectures derived from LeNet-5, namely CNN1, CNN2, and CNN3, will be adopted. The data obtained from this study will serve as preliminary information for further studies on the classification of other native chicken breeds, aiming to develop tools for classifying native chickens in the future. This research could provide valuable insights for the livestock industry, especially in Thailand.

The major contributions of this work can be summarized as follows:

1. To best of our knowledge, there are no studies that have applied CNN-based methods to classify Thai native chicken breeds, especially Leung Hang Khao. This work introduced four CNN structures to classify Leung Hang Khao so that the identified results of Leung Hang Khao chickens can fully meet breed standards for both males and females, leading to no bias in annual Thai native competitions.
2. The image dataset of Leung Hang Khao chickens was collected from two real field sites. The dataset includes purebred Leung Hang Khao chickens from the first site and crossbred chickens between Leung Hang Khao and Pradu Hang Dam breeds from the second site. A total of 200 chickens

(100 males and 100 females), all aged 20 weeks or older, were selected, with 50 chickens from each breed and gender. Images were captured using an OPPO Reno3 Pro smartphone.

The remainder of the paper is organized as follows. Section II describes a theoretical background of CNNs-based approach. Section III presents the methodology of the study. The obtained results and discussion are given in Section IV. Finally, Section V concludes the paper.

Theoretical Background of CNN-Based Deep Learning

Convolutional Neural Networks (CNNs) represent a specialized architecture in deep learning, designed to handle grid-like data structures, such as images. CNNs are distinguished by their ability to learn spatial hierarchies of features through a series of operations including convolution, pooling, and fully connected layers. These operations are underpinned by specific mathematical expressions that govern the behavior and performance of the network.

1. Convolution Operation

The core operation in a CNN is the convolution, which is mathematically defined as the sum of the element-wise multiplication of a filter or kernel K with the input matrix X . For a given input image X of dimensions $H \times W \times C$ (where H is the height, W is the width, and C is the number of channels), and a filter of K dimensions $k_h \times k_w \times C$ (where k_h and k_w are the filter's height and width), the convolution operation to produce the output feature map Y is expressed by, (Equation (1))

$$Y(i, j) = \sum_{c=1}^C \sum_{m=1}^{k_h} \sum_{n=1}^{k_w} X(i+m-1, j+n-1, c) K(m, n, c) \quad (1)$$

where i and j iterate over the spatial dimensions of output feature map Y . This operation is typically followed by the application of a non-linear activation function, such as the ReLU.

2. Activation Function

The ReLU activation function introduces non-linearity into the network, which is crucial for learning complex patterns. The ReLU is mathematically defined as, (Equation (2))

$$ReLU(z) = \max(0, z) \quad (2)$$

where z is the input to the activation function. ReLU is applied element-wise to output of the convolutional layer, enabling the network to learn non-linear representations of the input data.

3. Pooling Operation

Pooling layer, such as max pooling, are used to reduce the spatial dimensions of the feature maps, thereby lowering the computational complexity and making the network invariant to small translations in the input. For a feature map Y of demensions $H' \times W' \times C'$, the max pooling operation with a filter size $p_h \times p_w$ can be expressed as, (Equation (3))

$$Z(i, j, c) = \max_{m=1, \dots, p_h; n=1, \dots, p_w} Y(p_h i + m - 1, p_w j + n - 1, c) \quad (3)$$

where Z is the down sampled output feature map, and c indexes overt the channels.

4. Flattening and Fully Connected Layers

After the convolutional and pooling layers, the multidimensional output feature maps are flattened into a one-dimensional vector f , which is then passed through fully connected layers. If w represents the weight and b represents the biased for a fully connected layer, the output o is given by, (Equation (4))

$$o = w^T f + b \quad (4)$$

In the context of classification tasks, the output from the fully connected layer is typically passed through a softmax function to produce a probability distribution over the target classes.

5. Softmax Function

The softmax function is used in the output layer of a CNN when the task is to classify the input into one of several categories. Given a vector of raw scores $o = [o_1, o_2, \dots, o_N]$ where N is the number of classes, the softmax function computes the probability $P(y=i)$ that the input belongs to class i as, (Equation (5))

$$P(y=i) = \frac{\exp(o_i)}{\sum_{k=1}^N \exp(o_k)} \quad (5)$$

This function ensures that the output probabilities sum to one, allowing for a probabilistic interpretation of the model's predictions.

6. Loss Function and Backpropagation

Training a CNN involves minimizing a loss function that measures the discrepancy between the predicted output and the true labels. For classification tasks, the cross-entropy loss is commonly used, which is defined as,

$$L = -\sum_{i=1}^N y_i \log P(y=i) \quad (6)$$

The loss function defined in Equation (6) represents the cross-entropy loss, which is fundamental to the training process of the CNN models used in this study for classifying Thai native chickens. It measures the discrepancy between the predicted class probabilities and the true labels, enabling the network to adjust its parameters through backpropagation and gradient descent. By minimizing this loss, the CNN learns to improve its classification accuracy across the four chicken categories: purebred male, purebred female, crossbred male, and crossbred female. The effectiveness of this loss function is reflected in the study's results, where the CNN1 model, trained with this function, achieved 100 % accuracy, demonstrating the model's ability to distinguish subtle visual differences in chicken breeds.

where y_i is true label (represented as a one-hot encoded vector) and $P(y=i)$ is the predicted probability for class i . The parameters of the network (i.e., the weights and biases) are updated using the gradient descent algorithm, which relies on the backpropagation method to compute the gradients of the loss function w.r.t. the network's parameters as, (Equation (7))

$$\theta \leftarrow \theta - \eta \frac{\partial L}{\partial \theta} \quad (7)$$

where θ represents the parameters, and η is the learning rate.

7. Convolutional Hierarchies and Feature Learning

CNNs exploit the hierarchical nature of images by stacking multiple convolutional layers. Early layers typically capture low-level features such as edges and textures, while deeper layers typically capture more abstract features such as shapes and objects. This hierarchical feature extraction is a key advantage of CNNs over traditional methods, as it allows the network to automatically learn relevant features from the data, leading to improved performance in complex visual tasks.

8. Regularization Techniques

To prevent overfitting, various regularization techniques are applied in CNNs, such as dropout, where randomly selected neurons are ignored during training. Dropout can be expressed mathematically as, (Equation (8))

$$f^{(l)} = r^l \odot h^l \quad (8)$$

where r^l is a binary mask vector (with each element drawn from a Bernoulli distribution), is h^l the output of the l-th layer, and $\odot$ denotes element-wise multiplication

9. Accuracy

Accuracy is a commonly used performance metric to evaluate the effectiveness of a Convolutional Neural Network (CNN), especially in classification tasks. It represents the proportion of correctly classified samples out of the total number of samples evaluated. The accuracy can be calculated using the following formula (Equation (9)):

$$accuracy = \frac{TP \times TN}{TP + TN + FP + FN} \times 100 \quad (9)$$

Explanation:

TP (True Positives): The number of samples that are correctly predicted as positive.

TN (True Negatives): The number of samples that are correctly predicted as negative.

FP (False Positives): The number of negative samples that are incorrectly predicted as positive.

FN (False Negatives): The number of positive samples that are incorrectly predicted as negative.

The mathematical foundation of CNNs enables the automatic learning of spatial hierarchies in data, which is critical for tasks involving complex and high-dimensional inputs such as images. Through the combined use of convolution, pooling, and fully connected layers, CNNs are able to efficiently process and classify visual information, making them indispensable in modern deep learning applications. The structure of a CNN is divided into layers, which consist of the input layer, hidden layers, and the output layer. The number of units or nodes in the output layer depends on the number of categories (classes) in the image dataset, as shown in Figure 3. If the probability value is highest for a particular category, that category is considered the predicted answer.

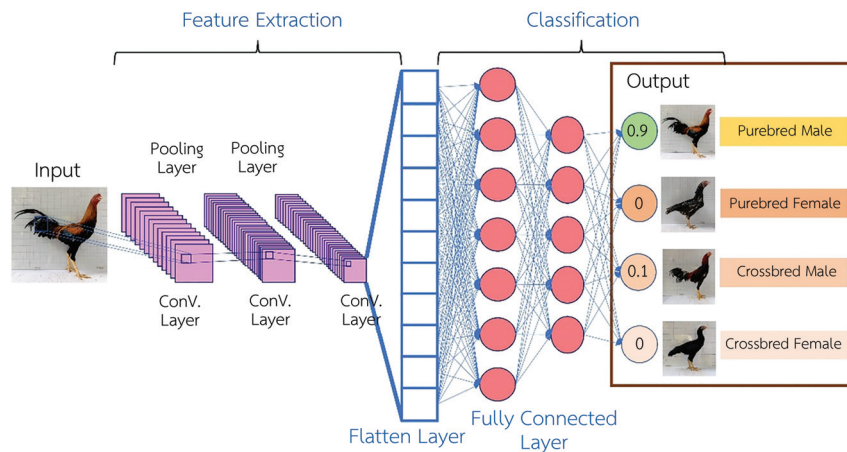


Figure 3 Workflow of the CNN architecture.

Figure 3 illustrates the process of the CNN structure as it performs image classification, specifically focusing on identifying different types of chickens (e.g., Purebred male, Purebred female, Crossbred male, Crossbred female). The process begins with an input image of a chicken, which is fed into the network. Then, the image passes through multiple convolutional layers, each applying a set of filters to generate feature maps that highlight various aspects of the image, such as edges, textures, and patterns. After each convolutional layer, pooling layers down sample the feature maps, reducing their spatial dimensions while retaining essential information. This process helps in making the network more robust to variations in the input image and reduces computational complexity. Once feature extraction is complete, the output from the final pooling layer is flattened into a one-dimensional vector, ready to be processed by fully connected layers. The flattened vector is passed through one or more fully connected layers, where neurons connect to every neuron in the previous layer, allowing the network to learn complex patterns and relationships between the features extracted by the convolutional layers. The final fully connected layer outputs a set of probabilities, each corresponding to a particular class. The class with the highest probability is selected as the predicted label for the input image. In this example, the network correctly identifies the image as a Purebred male with high confidence. The CNN architecture demonstrated in the figure is designed to perform image classification by extracting relevant features from input images and using those features to make accurate predictions. This process is typical in many image classification tasks, where the goal is to categorize images into predefined classes based on learned patterns.

Methodology

This study presents the classification of Thai native chicken breeds using CNNs-based approaches to identify the most suitable architecture for classifying images of Thai native chickens. The following steps have been undertaken.

1. Preparation of Thai Native Chicken Image Data

In this work, Thai native chickens were sourced from two places specializing in breeding and improving chicken breeds under the supervision of experts, as follows.

1. Kabin Buri Poultry Research and Breeding Center in Prachin Buri managed by the Department of Livestock Development, Thailand, which is dedicated to collecting and developing Leung Hang Khao Thai native chicken breed.

2. Faculty of Agriculture at Khon Kaen University, Thailand, which is involved in the collection and development of the Pradu Hang Dam Thai native chicken breed.

3. The native chickens were kept in cages measuring 50 cm x 80 cm x 1 m, with one chicken per cage, in an open housing environment maintained at around 30 degrees Celsius. During the experiment, feed and clean drinking water were available ad libitum and the diets were provided twice daily at 8:00 AM and 4:00 PM. This research was approved by the Animal Ethics Committee with license number 06/2564/IACUC.

For image collection, purebred Leung Hang Khao chickens from the first source and crossbred chickens between the Leung Hang Khao and Pradu Hang Dam breeds (produced from parent chickens sourced from both locations) were used. A total of 200 chickens (100 males and 100 females), all aged 20 weeks or older, were selected, with 50 chickens from each breed and gender. Images were captured using the OPPO Reno3 Pro smartphone model CPH2037, which has a quad camera system with specifications of 64 MP + 13 MP (Telephoto) + 8 MP (UltraWide) + 2 MP (MONO) and a maximum image resolution of 3,120 x 4,160 pixels.

The photo setup included a white table covered with a white future-board to prevent the chickens from slipping during photography. The background was a whiteboard grid with 1 x 1 square inches for measuring the height of the chickens. A white background was used to ensure a consistent environment for all photos as seen in Figure 4. The distance between the camera and the chickens was set at 80 cm to maintain uniformity in the image capture. A total of 250 images were taken for each group, resulting in 1,000 images in total.



(a) Leung Hang Khao purebred male



(b) Leung Hang Khao purebred female



(c) Crossbred male



(d) Crossbred female

Figure 4 Samples illustrating the Thai native chicken.

2. Verification Tools

This work was conducted using Python programming language with Jupyter Notebook. Jupyter is an Interactive Python that uses a web browser interface, functioning in a server-client model. The backend processor is IPython, and it operates through a JupyterLab server in a Localhost environment (Localhost:8888) (Toomey, 2018; Muttenthaler and Hebart, 2021).

3. CNN Models and Verification

The architectural structure used in this experiment is a simple architecture developed specifically to determine the appropriate architecture for classifying Thai native chickens. The model testing begins by inputting images of Thai native chickens and resizing them from 3,456 x 3,456 pixels to 224 x 224 pixels, then scaling the data to have values between 0 and 1 using the normalization method by dividing the data by 255. The data is divided into three sets: the training set, the validation set, and the test set. The model is tested with the following ratios: 60:20:20, 70:20:10, and 80:10:10. The architecture is created, and the model is tested three times, after which the average is calculated. The number of epochs used in processing is set at three levels: 10, 20, and 50 epochs as seen Figure 5.

In Figure 5, it is illustrated the process of CNN-based classification of Thai native chickens using different CNN architectures. The process begins with an input image of size 3,456 x 3,456 x 3, where 3 represents the RGB color channels. The image undergoes pre-processing, which includes resizing and rescaling. Resizing likely adjusts the image dimensions to match the input requirements of the CNN models, while rescaling normalizes the pixel values, typically between 0 and 1, to standardize the input data. After pre-processing, the image is passed through various CNN architectures, including LeNet-5, CNN1, CNN2, and CNN3. Each architecture processes the image to extract features that help in differentiating between different classes of chickens. The output layer then classifies the image into one of four possible classes, which could represent different breeds of Thai native chickens. The figure emphasizes the experimental approach of using multiple CNN architectures to determine the most effective model for accurate classification.

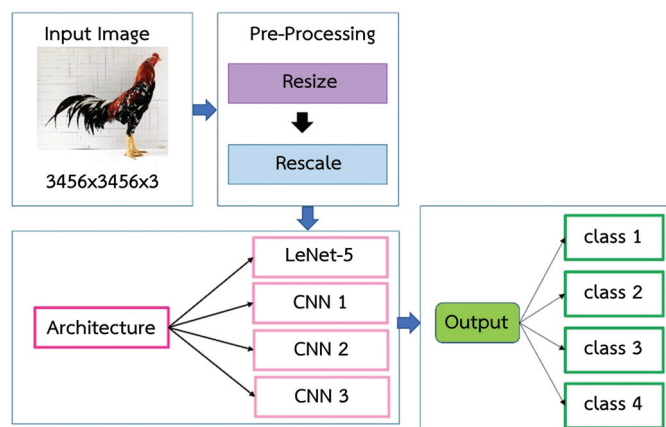


Figure 5 An overview structure of the proposed classification-based CNNs of Thai native chicken with Lenet-5, CNN1, CNN2, and CNN3.

4. Performance Evaluation

The performance evaluation of the model was conducted using a confusion matrix, including key metrics such as True Positive (TP), representing data correctly predicted as belonging to the considered group; True Negative (TN), which is data correctly predicted as not belonging to the considered group; False Positive (FP), where data is incorrectly predicted as belonging to the considered group; and False Negative (FN), where data is incorrectly predicted as not belonging to the considered group. These prediction values are essential for calculating the accuracy, following the method described in Equation (9) (Krstinić et al., 2020; Arias-Duart et al., 2023), as given by,

In this experiment, 28 images were randomly selected from the dataset of Thai native chicken images, with 7 images per group, to test the prediction accuracy. The number of correctly predicted images by the model was counted, and the percentage accuracy was calculated to measure the model's performance

Results and Discussion

The application of CNN-based techniques for classifying images of Thai native chickens aims to identify the most suitable architecture for this task. The goal is to gather data to develop efficient tools for classifying the Thai native chickens using images. Four groups of Thai native chickens were used in the experiment: purebred Leung Hang Khao male, purebred Leung Hang Khao female, Crossbred male, and Crossbred female. Four architectures were tested: LeNet-5, CNN1, CNN2, and CNN3 (Figure 6), with different data split ratios for training, validation, and testing (60:20:20, 70:20:10, and 80:10:10) and training periods of 10 epochs, 20 epochs, and 50 epochs. The results showed that the CNN1 architecture, with an 80:10:10 data split and 10 epochs, achieved 100 % accuracy in learning, validation, and testing, predicting correctly 100 % of the time with the shortest processing time. This was likely due to CNN1's minimal convolutional layers, only two. Additionally, CNN1, CNN2, and CNN3 exhibited more stable training and validation accuracy and loss compared to LeNet-5, with stability beginning around the 10th epoch. When training 50 of epochs with an 80:10:10 data split, all four architectures achieved 100 % accuracy. This demonstrates that deep learning using simple CNN architectures can effectively classify images of Thai native chickens, consistent with previous studies using this technique to classify various bird species. For example, the authors in (Singh et al., 2020) used CNNs to classify five bird species from smartphone images taken in natural environments, achieving 93 % learning accuracy and 80 % testing accuracy. The work presented in (Raj et al., 2020) used a modified VGGNet architecture to classify 60 bird species with 93.19 % learning accuracy and 84.91 % testing accuracy. In (Yao et al., 2020), the authors used six different CNN architectures to classify male and female chickens, finding VGG-19 to be the most accurate at 96.85 %. Other studies have applied CNNs to classify wild animals and livestock, achieving high accuracy with architectures like ResNets and LeNet-5.

Although the CNN1 model was able to classify images of Thai native chickens with 100 % accuracy on the test dataset prepared in this study, such results were achieved under highly controlled conditions, such as neutral backgrounds, consistent lighting, and images captured from a standardized angle. Furthermore, the test dataset was relatively limited in size, which may not adequately reflect

the model's applicability in diverse real-world environments. Therefore, further experiments using external datasets or real-world scenarios are necessary to validate the model's performance in more varied and challenging contexts.

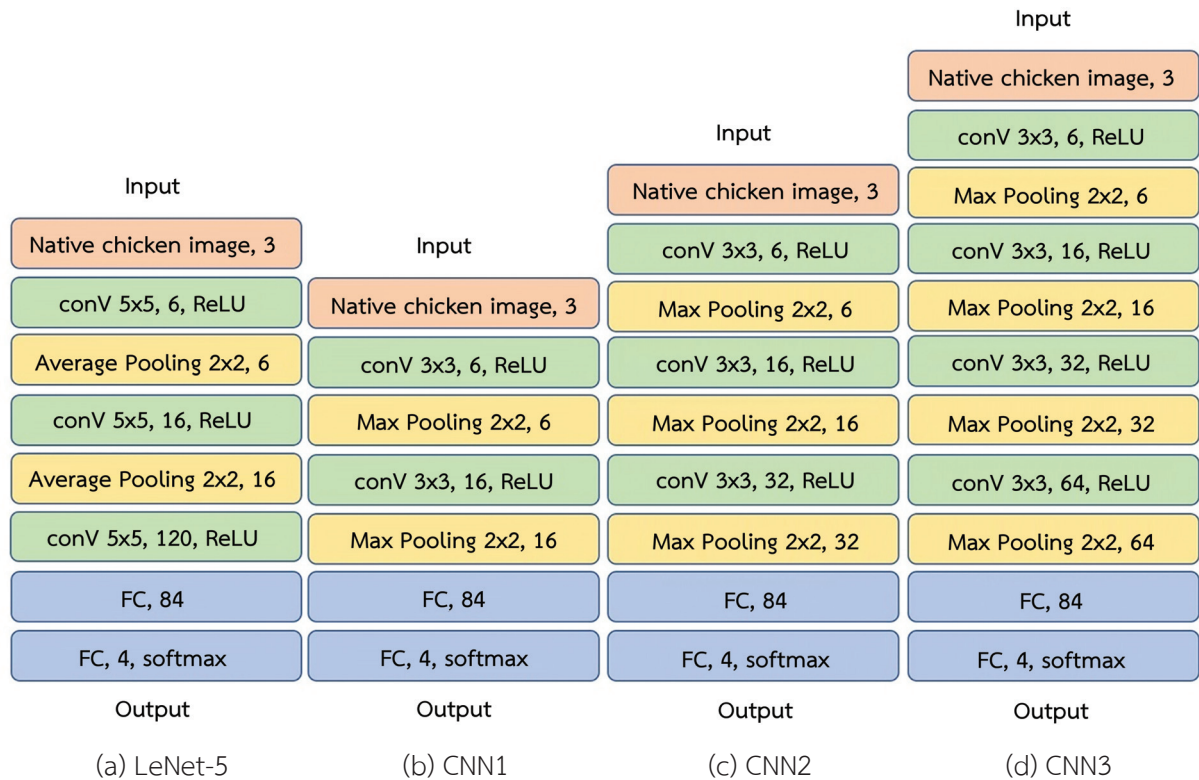


Figure 6 The architectures of CNNs-based approaches.

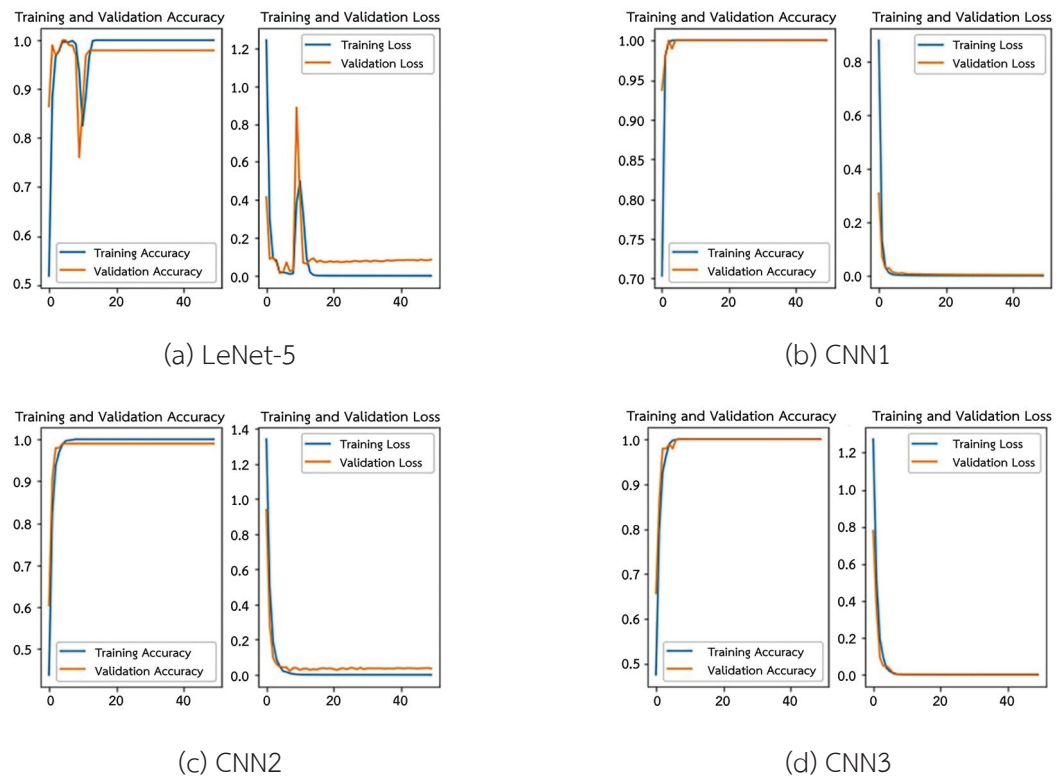


Figure 7 The training and validation accuracy and loss curves for four different convolutional neural network architectures over 50 epochs.

Table 1 presents a comparison of different neural network architectures LeNet-5, CNN1, CNN2, and CNN3 used to classify Thai native chicken. These architectures are evaluated based on various metrics including training accuracy, validation accuracy, testing accuracy, and prediction accuracy across different data splits (60:20:20, 70:20:10, and 80:10:10). Across the architectures, CNN1, with a data split of 80:10:10 and an execution time of 104 seconds, exhibits the most consistent and superior performance, achieving 100 % accuracy across validation, testing, and prediction stages. This indicates that CNN1 is the most efficient and reliable model for this classification task.

Notably, although LeNet-5 also performs well with high accuracy scores across all stages, it falls short compared to CNN1, especially in terms of testing and prediction accuracy where CNN1 consistently hits 100 %. Furthermore, CNN1 achieves these results with a relatively low computation time of 104 seconds, highlighting its efficiency. In contrast, other architectures like CNN2 and CNN3, despite also achieving perfect scores in certain instances, require longer execution times, which may not be optimal for real-time applications. The results suggest that CNN1, particularly with the 80:10:10 split, is the most effective model, balancing high accuracy and low computational cost.

The graphs presented in Figure 7 illustrate the training and validation accuracy, as well as the training and validation loss, for four deep learning models LeNet-5, CNN1, CNN2, and CNN3 over 50 epochs. The accuracy graphs for all models reveal that each architecture rapidly achieves high accuracy within the first 10 epochs, with minimal differences between training and validation accuracy thereafter. This rapid convergence suggests that the models are highly efficient in learning the necessary features for classifying Thai native chickens. Among the architectures, CNN1 and CNN2 demonstrate the most stable and consistent accuracy, achieving nearly perfect alignment between training and validation accuracy early in the training process. LeNet-5, while ultimately achieving high accuracy, exhibits a more noticeable fluctuation in the initial epochs, indicating that it requires more time to stabilize. Similarly, CNN3 shows a slight gap between training and validation accuracy during the initial epochs, which closes as the training progresses.

The loss graphs further corroborate these observations, with all models showing a significant reduction in both training and validation loss within the first few epochs. The graphs for CNN1 and CNN2 display the most rapid decline, with loss values approaching zero early in the training, reflecting their strong generalization capabilities. LeNet-5 and CNN3, however, exhibit a more gradual reduction in loss, particularly in the initial epochs, which aligns with the fluctuations observed in their accuracy graphs. Despite these initial variations, all models converge to low loss values, indicating effective learning. The close alignment of training and validation loss across all models also suggests that there is minimal overfitting, reinforcing the robustness of these architectures. Therefore, the analysis indicates that CNN1 and CNN2 are the most efficient and stable architectures for this classification task, while LeNet-5 and CNN3, though effective, require more epochs to achieve similar performance.

Table 1 Comparison of Four Different CNN Architectures Used to Classify The Thai Native Chickens Which Is Presented As Means $\pm$ Standard Deviation (S.D.)

Architecture	Ratio	Epoch	Time (s)	Training Accuracy (%)	Validation Accuracy (%)	Testing Accuracy (%)	Prediction (%)
LeNET-5	60:20:20	10	237	99.33 $\pm$ 0.51	97.92 $\pm$ 0.27	97.77 $\pm$ 0.25	97.50 $\pm$ 0.28
		20	420	96.38 $\pm$ 0.89	96.35 $\pm$ 0.85	95.98 $\pm$ 0.59	95.00 $\pm$ 0.95
		50	754	100 $\pm$ 0.00	97.40 $\pm$ 0.81	97.32 $\pm$ 0.84	97.75 $\pm$ 1.08
	70:20:10	10	237	100 $\pm$ 0.00	98.96 $\pm$ 0.51	99.22 $\pm$ 0.33	100 $\pm$ 0.00
		20	425	100 $\pm$ 0.00	98.96 $\pm$ 0.72	99.22 $\pm$ 0.26	99.33 $\pm$ 0.51
		50	746	100 $\pm$ 0.00	96.88 $\pm$ 0.58	96.88 $\pm$ 0.89	99.33 $\pm$ 0.51
	80:10:10	10	236	100 $\pm$ 0.00	100 $\pm$ 0.00	97.92 $\pm$ 0.47	100 $\pm$ 0.00
		20	410	99.87 $\pm$ 0.29	99.48 $\pm$ 0.05	98.66 $\pm$ 0.51	99.33 $\pm$ 0.51
		50	748	100 $\pm$ 0.00	97.92 $\pm$ 0.27	100 $\pm$ 0.00	100 $\pm$ 0.00
CNN1	60:20:20	10	106	100 $\pm$ 0.00	98.96 $\pm$ 0.87	98.66 $\pm$ 0.51	100 $\pm$ 0.00
		20	141	100 $\pm$ 0.00	98.44 $\pm$ 0.39	99.11 $\pm$ 0.32	100 $\pm$ 0.00
		50	347	100 $\pm$ 0.00	98.68 $\pm$ 0.93	95.26 $\pm$ 0.75	97.50 $\pm$ 0.95
	70:20:10	10	102	100 $\pm$ 0.00	99.48 $\pm$ 0.53	100 $\pm$ 0.00	100 $\pm$ 0.00
		20	160	100 $\pm$ 0.00	100 $\pm$ 0.00	100 $\pm$ 0.00	100 $\pm$ 0.00
		50	347	100 $\pm$ 0.00	100 $\pm$ 0.00	98.96 $\pm$ 0.40	100 $\pm$ 0.00
	80:10:10	10	104	100 $\pm$ 0.00	100 $\pm$ 0.00	100 $\pm$ 0.00	100 $\pm$ 0.00
		20	157	100 $\pm$ 0.00	100 $\pm$ 0.00	99.22 $\pm$ 0.29	100 $\pm$ 0.00
		50	346	100 $\pm$ 0.00	100 $\pm$ 0.00	99.22 $\pm$ 0.25	100 $\pm$ 0.00
CNN2	60:20:20	10	121	100 $\pm$ 0.00	100 $\pm$ 0.00	100 $\pm$ 0.00	100 $\pm$ 0.00
		20	168	100 $\pm$ 0.00	100 $\pm$ 0.00	98.86 $\pm$ 0.36	100 $\pm$ 0.00
		50	395	100 $\pm$ 0.00	98.96 $\pm$ 0.75	98.96 $\pm$ 0.12	100 $\pm$ 0.00
	70:20:10	10	119	100 $\pm$ 0.00	100 $\pm$ 0.00	100 $\pm$ 0.00	100 $\pm$ 0.00
		20	172	100 $\pm$ 0.00	99.22 $\pm$ 0.32	98.53 $\pm$ 0.39	100 $\pm$ 0.00
		50	396	100 $\pm$ 0.00	98.75 $\pm$ 0.85	100 $\pm$ 0.00	100 $\pm$ 0.00
	80:10:10	10	115	100 $\pm$ 0.00	98.96 $\pm$ 0.36	99.22 $\pm$ 0.22	100 $\pm$ 0.00
		20	178	100 $\pm$ 0.00	100 $\pm$ 0.00	99.22 $\pm$ 0.29	100 $\pm$ 0.00
		50	392	100 $\pm$ 0.00	98.96 $\pm$ 0.98	100 $\pm$ 0.00	100 $\pm$ 0.00
CNN3	60:20:20	10	122	98.86 $\pm$ 1.09	92.71 $\pm$ 0.85	92.97 $\pm$ 0.95	92.50 $\pm$ 0.59
		20	184	100 $\pm$ 0.00	98.96 $\pm$ 0.78	100 $\pm$ 0.00	100 $\pm$ 0.00
		50	415	100 $\pm$ 0.00	98.25 $\pm$ 0.74	100 $\pm$ 0.00	100 $\pm$ 0.00
	70:20:10	10	119	98.86 $\pm$ 0.83	92.71 $\pm$ 0.46	92.97 $\pm$ 1.05	95.00 $\pm$ 0.19
		20	191	100 $\pm$ 0.00	98.96 $\pm$ 0.83	100 $\pm$ 0.00	100 $\pm$ 0.00
		50	416	100 $\pm$ 0.00	99.22 $\pm$ 1.01	100 $\pm$ 0.00	100 $\pm$ 0.00
	80:10:10	10	114	99.87 $\pm$ 0.46	100 $\pm$ 0.00	100 $\pm$ 0.00	100 $\pm$ 0.00
		20	186	100 $\pm$ 0.00	98.96 $\pm$ 0.69	99.22 $\pm$ 1.05	100 $\pm$ 0.00
		50	402	100 $\pm$ 0.00	100 $\pm$ 0.00	100 $\pm$ 0.00	100 $\pm$ 0.00



Figure 8 The confusion matrix for the performance evaluation of the classification model.

The confusion matrix in Figure 8 shows the classification performance of the best model for distinguishing among four categories of Thai native chickens: purebred male, purebred female, crossbred male, and crossbred female. The matrix demonstrates perfect classification accuracy, as all 28 images in each class were correctly identified without any misclassifications. This result highlights the model's ability to effectively learn and distinguish between the subtle differences in the visual features of the chickens across different breeds and genders. The complete diagonal alignment, with no off-diagonal errors, further emphasizes the robustness and precision of the model, validating its suitability for the task of poultry classification.

Conclusion

This paper introduced the employment of deep learning techniques with CNNs for classifying Thai native chickens, specifically the Leung Hang Khao breed. The findings demonstrated that the CNN1, which was of simple design and setting, was the fastest and most efficient in classifying Thai native chicken images. The CNN1 architecture achieved 100 % accuracy in learning, validation, testing, and prediction, making it useful for verifying the Thai native chicken breeds and reducing the variability in judgments made by committee members with differing levels of experiences during Thai native chicken competitions. Moreover, the introduced technique aided farmers in accurately selecting breeding pairs for preserving Thai native chicken breeds.

Future work will focus on increasing the number of datasets for other Thai native chicken breeds and may involve refining the deep learning model to improve its efficiency and accuracy in classifying a variety of the native chicken breeds.

References

- Arias-Duart, A., Mariotti, E., Garcia-Gasulla, D. and Alonso-Moral, J.M. (2023). A Confusion Matrix for Evaluating Feature Attribution Methods. In *2023 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW)*, 3709-3714. <http://doi.org/10.1109/CVPRW59228.2023.00380>

- Buranawit, K., Chailungka, C., Wongsunsri, C. and Laenoi, W. (2016). Phenotypic Characterization of Thai Native Black-Bone Chickens Indigenous to Northern Thailand. *The Thai Journal of Veterinary Medicine*, 46(4), 547-554. <https://he01.tci-thaijo.org/index.php/tjvm/article/view/73774/59525>
- Dorji, N. and Sunar, S. (2014). Morphometric Variations Among Five Bhutanese Indigenous Chickens (*Gallus domesticus*). *Journal of Animal and Poultry Sciences*, 3(3), 76-85.
- Dorji, N., Duangjinda, M. and Phasuk, Y. (2012). Genetic Characterization of Bhutanese Native Chickens Based on an Analysis of Red Junglefowl (*Gallus gallus gallus* and *Gallus gallus spadecius*), Domestic Southeast Asian and Commercial Chicken Lines (*Gallus gallus domesticus*). *Genetics and Molecular Biology*, 35(3), 603-609. <https://doi.org/10.1590/S1415-47572012005000039>
- Fumihito, A., Miyake, T., Sumi, S.i., Takada, M., Ohno, S. and Kondo, N. (1994). One Subspecies of the Red Junglefowl (*Gallus gallus gallus*) Suffices as the Matriarchic Ancestor of All Domestic Breeds. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 91(26), 12505-12509. <https://doi.org/10.1073/pnas.91.26.12505>
- Hansen, M.F., Smith, M.L., Smith, L.N., Salter, M.G., Baxter, E.M., Farish, M. and Grieve, B. (2018). Towards On-Farm Pig Face Recognition Using Convolutional Neural Networks. *Computers in Industry*, 98, 145-152. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2018.02.016>
- Hata, A., Nunome, M., Suwanasopee, T., Duengkae, P., Chaiwatana, S., Chamchumroon, W., Suzuki, T., Koonawootrittriron, S., Matsuda, Y. and Srikulnath, K. (2021). Origin and Evolutionary History of Domestic Chickens Inferred from a Large Population Study of Thai Red Junglefowl and Indigenous Chickens. *Scientific Reports*, 11, 2035. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-81589-7>
- Katano, T., Shimogiri, T., Kawabe, K. and Okamoto, S. (2011). Genetic Diversity and Population Structure of Indonesian Native Chickens Based on Single Nucleotide Polymorphism Markers. *Poultry Science*, 90(11), 2471-2478. <https://doi.org/10.3382/ps.2011-01450>
- Khan, R.H., Kang, K.W., Lim, S.J., Youn, S.D., Kwon, O.J., Lee, S.H. and Kwon, K.R. (2020). Animal Face Classification Using Dual Deep Convolutional Neural Network. *Journal of Korea Multimedia Society*, 23(4), 525-538. <https://doi.org/10.9717/kmms.2020.23.4.525>
- Khumpeerawat, P., Duangjinda, M. and Phasuk, Y. (2021). Factors Affecting Gene Expression Associated with the Skin Color of Black-Bone Chicken in Thailand. *Poultry Science*, 100(11), 101440. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2021.101440>
- Kittichai, V., Kaewthamasorn, M., Thanee, S., Jomtarak, R., Klanboot, K., Naing, K.M., Tongloy, T., Chuwongin, S. and Boonsang, S. (2021). Classification for Avian Malaria Parasite *Plasmodium gallinaceum* Blood Stages by Using Deep Convolutional Neural Networks. *Scientific Reports*, 11, 16919. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-96475-5>
- Krstinić, D., Braović, M., Šerić, L. and Božić-Štulić, D. (2020). Multi-Label Classifier Performance Evaluation with Confusion Matrix. *Computer Science & Information Technology*, 1, 1-14. <https://doi.org/10.5121/csit.2020.100801>
- Laenoi, W., Kunkalw, W. and Buranawit, K. (2015). Phenotypic Characterization and Farm Management of Indigenous Chicken Reared in Highland Region of Northern Thailand. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 5, 127-132. <https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2015.08.019>
- Lecun, Y., Bottou, L., Bengio, Y. and Haffner, P. (1998). Gradient-Based Learning Applied to Document Recognition. *Proceedings of the IEEE*, 86(11), 2278-2324. <https://doi.org/10.1109/5.726791>

- Liu, Y.P., Wu, G.S., Yao, Y.G., Miao, Y.W., Luikart, G., Baig, M., Beja-Pereira, A., Ding, Z.L., Palanichamy, M.G. and Zhang, Y.P. (2006). Multiple Maternal Origins of Chickens: Out of the Asian Jungles. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 38(1), 12-19. <https://doi.org/10.1016/j.ympev.2005.09.014>
- Mbelwa, H., Machuve, D. and Mbelwa, J. (2021). Deep Convolutional Neural Network for Chicken Diseases Detection. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 12(2), 759-765. <https://doi.org/10.14569/IJACSA.2021.0120295>
- Mekchay, S., Supakankul, P., Assawamakin, A., Wilantho, A., Kluabmongkol, W. and Tongsima, S. (2014). Population Structure of Four Thai Indigenous Chicken Breeds. *BMC Genetics*, 15, 1-9. <https://doi.org/10.1186/1471-2156-15-40>
- Mou, C., Liang, A., Hu, C., Meng, F., Han, B. and Xu, F. (2023). Monitoring Endangered and Rare Wildlife in the Field: A Foundation Deep Learning Model Integrating Human Knowledge for Incremental Recognition with Few Data and Low Cost. *Animals*, 13(20), 3168; <https://doi.org/10.3390/ani13203168>
- Muttenthaler, L. and Hebart, M.N. (2021). THINGSvision: a Python Toolbox for Streamlining the Extraction of Activations from Deep Neural Networks. *Frontiers in Neuroinformatics*, 15, 679838. <https://doi.org/10.3389/fninf.2021.679838>
- Okumura, F., Shimogiri, T., Kawabe, K., Okamoto, S., Nishibori, M., Yamamoto, Y. and Maeda, Y. (2006). Gene Constitution of South-East Asian Native Chickens, Commercial Chickens and Jungle Fowl Using Polymorphisms of Four Calpain Genes. *Animal Science Journal*, 77(2), 188-195. <https://doi.org/10.1111/j.1740-0929.2006.00336.x>
- Phasouk, A., Sakkatatt, P., Kruekum, P. and Fongmul, S. (2021). The Situation of Farmers Rearing Native Chickens in Muang La, Udomxay Province, Laos PDR. *Rajabhat Chiang Mai Research Journal*, 22(2), 20-34. <https://so05.tci-thaijo.org/index.php/cmruresearch/article/view/248813/171660>
- Pramual, P., Meeyen, K., Wongpakam, K. and Klinhom, U. (2013). Genetic Diversity of Thai Native Chicken Inferred from Mitochondrial DNA Sequences. *Tropical Natural History*, 13(2), 97-106. <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/tnh/article/view/103035/82579>
- Raj, S., Garyali, S., Kumar, S. and Shidnal, S. (2020). Image Based Bird Species Identification Using Convolutional Neural Network. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 9(6), 346-351. <https://www.ijert.org/research/image-based-bird-species-identification-using-convolutional-neural-network-IJERTV9IS060279.pdf>
- Ren, Y., Huang, Y., Wang, Y., Zhang, S., Qu, H., Ma, J., Wang, L. and Li, L. (2022). A High-Performance Day-Age Classification and Detection Model for Chick Based on Attention Encoder and Convolutional Neural Network. *Animals*, 12(18), <https://doi.org/10.3390/ani12182425>
- Rotimi, E., Egahi, J. and Adeoye, A. (2016). Phenotypic Characterization of Indigenous Chicken Population in Gwer-West, Benue State, Nigeria. *World Scientific News*, 53(3), 343-353.
- Samek, W., Binder, A., Montavon, G., Lapuschkin, S. and Müller, K.R. (2016). Evaluating the Visualization of What a Deep Neural Network Has Learned. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 28(11), 2660-2673. <https://doi.org/10.1109/TNNLS.2016.2599820>
- Sawai, H., Kim, H.L., Kuno, K., Suzuki, S., Gotoh, H., Takada, M., Takahata, N., Satta, Y. and Akishinonomiya, F. (2010). The Origin and Genetic Variation of Domestic Chickens with Special Reference to Junglefowls *Gallus g. gallus* and *G. varius*. *PloS One*, 5(5), <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0010639>

- Schork, I., Zamansky, A., Farhat, N., de Azevedo, C.S. and Young, R.J. (2024). Automated Observations of Dogs' Resting Behaviour Patterns Using Artificial Intelligence and Their Similarity to Behavioural Observations. *Animals*, 14(7), <https://doi.org/10.3390/ani14071109>
- Shimogiri, T., Nishida, N., Kudo, M., Niwa, K., Nishibori, M., Kinoshita, K., Okamoto, S., Maeda, Y., Tokunaga, K. and Yasue, H. (2012). Genetic Relationships Between Japanese Native and Commercial Breeds Using 70 Chicken Autosomal SNP Genotypes by the DigiTag2 Assay. *Animal Genetics*, 43(1), 98-103. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2052.2011.02206.x>
- Singh, A., Jain, A. and Rai, B.K. (2020). Image Based Bird Species Identification. *International Journal of Research in Engineering, IT and Social Sciences*, 10(4), 17-24.
- Siriwadee, P., Wirot, L., Thanapol, P. and Wirawan, N. (2023). Genetic Diversity Among Five Native Thai Chickens and Khiew-Phalee Chickens in Lower-Northern Thailand Using Mitochondrial DNA Barcodes. *Biodiversitas*, 24(4), 1962-1970. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d240404>
- Sozzi, M., Pillan, G., Ciarelli, C., Marinello, F., Pirrone, F., Bordignon, F., Bordignon, A., Xiccato, G. and Trocino, A. (2023). Measuring Comfort Behaviours in Laying Hens Using Deep-Learning Tools. *Animals*, 13(1), <https://doi.org/10.3390/ani13010033>
- Thinh, N.H., Tuan, H.A., Dang, P.K. and Doan, B.H. (2015). Multi-Spurred Chicken Breed and Livelihood of Ethnic People in North Vietnam: Characterisation and Prospects. *The 1st International conference on Native chicken Journal*. February 23-25, Centara Hotel Khon Kaen, Thailand.
- Toomey, D. (2018). *Learning Jupyter 5: Explore Interactive Computing Using Python, Java, JavaScript, R, Julia, and JupyterLab* (2ndEd). Packt Publishing Ltd.
- Vanhala, T., Tuiskula-Haavisto, M., Elo, K., Vilkki, J. and Maki-Tanila, A. (1998). Evaluation of Genetic Variability and Genetic Distances Between Eight Chicken Lines Using Microsatellite Markers. *Poultry Science*, 77(6), 783-790. <https://doi.org/10.1093/ps/77.6.783>
- Villa, A.G., Salazar, A. and Vargas, F. (2017). Towards Automatic wild Animal Monitoring: Identification of Animal Species in Camera-Trap Images Using Very Deep Convolutional Neural Networks. *Ecological Informatics*, 41, 24-32. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2017.07.004>
- Wang, K., Chen, C. and He, Y. (2020). Research on Pig Face Recognition Model Based on Keras Convolutional Neural Network. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*. 474(3), <https://doi.org/10.1088/1755-1315/474/3/032030>
- Wiyabot, T. and Kiattinarueyut, S. (2022) Development and Identifying Quantitative and Quantities Traits for Breeding of Samae Dam Chicken (*Gallus gallus*), Thailand: Diversity of Phenotypic Characteristics. *Journal of the Hellenic Veterinary Medical Society*, 73(4), 4763-4772. <https://doi.org/10.12681/jhvms.27405>
- Xu, N., Ma, Z., Xia, Y., Dong, Y., Zi, J., Xu, D., Xu, F., Su, X., Zhang, H. and Chen, F. (2024). A Serial Multi-scale Feature Fusion and Enhancement Network for Amur Tiger Re-Identification. *Animals*, 14(7), <https://doi.org/10.3390/ani14071106>
- Yaemkong, S., Phromnoi, S., Mingchai, C. and Jongjitvimol, T. (2024). Characterization of Phenotypic Variation in Indigenous Chicken Populations in Lower Northern Thailand to Improve Chicken Breeding. *International Journal of Zoology*, 2024, <https://doi.org/10.1155/2024/9985076>
- Yao, Y., Yu, H., Mu, J., Li, J. and Pu, H. (2020). Estimation of the Gender Ratio of Chickens Based on Computer Vision: Dataset and Exploration. *Entropy*, 22(7), <https://doi.org/10.3390/e22070719>



- Yeamkong, S., Tangmo, S., Howhan, S., Gothom, P., Jaipong, P., Incharoen, T. and Muangtong, S. (2021). Effects of *Sesbania Grandiflora* (L.) DESV, *Spathodea Campanulate* (P.) Beauv. and *Cochlospermum Regium* (L.) Alston. flowers supplementation layer diet on egg production, egg quality and blood parameters. *Life Sciences and Environment Journal*, 22, 238-251. <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/psru/article/view/244717/167534>
- Zhang, L., Han, G., Qiao, Y., Xu, L., Chen, L. and Tang, J. (2023). Interactive Dairy Goat Image Segmentation for Precision Livestock Farming. *Animals*, 13(20), <https://doi.org/10.3390/ani13203250>

การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบไมโหมหลายย่านความถี่สำหรับการสื่อสารไร้สาย Wi-Fi 6E

Design of a Multi-Band MIMO Microstrip Antenna for Wi-Fi 6E Wireless Communication

สุรียพร เดชพันธ์¹ จารุวรรณ นาดสูงเนิน¹ ศุภนิตา แสงมณี¹ คมเดช ภาพพัฒนบุรี¹ สำราญ สันทาลุนัย² และนุชนาฏ สันทาลุนัย^{1*}
Suriphon Detphan¹ Jaruwat Nadsungnoen¹ Supanita Sengmanee¹ Khomdet Phapatanaburi¹ Samran Santalunai² and Nuchanart Santhalunai^{1*}

Received: October 11, 2024; Revised: June 17, 2025; Accepted: June 19, 2025

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบหลายย่านความถี่สำหรับระบบไมโหม (MIMO) ที่รองรับเทคโนโลยี Wi-Fi 6E โดยใช้เทคนิคโครงสร้างเรโซแนนซ์หลายชุดรวมกับการเพิ่มช่องว่างในแผ่นตัวนำ เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการแผ่กระจายคลื่นและการแยกสัญญาณ สายอากาศประกอบด้วยอิลิเมนต์ จำนวน 4 ชุด รองรับการทำงานในย่านความถี่ 2.45 5.5 และ 6.5 GHz โดยเน้นการลดค่าการแยกโดดเดี่ยว (Isolation) ระหว่างพอร์ตทั้ง 4 ให้ได้ค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน ผลการจำลองด้วยโปรแกรม CST Studio Suite 2024 พบว่าสายอากาศมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (S_{11}) ต่ำกว่า -10 dB และค่าการแยกโดดเดี่ยวระหว่างพอร์ตต่ำกว่า -30 dB ในทุกย่านความถี่แสดงถึงการแมตช์อิมพีแดนซ์และการลดสัญญาณรบกวนที่มีประสิทธิภาพสูง เมื่อนำแบบจำลองไปสร้างต้นแบบและทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์หีโครข่าย พบว่าค่าพารามิเตอร์ S จากการวัดจริงมีแนวโน้มใกล้เคียงกับผลการจำลอง โดยเฉพาะในย่าน 6.5 GHz ที่ได้ค่าการแยกสัญญาณต่ำกว่า -34 dB และค่าการสะท้อนต่ำสุดที่ -39.87 dB ยืนยันความเหมาะสมของสายอากาศดังกล่าวต่อการใช้งานในระบบไมโหมความถี่สูง

คำสำคัญ : สายอากาศไมโครสตริป; สายอากาศหลายย่านความถี่; Wi-Fi 6E; ค่าการแยกโดดเดี่ยว

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

² สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

¹ Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Isan

² Institute of Engineering, Suranaree University of Technology

* Corresponding Author, Tel. 08 3124 3684, E - mail: nuchanart.fa@rmuti.ac.th

Abstract

This study introduces the design of a multi-band microstrip antenna for multiple-input multiple-output (MIMO) systems that facilitate Wi-Fi 6E wireless communication. The design utilizes various resonator structures integrated with defective ground slots to improve radiation properties and inter-port isolation. The suggested antenna comprises four elements, each proficient in functioning inside the 2.45, 5.5, and 6.5 GHz frequency bands. The design aims to reduce below the standard threshold across all four ports. Simulation results from CST Studio Suite 2024 demonstrate that the antenna attains a reflection coefficient (S_{11}) below -10 dB and inter-port isolation below -30 dB throughout all operational bands, indicating optimal impedance matching and efficient signal separation. The constructed prototype underwent testing using a vector network analyzer, and the obtained S-parameters closely aligned with the simulation outcomes. The 6.5 GHz band exhibited an isolation level below -34 dB and a minimum reflection coefficient of -39.87 dB, demonstrating that the proposed antenna design is suitable for high-frequency MIMO applications.

Keywords: Microstrip Antenna; Multi-Band Antenna; Wi-Fi 6E; Isolation

บทนำ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายได้พัฒนาอย่างรวดเร็ว เพื่อตอบสนองความต้องการที่เพิ่มขึ้นของผู้ใช้งานในชีวิตประจำวัน ไม่ว่าจะเป็นด้านธุรกิจ การศึกษา หรือความบันเทิง ระบบสื่อสารไร้สายภายในพื้นที่จำกัด เช่น ภายในบ้าน สำนักงาน และพื้นที่สาธารณะ ได้กลายเป็นโครงสร้างพื้นฐานสำคัญในการเชื่อมโยงข้อมูล (Tanjaroen, 2012; Praditthira, 2024) การใช้งานมิได้จำกัดเพียงอุปกรณ์พื้นฐานอย่างโทรศัพท์เคลื่อนที่หรือคอมพิวเตอร์พกพาเท่านั้น แต่ยังขยายไปสู่กลุ่มอุปกรณ์อัจฉริยะ เช่น กล้องวงจรปิด เครื่องใช้ไฟฟ้าอัตโนมัติ และระบบควบคุมภายในบ้าน (Thirasupha, 2019; Chantratip and Na Thalang, 2023) เพื่อตอบสนองการใช้งานที่ซับซ้อนและหลากหลาย มาตรฐาน Wi-Fi รุ่นใหม่จึงได้รับการพัฒนา โดยเฉพาะ Wi-Fi 6E ซึ่งมีจุดเด่นคือ การเพิ่มย่านความถี่ใหม่ที่ 6 กิกะเฮิรตซ์ ควบคู่กับย่านเดิมที่ 2.4 และ 5 กิกะเฮิรตซ์ ทำให้สามารถใช้งานได้ในช่วงความถี่ 2.4 - 2.5 กิกะเฮิรตซ์ 5.15 - 5.85 กิกะเฮิรตซ์ และขยายไปถึงช่วง 5.925 - 7.125 กิกะเฮิรตซ์ (Brunner et al., 2022; Bartolin-Arnau et al., 2025) การเพิ่มย่านความถี่ 6 กิกะเฮิรตซ์ ช่วยลดความแออัดของสัญญาณในย่านเดิม และเปิดช่องสัญญาณใหม่ที่กว้างขึ้น ส่งผลให้สามารถรองรับอุปกรณ์จำนวนมากขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ ลดการชนกันของสัญญาณ เพิ่มความเร็วและความเสถียรในการเชื่อมต่อ เหมาะสมอย่างยิ่งกับการใช้งานในระบบอัจฉริยะและสภาพแวดล้อมที่มีความหนาแน่นของข้อมูลสูง เช่น ระบบบ้านอัจฉริยะ โรงงานอัตโนมัติ หรือสถานที่ที่มีผู้ใช้งานจำนวนมาก

ความท้าทายที่สำคัญของการพัฒนาเทคโนโลยีสื่อสารไร้สายในมาตรฐานใหม่นี้ คือ การออกแบบสายอากาศที่สามารถรองรับการทำงานได้หลายย่านความถี่อย่างมีประสิทธิภาพ โดยที่ยังคงมีขนาดเล็ก (Kaewtasang and Akkathimagul, 2017) และสามารถแยกสัญญาณได้ดีในระบบการส่งข้อมูลพร้อมกันหลายช่อง (Yotwipan and Boonpalit, 2021) หากไม่มีสายอากาศที่ออกแบบอย่างเหมาะสม อาจส่งผลให้เกิดปัญหาในการสื่อสาร เช่น สัญญาณรบกวน การถ่ายโอนข้อมูลไม่สมบูรณ์ หรือการเชื่อมต่อที่ไม่เสถียร (Kitchaichaporn, 2021) นอกจากนี้ การออกแบบสายอากาศให้ทำงานในย่านความถี่ 6 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งเป็นช่วงความถี่ใหม่ในมาตรฐาน Wi-Fi 6E ยังเผชิญข้อจำกัดด้านการคงรูปแบบการแผ่รังสีให้เสถียร การจัดการกับขนาดสายอากาศที่เพิ่มขึ้นเมื่อความถี่สูงขึ้น และการควบคุมแถบความถี่ให้เหมาะสมกับอุปกรณ์ขนาดเล็ก (Nilvivek, 2021; Hemmongkol and Pongsiriuthaipong, 2021) อีกทั้งยังต้องคำนึงถึงการเลือกวัสดุ ความสามารถในการปรับจูนค่าความถี่ และการจัดการโครงสร้าง

เรโซแนนซ์หลายตำแหน่ง เพื่อให้สามารถตอบสนองต่อหลายย่านความถี่ได้ในขนาดที่จำกัด (Nakthong, 2021; Mahmood, 2013) โดยเฉพาะในระบบที่มีการใช้งานพร้อมกันของอุปกรณ์จำนวนมาก การออกแบบที่สามารถลดการรบกวน ข้ามช่องทางและเพิ่มประสิทธิภาพการแยกสัญญาณถือเป็นปัจจัยสำคัญในการพัฒนา (Nguyen et al., 2023)

แม้ที่ผ่านมาได้มีงานวิจัยทั้งในประเทศและต่างประเทศที่มุ่งเน้นการออกแบบสายอากาศที่รองรับหลายย่านความถี่อย่างต่อเนื่อง โดยมีการประยุกต์เทคนิคต่าง ๆ เช่น การใช้โครงสร้างเรโซแนนซ์หลายชุด (Nguyen et al., 2023) การเพิ่มช่องว่างในแผ่นตัวนำ การใช้โครงสร้างป้อนสัญญาณแบบหลายจุด (Lamultree et al., 2020) และการออกแบบรูปทรงที่ซับซ้อน เพื่อให้รองรับย่านความถี่หลากหลายสำหรับการใช้งานในระบบสื่อสารไร้สาย เช่น การสื่อสารระยะใกล้ ระบบสื่อสารแบบเซลลูลาร์ และเครือข่ายอุปกรณ์อัจฉริยะ (Patel and Makwana, 2021) อย่างไรก็ตาม งานวิจัยส่วนใหญ่ยังคงมีข้อจำกัดสำคัญหลายประการ ได้แก่ ประสิทธิภาพในการแยกสัญญาณที่ยังไม่เพียงพอสำหรับระบบที่มีการส่งข้อมูลพร้อมกันหลายช่อง (Syed et al., 2024) ความยุ่งยากในการปรับแต่งโครงสร้างให้มีขนาดกะทัดรัด และความไม่ต่อเนื่องของประสิทธิภาพเมื่อขยายช่วงการใช้งานไปยังย่านความถี่ 6 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งเป็นย่านใหม่ในมาตรฐาน Wi-Fi 6E (Chien et al., 2022)

ดังนั้น งานวิจัยฉบับนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบสายอากาศไมโครสตริปขนาดกะทัดรัดที่สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพในหลายย่านความถี่ ได้แก่ ย่าน 2.45 5.5 และ 6.5 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งครอบคลุมช่วงใช้งานของมาตรฐาน Wi-Fi 6E การออกแบบดังกล่าวได้รับการจำลองแบบโดยใช้ซอฟต์แวร์ CST Microwave Studio 2024 (Dassault Systèmes, 2023) ซึ่งช่วยให้สามารถวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น สัมประสิทธิ์การสะท้อน (S_{11}) รูปแบบการแผ่กระจายคลื่น (Radiation Pattern) ค่าอัตราขยาย (Gain) และ ค่าการแยกโดดเดี่ยว (Isolation) สำหรับการแก้ปัญหาเรื่องการแยกสัญญาณในระบบการส่งข้อมูลแบบหลายช่องพร้อมกัน (MIMO: Multiple Input Multiple Output) โดยประกอบไปด้วยสายอากาศทั้งหมด 4 อิลิเมนต์ ผลการจำลองยังได้รับการยืนยันด้วยการสร้างต้นแบบจริงและการวัดค่าทางกายภาพ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผลลัพธ์มีความสอดคล้องกันอย่างชัดเจน

การออกแบบและการวิเคราะห์พารามิเตอร์ของสายอากาศ

1. สายอากาศไมโครสตริปหลายย่านความถี่แบบ 1 อิลิเมนต์

การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบแพทช์สี่เหลี่ยมที่รองรับย่านความถี่ 2.45 GHz โดยใช้วัสดุ FR4 ที่มีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (Relative Permittivity: ϵ_r) เท่ากับ 4.6 และมีความหนา 1.6 มิลลิเมตร ขนาดเริ่มต้นของสายอากาศสามารถคำนวณได้ตามสมการพื้นฐานสำหรับสายอากาศไมโครสตริปแบบดั้งเดิม ดังสมการที่ (1) - (4) (Balanis, 2016)

$$W = \frac{c}{2fr\sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}} \quad (1)$$

$$L = \frac{c}{2fr\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (2)$$

$$\Delta L = 0.412h \left(\frac{\epsilon_{eff} + 0.3}{\epsilon_{eff} - 0.258} \right) \left(\frac{W/h + 0.264}{W/h + 0.8} \right) \quad (3)$$

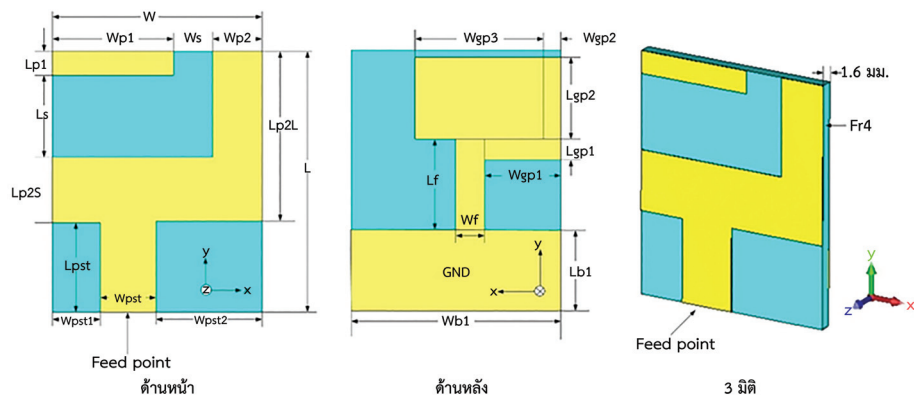
$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + 12 \frac{h}{w} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (4)$$

โดย

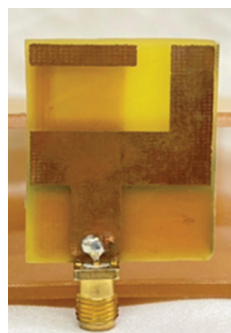
ϵ_{eff}	คือ	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกประสิทธิผล (Effective Dielectric Constant)
W	คือ	ความกว้างของแผ่นแพทช์ (Width of Patch)
ϵ_r	คือ	ค่าคงที่ของการนำไฟฟ้าของวัสดุฉนวน (Dielectric constant)
L	คือ	ความยาวของแผ่นแพทช์ (Length of Patch)

การออกแบบเริ่มต้นจากการคำนวณค่าพื้นฐานของสายอากาศโดยใช้สมการที่ (1) - (4) กำหนดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุซับสเตรต (ϵ_r) เป็น 4.4 ความสูงของซับสเตรต (h) เป็น 1.6 มิลลิเมตร และเลือกความถี่เรโซแนนซ์ (f_r) เริ่มต้นที่ 2.45 GHz สำหรับการออกแบบเบื้องต้น ด้วยค่าพารามิเตอร์เหล่านี้สามารถคำนวณหาขนาดเริ่มต้นของแผ่นแพทช์ได้ โดยที่ W และ L มีขนาดเท่ากับ 37.27 และ 30.30 มิลลิเมตร จากนั้นนำค่าเริ่มต้นไปปรับแต่งเพื่อให้รองรับหลายย่านความถี่ในลำดับถัดไป

โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปหลายย่านความถี่ดังรูปที่ 1 ปลายด้านบนของสายอากาศถูกเชื่อมต่อกับระนาบกราวด์ที่ลดขนาดลง โดยระนาบกราวด์แบ่งออกเป็นสองส่วนหลัก ได้แก่ ส่วนแนวนอน ขนาด $W_{gp1} \times L_{gp1}$ และส่วนแนวตั้ง ขนาด $W_{gp2} \times L_{gp2}$ นอกจากนี้ยังมีการขยายความยาวเพิ่มเติม W_{gp3} ต่อจาก W_{gp2} เพื่อปรับปรุงคุณลักษณะของคลื่นสะท้อนและการแมตชิ่งอิมพีแดนซ์ให้เหมาะสมยิ่งขึ้น คือให้ใกล้เคียง 50 โอห์ม ผลลัพธ์จากการออกแบบด้วยการจำลอง พบว่าสายอากาศที่พัฒนาขึ้นสามารถรองรับการทำงานในหลายย่านความถี่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และมีลักษณะการแผ่คลื่นที่ดี ภายหลังการออกแบบจึงได้สร้างต้นแบบจริงเพื่อยืนยันผลการจำลอง ขนาดรวมของสายอากาศคือ 25.75×32.00 มิลลิเมตร โดยตารางที่ 1 แสดงรายละเอียดของพารามิเตอร์ที่ใช้ ในการออกแบบตามโครงสร้างดังรูปที่ 1(ก) และ (ข)



(ก) การจำลองแบบ

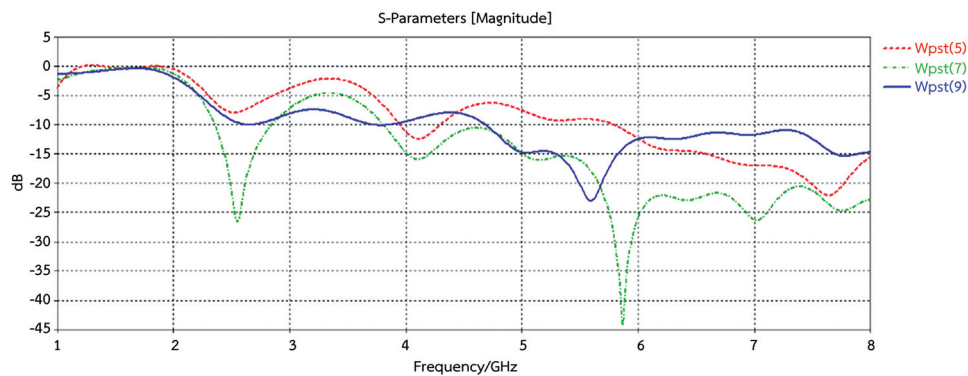


(ข) การสร้างจริง

รูปที่ 1 โครงสร้างสายอากาศไมโครสตริปหลายย่านความถี่แบบ 1 อิลิเมนต์

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของสายอากาศไมโครสตริปที่ถูกดัดแปลงโครงสร้าง

พารามิเตอร์	ขนาด (มม.)	พารามิเตอร์	ขนาด (มม.)
W	25.75	L_{p2l}	21
W_{p1}	14.88	L	32
W_s	5	W_{b1}	25.75
W_{p2}	5.88	L_{b1}	10
L_{p1}	3	L_f	11
L_s	10	W_f	3.5
L_{p2s}	8	W_{gp1}	9.2
L_{pst}	11	L_{gp1}	2.5
$pst1$	5.88	L_{gp2}	9.95
W_{pst}	7	W_{gp2}	2.7
W_{pst2}	12.88	W_{gp3}	15

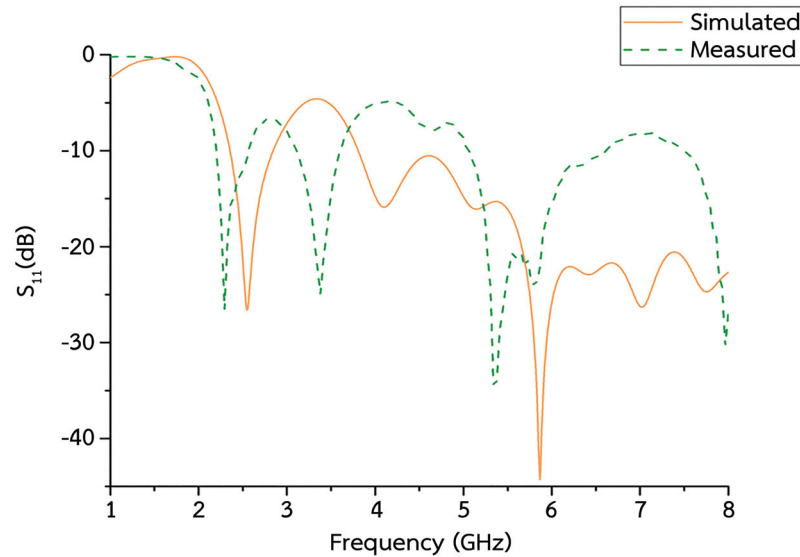


รูปที่ 2 ค่า S_{11} (dB) เมื่อ W_{pst} เปลี่ยนแปลง

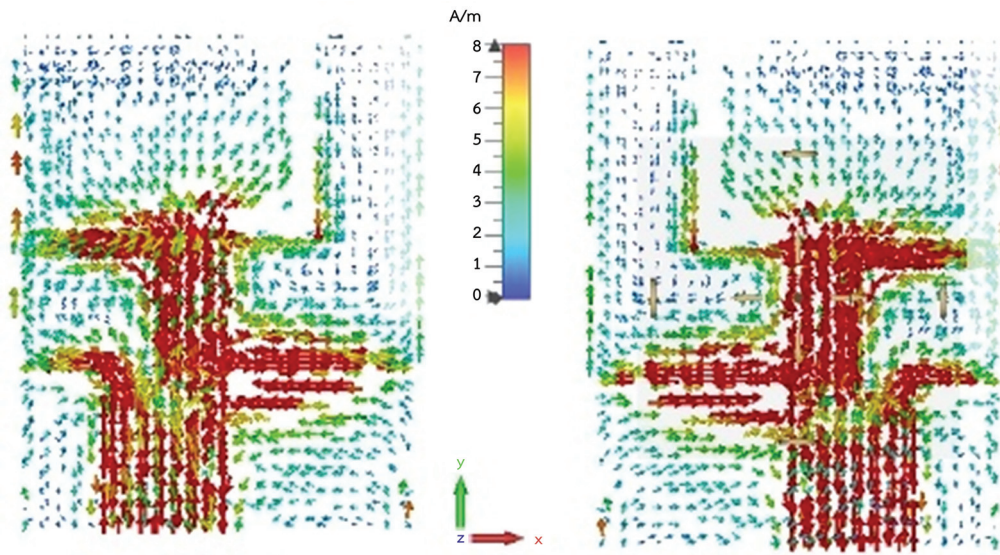
รูปที่ 2 แสดงให้เห็นถึงผลกระทบของขนาดความกว้างของเส้นสตริป (W_{pst}) ต่อค่าพารามิเตอร์ S_{11} (dB) ของสายอากาศไมโครสตริปที่ความถี่กลาง 2.45 GHz โดยมีการวิเคราะห์ที่ความถี่ต่างกัน 3 ค่า คือ 5 7 และ 9 มิลลิเมตร จากกราฟจะเห็นได้ว่าความกว้างของเส้นสตริปมีผลอย่างมากต่อการสะท้อนของคลื่น โดยค่าพารามิเตอร์ S_{11} (dB) ที่ความถี่ 2.45 GHz มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อความกว้าง W_{pst} เปลี่ยนแปลง ในกรณีของ $W_{pst} = 5$ มิลลิเมตร สายอากาศแสดงค่า S_{11} (dB) ที่ต่ำกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับค่าของ $W_{pst} = 7$ มิลลิเมตร และ $W_{pst} = 9$ มิลลิเมตร สายอากาศที่มี $W_{pst} = 9$ มิลลิเมตร แสดงประสิทธิภาพดีที่สุดในช่วงความถี่ที่กว้างขึ้น ในขณะที่ $W_{pst} = 5$ มิลลิเมตร แสดงความแบนซึ่งอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ใกล้เคียง 2.45 GHz $W_{pst} = 7$ มิลลิเมตร ที่ช่วงความถี่ 5.15 - 7.125 GHz ค่า S_{11} (dB) ของ $W_{pst} = 7$ มิลลิเมตรจะแสดงการสะท้อนที่ค่อนข้างสูงในบางช่วง โดยมีจุดที่ลดลงต่ำกว่า -10 dB เล็กน้อยที่ประมาณ 5.8 GHz แสดงให้เห็นว่าช่วงนี้สามารถมีการส่งสัญญาณที่ดี

ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้จึงเลือกใช้ $W_{pst} = 7$ มิลลิเมตร เนื่องจากสามารถครอบคลุมได้ทั้งย่านความถี่ 2.45 GHz และ 5.15 - 7.125 GHz ได้ดีที่สุด นอกจากนั้นรูปที่ 3 แสดงผลการวัดทดสอบค่า S_{11} (dB) ของสายอากาศไมโครสตริปหลายย่านความถี่แบบ 1 อิลิเมนต์ เมื่อ W_{pst} มีค่าเท่ากับ 7 มิลลิเมตร เพื่อเป็นการยืนยันว่า ผลการจำลองมีความสอดคล้องกับผลการสร้างจริง แต่อย่างไรก็ตามความแตกต่างระหว่างผลการจำลอง และผลการวัดที่ความถี่ 6.5 GHz อาจเกิดจากความคลาดเคลื่อนในการผลิตต้นแบบ เช่น ขนาดของแพตช์ หรือช่องว่างที่เปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย รวมถึงคุณสมบัติของวัสดุจริงที่แตกต่างจากค่าที่ใช้ในการจำลอง โดยเฉพาะค่าไดอิเล็กทริกของแผ่น FR-4 นอกจากนี้

การป้อนสัญญาณและการเชื่อมต่อในกระบวนการวัด รวมถึงสภาพแวดล้อมขณะทดสอบก็อาจมีผลต่อการแมตซ์อิมพีแดนซ์ และประสิทธิภาพของสายอากาศในย่านความถี่สูง และจากรูปที่ 4 แสดงการกระจายของกระแสบนผิวสายอากาศ ในแต่ละย่านความถี่ พบว่ากระแสมีความเข้มข้นบริเวณแพทช์และช่องว่างในทุกความถี่ โดยเฉพาะที่ 6.5 GHz มีการรวมตัวของกระแสที่เด่นชัดขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่าการแผ่พลังงานที่มีทิศทางชัดเจน กระแสกระจายอย่างสมมาตรในโครงสร้างแต่ละด้าน



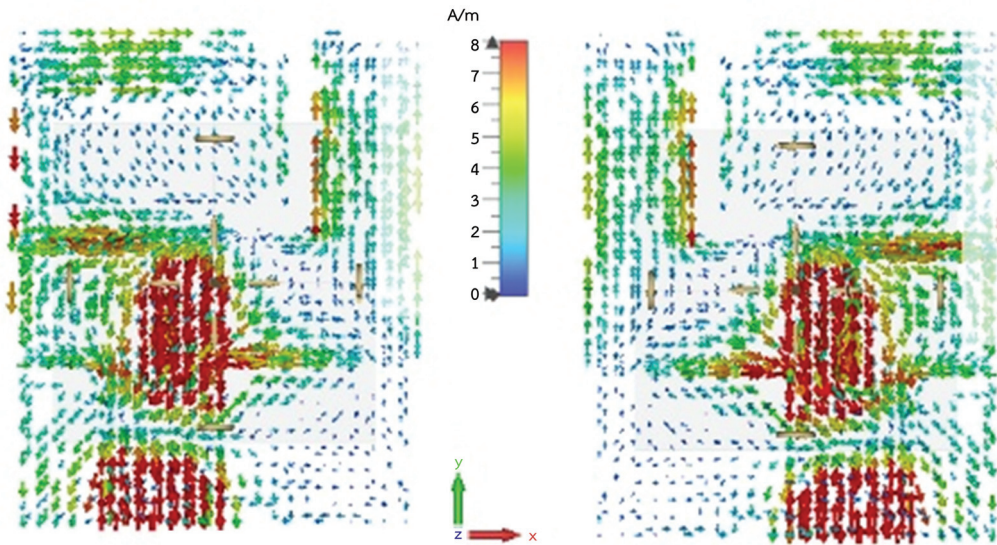
รูปที่ 3 ผลการวัดทดสอบค่า S_{11} (dB) ของสายอากาศไมโครสตริปหลายย่านความถี่แบบ 1 อิลิเมนต์



(ก) ด้านหน้า 2.45 GHz

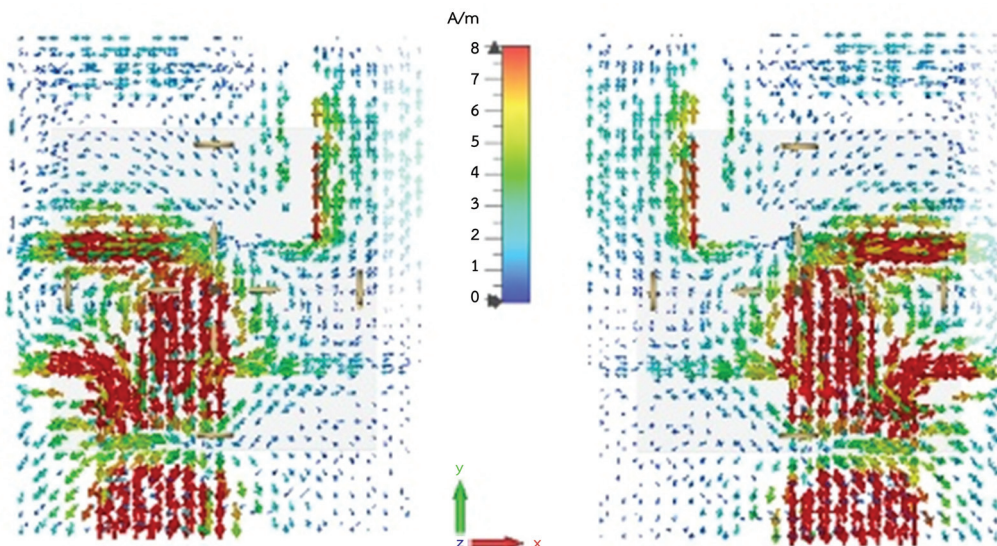
(ข) ด้านหลัง 2.45 GHz

รูปที่ 4 การกระจายกระแสบนผิวสายอากาศ



(ค) ด้านหน้า 5.5 GHz

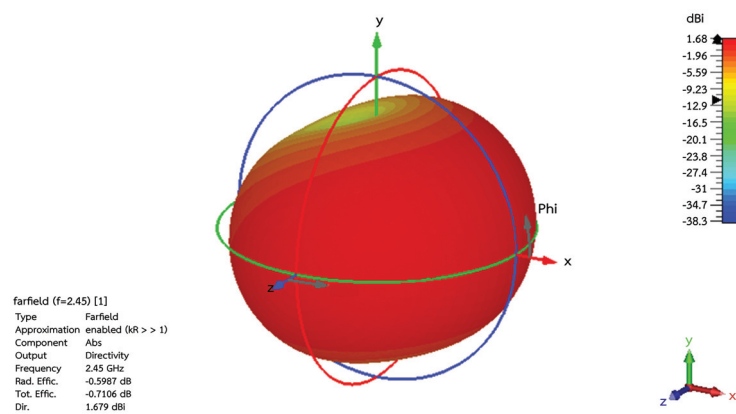
(ง) ด้านหลัง 5.5 GHz



(จ) ด้านหน้า 6.5 GHz

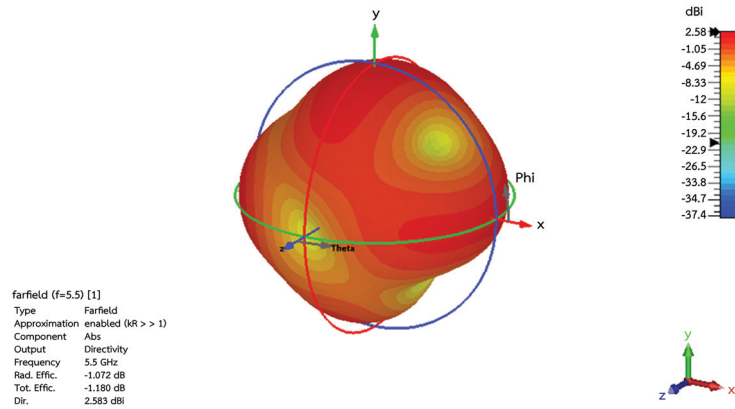
(ฉ) ด้านหลัง 6.5 GHz

รูปที่ 4 การกระจายกระแสบนผิวสายอากาศ (ต่อ)

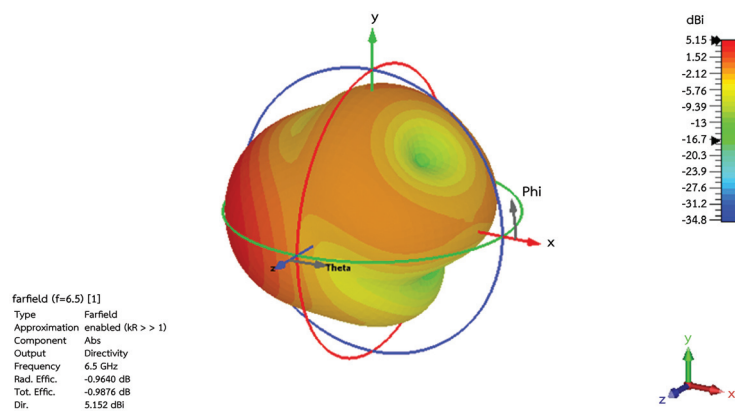


(ก) 2.45 GHz

รูปที่ 5 3D แบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศไมโครสตริปหลายย่านความถี่

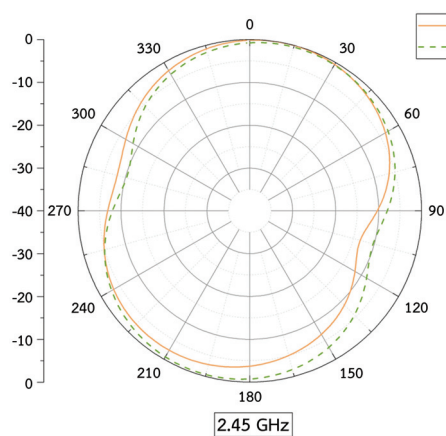


(ข) 5.5 GHz

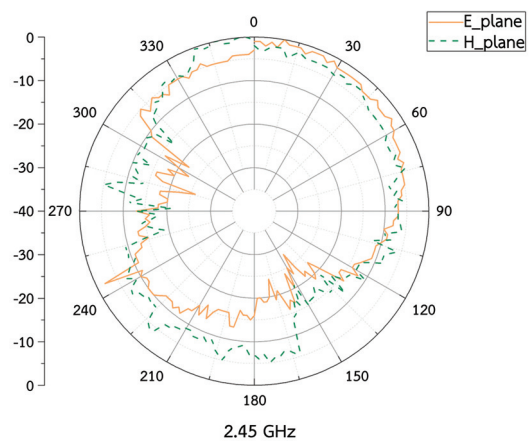


(ค) 6.5 GHz

รูปที่ 5 3D แบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศไมโครสตริปหลายย่านความถี่ (ต่อ)

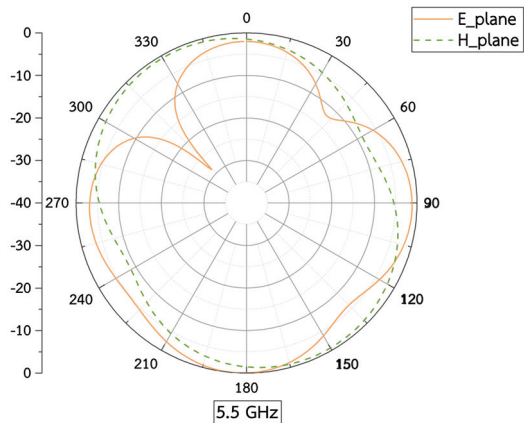


(ก) ผลการจำลอง 2.45 GHz

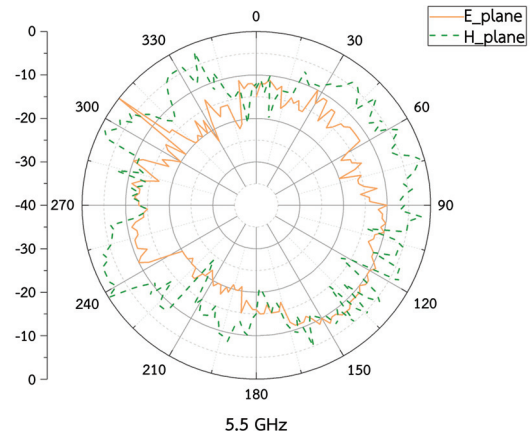


(ข) ผลการวัด 2.45 GHz

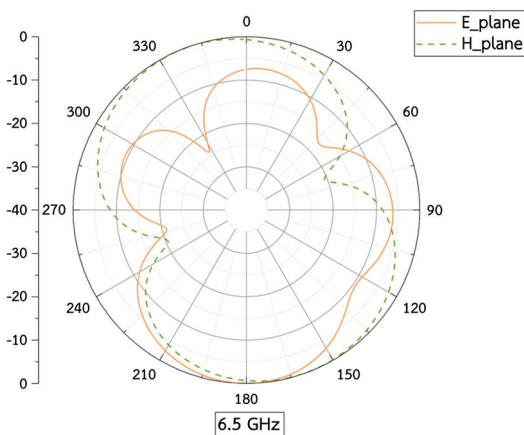
รูปที่ 6 แบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศไมโครสตริปหลายย่านความถี่ 2 แบบมิติ



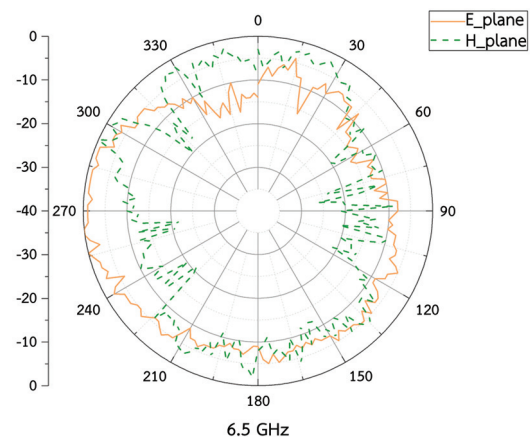
(ค) ผลการจำลอง 5.5 GHz



(ง) ผลการวัด 5.5 GHz



(จ) ผลการจำลอง 6.5 GHz



(ฉ) ผลการวัด 6.5 GHz

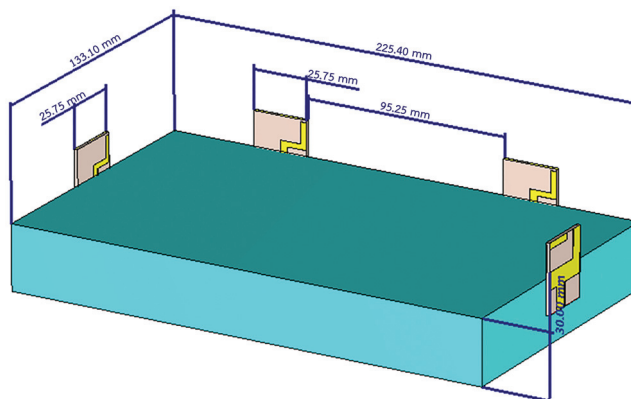
รูปที่ 6 แบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศไมโครสตริปหลายย่านความถี่ 2 แบบมิติ (ต่อ)

รูปที่ 5 แสดงภาพ 3D ของการกระจายพลังงานของสายอากาศไมโครสตริปที่รองรับหลายย่านความถี่ ได้แก่ 2.45 5.5 และ 6.5 GHz โดยในย่านความถี่ 2.45 GHz ค่าสภาพเจาะจงทิศทางอยู่ที่ประมาณ 1.680 dBi ซึ่งบ่งชี้ว่าการกระจายคลื่นเป็นไปอย่างกว้างและไม่เน้นไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่งอย่างชัดเจน ลักษณะนี้เรียกว่า แบบรูปการแผ่พลังงานรอบทิศทางในระนาบเดียว ส่วนในย่านความถี่ 5.5 และ 6.5 GHz ค่าสภาพเจาะจงทิศทางเพิ่มขึ้นเป็น 2.583 และ 5.151 dBi ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการกระจายพลังงานมีการโฟกัสมากขึ้นและเข้มข้นขึ้นในทิศทางที่ชัดเจนขึ้น แม้ยังคงรูปแบบการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทางในระนาบเดียว การออกแบบเช่นนี้เหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับการใช้งาน WiFi ซึ่งต้องการการกระจายพลังงานอย่างสม่ำเสมอเพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถ รับสัญญาณได้รอบทิศทาง

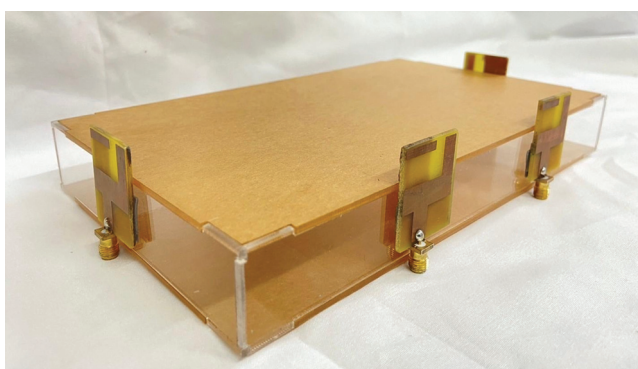
นอกจากนี้รูปที่ 6 แสดงรูปแบบการแผ่พลังงานเพื่อเปรียบเทียบผลจากการจำลองและผลการวัดจริงของสายอากาศไมโครสตริปหลายย่านความถี่ พบว่าผลลัพธ์ทั้งสองมีแนวโน้มที่สอดคล้องกันในภาพรวม โดยเฉพาะในย่านความถี่ 2.45 GHz อย่างไรก็ตาม ในความถี่ 5.5 และ 6.5 GHz พบว่ามีความแตกต่างของรูปแบบการแผ่พลังงานบางประการ ซึ่งอาจเกิดจากข้อจำกัดในกระบวนการวัด เช่น ความไม่แน่นอนของตำแหน่งติดตั้งสายอากาศหรือการสะท้อนจากสภาพแวดล้อมภายในห้องทดสอบ ที่อาจส่งผลต่อทิศทางของการแผ่พลังงานโดยเฉพาะในย่านความถี่สูง ทั้งนี้ควรมีการปรับปรุงกระบวนการวัดหรือควบคุมปัจจัยแวดล้อมให้แม่นยำยิ่งขึ้นในการศึกษาในอนาคต เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบผลการจำลองและผลการวัดได้อย่างใกล้เคียงกันมากขึ้น และยืนยันประสิทธิภาพของการออกแบบได้อย่างชัดเจนยิ่งขึ้นในทุกย่านความถี่

2. สายอากาศไมโครสตริปหลายย่านความถี่ 4 อิลิเมนต์บนเรเตอร์ไร้สาย

รูปที่ 7 แสดงโครงสร้างสายอากาศไมโครสตริปหลายย่านความถี่แบบ 4 อิลิเมนต์ที่ติดตั้งบนเรเตอร์จำลอง ด้วยวัสดุที่ทำจากอะคริลิก โครงสร้างนี้ถูกออกแบบให้มีความแข็งแรงและน้ำหนักเบาเพื่อให้สามารถติดตั้งบนเรเตอร์ไร้สายได้อย่างเหมาะสม โดยรูปที่ 7(ก) แสดงแบบจำลองโครงสร้างในโปรแกรมจำลอง และรูปที่ 7(ข) แสดงโครงสร้างจริงของต้นแบบสายอากาศ



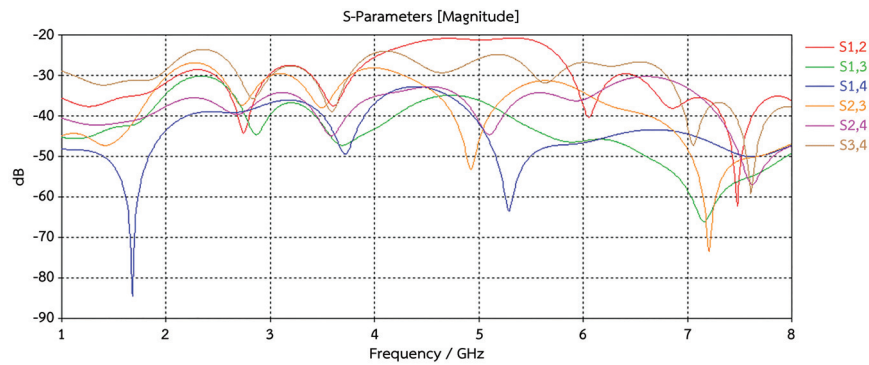
(ก) แบบจำลองในโปรแกรมจำลอง



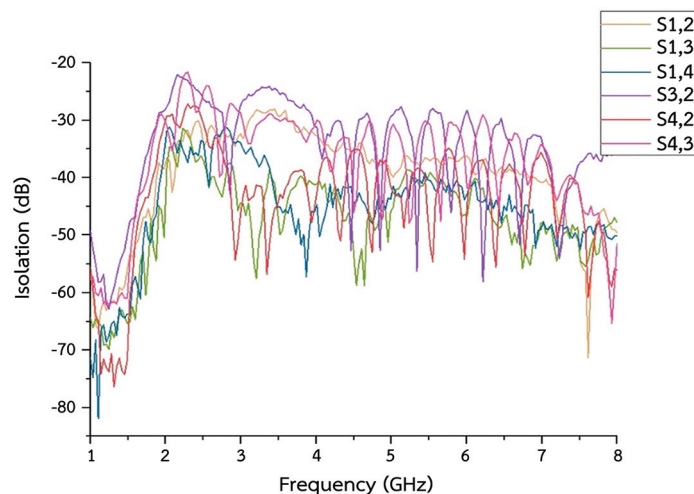
(ข) โครงสร้างจริงจำลองของต้นแบบสายอากาศ

รูปที่ 7 โครงสร้างสายอากาศไมโครสตริปหลายย่านความถี่ 4 อิลิเมนต์ที่ติดตั้งบนเรเตอร์

รูปที่ 8 แสดงผลการจำลองค่าการแยกโดดเดี่ยว (Isolation) จากการจำลองแบบซึ่งเป็นพารามิเตอร์สำคัญที่แสดงถึงการรบกวนระหว่างพอร์ตของสายอากาศไมโครสตริปหลายย่านความถี่แบบ MIMO การจำลองพารามิเตอร์ S ทำในช่วงความถี่ 1 - 8 GHz เพื่อวิเคราะห์การส่งผ่านสัญญาณระหว่างพอร์ตต่าง ๆ ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าการแยกตัวของสัญญาณระหว่างพอร์ตมีประสิทธิภาพดีซึ่งมีค่าต่ำกว่า -15 dB โดยมีการแยกโดดเดี่ยวอย่างชัดเจนในย่านความถี่ต่าง ๆ ซึ่งช่วยลดการรบกวนและเพิ่มความเสถียรในการรับ-ส่งสัญญาณ รูปที่ 9 แสดงผลการวัดจริงของค่าการแยกโดดเดี่ยว การวัดพารามิเตอร์ S ในช่วงความถี่เดียวกัน (1 - 8 GHz) แสดงให้เห็นถึงค่าการแยกตัวระหว่างพอร์ตต่าง ๆ ซึ่งผลการวัดจริงมีความสอดคล้องกับผลการจำลอง



รูปที่ 8 ผลการจำลองค่าการแยกโดดเดี่ยว



รูปที่ 9 ผลการวัดจริงค่าการแยกโดดเดี่ยว

ตารางที่ 2 แสดงค่าการแยกโดดเดี่ยวของสายอากาศไมโครสตริปหลายย่านความถี่แบบ 4 อิลิเมนต์ที่ติดตั้งบนเรเตอร์จำลอง ซึ่งค่าพารามิเตอร์นี้ถูกวัดในความถี่ 2.45 5.5 และ 6.5 GHz เพื่อประเมินประสิทธิภาพค่าการแยกโดดเดี่ยว โดยผลการจำลองและผลการวัดจริงถูกนำมาเปรียบเทียบกัน พอร์ต $S_{1,2}$ (ระหว่างพอร์ต 1 และ 2) มีค่าการแยกตัวที่ความถี่ 2.45 GHz อยู่ระหว่าง -29.601 ถึง -30.919 dB แสดงถึงประสิทธิภาพการแยกตัวที่ดีและมีค่าที่ใกล้เคียงกันที่ความถี่ 5.5 GHz และ 6.5 GHz (-24.088 ถึง -39.346 dB) ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นตามความถี่ พอร์ต $S_{1,3}$ (ระหว่างพอร์ต 1 และ 3) มีค่า Isolation ต่ำกว่า -30 dB ตลอดทั้งย่านความถี่แสดงถึงการแยกตัวที่ดี พอร์ต $S_{1,4}$ (ระหว่างพอร์ต 1 และ 4) มีค่าแยกตัวอยู่ระหว่าง -35.909 ถึง -49.822 dB ในความถี่ 2.45 5.5 และ 6.5 GHz แสดงถึงการลดการรบกวนระหว่างพอร์ตได้อย่างมีประสิทธิภาพ พอร์ต $S_{3,2}$ (ระหว่างพอร์ต 3 และ 2) แสดงถึงการแยกตัวที่ดี โดยมีค่าอยู่ระหว่าง -25.563 ถึง -39.401 dB ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพที่ดีขึ้นตามความถี่ ส่วนพอร์ต $S_{4,2}$ และ $S_{4,3}$ (ระหว่างพอร์ต 4 กับพอร์ตอื่น ๆ) มีค่าการแยกตัวใกล้เคียงกับผลการจำลอง โดยมีค่า Isolation ต่ำสุดที่ -22.354 dB แต่ยังคงเพียงพอสำหรับการใช้งาน ผลการจำลองและผลการวัดจริงมีความสอดคล้องกัน ซึ่งบ่งชี้ว่าสายอากาศมีประสิทธิภาพสูงในการลดการรบกวนระหว่างพอร์ตต่าง ๆ ทำให้สามารถใช้ในระบบสื่อสารไร้สายที่ต้องการความเสถียรและประสิทธิภาพสูง อย่างไรก็ตามในการศึกษาครั้งนี้ยังไม่ได้ครอบคลุมการทดสอบการวางสายอากาศในลักษณะคู่พอร์ตที่หลากหลายรูปแบบ ซึ่งอาจส่งผลต่อพฤติกรรมของค่าการแยกโดดเดี่ยวในบางเงื่อนไข การศึกษารูปแบบการจัดเรียงพอร์ตในลักษณะต่าง ๆ จะถูกนำมาวิเคราะห์เพิ่มเติมในการวิจัยในอนาคตเพื่อเพิ่มความชัดเจนและครอบคลุมการใช้งานในสถานการณ์จริงได้ดียิ่งขึ้น

ตารางที่ 2 ตารางเปรียบเทียบค่าการแยกโดดเดี่ยวของสายอากาศไมโครสตริปหลายย่านความถี่ 4 อิลิเมนต์บนเรเตอร์

ความถี่ (GHz) Isolation (dB)	2.45 GHz		5.5 GHz		6.5 GHz	
	การจำลอง	การวัดจริง	การจำลอง	การวัดจริง	การจำลอง	การวัดจริง
$S_{1,2}$	-29.601	-30.919	-24.088	-36.378	-30.069	-39.346
$S_{1,3}$	-30.654	-35.149	-43.036	-39.406	-48.466	-48.195
$S_{1,4}$	-38.933	-35.909	-49.822	-40.355	-43.69	-45.166
$S_{3,2}$	-30.664	-25.563	-31.904	-29.339	-39.401	-31.839
$S_{4,2}$	-42.732	-28.192	-36.46	-47.605	-32.47	-39.488
$S_{4,3}$	-22.354	-29.607	-29.369	-30.685	-26.542	-36.911

การอภิปรายผลลัพธ์

ในการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปหลายย่านความถี่นี้ ได้เลือกใช้โครงสร้างแพทช์รูปสี่เหลี่ยมในย่านความถี่กลางที่ 2.45 GHz ซึ่งเป็นความถี่พื้นฐานของการสื่อสารไร้สาย เนื่องจากมีข้อดีด้านความเรียบง่ายในการออกแบบความแข็งแรง น้ำหนักเบา และสามารถผลิตได้ในต้นทุนที่ต่ำ สายอากาศได้รับการป้อนสัญญาณด้วยหัวเชื่อมต่อสัญญาณแบบ SMA (Sub Miniature Version A) โดยที่สายอากาศถูกจำลองแบบและสร้างด้วยแผ่นวงจรพิมพ์ชนิด FR-4 ที่มีค่า ϵ_r เท่ากับ 4.6 และมีความหนาเท่ากับ 1.6 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานที่นิยมใช้กัน

ผลการศึกษาพารามิเตอร์ S_{11} ซึ่งสะท้อนถึงการสูญเสียจากการสะท้อนกลับของสัญญาณ พบว่าสายอากาศสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพในทั้งสามย่านความถี่ที่ออกแบบไว้ โดยมีค่าของ S_{11} ต่ำกว่า -10 dB ในทุกย่านความถี่ และลดลงถึง -22.62 dB ที่ความถี่ 6.5 GHz แสดงถึงการแมตช์อิมพีแดนซ์ที่ดีขึ้นตามความถี่ที่สูงขึ้น การสะท้อนสัญญาณที่ต่ำแสดงให้เห็นถึงการสูญเสียพลังงานที่น้อยลง และส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพในการส่งผ่านพลังงานสู่ระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ

นอกจากนี้การวิเคราะห์แบบรูปการแผ่กำลังงานในสนามระยะไกล (Far-Field) ยังแสดงถึงการกระจายตัวของสนามที่มีความสม่ำเสมอในทิศทางที่เป็นแบบรอบทิศทางในระนาบเดียวที่ความถี่ 2.45 GHz โดยค่ากำหนดทิศทาง (Directivity) อยู่ที่ 1.680 dBi ซึ่งบ่งบอกถึงประสิทธิภาพในการกระจายสนามได้ดี อย่างไรก็ตาม เมื่อความถี่เพิ่มขึ้นเป็น 5.5 และ 6.5 GHz การกระจายของสนามมีการเปลี่ยนแปลงเป็นลำคลื่นที่แคบลง และมีค่าสภาพเจาะจงทิศทางสูงขึ้น โดยเฉพาะที่ความถี่ 6.5 GHz ซึ่งมีค่าความเจาะจงทิศทางสูงถึง 5.151 dBi แสดงถึงการเพิ่มประสิทธิภาพในการแผ่กำลังงานในทิศทางใดทิศทางหนึ่งอย่างชัดเจน อย่างไรก็ตาม การที่สายอากาศมีแบบรูปการแผ่พลังงานที่ไม่สอดคล้องกันในแต่ละความถี่ ส่งผลกระทบโดยตรงต่อความสม่ำเสมอของสัญญาณ ประสิทธิภาพของระบบ MIMO และการใช้งานในสภาพแวดล้อมจริง โดยเฉพาะในเครือข่ายความหนาแน่นสูงหรือพื้นที่ที่ต้องการความครอบคลุมรอบทิศทางเพื่อแก้ไขข้อจำกัดดังกล่าว งานวิจัยในอนาคตควรมุ่งเน้นการปรับโครงสร้างหรือเพิ่มองค์ประกอบควบคุมทิศทางของการแผ่พลังงาน เช่น การเพิ่มตัวสะท้อน (Reflector) หรือการจัดเรียงตำแหน่งอิลิเมนต์ใหม่ เพื่อให้รูปแบบการแผ่พลังงานในแต่ละย่านความถี่มีแนวโน้มทิศทางที่สอดคล้องกันมากยิ่งขึ้น ซึ่งจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของระบบไมโมแบบหลายความถี่ในการใช้งานจริงได้อย่างเหมาะสม

ในด้านของค่า Isolation ซึ่งแสดงถึงการแยกสัญญาณระหว่างพอร์ตของสายอากาศ พบว่าผลการจำลองและผลการวัดจริงให้ค่าที่สอดคล้องกัน โดยค่าการแยกโดดเดี่ยวต่ำกว่า -30 dB ในหลายคู่พอร์ต โดยเฉพาะคู่พอร์ต $S_{1,4}$ และ $S_{1,3}$ ซึ่งให้ค่าการแยกต่ำสุดถึง -49.822 dB และ -33.705 dB แสดงถึงประสิทธิภาพในการลดการรบกวนจากสัญญาณ

ข้ามพอร์ตได้อย่างดีเยี่ยม ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่จำเป็นสำหรับระบบโมโมที่มีการรับ-ส่งข้อมูลพร้อมกันหลายช่อง โดยค่าการแยกโดตเดี่ยวที่อยู่ในระดับต่ำกว่าค่ามาตรฐานขั้นต่ำ (-20 dB) ถือว่าเป็นตัวชี้วัดถึง การออกแบบที่มีประสิทธิภาพสูง และมีความพร้อมต่อการนำไปใช้งานในระบบไร้สายที่ต้องการความเสถียร เช่น ในอุปกรณ์กระจายสัญญาณ Wi-Fi IoT Gateway และเราเตอร์เชิงพาณิชย์

สรุปและวิจารณ์

สายอากาศไมโครสตริปถูกออกแบบให้มีขนาดกะทัดรัดและน้ำหนักเบา โดยใช้วัสดุ FR-4 ที่มีคุณสมบัติการนำไฟฟ้าดี และโครงสร้างประกอบด้วยแพทช์แบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าและแบบตัว L คว่ำ ซึ่งช่วยให้สามารถรองรับการทำงานในหลายย่านความถี่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โครงสร้างดังกล่าวได้รับการออกแบบเพื่อให้เกิดการแยกตัวของสัญญาณที่ดีในระบบ MIMO และมีการแผ่รังสีที่เหมาะสมกับการใช้งานไร้สายหลายย่านความถี่

จากการจำลองและการสร้างจริงเพื่อวัดทดสอบค่าพารามิเตอร์ S ของสายอากาศไมโครสตริปหลายย่านความถี่แบบ 4 อิลิเมนต์ พบว่าผลการจำลองและการวัดจริงมีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี โดยเฉพาะในย่านความถี่ 2.45 5.5 และ 6.5 GHz ค่าการแยกตัวของสัญญาณ (Isolation) ระหว่างพอร์ต $S_{1,2}$ $S_{1,3}$ และ $S_{1,4}$ อยู่ในระดับที่ต่ำกว่า -30 dB ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพที่ดีในการลดการรบกวนระหว่างพอร์ตต่าง ๆ ทำให้เหมาะสมกับ การใช้งานในระบบสื่อสารไร้สายที่ต้องการค่าการแยกโดตเดี่ยวสูง เช่น Wi-Fi 6E และ MIMO สำหรับพอร์ต $S_{3,2}$ $S_{4,2}$ และ $S_{4,3}$ แม้ว่าค่าการแยกตัวบางช่วงจะต่ำกว่า -25 dB แต่ก็ยังเพียงพอสำหรับการแยกสัญญาณที่มีประสิทธิภาพในการใช้งานจริง

ผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงความถูกต้องและน่าเชื่อถือของแบบจำลองที่ใช้ในการออกแบบสายอากาศ ทำให้การออกแบบนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในเครือข่ายสื่อสารไร้สายที่ต้องการความเสถียรและประสิทธิภาพสูง นอกจากนี้ยังชี้ให้เห็นว่าสายอากาศไมโครสตริปแบบหลายย่านความถี่นี้มีศักยภาพสูงในการรองรับการใช้งานจริงในระบบสื่อสารที่หลากหลาย ทั้งในด้านความคุ้มค่า การผลิต และการติดตั้ง

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนโปรแกรม CST Microwave Studio 2024 และเครื่องมือวัดจากสาขาวิศวกรรมโทรคมนาคมและนวัตกรรมดิจิทัล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

References

- Balanis, C.A. (2016). *Antenna Theory: Analysis and Design* (4thed). Wiley.
- Bartolin-Arnau, L.M., Orozco-Santos, F., Sempere-Payá, V., Silvestre-Blanes, J., Alberio-Alberio, T. and Llacer-Garcia, D. (2025). Exploring the Potential of Wi-Fi in Industrial Environments: A Comparative Performance Analysis of IEEE 802.11 Standards. *Telecom*, 6(2), <https://doi.org/10.3390/telecom6020040>
- Brunner, H., Stocker, M., Schuh, M., Schuß, M., Boano, C.A. and Römer, K. (2022). Understanding and Mitigating the Impact of Wi-Fi 6E Interference on Ultra-Wideband Communications and Ranging. In *21th ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks*, pp. 92-104. <https://doi.org/10.1109/IPSNS54338.2022.00015>
- Chantratip, C. and Na Thalang, C. (2023). Approaches to the Development of Tourism in a Holistic Smart City: A Case Study in Phuket. *Journal of Nakhonratchasima College (Humanities and Social Sciences)*, 17(2), 198-212. <https://so03.tci-thaijo.org/index.php/hsjournalnmc/article/view/267298>

- Chien, W., Chiu, C.C., Chen, P.H., Jiang, H. and Chen, W.H. (2022). Wi-Fi 6E Antenna Design for All-metal Housing of Notebook. *Sensors and Materials*, 34(7). 2869-2878. <https://doi.org/10.18494/SAM3928>
- Dassault Systèmes. (2023). *CST Studio Suite 2024 - Cluster Integration Guide*. https://updates.cst.com/downloads/Cluster_Integration_Guide_2024.pdf
- Hemmongkol, J. and Pongsiriuthaipong, C. (2021). *Design of Circular-Ring Patch Antenna on Metamaterial Ring Resonator Surface for Dual-Band Applications* [Academic Article]. King Mongkut's Institute of Technology, Ladkrabang.
- Kaewtasang, W. and Akkathimagul, S. (2017). The Development of Instructional Aids of the Basic Antenna Design of the Telecommunication Engineering Education. *RMUTSB Academic Journal (Humanities and Social Sciences)*, 2(2), 179-190. <https://so05.tci-thaijo.org/index.php/rmutsb-hs/article/view/105392/83717>
- Kitchaichaporn, N. (2021). *The Study on Efficiency of the Wireless Network usage of Students at Rajamangala University of Technology Thanyaburi* [Research Report]. Office of Academic Resources and Information Technology, Rajamangala University of Technology Thanyaburi. <http://www.repository.rmutt.ac.th/xmlui/handle/123456789/4044>
- Lamultree, S., Srisukhot, S., Sukphengphanao, K. and Kulawong, C. (2020). A Compact Tri-Band Antenna for Wireless Communications. *RMUTI JOURNAL Science and Technology*, 13(2), 72-85. <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/rmutijo/article/view/221219/164647>
- Mahmood, T.Y., Ali, J.K., Salim, A.J., Abdulkareem, S.F., Hammoodi, A.I. and Hussan, M.R. (2013). A New Compact Slot Antenna for Dual-band WLAN Applications. *International Journal of Science and Modern Engineering (IJISME)*, 1(10), 80-83.
- Nakthong, W. (2021). *Tructure-Adjusted Antenna for Wireless Communication Applications* [Doctoral Dissertation, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Electrical Engineering]. <http://www.repository.rmutt.ac.th/xmlui/handle/123456789/4068>
- Nguyen, T.D., Lee, Y. and Jung, C.W. (2023). Transparent and Flexible Patch Antenna Using MMF for Conformal Wi-Fi 6E Applications. *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, 23(4), 310-317. <https://doi.org/10.26866/jees.2023.4.r.172>
- Nilvivek, K. (2021). *The Bandwidth Enhancement of Wideband CPW-Fed Monopole Antenna Using I - Shaped Stub and Strip Load Tuning Technique* [Doctoral Dissertation, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology]. <http://www.repository.rmutt.ac.th/xmlui/handle/123456789/3913>
- Patel, D.H. and Makwana, G.D. (2021). A Comprehensive Review on Multi-Band Microstrip Patch Antenna Comprising 5G Wireless Communication. *International Journal of Computing and Digital System*. 11(1), 941-953. <https://journal.uob.edu.bh/server/api/core/bitstreams/e12b60d9-e5b7-4a7d-9491-d080f63b78f1/content>
- Praditthira, I. (2024). The 5G Technological Awareness and Utilization in the Context of Wireless Communication. *Sutthiparithat Journal*, 38(3), 16-35. <https://so05.tci-thaijo.org/index.php/DPUstutthiparithatJournal/article/view/273151/183741>
- Syed, N.R.R., Md, A.S., Niamat, H., Yangbae, C., Park, S.G., Sunggoo, K. and Nam, K. (2024). Isolation Enhancement of a Capacitively-Fed MIMO Antenna Using a Quasi-Fractal Parasitic Element and Defected Ground Structure, *Heliyon*, 10(20), <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39228>

- Tanjaroen, D. (2012). The Evolution of Wireless Communication Technology. *Panyapiwat Journal*, 3(2), 111-120. <https://so05.tci-thaijo.org/index.php/pimjournal/article/view/12017/10835>
- Thirasupha, R. (2019). *Cloud Infrastructure Design Model for Green Smart City: A Case Study of Electricity Generating Authority of Thailand* [Master's thesis, Chulalongkorn University]. <https://doi.org/10.58837/CHULA.THE.2019.1250>
- Yotwipan, A. and Boonpalit, A. (2021). *Marketing Mix and Social Value Effecting Samut Songkhram Customers Behaviours in Using Coffeehouse Services* [Doctoral Dissertation, Silpakorn University]. <http://ithesis-ir.su.ac.th/dspace/handle/123456789/3594>

การศึกษาการใช้พลังงานหมุนเวียนในอาคารอัจฉริยะ: การวิเคราะห์แนวทางสู่ Net Zero Energy Building

Study of Renewable Energy Utilization in Smart Buildings: An Analysis of Pathways to Net Zero Energy Building

สันติ การิสันต์^{1*} และสิทธิศักดิ์ ไรจชยะ²

Santi Karisan^{1*} and Sittisak Rojchaya²

Received: March 25, 2025; Revised: July 3, 2025; Accepted: July 7, 2025

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการบูรณาการพลังงานหมุนเวียนในระบบไฟฟ้าของอาคารเรียนรวมช่างอุตสาหกรรม วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ มุ่งสู่การเป็นอาคารพลังงานสุทธิเป็นศูนย์ (NZEB) โดยวิเคราะห์รูปแบบการใช้พลังงาน ออกแบบระบบพลังงานหมุนเวียน และจัดการพลังงานอัจฉริยะโดยอ้างอิงข้อมูลจริง ผลการศึกษาพบว่าการติดตั้งระบบ Solar PV ขนาด 125 kWp และแบตเตอรี่ 250 kWh ช่วยลดการพึ่งพาพลังงานจากโครงข่ายไฟฟ้าได้ 65 % และคืนทุนภายใน 8 ปี อาคารใช้พลังงานเฉลี่ย 47,264.27 วัตต์ต่อวัน โดยปัจจัยสำคัญคือ ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (ค่าเฉลี่ย 0.58) และอุณหภูมิภายนอก (>30 °C) ระบบจัดการพลังงานอัจฉริยะช่วยลดพลังงานรวม 24 % โดยปรับปรุงตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (ลดสูญเสีย 12 %) และใช้ระบบควบคุมแสงสว่างอัตโนมัติ (ลดพลังงาน 25 %) ส่งผลให้ลดการปล่อย CO₂ ได้ 118.5 ตัน/ปี งานวิจัยนี้ให้แนวทางแก่สถาบันและภาคอุตสาหกรรม เพื่อพัฒนาอาคารที่ยั่งยืนโดยใช้พลังงานหมุนเวียนร่วมกับระบบอัจฉริยะ

คำสำคัญ : พลังงานหมุนเวียน; อาคารพลังงานสุทธิเป็นศูนย์ (NZEB); การจัดการพลังงานอัจฉริยะ; การลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก

¹ วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

² คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

¹ College of Industrial Technology and Management, Rajamangala University of Technology Srivijaya

² Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Srivijaya

* Corresponding Author, Tel. 08 9924 1322, E - mail: santi.k@rmutsv.ac.th

Abstract

This research examines the integration of renewable energy into the electrical system of the Industrial Technician School Building at the College of Industrial Technology and Management, aiming to achieve a Net Zero Energy Building (NZEB). The study analyzes energy consumption patterns, designs an optimal renewable energy system, and implements smart energy management based on real consumption data. The findings indicate that installing a 125 kWp Solar PV system and a 250 kWh battery storage can reduce reliance on the public grid by 65 %, with a payback period of eight years. The building's average energy consumption is 47,264.27 W/day, with key influencing factors including power factor (average 0.58) and external temperatures above 30 °C. Smart energy management reduces total energy consumption by 24 %, primarily through power factor correction (12 % loss reduction) and automated lighting control (25 % energy savings), leading to a CO₂ reduction of 118.5 tons/year. This study provides practical recommendations for educational institutions and industries to develop sustainable buildings by integrating renewable energy with smart management systems.

Keywords: Renewable Energy; Net Zero Energy Building (NZEB); Smart Energy Management; Greenhouse Gas Emission Reduction

บทนำ

ในปัจจุบันภาคอาคารเป็นหนึ่งในภาคส่วนที่มีการใช้พลังงานสูงและเป็นแหล่งปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญของโลก โดยเฉพาะในประเทศไทยที่อาคารพาณิชย์และที่อยู่อาศัยมีการใช้พลังงานคิดเป็นสัดส่วนมากกว่า 40 % ของการใช้พลังงานทั้งหมดของประเทศ ทำให้การพัฒนาอาคารที่มีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมีความสำคัญอย่างยิ่ง (Hongvityakorn et al., 2024; Mengesha et al., 2024) แนวคิดอาคารพลังงานสุทธิเป็นศูนย์ (Net Zero Energy Building: NZEB) ได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นในฐานะแนวทางสำคัญในการลดการพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิลและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Noh et al., 2024; Wang et al., 2024) NZEB เป็นอาคารที่สามารถผลิตพลังงานจากแหล่งพลังงานหมุนเวียนได้เท่ากับหรือมากกว่าพลังงานที่ใช้ในแต่ละปี (Hanifi, 2024) แนวทางนี้ไม่เพียงช่วยลดต้นทุนด้านพลังงาน แต่ยังช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกรวมทั้งเป็นปัจจัยสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Latief et al., 2017; Bedi et al., 2025) อย่างไรก็ตาม การบรรลุเป้าหมาย NZEB ต้องอาศัยองค์ประกอบสำคัญหลายประการ เช่น (1) การวิเคราะห์รูปแบบการใช้พลังงานของอาคาร เพื่อลดความสูญเสียและเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน (2) การออกแบบระบบพลังงานหมุนเวียนที่เหมาะสม ซึ่งสามารถรองรับความต้องการพลังงานของอาคารได้อย่างสมดุล (3) การใช้ระบบจัดการพลังงานอัจฉริยะ (Smart Energy Management System) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความเสถียรของระบบไฟฟ้า (Pan et al., 2015; Hanifi, 2024)

การวิจัยนี้นำเสนอการศึกษาเชิงลึกเกี่ยวกับการผสมผสานพลังงานหมุนเวียนระบบไฟฟ้าในอาคารเรียนรวมช่างอุตสาหกรรม วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย เพื่อบรรลุเป้าหมาย NZEB โดยใช้ข้อมูลการใช้พลังงานจริง วิเคราะห์แนวทางที่เหมาะสมในการติดตั้งระบบพลังงานหมุนเวียนและนำเสนอแนวทางในการจัดการพลังงานที่มีประสิทธิภาพสูงสุด ข้อมูลการใช้พลังงานถูกเก็บรวบรวมผ่านระบบตรวจวัดพลังงานแบบเรียลไทม์ที่ใช้เทคโนโลยี IoT เพื่อบันทึกข้อมูลกระแสไฟฟ้า แรงดัน และพลังงานในแต่ละช่วงเวลา ข้อมูลเหล่านี้ถูกนำมาวิเคราะห์และประมวลผลด้วยซอฟต์แวร์ HOMER Pro ซึ่งเป็นเครื่องมือสำหรับการจำลอง และวิเคราะห์ระบบพลังงานไฮบริด โดยนำข้อมูลโหลดจริง อัตราค่าไฟฟ้า และศักยภาพพลังงานหมุนเวียนมาป้อนเพื่อจำลองระบบและประเมินความเหมาะสมทั้งในเชิงเทคนิคและเศรษฐศาสตร์ ผลลัพธ์ที่ได้ช่วยให้สามารถกำหนด

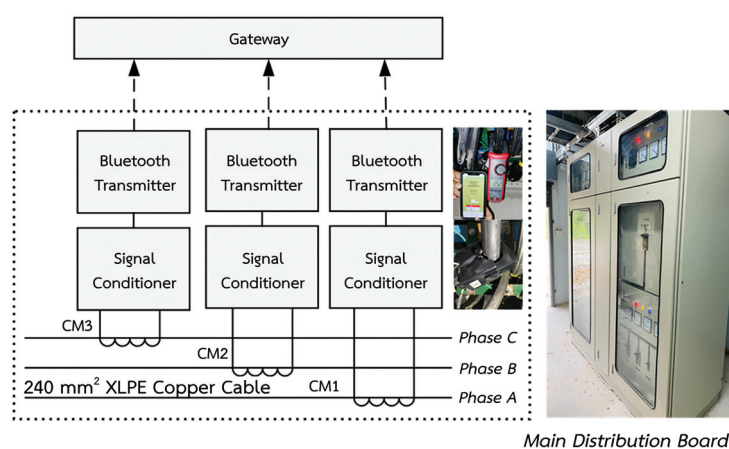
ขนาดระบบพลังงานหมุนเวียน ต้นทุน และประสิทธิภาพที่เหมาะสมสำหรับอาคารเรียนดังกล่าว ผลการศึกษานี้ไม่เพียงให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์สำหรับวิศวกร นักวิจัย และนักพัฒนาอาคารเท่านั้น แต่ยังเป็นแนวทางสำคัญสำหรับนักวางแผนนโยบายและภาคอุตสาหกรรมในการขับเคลื่อนอาคารประหยัดพลังงานและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมในประเทศไทย และทั่วโลก (Wikipedia Contributors, 2011.; IES, 2023)

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ดำเนินการตามกระบวนการวิเคราะห์และนำเสนอข้อมูล เพื่อประกอบการปรับปรุงระบบไฟฟ้าในอาคารเรียนรวมช่างอุตสาหกรรมให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด โดยแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ (1) การเก็บรวบรวมข้อมูลการใช้พลังงาน (2) การวิเคราะห์และจำลองระบบพลังงานหมุนเวียน (3) การพัฒนาระบบจัดการพลังงานอัจฉริยะ และ (4) การประเมินผลทางเศรษฐศาสตร์และสิ่งแวดล้อม รายละเอียดของแต่ละขั้นตอนมีดังนี้

1. การเก็บรวบรวมข้อมูลการใช้พลังงาน

เพื่อให้ได้ข้อมูลที่แม่นยำเกี่ยวกับรูปแบบการใช้พลังงานของอาคารเรียนรวมช่างอุตสาหกรรม วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย งานวิจัยนี้ได้ใช้ระบบตรวจวัดและเก็บข้อมูลแบบเรียลไทม์ (Real-Time Monitoring System) ซึ่งติดตั้งที่สายเมนหลักในตู้ MDB ที่จ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับอาคารระหว่างเดือนธันวาคม พ.ศ. 2567 ถึงมกราคม พ.ศ. 2568 โดยทำการวัดกระแสไฟฟ้า การใช้พลังงาน และอุณหภูมิที่สายเมนหลัก และบันทึกข้อมูลเพื่อแสดงผลผ่านระบบ IoT แบบเรียลไทม์ เพื่อให้สามารถติดตามและวิเคราะห์ข้อมูลได้อย่างทันเวลาและแม่นยำ



รูปที่ 1 ระบบติดตามการใช้พลังงานไฟฟ้าด้วยเซนเซอร์กระแสไฟฟ้าและระบบ IoT

จากรูปที่ 1 แสดงระบบบันทึกข้อมูลการใช้พลังงานจากตู้ MDB โดยใช้ Clamp Meter (CM) วัดค่ากระแสไฟฟ้าและส่งสัญญาณผ่านกระบวนการปรับสัญญาณไปยัง Gateway ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวกลางสื่อสารกับอินเทอร์เน็ตผ่าน Bluetooth ข้อมูลที่บันทึกจะถูกอัปโหลดเข้าสู่ Data Center ทุก 1 นาที และสามารถดาวน์โหลดในรูปแบบ CSV ผ่าน Browser Engine ได้ ระบบนี้ทำการบันทึกข้อมูลต่อเนื่องตั้งแต่เดือนธันวาคม พ.ศ. 2567 ถึงมกราคม พ.ศ. 2568 เพื่อนำไปวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อการเกิดกระแสไม่สมดุล (Unbalance Current)



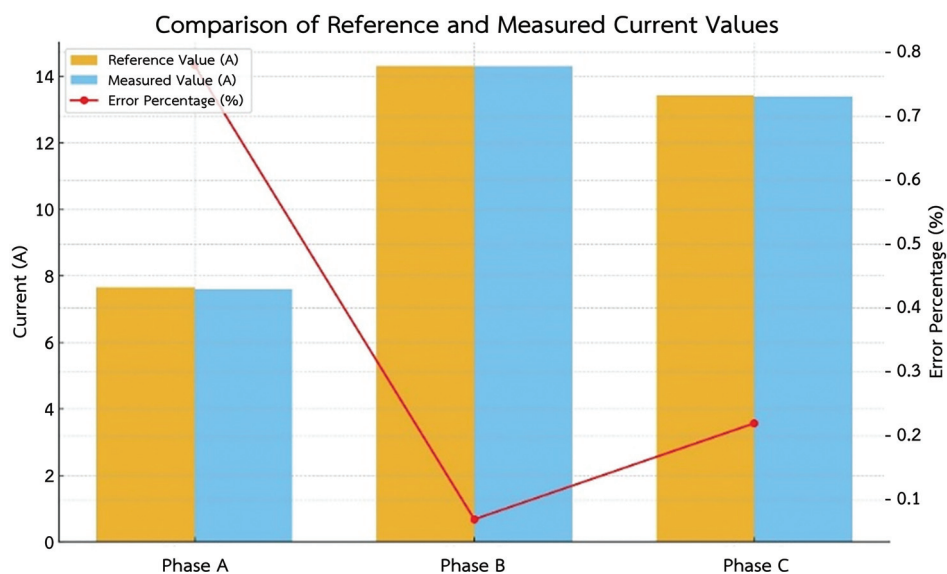
รูปที่ 2 การทดสอบประสิทธิภาพและความแม่นยำของระบบ

จากรูปที่ 2 การทดสอบเปรียบเทียบความแม่นยำของระบบ เพื่อยืนยันความถูกต้องของระบบเก็บข้อมูล ได้ทำการเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดมาตรฐาน Clip AM และคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนเชิงเปอร์เซ็นต์ (Error Percentage) ผลการประเมินพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 0.07 - 0.78 % ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้สำหรับการวิเคราะห์ทางวิศวกรรมไฟฟ้า

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบความแม่นยำระหว่างระบบและเครื่องมือวัด (เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด)

Phase	Reference Value (A)	Measured Value (A)	Error Percentage %
Phase A	7.66	7.6	0.78
Phase B	14.31	14.3	0.07
Phase C	13.43	13.4	0.22

ตารางที่ 1 แสดงการเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้ระหว่างเครื่องมืออ้างอิงมาตรฐาน (Reference Value) กับค่าที่วัดได้จากระบบต้นแบบ (Measured Value) ในแต่ละเฟส โดยคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนเป็นร้อยละ (Error Percentage) ผลการวิเคราะห์พบว่า เฟส A มีค่าความคลาดเคลื่อน 0.78 % เฟส B มีความคลาดเคลื่อนต่ำที่สุดที่ 0.07 % เฟส C มีค่าความคลาดเคลื่อน 0.22 % ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ระบบต้นแบบมีความแม่นยำในการวัดกระแสไฟฟ้าในระดับที่น่าเชื่อถือ (ค่าความคลาดเคลื่อน < 1 %)



รูปที่ 3 ร้อยละของความคลาดเคลื่อน

จากรูปที่ 3 พบว่าเฟส A (7.6 A) วัดได้ 7.66 A (+0.78 %) เฟส B (14.3 A) วัดได้ 14.31 A (+0.07 %) และ เฟส C (13.4 A) วัดได้ 13.43 A (+0.22 %) ค่าที่วัดได้ใกล้เคียงค่ามาตรฐาน ความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 0.07 - 0.78 %

2. การวิเคราะห์และจำลองระบบพลังงานหมุนเวียน

เมื่อได้ข้อมูลการใช้พลังงานของอาคารเรียนรวมช่างอุตสาหกรรม งานวิจัยนี้ใช้ซอฟต์แวร์ HOMER Pro เพื่อจำลองและออกแบบระบบพลังงานหมุนเวียนที่เหมาะสม โดยขั้นตอนประกอบด้วย

2.1 การจำลองขนาดระบบพลังงานหมุนเวียน วิเคราะห์ความต้องการพลังงานของอาคารเรียนรวมช่างอุตสาหกรรมในแต่ละช่วงเวลา เลือกขนาดแผงโซลาร์เซลล์ (Solar PV System) และระบบกักเก็บพลังงาน (Battery Storage System) วิเคราะห์การติดตั้งระบบในรูปแบบต่าง ๆ เช่น Grid-Connected Off-Grid และ Hybrid System คำนวณกำลังการผลิต (kWh/ปี) และอัตราการลดการพึ่งพาพลังงานจาก Grid (%)

2.2 การวิเคราะห์ความคุ้มค่าและอายุการใช้งานของอุปกรณ์ คำนวณต้นทุนการติดตั้งและบำรุงรักษาของระบบพลังงานหมุนเวียน ประเมินอายุการใช้งานของแผงโซลาร์เซลล์และแบตเตอรี่ คำนวณค่า Capacity Factor ของแผงโซลาร์เซลล์ภายใต้สภาพแวดล้อมจริง วิเคราะห์ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) ของแต่ละทางเลือก

3. ระบบจัดการพลังงานอัจฉริยะ

ระบบจัดการพลังงานอัจฉริยะ (Smart Energy Management System: SEMS) มีบทบาทสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน ลดต้นทุนด้านพลังงาน และสนับสนุนการใช้พลังงานหมุนเวียน ระบบนี้ใช้เทคโนโลยี IoT ปัญญาประดิษฐ์ (AI) และ Big Data Analytics ในการตรวจสอบ วิเคราะห์ และควบคุมการใช้พลังงานแบบเรียลไทม์ โดยมีองค์ประกอบหลักของระบบจัดการพลังงานอัจฉริยะ

3.1 เซนเซอร์และอุปกรณ์ตรวจวัด (IoT Sensors and Meters) ตรวจวัดพารามิเตอร์สำคัญ เช่น กระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า พลังงานที่ใช้ อุณหภูมิ และโหลดไฟฟ้า ส่งข้อมูลแบบเรียลไทม์ไปยังระบบกลาง

3.2 แพลตฟอร์มวิเคราะห์ข้อมูลพลังงาน (Energy Analytics Platform) วิเคราะห์แนวโน้มการใช้พลังงาน ใช้ Machine Learning หรือ Clustering เพื่อระบุพฤติกรรมโหลดผิดปกติ

3.3 ระบบควบคุมและบริหารพลังงาน (Energy Control and Management System) ควบคุมโหลดไฟฟ้าอัตโนมัติ เช่น การเปิด/ปิดอุปกรณ์ตามโหลดไฟฟ้า บูรณาการแหล่งพลังงานหมุนเวียน เช่น Solar PV และแบตเตอรี่

3.4 ส่วนติดต่อผู้ใช้ (User Interface & Dashboard) แสดงข้อมูลพลังงานในรูปแบบกราฟหรือแดชบอร์ด แจ้งเตือนเมื่อมีการใช้พลังงานผิดปกติ

4. การประเมินผลทางเศรษฐศาสตร์และสิ่งแวดล้อม

เพื่อตรวจสอบความคุ้มค่าและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม งานวิจัยนี้ใช้การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ และการวิเคราะห์วงจรชีวิต (Life Cycle Assessment: LCA) โดยมีขั้นตอนดังนี้

4.1 การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ คำนวณมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV) ประเมินอัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return: IRR) วิเคราะห์จุดคุ้มทุน (Break-even Analysis) ศึกษาความอ่อนไหวของโครงการ (Sensitivity Analysis) ต่อปัจจัย เช่น ราคาติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์และอัตราค่าไฟฟ้า

4.2 การประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม คำนวณปริมาณการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (GHG Emission Reduction) ในแต่ละปีเปรียบเทียบกับปริมาณการปล่อยก๊าซก่อนและหลังติดตั้งระบบ วิเคราะห์ผลกระทบด้านการใช้ทรัพยากรและสิ่งแวดล้อมในแต่ละทางเลือก

ผลการศึกษา

งานวิจัยนี้ดำเนินการตามขั้นตอนที่วางแผนไว้และได้ผลการศึกษาที่สำคัญใน 4 ด้านหลัก ได้แก่ (1) การวิเคราะห์รูปแบบการใช้พลังงาน (2) ผลการจำลองระบบพลังงานหมุนเวียน (3) ผลของการใช้ระบบจัดการพลังงานอัจฉริยะ และ (4) การประเมินผลกระทบทางเศรษฐศาสตร์และสิ่งแวดล้อม

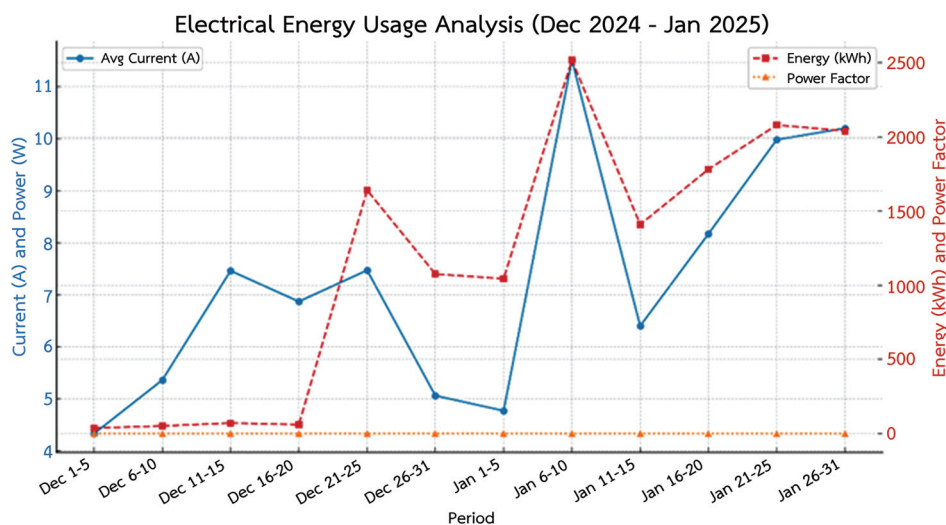
1. การวิเคราะห์รูปแบบการใช้พลังงานจากข้อมูลที่เก็บรวบรวมระหว่างเดือนธันวาคม พ.ศ. 2567 ถึง มกราคม พ.ศ. 2568 ช่วยให้เข้าใจแนวโน้มและพัฒนาแนวทางการจัดการพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ

ตารางที่ 2 แสดงค่ากำลังไฟฟ้า (kW) และพลังงานไฟฟ้า (kWh) ได้จากการวัดด้วยเครื่องมือ IoT Energy Meter ที่บันทึกค่าทุก 1 นาทีตลอด 24 ชั่วโมง โดยคำนวณพลังงานจากการรวมกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยในแต่ละนาทียกใช้การประมาณค่า จะระบุช่วงเวลาและชั่วโมงที่ใช้ในการคำนวณอย่างชัดเจน เพื่อความถูกต้องในการวิเคราะห์พลังงานและต้นทุน

ตารางที่ 2 ข้อมูลและการวิเคราะห์การใช้พลังงาน

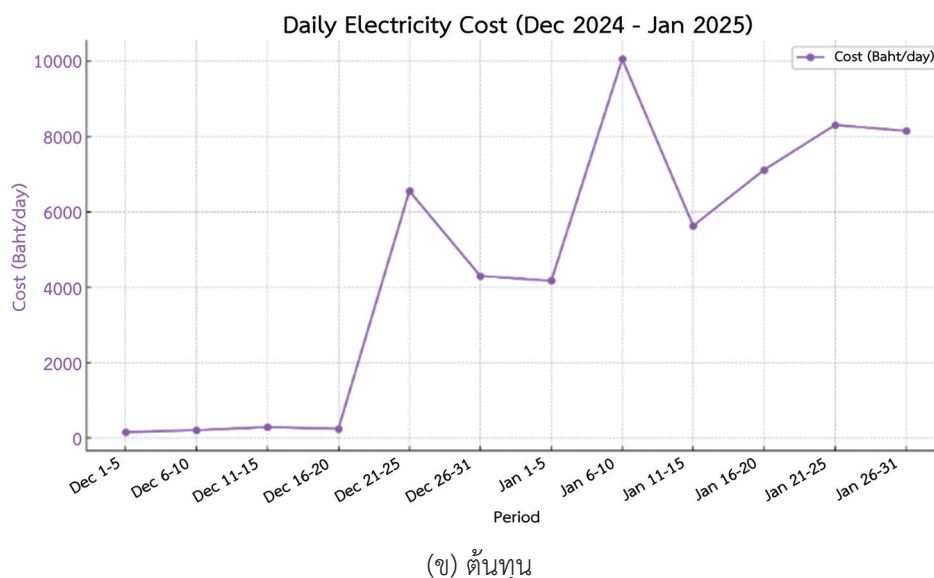
Period	Average Current (A)	Average Power (W)	Power Factor (PF)	Energy Consumption (kWh/day)	Cost (Baht/day)*
Dec 1-5, 2024	4.33	1601.35	0.56	38.43	153.73
Dec 6-10, 2024	5.36	2179.05	0.54	52.30	209.19
Dec 11-15, 2024	7.46	2986.57	0.51	71.68	286.71
Dec 16-20, 2024	6.87	2554.90	0.52	61.32	245.27
Dec 21-25, 2024	7.47	68312.40	0.66	1,639.50	6,557.99
Dec 26-31, 2024	5.06	44815.08	0.80	1,075.56	4,302.25
Jan 1-5, 2025	4.77	43482.35	0.73	1,043.58	4,174.30
Jan 6-10, 2025	11.51	104817.09	0.44	2,515.61	10,062.44
Jan 11-15, 2025	6.40	58698.36	0.69	1,408.76	5,635.05
Jan 16-20, 2025	8.17	74187.84	0.51	1,780.51	7,122.03
Jan 21-25, 2025	9.98	86584.38	0.48	2,078.03	8,312.10
Jan 26-31, 2025	10.20	84954.82	0.47	2,038.92	8,155.66
Average	7.30	47,264.27	0.58	1,150.38	4,601.39

หมายเหตุ: ค่าใช้จ่ายคำนวณตามอัตราค่าไฟฟ้าท้องถิ่น



(ก) แนวโน้มการใช้พลังงานไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเฉลี่ย

รูปที่ 4 ข้อมูลและการวิเคราะห์การใช้พลังงาน



รูปที่ 4 ข้อมูลและการวิเคราะห์การใช้พลังงาน (ต่อ)

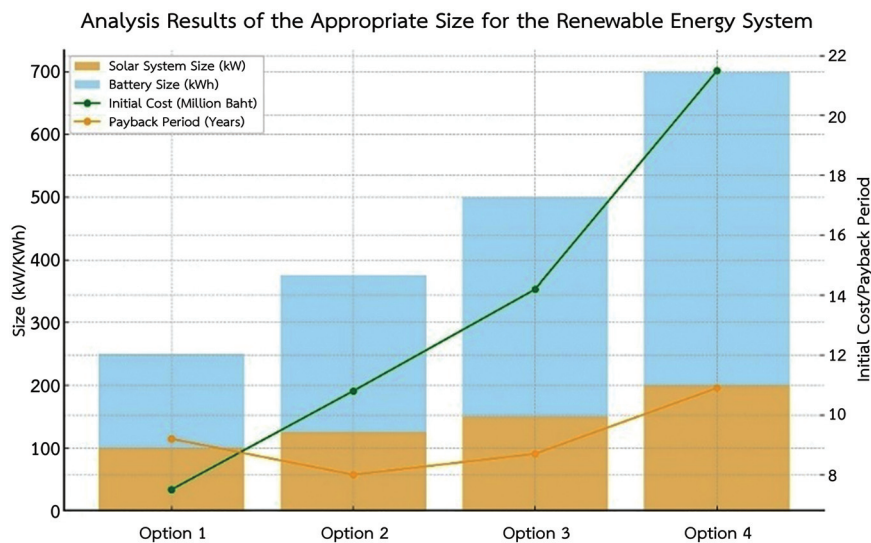
จากรูปที่ 4(ก) กระแสไฟฟ้าเฉลี่ย (Average Current, A) มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 7.30 A ตลอดช่วงเวลาที่ศึกษา ช่วงที่กระแสไฟฟ้าต่ำสุดคือ 4.33 A (1 - 5 ธันวาคม พ.ศ. 2567) และสูงสุดที่ 11.51 A (6 - 10 มกราคม พ.ศ. 2568) พบว่าแนวโน้มกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญในเดือนมกราคม โดยเฉพาะช่วง 6 - 10 มกราคม พ.ศ. 2568 ซึ่งอาจเป็นผลจากการเพิ่มขึ้นของโหลดไฟฟ้า พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (Energy Consumption, kWh/day) ค่าเฉลี่ยของพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ต่อวันอยู่ที่ 1,150.38 kWh/day ช่วงที่มีการใช้พลังงานต่ำสุดคือ 38.43 kWh/day (1 - 5 ธันวาคม พ.ศ. 2567) การใช้พลังงานสูงสุด พบในช่วง 6 - 10 มกราคม พ.ศ. 2568 ที่ 2,515.61 kWh/day ซึ่งมากกว่าค่าเฉลี่ยเกือบ 2.19 เท่า ค่า Power Factor (PF) ค่าเฉลี่ยของ Power Factor อยู่ที่ 0.58 ตลอดช่วงเวลาที่ศึกษา พบว่าช่วงที่ Power Factor ต่ำสุดคือ 0.44 (6 - 10 มกราคม พ.ศ. 2568) และสูงสุดที่ 0.80 (26 - 31 ธันวาคม 2567) ค่า Power Factor ต่ำกว่า 0.5 ในหลายช่วงเวลา ซึ่งบ่งบอกถึงประสิทธิภาพการใช้พลังงานที่ยังไม่ดี ควรมีการปรับปรุงโหลดไฟฟ้าเพื่อเพิ่มค่า PF ส่วนรูปที่ 4(ข) พบว่า ค่าไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจาก 153.73 บาท/วัน เป็น 10,062.44 บาท/วัน (เพิ่มขึ้นกว่า 65 เท่า) ช่วง 6 - 10 มกราคม พ.ศ. 2568 เป็นจุด Peak ของการใช้พลังงานและค่าไฟ ก่อนลดลงเล็กน้อยหลังจากนั้น มีความสัมพันธ์โดยตรงระหว่างกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยและปริมาณการใช้พลังงาน

2. ผลการจำลองระบบพลังงานหมุนเวียน

การจำลองระบบพลังงานหมุนเวียนโดยใช้ซอฟต์แวร์ HOMER Pro พบว่าทางเลือกที่เหมาะสมที่สุด คือ การติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์ขนาด 125 kWp พร้อมระบบกักเก็บพลังงาน (Battery Storage) ขนาด 250 kWh ตามรายละเอียดตารางที่ 3 ระบบนี้สามารถผลิตพลังงานได้ประมาณ 175,000 kWh/ปี ซึ่งครอบคลุม 65 % ของความต้องการพลังงานทั้งหมดของอาคาร ค่า Capacity Factor ของระบบพลังงานแสงอาทิตย์เฉลี่ยอยู่ที่ 17.2 % ข้อมูลดังกล่าวสะท้อนถึงความสมดุลระหว่างขนาดระบบพลังงาน แบตเตอรี่ และความคุ้มค่าในการลงทุน

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ขนาดที่เหมาะสมของระบบพลังงานหมุนเวียน

Option	Solar System Size (kW)	Battery Size (kWh)	Energy Demand Coverage (%)	Initial Cost (Million Baht)	Payback Period (Years)
Option 1	100	150	48 %	7.5	9.2
Option 2	125	250	65 %	10.8	8.0
Option 3	150	350	78 %	14.2	8.7
Option 4	200	500	95 %	21.5	10.9



รูปที่ 5 การวิเคราะห์ขนาดที่เหมาะสมสำหรับระบบพลังงานหมุนเวียน

จากรูปที่ 5 พบว่า ขนาดระบบโซลาร์ และขนาดแบตเตอรี่ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามลำดับของทางเลือกที่สูงขึ้น การครอบคลุมพลังงาน (%) เพิ่มขึ้นตามขนาดของระบบโซลาร์และแบตเตอรี่ โดยมีลักษณะเป็นเส้นกราฟที่เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ทางเลือกที่ 4 ให้ค่าการครอบคลุมพลังงานสูงสุด (~100 %) และมีขนาดระบบใหญ่ที่สุด ต้นทุนเริ่มต้นเพิ่มขึ้นตามทางเลือกที่สูงขึ้น โดยทางเลือกที่ 4 มีต้นทุนสูงสุด ระยะเวลาคืนทุนมีแนวโน้มเป็นรูปตัวยู (U-shape) โดยทางเลือกที่ 2 มีระยะเวลาคืนทุนต่ำสุด และเพิ่มขึ้นในทางเลือกที่ 3 และ 4 แม้ต้นทุนเพิ่มขึ้น แต่ระยะเวลาคืนทุนไม่ได้ลดลงเสมอไป

3. ผลของการใช้ระบบจัดการพลังงานอัจฉริยะ

ในช่วงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2567 ถึงมกราคม พ.ศ. 2568 ได้มีการติดตั้งและทดลองใช้งานระบบจัดการพลังงานอัจฉริยะ (SEMS) ภายในอาคารเรียนรวมช่างอุตสาหกรรม วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย เพื่อวัตถุประสงค์ในการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน ลดภาระโหลดไฟฟ้า ในช่วงเวลาที่ไม่จำเป็น และปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าโดยรวมของอาคาร ระบบ SEMS ประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ได้แก่ เซนเซอร์ และมีเตอร์ IoT ที่ติดตั้งในระบบไฟฟ้าหลักของอาคาร เพื่อวัดพารามิเตอร์สำคัญ เช่น กระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า พลังงานที่ใช้ และตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (Power Factor) แบบเรียลไทม์ ข้อมูลจากเซนเซอร์จะถูกส่งเข้าสู่แพลตฟอร์มวิเคราะห์ข้อมูล (Energy Analytics Platform) ที่ใช้เทคนิค Machine Learning ในการตรวจจับและวิเคราะห์รูปแบบการใช้พลังงาน รวมทั้งระบุช่วงเวลาที่มิโหลดไฟฟ้าสูงผิดปกติ ผลการวิเคราะห์ช่วยให้ระบบควบคุมและบริหารจัดการ พลังงาน (Energy Control and Management System) สามารถดำเนินการปรับโหลดอัตโนมัติ เช่น การเปิด-ปิดอุปกรณ์ไฟฟ้า รวมถึงระบบแสงสว่างอัตโนมัติและการปรับปรุงตัวประกอบกำลังไฟฟ้าให้สูงขึ้น เพื่อลดการสูญเสียพลังงานในระบบ นอกจากนี้ระบบยังบูรณาการกับแหล่งพลังงานหมุนเวียน เช่น Solar PV และ แบตเตอรี่เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานทดแทนในอาคาร

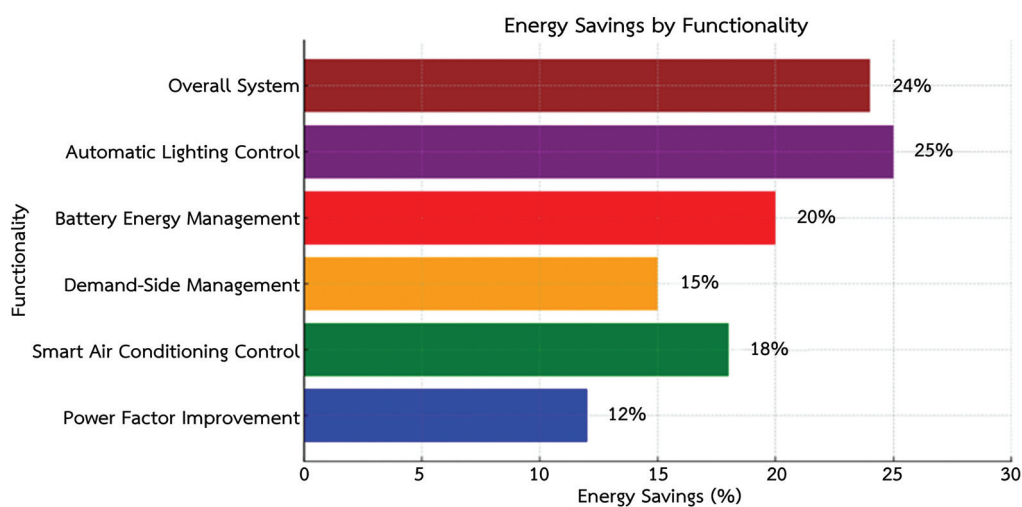
ตารางที่ 4 ประสิทธิภาพของระบบการจัดการพลังงานอัจฉริยะ

Functionality	Energy Savings (%)	Benefits
Power Factor Improvement	12 %	Reduce electricity cost, reduce power loss
Smart Air Conditioning Control	18 %	Reduce energy usage, increase comfort
Demand-Side Management	15 %	Reduce electricity cost during Peak Demand
Battery Energy Management	20 %	Increase use of renewable energy

ตารางที่ 4 ประสิทธิภาพของระบบการจัดการพลังงานอัจฉริยะ (ต่อ)

Functionality	Energy Savings (%)	Benefits
Automatic Lighting Control	25 %	Reduce lighting energy usage
Overall System	24 %	Reduce total energy usage

ตารางที่ 4 แสดงข้อมูลผลการใช้พลังงานจริงที่เก็บรวบรวมจากระบบเซนเซอร์ IoT ในอาคารระหว่างช่วงเวลาที่ทำการทดลอง (ธันวาคม พ.ศ. 2567 - มกราคม พ.ศ. 2568) โดยค่าพลังงานไฟฟ้า (kWh) และตัวประกอบกำลังไฟฟ้าเป็นข้อมูล ที่วัดจริง ไม่ใช่ค่าจากการจำลองโปรแกรมใด ๆ การแสดงผลในตารางจึงสะท้อนการเปลี่ยนแปลงการใช้พลังงาน และประสิทธิภาพที่เกิดขึ้นจริงจากการนำ SEMS มาใช้ โดยแสดงให้เห็นการลดโหลดไฟฟ้าในช่วงเวลาที่ไม่จำเป็น และการเพิ่มตัวประกอบกำลังไฟฟ้า ทำให้ลดการสูญเสียพลังงานอย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 6 สัดส่วนการประหยัดพลังงาน

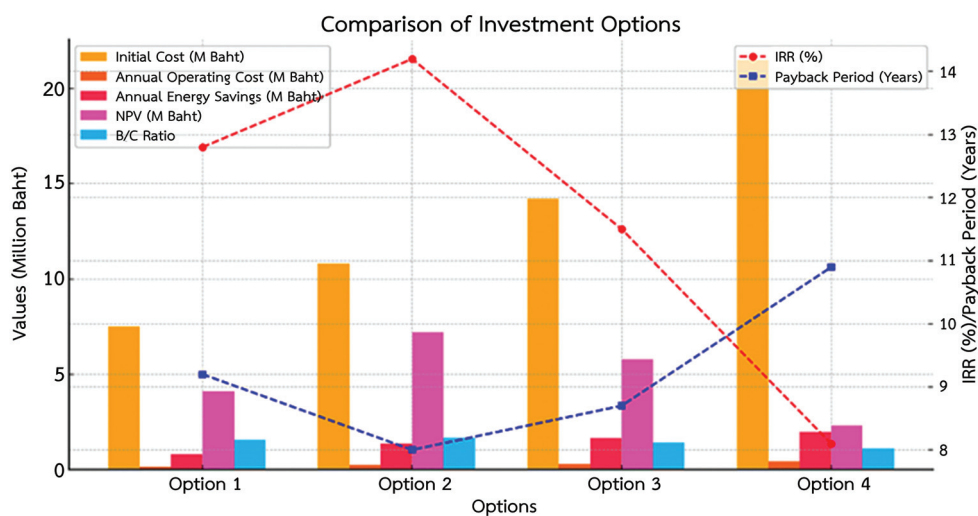
จากรูปที่ 6 พบว่า การจัดการความต้องการไฟฟ้ามีส่วนสูงสุด (25 %) แสดงถึงความสำคัญของการควบคุมและบริหารโหลดไฟฟ้า การบริหารการใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ (20 %) เป็นอีกแนวทางสำคัญที่ช่วยลดการใช้พลังงานจากระบบหลัก การปรับปรุงตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (18 %) และการควบคุมแสงสว่างอัตโนมัติ (15 %) เป็นมาตรการเสริมที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพ การควบคุมระบบปรับอากาศอัจฉริยะ (12 %) มีสัดส่วนน้อยที่สุด แต่ยังคงเป็นส่วนหนึ่ง ที่ช่วยลดการใช้พลังงาน

4. การประเมินผลกระทบทางเศรษฐศาสตร์และสิ่งแวดล้อม

4.1 การวิเคราะห์ความคุ้มค่า ตารางที่ 5 เปรียบเทียบทางเลือกการลงทุนระบบจัดการพลังงานอัจฉริยะ 4 แบบ (Option 1 - 4) โดยพิจารณาต้นทุนเริ่มต้น ต้นทุนดำเนินงาน การประหยัดพลังงาน มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) ระยะเวลาคืนทุน และอัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุน (B/C Ratio) ราคาของแต่ละทางเลือก ประเมินจากค่าใช้จ่ายจริงในตลาด ทั้งต้นทุนอุปกรณ์ การติดตั้ง และบำรุงรักษา ความแตกต่างของแต่ละ Option เกิดจากขนาดและชนิดของอุปกรณ์ ระดับการบูรณาการกับพลังงานหมุนเวียน และขอบเขตการควบคุม โหลดไฟฟ้า อย่างไรก็ตาม บทความควรระบุที่มาของราคาและสมมติฐานที่ใช้ในการคำนวณแต่ละ Option ให้ชัดเจน เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือและความสมบูรณ์ของการวิเคราะห์

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์เชิงเศรษฐกิจของแต่ละทางเลือก

Item	Option 1	Option 2	Option 3	Option 4
Initial Cost (Million Baht)	7.5	10.8	14.2	21.5
Annual Operating Cost (Million Baht)	0.15	0.22	0.28	0.43
Annual Energy Savings (Million Baht)	0.82	1.35	1.63	1.97
Net Present Value (NPV) (Million Baht)	4.1	7.2	5.8	2.3
Internal Rate of Return (IRR) (%)	12.8 %	14.2 %	11.5 %	8.1 %
Payback Period (Years)	9.2	8.0	8.7	10.9
Benefit-Cost Ratio (B/C Ratio)	1.54	1.67	1.41	1.11



รูปที่ 7 การวิเคราะห์ทางเศรษฐกิจของแต่ละตัวเลือก

จากรูปที่ 7 พบว่า ค่าใช้จ่ายและผลประโยชน์หลักต้นทุนเริ่มต้น Option 4 มีต้นทุนสูงสุด (~21.5M Baht) Option 1 มีต้นทุนต่ำสุด (~7.5M Baht) ค่าใช้จ่ายดำเนินงานรายปีเพิ่มขึ้นตามขนาดของโครงการ โดย Option 4 สูงสุด (~0.43M Baht) การประหยัดพลังงานรายปี สูงขึ้นตาม Option โดย Option 4 ประหยัดพลังงานได้มากที่สุด (~1.97M Baht) ตัวชี้วัดทางการเงินมูลค่าปัจจุบันสุทธิ Option 2 มี NPV สูงสุด (~7.2M Baht) Option 4 มี NPV ต่ำสุด (~2.3M Baht) อัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุน สูงสุดที่ Option 2 (~1.67) แสดงว่ามีความคุ้มค่ามากที่สุด การคืนทุนและอัตราผลตอบแทน IRR (%) สูงสุดที่ Option 2 (~14.2 %) ต่ำสุดที่ Option 4 (~8.1 %) แสดงว่าไม่คุ้มค่ามากนัก ระยะเวลาคืนทุนสั้นที่สุดที่ Option 2 (~8 ปี) ยาวที่สุดที่ Option 4 (~10.9 ปี) บทสรุป Option 2 มีความคุ้มค่าทางการเงินสูงสุด เพราะ NPV และ B/C Ratio สูง และ IRR ดีที่สุด พร้อมระยะเวลาคืนทุนที่สั้น Option 4 ไม่คุ้มค่าเท่าไร เนื่องจากต้นทุนสูงมากและคืนทุนช้า Option 1 และ 3 อาจเป็นตัวเลือกที่ดี หากต้องการสมดุลระหว่างต้นทุนและผลตอบแทน

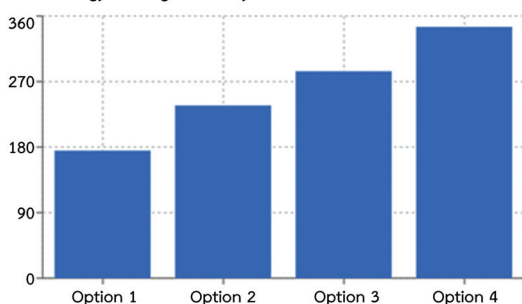
4.2 การลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ตารางที่ 6 วิเคราะห์ปริมาณการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse Gas Emission Reduction) ของแต่ละทางเลือก โดยคำนวณจากพลังงานที่ประหยัดได้ (Energy Savings) และตัวคูณการปล่อยคาร์บอน (Emission Factor = 0.5 kg/kWh) ซึ่งเป็นค่าประมาณการของระบบผลิตไฟฟ้าในประเทศไทย

ตารางที่ 6 การลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของแต่ละทางเลือก

Option	Energy Savings from the System (MWh/year)	Emission Reduction (tons/year)	Emission Reduction over the Project Lifetime (25 years) (tons)
Option 1	175	87.5	2,187.5
Option 2	237	118.5	2,962.5
Option 3	284	142.0	3,550.0
Option 4	345	172.5	4,312.5

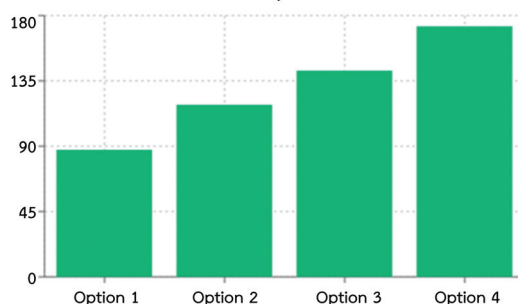
หมายเหตุ: คำนวณโดยอิงค่าปัจจัยการปล่อยก๊าซ 0.5 กิโลกรัมต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง สำหรับการผลิตไฟฟ้าในประเทศไทย

Annual Energy Savings (MWh/year)



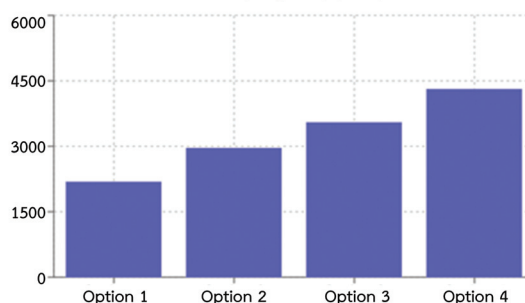
(ก) การประหยัดพลังงาน

Annual Emission Reduction (tons/year)



(ข) การลดการปล่อยมลพิษ

Lifetime Emission Reduction (25 years) (tons)



(ค) การลดการปล่อยมลพิษตลอดอายุโครงการ

รูปที่ 8 การลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก

จากรูปที่ 8(ก) พบว่า กราฟการประหยัดพลังงานรายปี (MWh/ปี) แสดงปริมาณพลังงานที่ประหยัดได้ต่อปีของแต่ละทางเลือก โดยมีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับจาก Option 1 (175 MWh/ปี) ถึง Option 4 (345 MWh/ปี) แสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่างแต่ละทางเลือก โดยมีอัตราการเพิ่มขึ้นประมาณ 56 - 62 MWh/ปี ระหว่างแต่ละทางเลือกที่ต่อเนื่องกัน รูปที่ 8(ข) กราฟการลดการปล่อยมลพิษรายปี (ตัน/ปี) สะท้อนถึงปริมาณการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่อปี ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณการประหยัดพลังงาน โดยค่าเพิ่มขึ้นจาก Option 1 (87.5 ตัน/ปี) ถึง Option 4 (172.5 ตัน/ปี) โดยมีอัตราส่วนคงที่ระหว่างการประหยัดพลังงานและการลดมลพิษที่ประมาณ 2:1 (MWh:ตัน) รูปที่ 8(ค) กราฟการลดการปล่อยมลพิษตลอดอายุโครงการ 25 ปี (ตัน) แสดงผลกระทบสะสมของการลดมลพิษตลอดระยะเวลาโครงการ 25 ปี มีค่าเพิ่มขึ้นจาก Option 1 (2,187.5 ตัน) ถึง Option 4 (4,312.5 ตัน) แสดงให้เห็นถึงประสิทธิผลระยะยาวที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดย Option 4 สามารถลดการปล่อย

มลพิษได้มากกว่า Option 1 เกือบสองเท่า สรุปจากข้อมูลกราฟทั้งสามแสดงถึงความสัมพันธ์เชิงบวกระหว่างลำดับของทางเลือกกับประสิทธิภาพในการลดผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม โดย Option 4 แสดงค่าประสิทธิภาพสูงสุดในทุกพารามิเตอร์ที่วัด ซึ่งสามารถนำไปใช้ประกอบการตัดสินใจเชิงนโยบายด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อมได้อย่างมีนัยสำคัญ

การอภิปรายผล

จากผลการศึกษาพบว่า การบูรณาการพลังงานหมุนเวียนร่วมกับระบบจัดการพลังงานอัจฉริยะมีศักยภาพสูงในการลดการพึ่งพาโครงข่ายไฟฟ้าสาธารณะ โดยสามารถรองรับความต้องการพลังงานของอาคารได้ถึง 65 % และลดการใช้พลังงานรวมได้ 24 % ซึ่งเป็นผลมาจากการใช้ระบบควบคุมแสงสว่างอัตโนมัติและการปรับปรุงตัวประกอบกำลังไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น (Hongvityakorn et al., 2024; Mengesha et al., 2024) การวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (Power Factor: PF) มีผลกระทบโดยตรงต่อประสิทธิภาพของระบบ โดยค่า PF ที่ต่ำกว่า 0.85 ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานที่ไม่จำเป็น (Latief et al., 2017) นอกจากนี้ การใช้พลังงานมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับอุณหภูมิภายนอกอาคาร โดยเฉพาะในช่วงที่อุณหภูมิสูงกว่า 30 °C มีแนวโน้มที่อัตราการใช้พลังงานจะเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเกิดจากการใช้งานเครื่องปรับอากาศและระบบระบายอากาศที่มากขึ้น (Noh et al., 2024) ปัจจุบันนี้ชี้ถึง ความจำเป็นในการเพิ่มประสิทธิภาพระบบทำความเย็น หรือพิจารณาใช้วัสดุที่ช่วยลดความร้อนในอาคารเพื่อลดภาระโหลดพลังงาน (Wang et al., 2024) ในด้านเศรษฐศาสตร์การลงทุน พบว่าระบบพลังงานหมุนเวียนร่วมกับระบบ กักเก็บพลังงานมีระยะเวลาคืนทุนประมาณ 8 ปี และอัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) 14.2 % ซึ่งถือว่าอยู่ในช่วงที่คุ้มค่าเมื่อเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานของอุตสาหกรรม (Hanifi, 2024) อย่างไรก็ตาม หากเลือกติดตั้งระบบที่สามารถรองรับพลังงานได้มากขึ้น เช่น 78 - 95 % ของความต้องการพลังงานของอาคาร จะทำให้ต้นทุนเริ่มต้นเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ระยะเวลาคืนทุนยาวนานขึ้น ดังนั้น แนวทางที่เหมาะสมควรเป็นการผสมผสานระหว่างพลังงานหมุนเวียนและการจัดการโหลดไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพ (Bedi et al., 2025)

ผลจากการศึกษานี้ตอกย้ำว่า การพัฒนาอาคารพลังงานสุทธิเป็นศูนย์ (Net Zero Energy Building: NZEB) ไม่สามารถอาศัยเพียงพลังงานหมุนเวียนเท่านั้น แต่ต้องมีระบบจัดการพลังงานที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน ลดการสูญเสีย และปรับสมดุลระหว่างการผลิตและการใช้พลังงานได้อย่างเหมาะสม (Mengesha et al., 2024) นอกจากนี้ การวิจัยยังแสดงให้เห็นว่า การนำเทคโนโลยี Internet of Things (IoT) และปัญญาประดิษฐ์ (AI) มาใช้ในระบบจัดการพลังงาน สามารถช่วยให้การวางแผนและการปรับโหลดพลังงานเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น (Pan et al., 2015) โดยสรุป งานวิจัยนี้เน้นย้ำถึงความสำคัญของการออกแบบระบบพลังงานที่มีการบูรณาการอย่างสมดุลระหว่างพลังงานหมุนเวียน ระบบกักเก็บพลังงาน และระบบจัดการพลังงานอัจฉริยะ ซึ่งไม่เพียงแต่ช่วยลดต้นทุนด้านพลังงาน แต่ยังลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสนับสนุนเป้าหมายการพัฒนาอาคารที่ยั่งยืนในอนาคต (Wikipedia Contributors, 2011; IES, 2023)

สรุป

งานวิจัยนี้เสนอแนวทางพัฒนาอาคารเรียนรวมช่างอุตสาหกรรม วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ให้เป็นอาคารพลังงานสุทธิเป็นศูนย์ (Net Zero Energy Building: NZEB) ด้วยการบูรณาการพลังงานหมุนเวียนและระบบจัดการพลังงานอัจฉริยะ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพลดการพึ่งพาไฟฟ้าจากโครงข่าย และลดผลกระทบสิ่งแวดล้อม อาคารมีการใช้พลังงานเฉลี่ย 47,264.27 วัตต์/วัน โดย Peak สูงสุดที่ 104,817.09 วัตต์ในต้นเดือนมกราคม พ.ศ. 2568 การติดตั้ง Solar PV ขนาด 125 kWp และ Battery Storage 250 kWh ลดการพึ่งพาไฟฟ้าได้ถึง 65 % ขณะเดียวกัน SEMS ช่วยลดพลังงานรวม 24 % โดยระบบปรับปรุงตัวประกอบกำลังไฟฟ้าลดการสูญเสียได้ 12 % และระบบควบคุมแสงสว่างลดได้ 25 % การประเมินทางเศรษฐศาสตร์พบว่า ระบบมีระยะเวลาคืนทุน 8 ปี อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) 14.2 % และลดค่าไฟฟ้าได้กว่า 65 % ส่วนด้านสิ่งแวดล้อม

สามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ 118.5 ตัน/ปี และรวม 2,962.5 ตันตลอดอายุโครงการ อย่างไรก็ตามควรเพิ่มเติมการวิเคราะห์เชิงคุณภาพด้าน Life Cycle Assessment (LCA) เช่น ผลกระทบจากการผลิตอุปกรณ์และการจัดการของเสีย จากแบตเตอรี่ รวมถึงระบุข้อจำกัดของการศึกษา เช่น ผลกระทบจากฤดูกาล และความไม่แน่นอนของต้นทุน นอกจากนี้ควรเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นในประเทศหรือภูมิภาค เพื่อแสดงบริบทท้องถิ่นและระดับความก้าวหน้า

References

- Bedi, A., Ramprabhakar, J., Anand, R. and Hameed, I.A. (2025). Empowering Net Zero Energy Grids: A Comprehensive Review of Virtual Power Plants, Challenges, Applications, and Blockchain Integration. *Discover Applied Sciences*, 7, <https://doi.org/10.1007/s42452-025-06691-1>
- Hanifi, H. (2024). *Concepts and Methods for Designing Net Zero Energy Buildings* [Unpublished Master's Thesis]. Islamic Azad University, Shahre Qods Branch.
- Hongvityakorn, B., Jaruwatupant, N., Khongphinitbunjong, K. and Aggarangsi, P. (2024). Achieving Nearly Zero-Energy Buildings through Renewable Energy Production-Storage Optimization: A Study Based on Monitoring Data from a Thai Office Building. *Energies*, 17(19), 4845. <https://doi.org/10.3390/en17194845>
- IES. (2023, 1 May). *IES Performance Digital Twin Finds Additional Energy Savings for Super-Efficient Green Mark Platinum Keppel Bay Tower*. IES. <https://www.iesve.com/discoveries/view/34254/keppel-bay-tower>
- Latief, Y., Berawi, M.A., Supriadi, L., Koesalamwardi, A.B., Petroceany, J. and Herzanita, A. (2017). Integration of Net Zero Energy Building with Smart Grid to Improve Regional Electrification Ratio Towards Sustainable Development. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 109(1), <https://doi.org/10.1088/1755-1315/109/1/012041>
- Mengesha, M.A., Mengesha, W.J. and Madessa, H.B. (2024). Recent Progress in Net-Zero-Energy Buildings in Tropical Climates: A Review of the Challenges and Opportunities. In: Kioumars, M., Shafei, B. (Eds.), *The 1st International Conference on Net-Zero Built Environment*. NTZR 2024. Lecture Notes in Civil Engineering, Vol 237. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-69626-8_84
- Noh, Y., Jafarinejad, S. and Anand, P. (2024). A Review on Harnessing Renewable Energy Synergies for Achieving Urban Net Zero Energy Buildings: Technologies, Performance Evaluation, Policies, Challenges, and Future Directions. *Sustainability*, 16(8), 3444. <https://doi.org/10.3390/su16083444>
- Pan, J., Jain, R., Paul, S., Vu, T., Saifullah, A. and Sha, M. (2015). An Internet of Things Framework for Smart Energy in Buildings: Designs, Prototype, and Experiments. *IEEE Internet of Things Journal*, 2(6), 527-537. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2015.2413397>
- Wang, Y., Hu, B., Meng, X. and Xiao, R. (2024). A Comprehensive Review on Technologies for Achieving Zero-Energy Building. *Sustainability*, 16(24), 10941. <https://doi.org/10.3390/su162410941>
- Wikipedia Contributors. (2011). *Pearl River Tower*. Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Pearl_River_Tower

การวัดค่าไดอิเล็กทริกของตัวกลางด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

The Measurement of Dielectric Properties of Medium Using Electromagnetic Waves

วัชรพล นาคทอง¹ ยศวดี คำสุกร¹ จุฑามณี เหลวภู¹ คมเดช ภาพัฒน์บุรี¹ สำราญ สันทาลุนัย² และ
นุชนาฏ สันทาลุนัย^{1*}

Watcharaphon Nakdong¹ Yossawadee Khasukorn¹ Chuthamani Leokun¹ Khomdet Phapatanaburi¹
Samran Santalunai² and Nuchanart Santalunai^{1*}

Received: October 15, 2024; Revised: June 17, 2025; Accepted: June 19, 2025

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนาระบบวัดค่าไดอิเล็กทริกของวัสดุในรูปแบบตัวกลางไดอิเล็กทริกทั้งหมด 4 รูปแบบ โดยระบบวัดค่าไดอิเล็กทริกของวัสดุแยกเป็นสององค์ประกอบหลัก ได้แก่ (1) ชุดเครื่องมือวัด ซึ่งใช้สายอากาศปากแตร ที่ความถี่ 2.1 GHz จำนวน 2 ตัว ร่วมกับเครื่องวิเคราะห์เวกเตอร์เครือข่าย (VNA) และ (2) ระบบประมวลผลสัญญาณด้วย MATLAB สำหรับคำนวณพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า ผลการทดสอบยืนยันว่าระบบสามารถประเมินค่าไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ (ϵ_r) ในช่วง 1.04 - 1.58 ด้วยความคลาดเคลื่อนไม่เกิน $\pm 2\%$ เมื่อเปรียบเทียบผลระหว่าง การวัดทดสอบด้วยระบบ วัดค่าไดอิเล็กทริกของวัสดุกับการจำลองแบบด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST Microwave Studio เมื่อเปรียบเทียบ ความแตกต่างของการวัดผลเชิงประสิทธิภาพของโครงสร้างวัสดุแบบอลูมิเนียมแท่งพบว่า การเพิ่มจำนวนชั้นของ วัสดุช่วยขยายแถบความถี่ส่งผ่านเป็น 1.65 - 2.50 GHz หรือมีแบนด์วิดท์เชิงเศษส่วนประมาณ 46 % ผลลัพธ์นี้ แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของแนวทางที่นำเสนอทั้งในการออกแบบอวัยวะและในการสร้างระบบวัดต้นทุนต่ำที่สามารถ ทดแทนอุปกรณ์วัดค่าไดอิเล็กทริกเชิงพาณิชย์ที่มีราคาสูงในปัจจุบันได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ : ค่าไดอิเล็กทริก; วัสดุ; สายอากาศ; คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

² สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

¹ Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Isan

² Institute of Engineering, Suranaree University of Technology

* Corresponding Author, Tel. 08 3124 3684, E - mail: nuchanart.fa@rmuti.ac.th

Abstract

This research presents the development of a dielectric measurement system for metamaterials, using four different configurations of dielectric media. The system has two main parts: (1) a measurement setup with two horn antennas that work at 2.1 GHz along with a vector network analyzer (VNA), and (2) a signal processing unit created in MATLAB to calculate electrical parameters. Test results confirm that the system can estimate the relative permittivity (ϵ_r) in the range of 1.04 - 1.58 with an error margin not exceeding ± 2 %, based on a comparison between measurements obtained from the proposed system and results from full-wave simulation using CST Microwave Studio. When comparing the performance of aluminum rod-based metamaterial structures, it was found that increasing the number of layers significantly expanded the transmission bandwidth to 1.65 - 2.50 GHz, corresponding to a fractional bandwidth of approximately 46 %. These are the results of the proposed approach in both the effective design of metamaterial structures and the development of a low-cost measurement system that serves as a practical alternative to expensive commercial dielectric measurement equipment.

Keywords: Dielectric; Metamaterials; Antenna; Electromagnetic Wave

บทนำ

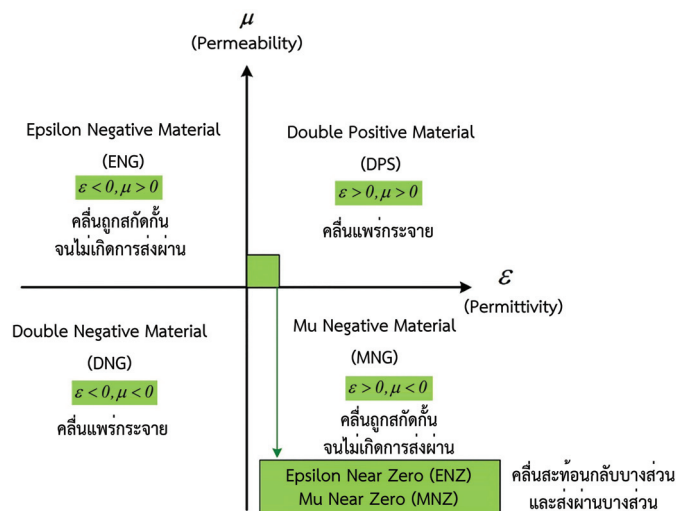
ในยุคที่การพัฒนาทรัพยากรมนุษย์มุ่งเน้นการสร้างบัณฑิตทักษะสูง นวัตกรรม และผู้ประกอบการ การเรียนรู้เชิงปฏิบัติ (Practice-Based Learning) ได้กลายเป็นหัวใจสำคัญของระบบการศึกษาและการวิจัยสมัยใหม่ โดยเฉพาะในสาขาวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ ซึ่งต้องอาศัยเครื่องมือที่สามารถเชื่อมโยงองค์ความรู้ทางทฤษฎีสู่การประยุกต์ใช้อย่างแท้จริง หนึ่งในเครื่องมือสำคัญคือ ระบบวัดสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุ โดยเฉพาะค่าไดอิเล็กทริก (ϵ_r) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์สำคัญในการออกแบบอุปกรณ์คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เช่น สายอากาศ ตัวกรอง หรือเซนเซอร์ (Chen et al., 2004; McRae et al., 2020) นอกจากนี้ในภาคการเกษตรและอุตสาหกรรมอาหาร ค่าไดอิเล็กทริกยังมีบทบาทในการตรวจวัดความสุก ความชื้น และคุณภาพของผลผลิต ซึ่งเป็นพื้นฐานสำคัญของการพัฒนาเทคโนโลยีเกษตรแม่นยำ (Precision Agriculture) (Teseme and Weldeselassie, 2020)

แม้การวัดค่าไดอิเล็กทริกจะมีบทบาทหลากหลายดังกล่าว แต่เครื่องมือวัดเชิงพาณิชย์ที่มีความแม่นยำสูง เช่น โพรเรโซแนนซ์ (Resonant Cavity) หัววัดปลายเปิดแบบโคแอกเซียล (Open-Ended Coaxial Probe) และอุปกรณ์ฟิกเจอร์แบบสายส่ง (Transmission Line Fixture) ยังคงมีราคาสูง ติดตั้งและใช้งานได้ยาก อีกทั้งจำกัดการใช้งานเฉพาะในห้องปฏิบัติการเท่านั้น (Šarolić and Matković, 2022; Rammah et al., 2015) นอกจากนี้เครื่องมือเหล่านี้ยังมีข้อจำกัดด้านขนาดและรูปร่างของตัวอย่าง รวมถึงช่วงความถี่ที่สามารถรองรับได้ จึงไม่เหมาะกับการวัดวัสดุที่มีโครงสร้างซับซ้อนหรือการใช้งานในสภาพแวดล้อมจริงภาคสนาม (Vergnano et al., 2020; Gregory and Clarke, 2005) นอกจากนี้ระบบวัดแบบเชิงพาณิชย์ยังต้องอาศัยกระบวนการปรับเทียบที่มีความซับซ้อน ใช้เวลานาน และต้องใช้ชุดมาตรฐานที่มีราคาสูง ทำให้ต้นทุนรวมในการดำเนินงานเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ด้วยเหตุนี้จึงเกิดความจำเป็นในการพัฒนาระบบวัดค่าไดอิเล็กทริกต้นทุนต่ำที่มีความยืดหยุ่นสูง เพื่อรองรับการใช้งานในด้านการเรียนการสอน งานวิจัย และการประยุกต์ในภาคอุตสาหกรรม

ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา อภิวัด ได้รับ ความสนใจอย่างแพร่หลายในหมู่นักวิจัยด้านวิศวกรรมไฟฟ้า อิเล็กทรอนิกส์ และโทรคมนาคม เนื่องจากสามารถออกแบบให้มีคุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ไม่ปรากฏในธรรมชาติ เช่น การมีค่าความยอมได้ทางไฟฟ้า (Permittivity) หรือสภาพให้ซึมผ่านได้ (Permeability) เป็นลบ หรือมีค่าต่ำใกล้ศูนย์ (Singh

et al., 2015; Fan et al., 2021) ดังรูปที่ 1 คุณสมบัติดังกล่าวนำไปสู่การพัฒนาอุปกรณ์ที่มีสมรรถนะสูง อาทิ เสาอากาศประสิทธิภาพสูง (Shahid Aziz et al., 2024) ตัวกรองความถี่เฉพาะ (Vineetha et al., 2023) รวมถึง อุปกรณ์ควบคุมคลื่นในระบบสื่อสารยุคใหม่ เช่น ระบบ 5G และอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Thakur et al., 2024; Cho et al., 2021) อย่างไรก็ตาม การออกแบบอภิวัดส์ที่มีความแม่นยำยังคงต้องอาศัยข้อมูลค่าความยอมทางไฟฟ้าของวัสดุจริงที่ถูกต้อง เพื่อใช้ยืนยันความถูกต้องของผลการจำลองแบบจำลองเชิงตัวแบบ และลดจำนวนรอบการออกแบบ ซึ่งยังเป็นข้อจำกัดสำคัญในงานวิจัยที่ผ่านมา (Cummer et al., 2008)

ในงานวิจัยฉบับนี้ผู้วิจัยนำเสนอการออกแบบและทดสอบโครงสร้างอภิวัดส์ที่ทำงานในย่านความถี่ 2.1 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งเป็นช่วงความถี่ที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในระบบสื่อสารไร้สายยุคปัจจุบัน เช่น LTE และ 5G ในช่วงความถี่ต่ำกว่า 6 กิกะเฮิรตซ์ (Li et al., 2020) การศึกษาประกอบด้วยทั้งการจำลองด้วยโปรแกรม CST Studio Suite และการทดลองจริง โดยใช้สายอากาศปากแตรจำนวนสองชุดร่วมกับเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย ในการวัดค่าการสะท้อนกลับ (S_{11}) และการส่งผ่าน (S_{21}) ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อวิเคราะห์สมบัติของอภิวัดส์ที่จัดวางเป็นตัวกลางระหว่างสายอากาศทั้งสอง ระบบการวัดนี้ทำงานร่วมกับชุดประมวลผลสัญญาณในโปรแกรม MATLAB เพื่อคำนวณพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า โดยเฉพาะค่าไดอิเล็กทริกของตัวกลาง ทั้งนี้สายอากาศปากแตรเป็นทางเลือกที่เหมาะสมสำหรับการสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความสม่ำเสมอและแม่นยำในย่านความถี่ไมโครเวฟ (Murthy, 2020) ผลจากการทดลองและการจำลองพบว่าโครงสร้างอภิวัดส์ที่พัฒนาขึ้นสามารถควบคุมพฤติกรรมของการสะท้อนและการส่งผ่านของคลื่นได้อย่างมีประสิทธิภาพ และแสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการประยุกต์ใช้ในระบบสื่อสารไร้สาย อุปกรณ์เรดาร์ และระบบตรวจจับความถี่สูงที่ต้องการความแม่นยำในระดับอุตสาหกรรม

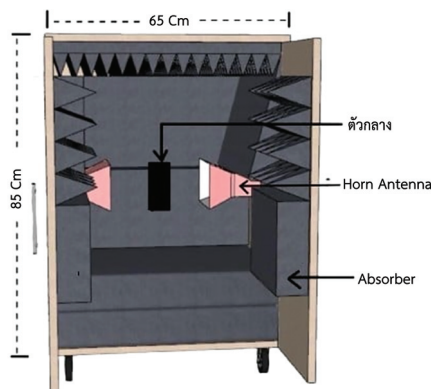


รูปที่ 1 การจำแนกประเภทของอภิวัดส์ (Santalunai et al., 2022)

การออกแบบและการวิเคราะห์ผล

1. โครงสร้างชุดทดสอบค่าไดอิเล็กทริกของวัสดุ

รูปที่ 2 แสดงโครงสร้างของชุดทดสอบสำหรับการวัดค่าไดอิเล็กทริกของอภิวัดส์ ซึ่งออกแบบมาเพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติทางไดอิเล็กทริกของวัสดุ องค์ประกอบหลักของชุดทดสอบประกอบด้วย 1) สายอากาศปากแตรสองตัวที่ทำหน้าที่ส่งและรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า 2) วัสดุอุดซับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง ที่ติดตั้งตามผนังและมุมต่าง ๆ ของตู้ทดสอบ เพื่อป้องกันการสะท้อนและการกระจายคลื่นอย่างไม่ต้องการ สายอากาศปากแตรทั้งสองตัวถูกจัดวางหันหน้าเข้าหากัน และ 3) อภิวัดส์ที่ต้องการทดสอบวางอยู่ตรงกลางระหว่างสายอากาศทั้งสองต้น ซึ่งการตั้งค่าของชุดทดสอบนี้จะถูกตั้งให้เหมือนกันทั้งในขั้นตอนการจำลองแบบด้วยโปรแกรมและการวัดทดสอบจริง



รูปที่ 2 ชุดทดสอบค่าไดอิเล็กทริกของตัวกลาง

1.1 ตัวแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความถี่ 2.1 GHz

สายอากาศปากแตรดังรูปที่ 3 เป็นอุปกรณ์ที่ถูกออกแบบมาเพื่อใช้งานในย่านความถี่สูง เช่น 2.1 GHz ซึ่งเป็นความถี่ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในระบบสื่อสารไร้สาย การออกแบบและการคำนวณขนาดของสายอากาศปากแตรจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง เพื่อให้การส่งและรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด โดยในการคำนวณค่าพารามิเตอร์สำคัญต่าง ๆ ของสายอากาศปากแตรที่ความถี่ 2.1 GHz สามารถทำได้ดังสมการที่ (1) - (2)

ความยาวคลื่น (Wavelength: λ) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1) (Balanis, 2016; Polzar, 2011)

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1)$$

โดยที่

λ	คือ	ความยาวคลื่น (m)
c	คือ	ความเร็วแสงในสุญญากาศ (m/s)
f	คือ	ความถี่ (MHz)



รูปที่ 3 สายอากาศปากแตรที่ความถี่ 2.1 GHz

สำหรับความถี่ 2.1 GHz ความยาวคลื่นคำนวณได้เท่ากับ 0.143 เมตร หรือ 143 มิลลิเมตร ขนาดปากแตร (Horn Dimension) ขนาดของปากแตรสามารถคำนวณได้จากสมการที่ใช้ความยาวคลื่นและมุมการแผ่รังสี (Beamwidth) โดยสมการที่ (2) (Balanis, 2016)

$$D = \frac{k\lambda}{\sin(\theta/2)} \quad (2)$$

โดยที่

D	คือ	ขนาดของปากแตร (เมตร)
k	คือ	ค่าคงที่ (ขึ้นอยู่กับรูปทรงของปากแตร สำหรับปากแตรรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า $k \approx 0.51$)
θ	คือ	ความกว้างลำคลื่น (องศา)

เมื่อกำหนดให้ความกว้างลำคลื่นมีค่าเท่ากับ 15 องศา สามารถคำนวณขนาดของสายอากาศปากแตรได้จากสมการที่ (2) คือ

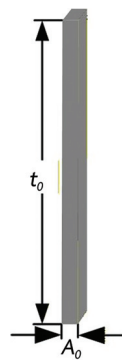
$$D = \frac{0.51 \times 0.143}{\sin(15/2)}$$

$$D \approx \frac{0.07293}{0.1305} \approx 0.56 \text{ เมตร}$$

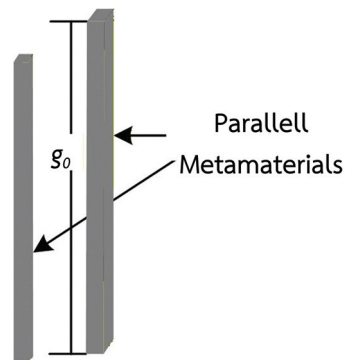
ความกว้างลำคลื่น 15 องศา คำนวณขนาดของสายอากาศปากแตรได้เท่ากับ 0.56 เมตร หรือ 560 มิลลิเมตร

1.2 ตัวกลางแบบแท่งอลูมิเนียมที่มีความถี่ 2.1 GHz

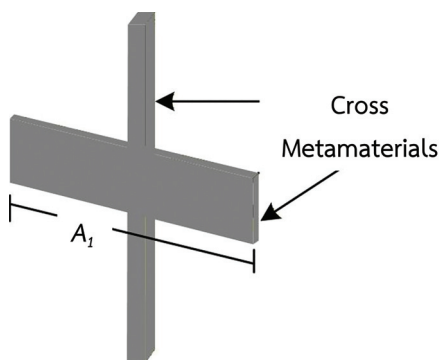
โครงสร้างหนึ่งหน่วยของอวัยวะที่ทำจากแท่งอลูมิเนียมดังรูปที่ 4 โดยประกอบด้วยหลายองค์ประกอบที่ช่วยในการตอบสนองต่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ เริ่มจากรูปที่ 4(ก) ซึ่งแสดงโครงสร้างพื้นฐานของอวัยวะที่เป็นแท่งอลูมิเนียม 1 ชั้น รูปที่ 4(ข) แสดงการจัดเรียงแผงอวัยวะแบบขนาน โดยที่แผ่นอวัยวะสองแผ่นถูกจัดเรียงในแนวตั้งและขนานกัน รูปที่ 4(ค) แสดงการจัดเรียงแผงอวัยวะแบบไขว้ ซึ่งแผงทั้งสองจะวางในแนวตั้งและแนวนอนเพื่อสร้างโครงสร้างที่สามารถตอบสนองต่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในหลายมิติหรือหลายโพลาไรซ์ รูปที่ 4(ง) แสดงแท่งอลูมิเนียมวางแบบไขว้กันแต่ประกอบไปด้วยการวางเรียงกันทั้งหมด 3 ชั้น จากโครงสร้างทั้งหมดรายละเอียดขนาดของโครงสร้างอวัยวะแบบแท่งอลูมิเนียมซึ่งถูกใช้ในการศึกษานี้ ดังตารางที่ 1 ขนาดของอวัยวะประกอบด้วยพารามิเตอร์สำคัญหลายค่า ได้แก่ A_0 และ A_1 ซึ่งเป็นความกว้างของแท่งอลูมิเนียมในแต่ละชั้น ขนาดของ g_0 คือความสูงของโครงสร้าง รวมถึง t_0 ซึ่งแสดงถึงความยาวของอวัยวะ ขนาดทั้งหมดนี้มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร และถูกคำนวณมาเพื่อให้สามารถตอบสนองต่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความถี่ 2.1 GHz ได้อย่างมีประสิทธิภาพ



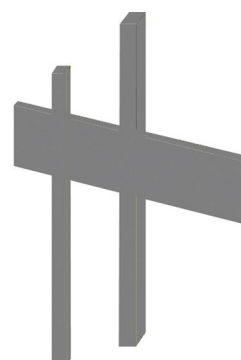
(ก) 1 ชั้น



(ข) 2 ชั้นแบบขนาน



(ค) 2 ชั้นแบบไขว้



(ง) 3 ชั้น

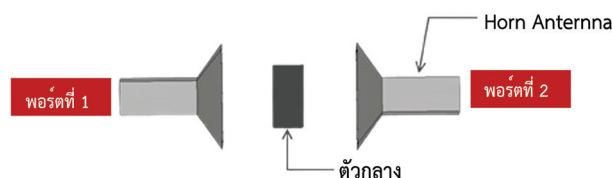
รูปที่ 4 โครงสร้างหนึ่งหน่วยของอวัยวะแบบแท่งอลูมิเนียม

ตารางที่ 1 ขนาดของโครงสร้าง

อภิวัดแบบแท่งอลูมิเนียม	ขนาด (มิลลิเมตร)
A_0 : ความกว้าง	3.85
A_1 : ความกว้าง	15.47
g_0 : ความสูง	2.38
t_0 : ความยาว	140

2. การจำลองแบบชุดวัดค่าไดอิเล็กทริกด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป

งานวิจัยนี้ได้ทำการจำลองการรับและส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านสายอากาศปากแตรที่ย่านความถี่ 2.1 GHz เพื่อวิเคราะห์ค่า S-parameter โดยแบ่งการจำลองออกเป็น 2 กรณี ได้แก่ กรณีแรกคือการจำลองแบบที่ไม่มีการใช้อภิวัด และกรณีที่สองคือการวางอภิวัดไว้ที่ตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างสายอากาศทั้งสองต้น ดังรูปที่ 5 นอกจากนี้ในกรณีที่มีการใช้อภิวัดโครงสร้างของอภิวัดถูกแบ่งออกเป็น 4 รูปแบบ



รูปที่ 5 โครงสร้างการจำลองแบบเพื่อหาค่าไดอิเล็กทริก

2.1 การหาค่าไดอิเล็กทริกกรณีปราศจากตัวกลางหรือตัวกลางคืออากาศว่าง

รูปที่ 6(ก) แสดงค่าพารามิเตอร์ $|S_{11}|$ และ $|S_{21}|$ กรณีไม่ได้วางอภิวัดหรือตัวกลางเป็นอากาศว่าง ซึ่งเป็นการแสดงถึงค่าขนาดของการสะท้อนกลับและการส่งผ่านของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านตัวกลางในช่วงความถี่ 1 - 4 GHz และรูปที่ 6(ข) แสดงค่าเฟสของการสะท้อนกลับและการส่งผ่าน ซึ่งสามารถนำมาคำนวณค่าความยอมทางไฟฟ้า ดังสมการที่ (3) (Baker-Jarvis et al., 1992; Nicolson and Ross, 1970)

$$\epsilon_r = \frac{2(1 - v_I)}{jk_0 d(1 + v_I)} \quad (3)$$

โดยที่ $v_I = S_{2I} + S_{1I}, k_0 = \omega / c$

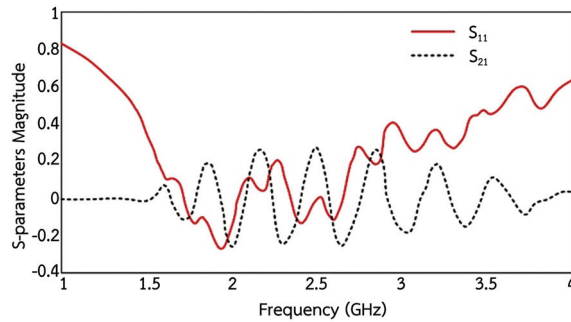
ω คือ ความถี่เชิงมุม
 d คือ ความหนาของไดอิเล็กทริก
 c คือ ความเร็วแสง

กรณีตัวกลางคืออากาศว่าง จากรูปที่ 6(ค) แสดงค่า ϵ_r ของอากาศว่าง โดยแสดงการเปลี่ยนแปลงในช่วงความถี่ตั้งแต่ 1 - 4 GHz โดยค่า ϵ_r มีค่าเท่ากับ 1.2491 ที่ความถี่ 2.1 GHz ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับ 1 ซึ่งเป็นค่า ϵ_r ของอากาศว่าง

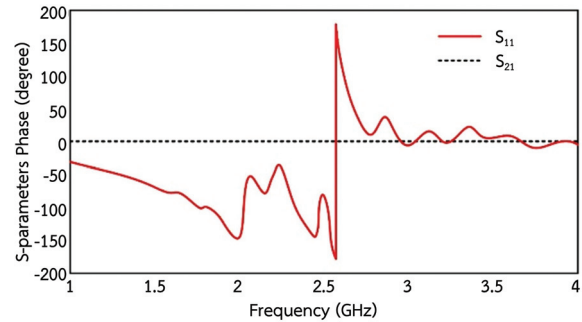
ในกรณีที่มีตัวกลางอื่นเข้ามาแทนที่อากาศว่าง ค่า ϵ_r ของวัสดุอาจเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งสามารถนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงในการสะท้อนและการส่งผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังนั้นในหัวข้อ 2.2 การหาค่าไดอิเล็กทริกในกรณีมีตัวกลาง จะเป็นการศึกษาถึงผลของตัวกลางต่าง ๆ ที่มีผลต่อค่าพารามิเตอร์ไดอิเล็กทริกและคุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าของวัสดุ

2.2 การหาค่าไดอิเล็กทริกกรณีมีตัวกลาง

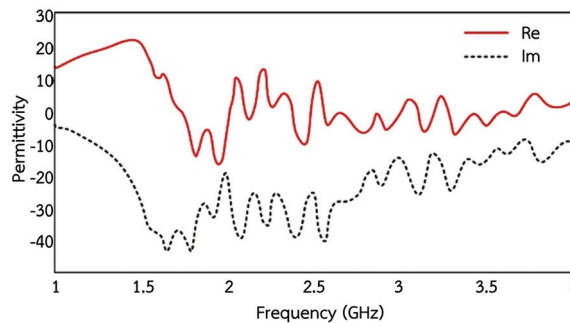
ในหัวข้อนี้ได้ศึกษาค่าความยอมทางไฟฟ้าของวัสดุที่มีตัวกลาง โดยในงานวิจัยได้ทำการจำลองด้วยวัสดุตัวกลางหลายรูปแบบ ได้แก่ แท่งอลูมิเนียมชั้นเดียว แท่งอลูมิเนียมสองชั้นในลักษณะการวางขนานและแบบไขว้ และโครงสร้างแท่งอลูมิเนียมสามชั้นที่จัดเรียงแบบไขว้กัน



(ก) ขนาดของ S-parameter



(ข) เฟสของ S-parameter

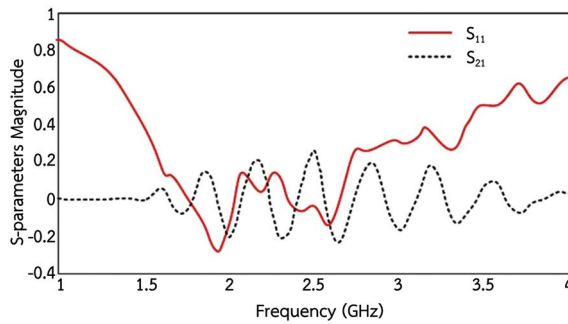


(ค) ค่าความยอมทางไฟฟ้า

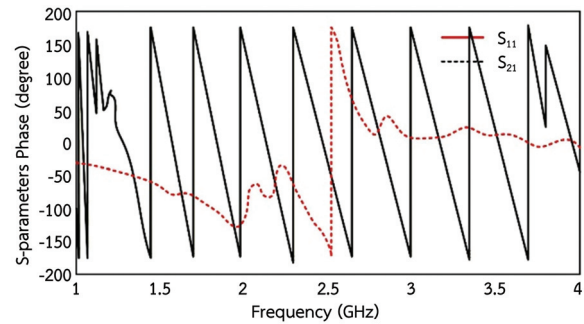
รูปที่ 6 ผลการจำลองกรณีปราศจากอภิวัด

2.2.1 แท่งอลูมิเนียมแบบ 1 ชั้น เมื่อทำการเพิ่มตัวกลางแบบแท่งอลูมิเนียม 1 ชั้น ที่บริเวณตรงกลางระหว่างสายอากาศจากรูปที่ 7(ก) และ (ข) แสดงให้เห็นว่าค่า S_{11} มีค่าประมาณ 0.34 ที่ความถี่ 2.1 GHz ซึ่งบ่งบอกถึงการสะท้อนในระดับปานกลาง ขณะที่ S_{21} มีแนวโน้มลดลงอย่างมากในความถี่ต่ำกว่า 2.1 GHz แต่เพิ่มขึ้นในความถี่ที่สูงกว่า 2.1 GHz สะท้อนถึงการส่งผ่านที่เพิ่มขึ้นเมื่อความถี่สูงขึ้น นอกจากนี้ค่าเฟสของ S_{11} มีการเปลี่ยนแปลงชัดเจนที่ประมาณ 80 องศา ซึ่งบ่งบอกถึงการสะท้อนที่มีเฟสสวิงขึ้นลง ส่วน S_{21} มีการเปลี่ยนแปลงเฟสในลักษณะคล้ายกัน แสดงถึงความซับซ้อนของการส่งผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านตัวกลาง เมื่อนำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่า ในกรณีนี้พบว่าแท่งอะลูมิเนียมถูกจัดอยู่ในตัวกลางที่มีทั้งค่าความยอมทางไฟฟ้าและค่าความยอมทางแม่เหล็กที่มากกว่าสุญญากาศ ($\epsilon_r > 0$) ดังรูปที่ 7(ค)

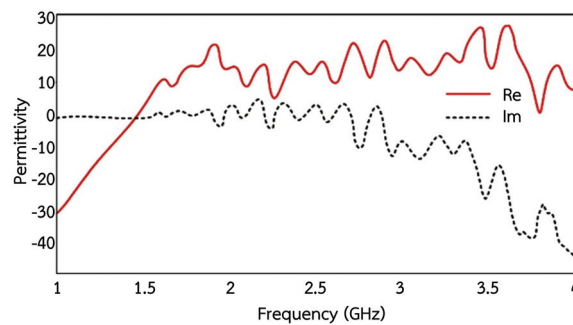
ดังนั้น เมื่อการแพร่กระจายของคลื่นกระทบกับผิวระนาบที่แยกตัวกลางสองชนิด คลื่นจะเกิดการหักเหเมื่อเข้าสู่ตัวกลางที่สอง หากคลื่นที่กระทบมีมุมเฉียดกับผิวระนาบ มุมตกกระทบจะสัมพันธ์กับมุมหักเหตามความสัมพันธ์ง่าย ๆ ที่รู้จักกันในชื่อกฎของสเนลล์ (Snell's Law)



(ก) ขนาดของ S-parameter



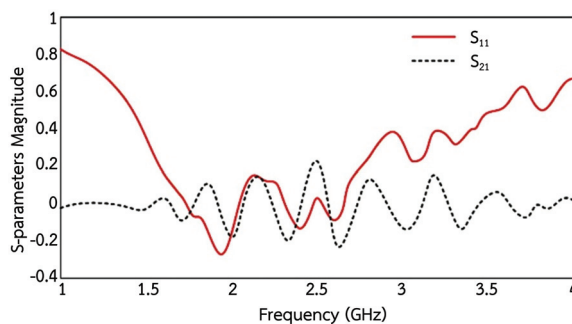
(ข) เฟสของ S-parameter



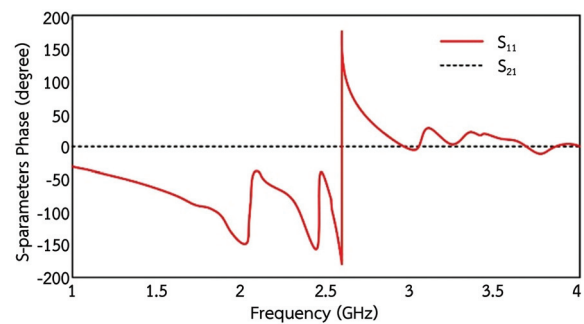
(ค) ค่าความยอมทางไฟฟ้า

รูปที่ 7 ผลการจำลองกรณีวัสดุหนึ่งชั้น

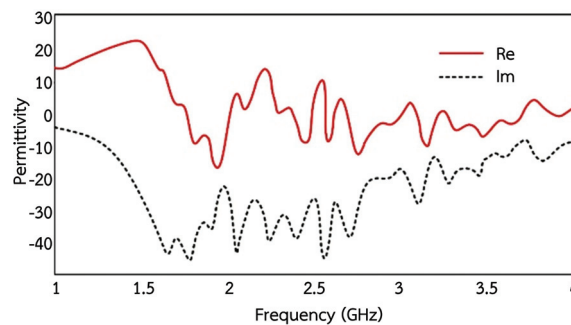
2.2.2 แท่งอลูมิเนียมแบบขนาน 2 ชั้น รูปที่ 8(ก) และ (ข) แสดงขนาดของพารามิเตอร์ S_{11} และ S_{21} ในช่วงความถี่ที่ 2.1 GHz ในกรณีตัวกลางมีลักษณะเป็นแท่งอลูมิเนียมสองชั้นวางขนานกัน พบว่าช่วงความถี่แบนด์วิดท์ที่มีความแคบ และผลการคำนวณค่า ϵ_r ที่ 2.1 GHz มีค่าเท่ากับ 1.57881 ดังรูปที่ 8(ค)



(ก) ขนาดของ S-parameter



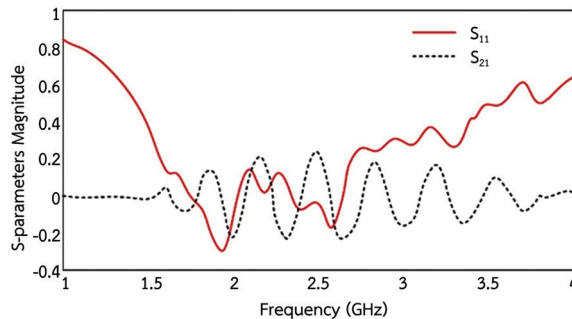
(ข) เฟสของ S-parameter



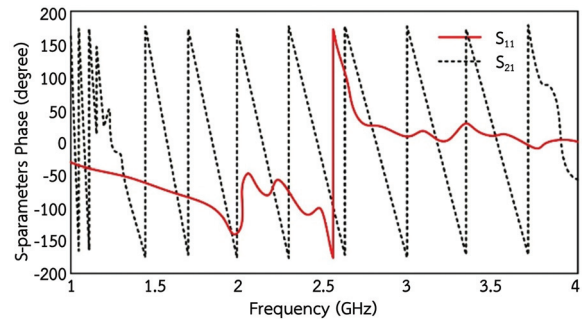
(ค) ค่าความยอมทางไฟฟ้า

รูปที่ 8 ผลการจำลองตัวกลางแท่งอลูมิเนียมแบบขนาน 2 ชั้น

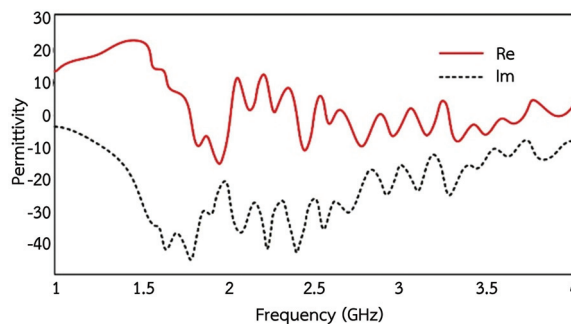
2.2.3 แท่งอลูมิเนียมแบบไขว้ 2 ชั้น รูปที่ 9(ก) และ (ข) แสดงขนาดและเฟสของพารามิเตอร์ S_{11} และ S_{21} ในช่วงความถี่ที่ 2.1 GHz การเปลี่ยนแปลงของค่าเหล่านี้ในช่วงความถี่ที่ 2.1 GHz ผลของค่า ϵ_r ที่คำนวณได้เท่ากับ 1.76824 ดังรูปที่ 9(ค)



(ก) ขนาดของ S-parameter



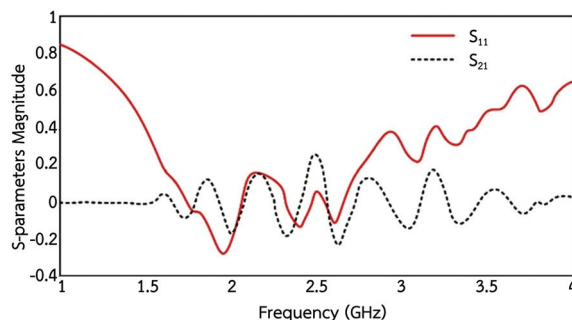
(ข) เฟสของ S-parameter



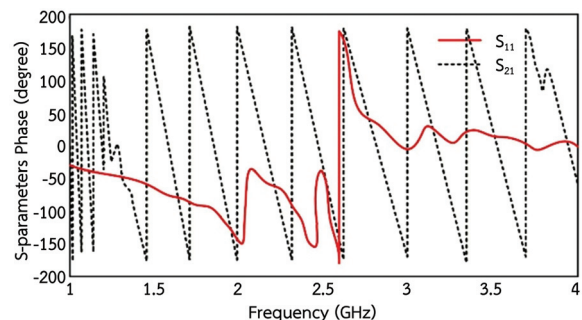
(ค) ค่าความยอมทางไฟฟ้า

รูปที่ 9 ผลการจำลองตัวกลางแท่งอลูมิเนียมแบบไขว้ 2 ชั้น

2.2.4 แท่งอลูมิเนียมไขว้แบบ 3 ชั้น โครงสร้างแท่งอลูมิเนียมไขว้แบบ 3 ชั้น สามารถแสดงขนาดและเฟสของพารามิเตอร์ S_{11} และ S_{21} ในช่วงความถี่ที่ 2.1 GHz ดังรูปที่ 10(ก) และ (ข) รูปที่ 10(ค) แสดงค่าความยอมทางไฟฟ้าของตัวกลางได้ผลเท่ากับ 1.56702

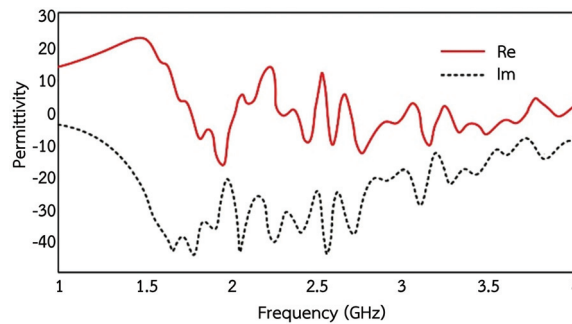


(ก) ขนาดของ S-parameter



(ข) เฟสของ S-parameter

รูปที่ 10 ผลการจำลองตัวกลางแท่งอลูมิเนียมไขว้แบบ 3 ชั้น



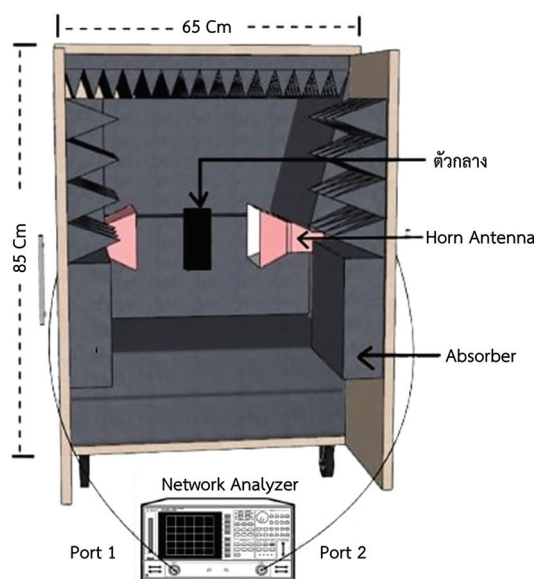
(ค) ค่าความยอมทางไฟฟ้า

รูปที่ 10 ผลการจำลองตัวกลางแท่งอลูมิเนียมไขว้แบบ 3 ชั้น (ต่อ)

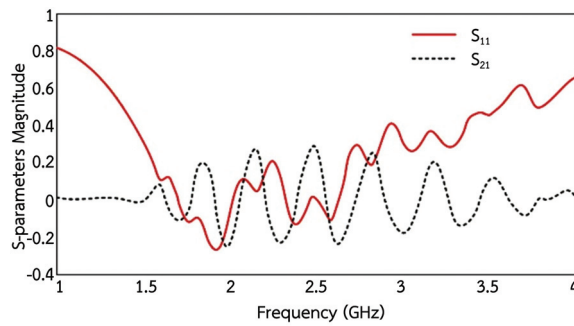
3. การวัดทดสอบจริง

ชุดวัดค่าไดอิเล็กทริกของอภิวัด ดังรูปที่ 11 ที่ใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ 2.1 GHz ทำการส่งและรับคลื่นผ่านสายอากาศปากแตร โดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) เป็นตัวกำเนิดคลื่นภายใต้สภาวะแวดล้อมที่ป้องกันการรบกวนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า การทดสอบนี้จัดทำขึ้นเพื่อแสดงให้เห็นว่าวัสดุที่ใช้ในการทดลองมีคุณสมบัติตรงตามสมมติฐานที่กำหนดไว้

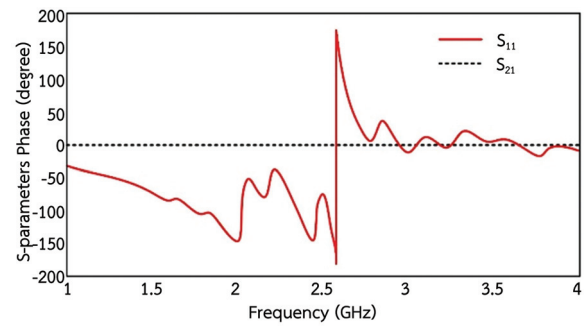
จากการทดสอบค่า S-parameter ของอภิวัด (Metamaterial) ในกรณีต่าง ๆ ดังในรูปที่ 12 - 16 ทั้งแบบไม่มีอภิวัดและกรณีที่มีอภิวัดชั้นเดียว สองชั้น และสามชั้น ผลการทดสอบแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของค่าการสะท้อนกลับ (S_{11}) และการส่งผ่าน (S_{21}) ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านความถี่ 2.1 GHz การเปลี่ยนแปลงในแต่ละกรณีแสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่แตกต่างกันของวัสดุ โดยค่า ϵ_r ในแต่ละกรณีมีความสำคัญในการวิเคราะห์พฤติกรรมของวัสดุ เมื่อไม่มีอภิวัด ค่า ϵ_r มีค่าเท่ากับ 1.24091 ซึ่งสอดคล้องกับวัสดุที่ไม่มีการดัดแปลง ในกรณีที่มีอภิวัดแบบชั้นเดียว พบว่าค่า ϵ_r เป็น 1.11289 ซึ่งบ่งชี้ถึงพฤติกรรมที่ซับซ้อนและการสะท้อนคลื่นบางส่วน สำหรับกรณีที่มีอภิวัดสองชั้นแบบขนาน ค่า ϵ_r มีค่าเป็นบวกที่ 1.57881 และ 1.04381 ซึ่งบ่งบอกถึงการส่งผ่านที่ดีขึ้น ในกรณีที่มีอภิวัดสามชั้น ค่า ϵ_r อยู่ที่ 1.56702 แสดงให้เห็นถึงความสามารถของวัสดุในการควบคุมการส่งผ่านและการสะท้อนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผลการคำนวณค่า ϵ_r ทั้งในกรณีจำลองแบบและวัดจริง ดังตารางที่ 2



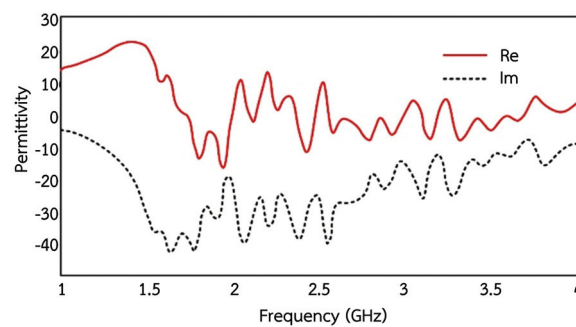
รูปที่ 11 ชุดวัดค่าไดอิเล็กทริกของอภิวัด



(ก) ขนาดของ S-parameter

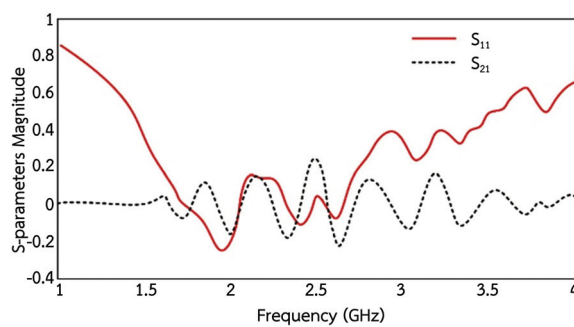


(ข) เฟสของ S-parameter

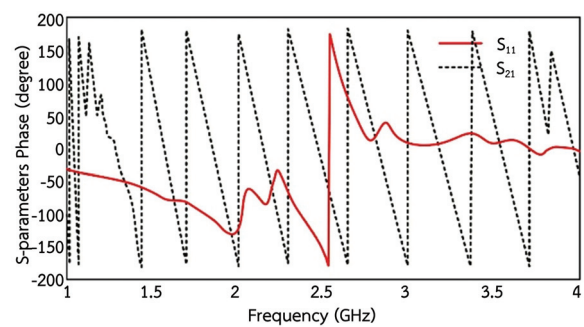


(ค) ค่าความยอมทางไฟฟ้า

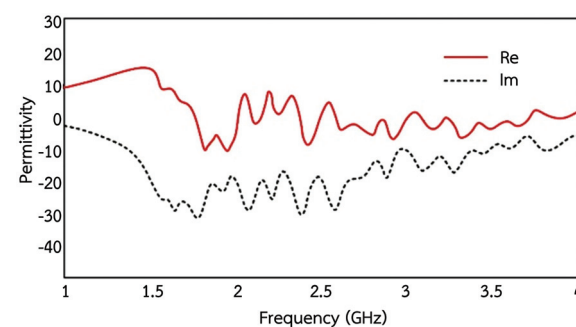
รูปที่ 12 ผลการวัดกรณีปราศจากอิวิสต์



(ก) ขนาดของ S-parameter

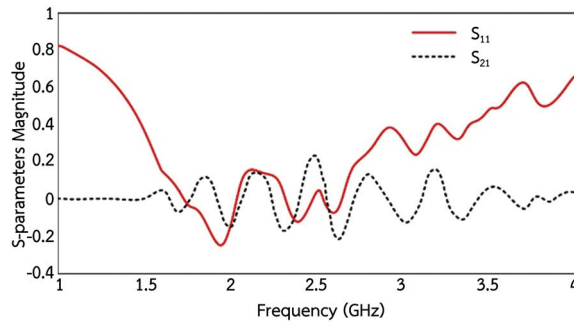


(ข) เฟสของ S-parameter

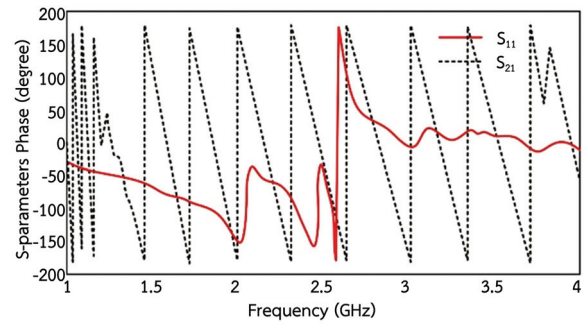


(ค) ค่าความยอมทางไฟฟ้า

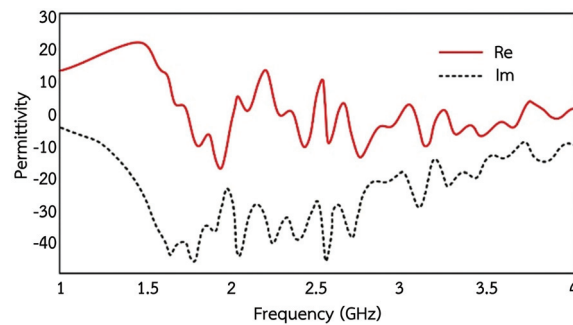
รูปที่ 13 ผลการวัดกรณีอิวิสต์แบบหนึ่งชั้น



(ก) ขนาดของ S-parameter

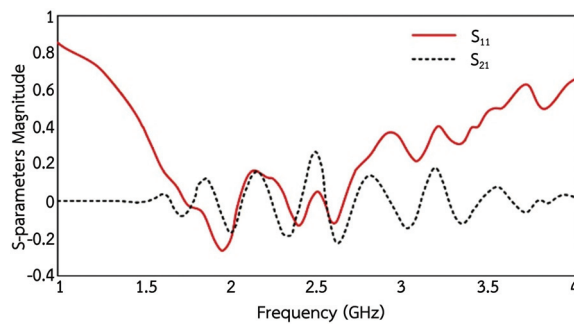


(ข) เฟสของ S-parameter

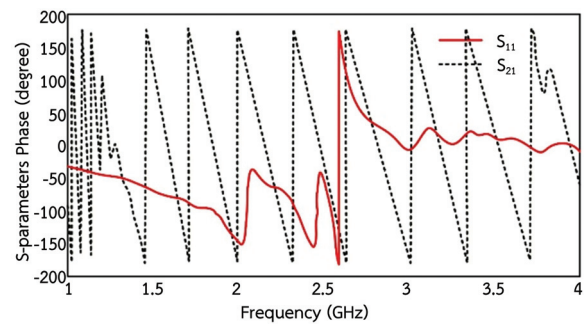


(ค) ค่าความยอมทางไฟฟ้า

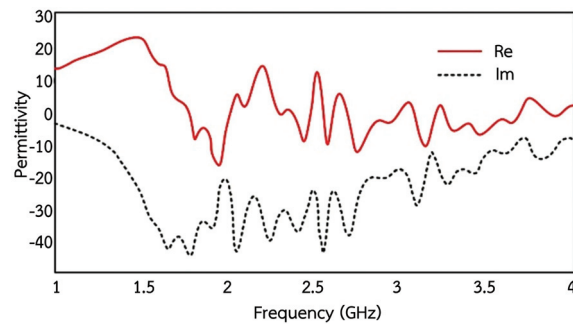
รูปที่ 14 ผลการวัดกรณีวัสดุขุ่นแบบสองชั้น



(ก) ขนาดของ S-parameter

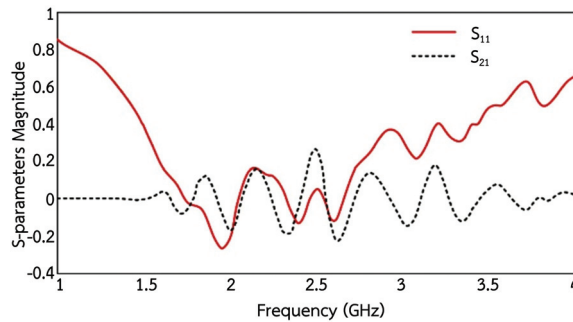


(ข) เฟสของ S-parameter

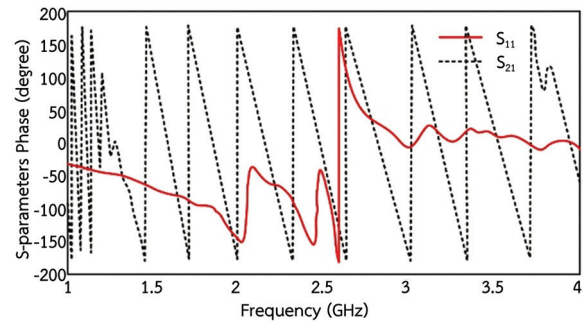


(ค) ค่าความยอมทางไฟฟ้า

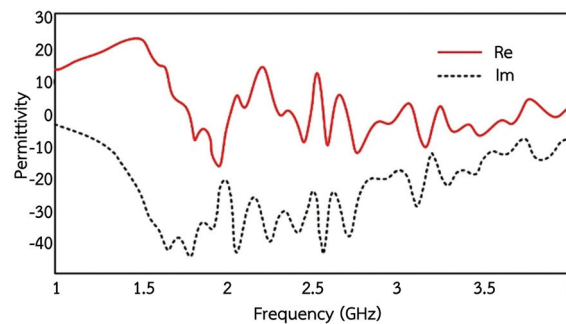
รูปที่ 15 ผลการวัดกรณีวัสดุแบบไขว้สองชั้น



(ก) ขนาดของ S-parameter



(ข) เฟสของ S-parameter



(ค) ค่าความยอมทางไฟฟ้า

รูปที่ 16 ผลการวัดกรณีวัสดุแบบไขว้สามชั้น

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบค่าไดอิเล็กทริกจากการจำลองและการทดลองจริง

โครงสร้างอภิวัด	ϵ_r จากการจำลอง (Simulation)	ϵ_r จากการทดลอง (Measured)	ค่าความคลาดเคลื่อน (%)
ชั้นเดียว (Single Layer)	1.10	1.11	0.91 %
สองชั้นขนาน (2-Layer Parallel)	1.60	1.58	1.25 %
สองชั้นไขว้ (2-Layer Crossed)	1.05	1.04	0.95 %
สามชั้นไขว้ (3-Layer Crossed)	1.60	1.57	1.88 %

การอภิปรายผล

ผลการจำลองโครงสร้างแท่งโลหะชั้นเดียวแสดงให้เห็นว่า โครงสร้างดังกล่าวสามารถสะท้อนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้บางส่วน แต่มีช่วงความกว้างของแถบความถี่ที่ค่อนข้างแคบเมื่อเทียบกับโครงสร้างที่มีจำนวนชั้นมากขึ้น โดยพฤติกรรม การสะท้อนและการส่งผ่านคลื่นที่เกิดขึ้นสะท้อนถึงคุณลักษณะของอภิวัดที่สามารถควบคุมการกระจายตัวของคลื่นได้ในระดับหนึ่ง ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีการสะท้อนในวัสดุที่มีความยอมทางไฟฟ้าเป็นบวก ลักษณะดังกล่าว ทำให้โครงสร้างชั้นเดียวเหมาะสำหรับการควบคุมคลื่นในย่านความถี่เฉพาะจุด เมื่อเพิ่มจำนวนชั้นเป็นสองชั้น ในลักษณะการจัดเรียงแบบขนาน ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าแถบความถี่มีความกว้างขึ้น และความสามารถในการ ควบคุมพฤติกรรมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าก็ดีขึ้น โดยสามารถลดการสะท้อนและเพิ่มการส่งผ่านในย่านความถี่ที่หลากหลาย ซึ่งผลลัพธ์นี้สอดคล้องกับกฎของสเนลล์ที่กล่าวถึงความสัมพันธ์ของมุมตกกระทบและมุมหักเหเมื่อคลื่นเคลื่อนผ่าน วัสดุสองชนิดที่มีความยอมทางไฟฟ้าต่างกัน สำหรับกรณีที่เพิ่มจำนวนชั้นเป็นสามชั้น ผลการจำลองพบว่าแถบความถี่ ที่สามารถใช้งานได้ขยายจาก 1.65 - 2.5 GHz และโครงสร้างมีความสามารถในการสะท้อนและส่งผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น อีกทั้งยังพบว่าค่าการสะท้อนกลับในเชิงเฟส มีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน

แสดงถึงประสิทธิภาพในการควบคุมคลื่นได้สูงสุด ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะของโครงสร้างที่มีคุณสมบัติเป็นแถบหยุดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Band Gap) ที่สามารถห้ามการแพร่กระจายของคลื่นในบางย่านความถี่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เมื่อเปรียบเทียบผลการจำลองกับการวัดจริง ผลการทดลองและการจำลองแบบแสดงให้เห็นว่ามีความสอดคล้องกัน เมื่อพิจารณาค่าไดอิเล็กทริกที่ได้จากการวัดจริงเทียบกับผลจากการจำลอง พบว่าความคลาดเคลื่อน มีค่าน้อยมาก โดยอยู่ในช่วง 0.91 - 1.88 % ดังตารางที่ 2 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความน่าเชื่อถือของระบบวัดที่พัฒนาและยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองเชิงคอมพิวเตอร์ ทั้งนี้โครงสร้างสองชั้นและสามชั้น มีความแม่นยำในการควบคุมคลื่นและพฤติกรรมทางแม่เหล็กไฟฟ้าสอดคล้องกับค่าความยอมทางไฟฟ้าที่ได้จากการจำลองอย่างชัดเจน ส่งผลให้ระบบที่นำเสนอสามารถประยุกต์ใช้ในการออกแบบอวัยวะหรือตัวกรองความถี่ ได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีความแม่นยำตรงในระดับที่สามารถรองรับการใช้งานจริงในระดับอุตสาหกรรมได้

เพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ ได้มีการเปรียบเทียบกับเทคนิคมาตรฐานที่นิยมใช้ในห้องปฏิบัติการดังตารางที่ 3 ได้แก่ วิธีห้วัดแบบโคเอกเซียล และเทคนิคเรโซแนนซ์เควิตี้ จากการเปรียบเทียบพบว่า แม้ความแม่นยำของระบบที่พัฒนาขึ้นจะน้อยกว่าวิธีเรโซแนนซ์เควิตี้เพียงเล็กน้อย แต่มีข้อได้เปรียบชัดเจนในด้านต้นทุนต่ำ รองรับตัวอย่างได้หลากหลายขนาดและรูปทรง และสามารถใช้งานในสภาพแวดล้อมภาคสนามได้สะดวก จึงเหมาะสมสำหรับใช้ในงานวิจัย การเรียนการสอน และการประเมินวัสดุที่มีโครงสร้างซับซ้อน เช่น อวัยวะชนิดแท่งโลหะที่ใช้ในงานนี้ ในด้านความปลอดภัย ระบบใช้คลื่นความถี่ต่ำที่ระดับ 2.1 กิกะเฮิรตซ์ และเป็นระบบวัดแบบไม่ใช้กำลังส่ง จึงอยู่ในขอบเขตที่ไม่เป็นอันตรายต่อผู้ใช้งานตามมาตรฐานความปลอดภัยที่กำหนด อย่างไรก็ตาม ควรพิจารณาออกแบบฉนวนป้องกันคลื่น หรือกำหนดระยะห่างในการวัดให้เหมาะสมในกรณีที่ใช้งานกับวัสดุที่มีคุณสมบัติดูดกลืนคลื่นได้สูง

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบลักษณะระบบวัดไดอิเล็กทริกในงานวิจัยนี้กับวิธีมาตรฐานก่อนหน้า

รายการเปรียบเทียบ	งานวิจัยนี้	มาตรฐานก่อนหน้า (Keysight Technologies, 2019)	ระบบระดับสูงมาก (Levine et al., 2022)
ความแม่นยำในการวัด	±2 %	±0.5 %	±0.2 %
ต้นทุนอุปกรณ์	ต่ำ	สูงมาก	ต่ำ
ความสะดวกในการใช้งาน	สูง	ปานกลาง	ต่ำ
การนำไปประยุกต์กับ MTMs	ทำได้โดยตรงจากพฤติกรรมคลื่น	ไม่เหมาะสมกับคลื่นที่มีมุมเฉียง	เหมาะสมกับคลื่นแนวตรงอย่างเดียว
ความเสี่ยงต่อผู้ใช้งาน	ต่ำ	ต่ำ	ต่ำ

สรุปและวิจารณ์

งานวิจัยนี้นำเสนอการจำลองและการออกแบบระบบการวัดค่าไดอิเล็กทริกของโครงสร้างอวัยวะที่ทำจากแท่งอลูมิเนียมในหลายรูปแบบ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการส่งผ่านและสะท้อนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านความถี่ 2.1 GHz ผลการจำลองและการวัดจริงแสดงผลที่สอดคล้องกัน โดยในโครงสร้างแท่งอลูมิเนียมชั้นเดียวสามารถสะท้อนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้บางส่วนแต่มีแถบความถี่ค่อนข้างแคบ เมื่อเพิ่มจำนวนชั้น การสะท้อนและส่งผ่านคลื่นมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน โดยเฉพาะโครงสร้างแท่งสองชั้นและสามชั้นที่ช่วยขยายแถบความถี่และควบคุมการส่งผ่านคลื่นได้ดียิ่งขึ้น ค่า S-parameter (S_{11} และ S_{21}) และ Permittivity ที่ได้จากการทดลองจริงสามารถยืนยันผลการจำลอง ที่ระบุว่าโครงสร้างอวัยวะมีความสามารถในการควบคุมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ

งานวิจัยนี้มีความสำคัญในการพัฒนาโครงสร้างอภิวัดเพื่อประยุกต์ใช้ในระบบสื่อสารไร้สาย โดยเฉพาะการพัฒนาสายอากาศที่มีความสามารถในการควบคุมคลื่นและทิศทางได้อย่างแม่นยำ การใช้สายอากาศปากแตรในการทดสอบส่งผลให้ได้ค่าที่มีความแม่นยำและสอดคล้องกับการจำลอง อย่างไรก็ตาม การพัฒนาเพิ่มเติมอาจพิจารณาเพิ่มรูปแบบการจัดเรียงของแท่งอลูมิเนียมให้หลากหลายมากขึ้นเพื่อให้ได้ข้อมูลที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในความถี่ที่กว้างขึ้น ซึ่งจะช่วยให้สามารถออกแบบวัสดุที่ตอบสนองต่อความต้องการในอุตสาหกรรมสื่อสารได้ดียิ่งขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้จัดทำวิจัยเล็งเห็นขอขอบคุณคุณอาจารย์ สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคมและนวัตกรรมดิจิทัล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา อันเนื่องมาจากวิชาความรู้ต่าง ๆ ที่ผู้จัดทำได้ทำการศึกษาและจากการทบทวนวรรณกรรมต่าง ๆ และได้ความรู้จากคณะอาจารย์ ที่ได้ให้คำแนะนำในด้านเทคนิคการสร้างสายอากาศ การใช้โปรแกรมออกแบบสายอากาศ รวมถึงการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น และช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ จนทำให้การจัดทำวิจัยเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และงานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนโปรแกรม CST Microwave Studio 2024 จากสาขาวิศวกรรมโทรคมนาคมและนวัตกรรมดิจิทัล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

References

- Baker-Jarvis, J.R., Janezic, M.D., Grosvenor, J.H and Geyer, R.G. (1992). *Transmission/Reflection and Short-Circuit Line Methods for Measuring Permittivity and Permeability*. National Institute of Standards and Technology Technical Note 1355.
- Balanis, C.A. (2016). *Antenna Theory: Analysis and Design* (4thed). Wiley.
- Chen, L.F., Ong, C.K., Neo, C.P., Varadan, V.V. and Varadan, V.K. (2004). *Microwave Electronics: Measurement and Materials Characterization*. John Wiley & Sons Ltd., Chichester. <http://dx.doi.org/10.1002/0470020466>
- Cho, K.W., Mazaheri, M.H., Gummesson, J., Abari, O. and Jamieson, K. (2021). mmWall: A Reconfigurable Metamaterial Surface for mmWave Networks. *Proceedings of the 22nd International Workshop on Mobile Computing Systems and Applications*, 119-125. <https://doi.org/10.1145/3446382.3448665>
- Cummer, S.A., Popa, B.-I. and Hand, T.H. (2008). Q-based Design Equations and Loss Limits for Resonant Metamaterials. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 56(1), 127-132. <https://doi.org/10.1109/TAP.2007.912959>
- Fan, G., Sun, K., Hou, Q., Wang, Z., Liu, Y. and Fan, R. (2021). Epsilon-Negative Media from the Viewpoint of Materials Science. *The European Physical Journal Applied Metamaterials, (EPJ Applied Metamaterials)*, 8, 1-17. <https://doi.org/10.1051/epjam/2021005>
- Gregory, A.P. and Clarke, R.N. (2005). *Dielectric Metrology with Coaxial Sensors*. Metrology Division, National Physical Laboratory.
- Keysight Technologies. (2019). *Basics of Measuring the Dielectric Properties of Materials* [Application Note]. Keysight.
- Lang, R., Li, M., O'Dell, B., Zhou, Y. and Vine, D.L. (2022). A Cavity System for Seawater Dielectric Measurements at P-band. *IGARSS 2022 - 2022 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, (pp. 6978-6981). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.. <https://doi.org/10.1109/IGARSS46834.2022.9884131>

- Li, Z., Mu, Y., Han, J., Gao, X. and Li, L. (2020). Dual-Polarized Antenna Design Integrated with Metasurface and Partially Reflective Surface for 5G Communication. *The European Physical Journal Applied Metamaterials (EPJ Applied Metamaterials)*, 7(3), <https://doi.org/10.1051/epjam/2020004>
- McRae, C.R.H., Wang, H., Gao, J., Brecht, T. and Reagor, M., Vissers, M.R., Brecht, T., Dunsworth, A., Pappas, D.P. and Mutus, J. (2020). Materials Loss Measurements Using Superconducting Microwave Resonators. *Review of Scientific Instruments*, 91(9). <https://doi.org/10.1063/5.0017378>
- Murthy, N.S. (2020). Improved Isolation Metamaterial-Inspired mm-Wave MIMO Dielectric Resonator Antenna for 5G Applications. *Progress in Electromagnetics Research C*, 100, 247-261. <https://doi.org/10.2528/PIERC19112603>
- Nicolson, A.M. and Ross, G.F. (1970). Measurement of the Intrinsic Properties of Materials by Time-Domain Techniques. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 19(4), 377-382. <https://doi.org/10.1109/TIM.1970.4313932>
- Pozar, D.M. (2011). *Microwave Engineering* (4thed). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9780470631553>
- Rammah, A.A., Zakaria, Z., Ruslan, E. and Isa, A.A.M. (2015). Comparative Study of Materials Characterization Using Microwave Resonators. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 9(1), 76-85. <https://www.ajbasweb.com/old/ajbas/2015/76-85.pdf>
- Santalunai, N., Santalunai, S., Rattananamlom, A., Chaipanya, P., Meesawad, P., Thongsopa, C. and Pumpoung, T. (2022). Investigation on Characteristics of Metamaterials by Using Metallic Rod Structure for Antenna Engineering. *Przegląd Elektrotechniczny*, 98(5), 103-109. <https://doi.org/10.15199/48.2022.05.19>
- Shahid Aziz, R., Koziel, S. and Pietrenko-Dabrowska, A. (2024). Millimeter Wave Negative Refractive Index Metamaterial Antenna Array. *Scientific Reports*, 14, <https://doi.org/10.1038/s41598-024-67234-z>
- Singh, G., Ni, R. and Marwaha, A. (2015). A Review of Metamaterials and it's Applications. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 19(6), 305-310. <http://dx.doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V19P254>
- Šarolić, A. and Matković, A. (2022). Dielectric Permittivity Measurement Using Open-Ended Coaxial Probe-Modeling and Simulation Based on the Simple Capacitive-load model. *Sensors*, 22(16), <https://doi.org/10.3390/s22166024>
- Teseme, W.B. and Weldeselassie, H.W. (2020). Review on the Study of Dielectric Properties of Food Materials. *American Journal of Engineering and Technology Management*, 5(5), 76-83. <https://doi.org/10.11648/j.ajetm.20200505.11>
- Thakur, K., Singhai, R. and Kushwaha, A.S. (2024). Metamaterial Antennas for 5G and Beyond: A Comprehensive Review of Advances, Challenges and Future Directions. *2024 IEEE 2nd International Conference on Innovations in High-Speed Communication and Signal Processing (IHCSP)*, 1-5. <http://doi.org/10.1109/IHCSP63227.2024.10959886>
- Vergnano, A., Godio, A., Raffa, C.M., Chiampo, F., Tobon Vasquez, J.A. and Vipiana, F. (2020). Open-Ended Coaxial Probe Measurements of Complex Dielectric Permittivity in Diesel-Contaminated Soil During Bioremediation. *Sensors*, 20(22), <https://doi.org/10.3390/s20226677>
- Vineetha, K.V., Madhav, B.T.P., Kumar, M.S., Das, S., Islam, T. and Alathbah, M. (2023). Development of Compact Bandpass Filter Using Symmetrical Metamaterial Structures for GPS, ISM, Wi-MAX, and WLAN Applications. *Symmetry*, 15(11), <https://doi.org/10.3390/sym15112058>

การใช้สมุนไพรเพื่อยืดอายุการเก็บรักษาและเพิ่มคุณภาพความปลอดภัยด้านจุลินทรีย์ของผลิตภัณฑ์หมูปูดปรุงรส

Improving Microbiological Safety and Shelf-Life of Raw Seasoned Minced Pork Products Preserved by Thai-Medicinal Plants

ปัทมา ศรีน้ำเงิน¹ ปรีดา สิทธิศาสตร์¹ และฐิติกร มหิสนันท์^{2*}

Pattama Srinamngoen¹ Priyada Sittisart¹ and Thitikorn Mahidsanan^{2*}

Received: June 16, 2025; Revised: September 17, 2025; Accepted: September 18, 2025

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์ใช้สมุนไพรไทย 3 ชนิด ได้แก่ ใบหม่อน (*Morus alba*) ข่า (*Alpinia galanga*) และกระชาย (*Boesenbergia rotunda*) เพื่อเพิ่มความปลอดภัยทางจุลชีววิทยาและยืดอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์หมูปูดปรุงรส (Raw Seasoned Minced Pork Products) ภายใต้บรรจุภัณฑ์สุญญากาศที่อุณหภูมิ 4 °C เป็นระยะเวลา 6 วัน โดยเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุมที่ไม่มีสมุนไพร (สูตร 1) และเติมกระเทียม (*Allium sativum*) (สูตร 2) ซึ่งเป็นสมุนไพรที่ใช้ในการถนอมผลิตภัณฑ์แปรรูปจากเนื้อสัตว์ ผลการศึกษาพบว่า การเติมสมุนไพรไทยมีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพ เนื้อสัมผัส ค่าสี (L^* a^* b^*) คุณสมบัติน้ำเค็ม (ค่า pH) และทางด้านจุลินทรีย์ โดยที่การเติมใบหม่อน (สูตร 3) และข่า (สูตร 4) มีผลต่อการเพิ่มความแข็งแรงเนื้อสัมผัส ในขณะที่การเติมกระชาย (สูตร 5) มีผลต่อการเพิ่มความยืดหยุ่นและเหนียวนุ่มได้อย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้การเติมกระเทียม (สูตร 2) แสดงให้เห็นว่าเมื่อเก็บรักษานาน 6 วัน ไม่สามารถควบคุมการเปลี่ยนแปลงได้ ทำให้ค่า pH ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเทียบกับการเติมใบหม่อน ข่า และกระชาย (สูตร 3 4 และ 5 ตามลำดับ) เช่นเดียวกับคุณภาพด้านสี โดยเฉพาะการเติมกระชาย (สูตร 5) มีค่าความสว่าง (L^*) และค่าสีแดง (a^*) คงที่ตลอดการเก็บรักษานาน 6 วัน ซึ่งให้เห็นว่ากระชายมีประสิทธิภาพในการรักษาสีของเนื้อหมูในเนื้อหมูได้อย่างมีประสิทธิภาพ ยังสามารถควบคุมการเจริญของแบคทีเรียทั้งหมด ($<6 \log \text{CFU/g}$) รวมถึงแบคทีเรียก่อโรคในอาหาร *S. aureus* และ *B. cereus* (1.89 และ 1.93 $\log \text{CFU/g}$) โดยเฉพาะไม่พบการปนเปื้อนของ *Salmonella* spp. ตลอดการเก็บรักษานาน 6 วันได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้น การใช้สมุนไพรช่วยปรับปรุงคุณภาพทางกายภาพ จุลชีววิทยา และสีของหมูปูดปรุงรสที่แตกต่างกัน โดยเฉพาะการเติมกระชาย (สูตร 5) สามารถคงคุณภาพและความปลอดภัยได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด เป็นทางเลือกที่น่าสนใจสำหรับการพัฒนาผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์แปรรูปที่ปลอดภัยต่อผู้บริโภคต่อไป

คำสำคัญ : หมูปูดปรุงรส; ความปลอดภัยในอาหาร; อายุการเก็บ; สมุนไพร

¹ คณะวิทยาศาสตร์และศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา วิทยาเขตจันทบุรี

² คณะนวัตกรรมและเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

¹ Faculty of Science and Arts, Burapha University, Chanthaburi Campus

² Faculty of Innovation and Agricultural Technology, Rajamangala University of Technology Isan

* Corresponding Author, Tel. 08 4962 3641, E - mail: thitikorn.ma@rmuti.ac.th

Abstract

This study aimed to apply three Thai herbs, including mulberry leaf (*Morus alba*), galangal (*Alpinia galanga*), and fingerroot (*Boesenbergia rotunda*) to enhance microbiological safety and extend the shelf life of raw seasoned minced pork product. The samples were vacuum-packaged and stored at 4 °C for 6 days. The effectiveness of the herbs was compared with a control group without herbal addition (formula 1) and a group supplemented with garlic (*Allium sativum*) (formula 2), which is commonly used as raw meat preservation. The results demonstrated that Thai herbs affected the physical properties, texture, color parameters (L^* , a^* , b^*), chemical properties (pH), and microbiological quality of the raw seasoned minced pork product. The supplemented with mulberry leaves (formula 3) and galangal (formula 4) resulted in a significant increase in firmness of raw seasoned minced pork product, while the supplemented with fingerroot (formula 5) resulted in a significant improvement in elasticity and tenderness. Moreover, supplemented with garlic (formula 2) was less effective in controlling pH, resulting in a significantly rapid decrease in pH after 6 days of storage compared to the samples supplemented with mulberry leaves, galangal, and fingerroot (formulas 3, 4, and 5, respectively). Similarly, in terms of color quality control, the supplemented with fingerroot (Formula 5) maintained stable lightness (L^*) and redness (a^*) values throughout the 6 days storage period, indicating its effectiveness in preserving the color characteristics of product. It was also able to effectively control the growth of total bacteria ($<6 \log \text{CFU/g}$) including pathogens *S. aureus* and *B. cereus* (1.89 and 1.93 $\log \text{CFU/g}$), and no contamination of *Salmonella* spp. was detected during the 6 days storage period. Therefore, the use of herbs to improve the physical, microbiological, and color qualities of seasoned minced pork, particularly the addition of fingerroot (formula 5), which most effectively quality and safety represents a promising natural approach for the development of safe processed meat products for consumers.

Keywords: Raw Seasoned Minced Pork; Food Safety; Shelf-Life; Herbal Plant

บทนำ

ผลิตภัณฑ์หมูบดปรุงรส (Raw Seasoned Minced Pork Product) เป็นหนึ่งในผลิตภัณฑ์ทางการค้า ที่สามารถจัดอยู่ในผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์แปรรูปดิบ ที่ปลอดภัยหรือเอากระดูกออกด้วยเครื่องจักร ที่ไม่ผ่านกระบวนการแปรรูป ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ในกลุ่มที่คุ้นเคย เช่น เนื้อวัวสดแฮมเบอร์เกอร์ โดยที่ผลิตภัณฑ์หมูบดปรุงรสนี้ ได้รับความนิยม อย่างแพร่หลายในประเทศไทย เนื่องจากสะดวกในการประกอบอาหารและรสชาติถูกปากผู้บริโภค อย่างไรก็ตามเนื่องจากเป็นผลิตภัณฑ์ที่ยังไม่ผ่านกระบวนการให้ความร้อน จึงมีความเสี่ยงต่อการเสื่อมเสียง่าย ผลิตภัณฑ์มีปริมาณน้ำอิสระ (a_w) ความชื้น (Moisture Content) สูง อีกทั้งมีโปรตีนและไขมันเป็นองค์ประกอบหลักที่เป็นแหล่งคาร์บอน-ไนโตรเจน (Carbon-Nitrogen Source) ที่เหมาะสมสำหรับการเจริญของจุลินทรีย์ (Djordjević et al., 2019) อีกทั้งตลอดห่วงโซ่การผลิตมีความเสี่ยงต่อการปนเปื้อนจุลินทรีย์ที่สามารถเกิดขึ้นได้ตั้งแต่กระบวนการฆ่าสัตว์ การแปรรูป การบรรจุหีบห่อ ไปจนถึงการจัดจำหน่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่ออยู่ในสภาวะอุณหภูมิที่ไม่เหมาะสมหรือไม่มีการควบคุมอุณหภูมิ หนึ่งในปัญหาสำคัญที่กระทบต่อคุณภาพและความปลอดภัยของผลิตภัณฑ์หมูบดปรุงรส คือ การอยู่รอด การเจริญของจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดการเสื่อมเสีย โดยเฉพาะจุลินทรีย์ก่อโรคในอาหาร เช่น *Staphylococcus aureus*, *Bacillus cereus*, *Salmonella* spp. และ *Escherichia coli* ซึ่งไม่เพียงแต่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ เช่น กลิ่น สี และเนื้อสัมผัส แต่ยังก่อให้เกิดโรคทางอาหารได้ เช่น อาการอาหารเป็นพิษ อาเจียน หรือท้องเสีย (Mansur et al., 2016;

Scott et al., 2020) นอกจากนี้การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมัน (Lipid Oxidation) ยังเป็นอีกปัจจัยที่สำคัญซึ่งส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์แปรรูป เกิดกลิ่นเหม็นหืน รวมถึง การเปลี่ยนแปลงสี และการลดลงของคุณค่าทางโภชนาการของอาหาร ซึ่งการเกิดออกซิเดชันสามารถเร่งได้ด้วยแสง อุณหภูมิ และการสัมผัสกับออกซิเจน (Falowo et al., 2014) ส่งผลให้อายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ลดลง

ในปัจจุบันการควบคุมการเสื่อมเสียของเนื้อสัตว์ เนื้อสัตว์แปรรูป รวมถึงผลิตภัณฑ์หมูปดปรุงรสมักใช้สารกันบูดและ/หรือสารต้านอนุมูลอิสระสังเคราะห์ เช่น โซเดียมไนไตรต์ หรือบิวทิลไฮดรอกซีโทลูอิน (BHT) ซึ่งแม้จะมีประสิทธิภาพในการยืดอายุการเก็บรักษา แต่การบริโภคในปริมาณมากหรือเป็นเวลานานอาจก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพ (Papuc et al., 2018) ทำให้ผู้บริโภคในปัจจุบันมีความต้องการผลิตภัณฑ์อาหารที่ปราศจากสารเคมีหรือมีส่วนผสมจากธรรมชาติเพิ่มขึ้น จากแนวโน้มดังกล่าวมีการศึกษานำสารสกัดจากพืชสมุนไพรธรรมชาติ มาใช้เป็นทางเลือกในการถนอมอาหาร หรือยืดอายุการเก็บรักษา โดยเฉพาะพืชสมุนไพรไทย (Thia-Medicinal Plants) ซึ่งมีฤทธิ์ทางชีวภาพหลากหลาย ทั้งฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและต้านจุลชีพ (Yuwang et al., 2019; Rattanahemboot et al., 2022) โดยทั่วไปในกลุ่มผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์แปรรูปนิยมใช้กระเทียม (*Allium sativum*) ซึ่งเป็นสมุนไพรที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมแปรรูปเนื้อสัตว์ และการยอมรับจากผู้บริโภคในวงกว้าง ทั้งนี้เนื่องจากกระเทียมมีองค์ประกอบทางชีวภาพที่สำคัญหลายชนิด เช่น ซาโปนิน (Saponins) ซาโปจีนิน (Sapogenin) และฟลาโวนอยด์ (Flavonoid) ซึ่งมีความคงตัวต่อกระบวนการผลิตและการเก็บรักษา โดยเฉพาะกลุ่มฟลาโวนอยด์ เช่น ฟลาโวน (Flavone) และเคอร์ซีทิน (Quercetin) รวมถึงสารประกอบซัลเฟอร์ (Sulfur) เช่น แอลลิล-ซิสเทอีน (Allyl-Cysteine) ไดแอลลิลซัลไฟด์ (Diallyl Sulfide) และแอลลิลไตรซัลไฟด์ (Allyl Trisulfide) มีบทบาทสำคัญในด้านฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant) ซึ่งสามารถช่วยชะลอการเสื่อมสภาพของอาหาร และเสริมความปลอดภัยของผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์ (Lanzotti, 2006; Brewer, 2011; Kovarović et al., 2019) แม้กระเทียมจะเป็นสมุนไพรที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมแปรรูปเนื้อสัตว์มาอย่างยาวนาน แต่การเสริมหรือประยุกต์ใช้สมุนไพรชนิดอื่นที่มีคุณสมบัติทางชีวภาพที่คล้ายคลึงหรือเสริมฤทธิ์กัน อาจเป็นแนวทางที่น่าสนใจในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ทางเลือกใหม่ที่มีคุณภาพและความปลอดภัยสามารถเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการ หรือเพิ่มฤทธิ์ต้านจุลชีพ (Antimicrobial) ใบหม่อน (*Morus alba* L.) ประกอบด้วยออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่สำคัญ เช่น สารฟลาโวนอยด์ ซึ่งมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและสามารถยับยั้งการเจริญของ *S. aureus* *B. pumilus*. และ *E. coli* ได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Cui et al., 2019; Chanthabal and Mahidsanan, 2023) เช่นเดียวกับข่า (*Alpinia galanga* (L.) Willd.) เป็นหนึ่งในสมุนไพรและเครื่องเทศที่นิยมนำมาประกอบอาหารเนื่องจากมีน้ำมันหอมระเหยที่สำคัญ ได้แก่ ซิเนออล (Cineole) 2,2-ไดเมทิล-3-เมทิลสโนร์บอร์น (2,2-Dimethyl-3-methylenenorbornane) และอัลฟา-เคอร์คูมิน (α-Curcumenene) ซึ่งมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระเซลล์มะเร็ง รวมถึงยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมบวกและแกรมลบอย่างมีประสิทธิภาพ (Aziz et al., 2024) นอกจากนี้ กระชาย (*Boesenbergia rotunda* (L.) Mansf.) อุดมไปด้วยสารประกอบฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์ที่แสดงฤทธิ์ต้านจุลชีพและต้านออกซิเดชันได้ดี โดยสามารถยับยั้งการเจริญของ *S. aureus* และ *B. cereus* (Sopitthummakun et al., 2021)

ดังนั้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์หมูปดปรุงรสด้วยการใช้สมุนไพร ใบหม่อน ข่า และกระชาย ร่วมกับการเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำ โดยไม่พึ่งพาสารเคมีสังเคราะห์ เพื่อหาความเป็นไปได้ทดแทนการใช้กระเทียม โดยพิจารณาจากลักษณะทางกายภาพ เนื้อสัมผัส สี ด้านเคมี เช่น ค่าความเป็นกรด-ด่างที่เปลี่ยนแปลงไป และทางจุลชีววิทยาของผลิตภัณฑ์หมูปดปรุงรส เพื่อตอบโจทย์ความต้องการของผู้บริโภคที่มองหาอาหารที่มีคุณภาพ ปลอดภัย และมีความเป็นธรรมชาติโดยไม่พึ่งสารเคมีสังเคราะห์

วิธีดำเนินการวิจัย

1. วัตถุดิบและกรรมวิธีการผลิตหมูปดปรุงรสสมุนไพร

ในกระบวนการผลิตหมูปดปรุงรสมีวัตถุดิบในการผลิตดังนี้ หมูติดมัน ขอสปรุงรส ซีอิ๊วขาว ผงปรุงรส น้ำตาลทราย แป้งมัน ผงฟู รากผักชี พริกไทย กระเทียม และสมุนไพรที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ ใบหม่อน ข่า และกระชาย ขั้นตอนการเตรียมผลิตภัณฑ์มีรายละเอียดดังนี้ การเตรียมเนื้อหมู นำไปล้างทำความสะอาดด้วยน้ำสะอาด จากนั้น

หั่นเป็นชิ้นขนาดประมาณ 2×2 เซนติเมตร แล้วนำมาบดด้วยเครื่องบดไฟฟ้า (อัตราความเร็ว 160 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 นาที) เพื่อให้ได้เนื้อหมูปดที่มีเนื้อสัมผัสละเอียดสม่ำเสมอ วัตถุดิบสมุนไพร ได้แก่ กระเทียม ใบหม่อน ข่า และกระชาย ล้างทำความสะอาดด้วยน้ำสะอาด 2 ครั้ง เพื่อลดการปนเปื้อนของสิ่งสกปรก จากนั้นปล่อยให้สะเด็ดน้ำ 15 นาที ก่อนนำมาบดละเอียดโดยใช้เครื่องปั่นไฟฟ้า (อัตราความเร็ว 160 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 นาที) จากนั้น นำส่วนผสมที่เตรียมดังตารางที่ 1 โดยที่สูตร 1 (Negative Control) หรือสูตรที่ไม่มีการเติมสมุนไพร ประกอบด้วย หมูติดมันบด ซอสปรุงรส ซีอิ๊วขาว ผงปรุงรส น้ำตาลทราย แป้งมัน ผงฟู รากผักชี และพริกไทย สูตร 2 หรือสูตรที่มีการเติมกระเทียมที่ใช้ทั่วไปในผลิตภัณฑ์เชิงพาณิชย์ ประกอบด้วยส่วนประกอบเหมือนกับสูตร 1 ที่มีการเติมกระเทียม เช่นเดียวกับสูตร 3 4 และ 5 ที่มีการเติมใบหม่อน ข่า และกระชาย ตามลำดับ ทุกสูตรผสมของกระบวนการผลิต ทำการผสมต่อเนื่องนาน 2 นาที จากนั้นนำผลิตภัณฑ์หมูปดปรุงรสในแต่ละสูตรบรรจุลงในถุงสุญญากาศโดยใช้ เครื่องบรรจุแบบสุญญากาศ (Vacuum Sealer) เพื่อควบคุมปัจจัยออกซิเจน ซึ่งเป็นสาเหตุของการเสื่อมคุณภาพของ เนื้อสัตว์ (Kernberger-Fischer et al., 2017) บรรจุแบบภายใต้สภาวะปลอดเชื้อ (Aseptic Condition) เก็บรักษาและ ติดตามผลตัวอย่างที่บรรจุแล้วถูกเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4°C และทำการศึกษาคูณภาพตัวอย่างในวันที่ 0 2 4 และ 6 วัน

ตารางที่ 1 วัตถุดิบและส่วนผสมที่ใช้ในการผลิตหมูปดปรุงรส

วัตถุดิบ	หมูปดปรุงรส (% w/w)				
	สูตร 1	สูตร 2	สูตร 3	สูตร 4	สูตร 5
หมูติดมันบด	75.76	72.99	72.99	72.99	72.99
ซอสปรุงรส	3.79	3.65	3.65	3.65	3.65
ซีอิ๊วขาว	3.79	3.65	3.65	3.65	3.65
ผงปรุงรส	2.27	2.19	2.19	2.19	2.19
น้ำตาลทราย	3.79	3.65	3.65	3.65	3.65
แป้งมัน	3.79	3.65	3.65	3.65	3.65
ผงฟู	2.27	2.19	2.19	2.19	2.19
รากผักชี	2.27	2.19	2.19	2.19	2.19
พริกไทย	2.27	2.19	2.19	2.19	2.19
กระเทียม	0	3.65	0	0	0
ใบหม่อน	0	0	3.65	0	0
ข่า	0	0	0	3.65	0
กระชาย	0	0	0	0	3.65

หมายเหตุ: % w/w หมายถึงร้อยละโดยน้ำหนักของส่วนผสมแต่ละชนิดเมื่อเทียบกับน้ำหนักรวมทั้งหมด ในแต่ละสูตรโดยที่ ส่วนผสมพื้นฐาน ได้แก่ หมูติดมัน ซอสปรุงรส ซีอิ๊วขาว ผงฟู ผงปรุงรส น้ำตาลทราย แป้งมัน รากผักชี และ พริกไทย ใช้ในปริมาณเท่ากันทุกสูตร

สูตร 1 คือ สูตรควบคุม (Negative Control) ไม่มีการเติมสมุนไพร

สูตร 2 คือ ที่มีส่วนผสมของกระเทียมที่มีจำหน่ายแล้วในเชิงพาณิชย์

สูตร 3 คือ ที่มีการเติมใบหม่อนเพิ่ม

สูตร 4 คือ ที่มีการเติมข่าเพิ่ม

สูตร 5 คือ ที่มีการเติมกระชายเพิ่ม

2. การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมี

การทดลองนี้ได้ดำเนินการประเมินคุณภาพของผลิตภัณฑ์หมูปดปรุงรสที่มีการเติมสมุนไพร (ใบหม่อน ข่า และกระชาย) เปรียบเทียบกับที่ไม่เติมกระเทียม (Negative Control) และหมูปดปรุงรสที่เติมกระเทียม โดยแบ่งการวิเคราะห์ 3 วิธีการ ได้แก่ การวัดเนื้อสัมผัส (Texture Analysis) การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH Analysis) และค่าสี (CIE L^* a^* b^* Analysis) ดังนี้

การวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ทั้ง 5 สูตร โดยใช้เครื่องวัดคุณสมบัติทางเนื้อสัมผัส (Texture Analyzer CT3 10K, BROOKFIELD, USA) หัววัด TA41 ทำการวัดค่าความแน่น ความแข็ง และแรงต้านการตัดของผลิตภัณฑ์ เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างด้านเนื้อสัมผัสระหว่างกลุ่มตัวอย่าง (Migdal et al., 2020)

การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่าง ผสมตัวอย่าง 10 กรัม กับน้ำกลั่นปลอดเชื้อ 90 มิลลิลิตร ในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร จากนั้นใช้เครื่องปั่นผสม (Blender) ให้เป็นเนื้อเดียวกันเป็นเวลา 1 นาที แล้วจึงทำการวัดค่าด้วย pH Meter (Mettler Toledo, Switzerland) ของสารละลาย เพื่อประเมินค่าความเป็นกรด-ด่างของผลิตภัณฑ์ในแต่ละสูตร

การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพในด้านสี วัดค่าความแตกต่างของสีโดยใช้เครื่องวัดสี Hunter Lab (Chroma Meter CR-410, Konica Minolta, Tokyo, Japan) โดยการวัดค่าพิกัดสีในระบบ CIE ได้แก่ ค่า L^* แสดงระดับความสว่าง (จากสีดำ $-L^*$ ไปจนถึงสีขาว $+L^*$) ค่า a^* แสดงระดับสีในแกนเขียวถึงแดง (จากสีเขียว $-a^*$ ถึงสีแดง $+a^*$) และค่า b^* แสดงระดับสีในแกนน้ำเงินถึงเหลือง (จากสีน้ำเงิน $-b^*$ ถึงสีเหลือง $+b^*$) การวิเคราะห์ทุกค่าจะดำเนินการในวันที่ 0 2 4 และ 6 ของการเก็บรักษา เพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นระหว่างการเก็บรักษา

3. การวิเคราะห์สมบัติทางด้านจุลินทรีย์

3.1 การตรวจนับแบคทีเรียทั้งหมด (Total Plate Count; TPC)

นำผลิตภัณฑ์หมูปดปรุงรสแต่ละสูตรน้ำหนัก 10 กรัม เติมใน 0.85% (w/v) Sodium Chloride ปริมาตร 90 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันภายใต้สภาวะปลอดเชื้อ เพื่อให้ได้สารแขวนลอยในความเข้มข้น 10^{-1} จากนั้นทำการเจือจางแบบสิบเท่า (10-Fold Serial Dilution) ต่อเนื่องจนได้ระดับความเจือจางที่เหมาะสมสำหรับการนับจำนวนโคโลนี จากแต่ละระดับความเจือจาง นำตัวอย่างปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร ปิเปตลงบนอาหารเลี้ยงเชื้อชนิด Plate Count Agar (PCA, HiMedia Laboratories, India) เกลี่ยให้ทั่วผิวหน้าจานเลี้ยงเชื้อด้วยเทคนิค Spread Plate ทำการทดลองในลักษณะซ้ำ 3 ซ้ำ (Triplicate) จากนั้นนำจานเลี้ยงเชื้อไปบ่มที่อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง บันทึกจำนวนโคโลนีที่เกิดขึ้นบนจานที่มีจำนวนโคโลนีอยู่ในช่วง 25 - 250 โคโลนีต่อจาน (Colony Forming Units; CFU) (Bacteriological Analytical Manual (BAM), 2001) เพื่อคำนวณหาค่าจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดในหน่วย $\log \text{CFU/g}$ ของตัวอย่าง

3.2 การตรวจนับเชื้อจุลินทรีย์ก่อโรคในอาหาร

การตรวจนับจำนวน *S. aureus* ดำเนินการโดยการปิเปตสารละลายตัวอย่างที่ผ่านการเจือจางในแต่ละระดับปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร ลงบนอาหารเลี้ยงเชื้อ Baird-Parker Agar (BPA, HiMedia Laboratories, India) ที่มีส่วนผสมของ Egg Yolk Tellurite Emulsion (HiMedia Laboratories, India) เกลี่ยให้ทั่วผิวหน้าจานเลี้ยงเชื้อด้วยเทคนิค Spread Plate ทำการทดลองในลักษณะซ้ำ 3 ซ้ำ (Triplicate) นำจานเพาะเลี้ยงไปบ่มที่อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 24 - 48 ชั่วโมง ตรวจนับโคโลนีสีดำที่ปรากฏบนจานอาหารที่มีจำนวนอยู่ระหว่าง 25 - 250 โคโลนีต่อจาน และรายงานในรูปของ $\log \text{CFU/g}$ ของตัวอย่าง (Gunaseena et al., 2021)

การตรวจนับจำนวน *B. cereus* โดยใช้ตัวอย่างที่ผ่านการเจือจางแบบสิบเท่า (10-Fold Serial Dilution) ปิเปตตัวอย่างที่เจือจางแล้วปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร ลงบนอาหารเลี้ยงเชื้อชนิด Mannitol Egg Yolk Polymyxin Agar (MYP; HiMedia M636, India) เกลี่ยให้ทั่วด้วยเทคนิค Spread Plate ภายใต้สภาวะปลอดเชื้อ นำไปบ่มที่อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากการบ่มตรวจนับโคโลนีสีชมพูที่ปรากฏบนอาหารเลี้ยงเชื้อจำนวนอยู่ในช่วง 25 - 250 โคโลนีต่อจาน และผลการนับจะถูกนำไปคำนวณ และรายงานในรูปของ $\log \text{CFU/g}$ ของตัวอย่าง (Harper et al., 2011)

การตรวจหาเชื้อ *Salmonella* spp. ตัวอย่างผลิตภัณฑ์หมูปดปรุงรสแต่ละสูตร 25 กรัม เติมน้ำใน Lactose Broth (HiMedia, India) ปริมาตร 225 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (Pre-Enrichment) หลังจากการบ่มปิเปตปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร ลงในหลอดที่บรรจุอาหารเสริมเลือก (Selective Enrichment Broth) ชนิด Rappaport-Vassiliadis (RV) Medium ปริมาตร 10 มิลลิลิตร แล้วผสมให้เข้ากัน จากนั้นบ่มต่อที่อุณหภูมิ 37 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบระยะเวลา นำเข็มฉีดยา (Inoculating Loop) ต่อบริเวณผิวของอาหารเลี้ยงเชื้อเหลวใน RV Medium แล้วนำมาขีดบนผิวหน้าของอาหารเลี้ยงเชื้อเฉพาะ Xylose Lysine Deoxycholate Agar (XLD agar; HiMedia, India) บ่มที่อุณหภูมิ 37 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โคโลนีของ *Salmonella* spp. ที่เจริญบน XLD จะมีลักษณะเฉพาะ คือ โคโลนีมีสีแดงและมีจุดกลางสีดำอันเกิดจากการสร้าง H₂S การยืนยันชนิดของจุลินทรีย์ควรดำเนินการต่อยด้วย Biochemical Tests หรือวิธี Molecular ตามความเหมาะสม (Pal and Marshall, 2009)

การตรวจเชื้อ *E. coli* ด้วยวิธี MPN (Most Probable Number) ตัวอย่างเนื้อจากแล้วให้มีระดับความเจือจาง 10⁻¹ 10⁻² และ 10⁻³ ในระบบ 3 Tube MPN โดยใช้ Series 3:3:3 ปิเปตสารละลายตัวอย่างในแต่ละระดับความเจือจางของ 3 Tube MPN อย่างละ 1 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดอาหารเลี้ยงเชื้อ Lauryl Sulfate Tryptose Broth (LST; HiMedia, India) ที่มีหลอดดักแก๊สคว่ำอยู่ ความเจือจางละ 3 หลอด บ่มที่อุณหภูมิ 37 °C ติดตามผลในหลอดที่เกิดแก๊สที่เวลา 24 ชั่วโมง สำหรับหลอดที่ไม่เกิดแก๊สให้บ่มต่อไปอีกให้ครบเวลา 48 ชั่วโมง ถ่ายเชื้อจากหลอดที่เกิดแก๊สลงในหลอดอาหาร Brilliant Green Lactose Bile Broth (BGLB broth; HiMedia, India) บ่มที่อุณหภูมิ 37 °C นาน 24 ชั่วโมง แล้วทำการยืนยันผลโดยการถ่ายเชื้อลง *Escherichia coli* broth (EC broth) ที่มีหลอดดักแก๊สบ่มที่อุณหภูมิ 44.5 °C (Feng et al., 2002)

4. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ ทางเคมี และทางจุลินทรีย์ โดยวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design, CRD) วิเคราะห์ผลการทดลอง ความแปรปรวนโดย ANOVA และวิเคราะห์ค่าความแตกต่างค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's Multiple Range Test ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยใช้โปรแกรมทางสถิติ SPSS

ผลการวิจัย

การประยุกต์ใช้สมุนไพรไทยทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ ใบหม่อน ข่า และกระชาย เพื่อรักษาคุณภาพ และความปลอดภัยทางด้านจุลินทรีย์ ตลอดจนเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์หมูปดปรุงรสมีอายุการเก็บรักษาที่ยาวนานขึ้น จากตารางที่ 2 แสดงผลการวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัส (ค่าความแข็ง ค่าความเหนียว ค่าความยืดหยุ่น และค่าความเปราะ) ผลิตภัณฑ์หมูปดปรุงรสที่เปลี่ยนแปลงไปในช่วงการเก็บรักษานาน 6 วัน พบว่าการเติมสมุนไพร ใบหม่อน ข่า และกระชาย มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และส่งผลให้แต่ละช่วงระยะเวลาการเก็บรักษาที่ 0 2 4 และ 6 วัน แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) โดยที่เนื้อสัมผัสค่าความแข็ง (Hardness) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าทุกสูตรการผลิตมีค่าความแข็งอยู่ในช่วง 8 - 10 g แต่เมื่อระยะเวลาการเก็บรักษามากขึ้น พบว่าการเติมใบหม่อน (สูตร 3) ค่าความแข็งของเนื้อสัมผัสเพิ่มขึ้น ในวันที่ 6 มีค่าความแข็ง 13.00±1.73 g ในขณะที่สูตรควบคุม (สูตร 1) เติมกระเทียม (สูตร 2) และเติมกระชาย (สูตร 5) ค่าความแข็งเนื้อสัมผัสในวันที่ 4 มีแนวโน้มลดลงเมื่อเก็บรักษานาน 6 วัน 9.67±1.53 9.00±2.00 และ 9.67±0.58 g ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการเติมใบหม่อน (สูตร 3) ช่วยทำให้ผลิตภัณฑ์เนื้อหมูปดปรุงรส มีความแน่นและแข็งแรงขึ้น ในขณะที่สูตรควบคุม หรือที่ไม่มีการเติมสมุนไพร (สูตร 1) สูตรที่เติมกระเทียม (สูตร 2) และกระชาย (สูตร 5) มีการเปลี่ยนแปลงของความแข็งและมีแนวโน้มลดลงเมื่อเก็บรักษานานขึ้น

ความเหนียวติดมือ (Adhesiveness) เป็นหนึ่งในคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสที่สำคัญที่บ่งบอกว่าผลิตภัณฑ์เหมาะสมช่วยให้สามารถปั้นหรือขึ้นรูปเป็นก้อนได้ง่าย ไม่แตกหรือหลุดร่วงระหว่างการจัดการ พบว่าสูตรที่ไม่มีการเติมสมุนไพร (สูตร 1) และเติมข่า (สูตร 4) มีค่าดังกล่าวสูงที่สุด 0.23±0.06 และ 0.22±0.03 mJ ในขณะที่การเติมกระชาย (สูตร 5)

มีค่าความเหนียวต่ำที่สุด คือ 0.11 ± 0.01 mJ อย่างไรก็ตามเมื่อเก็บรักษานาน 6 วัน พบว่าทุกสูตรการผลิตที่มีการเติมกระเทียม (สูตร 2) เติมใบหม่อน (สูตร 3) เติมข่า (สูตร 4) และเติมกระชาย (สูตร 5) โดยรวมมีค่าความเหนียวอยู่ในช่วง 0.10-0.17 mJ ผลดังกล่าวอาจเนื่องมาจากการที่สมุนไพรมีองค์ประกอบทางเคมีที่สามารถลดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเนื้อเยื่อของโปรตีนได้ ซึ่งส่งผลต่อคุณสมบัติทางกลของผลิตภัณฑ์

ค่าความยืดหยุ่น (Stringiness) ของเนื้อสัมผัส พบว่ามีแนวโน้มค่อนข้างแปรปรวนตลอดอายุการเก็บรักษานาน 6 วัน ในทุกสูตรการผลิต อย่างไรก็ตามสูตรที่ไม่มีการเติมสมุนไพร (สูตร 1) มีค่าดังกล่าวสูงที่สุดเมื่อเก็บรักษานาน 6 วัน คือ 4.88 ± 0.77 mm รองลงมาคือ สูตรการผลิตที่มีการเติมกระเทียม (สูตร 2) คือ 2.46 ± 0.79 mm เมื่อพิจารณาสมุนไพรที่นำมาทดสอบเพื่อต้องการแทนที่การใช้กระเทียม พบว่าสูตรที่เติมกระชาย (สูตร 5) มีค่าความยืดหยุ่น 1.76 ± 0.26 mm เมื่อเก็บรักษานาน 6 วัน ซึ่งสูงกว่าสูตรที่เติมใบหม่อน (สูตร 3) และข่า (สูตร 4) ที่มีค่าต่ำกว่า แสดงให้เห็นว่ากระชายอาจมีศักยภาพในการคงคุณลักษณะด้านความยืดหยุ่นของเนื้อสัมผัสได้ดีกว่าสมุนไพรชนิดอื่นที่ใช้ในการศึกษา ทั้งนี้คุณสมบัติดังกล่าวมีความสำคัญต่อการยืดเนื้อและความรู้สึกขณะเคี้ยวของผู้บริโภค

สำหรับค่าความเปราะหรือแตกง่ายของเนื้อสัมผัส (Fracturability) พบว่าสูตรที่เติมกระชาย (สูตร 5) มีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญ จากวันที่ 0 เท่ากับ 5.33 ± 0.58 g จนถึงวันที่ 6 เท่ากับ 4.67 ± 0.58 g ของการเก็บรักษา อย่างไรก็ตามผลิตภัณฑ์หมูปดปรุงรสที่เติมใบหม่อน (สูตร 3) และเติมข่า (สูตร 4) มีค่าดังกล่าวเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเก็บรักษานาน 6 วัน คือ 6.00 ± 1.73 และ 6.00 ± 0.00 g แสดงให้เห็นว่าสมุนไพรไทยทั้ง 3 ชนิดมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์หมูปดปรุงรสอย่างชัดเจน โดยการเติมใบหม่อน (สูตร 2) ช่วยเพิ่มความแข็ง การเติมกระชาย (สูตร 5) ช่วยคงความยืดหยุ่น และการเติมข่า (สูตร 4) เพิ่มความเหนียวติดมือของผลิตภัณฑ์

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัส (ค่าความแข็ง ค่าความเหนียว ค่าความยืดหยุ่น และค่าความเปราะ) ผลิตภัณฑ์หมูปดปรุงรสที่เปลี่ยนแปลงไปในระหว่างการเก็บรักษานาน 6 วัน

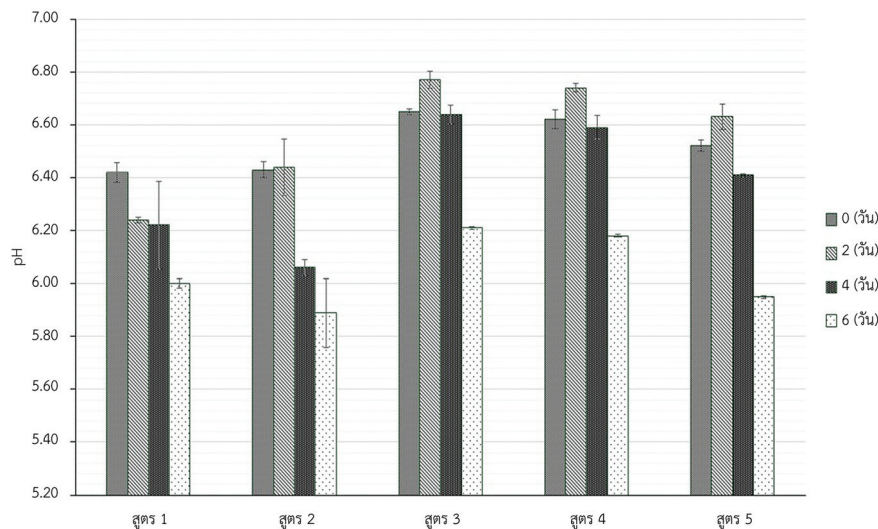
ระยะเก็บรักษา (วัน)	ผลิตภัณฑ์หมูปดปรุงรส				
	สูตร 1	สูตร 2	สูตร 3	สูตร 4	สูตร 5
ค่าความแข็ง (Hardness; g)					
0	9.83 ± 0.76^{Aab}	8.00 ± 1.00^{Bb}	9.67 ± 0.58^{Bab}	10.00 ± 1.73^{Aa}	10.00 ± 0.00^{ABa}
2	10.00 ± 2.00^{Aa}	9.55 ± 0.51^{ABa}	9.00 ± 0.00^{Ba}	8.67 ± 0.58^{Aa}	10.00 ± 0.00^{ABa}
4	10.00 ± 0.00^{Ab}	11.00 ± 1.00^{Aab}	12.74 ± 0.23^{Aa}	11.67 ± 1.53^{Aab}	11.00 ± 1.00^{Aab}
6	9.67 ± 1.53^{Ab}	9.00 ± 2.00^{ABb}	13.00 ± 1.73^{Aa}	11.33 ± 2.08^{Aab}	9.67 ± 0.58^{Bb}
ค่าความเหนียว (Adhesiveness; mJ)					
0	0.23 ± 0.06^{Aa}	0.14 ± 0.06^{Aab}	0.19 ± 0.08^{Aab}	0.22 ± 0.03^{Aa}	0.11 ± 0.01^{Bb}
2	0.13 ± 0.06^{Ab}	0.11 ± 0.03^{Ab}	0.10 ± 0.00^{Bb}	0.11 ± 0.01^{Bb}	0.17 ± 0.04^{Aa}
4	0.13 ± 0.06^{Ab}	0.09 ± 0.02^{Ab}	0.20 ± 0.01^{Aa}	0.10 ± 0.01^{Bb}	0.11 ± 0.03^{Bb}
6	0.22 ± 0.02^{Aa}	0.17 ± 0.06^{Ab}	0.11 ± 0.01^{Bc}	0.11 ± 0.01^{Bc}	0.10 ± 0.00^{Bc}
ค่าความยืดหยุ่น (Stringiness; mm)					
0	1.85 ± 0.50^{Bab}	2.35 ± 0.54^{Ba}	1.77 ± 0.21^{Aab}	1.31 ± 0.27^{Abc}	1.06 ± 0.10^{Cc}
2	2.37 ± 0.99^{Bc}	3.47 ± 0.21^{Ab}	1.45 ± 0.37^{Ac}	1.78 ± 0.25^{Ac}	1.26 ± 0.00^{Aa}
4	1.29 ± 0.33^{Ba}	1.72 ± 0.24^{Ba}	1.65 ± 0.32^{Aa}	1.33 ± 0.33^{Aa}	1.62 ± 0.31^{Ba}
6	4.88 ± 0.77^{Aa}	2.46 ± 0.79^{Bb}	1.38 ± 0.45^{Ab}	1.43 ± 0.30^{Ab}	1.76 ± 0.26^{Bb}

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัส (ค่าความแข็ง ค่าความเหนียว ค่าความยืดหยุ่น และค่าความเปราะ) ผลิตภัณฑ์หมูปดปรุงรสที่เปลี่ยนแปลงไปในระหว่างการเก็บรักษานาน 6 วัน (ต่อ)

ระยะเก็บรักษา (วัน)	ผลิตภัณฑ์หมูปดปรุงรส				
	สูตร 1	สูตร 2	สูตร 3	สูตร 4	สูตร 5
ค่าความเปราะ (Fracturability; g)					
0	5.33±0.58 ^{Aa}	4.33±1.15 ^{Ba}	4.00±1.00 ^{Aa}	5.33±0.58 ^{Aa}	5.33±0.58 ^{ABa}
2	5.30±0.44 ^{Ab}	4.67±0.58 ^{ABc}	4.00±0.00 ^{Ad}	4.00±0.00 ^{Bd}	6.00±0.00 ^{Aa}
4	5.30±0.61 ^{Aa}	6.00±0.00 ^{Aa}	5.91±0.21 ^{Aa}	5.69±0.71 ^{Aa}	6.00±1.00 ^{Aa}
6	5.00±1.73 ^{Aa}	5.00±1.00 ^{ABa}	6.00±1.73 ^{Aa}	6.00±0.00 ^{Aa}	4.67±0.58 ^{Ba}

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (±) จากการทดลอง 3 ซ้ำ
ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งมีความแตกต่างกันทางสถิติที่ ($P<0.05$)
ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวนอนมีความแตกต่างกันทางสถิติที่ ($P<0.05$)
สูตร 1 คือ สูตรควบคุม (Negative Control) ไม่มีการเติมสมุนไพร
สูตร 2 คือ ที่มีส่วนผสมของกระเทียม (3.65% w/w) ที่มีจำหน่ายแล้วในเชิงพาณิชย์
สูตร 3 คือ ที่มีการเติมใบหม่อนเพิ่ม (3.65% w/w)
สูตร 4 คือ ที่มีการเติมข่าเพิ่ม (3.65% w/w)
สูตร 5 คือ ที่มีการเติมกระชายเพิ่ม (3.65% w/w)

ผลของสมุนไพรต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH Value) ในผลิตภัณฑ์ทั้ง 5 สูตร ซึ่งค่า pH เป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อคุณภาพและความปลอดภัยของผลิตภัณฑ์หมูปดปรุงรส โดยมีผลต่อการเจริญของจุลินทรีย์ และการคงตัวของเนื้อสัมผัส จากรูปที่ 1 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด - ด่าง (pH Value) ของผลิตภัณฑ์หมูปดปรุงรสในระหว่างการเก็บรักษานาน 6 วัน พบว่าทั้ง 5 สูตรที่ทำการผลิตเมื่อทำการเก็บรักษานาน 6 วัน ค่า pH ของผลิตภัณฑ์ลดลงอย่างต่อเนื่องในทุกสูตร โดยที่การเติมกระเทียม (สูตร 2) ค่า pH ลดลงจาก 6.43 เหลือ 5.89 ณ วันที่ 6 ของการเก็บรักษา ซึ่งเป็นค่าต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรอื่น สำหรับสูตรที่มีการประยุกต์ใช้สมุนไพรไทยอื่น ๆ ที่นอกเหนือจากกระเทียม ได้แก่ สูตรที่มีการเติมใบหม่อน (สูตร 3) เติมข่า (สูตร 4) และเติมกระชาย (สูตร 5) พบว่าค่า pH ลดลงในอัตราที่ช้ากว่าสูตรควบคุมที่ไม่มีการเติมสมุนไพร (สูตร 1) และเติมกระเทียม (สูตร 2) นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อทำการเก็บรักษานาน 6 วัน การเติมกระชาย (สูตร 5) แม้จะมีแนวโน้มค่า pH ลดลงใกล้เคียงกับการเติมกระเทียม (สูตร 2) แต่อย่างไรก็ตามค่า pH ในวันที่ 6 ที่ตรวจพบ คือ 5.95 ซึ่งสูงกว่า ดังนั้น การเติมสมุนไพร เช่น กระชาย ข่า และใบหม่อน นอกจากจะมีศักยภาพในการชะลอการเปลี่ยนแปลงของค่า pH แล้ว ยังอาจช่วยลดความเป็นกรดในอัตราที่ช้ากว่ากระเทียม



รูปที่ 1 การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH Value) ของผลิตภัณฑ์หมูปดปรุงรสในระหว่างการเก็บรักษานาน 6 วัน

แสดงข้อมูลด้วยค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) จากการทดลอง 3 ซ้ำ โดยที่สูตร 1 คือ สูตรควบคุม (Negative Control) ไม่มีการเติมสมุนไพร สูตร 2 คือ ที่มีส่วนผสมของกระเทียม (3.65% w/w) ที่มีจำหน่ายแล้วในเชิงพาณิชย์ สูตร 3 คือ ที่มีการเติมใบหม่อนเพิ่ม (3.65% w/w) สูตร 4 คือ ที่มีการเติมข่าเพิ่ม (3.65% w/w) และสูตร 5 คือ ที่มีการเติมกระชายเพิ่ม (3.65% w/w)

การเปลี่ยนแปลงด้านค่าสี ซึ่งเป็นดัชนีคุณภาพที่สะท้อนถึงลักษณะผลิตภัณฑ์ที่ดี ดังตารางที่ 3 โดยพิจารณา ค่าสีในระบบ CIE Lab ได้แก่ ค่า L^* (ความสว่าง) a^* (เฉดสีแดง-เขียว) และ b^* (เฉดสีเหลือง-น้ำเงิน) พบว่าทุกสูตรการผลิตมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ทั้งในแต่ละสูตรทั้ง 5 สูตร และระหว่างระยะเวลาเก็บรักษา (0 2 4 และ 6 วัน) ค่า L^* หรือ ความสว่างพบว่าการเติมกระชาย (สูตร 5) มีค่า L^* สูงสุดในทุกช่วงเวลาทำการเก็บรักษาตั้งแต่วันที่ 0 ($L^* 65.96$) ไปจนถึงวันที่ 6 ($L^* 74.50$) แสดงถึงความสว่างของเนื้อผลิตภัณฑ์ที่คงที่มากที่สุดเมื่อเทียบกับสูตรอื่น ขณะที่การเติมใบหม่อน (สูตร 3) แม้จะมีค่า L^* เพิ่มขึ้นในวันที่ 2 อย่างชัดเจน ($L^* 74.20$) แต่กลับลดลงในวันที่ 4 ($L^* 66.65$) และเมื่อทำการเก็บรักษานานจนถึงวันที่ 6 พบว่าลักษณะปรากฏเกิดการเสื่อมเสียอย่างสังเกตเห็นได้จึงไม่สามารถตรวจติดตามได้ (NE; Not Examine) เช่นเดียวกับการเติมข่า (สูตร 4) ในขณะที่สูตรควบคุมหรือสูตรที่ไม่มีการเติมสมุนไพร (สูตร 1) และสูตรกระเทียม (สูตร 2) พบว่ามีค่า L^* ในระดับปานกลางและไม่แสดงแนวโน้มการเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน และเมื่อเก็บรักษานานถึง 6 วัน เกิดการเสื่อมเสียอย่างสังเกตเห็นได้จึงไม่สามารถตรวจติดตามได้

สำหรับการเปลี่ยนแปลงค่า a^* ซึ่งแสดงถึงเฉดสีแดง ที่ยังคงคุณภาพความสดนั้น พบว่าการเติมกระชาย (สูตร 5) มีค่าคงที่และสูงกว่าสูตรอื่น กล่าวคือในวันที่ 0 มีค่าสูงสุด ($a^* 19.86$) และค่าที่แสดงถึงเฉดสีแดงนี้ไม่ลดลงแต่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในการเก็บรักษานาน 6 วัน ($a^* 25.69$) ขณะที่เติมข่า (สูตร 4) พบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นกัน โดยเริ่มจากในวันที่ 0 มีค่าแสดงถึงเฉดสีแดง ($a^* 17.42$) และค่านี้ไม่ลดลงแต่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในการเก็บรักษานาน 4 วัน ($a^* 24.06$) ในทางตรงกันข้ามสูตรที่ไม่มีการเติมสมุนไพร (สูตร 1) และสูตรกระเทียม (สูตร 2) มีแนวโน้มของค่า a^* ซึ่งแสดงถึงเฉดสีแดง ลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่ออายุการเก็บรักษานานขึ้น ซึ่งจากผลการทดลองนี้สะท้อนให้เห็นถึงประสิทธิภาพของการเติมกระชาย (สูตร 5) ที่สามารถรักษาการเปลี่ยนแปลงของสีในผลิตภัณฑ์ไว้ได้โดยที่ยังคงเฉดสีแดงไว้ได้ในผลิตภัณฑ์อย่างมีนัยสำคัญ

ในส่วนของค่า b^* ซึ่งแสดงถึงเฉดสีเหลือง พบว่าทั้งสูตร 5 มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน โดยเฉพาะการเติมกระชาย (สูตร 5) วันที่ 0 มีค่า $b^* 9.43$ และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็น 13.61 ในวันที่ 6 ซึ่งแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับสูตรอื่น ($P < 0.05$) ในขณะที่สูตรที่ไม่มีการเติมสมุนไพร (สูตร 1) สูตรกระเทียม (สูตร 2) สูตรเติมใบหม่อน (สูตร 3) และสูตรที่เติมข่า (สูตร 4) เกิดการเสื่อมเสียอย่างสังเกตเห็นได้จึงไม่สามารถตรวจติดตามได้ในวันที่ 6 ของการติดตามอายุการเก็บรักษา

ตารางที่ 3 การเปลี่ยนแปลงค่าสีในระบบ L^* a^* และ b^* ของผลิตภัณฑ์หมูปดปรุงรสที่เก็บในบรรจุภัณฑ์ถุงสุญญากาศเป็นเวลา 6 วัน

ค่าสี	ผลิตภัณฑ์หมูปดปรุงรส					
	จำนวนวัน	สูตร 1	สูตร 2	สูตร 3	สูตร 4	สูตร 5
L^*	0	61.16 ^{Bb}	62.29 ^{Ba}	59.48 ^{Ba}	61.99 ^{ABb}	65.96 ^{Ab}
	2	64.67 ^{Ba}	63.21 ^{Ba}	74.20 ^{Aa}	66.51 ^{Bb}	71.71 ^{Aab}
	4	64.32 ^{Ba}	64.11 ^{Ba}	66.65 ^{Ba}	78.24 ^{Aa}	74.10 ^{Aa}
	6	NE	NE	NE	NE	74.50 ^{Aa}
a^*	0	18.02 ^{ABa}	16.24 ^{Ba}	12.34 ^{Ca}	17.42 ^{ABb}	19.86 ^{Aa}
	2	15.63 ^{Cb}	17.73 ^{BCa}	12.90 ^{Ca}	23.63 ^{Ab}	22.19 ^{ABa}
	4	15.26 ^{Ba}	15.47 ^{Ba}	11.32 ^{Ca}	24.06 ^{Aa}	22.25 ^{Aa}
	6	NE	NE	NE	NE	25.69 ^{Aa}
b^*	0	8.36 ^{Ba}	11.25 ^{Aa}	6.82 ^{Ba}	8.97 ^{Bb}	9.43 ^{Aa}
	2	5.26 ^{Db}	8.35 ^{Ca}	9.70 ^{Ca}	11.90 ^{Bab}	26.32 ^{Aa}
	4	6.29 ^{Bb}	6.20 ^{Ba}	7.78 ^{ABa}	12.67 ^{Aab}	10.76 ^{ABa}
	6	NE	NE	NE	NE	13.61 ^{Aa}

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ซ้ำ
 ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวนอนมีความแตกต่างกันทางสถิติที่ ($P < 0.05$)
 ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งมีความแตกต่างกันทางสถิติที่ ($P < 0.05$)
 สูตร 1 คือ สูตรควบคุม (Negative Control) ไม่มีการเติมสมุนไพร
 สูตร 2 คือ ที่มีส่วนผสมของกระเทียม (3.65% w/w) ที่มีจำหน่ายแล้วในเชิงพาณิชย์
 สูตร 3 คือ ที่มีการเติมใบหอมเพิ่ม (3.65% w/w)
 สูตร 4 คือ ที่มีการเติมข่าเพิ่ม (3.65% w/w)
 สูตร 5 คือ ที่มีการเติมกระชายเพิ่ม (3.65% w/w)
 NE หมายถึง Not Examined เนื่องจากลักษณะปรากฏเกิดการเสื่อมเสีย

การประเมินคุณภาพทางจุลินทรีย์ของผลิตภัณฑ์หมูปดปรุงรสทั้ง 5 สูตร ดังตารางที่ 4 พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงของจำนวนแบคทีเรียทั้งหมด โดยเฉพาะในสูตรควบคุม หรือสูตรที่ไม่มีการเติมสมุนไพร (สูตร 1) และสูตรที่เติมกระเทียม (สูตร 2) ซึ่งมีแบคทีเรียทั้งหมด (Total Bacteria Count) ที่เพิ่มขึ้น อย่างรวดเร็วตั้งแต่วันที่ 2 และสูงเกิน $7 \log \text{CFU/g}$ ที่เก็บรักษานาน 4 วัน และมีแนวโน้มเจริญเพิ่มขึ้นเกินกว่าขอบเขตการนับได้ (TNTC) ภายในวันที่ 6 ซึ่งจำนวนที่ตรวจพบมีปริมาณสูงเกินขอบเขตการนับได้ ทั้งนี้อาจเกิดจากการที่ตัวอย่างมีการปนเปื้อนสูงกว่าความสามารถในการนับด้วยวิธี Spread Plate อย่างไรก็ตามข้อมูลที่ยืนยันว่าจำนวนแบคทีเรียมีค่าสูงกว่าขีดจำกัดความปลอดภัยที่กำหนดไว้ หรือสูงเกินเกณฑ์ตั้งแต่ช่วงต้นของการเก็บรักษา ในขณะที่สูตรที่เติมสมุนไพรโดยเฉพาะการเติมกระชาย (สูตร 5) สามารถควบคุมการเพิ่มจำนวนของแบคทีเรียทั้งหมดได้ดีกว่าทุกสูตร โดยมีค่าการปนเปื้อนของแบคทีเรียรวมเพียง $5.23 \log \text{CFU/g}$ ในวันที่ 6

ในกรณีของเชื้อ *E. coli* ที่มีการรายงานผลด้วยวิธี Most Probable Number (MPN) สามารถแปลผลการวิเคราะห์ว่า $< 0.03 \text{ MPN/g}$ หมายถึง ไม่ตรวจพบเนื่องจากต่ำกว่าขีดจำกัดการตรวจวัด และหาก $\geq 0.03 \text{ MPN/g}$ หมายถึงตรวจพบในตัวอย่าง พบว่ามีการปนเปื้อนในสูตรที่ไม่มีการเติมสมุนไพร (สูตร 1) ตั้งแต่วันที่ 2 ของการเก็บรักษา และตรวจพบอย่างต่อเนื่องทุกวันจนครบระยะเวลาเก็บรักษา 6 วัน ในขณะที่สูตรที่มีการเติมกระเทียม (สูตร 2) เติมน้ำหอม (สูตร 3) และเติมข่า (สูตร 4) เริ่มตรวจพบในช่วงท้ายของอายุการเก็บหรือพบในวันที่ 6 ของการเก็บรักษา ในขณะที่การเติมกระชาย (สูตร 5) ไม่พบการปนเปื้อนของ *E. coli* ตลอดระยะเวลาการศึกษาอายุการเก็บ

การตรวจนับเชื้อ *S. aureus* เป็นแบคทีเรียก่อโรคในอาหาร พบแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของจำนวนเชื้อในทุกสูตรอย่างต่อเนื่องเมื่อเวลาผ่านการเก็บรักษาผ่านไป โดยเมื่อทำการรักษานาน 6 วัน พบว่าสูตรที่ไม่มีการเติมสมุนไพร (สูตร 1) สูตรกระเทียม (สูตร 2) สูตรเติมใบหม่อน (สูตร 3) และสูตรที่เติมชา (สูตร 4) มีจำนวนเชื้อดังกล่าวสูงจนไม่สามารถ นับได้ที่ระดับความเจือจางต่ำที่สุด (10^{-5}) ที่ทำการวิเคราะห์ ในขณะที่สูตรที่มีการเติมกระชาย (สูตร 5) เมื่อเก็บรักษานาน 6 วัน ตรวจพบ *S. aureus* 1.89 log CFU/g เท่านั้น

สำหรับเชื้อ *B. cereus* พบว่าสูตรที่ไม่มีการเติมสมุนไพร (สูตร 1) และสูตรกระเทียม (สูตร 2) มีแนวโน้มการเพิ่มจำนวนของเชื้อสูง ไปจนถึงการเก็บรักษานาน 6 วัน จนไม่สามารถนับได้ที่ระดับความเจือจางต่ำสุดที่ทำการวิเคราะห์ ในขณะที่การเติมกระชาย (สูตร 5) ให้ผลในทางตรงกันข้าม กล่าวคือ ตรวจพบการปนเปื้อนเชื้อดังกล่าวต่ำ และอยู่รอดในจำนวนที่น้อยตลอดการเก็บรักษา โดยจำนวนที่ตรวจพบในวันที่ 0 คือ 1.78 log CFU/g และเพิ่มขึ้นเพียง 1.93 log CFU/g ในวันที่ 6

การตรวจสอบการปนเปื้อนและการอยู่รอดของเชื้อ *Salmonella* spp. พบว่าสูตรที่ไม่มีการเติมสมุนไพร (สูตร 1) ตั้งแต่เสร็จสิ้นกระบวนการผลิต ตลอดจนเก็บรักษาได้ 6 วัน ตรวจพบเชื้อดังกล่าว ในขณะที่สูตรกระเทียม (สูตร 2) และการเติมใบหม่อน (สูตร 3) เริ่มตรวจพบภายหลังการเก็บรักษานาน 4 วัน อย่างไรก็ตามพบว่าการเติมชา (สูตร 4) และกระชาย (สูตร 5) ตรวจไม่พบการปนเปื้อนของเชื้อ *Salmonella* spp. ตลอดระยะเวลาเก็บรักษา

ตารางที่ 4 การเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางด้านจุลินทรีย์ในผลิตภัณฑ์หมูปดปรุงรสในระหว่างการเก็บรักษา

ระยะเก็บรักษา (วัน)	ผลิตภัณฑ์หมูปดปรุงรส				
	สูตร 1	สูตร 2	สูตร 3	สูตร 4	สูตร 5
Total Bacteria Count (log CFU/g)					
0	4.29	3.48	4.13	4.02	3.05
2	5.23	5.23	4.54	4.47	4.22
4	7.11	7.13	7.06	5.79	4.87
6	>5	>5	>5	>5	5.23
<i>E. coli</i> Detected (MPN/g)					
0	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03
2	1.2	1.2	1.2	1.2	<0.03
4	4.6	2.4	2.4	2.4	<0.03
6	4.6	4.6	4.6	4.6	<0.03
<i>S. aureus</i> Count (log CFU/g)					
0	4.83	4.63	3.00	3.00	3.39
2	5.08	4.89	4.31	4.19	1.64
4	5.09	4.95	4.64	4.40	1.82
6	>5	>5	>5	>5	1.89
<i>B. cereus</i> Count (log CFU/g)					
0	2.00	2.05	2.1	2.00	1.78
2	2.60	2.41	3.05	2.20	1.89
4	5.46	5.11	4.61	2.29	1.90
6	>5	>5	5.82	3.34	1.93

ตารางที่ 4 การเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางด้านจุลินทรีย์ในผลิตภัณฑ์หมูปปรุงรสในระหว่างการเก็บรักษา (ต่อ)

ระยะเก็บรักษา (วัน)	ผลิตภัณฑ์หมูปปรุงรส				
	สูตร 1	สูตร 2	สูตร 3	สูตร 4	สูตร 5
<i>Salmonella</i> spp. (Detected/ Not Detected)					
0	Detected	ND	ND	ND	ND
2	Detected	ND	ND	ND	ND
4	Detected	Detected	Detected	ND	ND
6	Detected	Detected	Detected	ND	ND

หมายเหตุ: ข้อมูลด้วยค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ซ้ำ

ND (Not Detected) หมายถึง ไม่พบ หรือ ตรวจไม่พบจุลินทรีย์ในปริมาณที่วัดได้

สูตร 1 คือ สูตรควบคุม (Negative Control) ไม่มีการเติมสมุนไพร

สูตร 2 คือ ที่มีส่วนผสมของกระเทียม (3.65% w/w) ที่มีจำหน่ายแล้วในเชิงพาณิชย์

สูตร 3 คือ ที่มีการเติมใบหอมเพิ่ม (3.65% w/w)

สูตร 4 คือ ที่มีการเติมข่าเพิ่ม (3.65% w/w)

สูตร 5 คือ ที่มีการเติมกระชายเพิ่ม (3.65% w/w)

สรุปผลและการอภิปรายผล

จากการศึกษาผลของการเติมสมุนไพรไทย ได้แก่ ใบหอม ข่า และกระชาย เพื่อปรับปรุงคุณภาพและยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์หมูปปรุงรส เปรียบเทียบกับสูตรการผลิตที่ไม่มีการเติมสมุนไพร หรือสูตรควบคุม (สูตร 1) และสูตรการผลิตที่มีการเติมกระเทียม (สูตร 2) ซึ่งเป็นหนึ่งในวัตถุดิบที่มีใช้อย่างกว้างขวางในกลุ่มผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์แปรรูป และในเชิงพาณิชย์ (Kovarović et al., 2019) ซึ่งผลิตภัณฑ์นี้เป็นหนึ่งในผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์แปรรูปพร้อมปรุง (Ready to Cook) ภายใต้การเก็บรักษาแบบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 4 °C ผลการทดลอง แสดงให้เห็นว่าสมุนไพรแต่ละชนิดมีผลเฉพาะต่อคุณลักษณะทางเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ ซึ่งอาจสัมพันธ์กับองค์ประกอบทางเคมีและสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพในสมุนไพร เช่น ฟลาโวนอยด์ แทนนิน หรือกลุ่มน้ำมันหอมระเหย ที่ส่งผลโดยเฉพาะต่อคุณภาพทางด้านจุลินทรีย์ที่แตกต่างกัน กล่าวคือการเติมใบหอม (สูตร 3) ปริมาณ 3.65 % (w/w) หรือคิดเป็น 25 กรัม ช่วยทำให้ผลิตภัณฑ์เนื้อหมูปปรุงรส มีความแน่นและแข็งแรงขึ้น และดีกว่าการเติมสมุนไพรชนิดอื่น อาจเนื่องมาจากโปรตีนและเส้นใยในใบหอมมีบทบาทในการเสริมความหนาแน่นของโครงสร้างเนื้อและ การยึดเกาะระหว่างโมเลกุลโปรตีน ทำให้ผลิตภัณฑ์มีความแน่น แข็งแรง และคงรูปได้ดียิ่งขึ้น สอดคล้องกับ Zhang et al. (2024) ได้ชี้ให้เห็นว่าการเติมผงใบหอมในสูตรผลิตภัณฑ์เนื้อทางเลือกจากพืช ส่งผลต่อสมบัติเนื้อสัมผัส โดยเฉพาะความแข็ง และความเหนียวติดมือ โดยจะไปปรับปรุงคุณสมบัติเหล่านี้สูงขึ้น ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้เกิดจากโครงสร้างเนื้อที่มีความหนาแน่นและการเชื่อมประสานกันดีขึ้นของเมทริกซ์โปรตีนและเส้นใยในผลิตภัณฑ์ ช่วยให้จับน้ำและเสริมแรงยึดเกาะของอนุภาคได้ดียิ่งขึ้น ส่งผลให้โครงสร้างแข็งแรงและเหนียวมากขึ้น ในกรณีของความยืดหยุ่น ในขณะที่การเติมกระชาย (สูตร 5) ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีความยืดหยุ่น (Stringiness) สูงขึ้น อาจมีความสัมพันธ์เกี่ยวข้องกับองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติของสารพฤกษเคมี โดยเฉพาะสารประกอบฟีนอลิกกับโปรตีนในเนื้อหมู ทำให้เกิดโครงสร้างเนื้อที่แข็งแรงขึ้นผ่านกลไกการเกิดพันธะระหว่างโปรตีนและฟีนอลิก (Protein-Polyphenol Interaction) ที่มีคุณสมบัติเป็นตัวช่วยในการเกิดเจล หรือเสริมโครงสร้างเนื้อสัตว์ให้มีความยืดหยุ่น (Shahidi and Dissanayaka, 2023) รวมถึงความสัมพันธ์ทางอ้อม กล่าวคือ กระชายมีสารฟีนอลิกและน้ำมันหอมระเหยซึ่งมีฤทธิ์ต้านแบคทีเรีย ช่วยยับยั้งหรือควบคุมการเจริญของแบคทีเรียปนเปื้อนในผลิตภัณฑ์ ส่งผลให้การเสื่อมสภาพของโปรตีนและไขมันช้าลง โครงสร้างโปรตีนและความชุ่มชื้นคงอยู่ได้นาน จึงสามารถคงความแน่น (Hardness) และความยืดหยุ่น (Springiness) ของผลิตภัณฑ์

ตลอดระยะเวลาเก็บรักษา (Soikam et al., 2024) แสดงให้เห็นว่ากระชายอาจมีศักยภาพในการคงคุณลักษณะด้านความยืดหยุ่นของเนื้อสัมผัสได้ดี ทั้งนี้คุณสมบัติดังกล่าวมีความสำคัญต่อการยืดเนื้อและความรู้สึกขณะเคี้ยวของผู้บริโภค นอกจากคุณภาพทางด้านกายภาพที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อมีการประยุกต์ใช้สมุนไพรทั้ง 3 ชนิดแล้ว ยังได้ข้อสรุปที่แสดงให้เห็นว่ามีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสีทั้งค่าความสว่าง (L^*) เฉดสีแดง (a^*) และเฉดสีเหลือง (b^*) แตกต่างกัน อย่างไรก็ตาม การเติมกระชาย (สูตร 5) สามารถรักษาค่าความสว่างได้ดีที่สุดตลอดระยะเวลาการเก็บรักษานาน 6 วัน อีกทั้งผลิตภัณฑ์ยังคงมีค่าที่เฉดสีแดง (a^*) คงไว้ได้ตลอดการเก็บรักษา ผลเหล่านี้สอดคล้องกับการทดสอบเติมกระชายในผลิตภัณฑ์ Pork Tteokgalbi พบว่าจะไปช่วยเสริมให้มีคาร์โบไฮเดรต มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระจากโพลีฟีนอลและฟลาโวนอยด์สูงขึ้น เหล่านี้จะไปมีผลต่อการปรับค่าความสว่าง (L^*) ให้ลดลง พร้อมเพิ่มค่า b^* (เฉดเหลือง) ของสีเนื้อ รวมถึงสารเหล่านี้มีฤทธิ์ต้านออกซิเดชัน จะไปช่วยชะลอการเปลี่ยนแปลงของไมโอโกลบินในเนื้อ (Lee et al., 2022) นอกจากนี้ (Soikam et al., 2024) ชี้ให้เห็นว่าในผลิตภัณฑ์มีตบอที่เติมน้ำมันหอมระเหย จากกระชายจะช่วยคงค่าความสว่าง (L^*) และค่าเฉดสีแดง (a^*) สูงขึ้นตามระดับการเติม นอกจากนี้การเติมสมุนไพรทั้ง 3 ชนิด ยังส่งต่อศักยภาพในการช่วยชะลอการเปลี่ยนแปลงของค่า pH และยืดอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยพิจารณาให้เป็นไปตามมาตรฐานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมสุกรสด แช่เย็นและเยือกแข็ง (มอก.1197-2536) และเนื้อสุกร มาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ (มกอช. 6000-2547) (Thai Industrial Standards Institute, 1993; National Bureau of Agricultural Commodity and Food Standards, 2004) ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการเติมใบหม่อน ข่า และกระชายมีผลต่อการลดลงของค่า pH อย่างต่อเนื่องตลอดการเก็บรักษา 6 วัน อันเป็นผลจากการเจริญของจุลินทรีย์และกระบวนการเมตาบอลิซึมที่สร้างกรดอินทรีย์ในผลิตภัณฑ์ (Dave and Ghaly, 2011) โดยเฉพาะสูตรที่เติมกระชาย (สูตร 5) ที่มีความสามารถในการชะลอการลดลงของ pH สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์จุลินทรีย์ ที่พบว่าควบคุมจำนวน Total Bacteria ให้อยู่ต่ำกว่า $6 \log \text{CFU/g}$ และยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ก่อโรค ได้แก่ *S. aureus* และ *B. cereus* ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ขณะเดียวกันยังไม่พบการปนเปื้อนของ *Salmonella* spp. ตลอดการเก็บรักษา ซึ่งต่างจากสูตรที่ไม่มีสมุนไพรหรือเติมกระเทียมที่มีการเพิ่มจำนวนจุลินทรีย์อย่างรวดเร็ว และตรวจพบเชื้อก่อโรครภายใน 4 วัน ซึ่งสามารถอธิบายกลไกความสัมพันธ์ที่อาจเกี่ยวข้องกับสารออกฤทธิ์ในสมุนไพรกระชาย มีสารโพลีฟีนอล ฟลาโวนอยด์ และน้ำมันหอมระเหยที่มีฤทธิ์ต้านจุลินทรีย์ สามารถยับยั้งการเจริญของเชื้อที่ทำให้เสื่อมเสียและเชื้อก่อโรค เช่น *E. coli* *S. aureus* และ *B. cereus* (Phanthong et al., 2013; Zainin et al., 2013; Teethaisong et al., 2018) จึงไปมีผลต่อการลดการสร้างกรดอินทรีย์จากการเมตาบอลิซึมของแบคทีเรีย ส่งผลให้ค่า pH ลดลงช้ากว่ากลุ่มควบคุมและช่วยรักษาโครงสร้างโปรตีนและเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ในระหว่างการเก็บรักษา ดังนั้นการเติมกระชายในการลดความเสี่ยงจากการปนเปื้อนของเชื้อก่อโรคจากแบคทีเรียก่อโรคในอาหารได้อย่างมีประสิทธิภาพ เป็นไปตามมาตรฐานมอก.1197-2536 และตามประกาศกรมวิทยาศาสตร์การแพทย์เรื่องเกณฑ์คุณภาพ ทางจุลชีววิทยาของอาหารและภาชนะสัมผัสอาหาร ฉบับที่ 3 (Thai Industrial Standards Institute, 1993; Department of Medical Sciences, 2017) กล่าวคือ ตรวจไม่พบเชื้อ *Salmonella* spp. และ *E. coli* (น้อยกว่า 100 MPN/g) และสามารถยับยั้งควบคุมการเจริญ และ/หรืออยู่รอดของ *S. aureus* และ *B. cereus* ไม่เกิน $2.00 \log \text{CFU/g}$ ตลอดระยะเวลาการเก็บรักษานาน 6 วัน ซึ่งสอดคล้องกับรายงานก่อนหน้านี้ที่พบว่าสารประกอบฟีนอลิกและน้ำมัน หอมระเหยในกระชายมีฤทธิ์ต้านจุลชีพ (Soikam et al., 2024) โดยเฉพาะกับแบคทีเรียแกรมบวกและแกรมลบ จึงเหมาะสมที่จะนำกระชายไปใช้เป็นส่วนผสมทางเลือกในการเพิ่มความปลอดภัยและยืดอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์หมูปดปรุงรส รวมถึงการนำไปพัฒนาใช้ในผลิตภัณฑ์อื่น ๆ ตลอดจนการต่อยอดทดสอบการยอมรับในกลุ่มผู้บริโภคในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ขอขอบคุณคณะนวัตกรรมและเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา ที่ให้ความอนุเคราะห์ในด้านความรู้และด้านเครื่องมืออุปกรณ์ในการปฏิบัติการวิจัย คณะผู้วิจัยขอขอบคุณนางสาวปณิพร ทองครบุรี ที่ช่วยสนับสนุนแนะนำวิธีการพื้นฐานในการเตรียมผลิตภัณฑ์หมูปด

References

- Aziz, I.M., Alfuraydi, A.A., Almarfadi, O.M., Aboul-Soud, M.A., Alshememry, A.K., Alsaleh, A.N. and Almajhdi, F.N. (2024). Phytochemical Analysis, Antioxidant, Anticancer, and Antibacterial Potential of *Alpinia galanga* (L.) Rhizome. *Heliyon*, 10(17), <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e37196>
- Bacteriological Analytical Manual (BAM). (2001). *U.S. Food and Drug Administration* (8thed). Center for Food Safety and Applied Nutrition, U.S. FDA. <https://www.fda.gov/food/laboratory-methods-food/bacteriological-analytical-manual-bam>
- Brewer, M.S. (2011). Natural Antioxidants: Sources, Compounds, Mechanisms of Action, and Potential Applications. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 10(4), 221-247. <https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2011.00156.x>
- Chanthabal, A. and Mahidsanan, T. (2023). Response Surface Methodology for Evaluation of Blanching Effects on Antioxidant Capacity and Physical Quality of Ground Pork Product Treated with Mulberry Leaves. *Asian Health, Science and Technology Reports*, 31(1), 74-81. <https://ph03.tci-thaijo.org/index.php/ahstr/article/view/1303/912>
- Cui, H., Lu, T., Wang, M., Zou, X., Zhang, Y., Yang, X., Dong, Y. and Zhou, H. (2019). Flavonoids from *Morus alba* L. Leaves: Optimization of Extraction by Response Surface Methodology and Comprehensive Evaluation of Their Antioxidant, Antimicrobial, and Inhibition of α -Amylase Activities through Analytical Hierarchy Process. *Molecules*, 24(13), 2398. <https://doi.org/10.3390/molecules24132398>
- Dave, D. and Ghaly, A.E. (2011). Meat Spoilage Mechanisms and Preservation Techniques: A Critical Review. *American Journal of Agricultural and Biological Sciences*, 6(4), 486-510. <https://doi.org/10.3844/ajabssp.2011.486.510>
- Department of Medical Sciences. (2017). *Microbiological Quality Standards for Foods and Food-Contact Utensils* (3rded). Bangkok: Ministry of Public Health. (in Thai)
- Djordjević, J.A.S.N.A., Bošković, M., Lazić, I.B., Djordjević, V.E.S.N.A., Baltić, T., Laudanović, M. and Baltić, M.Ž. (2019). Spoilage-Related Bacteria of Pork and Beef Minced Meat under Vacuum and Modified Atmosphere. *Romanian Biotechnological Letters*, 24(4), 658-668. <http://doi.org/10.25083/rbl/24.4/658.668>
- Falowo, A.B., Fayemi, P.O. and Muchenje, V. (2014). Natural Antioxidants Against Lipid-Protein Oxidative Deterioration in Meat and Meat Products: A Review. *Food Research International*, 64, 171-181. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.06.022>
- Feng, P., Weagant, S.D., Grant, M.A., Burkhardt, W., Shellfish, M. and Water, B. (2002). BAM: Enumeration of *Escherichia coli* and the Coliform Bacteria. In: *Bacteriological Analytical Manual*, US Food and Drug Administration, Washington DC.
- Gunasena, D.K., Jayashantha, E. and Senevirathne, N. (2021). Chitosan Improves the Shelf Life of Domestic Chicken (*Gallus gallus*) Eggs Against *Staphylococcus aureus* Contaminations. *European Journal of Biology and Biotechnology*, 2(1), 1-9. <https://doi.org/10.24018/ejbio.2021.2.1.139>
- Harper, N.M., Getty, K.J.K, Schmidt, K.A., Nutsch, A.L. and Linton, R.H. (2011). Comparing the Mannitol-Egg Yolk-Polymyxin Agar Plating Method with the Three-Tube Most-Probable-Number Method for Enumeration of *Bacillus Cereus* Spores in Raw and High-Temperature, Short-Time Pasteurized Milk. *Journal of Food Protection*, 74(3), 461-464. <https://doi.org/10.4315/0362-028X.JFP-10-340>

- Kernberger-Fischer, I., Kehrenberg, 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. <https://doi.org/10.1007/s13197-017-2768-4>
- Kovarovič, J., Bystricka, J., Vollmannova, A., Toth, T. and Brindza, J. (2019). Biologically Valuable Substances in Garlic (*Allium sativum* L.) -A Review. *Journal of Central European Agriculture*, 20(1), 292-304. <https://doi.org/10.5513/JCEA01/20.1.2304>
- Lanzotti, V. (2006). The Analysis of Onion and Garlic. *Journal of Chromatography A*, 1112(1-2), 3-22. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2005.12.016>
- Lee, J.J., Choi, J. and Ha, J.H. (2022). Physicochemical and Storage Characteristics of Pork Tteokgalbi Treated with *Boesenbergia pandurata* (Roxb.) Powder. *Applied Sciences*, 12(5), <https://doi.org/10.3390/app12052425>
- Mansur, A.R., Park, J.H. and Oh, D.H. (2016). Predictive Model for Growth of *Staphylococcus aureus* on Raw Pork, Ham, and Sausage. *Journal of Food Protection*, 79(1), 132-137. <https://doi.org/10.4315/0362-028X.JFP-15-227>
- Migdał, W., Różycki, M., Mucha, A., Tyra, M., Natonek-Wisniewska, M., Walczycka, M., Kulawik, P., Węsierska, E., Zając, M., Tkaczewska, J., Migdał, Ł. and Krępa-Stefanik, K. (2020). Meat Texture Profile and Cutting Strength Analyses of Pork Depending on Breed and Age. *Annals of Animal Science*, 20(2), 677-692. <http://doi.org/10.2478/aoas-2019-0085>
- National Bureau of Agricultural Commodity and Food Standards. (2004). *Pork*. Thai Agricultural Commodity and Food Standard TACFS 6000-2004. <https://certify2.dld.go.th/wp-content/uploads/2025/06/01-aw-law.pdf> (in Thai)
- Pal, A. and Marshall, D.L. (2009). Comparison of Culture Media for Enrichment and Isolation of *Salmonella* Spp. from Frozen Channel Catfish and Vietnamese Basa Fillets. *Food Microbiology*, 26(3), 317-319. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2008.12.003>
- Papuc, C., Predescu, C.N., Tudoreanu, L., Nicorescu, V. and Gâjâilă, I. (2018). Comparative Study of the Influence of Hawthorn (*Crataegus monogyna*) Berry Ethanolic Extract and Butylated Hydroxyanisole (BHA) on Lipid Peroxidation, Myoglobin Oxidation, Consistency and Firmness of Minced Pork During Refrigeration. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 98(4), 1346-1361. <https://doi.org/10.1002/jsfa.8599>
- Phanthong, P., Lomarat, P., Chomnawang, M.T. and Bunyapraphatsara, N. (2013). Antibacterial Activity of Essential Oils and Their Active Components from Thai Spices Against Foodborne Pathogens. *ScienceAsia*, 39, 472-476. <http://doi.org/10.2306/scienceasia1513-1874.2013.39.472>
- Rattanahemboot, W., Tubglang, R., Charoensuk, K. and Nonmuang, W. (2022). Effect of Herbal Species on Antioxidant Activities and Sensory Quality of Cardamom (*Amomum krervanh* Pierre) Mixed Herbs Tea. *RMUTI JOURNAL Science and Technology*, 15(3), 96-106. <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/rmutijo/article/view/248886/170149>
- Scott, M.E., Mbandi, E., Buchanan, S., Abdelmajid, N., Gonzalez-Rivera, C., Hale, K.R., Jacobsen, L., Webb, J., Green, J. and Dolan, P. (2020). *Salmonella* and Shiga Toxin-Producing *Escherichia coli* in Products Sampled in the Food Safety and Inspection Service Raw Pork Baseline Study. *Journal of Food Protection*, 83(3), 552-559. <https://doi.org/10.4315/0362-028X.JFP-19-360>

- Shahidi, F. and Dissanayaka, C.S. (2023). Phenolic-Protein Interactions: Insight from In-Silico Analyses - A Review. *Food Production, Processing and Nutrition*, 5, 1-21. <http://doi.org/10.1186/s43014-022-00121-0>
- Soikam, P., Rachtanapun, C., Suriyarak, S., Weiss, J. and Gibis, M. (2024). Effects of Fingerroot (*Boesenbergia pandurata*) Oil on Microflora as an Antimicrobial Agent and on the Formation of Heterocyclic Amines in Fried Meatballs. *Applied Sciences*, 14, 712. <https://doi.org/10.3390/app14020712>
- Sopitthummakhun, K., Rattanasinganchan, P., Nimmanee, P., Paungmoung, P., Moonthiya, P. and Thitapakorn, V. (2021). Antioxidant Capacity, Antibacterial Activity, and Cell Cytotoxicity in Cholangiocarcinoma (CCA) from *Boesenbergia rotunda* (L.) Mansf. *Asia-Pacific Journal of Science and Technology*, 26(2), 1-10. <https://so01.tci-thaijo.org/index.php/APST/article/view/235413/167177>
- Thai Industrial Standards Institute. (1993). *Industrial Standard for Fresh, Chilled, and Frozen Pork* (TIS 1197-1993). Bangkok: Ministry of Industry. (in Thai)
- Teethaisong, Y., Pimchan, T., Srisawat, R., Hobbs, G. and Eumkeb, G. (2018). *Boesenbergia rotunda* (L.) Mansf. Extract Potentiates the Antibacterial Activity of Some β -Lactams Against β -Lactam-Resistant Staphylococci. *Journal of Global Antimicrobial Resistance*, 12, 207-213. <https://doi.org/10.1016/j.jgar.2017.10.019>
- Yuwang, T., Intarapichet, K.O., Jantama, K. and Lautenchalager, R. (2019). Effects of Thai Herb Extracts in Combination with High Pressure Treatment on the Microbial and Physicochemical Quality of Fresh Pork. *RMUTI JOURNAL Science and Technology*, 12(3), 13-33. <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/rmutijo/article/view/193561/144159>
- Zainin, N.S., Lau, K.Y., Zakaria, M., Son, R., Razis, A.A. and Rukayadi, Y. (2013). Antibacterial Activity of *Boesenbergia rotunda* (L.) Mansf. A. Extract Against *Escherichia coli*. *International Food Research Journal*, 20(6), 3319-3323. <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/pdf/10.5555/20143047548>
- Zhang, Z.A., Xun, X.M., Herman, R.A., Zhang, Z.P., Yan, C.H., Gong, L.C. and Wang, J. (2024). Mulberry (*Morus alba* L.) Leaf Powder Modified the Processing of Meat Alternatives: Principal Component Analysis from Apparent Properties to Chemical Bonds. *Food Chemistry*, 450, <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.139318>

การลดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในฟาร์มเลี้ยงไก่ด้วยระบบชีวภาพ

Reduction of Hydrogen Sulfide in Chicken Farm by Biological Systems

ครรชิต เงินคำคง^{1*} ศิริประภา ชัยเนตร¹ นันทน์ภัส เงินคำคง² ชินานาฏ วิทยาประการ³ และรุ่งนภา เขียววิจิตร¹
Khanchit Ngoenkhamkhong^{1*} Siraprapa Chainetr¹ Nannaphat Ngoenkhamkhong²
Chinanat Withayaprapakorn³ and Rungnapha Khiewwiji¹

Received: June 26, 2025; Revised: September 11, 2025; Accepted: September 11, 2025

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของระบบบำบัดกลิ่นแบบชีวภาพในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในฟาร์มเลี้ยงไก่แบบกึ่งปิด โดยได้ออกแบบและดำเนินการติดตั้งระบบให้สามารถควบคุมปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้น และความเร็วลม ให้อยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมตามข้อกำหนดของการเลี้ยงสัตว์ปีก ผลการศึกษาตลอดระยะเวลา 90 วัน พบว่า ระบบสามารถกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้สูงถึงร้อยละ 94.63 ± 0.32 ส่วนคุณภาพน้ำเสียของระบบบำบัดที่ใช้สเปรย์ร่วมกับวัสดุตัวกลางชนิดโครอสโม่มีเดียมีประสิทธิภาพในการลดค่าน้ำเสีย ได้แก่ ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS) ค่าความต้องการออกซิเจนทางชีวภาพ (BOD) ค่าความต้องการออกซิเจนทางเคมี (COD) ไนเตรต (NO_3^-) และซัลเฟต (SO_4^{2-}) ลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยจุลินทรีย์ในระบบมีบทบาทสำคัญในการเปลี่ยนก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เป็นซัลเฟต ส่งผลให้กลิ่นเหม็นลดลงอย่างชัดเจน ส่งผลให้สารอินทรีย์ในระบบบำบัดมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าน้ำเสียที่ผ่านกระบวนการบำบัดสามารถนำกลับมาใช้ภายในระบบได้โดยไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของระบบบำบัดกลิ่นแบบชีวภาพในการบริหารจัดการกลิ่นและน้ำเสียในฟาร์มสัตว์ได้อย่างมีประสิทธิภาพและอย่างยั่งยืน

คำสำคัญ : ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์; ฟาร์มไก่; ระบบชีวภาพ

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

² คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

³ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

¹ Faculty of Engineering, Rajamagala University of Technology Lanna

² Faculty of Agro-Industry, Chiang Mai University

³ Faculty of Science and Agricultural Technology, Rajamagala University of Technology Lanna

* Corresponding Author, Tel. 08 6184 7248, E - mail: kunchit2516@rmutl.ac.th

Abstract

This study aims to assess the efficiency of a biofiltration system in order to remove the hydrogen sulfide gas in a semi-enclosed poultry farm. The system was designed and installed to maintain key the environmental factors, which were temperature, humidity and air velocity within the optimal ranges according to the poultry farming standards. The results over a 90-day observation period showed that the system could achieve a hydrogen sulfide removal efficiency of as high as 94.63 ± 0.32 %. Regarding the wastewater quality, the treatment system using a spray mechanism in combination with cross flow media resulted in a continuously decreasing in the wastewater quality parameters including TSS, BOD, COD, NO_3^- and SO_4^{2-} . Moreover, the dominant microbial populations in the system were identified, that were microorganisms in the system play a crucial role in converting hydrogen sulfide gas into sulfate, resulting in a significant reduction in malodors. These microbial activities contributed to a continuous decline in organic pollutants in the treatment system. The findings indicate that the treated wastewater can be safely reused within the system without causing adverse environmental impacts. This study highlights the potential of biofiltration system as an effective and sustainable solution for the odor and wastewater management in livestock farming.

Keywords: Hydrogen Sulfide; Chicken Farm; Biological Systems

บทนำ

การเลี้ยงสัตว์ในประเทศได้ขยายตัวอย่างรวดเร็ว มีทั้งระบบการเลี้ยงแบบฟาร์ม ขนาดใหญ่ ขนาดกลางและระบบเลี้ยงแบบรายย่อย ปัจจุบันการเลี้ยงสัตว์กระจายอยู่ตามชนบท โดยเฉพาะการเลี้ยงแบบรายย่อย ซึ่งส่วนใหญ่อยู่ในพื้นที่ของชุมชน ส่งผลให้เกิดมลภาวะทางสิ่งแวดล้อมทั้งภายในบริเวณฟาร์ม พื้นที่เลี้ยงสัตว์และชุมชนใกล้เคียงเป็นอย่างมาก เช่น น้ำที่เกิดจากการล้างทำความสะอาดอุปกรณ์ภายในเล้า สิ่งขับถ่ายทั้งปัสสาวะ มูลไก่และน้ำเสียที่เกิดจากการฉีดล้างทำความสะอาด (Prombaiyen, 2025) นอกจากนั้นแล้วกลิ่นอีกส่วนหนึ่งจะออกมาพร้อมกับพัดลมท้ายเล้า ซึ่งเป็นพัดลมระบายอากาศในระบบโรงเรือนแบบปิด ลมเหล่านั้นจะพัดพากลิ่นเหม็น โดยเฉพาะบริเวณในส่วนของท้ายเล้า ซึ่งเป็นทิศทางลมที่เกิดจากการระบายจะนำกลิ่นที่หลงเหลือภายในโรงเรือนออกมาด้วย ซึ่งนำพาเอากลิ่นที่เกิดจากมูลไก่ไข่ ทั้งก๊าซแอมโมเนียและก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ก๊าซเหล่านี้จะมีผลกระทบต่อการเจริญเติบโตและการให้ผลผลิตของไก่ไข่ รวมทั้งสุขภาพของผู้ปฏิบัติงานในโรงเรือนนั้นด้วย การระบายอากาศออกช่วยให้ก๊าซต่าง ๆ ภายในโรงเรือนลดลง แต่มลอากาศดังกล่าวหากปล่อยออกโดยไม่ได้รับการบำบัดลดกลิ่นเหม็นลงจะทำให้เกิดผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมทางอากาศทั้งภายในฟาร์มเองและชุมชนลุ่มข้าง หากไม่ได้รับการแก้ไขอย่างถูกต้องปัญหาอาจทวีความรุนแรงจนส่งผลให้ฟาร์มไม่สามารถประกอบกิจการในพื้นที่ปัจจุบันต่อไปได้ (Price, 2023)

ปัจจุบันการบำบัดกลิ่นที่ใช้มีหลายวิธี ได้แก่ วิธีทางเคมี เช่น การสครับด้วยเคมี การใช้ความร้อนทำปฏิกิริยาและการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นต้น (Panich et al., 2023) วิธีทางกายภาพ เช่น การควบแน่นและการดูดซับ เป็นต้น วิธีทางชีวภาพ เช่น การใช้วัสดุตัวกรองแบบชีวภาพและการสครับด้วยชีวภาพ (Sirianuntapiboon and Chuamkaew, 2007; Shareefdeen and Singh, 2008; Pudi et al., 2022) ซึ่งการบำบัดกลิ่นด้วยวิธีการทางชีวภาพนั้น ได้รับการยอมรับและสนใจศึกษามากขึ้น เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูง ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาต่ำ เทคโนโลยีไม่ซับซ้อน และไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจึงเป็นที่ยอมรับอย่างกว้างขวาง วิธีการบำบัดกลิ่นที่ดีที่สุดวิธีหนึ่ง คือ การบำบัดทางชีวภาพที่มีประสิทธิภาพการกำจัดของระบบนี้อยู่ระหว่างร้อยละ 85 - 99 (Potivichayanon, 2005)

ดังนั้นในการศึกษาวิจัยจึงเลือกที่จะพัฒนาระบบบำบัดกลิ่นแบบชีวภาพ โดยวิธีทางชีวภาพเป็นการใช้จุลินทรีย์ที่ได้จากระบบบำบัดน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนของไฮโดรเจนซัลไฟด์จะมีความสามารถในการกำจัดกลิ่นเกิดจากไฮโดรเจนซัลไฟด์ในสภาวะที่มีออกซิเจนซึ่งจะถูกเปลี่ยนรูปและกลายเป็นสารประกอบซัลเฟต ดังสมการที่ (1) และ (2) (Oyarzun et al., 2003)



จากเหตุผลข้างต้นทำให้คณะนักวิจัยร่วมกับสถานประกอบการได้ออกแบบระบบบำบัดกลิ่นในรูปก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ออกมาจากการระบายอากาศในระบบโรงเรือนเลี้ยงไก่ไข่แบบปิด โดยใช้กระบวนการทางชีวภาพไม่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการระบายอากาศภายในโรงเรือน ระบบบำบัดกลิ่นในรูปของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์แบบชีวภาพมีศักยภาพในการเป็นต้นแบบของเทคโนโลยีที่สามารถประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดการปัญหามลพิษทางอากาศ พร้อมทั้งส่งเสริมการดำเนินงานที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม การพัฒนาระบบบำบัดกลิ่นในรูปก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์แบบชีวภาพดังกล่าว ไม่เพียงช่วยลดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมจากกระบวนการผลิต แต่ยังเป็นแนวทางที่สามารถนำไปสู่การพัฒนาอุตสาหกรรมอย่างยั่งยืนในระยะยาว

วิธีดำเนินการวิจัย

1. ขอบเขตการวิจัย

1.1 งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพของระบบบำบัดกลิ่นในรูปของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์แบบชีวภาพ กรณีศึกษา บริษัท ฟาร์มครูแดง จำกัด

1.2 พื้นที่ดำเนินการวิจัย คือ บริษัท ฟาร์มครูแดง จำกัด ซึ่งเป็นฟาร์มเลี้ยงไก่ไข่ขนาดกลางที่มีรอบการเลี้ยงประมาณ 80 สัปดาห์ ฟาร์มดังกล่าวมีจำนวนไก่ไข่ที่เลี้ยงอยู่รวมทั้งสิ้น 7,000 ตัวต่อโรงเรือน และได้มีการติดตั้งระบบบำบัดกลิ่นในรูปก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์แบบชีวภาพไว้บริเวณส่วนท้ายของโรงเรือน เพื่อทำการศึกษาความสามารถในการลดกลิ่นโดยเฉพาะกลิ่นในรูปของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ซึ่งเป็นกลิ่นหลักที่เกิดจากกระบวนการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุในมูลสัตว์ ขอบเขตของการวิจัยจะมุ่งเน้นการวัดผลด้านคุณภาพอากาศก่อนและหลังผ่านระบบบำบัดกลิ่นในรูปก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์แบบชีวภาพ รวมถึงการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบในสภาวะการใช้งานจริง เพื่อประเมินศักยภาพของระบบบำบัดกลิ่นในรูปก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์แบบชีวภาพ ในการนำไปประยุกต์ใช้กับฟาร์มปศุสัตว์ในบริบทที่คล้ายคลึงกัน

1.3 โรงเรือนมีความกว้าง 8.20 เมตร โรงเรือนยาว 67.30 เมตร

1.4 โดยทำการศึกษาเดือนมกราคม - พฤษภาคม พ.ศ. 2568

2. สารเคมี

สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ทุกชนิดเป็น Analytical Reagent (AR) ในการวิเคราะห์พารามิเตอร์น้ำเสียในบ่อจุลินทรีย์และวิเคราะห์หาจุลินทรีย์ ได้แก่ $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$, H_2SO_4 , Ag_2SO_4 , HgSO_4 , $\text{C}_{10}\text{H}_6\text{Na}_2\text{O}_6\text{S}_2$, $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, KH_2PO_4 , K_2HPO_4 , $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, CaCl_2 , $\text{FeCl}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$, $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$, KNO_3 , $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, $\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_2$, Na_2SO_4 , BaCl_2 , $\text{C}_{12}\text{H}_{25}\text{NaO}_4\text{S}$, HCl และ Plate Count Agar (PCA)

3. จุลินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษา

ใช้น้ำเสียจากระบบบำบัดขั้นหลังของบริษัท ฟาร์มครูแดง จำกัด มาทำการเพาะเลี้ยงเพื่อเพิ่มปริมาณโดยใช้ น้ำเสีย 1,000 ลิตร ชั้นแรกเติมกากน้ำตาล 10 กิโลกรัม และทำการเพาะเลี้ยง โดยสังเกตจะมีฟองอากาศขึ้น และมีฝ้าขึ้นบริเวณผิวหน้าของถังในการขยายเชื้อ (ประมาณ 5 วัน) เป็นจุลินทรีย์เริ่มต้นในการเดินระบบ (Chuenban, 2017)

4. ศึกษาคุณภาพน้ำเสียในบ่อจุลินทรีย์

โดยดำเนินการเก็บตัวอย่างน้ำเสียจากบ่อจุลินทรีย์ ซึ่งเป็นน้ำที่ใช้ในการฉีดพ่นให้ความชื้นแก่ตัวกลางยัดเกาะของจุลินทรีย์ โดยน้ำเสียดังกล่าวจะไหลเวียนกลับลงมายังบ่อจุลินทรีย์เพื่อใช้หมุนเวียนในระบบอย่างต่อเนื่อง ตัวอย่างน้ำเสียที่เก็บรวบรวมจะถูกนำไปวิเคราะห์คุณภาพน้ำโดยใช้พารามิเตอร์หลัก ได้แก่ ค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS) ค่าความต้องการออกซิเจนทางชีวภาพ (BOD) ค่าความต้องการออกซิเจนทางเคมี (COD) ไนเตรต (NO_3^-) และซัลเฟต (SO_4^{2-}) (APHA, AWWA and WEF, 2007) โดยทำการวัดตัวอย่าง 3 ซ้ำ และตรวจวัดทุก ๆ 5 วัน เป็นระยะเวลา 90 วัน เพื่อประเมินแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มข้นของสารมลพิษในน้ำเสียตลอดระยะเวลาการศึกษา ข้อมูลที่ได้จากการศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินระดับความสกปรกของน้ำเสียในระบบและใช้เป็นแนวทางในการเฝ้าระวัง ป้องกันหรือออกแบบกระบวนการบำบัดเพิ่มเติมในกรณีที่น้ำเสียอาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ตามน้ำเสียจากระบบการดังกล่าวยังไม่มีมีการปล่อยออกสู่ภายนอก เนื่องจากมีการหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ภายในระบบ จึงอยู่ในขอบเขตการควบคุมและไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมภายนอก และเป็นไปตามประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดมลพิษ ประเภทการเลี้ยงสุกร (ประเภท ค) และเรื่อง กำหนดให้การเลี้ยงสุกรเป็นแหล่งกำเนิดมลพิษที่จะต้องถูกควบคุม การปล่อยน้ำเสียลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะหรือออกสู่สิ่งแวดล้อม ตามพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2564

5. ศึกษาตรวจวัดคุณภาพอากาศภายในโรงเรือนหลังการติดตั้งระบบบำบัดกลิ่นแบบชีวภาพ

โดยทำการตรวจวัดคุณภาพอากาศภายในโรงเรือนเลี้ยงไก่ไข่ หลังการติดตั้งระบบบำบัดกลิ่นในรูปแบบก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์แบบชีวภาพ โดยการตรวจวัดอากาศในลักษณะ Location-Specific Sampling เพื่อประเมินสภาพแวดล้อมภายในโรงเรือนอย่างต่อเนื่อง โดยทำการวัดตัวอย่าง 3 ซ้ำ และเก็บข้อมูลทุก ๆ 5 วัน เป็นระยะเวลา 90 วัน พารามิเตอร์ที่ใช้ในการประเมินคุณภาพอากาศ ได้แก่ การวัดความเร็วลม (Tasto 410i; Germany) อุณหภูมิ (Testo 925; Germany) ความชื้น (4IN1 Multi-Function Environment Meter; Standard ST-8820 Environment Mete; USA) และความเข้มข้นของกลิ่นในรูปแบบของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Biogas 5000 Geotech; UK) ข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดถูกนำไปเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานฟาร์มเลี้ยงสัตว์ปีก ตามประกาศของกรมปศุสัตว์ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ (Prombaiyen, 2025) เพื่อประเมินว่าอากาศภายในโรงเรือนยังอยู่ในระดับที่ปลอดภัยและไม่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพสัตว์และแรงงานภายในฟาร์มหลังการติดตั้งระบบบำบัดกลิ่น

6. ศึกษาประสิทธิภาพของระบบบำบัดกลิ่นในรูปแบบของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์แบบชีวภาพ

โดยทำการประเมินประสิทธิภาพของระบบบำบัดกลิ่นในรูปแบบของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์แบบชีวภาพ โดยดำเนินการตรวจวัดความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ทั้งก่อนเข้าและหลังออกจากระบบบำบัด เพื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในระบบบำบัดกลิ่น โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ห้องค์ประกอบก๊าซชนิดพกพา Biogas 5000 Geotech (UK) ซึ่งเหมาะสมสำหรับการวัดก๊าซในสภาวะแวดล้อมของฟาร์ม โดยทำการวัดตัวอย่าง 3 ซ้ำ และเก็บข้อมูลทุก ๆ 5 วัน เป็นระยะเวลา 90 วัน ติดต่อกัน ค่าที่ได้จากการตรวจวัดจะถูกนำไปคำนวณหาประสิทธิภาพการลดกลิ่นในรูปแบบของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์แบบชีวภาพโดยใช้ดังสมการที่ (3)

$$\text{ประสิทธิภาพการลดกลิ่นในรูปแบบก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (ร้อยละ)} = (C_{in} - C_{out}) / C_{in} \times 100 \quad (3)$$

เมื่อ

C_{in} = ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ก่อนเข้าสู่ระบบบำบัด (ppm)

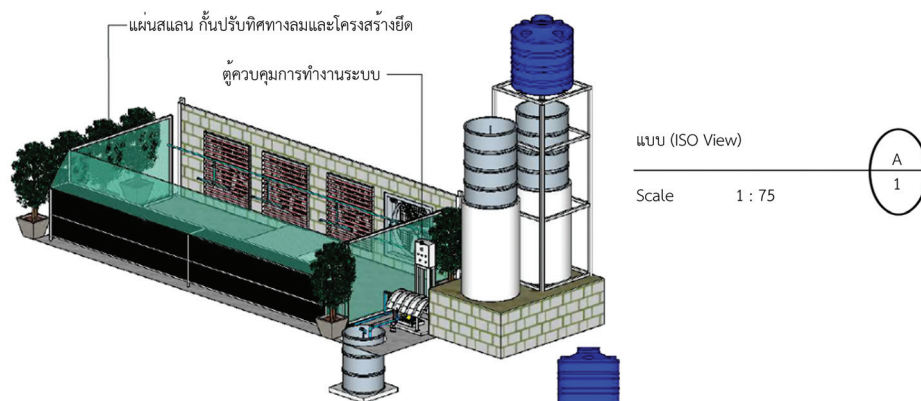
C_{out} = ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกจากระบบบำบัด (ppm)

7. ศึกษาการเจริญเติบโตของจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดในระบบบำบัดกลิ่นในรูปของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์แบบชีวภาพ

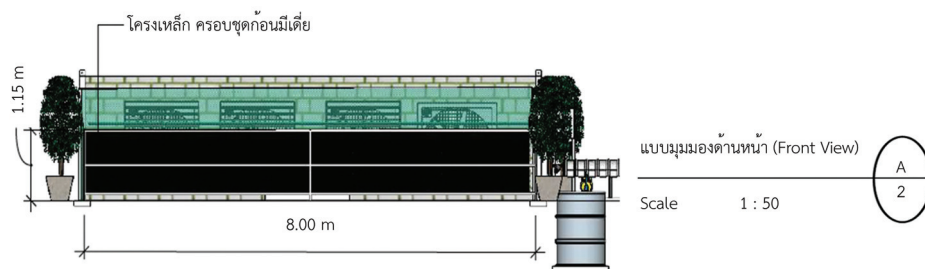
โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อติดตามการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่ทำหน้าที่กำจัดกลิ่นในระบบบำบัดกลิ่นในรูปก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์แบบชีวภาพ โดยทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียจากบ่อจุลินทรีย์ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของระบบบำบัด เพื่อนำมาวิเคราะห์จำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดด้วยวิธีการนับจำนวนจุลินทรีย์ (Total Plate Count) โดยใช้วิธีวิเคราะห์ Standard Plate Count Method (APHA, AWWA and WEF, 2007; Wattanajira, 2015) โดยทำการวัดตัวอย่าง 3 ซ้ำ และเก็บข้อมูลทุก ๆ 5 วัน เป็นระยะเวลา 90 วัน โดยใช้ตัวอย่างน้ำจากบริเวณที่มีการหมุนเวียนน้ำผ่านวัสดุตัวกลางที่จุลินทรีย์ยึดเกาะ เพื่อประเมินการเปลี่ยนแปลงของจำนวนจุลินทรีย์ในช่วงเวลาต่าง ๆ ของการใช้งานระบบ

8. หลักการทำงานของระบบบำบัดกลิ่นในรูปของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์แบบชีวภาพ

จากรูปที่ 1 แสดงรายละเอียดระบบบำบัดกลิ่น โดยระบบบำบัดกลิ่นในรูปของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์แบบชีวภาพจะประกอบไปด้วยระบบพ่นละอองน้ำ (บ่อจุลินทรีย์) ควบคุมรอบการทำงานผ่านระบบควบคุมไฟฟ้าเพื่อสั่งการทำงานให้พ่นละอองน้ำตามรอบเวลา เพื่อให้ความชื้นกับมีเดียสร้างสภาพที่เหมาะสมไม่ชื้นแฉะหรือแห้งจนเกินไปเอื้อต่อการเจริญเติบโตและเหมาะสมแก่การทำงานของจุลินทรีย์ กลิ่นที่ถูกระบายออกจากภายในโรงเรือน จะถูกจุลินทรีย์ที่มาพร้อมละอองน้ำจับ ส่วนมีเดียทำหน้าที่เป็นพื้นที่ยึดเกาะของจุลินทรีย์ เลือกใช้ตัวกลางชนิด คออสโม่มีเดียเพื่อเพิ่มพื้นที่ต่อปริมาตร ส่งผลให้ช่วยเพิ่มระยะเวลาและปริมาณจุลินทรีย์ ทำให้จุลินทรีย์ทำปฏิกิริยาในการย่อยสลายก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

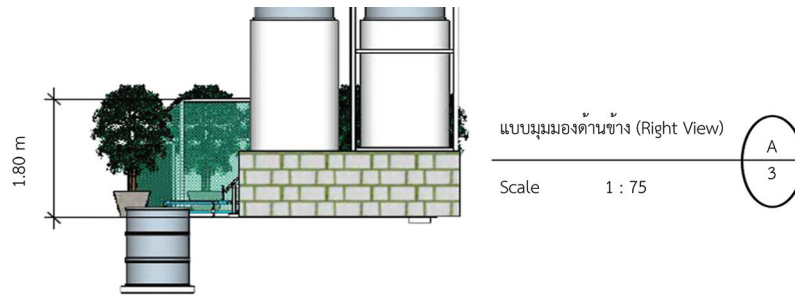


(ก) มีความยาวของมีเดีย 8 เมตร สูง 1.15 เมตร ติดตั้งห่างจากพัดลมท้ายโรงเรือน 4 เมตร

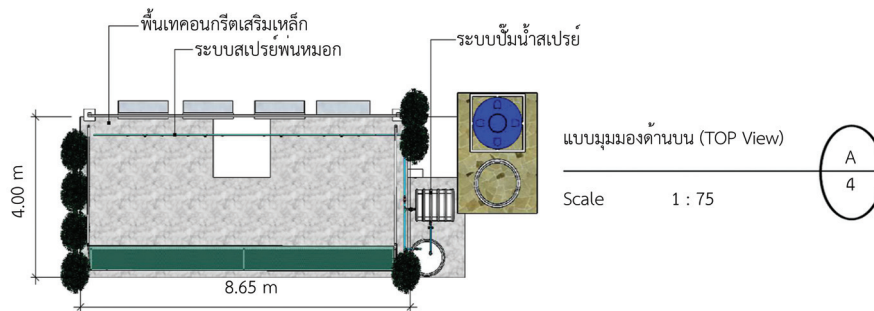


(ข) ด้านข้างล้อมรอบด้วยสแลมสูง 1.80 เมตร

รูปที่ 1 แบบระบบบำบัดกลิ่นในรูปของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์แบบชีวภาพ



(ค) บ่อสเปรย์จุลินทรีย์มีขนาด 1,000 ลิตร



(ง) ระบบปั๊มน้ำ ระบบกรอง และระบบไฟฟ้า

รูปที่ 1 แบบระบบบำบัดกลิ่นในรูปของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์แบบชีวภาพ (ต่อ)

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

1. ผลการศึกษาคุณภาพน้ำเสียในบ่อจุลินทรีย์

จากการศึกษาคุณภาพน้ำเสียบ่อจุลินทรีย์ พบว่าค่าคุณลักษณะของน้ำเสีย ได้แก่ ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS) ค่าความต้องการออกซิเจนทางชีวภาพ (BOD) ค่าความต้องการออกซิเจนทางเคมี (COD) ไนเตรต (NO_3^-) และ ซัลเฟต (SO_4^{2-}) มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเวลาผ่านไป โดยค่าที่วัดได้อยู่ในช่วง 273.33 ± 2.36 - 242.33 ± 2.05 226.67 ± 2.36 - 189.33 ± 0.47 629.00 ± 1.41 - 521.67 ± 2.36 143.67 ± 1.25 - 125.67 ± 0.47 และ 2.01 ± 0.08 - 1.61 ± 0.01 ppm ตามลำดับ แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของการย่อยสลายสารอินทรีย์ โดยอาศัยจุลินทรีย์ชนิดใช้ออกซิเจน (Wongphadungkiet and Suwannawitayakorn, 2011) ส่วนค่าความเป็นกรดต่างอยู่ที่ 7.02 ± 0.00 - 7.10 ± 0.01 จากรายงานวิจัย Lang (2011) พบว่าค่าความเป็นกรดต่างที่เหมาะสมต่อการทำงานของจุลินทรีย์อยู่ในช่วง 7.50-8.00 และ ยังพบว่าค่าความเป็นกรดต่างอยู่ในมาตรฐานน้ำทิ้ง ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำเสียสามารถย่อยสลายได้อย่างมีประสิทธิภาพภายใต้กระบวนการบำบัดที่ใช้จุลินทรีย์แบบใช้ออกซิเจน ด้วยเหตุนี้ น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดในระบบดังกล่าว จึงมีคุณภาพที่เหมาะสมและสามารถหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ได้โดยไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

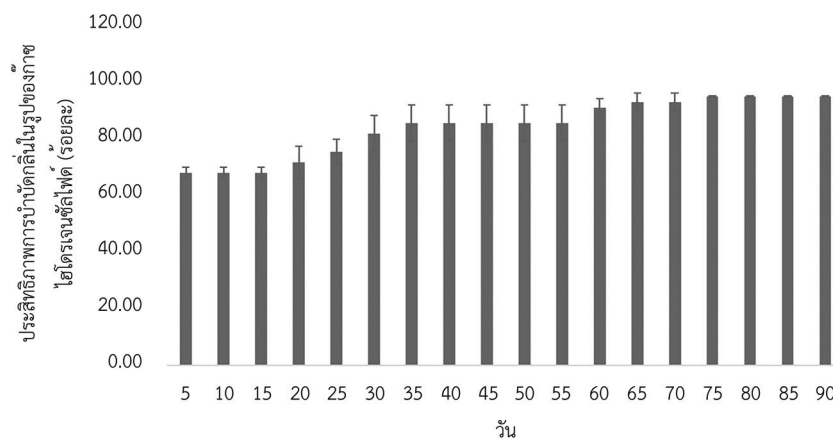
2. ผลการศึกษাত্রาววัดคุณภาพอากาศภายในโรงเรือนหลังการติดตั้งระบบบำบัดกลิ่นในรูปของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์แบบชีวภาพ

จากการศึกษาคุณภาพอากาศภายในโรงเรือนเลี้ยงไก่ไข่หลังการติดตั้งระบบบำบัดกลิ่นในรูปของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์แบบชีวภาพ พบว่าค่าความเร็วลมเฉลี่ยภายในโรงเรือนอยู่ที่ 2.48 ± 0.04 เมตรต่อวินาที ซึ่งอยู่ในช่วงค่ามาตรฐานที่เหมาะสมสำหรับโรงเรือนไก่ไข่ คือ 2.23 - 2.63 เมตรต่อวินาที (Nopparatmaitri et al., 2013) ขณะที่ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยที่ตรวจวัดได้อยู่ที่ 29.00 ± 0.00 องศาเซลเซียส ซึ่งสูงกว่าค่าที่มาตรฐานเล็กน้อย โดยทั่วไปอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับไก่ไข่ไม่ควรเกิน 27 องศาเซลเซียส เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงเกินไปอาจส่งผลให้สัตว์เกิดความเครียดทางความร้อน ซึ่งจะนำไปสู่การลดลงของการกินอาหารและสมรรถภาพการผลิต (Phonprasit, 2008) ภาวะความเครียดจากความร้อน (Heat Stress) นับเป็นหนึ่งในปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพ

การผลิตของสัตว์ปีกอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในไก่ไข่ ความร้อนที่สะสมในโรงเรือนอาจก่อให้เกิดผลกระทบ ตั้งแต่การเจริญเติบโตและการผลิตไข่ลดลง รวมถึงคุณภาพและความปลอดภัยของไข่และเนื้อไก่ลดลง นอกจากนี้ ความเครียดจากความร้อนยังส่งผลต่อ การตอบสนองของระบบภูมิคุ้มกันในสัตว์ปีกอีกด้วย (Balnave and Brake, 2005; Boonkum et al., 2014) และค่าความชื้นเฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ 69.08 ± 0.63 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมตามมาตรฐาน ฟาร์มเลี้ยงไก่ไข่ของกรมปศุสัตว์ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ (National Bureau of Agricultural Commodity and Food Standards, 2019) การออกแบบโรงเรือนเลี้ยงไก่ไข่ จึงควรคำนึงถึงการระบายอากาศอย่างเหมาะสม โดยการ ออกแบบให้โรงเรือนมีความโปร่งและสามารถถ่ายเทอากาศได้ดี จะช่วยให้เกิดการหมุนเวียนอากาศที่มีประสิทธิภาพ ซึ่งอากาศเสียและความร้อนภายในจะถูกระบายออกและถูกแทนที่ด้วยอากาศบริสุทธิ์จากภายนอก ส่งผลให้สภาพแวดล้อม ภายในโรงเรือนไม่ส่งผลกระทบต่อการใช้ร่างกายในโรงเรือน รวมไปถึงไม่ก่อให้เกิดผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม (Wongphadungkiet and Suwannawitayakorn, 2011)

3. ผลการศึกษาประสิทธิภาพของระบบบำบัดกลิ่นในรูปของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์แบบชีวภาพ

จากการศึกษาประสิทธิภาพของระบบบำบัดกลิ่นในรูปของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์แบบชีวภาพ พบว่าระบบ ดังกล่าวสามารถลดปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ อยู่ในช่วงร้อยละ 67.78 ± 1.92 94.63 ± 0.32 ตลอดระยะเวลาการทดลอง 90 วัน (รูปที่ 2 และตารางที่ 1) โดยพบว่าประสิทธิภาพการลดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเวลานานขึ้นมากที่สุดถึงร้อยละ 94.63 ± 0.32 ประสิทธิภาพที่สูงของระบบบำบัดกลิ่นในรูปของ ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์แบบชีวภาพ สามารถอธิบายได้จากการเลือกใช้วัสดุที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสสูงเป็นตัวกลาง ยึดเกาะ ของจุลินทรีย์ ส่งเสริมการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ สอดคล้องกับรายงานของ Yao et al. (2022) ที่ระบุว่ากาจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยระบบ Bio-Trickling Filter (BTF) สามารถกำจัดก๊าซได้ถึงร้อยละ 98 และงานวิจัยของ Phothiwichayanon (2011) ศึกษาประสิทธิภาพของระบบฟอกซ์ฟิล์ม ไบโอสคริปเบอร์ ใช้อัตราการไหล 10 มิลลิลิตรต่อนาที และความเข้มข้นของก๊าซ 10 ppm พบว่า ระบบสามารถกำจัด ก๊าซได้สูงถึงร้อยละ 99.99 แสดงให้เห็นว่าการประยุกต์ใช้ระบบบำบัดกลิ่นแบบชีวภาพในฟาร์มไก่ไข่ สามารถนำมาใช้ เพื่อลดปัญหากลิ่นรบกวนจากก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้อย่างมีประสิทธิภาพและเป็นแนวทางที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม



รูปที่ 2 ประสิทธิภาพการบำบัดกลิ่นในรูปของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์แบบชีวภาพ

4. ผลการศึกษาการเจริญเติบโตของจำนวนจุลินทรีย์ในระบบบำบัดกลิ่นในรูปของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์แบบชีวภาพ

จากการตรวจวัดจำนวนจุลินทรีย์ในระบบบำบัดกลิ่นในรูปของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์แบบชีวภาพ (ตารางที่ 2) พบว่าจำนวนจุลินทรีย์ในระบบอยู่ในช่วง $1.07 \times 10^7 - 3.67 \times 10^7$ CFU/ml ตลอดระยะเวลาการทดลอง 90 วัน โดยเฉพาะในวันที่ 90 พบว่าอัตราส่วนของปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ถูกบำบัดต่อจำนวนจุลินทรีย์มีค่าเท่ากับ 0.000254 mg/CFU ซึ่งแสดงถึงความเหมาะสมของจำนวนจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในระบบบำบัดกลิ่นในรูปของก๊าซไฮโดรเจน

ซัลไฟด์แบบชีวภาพ ตามรายงานของ Devinny et al. (1999) ระบุว่าปริมาณจุลินทรีย์ที่เหมาะสมในระบบบำบัดกลิ่นแบบชีวภาพอยู่ในช่วง $10^7 - 10^9$ CFU/ml สอดคล้องกับค่าที่พบในการศึกษาครั้งนี้ สามารถสรุปได้ว่าระบบบำบัดกลิ่นในรูปของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์แบบชีวภาพมีสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการย่อยสลายก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

นอกจากนี้ยังพบความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กับประสิทธิภาพในการลดกลิ่นโดยในช่วงแรกของการเดินระบบบำบัดกลิ่นในรูปของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์แบบชีวภาพจุลินทรีย์เข้าสู่ระยะปรับตัว จากนั้นจะเข้าสู่ระยะการเจริญเติบโตแบบทวีคูณ ส่งผลให้ความสามารถในการย่อยสลายก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ค่อย ๆ เพิ่มขึ้น และเมื่อเวลาผ่านไประบบเข้าสู่ภาวะคงตัว ซึ่งจำนวนจุลินทรีย์ในระบบเริ่มคงที่และมีประสิทธิภาพสูงในการบำบัดกลิ่น กระบวนการดังกล่าวสอดคล้องกับหลักการทำงานของระบบบำบัดกลิ่นแบบชีวภาพที่อาศัยจุลินทรีย์ เป็นกลไกหลักในการย่อยสลายสารมลพิษทางอากาศ โดยเฉพาะกลิ่นในรูปของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ซึ่งการเพิ่มขึ้นของจุลินทรีย์ในระบบมีบทบาทสำคัญต่อการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบในระยะยาว (Chung et al., 2000; Chen et al., 2023; Cesar et al., 2025)

ตารางที่ 1 ประสิทธิภาพการกำจัดกลิ่นในรูปของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ชีวภาพ

วัน	ค่าเฉลี่ย		
	ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ก่อนเข้าระบบ (ppm)	ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ออกจากระบบ (ppm)	ประสิทธิภาพการกำจัด ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (ร้อยละ)
5	9.33±0.58	3.00±0.00	67.78±1.92
10	9.33±0.58	3.00±0.00	67.78±1.92
15	9.33±0.58	3.00±0.00	67.78±1.92
20	9.33±0.58	2.67±0.58	71.48±5.70
25	9.33±0.58	2.33±0.58	75.19±4.49
30	9.00±0.00	1.67±0.58	81.48±6.42
35	9.00±0.00	1.33±0.58	85.19±6.42
40	9.00±0.00	1.33±0.58	85.19±6.42
45	9.00±0.00	1.33±0.58	85.19±6.42
50	9.00±0.00	1.33±0.58	85.19±6.42
55	9.00±0.00	1.33±0.01	85.19±6.42
60	9.00±0.00	0.83±0.01	90.74±3.21
65	9.00±0.00	0.67±0.01	92.59±3.21
70	9.00±0.00	0.67±0.01	92.59±3.21
75	9.33±0.58	0.50±0.01	94.63±0.32
80	9.33±0.58	0.50±0.01	94.63±0.32
85	9.33±0.58	0.50±0.00	94.63±0.32
90	9.33±0.58	0.50±0.01	94.63±0.32

จากการเปรียบเทียบระบบบำบัดกลิ่นประเภทต่าง ๆ พบว่าระบบบำบัดกลิ่นแบบชีวภาพมีต้นทุนดำเนินงานต่ำถึงปานกลาง เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและใช้พลังงานต่ำเหมาะสำหรับกลิ่นที่มีองค์ประกอบของสารอินทรีย์ โดยต้องควบคุมค่าความชื้นและอุณหภูมิอย่างเหมาะสม เพื่อให้จุลินทรีย์ทำงานได้เต็มประสิทธิภาพในทางตรงกันข้ามระบบบำบัดกลิ่นแบบเคมีมีประสิทธิภาพสูงแต่มีต้นทุนและความเสี่ยงจากสารเคมีสูง ส่วนระบบบำบัดกลิ่นแบบถ่านกัมมันต์

ใช้งานสะดวกแต่มีข้อจำกัดด้านความชื้นและอายุการใช้งาน ดังนั้นระบบบำบัดกลั่นแบบชีวภาพจึงเหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับฟาร์มไก่ไข่ โดยให้ความสำคัญค่าในระยะยาว สอดคล้องกับเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน (SDGs) เป้าหมายที่ 6 และเป้าหมายที่ 12 ในมิติด้านสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ระบบบำบัดกลั่นแบบชีวภาพยังช่วยรักษาสภาพแวดล้อมภายในโรงเรือนได้อย่างเหมาะสม ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยให้การบำบัดกลั่นมีประสิทธิภาพและประสิทธิภาพ

ตารางที่ 2 ประสิทธิภาพการกำจัดกลิ่นในรูปของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์และปริมาณจุลินทรีย์ในระบบบำบัดกลั่นในรูปของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์แบบชีวภาพ

วัน	ประสิทธิภาพการกำจัดกลิ่น ในรูปของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (ร้อยละ)	ปริมาณจุลินทรีย์ (CFU/ml)
0	-	1.07×10^7
5	67.78 ± 1.92	1.17×10^7
10	67.78 ± 1.92	1.30×10^7
15	67.78 ± 1.92	1.40×10^7
20	71.48 ± 5.70	1.53×10^7
25	75.19 ± 4.49	1.67×10^7
30	81.48 ± 6.42	1.67×10^7
35	85.19 ± 6.42	1.67×10^7
40	85.19 ± 6.42	1.87×10^7
45	85.19 ± 6.42	1.93×10^7
50	85.19 ± 6.42	2.13×10^7
55	85.19 ± 6.42	2.43×10^7
60	90.74 ± 3.21	3.13×10^7
65	92.59 ± 3.21	3.63×10^7
70	92.59 ± 3.21	3.63×10^7
75	94.63 ± 0.32	3.67×10^7
80	94.63 ± 0.32	3.67×10^7
85	94.63 ± 0.32	3.67×10^7
90	94.63 ± 0.32	3.67×10^7

สรุปผล

จากการศึกษาคุณภาพอากาศภายในโรงเรือนเลี้ยงไก่ไข่หลังการติดตั้งระบบบำบัดกลั่นในรูปของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์แบบชีวภาพพบว่า ค่าอุณหภูมิ ค่าความชื้น และความเร็วภายในโรงเรือนถือว่าเหมาะสมไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของโรงเรือน และอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมตามมาตรฐานฟาร์มเลี้ยงไก่ไข่ของกรมปศุสัตว์ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ ส่วนน้ำเสียที่เกิดจากการฉีดพ่นในระบบสเปรย์มีเดีย พบว่าค่า TSS BOD COD NO_3^- และ SO_4^{2-} มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องตลอดระยะเวลาการศึกษาการเดินระบบบำบัดกลั่นในรูปของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์แบบชีวภาพแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยอาศัยจุลินทรีย์ชนิดใช้ออกซิเจน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบบำบัดกลั่นในรูปของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์แบบชีวภาพที่ใช้ตัวกลางมีเดียเป็นแหล่งยึดเกาะจุลินทรีย์ร่วมกับการฉีดพ่นน้ำเสียแบบหมุนเวียนซึ่งเอื้อต่อการเพิ่มพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยาและช่วยให้กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

จากการศึกษาประสิทธิภาพของระบบบำบัดกลิ่นในรูปของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์แบบชีวภาพ พบว่ามีประสิทธิภาพอยู่ในช่วงร้อยละ 67.78 ± 1.92 - 94.63 ± 0.32 ตลอดระยะเวลา 90 วัน แสดงถึงประสิทธิภาพการกำจัดกลิ่นที่อยู่ในระดับสูง และมีปริมาณจุลินทรีย์อยู่ในช่วง 1.07×10^7 - 3.67×10^8 CFU/ml ซึ่งอยู่ในระดับที่เหมาะสมต่อกระบวนการบำบัดกลิ่น ซึ่งสามารถอธิบายได้จากการเลือกใช้วัสดุที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสสูงเป็นตัวกลางยึดเกาะของจุลินทรีย์ ส่งเสริมการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ แสดงให้เห็นว่าการประยุกต์ใช้ระบบบำบัดกลิ่นแบบชีวภาพในฟาร์มไก่ไข่ สามารถนำมาใช้เพื่อลดปัญหากลิ่นรบกวนจากก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเป็นแนวทางที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

References

- American Public Health Association [APHA], American Water Works Association [AWWA], and Water Environment Federation [WEF]. (2007). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (21sted). Washington, DC, United States.
- Balnave, D. and Brake, J. (2005). Nutrition and Management of Heat-Stressed Pullets and Laying Hens. *World's Poultry Science Journal*, 61(3), 399-406. <https://doi.org/10.1079/WPS200565>
- Boonkum, W., Duangjinda, M., Laopaiboon, B. and Vongpralub, T. (2014). Effect of Heat Stress on Genetic Parameters and Egg Production in Thai Pradu Hang Dam Breed Chickens. *Khon Kaen Agriculture Journal*, 42(3), 319-328. <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/agkasetkaj/article/view/250544/171367>
- Cesar, R., Marques, P.J.L., Tavares, J.R.A., Antunes, F.C., Goncalves, J.M., Vicentini, R., Cavallari, M.R., Brandao, B.B.N.S., Hunt, J.D., Doubek, G. and Zanin, H.G. (2025). Biogas Refining: A Review on Advances in Metal-Oxide-Modified Activated Carbon for H₂S and CO₂ Removal. *Energy and Fuels*, 39(3), 39-71. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.4c03493>
- Chen, G.H., Loosdrecht, M., Ekama, G. and Brdjanovic, D. (2023). *Biological Wastewater Treatment: Principles, Modelling and Design* (2nded). IWA Publishing.
- Chung, Y.-C., Huang, C., Tseng, C.-P. and Pan, J.R. (2000). Biotreatment of H₂S-and NH₃-Containing Waste Gases by Co-Immobilized Cells Biofilter. *Chemosphere*, 41(3), 329-336. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(99\)00490-7](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(99)00490-7)
- Chuenban, S. (2017). *Microorganisms Help to Reduce Odor from Animal Farms (NSTDA, Northern Region)*. Faculty of Science, Maejo University. (in Thai)
- Devinny, J.S., Deshusses, M.A. and Webster, T.S. (1999). *Biofiltration for Air Pollution Control* (1sted). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315138275>
- Lang, W. (2011). *Environmental Microbiology* (2nded). Kasetsart University Press. (in Thai)
- National Bureau of Agricultural Commodity and Food Standards. (2019). *Good Agricultural Practices for Egg Farms: TISI 6909(G)-2019*. Ministry of Agriculture and Cooperatives. https://e-book.acfs.go.th/Book_view/156 (in Thai)
- Nopparatmaitri, M., Panthong, A. and Kitpipit, W. (2013). Effects of Indoor Environment Management in Closed Houses on the Production Performance of Laying Hens. *RMUTP Research Journal Sciences and Technology*, 5, 234-241.
- Oyarzun, P., Arancibia, F., Canales, C. and Aroca, G.E. (2003). Biofiltration of High Concentration of Hydrogen Sulfide Using *Thiobacillus thausor*. *Process Biochemistry*, 39(2), 165-170. [https://doi.org/10.1016/S0032-9592\(03\)00050-5](https://doi.org/10.1016/S0032-9592(03)00050-5)

- Panich, N., Panic, S., Limpasene, W., Chongwisat, W. and Sueadee, W. (2023). *Air Pollution Treatment Systems* (7th ed). Chulalongkorn University Press. (in Thai)
- Phonprasit, P. (2008). *Teaching Materials for the Subject of Egg Production*. Agricultural Science and Technology Chonburi. (in Thai)
- Phothiwichayanon, S. (2011). *Fixed-Film Bioscrubber Capacity Development*. Department of Environmental Health, Faculty of Public Health, Suranaree University of Technology. (in Thai)
- Potivichayanon, S. (2005). *Removal of Hydrogen Sulfide by Fixed-Film Bioscrubber*. (Ph.D. dissertation, Mahidol University). <https://repository.li.mahidol.ac.th/handle/123456789/88721>
- Price, K. (2023, 7 November). *How to Control Ammonia Levels in Poultry Houses*. Alltech. <https://www.alltech.com/blog/how-control-ammonia-levels-poultry-houses> (in Thai)
- Prombaiyen, N. (2025, June 13). *Odor Elimination in Livestock Farms*. <https://certify.dld.go.th/certify/images/download/meeting%20papers/651206/1.pdf>
- Pudi, A., Rezaei, M., Signorini, V., Andersson, M.P., Baschetti, M.G. and Mansouri, S.S. (2022). Hydrogen Sulfide Capture and Removal Technologies: A Comprehensive Review of Recent Developments and Emerging Trends. *Separation and Purification Technology*, 298, <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.121448>
- Shareefdeen, Z. and Singh, A. (2008). *Biotechnology for Odor and Air Pollution Control* (1st ed). Springer.
- Sirianuntapiboon, S. and Chuamkaew, C. (2007). Packed Cage Rotating Biological Contactor System for Treatment of Cyanide Wastewater. *Journal of The Bioresource Technol*, 98(2), 266-272. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.01.014>
- Wattanjira, L. (2015). *Microbiological Analysis Operation Manual for the Environment: Water and Waste*. Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna. (in Thai)
- Wongphadungkiet, P. and Suwannawitayakorn, P. (2011). Commercial Seed in Wastewater Treatment Process of Fish Meal Factory. *Kasetsart Engineering Journal*, 24(77), 24-33. (in Thai)
- Yao, X., Shi, Y., Wang, K., Wang, C., He, L., Li, C. and Yao, Z. (2022). Highly Efficient Degradation of Hydrogen Sulfide, Styrene, and M-Xylene in a Bio-Trickling Filter. *Science of the Total Environment*, 808, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152130>

การพัฒนาผลิตภัณฑ์หลนปลาต้มพริกพร้อมบริโภคในบรรจุภัณฑ์รีทอร์ทเพาช์

Product Development of Ready-to-Eat Fermented Fish Dipping Sauce in a Retort Pouch

ณัฐพงษ์ ทาราพรหม น้อมจิตต์ สุธีบุตร* เกศรินทร์ เพ็ชรรัตน์ และดวงกมล ตั้งสถิตพร

Nutthapong Taraprom Nomjit Suteebut* Kasarin Pedcharat and Duangkamol Tungsatitporn

Received: May 27, 2025; Revised: September 1, 2025; Accepted: September 2, 2025

บทคัดย่อ

การแปรรูปปลาด้วยการหมักเป็นปลาต้มสามารถทำได้หลายรูปแบบ เช่น หมักทั้งตัว หมักเป็นชิ้น เป็นเส้น หรือเป็นปลาต้มพริก ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในเมนูอาหารได้หลากหลาย อย่างไรก็ตาม การปรุงปลาต้มพริกเพื่อให้พร้อมรับประทานมักใช้เวลานาน จึงมีการพัฒนาผลิตภัณฑ์หลนปลาต้มพริกให้เป็นอาหารพร้อมบริโภคในบรรจุภัณฑ์แบบรีทอร์ทเพาช์ เพื่อความสะดวกและตอบโจทย์การใช้ชีวิตของผู้บริโภคในปัจจุบัน ผลการศึกษาสูตรพื้นฐานหลนปลาต้มพริก พบว่าสูตรที่ 3 ผู้ทดสอบชิมให้คะแนนความชอบทางประสาทสัมผัสสูงสุด ผลการศึกษาระบวนการฆ่าเชื้อผลิตภัณฑ์หลนปลาต้มพริกพร้อมบริโภคในบรรจุภัณฑ์รีทอร์ทเพาช์ด้วยการฆ่าเชื้อด้วยเครื่องรีทอร์ทที่อุณหภูมิ 116 °C เป็นระยะเวลา 25 30 และ 35 นาที พบว่าการฆ่าเชื้อที่ใช้ระยะเวลานานขึ้น มีผลต่อค่าสีที่เพิ่มขึ้น โดยวัดจากค่าความสว่าง (L*) ที่ลดลง ค่าสีแดง (a*) และค่าสีเหลือง (b*) ที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) แต่ไม่มีผลต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง ($p > 0.05$) และตรวจไม่พบจุลินทรีย์ที่สามารถเจริญได้ในระหว่างการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการฆ่าเชื้อทั้ง 3 ระยะเวลา ผลิตภัณฑ์หลนปลาต้มพริกที่ผ่านการฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 116 °C เป็นระยะเวลา 25 นาที มีความเหมาะสมในการผลิตด้วยมีคะแนนความชอบทางประสาทสัมผัสไม่แตกต่างกับผลิตภัณฑ์ หลนปลาต้มพริกก่อนการฆ่าเชื้อ ($p > 0.05$) ซึ่งเป็นประโยชน์และทางเลือกให้กับผู้บริโภคที่ต้องการรับประทานหลนปลาต้มพริกแบบสำเร็จรูปพร้อมรับประทาน และเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับปลาต้มพริกอีกด้วย

คำสำคัญ : ปลาต้มพริก; พร้อมบริโภค; บรรจุภัณฑ์รีทอร์ทเพาช์

คณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

Faculty of Home Economics Technology, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon

* Corresponding Author, Tel. 08 5346 4522, E - mail: nomjit.s@rmutp.ac.th

Abstract

The fermentation of fish includes whole fish, pieces, and strips, particularly Som-fug, which is commonly used in various traditional dishes. However, preparing fermented fish for consumption can be time-consuming. To align with modern consumer lifestyles, this study aims to develop a ready-to-eat fermented fish product called "Loun-Pla-Som-fug" in retort pouches. The study first explored basic simmering recipes, identifying the third recipe as the most preferred among sensory panelists. The product was then sterilized using a retort process at 116 °C for 25, 30, and 35 minutes. Results showed that longer sterilization times led to significantly darker color values, with increases in red (a^*) and yellow (b^*) components ($p \leq 0.05$). However, pH levels remained unaffected ($p > 0.05$), and no microbial growth was detected across all time intervals during storage. Products sterilized at 116 °C for 25 minutes retained similar sensory characteristics as the pre-sterilized version and were deemed suitable for production. This ready-to-eat product adds value to traditional fermented fish and meets consumer demand for convenience.

Keywords: Som-Fug; Ready-to-Eat; Retort Pouch

บทนำ

อาหารหมักจากปลา เป็นการถนอมอาหารที่มีตั้งแต่อดีต เมื่อมีปลาร้านจำนวนมากรับประทานไม่หมดจึงนำมาแปรรูปโดยการหมักเพื่อให้เก็บรักษาไว้บริโภคได้นานขึ้น ปลาส้มเป็นอาหารหมักชนิดหนึ่งที่เป็นที่รู้จัก (Phitakpol, 1993) มีหลายประเภท ได้แก่ 1) ปลาส้มตัว เป็นปลาส้มที่ทำจากปลาทั้งตัวโดยผ่าท้องควักไส้ออกแล้ว 2) ปลาส้มชิ้น เป็นปลาส้มที่ทำจากเนื้อปลาล้วน ที่หั่นเป็นชิ้นตามขวางของลำตัวปลา 3) ปลาส้มเส้น เป็นปลาส้มที่ทำจากเนื้อปลาล้วน ที่หั่นเป็นเส้น และ 4) ปลาส้มฟัก หรือแหนมปลา เป็นปลาส้มที่ทำจากเนื้อปลาล้วนที่บดหรือสับ (Pornchaloempong and Rattanapannone, 2017) สำหรับปลาส้มฟักในการนำมาบริโภคสามารถนำมาปรุงเป็นอาหารที่มีรสชาติที่หลากหลายรับประทานง่าย เช่น หลนปลาส้มฟัก ซึ่งเป็นตำรับอาหารที่เป็นที่นิยม (Royal Thai Government Gazette, 2003) ให้ความหมายไว้ว่า “หลน” คือ อาหารที่ประกอบด้วยกะทิ หัวหอม หมูหรือกุ้งสับ เคี้ยวรวมกันแล้วใส่ปลาร้าหรือเต้าเจี้ยวแห้ง เป็นต้น อย่างใดอย่างหนึ่ง เรียกชื่อตามนั้น ปรุงรสให้เปรี้ยว เค็มหวาน เช่น ปลาร้าหลน เต้าเจี้ยวหลน เต้าหู้ยี้หลน ปลากระเทียมหลน รับประทานกับผักสด ทั้งนี้ Uluchada (2005) ได้ขยายความว่า “หลน” เป็นกับข้าวพื้นเมืองของไทยที่เน้นกะทิ อยู่ในตระกูลน้ำพริกชนิดหนึ่งเพราะต้องกินกับผัก บางที่ใช้ปลาทอด หมูทอดหรือกุ้งเผา หลนเป็นการต้มกะทิกับสิ่งที่จะหลน เช่น ปลาร้า เต้าเจี้ยว ปลากระเทียม ปลาเฒ่า ปลาส้ม แหนม หรือไข่เค็ม แล้วใส่รสหวาน รสเปรี้ยวลงไป ปรุงรสด้วยพริก ใส่หัวหอม ใบมะกรูด (The Central Library of Silpakorn University, 2021) ด้วยหลนใช้วัตถุดิบส่วนประกอบหลายชนิด มีกรรมวิธีการทำที่ยุ่งยาก เน้นเสี้ง่าย มีอายุการเก็บสั้น เป็นอาหารที่ปรุงรับประทานภายในมื้ออาหาร ด้วยเป็นอาหารความมีกะทิเป็นส่วนประกอบ ดังนั้นการพัฒนาให้หลนเป็นอาหารที่ปรุงสำเร็จรูปพร้อมรับประทานจึงเป็นแนวคิดที่น่าสนใจ

ด้วยสถานะที่มีประชากรจำนวนมากขึ้น สภาพสังคมที่มีการแข่งขัน การดำเนินชีวิตอย่างเร่งรีบ การทำงานแข่งกับเวลาและให้ทันกับการเปลี่ยนแปลงของเทคโนโลยี ทำให้วิถีชีวิตของผู้คนในสังคมเมืองเปลี่ยนแปลงไป โดยเฉพาะในด้านพฤติกรรมของผู้บริโภคที่ต้องการความสะดวกรวดเร็วในการเตรียมและการรับประทานอาหาร ส่งผลให้อาหารสำเร็จรูปพร้อมบริโภค (Ready to Eat) ได้รับความนิยมมากขึ้น (National Food Institute, 2020) ส่วนหนึ่งมาจากการพัฒนาของเทคโนโลยีการผลิต ทำให้อาหารปรุงสำเร็จที่อยู่ในลักษณะพร้อมรับประทาน หรืออาหารสำเร็จรูปแช่แข็ง - แช่เย็น มีการพัฒนารสชาติและเนื้อสัมผัสใกล้เคียงกับอาหารที่ปรุงสดเป็นอย่างมาก สามารถรับประทานได้ง่าย

วางจำหน่ายกันอย่างแพร่หลายมากขึ้นตามห้างสรรพสินค้า ร้านสะดวกซื้อ ทำให้ตอบโจทย์ผู้บริโภคในปัจจุบันได้เป็นอย่างดี ทางเลือกหนึ่งสำหรับอาหารสำเร็จรูปที่อยู่ในลักษณะพร้อมรับประทานวางจำหน่ายในสภาวะปกติที่ไม่ต้องมีการแช่เย็น - แช่แข็ง คือการใช้กระบวนการฆ่าเชื้อด้วยความร้อน (Thermal Processing) ในภาชนะบรรจุปิดสนิทสามารถรักษาผลิตภัณฑ์อาหารได้ ซึ่งได้รับความนิยมด้วย รับประทานได้สะดวก รวดเร็ว และมีความปลอดภัยในการบริโภค (Abhishek et al., 2014) มีทั้งการบรรจุในภาชนะแบบกระป๋อง ขวดแก้ว และบรรจุภัณฑ์รีโอร์ทเพาซ์ ซึ่งเป็นบรรจุภัณฑ์ชนิดอ่อนตัว (Flexible Packaging) ทำจากฟิล์มหลายชนิดมาเชื่อมประสาน (Laminate) ที่สามารถทนต่ออุณหภูมิในการแปรรูปด้วยความร้อนและนำมาใช้เป็นบรรจุภัณฑ์เพื่อการฆ่าเชื้อเช่นเดียวกับกระป๋องโลหะ (Rangsadthong, 2014; Pornchaloempong and Rattanapannone, 2017) ด้วยคุณสมบัติของวัสดุที่ต่างกัน บรรจุภัณฑ์รีโอร์ทเพาซ์มีความบางจึงมีอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรมากกว่ากระป๋องโลหะ ช่วยเพิ่มอัตราการแทรกผ่านความร้อนเข้าไปยังอาหาร (Teixeira et al., 1969) ระยะเวลาของกระบวนการฆ่าเชื้อเพื่อให้เกิดสภาพปลอดเชื้อทางการค้าใช้เวลาสั้นกว่ากระป๋องโลหะ ช่วยลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน และรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารได้มากกว่ากระป๋องโลหะ (Bindu et al., 2011) มีรายงานการวิจัยเกี่ยวกับการผลิตอาหารสำเร็จรูปพร้อมบริโภคในบรรจุภัณฑ์ รีโอร์ทเพาซ์มากขึ้น อาทิ ลูกตาลอ่อนในน้ำตาลสด (Klamsakul et al., 2024) เนื้อตุ๋น (Khwanchai et al., 2023) แกงส้มปักษ์ใต้ (Yotmanee and Ploykhaw, 2022) กว๊ายเตี่ยวเส้นจันท์ผัดปู (Kangkawisut and Khunputtirapee, 2021) โจ๊กไข่ขาว (Deprasert and Vatthanakul, 2023) ข้าวห่อใบบัว (Parnsakhorn et al., 2020) กุ้งในซอสมาซาล่า (Dasan et al., 2021) เป็นต้น

งานวิจัยนี้จึงได้มีแนวคิดในการพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารจากปลาต้มฟักเป็นหลนปลาต้มฟักเป็นอาหารสำเร็จรูปพร้อมบริโภคบรรจุในถุงรีโอร์ทเพาซ์ โดยผู้วิจัยจึงได้ศึกษาสูตรมาตรฐานของหลนปลาต้มฟัก นำสูตรที่ได้มาผลิตเป็นหลนปลาต้มฟักบรรจุในถุงรีโอร์ทเพาซ์แบบปิดสนิทผ่านกระบวนการฆ่าเชื้อด้วยเครื่องรีโอร์ท โดยศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมเพื่อให้ผลิตภัณฑ์หลนปลาต้มฟักปลอดภัยในการบริโภคและยังได้รับการยอมรับจากผู้บริโภค

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การศึกษาสูตรพื้นฐานหลนปลาต้มฟัก

1.1 การเตรียมส่วนผสม ได้แก่ ปลาต้มฟักโดยมีการเตรียมดังนี้ บดเนื้อปลายี่สก (ตลาดสดเทเวศร์) ให้ละเอียดน้ำหนัก 1,000 กรัม นวดเนื้อปลากับเกลือป่น 20 กรัม ข้าวสุก 100 กรัม กระเทียมบด 100 กรัม น้ำตาลทราย 20 กรัม นวดส่วนผสมทั้งหมดจนเหนียวเข้ากันดี บรรจุส่วนผสมใส่ถุงพลาสติกขนาด 8 X 12 นิ้ว น้ำหนักบรรจุถุงละ 250 กรัม หมักไว้ที่อุณหภูมิห้องระยะเวลา 2 วัน ได้ปลาต้มฟักสำหรับเป็นวัตถุดิบหลน และส่วนผสมอื่น ๆ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สูตรพื้นฐานหลนปลาต้มฟัก

ส่วนผสม	น้ำหนักวัตถุดิบ (กรัม)		
	สูตรที่ 1	สูตรที่ 2	สูตรที่ 3
ปลาต้มฟักหั่นชิ้นเล็ก	110	110	110
กะทิ (ขาวเกาะ)	240	220	220
หอมแดงซอย	60	70	30
พริกชี้ฟ้าแดงหั่น	-	30	30
พริกหยวกหั่น	20	-	20
พริกชี้หูสวนเขียว	-	-	30
ตะไคร้หั่น	-	-	18

ตารางที่ 1 สูตรพื้นฐานหลนปลาต้มผัก (ต่อ)

ส่วนผสม	น้ำหนักวัตถุดิบ (กรัม)		
	สูตรที่ 1	สูตรที่ 2	สูตรที่ 3
น้ำตาลปีบ	50	30	30
น้ำมะขามเปียก	52.5	30	30
เกลือ	1.5	-	1.5
น้ำปลา (ทิพรส)	-	30	-
ใบมะกรูดฉีก 2 ซีก	-	-	2

หมายเหตุ: ดัดแปลงจากสูตรน้ำพริกหลน (Maeban, 2015)

1.2 ขั้นตอนการทำหลนปลาต้มผัก ให้ความร้อนกะทิในหม้อ รอนกะทิเดือด ใส่ปลาต้มผักและตะไคร้ที่เตรียมไว้ลงไปต้มนาน 1 นาที พรงรสด้วยน้ำตาลปีบ น้ำมะขามเปียก และเกลือหรือน้ำปลา ใส่พริกหยวก พริกชี้ฟ้า พริกขี้หนู ใส่หอมแดงซอย ใบมะกรูดฉีก ต้มเดือด 5 นาที ยกออกจากเตา (Maeban, 2015)

1.3 การตรวจวิเคราะห์คุณภาพ นำหลนปลาต้มผักที่ได้ทั้ง 3 สูตรไปประเมินคุณภาพ ได้แก่

1) การตรวจวัดค่าสี Spectrophotometer ค่าที่วัด ได้แก่ ค่าสี L^* (ค่าความสว่างมีค่า 0 ถึง 100 โดย 100 หมายถึง วัตถุที่มีความสว่าง สีขาว 0 หมายถึง วัตถุที่มีความมืดสีดำ) ค่าสี a^* (+ หมายถึง วัตถุที่มีสีแดง - หมายถึง วัตถุที่มีสีเขียว) และค่าสี b^* (+ หมายถึง วัตถุที่มีสีเหลือง - หมายถึง วัตถุที่มีสีน้ำเงิน)

2) การตรวจวัดค่าความเป็นกรด - ด่าง (pH) โดยนำผลิตภัณฑ์มาบดให้ละเอียดใส่ในบีกเกอร์ แล้วเจือจางด้วยน้ำกลั่นอัตราส่วน (1 : 5) (Vijayakumar and Adedjei, 2017) เพื่อหาค่ากรด - ด่าง โดยใช้เครื่องวัดความกรด - ด่าง (pH Meter) ยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น Five Easy

3) การวิเคราะห์คุณภาพทางประสาทสัมผัส นำผลิตภัณฑ์หลนปลาต้มผักสูตรพื้นฐาน 3 สูตรมาทำการทดสอบทางประสาทสัมผัส วิเคราะห์ผลทางสถิติโดยวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ในบล็อก (Randomized Complete Block Design, RCBD) และนำผลิตภัณฑ์ไปประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสในด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ ลักษณะเนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม โดยวิธีการให้คะแนนความชอบ 9 ระดับ (9-Point Hedonic Scale Test) ซึ่งให้ผู้ทดสอบชิมที่ไม่ผ่านการฝึกฝนจำนวนทั้งหมด 30 คน แล้วนำผลมาวิเคราะห์หาความแปรปรวน (Analysis of Variance-ANOVA) และวิเคราะห์หาความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test-DMRT เพื่อคัดเลือกสูตรที่ผู้ทดสอบชิมให้คะแนนมากที่สุด สำหรับนำไปศึกษาขั้นตอนต่อไป

2. การศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมของการฆ่าเชื้อหลนปลาต้มผัก

บรรจุหลนปลาต้มผักในถุงรีทอร์ทเพาซ์ แบบ Hot Fill (บรรจุขณะร้อนอุณหภูมิ 75 °C) ซึ่งน้ำหนักบรรจุถุงละ 150 กรัม ซิลปิดสนิทด้วยเครื่องปิดผนึก โดยไล่อากาศออก เรียงใส่ตะแกรง เข้าเครื่องรีทอร์ท (AMMBEST-WS65 บริษัทเมจิก ฟู้ด จำกัด) ฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 116 °C ซึ่งเป็นระดับอุณหภูมิที่ได้ทำ การศึกษาค่าการกระจายความร้อน (TD) ภายในหม้อฆ่าเชื้อไว้แล้วโดยบริษัทผู้ผลิตและจำหน่ายเครื่อง และเป็นระดับอุณหภูมิที่ให้การกระจายความร้อนเพียงพอในรีทอร์ทเพาซ์ (Yu et al., 2023) โดยแต่ละรอบกำหนดระยะเวลาฆ่าเชื้อ (Processing Time) เป็นเวลา 25 30 และ 35 นาที สุ่มตัวอย่างไปตรวจคุณภาพทางกายภาพ และนำผลิตภัณฑ์ หลนปลาต้มผักไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 และ 55 °C เป็นเวลา 2 สัปดาห์ เพื่อประเมินคุณภาพทางจุลินทรีย์ (André et al., 2021)

3. การวิเคราะห์คุณภาพทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์หลนปลาต้มผักก่อนและหลังการฆ่าเชื้อ

นำผลิตภัณฑ์หลนปลาต้มผักสูตรที่ใช้เวลาฆ่าเชื้อเป็นเวลา 25 นาที และสูตรพื้นฐานก่อนการฆ่าเชื้อ มาทำการทดสอบทางประสาทสัมผัส วิเคราะห์ผลทางสถิติโดยวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ในบล็อก (Randomized Complete Block Design, RCBD) และนำผลิตภัณฑ์ไปประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส ในด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ ลักษณะเนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมโดยวิธีการให้คะแนนความชอบ 9 ระดับ (9-Point Hedonic

Scale Test) ซึ่งให้ผู้ทดสอบชิมที่ไม่ผ่านการฝึกฝนจำนวนทั้งหมด 30 คน แล้วนำผล มาวิเคราะห์เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างหลนปลาต้มผัก 2 ตัวอย่าง (T-Test)

ผลการทดลองและการอภิปรายผล

1. ผลการศึกษาสูตรพื้นฐานหลนปลาต้มผัก

ผลการศึกษาสูตรพื้นฐานหลนปลาต้มผักที่ดัดแปลงจากสูตรน้ำพริกหลนสารพัดเครื่องจิ้ม (Maeban, 2015) นำหลนปลาต้มผักที่วิเคราะห์คุณภาพ ได้แก่ ลักษณะปรากฏ ดังรูปที่ 1 และผลการวิเคราะห์ทางกายภาพ ดังตารางที่ 2 และให้ผู้ทดสอบชิมสูตรพื้นฐาน 3 สูตร ให้คะแนนความชอบในด้านประสาทสัมผัส ด้วยการทดสอบความชอบ 9 ระดับ นำคะแนนมาวิเคราะห์หาสูตรพื้นฐานที่ดีที่สุด ดังตารางที่ 2



(ก) สูตรที่ 1



(ข) สูตรที่ 2



(ค) สูตรที่ 3

รูปที่ 1 ลักษณะของหลนปลาต้มผักสูตรพื้นฐาน

ตารางที่ 2 ค่าสีและค่า pH ผลิตภัณฑ์หลนปลาต้มผักสูตรพื้นฐาน

ผลการวิเคราะห์	สูตรที่ 1	สูตรที่ 2	สูตรที่ 3
ค่าสี L ^{*ns}	71.52±3.97	70.35±3.45	70.26±3.88
a ^{*ns}	9.30±4.95	9.61±4.75	9.57±4.97
b ^{*ns}	24.83±6.10	25.68±6.15	25.85±6.35
ความเป็นกรด - ด่าง (pH) ^{ns}	4.28±0.40	4.66±0.26	4.02±0.12

หมายเหตุ: ^{ns} กำกับค่าในแนวนอนที่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$)

การทำหลนปลาต้มผักทั้ง 3 สูตร มีการใช้วัตถุดิบและเครื่องปรุงที่แตกต่างกัน สูตรที่ 1 มีส่วนประกอบเป็นพริกหนุ่มซึ่งทำให้หลนมีสีเขียวอ่อน สูตรที่ 2 มีพริกชี้ฟ้าแดงจึงทำให้เห็นสีแดง แต่สูตรที่ 3 มีส่วนผสมทั้งพริกชี้ฟ้าแดง พริกหนุ่มสีเขียวอ่อน พริกชี้ฟ้าเขียว ตะไคร้ และใบมะกรูดฉีก จึงทำให้มีลักษณะปรากฏที่มีสีสันที่หลากหลายมากกว่าสูตรที่ 1 และ 2 นอกจากนี้เมื่อสังเกตลักษณะของหลนปลาต้มผัก (รูปที่ 1) พบว่าสูตรที่ 1 มีลักษณะข้นหนืดมากกว่าสูตรที่ 2 และ 3 ด้วยสูตรที่ 1 มีส่วนผสมของกะทิปริมาณ 240 กรัม แต่สูตรที่ 2 และ 3 มีส่วนผสมของกะทิ 220 กรัม เท่ากัน จึงทำให้มีลักษณะความข้นและหนืดน้อยกว่าสูตรที่ 1 เมื่อพิจารณาวัตถุดิบที่เป็นส่วนผสมของทั้ง 3 สูตร พบว่าหลนปลาต้มผักสูตรที่ 3 มีวัตถุดิบที่หลากหลายมากที่สุดจึงทำให้มีสีและลักษณะปรากฏที่เด่นชัด อย่างไรก็ตาม ผลการวัดค่าสี และค่า pH ของหลนปลาต้มผักทั้ง 3 สูตรไม่แตกต่างกัน ($p>0.05$) ด้วยในการวัดค่าสีได้แยกส่วนของพริกที่มีสีเขียวและสีแดงออกไปจากตัวอย่างที่ใช้ทำการวัด (ตารางที่ 2)

ตารางที่ 3 ผลการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสในด้านต่าง ๆ ของผลิตภัณฑ์หลนปลาต้มผักสูตรต่าง ๆ

คุณลักษณะ	สูตรที่ 1	สูตรที่ 2	สูตรที่ 3
ลักษณะที่ปรากฏ ^{ns}	7.37±1.00	7.23±1.10	7.47±1.10
สี ^{ns}	7.00±1.29	7.00±1.36	7.47±1.22
กลิ่น ^{ns}	6.87±1.57	7.00±1.46	7.40±1.52
เนื้อสัมผัส ^{ns}	7.37±1.21	6.97±1.16	7.23±1.61
รสชาติ	7.07±1.17 ^{ab}	6.40±1.59 ^b	7.20±1.61 ^a
ความชอบโดยรวม	6.97±0.90 ^{ab}	6.60±1.22 ^b	7.27±1.23 ^a

หมายเหตุ: ตัวอักษรที่กำกับในแนวนอนมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

^{ns} ที่กำกับในแนวนอนไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

ผลการวิเคราะห์คุณภาพทางประสาทสัมผัสของสูตรพื้นฐานผลิตภัณฑ์หลนปลาต้มผัก 3 สูตร (ตารางที่ 3) พบว่าคะแนนความชอบด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น เนื้อสัมผัส ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) แต่ด้านรสชาติและความชอบโดยรวม มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยผู้ทดสอบชิมให้คะแนนมากที่สุด คือ สูตรที่ 3 ซึ่งมีระดับคะแนนความชอบอยู่ที่ขอบปานกลาง เพราะมีรสชาติที่เปรี้ยว เค็ม หวาน กำลังพอดี รองลงมา คือ สูตรที่ 1 เนื่องจากมีการใส่น้ำตาลปีบมากกว่าอีก 2 สูตร จึงทำให้มีรสชาติดูหวานมากเกินไป อีกทั้งสูตรที่ 2 มีการใส่น้ำปลาจึงทำให้มีรสชาติที่เค็มมากเกินไป จึงเลือกสูตรที่ 3 มาพัฒนาต่อไป

2. ผลการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมของการฆ่าเชื้อหลนปลาต้มผัก

นำผลิตภัณฑ์หลนปลาต้มผักสูตรพื้นฐานสูตรที่ 3 ที่คัดเลือกจากผู้ทดสอบชิมที่ให้คะแนนความชอบมากที่สุด (ผลจากข้อ 1) มาศึกษาระยะเวลาในการฆ่าเชื้อและบ่มเชื้อหลังจากผ่านการฆ่าเชื้อโดยนำผลิตภัณฑ์หลนปลาต้มผักที่บรรจุลงถุงรีทอร์ทเพาซ์ที่ผ่านกระบวนการฆ่าเชื้อ 3 ช่วงระยะเวลา และที่ยังไม่ผ่านกระบวนการฆ่าเชื้อมาบ่มที่อุณหภูมิ 37 และ 55 °C เป็นเวลา 2 สัปดาห์ ดังรูปที่ 2 และตารางที่ 4



(ก) ก่อนฆ่าเชื้อ

(ข) 25 นาที

(ค) 30 นาที

(ง) 35 นาที

รูปที่ 2 หลนปลาต้มผักก่อนและหลังผ่านการฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 116 °C เป็นระยะเวลา 25 30 และ 35 นาที

ตารางที่ 4 คุณภาพของหลนปลาต้มผักก่อนและหลังผ่านการฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 116 °C เป็นระยะเวลา 25 30 และ 35 นาที

การวิเคราะห์	ก่อนการฆ่าเชื้อ	หลังผ่านกระบวนการฆ่าเชื้อ		
		25 นาที	30 นาที	35 นาที
ค่าสี L*	68.86±0.26 ^a	64.05±0.16 ^b	59.67±0.15 ^c	58.09±0.69 ^d
a*	4.55±0.16 ^c	7.46±0.33 ^b	7.75±0.10 ^{ab}	7.95±0.16 ^a
b*	21.93±0.19 ^c	23.50±0.12 ^b	24.43±0.67 ^{ab}	25.41±0.10 ^a
ค่าพีเอช (pH)	4.02±0.12 ^b	4.37±0.52 ^a	4.40±0.23 ^a	4.42±0.40 ^a

หมายเหตุ: ตัวอักษรที่กำกับในแนวนอนมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

จากรูปที่ 2 ผลิตภัณฑ์หลนปลาต้มฟักก่อนการฆ่าเชื้อมีสีขาวจากกะทิและส่วนผสมอื่น ๆ แต่เมื่อนำผลิตภัณฑ์หลนปลาต้มฟักฆ่าเชื้อด้วย Water Spray Retort อุณหภูมิ 116 °C เป็นเวลา 25 30 และ 35 นาที สังเกตพบว่าทั้งน้ำกะทิ เนื้อปลา และพริก มีสีที่เข้มขึ้นมากกว่าผลิตภัณฑ์ที่ยังไม่ผ่านการฆ่าเชื้อ เนื่องจากการใช้ความร้อนสูงในการฆ่าเชื้อ จึงทำให้สีของผลิตภัณฑ์แตกต่างไปจากตัวอย่างที่ยังไม่ผ่านกระบวนการฆ่าเชื้อ (Sutheerawathananon and Rodtong, 2008) จากตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์คุณภาพของผลิตภัณฑ์หลนปลาต้มฟักก่อนและหลังผ่านกระบวนการฆ่าเชื้อด้วยรีเทอร์ท พบว่าเมื่อใช้ระยะเวลาในการฆ่าเชื้อเพิ่มขึ้น ค่าสีของตัวอย่าง ค่า L^* ความสว่างลดลง และค่า a^* และ b^* มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากสีของเนื้อปลาและวัตถุดิบอื่น ๆ ผลการวัดค่าความสว่าง (L) ลดลงแสดงถึงการเปลี่ยนสีเข้มขึ้น ค่าสีที่ต่างกันอาจเกิดจากอุณหภูมิและความร้อนในการฆ่าเชื้อเป็นสาเหตุให้เกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard Reaction) เพิ่มขึ้นหรือการเกิดสีน้ำตาล (Browning Reaction) เพิ่มขึ้นเนื่องจากการใช้เวลาฆ่าเชื้อที่นานขึ้น ซึ่งทำให้สีของผลิตภัณฑ์หลนปลาต้มฟักเข้มขึ้นกว่าเดิม (Nursten, 2005) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Yotmanee and Ploykhaw (2022) ได้ศึกษาผลของการพาสเจอร์ไรซ์ต่อคุณภาพและการยืดอายุการเก็บรักษาของแกงส้มปักษ์ใต้พร้อมบริโภคพบว่าอุณหภูมิและเวลาที่ผ่านการพาสเจอร์ไรซ์ยังเพิ่มขึ้นทำให้สีของผลิตภัณฑ์เปลี่ยนแปลงไป โดยค่า L^* ลดลง ค่า a^* และ b^* จะเพิ่มขึ้น และงานวิจัยของ Kangkawisut and Khunputtirapee (2021) ที่ศึกษากระบวนการผลิตก้วยเตี่ยวเส้นจันท์ผัดปูพร้อมบริโภคในบรรจุภัณฑ์รีเทอร์ทพบว่าช่วงระยะเวลา ที่เหมาะสมในการฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 105 °C คือ ระยะเวลา 25 - 30 นาที โดยระยะเวลาการฆ่าเชื้อที่นานขึ้นมีผลต่อคุณภาพด้านสีแดง (a) มีค่าสูงขึ้น เนื่องจากความร้อนทำให้สีของผลิตภัณฑ์เปลี่ยนแปลง

หลนปลาต้มฟักที่ผ่านกระบวนการฆ่าเชื้อด้วยเวลาที่ต่างกัน มีค่าความเป็นกรด - ด่าง ไม่ต่างกัน ($p > 0.05$) แต่ตัวอย่างที่ผ่านการฆ่าเชื้อมีค่าความเป็นกรด - ด่าง (pH) สูงกว่าหลนปลาต้มฟักที่ยังไม่ผ่านการฆ่าเชื้อด้วยความร้อนสูง ($p \leq 0.05$) ผลการศึกษาคุณภาพด้านจุลินทรีย์ของผลิตภัณฑ์หลนปลาต้มฟัก ตรวจไม่พบจุลินทรีย์ที่สามารถเจริญได้ในระหว่างการเก็บรักษาในผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการฆ่าเชื้อทั้งระยะเวลา 25 30 และ 35 นาที และการเปลี่ยนแปลงของค่า pH ระหว่างการให้ความร้อนมีสาเหตุเกิดจากการเปลี่ยนแปลงประจุ หรือการเปลี่ยนแปลงพันธะไฮโดรเจน หรือทั้งสองอย่างที่เกิดขึ้นภายในไมโอไฟบริลลาร์โปรตีน (Myofibrillar Protein) โดยความร้อนทำให้พันธะไฮโดรเจนเกิดการแตกตัวส่งผลให้ประจุบวกถูกปลดปล่อยออกมามากขึ้นทำให้ค่า pH สูงขึ้น (Hamm, 1996)

ตารางที่ 5 คุณภาพทางจุลินทรีย์ของผลิตภัณฑ์หลนปลาต้มฟักที่ผ่านกระบวนการฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 116 °C เป็นเวลา 25 30 และ 35 นาที

จุลินทรีย์ทั้งหมด	25 นาที		30 นาที		35 นาที	
	37 °C	55 °C	37 °C	55 °C	37 °C	55 °C
TVC (Mesophilic)	ND	ND	ND	ND	ND	ND
TVC (Thermophile)	ND	ND	ND	ND	ND	ND

หมายเหตุ: ND หมายถึง Not Detect
TVC หมายถึง Total Viable Count (ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด)

ผลการทดสอบจุลินทรีย์ในผลิตภัณฑ์หลนปลาต้มฟักที่ผ่านการฆ่าเชื้อเป็นเวลา 25 30 และ 35 นาที จากนั้นนำตัวอย่างไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 และ 55 °C เป็นเวลา 2 สัปดาห์ พบว่าตรวจไม่พบจุลินทรีย์ในตัวอย่างที่สามารถเจริญได้ในระหว่างการเก็บรักษาทั้งชนิด Mesophilic และ Thermophile (ตารางที่ 5) การบ่มตัวอย่างที่ผ่านการฆ่าเชื้อที่อุณหภูมินี้ เพื่อแสดงว่าการฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 116 °C ช่วยทำลายจุลินทรีย์และยืดอายุการเน่าเสียของผลิตภัณฑ์อาหารสำเร็จรูปในภาชนะบรรจุปิดสนิทได้ การตรวจสอบสภาพปลอดภัยทางการค้า โดยการนำตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการฆ่าเชื้อแล้วไปทำการบ่ม (Incubate) ที่อุณหภูมิ 37 °C และ 55 °C เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับจุลินทรีย์ชนิดไม่ทนความร้อน (Mesophilic Bacteria) ซึ่งอาจรอดจากการฆ่าเชื้อ หากกระบวนการไม่สมบูรณ์

ส่วน 55°C ใช้สำหรับกระตุ้นการเจริญของจุลินทรีย์ทนร้อน (Thermophilic Bacteria) ซึ่งอาจเป็นชนิดที่ทนต่อกระบวนการรีโอร์ท เช่น *Bacillus stearothermophilus* โดยปกติจะบ่มเป็นเวลา 7 - 14 วัน หากไม่มีการเจริญของจุลินทรีย์ แสดงว่าผลิตภัณฑ์อยู่ในสภาพปลอดเชื้อทางการค้า (Commercially Sterile) (Landry et al., 2001) ในการศึกษาี้แสดงให้เห็นว่าหอยปลาต้มพริกในบรรจุภัณฑ์รีโอร์ทแพคเกจผ่านกระบวนการฆ่าเชื้อเพียงพอที่จะทำให้ผลิตภัณฑ์ได้รับการฆ่าเชื้อทางการค้า เป็นไปตามประกาศของกระทรวงสาธารณสุขที่กำหนดให้อาหารในภาชนะบรรจุปิดสนิทและมีความเป็นกรด - ด่าง ตั้งแต่ 4.6 ลงมา ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดไม่เกิน 1,000 โคโลนีต่อกรัม ผ่านการฆ่าเชื้อด้วยความร้อนที่อุณหภูมิและเวลาที่กำหนด (Ministry of Public Health, 2013) จากตารางที่ 4 ไม่พบเชื้อจุลินทรีย์ที่สามารถเจริญเติบโตได้ในตัวอย่างที่ผ่านการฆ่าเชื้อเป็นเวลา 25 นาที จึงมั่นใจได้ว่าผลิตภัณฑ์หอยปลาต้มพริกปลอดภัยกับผู้บริโภค จึงนำผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการฆ่าเชื้อด้วยเวลา 25 นาที ไปศึกษาเปรียบเทียบคุณภาพด้านประสาทสัมผัส

3. คุณภาพทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์หอยปลาต้มพริกก่อนและหลังผ่านกระบวนการฆ่าเชื้อ

ผลการศึกษาคูณภาพทางประสาทสัมผัสของหอยปลาต้มพริกก่อนและหลังผ่านกระบวนการฆ่าเชื้อด้วยอุณหภูมิ 116 °C ระยะเวลา 25 นาที ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ผลการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสในด้านต่าง ๆ ของผลิตภัณฑ์หอยปลาต้มพริกก่อนและหลังผ่านการฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 116 °C ระยะเวลา 25 นาที

คุณลักษณะ	ก่อนฆ่าเชื้อ	ผ่านการฆ่าเชื้อ 25 นาที
ลักษณะที่ปรากฏ	7.77±0.94 ^b	8.00±0.91 ^a
สี	7.97±0.85 ^b	8.20±0.85 ^a
กลิ่น ^{ns}	8.20±0.71	8.17±0.83
เนื้อสัมผัส ^{ns}	7.97±0.76	7.90±1.02
รสชาติ ^{ns}	8.20±0.61	8.30±0.75
ความชอบโดยรวม ^{ns}	7.87±0.86	8.13±1.04

หมายเหตุ: ตัวอักษรที่กำกับในแนวนอนมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

^{ns} ที่กำกับในแนวนอนไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

ตารางที่ 6 แสดงคะแนนความชอบด้านประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์หอยปลาต้มพริก พบว่าผู้ทดสอบชิมให้คะแนนความชอบผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการฆ่าเชื้อเป็นเวลา 25 นาที ในด้านลักษณะปรากฏและด้านสีสูงกว่าตัวอย่างที่ไม่ผ่านกระบวนการฆ่าเชื้อ ($p \leq 0.05$) โดยด้านกลิ่น เนื้อสัมผัส รสชาติ และความชอบโดยรวมไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) แสดงว่าผู้ทดสอบชิมยังให้การยอมรับผลิตภัณฑ์หอยปลาต้มพริกพร้อมบริโภคที่ผ่านกระบวนการฆ่าเชื้อด้วยความร้อนสูงที่อุณหภูมิ 116 °C ด้วยเป็นระดับอุณหภูมิที่ให้การกระจายความร้อนที่เพียงพอในรีโอร์ทแพคเกจที่ช่วยลดการ เกิด Overcooking บริเวณขอบของถุงได้ (Yu et al., 2023)

สรุป

สูตรพื้นฐานผลิตภัณฑ์หอยปลาต้มพริก ที่ดัดแปลงจากสูตรน้ำพริกหอยปลาสดเครื่องจิ้ม สูตรที่ 3 เป็นผู้ทดสอบชิมให้คะแนนความชอบสูงที่สุด ผลิตภัณฑ์หอยปลาต้มพริกที่ผ่านกระบวนการฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 116 °C เป็นเวลา 25 30 และ 35 นาที มีผลต่อค่าสีของผลิตภัณฑ์ที่ต่างกันการใช้เวลาในการฆ่าเชื้อนานขึ้น มีผลต่อคุณลักษณะด้านสีของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น ค่าความสว่าง L^* น้อยลง ค่าสีแดง a^* และค่าสีเหลือง b^* เพิ่มขึ้น แต่ระยะเวลาการฆ่าเชื้อที่ต่างกันไม่มีผลต่อค่าความเป็นกรด - ด่าง ($p > 0.05$) ตรวจไม่พบจุลินทรีย์ที่สามารถเจริญได้ในระหว่างการเก็บรักษาในผลิตภัณฑ์หอยปลาต้มพริกที่ผ่านการฆ่าเชื้อด้วยระยะเวลา 25 30 และ 35 นาที โดยผลการศึกษาคุณภาพทางประสาทสัมผัสของ

ผลิตภัณฑ์หลนปลาต้มพริกที่ผ่านกระบวนการฆ่าเชื้อไม่แตกต่างกับผลิตภัณฑ์หลนปลาต้มพริกที่ยังไม่ผ่านกระบวนการฆ่าเชื้อ โดยได้รับคะแนนความชอบด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รส เนื้อสัมผัส ความชอบโดยรวม ไม่แตกต่างกัน ($p>0.05$) ทั้งนี้ในการผลิตระดับอุตสาหกรรม ควรศึกษาคุณค่าทางโภชนาการและศึกษาการแทรกผ่านความร้อนในบรรจุภัณฑ์ (Heat Penetration, Fo) เพื่อประเมินสภาวะการผลิตที่เหมาะสมและปลอดภัยสำหรับผู้บริโภค

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ให้การสนับสนุนงบประมาณจากกองทุนเพื่อการวิจัยภายใต้โครงการส่งเสริมสิ่งประดิษฐ์และนวัตกรรมเพื่อคนรุ่นใหม่

References

- Abhishek, V., Kumar, R., George, J., Nataraju, S., Lakshmana, J.H., Kathiravan, T., Madhukar, N. and Nadanasabapathi, S. (2014). Development of Retort Process for Ready-to-Eat (RTE) Soy-Peas Curry as a Meat Alternative in Multilayer Flexible Retort Pouches. *International Food Research Journal*, 21(4), 1553-1558. <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/pdf/10.5555/20143298092>
- André, S., Charton, A., Pons, A., Vannier, C. and Couvert, O. (2021). Viability of Bacterial Spores Surviving Heat-Treatment is Lost by Further Incubation at Temperature and pH Not Suitable for Growth. *Food Microbiology*, 95, 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2020.103690>
- Bindu, J., Ravishankar, C.N., Dinesh, K., Mallick, A.K. and Gopal, T.K.S. (2011). Heat Penetration Characteristics and Shelf Life of Ready to Serve Mahseer Curry in Opaque Retortable Pouches. *Fishery Technology*, 48(2), 141-148. <https://epubs.icar.org.in/index.php/FT/article/view/8189/3214>
- Dasan, G.P., Bojayanai, M., Gundubilli, D., Banavath, S.N., Siravati, M.R., Obaliah, M.C. and Alandur, V.S. (2021). Heat Penetration Characteristics and Quality of Ready-to-Eat Shrimp in Masala (*Litopenaeus vannamei*) in Flexible Retortable Pouches. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45(5), <https://doi.org/10.1111/jfpp.15411>
- Deeprasert, A. and Vatthanakul, S. (2023). Production of Ready-to-eat Egg White Porridge in Retort Pouch. *Srinakharinwirot University Journal of Sciences and Technology*, 15(29), 1-12. <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/swujournal/article/view/249756/168977>
- Hamm R. (1996). *The Physiology and Biochemistry of Muscle as Food, Heating of Muscle Systems*. In Brisket E.J., Cassens R.G., Trautman J.C., (Eds.), Madison University of Wisconsin Press; 1966, 363-385.
- Kangkawisut, N. and Khunputtirapee, T. (2021). The Study Process on Ready to Eat Stir-Fried Chan Noodles with Crab Product in Flexible Package (Retort Pouch). *Recent Science and Technology*, 13(1), 216-226. <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/rmutsvrj/article/view/194660>
- Khwanchai, P., Dokkhom, W., Phandaeng, P. and Fong-In, S. (2023). Effect of Thermal Process on Physicochemical Characteristics and Sensory Quality of Stewed Beef Product in Retortable Pouches. *Burapha Science Journal*, 28(1), 94-113. <https://scijournal.buu.ac.th/index.php/sci/article/view/4404>
- Klamsakul, S., Ratchatachaiyos, K., NimKian, B. and Chomphuthong, P. (2024). Product Development of Toddy Palm Seeds in Sugar Palm Juice Packed in Retort Pouch. *Journal of Food Technology, Siam University*, 19(1), 37-49. <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/JFTSU/article/view/261773>

- Landry, W., Schwab, A. and Lancette, G. (2001). *Examination of canned foods*. AOAC International, Gaithersburg, Maryland. <https://www.fda.gov/food/laboratory-methods-food/bam-chapter-21a-examination-canned-foods>
- Maeban. (2012). *Dipping Sauces, Salad Dressing Seasoning*. Maeban, Bangkok. (In Thai).
- Ministry of Public Health. (2013). *Food in a Hermetically Sealed Container*. FDA, MOPH. https://exfood.fda.moph.go.th/law/data/announ_moph/V.English/P355_E.pdf
- National Food Institute. (2020, April). *Ready-to-Eat Food Market*. <https://fic.nfi.or.th/market-intelligence-detail.php?smid=290>
- Nursten, H.E. (2005). *The Maillard Reaction: Chemistry, Biochemistry, and Implications*. Royal Society of Chemistry, Cambridge, UK.
- Parnsakhorn, S., Langkapin, J., Pansri, P. and Chaiyadam, T. (2020). Effect of Sterilization Process on Physicochemical Properties of Lotus Leaf Wrapped Rice in Retort Pouch Product. *Journal of Applied Research on Science and Technology (JARST)*, 19(1), 1-15. <https://doi.org/10.14456/rj-rmutt.2020.1>
- Phitakpol, B. (1993). *Fish Fermentation Technology in Thailand*. Fermentation Technology, United Nation University Press, Tokyo (Japan) (1993), 155-166
- Pornchaloempong, P. and Rattanapannone, R. (2017). *Retort Pouch*. Food Network Solution. Food Network Solution. <https://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0473/retort-pouch->
- Rangsadthong, W. (2014). *Food Processing Technology* (5thed). Bangkok: Tex and Journal Publication Co., Ltd.
- Royal Thai Government Gazette. (2003). *Royal Institute Dictionary B.E. 2542 (1999)* (1sted). Nanmee Books Publications.
- Sutheerawathananond, M. and Rodtong, S. (2008). *Ready-to-Eat Pla-Som*. Department of Food Technology, Suranaree University of Technology. <https://doi.org/10.14457/SUT.res.2008.22>
- Teixeira, A.A., Ball, C.O. and Pflug, I.J. (1969). Heat Penetration into Cylindrical Containers Filled with Conduction-Heating Foods. *Food Technology*, 23, 99-106.
- The Central Library of Silpakorn University. (2021, May 31). *Crab dipping sauce “Loun Poo Pen Het”* [Facebook post]. <https://www.facebook.com/suslibrary/posts/3935903499829907/>
- Uluchada, P. (2005). *The Delicious Food of the Ancient People*. Bangkok: Sangdad Publisher.
- Vijayakumar, P.P. and Adedeji, A. (2017). *Measuring the pH of Food Products*. University of Kentucky College of Agriculture, Food and Environment Cooperative Extension Service: Lexington, KY, USA, Publication No. ID-246.
- Yotmanee, S. and Ploykhaw, J. (2022). The Effect of Pasteurization on the Quality and Shelf Life of Ready to Eat Southern Sour Curry. *PKRU SciTech Journal*, 6(2), 32-43. <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/pkruscitech/article/view/248770>
- Yu, S.S., Ahn, H.S. and Park, S.H. (2023). Heat Penetration and Quality Analysis of Retort Processed Vegetables for Home Meal Replacement Foods. *Food Science and Biotechnology*, 32, 1057-1065. <https://doi.org/10.1007/s10068-023-01247-8>

การดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 ด้วยถ่านจากเปลือกผลลำโรง

Adsorption of Reactive Blue 19 Dye Using Charcoal Derived from *Sterculia foetida* Fruit Rind

วาทีนี จันมี* หทัยรัตน์ สุขเพริยบพร้อม และอารี แจ้งเรือง

Watinee Chanmee* Hatairat Sukpreabprom and Aree Jangruang

Received: June 17, 2024; Revised: September 11, 2025; Accepted: September 12, 2025

บทคัดย่อ

การดูดซับเป็นวิธีการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนสีย้อมจากอุตสาหกรรมสิ่งทอที่ทำได้ง่ายและมีประสิทธิภาพ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 โดยใช้ถ่านที่เตรียมจากเปลือกผลลำโรงเป็นวัสดุดูดซับ ทำการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของถ่านที่เตรียมได้ สภาวะที่เหมาะสมต่อการดูดซับ พฤติกรรมการดูดซับผ่านไอโซเทอมและจลนศาสตร์การดูดซับในระบบแบตช์ ผลการทดลองพบว่าถ่านที่เตรียมได้มีพื้นที่ผิวจำเพาะ 12.74 ตารางเมตรต่อกรัม และขนาดของรูพรุนเฉลี่ย 2.111 นาโนเมตร จัดเป็นวัสดุที่มีรูพรุนขนาดกลาง ลักษณะสัณฐานมีพื้นผิวขรุขระมีช่องว่างและรูพรุน ธาตุองค์ประกอบหลักคือ คาร์บอน และออกซิเจน ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 พบว่าสภาวะที่เหมาะสม คือ ปริมาณถ่าน 0.30 กรัม เวลาในการดูดซับ 180 นาที และค่าความเป็นกรด-เบส (pH) ของสีย้อมไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการดูดซับ ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับสอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์มากกว่าไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช จัดเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว และมีลักษณะเป็นเนื้อเดียว มีค่าการดูดซับสูงสุด (q_m) เท่ากับ 3.7764 มิลลิกรัมต่อกรัม ผลการศึกษาจลนศาสตร์ การดูดซับสอดคล้องกับแบบจำลองสมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียมซึ่งชี้ให้เห็นว่าการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นการดูดซับทางเคมี จากผลศึกษานี้ชี้ให้เห็นถึงศักยภาพของถ่านที่ผลิตจากเปลือกผลลำโรงในการนำมาใช้เป็นวัสดุดูดซับสำหรับกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 ในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม ช่วยลดปัญหามลพิษทางสิ่งแวดล้อมและส่งเสริมการใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือใช้ในท้องถิ่นอย่างมีคุณค่าและยั่งยืน

คำสำคัญ: การดูดซับ; สีย้อมรีแอคทีฟบลู 19; ถ่าน; ลำโรง

คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา

Faculty of Education, Bansomdejchaopraya Rajabhat University

* Corresponding Author, Tel 08 9164 7329, E-mail: watinee.ch@bsru.ac.th

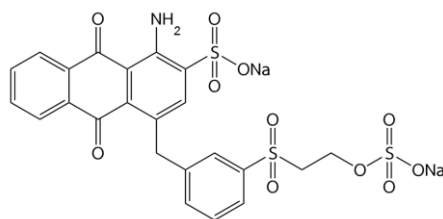
Abstract

Adsorption is a simple and effective method for treating wastewater contaminated with dyes from the textile industry. This study aimed to investigate the adsorption capacity of Reactive Blue 19 dye using charcoal prepared from *Sterculia foetida* fruit rind as the adsorbent. The physical properties of the prepared charcoal, the optimal conditions for adsorption, and the adsorption behavior based on isotherm and kinetic studies were examined under batch conditions. The results showed that the charcoal had a specific surface area of 12.74 m²/g and an average pore diameter of 2.111 nm, classifying it as mesoporous. Its morphology exhibited a rough surface with voids and pores, and the principal elemental components were carbon and oxygen. The optimal conditions for Reactive Blue 19 adsorption were an adsorbent dose of 0.30 g and an adsorption time of 180 min, while the pH of the dye solution did not significantly affect the adsorption. The adsorption isotherm data fitted the Langmuir isotherm better than the Freundlich isotherm, indicating monolayer, homogeneous adsorption, with a maximum adsorption capacity (q_m) of 3.7764 mg/g. The adsorption kinetics followed the pseudo-second-order model, suggesting that the process was governed by chemisorption. These findings demonstrate the potential of charcoal derived from *Sterculia foetida* fruit rind as an adsorbent for removing Reactive Blue 19 from dyeing wastewater, thereby helping to reduce environmental pollution and promoting the valuable and sustainable utilization of locally available agricultural residues.

Keywords: Adsorption; Reactive Blue 19 Dye; Charcoal; *Sterculia foetida*

บทนำ

สีย้อมผ้าสังเคราะห์เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมสิ่งทอ โดยสามารถจำแนกได้เป็นหลายประเภท เช่น สีย้อมแอโซ (Azo Dyes) สีย้อมรีแอคทีฟ (Reactive Dyes) สีย้อมไดเรกต์ (Direct Dyes) และสีย้อมแอนไอออนิก (Anionic Dyes) แต่ละประเภทมีโครงสร้างทางเคมีและคุณสมบัติเฉพาะที่เหมาะสมกับชนิดของเส้นใยผ้า (Benkhaya et al., 2020) สีย้อมรีแอคทีฟ เช่น สีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 เป็นสีย้อมที่นิยมอย่างมากในอุตสาหกรรมสิ่งทอฝ้าย เนื่องจากสีย้อมรีแอคทีฟสามารถสร้างพันธะโควาเลนต์กับเส้นใย ทำให้ได้สีที่คงทนต่อการซักและแสง (Śmigiel-Kamińska et al., 2020) อย่างไรก็ตามพบปัญหาจากความคงทนต่อการย่อยสลายทางชีวภาพ จึงมักพบการปนเปื้อนในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรม ซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมออกซิเจนในน้ำ ทำให้เกิดผลกระทบต่องานมีชีวิตในระบบนิเวศน้ำจืด (Gholizade et al., 2023) อีกทั้งยังมีการศึกษาพบว่า สีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 ก่อให้เกิดการกลายพันธุ์และพิษ ต่อจุลินทรีย์และสัตว์น้ำ (Saratale et al., 2011) สีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 มีสูตรโมเลกุล $C_{22}H_{16}N_2Na_2O_{11}S_3$ มวลโมเลกุล 626.53 g·mol⁻¹ มีโครงสร้างดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 โครงสร้างสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19

กระบวนการกำจัดสีย้อมจากน้ำทิ้งในโรงงานอุตสาหกรรมสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การใช้กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Advanced Oxidation Processes-AOPs) ซึ่งรวมถึงการใช้โอโซนร่วมกับรังสีอัลตราไวโอเลต (UV) ที่สามารถลดความเข้มข้นของสีย้อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกวิธีหนึ่งคือการใช้กระบวนการเฟนตัน (Fenton Process) ซึ่งใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมกับไอออนเหล็กในการสร้างอนุมูลไฮดรอกซิลที่สามารถย่อยสลายสีย้อมได้ (Abrile et al., 2020) และวิธีที่ได้รับความนิยมวิธีหนึ่งคือ การดูดซับ เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ประหยัดและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม วัสดุดูดซับจากธรรมชาติหลายชนิดที่สามารถดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 ได้ดี ตัวอย่างเช่น กากชา และเมล็ดมะรุม (Yadav et al., 2024; Reddy et al., 2024) ชิงช้าโพล (Rahmoun et al., 2025) และยังมีรายงานว่าผงเมล็ดทับทิม สามารถดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 ได้ดี (Dehvari et al., 2016)

การใช้วัสดุดูดซับจากธรรมชาติ หรือของเสียทางการเกษตรมาให้ความร้อนสูงภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจนจำกัดหรือไม่มีเลยจะได้ ถ่าน (Charcoal) หรือเรียกว่า ถ่านชีวภาพ (Biochar) เป็นวัสดุที่มีรูพรุน ซึ่งได้จากการคาร์บอนไนเซชันของวัสดุชีวมวล (Lehmann and Joseph, 2015) การมีรูพรุนสูงทำให้ถ่านสามารถดูดซับได้ดีขึ้น ตัวอย่างของถ่านจากชีวมวลที่ใช้ดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 ได้ดี เช่น ถ่านจากกากกาแฟ (Hyeon et al., 2025) ถ่านจากชิงช้าโพล (Adejumo et al., 2020) ถ่านจากเปลือกเมล็ดแมคคาเดเมีย (Fernandes et al., 2025) ถ่านเปลือกกล้วย (Hoa et al., 2025) และถ่านจากไม้ไผ่ (Ahmad and Hameed, 2010) เป็นต้น การใช้วัสดุดูดซับจากธรรมชาติเหล่านี้ไม่เพียงแต่ช่วยลดต้นทุนในการบำบัดน้ำเสียเท่านั้น แต่ยังส่งเสริมการใช้ทรัพยากรในท้องถิ่นและลดปริมาณของเสียจากการเกษตรอีกด้วย

ลำโรง (*Sterculia foetida*) เป็นไม้ยืนต้นที่พบในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ โดยเฉพาะในอินเดีย ศรีลังกา อินโดนีเซีย และบางพื้นที่ของประเทศไทย (Yennam et al., 2024) เปลือก ผล และเมล็ดของต้นลำโรงสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย เช่น เมล็ดมีน้ำมันที่สามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมสบู่ เชื้อเพลิง และยา (Sridharan et al., 2024) เปลือกผลลำโรงเมื่อแก่จัดจนแห้งจะแข็งเหมือนไม้ เปลือกหนาแต่เบา แสดงว่ามีช่องอากาศแทรกอยู่ภายในจำนวนมาก งานวิจัยนี้สนใจที่จะนำเปลือกผลลำโรงซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้ที่มีอยู่ในท้องถิ่นมาทำให้เป็นถ่านเพื่อเพิ่มรูพรุนให้มากขึ้น ใช้เป็นวัสดุดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุที่เตรียมได้ การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 ไอโซเทอมการดูดซับ และจลนศาสตร์การดูดซับ ซึ่งผลการศึกษารั้งนี้จะเป็นประโยชน์ต่อการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม ลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือใช้ในชุมชน

วิธีการดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมวัสดุดูดซับ ถ่านจากเปลือกผลลำโรง

นำเปลือกผลลำโรงมาล้างด้วยน้ำสะอาดเพื่อลดสิ่งสกปรก ตากให้แห้ง จากนั้นนำไปคาร์บอนไนเซชันด้วยเตาเผาที่อุณหภูมิ 800 °C ภายใต้สภาวะที่มีการจำกัดออกซิเจน เป็นเวลา 5 ชั่วโมง นำวัสดุที่ได้มาบดให้ละเอียดและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 100 เมช เพื่อให้ได้ขนาดอนุภาคที่สม่ำเสมอ แล้วนำไปอบที่ 70 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

2. การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของถ่านจากเปลือกผลสำโรง

2.1. วิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ และปริมาตรรูพรุนของถ่านที่เตรียมได้ ด้วยเครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิว (Specific Surface Area Analyzer) บริษัท Quantachrome รุ่น Quadrasorb SI ด้วยวิธี BET (Brunauer Emmett-Teller)

2.2. วิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาถ่านจากเปลือกผลสำโรง ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) บริษัท JEOL รุ่น JSM-6610LV และต่อกับอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์วัดการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ (Energy Dispersive X-ray Spectrometer, EDS) บริษัท Oxford รุ่น INCA x-act

2.3. วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer (FTIR) บริษัท Perkin Elmer รุ่น Spectrum One โดยใช้เทคนิค Attenuated Total Reflectance (ATR) ที่มีการวัดในช่วงคลื่น 400 - 4000 cm^{-1}

3. การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19

ทำการทดลองแบบแบตช์ (Batch Experiments) โดยชั่งถ่านจากเปลือกผลสำโรงใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 50 mL ปิดเตาสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 ความเข้มข้น 50.00 ppm ปริมาตร 25.00 mL ใส่ขวดรูปชมพู่ นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าสาร (Digital Precise Shaking Water Bath; บริษัท DAIHAN Scientific รุ่น Maxturdy-45) ความเร็ว 150 รอบต่อนาทีที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นทำการกรองสุญญากาศด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 5 และนำสารละลายที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis Spectrophotometer; บริษัท Metash รุ่น UV5100) ที่ความยาวคลื่น 591 nm คำนวณค่าร้อยละการดูดซับ (%Adsorption) ดังสมการที่ (1) และความสามารถในการดูดซับ (q_e) ดังสมการที่ (2)

ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับดังนี้:

3.1. ปริมาณวัสดุดูดซับ: เปรียบเทียบค่าร้อยละการดูดซับ เมื่อใช้ถ่านจากเปลือกผลสำโรงมวล 0.0500 0.1000 0.1500 0.2000 0.2500 0.3000 และ 0.3500 กรัม โดยควบคุมเวลาในการดูดซับ 6 ชั่วโมง

3.2. เวลาในการดูดซับ: ใช้ถ่านจากเปลือกผลสำโรง 0.2000 กรัม เปรียบเทียบค่าร้อยละการดูดซับเมื่อกำหนดเวลาในการดูดซับที่ 10 30 60 120 180 และ 240 นาที

3.3. ค่าความเป็นกรด-เบส (pH): เปรียบเทียบค่าร้อยละการดูดซับเมื่อใช้สารละลายสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 ที่มีค่า pH เป็น 2 4 6 7 8 และ 10 โดยใช้วัสดุดูดซับ 0.2000 กรัม และเวลาในการดูดซับ 180 นาที

การทดลองในแต่ละปัจจัยดำเนินการซ้ำอย่างน้อย 3 ครั้ง ข้อมูลที่ได้ถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (one-way ANOVA) เพื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย และวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างคู่ค่าเฉลี่ยโดยใช้วิธี Tukey's HSD (Honestly Significant Difference) ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 (กำหนดให้ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ) โดยแสดงผลการทดลองในรูปของค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (El-Naggar et al., 2016)

$$\% \text{Adsorption} = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100 \quad (1)$$

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)V}{m} \quad (2)$$

โดย C_0 C_e และ V คือ ความเข้มข้นเริ่มต้น (ppm) ความเข้มข้นที่สมดุล (ppm) และปริมาตรของสารละลายรีแอคทีฟบลู 19 (mL) ตามลำดับ และ m คือมวลของถ่านจากเปลือกผลสำโรง (g)

4. การศึกษาสมการไอโซเทอมการดูดซับ

เตรียมสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 ที่ความเข้มข้น 20.00 25.00 30.00 40.00 และ 50.00 ppm ทำการดูดซับด้วยถ่านจากเปลือกผลสำโรง 0.2000 กรัม เป็นเวลา 180 นาที แล้ววัดความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลือในสารละลายด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ จากนั้นคำนวณค่า q_e และนำผลลัพธ์ไปวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองไอโซเทอมของ Langmuir และ Freundlich เพื่อหากลไกการดูดซับ

5. การศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับ

ชั่งถ่านจากเปลือกผลสำโรง 0.2000 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ ปิเปตสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 ความเข้มข้น 50.00 ppm ปริมาตร 25.00 mL ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ จากนั้นนำไปเขย่าที่ความเร็ว 150 รอบต่อนาที เวลา 10 30 60 120 180 และ 240 นาที กรองแยกสารละลายนำมาวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารละลายรีแอคทีฟบลู 19 ด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ นำผลการทดลองที่ได้มาคำนวณความสามารถในการดูดซับที่สมดุล (q_e) ตามสมการที่ (2) ความสามารถในการดูดซับที่เวลา t (q_t) ตามสมการที่ (3) โดย C_t คือความเข้มข้นของสารละลายรีแอคทีฟบลู 19 ที่เวลา t นำค่าที่ได้ไปสร้างกราฟเพื่อวิเคราะห์รูปแบบการดูดซับโดยใช้แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-First-Order) และ แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo-Second-Order)

$$q_t = \frac{(C_0 - C_t)V}{m} \quad (3)$$

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

1. ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของถ่านจากเปลือกผลสำโรง

1.1 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ และปริมาตรรูพรุนของถ่านที่เตรียมได้ ด้วยเครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิว (Specific Surface Area Analyzer) ด้วยวิธี BET (Brunauer-Emmett-Teller)

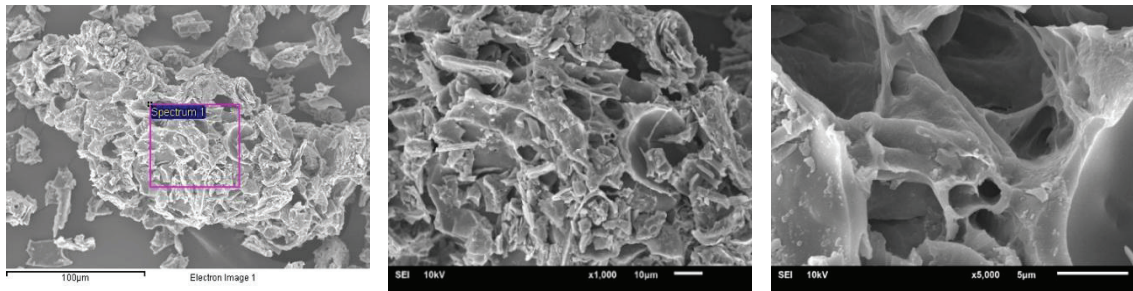
ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพด้วย BET Surface Area ของถ่านจากเปลือกผลสำโรง

รายการ	ผลการวิเคราะห์
พื้นที่ผิว (Surface Area Data)	12.74 m ² /g
ปริมาตรรูพรุน (Pore Volume)	0.01344 cm ³ /g
ขนาดของรูพรุน (Pore Size)	2.111 nm

การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของถ่านที่เตรียมได้จากเปลือกผลสำโรง พบว่ามีปริมาตรรูพรุน 0.01344 cm³/g มีพื้นที่ผิว 12.74 m²/g พื้นที่ผิวมีค่าไม่สูงมาก แต่มีค่าสูงกว่าถ่านจากวัสดุชีวมวลอื่นที่ไม่ได้ผ่านการกระตุ้น เช่น ถ่านจากก้นข้าว (*Biden pilosa*) ที่มีพื้นที่ผิว 5.21 m²/g (Sangsuk et al., 2023) และถ่านจากพืชหน่อกิม (Suaeda Altissima) ที่มีพื้นที่ผิว 3.5 m²/g (Xiao et al., 2022) เมื่อพิจารณาขนาดของรูพรุนของถ่านจากเปลือกผลสำโรงที่มีขนาด 2.111 nm ตามนิยามของ International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) วัสดุที่มีรูพรุนเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 2 - 50 nm จัดอยู่ในกลุ่มรูพรุนขนาดกลาง หรือ เมโซพอร์ (Mesopores) (Galán et al., 2013; Thommes et al., 2015) นอกจากนี้จากกราฟไนโตรเจนแอดซอร์ปชัน-ดีซอร์ปชัน แสดงลักษณะไอโซเทอมประเภทที่ IV ตามเกณฑ์ของ IUPAC โดยมี Hysteresis Loop ปรากฏชัดเจนในช่วง P/Po ประมาณ 0.4 - 0.9 ซึ่งเป็นช่วงที่สัมพันธ์กับการเกิดการควบแน่นของไนโตรเจนในรูพรุนขนาดกลาง

บ่งชี้ว่าถ่านจากเปลือกผลสำโรงนี้มีลักษณะเป็นวัสดุประเภทเมโซพอร์ (Sing, 1985; Thommes et al., 2015) ทำให้โมเลกุลสีย้อมสามารถแพร่กระจายและเข้าสู่ภายในโครงสร้างรูพรุนได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยไม่เกิดข้อจำกัดจากผลกระหนาบการกีดกันขนาด (Size Exclusion Effect) โมเลกุลสีย้อมที่มีขนาดใหญ่ผ่านเข้ารูพรุนขนาด Micropore ได้ยาก ส่วนรูพรุนขนาด Macropore แม้จะมีขนาดใหญ่จนโมเลกุลของสีย้อมผ่านเข้าไปได้ แต่จะมีพื้นที่ผิวน้อยลงทำให้ดูดซับได้ไม่ดี (Foo and Hameed, 2010; Iwuozor et al., 2021)

1.2 ผลการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาถ่านจากเปลือกผลสำโรง ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM/EDS)



(ก) กำลังขยาย 500 เท่า

(ข) กำลังขยาย 1,000 เท่า

(ค) กำลังขยาย 5,000 เท่า

และบริเวณที่วิเคราะห์ธาตุ
องค์ประกอบด้วยเทคนิค EDS

รูปที่ 2 ภาพขยายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของถ่านจากเปลือกผลสำโรง

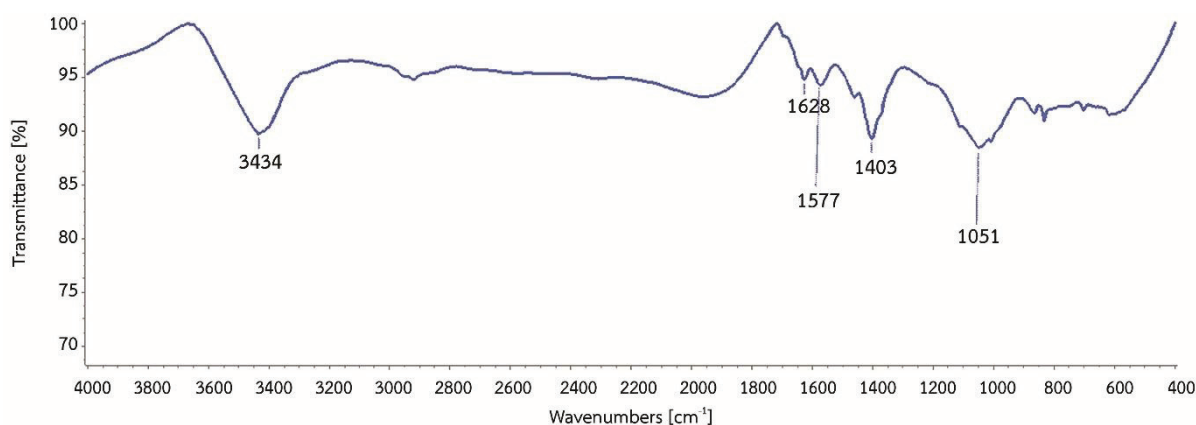
ตารางที่ 2 ธาตุองค์ประกอบของถ่านจากเปลือกผลสำโรงที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM/EDS

Element	Weight %	Atomic %
C	67.54	79.27
O	17.06	15.03
Mg	0.47	0.28
Cl	1.40	0.55
K	12.07	4.35
Ca	1.46	0.52
Totals	100.00	-

จากการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของถ่านจากเปลือกผลสำโรงที่เตรียมได้ พบว่าพื้นผิวมีลักษณะขรุขระมีช่องว่าง และรูในถ่าน ดังรูปที่ 2(ก) (ข) และ (ค) โดยช่องว่างนี้มีทั้งขนาดเล็กและใหญ่ โดยช่องว่างขนาดใหญ่มีขนาดมากกว่า 5 ไมโครเมตร การวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของถ่านจากเปลือกผลสำโรงด้วยเทคนิค SEM/EDS ในตารางที่ 2 แสดงให้เห็นว่า มีคาร์บอน (C) เป็นองค์ประกอบหลัก 67.54 % โดยน้ำหนัก หรือ 79.27 % เชิงอะตอม ซึ่งเป็นคุณสมบัติทั่วไปของถ่านจากวัสดุธรรมชาติที่ผ่านการคาร์บอนไนเซชัน ปริมาณคาร์บอนที่สูงนี้ ประกอบกับโครงสร้างที่มีรูพรุน ทำให้เกิดอันตรกิริยากับสีย้อมได้ดี (Keiluweit et al., 2010) π - π stacking โดยเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างวงแหวนอะโรมาติกของถ่านกับวงแหวนอะโรมาติกของโมเลกุลสีย้อม (Laishram et al., 2025) นอกจากนี้ยังพบออกซิเจน (O) เป็นองค์ประกอบ 17.06 % โดยน้ำหนัก หรือ 15.03 % เชิงอะตอม แสดงว่ายังมีหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนหลงเหลืออยู่บนพื้นผิวถ่าน ซึ่งช่วยในการเกิดแรงยึดเหนี่ยวทางไฟฟ้าสถิต หรือ

พันธะไฮโดรเจนกับสีย้อมที่มีขั้วอย่างสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 (Xue et al., 2012) ส่วนธาตุรองได้แก่ โพแทสเซียม (K) แคลเซียม (Ca) และแมกนีเซียม (Mg) เป็นสิ่งตกค้างจากพืช มีส่วนช่วยในการดูดซับแบบแลกเปลี่ยนไอออน เมื่อโลหะเหล่านี้แตกตัวเป็นไอออนบวกจะช่วยในการดูดซับสีย้อมที่มีประจุลบได้ (Ahmad et al., 2014) องค์ประกอบธาตุที่หลากหลายและสัดส่วนของธาตุคาร์บอนที่สูง แสดงถึงศักยภาพของถ่านจากเปลือกผลสำโรง ในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 ได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Chen et al., 2011)

1.3 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer (FTIR)



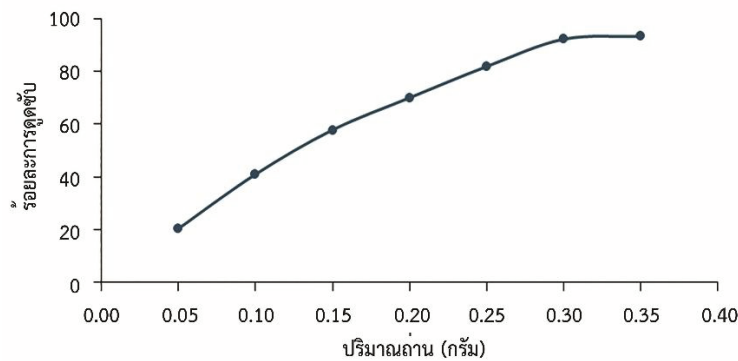
รูปที่ 3 สเปกตรัมอินฟราเรดของถ่านจากเปลือกผลสำโรง

สเปกตรัมอินฟราเรดของถ่านจากเปลือกผลสำโรงในรูปที่ 3 พบพีกที่ปรากฏที่เลขคลื่นประมาณ 3434 cm^{-1} แสดงถึงหมู่ไฮดรอกซิล (O-H stretching) ที่เลขคลื่น 1627 cm^{-1} การสั่นของพันธะ C=O (C=O stretching) และพันธะ C=C ในวงอะโรมาติก (highly conjugated aromatic C=C stretching) (condensed aromatic C=C stretching) ที่เลขคลื่น 1577 cm^{-1} (Chatterjee et al., 2020; Angthararuk et al., 2023) สอดคล้องกับผล SEM/EDS ที่บ่งชี้ถึงธาตุคาร์บอนและออกซิเจนที่เป็นองค์ประกอบหลัก มีวงอะโรมาติกเป็นโครงสร้างหลักของคาร์บอนในถ่านชีวภาพที่ผ่านการคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิสูง (Keiluweit et al., 2010) อีกทั้งยังประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลและหมู่คาร์บอนิลด้วย

2. ผลการศึกษาสภาพที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19

2.1 ปริมาณวัสดุดูดซับ

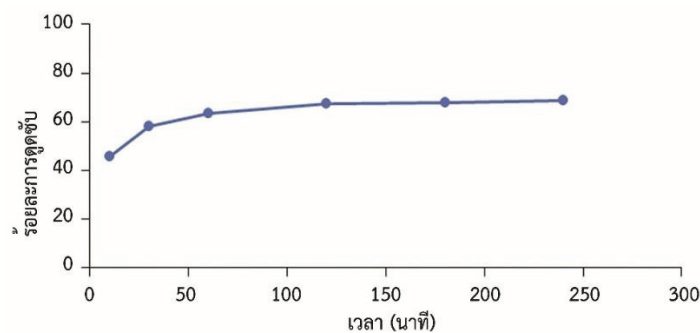
ผลการศึกษาผลของปริมาณถ่านต่อการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 ในรูปที่ 4 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของถ่านมากขึ้น 0.0500 0.1000 0.1500 0.2000 0.2500 0.3000 และ 0.3500 กรัม ร้อยละการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 จะเพิ่มขึ้นดังนี้ 20.21 ± 0.49^a , 40.84 ± 0.47^b , 57.71 ± 1.90^c , 69.92 ± 0.30^d , 81.77 ± 1.83^e , 92.16 ± 0.96^f และ 93.29 ± 0.89^f ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มปริมาณถ่านคือการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสในการดูดซับสีย้อมให้มากขึ้น และเมื่อใช้ปริมาณถ่าน 0.3000 0.3500 กรัม พบว่าร้อยละการดูดซับเริ่มคงที่ เนื่องจากระบบเข้าสู่ภาวะอิ่มตัว (Saturation) พื้นที่ผิวของถ่านที่เพิ่มขึ้นไม่สามารถดูดซับโมเลกุลของสีย้อมได้มากไปกว่านี้ (Zhou et al., 2019) ดังนั้น ปริมาณถ่านที่เหมาะสมที่สุดคือ 0.30 กรัม (ที่ ความเข้มข้นสีย้อม 50 ppm ปริมาตร 25.00 mL) อย่างไรก็ตาม ในการศึกษาปัจจัยอื่นที่ตามมา คือ เวลา pH ไอโซเทอม และจลนศาสตร์การดูดซับ ผู้วิจัยได้เลือกใช้ปริมาณถ่าน 0.2000 กรัม ซึ่งเป็นปริมาณที่น้อยกว่าค่าที่เหมาะสมที่สุด เพื่อให้กระบวนการดูดซับไม่เข้าสู่ภาวะอิ่มตัว สามารถเก็บข้อมูลการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นสีย้อมได้ และวิเคราะห์ข้อมูลได้อย่างแม่นยำ (Ahmad and Hameed, 2010)



รูปที่ 4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณถ่านจากเปลือกผลลำโรงที่ใช้ในการดูดซับและร้อยละการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 (ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 เท่ากับ 50.00 ppm เขย่าด้วยความเร็ว 150 รอบต่อนาที เวลาในการดูดซับ 6 ชั่วโมง)

2.2 เวลาในการดูดซับ

จากการศึกษาผลของเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 ด้วยถ่านจากเปลือกผลลำโรงที่เวลาในการดูดซับ 10, 30, 60, 120, 180 และ 240 นาที มีร้อยละการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 45.52 ± 0.39^a , 58.00 ± 0.26^b , 63.35 ± 0.70^c , 67.61 ± 0.36^d , $67.94 \pm 0.23^{d,e}$ และ 68.89 ± 0.15^e ตามลำดับ พบว่าเมื่อใช้ระยะเวลาในการดูดซับเพิ่มมากขึ้น ร้อยละการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 จะเพิ่มมากขึ้นเช่นเดียวกันเนื่องจากในช่วงแรกมีตำแหน่งที่ว่างไว้ในการดูดซับ (Active Sites) จำนวนมาก (Aswasukhee et al., 2012; Sukpreabprom et al., 2024) และจะเริ่มคงที่ที่เวลา 180 นาที ดังกราฟในรูปที่ 5 เนื่องจากการดูดซับเข้าสู่สภาวะสมดุล (Adsorption Equilibrium) ดังนั้นเวลาเหมาะสมในการดูดซับคือ 180 นาที

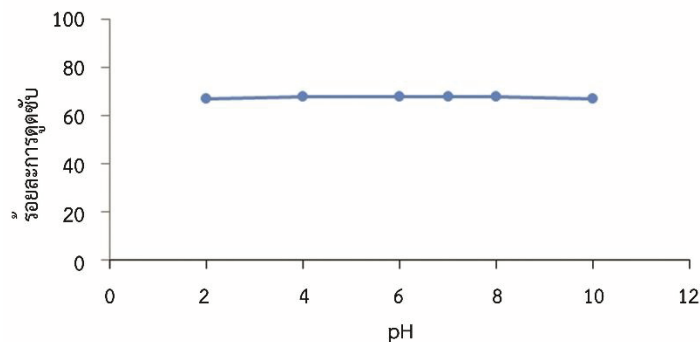


รูปที่ 5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการดูดซับและร้อยละการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 (ปริมาณถ่าน 0.2000 g ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 เท่ากับ 50.00 ppm เขย่าด้วยความเร็ว 150 รอบต่อนาที)

2.3 ความเป็นกรด-เบส (pH)

จากการศึกษาความเป็นกรด-เบสของสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 ที่มีผลต่อการดูดซับของถ่านจากเปลือกผลลำโรงที่เตรียมขึ้นที่ pH 2 4 6 7 8 และ 10 มีร้อยละการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 67.16 ± 0.66^a , 67.90 ± 1.26^a , 67.96 ± 0.21^a , 67.95 ± 0.10^a , 67.95 ± 1.05^a และ 66.92 ± 0.69^a ตามลำดับ พบว่าเมื่อค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายมีค่าเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับค่อนข้างคงที่ ดังรูปที่ 6 นั่นคือการเพิ่มหรือลดปริมาณของประจุบวกและประจุลบในสารละลายไม่ส่งผลกระทบต่อปริมาณการดูดซับของ

ถ่านจากเปลือกผลลำโรง เนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสีย้อมและถ่านที่สำคัญ 2 แรงคือ ระหว่างโมเลกุลที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic-hydrophobic interaction) ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างส่วนที่ไม่ชอบน้ำของสีย้อมและส่วนที่ไม่ชอบน้ำของถ่าน หรือแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมของคาร์บอน และแรงยึดเหนี่ยว $\pi-\pi$ Stacking ระหว่าง π อิเล็กตรอนของวงอะโรมาติกของสีย้อมรีแอคทีฟลู 19 ยึดเหนี่ยวกับ π อิเล็กตรอนของวงอะโรมาติกของถ่าน การเปลี่ยนแปลงค่า pH จึงไม่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับ (Umpuch et al., 2017)



รูปที่ 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรด-เบส (pH) และร้อยละการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟลู 19 (ปริมาณถ่าน 0.2000 g ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมรีแอคทีฟลู 19 เท่ากับ 50.00 ppm เขย่าที่ความเร็ว 150 รอบต่อนาที เวลาในการดูดซับ 180 นาที)

3. ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟลู 19 ด้วยถ่านจากเปลือกผลลำโรง

ไอโซเทอมของการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟลู 19 ด้วยถ่านจากเปลือกผลลำโรง เป็นการศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสีย้อมรีแอคทีฟลู 19 ที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของถ่านจากเปลือกผลลำโรงกับความเข้มข้นของสีย้อมรีแอคทีฟลู 19 ที่เหลืออยู่ ณ สภาวะสมดุลและอุณหภูมิคงที่ เพื่อหาไอโซเทอมที่เหมาะสมและใช้อธิบายลักษณะการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟลู 19 ของถ่านจากเปลือกผลลำโรงที่เตรียมขึ้น ซึ่งไอโซเทอมที่ศึกษาในการทดลองนี้มี 2 แบบ คือ ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์และไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช

ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์มีสมมติฐานว่าการดูดซับจะเกิดขึ้นบนพื้นผิวของตัวดูดซับเพียงชั้นเดียว (Monolayer Adsorption) และมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวและไม่เกิดอันตรกิริยากับตัวดูดซับ (Hameed et Al., 2007) เมื่อพิจารณาสมการไอโซเทอมของการดูดซับแลงเมียร์ เขียนได้ดังสมการ (4)

$$q_e = \frac{q_m K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (4)$$

เมื่อ q_e คือ ปริมาณสูงสุดของตัวถูกดูดซับที่สามารถดูดซับแบบชั้นเดียว หาได้จาก $q_e = \frac{(C_e - C_0)}{W} V$
 K_L คือ ค่าคงที่แลงเมียร์

แบบจำลองไอโซเทอมสมการเส้นตรงของการดูดซับแบบแลงเมียร์เขียนได้ดังสมการ (5)

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{K_L q_m} \frac{1}{C_e} + \frac{1}{q_m} \quad (5)$$

ไอโซเทอมแบบฟรันทซ์มีสมมติฐานว่า การดูดซับจะเกิดขึ้นที่ตำแหน่งของพื้นผิวมีลักษณะไม่เป็นเนื้อเดียวกัน โดยผ่านกลไกของการดูดซับหลายชั้น (Hameed et al., 2007) ความสามารถในการดูดซับขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสีย้อมที่สมดุล เมื่อพิจารณาแบบจำลองไอโซเทอมของการดูดซับแบบฟรันทซ์ เขียนได้ดังสมการที่ (6)

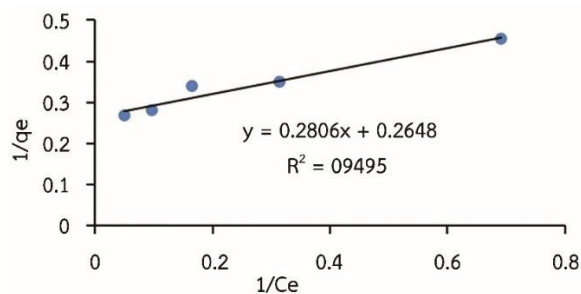
$$q_e = K_F C_e^{1/n} \quad (6)$$

เมื่อ K_F คือ ค่าคงที่ฟรันทซ์
 $1/n$ คือ ปัจจัยที่แสดงความไม่เป็นเนื้อเดียว

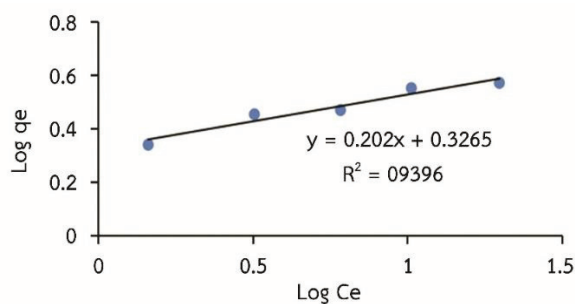
แบบจำลองไอโซเทอมสมการเส้นตรงของการดูดซับแบบฟรันทซ์เขียนได้ดังสมการที่ (7)

$$\log q_e = \log K_F + \frac{1}{n} \log C_e \quad (7)$$

จากที่กล่าวข้างต้น เมื่อนำค่าที่ได้มาสร้างกราฟเพื่อศึกษาความสอดคล้องของข้อมูลสำหรับแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 โดยใช้ถ่านจากเปลือกผลสำโรงเป็นตัวดูดซับ สำหรับไอโซเทอมแบบแลงเมียร์และฟรันทซ์ ดังรูปที่ 7 และ 8



รูปที่ 7 กราฟไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์



รูปที่ 8 กราฟไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรันทซ์

ตารางที่ 3 ค่าคงที่ไอโซเทอมการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 โดยใช้ถ่านจากเปลือกผลลำโรงเป็นตัวดูดซับ

Isotherm Model		Isotherm Parameters
Langmuir isotherm	q_m	3.7764 mg/g
	K_L	0.9437 L/mg
	R^2	0.9495
Freundlich isotherm	K_F	2.1208
	$1/n$	0.2020
	R^2	0.9396

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบค่าการดูดซับสูงสุด (q_m) สีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 กับวัสดุธรรมชาติในงานวิจัยอื่น

Adsorbent	q_m (mg/g)	Reference
Pistachio shell	2.2	(Rahdar et al., 2018)
Pomegranate seed powder	3.61	(Dehvari et al., 2016)
Coconut shell	2.2	(Isah et al., 2015)
Grapefruit peel	12.39	(Abassi and Razzaghi Asl, 2009)
Groundnut shell derived biochar	7.99	(Muralikrishnan and Jodhi, 2023)
Charcoal derived from <i>Sterculia foetida</i> Fruit Rind	3.7764	Present study

นำกราฟไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์มาคำนวณหาค่าคงที่ไอโซเทอมการดูดซับ พบว่ามีค่าการดูดซับสูงสุด (q_m) เท่ากับ 3.7764 mg/g ค่าคงที่การดูดซับ (K_L) เท่ากับ 0.9437 L/mg และมีความเป็นเส้นตรง R^2 เท่ากับ 0.9495 ดังตารางที่ 3 คำนวณหาค่า R_L (หรือ Separation Factor) ใช้ในการประเมินความเหมาะสมของการดูดซับตามแบบจำลอง Langmuir Isotherm ได้จากสมการ $R_L = \frac{1}{1 + K_L C_0}$ พบว่าค่า R_L อยู่ในช่วง 0.0209 - 0.0508 ค่าที่ได้อยู่ในช่วง $0 < R_L < 1$ แสดงว่าการดูดซับอยู่ในช่วงที่เหมาะสม (Favorable) ส่วนไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดิช คำนวณค่าคงที่ไอโซเทอมการดูดซับได้ดังนี้ ค่า $(1/n)$ เท่ากับ 0.2020 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 1 แสดงว่าปริมาณพื้นผิวบนตัวดูดซับมีปริมาณจำกัดที่ใช้ในการดูดซับ ค่าคงที่การดูดซับ (K_F) เท่ากับ 2.1208 เมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ของทั้งสองไอโซเทอมพบว่าค่าที่ได้สอดคล้องกับไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ ($R^2 = 0.9495$) มากกว่าฟรุนดิช ($R^2 = 0.9396$) เนื่องจากมีค่า R^2 เข้าใกล้ 1 มากกว่า

แสดงให้เห็นว่าการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 ของถ่านจากเปลือกผลลำโรงที่เตรียมได้เป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer Adsorption) บนพื้นผิวที่เป็นเนื้อเดียว มีค่าการดูดซับสูงสุด (q_m) เท่ากับ 3.7764 mg/g มีค่าสูงกว่าวัสดุดูดซับธรรมชาติหลายชนิดที่มีรายงานผลวิจัย เช่น ผงเมล็ดทับทิม เปลือกพิตาชิโอ และกะลามะพร้าว ดังตารางที่ 4 แม้ถ่านจากเปลือกผลลำโรง จะไม่ได้ให้ค่า q_m สูงสุดเมื่อเทียบกับวัสดุบางชนิด แต่มีข้อดีที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตรที่หาได้ง่ายในท้องถิ่น อีกทั้งกระบวนการเตรียมไม่ซับซ้อน ไม่ต้องผ่านกระบวนการกระตุ้น (Activation) ไม่ใช้สารเคมีอันตราย pH ไม่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับ ใช้ได้ทั้งในกรดและเบส สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ เหมาะสำหรับนำไปใช้ในระดับชุมชนหรือระบบบำบัดขนาดเล็กที่เน้นความปลอดภัยและความยั่งยืน

4. ผลการศึกษาจลนศาสตร์ของการดูดซับ

การศึกษาจลนศาสตร์ของกระบวนการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 โดยใช้ถ่านจากเปลือกผลสำโรงเป็นวัสดุดูดซับ ได้ดำเนินการเพื่อวิเคราะห์กลไกการดูดซับและอัตราการดูดซับ โดยใช้แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-First-Order) และแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo-Second-Order) ตามสมการที่ (8) และ (9)

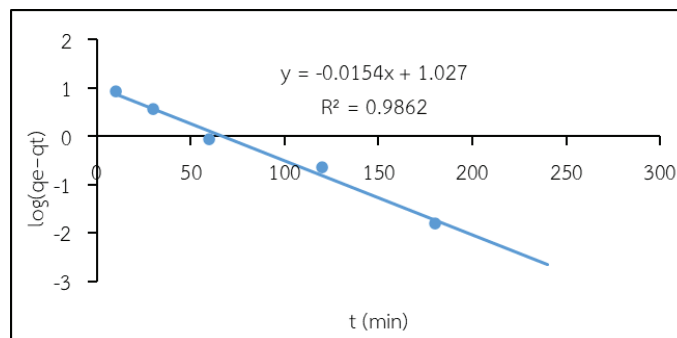
ในการวิเคราะห์ข้อมูลได้มีการสร้างกราฟทั้งสองแบบจำลอง ดังรูปที่ 9 และ 10 โดยใช้ข้อมูล q_t (ความสามารถในการดูดซับที่เวลา t ในหน่วย mg/g) และ q_e (ความสามารถในการดูดซับที่สมดุลในหน่วย mg/g) กับ t (เวลา (min)) เพื่อคำนวณค่าคงที่การดูดซับในรูปแบบปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (k_1 ($1/\text{min}$)) ค่าคงที่การดูดซับในรูปแบบปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (k_2 ($\text{g/mg}\cdot\text{min}$)) และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ของแต่ละแบบจำลอง

สมการของแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม :

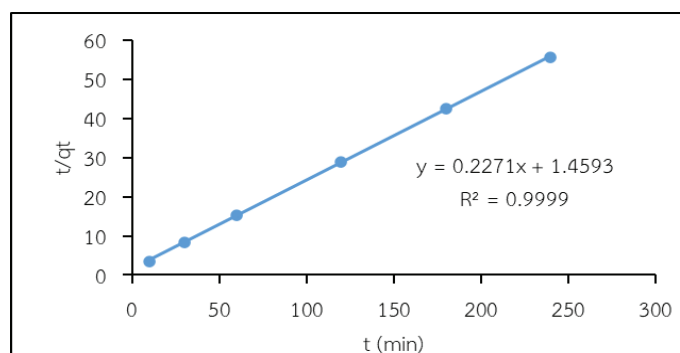
$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad (8)$$

สมการของแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม :

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (9)$$



รูปที่ 9 กราฟแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม



รูปที่ 10 กราฟแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม

ผลการคำนวณค่าคงที่และค่าความสัมพันธ์จากการวิเคราะห์พบว่า แบบจำลองสมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม ให้ค่าคงที่ $k_1 = 0.0355 \text{ min}^{-1}$ และค่า $q_e = 10.64 \text{ mg/g}$ ความสามารถในการดูดซับที่สมดุลที่สูงกว่า

ค่าที่ได้จากการทดลองจริง ขณะที่แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม ให้ค่าคงที่ $k_2 = 0.0352 \text{ g/mg}\cdot\text{min}$ และค่า $q_e = 4.40 \text{ mg/g}$ ซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลอง ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ค่าตัวแปรของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม ปฏิกิริยาอันดับสองเทียม

Model	Parameter		
Pseudo-first-order	q_e (experimental)	4.31	mg/g
	q_e (calculated)	10.64	mg/g
	k_1	0.0355	min^{-1}
	R^2	0.9862	
Pseudo-second-order	q_e (calculated)	4.40	mg/g
	k_2	0.0352	$\text{g}/(\text{mg}\cdot\text{min})$
	h	0.685	$\text{mg}/\text{g}\cdot\text{min}$
	R^2	0.9999	

จากการวิเคราะห์ข้อมูลจลนพลศาสตร์การดูดซับ พบว่าแบบจำลองสมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียม มีความเหมาะสมในการอธิบายกระบวนการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 บนถ่านจากเปลือกผลลำโรง โดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ของแบบจำลองอันดับสองเทียมมีค่า 0.9999 ซึ่งใกล้เคียง 1.0 มากกว่าแบบจำลองสมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมซึ่งมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9862 แสดงว่าการดูดซับที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นการดูดซับทางเคมี (Chemisorption) ซึ่งอัตราการดูดซับขึ้นอยู่กับอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างสีย้อมกับหมู่ฟังก์ชันบนผิวของถ่านเป็นหลัก โดยกลไกที่สำคัญที่อาจเกิดขึ้น ได้แก่ π - π Stacking แรงยึดเหนี่ยวทางไฟฟ้าสถิตและพันธะไฮโดรเจน (Tan et al., 2008; Ahmad and Hameed, 2010) สอดคล้องกับงานวิจัยหลายชิ้นที่ศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟบลูโดยใช้วัสดุดูดซับจากธรรมชาติหรือวัสดุชีวภาพ ซึ่งมักจะพบว่าแบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับสองเทียมให้การอธิบายที่เหมาะสมที่สุด ตัวอย่างเช่น งานวิจัยที่ศึกษาการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟบลูด้วยถ่านชีวภาพจากเปลือกส้ม (Jawad et al., 2019) และถ่านจากกากเมล็ดพืชทอง (Kizil et al., 2024) ก็แสดงผลที่สอดคล้องกัน ว่าการดูดซับเป็นไปแบบจำลองสมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียม

บทสรุป

งานวิจัยนี้ศึกษาการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 ด้วยถ่านจากเปลือกผลลำโรง พบว่า ถ่านที่เตรียมได้มีพื้นที่ผิว $12.74 \text{ m}^2/\text{g}$ ปริมาตรรูพรุน $0.01344 \text{ cm}^3/\text{g}$ และขนาดของรูพรุน 2.111 nm จัดว่าเป็นวัสดุที่มีรูพรุนขนาดกลาง mesopores ซึ่งมีขนาดอยู่ในช่วง (2 - 50 nm) จากการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาและธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค SEM/EDS พบว่าถ่านมีพื้นผิวขรุขระมีช่องว่างและรูพรุนขนาดเล็กและใหญ่ มีธาตุคาร์บอน และออกซิเจนเป็นองค์ประกอบหลัก 67.54 และ 17.06 % โดยน้ำหนักตามลำดับ และวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FTIR พบว่ามีหมู่ไฮดรอกซิลและวงอะโรมาติก เมื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 สภาวะที่เหมาะสมคือ ปริมาณถ่าน 0.30 กรัม เวลาในการดูดซับ 180 นาที และค่าความเป็นกรด-เบส (pH) ของสีย้อม ไม่ส่งผลต่อการดูดซับ

เมื่อศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ พบว่าการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 ด้วยถ่านจากเปลือกผลส้มมีแนวโน้มสอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์มากกว่าไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ในไอโซเทอมแบบแลงเมียร์มีค่ามากกว่าไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช ($R^2=0.9495$) บ่งชี้ว่าการดูดซับเกิดขึ้นบนพื้นผิวของตัวดูดซับในลักษณะชั้นเดียว (Monolayer Adsorption) บนพื้นผิวที่เป็นเนื้อเดียวกัน มีค่าการดูดซับสูงสุด (q_m) เท่ากับ 3.7764 mg/g จลนศาสตร์การดูดซับสอดคล้องกับแบบจำลองสมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียม แสดงว่าเป็นการดูดซับทางเคมี จากผลการทดลองมีความเป็นไปได้ที่จะประยุกต์ใช้วัสดุนี้ในการกำจัดสีย้อมในน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมสี ซึ่งจะเป็นการช่วยลดปัญหามลภาวะทางสิ่งแวดล้อมและยังเป็นการนำเปลือกผลส้มที่เป็นวัสดุเหลือใช้ในท้องถิ่นมาใช้ประโยชน์อย่างคุ้มค่าอีกทางหนึ่งด้วย

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสาขาวิชาเคมี คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา สำหรับความอนุเคราะห์สนับสนุนเครื่องมือและสารเคมี รวมทั้งเอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำงานวิจัย ขอขอบพระคุณบริษัท พี.พี. คัลเลอร์ เท็กซ์ ที่ให้ความอนุเคราะห์สีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 และ คุณปรีชา ภัสสรศิริ บริษัท อุตสาหกรรมแมนดารินสปินนิ่ง จำกัด ที่ให้ความช่วยเหลือในการเผ่าถ่านจากเปลือกผลส้มที่ใช้ในงานวิจัยในครั้งนี้

References

- Abassi, M. and Razzaghi Asl, N. (2009). Removal of Hazardous Reactive Blue 19 Dye from Aqueous Solutions by Agricultural Waste. *Journal of the Iranian Chemical Research*, 2, 221-230. <https://www.academia.edu/30876200>
- Abrile, M.G., Fiasconaro, M.L. and Lovato, M.E. (2020). Optimization of Reactive Blue 19 Dye Removal Using Ozone and Ozone/UV Employing Response Surface Methodology. *SN Applied Sciences*, 2, <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2824-y>
- Adejumo, A.L., Azeez, L., Oyedele, A.O., Adetoro, R.O. and Aderibigbe, F.A. (2020). Nanostructured and Surface Functionalized Corncob as Unique Adsorbents for Anionic Dye Remediation. *Springer Nature Applied Sciences (SN Applied Sciences)*, 2, <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2109-5>
- Ahmad, A.A. and Hameed, B.H. (2010). Fixed-bed Adsorption of Reactive Azo Dye onto Granular Activated Carbon Prepared from Waste. *Journal of Hazardous Materials*, 175(1-3), 298-303. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.10.003>
- Ahmad, M., Rajapaksha, A.U., Lim, J.E., Zhang, M., Bolan, N., Mohan, D., Vithanage, M., Lee, S.S. and Ok, Y.S. (2014). Biochar as a Sorbent for Contaminant Management in Soil and Water: A Review. *Chemosphere*, 99, 19-33. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.10.071>
- Angthararuk, D., Phasuk, S. and Takolpuckdee, P. (2023). Low-Cost Biochar Derived from Bamboo Waste for Removal of Heavy Metal in Aqueous Solution. *Journal of Food Health and Bioenvironmental Science*, 15(2), 34-42. <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/sdust/article/view/260628>

- Aswasukhee, A., Suppametanon, N., Sombatsri, S., Kunawong, T. and Chankaew, C. (2012). Adsorption of Methyl Orange Using Clays and Zeolites. *Research on Modern science and Utilizing Technological Innovation Journal*, 5(2), 1-10. <https://ph01.tcithaijo.org/index.php/rmutijo/article/view/15953/14529>
- Benkhaya, S., M'rabet, S. and El Harfi, A. (2020). Classifications, Properties, Recent Synthesis and Applications of Azo Dyes. *Heliyon*, 6(1), <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03271>
- Chen, B., Chen, Z. and Lv, S. (2011). A Novel Magnetic Biochar Efficiently Sorbs Organic Pollutants and Phosphate. *Bioresource Technology*, 102(2), 716-723. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.08.067>
- Chatterjee, R., Sajjadi, B., Chen, W.-Y., Mattern, D.L., Hammer, N., Raman, V. and Dorris, A. (2020). Effect of Pyrolysis Temperature on Physicochemical Properties and Acoustic-Based Amination of Biochar for Efficient CO₂ Adsorption. *Frontiers in Energy Research*, 8, 85. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2020.00085>
- Dehvari, M., Ghaneian, M.T., Ebrahimi, A., Jamshidi, B. and Mootab, M. (2016). Removal of Reactive Blue 19 Dyes from Textile Wastewater by Pomegranate Seed Powder: Isotherm and Kinetic Studies. *International Journal of Environmental Health Engineering*, 5(1), 5. <https://www.researchgate.net/publication/299385785>
- El-Naggar, A.H., Alzhrani, A.K.R., Ahmad, M., Usman, A.R.A., Mohan, D., Ok, Y.S. and Al-Wabel, M.I. (2016). Preparation of Activated and Non-Activated Carbon from *Conocarpus* Pruning Waste as Low-Cost Adsorbent for Removal of Heavy Metal Ions from Aqueous Solution. *BioRes*, 11(1), 1092-1107. <https://doi.org/10.15376/biores.11.1.1092-1107>
- Fernandes, G.B., Alves, R.de O., Marconsini, L.T., de Oliveira, M.P., Passos, R.R., Profeti, D. and Profeti, L.P.R. (2025). Macadamia Nut Residue-Derived Biochar: An Eco-Friendly Solution for β -Naphthol and Reactive Black-5 Removal. *Catalysis Today*, 445, <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2024.115050>
- Foo, K.Y. and Hameed, B.H. (2010). Insights into the Modeling of Adsorption Isotherm Systems. *Chemical Engineering Journal*, 156(1), 2–10. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.09.013>
- Galán, J., Rodríguez, A., Gómez, J. M., Allen, S. J. and Walker, G. M. (2013). Reactive Dye Adsorption onto a Novel Mesoporous Carbon. *Chemical Engineering Journal*, 219, 62-68. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.12.073>
- Gholizade, A., Asadollahfardi, G. and Rezaei, R. (2023). Reactive Blue 19 Dye Removal by UV-LED/Chlorine Advanced Oxidation Process. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(1), 1719. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-22545-4>
- Hameed, B.H., Din, A.T.M. and Ahmad, A.L. (2007). Adsorption of Methylene Blue onto Bamboo-Based Activated Carbon: Kinetics and Equilibrium Studies. *Journal of Hazardous Materials*, 141(3), 819-825. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.07.049>
- Hoa, N.T.H., Quynh, N.T., Nguyen, V.D., Nguyen, T.N., Huy, B.Q., Thanh, N.T., Loan, H.T., Hoa, N.T.Q. and Nghia, N.T. (2025). Adsorptive Removal of Reactive Black 5 by Longan Peel-Derived Activated Carbon: Kinetics, Isotherms, Thermodynamics, and Modeling. *Water*, 17(11), <https://doi.org/10.3390/w17111678>

- Hyeon, G.-W., Lee, G.B., Kang, D.J., Lee, S.E., Seong, K.M. and Park, J.-E. (2025). Optimization of Activated Carbon Synthesis from Spent Coffee Grounds for Enhanced Adsorption Performance. *Molecules*, 30(12), <https://doi.org/10.3390/molecules3012255>
- Isah, U.A., Abdulraheem, G., Bala, S., Muhammad, S. and Abdullahi, M. (2015). Kinetics, Equilibrium and Thermodynamics Studies of C.I. Reactive Blue 19 Dye Adsorption on Coconut Shell Based Activated Carbon. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 102, 265-273. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2015.04.006>
- Iwuozor, K.O., Ighalo, J.O., Emenike, E.C., Igwegbe, C.A. and Adeniyi, A.G. (2021). Do Adsorbent Pore Size and Specific Surface Area Affect the Kinetics of Methyl Orange Aqueous-Phase Adsorption?. Research Square. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-777328/v1>
- Jawad, A.H., Al-Heetm, D.T. and Abd Rashid, R. (2019). Biochar from Orange (*Citrus sinensis*) Peels by Acid Activation for Methylene Blue Adsorption. *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 38(2), 91-105. <https://doi.org/10.30492/ijcce.2019.30877>
- Keiluweit, M., Nico, P.S., Johnson, M.G. and Kleber, M. (2010). Dynamic Molecular Structure of Plant Biomass-Derived Black Carbon (Biochar). *Environmental Science and Technology*, 44(4), 1247-1253. <https://doi.org/10.1021/es9031419>
- Kızıl, Y., Benek, V., Teğin, İ., Önal, Y., Erol, K. and Alacabey, İ. (2024). Reactive Blue 19 Adsorption on Activated Carbon from Pumpkin (*Cucurbita pepo*) Seed Waste: Kinetic, Isotherm and Thermodynamic Studies. *Journal of Environmental Research, Engineering and Management*, 80(1), 7-20. <https://doi.org/10.5755/j01.erem.80.1.34243>
- Laishram, D., Kim, B., Lee, Y. and Park, J. (2025). Advancements in Biochar as a Sustainable Adsorbent for Water Pollution Mitigation. *Advanced Science*, 12(19), 2410383. <https://doi.org/10.1002/adv.202410383>
- Lehmann, J. and Joseph, S.(Eds.). (2015). *Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation* (2nd ed.). Routledge.
- Muralikrishnan, R. and Jodhi, C. (2023). Biodecolorization of Reactive Blue 19 Using Biochar Derived from Groundnut Shell: Batch Adsorption Isotherms, Kinetics and Regeneration Studies. *Applied Nanoscience*, 13, 2211–2221. <https://doi.org/10.1007/s13204-021-02212-9>
- Rahdar, S., Shikhe, L. and Ahmadi, S. (2018). Removal of Reactive Blue 19 Dye Using a Combined Sonochemical and Modified Pistachio Shell Adsorption Processes from Aqueous Solutions. *Iranian Journal of Health Sciences*, 6, 8-20. <https://doi.org/10.18502/jhs.v6i3.193>
- Rahmoun, H.B., Boumediene, M., Ghenim, A.N., Da Silva, E.F. and Labrincha, J. (2025). Coupling Coagulation-Flocculation-Sedimentation with Adsorption on Biosorbent (Corn cob) for the Removal of Textile Dyes from Aqueous Solutions. *Environments*, 12(6), 201. <https://doi.org/10.3390/environments12060201>
- Reddy, Y., Rotte, N.K., Sudhakar, B.K., Chand, N., Naik, R.J., Mandal, S. and Chandra, M.R. (2024). Biomass-Derived Sustainable Mesoporous Activated Carbon as an Efficient and Recyclable Adsorbent for the Adsorption of Hazardous Dyes. *Hybrid Advances*, 6, <https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2024.100218>

- Saratale, R.G., Saratale, G.D., Chang, J.S. and Govindwar, S.P. (2011). Bacterial Decolorization and Degradation of Azo Dyes: A Review. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 42(1), 138-157. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2010.06.006>
- Sing, K.S.W. (1985). Reporting Physisorption Data for Gas/Solid Systems with Special Reference to the Determination of Surface Area and Porosity. *Pure and Applied Chemistry*, 57(4), 603-619. <https://doi.org/10.1351/pac198557040603>
- Śmigiel-Kamińska, D., Wąs-Gubała, J., Stepnowski, P. and Kumirska, J. (2020). The Identification of Cotton Fibers Dyed with Reactive Dyes for Forensic Purposes. *Molecules*, 25(22), 5435. <https://doi.org/10.3390/molecules25225435>
- Sukpreabprom, H., Chanmee, W., Jangruang, A., La-onghitirat, T. and Chunyoung, N. (2024). Adsorption of Direct Red 23 Dye by Corn Husks. *Journal of BSRU-Research and Development Institute*, 9(1), 135-149. <https://so06.tcithaijo.org/index.php/rdibsr/article/view/271556>
- Sangsuk, S., Napanya, P., Tasen, S., Baiya, P., Buathong, C., Keeratisoontornwat, K. and Suebsiri, S. (2023). Production of Non-Activated Biochar Based on *Biden Pilosa* and its Application in Removing Methylene Blue from Aqueous Solutions. *Heliyon*, 9(5), <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e15766>
- Sridharan, V., Pulidindi, I.N., Vaithyanathan, P., Kanthadai, V.T. and Balasubramanian, V. (2024). Steam Activated Carbon Material from the Fruit Shells of *Sterculia foetida* for Energy and Environmental Applications. *Journal of Water Pollution and Purification Research*, 11(1), 23-33. <https://journals.stmjournals.com/jowppr/article=2024/view=168758>
- Tan, I.A.W., Ahmad, A.L. and Hameed, B.H. (2008). Adsorption of Basic Dye Using Activated Carbon Prepared from Oil Palm Shell: Batch and Fixed Bed Studies. *Desalination*, 225(1-3), 13-28. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.07.005>
- Thommes, M., Kaneko, K., Neimark, A.V., Olivier, J.P., Rodriguez-Reinoso, F., Rouquerol, J. and Sing, K.S.W. (2015). Physisorption of Gases, with Special Reference to the Evaluation of Surface Area and Pore Size Distribution (IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*, 87(9-10), 1051-1069. <https://doi.org/10.1515/pac-2014-1117>
- Umpuch, C., Kamphu, T., Thongfueang, N., Kaewsiri, S., Paopo, I., Sangthien, T. and Sangthean, P. (2017). Adsorption of Reactive Black 5 Dye on Activated Carbon Prepared from Water Hyacinth. *Journal of Science and Technology, UbonRatchathani University*, 19(1), 163-177. https://li01.tcithaijo.org/index.php/sci_ubu/article/view/86460/68588
- Xiao, H., Lin, Q., Li, G., Zhao, X., Li, J. and Li, E. (2022). Comparison of Biochar Properties from 5 Kinds of Halophyte Produced by Slow Pyrolysis at 500 °C. *Biochar*, 4(1), <https://doi.org/10.1007/s42773-022-00141-6>
- Xue, Y., Gao, B., Yao, Y., Inyang, M., Zhang, M. and Zimmerman, A. R. (2012). Hydrogen Peroxide Modification Enhances the Ability of Biochar (Hydrochar) Produced from Hydrothermal Carbonization of Biomass to Remove Aqueous Heavy Metals: Batch and Column Tests. *Chemical Engineering Journal*, 200-202, 673-680. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.06.116>

- Yadav, M., Singh, N., Annu, Khan, S.A., Raorane, C.J. and Shin, D.K. (2024). Recent Advances in Utilizing Lignocellulosic Biomass Materials as Adsorbents for Textile Dye Removal: A Comprehensive Review. *Polymers*, 16(17), 2417. <https://doi.org/10.3390/polym16172417>
- Yennam, R., Gautam, N., Shah, J., Thandlam, A.K., Gole, S., Nirgude, P. and Dabhade, G. (2024). Evaluation of Activated Biochar from Sustainable *Sterculia foetida* Shells for the Removal of AB 158 Dye. *Journal of Environmental Nanotechnology*, 13(2), 248-255. <https://doi.org/10.13074/jent.2024.06.242607>
- Zhou, Y., Lu, J., Zhou, Y. and Liu, Y. (2019). Recent Advances for Dyes Removal Using Novel Adsorbents: A Review. *Environmental Pollution*, 252, 352-365. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.05.072>

การประยุกต์ใช้แพลตฟอร์มไร้โค้ดสำหรับการติดตามและประเมินผลโครงการก่อสร้างถนน

Application of No-Code Platforms for Monitoring and Evaluating Road Construction Projects

เฉลิมศักดิ์ ศรีทัยแก้ว^{1*} วิศิษฐ์ศักดิ์ ทับยัง¹ นันทชัย ชูศิลป์¹ และเชิดศักดิ์ สุขศิริพัฒน์พงศ์²

Chalerm Sak Srithaikaew^{1*} Wisitsak Tabyang¹ Nuntachai Chusilp¹ and

Cherdsak Suksiripatanapong²

Received: April 4, 2025; Revised: May 27, 2025; Accepted: May 28, 2025

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นหลายแห่งยังคงใช้วิธีการบันทึกรายงานการก่อสร้างถนนด้วยกระดาษซึ่งก่อให้เกิดปัญหาด้านความล่าช้า ความผิดพลาด และการจัดเก็บข้อมูลที่ไม่มีประสิทธิภาพ ส่งผลให้การบริหารจัดการโครงการไม่สามารถดำเนินการได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ การวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) ศึกษาการประยุกต์ใช้แพลตฟอร์มไร้โค้ดในการติดตามและประเมินผลแผนดำเนินการก่อสร้างถนนผ่านการบันทึกรายงานประจำวัน 2) เปรียบเทียบผลการใช้งานแพลตฟอร์มไร้โค้ดในการติดตามและประเมินผลแผนดำเนินการก่อสร้างถนนระหว่างระบบกระดาษและแอปพลิเคชัน การศึกษาที่ใช้แพลตฟอร์มไร้โค้ด AppSheet สำหรับบันทึกรายงานประจำวันของงานก่อสร้างถนน เนื่องจากสามารถพัฒนาแอปพลิเคชันได้อย่างรวดเร็วไม่จำเป็นต้องมีทักษะการเขียนโปรแกรม โดยออกแบบให้สามารถบันทึกข้อมูล เช่น ข้อมูลโครงการ วันที่ เวลาทำงาน และกิจกรรมต่าง ๆ ทดลองใช้งานในโครงการก่อสร้างถนน โดยกลุ่มตัวอย่างเป็นผู้ควบคุมงานในองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น จังหวัดตรัง จำนวน 50 คน ข้อมูลถูกรวบรวมผ่านแบบสอบถามความพึงพอใจ และวิเคราะห์โดยใช้สถิติ ได้แก่ ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ผลการวิจัยพบว่า 1. การจัดทำรายงานประจำวันมีความสะดวกมากขึ้น ($\bar{X} = 4.06$ S.D. = 0.95) เทียบกับระบบกระดาษ 2. ความถูกต้องและความครบถ้วนของข้อมูลเพิ่มขึ้น ($\bar{X} = 3.97$ S.D. = 0.91) 3. การค้นหาและจัดเก็บข้อมูลมีความสะดวกและปลอดภัยมากขึ้น ($\bar{X} = 4.15$ S.D. = 0.85) 4. ความพึงพอใจโดยรวมสูงกว่าระบบกระดาษ ($\bar{X} = 4.07$ S.D. = 0.80) สรุปได้ว่า แพลตฟอร์มไร้โค้ด AppSheet ที่พัฒนาขึ้น ช่วยลดข้อผิดพลาดในการบันทึกข้อมูล เพิ่มความสะดวกและรวดเร็วในการจัดทำรายงาน และเสริมประสิทธิภาพการบริหารโครงการก่อสร้างถนนในองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น

คำสำคัญ : แพลตฟอร์มไร้โค้ด; การติดตามโครงการก่อสร้าง; การก่อสร้างถนน; AppSheet; องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

² คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

¹ Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya

² Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Isan

* Corresponding Author, Tel. 08 8749 2826, E-mail: Chalerm Sak.s@mutsvmail.com

Abstract

Currently, many local administrative organizations still rely on paper-based methods for recording road construction activities. This approach often results in delays, data inaccuracies, and inefficient data storage, which hinder effective project management. Therefore, this research aims to 1) examine the application of a no-code platform for monitoring and evaluating road construction plans through daily construction reporting and 2) compare its effectiveness with traditional paper-based reporting methods. The study employs the AppSheet no-code platform for daily reporting due to its capability to develop applications rapidly without requiring programming skills. The application is designed to record essential project data, including project details, work schedules, personnel, and construction activities. The platform was tested in a road construction project with a sample of 50 site supervisors from local administrative organizations in Trang Province. Data was collected through satisfaction surveys and analyzed using statistical methods, including mean and standard deviation. The results indicate that the no-code platform enhanced the efficiency of daily report preparation ($\bar{X} = 4.06$, S.D. = 0.95), improved data accuracy and completeness ($\bar{X} = 3.97$, S.D. = 0.91), and facilitated more efficient and secure data retrieval and storage ($\bar{X} = 4.15$, S.D. = 0.85). Overall, user satisfaction with the system was higher compared to the paper-based method ($\bar{X} = 4.07$, S.D. = 0.80). These findings suggest that the AppSheet-based no-code platform enhances data accuracy, accelerates report preparation, and improves project management efficiency in road construction within local administrative organizations.

Keywords : No-code Platform; Construction Project Monitoring; Road Construction; AppSheet; Local Administrative Organizations

บทนำ

การติดตามงานก่อสร้างในองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น (อปท.) เป็นกระบวนการตรวจสอบและประเมินผลโครงการก่อสร้าง เช่น ถนน สะพาน อาคารสาธารณะ และระบบระบายน้ำ โดยครอบคลุมการบันทึกสถานะโครงการ ตรวจสอบคุณภาพ รายงานความคืบหน้า และวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามหลายองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น (อปท.) ยังคงใช้เอกสารกระดาษในการจัดเก็บและประมวลผลข้อมูล ซึ่งก่อให้เกิดต้นทุนสูง ลดประสิทธิภาพการทำงาน เพิ่มความเสี่ยงด้านความล่าช้า ข้อผิดพลาด และการสูญหายของข้อมูล อีกทั้งยังต้องใช้พื้นที่จัดเก็บจำนวนมากและไม่สะดวกต่อการสืบค้น การใช้ระบบจัดเก็บข้อมูลดิจิทัลช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดการข้อมูล ทั้งการสร้าง แก้ไข ปรับปรุง และวิเคราะห์ ซึ่งเป็นข้อจำกัดของระบบบันทึกข้อมูลแบบกระดาษ ปัจจุบันโมบายแอปพลิเคชันมีบทบาทสำคัญในการเข้าถึงข้อมูลได้สะดวกและรวดเร็ว ส่งผลให้ภาครัฐและเอกชนพัฒนาแอปพลิเคชันเพื่อรองรับบริการต่าง ๆ เช่น ธุรกิจการเงิน การติดตามงาน และการจองที่พัก (Jaroenjit and Thanon, 2016) การพัฒนาโมบายแอปพลิเคชันก้าวหน้าอย่างรวดเร็ว โดยแพลตฟอร์มสำเร็จรูปช่วยลดความซับซ้อนทำให้ผู้ใช้สร้างแอปได้โดยไม่ต้องมีพื้นฐานการเขียนโปรแกรม ทั้งยังมีต้นทุนต่ำและเข้าถึงง่ายขึ้น (Yoopensuk, 2016) แพลตฟอร์มไร้โค้ด (No-Code) เช่น AppSheet, QuickBase และ Monday.com ช่วยพัฒนาแอปพลิเคชันสำหรับติดตามโครงการก่อสร้างได้แบบเรียลไทม์ ตั้งแต่บันทึกสถานะงาน สถานที่ ระยะเวลาดำเนินงาน ไปจนถึง

รายงานความคืบหน้า โดยลดเวลาและต้นทุนพัฒนา ทำให้เจ้าหน้าที่เข้าถึงและจัดการข้อมูลได้ทุกที่ทุกเวลา (Chanpum et al., 2017) จากการศึกษาวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง พบว่ามีงานวิจัยที่ประยุกต์ใช้แพลตฟอร์ม AppSheet ในลักษณะใกล้เคียงกับวัตถุประสงค์ของงานวิจัยฉบับนี้ ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่ม ได้แก่

1) งานวิจัยในประเทศไทยที่ใช้ AppSheet เป็นเครื่องมือหลักในการจัดเก็บข้อมูลภาคสนาม โดยงานวิจัยของ (Ngamsong et al., 2021) ได้พัฒนาแอปพลิเคชันบน AppSheet เพื่อใช้เก็บข้อมูลภาคสนามด้านการบริหารจัดการเก็บภาษีขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น โดยออกแบบให้เจ้าหน้าที่สามารถกรอกข้อมูลพื้นที่และทรัพย์สินได้จากหน้าจอ ซึ่งช่วยลดความผิดพลาดจากการจดบันทึกด้วยมือ และเพิ่มความแม่นยำของฐานข้อมูลภาษีงานวิจัยของ (Chantra, 2020) พัฒนาแอปเพื่อการเรียนการสอน โดยใช้ AppSheet สำหรับการสื่อสารสัญลักษณ์ผู้ตัดสินใจแก่นักศึกษา ซึ่งช่วยให้ผู้เรียนสามารถเรียนรู้แบบโต้ตอบได้ทุกที่ทุกเวลา ส่วนงานของ (Prathumnok et al., 2022) ได้นำ AppSheet มาใช้พัฒนาแอปสำหรับบันทึกการเข้าร่วมกิจกรรมของนักศึกษา โดยรองรับการเก็บข้อมูลทั้งแบบฟอร์มและภาพถ่าย รวมถึงสามารถสรุปรายงานการเข้าร่วมได้อย่างรวดเร็ว ความเชื่อมโยงกับงานวิจัยข้างต้นแสดงให้เห็นว่า AppSheet เหมาะสำหรับการใช้งานในพื้นที่ภาคสนามที่ต้องการความสะดวก รวดเร็ว และลดภาระการใช้เอกสารกระดาษ ซึ่งสอดคล้องกับบริบทของงานวิจัยนี้ที่ต้องการให้ช่างผู้ควบคุมงานก่อสร้างสามารถบันทึกข้อมูลโครงการ เช่น แรงงาน สภาพอากาศ และภาพถ่าย จากหน้างานก่อสร้างถนนในแต่ละวันได้ทันทีผ่านแอปบนสมาร์ตโฟน

2) งานวิจัยที่ใช้แนวทาง Low-Code/No-Code เพื่อจัดเก็บและจัดการข้อมูลการก่อสร้าง โดยงานวิจัยของ (Sutisanuwat and Phairikeng, 2023) พัฒนาแอปมือถือสำหรับบันทึกรายงานประจำวันงานก่อสร้าง โดยสามารถกรอกข้อมูลแรงงานและความคืบหน้าของงานในแต่ละวัน ซึ่งใกล้เคียงกับเป้าหมายของงานวิจัยนี้ ที่เน้นการพัฒนากระบวนการประจำวันในรูปแบบดิจิทัล งานของ (Sanookpant, 2017) ใช้แอปมือถือเพื่อบริหารงานก่อสร้างของมหาวิทยาลัย โดยมีฟังก์ชันการติดตามงานแบบเรียลไทม์ ขณะที่ (Vinay et al., 2024) พัฒนาแอปด้วย Flutter/Dart เพื่อรายงานความก้าวหน้างาน พร้อมระบบกราฟแสดงความคืบหน้า โดยความเชื่อมโยงกับงานวิจัยข้างต้นเหล่านี้ ได้นำมาใช้ในการออกแบบแอปของผู้วิจัย โดยเน้นการบันทึกข้อมูลรายวันของโครงการถนน พร้อมการสรุปผลให้อยู่ในรูปแบบรายงานที่สามารถส่งออกเป็น Portable Document Format (PDF) ได้ทันที เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานจริงในระดับองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น

3) งานวิจัยต่างประเทศที่ใช้เทคโนโลยีขั้นสูงสำหรับการบริหารโครงการก่อสร้าง โดยงานวิจัยของ (Oluwatosin, 2024) ศึกษาการใช้ซอฟต์แวร์ขั้นสูงเพื่อบริหารต้นทุนและทรัพยากรในโครงการก่อสร้าง ขณะที่ (Deng and Li, 2022) ใช้เทคโนโลยี Building Information Modeling (BIM) และ Radio Frequency Identification (RFID) ในการติดตามการก่อสร้างอาคารสูงแบบเรียลไทม์ และงานของ (Lan and Sulbaran, 2023) นำเสนอการใช้เทคนิค Computer Vision ร่วมกับ Critical Path Method (CPM) ในการตรวจสอบความคืบหน้าโครงการแบบอัตโนมัติ โดยความเชื่อมโยงกับงานวิจัยข้างต้นเหล่านี้ จะใช้เทคโนโลยีที่ล้ำสมัยกว่าแต่แสดงให้เห็นแนวโน้มของการนำเครื่องมือดิจิทัลมาใช้ในการติดตามและประเมินผลโครงการก่อสร้าง ซึ่งสนับสนุนแนวทางของผู้วิจัยในการเลือกใช้ AppSheet ที่มีความยืดหยุ่น ต้นทุนต่ำ และสามารถใช้งานจริงในองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นระดับท้องถิ่นได้อย่างมีประสิทธิภาพ

จากการวิเคราะห์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง พบว่า AppSheet มีศักยภาพในการนำไปประยุกต์ใช้ในบริบทที่หลากหลาย ทั้งในด้านการศึกษา การบริหารภายในองค์กร และการจัดเก็บข้อมูลภาคสนาม โดยเฉพาะในหน่วยงานภาครัฐระดับท้องถิ่นที่ขาดบุคลากรด้านเทคโนโลยีสารสนเทศโดยเฉพาะ ซึ่งลักษณะของงานที่ต้องอาศัยการบันทึกข้อมูลหน้างานแบบต่อเนื่อง เช่น งานก่อสร้างถนน มีความสอดคล้องกับคุณสมบัติของแพลตฟอร์มดังกล่าว ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ AppSheet เป็นเครื่องมือหลักในการพัฒนาแอปพลิเคชันติดตามและประเมินผลโครงการก่อสร้างถนนในองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น โดยอิงจากแนวโน้มเชิงประจักษ์ของงานวิจัยก่อนหน้าและความเหมาะสมกับสภาพแวดล้อมของการใช้งานจริง

จากประเด็นปัญหาดังกล่าว และจากแผนพัฒนาท้องถิ่น (พ.ศ. 2566-2567) ขององค์การบริหารส่วนจังหวัดตรัง ระบุว่าโครงการก่อสร้างถนนมีสัดส่วนร้อยละ 83.33 ผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะศึกษาประยุกต์ใช้แพลตฟอร์มไร้โค้ดสำหรับการติดตามและประเมินผลแผนดำเนินการก่อสร้างถนน เพื่อตอบสนองและสนับสนุนการทำงานให้แก่ วิศวกร นายช่างโยธา ผู้ควบคุมงานก่อสร้าง ในการติดตามงานก่อสร้างถนนให้มีประสิทธิภาพ โดยเลือกประยุกต์ใช้แพลตฟอร์มไร้โค้ด เนื่องจากสามารถใช้ร่วมกับเอกสารประเภทต่าง ๆ ได้ดี สามารถใช้งานได้ทั้งคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล คอมพิวเตอร์พกพา และสมาร์ตโฟน โดยระบบที่พัฒนาขึ้นนี้มุ่งเน้นสำหรับการรายงานความก้าวหน้าและการจัดเก็บข้อมูลโครงการ

วิธีการดำเนินงานวิจัย

การศึกษาและประยุกต์ใช้แพลตฟอร์มไร้โค้ดสำหรับการติดตามและประเมินผลโครงการก่อสร้างถนนในครั้งนี้ จะอาศัยแพลตฟอร์มแอปชีต (AppSheet) ที่เป็นแพลตฟอร์มการพัฒนาแอปพลิเคชันแบบไม่ต้องเขียนโปรแกรม (No-Code Application Development - NCAD) ผู้ใช้งานสามารถสร้างแอปพลิเคชันสำหรับทำงานบนสมาร์ตโฟน พีซี หรือประยุกต์ผ่านเว็บ (Web Application) ได้อย่างง่ายดาย โดยข้อมูลที่ได้จากแอปพลิเคชันนั้น สามารถจัดเก็บได้หลากหลายรูปแบบทั้ง Google Sheets, Dropbox, Microsoft Excel หรือระบบจัดการฐานข้อมูลอื่น ๆ เช่น มายเอสคิวแอล (MySQL) ออราเคิล (Oracle) โพสท์เกรเอสคิวแอล (PostgreSQL) หรือไมโครซอฟท์ เอสคิวแอลเซิร์ฟเวอร์ (Microsoft SQL Server) เป็นต้น (Waszkowski, 2019)

กระบวนการพัฒนาแอปพลิเคชันจะอาศัยแนวทางการพัฒนาระบบตามวงจรการพัฒนาระบบ (System Development Life Cycle - SDLC) มาเป็นโครงร่างการดำเนินงาน และมีการปรับให้สอดคล้องกับสภาพบริบทสำหรับการดำเนินงานจริง (lamsiriwong, 2017) แสดงขั้นตอนการดำเนินการวิจัย ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้

1. ศึกษาข้อมูลรูปแบบการทำงาน

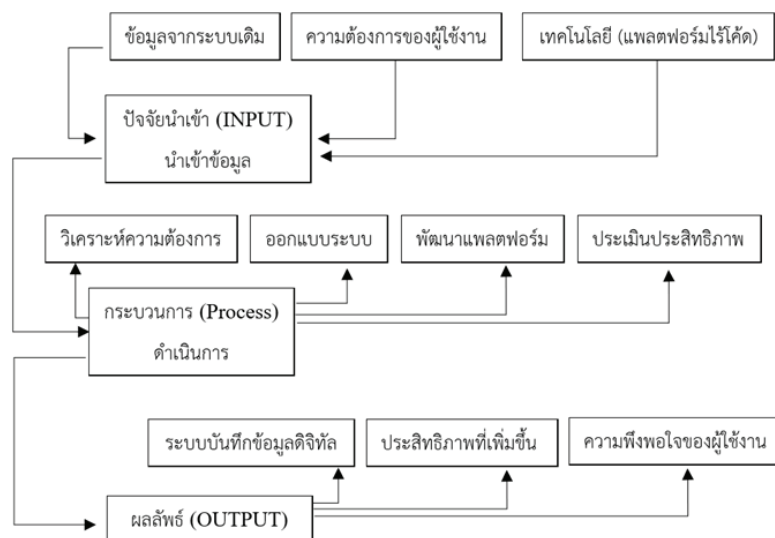
โดยศึกษาจากการบันทึกข้อมูลโครงการก่อสร้างถนน ได้แก่ 1) รายงานประจำวัน (Daily Report) บันทึกปริมาณงาน แรงงาน และสภาพอากาศในแต่ละวัน เพื่อใช้ประเมินผลการดำเนินงาน 2) รายงานความก้าวหน้า จัดทำเป็นระยะ เช่น รายสัปดาห์หรือรายเดือน เพื่อติดตามความคืบหน้าเทียบกับแผนงาน วิเคราะห์ความล่าช้าและปัญหาที่อาจเกิดขึ้น 3) ภาพถ่ายและวิดีโอ ใช้เป็นหลักฐานสนับสนุนการรายงานและตรวจสอบคุณภาพงาน โดยระบบงานดั้งเดิมนั้นใช้การจดบันทึกข้อมูลลงในกระดาษ เช่น การทำรายงานประจำวัน ประจำสัปดาห์ การบันทึกข้อมูลลงในกระดาษ อาจทำให้ข้อมูลบางส่วนขาดหายเมื่อเวลาผ่านไปข้อมูลอาจเกิดความผิดพลาดหรือคลาดเคลื่อน และจำเป็นต้องทำการแปลงข้อมูลเข้าสู่ระบบคอมพิวเตอร์เพื่อดำเนินงานส่วนอื่นที่เกี่ยวข้อง ซึ่งเกิดความล่าช้าและซ้ำซ้อนกันของการทำงาน ผู้วิจัยจึงปรับเปลี่ยนเทคโนโลยีจากระบบการทำงานบนกระดาษมาเป็นการใช้แพลตฟอร์มไร้โค้ดเข้ามาสนับสนุนการทำงาน

2. การวิเคราะห์ความต้องการ

โดยผู้วิจัยได้รวบรวมและศึกษาเอกสารที่เกี่ยวข้องกับการจัดทำรายงานประจำวันและรายงานประจำสัปดาห์จากเจ้าหน้าที่ที่ปฏิบัติงานจริงในโครงการก่อสร้างถนน ภายใต้หน่วยงานของเทศบาลตำบลห้วยยอด ซึ่งประกอบด้วยรูปแบบฟอร์มรายงาน วิธีการกรอกข้อมูล ขั้นตอนการรวบรวม และการจัดส่งเอกสาร เพื่อให้เข้าใจบริบทการทำงานจริงของเจ้าหน้าที่ ข้อมูลจากเอกสารดังกล่าวถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อระบุจุดที่เกิดความซ้ำซ้อน ความล่าช้า หรือข้อผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นจากการใช้ระบบบันทึกแบบเดิม จากนั้นจึงนำผลการวิเคราะห์มาวางแผนและออกแบบแนวทางการดำเนินงานในรูปแบบใหม่ โดยประยุกต์ใช้แพลตฟอร์มไร้โค้ดในการพัฒนาเครื่องมือดิจิทัลสำหรับบันทึกและติดตามงานก่อสร้างถนนให้เหมาะสมกับลักษณะงานและขั้นตอนที่เจ้าหน้าที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน

3. การออกแบบระบบโครงสร้างของข้อมูล

ภายหลังจากการรวบรวมและศึกษาข้อมูลจากเอกสาร รวมถึงสัมภาษณ์เจ้าหน้าที่ผู้ปฏิบัติงานที่เกี่ยวข้องกับการรายงานความก้าวหน้าของโครงการก่อสร้างถนนแล้ว ผู้วิจัยได้นำข้อมูลที่ได้นำมาวิเคราะห์และออกแบบระบบให้เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้แพลตฟอร์มไร้โค้ดในการสนับสนุนการดำเนินงานของเจ้าหน้าที่ภาคสนาม โดยคำนึงถึงความสะดวกในการใช้งานจริง ความสอดคล้องกับขั้นตอนงานเดิม และการจัดเก็บข้อมูลอย่างเป็นระบบ โดยแนวทางการออกแบบนี้ได้จัดทำขึ้นภายใต้กรอบแนวคิดในการวิจัยดังในรูปที่ 1



รูปที่ 1 กรอบแนวคิดในการวิจัย

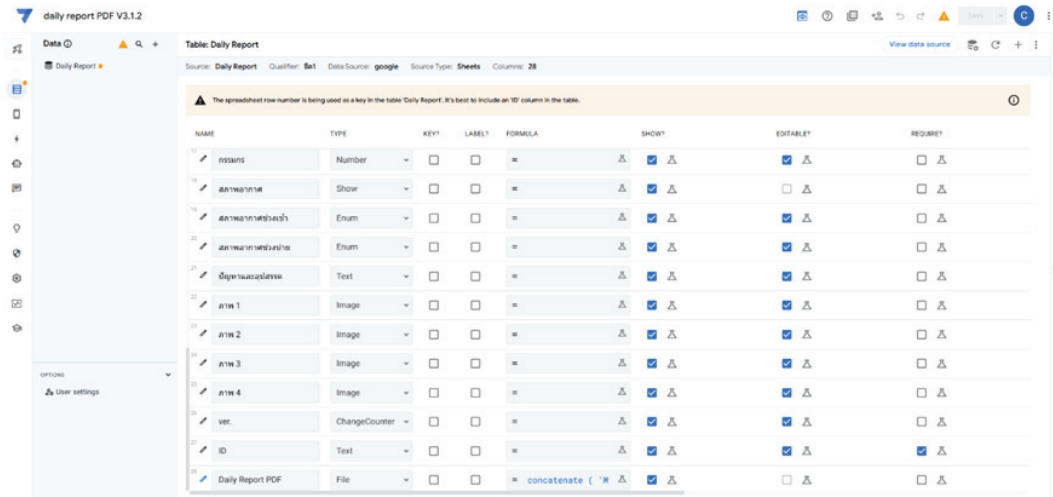
4. การประยุกต์ใช้แพลตฟอร์มไร้โค้ด

ในการศึกษาครั้งนี้ ผู้วิจัยได้เลือกแพลตฟอร์ม AppSheet สำหรับประยุกต์ใช้แพลตฟอร์มไร้โค้ดสำหรับการติดตามและประเมินผลโครงการก่อสร้างถนน เนื่องจากเป็นแพลตฟอร์มที่ใช้งานได้ง่าย ไม่จำเป็นต้องมีความรู้ด้านการเขียนโปรแกรม และไม่มีค่าใช้จ่ายในการพัฒนาและใช้งานร่วมกันของแพลตฟอร์ม (หากไม่เกินขอบข่ายของข้อกำหนดการใช้งาน) สามารถประยุกต์ใช้ในการเก็บข้อมูล รูปภาพ อีกทั้งยังสามารถใช้งานร่วมกับ Google Sheets ในการจัดเก็บข้อมูล นอกจากนี้ยังสามารถส่งออกข้อมูลให้เป็นไฟล์ Microsoft Excel ที่นิยมใช้งานอย่างแพร่หลายได้เป็นอย่างดี (Chantra,, 2020) เพื่อให้ตรงตามวัตถุประสงค์ของการวิจัยและชื่อเรื่อง ผู้วิจัยได้ออกแบบฟังก์ชันของแอปพลิเคชันให้สามารถรองรับกระบวนการ ติดตาม และประเมินผล โครงการก่อสร้างถนนได้อย่างเป็นระบบ โดยมีคุณสมบัติหลัก ดังนี้

1) ด้านการติดตาม (Monitoring) แอปพลิเคชันสามารถใช้บันทึกข้อมูลรายวัน ได้แก่ ประเภทของงานที่ดำเนินการ แรงงาน สภาพอากาศ และภาพถ่าย โดยข้อมูลทั้งหมดจะถูกส่งไปยัง Google Sheets และแสดงผลแบบเรียลไทม์ผ่านแดชบอร์ด ส่งผลให้ช่างผู้ควบคุมงานสามารถจัดเก็บและส่งข้อมูลได้อย่างเป็นระบบ ลดขั้นตอนการรายงานแบบกระดาษ เพิ่มความสะดวกในการติดตามสถานะของโครงการในแต่ละวัน และช่วยให้สามารถประสานงานกับผู้บริหารหรือเจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้องได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

2) ด้านการประเมินผล (Evaluation) แอปมีฟังก์ชันที่สามารถส่งออกรายงานประจำวันในรูปแบบไฟล์ Portable Document Format (PDF) ซึ่งช่วยให้ช่างผู้ควบคุมงานสามารถจัดเก็บหรือส่งต่อรายงาน เพื่อประกอบการตรวจสอบและสรุปผลการดำเนินงานได้อย่างสะดวกและเป็นระบบ

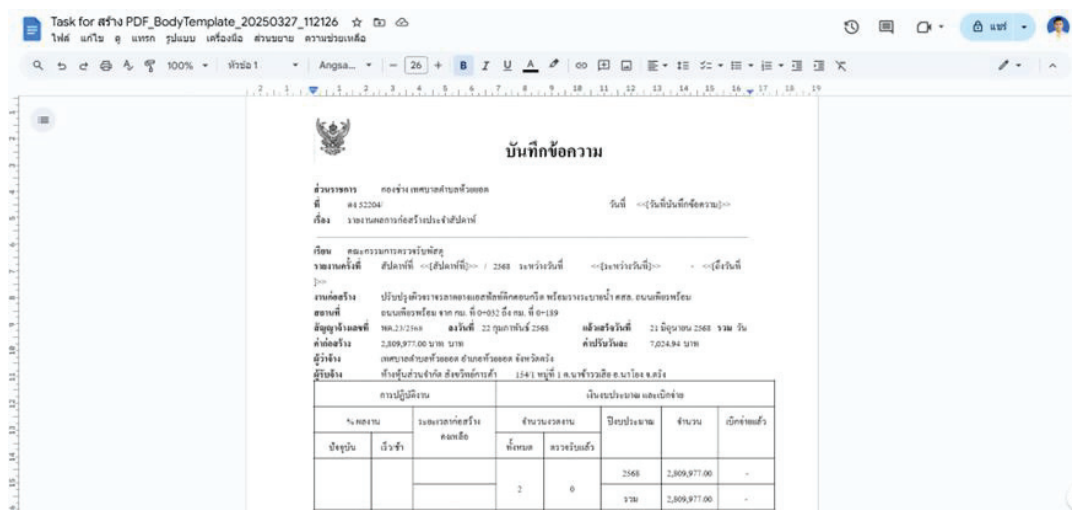
คุณลักษณะของระบบนี้จึงสามารถใช้เป็นเครื่องมือเสริมในการบริหารโครงการก่อสร้างถนนขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น ทั้งในเชิงข้อมูลที่เป็นหลักฐานประกอบการควบคุมงาน และในเชิงการตัดสินใจและปรับแผน อย่างมีประสิทธิภาพ ดังรูปที่ 2



The screenshot shows a configuration table for a 'Daily Report' form. The table has columns for NAME, TYPE, KEY?, LABEL, FORMULA, SHOW?, EDITABLE?, and REQUIRED?. The rows list various form fields like 'ถนน' (Road), 'สภาพถนน' (Road Condition), 'สภาพอากาศ' (Weather), 'อุณหภูมิ' (Temperature), 'ภาพถ่าย' (Photos), 'เวลา' (Time), 'วันที่' (Date), 'ID', and 'Daily Report PDF'.

NAME	TYPE	KEY?	LABEL	FORMULA	SHOW?	EDITABLE?	REQUIRED?
ถนน	Number	☐		=	☒	☒	☐
สภาพถนน	Show	☐		=	☒	☐	☐
สภาพอากาศ	Enum	☐		=	☒	☒	☐
อุณหภูมิ	Enum	☐		=	☒	☒	☐
ภาพถ่าย	Text	☐		=	☒	☒	☐
ภาพ 1	Image	☐		=	☒	☒	☐
ภาพ 2	Image	☐		=	☒	☒	☐
ภาพ 3	Image	☐		=	☒	☒	☐
ภาพ 4	Image	☐		=	☒	☒	☐
ver	ChangeCounter	☐		=	☒	☒	☐
ID	Text	☐		=	☒	☒	☒
Daily Report PDF	File	☐		= concatenate ('M	☒	☐	☐

(ก) หน้าจอระบบข้อมูลผู้ควบคุมงาน



The screenshot shows a Thai government form titled 'บันทึกข้อความ' (Record of Communication). It contains fields for 'ส่วนราชการ' (Government Agency), 'ที่' (Number), 'วันที่' (Date), and 'เรื่อง' (Subject). The form also includes a table for 'การปฏิบัติงาน' (Work Performance) with columns for 'วันจันทร์' (Monday), 'วันอังคาร' (Tuesday), 'วันพุธ' (Wednesday), 'วันพฤหัสบดี' (Thursday), 'วันศุกร์' (Friday), and 'วันเสาร์' (Saturday).

วันจันทร์	วันอังคาร	วันพุธ	วันพฤหัสบดี	วันศุกร์	วันเสาร์
2,809,977.00 บาท	2,809,977.00 บาท	2,809,977.00 บาท	2,809,977.00 บาท	2,809,977.00 บาท	2,809,977.00 บาท

(ข) หน้าจอแบบฟอร์มบันทึกข้อความรายงานประจำวัน

รูปที่ 2 การประยุกต์ใช้แพลตฟอร์มไร้โค้ด AppSheet แสดงหน้าจอแอปพลิเคชันที่พัฒนาด้วยแพลตฟอร์มไร้โค้ด AppSheet สำหรับใช้ในการติดตามและประเมินผลโครงการก่อสร้างถนน

โดยออกแบบให้สามารถกรอกข้อมูลประจำวันได้จากอุปกรณ์พกพา เช่น สมาร์ทโฟนหรือ Tablet หน้าจอที่ปรากฏประกอบด้วย

- หน้าจอผู้ควบคุมงาน สำหรับเข้าสู่ระบบและเลือกโครงการที่รับผิดชอบ
- แบบฟอร์มบันทึกกรายงานประจำวัน ใช้กรอกข้อมูลประเภทงานที่ดำเนินการ จำนวนแรงงาน และสภาพอากาศ

- หน้าจอแนบภาพถ่าย สำหรับแนบภาพประกอบความก้าวหน้างานแต่ละวัน
- หน้าจอดาวน์โหลดรายงาน Portable Document Format (PDF) สำหรับส่งออกรายงานในรูปแบบเอกสารทางราชการ

ฟังก์ชันทั้งหมดนี้ช่วยให้ช่างผู้ควบคุมงานสามารถจัดเก็บข้อมูลได้สะดวก รวดเร็ว และลดข้อผิดพลาดจากการใช้เอกสารกระดาษ

5. การประเมินประสิทธิภาพ

ภายหลังการประยุกต์ใช้แพลตฟอร์มไร้โค้ดสำหรับการติดตามและประเมินผลโครงการก่อสร้างถนนแล้ว จะทำการประเมินความพึงพอใจโดยอาศัยการพิจารณา โดยสถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล ได้แก่ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดยกำหนดเกณฑ์การแปลความหมาย (Wongratana, 2017) ดังนี้

ค่าเฉลี่ย 4.50 - 5.00 หมายถึง มีคุณภาพ/ความพึงพอใจระดับมากที่สุด

ค่าเฉลี่ย 3.50 - 4.49 หมายถึง มีคุณภาพ/ความพึงพอใจระดับมาก

ค่าเฉลี่ย 2.50 - 3.49 หมายถึง มีคุณภาพ/ความพึงพอใจระดับปานกลาง

ค่าเฉลี่ย 1.50 - 2.49 หมายถึง มีคุณภาพ/ความพึงพอใจระดับน้อย

ค่าเฉลี่ย 1.00 - 1.49 หมายถึง มีคุณภาพ/ความพึงพอใจระดับน้อยที่สุด

การประเมินความพึงพอใจนั้นแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ประกอบด้วย 1) คำถามเกี่ยวกับความคิดเห็นของผู้ควบคุมงานก่อสร้างในการใช้กระดาษสำหรับการบันทึกรายงานประจำวัน 2) คำถามเกี่ยวกับความคิดเห็นของผู้ควบคุมงานก่อสร้างหลังใช้งานแพลตฟอร์มไร้โค้ดสำหรับการบันทึกรายงานประจำวัน โดยแบ่งออกเป็น 4 ด้าน คือ 1) การจัดทำรายงานประจำวัน 2) การรายงานข้อมูล 3) การค้นหาและจัดเก็บข้อมูล 4) ความพึงพอใจโดยรวมในการใช้งาน ประเมินจากแบบสอบถามออนไลน์ เจ้าหน้าที่ช่างผู้ควบคุมงานองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นในจังหวัดตรัง จำนวน 50 คน

นอกจากนี้ เพื่อประเมินความสอดคล้องของแบบสอบถาม ความเชื่อมั่นของเครื่องมือที่ใช้เก็บข้อมูลจะประเมินโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์แอลฟาของครอนบาค (Cronbach's Alpha) ซึ่งเป็นค่าสถิติที่ใช้วัดความเชื่อมั่น (Reliability) ของแบบสอบถาม โดยเฉพาะเมื่อเป็นแบบสอบถามแบบมาตราส่วนประมาณค่า (Likert Scale)

สูตรการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์แอลฟาของครอนบาค (Cronbach's Alpha) สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (1)

$$\alpha = \frac{N}{N-1} \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^N \sigma^2_{Y_i}}{\sigma^2_X} \right) \quad (1)$$

เมื่อ: α คือ ค่าสัมประสิทธิ์แอลฟาของครอนบาค

N คือ จำนวนข้อคำถามทั้งหมด

$\sigma^2_{Y_i}$ คือ ความแปรปรวนของคะแนนในข้อคำถามที่ i

σ^2_X คือ ความแปรปรวนของคะแนนรวมทั้งหมด

ซึ่งค่า α ที่ได้จะมีความหมาย ดังนี้

ค่า $\alpha \geq 0.90$ = ความเชื่อมั่นในระดับ ดีที่สุด

$0.80 \leq \alpha < 0.90$ = ความเชื่อมั่นในระดับ ดีมาก

$0.70 \leq \alpha < 0.80$ = ความเชื่อมั่นในระดับ ดี

ค่า $\alpha < 0.70$ = ความเชื่อมั่นในระดับ พอใช้หรือต่ำกว่าเกณฑ์

6. สรุปผลการวิจัย

โดยสรุปผลและรายงานผลการวิจัยเพื่อเผยแพร่

ผลการวิจัย

การสร้างโมบายแอปพลิเคชันแพลตฟอร์มไร้โค้ด ผู้วิจัยทำการสร้างแพลตฟอร์มโดยอาศัยแพลตฟอร์ม AppSheet ที่สามารถเข้าถึงได้ที่ <https://www.appsheet.com> โดยข้อมูลที่เก็บบันทึกรายงานประจำวันนั้นจะถูกจัดเก็บให้อยู่ในรูปของข้อมูลสเปรดชีตของ Google Sheets ที่สามารถเชื่อมต่อกับแพลตฟอร์ม AppSheet ได้โดยตรง เมื่อทำการสร้างโมบายแอปพลิเคชันแพลตฟอร์มไร้โค้ดเสร็จเรียบร้อยแล้วจึงทำการให้ช่างผู้ควบคุมงานในองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น จังหวัดตรัง จำนวน 50 คน ทดลองใช้และทำแบบประเมินความพึงพอใจ จุดเด่นของแพลตฟอร์ม AppSheet อีกอย่างหนึ่ง คือ สามารถทำงานได้ทั้งบนระบบปฏิบัติการ Android และ iOS

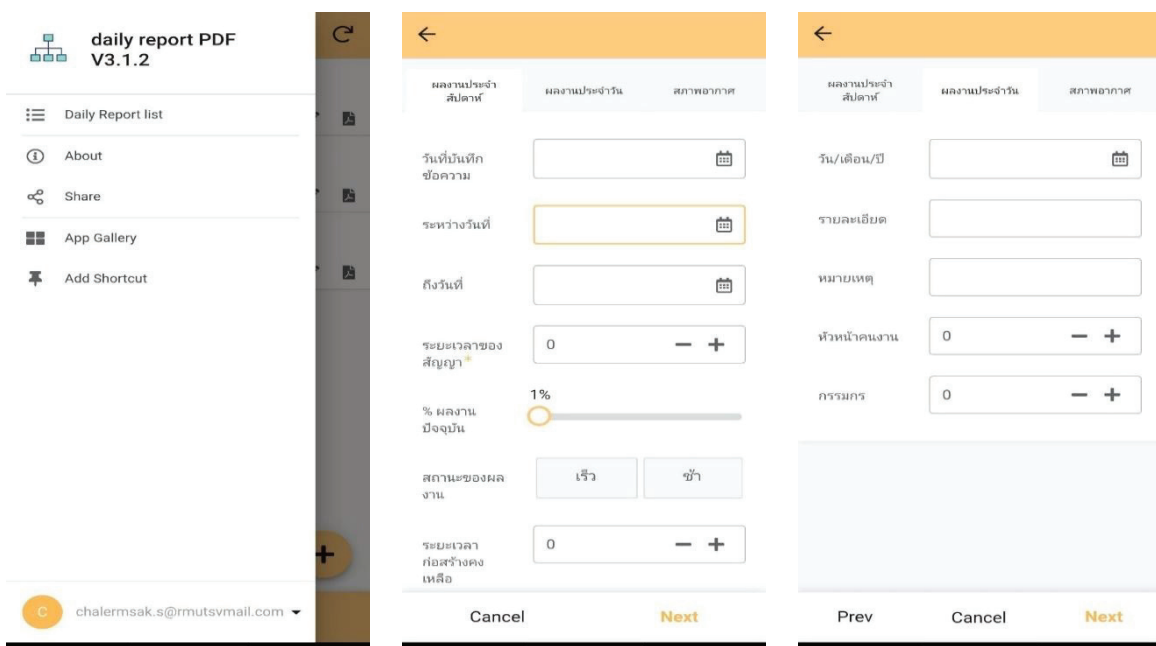
1. การประยุกต์ใช้ระบบติดตามและประเมินผล

1.1 โครงสร้างข้อมูล โดยระบบได้รับการออกแบบให้สามารถจัดเก็บข้อมูลรายวันได้อย่างเป็นระบบ โดยเน้นที่

- 1) รายงานประจำวัน บันทึกประเภทงานก่อสร้างที่ดำเนินการในแต่ละวัน
- 2) แรงงานที่ใช้ จำนวนแรงงานที่เข้าปฏิบัติงาน
- 3) สภาพอากาศ บันทึกว่าในแต่ละวันมีฝนตกหรือไม่ เพื่อประเมินผลกระทบต่อโครงการ
- 4) ภาพถ่ายใช้เป็นหลักฐานประกอบรายงาน

1.2 การพัฒนาแพลตฟอร์ม ใช้ แพลตฟอร์มไร้โค้ด ในการสร้างระบบโดยมีฟังก์ชันสำคัญ เช่น

- 1) การป้อนข้อมูลผ่านอุปกรณ์พกพา
- 2) การแสดงผลแบบเรียลไทม์ผ่านแดชบอร์ด

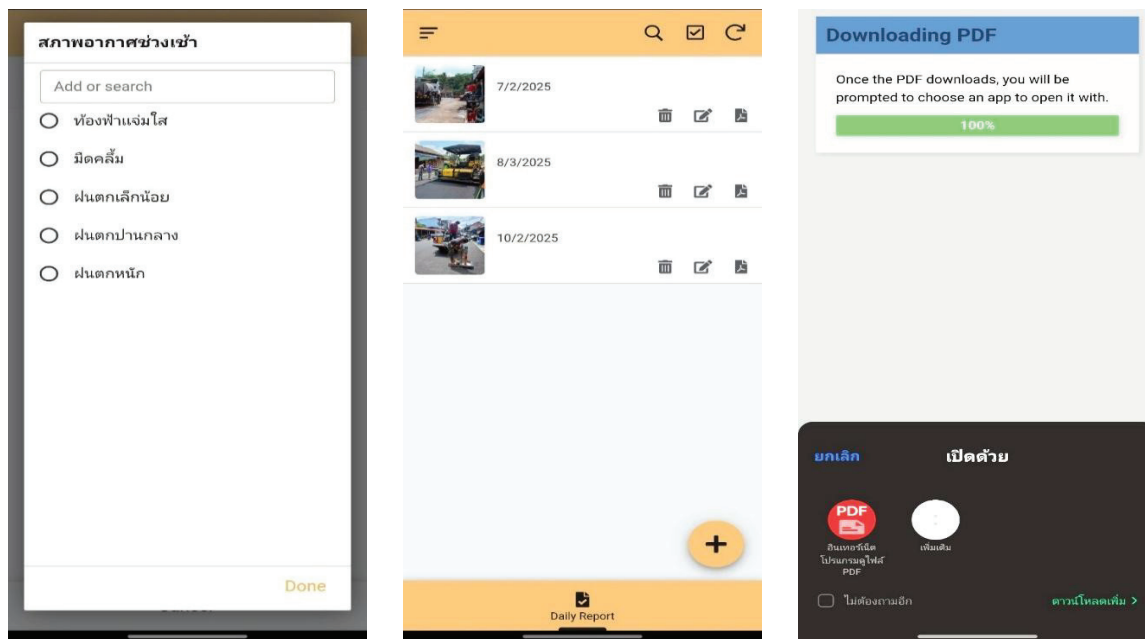


(ก) หน้าจอแสดงชื่อแอป

(ข) หน้าจอผลงานประจำวัน

(ค) หน้าจอบันทึก
สภาพอากาศและภาพ

รูปที่ 3 แสดงหน้าจอของแอปพลิเคชันที่พัฒนาขึ้นด้วย AppSheet



(ก) หน้าจอการเลือกสภาพอากาศ

(ข) หน้าจอผลการบันทึกข้อมูล

(ค) หน้าจอดาวน์โหลดไฟล์ PDF

รูปที่ 3 แสดงหน้าจอของแอปพลิเคชันที่พัฒนาขึ้นด้วย AppSheet (ต่อ)

ในการติดตามและประเมินผลโครงการก่อสร้างถนน โดยแต่ละหน้าจอมีการออกแบบให้รองรับการทำงาน ติดตามและประเมินผล โครงการก่อสร้างถนน ดังรูปที่ 3 ดังนี้

(ก) หน้าจอชื่อแอป เป็นหน้าเมนูหลักที่แสดงฟังก์ชันหลัก เช่น รายงานประจำวัน ตรวจสอบข้อมูล และดาวน์โหลดรายงาน

(ข) หน้าจอผลงานประจำวัน สำหรับกรอกข้อมูลประเภทงานที่ดำเนินการ เช่น งานถมดิน ลูกจ้าง หรือลาดยาง พร้อมจำนวนแรงงาน

(ค) หน้าจอบันทึกสภาพอากาศและภาพถ่าย ช่วยให้ช่างผู้ควบคุมสามารถบันทึกสภาพอากาศประจำวัน เช่น ฝนตก/แดดออก และถ่ายภาพหน้างานแนบเป็นหลักฐานได้

(ง) หน้าจอการเลือกสภาพอากาศ ออกแบบให้เลือกสถานะได้รวดเร็ว ลดเวลาการกรอกข้อมูล

(จ) หน้าจอผลการบันทึกข้อมูล แสดงผลการบันทึกว่าบันทึกสำเร็จหรือไม่ เพื่อความมั่นใจว่าข้อมูลถูกส่งไปยังฐานข้อมูลแล้ว

(ฉ) หน้าจอดาวน์โหลดรายงานไฟล์ Portable Document Format (PDF) ช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถส่งออก รายงานประจำวันในรูปแบบเอกสารทางราชการได้ทันที ถือเป็นฟังก์ชันที่รองรับการ “ประเมินผล” จากข้อมูลที่รวบรวมแอปพลิเคชันนี้ จึงทำหน้าที่ติดตาม โดยการบันทึกข้อมูลหน้างานในแต่ละวันอย่างเป็นระบบ พร้อมภาพถ่ายและตัวแปรสภาพอากาศ และทำหน้าที่ประเมินผล โดยการสรุปข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบรายงาน Portable Document Format (PDF) ที่สามารถใช้ตรวจสอบความคืบหน้าได้อย่างสะดวกและเป็นทางการ

2. ผลการประเมินความพึงพอใจของช่างผู้ควบคุมงานโครงการก่อสร้าง ของหน่วยงานองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นในจังหวัดตรัง จำนวน 50 คน

ตารางที่ 1 ข้อมูลทั่วไปของผู้ตอบแบบสอบถาม

ข้อมูล	จำนวน	ร้อยละ
1. เพศ		
1.1 ชาย	44	88
1.2 หญิง	6	12
2. อายุ		
2.1 25 - 30 ปี	4	8
2.2 31 - 40 ปี	18	36
2.3 41 - 50 ปี	21	42
2.4 51 ปีขึ้นไป	7	14
3. เคยใช้งานแพลตฟอร์มไร้โค้ดหรือไม่		
3.1 เคย	7	14
3.2 ไม่เคย	43	86
4. เคยเป็นผู้ควบคุมงานก่อสร้างมาแล้ว		
4.1 1 - 5 โครงการ	4	8
4.2 5 - 10 โครงการ	4	8
4.3 10 - 15 โครงการ	2	4
4.4 15 โครงการขึ้นไป	40	80
5. ประเภทโครงการที่เคยควบคุมงานก่อสร้าง		
5.1 งานถนน	46	92
5.2 งานอาคารที่พักอาศัย	34	68
5.3 งานอาคารขนาดใหญ่ เช่น ห้างสรรพสินค้า ตึกสูง	12	24
5.4 งานสาธารณูปโภคอื่น ๆ เช่น ประปา วางท่อ ไฟฟ้า ฯลฯ	25	50

จากตารางที่ 1 ข้อมูลทั่วไปของผู้ตอบแบบสอบถามพบว่าเป็นผู้ชายจำนวน 44 คน และผู้หญิงจำนวน 6 คน คิดเป็นร้อยละ 88 และ 12 ตามลำดับ จากข้อมูลจะเห็นได้ว่าเจ้าหน้าที่ช่างผู้ควบคุมงานขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น ในจังหวัดตรัง จำนวน 50 คน ส่วนมากเป็นผู้ชาย และมีอายุอยู่ในช่วง 31 - 40 ปี และ 41 - 50 ปี สูงถึงร้อยละ 36 และ 42 ตามลำดับ โดยส่วนมากเคยเป็นผู้ควบคุมงานก่อสร้างมาแล้ว 15 โครงการขึ้นไป ร้อยละ 80 และพบว่าประเภทโครงการที่เคยควบคุมงานก่อสร้างมากที่สุด เป็นงานก่อสร้างถนน จำนวน 46 คน คิดเป็นร้อยละ 92 รองลงมาเป็นงานก่อสร้างบ้านพักอาศัย จำนวน 34 คน คิดเป็นร้อยละ 68 งานสาธารณูปโภคอื่น ๆ เช่น ประปา วางท่อ ไฟฟ้า ฯลฯ จำนวน 25 คิดเป็นร้อยละ 50 และน้อยที่สุดคืองานอาคารขนาดใหญ่ เช่น ห้างสรรพสินค้า ตึกสูง จำนวน 12 คน คิดเป็นร้อยละ 24 นอกจากนี้ยังพบว่า ผู้ตอบแบบสอบถามส่วนใหญ่ไม่เคยมีประสบการณ์การใช้แพลตฟอร์มไร้โค้ดมาก่อน มีจำนวน 43 คน คิดเป็นร้อยละ 86 ของผู้ตอบแบบสอบถามทั้งหมด

ตารางที่ 2 ผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ควบคุมงานก่อสร้างในการใช้กระตาดสำหรับการบันทึกรายงานประจำวัน หมวดก่อนใช้ การจดบันทึกด้วยกระตาด

รายการประเมิน	$\bar{X}$	S.D.	ความหมาย
1. การจัดทำรายงานประจำวัน			
1.1 การจดบันทึกข้อมูลรายวันมีความไม่สะดวก	3.90	1.04	มาก
1.2 การกรอกข้อมูลและการจัดทำรายงานใช้เวลานาน	3.78	1.15	มาก
1.3 การแก้ไขข้อมูลเมื่อเกิดข้อผิดพลาดมีความยุ่งยาก	3.80	1.10	มาก
รวมเฉลี่ย	3.83	1.10	มาก
2. การรายงานข้อมูล			
2.1 การรายงานข้อมูลมีความถูกต้อง	3.80	0.82	มาก
2.2 การรายงานข้อมูลมีความครบถ้วน	3.66	1.05	มาก
2.3 การตรวจสอบข้อผิดพลาดของข้อมูลมีความยุ่งยาก	3.56	1.10	มาก
รวมเฉลี่ย	3.67	0.99	มาก
3. การค้นหาและจัดเก็บข้อมูล			
3.1 การจัดเก็บข้อมูลรายงานมีความยุ่งยาก	3.68	1.09	มาก
3.2 การค้นหารายงานย้อนหลังมีความยุ่งยาก	3.76	1.21	มาก
3.3 การจัดเก็บรายงานที่เป็นเอกสารมีความไม่ปลอดภัย	3.82	1.07	มาก
รวมเฉลี่ย	3.75	1.17	มาก
4. ความพึงพอใจโดยรวมในการใช้งาน			
4.1 ความพึงพอใจต่อประสิทธิภาพของการทำรายงาน	3.34	0.91	ปานกลาง
4.2 ความพึงพอใจต่อความน่าเชื่อถือของรายงาน	3.50	0.92	มาก
4.3 ความพึงพอใจต่อการใช้งานในการจดบันทึกด้วยกระตาด	3.12	1.01	ปานกลาง
รวมเฉลี่ย	3.32	0.95	ปานกลาง
ค่าเฉลี่ยโดยรวม	3.64	1.04	มาก

จากตารางที่ 2 พบว่าการใช้กระตาดในการจัดทำรายงานประจำวันได้รับความพึงพอใจในระดับมาก ($\bar{X} = 3.64$ S.D. = 1.04) โดยประเด็นที่ได้รับคะแนนสูงสุดคือ การจัดทำรายงานประจำวัน ขณะที่ความพึงพอใจโดยรวมยังคงอยู่ในระดับปานกลาง ทั้งนี้แบบสอบถามมีความเชื่อมั่นในระดับดี ($\alpha = 0.83$)

ตารางที่ 3 ผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ควบคุมงานก่อสร้าง หลังใช้งานแพลตฟอร์มไร้โค้ดสำหรับการบันทึก รายงานประจำวัน หมวดหลังใช้แพลตฟอร์มไร้โค้ด

รายการประเมิน	$\bar{X}$	S.D.	ความหมาย
1. การจัดทำรายงานประจำวัน			
1.1 การจดบันทึกข้อมูลรายวันมีความสะดวก	4.18	0.86	มาก
1.2 การกรอกข้อมูลและการจัดทำรายงานใช้เวลาสั้น	4.00	0.98	มาก
1.3 การแก้ไขข้อมูลเมื่อเกิดข้อผิดพลาดมีความง่าย	4.00	1.00	มาก
รวมเฉลี่ย	4.06	0.95	มาก
2. การรายงานข้อมูล			
2.1 การรายงานข้อมูลมีความถูกต้อง	4.00	0.87	มาก
2.2 การรายงานข้อมูลมีความครบถ้วน	4.02	0.91	มาก
2.3 การตรวจสอบข้อผิดพลาดของข้อมูลมีความง่าย	3.90	0.94	มาก
รวมเฉลี่ย	3.97	0.91	มาก
3. การค้นหาและจัดเก็บข้อมูล			
3.1 การจัดเก็บข้อมูลรายงานมีความง่าย	4.14	0.85	มาก
3.2 การค้นหารายงานย้อนหลังมีความง่าย	4.28	0.80	มาก
3.3 การจัดเก็บรายงานที่เป็นเอกสารมีความปลอดภัย	4.02	0.91	มาก
รวมเฉลี่ย	4.15	0.85	มาก
4. ความพึงพอใจโดยรวมในการใช้งาน			
4.1 ความพึงพอใจต่อประสิทธิภาพของการทำรายงาน	4.12	0.77	มาก
4.2 ความพึงพอใจต่อความน่าเชื่อถือของรายงาน	4.04	0.77	มาก
4.3 ความพึงพอใจต่อการใช้งานในรูปแบบแพลตฟอร์มไร้โค้ด	4.04	0.85	มาก
รวมเฉลี่ย	4.07	0.80	มาก
ค่าเฉลี่ยโดยรวม	4.06	0.86	มาก

จากตารางที่ 3 ผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ควบคุมงานก่อสร้างหลังใช้งานแพลตฟอร์มไร้โค้ด สำหรับการบันทึก รายงานประจำวัน พบว่าโดยรวมมีความพึงพอใจในระดับมาก ($\bar{X} = 4.06$ S.D. = 0.86) เมื่อพิจารณารายด้านพบว่า ด้านการค้นหาและจัดเก็บข้อมูลได้รับคะแนนเฉลี่ยสูงสุด ($\bar{X} = 4.15$ S.D. = 0.85) รองลงมาคือความพึงพอใจโดยรวมในการใช้งาน ($\bar{X} = 4.07$ S.D. = 0.80) ด้านการจัดทำรายงานประจำวัน ($\bar{X} = 4.06$ S.D. = 0.95) และด้านการรายงานข้อมูล ($\bar{X} = 3.97$ S.D. = 0.91) โดยแบบสอบถามมีค่าความเชื่อมั่น ระดับดีเยี่ยม ($\alpha = 0.94$)

นอกจากข้อมูลเชิงความพึงพอใจ ผู้วิจัยยังได้รวบรวมข้อมูลเชิงปริมาณเกี่ยวกับประสิทธิภาพเชิงเวลา (Time Efficiency) ในการจัดทำรายงานประจำวันของเจ้าหน้าที่ควบคุมงาน ก่อนและหลังการประยุกต์ใช้แพลตฟอร์มไร้โค้ด AppSheet โดยจากการสอบถามกลุ่มตัวอย่าง 50 คนในชุดเดียวกัน พบว่า

- ก่อนใช้งานแพลตฟอร์มไร้โค้ด (ระบบกระดาษเดิม) ใช้เวลาเฉลี่ยประมาณ 27 นาที ในการกรอกแบบฟอร์ม จัดเตรียมเอกสาร และแนบภาพถ่ายลงในรายงาน
- หลังใช้งานแพลตฟอร์มไร้โค้ด AppSheet เวลาที่ใช้ลดลงเหลือเฉลี่ย 12 นาที โดยสามารถกรอกข้อมูลผ่านอุปกรณ์พกพา แนบภาพถ่าย และส่งออกเป็นรายงาน Portable Document Format (PDF) ได้ภายในแอปเดียว

จากข้อมูลดังกล่าวสามารถคำนวณได้ว่า ระบบใหม่ช่วยลดเวลาการทำรายงานลงเฉลี่ย 15 นาทีต่อวัน คิดเป็นอัตราการลดเวลา ประมาณ 55.6 % เมื่อเทียบกับวิธีเดิม ข้อมูลนี้สะท้อนว่าการนำแพลตฟอร์มไร้โค้ดมาใช้ ไม่เพียงส่งผลดีด้านความพึงพอใจของผู้ใช้งานเท่านั้น แต่ยังช่วยลดภาระงานซ้ำซ้อน เพิ่มความรวดเร็ว และเพิ่มประสิทธิภาพในการปฏิบัติงานของเจ้าหน้าที่ควบคุมงานระดับท้องถิ่นได้อย่างเป็นรูปธรรม

การอภิปรายผล

ผลการศึกษาพบว่ากลุ่มตัวอย่างส่วนใหญ่เป็นเพศชาย ร้อยละ 88 และอยู่ในช่วงอายุ 31 - 50 ปี ร้อยละ 78 ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าเจ้าหน้าที่ควบคุมงานก่อสร้างขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นในจังหวัดตรังส่วนใหญ่มีประสบการณ์ทำงานด้านงานก่อสร้างสูง โดยร้อยละ 80 เคยควบคุมงานก่อสร้างมาแล้ว 15 โครงการขึ้นไป และงานที่ควบคุมมากที่สุด คือ งานก่อสร้างถนนร้อยละ 92 แสดงให้เห็นว่าแบบสอบถามได้รับการตอบจากผู้ที่มีความรู้และประสบการณ์ตรง โดยจากแบบประเมินความพึงพอใจก่อนใช้แพลตฟอร์มไร้โค้ด การบันทึกข้อมูลด้วยกระดาษได้รับคะแนนความพึงพอใจในระดับมาก ($\bar{X} = 3.97$ S.D. = 0.91) โดยการจัดทำรายงานประจำวันได้รับคะแนนสูงสุด ($\bar{X} = 3.83$ S.D. = 1.10) อย่างไรก็ตาม การค้นหาและจัดเก็บข้อมูลได้รับคะแนนต่ำกว่า ($\bar{X} = 3.75$ S.D. = 1.17) สะท้อนถึงข้อจำกัดของการใช้กระดาษที่ทำให้การเรียกดูข้อมูลทำได้ยาก จากแบบประเมินความพึงพอใจหลังใช้แพลตฟอร์มไร้โค้ด ความพึงพอใจโดยรวมเพิ่มขึ้น ($\bar{X} = 4.06$ S.D. = 0.86) โดยการค้นหาและจัดเก็บข้อมูลได้รับคะแนนสูงสุด ($\bar{X} = 4.15$ S.D. = 0.85) แสดงให้เห็นว่าแพลตฟอร์มช่วยให้การบริหารจัดการข้อมูลมีประสิทธิภาพมากขึ้น และลดข้อผิดพลาดจากกระบวนการบันทึกโดยกระดาษแบบดั้งเดิม นอกจากนี้ ค่าสัมประสิทธิ์แอลฟาของครอนบาคเพิ่มขึ้นจาก 0.83 เป็น 0.94 แสดงถึงความสอดคล้องของแบบสอบถามที่ดีขึ้น สะท้อนว่าผู้ตอบแบบสอบถามมีความคิดเห็นที่เป็นเอกฉันท์มากขึ้น

สรุปผล

ผลการศึกษาพบว่า กลุ่มตัวอย่างส่วนใหญ่เป็นเพศชาย ร้อยละ 88 และเพศหญิง ร้อยละ 12 สะท้อนให้เห็นว่าเจ้าหน้าที่ช่างผู้ควบคุมงานขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นในจังหวัดตรัง ส่วนใหญ่เป็นเพศชาย ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะงานก่อสร้างที่ต้องอาศัยทักษะทางเทคนิคและการปฏิบัติงานภาคสนาม อีกทั้งช่วงอายุของผู้ตอบแบบสอบถามส่วนใหญ่อยู่ระหว่าง 31 - 50 ปี มีค่าร้อยละ 36 และ 42 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่ากลุ่มเป้าหมายมีประสบการณ์ในการควบคุมงานก่อสร้าง ซึ่งส่งผลต่อการประเมินและให้ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับแพลตฟอร์มไร้โค้ดในบริบทของงานก่อสร้างได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยการใช้แพลตฟอร์มไร้โค้ดช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงาน โดยเฉพาะด้านการจัดเก็บและค้นหาข้อมูล ซึ่งได้คะแนนความพึงพอใจสูงสุด ($\bar{X} = 4.15$ S.D. = 0.85) เมื่อเทียบกับการใช้กระดาษแบบดั้งเดิม ($\bar{X} = 3.75$ S.D. = 1.17) ในภาพรวม ความพึงพอใจต่อแพลตฟอร์มไร้โค้ดอยู่ในระดับมาก ($\bar{X} = 4.06$ S.D. = 0.86) สูงกว่าการใช้กระดาษ ($\bar{X} = 3.97$ S.D. = 0.91) และค่าสัมประสิทธิ์แอลฟาของครอนบาคเพิ่มขึ้นจาก 0.83 เป็น 0.94 แสดงถึงความสอดคล้องของแบบสอบถามที่ดีขึ้น จึงสรุปได้ว่าแพลตฟอร์มไร้โค้ดช่วยลดภาระงาน เพิ่มความรวดเร็วในการบันทึกและเรียกดูข้อมูล และทำให้กระบวนการควบคุมงานก่อสร้างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

ข้อเสนอแนะ

- 1) ควรจัดอบรมเชิงปฏิบัติการเกี่ยวกับแพลตฟอร์มไร้โค้ดให้แก่เจ้าหน้าที่ควบคุมงานก่อสร้าง เนื่องจากผู้ตอบแบบสอบถามส่วนใหญ่ไม่มีประสบการณ์การใช้งานมาก่อน การฝึกอบรมจะช่วยให้ใช้งานเทคโนโลยีได้อย่างมีประสิทธิภาพ
- 2) ควรศึกษาการประยุกต์ใช้แพลตฟอร์มไร้โค้ดในงานก่อสร้างประเภทอื่น เช่น อาคารและระบบสาธารณูปโภค เพื่อประเมินประสิทธิภาพของแพลตฟอร์มในงานที่ซับซ้อนขึ้น
- 3) ควรปรับแต่งฟีเจอร์ของแพลตฟอร์มให้สอดคล้องกับกระบวนการทำงานขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น เช่น การเพิ่มฟังก์ชันวิเคราะห์ข้อมูลหรือระบบแจ้งเตือนอัตโนมัติ
- 4) ในอนาคตอาจมีการศึกษาต่อ เพื่อเปรียบเทียบผลความพึงพอใจระหว่างการใช้กระดาษกับแพลตฟอร์มไร้โค้ดด้วยวิธีการทางสถิติ เช่น การทดสอบ T-Test เพื่อยืนยันผลอย่างเป็นทางการ
- 5) ควรพิจารณาข้อจำกัดของการใช้แพลตฟอร์มไร้โค้ด AppSheet ในการประยุกต์ใช้จริง เช่น ความเสี่ยงด้านความปลอดภัยของข้อมูลที่เก็บบน Cloud การพึ่งพาการเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ต และประสิทธิภาพเมื่อมีข้อมูลจำนวนมาก เพื่อให้การนำระบบไปใช้งานในระยะยาวมีความมั่นคงและสอดคล้องกับข้อจำกัดเชิงเทคนิค
- 6) ควรพิจารณาการเชื่อมต่อข้อมูลจากแพลตฟอร์มกับระบบ Geographic Information System (GIS) เพื่อให้สามารถแสดงตำแหน่งถนนบนแผนที่ และวิเคราะห์ข้อมูลเชิงพื้นที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

ข้อจำกัดของงานวิจัย

งานวิจัยครั้งนี้ดำเนินการกับกลุ่มตัวอย่าง จำนวน 50 คน ซึ่งเป็นช่างผู้ควบคุมงานขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นในจังหวัดตรังเพียงจังหวัดเดียว แม้จะสะท้อนข้อมูลจากการใช้งานจริงในพื้นที่ระดับท้องถิ่น แต่ยังมีข้อจำกัดด้านความหลากหลายของบริบทการดำเนินงาน

ดังนั้น ผลการวิจัยอาจแตกต่างออกไปหากนำระบบที่พัฒนาขึ้นไปใช้ในพื้นที่อื่นที่มีลักษณะงาน โครงสร้างองค์กร หรือความพร้อมด้านเทคโนโลยีที่แตกต่างกัน เช่น ในเมืองขนาดใหญ่ที่มีขั้นตอนการควบคุมงานที่ซับซ้อน หรือในพื้นที่ชนบทที่ขาดแคลนเทคโนโลยี อาจมีข้อจำกัดด้านการเข้าถึงอุปกรณ์และระบบอินเทอร์เน็ต จึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในบริบทที่หลากหลาย เพื่อให้ได้ข้อมูลเปรียบเทียบที่ครอบคลุมและสามารถสรุปผลในภาพรวมได้แม่นยำยิ่งขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ที่อนุเคราะห์เครื่องมือ และสถานที่ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงตามระยะเวลาที่กำหนด

References

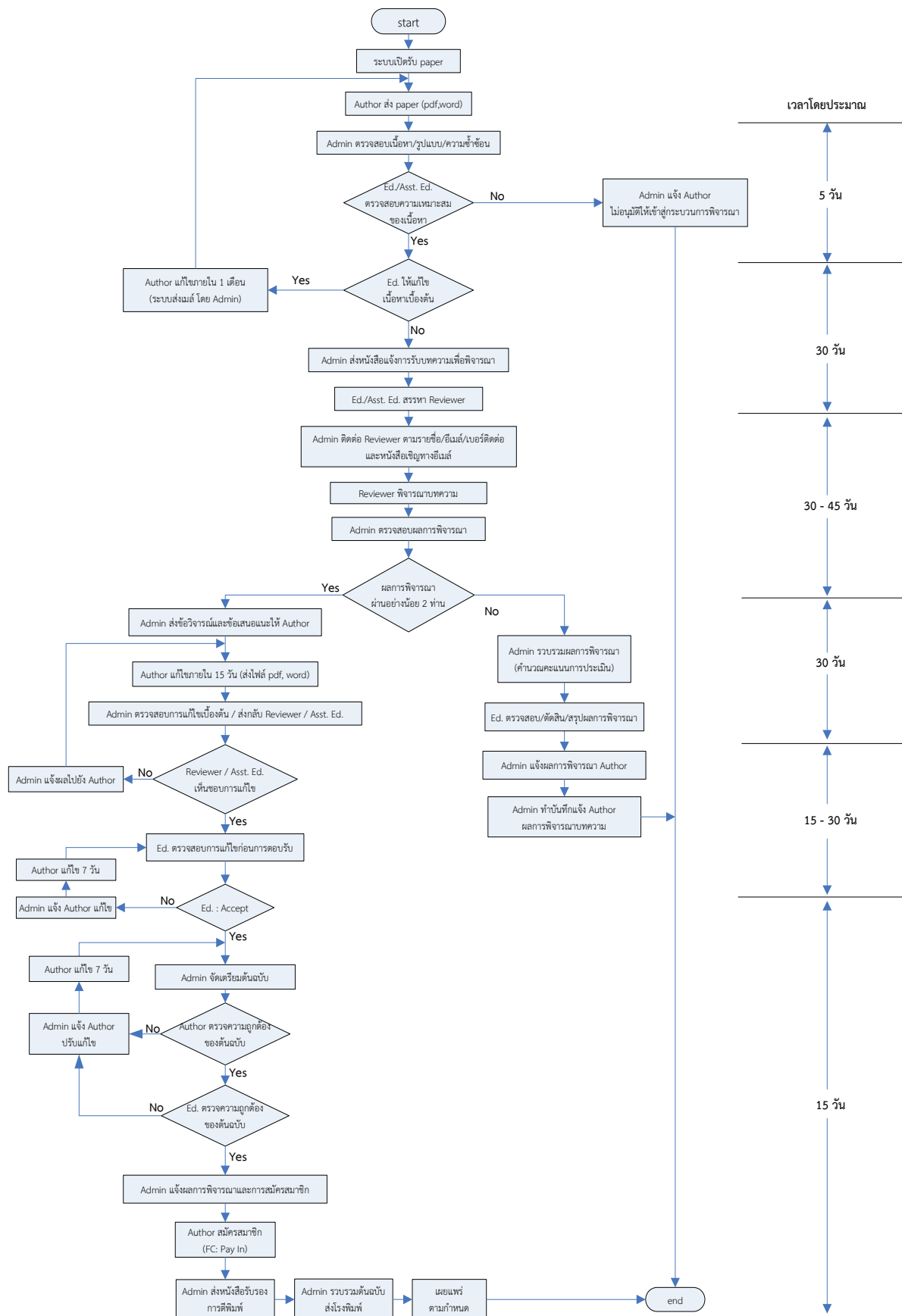
- Chanpum, S., Chanpum, P. and Jarutan, P. (2017). The Development Mobile Application Tourist Attraction in Sakon Nakhon Province on Android. *Journal of Technology Management Rajabhat Maha Sarakham University*, 4(2), 114-120. <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/itm-journal/article/view/115344/89148> (in Thai)
- Chantra, D. (2020). Apsheet Application Program Application Development for Physical Education Teaching in Volleyball Subject of Referee's Symbol of Student's 4th Year Sisaket Rajabhat University. *Sisaket Rajabhat University Journal*, 14(1), 83-94. <https://so05.tci-thaijo.org/index.php/sskrujournal/article/view/241947/164564> (in Thai)

- Jaroenjit, J. and Thanon, N. (2016). *Web Application Development for Health Check-Up System*. In Proceedings of the 7th Hatyai National and International Conference (p.758). Hatyai University.
- Deng, R. and Li, C. (2022). Digital Intelligent Management Platform for High-Rise Building Construction Based on BIM Technology. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 13(12), 1057-1067. <https://dx.doi.org/10.14569/IJACSA.2022.01312121>
- Iamsiriwong, O. (2017). *System Analysis and Design* (Rev. ed.). SE-EDUCATION.
- Lan, R. and Sulbaran, T. (2023). *A Review of Computer Vision-Based Progress Monitoring for Effective Decision Making*. CONVR 2023 Proceedings of the 23rd International Conference on Construction Applications of Virtual Reality (pp. 856-864). Firenze University Press. <https://doi.org/10.36253/979-12-215-0289-3.85>
- Ngamsong, S., Lerk-u-suke, S. and Wongyai, S. (2021). Building of Mobile Applications with No-Code Development for Field Data Collection in Tax Administration of Local Administrative Organization. *The Journal of Spatial Innovation Development (JSID)*, 2(3), 55-69. <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/jsid/article/view/246312> (in Thai)
- Oluwatosin, E. A. (2024). Impact of Advanced Construction Project Management Software on Project Performance. *International Journal of Research Publication and Reviews*, 5(7), 414-422. <https://doi.org/10.55248/gengpi.5.0724.1617>
- Prathumnok, N., Kiltchairat, C., Ubonhom, S. and Singsungnoen, K. (2022). The Development of Verifying Activities Participation Applications Using App Sheet Platform. *Journal of Research and Innovation in Science and Technology*, 3(2), 17-28. <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/JRIST/article/view/247719> (in Thai)
- Sanookpant, N. (2017). *Development of Mobile Application for Construction Management: Case Study of Ubon Ratchathani Rajabhat University* [Master's thesis, Suranaree University of Technology]. <http://sutir.sut.ac.th:8080/jspui/handle/123456789/7965>
- Suthisanuwat, N. (2022). *The Mobile Application Development for Storing the Construction Daily Report* [Master's thesis, Dhurakij Pundit University]. <https://libdoc.dpu.ac.th/thesis/Nopporn.Suth.pdf>
- Vinay, J.S., Kuppala, S., Rao, B.R., Vadde, T., Pavan, N.V.S.S.S. and Kumar, M.P. (2024). Developing an Application on Daily Updates on the Construction Site Progress Using Flutter and Dart. *Iconic Research and Engineering Journals (IRE Journal)*, 7(7), 144-151. <https://www.irejournals.com/paper-details/1705378>
- Waszkowski, R. (2019). Low-Code Platform for Automating Business Processes in Manufacturing. *IFAC-PapersOnLine*, 52(10), 376-381. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.10.060>
- Wongratana, C. (2017). *Techniques for Using Statistics for Research* (13th ed.). Amorn Printing.
- Yoopensuk, C. (2016). *Development of Reviewer Selection System: A Case Study of Graduate School, Slipakorn University* [Master's thesis, Silpakorn University]. <http://ithesis-ir.su.ac.th/dspace/handle/123456789/1110>



RMUTI Journal

วารสารงานวิจัยด้านวิทยาศาสตร์สมัยใหม่ และการใช้ประโยชน์นวัตกรรมเทคโนโลยี (RMUTI Journal)



วารสารงานวิจัยด้านวิทยาศาสตร์สมัยใหม่ และการใช้ประโยชน์นวัตกรรมเทคโนโลยี
(RMUTI Journal)

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

1. ประเภทของบทความที่ตีพิมพ์

1.1 บทความวิจัย (Research article) เป็นบทความที่ได้จากงานวิจัย

1.2 บทความวิชาการ (Academic article) เป็นบทความที่มีลักษณะดังนี้

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

2. รูปแบบการพิมพ์บทความ

การตั้งค่านำกระดาษ

- ระยะขอบ

ขอบบน (Top Margin) 2.5 ซม. ขอบล่าง (Bottom Margin) 2.5 ซม.

ขอบขวา (Right Margin) 2.5 ซม. ขอบซ้าย (Left Margin) 2.5 ซม.

- ระยะห่างบรรทัด 1 เท่า

- รูปแบบตัวอักษร ใช้ตัวอักษร TH SarabunPSK ทั้งบทความภาษาไทยและภาษาอังกฤษ

- การย่อหน้า 7 ตัวอักษร พิมพ์ตัวที่ 8

- จำนวนหน้า 12 หน้า แต่ไม่ควรเกิน 15 หน้าขนาด A4

- ชื่อบทความ จัดชิดซ้ายหน้ากระดาษ ขนาดตัวอักษร 22 ตัวหนา

- ชื่อผู้เขียน จัดชิดซ้ายหน้ากระดาษ ขนาดตัวอักษร 16 ตัวหนา

- ที่อยู่ จัดชิดซ้ายหน้ากระดาษ ขนาดตัวอักษร 14 ตัวปกติ

- ชื่อหัวเรื่องหลักในบทความ เช่น “บทคัดย่อ” “คำสำคัญ” “วิธีดำเนินการ” “ผลการวิจัย”
“สรุปผลการวิจัย” “กิตติกรรมประกาศ” “เอกสารอ้างอิง” จัดชิดซ้ายหน้ากระดาษ ขนาดตัวอักษร 20 ตัวหนา

- ชื่อหัวเรื่องรอง จัดชิดซ้ายหน้ากระดาษ ขนาดตัวอักษร 15 ตัวหนา

- เนื้อหาในส่วนต่าง ๆ และคำสำคัญ จัดชิดซ้ายหน้ากระดาษ ขนาดตัวอักษร 15 ตัวปกติ

- คำสำคัญ จัดชิดซ้ายหน้ากระดาษ ขนาดตัวอักษร 14 ตัวปกติ

- ชื่อตาราง

บทความภาษาไทย ใช้คำว่า “ตารางที่...” และบทความภาษาอังกฤษ ใช้คำว่า “Table...” ขนาดตัวอักษร 15 ตัวหนา จัดชิดซ้ายหน้ากระดาษไว้เหนือตาราง ตามด้วยคำอธิบายชื่อตารางที่เป็นตัวอักษรขนาด 15 ตัวปกติ

- ชื่อรูปภาพ

บทความภาษาไทย ใช้คำว่า “รูปที่...” และบทความภาษาอังกฤษ ใช้คำว่า “Figure...” ขนาดตัวอักษร 15 ตัวหนา จัดชิดซ้ายหน้ากระดาษไว้ด้านล่างรูปภาพ ตามด้วยคำอธิบายชื่อรูปที่เป็นตัวอักษรขนาด 15 ตัวปกติ

3. ส่วนประกอบของบทความแต่ละประเภท

3.1 บทความวิจัย จะประกอบไปด้วย

ก. ส่วนปก

1. **ชื่อบทความ (Title)** ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ควรสั้นกระชับรัด ไม่ยาวเกินไป และสื่อความหมายของเรื่องที่ทำได้อย่างชัดเจน บทความภาษาไทยชื่อเรื่องต้องมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ บทความภาษาอังกฤษชื่อเรื่องไม่ต้องมีภาษาไทย

2. **ชื่อผู้เขียน (Authors)** ชื่อเต็ม - นามสกุลเต็ม ของผู้เขียนทุกคน โดยให้รายละเอียดต้นสังกัดของผู้เขียนไว้ที่บรรทัดล่างสุดของหน้าแรก พร้อมทั้งระบุชื่อผู้เขียนประสานงาน (Corresponding Author) ด้วยการระบุเบอร์โทรศัพท์ และ E-mail Address ที่สามารถติดต่อได้ และให้ใส่เครื่องหมายดอกจันทน์ด้วยกำกับไว้ต่อท้ายนามสกุล และตัวเลขยก ให้เขียนไว้ต่อท้ายนามสกุล เพื่อระบุที่อยู่ของผู้เขียน

3. **บทคัดย่อ (Abstract)** ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ควรสั้น ตรงประเด็น ครอบคลุมสาระสำคัญของการศึกษา ประกอบไปด้วย วัตถุประสงค์ วิธีการ ผลการวิจัย และการอภิปรายผล เป็นต้น โดยเขียนลงใน 1 ย่อหน้า ถ้าบทความเป็นภาษาไทย จะต้องมีบทคัดย่อภาษาไทย 1 ย่อหน้า และภาษาอังกฤษ 1 ย่อหน้า โดยให้ภาษาไทยขึ้นก่อน เนื้อความในบทคัดย่อภาษาไทยและภาษาอังกฤษต้องมีความหมายเดียวกัน ความยาวของบทคัดย่อภาษาอังกฤษ กำหนดให้มีความยาวได้ไม่เกิน 300 คำ และไม่มีการใส่เอกสารอ้างอิงในบทคัดย่อ

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

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

ข. ส่วนเนื้อหา

1. **บทนำ (Introduction)** เพื่ออธิบายถึงความสำคัญของปัญหา และวัตถุประสงค์ของการวิจัย รวมถึงการทบทวนวรรณกรรม และเอกสารที่เกี่ยวข้อง

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

3. **ผลการวิจัย (Results)** เสนอผลการทดลองอย่างชัดเจน ตรงประเด็น มีรายละเอียดครบถ้วน เป็นการประเมินการตีความ การวิเคราะห์ในแง่มุมต่าง ๆ ของผลที่ได้ว่าเป็นไปตามวัตถุประสงค์หรือไม่ มีความสอดคล้องหรือขัดแย้งกับผลงานของผู้อื่นอย่างไร ควรมีรูปภาพและ/หรือตารางประกอบการอธิบายผลในตารางและรูปภาพ ต้องไม่ซ้ำซ้อนกัน รูปภาพและตารางของบทความที่เป็นภาษาไทยให้บรรยายเป็นภาษาไทย รูปภาพและตารางของบทความที่เป็นภาษาอังกฤษให้บรรยายเป็นภาษาอังกฤษ

4. **การอภิปรายผล (Discussion)** เป็นการอภิปรายผลการวิจัย เพื่อให้ผู้อ่านมีความเห็นคล้อยตาม เพื่อเปรียบเทียบกับผลการวิจัยของผู้อื่น พร้อมทั้งเสนอแนวทางที่จะนำไปใช้ประโยชน์ผลการวิจัยและการอภิปรายผล (Results and Discussion) อาจนำมาเขียนตอนเดียวกันได้

5. **บทสรุป (Conclusion)** สรุปประเด็น และสาระสำคัญของการวิจัย เป็นเนื้อหาที่ไม่ซ้ำกับบทคัดย่อ อาจมีข้อเสนอแนะหรือการนำผลวิจัยไปใช้ประโยชน์

6. **กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgements)** เพื่อแสดงความขอบคุณแก่ผู้ให้ความช่วยเหลือในการวิจัย และได้รับการสนับสนุนทุนวิจัย อาจมีหรือไม่ก็ได้

7. **เอกสารอ้างอิง (References)** เป็นรายการเอกสารที่ถูกอ้างไว้ในส่วนของเนื้อเรื่อง เพื่อใช้เป็นหลักในการค้นคว้าวิจัยจำนวนเอกสารที่นำมาอ้างอิงตอนท้ายต้องมีจำนวนตรงกับที่ถูกอ้างอิงไว้ในส่วนของเนื้อเรื่องที่ปรากฏในบทความเท่านั้น โดยให้ยึดถือรูปแบบการเขียนเอกสารอ้างอิงตามที่ทางวารสาร มทร.อีสาน กำหนด และต้องเขียนในรูปแบบภาษาอังกฤษเท่านั้น

3.2 บทความวิชาการ จะประกอบไปด้วย

ก. ส่วนปก

มีส่วนประกอบเหมือนบทความวิจัย และเขียนให้อยู่ในกระดาษ จำนวน 1 หน้า เท่านั้น

ข. ส่วนเนื้อหา

1. บทนำ (Introduction) เป็นส่วนของที่มาของมูลเหตุของการเขียนบทความ

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

3. ผลการศึกษา/ผลการดำเนินการ (Results) เป็นการเสนอผลอย่างชัดเจน ตามประเด็นโดยลำดับตามหัวข้อที่ศึกษาหรือดำเนินการ

4. สรุป (Conclusion) สรุปประเด็น และสาระสำคัญที่ได้จากการศึกษา

5. เอกสารอ้างอิง (References) ใช้รูปแบบที่วารสารกำหนด รายการการอ้างอิงต้องเขียนในรูปแบบภาษาอังกฤษเท่านั้น

4. การอ้างอิงเอกสารในเนื้อเรื่องของบทความ (In-text Citations)

การอ้างอิงเอกสารในเนื้อเรื่องของบทความให้ใช้ระบบนามปี (Name-year System) เท่านั้น การอ้างอิงส่วนท้ายบทความใช้รูปแบบ APA 7th ตามมาตรฐานสากล การอ้างอิงในเนื้อเรื่องหน้าข้อความ เช่น งานวิจัยของ Vitsanusat (2015) ... การอ้างอิงในเนื้อเรื่องหลังข้อความ เช่น (Vitsanusat, 2015) ในกรณีที่ผู้แต่ง 2 คน ให้ใส่คำเชื่อม “and” เช่น (Vitsanusat and Phachirarat, 2016) ถ้าผู้แต่งมากกว่า 2 คน ให้ใส่เฉพาะชื่อคนแรกแล้วตามด้วย “et al.” คั่นด้วยเครื่องหมายจุลภาค (,) เช่น (Sadrmomtazi et al., 2009) และถ้ามีการอ้างอิงในเนื้อเรื่องมากกว่า 1 รายการ ให้เรียงลำดับปีที่พิมพ์จากน้อยไปหามากและคั่นแต่ละชุดด้วยเครื่องหมาย (;) เช่น (Sadrmomtazi et al., 2009; Vitsanusat, 2015; Vitsanusat and Phachirarat, 2016)

5. การเขียนรายการเอกสารอ้างอิง (Reference List)

การเขียนรายการเอกสารอ้างอิงทั้งหมดที่ได้มีการอ้างอิงในเนื้อหาให้เรียงตามลำดับตัวอักษร โดยรายการเอกสารอ้างอิงท้ายบทความให้จัดชิดซ้ายหน้ากระดาษ กรณีชื่อผู้แต่งในบทความมีมากกว่า 3 คน ให้ใส่ชื่อผู้แต่งให้ครบทุกคนคั่นด้วยเครื่องหมายจุลภาค (,) คนสุดท้ายให้เชื่อมด้วย “and” กรณีเอกสารอ้างอิงที่มีการแปลจากภาษาไทยเป็นภาษาอังกฤษ ให้เขียนวงเล็บไว้ด้านหลังเอกสารอ้างอิงรายการนั้นเป็น (in Thai)

1) หนังสือ

ชื่อผู้แต่ง./ (ปีที่พิมพ์)./ชื่อหนังสือ/(พิมพ์ครั้งที่)./สำนักพิมพ์.

Author./ (Year)./Title of the book/(Edition ed.)./Publisher.

ชื่อผู้แต่ง./ (ปีที่พิมพ์)./ชื่อบทหรือชื่อบทความ./ใน/ชื่อบรรณาธิการ/(บ.ก.)./ชื่อหนังสือ/(น./เลขหน้า)./สำนักพิมพ์.

Author./ (Year)./Title of the chapter./In/Editor/(Eds.)./Title of the book/(pp.xx-xxx)./สำนักพิมพ์.

ตัวอย่างเช่น

Suksawat, M. (2004). *Handbook of Flower Agriculture and Media for Ornamental Plants*. House and Garden, Bangkok.

Johnson, R.A. and Wichern, D.W. (1998). *Applied Multivariate Statistical Analysis* (4thed). Englewood Cliffs, Prentice Hall, Inc., New Jersey.

World Health Organization. (2013). *The World Health Report 2013: Research for Universal Health Coverage*. WHO.

Jacobbeer, L.F. and Rand, A.G. (1982). Biochemical of seafood. In Martin, R.E., Flick, F.J., Hebard, C.E. and Ward, D.R. (Eds.), *Chemistry and Biochemistry of Marine Food Products* (pp. 347-365). AVI Inc, Westport.

2) หนังสืออิเล็กทรอนิกส์

ชื่อผู้แต่ง./ (ปีที่พิมพ์)./ชื่อหนังสือ/(พิมพ์ครั้งที่)./URL

Author./ (Year)./Title of the book/(Edition ed.)/URL

ชื่อผู้แต่ง./ (ปีที่พิมพ์)./ชื่อบทหรือชื่อบทความ./ใน/ชื่อบรรณาธิการ/(บ.ก.)/ชื่อหนังสือ/(น./เลขหน้า)./URL

Author./ (Year)./Title of the chapter./In Editor/(Eds.)/Title of the book/(Edition ed.)/pp.xx-xxx./URL

ชื่อ นามสกุล./ (ปีที่พิมพ์)./ชื่อหนังสือ/(พิมพ์ครั้งที่)./https://doi.org/xxxxxxx

Author, A.A./ (Year)./Title of the book/(Edition ed.)/https://doi.org/xxxxxxx

ตัวอย่างเช่น

Starke, J.R. (2011). Tuberculosis: Mycobacterium tuberculosis. In R.M. Khgman, B.F. Stanton, J.W. Geme, N.F. Schor, R.E. Behrman (Eds). *Nelson textbook of pediatrics* (9th ed., pp. 996-1011). <http://www.clinicalkey.com>

Chu, Z. (2022). People-Oriented Education Transformation. <https://doi.org/10.1007/978-981-16-6353-6>

3) บทความในวารสาร

ชื่อผู้แต่ง (ให้นำนามสกุลขึ้นก่อน ตามด้วยตัวอักษรย่อตัวแรกของชื่อตัว ชื่อกลาง ตามลำดับ)./ (ปีที่พิมพ์)./ชื่อบทความ./ชื่อวารสาร (ให้ใช้ชื่อเต็ม)/ปีที่(ฉบับที่)/หน้าแรก-หน้าสุดท้าย.

ชื่อผู้แต่ง (ให้นำนามสกุลขึ้นก่อน ตามด้วยตัวอักษรย่อตัวแรกของชื่อตัว ชื่อกลาง ตามลำดับ)./ (ปีที่พิมพ์)./ชื่อบทความ./ชื่อวารสาร (ให้ใช้ชื่อเต็ม)/ปีที่(ฉบับที่)/หน้าแรก-หน้าสุดท้าย./URL

ชื่อผู้แต่ง (ให้นำนามสกุลขึ้นก่อน ตามด้วยตัวอักษรย่อตัวแรกของชื่อตัว ชื่อกลาง ตามลำดับ)./ปีที่พิมพ์./ชื่อบทความ./ชื่อวารสาร (ให้ใช้ชื่อเต็ม)/ปีที่(ฉบับที่)/หน้าแรก-หน้าสุดท้าย./http://doi.org/เลข doi

ตัวอย่างเช่น

Komhom, S. (2018). Comparison of Dye-Sensitized Solar Cells Performance using Natural Dye Sensitizer Extracted from Zingiber cassumunar and Clitoria ternatea. *RMUTI Journal Science and Technology*, 11(3), 1-16.

Saptamongkol, A., Nasaeng, P., Wongs, A., Kroehong, W., Sata, V. and Chindaprasirt, P. (2024). Mechanical and Microstructural Properties of Geopolymer Paste from High Calcium Fly Ash Containing Basalt Fiber Powder from Waste Insulation. *Research on Modern Science and Utilizing Technological Innovation Journal (RMUTI Journal)*, 17(3), 70-83. <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/rmutijo/article/view/257472/173486>

Somna, K., Jaturapitakkul, C., Kajitvichyanukul, P. and Chindaprasirt, P. (2011). NaOH-activated Ground Fly Ash Geopolymer Cured at Ambient Temperature. *Fuel*, 90(6), 2118-2124. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.01.018>

4) รายงานการประชุมเชิงวิชาการ

ชื่อผู้แต่ง./ (ปี)./ชื่อบทความ./ใน/ชื่อบรรณาธิการ/(บ.ก.)/ชื่อหัวข้อการประชุม./ชื่อการประชุม/(น./เลขหน้า)./ฐานข้อมูล.

Author./ (Year)./Title./In/Editor/(Eds.)/Title of conference./Title of Conference/(pp.xx-xxx)/database.

กรณีมีเลข DOI หรือ URL ให้เติมต่อท้ายจากฐานข้อมูล ตัวอย่าง ชื่อฐานข้อมูล./https://doi.org/xxxx

ชื่อผู้แต่ง./ (ปี)./ชื่อเรื่อง./ชื่อเรื่องย่อ./ชื่อวารสาร./ปีที่(ฉบับที่)/หน้าแรก-หน้าสุดท้าย./URL

Author, A. and Author, B./ (Year)./Title:/Sub-title./Journal./ปีที่(ฉบับที่)/หน้าแรก-หน้าสุดท้าย./URL

ตัวอย่างเช่น

Bedenel, A.-L., Jourdan, L. and Biernacki, C. (2019). *Probability estimation by an adapted genetic algorithm in web insurance*. In R. Battiti, M. Brunato, I. Kotsireas, & P. Pardalos (Eds.), *Lecture notes in computer science: Vol. 11353. Learning and intelligent optimization* (pp. 225-240). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-05348-2_21

Herculano-Houzel, S., Collins, C.E., Wong, P., Kaas, J.H. and Lent, R. (2008). The basic nonuniformity of the cerebral cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105(34), 12593-12598. <https://www.pnas.org/doi/full/10.1073/pnas.0805417105>

5) วิทยานิพนธ์

ชื่อผู้แต่ง./ (ปีที่เผยแพร่)./ชื่อวิทยานิพนธ์/[วิทยานิพนธ์ปริญญาดุษฎีบัณฑิต ไม่ได้ตีพิมพ์หรือวิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ไม่ได้ตีพิมพ์]/ชื่อมหาวิทยาลัย.

Author, A.A./ (Year)./ *Thesis Title*/[Unpublished doctoral or master's thesis]/Name of the Institution awarding the degree.

ชื่อผู้แต่ง./ (ปีที่เผยแพร่)./ชื่อวิทยานิพนธ์/[วิทยานิพนธ์ปริญญาดุษฎีบัณฑิต หรือวิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต]/ชื่อมหาวิทยาลัย./ชื่อเว็บไซต์./URL

ชื่อผู้แต่ง./ (ปีที่เผยแพร่)./ชื่อวิทยานิพนธ์/(หมายเลข UMI หรือ เลขลำดับอื่น ๆ)/[วิทยานิพนธ์ปริญญาดุษฎีบัณฑิต หรือวิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต]/ชื่อมหาวิทยาลัย./ชื่อฐานข้อมูล.

ตัวอย่างเช่น

Stewart, Y. (2000). *Dressing the tarot* [Unpublished master's thesis]. Auckland University of Technology.

Miller, T. (2019). *Enhancing readiness: An exploration of the New Zealand Qualified Firefighter* [Master's thesis, Auckland University of Technology]. Tuwhera. <https://openrepository.aut.ac.nz/handle/10292/12338>

Becker, J.C. (2013). *Landscape-level influences on community composition and ecosystem function in a large river ecosystem* (Publication No. 3577776) [Doctoral dissertation, Graduate Council of Texas State University - San Marcos]. ProQuest Dissertations and Theses Global.

6) เว็บไซต์

ชื่อ-สกุล./ (ปี./วัน/เดือนที่เผยแพร่)./ชื่อบทความ./ชื่อเว็บไซต์./URL

Author/(Year,/Date/Month)./ *Title of the work: Subtitle*./Website name./URL

ตัวอย่างเช่น

Tomoyuki, Ohe. (2019, 29 August). *The chemical structure of drugs affects their toxicity*. Keio Research Highlights. <https://research-highlights.keio.ac.jp/2019/08/b.html>

6. รูปแบบการใส่รูปภาพในเนื้อหาบทความ

- 1) ชื่อรูปภาพห้ามขึ้นต้นด้วยคำว่า “แสดง”
- 2) รูปภาพ ให้ระบุลำดับที่ของรูปโดยใช้คำว่า “รูปที่...” และต้องมีคำอธิบายใส่ไว้ใต้รูปและอยู่ในเนื้อหาบทความเรียงลำดับรูปภาพในการอ้างอิง เช่น รูปที่ 1 รูปที่ 1-3
- 3) จัดรูปภาพไว้กึ่งกลางหน้ากระดาษใกล้ตำแหน่งที่มีการระบุถึงรูปภาพ และคำอธิบายจัดชิดซ้ายหน้ากระดาษ ดังรูปที่ 1
- 4) ไฟล์ของรูปภาพต้องเป็นไฟล์ที่มีนามสกุล .jpg, .png, .tiff หรือ .eps เท่านั้น ความละเอียดไม่ต่ำกว่า 300 dpi
- 5) ลายเส้นที่ปรากฏบนรูปภาพต้องมีความคมชัด กรณีที่เป็นรูปภาพ ต้องระบุชื่อแกนต่าง ๆ ให้ครบถ้วน
- 6) กรณีที่มีรูปภาพย่อย ควรจัดให้รูปภาพย่อยทั้งหมดอยู่ในหน้าเดียวกัน สำหรับบทความภาษาไทย ให้เขียนคำบรรยายใต้ชื่อรูปย่อยแต่ละรูป และกำหนดลำดับของรูปภาพด้วยตัวอักษร ตัวอย่างเช่น



(ก) รูปย่อยที่ 1



(ข) รูปย่อยที่ 2

รูปที่ 1 ตัวอย่างการเขียนคำอธิบายรูปภาพ

สำหรับบทความภาษาอังกฤษ ใช้คำว่า “Figure....” และรูปภาพย่อยให้ใช้อักษร (a), (b),... แทนการกำหนดรูปภาพย่อย

- 7) การเว้นระยะบรรทัด ก่อนรูปภาพ ให้เว้น 1 บรรทัด และหลังจากชื่อรูปภาพ ให้เว้น 1 บรรทัด
- 8) การใช้ภาพสี อาจทำให้เกิดความสวยงาม แต่ให้คำนึงถึงการสื่อความหมายกรณีที่มีการจัดพิมพ์เอกสารแบบขาวดำเพื่อให้ผู้อ่านสามารถเข้าใจได้ กรณีที่เป็นกราฟควรกำหนดลักษณะเส้นที่แตกต่างกัน เพื่อให้สามารถเข้าใจได้ เมื่อมีการจัดพิมพ์แบบขาว - ดำ
- 9) ขนาดของรูปต้องไม่ใหญ่เกินกว่าความกว้างของหน้ากระดาษที่กำหนดไว้
- 10) หากเป็นการคัดลอกรูปภาพมาจากที่อื่น ผู้เขียนควรมีการอ้างอิงแหล่งที่มาให้ถูกต้อง

7. รูปแบบการใส่ตารางในเนื้อหาบทความ

- 1) ชื่อตารางห้ามขึ้นต้นด้วยคำว่า “แสดง”
- 2) ตาราง ให้ระบุลำดับที่ของตารางโดยใช้คำว่า “ตารางที่...” และต้องมีคำอธิบายใส่ไว้ในเนื้อหาตารางและอยู่ในเนื้อหาบทความเรียงลำดับตารางในการอ้างอิง เช่น ตารางที่ 1 ตารางที่ 1-3
- 3) จัดคำอธิบายไว้ชิดขอบด้านซ้ายของหน้ากระดาษใกล้ตำแหน่งที่มีการระบุถึงตาราง และตารางอยู่กึ่งกลางหน้ากระดาษ ควรจัดเนื้อหาตารางให้อยู่บนหน้าเดียวกัน ดังตารางที่ 1 กรณีที่ตารางมีความยาวเกินหน้ากระดาษ ให้ใส่ชื่อตาราง “ตารางที่...” ไว้ที่ด้านบนของตารางในหน้าแรก และใส่ชื่อตาราง “ตารางที่... คำอธิบายตาราง (ต่อ)” ไว้ที่ด้านบนของตารางในหน้าถัดไป
- 4) ขนาดของตารางต้องไม่ใหญ่เกินกว่าความกว้างของหน้ากระดาษที่กำหนดไว้
- 5) การเว้นระยะบรรทัด ก่อนชื่อตาราง ให้เว้น 1 บรรทัด และหลังสิ้นสุดตาราง ให้เว้น 1 บรรทัด
- 6) การกำหนดเส้นขอบตาราง ให้กำหนดเฉพาะเส้นด้านบน และด้านล่างของบรรทัด ดังตัวอย่าง

ตารางที่ 1 ตัวอย่างการนำเสนอตาราง

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

8. รูปแบบการใส่สมการในเนื้อหาบทความ

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

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

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

9. การดำเนินงานของกองบรรณาธิการ

- 1) บทความที่ส่งเข้าวารสาร ต้องส่งผ่านระบบออนไลน์ที่ <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/rmutijo/index>
- 2) บทความที่ถูกส่งเข้ามาในระบบ กองบรรณาธิการจะพิจารณาบทความเบื้องต้นเกี่ยวกับความถูกต้องของรูปแบบทั่วไป **บทความที่ไม่ดำเนินการตามรูปแบบที่กำหนดจะไม่รับเข้าสู่กระบวนการพิจารณา** โดยผู้ทรงคุณวุฒิ และจะส่งกลับเพื่อทำการแก้ไข ดังนั้น เพื่อให้เกิดความรวดเร็วในเข้าสู่กระบวนการพิจารณาผล ผู้เขียนควรดำเนินการจัดทำวารสารให้ถูกต้องตามรูปแบบที่กำหนดอย่างเคร่งครัด
- 3) เมื่อบทความผ่านการพิจารณาให้ตีพิมพ์ลงในวารสาร และผู้เขียนได้ดำเนินการจัดเตรียมเอกสารต่าง ๆ อย่างถูกต้อง ครบถ้วนตามข้อกำหนดของวารสารเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ผู้เขียนจะได้รับหนังสือรับรองการตีพิมพ์บทความเพื่อเป็นการยืนยัน
- 4) หากทางวารสารตรวจพบว่าบทความที่ถูกส่งเข้ามามีการคัดลอก หรือเผยแพร่ในที่อื่น ๆ ก่อนหน้า หรือมีการดำเนินการใด ๆ อันเป็นการกระทำที่ผิดจรรยาบรรณของนักวิจัย ทางวารสารจะดำเนินการทำหนังสือแจ้งไปยังหน่วยงานต้นสังกัด และระงับการพิจารณาและรับบทความจากผู้เขียนบทความนั้นเป็นระยะเวลาอย่างน้อย 5 ปี



หมายเลขบทความ

(สำหรับเจ้าหน้าที่)

แบบฟอร์มการส่งบทความ

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

วันที่

ข้าพเจ้า (นาย/นาง/นางสาว)

ระดับการศึกษาสูงสุด ตำแหน่งทางวิชาการ

หน่วยงาน

ที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้สะดวก

โทรศัพท์.....โทรสาร.....โมบาย.....

e-mail.....

ขอส่ง ☐ บทความวิจัย ☐ บทความวิชาการ

สาขาของบทความ (กรุณาเลือก)

☐ Chemistry

☐ Engineering

☐ Materials Science

☐ Environmental Science

☐ Mathematics

ชื่อบทความ (ภาษาไทย)

.....

.....

(ภาษาอังกฤษ)

.....

.....

ชื่อผู้เขียนร่วม (พร้อมคำนำหน้าชื่อ อีเมล และเบอร์โทรศัพท์)

1.

2.

3.

4.

5.

ขอเสนอชื่อผู้ทรงคุณวุฒิที่มีความเชี่ยวชาญในสาขาที่เกี่ยวข้อง

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

คุณวุฒิ.....สาขาที่เชี่ยวชาญ.....

หน่วยงานที่สังกัด.....

ที่อยู่สำหรับส่งเอกสาร.....

หมายเลขโทรศัพท์.....Email.....

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

คุณวุฒิ.....สาขาที่เชี่ยวชาญ.....

หน่วยงานที่สังกัด.....

ที่อยู่สำหรับส่งเอกสาร.....

หมายเลขโทรศัพท์.....Email.....

หมายเหตุ

1. ผู้ทรงคุณวุฒิต้องมีตำแหน่งทางวิชาการ ระดับผู้ช่วยศาสตราจารย์ขึ้นไป หรือจบการศึกษาระดับปริญญาเอก และต้องไม่สังกัดหน่วยงานเดียวกับผู้นิพนธ์

2. กองบรรณาธิการขอสงวนสิทธิ์ในการเป็นผู้พิจารณาคัดเลือกผู้ทรงคุณวุฒิเพื่อพิจารณาผลงานทางวิชาการ

ข้าพเจ้าได้รับทราบและยินดีปฏิบัติตามเงื่อนไขและข้อกำหนดต่าง ๆ ในแบบฟอร์มแนบท้าย ซึ่งมีรายละเอียดอยู่ใน “คำแนะนำในการเตรียมต้นฉบับบทความ” ที่ทางกองบรรณาธิการวารสาร RMUTI Journal ได้กำหนดขึ้น และยินดีให้กองบรรณาธิการมีสิทธิ์ที่จะไม่รับพิจารณา หากไม่จัดรูปแบบตามที่กำหนด ยินยอมให้มีสิทธิ์ในการเลือกสรรหาผู้กลั่นกรองโดยอิสระเพื่อพิจารณาด้านฉบับที่ข้าพเจ้า (และผู้แต่งร่วม) ส่งมา ยินยอมให้กองบรรณาธิการสามารถตรวจแก้ไขต้นฉบับดังกล่าวได้ตามที่เห็นสมควร และข้าพเจ้า “ขอรับรองว่า บทความนี้ไม่เคยลงตีพิมพ์ในวารสารใดมาก่อน ไม่อยู่ระหว่างการพิจารณาจากวารสารอื่น และยินยอมว่าบทความที่ตีพิมพ์ลงในวารสารวิชาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ถือเป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน”

หากข้าพเจ้ามีความประสงค์ในการขอยกเลิกการพิจารณาบทความหลังจากวันที่ได้รับหนังสือยืนยันการรับบทความ ข้าพเจ้ายินดีดำเนินการตามกระบวนการของกองบรรณาธิการวารสาร RMUTI Journal

ลงชื่อ.....

(.....)



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

ขอรับรองว่าบทความ.....

เรื่อง
.....
โดย
.....

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



(.....)

บรรณาธิการวารสาร RMUTI Journal
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน



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

ข้าพเจ้า (นาย/นาง/นางสาว).....

สังกัดหน่วยงาน

มีความประสงค์ขออนุญาตพิจารณาบทความ รหัสบทความเรื่อง

.....

.....

.....

ที่ได้ส่งเข้ามายังวารสารระบบการจัดการวารสารออนไลน์ RMUTI Journal เมื่อวันที่

เนื่องจาก (ระบุเหตุผลในการถอนบทความ).....

.....

.....

ลงชื่อ.....ผู้ถอนบทความ

(.....)



RMUTI Journal



RMUTI Journal

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

Vol. 18 No. 3 September-December 2025

ISSN: 3027-6756 (Online)



INSTITUTE OF RESEARCH AND DEVELOPMENT
RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY ISAN

**Institute of Research and Development
Rajamangala University of Technology Isan**

744 Suranarai Road, Meuang, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

Tel. (66) 4423 3063 Fax. (66) 4423 3064

E-mail : rmuti.journai@gmail.com