ISSN: 3027-6756 (Online)

RMUTI Journal

Research on Modern science and Utilizing Technological Innovation Journal

(RMUTI Journal)

Vol. 19 No. 2 May-August 2026

2026



RMUTI Journal ได้รับการประเมินคุณภาพให้อยู่ในฐานข้อมูล
ของศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (TCI) กลุ่มที่ 2

INSTITUTE OF RESEARCH AND DEVELOPMENT
RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY ISAN

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 ในสาขาวิชาเคมี (Chemistry) วิศวกรรม (Engineering) วัสดุศาสตร์ (Materials Science) วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (Environmental Science) และคณิตศาสตร์ (Mathematics)

ประเภทของบทความที่ตีพิมพ์ บทความวิจัย และบทความวิชาการ

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

เจ้าของ

สถาบันวิจัยและพัฒนา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
744 ถ.สุรนารายณ์ ต.ในเมือง อ.เมืองนครราชสีมา จ.นครราชสีมา 30000
โทรศัพท์ 0 - 4423 - 3063 ต่อ 2535
E-mail : rmuti.journal@gmail.com

ตีพิมพ์เผยแพร่ราย 4 เดือน ปีละ 3 ฉบับ

ฉบับที่ 1 ประจำเดือนมกราคม - เดือนเมษายน
ฉบับที่ 2 ประจำเดือนพฤษภาคม - เดือนสิงหาคม
ฉบับที่ 3 ประจำเดือนกันยายน - เดือนธันวาคม

วารสารงานวิจัยด้านวิทยาศาสตร์สมัยใหม่และการใช้ประโยชน์นวัตกรรมเทคโนโลยี ชื่อวารสารใหม่เริ่มใช้ปีที่ 16 ฉบับที่ 3 (กันยายน - ธันวาคม) เป็นต้นไป

ลิขสิทธิ์

ต้นฉบับที่ได้รับการตีพิมพ์ ถือเป็นลิขสิทธิ์ของวารสาร RMUTI Journal และบทความในวารสารเป็นแนวคิดของผู้แต่ง มิใช่เป็นความคิดของคณะกรรมการจัดทำวารสาร และมิใช่เป็นความรับผิดชอบของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

วารสารงานวิจัยด้านวิทยาศาสตร์สมัยใหม่ และการใช้ประโยชน์นวัตกรรมเทคโนโลยี (RMUTI Journal)

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

ที่ปรึกษากองบรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.โฆษิต	ศรีภูธร	อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
รองศาสตราจารย์ ดร.ศักดิ์ระวี	ระวีกุล	ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
รองศาสตราจารย์ ดร.วีรชัย	พุทธวงศ์	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	สมบัติสมภพ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.ตะวัน	สุขน้อย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ศาสตราจารย์ ดร.ทวนทอง	จุฑาเกตุ	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ศาสตราจารย์ ดร.ปารเมศ	ชุติมา	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.พิเชษฐ	ลิ้มสุวรรณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.มนัส	ชัยจันทร์	มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์
ศาสตราจารย์ ดร.วินัย	ประลมพ์กาญจน์	มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์
ศาสตราจารย์ ดร.ศุภชัย	ปทุมนากุล	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ศาสตราจารย์ ดร.ศุภชัย	สิงห์ยะบุศย์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ศาสตราจารย์ ดร.สำเริง	จักรใจ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.สุชาติ	ลิ่มกตัญญู	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ศาสตราจารย์ ดร.สมชาติ	โสภณรณฤทธิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.สุทธวัฒน์	เบญจกุล	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ศาสตราจารย์ ดร.สราวุฒิ	สุจิตจร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ศาสตราจารย์ ดร.อรอนงค์	นัยวิกุล	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.กนกอร	อินทราพิเชฐ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รองศาสตราจารย์ ดร.กนต์ธร	ชำนิประศาสน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รองศาสตราจารย์ ดร.คงศักดิ์	ธาตุทอง	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.คณิต	มุกดาใส	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.จักรี	ศรีนนท์ฉัตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.ชนกพร	เผ่าศิริ	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.ณัญธิวัฒน์	พลดี	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.ดริศ	สามารถ	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.นิรัช	สุดสังข์	มหาวิทยาลัยนเรศวร

กองบรรณาธิการ (ต่อ)

รองศาสตราจารย์ ดร.ปราโมทย์	แพงคำ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รองศาสตราจารย์ ดร.ปรีชา	กอเจริญ	วิทยาลัยเทคโนโลยีจิตรลดา
รองศาสตราจารย์ ดร.วุฒิพล	สินธุนาวารัตน์	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.สุรภาพ	แก้วสวัสดิ์วงศ์	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.สมพงษ์	ดุลย์จินดาชบาพร	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.สมพร	ไชยะ	จังหวัดฉะเชิงเทรา
รองศาสตราจารย์ ดร.สิทธิชัย	แสงอาทิตย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รองศาสตราจารย์ ดร.สรายุธ	เดชะปัญญา	มหาวิทยาลัยบูรพา
รองศาสตราจารย์ อุดมศักดิ์	สาริบุตร	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นาถ	สุขศีล	มหาวิทยาลัยนครพนม
รองศาสตราจารย์ ดร.จิตติวัฒน์	นิธิกาญจนธาร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
รองศาสตราจารย์ ดร.คมเดช	ภาพัฒนบุรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
รองศาสตราจารย์ ดร.เชิดศักดิ์	สุขศิริพัฒนพงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
รองศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต	กฤตาคม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
รองศาสตราจารย์ ดร.ปกิต	กำบุญมา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
รองศาสตราจารย์ ดร.รตินันท์	เหลือมพล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
รองศาสตราจารย์ ดร.รพีพงศ์	เปี่ยมสุวรรณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
รองศาสตราจารย์ ดร.สุจิตรา	อุ่นเรือน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
รองศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์	อัศวสุขี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไกรสิทธิ	วสุเพ็ญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักษดา	ธำรงวุฒิ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาคริต	นวลฉิมพลี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพล	พิสิฐพิพัฒน์สิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เดือนเพ็ญ	วงค์สอน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัฐพล	สมนา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศศิพันธ์	วงศ์สุทธาวาส	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อดิศักดิ์	หารจริง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์อนุชา	กล่ำน้อย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ดร.จารุพงษ์	บรรเทา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ดร.ฉันทพิชญ์	ซามาตย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ดร.เยาวพา	ความหมั่น	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ดร.รักชาติ	กลิ่นกล้า	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ดร.วัชรินทร์	ชาติบุปผาพันธ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ดร.สุกัญญา	คำหล้า	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

บรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ศักดิ์	โยธา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

ฝ่ายจัดการและธุรการ

นางสาววลีรักษ์	ศรีศิลป์ไชย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

สารบัญ
Table of Contents

บทความวิจัย (Research Articles)

Generalized Solutions of the Diophantine Equation $\frac{1^n}{u_1}+\frac{2^n}{u_2}+\frac{3^n}{u_3}+\cdots+\frac{k^n}{u_k}=1$ 1

Cholatis Suanoom, Rakkiet Srisuntorn, and Komin Boonchoo

Mathematical Analysis of the Effect of Education Campaign on Chickenpox Transmission Dynamics 9

Anurak Weraprasertsakun and Anuwat Jirawattanapanit

อิทธิพลของผงแก้วทดแทนปูนซีเมนต์และทรายร่วมกันต่อกำลังอัดและสมบัติทางกายภาพของมอร์ตาร์ 23
Effect of Combined Replacement of Cement and Sand with Glass Powder on Compressive Strength and Physical Properties of Mortar

อภิพงศ์ เจือสนิท, นันทชัย ชูศิลป์, จิระศักดิ์ บุญเนือง, จรูญ เจริญเนตรกุล และเชิดศักดิ์ สุขศิริพัฒนพงศ์
Apipong Juesanit, Nuntachai Chusilp, Jirasak Bunnueang, Charoon Charoennetkul, and Cherdsak Suksiripattanapong

การพัฒนาชิ้นงานดินปั้นรักษ์โลกจากเปลือกหอยเหลือทิ้ง: อิทธิพลของสารเคลือบผิวที่มีต่อสมบัติทางกายภาพและความคงทน 37
Development of Eco-Friendly Shell-Based Clay Products: Influence of Surface Coatings on Physical Properties and Durability

ภัทรา ศรีสุโข, วิทวัส สิงห์สังข์, สุรพงษ์ ปัญญาทา, อนุรักษ์ รอดบำรุง, ภัทรบดี พิมพ์กิ และกรกนก สนิทการ
Pathra Srisukho, Witawat Singsang, Surapong Panyata, Anurak Rodbumrung, Pattarabordee Pimki, and Kornkanok Sanitgan

การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนของฟิล์มกรองแสงอาคารด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการประเมินความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ในภูมิอากาศเขตร้อน 47
Heat Transfer Analysis of Building Window Films Using the Finite Element Method with Economic Evaluation in a Tropical Climate

กิตติพงษ์ ศรีแขไตร
Kittipong Srikhaetai

การสั่นอิสระของโครงสร้างเปลือกบางทำจากวัสดุที่มีสมบัติเปลี่ยนแปลงตามความหนาและเสริมกำลังด้วยแกรฟีนเพลตเลทโดยใช้ทฤษฎีการเสียรูปด้วยแรงเฉือนอันดับที่หนึ่งแบบปรับปรุง 64
Free Vibration of Functionally Graded Shells with Graphene Platelets Reinforcement using Improved First-Order Shear Deformation Theory

หทัยกาญจน์ หนันดูลย์, วีรพันธุ์ เจียมมีปรีชา, คมกร ไชยเดชาธร และ Sunchhorng Roun
Hathaikan Nandun, Weeraphan Jiammeepreecha, Komkorn Chaidachatorn, and Sunchhorng Roun

การประเมินสารพฤกษเคมีและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดเมล็ดมะยงชิด 84
Assessment of Phytochemical Profile and Antioxidant Activities of *Bouea oppositifolia* (Roxb.) Meisn. Seed Extract

พลอยชมพู คำบุญ และพัทวัฒน์ สีขาว
Ploychompoo Khamboon and Pattawat Seekhaw

สารบัญ (ต่อ)
Table of Contents (Cont.)

บทความวิจัย (Academic Articles)

การเพิ่มประสิทธิภาพแบบจำลองความคิดเห็นของคนไทยต่อปัญญาประดิษฐ์ด้วยเทคนิคการตัดคำ 95
Enhancing Efficiency of Thai Opinions Models on Artificial Intelligence using Word Segmentation Techniques
จตุรภัทร สืบสาย และจารี ทองคำ
Jaturapat Suebsay and Jaree Thongkam

Generalized Solutions of the Diophantine Equation

$$\frac{1^n}{u_1}+\frac{2^n}{u_2}+\frac{3^n}{u_3}+\cdots+\frac{k^n}{u_k}=1$$

Cholatis Suanoom[1*] **Rakkiet Srisuntorn**[2] **and Komin Boonchoo**[2]

Received: *March 4, 2026;* ***Revised:*** *June 22, 2026;* ***Accepted:*** *June 26, 2026*

Abstract

This paper investigates the positive integer solutions of the Diophantine equation $\frac{1^n}{u_1}+\frac{2^n}{u_2}+\frac{3^n}{u_3}+\cdots+\frac{k^n}{u_k}=1$ where n is a positive integer and $u_1<u_2<\cdots<u_k$ are positive integers with the condition $k=u_1$. The study focuses on the existence and structural properties of the solution set. For a fixed smallest denominator, it is shown that the equation admits only finitely many solutions, and explicit upper and lower bounds for all denominators are established. Necessary conditions and polynomial growth constraints for admissible solutions are derived. These results clarify the structural behavior of power-type fractional Diophantine equations and provide a theoretical framework for further developments in number theory.

Keywords: Diophantine Equation; Parametric Solutions; Power-Type Equation; Number Theory

[1] *Faculty Science and Technology, Kamphaeng Phet Rajabhat University*

[2] *Faculty of Education, Kamphaeng Phet Rajabhat University*

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

Introduction

Diophantine equations are algebraic equations whose solutions are restricted to integers. They may be linear or nonlinear, involve one or several variables, or form systems in which the number of variables exceeds the number of equations. The study of Diophantine equations constitutes an important branch of number theory.

In 2019, Thamkaew et al. investigated Diophantine equations of the Equation (1) and (2)

$$\frac{1}{u_1}+\frac{3}{u_2}+\frac{5}{u_3}+\cdots+\frac{2k+1}{u_k}=1, \tag{1}$$

and

$$\frac{2}{u_1}+\frac{4}{u_2}+\frac{6}{u_3}+\cdots+\frac{2k}{u_k}=1, \tag{2}$$

where $2\le u_1<u_2<\cdots<u_k$ are integers and $k=u_1$. Their results described the number of solutions depending on the value of u_1. In 2017, Burshtein Nechemia studied reciprocal-type Diophantine equations and developed structural techniques for constructing parametric solution families, contributing significantly to the theory of fractional Diophantine representations. In 2022, Thamkaew and Thamkaew examined the quadratic power case Equation (3)

$$\frac{1^2}{u_1}+\frac{2^2}{u_2}+\cdots+\frac{k^2}{u_k}=1, \tag{3}$$

establishing existence results and identifying families of solutions depending on the smallest denominator. Subsequently, Saethao et al. (2024) investigated the cubic case Equation (4)

$$\frac{1^3}{u_1}+\frac{2^3}{u_2}+\cdots+\frac{k^3}{u_k}=1, \tag{4}$$

and analyzed the structure of positive integer solutions under ordered denominators. Their results provided further insight into the behavior of higher power reciprocal Diophantine equations and demonstrated how the number and structure of solutions change as the exponent increases.

More recently, Muangkarn et al. (2024) extended this line of research to the fourth power case Equation (5)

$$\frac{1^4}{u_1}+\frac{2^4}{u_2}+\cdots+\frac{k^4}{u_k}=1, \tag{5}$$

establishing structural classifications and identifying parametric families of solutions.
Motivated by these developments for $n=1, 2, 3, 4$ the present study considers the generalized power by Equation (6)

$$\sum_{i=1}^{k}\frac{i^n}{u_i}=1, \tag{6}$$

and aims to investigate the existence and structural properties of its positive integer solutions for arbitrary $n\in\mathbb{N}$.

Preliminaries

Diophantine equations are algebraic equations for which only integer solutions are sought. They may be linear or nonlinear, involve one or several variables, or even form systems in which the number of variables exceeds the number of equations. The study of Diophantine equations constitutes a central area of number theory, focusing on existence criteria, structural properties, and classifications of integer solutions. In particular, equations involving reciprocal sums have attracted considerable attention due to their connections with classical problems in number theory.

The equation considered in this paper belongs to the class of reciprocal sum Diophantine equations and is given by Equation (7)

$$\sum_{i=1}^{k} \frac{i^n}{u_i} = 1, \tag{7}$$

where n is a positive integer and $u_1, u_2, \ldots, u_k$ are positive integers satisfying the ordering condition $u_1 < u_2 < \cdots < u_k$. This form may be viewed as a power-weighted generalization of Egyptian fraction representations, in which the numerators are no longer constant but instead grow polynomially according to the exponent n. The presence of the power term significantly affects the behavior of the equation, especially with respect to growth and dominance among the summands. The strictly increasing condition imposed on the denominators ensures uniqueness in representation and prevents trivial rearrangements of solutions. Moreover, it facilitates structural analysis by allowing solutions to be classified into distinct parametric families. A parametric solution refers to a family of integer solutions that can be expressed in terms of one or more integer parameters. Such representations are particularly useful in studying infinite families of solutions and understanding their underlying structure. Since the numerator i^n grows polynomially with respect to i, the magnitude of each term in the sum depends critically on both the exponent n and the size of the corresponding denominator v_i. As n increases, the growth rate of the power terms becomes more pronounced, and stronger constraints on the denominators are required in order for the sum to equal one. Consequently, inequality techniques and bounding arguments play an essential role in analyzing the existence and structural properties of solutions. These foundational concepts provide the necessary framework for investigating the generalized Diophantine equation and for developing structural and parametric descriptions of its positive integer solutions.

Results

In this section, we establish structural properties and existence results for the Diophantine Equation (8)

$$\sum_{i=1}^{k} \frac{i^n}{u_i} = 1, \tag{8}$$

where n is a positive integer and $u_1 < u_2 < \cdots < u_k$ are positive integers.

Definition 3.1 (Big-O Class).

Let $g : \mathrm{N} \to R$ be a function. The Big-O class of g, denoted by $O(g)$, is defined as

$$O(g) = \{f : \mathrm{N} \to R : \exists C > 0, \exists k_0 \in \mathrm{N}, |f(k)| \le C|g(k)| \text{ for all } k \ge k_0\}.$$

Thus, $O(g)$ is the set of all functions whose growth is asymptotically bounded above by a constant multiple of g.

Theorem 3.2 Let Equation (9)

$$\sum_{i=1}^{k} \frac{i^n}{u_i} = 1, \text{ where } 2 \le u_1 < u_2 < \cdots < u_k, k = u_1, n \in \mathrm{N}. \tag{9}$$

Assume that $A(u_1, n) < 1$. Then the Diophantine equation admits only finitely many positive integer solutions.

Proof Fix u_1. Since $k = u_1$ where k is any positive integer, the number of variables is fixed.

Because the sequence is strictly increasing,

$$u_1 \ge u_1 + (i-1) \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (1) \text{ for all } i = 1, \ldots, k.$$

Step 1: Lower bounds are fixed.

From (1),

$$u_k \ge u_1 + (k-1) = u_1 + (u_1 - 1) = 2u_1 - 1.$$

Thus each denominator has a fixed positive lower bound depending only on u_1.

Step 2: Obtain an upper bound for u_k.

We have Equation (10),

$$\frac{k^n}{u_k} = 1 - \sum_{i=1}^{k-1} \frac{i^n}{u_i}. \tag{10}$$

Using (1) by Equation (11),

$$\sum_{i=1}^{k-1} \frac{i^n}{u_i} \le \sum_{i=1}^{k-1} \frac{i^n}{u_1 + i - 1} =: A(u_1, n). \tag{11}$$

The equinity $A(u_1, n)$ is a fixed real number because u_1 and n are fixed.

Since the left-hand side of the original equation equals (8) and all terms are positive, we must have Equation (12) - (13),

$$A(u_1, n) < 1. \tag{12}$$

Therefore,

$$\frac{k^n}{u_k} \ge 1 - A(u_1, n). \tag{13}$$

Because $1 - A(u_1, n) > 0$, we obtain

$$u_k \le \frac{k^n}{1 - A(u_1, n)}. \tag{14}$$

This gives an explicit upper bound for u_k Equation (14).

Step 3: All denominators are bounded.

Since

$$u_1 < u_2 < \cdots < u_k,$$

each u_1 satisfies

$$u_i \le u_k.$$

Thus every denominator is bounded both below and above by constants depending only on u_1 and n.

Step 4: Conclude finiteness

Each u_i lies in a finite interval of integers. Since k is fixed, the number of possible integer tuples $(u_1,\ldots,u_k)$ is finite. Hence the equation admits only finitely many solutions for fixed u_1.

Let $f(x)$ and $g(x)$ be real-valued functions defined for sufficiently large integers k. We write

$$f(k) = O(g(k)),$$

if there exist constants $C > O$ and $k_0 \in \mathrm{N}$ such that $|f(k)| \le C|g(k)|$ for all $k \ge k_0$.

This notation describes the asymptotic upper growth rate of $f(k)$ relative to $g(k)$.

Remark 3.3 We use the classical estimate for sums of powers: $\sum_{i=1}^{k} i^n = \frac{k^{n+1}}{n+1} + O(k^n)$, which follows from Faulhaber's formula. In particular, this implies $\sum_{i=1}^{k} i^n = O(k^{n+1})$.

Theorem 3.4 (Polynomial Growth Classification) Let Equation (15)

$$\sum_{i=1}^{k} \frac{i^n}{u_i} = 1, \text{ where } 2 \le u_1 < u_2 < \cdots < u_k, k = u_1, n \in \mathrm{N}. \tag{15}$$

Then every solution satisfies the following growth conditions:

1. $u_i \ge i^n$ for all $i = 1,\ldots,k$.
2. $u_1 \le \sum_{i=1}^{k} i^n$.
3. In particular,

$$u_1 = O(k^{n+1}).$$

Proof Step 1: Proof of $u_1 \ge i^n$.

Since all terms in the sum are positive, we have Equation (16)

$$\frac{i^n}{u_i} \le \sum_{j=1}^{k} \frac{j^n}{u_j} = 1 \text{ for every } j = 1,\ldots,k. \tag{16}$$

Hence,

$$\frac{i^n}{u_i} \le 1.$$

Multiplying both sides by $u_i > 0$ gives

$$i^n \le u_i.$$

Therefore, $u_i \geq i^n$ for all $i = 1,\ldots,k$.

Step 2: Proof of $u_1 \leq \sum_{i=1}^{k} i^n$.

Because the denominators are strictly increasing Equation (17),

$$u_1 < u_2 < \cdots < u_k, \tag{17}$$

we have $u_i \geq u_1$ for all i.

Thus Equation (18),

$$\frac{i^n}{u_i} \leq \frac{i^n}{u_1}. \tag{18}$$

Summing from $i = 1$ to k Equation (19),

$$\sum_{i=1}^{k} \frac{i^n}{u_i} \leq \sum_{j=1}^{k} \frac{i^n}{u_1} = \frac{1}{u_1} \sum_{i=1}^{k} i^n. \tag{19}$$

Since the left-hand side equals 1, we obtain Equation (20)

$$1 \leq \frac{1}{u_1} \sum_{i=1}^{k} i^n. \tag{20}$$

Multiplying by $u_1 > 0$ yields Equation (21)

$$u_1 \leq \sum_{i=1}^{k} i^n. \tag{21}$$

Step 3: Asymptotic growth estimate.

By the classical power-sum estimate (Faulhaber's formula) Equation (22),

$$\sum_{i=1}^{k} i^n = \frac{k^{n+1}}{n+1} + 0\left(k^n\right). \tag{22}$$

In particular Equation (23),

$$\sum_{i=1}^{k} i^n = 0\left(k^{n+1}\right). \tag{23}$$

Combining this with Step 2 gives

$$u_i \leq Ck^{n+1},$$

for some constant $C > 0$ and sufficiently large k. Hence,

$$u_1 = O\left(k^{n+1}\right).$$

This completes the proof.

Conclusion and Discussion

In this paper, we investigated the Diophantine equation

$$\sum_{i=1}^{k} \frac{i^n}{u_i} = 1,$$

ISSN 3027-6756 (Online)
Research on Modern science and Utilizing Technological Innovation Journal (RMUTI Journal)

under the ordering condition $2 \le u_1 < u_2 < \cdots < u_k$ with $k = u$ and $n \in \mathrm{N}$. The main objective was to analyze how the smallest denominator influences the structure and size of the solution set. The results establish that, for each fixed smallest denominator v_1, the equation admits only finitely many positive integer solutions. This shows that the solution space is completely determined once the initial denominator is fixed. Furthermore, explicit lower and upper bounds for admissible denominators were derived, leading to polynomial growth constraints governed by the exponent n. In particular, every solution must satisfy $u_i \ge i^n,$, while the smallest denominator satisfies an upper bound of order k^{n+1}. These findings clarify the structural behavior of power-type fractional Diophantine equations and extend previously known results for the cases n = 1, 2, 3, and 4 to arbitrary positive integers n. Rather than focusing on explicit enumeration of solutions, this work provides a general structural framework that explains how growth conditions restrict admissible solution families. Future research may address the explicit construction of parametric solution families, the determination of exact solution counts for small values of u_1, and possible extensions to more general reciprocal-type Diophantine equations without the restriction $k = v_1$. Another promising direction is the asymptotic analysis of solution distributions as the exponent n increases.

Acknowledgements

The authors would like to express their sincere gratitude to the Faculty of Science and Technology, Kamphaeng Phet Rajabhat University, for providing academic support a nd a conducive research environment. The authors also thank the anonymous reviewers for their valuable comments and suggestions, which helped improve the quality of this manuscript.

References

Burshtein, N. (2017). On Solution of the Diophantine Equation $\frac{1}{x_1}+\frac{2}{x_2}+\frac{3}{x_3}+\cdots+\frac{k}{x_k}=1$ when $2 \le x_1 < x_2 < x_3 < \cdots < x_k$ are integers and $k = x_1$. *Notes on Number Theory and Discrete Mathematics*, 23(2), 30-35. https://nntdm.net/volume-23-2017/number-2/30-35/

Muangkarn, P., Janthasopha, J. and Suanoom, C. (2024). The Solutions of the Diophantine Equation $\frac{1^4}{v_1}+\frac{2^4}{v_2}+\frac{3^4}{v_3}+\cdots+\frac{k^4}{v_k}=1$. *Research on Modern science and Utilizing Technological Innovation Journal (RMUTI Journal)*, 17(1), 85-94. https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/rmutijo/article/view/256061

Thamkaew, P., Kameeh, P., Maneelek, P. and Wongmookham, S. (2019). Solutions of the Diophantine Equation (1) $\frac{1}{u_1}+\frac{3}{u_2}+\frac{5}{u_3}+\cdots+\frac{2k-1}{u_k}=1$ and (2) $\frac{2}{u_1}+\frac{4}{u_2}+\frac{6}{u_3}+\cdots+\frac{2k}{u_k}=1$. *The Golden Teak : Science and Technology Journal (GTSJ.)*, 6(1), 1-10. https://research.kpru.ac.th/journal_science/journal/26322019-07-07.pdf

Thamkaew, P. and Thamkaew, J. (2022). Solutions of the Diophantine Equation $\frac{1^2}{x_1}+\frac{2^2}{x_2}+\frac{3^2}{x_3}+\cdots+\frac{k^2}{x_k}=1$. *Science and Technology Nakhon Sawan Rajabhat University Journal*, 14(20), 118-136. https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/JSTNSRU/article/view/245601

Saethao, L., Muangkarn, P. and Suanoom, C. (2024). The Solution of the Diophantine Equation $\frac{1^3}{u_1}+\frac{2^3}{u_2}+\frac{3^3}{u_3}+\cdots+\frac{k^3}{u_k}=1$. *Journal of Science and Technology CRRU*, 3(1), 1-9. https://li01.tci-thaijo.org/index.php/jstcrru/article/view/262501

Mathematical Analysis of the Effect of Education Campaign on Chickenpox Transmission Dynamics

Anurak Weraprasertsakun[1] **and Anuwat Jirawattanapanit**[1*]

Received: *March 20, 2026;* ***Revised:*** *June 15, 2026;* ***Accepted:*** *June 26, 2026*

Abstract

The research objective is to develop and evaluate the stability of mathematical modelling for controlling the spread of chickenpox in the education campaign. The model is analyzed using standard methods, the equilibrium point, stability of the equilibrium points and analytic solutions. The effectiveness of the education campaign in mathematical modelling and numerical solutions is studied. The findings of the analysis indicate that the effectiveness of the education campaign constitutes a significant factor influencing the dynamics of the mathematical model developed to control the spread of chickenpox. It was found that if the population at risk of infection with chickenpox has knowledge about the prevention of chickenpox, it will contribute less to the increase in the spread of the disease. If the population at risk of infection with chickenpox has knowledge about the prevention of chickenpox, it will contribute to the decrease in the spread of the disease until there is no further spread of chickenpox infection. The population at risk of infection with knowledge about the prevention of chickenpox is not less than 50 percent of the total population and will contribute to the decrease in disease spread until there is no further spread of infection. This highlights the importance of public health education in controlling outbreaks. By ensuring that a significant portion of the population understands how to prevent transmission, the overall health of the community can be safeguarded and the incidence of chickenpox can be significantly reduced.

Keywords: Mathematical Model; Chickenpox; Control the Spread; Education Campaign

[1] *Faculty of Education, Phuket Rajabhat University*

[*] *Corresponding Author, Tel. 08 6272 7610, E - mail: anuwat.j@pkru.ac.th*

Introduction

Chickenpox, known as varicella, is a highly contagious disease caused by the initial infection with the varicella zoster virus. The disease results show the characteristic skin rash that forms small, itchy blisters, which eventually scab over. It usually starts on the chest, back, and face and then spreads to the rest of the body. Other symptoms may include fever, tiredness, and headaches. Symptoms usually last five to seven days. Complications may occasionally include pneumonia, inflammation of the brain, and bacterial skin infections. The disease is often more severe in adults than in children. Symptoms begin 10 to 20 days after exposure to the virus (Division of Epidemiology, 2020). Based on the mathematical model, the transmission dynamics of chickenpox can be characterized, thereby providing insights into the factors that influence its spread and informing effective control strategies. In addition, the strengths of mathematical models can change the characteristics of the disease and the parameters related to it. Isolating affected individuals can prevent the spread of chickenpox. Contagion is by exposure to respiratory droplets or direct contact with lesions within a period lasting from three days before the onset of the rash to four days after the onset of the rash. The chickenpox virus is susceptible to disinfectants, notably chlorine bleach. Like all enveloped viruses, it is sensitive to desiccation, heat and detergents (Sangthongjeen et al., 2015).

Mathematical modeling of chickenpox (Varicella) epidemics provides critical insights into the dynamics of disease transmission and control. While robust models can effectively evaluate the shifting characteristics of an epidemic under varying disease-associated parameters (Almuallem et al., 2025), their application is vital for mitigating infection risks and optimizing public health interventions. To this end, the objective of this study is to formulate and evaluate the stability of a modified SEIR model that explicitly incorporates the impact of public education campaigns. Methodologically, the model is rigorously analyzed through equilibrium points, local and global stability thresholds, and the derivation of the basic reproduction number (R_0), supported by numerical simulations to evaluate campaign efficacy under varying compliance rates. Although various SEIR-type models have been proposed for infectious diseases, the structural novelty of this study lies in embedding an educational campaign parameter (ω) into the transmission mechanism, providing analytical and numerical evidence demonstrating how targeted public awareness can reduce the basic reproduction number below unity $(R_0 < 1)$, thereby suppressing disease persistence and facilitating eradication.

Model Formulation

In this study, the total human population (N) is assumed to be constant and partitioned into four epidemiological classes: susceptible (S), exposed (E), infected (I), and recovered (R). The transitions between these compartments are governed by a system of first-order differential equations (Sukawat and Naowarat, 2014). While standard SEIR models assume static host behavior, this paper introduces a novel extension tailored specifically to chickenpox (Varicella) dynamics by embedding targeted behavioral and disease-specific parameters. We incorporate the education campaign rate r (ω) to quantify the behavioral shift of susceptible individuals actively avoiding infection. Additionally, the model explicitly integrates the latent period (α), recovery rate (γ), and loss of temporary immunity (δ) to

accurately reflect the clinical hallmarks of chickenpox. Rather than a simple mathematical expansion, adding these parameters modifies the system's transmission topology, providing a new threshold for disease eradication. Consequently, the modified compartmental framework is formulated as follows Equation (1) - (4):

$$\frac{dS}{dt} = \delta \mathrm{N} - (1-\omega)\alpha SI - \varphi S \tag{1}$$

$$\frac{dE}{dt} = (1-\omega)\alpha SI - \beta E - \varphi E \tag{2}$$

$$\frac{dI}{dt} = \beta E - \gamma I - \varphi I \tag{3}$$

$$\frac{dR}{dt} = \gamma I - \varphi R \tag{4}$$

Then $N = S + E + I + R$

where,

$S(t)$ represent the susceptible human populations
$E(t)$ represent the exposed human populations
$I(t)$ represent the infected human populations
$R(t)$ represent the recovered human populations
N represent the total number of human populations
δ represent the birth rate of human populations
ω represent the effectiveness of an education campaign
α represent the probability that virus transmitted from an infected human to susceptible human
β represent the proportional rate for people exposed to the infected human populations
γ represent the recovery rate of infected human populations
φ represent the natural death rate of human populations

Model Analysis

The model monitors the human population, the all-associated parameters and state variables are non-negative, $t \geq 0$. To show that the state variables of the model remain non-negative for all non-negative initial conditions then consider the biologically feasible region

$$\Phi = \left\{ (S,E,I,R) \in R_+^4 : N \to \frac{\delta}{\varphi} \right\}$$

Lemma 1 The closed Φ are positively invariant and attracting.

Proof.

Adding (1) - (4) and gives the rate of change of the total population, $\frac{dN}{dt} = \delta N - \varphi N$. Then, the total

human population (N) is bounded by $\frac{\delta}{\varphi}$, so that $\frac{dN}{dt}=0$ whenever $N(t)=\frac{\delta}{\varphi}$. It can be shown that $N(t)=\frac{\delta}{\varphi}+\left(N_0-\frac{\delta}{\varphi}\right)e^{-\varphi t}$. In particular $N(t)=\frac{\delta}{\varphi},$, if $N(0)=\frac{\delta}{\varphi}$. Therefore, the region Φ is positively invariant and attracts all solution in R_+^4.

1) Basic Reproductive Number

The basic reproductive number (R_0) is defined as the expected number of secondary cases produced by a single infected individual in a completely susceptible population. To calculate the basic reproductive number for this system, we apply the next-generation matrix method.

Let $X=[S,E,I,R]^T$ represent the population compartments. The rate of appearance of new infections (F) and the transfer of individuals out of these compartments (V) are given by Equation (5):

$$F=\begin{bmatrix}0\\ \alpha S(1-\omega)I\\ 0\\ 0\end{bmatrix},V=\begin{bmatrix}-\delta+\alpha S(1-\omega)I+\varphi S\\ (\beta+\varphi)E\\ -\beta E+(\gamma+\varphi)I\\ -\gamma I+\varphi R\end{bmatrix} \tag{5}$$

Evaluating the Jacobian matrices of F and V at the disease-free equilibrium point $E_0=\left(\frac{\delta}{\varphi},0,0,0\right)$ yields the matrices Equation (6) - (7):

$$F(E_0)=\begin{bmatrix}0&0&0&0\\0&0&\alpha\delta(1-\omega)&0\\0&0&\varphi&0\\0&0&0&0\end{bmatrix} \tag{6}$$

$$V(E_0)=\begin{bmatrix}\varphi&0&\frac{\alpha\delta(1-\omega)}{\varphi}&0\\0&\beta+\varphi&0&0\\0&-\beta&\gamma+\varphi&0\\0&0&-\gamma&\varphi\end{bmatrix} \tag{7}$$

The inverse of matrix $V(E_0)$ is computed as Equation (8):

$$V^{-1}(E_0)=\begin{bmatrix}\frac{1}{\varphi}&0&-\frac{\alpha\delta(1-\omega)}{\varphi^2(\gamma+\varphi)}&0\\0&\frac{1}{\beta+\varphi}&0&0\\0&\frac{\beta}{(\beta+\varphi)(\gamma+\varphi)}&\frac{1}{\gamma+\varphi}&0\\0&\frac{\beta\gamma}{\varphi(\beta+\varphi)(\gamma+\varphi)}&\frac{\gamma}{\varphi(\gamma+\varphi)}&\frac{1}{\varphi}\end{bmatrix} \tag{8}$$

The next-generation matrix $FV^{-1}(E_0)$ is derived as follows Equation (9):

$$FV^{-1}(E_0)=\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \dfrac{\alpha\beta\delta(1-\omega)}{\varphi(\beta+\varphi)(\gamma+\varphi)} & \dfrac{\alpha\delta(1-\omega)}{\varphi(\gamma+\varphi)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{9}$$

The basic reproductive number (R_0) is determined by the spectral radius (the largest eigenvalue) of the matrix $FV^{-1}(E_0)$, which gives:

$$R_0=\frac{\alpha\beta\delta(1-\omega)}{\varphi(\beta+\varphi)(\gamma+\varphi)}.$$

2) Stability Analysis of the Disease-Free Equilibrium

At the equilibrium point, the time derivatives of all state variables vanish $\left(\frac{dS}{dt}=\frac{dE}{dt}=\frac{dI}{dt}=\frac{dR}{dt}=0\right)$. The disease-free equilibrium point (E_0) is evaluated where there is no infection in the population, given by:

$$E_0(S,E,I,R)=E_n\left(\frac{\delta}{\varphi},0,0,0\right).$$

Theorem 1 The disease-free equilibrium E_0 of the system is locally asymptotically stable if $R_0<1$ and unstable if $R_0>1$.

Proof.

The Jacobian matrix of the system evaluated at the disease-free equilibrium is given by Equation (10):

$$J(E_0)=\begin{bmatrix} -\varphi & 0 & -\dfrac{\alpha\delta(1-\omega)}{\varphi} & 0 \\ 0 & -\beta-\varphi & \dfrac{\alpha\delta(1-\omega)}{\varphi} & 0 \\ 0 & \beta & -\gamma-\varphi & 0 \\ 0 & 0 & \gamma & -\varphi \end{bmatrix} \tag{10}$$

The eigenvalues (λ) are obtained by solving the characteristic equation $det(J(E_0)-\lambda I)=0.$ This factors directly into:

$$(-\lambda-\varphi)^2\left(\lambda^2+\lambda(\beta+\gamma+2\varphi)+(\beta+\varphi)(\gamma+\varphi)-\frac{\alpha\beta\delta(1-\omega)}{\varphi}\right)=0.$$

From this, we obtain two negative eigenvalues immediately: $\lambda_1=-\varphi,\lambda_2=-\varphi.$

The remaining two eigenvalues (λ_3,λ_4) are determined by the quadratic polynomial $P(\lambda)=\lambda^2+A\lambda+B=0,$ where:

$$A=\beta+\gamma+2\varphi \text{ and } B=(\beta+\varphi)(\gamma+\varphi)-\frac{\alpha\beta\delta(1-\omega)}{\varphi}.$$

According to the Routh–Hurwitz criterion, all roots of this characteristic polynomial have negative real parts if and only if $A>0$ and $B>0.$

a. Since all parameters are positive, $A = \beta + \gamma + 2\varphi > 0$ is always satisfied.

b. For $B > 0$, we require:

$$(\beta + \varphi)(\gamma + \varphi) - \frac{\alpha\beta\delta(1-\omega)}{\varphi} > 0$$

$$(\beta + \varphi)(\gamma + \varphi) > \frac{\alpha\beta\delta(1-\omega)}{\varphi}$$

$$1 > \frac{\alpha\beta\delta(1-\omega)}{\varphi(\beta + \varphi)(\gamma + \varphi)}.$$

By definition, the right-hand side is the basic reproductive number (R_0). Therefore, the condition $B > 0$ holds if and only if $R_0 < 1$.

Conversely, if $R_0 > 1$, then $B > 0$, which ensures that at least one eigenvalue has a positive real part, making the disease-free equilibrium unstable. This completes the proof.

3) Existence and Stability of the Endemic Equilibrium

When $R_0 > 1$, the disease cannot be eradicated, and the system reaches a steady state where the infection persists in the population. This state is known as the Endemic Equilibrium point (E_1).

The endemic equilibrium point $E_1(S^*, E^*, I^*, R^*)$ is obtained by setting the governing differential equations to zero under the condition that the infected populations are non-zero $(E \neq 0, I \neq 0)$. Solving the algebraic system yields:

$$S^* = \frac{\delta}{\varphi R_0}$$

$$E^* = \frac{\varphi(\gamma + \varphi)}{\alpha\beta}(R_0 - 1)$$

$$I^* = \frac{\varphi(\beta + \varphi)}{\alpha\beta}(R_0 - 1)$$

$$R^* = \frac{\gamma(\beta + \varphi)}{\alpha\beta}(R_0 - 1).$$

Theorem 2 The endemic equilibrium of the system exists and is locally asymptotically stable if $R_0 > 1$, and does not exist if $R_0 \leq 1$.

Proof.

The existence of E_1 requires all state variables to be strictly positive. From the analytical expressions above, it is evident that S^* is always positive, while E^*, I^* and R^* are strictly positive if and only if $R_0 < 1$.

To evaluate the local stability of E_1, the Jacobian matrix of the system is calculated at the endemic state Equation (11):

$$J(E_1) = \begin{bmatrix} -\alpha(1-\omega)I^* - \varphi & 0 & -\alpha(1-\omega)S^* & 0 \\ \alpha(1-\omega)I^* & -\beta - \varphi & \alpha(1-\omega)S^* & 0 \\ 0 & \beta & -\gamma - \varphi & 0 \\ 0 & 0 & \gamma & -\varphi \end{bmatrix} \quad (11)$$

ISSN 3027-6756 (Online)
Research on Modern science and Utilizing Technological Innovation Journal (RMUTI Journal)

The corresponding characteristic equation $det(J(E_1)-\lambda I)=0$ simplifies to:

$(-\varphi-\lambda)(\lambda^3+a_1\lambda^2+a_2\lambda+a_3)=0.$

This provides one negative eigenvalue immediately: $\lambda_1=-\varphi.$ The remaining three eigenvalues are roots of the cubic polynomial $P(\lambda)=\lambda^3+A\lambda^2+B\lambda+C=0,$ where the coefficients are determined as:

$$A=\alpha(1-\omega)I^*+\beta+\gamma+2\varphi$$
$$B=(\beta+\varphi)(\gamma+\varphi)+\alpha(1-\omega)I^*(\beta+\gamma+2\varphi)-\alpha\beta(1-\omega)S^*$$
$$C=\alpha(1-\omega)I^*(\beta+\varphi)(\gamma+\varphi).$$

By applying the Routh–Hurwitz criterion for a third-order polynomial, all roots have negative real parts if and only if the following conditions are met:

a. $A>0$

b. $C>0$

c. $AB>C.$

Since $R_0>1,$ the infected population I^* is strictly positive. Given that all biological parameters $(\alpha,\beta,\gamma,\varphi,\delta,\omega)$ are positive, it follows directly that $A>0$ and $C>0$.

Furthermore, substituting $S^*=\frac{\delta}{\varphi R_0}$ and R_0 into the coefficients and simplifying the algebraic expression proves that $AB-C>0$ holds true whenever $R_0>1.$ Therefore, by the Routh–Hurwitz criterion, the endemic equilibrium E_1 is locally asymptotically stable for $R_0>1.$ This completes the proof.

Numerical Analysis

In this section, the numerical simulation of our model is presented. The parameter values that we used in the numerical simulation are given in Table 1.

Table 1 Parameters values are used for numerical simulation at the disease-free state.

Description	Parameters	Values
The human populations**	N	85,140 persons
The birth rate of human**	δ	0.0000244 /day
The probability that virus transmitted*	α	0.00000144 /day
The Incubation rate*	β	0.142857 /day
The natural death rate of human**	φ	0.00001567 /day
The recovery rate of infected* human	γ	0.06667 /day
The effectiveness of the education campaign	ω	0 - 1

* (Department of Disease Control, n.d.)

** (Phuket Provincial Statistical Office, 2022)

The numerical results showed the relationship between the effectiveness of the education campaign and the basic reproductive number, as presented in Table 2.

Table 2 The relationship between the parameters of effectiveness of education campaign and basic reproductive Number

Effectiveness of education campaign	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
Basic reproductive Number	1.838	1.654	1.471	1.287	1.103	0.919	0.735	0.551	0.368	0.183	0

The analysis model and optimal control found that the stability of equilibrium points when the effectiveness of Education Campaign ω = 0.5, have basic reproductive number R_0 = 0.919, and the effectiveness of Education Campaign ω = 0, the disease-endemic equilibrium R_0 = 1.838. The effectiveness of Education Campaign is the factor affecting the mathematical modelling.

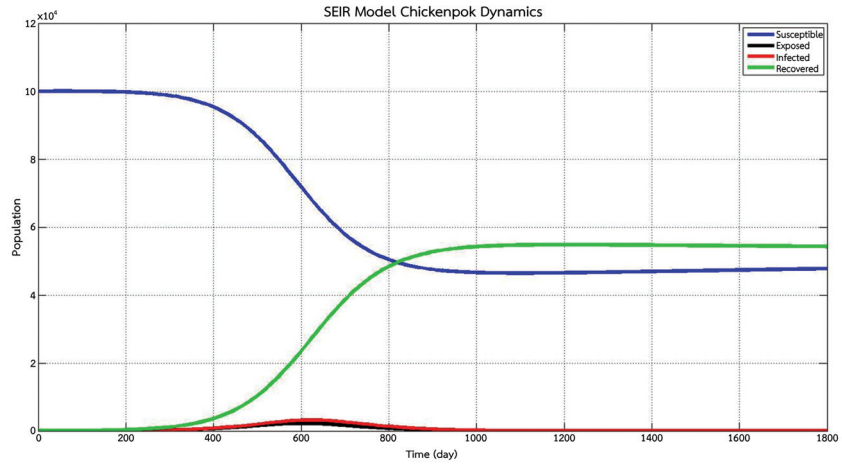
1) Stability of the disease-free state

We changed the values of Education Campaign ω = 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, and 0.9, and keep the values of the other values of parameters to be those given in Table 1.

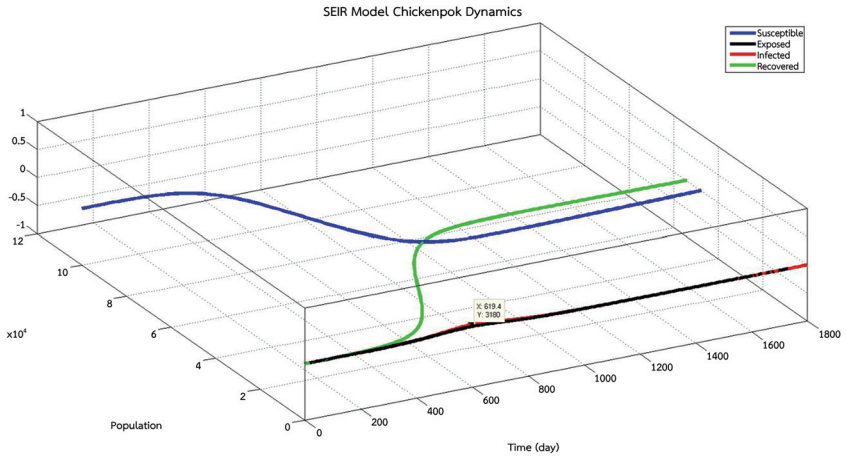
For the case where ω = 0.5, we obtained the basic reproductive number R_0 = 0.919, which is less than one $(R_0 < 1)$. According to Theorem 1, the local stability of the disease-free equilibrium point (E_0) is evaluated by determining the eigenvalues from the characteristic equation. Two negative eigenvalues are immediately obtained as $\lambda_1 = -\varphi = -0.00001567$ and $\lambda_2 = -\varphi = -0.00001567$. The remaining two eigenvalues (λ_3, λ_4) are determined by the quadratic characteristic polynomial: $\lambda^2 + A\lambda + B = 0$

By substituting the baseline parameter values from Table 1 into the coefficients defined in Theorem 1, where $A = \beta + \gamma + 2\varphi$ and $B = (\beta + \varphi)(\gamma + \varphi) - \frac{\alpha\beta\delta(1-\omega)}{\varphi}$, we obtained the positive coefficients: $A = 0.209558$ and $B = 0.000779$

According to the Routh-Hurwitz criterion, since all coefficients of this characteristic polynomial are strictly positive $(A > 0, B > 0)$, all remaining eigenvalues have negative real parts. Consequently, since all eigenvalues have negative real parts, the disease-free equilibrium point (E_0) is locally asymptotically stable. This implies that the chickenpox disease will eventually disappear from the population when $R_0 < 1$, which perfectly matches the numerical simulation results shown in Figure 1, where the infected trajectories continuously approach zero.



(a) SEIR05



(b) SEIR05H

Figure 1 Time series of Susceptible human, Exposed human, Infected human and Recovered human on Education Campaign ω = 0.5.

Furthermore, to clarify the behavior of the endemic equilibrium point (E_1), Theorem 2 states that E_1 does not exist in the biologically feasible region when $R_0 \leq 1$ because the state variables (E^*, I^*, R^*) would become non-positive or negative. This is consistent with the epidemic theory where the disease cannot persist without a sufficient transmission rate. Therefore, when $R_0 = 0.919 < 1$, the disease-free equilibrium (E_0) is the only stable steady state, and any discussion regarding the stability of an endemic state is irrelevant for this case, as confirmed by the continuous decline of the infected population toward eradication in Figure 1.

2) Stability of the endemic state

We changed the values of Education Campaign ω = 0.0, 0.1, 0.2, 0.3, and 0.4, and keep the values of the other values of parameters to be those given in Table 1. We obtained the eigenvalues, and basic reproductive numbers are R_0 = 1.838, 1.654, 1.471, 1.287, and 1.103 $(R_0 > 1)$. All the eigenvalues are negative, and the basic reproductive number is greater than one, the endemic equilibrium point is local asymptotically stable, as shown in Figure 2 - 9.

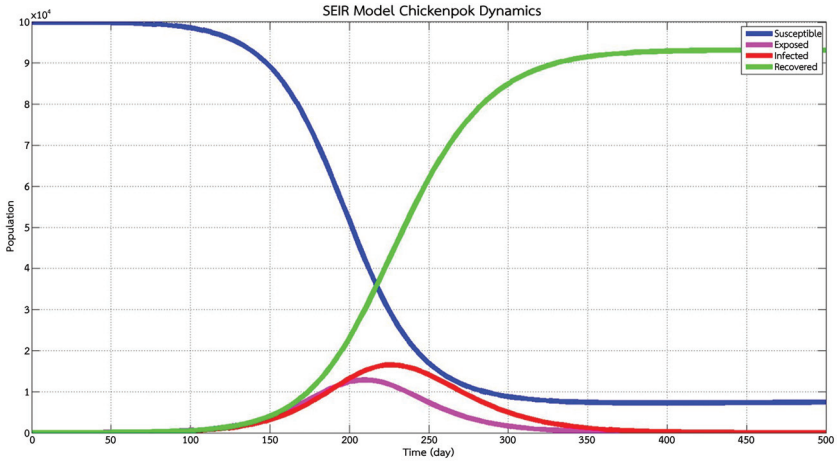


Figure 2 Time series of Susceptible human, Exposed human, Infected human and Recovered human on Education Campaign $\omega = 0$.

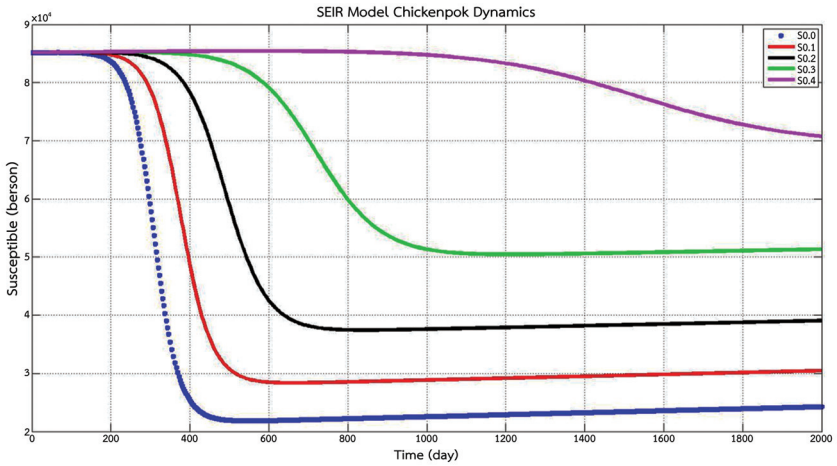


Figure 3 Time series of Susceptible human on Education Campaign $\omega = 0.0, 0.1, 0.2, 0.3$, and 0.4.

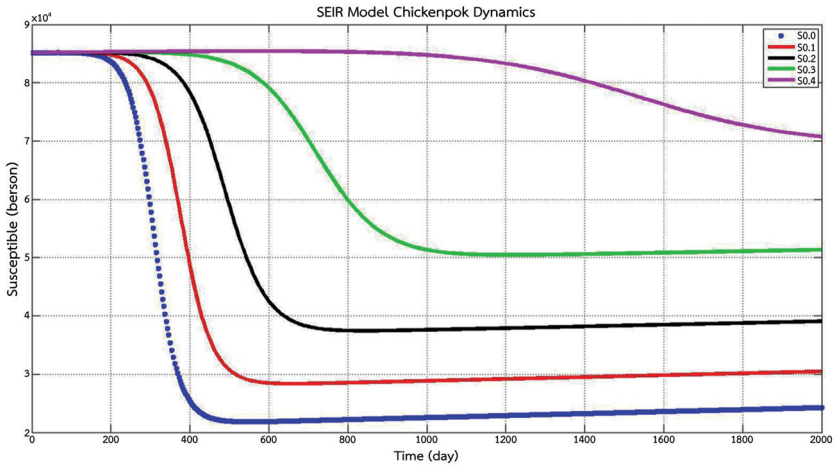


Figure 4 Time series of Exposed human on Education Campaign $\omega = 0.0, 0.1, 0.2, 0.3$, and 0.4.

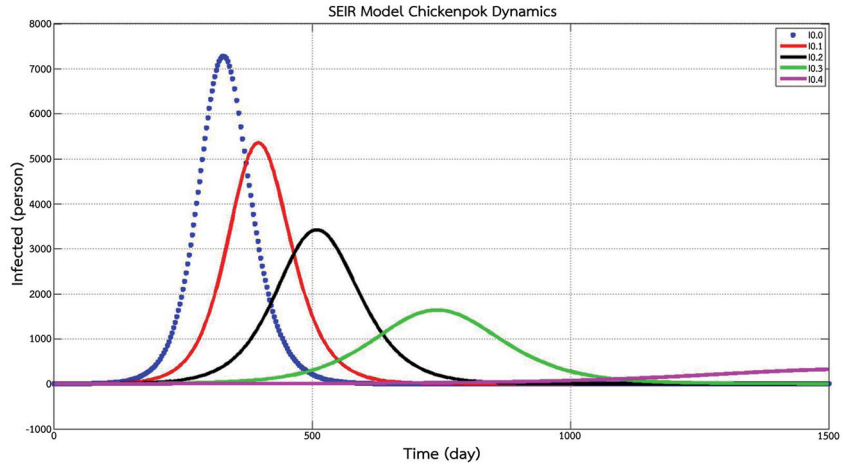


Figure 5 Time series of Infected human on Education Campaign ω = 0.0, 0.1, 0.2, 0.3, and 0.4.

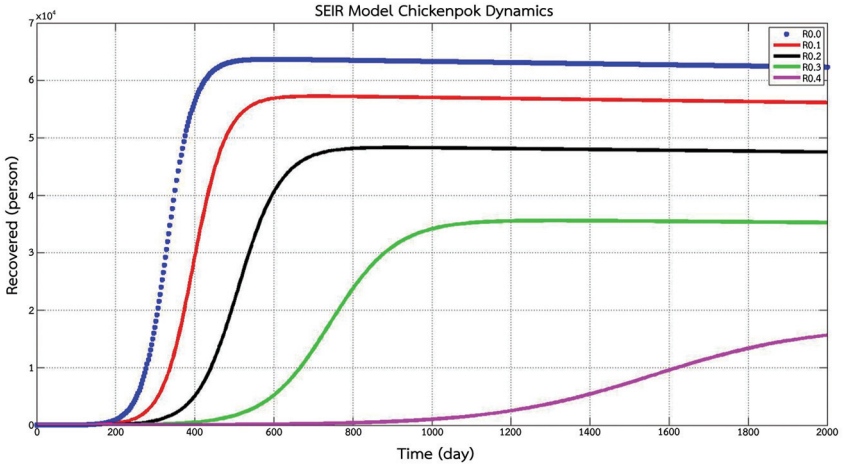


Figure 6 Time series of Recovered human on Education Campaign ω = 0.0, 0.1, 0.2, 0.3, and 0.4.

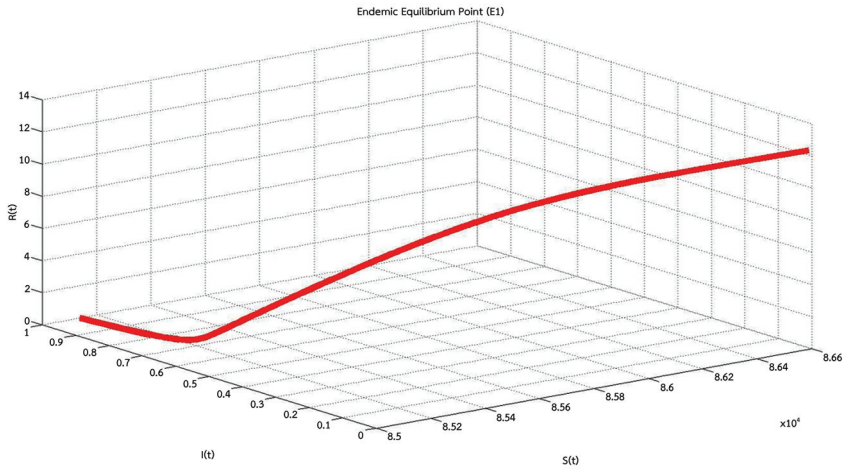


Figure 7 The relationship between (S) Susceptible human, (I) Infected human and (R) Recovered human. The solutions approach the endemic equilibrium state to the disease-free state.

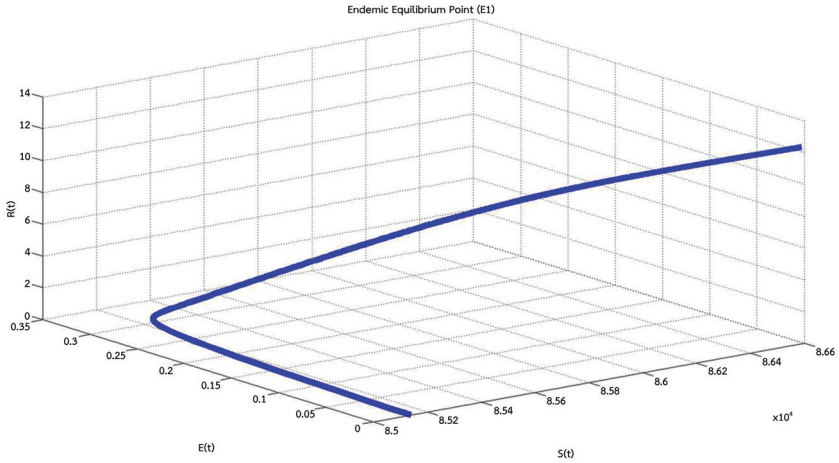


Figure 8 The relationship between (S) Susceptible human, (E) Exposed human and (R) Recovered human. The solutions approach the endemic equilibrium state to the disease-free state.

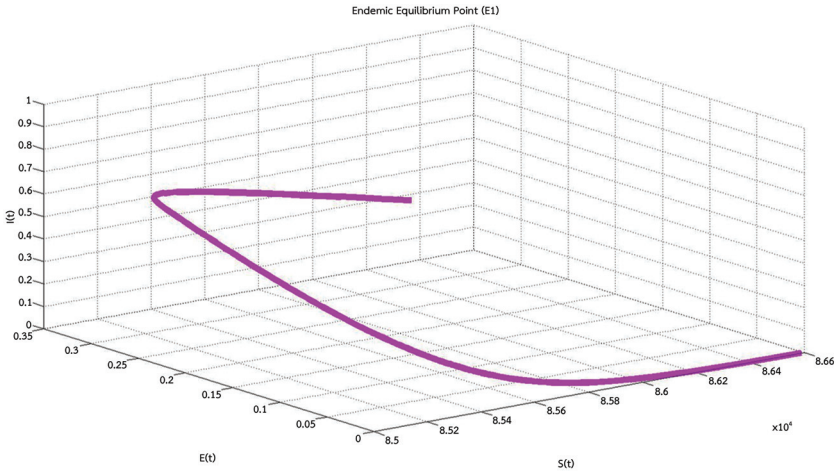


Figure 9 The relationship between (S) Susceptible human, (E) Exposed human and (I) Infected human. The solutions approach the endemic equilibrium state to the disease-free state.

The study found that the effectiveness of the education campaign is one of the factors affecting the dynamics of a mathematical model used to control the spread of chickenpox. If the at-risk population knows how to prevent chickenpox, fewer will spread the disease. If the population at risk of infection with chickenpox is knowledgeable about prevention methods, many individuals will help reduce the spread of the disease until there is no further transmission of chickenpox. At least 50 percent of the total population is at risk of infection with chickenpox and has knowledge about its prevention. This will aid in reducing the disease's spread until the infection stops spreading. This statistic highlights the importance of public health education in controlling outbreaks. By ensuring that a significant portion of the population understands how to prevent transmission, the overall health of the community can be safeguarded and the incidence of chickenpox can be significantly reduced.

In this study, we proposed the dynamics model of Chickenpox with considered the education campaign. We analyzed the model by the standard method. Also, we determined the equilibrium points and investigated the stability of the model. We obtained the basic reproductive

number using the next generation method. Further, we explored the impact of varying educational strategies on the spread of the disease, highlighting the importance of the education campaign in controlling outbreaks. Our findings suggest that targeted campaigns can significantly reduce transmission rates and improve overall health outcomes in the population.

The effectiveness of Education Campaign is the factor affecting the mathematical modelling. In epidemiology, the basic reproductive number is the number of secondary cases generated by a primary infectious individual. We employ the Roth-Hurwitz criteria to examine the stability of the system. The qualitative behaviors of this model are shown in Figure 1 - 4. We analyzed the model and optimal control and found that when the Education Campaign was 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, and 0.9. The population at risk of infection with knowledge about the prevention of chickenpox is not less than 50 % of the total population and will contribute to the decrease in the spread of the disease until there is no further spread of infection. The evidence indicates that increasing the education campaign's effectiveness significantly enhances community awareness and engagement in preventive measures. This, in turn, leads to a more resilient population capable of resisting outbreaks. By fostering a culture of vigilance and proactive health practices, the long-term impact on public health can be profoundly positive, reducing the burden of chickenpox and similar infectious diseases. As a result, we can effectively reduce the overall incidence of chickenpox, promoting a healthier population and alleviating the burden on healthcare resources.

Conclusion and Suggestions

In conclusion, the results of this study demonstrate that the effectiveness of education campaigns plays a crucial role in controlling the transmission dynamics of chickenpox. When the effectiveness of the education campaign decreases, the number of infected individuals increases, resulting in a basic reproduction number greater than one $(R_0 > 1)$, indicating persistent disease transmission within the community. Conversely, increasing the effectiveness of the education campaign reduces the number of infected individuals and leads to a basic reproduction number less than one $(R_0 < 1)$, implying that the disease will eventually disappear from the population. These findings highlight the critical importance of maintaining effective educational campaigns to strengthen public awareness and preventive behaviors among at-risk populations. By enhancing the effectiveness of such interventions, communities can significantly reduce disease transmission and better protect vulnerable individuals. Furthermore, collaboration among local health authorities, schools, and community organizations can improve outreach activities, promote early recognition of symptoms, and encourage timely preventive actions, thereby contributing to the overall resilience and health of the community. Regarding the practical application of the proposed mathematical model, public health authorities may utilize the education campaign effectiveness parameter (ω) as a strategic indicator for planning and evaluating chickenpox control policies in schools and communities. Both the theoretical analysis and numerical simulations indicate that achieving an educational compliance level of at least 50 % $(\omega \geq 0.5)$ can successfully reduce the basic reproduction number below the epidemic threshold $(R_0 < 1)$, leading to disease eradication. In practical settings, decision-makers may estimate the actual value of (ω) through Knowledge, Attitudes, and Practices surveys conducted within target populations. If the observed

effectiveness level is lower than the mathematically determined threshold, public health interventions and educational campaigns can be intensified proactively to reduce the risk of future outbreaks. Although this study primarily focuses on theoretical analysis, the proposed model provides a useful framework for future epidemiological investigations. Future studies may incorporate real epidemiological data for model calibration and validation to improve predictive accuracy and enhance the practical applicability of the model in public health decision-making and chickenpox outbreak management.

Acknowledgments

This work was supported by the Research and Development Institute, Phuket Rajabhat University, Phuket, Thailand and the authors are grateful to the Department of Mathematics, Faculty of Education, Phuket Rajabhat University, Phuket, Thailand for providing the facilities to carry out the research.

References

Almuallem, N.A., Ali, H.M., Elsaid, E.M., Eid, M.R. and Hassanin, W.S. (2025). Mathematical Simulation of Optimal Control Measures to Avoid Chickenpox Infection. *International Journal of Mathematics and Mathematical Sciences*. https://doi.org/10.1155/ijmm/3238188

Department of Disease Control. (n.d.). *Chickenpox, Varicella*. Department of Disease Control, Ministry of Public Health. https://www.ddc.moph.go.th/disease_detail.php?d=113

Division of Epidemiology. (2020). *Case Definition for Communicable Diseases Surveillance, Thailand, 2020*. Department of Disease Control, Ministry of Public Health. https://ddc.moph.go.th/uploads/publish/1142920210518092542.pdf

Phuket Provincial Statistical Office. (2022). *Phuket Provincial Statistical Report*. Phuket Provincial Statistical Office. Ministry of Digital Economy and Society. https://phuket.nso.go.th/reports-publications/provincial-statistics-report.html

Sangthongjeen, S., Sudchumnong, A. and Naowarat, S. (2015). Effect of Educational Campaign on Transmissions Model of Conjunctivitis. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 9(7), 811-815. https://www.ajbasweb.com/old/ajbas/2015/April/811-815.pdf

Sukawat, J. and Naowarat, S. (2014). Effect of Rainfall on the Transmission Model of Conjunctivitis. *Advances in Environmental Biology*, 8(14), 99-104. https://www.aensiweb.com/old/aeb/Special%207%20ICEBS%202014/99-104.pdf

อิทธิพลของผงแก้วทดแทนปูนซีเมนต์และทรายร่วมกันต่อกำลังอัดและสมบัติทางกายภาพของมอร์ตาร์

Effect of Combined Replacement of Cement and Sand with Glass Powder on Compressive Strength and Physical Properties of Mortar

อภิพงศ์ เจือสนิท[1*] นันทชัย ชูศิลป์[1] จิระศักดิ์ บุญเนือง[1] จรูญ เจริญเนตรกุล[1] และเชิดศักดิ์ สุขศิริพัฒนพงศ์[2]
Apipong Juesanit[1*] Nuntachai Chusilp[1] Jirasak Bunnueang[1] Charoon Charoennetkul[1] and Cherdsak Suksiripattanapong[2]

Received: *February 23, 2026;* ***Revised:*** *May 30, 2026;* ***Accepted:*** *June 15, 2026*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาศักยภาพในการนำเศษแก้วเหลือทิ้งกลับมาใช้ใหม่ โดยทำการศึกษาผลกระทบของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงแก้วบดละเอียด (GPF) และการแทนที่ทรายด้วยผงแก้วบดหยาบ (GPC) ในรูปแบบการแทนที่ร่วมที่ร้อยละ 5 10 15 และ 20 โดยน้ำหนัก ต่อกำลังอัดและสมบัติทางกายภาพของมอร์ตาร์ ผลการทดสอบพบว่าค่าการไหลแผ่และความหนาแน่นของมอร์ตาร์มีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณการแทนที่ด้วยผงแก้วเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวจำเพาะของอนุภาคผงแก้ว ส่งผลให้ความต้องการน้ำในการหล่อลื่นผิวอนุภาคเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม พบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย GPF ร้อยละ 5 ร่วมกับการแทนที่ทรายด้วย GPC ร้อยละ 5 ให้ค่ากำลังอัดสูงสุดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 35.21 MPa อีกทั้งค่าความพรุนและการดูดซึมน้ำต่ำที่สุดเพียงร้อยละ 3.85 และ 1.60 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคแสดงให้เห็นว่า GPF ทำหน้าที่เป็นวัสดุเติมเต็ม ทำให้โครงสร้างมีความทึบแน่นมากขึ้น ในขณะที่การใช้ GPC ในปริมาณสูงขึ้นจะส่งผลลบต่อกำลังอัดเนื่องจากลักษณะอนุภาคที่เป็นเหลี่ยมมุมขัดขวางการจัดเรียงตัวของมวลรวม ดังนั้นอัตราส่วนมอร์ตาร์ที่เหมาะสมที่สุดคือ การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย GPF ร้อยละ 5 ร่วมกับการแทนที่ทรายด้วย GPC ร้อยละ 5 ซึ่งช่วยลดปริมาณขยะแก้วและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

คำสำคัญ : ผงแก้ว; มอร์ตาร์; กำลังอัด

[1] *คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย*
[2] *คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน*
[1] *Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya*
[2] *Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Isan*
[*] *Corresponding Author, Tel. 09 3930 5955, E - mail: apipong.j@rmutsvmail.com*

Abstract

The objective of this research is to study the potential of reutilizing waste glass. The study examines the effects of the combined replacement of cement with fine glass powder (GPF) and sand with coarse glass powder (GPC) in proportions of 5, 10, 15, and 20 percent by weight on the compressive strength and physical properties of mortar. The results of the study indicated that the flow and density of the mortar tended to decrease with the increase of glass replacement levels due to the increased specific surface area of the glass powder particles, leading to a higher water demand to lubricate the particle surfaces. However, the replacement of cement with 5 percent GPF combined with the replacement of sand 5 percent GPC yielded the highest compressive strength of 35.21 MPa at 28 days. Additionally, this mixture exhibited the lowest porosity and water absorption values of 3.85 percent and 1.60 percent. Microstructural analysis revealed that GPF acted as a filler material, resulting in a denser structure, whereas excessive GPC content negatively affected compressive strength due to its angular particles hindering aggregate packing. In conclusion, the most appropriate mortar ratio is the replacement of cement with 5 percent GPF combined with the replacement of sand with 5 percent GPC, which helps reduce waste glass quantity and is environmentally friendly.

Keywords: Glass Powder; Mortar; Compressive Strength

บทนำ

ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) อันเกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของวัตถุดิบควบคู่กับการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล ก๊าซชนิดนี้เป็นก๊าซเรือนกระจกที่มีส่วนสำคัญในการก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน จากข้อมูลบัญชีก๊าซเรือนกระจกของประเทศไทยปี พ.ศ. 2561 ซึ่งภาคกระบวนการอุตสาหกรรมและการใช้ผลิตภัณฑ์มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกร้อยละ 10.77 มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์เกินครึ่ง คือ กว่าร้อยละ 51.28 (Office of Natural Resources and Environmental Policy and Planning, 2022) โดยในปี พ.ศ. 2567 ประเทศไทยมีขยะมูลฝอยเกิดขึ้นประมาณ 27.20 ล้านตัน (Pollution Control Department, 2025) ในขณะที่สถานการณ์ระดับโลกมีปริมาณขยะมูลฝอยประมาณ 200 ล้านตันและประมาณร้อยละ 7 ของขยะดังกล่าวเป็นขยะแก้ว ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นแก้วโซดาไลม์ (Muhedin and Ibrahim, 2023) อย่างไรก็ตาม ทั่วโลกกำลังเผชิญกับวิกฤตการณ์ทรัพยากรทราย ซึ่งเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตแก้วและคอนกรีตในช่วงสองทศวรรษที่ผ่านมา การใช้ทรายทั่วโลกได้เพิ่มขึ้นอย่างก้าวกระโดดแตะระดับประมาณ 40 - 50 พันล้านเมตริกตันต่อปี (United Nations Environment Programme, 2022) ซึ่งการนำผงแก้วมาประยุกต์ใช้ในการเป็นวัสดุทดแทนในงานก่อสร้าง จึงเป็นแนวทางที่ช่วยลดปัญหาก๊าซเรือนกระจกและลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติไปพร้อมกัน โดยผงแก้วมีซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) เป็นองค์ประกอบหลัก (Thatuchirangkul et al., 2025) และกระบวนการผลิตยังส่งผลให้แก้วมีโครงสร้างเป็นวัสดุอสัณฐาน (Phoophool, 2015) ซึ่งจะส่งเสริมให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) จากผลศึกษาพบว่าการใช้ผงแก้วขนาดอนุภาคเล็กกว่า 75 μm แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 สามารถเพิ่มกำลังอัดคอนกรีตได้ร้อยละ 9 เมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุม นอกจากนี้การใช้ผงแก้วแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณไม่เกินร้อยละ 15 ยังสามารถปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของคอนกรีต โดยไม่กระทบต่อระยะเวลาการก่อตัวและการขยายตัว (Aliabdo et al., 2016)

ในด้านกลไกทางเคมี เมื่อนำแก้วมาบดให้มีความละเอียดสูง SiO_2 ในผงแก้วจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์เกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ซึ่งมีความสำคัญต่อการพัฒนากำลังอัด อีกทั้งยังช่วยลดความพรุน ซึ่งเป็นการปรับปรุงทั้งคุณสมบัติทางกลและความทนทานในคอนกรีต

(Dong et al., 2021) อย่างไรก็ตามหนึ่งในข้อกังวลสำคัญเกี่ยวกับการใช้แก้วในคอนกรีต คือ ปฏิกิริยาเคมีระหว่างอนุภาคแก้วที่มีปริมาณซิลิกาสูงและอัลคาไล เรียกว่า ปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกา (Alkali Silica Reaction, ASR) (Zheng, 2016) ซึ่งจะเกิดเป็นเจล (Gel) ซึ่งมีคุณลักษณะดูดซับน้ำและการขยายตัว ทำให้เกิดแรงดันภายในคอนกรีต ซึ่งหากแรงดันนั้นเกินกว่ากำลังคอนกรีตจะรับได้ คอนกรีตก็จะเกิดการแตกร้าว (Thaipum and Srisoros, 2013) ทั้งนี้มีการนำเอาผงแก้วที่มีความละเอียดเล็กกว่า 100 μm มาทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วน และทำการทดสอบการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์ พบว่า การขยายตัวที่ 14 วัน น้อยกว่าร้อยละ 0.09 สำหรับทุกอัตราส่วน ซึ่งต่ำกว่าเกณฑ์ของ ASTM C1260 ที่กำหนดไว้ที่ร้อยละ 0.1 แสดงให้เห็นว่าไม่มีการขยายตัวที่เป็นอันตรายจาก ASR เนื่องจากอนุภาคผงแก้วที่มีความละเอียดสูงจะทำหน้าที่เป็นวัสดุปอซโซลานที่ไวต่อการทำปฏิกิริยา โดยจะทำปฏิกิริยากับ $Ca(OH)_2$ เพื่อสร้าง C-S-H แทนที่จะเกิด ASR (Sharifi et al., 2016) อีกทั้งยังพบว่าปริมาณการแทนที่ของผงแก้วมีผลต่อการยับยั้งปฏิกิริยา ASR มากกว่าความละเอียด (Huang et al., 2021)

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ส่วนใหญ่มักมุ่งเน้นการศึกษาการนำผงแก้วมาใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ หรือมวลรวมละเอียด เพียงอย่างใดอย่างหนึ่งแยกจากกัน (Dong et al., 2021) ส่งผลให้ผลการศึกษาถึงอิทธิพลของการแทนที่วัสดุทั้งสองส่วนพร้อมกัน ยังมีอยู่อย่างจำกัด แม้ว่าเริ่มจะมีงานวิจัยบางส่วนศึกษาการแทนที่ร่วมกันบ้างแล้ว (Baikerikar et al., 2023; Muhedin and Ibrahim, 2023) แต่การทำความเข้าใจถึงผลกระทบแบบบูรณาการที่เกิดจากการแทนที่ทั้งปูนซีเมนต์และทรายพร้อมกันยังคงเป็นช่องว่างงานวิจัยที่สำคัญ

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์และแทนที่ทรายด้วยผงแก้ว ในการแทนที่แบบร่วมในอัตราส่วนต่าง ๆ ที่มีผลต่อสมบัติทางกลและสมบัติทางกายภาพ เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการใช้งาน อันจะเป็นแนวทางในการจัดการขยะแก้วและพัฒนาวัสดุก่อสร้างที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมต่อไป

วิธีดำเนินการวิจัย

1. วัสดุ

วัสดุที่ใช้สำหรับการวิจัย ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกชนิดใช้งานทั่วไป (Hydraulic Cement Type General Use) ตาม มอก.2594-2567 ทรายแม่น้ำคละขนาดที่อยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้งตามมาตรฐาน ASTM C33 มีค่าโมดูลัสความละเอียด 2.65 ผงแก้วบดหยาบ (Glass Powder Coarse, GPC) ผ่านตะแกรงเบอร์ 16 และค้างตะแกรงเบอร์ 100 มีค่าโมดูลัสความละเอียด 2.56 และผงแก้วบดละเอียด (Glass Powder Fine, GPF) มีร้อยละการค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ร้อยละ 33 โดยลักษณะทางกายภาพของวัสดุทั้งหมดดังรูปที่ 1



(ก) ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก



(ข) ผงแก้วบดหยาบ



(ค) ผงแก้วบดละเอียด



(ง) ทรายแม่น้ำ

รูปที่ 1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

2. ส่วนผสมของมอร์ตาร์

งานวิจัยนี้ออกแบบส่วนผสมมอร์ตาร์ทั้งหมด 17 รูปแบบ โดยมุ่งเน้นศึกษาผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงแก้วบดละเอียด (GPF) และการแทนที่ทรายด้วยผงแก้วบดหยาบ (GPC) ประกอบด้วย มอร์ตาร์ควบคุม (CT), GPF ในปริมาณร้อยละ 5 ร่วมกับ GPC ในปริมาณร้อยละ 5 10 15 และ 20 คือ มอร์ตาร์ 5GPF-5GPC ถึง มอร์ตาร์ 5GPF-20GPC, GPF ในปริมาณร้อยละ 10 ร่วมกับ GPC ในปริมาณร้อยละ 5 10 15 และ 20 คือ มอร์ตาร์ 10GPF-5GPC ถึง 10GPF-20GPC, GPF ในปริมาณร้อยละ 15 ร่วมกับ GPC ในปริมาณร้อยละ 5 10 15 และ 20 คือ มอร์ตาร์ 15GPF-5GPC ถึงมอร์ตาร์ 15GPF-20GPC และ GPF ในปริมาณร้อยละ 20 ร่วมกับ GPC ในปริมาณร้อยละ 5 10 15 และ 20 คือ มอร์ตาร์ 20GPF-5GPC ถึงมอร์ตาร์ 20GPF-20GPC โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ดังตารางที่ 1 โดยทุกตัวอย่างมอร์ตาร์จะมีค่าการไหล (Flow) เท่ากับ 110±5

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมมอร์ตาร์ ร้อยละโดยน้ำหนัก

No.	Sample ID	Cement	GPF	Sand	GPC	W/B
1	CT	100	-	275	-	0.56
2	5GPF-5GPC	95	5	270	5	0.56
3	5GPF-10GPC	95	5	265	10	0.56
4	5GPF-15GPC	95	5	260	15	0.56
5	5GPF-20GPC	95	5	255	20	0.55
6	10GPF-5GPC	90	10	270	5	0.57
7	10GPF-10GPC	90	10	265	10	0.57
8	10GPF-15GPC	90	10	260	15	0.56
9	10GPF-20GPC	90	10	255	20	0.55
10	15GPF-5GPC	85	15	270	5	0.59
11	15GPF-10GPC	85	15	265	10	0.59
12	15GPF-15GPC	85	15	260	15	0.58
13	15GPF-20GPC	85	15	255	20	0.58
14	20GPF-5GPC	80	20	270	5	0.59
15	20GPF-10GPC	80	20	265	10	0.58
16	20GPF-15GPC	80	20	260	15	0.59
17	20GPF-20GPC	80	20	255	20	0.58

3. การทดสอบการไหลแผ่ (Flow)

การทดสอบการไหลแผ่ (Flow) เพื่อหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Water Requirement Test) ของมอร์ตาร์โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ทำให้ค่าการไหลแผ่เท่ากับร้อยละ 110±5 ตามมาตรฐาน ASTM C230 ด้วยโต๊ะทดสอบการไหล (Flow Table) โดยทำการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของแบบทดสอบ (D_1) มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm) และวัดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของมอร์ตาร์บนแท่นทดสอบ (D_2) มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm) โดยคำนวณค่าการไหลแผ่ดังสมการที่ (1)

$$Flow(\%) = \frac{D_2 - D_1}{D_1} \times 100 \quad (1)$$

4. การทดสอบความหนาแน่น (Density)

การทดสอบหาความหนาแน่น (Bulk Density) ทำได้โดยนำก้อนตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ผ่านการอบแห้งไปชั่งหาน้ำหนักอบแห้ง (A) มีหน่วยเป็นกรัม (g) หารด้วยปริมาตรของก้อนตัวอย่างซึ่งคำนวณจากผลต่างของน้ำหนักหลังแช่น้ำ (B)

มีหน่วยเป็นกรัม (g) กับน้ำหนักชั่งในน้ำ (C) มีหน่วยเป็นกรัม (g) แล้วคูณด้วยค่าความหนาแน่นของน้ำ (ρ) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (kg/m^3) โดยความหนาแน่นที่คำนวณได้จะมีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (kg/m^3) ดังสมการที่ (2)

$$Bulk\ \ density\ \left(kg/m^3\right)=\left(\frac{A}{B-C}\right)\times\rho \tag{2}$$

5. การทดสอบการดูดซึมน้ำ (Absorption)

การทดสอบหาการดูดซึมน้ำ (Water Absorption) ทำได้โดยนำก้อนตัวอย่างมอร์ตาร์ทรงลูกบาศก์ขนาด 50×50×50 มิลลิเมตร ที่อายุการบ่ม 28 วัน ไปอบที่อุณหภูมิ 110±5 °C เป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมง เพื่อให้น้ำหนักคงที่ จากนั้นตั้งทิ้งไว้ให้เย็นตัวลงเป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วนำมาชั่งน้ำหนักแห้งและบันทึกค่า (M_{dry}) มีหน่วยเป็นกรัม (g) จากนั้นนำตัวอย่างไปแช่น้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำขึ้นมาเช็ดทำความสะอาดผิวหน้าให้แห้ง ซึ่งตัวอย่างจะอยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง แล้วนำมาชั่งน้ำหนักและบันทึกค่า (M_{sat}) มีหน่วยเป็นกรัม (g) โดยค่าการดูดซึมน้ำสามารถคำนวณได้จากผลต่างของน้ำหนัก (M_{sat}) กับ (M_{dry}) หารด้วยน้ำหนัก (M_{dry}) แล้วคูณด้วย 100 ดังสมการที่ (3)

$$Absorption(\%)=\frac{M_{sat}-M_{dry}}{M_{dry}}\times 100 \tag{3}$$

6. การทดสอบความพรุนของมอร์ตาร์ (Porosity)

การทดสอบความพรุนใช้การประยุกต์การทดสอบตามมาตรฐานของ ASTM C642 โดยใช้มอร์ตาร์ทรงลูกบาศก์ขนาด 50×50×50 มิลลิเมตร อายุการบ่ม 28 วัน น้ำหนักอิ่มตัวผิวแห้ง (M_{sat}) และน้ำหนักอบแห้ง (M_{dry}) มาร่วมคำนวณกับน้ำหนักของก้อนตัวอย่างที่ชั่งในน้ำ (M_w) ซึ่งการคำนวณความพรุนดังสมการที่ (4)

$$Porosity(\%)=\frac{M_{sat}-M_{dry}}{M_{sat}-M_w}\times 100 \tag{4}$$

7. การทดสอบกำลังอัด (Compressive Strength)

การทดสอบหาค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ตามมาตรฐาน ASTM C109 โดยใช้มอร์ตาร์ทรงลูกบาศก์ขนาด 50x50x50 มิลลิเมตร จำนวน 3 ตัวอย่างต่อส่วนผสม นำไปบ่มในน้ำสะอาดจนครบอายุการบ่มที่กำหนดคือ 7 14 และ 28 วัน เมื่อครบกำหนดนำตัวอย่างขึ้นมาเช็ดผิวให้แห้งและวัดขนาดก่อนนำไปทดสอบด้วยเครื่อง Universal Testing Machine จนกระทั่งชิ้นตัวอย่างวิบัติ ค่ากำลังอัดประลัย (f_c) มีหน่วยเป็นเมกะปาสกาล (MPa) สามารถคำนวณได้จากค่าแรงอัดประลัย (P) มีหน่วยเป็นกิโลนิวตัน (kN) หารด้วยพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง (A) มีหน่วยเป็นตารางมิลลิเมตร (mm^2) ดังสมการที่ (5)

$$f_c=\frac{P}{A} \tag{5}$$

ผลการวิจัย

1. คุณสมบัติของวัสดุ

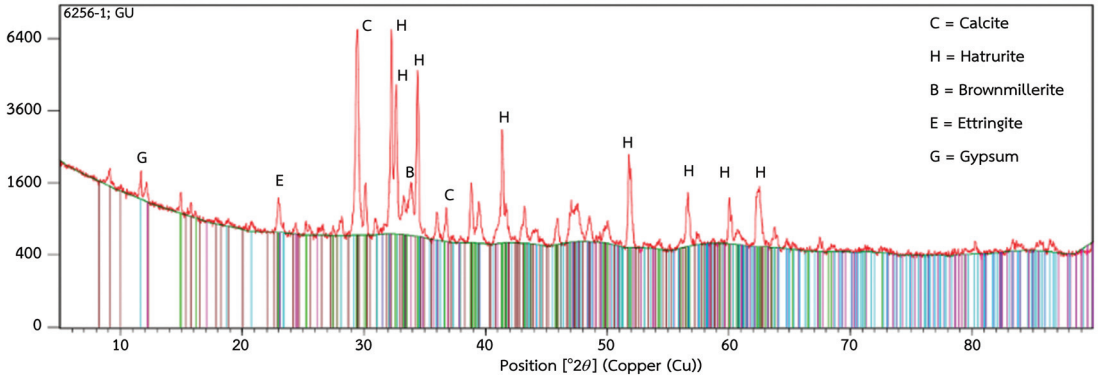
เมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและผงแก้วซึ่งทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence Spectrometry (XRF) จากตารางที่ 2 พบว่ามีองค์ประกอบออกไซด์หลักที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก มีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นองค์ประกอบหลักสูงถึงร้อยละ 64.24 ซึ่งมีซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) เป็นองค์ประกอบรองร้อยละ 13.96 ซึ่ง CaO กับ SiO_2 ทำปฏิกิริยากันจะได้สารประกอบหลัก คือ ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) และไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S) ซึ่งจะช่วยพัฒนากำลังอัดในระยะเริ่มต้นและระยะยาวตามลำดับ (Sethabutr, 2003)

และผงแก้วมีซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) เป็นองค์ประกอบหลักร้อยละ 65.18 และในผงแก้วมีปริมาณอัลคาไล คือ โซเดียมออกไซด์ (Na_2O) และโพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O) ซึ่งปริมาณอัลคาไลดังกล่าวก่อให้เกิดปัญหาเรื่องปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกา (Alkali-Silica Reaction, ASR) หากใช้แก้วเป็นวัสดุประสาน อย่างไรก็ตามพบว่าเมื่อบดแก้วจนมีขนาดเล็กเพียงพอ จะช่วยส่งเสริมปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic Reactivity) ในขณะเดียวกันก็ช่วยยับยั้งการขยายตัวอันเนื่องมาจากปฏิกิริยา ASR ได้ (Dong et al., 2021)

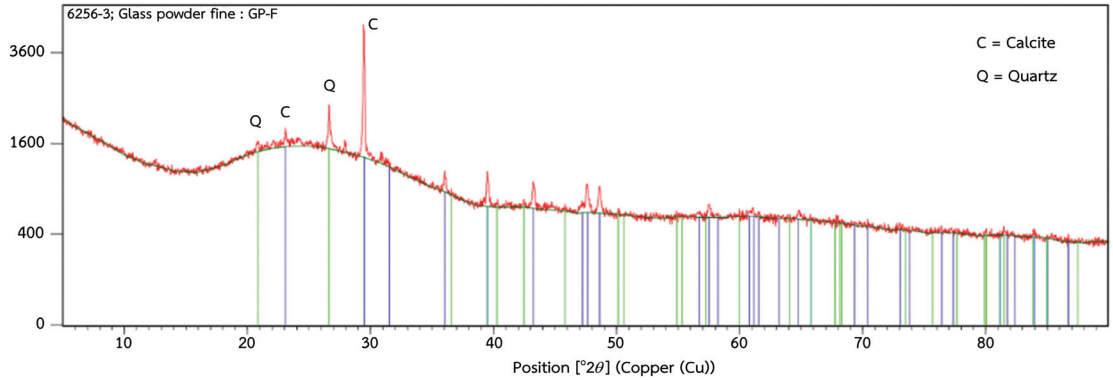
ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน

องค์ประกอบทางเคมี	ร้อยละโดยน้ำหนัก	
	ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก	ผงแก้ว
ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2)	13.96	65.18
อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)	2.99	2.45
ไอร์ออนออกไซด์ (Fe_2O_3)	3.32	1.06
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	64.24	20.52
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	1.54	1.89
โซเดียมออกไซด์ (Na_2O)	0.03	5.93
โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O)	1.10	0.57
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3)	3.87	0.10

จากผลการวิเคราะห์สารประกอบทางแร่ซึ่งอยู่ในรูปของผลึกของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและผงแก้วบดละเอียดด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction (XRD) ดังรูปที่ 2 และรูปที่ 3 พบว่าปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมีโครงสร้างเป็นผลึกอย่างชัดเจน โดยมีจุด Peak Intensity เด่นชัดที่สุดที่มุม 2-Theta 29.47 ซึ่งตรงกับแร่ Calcite ($CaCO_3$) และที่มุม 32.26 ตรงกับแร่ Hatrurite (Ca_3SiO_5) ซึ่งเป็นส่วนสำคัญต่อการพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์ (Wangbooncong, 2022) ในขณะที่ผงแก้วบดละเอียดแสดงลักษณะกราฟเป็นเนินกว้างในช่วงมุม 20 ถึง 35 องศา ซึ่งบ่งชี้ถึงโครงสร้างซิลิกาแบบอสัณฐาน (Amorphous Silica) (Navaneetha et al., 2025) แต่อย่างไรก็ตาม ยังคงปรากฏยอดแหลมซ้อนทับอยู่ โดยพบ Peak ของแร่ Calcite ที่มุม 29.46 และแร่ Quartz (SiO_2) ที่มุม 26.65

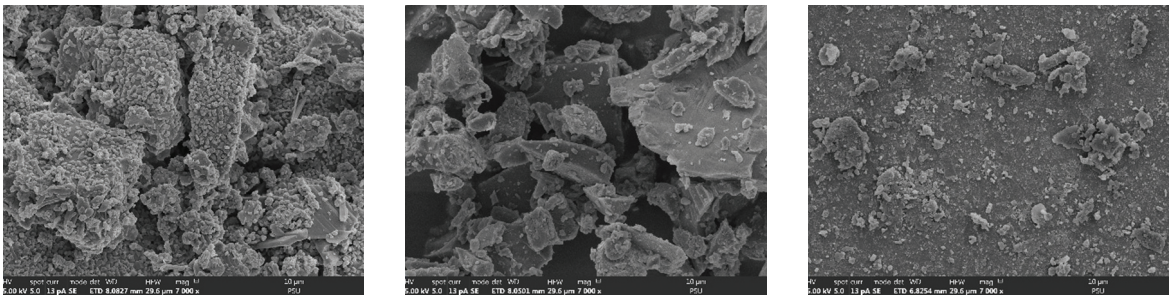


รูปที่ 2 การวิเคราะห์สารประกอบในของแข็งที่เป็นผลึกของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก



รูปที่ 3 การวิเคราะห์สารประกอบในของแข็งที่เป็นผลึกของผงแก้วบดละเอียด

จากการศึกษาลักษณะอนุภาคของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก ผงแก้วบดละเอียด (GPF) และผงแก้วบดหยาบ (GPC) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ที่กำลังขยาย 7,000 เท่า พบว่า อนุภาคของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมีรูปร่างไม่แน่นอน เป็นเหลี่ยมมุม และพื้นผิวขรุขระ ในขณะที่ผงแก้วบดละเอียดมีลักษณะเป็นเกล็ดบางและคม รูปร่างไม่แน่นอน แตกเป็นเศษเล็ก ๆ และมีการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ ส่วนผงแก้วบดหยาบเป็นชิ้นแตกเหลี่ยมมุม มีขอบคม และพื้นผิวขรุขระ (รูปที่ 4)



(ก) ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (ข) ผงแก้วบดละเอียด (ค) ผงแก้วบดหยาบ

รูปที่ 4 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 7,000 เท่า ของวัสดุประสาน

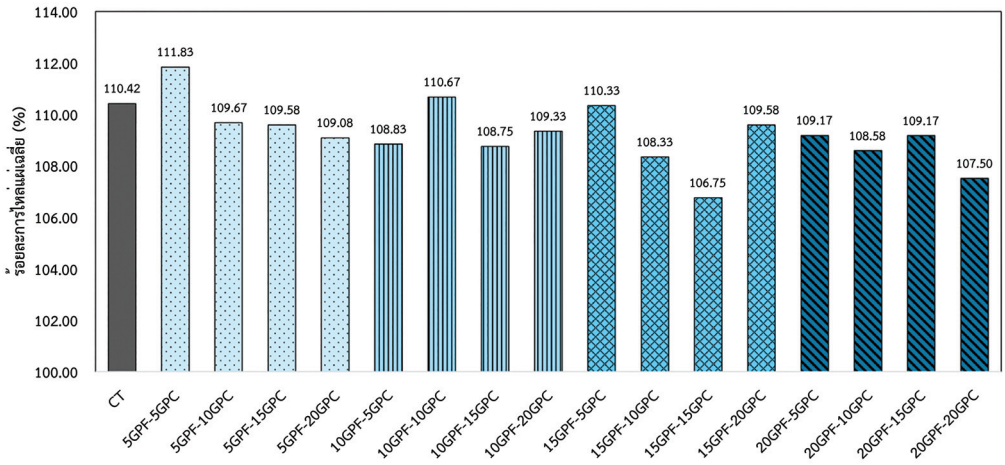
ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย ได้แก่ ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก ทราย ผงแก้วบดละเอียด (GPF) และผงแก้วบดหยาบ (GPC) ซึ่งประกอบด้วยค่าโมดูลัสความละเอียด ขนาดอนุภาค (D_{50}) และ (D_{10}) ร้อยละที่ค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 และความถ่วงจำเพาะ ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

วัสดุ	โมดูลัสความละเอียด	D_{50} (mm)	D_{10} (mm)	ร้อยละค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325	ความถ่วงจำเพาะ
ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก	-	-	-	34	3.13
ทราย	2.65	0.67	0.20	-	2.60
ผงแก้วบดละเอียด (GPF)	-	-	-	33	2.50
ผงแก้วบดหยาบ (GPC)	2.56	0.63	0.20	-	2.53

2. การทดสอบการไหลแผ่

ค่าการไหลแผ่ของตัวอย่างดังรูปที่ 5 พบว่ามอร์ตาร์ CT มีค่าการไหลแผ่เฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 110.42 และมีค่าสูงที่สุดในมอร์ตาร์ 5GPF-5GPC ที่ร้อยละ 111.83 อย่างไรก็ตาม ค่าการไหลแผ่มีแนวโน้มลดลงตามอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงแก้วบดละเอียด (GPF) และการแทนที่ทรายด้วยผงแก้วบดหยาบ (GPC) ที่เพิ่มขึ้น โดยมอร์ตาร์ 15GPF-15GPC มีค่าการไหลแผ่ต่ำที่สุดเท่ากับร้อยละ 106.75 ทั้งนี้เป็นผลมาจากผงแก้วที่มีความละเอียดสูงและมีพื้นที่ผิวจำเพาะมาก ส่งผลให้เกิดความต้องการน้ำในการหล่อลื่นผิวอนุภาคเพิ่มขึ้น ทำให้ความหนืดของมอร์ตาร์สูงขึ้นและความสามารถในการทำงานได้ลดลง สอดคล้องกับผลการทดสอบของ Li et al. (2022) ที่ได้ทำการศึกษาการใช้ผงแก้วนำมาแทนที่ปูนซีเมนต์ในมอร์ตาร์ พบว่าเมื่อขนาดอนุภาคของผงแก้วเล็กลง พื้นที่ผิวของอนุภาคจะเพิ่มขึ้น เป็นปัจจัยหลักที่ทำให้ปริมาณน้ำที่ต้องใช้เพิ่มขึ้น และส่งผลให้ค่าการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ลดลง



รูปที่ 5 การไหลแผ่ของมอร์ตาร์

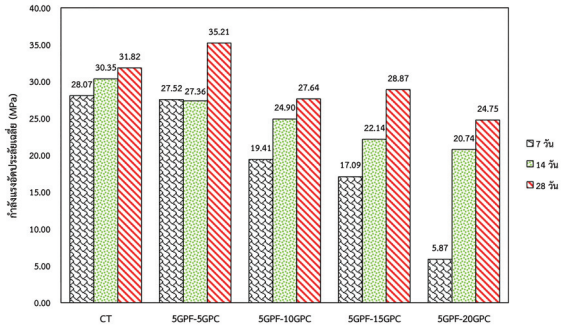
3. การทดสอบกำลังอัด

จากการศึกษาคุณสมบัติด้านกำลังอัดของมอร์ตาร์ โดยมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงแก้วบดละเอียด (GPF) และแทนที่ทรายด้วยผงแก้วบดหยาบ (GPC) ร่วมกันในสัดส่วนต่าง ๆ ตั้งแต่ร้อยละ 5 ถึงร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก สามารถอภิปรายผลตามอายุการบ่มได้ดังรูปที่ 6 ดังนี้

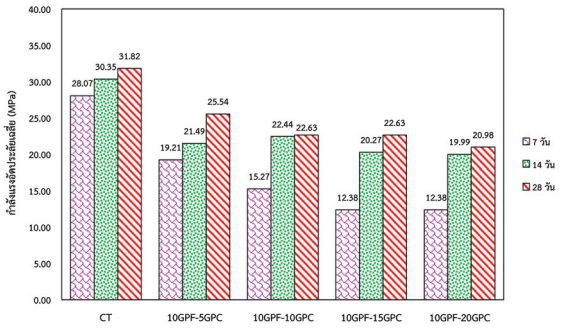
ในช่วงอายุการบ่มเริ่มต้น 7 วัน มอร์ตาร์ CT มีค่ากำลังอัดอยู่ที่ 28.07 MPa เมื่อพิจารณาตัวอย่างมอร์ตาร์พบว่าส่วนใหญ่มีกำลังอัดต่ำกว่ามอร์ตาร์ CT โดยเฉพาะมอร์ตาร์ 5GPF-20GPC ที่ลดลงเหลือเพียง 5.87 MPa อย่างไรก็ตาม มอร์ตาร์ 5GPF-5GPC ยังคงกำลังอัดใกล้เคียง มอร์ตาร์ CT ที่ 27.52 MPa ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการแทนที่ผงแก้วปริมาณน้อยไม่กระทบกำลังอัดเริ่มต้นอย่างมีนัยสำคัญ

เมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้นเป็น 14 วัน มอร์ตาร์ CT มีการพัฒนากำลังเพิ่มขึ้นเป็น 30.35 MPa ขณะที่ส่วนผสมซึ่งมีกำลังอัดต่ำในช่วงแรก เช่น มอร์ตาร์ 5GPF-20GPC มีการพัฒนากำลังอัดอย่างมีนัยสำคัญเป็น 20.74 MPa นอกจากนี้ มอร์ตาร์ 20GPF-5GPC มีกำลังอัดถึง 22.84 MPa สะท้อนถึงอิทธิพลของผงแก้วบดละเอียด (GPF) ที่เริ่มทำปฏิกิริยาเมื่อระยะเวลาบ่มนานขึ้น

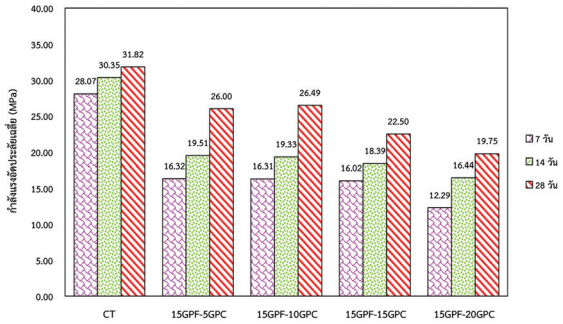
ที่อายุการบ่ม 28 วัน มอร์ตาร์ CT มีกำลังอัด 31.82 MPa โดยมอร์ตาร์ 5GPF-5GPC มีกำลังอัดสูงสุด 35.21 MPa ขณะที่มอร์ตาร์ 5GPF-15GPC และมอร์ตาร์ 10GPF-5GPC มีกำลังอัด 28.87 MPa และ 25.54 MPa ซึ่งแสดงถึงการพัฒนากำลังอัดที่เพิ่มขึ้นต่อเนื่องจากอายุ 14 วัน การเพิ่มขึ้นของกำลังอัดเป็นผลมาจาก 2 กลไก คือ ผงแก้วบดละเอียด (GPF) ที่เป็นวัสดุเติมเต็มที่ช่วยลดช่องว่างภายใน (Filler Effect) ทำให้โครงสร้างอัดแน่นและลดความพรุน ควบคู่กับปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) ที่ซิลิกาอสัณฐานใน GPF ทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) เกิดเป็น C-S-H เพิ่มเติม ทั้ง 2 กลไกนี้จึงช่วยให้มอร์ตาร์มีความทึบแน่นและรับแรงอัดได้สูงขึ้น



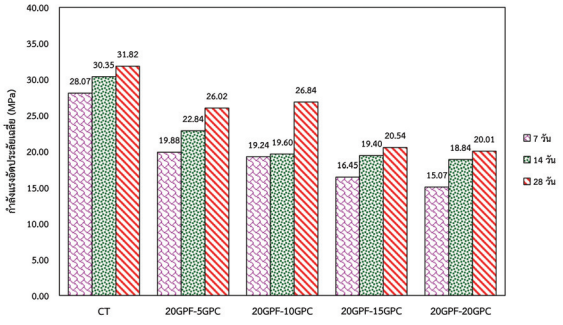
(ก) กำลังอัดของมอร์ตาร์ 5GPF
ที่ GPC ร้อยละ 5 ถึง 20



(ข) กำลังอัดของมอร์ตาร์ 10GPF
ที่ GPC ร้อยละ 5 ถึง 20



(ค) กำลังอัดของมอร์ตาร์ 15GPF
ที่ GPC ร้อยละ 5 ถึง 20

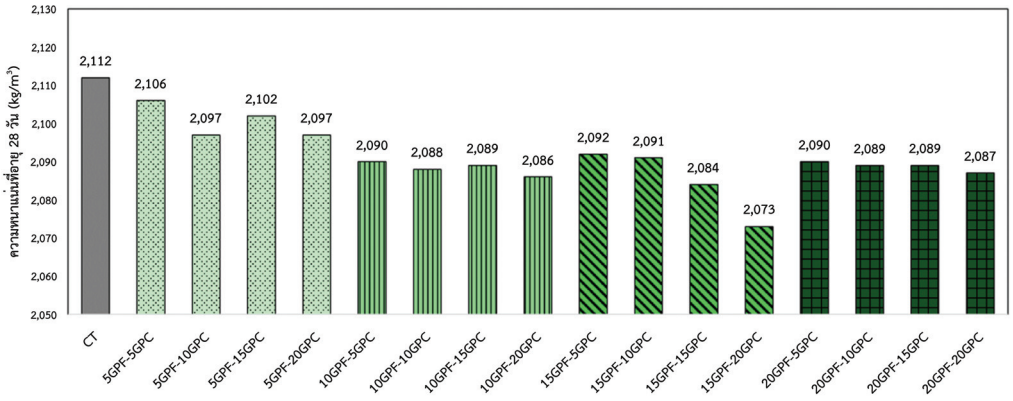


(ง) กำลังอัดของมอร์ตาร์ 20GPF
ที่ GPC ร้อยละ 5 ถึง 20

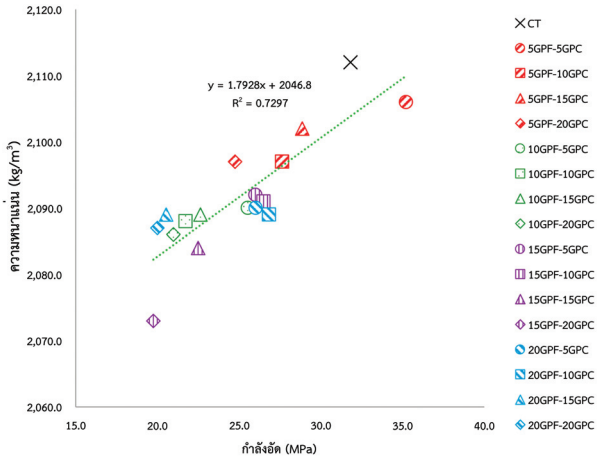
รูปที่ 6 กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุการบ่ม 7 14 และ 28 วัน

4. การทดสอบความหนาแน่น

ผลการทดสอบความหนาแน่นของมอร์ตาร์ที่อายุ 28 วัน พบว่ามอร์ตาร์ CT มีความหนาแน่นสูงสุดเท่ากับ 2,112 kg/m^3 ขณะที่มอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงแก้วบดละเอียด (GPF) และแทนที่ทรายด้วยผงแก้วบดหยาบ (GPC) ร่วมกัน มีค่าความหนาแน่นลดลงตามสัดส่วนการแทนที่ของผงแก้วที่เพิ่มขึ้น โดยมอร์ตาร์ 5GPF-5GPC มีความหนาแน่นเท่ากับ 2,106 kg/m^3 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับมอร์ตาร์ CT และมอร์ตาร์ 15GPF-20GPC มีความหนาแน่นต่ำสุดเท่ากับ 2,073 kg/m^3 การลดลงของความหนาแน่นดังกล่าวเป็นผลมาจากผงแก้วมีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าปูนซีเมนต์ ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยของ Bahar et al. (2025) นอกจากนี้เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและความหนาแน่นพบว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์และทรายด้วยผงแก้วบดละเอียดและหยาบ ตามลำดับ ส่งผลโดยตรงต่อการลดลงของความหนาแน่นรวม ซึ่งมีสาเหตุหลักมาจากความถ่วงจำเพาะของผงแก้วที่ต่ำกว่าปูนซีเมนต์และทรายประกอบกับปรากฏการณ์การเจือจางปูนซีเมนต์ เมื่อมีการแทนที่ด้วย GPF ในปริมาณสูง ทำให้เกิดปรากฏการณ์เจือจาง (Dilution Effect) เนื่องจากปริมาณปูนซีเมนต์ที่ลดลงส่งผลให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดได้น้อยลง ส่งผลให้การเกิด C-S-H ลดลงจนไม่สามารถเติมเต็มช่องว่างภายในโครงสร้างได้อย่างสมบูรณ์ จึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้กำลังอัดมีแนวโน้มลดลงตามความหนาแน่นที่ลดลง (รูปที่ 7 และ 8)



รูปที่ 7 ความหนาแน่นของมอร์ตาร์ที่อายุการบ่ม 28 วัน



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นและกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุการบ่ม 28 วัน

5. ผลการทดสอบความพรุนของมอร์ตาร์

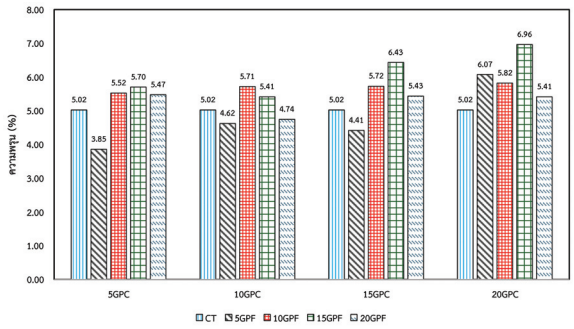
ผลการทดสอบความพรุนของมอร์ตาร์ดังรูปที่ 9 ซึ่งสอดคล้องกับผลกำลังอัด โดยที่อายุการบ่ม 28 วัน มอร์ตาร์ 5GPF-5GPC มีความพรุนต่ำสุดที่ร้อยละ 3.85 ส่งผลให้รับกำลังอัดได้สูงสุดที่ 35.21 MPa ความทึบแน่นที่เพิ่มขึ้นนี้เป็นผลจากกลไกการเติมเต็ม (Filler Effect) ของผงแก้วบดละเอียด (GPF) ที่ช่วยอุดช่องว่างร่วมกับปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) ที่สร้าง C-S-H เพิ่มเติม

ในทางกลับกันมอร์ตาร์ 15GPF-20GPC มีความพรุนสูงสุดถึงร้อยละ 6.96 และกำลังอัดลดลงเหลือ 19.75 MPa สาเหตุหลักเกิดจากปรากฏการณ์เจือจาง (Dilution Effect) ที่ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลง ทำให้ปริมาณ C-S-H หลักไม่เพียงพอที่จะอุดช่องว่าง ประกอบกับปัจจัยทางกายภาพของผงแก้วบดหยาบ (GPC) ทั้งรูปทรงเหลี่ยมมุมที่ขัดขวางการจัดเรียงตัว (Packing) จนเกิดช่องว่างอากาศ และลักษณะพื้นผิวซึ่งทำให้การยึดเหนี่ยวเชิงกลบริเวณรอยต่อกับซีเมนต์เพสต์ลดลง (รูปที่ 10)

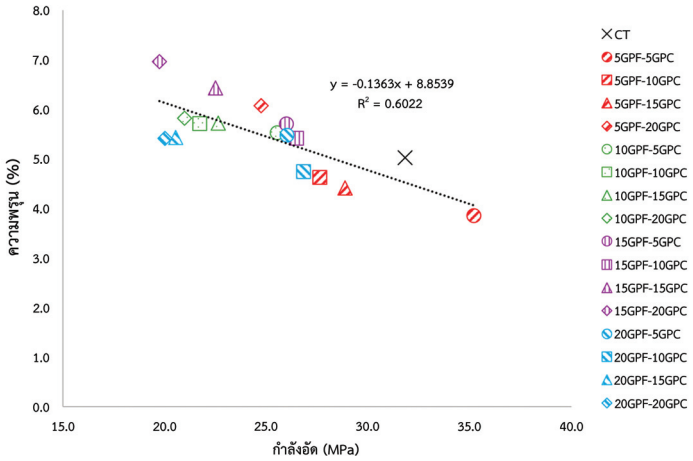
6. ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์

ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำ ดังรูปที่ 11 ซึ่งสอดคล้องกับความพรุนและกำลังอัด โดยที่อายุ 28 วัน มอร์ตาร์ 5GPF-5GPC มีการดูดซึมน้ำต่ำสุดที่ร้อยละ 1.60 และให้กำลังอัดสูงสุดที่ 35.21 MPa ผลลัพธ์ดังกล่าวเป็นผลมาจาก Filler Effect ของผงแก้วบดละเอียด (GPF) ที่เข้าไปแทรกอุดรูพรุนร่วมกับ Pozzolanic Reaction ที่สร้าง C-S-H เพิ่มเติม ทำให้โครงสร้างมีความทึบแน่นสูงขึ้นในทางกลับกัน เมื่อใช้ผงแก้วบดหยาบ (GPC) ในสัดส่วนที่สูง เช่น มอร์ตาร์ 15GPF-20GPC ค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 3.14 การลดลงของความทึบแน่นนี้เกิดจาก Dilution Effect ที่ปริมาณปูนซีเมนต์น้อยลงเนื่องจากการถูกแทนที่ในปริมาณมาก จนผลิตภัณฑ์ไฮเดรชันหลักลดลง ประกอบกับรูปทรงเหลี่ยมมุมของผงแก้วบดหยาบ (GPC) ไปขัดขวางการจัดเรียงตัว (Packing) ซึ่งทำให้เกิดช่องว่างภายในมอร์ตาร์มากขึ้น

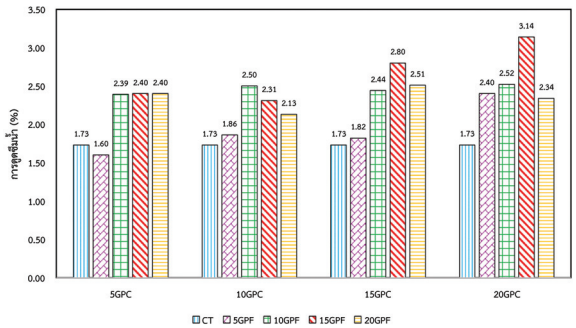
สอดคล้องกับแนวโน้มดังรูปที่ 12 ที่แสดงให้เห็นความสัมพันธ์เชิงลบอย่างชัดเจน โดยมอร์ตาร์ที่มีกำลังรับแรงอัดสูงจะมีแนวโน้มของการดูดซึมน้ำที่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ



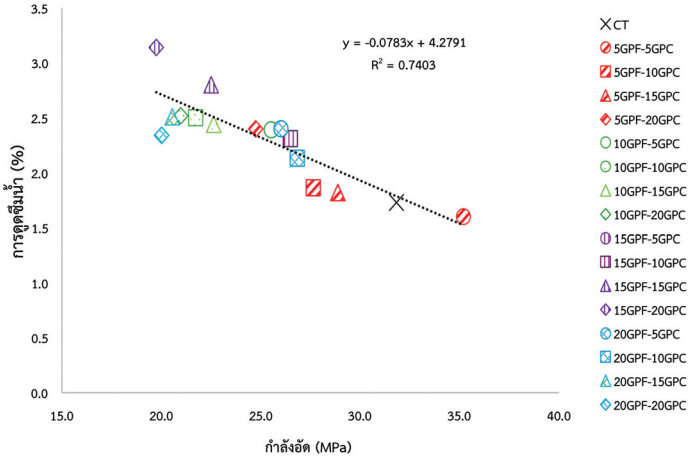
รูปที่ 9 ความพรุนของมอร์ตาร์ที่อายุการบ่ม 28 วัน



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ของความพรุนและกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุการบ่ม 28 วัน



รูปที่ 11 การดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ที่อายุการบ่ม 28 วัน



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ของการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์กับกำลังอัดที่อายุการบ่ม 28 วัน

สรุปผล

จากการศึกษาสมบัติทางกลและทางกายภาพของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของผงแก้ว โดยทำการศึกษาผลกระทบของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงแก้วบดละเอียด (GPF) และการแทนที่ทรายด้วยผงแก้วบดหยาบ (GPC) ร่วมกันในอัตราส่วนร้อยละ 5 10 15 และ 20 โดยน้ำหนัก สรุปผลการทดสอบได้ดังนี้

1. เมื่อปริมาณการแทนที่ด้วยผงแก้วเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้ค่าการไหลแผ่และความหนาแน่นของมอร์ตาร์มีค่าลดลงต่ำกว่ามอร์ตาร์ควบคุม โดยมอร์ตาร์มีค่าความหนาแน่นต่ำที่สุดที่อัตราส่วนผสม 15GPF-20GPC เนื่องจากความถ่วงจำเพาะของผงแก้วที่ต่ำกว่าปูนซีเมนต์ และรูปทรงอนุภาคที่มีเหลี่ยมมุมช่วยเพิ่มแรงเสียดทานระหว่างอนุภาค จึงเป็นข้อจำกัดที่ทำให้มอร์ตาร์ต้องการน้ำเพิ่มขึ้นเพื่อรักษาความสามารถในการทำงาน

2. กำลังอัดของมอร์ตาร์ 5GPF-5GPC ที่อายุการบ่ม 28 วัน มีค่าสูงสุดเท่ากับ 35.21 MPa อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ด้วยผงแก้วให้สูงขึ้น กำลังอัดกลับมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากการลดลงของปริมาณปูนซีเมนต์ (Dilution Effect) และลักษณะอนุภาคที่เป็นเหลี่ยมมุมและมีขอบคมของผงแก้วบดหยาบ (GPC) ที่ขัดขวางการจัดเรียงตัวของมวลรวม จึงเป็นข้อจำกัดสำคัญที่ทำให้ประสิทธิภาพการรับแรงลดลงเมื่อใช้ผงแก้วแทนที่ในปริมาณมาก

3. อัตราส่วนมอร์ตาร์ที่เหมาะสมที่สุด คือ มอร์ตาร์ 5GPF-5GPC เนื่องจากมีค่าความพรุนและการดูดซึมน้ำต่ำที่สุดเพียงร้อยละ 3.85 และ 1.60 โดยผงแก้วบดละเอียด (GPF) ทำหน้าที่เป็นวัสดุเติมเต็ม (Filler Effect) เข้าไปอุดช่องว่างระหว่างอนุภาคช่วยให้โครงสร้างจุลภาคมีความทึบแน่นและมีกำลังอัดที่สูงสุด

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย เป็นอย่างสูงที่ได้ให้ความอนุเคราะห์และสนับสนุนด้านเครื่องมือ วัสดุอุปกรณ์ ตลอดจนห้องปฏิบัติการเพื่อการทดสอบ ซึ่งมีส่วนสำคัญที่ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

References

Aliabdo, A.A., Abd Elmoaty, A.E.M. and Aboshama, A.Y. (2016). Utilization of Waste Glass Powder in the Production of Cement and Concrete. *Construction and Building Materials*, 124, 866-877. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.016

Bahar, A., Younsi, A., Hamami, A.E.A. and Bastidas-Arteaga, E. (2025). Effect of Recycled Waste Glass Color on the Properties of High-Volume Glass Powder Cement Pastes. *Results in Engineering*, 28. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.107910

Baikerikar, A., Mudalgi, S. and Ram, V.V. (2023). Utilization of Waste Glass Powder and Waste Glass Sand in the Production of Eco-Friendly Concrete. *Construction and Building Materials*, 377. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131078

Dong, W., Li, W. and Tao, Z. (2021). A Comprehensive Review on Performance of Cementitious and Geopolymeric Concretes with Recycled Waste Glass as Powder, Sand or Cullet. *Resources, Conservation and Recycling*, 172. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105664

Huang, D., Sun, P., Gao, P., Liu, G., Wang, Y. and Chen, X. (2021). Study on the Effect and Mechanism of Alkali-Silica Reaction Expansion in Glass Concrete. *Sustainability*, 13(19). https://doi.org/10.3390/su131910618

Li, Q., Qiao, H., Li, A. and Li, G. (2022). Performance of Waste Glass Powder as a Pozzolanic Material in Blended Cement Mortar. *Construction and Building Materials*, 324. https://doi. org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126531

Muhedin, D.A. and Ibrahim, R.K. (2023). Effect of Waste Glass Powder as Partial Replacement of Cement & Sand in Concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 19. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02512

Navaneetha, E., Rao, P.N. and Bahurudeen, A. (2025). Development of Sustainable and Durable Ternary Blended Concrete Using Sugarcane Bagasse Ash and Glass Powder. *Construction and Building Materials*, 466. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.140329

Office of Natural Resources and Environmental Policy and Planning. (2022). *Thailand's Fourth National Communication*. https://unfccc.int/sites/default/files/resource/Thailand%20NC4_22122022.pdf

Phoophool, P. (2015). *Mechanical Behavior of Cement Paste Containing Glass Dust* [Master's thesis, Thammasat University]. Thammasat University Theses. https://ethesisarchive.library.tu.ac.th/thesis/2015/TU_2015_5310031538_3992_3037.pdf

Pollution Control Department. (2025). *Thailand Municipal Solid Waste Disposal Site Status Report, 2024*. https://www.pcd.go.th/wp-content/uploads/2025/06/pcdnew-2025-06-09_02-33-11_404990.pdf

Sethabutr, C. (2003). *Concrete Technology* (11th ed). CPAC Concrete Academy.

Sharifi, Y., Afshoon, I., Firoozjaei, Z. and Momeni, A. (2016). Utilization of Waste Glass Micro-particles in Producing Self-Consolidating Concrete Mixtures. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 10, 337-353. https://doi.org/10.1007/s40069-016-0141-z

Thaipum, S. and Srisoros, W. (2013). Expansion and Mechanical Properties of ASR-Affected Concrete in Thailand. *The 18th National Convention on Civil Engineering (NCCE-18)*, MAT206-210.

Thatuchirangkul, N., Jitchaiyaphum, K., Maythathirut, R., Tiyasangthong, S., Yoosuk, P. and Suksiripattanapong, C. (2025). Engineering and Microstructure Properties of Cellular Lightweight Mortar from Recycled Glass mixed with Alkali-activated Fly Ash. *Research on Modern science and Utilizing Technological Innovation Journal (RMUTI Journal)*, 18(2), 103-116. https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/rmutijo/article/view/260786 (in Thai)

United Nations Environment Programme. (2022). *Sand and Sustainability 10 Strategic: Recommendations to Avert a Crisis*. https://unepgrid.ch/en/resource/2022SAND

Wangbooncong, K. (2022). *Optimum Proportion of Municipal Waste Ashes and Biomass Ashes on Mechanical and Durable Properties of Mortars* [Master's thesis, Rajamangala University of Technology Srivijaya]. Institutional Repository @ RUTS. https://www.repository.rmutsv.ac.th/handle/123456789/3970

Zheng, K. (2016). Pozzolanic Reaction of Glass Powder and Its Role in Controlling Alkali-Silica Reaction. *Cement and Concrete Composites*, 67, 30-38. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.12.008

การพัฒนาชิ้นงานดินปั้นรักษ์โลกจากเปลือกหอยเหลือทิ้ง: อิทธิพลของสารเคลือบผิวที่มีต่อสมบัติทางกายภาพและความคงทน

Development of Eco-Friendly Shell-Based Clay Products: Influence of Surface Coatings on Physical Properties and Durability

ภัทรา ศรีสุโข[1] วิทวัส สิงห์สังข์[1*] สุรพงษ์ ปัญญาทา[1] อนุรักษ์ รอดบำรุง[1] ภัทรบดี พิมพ์กิ[1] และกรกนก สนิทการ[1]

Pathra Srisukho[1] Witawat Singsang[1*] Surapong Panyata[1] Anurak Rodbumrung[1] Pattarabordee Pimki[1] and Kornkanok Sanitgan[1]

Received: *April 7, 2026;* ***Revised:*** *June 23, 2026;* ***Accepted:*** *June 26, 2026*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพและความคงทนของชิ้นงานดินปั้นรักษ์โลกจากเปลือกหอยเหลือทิ้ง โดยใช้สารเคลือบผิวที่แตกต่างกัน เพื่อแก้ปัญหาผลิตภัณฑ์เครื่องประดับและของที่ระลึกจากแป้งดินปั้นที่ไม่ทนทานต่อความชื้นและเกิดเชื้อราได้ง่าย วิธีการดำเนินงานเริ่มจากการเตรียมดินปั้นที่มีส่วนผสมของแป้งข้าวเหนียว แป้งข้าวโพด และผงเปลือกหอยแมลงภู่ นำมาขึ้นรูปและอบแห้งก่อนเคลือบผิวโดยใช้สารเคลือบผิว ได้แก่ อะคริลิกแลคเกอร์ เรซินอิพอกซี และโพลิยูรีเทน จากนั้นทดสอบค่าสี มุมสัมผัสการเปียกผิว และทดสอบความคงทนผ่านการจำลองการใช้งานจริง ผลการวิจัยพบว่าสารเคลือบผิวทั้งสามชนิดช่วยเพิ่มมุมสัมผัสของน้ำบนพื้นผิวชิ้นงาน ทำให้การเปียกผิวลดลง โดยชิ้นงานที่เคลือบโพลิยูรีเทนมีมุมสัมผัสสูงสุดที่ 86 องศา แสดงสมบัติการเปียกผิวได้น้อยที่สุด ขณะที่การเคลือบโพลิยูรีเทนส่งผลให้ค่าความสว่างของสี (L*) ลดลงเล็กน้อย ทำให้ชิ้นงานดูมีสีเข้มขึ้นเมื่อเทียบกับสารเคลือบชนิดอื่น แต่สามารถลดความเสียหายของชิ้นงานที่ผ่านการทำความสะอาดไปได้ดีกว่าชิ้นงานที่ไม่เคลือบถึง 40 % ที่เวลาทำความสะอาดภายใต้คลื่นเสียงความถี่สูง 15 นาที ดังนั้นสารเคลือบผิวช่วยยกระดับความคงทนต่อความชื้นและรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ดินปั้นจากเปลือกหอยได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ : เปลือกหอยเหลือทิ้ง; ดินปั้น; การเคลือบผิว; ความทนทานต่อน้ำ; การจัดการของเสียชุมชน

[1] *คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี*

[1] *Faculty of Engineering and Industrial Technology, Rambhai Barni Rajabhat University*

[*] *Corresponding Author, Tel. 08 6163 5411, E - mail: witawat.s@rbru.ac.th*

Abstract

This research aims to investigate the physical properties and durability of eco-friendly clay sculptures incorporating waste shells using different surface coatings. The study addresses the vulnerability of flour-based clay jewelry and souvenirs to moisture damage and fungal growth. The experimental procedure began with preparing clay specimens from a mixture of glutinous rice flour, cornstarch, and mussel shell powder, followed by molding, drying, and surface coating with acrylic lacquer, epoxy resin, and polyurethane. The specimens were subsequently evaluated for color properties, surface wettability via contact angle measurements, and durability through simulated practical use. The results indicated that all three surface coatings effectively increased the water contact angle on the specimen surfaces, thereby reducing wettability. Polyurethane-coated specimens exhibited the highest contact angle of 86 degrees, demonstrating the lowest wettability. Although the polyurethane coating slightly decreased the lightness value (L*), resulting in a darker appearance compared to other coatings, it significantly enhanced durability by reducing specimen damage by 40 % after 15 minutes of cleaning under ultrasonic waves compared to uncoated samples. Consequently, the application of surface coatings effectively improves moisture resistance and preserves the quality of shell-based clay products.

Keywords: Waste Shells; Clay Sculpture; Surface Coating; Water Resistance; Community-Based Waste Management

บทนำ

ชุมชนบ้านน้ำเชี่ยว จังหวัดตราด เป็นพื้นที่ที่มีความโดดเด่นเชิงภูมิรัฐศาสตร์และพหุวัฒนธรรม มีวิถีชีวิตผูกพันอย่างแนบแน่นกับระบบนิเวศป่าชายเลนและการประมงพื้นบ้าน จนสามารถพัฒนาเป็นแหล่งท่องเที่ยวได้ อย่างไรก็ตาม การขยายตัวของกิจกรรมทางเศรษฐกิจและการบริโภคได้ก่อให้เกิดขยะจากเศษเปลือกหอยจำนวนมหาศาล โดยเฉพาะเปลือกหอยแมลงภู่และหอยเชลล์ ซึ่งกลายเป็นภาระในการจัดการขยะของท้องถิ่นและส่งผลกระทบต่อทัศนียภาพเชิงนิเวศ แม้การกำจัดทิ้งจะสามารถทำได้แต่เป็นวิธีที่มีค่าใช้จ่ายและขาดผู้รับภาระในพื้นที่ ดังนั้น การเปลี่ยนของเสียเปลือกหอยให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าจึงเป็นสิ่งที่ชุมชนต้องการ

เมื่อพิจารณาเปลือกหอยจะพบว่า องค์ประกอบหลักของเปลือกหอยคือ สารประเภทแคลเซียมคาร์บอเนต โดยมีแคลเซียมฟอสเฟต แมกนีเซียมคาร์บอเนต แมกนีเซียมฟอสเฟต แมกนีเซียมซิลิเกต ผสมอยู่ด้วยในสัดส่วนที่แตกต่างกันตามชนิดและแหล่งของเปลือกหอย ซึ่งสารเหล่านี้ทำให้วัสดุมีความแข็ง ทนทานและมีผลต่อความมันวาวด้วย (Meiqi et al., 2023) ดังนั้น เปลือกหอยเหลือทิ้งจึงถูกสนใจนำไปศึกษาในการพัฒนาเป็นเครื่องประดับ เช่น ในงานวิจัยของ Srisukho et al. (2023) ได้พัฒนาเครื่องประดับดินปั้น โดยการนำเปลือกหอยแมลงภู่บดผสมลงไปในแป้งดินปั้นที่มีส่วนผสมหลักเป็นแป้งข้าวเหนียว โดยพบว่าการเพิ่มส่วนผสมของเปลือกหอยแมลงภู่เข้าไปในดินปั้นมีผลทำให้สีของดินปั้นมีสีน้ำตาลมากขึ้น มีความเรียบเนียนน้อยลง แต่มีความมันวาวคล้ายเครื่องประดับแบบมุกมากขึ้น จนสามารถนำส่วนผสมของดินปั้นที่เหมาะสมไปพัฒนาเป็นของที่ระลึกสำหรับจำหน่ายได้ เช่น ต่างหู หรือ เข็มกลัด เป็นต้น นอกจากนี้ทางคณะผู้วิจัย (Srisukho et al., 2024) ได้พัฒนางานวิจัยด้วยการนำเปลือกหอยเชลล์ฝาแดงมาผสมกับแป้งดินปั้นที่มีส่วนประกอบของแป้งข้าวเหนียวและแป้งข้าวโพด เพื่อพัฒนาเป็นเครื่องประดับ จากผลการวิจัยพบว่า ดินปั้นที่ได้จะมีสีชมพูโทนอ่อน มีความอ่อนนิ่ม ง่ายต่อการกดพิมพ์ขึ้นรูปจึงสามารถนำไปต่อยอดเป็นเครื่องประดับที่มีเอกลักษณ์เฉพาะตัวได้ดี และจัดทำเป็นผลิตภัณฑ์ของชุมชนบ้านน้ำเชี่ยวภายใต้ชื่อผลิตภัณฑ์ หอยคราฟต์ แม้เครื่องประดับและของที่ระลึกของผลิตภัณฑ์หอยคราฟต์จะได้รับการตอบรับจากผู้บริโภคค่อนข้างดี แต่เมื่อนำไปใช้งานจริงพบว่ามีข้อจำกัด

ในการใช้งานที่ต้องสัมผัสกับน้ำ หรือความชื้น เนื่องจากส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์ทำมาจากแป้งข้าวเหนียวและแป้งข้าวโพดเป็นหลักจึงไม่ทนทานต่อน้ำและเชื้อราเมื่อสัมผัสกับน้ำหรือทำความสะอาด ดังนั้น การพัฒนาผลิตภัณฑ์ให้ทนทานต่อน้ำหรือความชื้นจึงมีความสำคัญต่อการใช้งานผลิตภัณฑ์เป็นอย่างมาก

วิธีการพัฒนาผลิตภัณฑ์เครื่องประดับให้มีความทนทานต่อน้ำมักนิยมใช้การเคลือบผิวด้วยสารจำพวกโพลิเมอร์ เช่น อะคริลิกแลคเกอร์ (Matcan-Lîsenco, 2025) เรซินอีพอกซี (Adelson, 2008) หรือโพลิยูรีเทน (Chattopadhyay and Raju, 2007) เป็นต้น เนื่องจากมีคุณสมบัติทนทานต่อน้ำ มีสีใส ไม่บดบังสีของผลิตภัณฑ์ และใช้งานง่ายด้วยการพ่นหรือทาลงบนชิ้นงาน (Yang et al., 2001; Tracton, 2006) อย่างไรก็ตาม ผู้ผลิตได้พยายามเคลือบผลิตภัณฑ์ด้วยการพ่นสเปรย์อะคริลิกแลคเกอร์ แต่พบว่าผลิตภัณฑ์ยังคงเกิดการสูญเสียสภาพ หรือเนื้อของผลิตภัณฑ์หายไปเมื่อถูกน้ำจากการทำความสะอาด นอกจากนี้ ความชื้นที่สะสมยังส่งผลให้เกิดเชื้อราบนผลิตภัณฑ์ได้อีกด้วย ดังนั้น การพัฒนาความคงทนของเครื่องประดับดินปั้นจากเปลือกหอยเหลือทิ้งด้วยสารเคลือบผิวชนิดอื่น ๆ จึงเป็นประเด็นสำคัญในการรักษาคุณภาพของสินค้าและความสามารถในการแข่งขันของผลิตภัณฑ์จากชุมชนบ้านน้ำเชี่ยว จังหวัดตราด ทั้งนี้เมื่อศึกษางานวิจัยของ Du et al. (2025) พบว่าสารเคลือบผิวจะส่งผลต่อลักษณะทางกายภาพ เช่น สี และความคงทนต่อการใช้งานของผลิตภัณฑ์ที่ถูกเคลือบ ซึ่งเป็นปัจจัยที่ต้องได้รับการศึกษา

สำหรับในงานวิจัยนี้ คณะผู้วิจัยจะศึกษาผลของชนิดสารเคลือบป้องกันน้ำสำหรับผลิตภัณฑ์เครื่องประดับดินปั้นที่มีส่วนผสมของเปลือกหอยเหลือทิ้งจากชุมชนบ้านน้ำเชี่ยว จังหวัดตราด ที่มีต่อสีของผลิตภัณฑ์ มุมสัมผัสของผลิตภัณฑ์และความคงทนของสารเคลือบผิวจะถูกศึกษา โดยสารเคลือบผลิตภัณฑ์ที่ศึกษาแตกต่างกันสามชนิด ได้แก่ อะคริลิกแลคเกอร์ อิพอกซีเรซิน และโพลิยูรีเทน เพื่อพัฒนาเป็นเครื่องประดับดินปั้นจากเปลือกหอยเหลือทิ้งที่มีความคงทนต่อน้ำมากยิ่งขึ้น

วิธีดำเนินงานวิจัย

1. การเตรียมดินปั้นจากเปลือกหอยเหลือทิ้ง

เปลือกหอยแมลงภู่ที่ผ่านการทำความสะอาดและบดเป็นผงแล้วปริมาณ 80 กรัม จะถูกนำมาผสมกับแป้งข้าวโพด (ตราเหรียญทองคู่) 10 กรัม แป้งข้าวเหนียว (ตราช้างสามเศียร) 10 กรัม สารกันบูดชนิดโซเดียมเบนโซเอต (บริษัทอาร์แอนด์บีฟู้ดซัพพลาย จำกัด) 0.4 กรัม สารกันราแคลเซียมโปรปิโอเนต (บริษัทเบสท์โอเดอร์จำกัด) 0.5 กรัม เบบี้ออยล์ (ตราจอห์นสัน) 0.8 กรัม และกาวลาเท็กซ์ (ตราทีโอเอ) 40 กรัม จากนั้นนวดจนเนื้อดินมีความเป็นเนื้อเดียวกันและไม่เกาะติดมือ แล้วจึงนำไปหุ้มด้วยพลาสติกห่ออาหารไม่ให้สัมผัสอากาศเป็นเวลา 1 คืน

2. การเตรียมและเคลือบชิ้นงานดินปั้นจากเปลือกหอยเหลือทิ้ง

นำดินปั้นจากเปลือกหอยเหลือทิ้งที่เตรียมไว้มาขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบด้วยการกดอัดในแม่พิมพ์ซิลิโคนขนาด 0.5 x 0.5 x 0.5 เซนติเมตร โดยชิ้นงานแต่ละชิ้นจะมีปริมาณดินปั้นที่เตรียมไว้ 1.8 กรัม จากนั้นนำชิ้นงานไปอบด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 ชั่วโมง เมื่อนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ ชิ้นงานจะถูกขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 320 600 800 และ 1,000 ตามลำดับ หลังจากนั้น จึงนำชิ้นงานไปเคลือบด้วยสารเคลือบที่แตกต่างกันสามชนิด ได้แก่ อะคริลิกแลคเกอร์ชนิดเคลือบเงา (ชนิด C-75, ตรา Leyland) อิพอกซีเรซิน (ตรา Pop Craft) และโพลิยูรีเทน (ตรารุ่งอาร์ท)

สำหรับขั้นตอนการเคลือบผิวชิ้นงานทดสอบด้วยสารเคลือบแต่ละชนิดจะมีวิธีที่แตกต่างกัน ในกรณีของอะคริลิกแลคเกอร์ (Acrylic Coating) ชิ้นงานจะถูกเคลือบด้วยวิธีเดิมที่ชุมชนใช้มาก่อนคือ การพ่นสเปรย์อะคริลิกแลคเกอร์ห่างชิ้นงานประมาณ 1 ฟุต จำนวน 3 รอบ โดยแต่ละรอบห่างกัน 10 นาที ในขณะที่การเคลือบด้วยอิพอกซีเรซิน (Epoxy Coating) และโพลิยูรีเทน (Urethane Coating) ซึ่งมีลักษณะเป็นของเหลวจะใช้พู่กันทาเคลือบชิ้นงานจำนวน 3 รอบ แต่ละรอบห่างกัน 10 นาที ชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบแล้วจะถูกปล่อยให้แห้งในอากาศเป็นเวลา 5 ชั่วโมง

3. การทดสอบสมบัติของชิ้นงานดินปั้นจากเปลือกหอยเหลือทิ้ง

สีของชิ้นงานดินปั้นจากเปลือกหอยเหลือทิ้งจะถูกทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์สีดิจิทัล รุ่น LS171 (Linshang) ที่มีรูรับแสง 8 มิลลิเมตร แหล่งกำเนิดแสง D65 มุมมอง 10 องศา แสดงผลด้วยค่า L* a* b* โดยชิ้นงานทดสอบ

เป็นแผ่นวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้ว หนา 3 มิลลิเมตร ค่าความแตกต่างของสีจะพิจารณาได้จากค่า Delta E ดังสมการที่ (1)

$$Delta\ E = \sqrt{\left(L_1^* - L_2^*\right)^2 + \left(a_1^* - a_2^*\right)^2 + \left(b_1^* - b_2^*\right)^2} \quad (1)$$

เมื่อ L_1^*, a_1^*, b_1^* คือค่าพิกัดสีของชิ้นงานทดสอบที่เคลือบผิว และ L_2^*, a_2^*, b_2^* คือค่าพิกัดสีของชิ้นงานที่ไม่เคลือบผิว

มุมสัมผัสของหยดน้ำกับชิ้นงานทดสอบจะเป็นค่าที่บอกพฤติกรรมการเปียกผิวของวัสดุได้เป็นอย่างดี ในงานวิจัยนี้การวัดมุมสัมผัสของชิ้นงานดินปั้นจากเปลือกหอยเหลือทิ้งที่ไม่ผ่านการเคลือบ และชิ้นงานดินปั้นจากเปลือกหอยเหลือทิ้งที่ผ่านการเคลือบด้วยวัสดุต่างกันสามชนิดจะได้รับการศึกษาโดยการหยดน้ำลงบนผิวชิ้นงานและบันทึกภาพของหยดน้ำบนผิวชิ้นงานไว้ หลังจากนั้นใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยสำหรับการคำนวณวัดค่ามุมสัมผัสระหว่างผิวชิ้นงานกับหยดน้ำ



รูปที่ 1 ตัวอย่างชิ้นงานในการทดสอบความคงทนของสารเคลือบผิวกันน้ำ

สำหรับความคงทนของสารเคลือบผิวต่อการใช้งาน ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบการทดลองโดยจำลองจากสภาพการใช้งานจริงที่เครื่องประดับจะถูกทำความสะอาดด้วยเครื่องทำความสะอาดคลื่นเสียงความถี่สูง (Ultrasonic Cleaner) โดยในการทดสอบชิ้นงานเครื่องประดับจากเปลือกหอยที่ไม่ได้เคลือบผิว และชิ้นงานที่เคลือบผิวกันน้ำด้วยสารต่างกัน 3 ชนิด อย่างละ 3 ชิ้น ถูกเตรียมเป็นชิ้นงานทดสอบรูปลูกบาศก์ขนาด 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร ดังรูปที่ 1 นำชิ้นงานทดสอบจุ่มแช่อยู่ในเครื่องทำความสะอาดด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงที่มีน้ำกลั่นบรรจุอยู่ 1 ลิตร โดยระยะเวลาในการทำความสะอาดชิ้นงาน ตั้งแต่ 0 - 15 นาที ทั้งนี้ชั่งน้ำหนักชิ้นงานแห้งทุกชิ้นก่อนและหลังการทดสอบการทำความสะอาด เพื่อนำมาคำนวณร้อยละการลดลงของน้ำหนักชิ้นงาน (W) ดังสมการที่ (2)

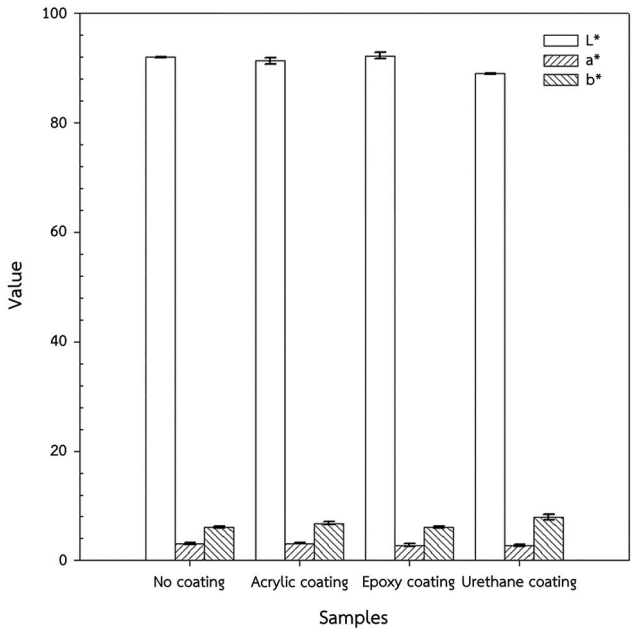
$$\Delta W = \left(\frac{W_1 - W_2}{W_1}\right) \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ W_1 และ W_2 คือ น้ำหนักชิ้นงานก่อน และหลังการทดสอบ

นอกจากนี้ชิ้นงานที่ผ่านการทำความสะอาดด้วยเครื่องทำความสะอาดคลื่นเสียงความถี่สูงแล้วจะถูกนำมาวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิวชิ้นงาน ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ยี่ห้อ FEI รุ่น Quanta 250 ที่กำลังขยาย 150 เท่า เพื่อพิจารณาความแตกต่างของลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบด้วยวัสดุต่างชนิดกัน ทั้งนี้ก่อนการวิเคราะห์ชิ้นงานจะถูกนำไปฉาบผิวด้วยทองคำ เพื่อเพิ่มสภาพการนำไฟฟ้าให้เหมาะสมต่อการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

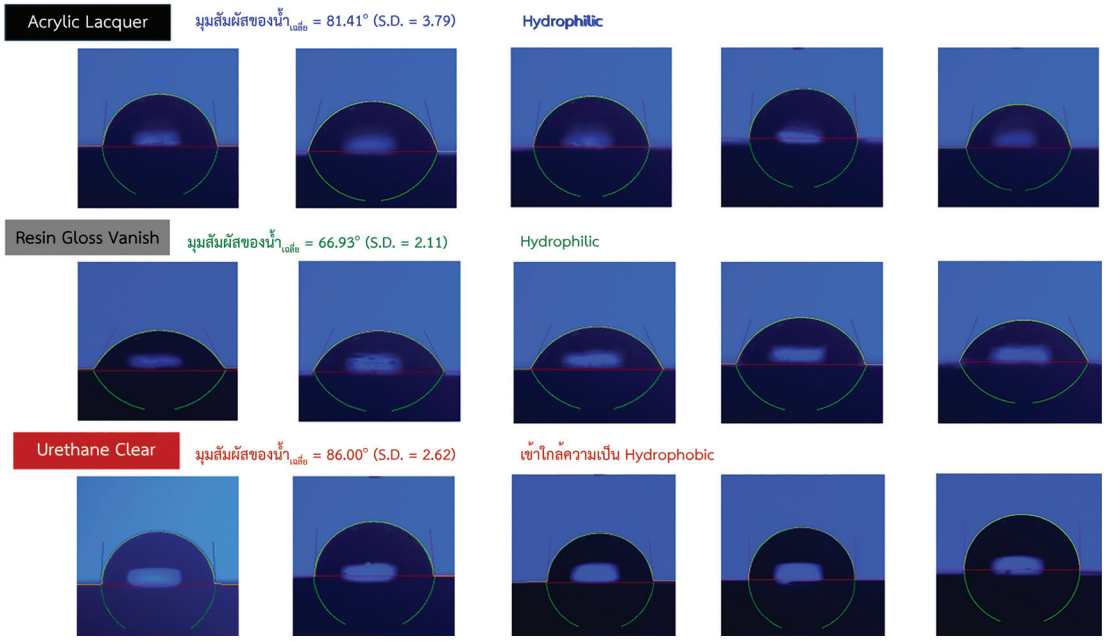
เมื่อนำชิ้นงานดินปั้นจากเปลือกหอยเหลือทิ้งไปวัดค่าสีด้วยเครื่องวิเคราะห์สีดิจิทัลสำหรับทดสอบสี จะได้ผลค่าพิกัดสีในระบบ CIE L* a* b* ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ค่าพิกัดสีของชิ้นงานดินปั้นจากเปลือกหอยเหลือทิ้งแบบไม่เคลือบผิว (No Coating) ชิ้นงานดินปั้นจากเปลือกหอยเหลือทิ้งแบบเคลือบผิวกันน้ำด้วยอะคริลิกแลคเกอร์ (Acrylic Coating) เรซินอิพอกซี (Epoxy Coating) และโพลิยูรีเทน (Urethane)

ผลกระทบของสารเคลือบผิวที่มีต่อสีของชิ้นงานสามารถสังเกตได้จากค่าพิกัดสีในระบบ CIE L* a* b* ดังรูปที่ 2 ซึ่งจะสังเกตได้ว่าชิ้นงานที่ถูกเคลือบผิวจะมีค่าพิกัดสีเปลี่ยนแปลงไปอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ไม่เคลือบผิว โดยค่าความแตกต่างของสีสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (1) ผลจากการคำนวณพบว่าการเคลือบผิวด้วยโพลิยูรีเทนจะมีค่าความแตกต่างของสีมากที่สุดในกลุ่มของสารเคลือบที่ใช้ในงานวิจัยนี้ โดยมีค่าเท่ากับ 5.96$\pm$0.56 ส่วนการเคลือบด้วยอะคริลิกแลคเกอร์ มีค่าความแตกต่างของสีเท่ากับ 3.86$\pm$.23 และการเคลือบด้วยเรซินอิพอกซีจะมีค่าความแตกต่างของสีเท่ากับ 3.15$\pm$0.25 จากข้อมูลในงานวิจัยของ Lee (2005) ระบุว่าหากชิ้นงานมีค่าความแตกต่างของสีไม่เกิน 1.0 จะแยกความแตกต่างของสีด้วยสายตามนุษย์ไม่ได้ แต่ถ้าค่าความแตกต่างของสีมีค่าอยู่ในช่วง 2.0 - 10.0 จะสังเกตความแตกต่างได้ด้วยตาเปล่า ดังนั้น สารเคลือบผิวทั้งสามชนิดทำให้สีของชิ้นงานดินปั้นเปลี่ยน

เมื่อพิจารณาผลกระทบของสารเคลือบผิวที่มีต่อความสามารถในการดูดซับน้ำจะใช้ข้อมูลจากการทดสอบวัดมุมสัมผัสมาพิจารณา โดยหยดน้ำจะถูกหยดลงบนชิ้นงาน สภาวะละ 5 ชิ้นงาน และถ่ายภาพเพื่อใช้ในการคำนวณหามุมสัมผัสกับวัสดุ ลักษณะของหยดน้ำบนพื้นผิวที่มีสารเคลือบผิวที่แตกต่างกันดังรูปที่ 3 และค่าเฉลี่ยมุมสัมผัสของชิ้นงานดินปั้นจากเปลือกหอยเหลือทิ้งที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารเคมีแตกต่างกันสามชนิดถูกนำเสนอดังตารางที่ 1



รูปที่ 3 ภาพถ่ายหยดน้ำบนพื้นผิวชิ้นงานดินปั้นจากเปลือกหอยเหลือทิ้งที่มีสารเคลือบผิวแตกต่างกัน

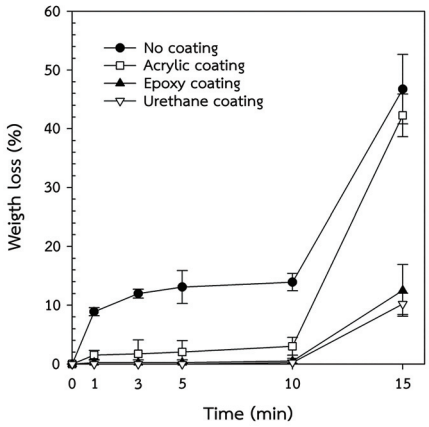
จากรูปที่ 3 จะสังเกตรูปร่างของหยดน้ำและมุมสัมผัสระหว่างหยดน้ำกับพื้นผิววัสดุที่มีสารเคลือบชนิดต่าง ๆ ได้อย่างชัดเจนว่ามีความแตกต่างกัน โดยชิ้นงานที่เคลือบผิวด้วยแลคเกอร์ หรือโพลิยูรีเทนจะทำให้หยดน้ำยังคงรูปร่างเป็นหยดวงกลมได้อยู่ ในขณะที่หยดน้ำบนชิ้นงานที่เคลือบผิวด้วยแลคเกอร์จะมีการแผ่ออกของหยดน้ำบนผิววัสดุมากกว่า โดยค่ามุมสัมผัสดังตารางที่ 1 จะยืนยันลักษณะดังกล่าวได้อย่างชัดเจน โดยค่ามุมสัมผัสของชิ้นงานที่เคลือบผิวด้วยเรซินอิพอกซีจะมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 66.93 องศา ในขณะที่ชิ้นงานที่เคลือบด้วยแลคเกอร์ และโพลิยูรีเทนจะมีค่ามุมสัมผัสที่ 81.41 องศา และ 86.00 องศา ค่ามุมสัมผัสสามารถบอกลักษณะของสมบัติการดูดซับน้ำของวัสดุได้ โดยที่วัสดุที่มีมุมสัมผัสน้อยกว่า 90 องศา จะมีการเปียกผิวน้ำได้ดี จัดเป็นวัสดุที่มีความชอบน้ำ (Hydrophilic Materials) แต่ถ้ามุมสัมผัสมากกว่า 90 องศา วัสดุนั้นจะมีความไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic Materials) และน้ำจะไม่เปียกผิววัสดุ ดังนั้น เมื่อพิจารณาจากค่ามุมสัมผัสของชิ้นงานตัวอย่างในงานวิจัยนี้จะพบว่าชิ้นงานที่เคลือบผิวด้วยเรซินอิพอกซีมีความสามารถในการเปียกผิวสูงที่สุด (ค่ามุมสัมผัสต่ำสุด) รองลงมาคือ ชิ้นงานที่เคลือบด้วยแลคเกอร์ และโพลิยูรีเทน

จากการศึกษาพบว่าคุณสมบัติความชอบน้ำ-ไม่ชอบน้ำดังกล่าว สอดคล้องกับองค์ประกอบทางเคมีของสารเคลือบผิว สารเคลือบผิวเรซินอีพอกซีมีหมู่ฟังก์ชันประเภทไฮดรอกซิล (-OH) และหมู่กรดคาร์บอกซิลิก (-COOH) ซึ่งมีความเป็นขั้วสูง และเกิดพันธะไฮโดรเจนได้มาก จึงสามารถดึงดูดโมเลกุลของน้ำที่มีขั้วสูงได้ดี ทำให้มีการเปียกผิวมากที่สุด (Pham and Marks, 2005) ในขณะที่สารเคลือบผิวจากแลคเกอร์อะคริลิคจะมีสารประกอบที่มีหมู่ฟังก์ชันของคาร์บอนิล (C = O) เป็นองค์ประกอบ ทำให้โมเลกุลมีขั้วสามารถดึงดูดน้ำได้ (Du et al., 2025) ในส่วนของสารเคลือบผิวที่มีโพลิยูรีเทนเป็นองค์ประกอบจะมีหมู่ฟังก์ชันเอไมด์ (-NH-CO-) ในโครงสร้างหลักทำให้โมเลกุลมีขั้วเล็กน้อย จึงสามารถสร้างแรงยึดเหนี่ยวกับโมเลกุลของน้ำได้เช่นกัน (Zafar and Sharmin, 2012) อย่างไรก็ตาม การใช้โพลิยูรีเทนเคลือบผิวชิ้นงานดินปั้นจากเปลือกหอยเหลือทิ้งมีแนวโน้มในการป้องกันการดูดซับน้ำของชิ้นงานดินปั้นมากที่สุด

ตารางที่ 1 ค่ามุมสัมผัสระหว่างหยดน้ำและพื้นผิวชิ้นงานดินปั้นจากเปลือกหอยเหลือทิ้งที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบผิวแตกต่างชนิดกัน

ชนิดสารเคลือบ	ค่าเฉลี่ยมุมสัมผัสน้ำ (°)	องค์ประกอบทางเคมีหลัก	แนวโน้มสมบัติ	ความสามารถในการเปียกผิว
เรซินอีพอกซี	66.93 (S.D. = 2.11)	มีหมู่ Polar (-OH, -COOH)	Hydrophilic	สูงสุด
อะคริลิกแลคเกอร์	81.41 (S.D. = 3.79)	มีหมู่ C = O, $-CH_3$ (บางส่วนโพลาร์)	Hydrophilic ปานกลาง	ปานกลาง
โพลิยูรีเทน	86.0 (S.D. = 2.62)	มีหมู่ -NH-CO- และ $-CH_3$ (ไม่ชอบน้ำมากกว่า)	เข้าใกล้ Hydrophobic	ต่ำสุด

ผลการทดสอบความคงทนของสารเคลือบผิวกันน้ำสำหรับเครื่องประดับจากเปลือกหอยผ่านการจำลองการทำความสะอาดชิ้นงานด้วยเครื่องทำความสะอาดคลื่นเสียงความถี่สูง ในระยะเวลาตั้งแต่ 0 - 15 นาที สามารถพิจารณาได้จากความสัมพันธ์ของร้อยละน้ำหนักของชิ้นงานที่ลดลง และระยะเวลาทำความสะอาด ดังรูปที่ 4 ซึ่งจะพบว่าเมื่อถูกทำความสะอาดด้วยเครื่องทำความสะอาดคลื่นเสียงความถี่สูงเป็นเวลาตั้งแต่ 1 - 15 นาที ชิ้นงานที่ไม่ผ่านการเคลือบผิวจะมีการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นงานโดยเฉลี่ย ประมาณร้อยละ 10 - 50 ของน้ำหนักเริ่มต้น ในขณะที่ชิ้นงานที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบผิวประเภท แลคเกอร์จะมีน้ำหนักชิ้นงานลดลงเฉลี่ยร้อยละ 1.5 - 42 ของน้ำหนักเริ่มต้น ส่วนชิ้นงานที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบผิวประเภทเรซินอีพอกซี และสารเคลือบผิวประเภทโพลิยูรีเทนมีการลดลงของน้ำหนักใกล้เคียงกัน กล่าวคือ ประมาณร้อยละ 0.25 - 12.5 ของน้ำหนักเริ่มต้น และร้อยละ 0 - 10 ของน้ำหนักเริ่มต้น ตามลำดับ

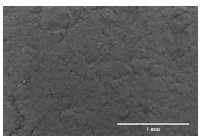
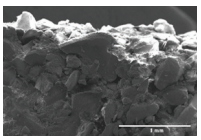
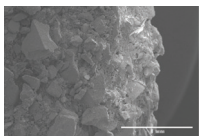
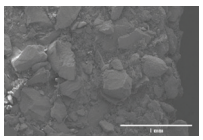
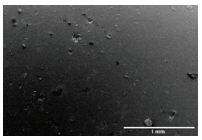
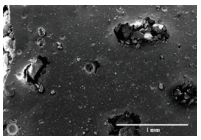
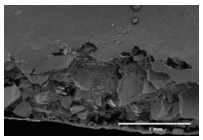
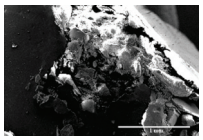
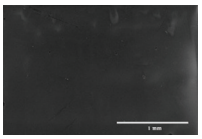
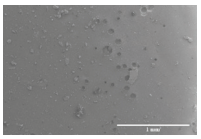
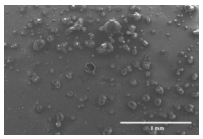
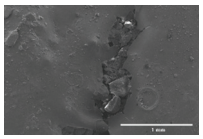
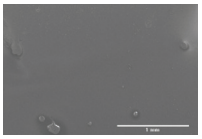
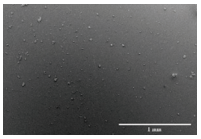
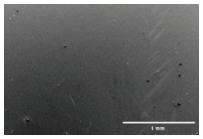
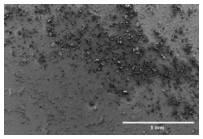


รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ของร้อยละน้ำหนักของชิ้นงานที่ลดลง และระยะเวลาทำความสะอาด

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างชิ้นงานที่ไม่เคลือบผิวและชิ้นงานที่เคลือบผิว พบว่าชิ้นงานที่ไม่เคลือบมีการสูญเสียน้ำหนักสูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นถึงบทบาทของสารเคลือบผิวในการเพิ่มความคงทนของวัสดุ อย่างไรก็ตามชนิดของสารเคลือบผิวมีผลต่อระดับการป้องกันที่แตกต่างกัน ชิ้นงานที่เคลือบด้วยโพลิยูรีเทนแสดงความสามารถในการปกป้องพื้นผิวได้ดีที่สุด โดยเริ่มเกิดการสูญเสียน้ำหนักอย่างมีนัยสำคัญเมื่อระยะเวลาการทำความสะอาดมากกว่า 10 นาที และมีการสูญเสียน้ำหนักเพียงประมาณร้อยละ 10 หลังการทำความสะอาด 15 นาที ในขณะที่ชิ้นงานที่เคลือบด้วยเรซินอีพอกซีมีการสูญเสียน้ำหนักเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 12.5 ภายใต้สภาวะเดียวกัน ในทางตรงกันข้าม ชิ้นงานที่เคลือบด้วยแลคเกอร์มีการสูญเสียน้ำหนักตั้งแต่ช่วงเริ่มต้นของการทดสอบ และมีการสูญเสียน้ำหนักมากกว่าร้อยละ 40 หลังการทำความสะอาด 15 นาที ซึ่งสะท้อนถึงประสิทธิภาพในการป้องกันที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับสารเคลือบชนิดอื่น

ชิ้นงานที่ผ่านการทำความสะอาดแล้วจะถูกนำไปวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของพื้นผิวด้วยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เพื่อยืนยันผลจากการทดสอบความคงทนของสารเคลือบผิว โดยผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ลักษณะสัณฐานวิทยาของพื้นผิวด้วยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 150 เท่า

ชนิดสารเคลือบ	เวลาในการทำความสะอาด (นาที)			
	0	5	10	15
ไม่เคลือบ				
อะคริลิกแลคเกอร์				
เรซินอิพอกซี				
โพลิยูรีเทน				

เมื่อเปรียบเทียบข้อมูลน้ำหนักที่สูญเสียไปของชิ้นงานดินปั้นจากเปลือกหอยเหลือทิ้งดังรูปที่ 4 กับลักษณะสัณฐานวิทยาของผิวชิ้นงานดังตารางที่ 2 พบว่ามีความสอดคล้องกัน โดยสังเกตได้ว่าที่เวลาเริ่มต้นบริเวณผิวของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการเคลือบจะไม่เรียบเนียนเท่ากับพื้นผิวที่ผ่านการเคลือบด้วยสารเคลือบผิวทั้งสามชนิด อย่างไรก็ตาม การเคลือบด้วยแลคเกอร์แบบสเปรย์ทำให้พื้นผิวชิ้นงานบางบริเวณถูกเคลือบอย่างสม่ำเสมอ เมื่อเวลาทำความสะอาดผ่านไป 5 นาที พบว่าพื้นผิวของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการเคลือบจะถูกทำลายและเกิดความเสียหายมาก โดยเฉพาะบริเวณขอบของชิ้นงานเป็นผลให้สูญเสียน้ำหนักไปมากกว่า 10 % ดังรูปที่ 4 ในขณะที่พื้นผิวที่เคลือบด้วยอะคริลิกแลคเกอร์จะเกิดความเสียหายที่ผิวหน้าอย่างชัดเจน สอดคล้องกับน้ำหนักที่หายไปประมาณ 2 - 4 % แต่ชิ้นงานที่เคลือบด้วย เรซินอิพอกซีและโพลิยูรีเทนเกิดความเสียหายเพียงเล็กน้อย (น้อยกว่า 2 %) โดยสังเกตได้เพียงพื้นผิวมีความขรุขระมากขึ้น ความรุนแรงของการพังทลายของผิวหน้าชิ้นงานเพิ่มมากขึ้นเมื่อเวลาทำความสะอาดนานขึ้น โดยที่ชิ้นงานเคลือบผิวด้วยแลคเกอร์จะเกิดความเสียหายค่อนข้างมากเมื่อทำความสะอาดไปแล้ว 15 นาที ซึ่งเกิดการหลุดออกของชิ้นงานในชั้นที่ลึกลงไปจากผิวหน้าที่พังทลาย แต่การเคลือบผิวชิ้นงานด้วย เรซินอีพอกซีหรือโพลิยูรีเทนจะสามารถลดความสูญเสียดังกล่าวได้ดีกว่า แม้จะผ่านการทำความสะอาดไป 15 นาทีก็ตาม

เมื่อชิ้นงานดินปั้นจากเปลือกหอยเหลือทิ้งถูกทำความสะอาดด้วยน้ำและคลื่นเสียงความถี่สูง โมเลกุลของน้ำที่ได้รับพลังงานคลื่นเสียงจะเกิดการสั่น และเกิดเป็นฟองอากาศจำนวนมาก ฟองอากาศนี้จะแตกออกบริเวณที่ต้องการทำความสะอาด เกิดความดันสูงในบริเวณดังกล่าวทำให้สิ่งเจือปนหลุดออก เรียกปรากฏการณ์นี้ว่าการเกิดโพรงอากาศ (Yusof et al., 2016) ในกรณีชิ้นงานที่ไม่ผ่านการเคลือบ โมเลกุลของน้ำจะซึมเข้าสู่ชิ้นงานได้มาก ทำให้เกิดการแตกออกของชิ้นงานได้ แต่ปรากฏการณ์ดังกล่าวจะเกิดขึ้นได้น้อยลงเมื่อชิ้นงานถูกเคลือบด้วยสารเคลือบผิวทั้งสามชนิด โดยชิ้นงานที่เคลือบด้วยโพลิยูรีเทนจะมีความคงทนต่อการทำความสะอาดมากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับสมบัติการเปียกผิวของน้ำน้อยที่สุด

(ค่ามุมสัมผัสของน้ำมากที่สุดดังตารางที่ 1) ทำให้โมเลกุลของน้ำไม่สามารถแพร่เข้าสู่ชิ้นงานได้ง่าย อย่างไรก็ดี ในกรณีของชิ้นงานที่เคลือบด้วยแลคเกอร์ ซึ่งมีค่ามุมสัมผัสของน้ำใกล้เคียงกับกรณีโพลิยูรีเทนแต่พบว่าเกิดความเสียหายมากกว่านั้น อาจเกิดจากลักษณะของฟิล์มแลคเกอร์ที่ไม่สม่ำเสมอเนื่องจากใช้การพ่นสเปรย์ ทำให้มีบริเวณที่ผิวชิ้นงานไม่ถูกปกคลุมด้วยชั้นฟิล์มแลคเกอร์ โมเลกุลของน้ำจึงแพร่เข้าไปในชิ้นงานได้มากกว่า สำหรับในกรณีของชิ้นงานที่เคลือบด้วยเรซินอีพอกซี พบว่าแม้ฟิล์มอีพอกซีจะถูกน้ำเปียกผิวได้ดีกว่าสารเคลือบอีกสองชนิด แต่โมเลกุลของน้ำทำลายได้แค่ชั้นของฟิล์มเป็นหลัก และส่งผลกระทบต่อพื้นผิวของชิ้นงานได้น้อยกว่าการเคลือบด้วยสเปรย์แลคเกอร์

สรุปผล

ชิ้นงานดินปั้นจากเปลือกหอยเหลือทิ้งสามารถเตรียมขึ้นได้จากการผสมแป้งข้าวเหนียว แป้งข้าวโพด เปลือกหอยเหลือทิ้งจากชุมชนบ้านน้ำเชี่ยว จังหวัดตราด และสารเติมแต่งอื่น ๆ และนำไปผลิตเป็นเครื่องประดับและของที่ระลึกเพื่อจำหน่ายสร้างรายได้ให้ชุมชน ควบคู่ไปกับการจัดการปัญหาขยะจากเปลือกหอยเหลือทิ้ง อย่างไรก็ตาม ชิ้นงานที่สัมผัสความชื้นจากการใช้งานและทำความสะอาดจะเกิด ความเสียหายและไม่คงทน งานวิจัยนี้ได้พัฒนานำสารเคลือบผิวชิ้นงานสามชนิดมาเคลือบลงบนชิ้นงานดินปั้นตัวอย่างเพื่อศึกษาความคงทนต่อความชื้นหรือน้ำ จากการศึกษาพบว่าสารเคลือบผิวทั้งสามทำให้มุมสัมผัสของน้ำบนพื้นผิวชิ้นงานเพิ่มขึ้น การเปียกผิวของน้ำบนชิ้นงานลดลง โดยโพลิยูรีเทนจะมีมุมสัมผัสมากที่สุดตามด้วยอะคริลิกแลคเกอร์ และเรซินอิพอกซี ในขณะที่ค่าสีของชิ้นงานเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมเล็กน้อย เมื่อนำชิ้นงานไปทดสอบด้วยการทำความสะอาดด้วยน้ำกลั่นและคลื่นเสียงความถี่สูง พบว่า ชิ้นงานที่ไม่เคลือบผิวมีการสูญเสียน้ำหนักไปประมาณ 40 - 50 % ภายในเวลา 15 นาที ในขณะที่ชิ้นงานที่เคลือบผิวด้วยโพลิยูรีเทนจะเกิดความสูญเสียเนื้อของชิ้นงานไม่เกิน 10 % แม้จะผ่านการทำความสะอาดด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงไปแล้ว 15 นาที ทั้งนี้ปรากฏการณ์ดังกล่าวสัมพันธ์กับโครงสร้างทางเคมีและวิธีการเคลือบผิวชิ้นงาน ซึ่งส่งผลต่อความเปียกผิวของชิ้นงาน ดังนั้น สารเคลือบผิวจากโพลิยูรีเทนจึงเป็นสารเคลือบผิวที่เหมาะสมที่สุดภายใต้สภาวะที่ศึกษา และสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการผลิตเครื่องประดับและของที่ระลึกเพื่อการพานิชย์ของชุมชนบ้านน้ำเชี่ยว จังหวัดตราดต่อไปได้

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี และกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม ที่ได้สนับสนุนทุนวิจัยงบประมาณด้านวิจัยและนวัตกรรม งบประมาณเพื่อสนับสนุนงานมูลฐาน (Fundamental Fund; FF) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2568 และขอขอบคุณกลุ่มวิสาหกิจชุมชนท่องเที่ยว บ้านน้ำเชี่ยว จังหวัดตราด สำหรับความร่วมมือต่าง ๆ จนงานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

References

Adelson, D. (2008). *The Art of Jewelry: Plastic & Resin: Techniques, Projects, Inspiration*. New York, NY: Lark Books.

Chattopadhyay, D.K. and Raju, K.V.S.N. (2007). Structural Engineering of Polyurethane Coatings for High Performance Applications. *Progress in Polymer Science*, 32(3), 352-418. https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2006.05.003

Du, X., Feng, Y., Olarescu, A., Chen, Y. and Liu, X. (2025). Preparation and Properties of Composite Coatings Fabricated from Carved Lacquer Waste and Waterborne Acrylic Resin. *Coatings*, 15(10), https://doi.org/10.3390/coatings15101230

Lee, Y.-K. (2005). Comparison of CIELAB $\Delta E(*)$ and CIEDE2000 Color-Differences After Polymerization and Thermocycling of Resin Composites. *Dental Materials*, 21(7), 678-682. https://doi.org/10.1016/j.dental.2004.09.005

Maţcan-Lîsenco, I. (2025). Eco-Friendly Innovations in Contemporary Adornment and Fine Jewelry Design for A Sustainable Future. *Intertext*, 1(65), 157-166. https://doi.org/10.54481/intertext.2025.1.16

Meiqi, C., Man, L., Lirong, C., Qing, L., Chunxiao, W., Le, H., Ziyue, Z., Wanying, D., Li, C., Sihan, G., Zhi, Q., Panpan, P. and Jingdi, C. (2023). Overview of Structure, Function and Integrated Utilization of Marine Shell. *Science of The Total Environment*, 870. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161950

Pham, H.Q. and Marks, M.J. (2005). Epoxy Resins. In *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, (Ed.). https://doi.org/10.1002/14356007.a09_547.pub2

Srisukho, P., Rungrattanaubol, K., Lertcumfu, N., Pimki, P. and Panyata, S. (2023). The Development of Crushed Mussel Shell Jewelry Clay at Ban Nam Chiew Tourism Community Enterprise in Trat Privince. *Academic Journal: Uttaradit Rajabhat University Science and Technology*, 18(2), 75-84. https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/uruj/article/view/250357

Srisukho, P., Rungrattanaubol, K., Lertcumfu, N., Pimki, P., Panyata, S. and Angkahiran, W. (2024). Study the Processing of Red Scallop Shells to Develop the Community Souvenirs. *Academic Journal Uttaradit Rajabhat University*, 19(2), 54-65. https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/uruj/article/view/255608

Tracton, A.A. (2006). *Coatings Technology Handbook* (3rd ed). CRC Press.

Yang, X.F., Vang, C., Tallman, D.E., Bierwagen, G.P., Croll, S.G. and Rohlik, S. (2001). Weathering Degradation of a Polyurethane Coating. *Polymer Degradation and Stability*, 74(2), 341-351. https://doi.org/10.1016/S0141-3910(01)00166-5

Yusof N.S.M., Babgi, B., Alghamdi, Y., Mecit, A., Madhavan, J. and Ashokkumar, M. (2016). Physical and Chemical Effects of Acoustic Cavitation in Selected Ultrasonic Cleaning Applications. *Ultrasonics Sonochemistry*, 29, 568-576. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2015.06.013

Zafar, F. and Sharmin, E. (2012). *Polyurethane*. Rijeka, Croatia: InTech. https://doi.org/10.5772/2416

การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนของฟิล์มกรองแสงอาคารด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการประเมินความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ในภูมิอากาศเขตร้อน

Heat Transfer Analysis of Building Window Films Using the Finite Element Method with Economic Evaluation in a Tropical Climate

กิตติพงษ์ ศรีแขไตร[1*]
Kittipong Srikhaetai[1*]

Received: *April 9, 2026;* ***Revised:*** *June 6, 2026;* ***Accepted:*** *June 26, 2026*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนภายในอาคารภายใต้สภาวะคงตัว โดยเปรียบเทียบสมรรถนะของฟิล์มกรองแสง 5 ประเภท ได้แก่ ฟิล์มเคลือบโลหะ ฟิล์มแบล็กฟอสฟอรัส ฟิล์มใสกันความร้อน ฟิล์มนิรภัย และฟิล์มเซรามิก แม้ว่างานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มกรองแสงแล้ว แต่ยังขาดการวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบภายใต้แบบจำลองเชิงตัวเลขเดียวกัน ควบคู่กับการประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในบริบทของภูมิอากาศเขตร้อน ในการศึกษานี้ได้ประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method: FEM) เพื่อวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิแบบสองมิติ โดยพัฒนาแบบจำลองเชิงตัวเลขด้วยโปรแกรมภาษาซี และทำการทวนสอบความถูกต้องของผลลัพธ์กับซอฟต์แวร์ COMSOL Multiphysics ผลการวิจัยพบว่า ฟิล์มเซรามิกมีสมรรถนะในการลดการถ่ายเทความร้อนดีที่สุดภายใต้เงื่อนไขของแบบจำลอง โดยสามารถลดอุณหภูมิที่ผิวกระจกด้านในได้ต่ำสุดที่ 35.12 องศาเซลเซียส และลดปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทผ่านกระจกได้ร้อยละ 31.67 ในด้านการประเมินเชิงเศรษฐศาสตร์ พบว่าฟิล์มเซรามิก ช่วยลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานได้ประมาณ 929.39 บาทต่อปี ส่งผลให้ค่าไฟฟ้าลดลงเหลือ 2,005.51 บาทต่อปี และมีระยะเวลาคืนทุนเฉลี่ยประมาณ 3.87 ปี ซึ่งสะท้อนถึงแนวโน้มความคุ้มค่าในการลงทุนภายใต้สมมติฐานของแบบจำลอง อย่างไรก็ตาม แบบจำลองนี้พิจารณาเฉพาะการนำความร้อน (Conduction) และไม่ได้รวมผลของการพาความร้อน (Convection) และการแผ่รังสี (Radiation) ดังนั้นผลลัพธ์จึงควรถูกตีความภายใต้ข้อจำกัดดังกล่าว งานวิจัยนี้มีส่วนช่วยเชื่อมโยงการวิเคราะห์เชิงอุณหพลศาสตร์กับการตัดสินใจเชิงเศรษฐศาสตร์ เพื่อสนับสนุนการเลือกใช้วัสดุสำหรับการออกแบบอาคารประหยัดพลังงานในสภาพภูมิอากาศร้อน

คำสำคัญ : การถ่ายเทความร้อน; ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์; ฟิล์มกรองแสงอาคาร; การอนุรักษ์พลังงาน; การประเมินเชิงเศรษฐศาสตร์

[1] *สำนักการศึกษาทั่วไป สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์*
[1] *Office of General Education, Panyapiwat Institute of Management*
[*] *Corresponding Author, Tel. 09 0963 8375, E - mail: kittipongsrik@pim.ac.th*

Abstract

This study investigates heat transfer behavior within buildings under steady-state conditions by comparing the performance of five types of window films: metallic film, black phosphorus film, clear heat-resistant film, safety film, and ceramic film. Although previous studies have examined the properties of window films, there remains a lack of comparative analysis under a unified numerical model combined with economic evaluation in a tropical climate context. In this study, the Finite Element Method (FEM) was applied to analyze the two-dimensional temperature distribution. A numerical model was developed using the C programming language, and the results were validated against simulations obtained from COMSOL Multiphysics. The findings indicate that the ceramic film provides the most effective thermal performance under the given modeling conditions. It achieves the lowest inner glass surface temperature of 35.12 °C and reduces heat transfer through glass by 31.67 %. From an economic perspective, the ceramic film can reduce annual energy costs by approximately 929.39 THB, lowering the electricity expense to 2,005.51 THB per year, with a payback period of approximately 3.87 years. These results suggest a strong potential for cost-effectiveness under the model assumptions. However, the model considers only conductive heat transfer and does not account for convection and radiation effects. Therefore, the results should be interpreted within these limitations. This study contributes to bridging thermodynamic analysis and economic decision-making, supporting the selection of materials for energy-efficient building design in hot climate regions.

Keywords: Heat Transfer; Finite Element Method; Building Window Films; Energy Conservation; Economic Evaluation

บทนำ

ภาคอาคารเป็นหนึ่งในแหล่งใช้พลังงานหลักของโลก โดยเฉพาะในประเทศเขตร้อนที่มีอุณหภูมิสูงและได้รับรังสีจากดวงอาทิตย์ตลอดทั้งปี ส่งผลให้ภาระการทำความเย็น (Cooling Load) และความต้องการใช้พลังงานเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง แนวทางการลดการถ่ายเทความร้อนผ่านกรอบอาคาร (Building Envelope) จึงเป็นกลยุทธ์สำคัญในการปรับปรุงประสิทธิภาพพลังงานของอาคาร การติดตั้งฟิล์มกรองแสงบนกระจกเป็นวิธีที่ได้รับความนิยม เนื่องจากสามารถลดการรับรังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์ (Solar Heat Gain) และลดการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศได้อย่างมีประสิทธิภาพ งานวิจัยที่ผ่านมาพิสูจน์ให้เห็นว่าการประยุกต์ใช้ฟิล์มกรองแสงสามารถลดการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศและลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ได้อย่างมีนัยสำคัญ (Bahadori-Jahromi et al., 2017; Huang et al., 2024) นอกจากนี้ชนิดของฟิล์มกรองแสงยังมีอิทธิพลโดยตรงต่อสมบัติทางความร้อนและเชิงแสงของกระจกหน้าต่างอาคาร (Rawat, 2017) ในทางวิศวกรรมปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนสามารถอธิบายได้ด้วยสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (Partial Differential Equations: PDEs) ซึ่งสามารถหาผลเฉลย (Solution) ได้ทั้งระเบียบวิธีเชิงวิเคราะห์และวิธีเชิงตัวเลข เช่น วิธีผลต่างจำกัด (Finite Difference Method: FDM) และระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method: FEM) ทั้งนี้ FEM ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายเนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงในการวิเคราะห์ปัญหาที่มีรูปทรงเรขาคณิตซับซ้อนและมีเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions) ที่หลากหลาย (Bathe, 1996; Zienkiewicz and Taylor, 2000; Incropera et al., 2007) ที่ผ่านมามีการประยุกต์ใช้แบบจำลอง FEM เพื่อวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนในอาคารอย่างกว้างขวาง ตัวอย่างเช่น การประเมินการดูดซับรังสีความร้อนในอาคารคอนกรีตชั้นเดียว ซึ่งพบว่าการละเว้นการติดตั้งฉนวนบริเวณหลังคาและช่องเปิด ส่งผลให้อุณหภูมิภายในอาคารพุ่งสูงขึ้นถึงร้อยละ 70 แม้จะมีการบุฉนวนที่ผนังแล้วก็ตาม

(Karim, 2025) ข้อค้นพบนี้ตอกย้ำถึงบทบาทสำคัญของกรอบอาคารต่อพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อน นอกจากนี้ยังมีการใช้ FEM ศึกษาผลสัมฤทธิ์ของวัสดุขั้นสูง เช่น วัสดุเปลี่ยนสถานะ (Phase Change Materials: PCM) โดยผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่า การติดตั้ง PCM บริเวณผิวด้านในของผนังสามารถหน่วงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Zhou et al., 2021) และช่วยลดอุณหภูมิภายในอาคารในสภาวะการทำงานจริงได้อย่างมีนัยสำคัญ (Baskar and Chellapandian, 2022) อย่างไรก็ตาม มาตรการดังกล่าวยังคงเผชิญกับข้อจำกัดด้านต้นทุนและความซับซ้อนในการติดตั้ง ในประเด็นความแม่นยำของแบบจำลอง การศึกษาเชิงเปรียบเทียบระหว่างระเบียบวิธี FEM แบบสามมิติกับผลการทดลองจริงบ่งชี้ว่าวัสดุที่มีค่าการนำความร้อนสูงมีความจำเป็นต้องใช้แบบจำลองสามมิติเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่มีความเที่ยงตรง (Mayer et al., 2014) ในขณะที่การศึกษาอื่นระบุว่า ปรากฏการณ์การพาความร้อน (Convection) ภายในพื้นที่ปรับอากาศมีบทบาทสำคัญต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิ โดยพลศาสตร์การไหลของอากาศช่วยลดความผันผวนของอุณหภูมิได้อย่างมีนัยสำคัญ (Chen, 2023) งานวิจัยหลายฉบับได้ใช้ FEM ในการวิเคราะห์การสูญเสียความร้อนผ่านองค์ประกอบของกรอบอาคาร เช่น โครงสร้างผนังไม้ (Timber Frame Structures) ซึ่งสามารถทำนายการกระจายความร้อนและการสูญเสียพลังงานได้อย่างแม่นยำ (Valachova and Skotnica, 2019) แม้ว่างานวิจัยก่อนหน้าจะครอบคลุมการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนในอาคารอย่างกว้างขวาง แต่ยังพบว่า งานวิจัยจำนวนมากมุ่งเน้นการศึกษาฟิล์มแต่ละประเภทแยกกัน หรือใช้เงื่อนไขการจำลองที่แตกต่างกัน ทำให้ไม่สามารถเปรียบเทียบสมรรถนะได้อย่างเป็นระบบ และยังขาดการบูรณาการระหว่างการวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) กับการประเมินความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ โดยเฉพาะในบริบทภูมิอากาศเขตร้อน ซึ่งมีผลต่อภาระการใช้พลังงานอย่างมีนัยสำคัญ

ดังนั้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) ศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนภายในอาคารภายใต้สภาวะคงตัว (Steady-State) เมื่อติดตั้งฟิล์มกรองแสง 5 ประเภท ได้แก่ ฟิล์มเคลือบโลหะ (Metallized Film) ฟิล์มแบล็กฟอสฟอรัส (Black Phosphorus Film) ฟิล์มใสกันความร้อน (Clear Heat-Resistant Film) ฟิล์มนิรภัย (Safety Film) และฟิล์มเซรามิก (Ceramic Film) 2) ประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method: FEM) ร่วมกับแบบจำลองเชิงตัวเลขที่พัฒนาขึ้นด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ด้วยภาษาซี (C Programming) เพื่อวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิแบบสองมิติ และ 3) ประเมินความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์และระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) อ้างอิงจากฐานข้อมูลค่าใช้จ่ายพลังงานไฟฟ้ารายปี ทั้งนี้งานวิจัยได้ดำเนินการทวนสอบความถูกต้องของแบบจำลองเชิงตัวเลข (Numerical Model Validation) โดยเปรียบเทียบผลเฉลยกับซอฟต์แวร์ COMSOL Multiphysics เพื่อสังเคราะห์เป็นแนวทางปฏิบัติทางวิศวกรรมสำหรับการออกแบบอาคารอนุรักษ์พลังงานอย่างยั่งยืน ในขณะเดียวกัน งานวิจัยนี้มีส่วนช่วยเติมเต็มช่องว่างทางวิชาการในด้านการเปรียบเทียบวัสดุภายใต้แบบจำลองเชิงตัวเลขเดียวกัน และการเชื่อมโยงผลลัพธ์ทางอุณหพลศาสตร์กับการตัดสินใจเชิงเศรษฐศาสตร์ อย่างไรก็ตาม แบบจำลองในงานวิจัยนี้พิจารณาเฉพาะการนำความร้อนภายใต้สภาวะคงตัว และไม่ได้รวมผลของการพาความร้อนและการแผ่รังสี ซึ่งอาจส่งผลต่อความแม่นยำในการประยุกต์ใช้งานจริง

วิธีดำเนินการวิจัย

1. แบบจำลองทางกายภาพและสมมติฐานของแบบจำลอง (Physical Model and Model Assumptions)

การศึกษานี้พิจารณาแบบจำลองห้องภายในอาคารขนาด 3 × 5 เมตร ซึ่งเป็นตัวแทนของพื้นที่ใช้งานทั่วไปในอาคารพักอาศัย ทั้งนี้ผนังห้องถูกสมมติให้เป็นวัสดุเนื้อเดียว (Homogeneous Material) ที่มีสมบัติทางความร้อนคงที่และไม่แปรผันตามอุณหภูมิ พื้นผิวด้านหนึ่งของห้องกำหนดให้เป็นกระจกที่ติดตั้งฟิล์มกรองแสง สำหรับการกำหนดสภาวะของแบบจำลอง อุณหภูมิภายในห้องถูกกำหนดให้คงที่ที่ 25 °C เพื่อจำลองสภาวะของพื้นที่ปรับอากาศ ในขณะที่อุณหภูมิภายนอกถูกกำหนดไว้ที่ 39.81 °C ซึ่งถือเป็นค่าตัวแทนของสภาวะอุณหภูมิสูงสุดของช่วงฤดูร้อนในประเทศไทย อ้างอิงจากข้อมูลอุณหภูมิสูงสุดเฉลี่ยที่รวบรวมจากสถานีตรวจวัดทางอุตุนิยมวิทยา 131 แห่งทั่วประเทศ (Thai Meteorological Department, 2025) ค่าดังกล่าวถูกใช้เป็นเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions) สำหรับการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนในโดเมน ซึ่งครอบคลุมพิจารณาฟิล์มกรองแสงจำนวน 5 ประเภท ได้แก่ ฟิล์มเคลือบโลหะ

ฟิล์มแบล็กฟอสฟอรัส ฟิล์มใสกันความร้อน ฟิล์มนิรภัย และฟิล์มเซรามิก โดยสมบัติทางความร้อนของวัสดุที่ใช้ในการจำลอง ได้แก่ ค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity) ความหนาแน่น (Density) และความจุความร้อนจำเพาะ (Specific Heat Capacity) ดังตารางที่ 1 โดยข้อมูลดังกล่าวอ้างอิงจากวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้มั่นใจในความน่าเชื่อถือของพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลอง

ตารางที่ 1 สมบัติทางความร้อนของวัสดุที่ใช้ในการจำลอง

วัสดุ	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน k (W/m·K)	ความหนาแน่น, ρ (kg/m³)	ความจุความร้อนจำเพาะ, Cp (J/kg·K)	แหล่งอ้างอิง
ผนังคอนกรีต	1.40	2,300	880	Incropera et al. (2007)
กระจก	0.96	2,500	750	Incropera et al. (2007)
ฟิล์มเคลือบโลหะ	2.50	1,400	900	Lampert (1981)
ฟิล์มแบล็กฟอสฟอรัส	15.00 - 30.00 (Anisotropic)	2,690	700	Luo et al. (2015)
ฟิล์มใสกันความร้อน	0.03	120	1,000	Fleury et al. (2020)
ฟิล์มนิรภัย	0.20 - 0.40	1,200	1,000	Incropera et al. (2007)
ฟิล์มเซรามิก	1.00 - 3.00	2,500	800	Callister (2007)

จากตารางที่ 1 พบว่าฟิล์มกรองแสงแต่ละประเภทมีสมบัติทางความร้อนแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยค่าของวัสดุทั่วไปอ้างอิงจากตำรามาตรฐานด้านการถ่ายเทความร้อน โดยในส่วนของฟิล์มนิรภัยได้อ้างอิงจากสมบัติทางความร้อนมาตรฐานของกลุ่มวัสดุพอลิเมอร์ (Polymer Data) ส่วนวัสดุฟิล์มขั้นสูงกำหนดจากช่วงค่าที่รายงานในวรรณกรรมเพื่อให้สอดคล้องกับลักษณะกายภาพของวัสดุ ผลการพิจารณาฟิล์มใสกันความร้อนมีค่าการนำความร้อนต่ำที่สุด ซึ่งสะท้อนถึงศักยภาพในการหน่วงความร้อนที่ดีภายใต้กลไกการนำความร้อน ในขณะที่ฟิล์มแบล็กฟอสฟอรัสมีค่าการนำความร้อนสูงที่สุดเนื่องจากโครงสร้างแบบแอนไอโซทรอปิก (Anisotropic) ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้พิจารณาเป็นช่วงค่าเพื่อสะท้อนการถ่ายเทความร้อนที่ขึ้นกับทิศทาง (Luo et al., 2015) ความแตกต่างของสมบัติดังกล่าวส่งผลโดยตรงต่อพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนในแบบจำลอง อย่างไรก็ตาม ผลลัพธ์ควรถูกตีความภายใต้สมมติฐานสภาวะคงตัวและกลไกการนำความร้อนของแบบจำลอง

2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model)

2.1 สมการควบคุม (Governing Equation)

เพื่อวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนภายในโดเมนสองมิติภายใต้สภาวะคงตัว กำหนดให้การถ่ายเทความร้อนเกิดจากกลไกการนำเพียงอย่างเดียว ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยสมการควบคุม ดังสมการที่ (1)

$$\nabla \cdot \left(k \nabla T\right) = 0 \tag{1}$$

โดย

T คือ อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งใด ๆ ในโดเมน (°C)

k คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal Conductivity) ของวัสดุ (W/m·K)

∇ คือ ตัวดำเนินการเกรเดียนต์ (Gradient Operator)

$\nabla \cdot$ คือ ตัวดำเนินการไดเวอร์เจนส์ (Divergence Operator) เมื่อพิจารณากรณีวัสดุเนื้อเดียวและสมบัติทางความร้อนคงที่ไม่แปรผันตามอุณหภูมิ สมการที่ (1) สามารถลดรูปเป็นสมการลาปลาซ (Laplace Equation) สำหรับโดเมนสองมิติได้ ดังสมการที่ (2)

$$\nabla^2 T = 0 \tag{2}$$

2.2 สมการค่าการแพร่ความร้อน (Thermal Diffusivity)

การวิเคราะห์ทางความร้อนของวัสดุสามารถอธิบายได้ด้วยค่าการแพร่ความร้อน ดังสมการที่ (3)

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} \tag{3}$$

โดยที่

α ค่าการแพร่ความร้อนของวัสดุ (m^2/s)

ρ ความหนาแน่นของวัสดุ (kg/m^3)

c_p ความร้อนจำเพาะของวัสดุ ($J/kg{\cdot}K$)

2.3 เงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions)

ในการวิเคราะห์โดเมนปัญหาการถ่ายเทความร้อน แบบจำลองนี้ได้กำหนดเงื่อนไขทางคณิตศาสตร์เชิงฟิสิกส์ไว้ 3 รูปแบบ (Çengel, 2002) ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 เงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลอง

ขอบเขตทางกายภาพ	ประเภทเงื่อนไข	รูปแบบทางคณิตศาสตร์	ค่าที่กำหนด
ผิวกระจกที่ติดฟิล์ม อากาศภายในห้อง	ดิริชเลต์ (Dirichlet)	$T = T_{film}$ $T = 25^oC$	อ้างอิงจากการคำนวณ 1 มิติ พื้นที่ปรับอากาศ
ผนังอื่นของห้อง	นอยมันน์ (Neumann)	$\frac{\partial T}{\partial n} = 0$	ผนังฉนวน (Adiabatic)
สภาพแวดล้อมภายนอก	พารามิเตอร์ขอบเขต (Boundary Parameter)	$T_{out} = 39.81^oC$	ข้อมูลกรมอุตุนิยมวิทยา

โดยที่ n แทนเวกเตอร์ในทิศทางตั้งฉากกับพื้นผิวขอบเขต (Normal Vector to the Surface Boundary) เงื่อนไขขอบเขตดังตารางที่ 2 ถูกกำหนดเพื่อแทนสภาวะทางกายภาพของระบบ โดยอุณหภูมิภายในห้องและภายนอกถูกกำหนดเป็นเงื่อนไขแบบดิริชเลต์ เพื่อสะท้อนสภาวะคงตัวของพื้นที่ปรับอากาศและสภาพแวดล้อมภายนอกตามลำดับ ขณะที่ผนังด้านอื่นถูกสมมติให้เป็นฉนวนความร้อนตามเงื่อนไขแบบนอยมันน์ สำหรับผิวกระจกที่ติดตั้งฟิล์มค่าอุณหภูมิ T_{film} ถูกใช้เป็นตัวแทนของผลกระทบจากฟิล์มกรองแสง โดยได้จากการประมาณค่าจากแบบจำลองการนำความร้อนหนึ่งมิติ (1D Analytical Solution) เพื่อช่วยลดความซับซ้อนของปัญหาในแบบจำลองสองมิติ

2.4 เงื่อนไขเริ่มต้น (Initial Conditions)

ในการวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิภายใต้สภาวะคงตัว แบบจำลองเชิงตัวเลขนี้กำหนดค่าอุณหภูมิเริ่มต้นเพื่อช่วยในการลู่เข้าสู่ผลเฉลยเชิงตัวเลข โดยค่าเริ่มต้นดังกล่าวไม่ได้มีผลต่อค่าผลเฉลยสุดท้ายในกรณีสภาวะคงตัวแต่มีบทบาทในการเพิ่มเสถียรภาพของกระบวนการคำนวณ ในการศึกษานี้ค่าอุณหภูมิที่ผิวกระจกภายหลังการติดตั้งฟิล์ม (T_{film}) ถูกนำมาใช้เป็นค่าประมาณเริ่มต้น โดยอ้างอิงจากผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ของการนำความร้อนแบบหนึ่งมิติ เพื่อสะท้อนผลกระทบของฟิล์มกรองแสงในระดับเบื้องต้น แนวทางดังกล่าวสามารถพิจารณาได้ว่าเป็นการเชื่อมโยงแบบจำลอง (Model Coupling) ระหว่างการวิเคราะห์เชิงวิเคราะห์หนึ่งมิติและการจำลองเชิงตัวเลขสองมิติ อย่างไรก็ตาม การกำหนดค่า T_{film} ในลักษณะนี้เป็นเพียงการประมาณค่าเพื่อใช้ในกระบวนการคำนวณ และไม่ได้แสดงถึงการจำลองเชิงกายภาพของฟิล์มในโดเมนโดยตรง เงื่อนไขเริ่มต้นทางคณิตศาสตร์สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (4)

$$T(x,y,0)=T_{film} \tag{4}$$

โดยค่าของอุณหภูมิ T_{film} สำหรับฟิล์มแต่ละประเภทดังตารางที่ 3 ซึ่งสะท้อนความแตกต่างของสมบัติทางความร้อนของวัสดุ ในขณะเดียวกันความแตกต่างดังกล่าวควรถูกพิจารณาร่วมกับข้อจำกัดของแบบจำลอง เนื่องจากแบบจำลองนี้พิจารณาเฉพาะกลไกการนำความร้อน และไม่ได้รวมผลของการพาความร้อนและการแผ่รังสี

ตารางที่ 3 อุณหภูมิที่ผ่านฟิล์มกรองแสงและใช้เป็นเงื่อนไขเริ่มต้น

ประเภทของฟิล์ม	อุณหภูมิภายนอก (°C)	อุณหภูมิหลังผ่านฟิล์ม T_{film} (°C)
ฟิล์มเคลือบโลหะ	39.81	38.60
ฟิล์มแบล็กฟอสฟอรัส	39.81	36.37
ฟิล์มใสกันความร้อน	39.81	39.80
ฟิล์มนิรภัย	39.81	37.07
ฟิล์มเซรามิก	39.81	35.12

3. การประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method: (FEM)

เพื่อแก้สมการการนำความร้อนในรูปแบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย สมการควบคุมถูกแปลงให้อยู่ในรูปสมการอ่อน (Weak Form) โดยใช้ระเบียบวิธีของกาเลอร์คิน (Galerkin's Method) ซึ่งเป็นวิธีมาตรฐานในการวิเคราะห์ด้วย FEM (Reddy, 2019) ดังสมการที่ (1) นำฟังก์ชันน้ำหนัก (Weighting Function, w) คูณทั้งสองข้างของสมการ และทำการอินทิเกรตบนโดเมน Ω จะได้ดังสมการที่ (5)

$$\int_{\Omega} w\nabla\cdot(k\nabla T)\,d\Omega=0 \tag{5}$$

จากนั้นใช้เทคนิคการอินทิเกรตทีละส่วน (Integration by Parts) จะได้ผลลัพธ์ดังสมการที่ (6)

$$\int_{\Omega} k\nabla w\cdot\nabla T d\Omega-\int_{\Gamma} wk\frac{\partial T}{\partial n}d\,\Gamma=0 \tag{6}$$

โดยที่

k คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุ
w คือ ฟังก์ชันน้ำหนัก (Weighting Function)
N_i คือ ฟังก์ชันรูปร่าง (Shape Function) ของโหนดที่ i
T_i คือ อุณหภูมิที่โหนดที่ i (Nodal Temperature)
Ω คือ โดเมนของปัญหา
Γ คือ ขอบเขตของโดเมน
n คือ เวกเตอร์ตั้งฉากกับพื้นผิวขอบเขต

พจน์บนขอบเขตของโดเมนดังสมการที่ (6) ถูกกำหนดตามเงื่อนไขขอบเขตที่ระบุดังตารางที่ 2 โดยเงื่อนไขแบบดิริชเลต์ถูกนำไปใช้ในการกำหนดค่าอุณหภูมิที่ผิวกระจกและอากาศภายในห้อง ส่วนเงื่อนไขแบบนอยมันน์ถูกใช้แทนผนังที่เป็นฉนวนความร้อน ในระเบียบวิธีการเลอร์คิน กำหนดให้ฟังก์ชันน้ำหนักมีค่าเท่ากับฟังก์ชันรูปร่าง ($w=N_i$) การประมาณอุณหภูมิภายในเอลิเมนต์ (T) สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (7)

$$T(x,y)\approx\sum_{i=1}^{n}N_i(x,y)T_i \tag{7}$$

โดยที่

N_i คือ ฟังก์ชันรูปร่างของโหนดที่ i

n คือ จำนวนโหนดในเอลิเมนต์

เมื่อนำสมการที่ (7) ไปแทนค่าในสมการรูปแบบอย่างอ่อน จะได้ระบบสมการเชิงเส้นในรูปเมทริกซ์ ดังสมการที่ (8)

$$[K]\{T\} = \{F\} \tag{8}$$

โดยที่

$[K]$ คือ เมทริกซ์สภาพนำความร้อน (Thermal Stiffness Matrix หรือ Conductance Matrix)

$\{T\}$ คือ เวกเตอร์อุณหภูมิ ณ โหนด (Nodal Temperature Vector)

$\{F\}$ คือ เวกเตอร์ภาระทางความร้อน (Thermal Load Vector) ซึ่งเป็นผลมาจากเงื่อนไขขอบเขตของปัญหา

สมการดังกล่าวแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายอุณหภูมิภายในโดเมนกับสมบัติทางความร้อนของวัสดุและเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนด สำหรับการสร้างตาข่าย (Mesh Generation) โดเมนของปัญหาถูกแบ่งออกเป็นเอลิเมนต์รูปสามเหลี่ยม (Triangular Elements) โดยใช้ฟังก์ชันรูปร่างเชิงเส้น (Linear Shape Function) ชนิด 3 โหนดต่อเอลิเมนต์ ซึ่งเหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ปัญหาการนำความร้อนสองมิติ (Reddy, 2019) การเลือกชนิดของเอลิเมนต์ดังกล่าวช่วยให้สามารถประมาณค่าการกระจายอุณหภูมิได้อย่างต่อเนื่องภายในโดเมน และลดความซับซ้อนของการคำนวณ

4. ขั้นตอนวิธีของโปรแกรมภาษาซี (Numerical Algorithm)

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาแบบจำลองโปรแกรมภาษาซี เพื่อหาผลเฉลยของสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยมีขั้นตอนวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Algorithm) ดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 การนำเข้าข้อมูล (Input Data): กำหนดพิกัดของโหนด (Nodes) ข้อมูลการเชื่อมโยงเอลิเมนต์ (Elements) และสมบัติทางความร้อนของวัสดุ

ขั้นตอนที่ 2 การสร้างสมการระดับเอลิเมนต์ (Element Formulation): คำนวณเมทริกซ์สภาพนำความร้อนระดับเอลิเมนต์ (Local Stiffness Matrix) สำหรับทุกเอลิเมนต์ในโดเมนปัญหา

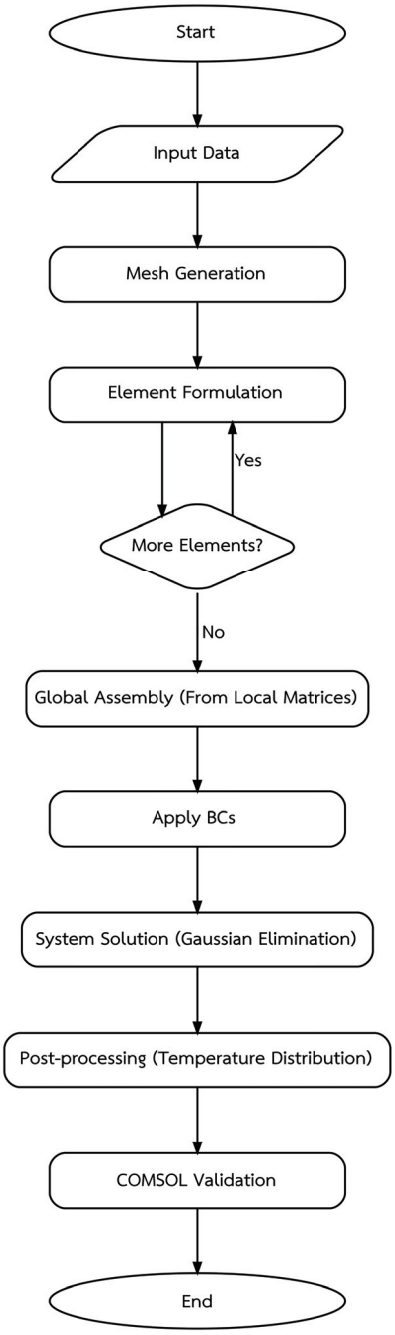
ขั้นตอนที่ 3 บูรณาการเมทริกซ์ระดับเอลิเมนต์เข้าด้วยกัน เพื่อสร้างเมทริกซ์สภาพนำความร้อนของระบบ (Global Stiffness Matrix) ดังสมการที่ (9)

$$[K] = \sum [k_e] \tag{9}$$

ขั้นตอนที่ 4 การประยุกต์ใช้เงื่อนไขขอบเขต (Apply Boundary Conditions): ปรับลดรูปเมทริกซ์ของระบบให้สอดคล้องกับเงื่อนไขขอบเขตทางความร้อนที่กำหนด

ขั้นตอนที่ 5 ดำเนินการหาผลเฉลยของสมการเมทริกซ์ที่ (8) โดยประยุกต์ใช้วิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขแบบการกำจัดของเกาส์ (Gaussian Elimination)

ขั้นตอนที่ 6 การประมวลผลภายหลัง (Post-Processing): ประเมินค่าอุณหภูมิ ณ แต่ละโหนด และแสดงผลในรูปแบบแผนภาพการกระจายตัวของอุณหภูมิ ผลลัพธ์ที่ประมวลผลได้จากโปรแกรมชุดนี้ จะถูกนำไปทวนสอบความถูกต้อง (Validation) โดยเปรียบเทียบกับผลเฉลยจากซอฟต์แวร์ COMSOL Multiphysics เพื่อยืนยันความน่าเชื่อถือของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ขั้นตอนวิธีดังกล่าวสามารถสรุปเป็นแผนผังการทำงาน (Flowchart) ได้ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ขั้นตอนวิธีเชิงตัวเลขของการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Implementation) ด้วยโปรแกรมภาษาซี ซึ่งครอบคลุมตั้งแต่การนำเข้าข้อมูล การสร้างตาข่าย การประกอบสมการ การประยุกต์ใช้เงื่อนไขขอบเขต การแก้ระบบสมการ และการประมวลผลผลลัพธ์ พร้อมการทวนสอบกับซอฟต์แวร์ COMSOL Multiphysics

ผลการวิจัย

1. การทวนสอบและตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองเชิงตัวเลข (Verification and Validation of the Numerical Model)

เพื่อประเมินความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของแบบจำลองเชิงตัวเลข งานวิจัยนี้ได้ทดสอบความเป็นอิสระของตาข่าย (Mesh Independence Test) โดยพิจารณาความละเอียดของตาข่าย 3 ระดับ ได้แก่ ตาข่ายหยาบ

(Coarse Mesh) ประมาณ 1,500 เอลิเมนต์ ตาข่ายปานกลาง (Medium Mesh) ประมาณ 5,000 เอลิเมนต์ และตาข่ายละเอียด (Fine Mesh) ประมาณ 12,000 เอลิเมนต์ ผลการจำลองดังรูปที่ 2(ก) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าอุณหภูมิเฉลี่ยภายในโดเมนกับจำนวนเอลิเมนต์พบว่าเมื่อจำนวนเอลิเมนต์เพิ่มขึ้นค่าอุณหภูมิที่ได้มีแนวโน้มลู่เข้าสู่ค่าคงที่ โดยค่าที่ได้จากตาข่ายละเอียดมีค่าเท่ากับ 35.12 °C และถูกใช้เป็นค่ามาตรฐานอ้างอิง (Benchmark Solution)

ในกรณีของตาข่ายระดับปานกลาง พบว่าค่าอุณหภูมิแตกต่างจากค่ามาตรฐานน้อยกว่าร้อยละ 0.5 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ในงานวิศวกรรม อีกทั้งยังให้ความสมดุลที่เหมาะสมระหว่างความแม่นยำและเวลาในการคำนวณ ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ตาข่ายระดับปานกลางในการวิเคราะห์ในทุกกรณีศึกษา ทั้งนี้เพื่อประเมินพฤติกรรมการลู่เข้าของผลเฉลยเชิงตัวเลข ได้คำนวณค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (Relative Error) โดยเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานอ้างอิงจากตาข่ายละเอียด ดังสมการที่ (10)

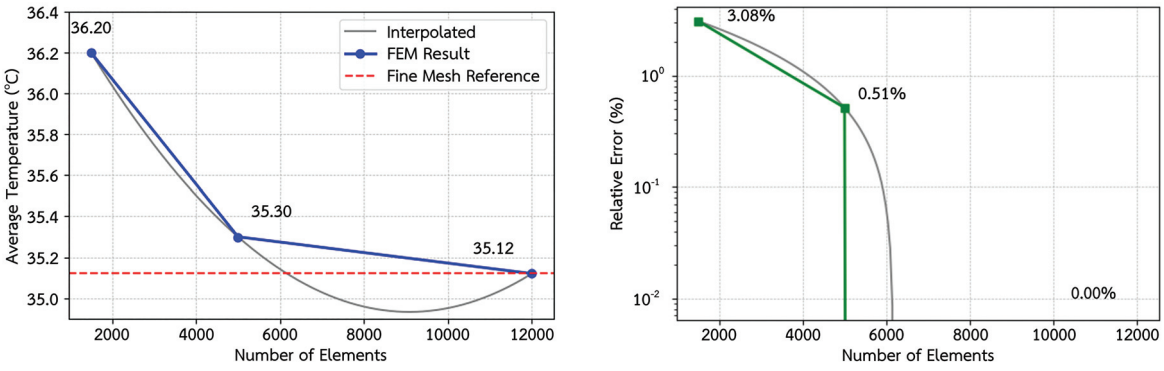
$$Error = \frac{\left|T_{mesh} - T_{ref}\right|}{T_{ref}} \times 100 \tag{10}$$

โดยที่

T_{ref} คือ ค่าอุณหภูมิจากตาข่ายละเอียด ซึ่งใช้เป็นค่ามาตรฐานอ้างอิง

T_{mesh} คือ ค่าอุณหภูมิจากตาข่ายที่นำมาเปรียบเทียบ

ผลการทดสอบจากรูปที่ 2(ข) บ่งชี้ถึงพฤติกรรมการลู่เข้าของผลเฉลยเชิงตัวเลข (Mesh Convergence) โดยพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ลดลงอย่างต่อเนื่องแปรผกผันกับจำนวนเอลิเมนต์ที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้ค่าความคลาดเคลื่อนได้ลดลงจากร้อยละ 3.08 ในโครงข่ายระดับหยาบสู่ร้อยละ 0.51 ในระดับปานกลาง และมีค่าลู่เข้าใกล้ศูนย์ในโครงข่ายระดับละเอียด ซึ่งเป็นการยืนยันเสถียรภาพและความแม่นยำของแบบจำลอง



(ก) การลู่เข้าของอุณหภูมิเฉลี่ยเมื่อจำนวนเอลิเมนต์เพิ่มขึ้น

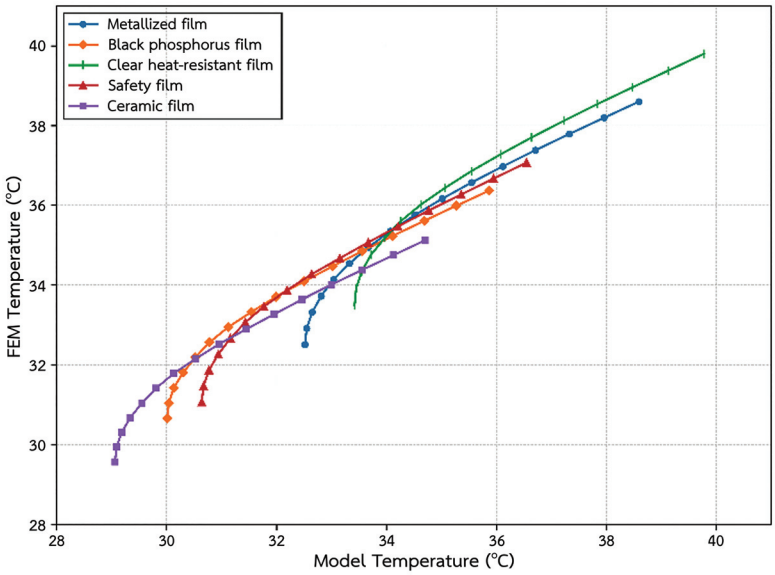
(ข) การลู่เข้าของค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ตามการเพิ่มความละเอียดของตาข่าย

รูปที่ 2 การทดสอบความเป็นอิสระของตาข่ายและการลู่เข้าของผลเฉลยด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

จากผลดังกล่าวสรุปได้ว่า แบบจำลองมีความเป็นอิสระจากขนาดตาข่าย (Mesh-Independent Solution) ภายใต้ระดับความละเอียดที่เลือกใช้ และแสดงถึงเสถียรภาพของวิธีเชิงตัวเลขที่นำมาใช้ในการคำนวณนอกจากนี้ จำนวนเอลิเมนต์ที่เพิ่มขึ้นยังส่งผลโดยตรงต่อจำนวนโหนดภายในโดเมน ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ใช้ในการคำนวณอุณหภูมิและสร้างกราฟการกระจายอุณหภูมิ ดังนั้น เมื่อความละเอียดของตาข่ายเพิ่มขึ้น จำนวนโหนดที่มากขึ้นจะช่วยให้สามารถประมาณค่าการกระจายอุณหภูมิได้ละเอียดและต่อเนื่องมากขึ้น ส่งผลให้เส้นกราฟมีความเรียบและมีแนวโน้มลู่เข้าสู่ค่าคงที่อย่างชัดเจน ความสัมพันธ์ดังกล่าวสอดคล้องกับแผนที่ความร้อน (Temperature Contour Map) แบบสองมิติ ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดของการกระจายอุณหภูมิในเชิงพื้นที่ได้ชัดเจนยิ่งขึ้นภายใต้ตาข่ายที่มีความละเอียดสูง และสะท้อนถึงอิทธิพลของการแบ่งโดเมน (Mesh Discretization) ต่อความแม่นยำของผลเฉลยในระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

2. การทวนสอบความถูกต้องของแบบจำลองเชิงตัวเลขกับ COMSOL (Validation Against COMSOL)

งานวิจัยนี้ได้ทวนสอบความถูกต้องของแบบจำลองเชิงตัวเลขเพิ่มเติม โดยเปรียบเทียบผลลัพธ์จากแบบจำลองเชิงตัวเลขที่พัฒนาขึ้นด้วยโปรแกรมภาษาซีกับผลเฉลยจากซอฟต์แวร์ COMSOL Multiphysics ซึ่งถูกใช้เป็นฐานอ้างอิงสำหรับการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ การประเมินความสอดคล้องของผลลัพธ์ดำเนินการโดยการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิในแต่ละโหนด (Nodal Temperature) ภายใต้สภาวะคงตัว พร้อมทั้งวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงเส้น (Linear Correlation) และการกระจายตัวของค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (Absolute Error Distribution) ดังรูปที่ 3 และ 4



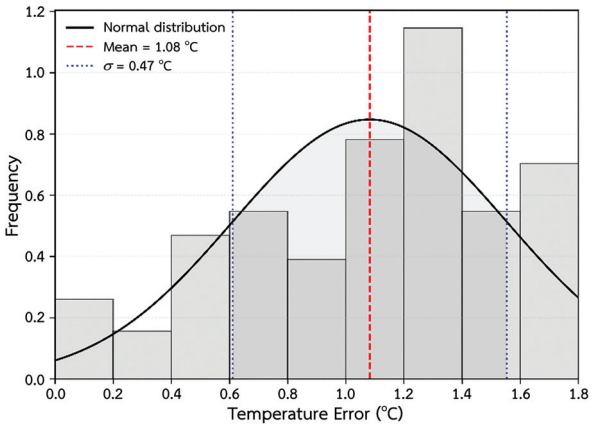
รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ของผลเฉลยอุณหภูมิระหว่างแบบจำลองและแบบจำลองไฟไนเอลิเมนต์

จากรูปที่ 3 พบว่าค่าอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองเชิงตัวเลขที่พัฒนาขึ้นด้วยโปรแกรมภาษาซีมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับผลลัพธ์จาก COMSOL Multiphysics อย่างชัดเจน โดยผลการถดถอยเชิงเส้นแสดงให้เห็นถึงระดับความสอดคล้องที่สูง (Good Agreement) ระหว่างทั้งสองวิธี การประเมินเชิงสถิติยังพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมบูรณ์ (Mean Absolute Error: MAE) และค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อน (Root Mean Square Error: RMSE) มีค่าต่ำ ขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination: R^2) มีค่าเข้าใกล้ 1.0 ซึ่งสะท้อนถึงความสอดคล้องของแนวโน้มผลลัพธ์ภายใต้เงื่อนไขของแบบจำลอง

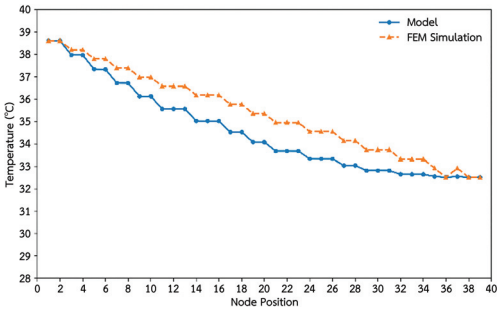
ผลการกระจายของค่าความคลาดเคลื่อนดังรูปที่ 4 พบว่าค่าความแตกต่างของอุณหภูมิในแต่ละโหนดอยู่ในช่วงที่ต่ำมาก ผลลัพธ์ที่ได้บ่งชี้ว่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิที่คำนวณได้อยู่ในขอบเขตของ Engineering Tolerance และสอดคล้องกับกรอบแนวคิดการประเมินความไม่แน่นอนและการตรวจสอบความถูกต้องเชิงตัวเลขตามแนวทางของ Roache (1994) ผลลัพธ์ดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่าอัลกอริทึมและกระบวนการประกอบ เมทริกซ์ในโปรแกรมภาษาซีมีความเสถียร และสามารถให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับ FEM เชิงพาณิชย์ได้ในระดับที่น่าพอใจ

การเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิตามตำแหน่งโหนด ดังรูปที่ 5(ก) - (จ) สำหรับฟิล์มกรองแสงทั้ง 5 ประเภท แสดงให้เห็นว่าแนวโน้มของกราฟจากทั้งสองวิธีมีความสอดคล้องกันอย่างชัดเจน โดยค่าจาก COMSOL มีแนวโน้มสูงกว่าเล็กน้อยในช่วงต้นของโดเมน และมีแนวโน้มลู่เข้าหากันในช่วงปลาย พฤติกรรมดังกล่าวสะท้อนถึงความสามารถของแบบจำลองในการจำลองการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในเชิงพื้นที่ (Spatial Temperature Variation) ได้อย่างสอดคล้องกับผลเฉลยจาก FEM เชิงพาณิชย์

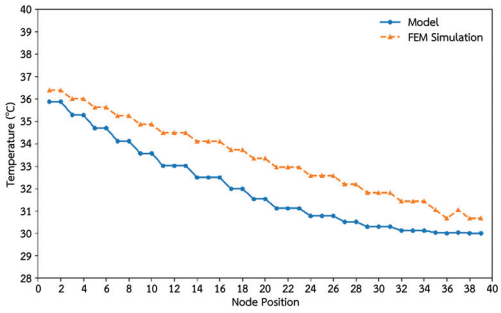
โดยสรุปการเปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่างแบบจำลองเชิงตัวเลขที่พัฒนาขึ้นด้วยโปรแกรมภาษาซีและ COMSOL Multiphysics แสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องทั้งในเชิงปริมาณและเชิงแนวโน้ม ซึ่งสนับสนุนความน่าเชื่อถือของแบบจำลองเชิงตัวเลขที่พัฒนาขึ้นสำหรับการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนผ่านฟิล์มกรองแสงภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด



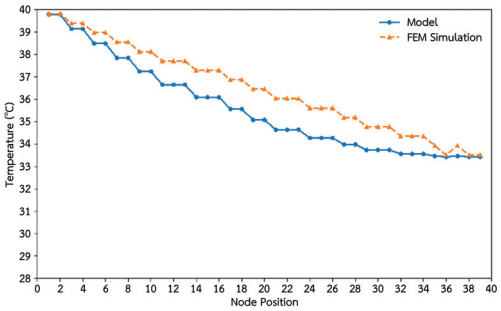
รูปที่ 4 การกระจายตัวของค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิระหว่างแบบจำลองและแบบจำลองไฟไนเอลิเมนต์



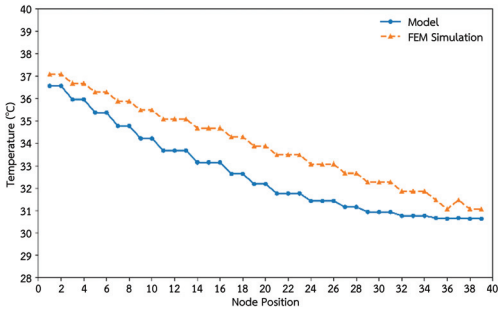
(ก) ฟิล์มเคลือบโลหะ



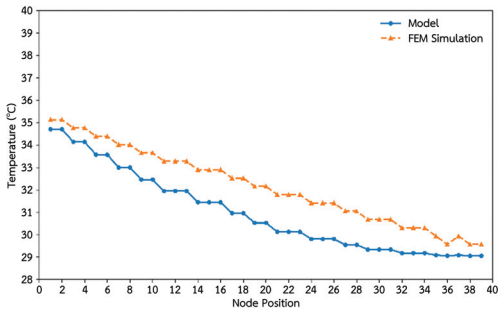
(ข) ฟิล์มแบล็กฟอสฟอรัส



(ค) ฟิล์มใสกันความร้อน



(ง) ฟิล์มนิรภัย

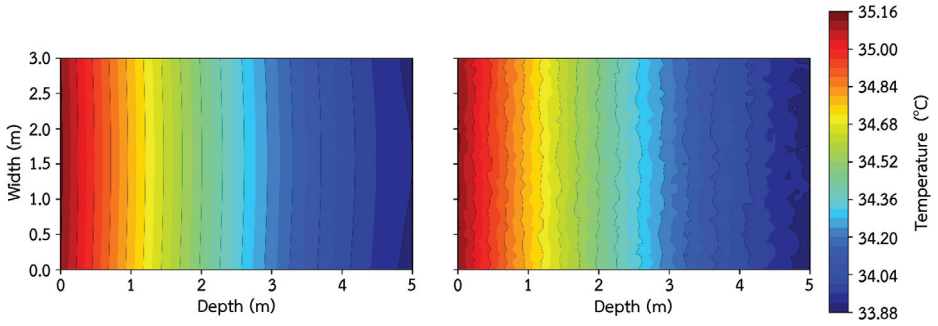


(จ) ฟิล์มเซรามิก

รูปที่ 5 การกระจายอุณหภูมิภายใต้สภาวะคงตัวตามตำแหน่งโหนดที่ได้จากแบบจำลองเชิงตัวเลขและแบบจำลองไฟไนเอลิเมนต์

3. การวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิแบบสองมิติ (2D Temperature Contour Analysis)

เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมการกระจายอุณหภูมิภายในพื้นที่แบบสองมิติ ผลลัพธ์จากการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ถูกนำเสนอในแบบแผนผังการกระจายตัวของอุณหภูมิ ดังรูปที่ 6 ซึ่งสามารถแสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิในเชิงพื้นที่ได้อย่างต่อเนื่องและละเอียดกว่าวิธีการวิเคราะห์แบบหนึ่งมิติ



(ก) แบบจำลองเชิงตัวเลขที่พัฒนาด้วยโปรแกรมภาษาซี

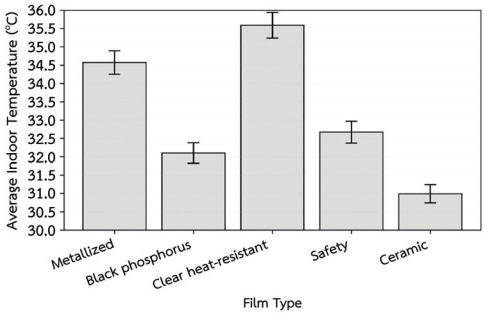
(ข) แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

รูปที่ 6 การเปรียบเทียบแผนผังการกระจายตัวของอุณหภูมิแบบสองมิติภายในพื้นที่จำลอง (มุมมองจากด้านบน) สำหรับฟิล์มเซรามิก

จากแผนผังการกระจายตัวของอุณหภูมิพบว่า อุณหภูมิสูงสุดเกิดขึ้นบริเวณผิวกระจกและลดลงอย่างต่อเนื่องเข้าสู่ภายในห้อง ซึ่งสะท้อนถึงกลไกการนำความร้อนตามทิศทางของความต่างอุณหภูมิ โดยความร้อนจะถ่ายเทจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำตามกฎของฟูริเยร์ (Fourier's Law of Heat Conduction) ลักษณะของการกระจายอุณหภูมิแสดงให้เห็นถึงที่เกรเดียนต์ของอุณหภูมิ (Temperature Gradient) มีความชันสูงในบริเวณใกล้ผิวกระจก ซึ่งเป็นผลมาจากการรับความร้อนจากสภาพแวดล้อมภายนอก และค่อย ๆ ลดลงเมื่อเคลื่อนเข้าสู่บริเวณภายในห้อง โดยรูปแบบดังกล่าวมีลักษณะสอดคล้องกันในทุกประเภทของฟิล์มกรองแสง อย่างไรก็ตาม ระดับของอุณหภูมิและความเข้มของเกรเดียนต์มีความแตกต่างกันตามชนิดของฟิล์ม โดยฟิล์มที่มีสมรรถนะในการลดการถ่ายเทความร้อนได้ดี เช่น ฟิล์มเซรามิก จะสามารถหน่วงการแพร่กระจายของความร้อนเข้าสู่ภายในได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้บริเวณภายในห้องมีอุณหภูมิต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มประเภทอื่น ในการวิเคราะห์เชิงตัวเลขแบบจำลองสองมิติสามารถแสดงรายละเอียดของการกระจายอุณหภูมิในแนวระนาบได้อย่างชัดเจน ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบเหนือแบบจำลองหนึ่งมิติ เนื่องจากสามารถสะท้อนพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นจริงภายในโดเมนได้ดียิ่งขึ้น ผลลัพธ์ดังกล่าวสอดคล้องกับผลการเปรียบเทียบในหัวข้อก่อนหน้า และแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นสามารถให้ผลลัพธ์ที่มีความแม่นยำและสอดคล้องทั้งในเชิงตัวเลขและเชิงกายภาพภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด

4. การวิเคราะห์สมรรถนะทางอุณหพลศาสตร์ของการถ่ายเทความร้อนผ่านฟิล์มกรองแสง (Thermodynamic Performance Analysis of Heat Transfer through Window Films)

งานวิจัยนี้ได้นำแบบจำลองเชิงตัวเลขมาประยุกต์ใช้เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนและประเมินสมรรถนะทางอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamic Performance) ของฟิล์มกรองแสงทั้ง 5 ประเภทภายใต้สภาวะคงตัว โดยใช้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยภายในห้อง (Average Indoor Temperature) เป็นตัวชี้วัดประสิทธิภาพในการต้านทานการถ่ายเทความร้อน ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 การเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิเฉลี่ยภายในห้องของฟิล์มกรองแสงแต่ละประเภทภายใต้สภาวะคงตัว

จากรูปที่ 7 พบว่าประเภทของฟิล์มกรองแสงมีอิทธิพลต่อระดับอุณหภูมิภายในอาคารอย่างมีนัยสำคัญ โดยฟิล์มใสกันความร้อนให้ค่าอุณหภูมิภายในสูงสุดประมาณ 35.6 °C ในขณะที่ฟิล์มเซรามิกให้ค่าอุณหภูมิต่ำสุดประมาณ 31.0 °C แนวโน้มดังกล่าวสะท้อนให้เห็นถึงความแตกต่างของสมรรถนะการต้านทานความร้อนโดยรวมของวัสดุ ซึ่งสอดคล้องกับเงื่อนไขอุณหภูมิขอบเขตบริเวณผิวกระจกที่ได้จากการประเมินเบื้องต้น โดยฟิล์มที่มีประสิทธิภาพสูงจะสามารถลดทอนอิทธิพลทางความร้อนจากสภาพแวดล้อมภายนอกได้อย่างมีนัยสำคัญ ส่งผลให้ปริมาณความร้อนที่แพร่ผ่านเข้าสู่ตัวอาคารลดลง เมื่อพิจารณาลำดับของสมรรถนะ พบว่าฟิล์มเซรามิกมีแนวโน้มให้สมรรถนะในการลดความร้อนดีที่สุดภายใต้เงื่อนไขของแบบจำลอง รองลงมาคือ ฟิล์มแบล็กฟอสฟอรัส ฟิล์มนิรภัย ฟิล์มเคลือบโลหะ และฟิล์มใสกันความร้อน ตามลำดับ ผลลัพธ์ดังกล่าวยังสอดคล้องกับการวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิแบบสองมิติในหัวข้อที่ 3 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ฟิล์มที่มีประสิทธิภาพสูงจะช่วยลดความชันของอุณหภูมิ (Temperature Gradient) ภายในห้อง ทำให้การกระจายตัวของอุณหภูมิมีความสม่ำเสมอมากขึ้น อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์นี้พิจารณาเฉพาะกลไกการนำความร้อนภายใต้สภาวะคงตัว ดังนั้น ผลลัพธ์จึงควรถูกตีความภายใต้ขอบเขตสมมติฐานของแบบจำลอง ซึ่งอาจมีความคลาดเคลื่อนจากสภาวะจริงหากมีการผนวกรวมกลไกการพาความร้อน และการแผ่รังสีเข้ามาพิจารณาร่วมด้วย

5. การประเมินความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์และระยะเวลาคืนทุน (Economic Evaluation and Payback Period Analysis)

งานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์ผลกระทบทางเศรษฐศาสตร์ของการติดตั้งฟิล์มกรองแสงแต่ละประเภท โดยพิจารณาภาระค่าใช้จ่ายด้านพลังงานสำหรับการทำความเย็น (Annual Cooling Cost) ซึ่งคำนวณจากปริมาณความร้อนที่ต้องกำจัดออกจากอาคารตามผลลัพธ์ของแบบจำลองเชิงตัวเลข ภาระค่าใช้จ่ายด้านการทำความเย็นสามารถประมาณได้จากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทเข้าสู่อาคารและการใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบปรับอากาศ โดยสามารถเขียนในรูปแบบสมการได้ดังสมการที่ (11) (Çengel, 2002)

$$Cooling\ \ Cost = \frac{Q}{COP} \times t \times C_{elec} \tag{11}$$

โดยที่

Q คือ ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทเข้าสู่อาคารจากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (kW)

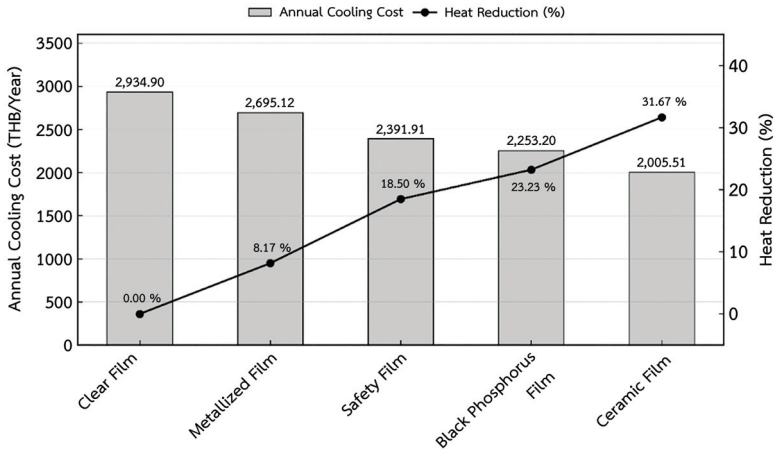
COP คือ ประสิทธิภาพของระบบปรับอากาศ

t คือ ชั่วโมงการใช้งาน (ชั่วโมง/ปี)

C_{elec} คือ อัตราค่าไฟฟ้า (บาท/kWh)

ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) คำนวณจากอัตราส่วนระหว่างต้นทุนการติดตั้งเริ่มต้นและผลประหยัดพลังงานที่ได้รับต่อปี ซึ่งเป็นวิธีมาตรฐานในงานวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์วิศวกรรม (Çengel, 2002) โดยสามารถเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังสมการที่ (12)

$$Payback\ \ Period = \frac{Initial\ \ Cost}{Annual\ \ Saving} \tag{12}$$



รูปที่ 8 การเปรียบเทียบภาระค่าใช้จ่ายด้านการทำความเย็นรายปีและประสิทธิภาพการลดความร้อนของฟิล์มกรองแสงแต่ละประเภท

จากรูปที่ 8 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์เชิงผกผัน (Inverse Relationship) อย่างชัดเจนระหว่างประสิทธิภาพการลดความร้อนและภาระค่าใช้จ่ายด้านการทำความเย็นรายปีของวัสดุฟิล์มกรองแสงทั้ง 5 ประเภท ข้อมูลบ่งชี้ว่า เมื่อวัสดุมีสมรรถนะในการสกัดกั้นความร้อนสูงขึ้น ภาระค่าใช้จ่ายในการใช้พลังงานจะลดต่ำลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยฟิล์มใสกันความร้อนมีภาระค่าใช้จ่ายสูงสุดอยู่ที่ 2,934.90 บาทต่อปี ในขณะที่ฟิล์มเคลือบโลหะ ฟิล์มนิรภัย และฟิล์มแบล็กฟอสฟอรัสสามารถลดภาระค่าใช้จ่ายลงมาได้ตามลำดับของประสิทธิภาพการกันความร้อนที่เพิ่มขึ้น ได้แก่ ร้อยละ 8.17 18.50 และ 23.23 ตามลำดับ ข้อสังเกตที่สำคัญคือ ฟิล์มเซรามิกสามารถลดสัดส่วนการถ่ายเทความร้อนได้ถึงร้อยละ 31.67 ส่งผลให้ภาระค่าใช้จ่ายรายปีลดลงไปอยู่ที่จุดต่ำสุดคือ 2,005.51 บาทต่อปี ผลลัพธ์ดังกล่าวยืนยันว่าการใช้วัสดุที่มีค่าความต้านทานความร้อนสูง มีนัยสำคัญต่อการลดทอนการใช้พลังงานของระบบปรับอากาศภายในอาคาร นอกเหนือจากการประเมินภาระค่าใช้จ่ายรายปีแล้ว ปัจจัยสำคัญในการตัดสินใจเลือกใช้วัสดุเชิงวิศวกรรมคือ ผลประหยัดพลังงานสุทธิ (Net Energy Savings) และระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) ซึ่งได้สรุปผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบไว้ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์และระยะเวลาคืนทุนของฟิล์มกรองแสง

ประเภทฟิล์มกรองแสง	อุณหภูมิผลลัพธ์ (°C)	ผลประหยัด (บาท/ปี)	ระยะเวลาคืนทุน (ปี)
ฟิล์มใสกันความร้อน	39.80	0.00	-
ฟิล์มเคลือบโลหะ38.60	239.78	3.75	
ฟิล์มนิรภัย 37.07	542.99	4.14	
ฟิล์มแบล็กฟอสฟอรัส	36.37	681.70	6.60
ฟิล์มเซรามิก 35.12	929.39	3.87	

จากตารางที่ 4 พบว่าฟิล์มเซรามิกประหยัดพลังงานได้สูงสุดถึง 929.39 บาทต่อปี โดยทำให้อุณหภูมิผิวลดลงต่ำสุดที่ 35.12 °C และมีระยะเวลาคืนทุน 3.87 ปี ซึ่งถือว่าอยู่ในระดับที่เหมาะสมและคุ้มค่าเมื่อเทียบกับอายุการใช้งานของวัสดุ (ประมาณ 7 - 10 ปี) แม้ว่าฟิล์มเคลือบโลหะจะมีระยะเวลาคืนทุนสั้นที่สุด (3.75 ปี) จากปัจจัยด้านต้นทุนเริ่มต้นที่ต่ำกว่า แต่ให้ผลประหยัดพลังงานและการลดอุณหภูมิที่น้อยกว่าอย่างชัดเจน ขณะที่ฟิล์มแบล็กฟอสฟอรัสแม้มีสมรรถนะทางความร้อนอยู่ในเกณฑ์ดี แต่มีระยะเวลาคืนทุนค่อนข้างยาวนาน (6.60 ปี) ซึ่งสะท้อนข้อจำกัดด้านต้นทุนของวัสดุ ในภาพรวมฟิล์มเซรามิกจึงแสดงศักยภาพด้านความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในระยะยาวสูงที่สุดภายใต้เงื่อนไขของแบบจำลอง ทั้งนี้ผลการประเมินขึ้นอยู่กับสมมติฐานสำคัญที่ตั้งไว้ เช่น อัตราค่าไฟฟ้า ชั่วโมงการใช้งานและประสิทธิภาพของระบบปรับอากาศ ดังนั้นผลลัพธ์ควรถูกตีความและนำไปประยุกต์ใช้ภายใต้เงื่อนไขดังกล่าว

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนภายในอาคารภายใต้สภาวะคงตัว โดยประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ร่วมกับแบบจำลองเชิงตัวเลขที่พัฒนาขึ้นด้วยโปรแกรมภาษาซี เพื่อวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิแบบสองมิติ และเปรียบเทียบสมรรถนะของฟิล์มกรองแสงจำนวน 5 ประเภท ได้แก่ ฟิล์มเคลือบโลหะ ฟิล์มแบล็กฟอสฟอรัส ฟิล์มใสกันความร้อน ฟิล์มนิรภัย และฟิล์มเซรามิก ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่า ฟิล์มเซรามิกมีสมรรถนะในการลดอุณหภูมิภายในห้องได้ดีที่สุดภายใต้เงื่อนไขของแบบจำลอง รองลงมาคือ ฟิล์มแบล็กฟอสฟอรัสและฟิล์มนิรภัย โดยแนวโน้มดังกล่าวสอดคล้องกับสมรรถนะการต้านทานความร้อนโดยรวมของวัสดุที่มีผลต่อการลดการถ่ายเทความร้อนผ่านกระจก ในด้านแบบจำลองเชิงตัวเลขผลการเปรียบเทียบกับซอฟต์แวร์ COMSOL Multiphysics แสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องของแนวโน้มการกระจายอุณหภูมิอย่างชัดเจน โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในระดับที่ยอมรับได้สำหรับการวิเคราะห์เชิงวิศวกรรม ซึ่งสะท้อนถึงความน่าเชื่อถือของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น ในส่วนของการประเมินเชิงเศรษฐศาสตร์ พบว่าฟิล์มเซรามิกมีความคุ้มค่าในการลงทุนสูงสุด โดยมีระยะเวลาคืนทุนประมาณ 3.87 ปี ทั้งนี้ ผลลัพธ์ดังกล่าวยังขึ้นอยู่กับสมมติฐานของแบบจำลอง เช่น อัตราค่าไฟฟ้า และประสิทธิภาพของระบบปรับอากาศ นอกจากนี้ผลลัพธ์ยังสอดคล้องกับหลักการทางทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการเลือกวัสดุที่เหมาะสมในการออกแบบอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงานการลดการใช้พลังงานดังกล่าวส่งผลโดยตรงต่อการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ซึ่งมีบทบาทสำคัญต่อการรับมือกับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (SDG 13: Climate Action) (United Nations, 2017) โดยเฉพาะในบริบทของประเทศเขตร้อนที่มีความต้องการใช้พลังงานเพื่อการทำความเย็นสูง

งานวิจัยนี้มีส่วนช่วยเติมเต็มช่องว่างทางวิชาการในด้านการเปรียบเทียบฟิล์มกรองแสงภายใต้แบบจำลองเชิงตัวเลขเดียวกัน และการเชื่อมโยงผลการวิเคราะห์ทางอุณหพลศาสตร์กับการตัดสินใจเชิงเศรษฐศาสตร์ในบริบทภูมิอากาศเขตร้อน ในขณะเดียวกันแบบจำลองที่ใช้ในงานวิจัยนี้พิจารณาเฉพาะกลไกการนำความร้อนภายใต้สภาวะคงตัวและไม่ได้รวมผลของการพาความร้อนและการแผ่รังสี ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในสภาวะจริง ดังนั้น ผลลัพธ์ควรถูกตีความภายใต้ข้อจำกัดดังกล่าว และควรมีการศึกษาต่อยอดเพื่อเพิ่มความแม่นยำและสมจริงของแบบจำลองในอนาคต โดยสรุปผลการศึกษานี้สามารถใช้เป็นแนวทางเบื้องต้นในการเลือกใช้ฟิล์มกรองแสง เพื่อยกระดับประสิทธิภาพการใช้พลังงานของอาคารและสนับสนุนการพัฒนาอาคารอย่างยั่งยืน

ข้อจำกัดของงานวิจัยและการอภิปรายผล

งานวิจัยนี้สามารถแสดงแนวโน้มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของฟิล์มกรองแสงได้อย่างชัดเจนภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด อย่างไรก็ตาม แบบจำลองเชิงตัวเลขและการวิเคราะห์ยังมีข้อจำกัดสำคัญที่ควรพิจารณา ได้แก่ การพิจารณาเฉพาะการนำความร้อนในสภาวะคงตัว โดยไม่รวมการพาความร้อนและการแผ่รังสีซึ่งมีอิทธิพลสูงในสภาพใช้งานจริง การแทนฟิล์มด้วยเงื่อนไขขอบเขตแทนการจำลองเป็นชั้นวัสดุจริง ทำให้ไม่สามารถสะท้อนพฤติกรรมภายในเชิงจุลภาคได้อย่างครบถ้วน และการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์ที่อิงสมมติฐานค่าคงที่ ซึ่งอาจแตกต่างจากสภาพการใช้งานจริงของแต่ละอาคาร ดังนั้น ผลลัพธ์จึงเหมาะใช้เป็นแนวทางประเมินและเปรียบเทียบสมรรถนะในระดับ และควรพัฒนาต่อยอดด้วยการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนแบบหลายโหมด การจำลองเชิงสามมิติ และการทวนสอบด้วยข้อมูลภาคสนาม เพื่อเพิ่มความแม่นยำและความสมจริงของแบบจำลองในอนาคต

References

Bahadori-Jahromi, A., Rotimi, A., Mylona, A., Godfrey, P. and Cook, D. (2017). Impact of Window Films on the Overall Energy Consumption of Existing UK Hotel Buildings. *Sustainability*, 9(5), https://doi.org/10.3390/su9050731

Baskar, I. and Chellapandian, M. (2022). Experimental and Finite Element Analysis on the Developed Real-Time form Stable PCM-Based Roof System for Thermal Energy Storage Applications. *Energy and Buildings*, 276. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112514

Bathe, K.J. (1996). *Finite Element Procedures*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.

Callister, W.D., Jr. (2007). *Materials Science and Engineering: An Introduction* (7thed). New York, NY: John Wiley & Sons.

Çengel, Y.A. (2002). *Heat Transfer: A Practical Approach* (2nded). New York, NY: McGraw-Hill.

Chen, Z. (2023). Finite Element Analysis on Heat Convection Effect on Air Temperature Distribution in a Heated Room. *Theoretical and Applied Natural Science*, 5, 482-489. https://doi.org/10.54254/2753-8818/5/20230291

Fleury, B., Abraham, E., De La Cruz, J.A., Chandrasekar, V.S., Senyuk, B., Liu, Q., Cherpak, V., Park, S., ten Hove, J.B. and Smalyukh, I.I. (2020). Aerogel from Sustainably Grown Bacterial Cellulose Pellicles as a Thermally Insulative Film for Building Envelopes. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 12(30), 34115-34121. https://doi.org/10.1021/acsami.0c08879

Huang, H.-Y., Hu, W.-C., Chen, C.-K., Lin, T.-H., Lin, F.-Y., Cheng, C.-C., Su, T.-C. and Yu, P.-Y. (2024). Evaluation of the Effects of Window Films on the Indoor Environment and Air-Conditioning Electricity Consumption of Buildings. *Energies*, 17(6), https://doi.org/10.3390/en17061388

Incropera, F.P., DeWitt, D.P., Bergman, T.L. and Lavine, A.S. (2007). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* (6thed). John Wiley & Sons.

Karim, M.A. (2025). Analytic Modeling to Study the Insolation Heat Gain of Semi Insulated Building in Hot Climate. *Academy Journal For Basic and Applied Sciences*, 7(1), 1-5. https://doi.org/10.5281/zenodo.15507447

Lampert, C.M. (1981). Heat Mirror Coatings for Energy Conserving Windows. *Solar Energy Materials*, 6(1), 1-41. https://doi.org/10.1016/0165-1633(81)90058-1

Luo, Z., Maassen, J., Deng, Y., Du, Y., Garrelts, R.P., Lundstrom, M.S., Ye, P.D. and Xu, X. (2015). Anisotropic In-Plane Thermal Conductivity Observed in Few-Layer Black Phosphorus. *Nature Communications*, 6. https://doi.org/10.1038/ncomms9572

Mayer, R., Enache-Pommer, E., Parsons, G., Mazor, M., Hansbro, J., Lastovica, J., Buck, C. and Maurer, M. (2014). Finite Element Thermal Modeling and Correlation of Various Building Wall Assembly Systems. *Energy and Buildings*, 75, 410-418. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.11.034

Rawat, P. (2017). Performance Evaluation of Parabolic Solar Concentrator with Carbon Credit Assessment. *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*, 4(11), 697-702. https://www.jetir.org/papers/JETIR1711118.pdf

Reddy, J.N. (2019). *An Introduction to the Finite Element Method* (4thed). New York, NY: McGraw-Hill Education.

Roache, P.J. (1994). Perspective: A Method for Uniform Reporting of Grid Refinement Studies. *Journal of Fluids Engineering*, 116(3), 405-413. https://doi.org/10.1115/1.2910291

Thai Meteorological Department. (2025). *Climate and Temperature Data Services*. https://www.tmd.go.th/service/tmdData

United Nations. (2017). *Global Indicator Framework for the Sustainable Development Goals and Targets of the 2030 Agenda for Sustainable Development (A/RES/71/313, Annex)*. https://unstats.un.org/sdgs/indicators/indicators-list/

Valachova, D. and Skotnica, J. (2019). Using the Finite Element Method to Predict Heat Dissipation in a Timber Frame Building Construction. *Wood Research*, 64(5), 859-870. https://www.woodresearch.sk/wr/201905/10.pdf

Zhou, H., Fransson, Å. and Olofsson, T. (2021). An Explicit Finite Element Method for Thermal Simulations of Buildings with Phase Change Materials. *Energies*, 14(19). https://doi.org/10.3390/en14196194

Zienkiewicz, O.C. and Taylor, R.L. (2000). *The Finite Element Method* (5th ed., Vols. 1-3). Oxford, England: Butterworth-Heinemann.

การสั่นอิสระของโครงสร้างเปลือกบางทำจากวัสดุที่มีสมบัติเปลี่ยนแปลงตามความหนาและเสริมกำลังด้วยแกรฟีนเพลตเลทโดยใช้ทฤษฎีการเสียรูปด้วยแรงเฉือนอันดับที่หนึ่งแบบปรับปรุง

Free Vibration of Functionally Graded Shells with Graphene Platelets Reinforcement using Improved First-Order Shear Deformation Theory

หทัยกาญจน์ หนันดูลย์[1] วีรพันธุ์ เจียมมีปรีชา[1] คมกร ไชยเดชาธร[1*] และ Sunchhorng Roun[2]

Hathaikan Nandun[1] Weeraphan Jiammeepreecha[1] Komkorn Chaidachatorn[1*] and Sunchhorng Roun[2]

Received: *April 26, 2026;* ***Revised:*** *June 10, 2026;* ***Accepted:*** *June 26, 2026*

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอสมการกึ่งการวิเคราะห์การสั่นอิสระของโครงสร้างเปลือกบางทำจากวัสดุที่มีสมบัติเปลี่ยนแปลงตามความหนาและเสริมกำลังด้วยแกรฟีนเพลตเลทโดยใช้ทฤษฎีการเสียรูปด้วยแรงเฉือนอันดับที่หนึ่งแบบปรับปรุง การคำนวณหาค่ามอดูลัสยืดหยุ่นประสิทธิผลของวัสดุเมทริกซ์ประเภทโลหะผสมที่มีสมบัติเปลี่ยนแปลงตามความหนาสามารถคำนวณได้โดยใช้แบบจำลองของ Voigt ในขณะที่วัสดุเสริมกำลังด้วยแกรฟีนเพลตเลทนิยามได้จากแบบจำลองไมโครกลศาสตร์ของ Halpin–Tsai สำหรับค่าอัตราส่วนปัวซงและค่าความหนาแน่นประสิทธิผลคำนวณได้จากกของการผสมสมการควบคุมสามารถนิยามได้โดยใช้ทฤษฎีการเสียรูปด้วยแรงเฉือนอันดับที่หนึ่งแบบปรับปรุง จากนั้นใช้หลักการของแฮมิลตันในการสร้างสมการการเคลื่อนที่ของระบบโครงสร้างเปลือกบาง และใช้กระบวนการหาคำตอบของนาเวียร์ในการหาผลลัพธ์เชิงตัวเลข ความถูกต้องของคำตอบที่ได้จากงานวิจัยในครั้งนี้สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาในอดีตที่ใช้ทฤษฎีการเสียรูปเนื่องจากแรงเฉือนแตกต่างกัน ผลการศึกษาพบว่าโครงสร้างเปลือกบางทำจากวัสดุที่มีสมบัติเปลี่ยนแปลงตามความหนาเสริมกำลังด้วยแกรฟีนเพลตเลทรูปแบบ B จะให้ค่าความถี่ธรรมชาติสูงที่สุด เนื่องจากมีปริมาณส่วนผสมส่วนใหญ่ของแกรฟีนเพลตเลทกระจายอยู่ในช่วงผิวบนและผิวล่างสอดคล้องกับค่าการกระจายความเค้นตั้งฉากจริงที่เกิดขึ้นของโครงสร้างเปลือกบาง

คำสำคัญ : การสั่นอิสระ; ทฤษฎีการเสียรูปด้วยแรงเฉือนอันดับที่หนึ่งแบบปรับปรุง; แบบจำลองไมโครกลศาสตร์; วัสดุที่มีสมบัติเปลี่ยนแปลงตามความหนา; สมการกึ่งการวิเคราะห์

[1] *คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน*

[2] *คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม*

[1] *Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Isan*

[2] *Faculty of Engineering, Siam University*

[*] *Corresponding Author, Tel. 08 8592 9040, E - mail: komkorn@rmuti.ac.th*

Abstract

This paper presents a semi-analytical formulation for the free vibration of functionally graded shells with graphene platelets reinforcement using improved first-order shear deformation theory. The effective Young's modulus of the functionally graded material (FGM) is determined using Voigt's model, while the effective Young's modulus of the graphene platelet (GPL) reinforcement is predicted by the Halpin–Tsai micromechanical model. Additionally, the effective Poisson's ratio and density are calculated using the rule of mixtures. The governing equations for FGM shells reinforced with GPL are formulated using the improved first-order shear deformation theory (FSDT). The equations of motion are derived using Hamilton's principle, and the numerical solutions are obtained through Navier's method. The present results demonstrate excellent agreement with various shear deformation theories reported in the existing literature. The numerical results indicate that the FGM shells reinforced with GPL pattern B yield the highest natural frequency. This is because the maximum GPL content is distributed near the top and bottom surfaces, where the normal stresses are highest. Furthermore, this GPL distribution effectively satisfies the actual normal stress requirements of the shells.

Keywords: Free Vibration; Functionally Graded Material; Improved First-Order Shear Deformation Theory; Micromechanical Model; Semi-Analytical Formulation

บทนำ

โครงสร้างเปลือกบาง (Shell Structures) เป็นโครงสร้างที่มีการใช้งานกันมาอย่างยาวนานเนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงในการต้านทานแรงกระทำในรูปแบบต่าง ๆ และสามารถกำหนดรูปทรงได้ตามวัตถุประสงค์ของการใช้งาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมที่ต้องใช้ชิ้นส่วนที่มีความซับซ้อนสูง (Zingoni, 2015; Jiammeepreecha, 2017) ดังนั้นการเลือกใช้วัสดุประเภทไอโซทรอปิก (Isotropic Material) อาจมีข้อจำกัดบางประการทำให้ไม่สามารถใช้งานวิศวกรรมขั้นสูงได้ ในปัจจุบันพบว่าการเลือกใช้งานวัสดุเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของโครงสร้างเปลือกบางจะสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การใช้วัสดุเชิงประกอบ (Composite Materials) หรือการใส่วัสดุเสริมกำลังเพื่อเสริมกำลังวัสดุหลัก (Reinforced Materials) เป็นต้น สำหรับโครงสร้างเปลือกบางที่ทำมาจากวัสดุเชิงประกอบจะสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทหลัก ๆ คือ โครงสร้างเปลือกบางแบบลามิเนท (Laminate Shells) ซึ่งจะประกอบไปด้วยวัสดุแผ่นโค้งซ้อนทับหลายชั้นสลับกัน (Reddy, 2003; Qatu, 2004) และโครงสร้างเปลือกบางทำจากวัสดุที่มีสมบัติเปลี่ยนแปลงตามความหนา (Functionally Graded Shells) ซึ่งจะเป็นการปรับปรุงคุณภาพโดยการเปลี่ยนเฟสของโลหะไปเป็นเซรามิกแบบต่อเนื่องตลอดความหนาของโครงสร้างเปลือกบาง (Shen, 2009; Thai and Kim, 2015; Garg et al., 2021) เนื่องจากข้อดีของโลหะ (Metal) จะมีกำลังสูงแต่ทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสูงได้ต่ำ ในขณะที่เซรามิก (Ceramic) จะมีกำลังต่ำแต่จะทนต่ออุณหภูมิสูงได้ดี ในกรณีของการใส่วัสดุเสริมกำลังในปัจจุบัน ได้แก่ การใส่วัสดุท่อนาโนคาร์บอน (Carbon Nanotubes) และวัสดุแกรฟีนเพลตเลท (Graphene Platelet) (Tjong, 2013; Zhao et al., 2020; Yee and Ghayesh, 2023; Worku and Ayele, 2023)

จากงานวิจัยที่ผ่านมาในอดีตพบว่าการเพิ่มประสิทธิภาพของวัสดุโครงสร้างเปลือกบางมักจะเลือกใช้เพียงแนวทางใดแนวทางหนึ่งเท่านั้น สำหรับการประยุกต์ใช้ทั้งสองแนวทางพร้อมกันก็ถือเป็นแนวทางที่เริ่มเป็นที่นิยมใช้สำหรับงานวิศวกรรมขั้นสูง เช่น งานวิจัยของ Zhao et al. (2024) และ Khalaf and Hasan (2024) ได้เลือกใช้วัสดุเสริมกำลังทั้งท่อนาโนคาร์บอนและแกรฟีนเพลตเลทในการผสมกับวัสดุเมทริกซ์ประเภทอีพอกซี่เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของโครงสร้างเปลือกบางให้สูงขึ้น อย่างไรก็ตามการเสริมกำลังประเภทนี้จะเป็นที่นิยมใช้กับงานทางด้านวิศวกรรมโยธา

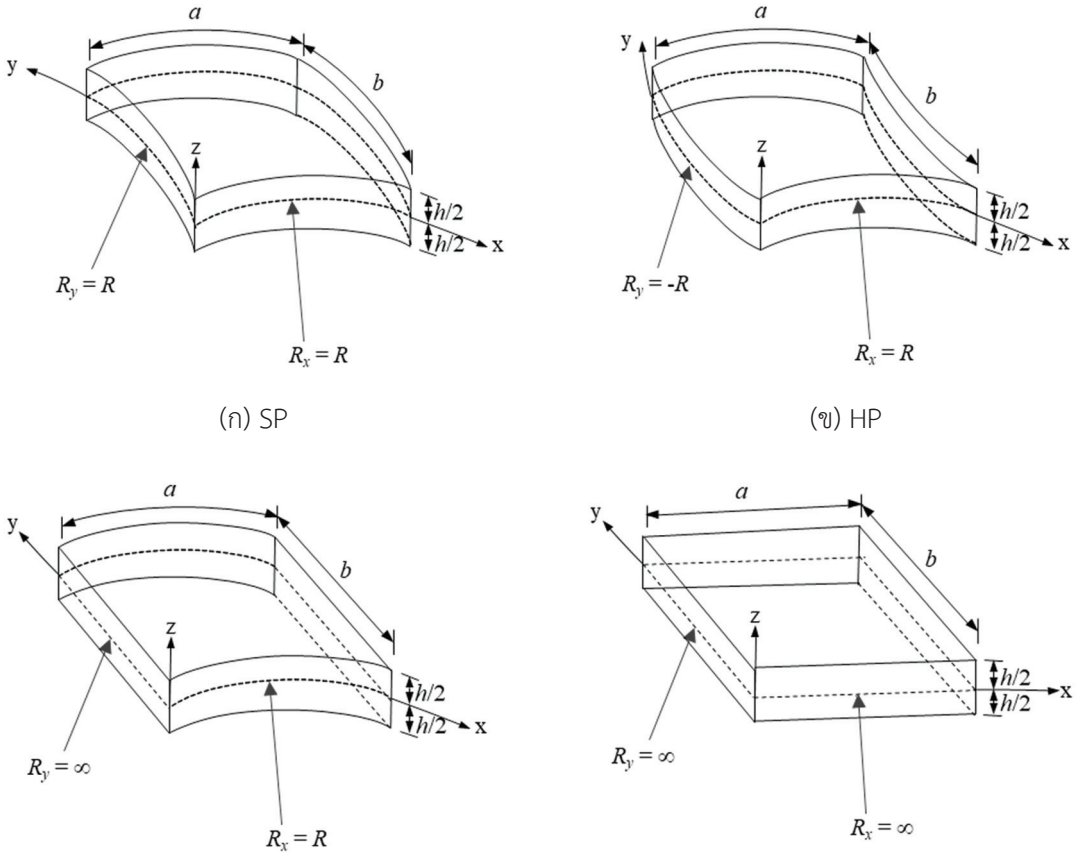
เป็นหลัก ในขณะที่งานทางด้านวิศวกรรมเครื่องกลและการบินจะพบว่าวัสดุเมทริกซ์จะเป็นประเภทโลหะผสม ซึ่งจะมีคุณสมบัติแตกต่างจากวัสดุเมทริกซ์ประเภทอีพอกซี่โดยสิ้นเชิง ดังงานวิจัยของ Ansari et al. (2020) โดยใช้โลหะประเภททองแดงเป็นวัสดุเมทริกซ์สำหรับโครงสร้างแผ่นเรียบนาโนคอมโพสิตเสริมกำลังด้วยแกรฟีนเพลตเลท (FG-GPLRC Nanocomposite Plates) ดังนั้นวัสดุเมทริกซ์ในงานวิจัยนี้จึงมีคุณสมบัติเป็นวัสดุไอโซทรอปิกเทียบเท่ากับกรณีของวัสดุเมทริกซ์ประเภทอีพอกซี่ จนกระทั่ง Roun et al. (2025) ได้นำเสนอวัสดุเมทริกซ์ประเภทโลหะผสมที่มีสมบัติเปลี่ยนแปลงตามความหนา (Functionally Graded Material) ที่ใช้สำหรับโครงสร้างแผ่นเรียบนาโนคอมโพสิตเสริมกำลังด้วยแกรฟีนเพลตเลท ซึ่งจะมีกระบวนการผลิตและการวิเคราะห์ที่ยุ่งยากซับซ้อนมากกว่า แต่จากงานวิจัยในอดีตที่ผ่านมาพบว่ายังไม่มีการศึกษาสำหรับกรณีที่เป็นโครงสร้างเปลือกบาง ซึ่งจะมีความแตกต่างจากการวิเคราะห์โครงสร้างแผ่นเรียบทั่วไป นั่นคือ จะมีผลของความโค้งหลักเริ่มต้น (Initial Principal Curvature) ในขณะที่โครงสร้างแผ่นเรียบจะมีค่าความโค้งหลักเริ่มต้นเป็นศูนย์นั่นเอง

สำหรับวัตถุประสงค์ของบทความนี้คือ การนำเสนอสมการกึ่งการวิเคราะห์การสั่นอิสระของโครงสร้างเปลือกบางทำจากวัสดุที่มีสมบัติเปลี่ยนแปลงตามความหนาและเสริมกำลังด้วยแกรฟีนเพลตเลทโดยใช้ทฤษฎีการเสียรูปด้วยแรงเฉือนอันดับที่หนึ่งแบบปรับปรุง (Improved FSDT) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของโครงสร้างเปลือกบางแบบดั้งเดิม การคำนวณหาค่ามอดูลัสยืดหยุ่นประสิทธิผลของวัสดุเมทริกซ์ประเภทโลหะผสมที่มีสมบัติเปลี่ยนแปลงตามความหนา (FGM) จะสามารถคำนวณได้โดยใช้แบบจำลองของ Voigt (Zhao et al., 2020) ในขณะที่วัสดุเสริมกำลังด้วยแกรฟีนเพลตเลท (GPL) จะนิยามได้จากแบบจำลองไมโครกลศาสตร์ของ Halpin–Tsai (Halpin and Kardos, 1976) สำหรับค่าอัตราส่วนปัวซงและค่าความหนาแน่นประสิทธิผลจะคำนวณได้จากกฎของการผสม (Rule of Mixtures) (Jones, 2018) สมการควบคุม (Governing Equation) สามารถนิยามได้โดยใช้ทฤษฎีการเสียรูปด้วยแรงเฉือนอันดับที่หนึ่งแบบปรับปรุง (Van Vinh et al., 2022; Benounas et al., 2024) โดยการกำหนดค่าตัวคูณปรับแก้แรงเฉือน (Shear Correction Factor) เป็นฟังก์ชันที่สอดคล้องกับเงื่อนไขของความเค้นเฉือนจริง (True Shear Stress) เพื่อให้ค่าความเค้นเฉือนที่บริเวณผิวด้านนอกของโครงสร้างเปลือกบางมีค่าเป็นศูนย์ จากนั้นใช้หลักการของแฮมิลตัน (Hamilton's Principle) (Reddy, 2003) ในการสร้างสมการการเคลื่อนที่ (Equations of Motion) ของระบบโครงสร้างเปลือกบาง และใช้กระบวนการหาคำตอบของนาเวียร์ (Navier's Solution) (Van Vinh and Tounsi, 2022) ในการหาผลลัพธ์เชิงตัวเลข (Numerical Results) โดยกำหนดให้ฟังก์ชันการเสียรูปของโครงสร้างเปลือกบางสอดคล้องกับเงื่อนไขของจุดรองรับอย่างง่าย

แบบจำลองโครงสร้างเปลือกบาง

พิจารณาโครงสร้างเปลือกบางทำจากวัสดุที่มีสมบัติเปลี่ยนแปลงตามความหนาและเสริมกำลังด้วยแกรฟีนเพลตเลทขนาดยาว x กว้าง x หนา เท่ากับ $a \times b \times h$ ดังรูปที่ 1 โดยกำหนดให้บริเวณผิวด้านนอกสุด $\left(z = h/2\right)$ และด้านในสุด $\left(z = -h/2\right)$ ของโครงสร้างเปลือกบางจะเป็นวัสดุเซรามิก (Ceramic) และโลหะ (Metal) ตามลำดับ ซึ่งสามารถนิยามการเปลี่ยนสมบัติของวัสดุจากโลหะเป็นเซรามิกตลอดความหนาของโครงสร้างโดยใช้กฎการยกกำลัง (Power Law Distribution) ซึ่งจะทำให้ได้ค่าสัดส่วนโดยปริมาตรของเซรามิก $\left(V_1\right)$ และโลหะ $\left(V_2\right)$ จากนั้นทำการเสริมกำลังด้วยแกรฟีนเพลตเลท (GPL) โดยพิจารณาจากค่าสัดส่วนโดยปริมาตรของแกรฟีนเพลตเลท $\left(V_{GPL}\right)$ โดยที่ผลรวมของ V_1, V_2 และ V_{GPL} จะมีค่าเท่ากับหนึ่งเสมอ ในที่นี้การจำแนกประเภทของโครงสร้างเปลือกบางจะสามารถทำได้โดยกำหนดให้ค่าองค์ประกอบของรัศมีความโค้ง (R_x และ R_y) ของโครงสร้างเปลือกบางมีค่าดังนี้

1) $R_x = R_y$ สำหรับโครงสร้างเปลือกบางรูปทรงกลม โดยมีอักษรย่อคือ SP ดังรูปที่ 1(ก)
2) $R_x = -R_y$ สำหรับโครงสร้างเปลือกบางรูปทรงไฮเปอร์โบลิก โดยมีอักษรย่อคือ HP ดังรูปที่ 1(ข)
3) $R_y = \infty$ สำหรับโครงสร้างเปลือกบางรูปทรงกระบอก โดยมีอักษรย่อคือ CY ดังรูปที่ 1(ค)
4) $R_x = R_y = \infty$ สำหรับโครงสร้างแผ่นเรียบ โดยมีอักษรย่อคือ FL ดังรูปที่ 1(ง)



(ก) SP (ข) HP

(ค) CY (ง) FL

รูปที่ 1 โครงสร้างเปลือกบางทำจากวัสดุที่มีสมบัติเปลี่ยนแปลงตามความหนาและเสริมกำลังด้วยแกรฟีนเพลตเลท

1. แบบจำลองของวัสดุเมทริกซ์ประเภทโลหะผสมที่มีสมบัติเปลี่ยนแปลงตามความหนา

วัสดุเมทริกซ์ประเภทโลหะผสมที่มีสมบัติเปลี่ยนแปลงตามความหนา (FGM) จะสามารถนิยามการเปลี่ยนเฟสจากโลหะเป็นเซรามิกตลอดความหนาของโครงสร้างโดยใช้กฎการยกกำลัง (Power Law Distribution) ดังสมการที่ (1)

$$V_1(z)=\left(\frac{1}{2}+\frac{z}{h}\right)^p, V_2(z)=1-V_1(z) \tag{1}$$

โดยที่ $-h/2 \le z \le h/2$ เมื่อตัวห้อย 1 และ 2 แทนคุณสมบัติของวัสดุเซรามิกและโลหะ ตามลำดับ ในขณะที่ตัวยกกำลัง p คือค่าเลขยกกำลังของวัสดุเมทริกซ์ ดังนั้นจากแบบจำลองของ Voigt (Zhao et al., 2020) จะสามารถคำนวณหาค่ามอดูลัสยืดหยุ่นประสิทธิผล (E_M) และความหนาแน่นประสิทธิผล (ρ_M) ของวัสดุเมทริกซ์ได้ดังสมการที่ (2) และ (3)

$$E_M(z)=(E_1-E_2)V_1(z)+E_2 \tag{2}$$

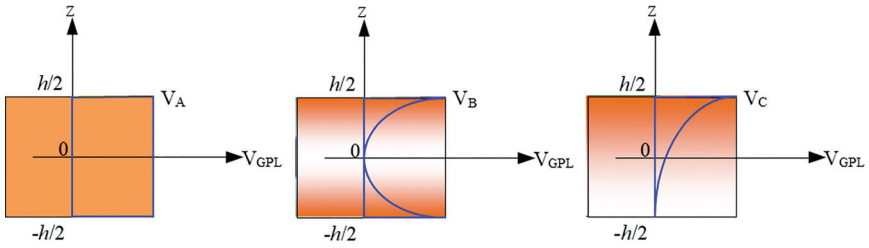
$$\rho_M(z)=(\rho_1-\rho_2)V_1(z)+\rho_2 \tag{3}$$

เมื่อตัวห้อย M คือวัสดุเมทริกซ์ ในกรณีนี้จะกำหนดให้ค่าอัตราส่วนปัวซง (v_M) ของวัสดุเซรามิกและโลหะมีค่าเท่ากัน นั่นคือ $v_1 = v_2 = v_M$

2. แบบจำลองของวัสดุเสริมกำลังด้วยแกรฟีนเพลตเลท

รูปที่ 2 แสดงค่าการกระจายตัวของแกรฟีนเพลตเลท โดยกำหนดให้รูปแบบ A มีค่าการกระจายตัวของแกรฟีนเพลตเลทสม่ำเสมอ (Uniform Distribution) ตลอดความหนาของโครงสร้างเปลือกบาง รูปแบบ B เป็นการกระจายตัว

ของแกรฟีนเพลตเลทแบบฟังก์ชัน FG-X โดยจะมีปริมาณการกระจายตัวของแกรฟีนเพลตเลทมากสุดที่บริเวณผิวด้านบนและล่างสุด $(z=\pm h/2)$ และลดลงเป็นฟังก์ชันโคไซน์ (Cosine Function) จนกระทั่งมีค่าเป็นศูนย์ที่ตำแหน่งกึ่งกลางความหนา $(z=0)$ ของโครงสร้างเปลือกบาง สุดท้ายจะเป็นรูปแบบ C เป็นการกระจายตัวของแกรฟีนเพลตเลทแบบฟังก์ชัน FG-V โดยจะมีปริมาณการกระจายตัวของแกรฟีนเพลตเลทมากสุดที่บริเวณผิวด้านบนสุด $(z=h/2)$ และลดลงเป็นฟังก์ชันโคไซน์ (Cosine Function) จนกระทั่งเป็นศูนย์ที่บริเวณผิวด้านล่างสุด $(z=-h/2)$ ของโครงสร้างเปลือกบาง



(ก) รูปแบบ A (ข) รูปแบบ B (ค) รูปแบบ C

รูปที่ 2 รูปแบบการกระจายตัวของแกรฟีนเพลตเลทตลอดความหนาของโครงสร้างเปลือกบาง

จากรูปที่ 2 จะสามารถนิยามค่าสัดส่วนโดยปริมาตร (Volume Fraction) ได้ดังสมการที่ (4)

$$V_{GPL}(z)=V_i(z)\cdot\phi_i(z) \tag{4}$$

ในที่นี้ กำหนดให้ตัวห้อย $i=A,B,C$ แทนด้วยรูปแบบการกระจายตัวของแกรฟีนเพลตเลท A, B, และ C ตามลำดับ และ V_i คือสัดส่วนโดยปริมาตรทั้งหมดของแกรฟีนเพลตเลทสามารถนิยามได้ดังสมการที่ (5)

$$V_i(z)=\frac{W_{GPL}\left[\int_{-h/2}^{h/2}\rho_M(z)\right]}{W_{GPL}\left[\int_{-h/2}^{h/2}\rho_M(z)\cdot\phi_i(z)\,dz\right]+\rho_{GPL}(1-W_{GPL})\left[\int_{-h/2}^{h/2}\phi_i(z)\,dz\right]} \tag{5}$$

เมื่อ ρ_{GPL} และ W_{GPL} คือค่าความหนาแน่นและน้ำหนักของแกรฟีนเพลตเลท ในขณะที่ ϕ_i คือฟังก์ชันการกระจายตัวของแกรฟีนเพลตเลท สามารถนิยามได้ดังสมการที่ (6)

$$\phi_A(z)=1,\phi_B(z)=1-\cos\left(\frac{\pi z}{h}\right),\phi_C(z)=1-\cos\left[\frac{\pi}{2}\left(\frac{z}{h}+\frac{1}{2}\right)\right] \tag{6}$$

จากแบบจำลองไมโครกลศาสตร์ของ Halpin–Tsai (Halpin and Kardos, 1976) จะสามารถคำนวณหาค่ามอดูลัสยืดหยุ่นประสิทธิผล (E_c) ของวัสดุเสริมกำลังด้วยแกรฟีนเพลตเลทได้ดังสมการที่ (7)

$$E_c(z)=\frac{3}{8}\left(\frac{1+\xi_L\eta_L V_{GPL}(z)}{1-\eta_L V_{GPL}(z)}\right)E_M(z)+\frac{5}{8}\left(\frac{1+\xi_T\eta_T V_{GPL}(z)}{1-\eta_T V_{GPL}(z)}\right)E_M(z) \tag{7}$$

ในที่นี้ กำหนดให้ตัวห้อย c แทนด้วยคุณสมบัติของวัสดุที่มีสมบัติเปลี่ยนแปลงตามความหนาเสริมกำลังด้วยแกรฟีนเพลตเลท ตัวห้อย L และ T แทนด้วยคุณสมบัติของวัสดุตามแนวยาวและแนวขวาง ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ η_L และ η_T จะสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (8)

$$\eta_L=\frac{(E_{GPL}/E_M)-1}{(E_{GPL}/E_M)+\xi_L},\eta_T=\frac{(E_{GPL}/E_M)-1}{(E_{GPL}/E_M)+\xi_L} \tag{8}$$

เมื่อ E_{GPL} คือค่ามอดูลัสของแกรฟีนเพลตเลท ดังนั้นค่าพารามิเตอร์อัตราส่วนรูปทรงของแกรฟีนเพลตเลท ξ_L และ ξ_T สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (9)

$$\xi_T = 2l_{GPL} / h_{GPL}, \xi_T = 2w_{GPL} / h_{GPL} \tag{9}$$

เมื่อ l_{GPL}, w_{GPL} และ h_{GPL} คือค่าเฉลี่ยของความยาว ความกว้าง และความหนาของแกรฟีนเพลตเลท สำหรับการคำนวณหาค่าอัตราส่วนปัวซง (v_c) และค่าความหนาแน่น (ρ_c) ของวัสดุที่มีสมบัติเปลี่ยนแปลงตามความหนาเสริมกำลังด้วยแกรฟีนเพลตเลทจะสามารถคำนวณได้จากกฎของการผสม (Rule of Mixtures) (Jones, 2018) ดังสมการที่ (10) และ (11)

$$v_c(z) = v_{GPL}V_{GPL}(z) + v_M V_M(z) \tag{10}$$

$$\rho_c(z) = \rho_{GPL}V_{GPL}(z) + \rho_M V_M(z) \tag{11}$$

เมื่อ v_{GPL} และ ρ_{GPL} คือค่าอัตราส่วนปัวซงและความหนาแน่นของแกรฟีนเพลตเลท ทั้งนี้ ค่าสัดส่วนโดยปริมาตร (Volume Fraction) ของวัสดุเมทริกซ์ (V_M) และแกรฟีนเพลตเลท (V_{GPL}) จะมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (12)

$$V_M(z) + V_{GPL}(z) = 1 \tag{12}$$

3. สมการความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของวัสดุ

ค่าการเสียรูปของโครงสร้างเปลือกบางสามารถนิยามได้โดยใช้ทฤษฎีการเสียรูปด้วยแรงเฉือนอันดับที่หนึ่งแบบปรับปรุง (Van Vinh et al., 2022; Benounas et al., 2024) ดังสมการที่ (13) - (15)

$$u(x,y,z,t) = u_0(x,y,t) + z\varphi_x(x,y,t) \tag{13}$$

$$v(x,y,z,t) = v_0(x,y,t) + z\varphi_y(x,y,t) \tag{14}$$

$$w(x,y,z,t) = w_0(x,y,t) \tag{15}$$

เมื่อ (u_0, v_0, w_0) คือองค์ประกอบของค่าการเสียรูปตามแนวแกน (x,y,z) ที่ตำแหน่งกึ่งกลางความหนา $(z=0)$ และ (φ_x, φ_y) คือค่าการหมุนแนวขวางตามแนวแกน (x,y) โดยมีค่าเท่ากับ $\varphi_x = \partial u / \partial z$ และ $\varphi_y = \partial v / \partial z$ จากสมการที่ (13) - (15) จะสามารถหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเครียด-การเคลื่อนตัว (Strain–Displacement Relations) ได้ดังสมการที่ (16) และ (17)

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \varepsilon^0_{xx} \\ \varepsilon^0_{yy} \\ \gamma^0_{xy} \end{Bmatrix} + z\begin{Bmatrix} \varepsilon^1_{xx} \\ \varepsilon^1_{yy} \\ \gamma^1_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \dfrac{\partial u_0}{\partial x} + \dfrac{w_0}{R_x} \\ \dfrac{\partial v_0}{\partial y} + \dfrac{w_0}{R_y} \\ \dfrac{\partial u_0}{\partial y} + \dfrac{\partial v_0}{\partial x} \end{Bmatrix} + z\begin{Bmatrix} \dfrac{\partial \varphi_x}{\partial x} \\ \dfrac{\partial \varphi_y}{\partial y} \\ \dfrac{\partial \varphi_x}{\partial y} + \dfrac{\partial \varphi_y}{\partial x} \end{Bmatrix} \tag{16}$$

$$\begin{Bmatrix} \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \gamma^0_{yz} \\ \gamma^0_{xz} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \dfrac{\partial w_0}{\partial y} - \dfrac{v_0}{R_y} + \varphi_y \\ \dfrac{\partial w_0}{\partial x} - \dfrac{u_0}{R_x} + \varphi_x \end{Bmatrix} \tag{17}$$

จากสมการที่ (16) และ (17) จะสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของวัสดุ (Stress–Strain Relations) ได้ดังสมการที่ (18) - (19)

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \tag{18}$$

$$\begin{Bmatrix} \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \end{Bmatrix} = K_s \begin{bmatrix} Q_{55} & 0 \\ 0 & Q_{44} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \end{Bmatrix} \tag{19}$$

ในที่นี้ (สมการที่ (20))

$$Q_{11} = Q_{22} = \frac{E(z)}{1-\nu(z)^2}, Q_{12} = Q_{21} = \frac{E(z)\cdot\nu(z)}{1-\nu(z)^2}, Q_{44} = Q_{55} = Q_{66} = \frac{E(z)}{2[1-\nu(z)]} \tag{20}$$

สำหรับค่า K_s คือค่าตัวคูณปรับแก้แรงเฉือน (Shear Correction Factor) ซึ่งโดยทั่วไปตามทฤษฎีการเสียรูปเนื่องจากแรงเฉือนอันดับที่หนึ่ง (FSDT) ค่า K_s จะเป็นค่าคงที่เท่ากับ 5/6 (Van Vinh and Tounsi, 2022) ซึ่งจะพบว่าค่าความเค้นเฉือนจะไม่ถูกต้องเนื่องจากค่าความเค้นเฉือนที่ถูกต้องจะต้องมีค่าเป็นศูนย์ที่ตำแหน่งผิวบนและล่าง $\left(z = \pm h/2\right)$ ของโครงสร้างเปลือกบาง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการกำหนดค่าตัวคูณปรับแก้แรงเฉือนให้เป็นฟังก์ชันที่สอดคล้องกับเงื่อนไขของความเค้นเฉือนจริง จากงานวิจัยของ Van Vinh et al. (2022) และ Benounas et al. (2024) ได้กำหนดฟังก์ชันของค่า K_s ดังสมการที่ (21)

$$K_s(z) = \frac{5}{4}\left[1 - 4\left(\frac{z}{h}\right)^2\right] \tag{21}$$

4. สมการการเคลื่อนที่

จากหลักการของแฮมิลตัน (Hamilton's Principle) (Reddy, 2003) จะสามารถสร้างสมการการเคลื่อนที่ (Equations of Motion) ของโครงสร้างเปลือกบางทำจากวัสดุที่มีสมบัติเปลี่ยนแปลงตามความหนาและเสริมกำลังด้วยแกรฟีนเพลตเลทโดยใช้ทฤษฎีการเสียรูปด้วยแรงเฉือนอันดับที่หนึ่งได้ดังสมการที่ (22)

$$\int_0^T \left(\delta U - \delta K\right) dt = 0 \tag{22}$$

เมื่อ δU คือค่าการแปรผันของพลังงานความเครียด (Strain Energy) และ δK คือค่าการแปรผันของพลังงานจลน์ (Kinematic Energy) ของโครงสร้างเปลือกบาง ดังนั้นค่า δU และ δK สามารถนิยามได้ดังสมการที่ (23) และ (24)

$$\delta U = \int_V \left(\sigma_{xx}\delta\varepsilon_{xx} + \sigma_{yy}\delta\varepsilon_{yy} + \tau_{xy}\delta\gamma_{xy} + \tau_{yz}\delta\gamma_{yz} + \tau_{xz}\delta\gamma_{xz}\right) dV \tag{23}$$

$$\delta K = \int_\Omega \int_{-h/2}^{h/2} \rho(z)\left(\ddot{u}\delta u + \ddot{v}\delta v + \ddot{w}\delta w\right) dz d\Omega \tag{24}$$

จากนั้นทำการแทนค่าสมการที่ (16) และ (17) ลงในสมการที่ (23) และแทนค่าสมการที่ (13) - (15) ลงในสมการที่ (24) ดังนั้นเราจะสามารถนิยามสมการการเคลื่อนที่ได้ดังสมการที่ (25) - (29)

$$\frac{\partial N_{xx}}{\partial x}+\frac{\partial N_{xy}}{\partial y}+\frac{Q_{xz}}{R_x}=I_0\ddot{u}_0+I_1\ddot{\varphi}_x \tag{25}$$

$$\frac{\partial N_{xy}}{\partial x}+\frac{\partial N_{yy}}{\partial y}+\frac{Q_{yz}}{R_y}=I_0\ddot{v}_0+I_1\ddot{\varphi}_y \tag{26}$$

$$\frac{\partial Q_{xz}}{\partial x}+\frac{\partial Q_{yz}}{\partial y}-\frac{N_{xx}}{R_x}-\frac{N_{yy}}{R_y}=I_0\ddot{w}_0 \tag{27}$$

$$\frac{\partial M_{xx}}{\partial x}+\frac{\partial M_{xy}}{\partial y}-Q_{xz}=I_1\ddot{u}_0+I_2\ddot{\varphi}_x \tag{28}$$

$$\frac{\partial M_{xy}}{\partial x}+\frac{\partial M_{yy}}{\partial y}-Q_{yz}=I_1\ddot{v}_0+I_2\ddot{\varphi}_y \tag{29}$$

โดยที่สมการที่ (25) - (29) เป็นสมการการเคลื่อนที่สำหรับการเคลื่อนที่ในทิศทาง $\delta u_0, \delta v_0, \delta w_0, \delta\varphi_x,$ และ $\delta\varphi_y$ ตามลำดับ และ (N_k, M_k, Q_k) คือค่าผลลัพธ์ของความเค้น (Stress Resultants) ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (30) - (32)

$$(N_x, N_y, N_{xy})=\int_{-h/2}^{h/2}(\sigma_{xx},\sigma_{yy},\tau_{xy})\,dz \tag{30}$$

$$(M_x, M_y, M_{xy})=\int_{-h/2}^{h/2}(\sigma_{xx},\sigma_{yy},\tau_{xy})\,z\,dz \tag{31}$$

$$(Q_x, Q_y)=\int_{-h/2}^{h/2}(\tau_{xz},\tau_{yz})\,dz \tag{32}$$

แทนค่าสมการที่ (18) ลงในสมการที่ (30) และ (31) จะสามารถเขียนในรูปเมทริกซ์ดังสมการที่ (33)

$$\begin{Bmatrix} N_{xx}\\ N_{yy}\\ N_{xy}\\ M_{xx}\\ M_{yy}\\ M_{xy}\end{Bmatrix}=\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 & B_{11} & B_{12} & 0\\ A_{12} & A_{22} & 0 & B_{12} & B_{22} & 0\\ 0 & 0 & A_{66} & 0 & 0 & B_{66}\\ B_{11} & B_{12} & 0 & D_{11} & D_{12} & 0\\ B_{12} & B_{22} & 0 & D_{12} & D_{22} & 0\\ 0 & 0 & B_{66} & 0 & 0 & D_{66}\end{bmatrix}\begin{Bmatrix} \varepsilon^0_{xx}\\ \varepsilon^0_{yy}\\ \gamma^0_{xy}\\ \varepsilon^1_{xx}\\ \varepsilon^1_{yy}\\ \gamma^1_{xy}\end{Bmatrix} \tag{33}$$

ในที่นี้

$$\begin{Bmatrix} A_j\\ B_j\\ D_j\end{Bmatrix}=\int_{-h/2}^{h/2}Q_j\begin{Bmatrix} 1\\ z\\ z^2\end{Bmatrix}dz \tag{34}$$

โดยที่สมการที่ (34) กำหนดให้ตัวห้อย j = 11, 12, 22 และ 66 ตามลำดับ แทนค่าสมการที่ (19) ลงในสมการที่ (32) จะได้ดังสมการที่ (35) และ (36)

$$\begin{Bmatrix} Q_{yz}\\ Q_{xz}\end{Bmatrix}=\begin{bmatrix} S_{55} & 0\\ 0 & S_{44}\end{bmatrix}\begin{Bmatrix} \gamma_{yz}\\ \gamma_{xz}\end{Bmatrix} \tag{35}$$

ในที่นี้

$$\{S_l\}=\int_{-h/2}^{h/2} K_s Q_l dz \tag{36}$$

โดยที่กำหนดให้ตัวห้อย l = 55 และ 44 สำหรับค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของมวล (Mass Moment of Inertia) ดังสมการที่ (25) - (29) จะสามารถนิยามได้ดังสมการที่ (37)

$$\begin{Bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{Bmatrix} = \int_{-h/2}^{h/2} \rho_c(z) \begin{Bmatrix} 1 \\ z \\ z^2 \end{Bmatrix} dz \tag{37}$$

5. สมการกึ่งการวิเคราะห์

การสร้างสมการกึ่งการวิเคราะห์และการหาผลลัพธ์เชิงตัวเลขสามารถทำได้โดยใช้กระบวนการหาคำตอบของนาเวียร์ (Navier's Solution) (Van Vinh and Tounsi, 2022) ในการกำหนดฟังก์ชันการเสียรูปของโครงสร้างเปลือกบางให้สอดคล้องกับเงื่อนไขของจุดรองรับอย่างง่าย (Simply-Supported Condition) ดังสมการที่ (38) - (42)

$$u_0 = \sum_{n=1}^{\infty}\sum_{m=1}^{\infty} U_{mn} e^{i\omega t} \cos\alpha x \sin\beta y \tag{38}$$

$$v_0 = \sum_{n=1}^{\infty}\sum_{m=1}^{\infty} V_{mn} e^{i\omega t} \sin\alpha x \cos\beta y \tag{39}$$

$$w_0 = \sum_{n=1}^{\infty}\sum_{m=1}^{\infty} W_{mn} e^{i\omega t} \sin\alpha x \sin\beta y \tag{40}$$

$$\phi_x = \sum_{n=1}^{\infty}\sum_{m=1}^{\infty} X_{mn} e^{i\omega t} \cos\alpha x \sin\beta y \tag{41}$$

$$\phi_y = \sum_{n=1}^{\infty}\sum_{m=1}^{\infty} Y_{mn} e^{i\omega t} \sin\alpha x \cos\beta y \tag{42}$$

เมื่อ $i=\sqrt{-1}, \alpha = m\pi/a$ และ $\beta = n\pi/b$ โดยที่ $(U_{mn}, V_{mn}, W_{mn}, X_{mn}, Y_{mn})$ คือค่าสัมประสิทธิ์ของการเสียรูปที่ไม่ทราบค่า ถ้ากำหนดให้ $\{q\}=(U_{mn} \quad V_{mn} \quad W_{mn} \quad X_{mn} \quad Y_{mn})^T$ และ ω_{mn} คือค่าความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency) โดยที่ตัวห้อย (m,n) คือค่าโหมดไอเกน (Eigen Mode) ตามแกน (x,y) จากนั้นทำการแทนค่าสมการที่ (38) - (42) ลงในสมการที่ (16) และ (17) ดังนั้นสมการที่ (25) - (29) จะให้ค่าสมการลักษณะเฉพาะ (Characteristic Equation) ดังสมการที่ (43)

$$\left([K]-\omega_{mn}^2[M]\right)\{q\}=0 \tag{43}$$

เมื่อ $[K]$ และ $[M]$ คือค่าเมทริกซ์ความแข็งแกร่ง (Stiffness Matrix) และเมทริกซ์มวล (Mass Matrix) ในที่นี้ $k_{ij}=k_{ji}$ และ $m_{ij}=m_{ji}$ โดยที่ i,j = 1, 2,..., 5 ดังนั้นจะสามารถนิยามค่าสัมประสิทธิ์ได้ดังสมการที่ (44) - (62)

$$k_{11} = A_{11}\alpha^2 + A_{66}\beta^2 + \frac{S_{55}}{R_x^2} \tag{44}$$

$$k_{12} = k_{21} = (A_{12} + A_{66})\alpha\beta \tag{45}$$

ISSN 3027-6756 (Online)
Research on Modern science and Utilizing Technological Innovation Journal (RMUTI Journal)

$$k_{13} = k_{31} = -\alpha\left(\frac{A_{11}}{R_x} + \frac{A_{12}}{R_y} + \frac{S_{55}}{R_x}\right) \quad (46)$$

$$k_{14} = k_{41} = B_{11}\alpha^2 + B_{66}\beta^2 - \frac{S_{55}}{R_x} \quad (47)$$

$$k_{15} = k_{51} = \left(B_{12} + B_{66}\right)\alpha\beta \quad (48)$$

$$k_{22} = A_{66}\alpha^2 + A_{22}\beta^2 + \frac{S_{44}}{R_y^2} \quad (49)$$

$$k_{23} = k_{32} = -\beta\left(\frac{A_{12}}{R_x} + \frac{A_{22}}{R_y} + \frac{S_{44}}{R_y}\right) \quad (50)$$

$$k_{24} = k_{42} = \left(B_{12} + B_{66}\right)\alpha\beta \quad (51)$$

$$k_{25} = k_{52} = B_{66}\alpha^2 + B_{22}\beta^2 - \frac{S_{44}}{R_y} \quad (52)$$

$$k_{33} = S_{55}\alpha^2 + S_{44}\beta^2 + \frac{A_{11}}{R_x^2} + \frac{2A_{12}}{R_xR_y} + \frac{A_{22}}{R_y^2} \quad (53)$$

$$k_{34} = k_{43} = \alpha\left(S_{55} - \frac{B_{11}}{R_x} - \frac{B_{12}}{R_y}\right) \quad (54)$$

$$k_{35} = k_{53} = \beta\left(S_{44} - \frac{B_{12}}{R_x} - \frac{B_{22}}{R_y}\right) \quad (55)$$

$$k_{44} = D_{11}\alpha^2 + D_{66}\beta^2 + S_{55} \quad (56)$$

$$k_{45} = k_{54} = \left(D_{12} + D_{66}\right)\alpha\beta \quad (57)$$

$$k_{55} = D_{66}\alpha^2 + D_{22}\beta^2 + S_{44} \quad (58)$$

$$m_{11} = m_{22} = m_{33} = I_0 \quad (59)$$

$$m_{14} = m_{41} = m_{25} = m_{52} = I_1 \quad (60)$$

$$m_{44} = m_{55} = I_2 \quad (61)$$

$$m_{12} = m_{21} = m_{13} = m_{31} = m_{15} = m_{51} = m_{23} = m_{32} = m_{24} = m_{42} = m_{35} = m_{53} = m_{45} = m_{54} = 0 \quad (62)$$

กระบวนการหาคำตอบเชิงตัวเลขโดยใช้กระบวนการหาคำตอบของนาเวียร์ (Navier's Solution) จะมีขั้นตอนในการคำนวณดังนี้

ขั้นที่ 1 คำนวณค่า $E_M(z)$ และ $\rho_M(z)$ ของวัสดุเมทริกซ์จากสมการที่ (2) และ (3)

ขั้นที่ 2 คำนวณค่า $E_c(z), v_c(z),$ และ $\rho_c(z)$ ของวัสดุเมทริกซ์เสริมกำลังด้วยแกรฟีนเพลตเลทจากสมการที่ (7) (10) และ (11) ตามลำดับ

ขั้นที่ 3 คำนวณค่า $Q_{11}, Q_{22}, Q_{12}, Q_{21}, Q_{44}, Q_{55},$ และ Q_{66} จากสมการที่ (20)

ขั้นที่ 4 คำนวณค่า $A_j, B_j,$ และ D_j เมื่อตัวห้อย j = 11, 12, 22, และ 66 ตามลำดับ จากสมการที่ (34) และคำนวณค่า $I_0, I_1,$ และ I_2 จากสมการที่ (37)

ขั้นที่ 5 กำหนดค่าโหมดไอเกน m และ n เพื่อคำนวณ k_{ij} และ m_{ij} จะสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (44) - (62)

ขั้นที่ 6 คำนวณค่า ω_{mn} จากสมการที่ (43)

ผลการศึกษา

ในการนำเสนอผลการวิเคราะห์การสั่นอิสระของโครงสร้างเปลือกบางทำจากวัสดุที่มีสมบัติเปลี่ยนแปลงตามความหนาและเสริมกำลังด้วยแกรฟีนเพลตเลทโดยใช้ทฤษฎีการเสียรูปด้วยแรงเฉือนอันดับที่หนึ่งแบบปรับปรุง และการหาคำตอบเชิงตัวเลขโดยใช้กระบวนการหาคำตอบของนาเวียร์ (Navier's Solution) สำหรับค่ามอดูลัสยืดหยุ่น อัตราส่วนปัวซงและความหนาแน่นของวัสดุเมทริกซ์พอลิเมอร์ (Polymer) วัสดุที่มีสมบัติเปลี่ยนแปลงตามความหนา (FGM) สำหรับเซรามิกที่ทำจากอะลูมินา (Al_2O_3) และโลหะที่ทำจากอะลูมิเนียม (Al) และสุดท้ายคือ แกรฟีนเพลตเลท (GPL) ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้จะมีค่าดังตารางที่ 1 โดยที่ขนาดของแกรฟีนเพลตเลท (GPL) ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ จะมีค่า w_{GPL} = 1.5 ไมโครเมตร, l_{GPL} = 2.5 ไมโครเมตร และ h_{GPL} = 1.5 นาโนเมตร ในกรณีที่ไม่ได้กำหนดเป็นอย่างอื่น จะสามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ความถี่ (Frequency Parameter) ได้ดังสมการที่ (63)

$$\overline{\omega} = \omega h\sqrt{\rho_1 / E_1} \tag{63}$$

1. การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง จะแบ่งออกเป็น 3 กรณี โดยเริ่มต้นจากการเปรียบเทียบกับค่าพารามิเตอร์ความถี่ (Frequency Parameter) ของโครงสร้างเปลือกบางทำจากวัสดุที่มีสมบัติเปลี่ยนแปลงตามความหนา (FGM Shells) โดยที่เซรามิกทำจากอะลูมินา (Al_2O_3) และโลหะทำจากอะลูมิเนียม (Al) มีค่าคุณสมบัติดังตารางที่ 1 ในที่นี้ค่าอัตราส่วนความยาวรัศมีต่อความยาวของโครงสร้างเปลือกบาง (a/R_x) และอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างของโครงสร้างเปลือกบาง (a/b) มีค่าเท่ากับ 0.5 และ 1.0 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองพบว่าค่าพารามิเตอร์ความถี่ $(\overline{\omega})$ ที่ได้จากงานวิจัยนี้มีค่าน้อยกว่างานวิจัยของ Matsunaga (2008) ดังตารางที่ 2 เนื่องจากความแตกต่างของทฤษฎีการเสียรูปเนื่องจากแรงเฉือนที่แตกต่างกัน โดยงานวิจัยของ Matsunaga (2008) ใช้ทฤษฎีการเสียรูปขั้นสูงแบบสองมิติ (Two-Dimensional Higher-Order Deformation Theory) อย่างไรก็ตาม ความแตกต่างสูงสุดจะมีค่าไม่เกินร้อยละ 6.836 สำหรับโครงสร้างเปลือกบางรูปทรงกลม (SP) เมื่ออัตราส่วน $a/h = 2$ ทั้งนี้ค่าร้อยละความแตกต่างจะมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วน a/h มีค่าเพิ่มสูงขึ้นนั่นเอง เนื่องจากโครงสร้างเปลือกบางมีความหนาน้อย (Thin Shells) จะส่งผลทำให้ความแตกต่างเนื่องจากการคำนวณทั้งสองทฤษฎีคือ ทฤษฎีการเสียรูปขั้นสูงแบบสองมิติ (Matsunaga, 2008) และทฤษฎีการเสียรูปด้วยแรงเฉือนอันดับที่หนึ่งแบบปรับปรุง (Improved FSDT) มีค่าลดลงเพราะผลของความเค้นเฉือนที่มีต่อโครงสร้างมีค่าลดลง ในขณะที่เมื่อความหนาของโครงสร้างมีค่าเพิ่มสูงขึ้น จะส่งผลทำให้ค่าการกระจายตัวของค่าความเค้นเฉือนในสมการที่ (35) มีความแตกต่างกันจากทั้งสองทฤษฎี สำหรับผลกระทบของความแตกต่างที่เกิดขึ้นเมื่อเทียบกับงานวิจัยของ Matsunaga (2008) จะพบว่าเมื่อโครงสร้างเปลือกบางมีผลของค่ารัศมีความโค้ง (R_x และ R_y) เพิ่มมากขึ้น จะทำให้ความแตกต่างมีค่าเพิ่มสูงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่เป็นโครงสร้างเปลือกบางรูปทรงกลม (SP) และรูปทรงไฮเปอร์โบลิก (HP) ในขณะที่โครงสร้างแผ่นเรียบ (FL) ซึ่งจะไม่มีผลของค่ารัศมีความโค้ง (R_x และ R_y) ทำให้ค่าความแตกต่างเกิดขึ้นน้อยที่สุดในทุกกรณีของค่าอัตราส่วนความหนา (a/h) ดังตารางที่ 2 ทั้งนี้เนื่องจากค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเครียด-การเคลื่อนตัว (Strain–Displacement Relations) ในสมการที่ (16) และ (17) ไม่ได้พิจารณาผลของโครงสร้างเปลือกบางรูปทรงตื้น (Shallow Shells) ซึ่งจะทำให้ค่ารัศมีความโค้งมีเงื่อนไขแตกต่างกัน

สำหรับการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโครงสร้างเปลือกบางเสริมกำลังด้วยแกรฟีนเพลตเลท (FG-GPLRC Shells) กับงานวิจัยของ Wang et al. (2018) จะทำได้โดยการกำหนดให้ค่าเลขยกกำลังของวัสดุเมทริกซ์

(p) ในสมการที่ (1) มีค่าเป็นศูนย์ จากนั้นทำการกำหนดค่าของวัสดุเซรามิกเป็นวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยแกรฟีนเพลตเลท (GPL) ที่มีคุณสมบัติดังตารางที่ 1 ในที่นี้ค่าอัตราส่วน a/R_x และ a/b จะมีค่าเท่ากับ 0.2 และ 1.0 ซึ่งจะพบว่าค่าพารามิเตอร์ความถี่ $(\overline{\omega})$ มีค่าตรงกับงานวิจัยของ Wang et al. (2018) ยกเว้นในโหมดการสั่นลำดับ (2,2) เมื่อความหนาของโครงสร้างเปลือกบางมีค่าสูง ($a/h=5$) มีความแตกต่างกันน้อยมาก ในขณะที่โหมดการสั่นอื่น ๆ จะมีค่าเท่ากัน ดังตารางที่ 3 แม้ว่างานวิจัยของ Wang et al. (2018) จะใช้ทฤษฎีการเสียรูปเนื่องจากแรงเฉือนอันดับสูง (Higher-Order Shear Deformation Theory) ซึ่งจะมีจำนวนตัวแปรไม่ทราบค่า 9 ตัว ในขณะที่งานวิจัยนี้ใช้ทฤษฎีการเสียรูปด้วยแรงเฉือนอันดับที่หนึ่งแบบปรับปรุง (Improved FSDT) ซึ่งจะมีจำนวนตัวแปรไม่ทราบค่า 5 ตัว ดังนั้นการใช้ทฤษฎีการเสียรูปด้วยแรงเฉือนอันดับที่หนึ่งแบบปรับปรุง (Improved FSDT) จะทำให้การแก้ปัญหาที่ซับซ้อนได้ง่ายขึ้น

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของวัสดุ

รายการวัสดุ	มอดูลัสยืดหยุ่น (GPa)	อัตราส่วนปัวซง	ความหนาแน่น (kg/m^3)
พอลิเมอร์ (Polymer)	2.85	0.34	1,200
อะลูมินา (Al_2O_3)	380	0.30	3,800
อะลูมิเนียม (Al)	70	0.30	2,702
แกรฟีนเพลตเลท (GPL)	1,010	0.186	1,060

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างเปลือกบางทำจากวัสดุที่มีสมบัติเปลี่ยนแปลงตามความหนา ($a/R_x=0.5$ และ $a/b=1.0$)

a/h	ประเภทโครงสร้าง	ค่าความถี่ธรรมชาติในโหมดการสั่นพื้นฐาน (1,1)								
		Matsunaga (2008)			งานวิจัยนี้			ความแตกต่าง (%)		
		p = 0	p = 0.5	p = 1	p = 0	p = 0.5	p = 1	p = 0	p = 0.5	p = 1
2	FL	0.9400	0.8232	0.7476	0.9265	0.8101	0.7333	1.436	1.591	1.913
	SP	0.9527	0.8429	0.7709	0.9291	0.8001	0.7182	2.477	5.078	6.836
	CY	0.9334	0.8213	0.7483	0.9075	0.7882	0.7109	2.775	4.030	4.998
	HP	0.9038	0.7925	0.7202	0.8551	0.7502	0.6807	5.388	5.338	5.485
5	FL	0.2121	0.1819	0.1640	0.2112	0.1808	0.1631	0.424	0.605	0.549
	SP	0.2301	0.2000	0.1819	0.2271	0.1940	0.1749	1.304	3.000	3.848
	CY	0.2153	0.1855	0.1678	0.2123	0.1812	0.1633	1.393	2.318	2.682
	HP	0.2064	0.1770	0.1596	0.1996	0.1710	0.1544	3.295	3.390	3.258
10	FL	0.0578	0.0492	0.0443	0.0577	0.0490	0.0442	0.173	0.407	0.226
	SP	0.0751	0.0657	0.0601	0.0746	0.0646	0.0588	0.666	1.674	2.163
	CY	0.0622	0.0535	0.0485	0.0617	0.0527	0.0477	0.804	1.495	1.649
	HP	0.0563	0.0479	0.0432	0.0548	0.0466	0.0420	2.664	2.714	2.778

สุดท้ายจะเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของโครงสร้างเปลือกบางทำจากวัสดุที่มีสมบัติเปลี่ยนแปลงตามความหนาและเสริมกำลังด้วยแกรฟีนเพลตเลท (FG Shells with GPL Reinforcement) ซึ่งจะยังไม่มีงานวิจัยที่ทำการศึกษามาก่อน นอกจากงานวิจัยของ Roun et al. (2025) ที่ได้ทำการศึกษาการสั่นอิสระของโครงสร้างแผ่นเรียบทำจากวัสดุที่มีสมบัติเปลี่ยนแปลงตามความหนา เสริมกำลังด้วยแกรฟีนเพลตเลทโดยใช้ทฤษฎีแผ่นเรียบปรับปรุงสี่ตัวแปรไม่ทราบค่าที่มีการพิจารณาฟังก์ชันการเสียรูปออกเป็น 4 ตัวแปรหลัก ได้แก่ การเคลื่อนที่แนวราบ 2 แนว (u,v) และการเคลื่อนที่แนวตั้งฉากที่พิจารณาผลของแรงเฉือนและแรงดัด (w_s,w_b) โดยที่วัสดุที่มีสมบัติเปลี่ยนแปลงตามความหนาจะกำหนดให้เซรามิกทำจากอะลูมินา (Al_2O_3) โลหะทำจากอะลูมิเนียม (Al) เสริมกำลังด้วยแกรฟีนเพลตเลท

(GPL) มีคุณสมบัติดังตารางที่ 1 พบว่าค่าพารามิเตอร์ความถี่ธรรมชาติมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยนี้ดังตารางที่ 4 ซึ่งมีค่าความแตกต่างสูงสุดเท่ากับร้อยละ 0.20 ในโหมดการสั่นลำดับ (2,2) เมื่อความหนาของโครงสร้างแผ่นเรียบมีค่าสูง ($a/h=5$)

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างเปลือกบางทำจากวัสดุที่มีสมบัติเปลี่ยนแปลงตามความหนา ($a/R_x=0.2,\ a/b=1.0$ และ $W_{GPL}=1.0\%$)

a/h	ประเภทโครงสร้าง	ค่าโหมดพารามิเตอร์ความถี่ธรรมชาติ (m,n)								
		Wang et al. (2018)			งานวิจัยนี้			ความแตกต่าง (%)		
		(1,1)	(1,2)	(2,2)	(1,1)	(1,2)	(2,2)	(1,1)	(1,2)	(2,2)
5	SP	0.1279	0.2919	0.4450	0.1279	0.2919	0.4449	0	0	0.022
	CY	0.1229	0.2892	0.4438	0.1229	0.2892	0.4437	0	0	0.023
	HP	0.1206	0.2898	0.4427	0.1206	0.2898	0.4425	0	0	0.045
10	SP	0.0374	0.0796	0.1232	0.0374	0.0796	0.1232	0	0	0
	CY	0.0328	0.0770	0.1219	0.0328	0.0770	0.1219	0	0	0
	HP	0.0310	0.0778	0.1213	0.0310	0.0778	0.1213	0	0	0
15	SP	0.0097	0.0150	0.0217	0.0097	0.0150	0.0217	0	0	0
	CY	0.0065	0.0127	0.0205	0.0065	0.0127	0.0205	0	0	0
	HP	0.0050	0.0135	0.0200	0.0050	0.0135	0.0200	0	0	0

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างเปลือกบางทำจากวัสดุที่มีสมบัติเปลี่ยนแปลงตามความหนาและเสริมกำลังด้วยแกรฟีนเพลตเลท ($a/b=1.0,\ p=1.0$ และ $W_{GPL}=1.0\%$)

a/h	รูปแบบ GPL	ค่าโหมดพารามิเตอร์ความถี่ธรรมชาติ (m,n)								
		Roun et al. (2025)			งานวิจัยนี้			ความแตกต่าง (%)		
		(1,1)	(1,2)	(2,2)	(1,1)	(1,2)	(2,2)	(1,1)	(1,2)	(2,2)
5	A	0.1824	0.4021	0.5847	0.1824	0.4019	0.5839	0	0	0.137
	B	0.1904	0.4152	0.5997	0.1905	0.4150	0.5985	0	0	0.200
	C	0.1742	0.3857	0.5625	0.1742	0.3854	0.5616	0	0	0.160
10	A	0.0495	0.1185	0.1824	0.0495	0.1185	0.1824	0	0	0
	B	0.0522	0.1242	0.1904	0.0522	0.1243	0.1905	0	0	0
	C	0.0471	0.1130	0.1742	0.0471	0.1130	0.1742	0	0	0

2. พฤติกรรมการสั่นอิสระของโครงสร้างเปลือกบางทำจากวัสดุที่มีสมบัติเปลี่ยนแปลงตามความหนาเสริมกำลังด้วยแกรฟีนเพลตเลท

สำหรับการศึกษาพฤติกรรมการสั่นอิสระของโครงสร้างเปลือกบางทำจากวัสดุที่มีสมบัติเปลี่ยนแปลงตามความหนาและเสริมกำลังด้วยแกรฟีนเพลตเลท โดยที่วัสดุที่มีสมบัติเปลี่ยนแปลงตามความหนาจะกำหนดให้เซรามิกทำจากอะลูมินา (Al_2O_3) โลหะทำจากอะลูมิเนียม (Al) เสริมกำลังด้วยแกรฟีนเพลตเลท (GPL) มีค่าคุณสมบัติดังตารางที่ 1 โดยที่ค่าอัตราส่วน a/R_x และ a/b มีค่าเท่ากับ 0.2 และ 1.0 ตารางที่ 5 แสดงค่าพารามิเตอร์ความถี่ (ϖ) ของโครงสร้างเปลือกบางทำจากวัสดุที่มีสมบัติเปลี่ยนแปลงตามความหนาและเสริมกำลังด้วยแกรฟีนเพลตเลท โดยค่าในวงเล็บคือร้อยละของการเปลี่ยนแปลงความถี่สัมพัทธ์ (Relative Frequency Change) ของค่าพารามิเตอร์ความถี่ของโครงสร้างเปลือกบางทำจากวัสดุที่มีสมบัติเปลี่ยนแปลงตามความหนาและเสริมกำลังด้วยแกรฟีนเพลตเลทเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีการเสริมกำลังด้วยแกรฟีนเพลตเลท ดังสมการที่ (64)

$$Relative\ frequency\ change(\%) = \frac{\overline{\omega}_{GPL} - \overline{\omega}_{FGM}}{\overline{\omega}_{FGM}} \times 100\% \quad (64)$$

เมื่อ $\overline{\omega}_{GPL}$ และ $\overline{\omega}_{FGM}$ คือค่าพารามิเตอร์ความถี่ของโครงสร้างเปลือกบางทำจากวัสดุที่มีสมบัติเปลี่ยนแปลงตามความหนาในกรณีที่มีการเสริมกำลังด้วยแกรฟีนเพลตเลทกับกรณีที่ไม่มีการเสริมกำลังด้วยแกรฟีนเพลตเลท จากผลการศึกษาพบว่าเมื่อโครงสร้างเปลือกบางทำจากวัสดุที่มีสมบัติเปลี่ยนแปลงตามความหนาและเสริมกำลังด้วยแกรฟีนเพลตเลทจะมีค่าพารามิเตอร์ความถี่ $(\overline{\omega})$ สูงกว่ากรณีที่ไม่มีการเสริมกำลังด้วยแกรฟีนเพลตเลทในทุกโหมดการสั่นและค่าที่เพิ่มสูงขึ้นมีค่าใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ยังพบว่าโครงสร้างเปลือกบางทำจากวัสดุที่มีสมบัติเปลี่ยนแปลงตามความหนาและเสริมกำลังด้วยแกรฟีนเพลตเลทที่มีรูปแบบการกระจายแบบ B จะให้ค่าพารามิเตอร์ความถี่ $(\overline{\omega})$ สูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีรูปแบบการกระจายตัวของแกรฟีนเพลตเลทแบบอื่น ๆ เนื่องจากมีปริมาณส่วนผสมส่วนใหญ่ของแกรฟีนเพลตเลทกระจายอยู่ในช่วงผิวบนและผิวล่างสอดคล้องกับค่าการกระจายความเค้นตั้งฉากจริงที่เกิดขึ้นของโครงสร้างเปลือกบาง (รูปที่ 2) ดังนั้นการเพิ่มประสิทธิภาพของโครงสร้างเปลือกบางทำจากวัสดุที่มีสมบัติเปลี่ยนแปลงตามความหนาจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องพิจารณาถึงรูปแบบการกระจายตัวของแกรฟีนเพลตเลทเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด

3. ผลของค่าเลขยกกำลังของวัสดุเมทริกซ์ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่สั่นพ้องธ์

สำหรับการศึกษาผลของค่าเลขยกกำลังของวัสดุเมทริกซ์ที่มีต่อค่าพารามิเตอร์ความถี่ $(\overline{\omega})$ ของโครงสร้างเปลือกบางทำจากวัสดุที่มีสมบัติเปลี่ยนแปลงตามความหนาและเสริมกำลังด้วยแกรฟีนเพลตเลท โดยที่ค่าอัตราส่วน a/R_x และ a/b มีค่าเท่ากับ 0.2 และ 1.0 ค่าสัดส่วนโดยน้ำหนักของแกรฟีนเพลตเลท (W_{GPL}) จะมีค่าเท่ากับ 1.0 % ในขณะที่ค่าเลขยกกำลังของวัสดุเมทริกซ์ (p) จะมีการแปรเปลี่ยนตั้งแต่ 0 ถึง 5 พบว่าค่าพารามิเตอร์ความถี่ $(\overline{\omega})$ จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงที่ค่า p มีค่าน้อย หลังจากนั้นค่าพารามิเตอร์ความถี่ $(\overline{\omega})$ จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างช้า ๆ เมื่อค่า p มีค่าตั้งแต่ 2 ขึ้นไป ดังรูปที่ 3 นอกจากนี้ยังพบว่าโครงสร้างเปลือกบางทำจากวัสดุที่มีสมบัติเปลี่ยนแปลงตามความหนาและเสริมกำลังด้วยแกรฟีนเพลตเลทที่มีรูปแบบการกระจายแบบ B จะให้ค่าพารามิเตอร์ความถี่ $(\overline{\omega})$ สูงสุด เนื่องจากค่าการเสริมกำลังด้วยแกรฟีนเพลตเลทในช่วงบริเวณผิวบนและผิวล่างจะทำให้ค่ามอดูลัสประสิทธิผลของวัสดุเมทริกซ์ที่มีสมบัติเปลี่ยนแปลงตามความหนามีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีการกระจายตัวของแกรฟีนเพลตเลทรูปแบบอื่น ๆ ดังรูปที่ 4

สำหรับกรณีที่แกรฟีนเพลตเลทมีรูปแบบการกระจายแบบสม่ำเสมอ (รูปแบบ A) จะพบว่าผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความยาวต่อความหนาของโครงสร้างเปลือกบางจะส่งผลต่อค่าการเปลี่ยนแปลงความถี่สั่นพ้องธ์ของโครงสร้างเปลือกบางรูปทรงไฮเปอร์โบลิก (HP) รูปทรงกระบอก (CY) และแผ่นเรียบ (FL) ที่ทำจากวัสดุที่มีสมบัติเปลี่ยนแปลงตามความหนาเสริมกำลังด้วยแกรฟีนเพลตเลท ดังรูปที่ 4(ข) - 4(ง) ตามลำดับ นั่นคือค่าการเปลี่ยนแปลงความถี่สั่นพ้องธ์สำหรับกรณีที่โครงสร้างมีค่าอัตราส่วนความยาวต่อความหนาของโครงสร้างเปลือกบางเท่ากับ 5 จะมีค่าต่ำกว่ากรณีที่มีค่าอัตราส่วนความยาวต่อความหนาของโครงสร้างเปลือกบางเท่ากับ 10 ในขณะที่ช่วงค่า p มีค่าสูงจะให้ผลที่ตรงกันข้าม

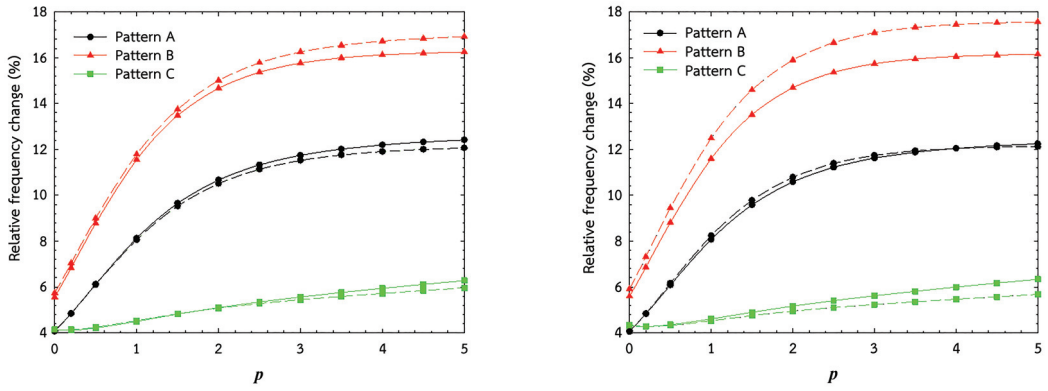
ตารางที่ 5 ค่าพารามิเตอร์ความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างเปลือกบางทำจากวัสดุที่มีสมบัติเปลี่ยนแปลงตามความหนาและเสริมกำลังด้วยแกรฟีนเพลตเลท ($a/R_x = 0.2$, $a/b = 1.0$, $p = 1.0$ และ $W_{GPL} = 1.0\%$)

รูปแบบ GPL	a/h = 5				a/h = 10			
	SP	HP	CY	FL	SP	HP	CY	FL
ค่าโหมดพารามิเตอร์ความถี่ธรรมชาติ (*m*,*n*) = (1,1)								
W_{GPL} = 0%	0.1644	0.1616	0.1627	0.1631	0.0468	0.0438	0.0447	0.0442
A	0.1777	0.1747	0.1760	0.1763	0.0506	0.0474	0.0484	0.0478
	(8.13%)	(8.08%)	(8.12%)	(8.08%)	(8.06%)	(8.24%)	(8.21%)	(8.24%)

ตารางที่ 5 ค่าพารามิเตอร์ความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างเปลือกบางทำจากวัสดุที่มีสมบัติเปลี่ยนแปลงตามความหนาและเสริมกำลังด้วยแกรฟีนเพลตเลท ($a/R_x = 0.2$, $a/b = 1.0$, $p = 1.0$ และ $W_{GPL} = 1.0\%$) (ต่อ)

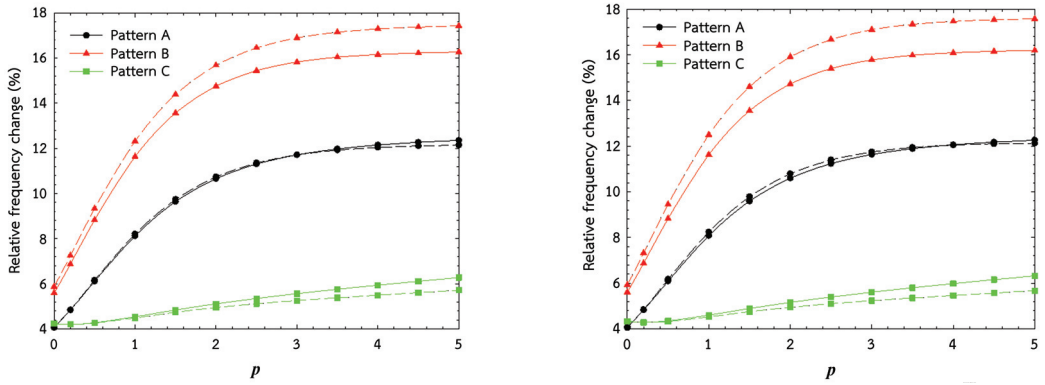
รูปแบบ GPL	a/h = 5				a/h = 10			
	SP	HP	CY	FL	SP	HP	CY	FL
B	0.1834	0.1804	0.1817	0.1821	0.0523	0.0493	0.0502	0.0497
	(11.6%)	(11.6%)	(11.6%)	(11.6%)	(11.8%)	(12.5%)	(12.3%)	(12.5%)
C	0.1718	0.1691	0.1701	0.1706	0.0489	0.0458	0.0467	0.0462
	(4.50%)	(4.61%)	(4.54%)	(4.60%)	(4.54%)	(4.53%)	(4.49%)	(4.53%)
ค่าโหมดพารามิเตอร์ความถี่ธรรมชาติ (*m*,*n*) = (1,2)								
W_{GPL} = 0%	0.3589	0.3588	0.3582	0.3604	0.1065	0.1059	0.1055	0.1059
A	0.3874	0.3871	0.3867	0.3887	0.1152	0.1145	0.1141	0.1145
	(7.96%)	(7.91%)	(7.94%)	(7.87%)	(8.17%)	(8.17%)	(8.20%)	(8.16%)
B	0.3969	0.3967	0.3962	0.3983	0.1193	0.1186	0.1182	0.1186
	(10.6%)	(10.6%)	(10.6%)	(10.5%)	(12.0%)	(12.0%)	(12.1%)	(12.0%)
C	0.3754	0.3756	0.3749	0.3773	0.1113	0.1107	0.1103	0.1107
	(4.62%)	(4.70%)	(4.65%)	(4.71%)	(4.50%)	(4.58%)	(4.52%)	(4.57%)
ค่าโหมดพารามิเตอร์ความถี่ธรรมชาติ (*m*,*n*) = (2,2)								
W_{GPL} = 0%	0.5220	0.5231	0.5228	0.5245	0.1631	0.1627	0.1628	0.1631
A	0.5628	0.5634	0.5634	0.5651	0.1764	0.1759	0.1761	0.1763
	(7.81%)	(7.72%)	(7.77%)	(7.73%)	(8.12%)	(8.08%)	(8.11%)	(8.08%)
B	0.5737	0.5742	0.5743	0.5759	0.1821	0.1816	0.1818	0.1821
	(9.91%)	(9.78%)	(9.85%)	(9.80%)	(11.6%)	(11.6%)	(11.6%)	(11.6%)
C	0.5466	0.5481	0.5476	0.5497	0.1705	0.1702	0.1703	0.1706
	(4.70%)	(4.79%)	(4.75%)	(4.79%)	(4.54%)	(4.61%)	(4.57%)	(4.60%)

หมายเหตุ ค่าในวงเล็บคือ ร้อยละของการเปลี่ยนแปลงความถี่สัมพัทธ์ของค่าพารามิเตอร์ความถี่ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ $\left[\left(\overline{\omega}_{GPL} - \overline{\omega}_{FGM}\right)/\overline{\omega}_{FGM}\right] \times 100\%$



(ก) SP (ข) HP

รูปที่ 3 ผลของค่าเลขยกกำลังของวัสดุเมทริกซ์ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่สัมพัทธ์ของโครงสร้างเปลือกบางทำจากวัสดุที่มีสมบัติเปลี่ยนแปลงตามความหนาและเสริมกำลังด้วยแกรฟีนเพลตเลท (เส้นเต็มคือ a/h = 5 และเส้นประคือ a/h = 10)

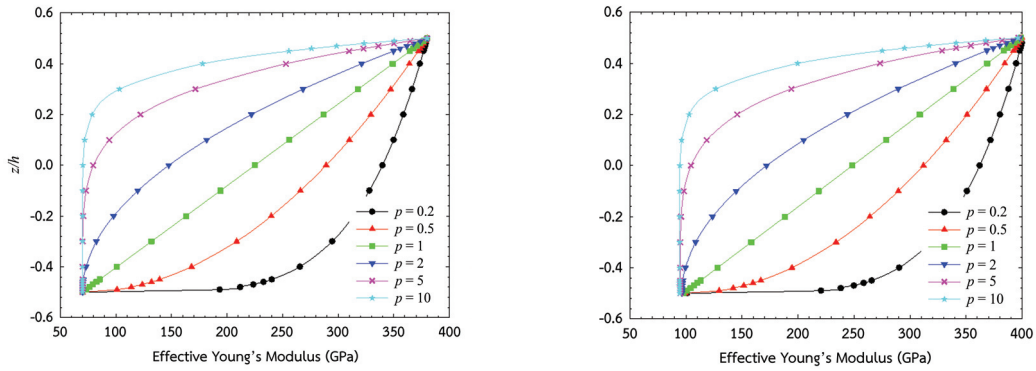


(ค) CY (ง) FL

รูปที่ 3 ผลของค่าเลขยกกำลังของวัสดุเมทริกซ์ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่สัมพัทธ์ของโครงสร้างเปลือกบางทำจากวัสดุที่มีสมบัติเปลี่ยนแปลงตามความหนาและเสริมกำลังด้วยแกรฟีนเพลตเลท (เส้นเต็มคือ a/h = 5 และเส้นประคือ a/h = 10) (ต่อ)

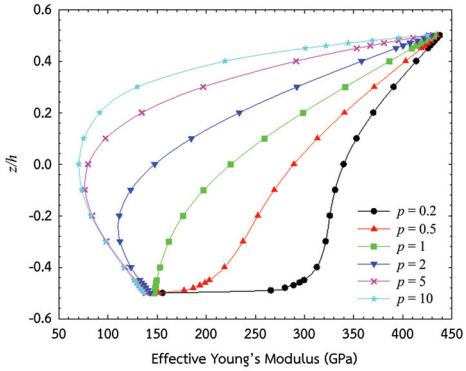
4. ผลของค่าสัดส่วนโดยน้ำหนักของแกรฟีนเพลตเลทที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่สัมพัทธ์

การเพิ่มค่าสัดส่วนโดยน้ำหนักของแกรฟีนเพลตเลท (W_{GPL}) จะส่งผลโดยตรงต่อค่าความแข็งแกร่งของโครงสร้างเปลือกบางทำจากวัสดุที่มีสมบัติเปลี่ยนแปลงตามความหนา เนื่องจากค่ามอดูลัสของแกรฟีนเพลตเลท (E_{GPL}) จะมีค่าสูงกว่าค่ามอดูลัสของเซรามิกที่ทำจากอะลูมินา (Al_2O_3) และโลหะที่ทำจากอะลูมิเนียม (Al) จากตารางคุณสมบัติของวัสดุดังตารางที่ 1 จะพบว่าอัตราส่วนมอดูลัสของ E_{GPL}/E_1 และ E_{GPL}/E_2 อยู่ที่ 2.65 และ 14.43 เท่า ดังนั้นการเพิ่มปริมาณแกรฟีนเพลตเลท (W_{GPL}) จึงส่งผลทำให้ค่าพารามิเตอร์ความถี่ (ϖ) มีค่าเพิ่มสูงขึ้น ดังรูปที่ 5 โดยที่ค่าอัตราส่วน a/R_x และ a/b มีค่าเท่ากับ 0.2 และ 1.0 ค่าเลขยกกำลังของวัสดุเมทริกซ์ (p) จะมีค่าเท่ากับ 1.0 และค่าสัดส่วนโดยน้ำหนักของแกรฟีนเพลตเลท (W_{GPL}) จะมีการแปรเปลี่ยนตั้งแต่ 0 ถึง 3 % นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่ออัตราส่วนความยาวต่อความหนาของโครงสร้างเปลือกบางมีค่าเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้ค่าการเปลี่ยนแปลงความถี่สัมพัทธ์ของโครงสร้างเปลือกบางทำจากวัสดุที่มีสมบัติเปลี่ยนแปลงตามความหนาและเสริมกำลังด้วยแกรฟีนเพลตเลทมีค่าลดลง

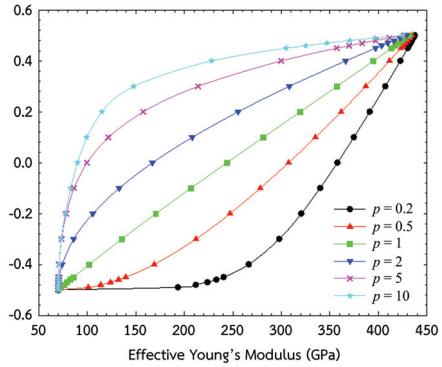


(ก) FGM (W_{GPL} = 0 %) (ข) รูปแบบ A (W_{GPL} = 1%)

รูปที่ 4 ค่ามอดูลัสยืดหยุ่นประสิทธิผลของโครงสร้างเปลือกบางทำจากวัสดุที่มีสมบัติเปลี่ยนแปลงตามความหนาเสริมกำลังด้วยแกรฟีนเพลตเลท



(ค) รูปแบบ B (W_{GPL} = 1%)

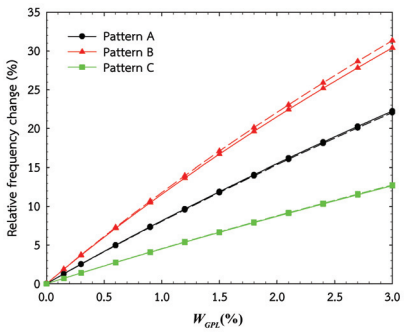


(ง) รูปแบบ C (W_{GPL} = 1%)

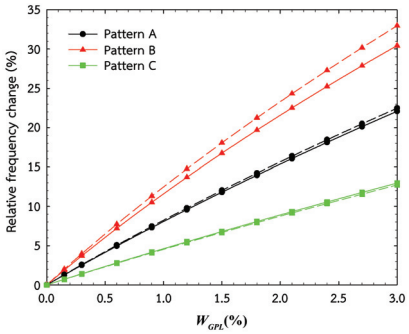
รูปที่ 4 ค่ามอดูลัสยืดหยุ่นประสิทธิผลของโครงสร้างเปลือกบางทำจากวัสดุที่มีสมบัติเปลี่ยนแปลงตามความหนาเสริมกำลังด้วยแกรฟีนเพลตเลท (ต่อ)

5. ผลของอัตราส่วนรูปร่างของแกรฟีนเพลตเลทที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่สัมพัทธ์

จากผลการศึกษาดังตารางที่ 5 พบว่าค่าพารามิเตอร์ความถี่ ($\overline{\omega}$) ของโครงสร้างเปลือกบางทำจากวัสดุที่มีสมบัติเปลี่ยนแปลงตามความหนาและเสริมกำลังด้วยแกรฟีนเพลตเลท จะมีค่าสูงสุดเมื่อแกรฟีนเพลตเลทมีการกระจายตัวในรูปแบบ B ดังนั้นค่าพารามิเตอร์สุดท้ายที่จะถูกนำเสนอในบทความนี้คือ ผลของอัตราส่วนรูปร่างของแกรฟีนเพลตเลทที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่สัมพัทธ์ของโครงสร้างเปลือกบางทำจากวัสดุที่มีสมบัติเปลี่ยนแปลงตามความหนาและเสริมกำลังด้วยแกรฟีนเพลตเลทรูปแบบ B โดยที่ค่าอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างของแกรฟีนเพลตเลท (l_{GPL}/w_{GPL}) จะมีค่าเท่ากับ 1.0 2.0 3.0 ในที่นี้ถ้าอัตราส่วน l_{GPL}/w_{GPL} มีค่าเท่ากับ 1.0 แสดงว่าแกรฟีนเพลตเลทจะมีรูปทรงเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส ในขณะที่อัตราส่วน l_{GPL}/w_{GPL} มีค่ามากกว่า 1.0 จะเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า สำหรับค่าอัตราส่วนความยาวต่อความหนาของแกรฟีนเพลตเลท $(l_{GPL}/h_{GPL})\times 1000$ จะมีค่าแปรเปลี่ยนตั้งแต่ 0.1 ถึง 4.9 ทั้งนี้ค่า l_{GPL} จะมีค่าคงที่คือ 2.5 ไมโครเมตร สำหรับอัตราส่วน a/R_x และ a/b จะมีค่าคงที่เท่ากับ 0.2 และ 1.0 ค่าเลขยกกำลังของวัสดุเมทริกซ์ (p) จะมีค่าเท่ากับ 1.0 และค่าสัดส่วนโดยน้ำหนักของแกรฟีนเพลตเลท (W_{GPL}) จะมีค่าเท่ากับ 1.0 % จากผลการศึกษาพบว่าเมื่อค่าอัตราส่วน l_{GPL}/w_{GPL} มีค่าน้อยกว่า 500 จะส่งผลทำให้ค่าการเปลี่ยนแปลงความถี่สัมพัทธ์ของโครงสร้างเปลือกบางทำจากวัสดุที่มีสมบัติเปลี่ยนแปลงตามความหนาและเสริมกำลังด้วยแกรฟีนเพลตเลทมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วและจะเริ่มคงที่เมื่ออัตราส่วน l_{GPL}/w_{GPL} มีค่ามากกว่า 1000 ดังรูปที่ 6 นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่ออัตราส่วน l_{GPL}/w_{GPL} มีค่าเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลทำให้ค่าการเปลี่ยนแปลงความถี่สัมพัทธ์ของโครงสร้างเปลือกบางทำจากวัสดุที่มีสมบัติเปลี่ยนแปลงตามความหนาและเสริมกำลังด้วยแกรฟีนเพลตเลทมีค่าลดลง

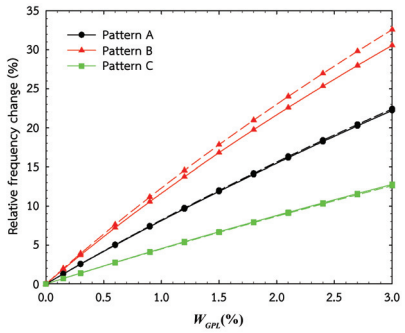


(ก) SP

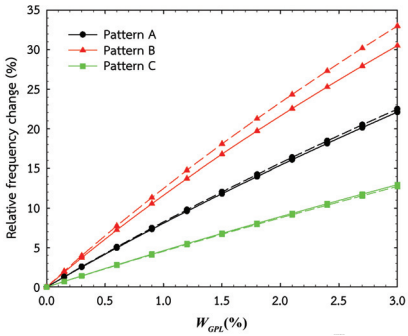


(ข) HP

รูปที่ 5 ผลของปริมาณแกรฟีนเพลตเลทที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่สัมพัทธ์ของโครงสร้างเปลือกบางทำจากวัสดุที่มีสมบัติเปลี่ยนแปลงตามความหนาและเสริมกำลังด้วยแกรฟีนเพลตเลท (เส้นเต็มคือ a/h = 5 และเส้นประคือ a/h = 10)

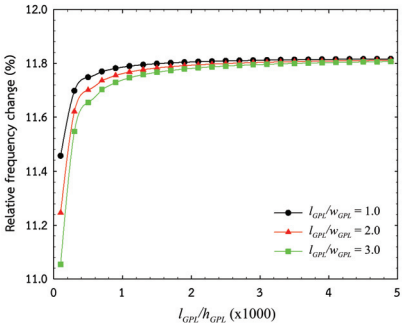


(ค) CY

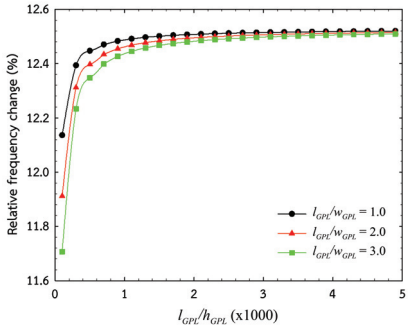


(ง) FL

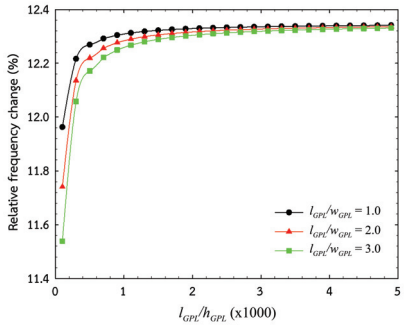
รูปที่ 5 ผลของปริมาณแกรฟีนเพลตเลทที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่สัมพัทธ์ของโครงสร้างเปลือกบางทำจากวัสดุที่มีสมบัติเปลี่ยนแปลงตามความหนาและเสริมกำลังด้วยแกรฟีนเพลตเลท (เส้นเต็มคือ a/h = 5 และเส้นประคือ a/h = 10) (ต่อ)



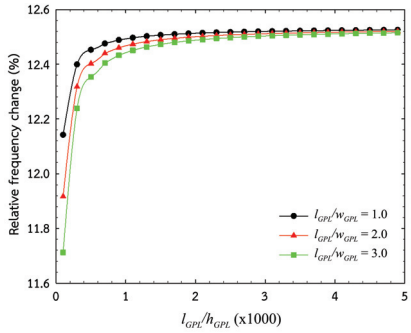
(ก) SP



(ข) HP



(ค) CY



(ง) FL

รูปที่ 6 ผลของอัตราส่วนรูปร่างของแกรฟีนเพลตเลทที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่สัมพัทธ์ของโครงสร้างเปลือกบางทำจากวัสดุที่มีสมบัติเปลี่ยนแปลงตามความหนาและเสริมกำลังด้วยแกรฟีนเพลตเลทรูปแบบ B

สรุปผล

การศึกษาผลของการเสริมกำลังด้วยแกรฟีนเพลตเลทเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพโครงสร้างเปลือกบางทำจากวัสดุที่มีสมบัติเปลี่ยนแปลงตามความหนาให้สูงขึ้นโดยใช้ทฤษฎีการเสียรูปด้วยแรงเฉือนอันดับที่หนึ่งแบบปรับปรุง ค่ามอดูลัสยืดหยุ่นประสิทธิผลของวัสดุเมทริกซ์ที่มีสมบัติเปลี่ยนแปลงตามความหนาและวัสดุเสริมกำลังด้วยแกรฟีนเพลตเลทจะสามารถนิยามได้โดยใช้แบบจำลองของ Voigt และ Halpin–Tsai จากนั้นทำการสร้างสมการการเคลื่อนที่โดยอาศัยหลักการของแฮมิลตันและใช้กระบวนการของนาเวียร์ในการหาผลลัพธ์เชิงตัวเลขจากผลการศึกษาพบว่าการใช้ทฤษฎีการเสียรูป

ด้วยแรงเฉือนอันดับที่หนึ่งแบบปรับปรุงจะให้คำตอบที่ดีเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ใช้ทฤษฎีการเสียรูปที่มีอันดับสูงกว่า ทำให้ลดความยุ่งยากในการคำนวณ นอกจากนี้ยังพบว่าการเสริมกำลังด้วยแกรฟีนเพลตเลทรูปแบบ B จะให้ค่าพารามิเตอร์ความถี่สูงสุดในขณะที่รูปแบบ C จะให้ค่าพารามิเตอร์ความถี่ต่ำสุด ซึ่งจะสอดคล้องกับค่าความเค้นที่เกิดขึ้นในกรณีที่ค่าเลขยกกำลังของวัสดุเมทริกซ์ (p) การเสริมกำลังด้วยแกรฟีนเพลตเลทจะส่งผลต่อค่าการเปลี่ยนแปลงความถี่สัมพัทธ์สูงมากเมื่อเทียบกับกรณีที่ค่าเลขยกกำลังของวัสดุเมทริกซ์ (p) มีค่าต่ำ และอัตราส่วนรูปทรงของแกรฟีนเพลตเลทจะมีผลกระทบโดยตรงต่อค่าพารามิเตอร์ความถี่ โดยเฉพาะเมื่อค่าอัตราส่วนความยาวต่อความหนาของแกรฟีนเพลตเลท (l_{GPL} / w_{GPL}) มีค่าน้อย ดังนั้นผลการศึกษาที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพของโครงสร้างเปลือกบางให้ดีขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยได้รับการสนับสนุนจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม ตามสัญญาเลขที่ FF69/NKR/054

References

Ansari, R., Hassani, R., Gholami, R. and Rouhi, H. (2020). Nonlinear Bending Analysis of Arbitrary-Shaped Porous Nanocomposite Plates using a Novel Numerical Approach. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 126. https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2020.103556

Benounas, S., Belarbi, M.O., Van Vinh, P., Daikh, A.A. and Fantuzzi, N. (2024). Finite Element Model for Free Vibration Analysis of Functionally Graded Doubly Curved Shallow Shells by using an Improved First-Order Shear Deformation Theory. *Structures*, 64. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.106594

Garg, A., Belarbi, M.O., Chalak, H.D. and Chakrabarti, A. (2021). A Review of the Analysis of Sandwich FGM Structures. *Composite Structures*, 258. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.113427

Halpin, J.C. and Kardos, J.L. (1976). The Halpin-Tsai Equations: A Review. *Polymer Engineering & Science*, 16(5), 344-352. https://doi.org/10.1002/pen.760160512

Jiammeepreecha, W. (2017). Effects of Internal Pressure and Constraint Volume on Vibration of Spherical Membrane. *RMUTI Journal Science and Technology*, 10(2), 40-60. https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/rmutijo/article/view/96525

Jones, R.M. (2018). *Mechanics of Composite Materials*. CRC Press.

Khalaf, A.S. and Hasan, H.M. (2024). Nonlinear Forced Vibration of Functionally Graded Hybrid Three-Phase Nanocomposite Toroidal Shell Segments Reinforced by Carbon Nanotubes (CNTs) and Graphene Nanoplatelets (GPLs). *Thin-Walled Structures*, 199. https://doi.org/10.1016/j.tws.2024.111876

Matsunaga, H. (2008). Free Vibration and Stability of Functionally Graded Shallow Shells According to a 2D Higher-Order Deformation Theory. *Composite Structures*, 84(2), 132-146. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2007.07.006

Qatu, M.S. (2004). *Vibration of Laminated Shells and Plates*. Academic Press.

Reddy, J.N. (2003). *Mechanics of Laminated Composite Plates and Shells: Theory and Analysis* (2nd ed). CRC Press. https://doi.org/10.1201/b12409

Roun, S., Nguyen, V.L. and Rungamornrat, J. (2025). Free Vibration and Buckling Analyses of Functionally Graded Plates with Graphene Platelets Reinforcement. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 25(1). https://doi.org/10.1115/1.4064665

Shen, H.S. (2009). *Functionally Graded Materials Nonlinear Analysis of Plates and Shells*. CRC Press.

Thai, H.T. and Kim, S.E. (2015). A Review of Theories for the Modeling and Analysis of Functionally Graded Plates and Shells. *Composite Structures*, 128, 70-86. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.03.010

Tjong, S.C. (2013). Recent Progress in the Development and Properties of Novel Metal Matrix Nanocomposites Reinforced with Carbon Nanotubes and Graphene Nanosheets. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 74(10), 281-350. https://doi.org/10.1016/j.mser.2013.08.001

Van Vinh, P. and Tounsi, A. (2022). Free Vibration Analysis of Functionally Graded Doubly Curved Nanoshells using Nonlocal First-Order Shear Deformation Theory with Variable Nonlocal Parameters. *Thin-Walled Structures*, 174. https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.109084

Van Vinh, P., Van Chinh, N. and Tounsi, A. (2022). Static Bending and Buckling Analysis of Bi-Directional Functionally Graded Porous Plates using an Improved First-Order Shear Deformation Theory and FEM. *European Journal of Mechanics - A/Solids*, 96. https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2022.104743

Wang, A., Chen, H., Hao, Y. and Zhang, W. (2018). Vibration and Bending Behavior of Functionally Graded Nanocomposite Doubly-Curved Shallow Shells Reinforced by Graphene Nanoplatelets. *Results in Physics*, 9, 550-559. https://doi.org/10.1016/j.rinp.2018.02.062

Worku, A.K. and Ayele, D.W. (2023). Recent Advances of Graphene-Based Materials for Emerging Technologies. *Results in Chemistry*, 5. https://doi.org/10.1016/j.rechem.2023.100971

Yee, K. and Ghayesh, M.H. (2023). A Review on the Mechanics of Graphene Nanoplatelets Reinforced Structures. *International Journal of Engineering Science*, 186. https://doi.org/10.1016/j.ijengsci.2023.103831

Zhao, S., Zhao, Z., Yang, Z., Ke, L.L., Kitipornchai, S. and Yang, J. (2020). Functionally Graded Graphene Reinforced Composite Structures: A Review. *Engineering Structures*, 210. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110339

Zhao, T., Bayat, M.J., Kalhori, A. and Asemi, K. (2024). Free Vibration Analysis of Functionally Graded Multilayer Hybrid Composite Cylindrical Shell Panel Reinforced by GPLs and CNTs Surrounded by Winkler Elastic Foundation. *Engineering Structures*, 308. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.117975

Zingoni, A. (2015). Liquid-Containment Shells of Revolution: A Review of Recent Studies on Strength, Stability and Dynamics. *Thin-Walled Structures*, 87, 102-114. https://doi.org/10.1016/j.tws.2014.10.016

การประเมินสารพฤกษเคมีและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดเมล็ดมะยงชิด

Assessment of Phytochemical Profile and Antioxidant Activities of *Bouea oppositifolia* (Roxb.) Meisn. Seed Extract

พลอยชมพู คำบุญ[1] และพัทวัฒน์ สีขาว[1*]
Ploychompoo Khamboon[1] and Pattawat Seekhaw[1*]

Received: *October 15, 2025;* ***Revised:*** *April 11, 2026;* ***Accepted:*** *June 26, 2026*

บทคัดย่อ

สารพฤกษเคมีที่พบในพืชจัดเป็นแหล่งสารต้านอนุมูลอิสระที่มีบทบาทสำคัญในการช่วยป้องกัน และลดความเสี่ยงของการเกิดโรคร้ายหลายชนิดได้ เช่น โรคเบาหวาน โรคกล้ามเนื้อหัวใจ โรคความผิดปกติของระบบประสาทและสมอง โรคการอักเสบเรื้อรัง และโรคมะเร็ง ซึ่งปัจจุบันกำลังได้รับความสนใจจากผู้บริโภคทั่วโลก งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจหาสารพฤกษเคมีเบื้องต้น ปริมาณฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์รวม และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดหยาบเมล็ดมะยงชิดที่สกัดด้วยเฮกเซน เอทิลอะซิเตท และเมทานอล ผลการตรวจสอบสารพฤกษเคมีด้วยปฏิกิริยาการเกิดสีหรือตะกอนพบ ฟีนอลิก ฟลาโวนอยด์ แอนทราควิโนน ไตรเทอร์พีน และแทนนิน เป็นองค์ประกอบ การตรวจหาปริมาณฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์รวมด้วยวิธี Folin-Ciocalteu Reagent และ Aluminium Chloride Colorimetric พบว่าสารสกัดเมทานอลมีปริมาณฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์รวมสูงที่สุด (105.91±0.70 mg GAE/g dried weight และ 19.41±3.13 mg QE/g dried weight) อีกทั้งยังแสดงฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระที่ดีที่สุดทั้ง 3 วิธี ได้แก่ DPPH, ABTS (IC_{50} เท่ากับ 0.16±0.05 และ 5.54±0.35 µg/mL) และ FRAP (FRAP Value เท่ากับ 560.51±30.90 mg $FeSO_4$/g dried weight) แสดงให้เห็นว่าสารสกัดจากเมล็ดมะยงชิดเป็นแหล่งของสารต้านอนุมูลอิสระที่จะนำไปสู่การศึกษาข้อมูลเชิงลึกเพื่อต่อยอดพัฒนาหรือประยุกต์เป็นผลิตภัณฑ์เพื่อสุขภาพได้ต่อไป

คำสำคัญ : สารพฤกษเคมี; สารต้านอนุมูลอิสระ; มะยงชิด

[1] *คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม*
[1] *Faculty of Science and Technology, Pibulsongkram Rajabhat University*
[*] *Corresponding Author, Tel. 08 2176 4955, E - mail: pattawat.s@psru.ac.th*

Abstract

Phytochemicals found in plants are important sources of antioxidants, which play a vital role in preventing and reducing the risk of various serious diseases such as diabetes mellitus, cardiovascular diseases, neurodegenerative and brain disorders, chronic inflammatory diseases, and cancer. These compounds have gained increasing attention from consumers worldwide. This study aimed to conduct a preliminary screening of phytochemicals, determine the total phenolic and flavonoid contents, and evaluate the antioxidant activity of crude seed extracts of *Bouea oppositifolia* (Roxb.) Meisn. using hexane, ethyl acetate, and methanol as solvents. Preliminary phytochemical screening using colorimetric or precipitation reactions revealed the presence of phenolics, flavonoids, anthraquinones, triterpenes, and tannins. The total phenolic and flavonoid contents were determined using the Folin-Ciocalteu reagent and the aluminum chloride colorimetric method, respectively. Among the extracts, the methanolic extract exhibited the highest total phenolic and flavonoid contents (105.91±0.70 mg GAE/g dried weight and 19.41±3.13 mg QE/g dried weight). It also demonstrated the strongest antioxidant activity based on all three methods: DPPH and ABTS radical scavenging assays (IC_{50} values of 0.16±0.05 and 5.54±0.35 µg/mL), and the FRAP assay (FRAP value of 560.51±30.90 mg $FeSO_4$/g dried weight). These findings suggest that *B. oppositifolia* seed extract is a potential source of natural antioxidants and could serve as a basis for further research and development into health-related products.

Keywords: Phytochemicals; Antioxidant; *Bouea oppositifolia* (Roxb.) Meisn.

บทนำ

ปัจจุบันแนวโน้มการหันมาใช้ผลิตภัณฑ์จากธรรมชาติมีเพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากผู้บริโภคให้ความสำคัญกับสุขภาพ ความปลอดภัย และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม สารสกัดจากพืชหรือสมุนไพร จึงกลายเป็นทางเลือกที่ได้รับความนิยมในอุตสาหกรรมอาหาร ยา เครื่องสำอาง หรือผลิตภัณฑ์เพื่อสุขภาพ เนื่องจากมีสารที่เป็นประโยชน์ต่อสุขภาพ โดยเฉพาะสารต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidants) ซึ่งเป็นสารที่มีความสามารถในการยับยั้งหรือชะลอการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของอนุมูลอิสระในร่างกาย โดยทำหน้าที่เป็นตัวให้หรือรับอิเล็กตรอนแก่อนุมูลอิสระ เพื่อลดความเสียหายต่อเซลล์ สารต้านอนุมูลอิสระสามารถพบได้ทั้งในร่างกายมนุษย์ (Endogenous Antioxidants) และจากแหล่งธรรมชาติ เช่น วิตามินซี วิตามินอี ฟลาโวนอยด์ โพลีฟีนอล และเบต้าแคโรทีน ซึ่งมีอยู่ในผัก ผลไม้ และสมุนไพรหลายชนิด (Thiraphatthanavong and Phandech, 2023)

มะยงชิด (*Bouea oppositifolia* (Roxb.) Meisn.) หรือชื่อพ้อง *Bouea burmanica* Griff. อยู่ในวงศ์ Anacardiaceae มีถิ่นกำเนิดในแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ เป็นไม้ผลยืนต้นสูงประมาณ 8 - 10 เมตร อยู่ในวงศ์เดียวกับมะม่วง มะปราง และมะกอก มีดอกเป็นช่อขนาดเล็กสีเหลือง เป็นพืชไม่ผลัดใบ ใบเดี่ยวปลายแหลมยาวรีคล้ายใบมะปราง ผลมีขนาดใหญ่กว่ามะปราง รูปทรงกลมรี ผลที่ยังไม่สุกมีสีเขียว ผลสุกมีสีเหลือง รสชาติหวานอมเปรี้ยวขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ เมล็ดมีสีม่วง (Boonwong et al., 2017) Seekhaw et al. (2022) รายงานว่าสารสกัดน้ำย้อมสีจากใบมะยงชิดมีสารพฤกษเคมีที่เป็นแหล่งของสีธรรมชาติ 4 กลุ่ม ได้แก่ ฟีนอลิก แทนนิน ไตรเทอร์พีน และแอนทราควิโนน โดยสารสกัดดังกล่าวไม่ก่อให้เกิดการระคายเคืองหรือกัดกร่อนต่อผิวหนังกระต่าย จากการศึกษาของ Seekhaw et al. (2023) พบว่าสารสกัดเอทานอลของเมล็ดมะยงชิดแสดงฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ซึ่งประกอบด้วยสารพฤกษเคมี 6 ชนิด ได้แก่ ฟีนอลิก ฟลาโวนอยด์ สเตียรอยด์ ไกลโคไซด์ แอนทราควิโนน และไตรเทอร์พีน และจากการศึกษาของ Lamkhwan and Seekhaw (2025) พบว่าสารสกัดจากกิ่งมะยงชิดเป็นแหล่งของสารต้านอนุมูลอิสระที่มีศักยภาพ อุดมไปด้วยองค์ประกอบ

ของสารพฤกษเคมีที่สำคัญต่อกลไกการออกฤทธิ์ทางชีวภาพ อีกทั้งยังมีปริมาณฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์รวมสูง และมีค่าความเป็นพิษต่อเซลล์ผิวหนังชั้นนอกของมนุษย์ (HaCaT) ที่ต่ำ และยังพบว่าพืชในวงศ์เดียวกับมะยงชิด เช่น มะปราง และมะม่วง มีการรายงานเกี่ยวกับองค์ประกอบทางเคมีและฤทธิ์ทางชีวภาพที่น่าสนใจ โดยเฉพาะมะปราง (*Bouea macrophylla* Griffith) ซึ่งเป็นพืชที่มีลักษณะคล้ายกับมะยงชิด มีการรายงานว่า สารสกัดจากส่วนต่าง ๆ ของมะปรางเป็นแหล่งของสารพฤกษเคมีที่สำคัญที่มีศักยภาพในการต้านอนุมูลอิสระ โดยมีฟีนอลิก ฟลาโวนอยด์ ซาโปนิน แทนนิน เทอร์พีนอยด์ และสเตียรอยด์ เป็นองค์ประกอบหลัก (Fu'adah et al., 2022) จากข้อมูลข้างต้นพบว่ามีการรายงานเกี่ยวกับองค์ประกอบและฤทธิ์ทางชีวภาพจากเมล็ดของมะยงชิดที่สกัดด้วยเอทานอล แต่ยังไม่มีการรายงานเกี่ยวกับเมล็ดของมะยงชิดที่สกัดด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ที่มีขั้วต่างกัน ข้อมูลที่ได้กล่าวมาข้างต้นผู้วิจัยจึงสนใจที่จะศึกษาสารพฤกษเคมีเบื้องต้น ปริมาณฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์รวม ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ จากสารสกัดหยาบของเมล็ดมะยงชิดที่สกัดด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ที่มีขั้วแตกต่างกัน 3 ชนิด (เฮกเซน เอทิลอะซิเตท และเมทานอล) เพื่อประเมินว่าความมีขั้วของตัวทำละลายอินทรีย์มีผลต่อการสกัดปริมาณสารประกอบฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์รวมซึ่งเป็นสารต้านอนุมูลอิสระกลุ่มหลักอย่างไร โดยใช้เป็นฐานข้อมูลในการศึกษาถึงองค์ประกอบทางพฤกษเคมีที่สำคัญ การแยกและพิสูจน์เอกลักษณ์ของสารประกอบหลักที่แสดงฤทธิ์ทางชีวภาพอย่างมีศักยภาพ ซึ่งนำไปสู่การพัฒนาผลิตภัณฑ์เพื่อสุขภาพ เครื่องสำอาง หรือเภสัชภัณฑ์ต่อไปในอนาคต

วิธีดำเนินการ

1. การเก็บตัวอย่างเมล็ดมะยงชิด

เก็บตัวอย่างเมล็ดมะยงชิดสด ในพื้นที่ตำบลไกรนอก อำเภอกงไกรลาศ จังหวัดสุโขทัย ในช่วงเดือนเมษายน พ.ศ. 2567 โดยทำการเก็บรักษาตัวอย่างไว้ ณ ห้องเก็บรวบรวมตัวอย่างพรรณไม้ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม (Voucher Specimen No. PSRU 1010)

2. การเตรียมสารสกัดหยาบเมล็ดมะยงชิด

นำเมล็ดมะยงชิดสดมาล้างให้สะอาด แกะเปลือกหุ้มเมล็ดออกให้เหลือแค่เมล็ดด้านในสีม่วง หั่นเป็นชิ้นเล็ก ๆ แล้วนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมาบดให้ละเอียด ชั่งน้ำหนักตัวอย่างเมล็ดมะยงชิดแห้งบดละเอียด 500 g สกัดด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ตามลำดับความมีขั้วของตัวทำละลาย (เฮกเซน เอทิลอะซิเตท และเมทานอล) ปริมาตร 1,500 mL โดยใช้วิธีการแช่หมักที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 สัปดาห์ (ทำการแช่หมัก 2 ครั้ง) กรองและระเหยตัวทำละลายออกด้วยเครื่องระเหยแบบลดความดัน (Rotary Evaporator) จะได้สารสกัดหยาบของเมล็ดมะยงชิด และคำนวณหาร้อยละผลผลิตที่ได้ (%yield) และเก็บไว้ในภาชนะที่มีฝาปิดสนิทป้องกันแสงที่อุณหภูมิ 4 °C เพื่อทำการทดสอบในขั้นตอนต่อไป

ร้อยละผลผลิตที่ได้ = (น้ำหนักสารสกัด / น้ำหนักสารตัวอย่าง x 100)

3. การตรวจสอบสารพฤกษเคมีเบื้องต้น (Phytochemical Screening)

การตรวจสอบสารพฤกษเคมีเบื้องต้นจากสารสกัดหยาบเฮกเซน เอทิลอะซิเตท และเมทานอลของเมล็ดมะยงชิดด้วยปฏิกิริยาการเกิดสีหรือตะกอน จำนวน 10 กลุ่ม ได้แก่ ฟีนอลิก ซาโปนิน ฟลาโวนอยด์ สเตียรอยด์ อัลคาลอยด์ ไกลโคไซด์ แอนทราควิโนน ไดเทอร์พีน ไตรเทอร์พีน และแทนนิน (Shaikh and Patil, 2020) โดยมีขั้นตอนทดลองดังนี้

3.1 การตรวจสอบฟีนอลิก (Phenolic Test)

นำสารสกัดหยาบ 5 mg ละลายด้วย 95% เอทานอล 1 mL จากนั้นเติม 5% w/v เฟอร์ริกคลอไรด์ ($FeCl_3$) 3 - 4 หยด หากพบสารกลุ่มฟีนอลิก สารละลายจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงินหรือสีดำ

3.2 การตรวจสอบซาโปนิน (Saponin Test)

นำสารสกัดหยาบ 5 mg ละลายด้วย 95% เอทานอล 1 mL เติมน้ำกลั่น 2 mL และเขย่า หากพบสารกลุ่มซาโปนิน สารละลายจะต้องมีฟองเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง

3.3 การตรวจสอบฟลาโวนอยด์ (Flavonoid Test) จะทำการทดสอบด้วยกัน 3 วิธี ได้แก่

- การตรวจสอบด้วยน้ำยาอัลคาไลน์ (Alkaline's Reagent Test) นำสารสกัดหยาบ 5 mg ละลายด้วย 95% เอทานอล 1 mL แล้วเติม 10% w/v โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 2 - 3 หยด หากพบฟลาโวนอยด์ สารละลายจะเปลี่ยนเป็นสีเหลืองเข้ม
- การตรวจสอบด้วยเลดอะซิเตท (Lead Acetate Test) นำสารสกัดหยาบ 5 mg ละลายด้วย 95% เอทานอล 1 mL จากนั้นเติม 10% w/v เลดอะซิเตท [$Pb(CH_3COO)_2$] 3 - 4 หยด หากพบอนุพันธ์ของฟลาโวนอยด์ จะปรากฏตะกอนสีขาวขุ่นขึ้นที่ก้นหลอดทดลอง
- การตรวจสอบด้วยลวดแมกนีเซียม (Magnesium Wire Test) นำสารสกัดหยาบ 100 mg ละลายด้วยน้ำกลั่น 1 mL ใส่ลวดแมกนีเซียม 1 - 2 ชิ้น จากนั้นเติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น (conc. HCl) 2 - 3 หยด หากพบฟลาโวนอยด์ สารละลายจะเปลี่ยนเป็นสีชมพูหรือสีแดง

3.4 การตรวจสอบสเตียรอยด์ (Steroid Test)

นำสารสกัดหยาบ 1 mg ละลายด้วยคลอโรฟอร์ม ($CHCl_3$) 1 mL แล้วเติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น (conc. H_2SO_4) 1 mL หากพบสารกลุ่มสเตียรอยด์ สารละลายชั้นล่างจะเปลี่ยนเป็นสีแดง

3.5 การตรวจสอบอัลคาลอยด์ (Alkaloid Test)

นำสารสกัดหยาบ 5 mg ละลายด้วย 95% เอทานอล 1 mL แล้วเติมสารละลาย Wagner's Reagent 2 - 3 หยด ถ้าพบสารกลุ่มอัลคาลอยด์ จะปรากฏตะกอนสีน้ำตาลที่ก้นหลอดทดลอง

3.6 การตรวจสอบไกลโคไซด์ (Glycoside Test)

นำสารสกัดหยาบ 500 mg ละลายด้วยน้ำกลั่น 5 mL จากนั้นเติมกรดอะซิติกเข้มข้น (conc. CH_3COOH) 2 mL ตามด้วย 5% w/v เฟอร์ริกคลอไรด์ ($FeCl_3$) 2 - 3 หยด แล้วเติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น (conc. H_2SO_4) 1 mL ที่ข้างหลอด ถ้าพบสารกลุ่มไกลโคไซด์ จะมีวงแหวนสีม่วงหรือวงแหวนสีม่วงใต้วงแหวนสีน้ำตาลปรากฏขึ้น

3.7 การตรวจสอบแอนทราควิโนน (Anthraquinone Test)

นำสารสกัดหยาบ 100 mg ละลายด้วยคลอโรฟอร์ม ($CHCl_3$) 5 mL เขย่าแล้วกรองสารละลาย จากนั้นเติม 10% v/v แอมโมเนีย (NH_3) 2 mL ถ้าพบอนุพันธ์ของแอนทราควิโนน จะปรากฏสีชมพู สีส้ม หรือสีแดงขึ้นในสารละลายชั้นบน

3.8 การตรวจสอบไดเทอร์พีน (Diterpene Test)

นำสารสกัด 100 mg ละลายด้วยน้ำกลั่น 5 mL อุ่น 10 นาที และกรองสารละลาย จากนั้นเติม 10% w/v คอปเปอร์อะซิเตท [$Cu(CH_3COO)_2$] 2 - 3 หยด หากพบสารกลุ่มไดเทอร์พีน สารละลายจะปรากฏเป็นสีเขียวมรกต

3.9 การตรวจสอบไตรเทอร์พีน (Triterpene Test)

นำสารสกัด 100 mg ละลายด้วยคลอโรฟอร์ม ($CHCl_3$) 5 mL เขย่าแล้วกรองสารละลาย จากนั้นเติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น (conc.H_2SO_4) 2 mL แล้วเขย่าอีก 2 - 3 นาที ถ้าพบอนุพันธ์ของไตรเทอร์พีน สารละลายชั้นล่างจะปรากฏสีน้ำตาลแดงขึ้น

3.10 การตรวจสอบแทนนิน (Tannin Test) จะทำการทดสอบด้วยกัน 2 วิธี ได้แก่

- การตรวจสอบด้วยเจลาติน (Gelatin Test) นำสารสกัด 100 mg ละลายด้วยน้ำกลั่น 5 mL เติม 1% w/v เจลาติน (Gelatin) 2 - 3 หยด หากมีแทนนิน จะปรากฏตะกอนสีขาวขุ่นที่ก้นหลอดทดลอง
- การตรวจสอบด้วยเลดอะซิเตท (Lead Acetate Test) สารสกัด 100 mg ละลายด้วยน้ำกลั่น 5 mL เติม 10% w/v เลดอะซิเตท [$Pb(CH_3COO)_2$] 2 - 3 หยด ถ้าพบอนุพันธ์ของแทนนิน สารละลายจะเกิดตะกอนสีขาวขุ่นที่ก้นหลอดทดลอง

4. การหาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวม (Total Phenolic Content, TPC)

การหาปริมาณฟีนอลิกรวมด้วยวิธี Folin-Ciocalteu Reagent (Lamkhwan and Seekhaw, 2025) เตรียมสารละลายมาตรฐานกรดแกลลิก (Gallic Acid) (ความเข้มข้นอยู่ในช่วง 0.01 - 0.5 mg/mL) และสารละลายตัวอย่าง (ความเข้มข้น 0.1 mg/mL) จากนั้นนำสารมาตรฐานหรือสารสกัดตัวอย่าง ใส่ลงใน 96-well plate 12.5 µL เติมน้ำกลั่น

12.5 µL และ Folin-Ciocalteu Reagent 12.5 µL ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 6 นาที จากนั้นเติมน้ำกลั่น 100 µL และ 7.5% w/v โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) 125 µL เขย่าและตั้งทิ้งไว้ในที่มืดที่อุณหภูมิห้องอีก 90 นาที นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 760 nm ด้วย Microplate Reader แล้วนำค่าที่ได้มาคำนวณหาปริมาณฟีนอลิกรวม โดยเทียบกับกราฟของสารละลายมาตรฐานกรดแกลลิก (Gallic Acid) และรายงานผลในหน่วย mg GAE/g dried weight โดยจะทำการทดสอบตัวอย่างละ 3 ครั้ง (n = 3) จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (mean ± SD)

5. การหาปริมาณฟลาโวนอยด์รวม (Total Flavonoid Content, TFC)

การหาปริมาณฟลาโวนอยด์รวมด้วยวิธี Aluminium Chloride Colorimetric (Lamkhwan and Seekhaw, 2025) เตรียมสารละลายมาตรฐานเควอซิทิน (Quercetin) (ความเข้มข้นอยู่ในช่วง 0.001 - 0.1 mg/mL) และสารละลายตัวอย่าง (ความเข้มข้น 0.01 mg/mL) จากนั้นนำสารมาตรฐานหรือสารสกัดตัวอย่างลงใน 96-well plate 125 µL เติม 5% w/v โซเดียมไนไตรท์ ($NaNO_2$) 12.5 µL และตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นเติม 10% w/v อะลูมิเนียมคลอไรด์ ($AlCl_3$) 37.5 µL เขย่าและนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 510 nm ด้วย Microplate Reader แล้วนำค่าที่ได้มาคำนวณหาปริมาณฟลาโวนอยด์รวมโดยเทียบกับกราฟของสารละลายมาตรฐานเควอซิทิน (Quercetin) และรายงานผลในหน่วย mg QE/g dried weight โดยจะทำการทดสอบตัวอย่างละ 3 ครั้ง (n = 3) จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (mean ± SD)

6. การทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH

การทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH (Sriraksa and Seekhaw, 2024) ทำได้โดยเตรียมสารละลายตัวอย่างที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 1.0 mg/mL และทำการเจือจางในความเข้มข้นที่เหมาะสม จากนั้นนำสารละลายตัวอย่าง 100 µL ลงใน 96-well plate เติม 0.2 mM DPPH 100 µL เขย่าและตั้งทิ้งไว้ในที่มืดที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 517 nm ด้วย Microplate Reader และนำค่าที่ได้มาคำนวณหาร้อยละความสามารถในการยับยั้งอนุมูลอิสระ (%radical scavenging) โดยใช้สูตรคำนวณ ดังนี้

$$\%\text{DPPH radical scavenging activity} = [(A_{Control} - A_{Sample})/A_{Control}] \times 100$$

เมื่อ

$A_{Control}$ คือ ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย DPPH (ไม่ผสมสารตัวอย่าง)

A_{Sample} คือ ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายตัวอย่างที่ทำปฏิกิริยากับ DPPH

ทำการสร้างกราฟคำนวณหาร้อยละความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ (%Radical Scavenging) และความเข้มข้นของสารละลายตัวอย่าง เพื่อหาความเข้มข้นของสารละลายตัวอย่างที่สามารถยับยั้งอนุมูลอิสระ DPPH ได้ 50% (IC_{50}) เทียบกับสารละลายมาตรฐานกรดแอสคอร์บิก (L-Ascorbic Acid) ทำการทดสอบตัวอย่างละ 3 ครั้ง (n = 3) จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (mean ± SD)

7. การทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระโดยวิธี ABTS

การทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระโดยวิธี ABTS (Sriraksa and Seekhaw, 2024) โดยเตรียมสารละลาย $ABTS^{\bullet+}$ (7 mM ABTS 4 mL ทำปฏิกิริยากับ 2.4 mM $K_2S_2O_8$ 6 mL) ตั้งทิ้งไว้ในที่มืดที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 12 - 14 ชั่วโมง เพื่อให้ $ABTS^{\bullet+}$ เกิดปฏิกิริยาสมบูรณ์ จากนั้นเจือจางสารละลาย $ABTS^{\bullet+}$: Methanol ในอัตราส่วน 1:50 mL นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 734 nm ด้วย Microplate Reader ให้ได้ค่าการดูดกลืนแสงในช่วง 0.70 - 0.71 เตรียมสารละลายตัวอย่างที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 1.0 mg/mL และทำการเจือจางในความเข้มข้นที่เหมาะสม ลงใน 96-well plate 20 µL เติมสารละลาย $ABTS^{\bullet+}$ 180 µL เขย่าและตั้งทิ้งไว้ในที่มืดที่อุณหภูมิห้องอีก 6 นาที ทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 734 nm และนำค่าที่ได้มาคำนวณหาร้อยละความสามารถในการยับยั้งอนุมูลอิสระ (%radical scavenging) โดยใช้สูตรคำนวณ ดังนี้

$$\%\text{ABTS radical scavenging activity} = [(A_{Control} - A_{Sample})/A_{Control}] \times 100$$

เมื่อ

$A_{Control}$ คือ ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย $ABTS^{\bullet+}$ (ไม่ผสมสารตัวอย่าง)

A_{Sample} คือ ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายตัวอย่างที่ทำปฏิกิริยากับ $ABTS^{\bullet+}$

ทำการสร้างกราฟคำนวณหาร้อยละความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ (%radical scavenging) และความเข้มข้นของสารละลายตัวอย่าง เพื่อหาความเข้มข้นของสารละลายตัวอย่างที่สามารถยับยั้งอนุมูลอิสระ $ABTS^{\bullet+}$ ได้ 50% (IC_{50}) เทียบกับสารละลายมาตรฐานกรดแอสคอร์บิก (L-Ascorbic Acid) ทำการทดสอบตัวอย่างละ 3 ครั้ง (n = 3) จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (mean ± SD)

8. การทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระโดยวิธี FRAP

การทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระโดยวิธี FRAP (Sriraksa and Seekhaw, 2024) เตรียมสารละลาย FRAP reagent (300 mM acetate buffer pH 3.6; 20 mM $FeCl_3$; 10 mM TPTZ ใน 40 mM HCl อัตราส่วน 10:1:1 mL) เตรียมสารละลายตัวอย่างที่ความเข้มข้น 0.05 mg/mL ลงใน 96-well plate 20 µL เติมสารละลาย FRAP reagent 180 µL เขย่าและตั้งทิ้งไว้ในที่มืดที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 6 นาที ทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 593 nm ด้วย Microplate Reader นำค่าที่ได้มาคำนวณหาปริมาณของ Fe^{2+} โดยเทียบกับกราฟของสารละลายมาตรฐาน $FeSO_4$ และรายงานผลในหน่วย mg $FeSO_4$ /g dried weight โดยจะทำการทดสอบตัวอย่างละ 3 ครั้ง (n = 3) จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (mean ± SD)

9. การวิเคราะห์ผลข้อมูลทางสถิติ

ในการวิเคราะห์ปริมาณฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์รวม และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ จากสารสกัดหยาบของเมล็ดมะยงชิดที่สกัดด้วยตัวทำละลายที่แตกต่างกัน 3 ชนิด จะทำการทดลองซ้ำตัวอย่างละ 3 ครั้ง (n = 3) แสดงผลการวิเคราะห์ในรูปของค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (mean ± SD) การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าเฉลี่ยโดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-Way ANOVA) ด้วยวิธีทดสอบ Post-Hoc Test โดย Tukey ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (p-value < 0.05) ด้วยโปรแกรม GNU PSPP Version 2.0.1

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

1. การเตรียมสารสกัดหยาบเมล็ดมะยงชิด

จากการสกัดเมล็ดมะยงชิดแห้งด้วยตัวทำละลายเฮกเซน เอทิลอะซิเตท และเมทานอล และระเหยตัวทำละลายออกด้วยเครื่องระเหยแบบสุญญากาศ จะได้สารสกัดหยาบของเมล็ดมะยงชิดที่มีลักษณะทางกายภาพและร้อยละผลผลิตของสารสกัดเมล็ดมะยงชิด ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สารสกัดหยาบของเมล็ดมะยงชิดที่สกัดด้วยเฮกเซน เอทิลอะซิเตท และเมทานอล

Extracts	Physical Characteristics	Weight (g)	%Yield (% w/w)
Hexane	ของเหลวผสมน้ำมันสีเหลือง	2.07	0.41
Ethyl Acetate	ของเหลวหนืดสีน้ำตาลเข้ม	5.51	1.10
Methanol	ของเหลวหนืดสีน้ำตาลเข้ม	88.40	17.68

2. การตรวจสอบสารพฤกษเคมีเบื้องต้น

ผลการตรวจสอบสารพฤกษเคมีเบื้องต้นของสารสกัดหยาบเมล็ดมะยงชิดทั้ง 3 ชนิด พบกลุ่มสารพฤกษเคมี 5 กลุ่ม ได้แก่ ฟีนอลิก ฟลาโวนอยด์ แอนทราควิโนน ไตรเทอร์พีนและแทนนิน ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สารพฤกษเคมีเบื้องต้นจากสารสกัดหยาบของเมล็ดมะยงชิด

Phytochemicals		Results		
		Hexane	Ethyl Acetate	Methanol
Phenolics		-	+	+
Saponins		-	-	-
Flavonoids	- Alkaline's Regent Test	-	+	+
	- Lead Acetate Test	-	+	+
	- Magnesium Wire Test	-	+	+
Steroids		-	-	-
Alkaloids		-	-	-
Glycosides		-	-	-
Anthraquinones		+	+	+
Diterpenes		-	-	-
Triterpenes		+	+	+
Tannins	- Gelatin Test	+	+	+
	- Lead Acetate Test	+	+	+

หมายเหตุ: + พบสารพฤกษเคมี - ไม่พบสารพฤกษเคมี

3. ผลการตรวจหาปริมาณฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์รวม (TPC และ TFC)

การหาปริมาณฟีนอลิกรวมจากสารสกัดหยาบเฮกเซน เอทิลอะซิเตท และเมทานอล สามารถคำนวณหาได้จากกราฟของสารละลายมาตรฐานกรดแกลลิก (Gallic Acid) ($y = 5.3493x + 0.1461$; $R^2 = 0.9987$) โดยจะรายงานผลการทดลองในหน่วย mg GAE/g dried weight ส่วนการหาปริมาณฟลาโวนอยด์รวมสามารถคำนวณได้จากกราฟของสารละลายมาตรฐานเควอซิทิน (Quercetin) ($y = 1.728x + 0.0747$; $R^2 = 0.9984$) โดยรายงานผลการทดลองในหน่วย mg QE/g, dried weight ผลการทดสอบดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ปริมาณฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์รวม จากสารสกัดเมล็ดมะยงชิดทั้ง 3 ชนิด

Extracts	Phytochemical Contents	
	TPC (mg GAE/g dried weight)	TFC (mg QE/g dried weight)
Hexane	-	-
Ethyl Acetate	1.40 ± 0.07^{b}	1.72 ± 0.24^{b}
Methanol	105.91 ± 0.70^{a}	19.41 ± 3.13^{a}

หมายเหตุ: - ไม่พบองค์ประกอบของกลุ่มสารพฤกษเคมี

$^{a, b}$ ในคอลัมน์เดียวกันแสดงถึงค่าที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ $p<0.05$

4. ผลการทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH, ABTS และ FRAP

การทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระจากสารสกัดหยาบของเมล็ดมะยงชิดที่สกัดด้วยตัวทำละลายทั้ง 3 ชนิด ด้วยวิธี DPPH, ABTS และ FRAP พบว่า สารสกัดหยาบของเมล็ดมะยงชิดที่สกัดด้วยตัวทำละลายที่มีขั้วแตกต่างกันจะให้ผลฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระที่แตกต่างกัน โดยการทดสอบด้วยวิธี DPPH และ ABTS จะรายงานผลการทดลองเป็น

ค่า IC_{50} ส่วนการทดสอบด้วยวิธี FRAP ในการรีดิวซ์โดยให้อิเล็กตรอนแก่อนุมูลอิสระจะรายงานผลการทดลองเป็นค่า FRAP value ในหน่วย mg $FeSO_4$/g dried weight ผลการทดสอบดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH, ABTS และ FRAP จากสารสกัดของเมล็ดมะยงชิดทั้ง 3 ชนิด

Extracts	Antioxidant activities		
	IC_{50} of DPPH (µg/mL)	IC_{50} of ABTS (µg/mL)	FRAP value (mg $FeSO_4$ /g dried weight)
Hexane	280.36±0.69[a]	4968.69±16.65[a]	0.13±0.01[c]
Ethyl Acetate	3.05±0.46[b]	350.15±1.41[b]	7.65±0.40[b]
Methanol	0.16±0.05[c]	5.54±0.35[c]	560.51±30.90[a]

หมายเหตุ: ค่า IC_{50} ของสารมาตรฐานวิตามินซีด้วยวิธี DPPH และ ABTS มีค่าเท่ากับ 0.63±0.04 และ 35.10±1.05 µg/mL
[a-c] ในคอลัมน์เดียวกันแสดงถึงค่าที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ $p<0.05$

การสกัดเมล็ดมะยงชิดด้วยตัวทำละลายเฮกเซน เอทิลอะซิเตท และเมทานอล พบว่า สารสกัดเมทานอลมีปริมาณสารสกัดหยาบสูงที่สุด (17.68%) รองลงมาคือ สารสกัดเอทิลอะซิเตท (1.10%) และสารสกัดเฮกเซน (0.41%) การตรวจสอบสารพฤกษเคมีเบื้องต้นจากสารสกัดทั้ง 3 ชนิด ด้วยปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงสีหรือตะกอน พบว่า สารสกัดเมทานอลและเอทิลอะซิเตทพบสารพฤกษเคมี 5 กลุ่ม ได้แก่ ฟีนอลิก ฟลาโวนอยด์ แอนทราควิโนน ไตรเทอร์พีน และแทนนิน ส่วนสารสกัดเฮกเซนที่มีขั้วต่ำลง พบ 3 กลุ่ม ได้แก่ แอนทราควิโนน ไตรเทอร์พีน และแทนนิน เป็นองค์ประกอบหลัก จากผลการทดสอบสอดคล้องกับรายงานของ Widyawati et al. (2014) ได้รายงานว่าสภาพขั้วของตัวทำละลายที่แตกต่างกันในกระบวนการสกัดมีผลต่อการสกัดกลุ่มสารพฤกษเคมีที่แตกต่างกัน โดยจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างและชนิดของสารกลุ่มสารพฤกษเคมีที่พบ จากการศึกษาในครั้งนี้พบกลุ่มสารที่มีบทบาทสำคัญต่อการออกฤทธิ์ทางชีวภาพหลายชนิด โดยเฉพาะสารกลุ่มฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์เป็นกลุ่มสารที่มีการรายงานถึงฤทธิ์ทางชีวภาพอย่างแพร่หลาย เช่น สามารถช่วยควบคุมระดับอนุมูลอิสระในร่างกายให้อยู่ในสภาวะสมดุล ต้านเชื้อแบคทีเรียที่ก่อโรคทั้งชนิดแกรมบวกและลบ ต้านการอักเสบของร่างกาย สารประกอบฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์มีโครงสร้างที่มีขั้วค่อนข้างสูง ทำให้ละลายได้ดีในตัวทำละลายที่มีขั้ว (Thungmunnithum et al., 2018) ในการตรวจหาปริมาณฟีนอลิกรวม พบว่าในสารสกัดเมทานอลมีปริมาณสูงที่สุด รองลงมาคือ สารสกัดเอทิลอะซิเตท (105.91±0.70 และ 1.40±0.07 mg GAE/g, dried weight) การตรวจหาปริมาณฟลาโวนอยด์รวมพบว่า สารสกัดเมทานอลมีปริมาณรวมสูงที่สุด รองลงมาคือ สารสกัดเอทิลอะซิเตท (19.41±3.13 และ 1.72±0.24 mg QE/g dried weight) ส่วนสารสกัดเฮกเซนในเบื้องต้นตรวจไม่พบสารกลุ่มฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์ด้วยปฏิกิริยาการเกิดสีหรือตะกอน การรายงานของ Kebede et al. (2025) พบว่าเมทานอลเป็นตัวทำละลายที่มีขั้วที่สูงกว่าเอทิลอะซิเตทและเฮกเซน จึงสามารถสกัดกลุ่มสารสำคัญอย่างฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์ที่เป็นสารประกอบที่มีขั้วได้ค่อนข้างดี เนื่องจากกลุ่มสารที่มีขั้วจะละลายในตัวทำละลายที่มีขั้วได้ดี ซึ่งสารประกอบฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์ส่วนใหญ่ที่พบในธรรมชาติจะมีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ติดอยู่กับวงอะโรมาติก (Aromatic Ring) ในโครงสร้าง โดยคุณสมบัตินี้จะทำให้สารประกอบดังกล่าวสามารถละลายหรือถูกสกัดออกมาได้ดีในตัวทำละลายที่มีหมู่ไฮดรอกซิลในโมเลกุลเหมือนกัน โดยอาศัยหลักการ like-dissolves-like ทำให้เมทานอลเกิดอันตรกิริยากับสารประกอบฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์ได้ดีและส่งผลให้สารสกัดที่สกัดด้วยตัวทำละลายเมทานอลมีปริมาณฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์สูงกว่าสารสกัดจากเอทิลอะซิเตทและเฮกเซน จากข้อมูลสารกลุ่มฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์ได้รับการพิสูจน์แล้วว่ามีประสิทธิภาพสูงในการดักจับโมเลกุลออกซิไดซ์ส่วนใหญ่ และอนุมูลอิสระ ซึ่งเกี่ยวข้องกับโรคหลายชนิด เช่น โรคมะเร็ง โรคภูมิแพ้ และโรคหลอดเลือด เป็นต้น ดังนั้นสารกลุ่มฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์อาจเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งเสริมฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ (Saeed et al., 2012) การทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH และ ABTS พบว่าสารสกัดเมทานอลมีฤทธิ์ในการยับยั้งอนุมูลอิสระดีที่สุด (IC_{50} = 0.16±0.05, 5.54±0.35 µg/mL)

รองลงมาคือ สารสกัดเอทิลอะซิเตท (IC_{50} = 3.05±0.46, 350.15±1.41 µg/mL) และสารสกัดเฮกเซน (280.36±0.69, 4968.69±16.65 µg/mL) ส่วนการทดสอบด้วยวิธี FRAP โดยการรีดิวซ์จาก Fe^{3+} ให้เป็น Fe^{2+} ซึ่งเปรียบเสมือนกับการให้อิเล็กตรอนแก่อนุมูลอิสระเพื่อให้อนุมูลอิสระอยู่ในสภาวะที่เสถียร พบว่า สารสกัดเมทานอลสามารถให้อิเล็กตรอนแก่อนุมูลอิสระได้ดีที่สุด รองลงมาคือ เอทิลอะซิเตท และเฮกเซน (FRAP Values เท่ากับ 560.51±30.90, 7.65±0.40 และ 0.13±0.01 mg $FeSO_4$/g dried weight ตามลำดับ) จากผลการทดสอบความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระทั้ง 3 วิธี ได้ผลสอดคล้องและไปในทิศทางเดียวกันว่า สารสกัดเมทานอลมีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระดีที่สุดรวมไปถึงมีปริมาณฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์รวมสูงที่สุดอีกด้วย ซึ่งสอดคล้องกับ Lamkhwan and Seekhaw (2025) ที่มีการรายงานก่อนหน้านี้ว่า ปริมาณฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์จะแปรผันตรงกับอนุมูลอิสระ และค่าเฉลี่ยของปริมาณฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์รวม รวมถึงค่าเฉลี่ยของความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระทั้ง 3 วิธีมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (p-value < 0.05) นอกจากนี้การรายงานของ Kiss et al. (2025) พบว่า ปริมาณฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์รวมในสารสกัดแสดงความสัมพันธ์ในเชิงบวกกับการทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ โดยสารสกัดที่มีปริมาณฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์รวมที่สูงจะแสดงฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระที่มีศักยภาพ เนื่องจากมีปริมาณของสารประกอบฟีนอลิกและฟลาโวนยอด์รวมที่สูงซึ่งมีคุณสมบัติในการดักจับกับอนุมูลอิสระ ให้อิเล็กตรอนแก่อนุมูลอิสระ และทำให้อนุมูลอิสระอยู่ในสภาวะที่เสถียร

จากการศึกษาของพืชในวงศ์เดียวกันกับมะยงชิด โดยเฉพาะอย่างยิ่งมะปราง (*Bouea macrophylla* Griffith) พบว่าสารสกัดหยาบเอทานอลจากใบมะปรางอุดมไปด้วยกลุ่มสารพฤกษเคมีที่สำคัญหลากหลายชนิด เช่น สารประกอบโพลีฟีนอล แทนนิน ฟลาโวนอยด์ สเตียรอยด์ ไตรเทอร์พีนอยด์ กรดไขมัน ซาโปนิน และอัลคาลอยด์ และยังมีปริมาณฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์รวมที่สูง (88.78±6.51 mg GAE/g และ 70.66±7.51 mg RE/g) ทั้งนี้ ค่าปริมาณฟลาโวนอยด์ดังกล่าวรายงานโดยเทียบกับสารมาตรฐานรูติน (Rutin Equivalent, RE) ซึ่งเป็นสารคนละชนิดกับที่ใช้ในการศึกษานี้ที่เทียบกับสารมาตรฐานเควซิติน (Quercetin Equivalent, QE) จึงไม่สามารถนำค่าตัวเลขทั้งสองมาเปรียบเทียบโดยตรงได้ ซึ่งมีส่วนสำคัญต่อการออกฤทธิ์ทางชีวภาพในการต้านเชื้อจุลชีพและยับยั้งเซลล์มะเร็งปากมดลูก (HeLa) และมะเร็งลำไส้ใหญ่ (HCT116) โดยแสดงค่า IC_{50} ของการยับยั้งเซลล์มะเร็งเท่ากับ 24±0.8 และ 28±0.9 µg/mL นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค GC-MS พบว่า ในสารสกัดหยาบเอทานอลของใบมะปรางมีสารกลุ่มโพลีฟีนอล (Polyphenols) ฟลาโวนอยด์ (Flavonoids) แคริโอฟิลลีน (Caryophyllene) ฟายทอล (Phytol) และทรานส์-เจรานิลเจรานิออล (Trans-Geranylgeraniol) เป็นองค์ประกอบหลักซึ่งส่งผลต่อการออกฤทธิ์ทางชีวภาพอย่างมีประสิทธิภาพ (Nguyen et al., 2020)

อย่างไรก็ตาม การศึกษาในครั้งนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับสารพฤกษเคมี ปริมาณฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์รวมและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระจากสารสกัดเมล็ดมะยงชิดที่สกัดด้วยตัวทำละลายเฮกเซน เอทิลอะซิเตท และเมทานอล เป็นการศึกษาข้อมูลในขั้นเบื้องต้น หากมีการนำไปพัฒนาและประยุกต์ใช้ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในเชิงลึกและใช้กระบวนการสกัดแบบสีเขียว เพื่อให้เกิดความปลอดภัยต่อการพัฒนาผลิตภัณฑ์เพื่อสุขภาพในอนาคต

สรุปผล

การศึกษาสารสกัดเมล็ดมะยงชิดพบว่า ส่วนที่สกัดด้วยเมทานอลแสดงฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระที่มีศักยภาพทั้งการทดสอบด้วยวิธี DPPH, ABTS และ FRAP อีกทั้งยังมีปริมาณฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์รวมสูงที่สุดเมื่อเทียบกับสารสกัดที่สกัดด้วยตัวทำละลายชนิดอื่น ดังนั้นจึงแสดงให้เห็นว่าสารสกัดเมล็ดมะยงชิดเป็นแหล่งของสารต้านอนุมูลอิสระที่มีศักยภาพ จึงควรมีการแยกและมีการระบุองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญ รวมถึงการทดสอบฤทธิ์ทางชีวภาพอื่น ๆ ร่วมด้วย เช่น ฤทธิ์การยับยั้งเอนไซม์ไทโรซิเนส ฤทธิ์ต้านแบคทีเรีย และฤทธิ์ต้านการอักเสบทั้งในหลอดทดลองและทางคลินิก เพื่อเป็นฐานข้อมูลและสามารถที่จะนำไปใช้หรือพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์เครื่องสำอาง หรือเภสัชภัณฑ์ในอนาคตได้ต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ สาขาวิชาเคมี ศูนย์วิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม ที่ให้การสนับสนุนเครื่องมือ อุปกรณ์ และสถานที่ทำการวิจัย

References

Boonwong, T., Chumpookam, J. and Yapwattanaphun, C. (2017). Effect of Colors of Bagging Material on Fruit Quality of 'Toon Klaow' Marian Plum (*Bouea burmanica* Griff.). *Thai Journal of Science and Technology*, 6(3), 214-220. https://doi.org/10.14456/tjst.2017.34

Fu'adah, I.T., Sumiwi, S.A. and Wilar, G. (2022). The Evolution of Pharmacological Activities *Bouea macrophylla* Griffith *In Vivo* and *In Vitro* Study: A Review. *Pharmaceuticals*, 15(2), 238. https://doi.org/10.3390/ph15020238

Kebede, B.H., Them, R.L. and Mengistu, B.A. (2025). Effects of Extraction Solvents on Phenolic Contents, In Vitro Antioxidant, and Antimicrobial Activities of Roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.) Calyx. *Food Chemistry Advances*, 9. https://doi.org/10.1016/j.focha.2025.101119

Kiss, A., Papp, V. A., Pál, A., Prokisch, J., Mirani, S., Toth, B. E. and Alshaal, T. (2025). Comparative Study on Antioxidant Capacity of Diverse Food Matrices: Applicability, Suitability and Inter-Correlation of Multiple Assays to Assess Polyphenol and Antioxidant Status. *Antioxidants*, 14(3). https://doi.org/10.3390/antiox14030317

Lamkhwan, N. and Seekhaw, P. (2025). Phytochemical Screening, Total Phenolic and Flavonoid Contents, Antioxidant and Cytotoxic Activities from Twig Crude Extracts of *Bouea burmanica* Griff. *Thai Science and Technology Journal*, 33(2), 1-14. https://li01.tci-thaijo.org/index.php/tstj/article/view/263427

Nguyen, N.H., Nguyen, T.T., Ma, P.C., Ta, Q.T.H., Duong, T.H. and Vo, V.G. (2020). Potential Antimicrobial and Anticancer Activities of an Ethanol Extract from *Bouea macrophylla*. *Molecules*, 25(8). https://doi.org/10.3390/molecules25081996

Saeed, N., Khan, M.R. and Shabbir, M. (2012). Antioxidant Activity, Total Phenolic and Total Flavonoid Contents of Whole Plant Extracts *Torilis leptophylla* L. *BMC Complementary and Alternative Medicine*, 12. https://doi.org/10.1186/1472-6882-12-221

Seekhaw, P., Lamkhwan, N., Nearmayhom, N., Sriraksa, A. and Khamboon, P. (2023). Phytochemicals Screening, Total Phenolic and Flavonoid Content and Antioxidant Activities of *Bouea burmanica* Griff. Seed Crude Extract. In *Proceedings of the 5th National Conference on Science, Technology, and Innovation: Science and Technology for Sustainable Local Development* (pp. 47-56). Faculty of Science and Technology, Loei Rajabhat University.

Seekhaw, P., Nearmayhom, N., Promla, N., na wichian, K. and Jutiviboonsuk, A. (2022). Phytochemical Screening, Acute Toxicity Against Skin Irritation and Corrosion in Rabbits of Aqueous Fabric Dye from *Bouea burmanica* Griff. Leaf Extract. *PSRU Journal of Science and Technology*, 7(1), 117-128. https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/Scipsru/article/view/247424

Shaikh, J.R. and Patil, M.K. (2020). Qualitative Tests for Preliminary Phytochemical Screening: An Overview. International Journal of Chemical Studies, 8(2), 603-608. https://doi.org/10.22271/chemi.2020.v8.i2i.8834

Sriraksa, A. and Seekhaw, P. (2024). Comparison of Phytochemicals and Antioxidant Capacities of Ethanol Extracts from Different Parts of *Elsholtzia beddomei* C.B.Clarke ex Hook. f. *Thai Science and Technology Journal*, 32(2), 1-12. https://li01.tci-thaijo.org/index.php/tstj/article/view/260507

Thiraphatthanavong, P. and Phandech, K. (2023). Comparison of the Phenolic Compounds and Antioxidant Activity in Different Extraction Techniques of *Allium ascalonicum*. *Udon Thani Rajabhat University Journal of Science and Technology*, 11(1), 31-46. https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/scudru/article/view/250952

Thungmunnithum, D., Thongboonyou, A., Pholboon, A. and Yangsabai, A., (2018). Flavonoids and Other Phenolic Compounds from Medicinal Plants for Pharmaceutical and Medical Aspects: An Overview. *Medicines*, 5(3). https://doi.org/10.3390/medicines5030093

Widyawati, P.S., Budianta, T.D.W., Kusuma,F.A. and Wijaya, E.L. (2014). Difference of Solvent Polarity to Phytochemical Content and Antioxidant Activity of *Pluchea indicia* Less Leaves Extracts. *International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Research*, 6(4), 850-855. https://repositori.ukwms.ac.id/id/eprint/10684/

การเพิ่มประสิทธิภาพแบบจำลองความคิดเห็นของคนไทยต่อปัญญาประดิษฐ์ด้วยเทคนิคการตัดคำ

Enhancing Efficiency of Thai Opinions Models on Artificial Intelligence using Word Segmentation Techniques

จตุรภัทร สืบสาย[1] และจารี ทองคำ[1*]
Jaturapat Suebsay[1] and Jaree Thongkam[1*]

Received: *February 5, 2026;* ***Revised:*** *May 14, 2026;* ***Accepted:*** *June 26, 2026*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์เทคนิคการตัดคำที่เพิ่มประสิทธิภาพของแบบจำลอง การจำแนกความคิดเห็นของคนไทยต่อปัญญาประดิษฐ์ ข้อมูลถูกเก็บรวบรวมจากสื่อสังคมออนไลน์ จำนวนทั้งหมด 8,091 ความคิดเห็น ผู้วิจัยได้คัดเลือกความคิดเห็นที่มีความยาวมากกว่า 10 คำขึ้นไปมาใช้ในการวิเคราะห์ ดังนั้นจึงเหลือ 1,767 ความคิดเห็น ในกระบวนการทำเหมืองข้อความ ขั้นตอนการตัดคำมีความสำคัญและใช้เวลามาก ผู้วิจัยจึงเลือกใช้เทคนิค Newmm เทคนิค Deepcut เทคนิค Longest และเทคนิค Attacut ในการตัดคำ ส่วนการสร้างแบบจำลองใช้เทคนิคนาอีฟเบย์ เทคนิคซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน เทคนิคการหาเพื่อนบ้านใกล้ที่สุด และเทคนิคการเรียนรู้ของต้นไม้ตัดสินใจ ซี 4.5 เนื่องจากเป็นเทคนิคที่มีความน่าเชื่อถือ ได้รับความนิยม และถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลายในงานวิจัย การวัดประสิทธิภาพของการตัดคำใช้หลักการ 10-Fold Cross Validation ในการแบ่งข้อมูล แสดงประสิทธิภาพของการตัดคำด้วย ค่าความถูกต้อง ค่าความแม่นยำ ค่าความระลึก และค่าคะแนนเอฟ 1 ผลการทดลองพบว่า การตัดคำด้วยเทคนิค Deepcut ซึ่งเป็นวิธีการตัดคำแบบเรียนรู้จากข้อมูล สามารถจัดการความคิดเห็นที่มีคำใหม่หรือคำไม่เป็นทางการได้ดี เมื่อนำมาสร้างแบบจำลองด้วยเทคนิคซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน ซึ่งสามารถจัดการข้อมูลที่มีมิติสูงและความคิดเห็นที่ซับซ้อนได้ดี ทั้งคำที่เป็นทางการ คำไม่เป็นทางการ และศัพท์ใหม่ ส่งผลให้การใช้เทคนิคดังกล่าวร่วมกันทำให้ได้ผลการทดลองที่ดีที่สุด ให้ค่าความถูกต้องที่ร้อยละ 93.42 ค่าความระลึกที่ร้อยละ 97.03 และค่าคะแนนเอฟ 1 ที่ร้อยละ 94.54

คำสำคัญ : การตัดคำ; การจำแนกความคิดเห็น; เหมืองความคิดเห็นต่อปัญญาประดิษฐ์

[1] *คณะวิทยาการสารสนเทศ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม*
[1] *Faculty of Informatics, Mahasarakham University*
[*] *Corresponding Author, Tel. 09 4224 8926, E - mail: jaree.t@msu.ac.th*

Abstract

This research aimed to analyze word segmentation techniques that improve the performance of sentiment classification models for Thai people's opinions toward artificial intelligence. The data were collected from social media platforms, consisting of 8,091 comments. The researcher selected only comments containing more than 10 words for analysis, resulting in a total of 1,767 comments. In the text mining process, word segmentation is an important and time-consuming step. Therefore, the researcher employed Newmm, Deepcut, Longest, and Attacut techniques for word segmentation. For model construction, Naive Bayes, Support Vector Machine, K-Nearest Neighbors, and C4.5 Decision Tree techniques were applied, as these techniques are reliable, widely accepted, and commonly used in research studies. The performance evaluation employed the 10-Fold Cross Validation method for data partitioning. The effectiveness of the word segmentation techniques was measured using Accuracy, Precision, Recall, and F1-Score. The experimental results revealed that the Deepcut technique, which is a data-driven word segmentation approach, could effectively handle comments containing new or informal words. When combined with the Support Vector Machine technique, which performs well with high-dimensional and complex data containing formal words, informal expressions, and newly emerging terms, the combination achieved the best performance. The results yielded an accuracy of 93.42 %, a recall of 97.03 %, and an F1-score of 94.54 %.

Keywords: Word Tokenization; Opinion Classification; Opinion Mining in Artificial Intelligence

บทนำ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence: AI) ได้เข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวัน เช่น การใช้ปัญญาประดิษฐ์ในทางการแพทย์ (Kaya and Yildiz, 2026) การใช้ปัญญาประดิษฐ์ในบริบททางวิชาการ (Demir and Egbert, 2026) การใช้ปัญญาประดิษฐ์ในด้านการศึกษา การเรียนการสอน (Turmuzi et al., 2026) การใช้ปัญญาประดิษฐ์ในการสร้างเนื้อหาเพื่อตอบคำถามของผู้ใช้ (Charmanas et al., 2026) จากการใช้งานปัญญาประดิษฐ์ ซึ่งมีคนไทยแสดงความคิดเห็นต่อปัญญาประดิษฐ์ บนสื่อสังคมออนไลน์เป็นจำนวนมาก โดยการวิเคราะห์ความคิดเห็นดังกล่าวจำแนกออกเป็นความคิดเห็นด้านเชิงบวกและเชิงลบ (Phaewattanakul and Luenam, 2014) การทำเหมืองความคิด (Opinions Mining) เป็นกระบวนการที่นักวิจัยนิยมนำมาใช้ในการวิเคราะห์ความคิดเห็น

การตัดคำเป็นขั้นตอนที่สำคัญและใช้เวลามากในการทำเหมืองข้อความ (Duangtham et al., 2025) เนื่องจากภาษาไทยไม่มีการแบ่งวรรคคำ เหมือนภาษาอังกฤษ และภาษาไทยมีการใช้คำประสมเป็นการรวมกันของหลายคำหรือหลายพยางค์ ซึ่งหากมีการตัดคำผิดพลาดจะทำให้คำสื่อความหมายผิดไปจากเดิม (Damrongkamoltip et al., 2024) จึงมีนักวิจัยบางท่านได้ทำการวิจัยในด้านของการตัดคำ วิเคราะห์เทคนิคการตัดคำที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด ดังงานวิจัยของ Bowornlertsutee and Paireekreng (2022) ได้ใช้เทคนิคการตัดคำ 3 เทคนิค ได้แก่ เทคนิค Newmm เทคนิค Longest และเทคนิค Attacut แบ่งกลุ่มข้อมูลด้วยวิธี 10-Fold Cross Validation พบว่าการตัดคำด้วยเทคนิค Longest จำแนกด้วยเทคนิคซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน (Support Vector Machines: SVM) ให้ค่าความแม่นยำ (Precision) สูงที่สุด ส่วนงานวิจัยของ Manhem et al. (2020) ได้ใช้เทคนิคการตัดคำ 3 เทคนิค ได้แก่ เทคนิค Mm เทคนิค Newmm และเทคนิค Longest แบ่งกลุ่มข้อมูลด้วยวิธี Hold Out พบว่าการตัดคำด้วยเทคนิค Newmm จำแนกด้วยเทคนิคต้นไม้ตัดสินใจ ให้ค่าความถูกต้อง (Accuracy) และค่าความแม่นยำสูงที่สุด งานวิจัยของ Duangtham et al. (2025) ได้ใช้เทคนิคการตัดคำ 3 เทคนิค ได้แก่ เทคนิค Longest เทคนิค Newmm และเทคนิค Multi_cut

แบ่งกลุ่มข้อมูลด้วยวิธี Hold Out พบว่าการตัดคำด้วยเทคนิค Newmm จำแนกด้วยเทคนิคการถดถอยโลจิสติกส์ (Logistic Regression: LR) ให้ค่าความถูกต้องสูงที่สุด

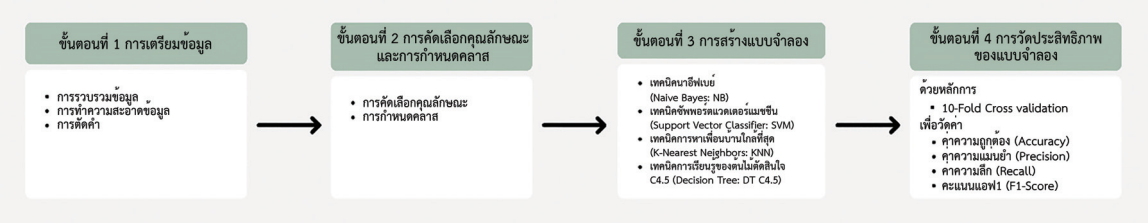
การวิเคราะห์ความคิดเห็น (Sentiment Analysis) เป็นการศึกษาโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ความคิดเห็น ความรู้สึก การประเมินทัศนคติ และอารมณ์ของผู้คนต่อสิ่งที่สนใจ ที่แสดงออกมาในรูปแบบของการแสดงความคิดเห็น การวิเคราะห์ความรู้สึกจากความคิดเห็น ที่แสดงออกหรือบ่งบอกถึงความรู้สึกเชิงบวกหรือเชิงลบ เพื่อให้ได้ข้อมูลในการนำไปสร้างแบบจำลอง เพื่อวิเคราะห์ (Md Suhaimin et al., 2023) ดังงานวิจัยของ Laowsungsuk et al. (2017) ได้วิเคราะห์ความคิดเห็นเกี่ยวกับร้านอาหารบนเว็บไซต์รีวิว จากปัญหาการตัดสินใจเลือกร้านอาหารของผู้บริโภคที่ทำได้ยากจากจำนวนร้านและรีวิวจำนวนมาก ต้องใช้เวลาในการอ่านรีวิวเพื่อหาข้อสรุป ผู้วิจัยได้พัฒนาระบบวิเคราะห์และสรุปความคิดเห็นจากเว็บไซต์รีวิวแบบอัตโนมัติ นำเสนอผู้บริโภคในรูปแบบกราฟิกเพื่อให้ง่ายต่อการตัดสินใจ โดยใช้เทคนิคประมวลผลภาษาธรรมชาติ เช่น การตัดคำ และการวิเคราะห์โครงสร้างประโยค เพื่อจำแนกความคิดเห็นเชิงบวกและเชิงลบ จากนั้นแสดงผลเป็นระดับความพึงพอใจในรูปแบบกราฟิก ผลสรุปจากผู้ใช้พบว่า การสรุปความคิดเห็นด้านบริการและอาหารอยู่ในระดับดี ขณะที่ด้านอื่น ๆ อยู่ในระดับพอใช้ ส่วนงานวิจัยของ Chantanapelin et al. (2024) ได้ศึกษาการพัฒนาและการบริหารจัดการในสถานที่ท่องเที่ยวโดยการใช้ปัจจัยทางตลาด โดยใช้เทคโนโลยี Chat-GPT เพื่อการวิเคราะห์ความพึงพอใจของผู้ใช้งาน วิเคราะห์ข้อมูลเพื่อคิดกลยุทธ์การตลาดที่เหมาะสมกับบริบททท้องถิ่น โดยใช้การประมวลผลข้อมูลที่ได้จากการรวบรวม การคัดกรองข้อมูล และการจำแนกข้อมูล เพื่อใช้สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูล ผลการวิจัยพบว่า จากรีวิว 434 รายการ (ตุลาคม พ.ศ. 2565 - พฤษภาคม พ.ศ. 2566) คะแนนเฉลี่ย 4.2 ดาว ส่วนใหญ่เป็นรีวิวจาก Google Maps โดยนักท่องเที่ยวอังกฤษมากที่สุด ร้อยละ 39 ความคิดเห็นส่วนใหญ่เป็นเชิงบวก ร้อยละ 55 ความคิดเห็นเชิงกลาง ร้อยละ 23 ความคิดเห็นเชิงลบ ร้อยละ 13 ความคิดเห็นผสมผสานกัน ร้อยละ 9

การสร้างแบบจำลองเพื่อการจำแนกเป็นขั้นตอนหนึ่งในการทำเหมืองข้อความเช่นกัน เป็นการวิเคราะห์ความคิดเห็นด้วยเทคนิคการทำเหมืองข้อมูลและการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) มาใช้ในการสร้างแบบจำลองเพื่อการจำแนก มีนักวิจัยหลายท่านได้ใช้เทคนิคดังกล่าว ดังงานวิจัยของ Sancoko et al. (2022) ได้ศึกษาความคิดเห็นของผู้คนเกี่ยวกับการป้องกันโควิด-19 จากข้อมูลบนทวิตเตอร์ ด้วยเทคนิคนาอีฟเบย์ (Naive Bayes: NB) เทคนิคการเรียนรู้ของต้นไม้ตัดสินใจ ซี 4.5 (Decision Tree: DT C4.5) และเทคนิคการหาเพื่อนบ้านใกล้ที่สุด (K-Nearest Neighbors: KNN) ในการทดลองใช้การแบ่งกลุ่มข้อมูลด้วยวิธี 10-Fold Cross Validation ใช้ค่าความถูกต้อง ค่าความระลึก (Recall) และค่าความแม่นยำ ในการวัดประสิทธิภาพของแบบจำลอง พบว่าเทคนิคนาอีฟเบย์สร้างแบบจำลองที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุด ส่วนงานวิจัยของ Handayani et al. (2024) ได้ศึกษาความคิดเห็นของคนอินโดนีเซียเกี่ยวกับผู้ให้บริการอินเทอร์เน็ตไฟเบอร์ ICONNET จากข้อมูลบน X (เดิม ทวิตเตอร์) โดยมี 2,720 ความคิดเห็น ใช้เทคนิคนาอีฟเบย์ และเทคนิคซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน ในการทดลองใช้การแบ่งกลุ่มข้อมูลด้วยวิธี 10-Fold Cross Validation ใช้ค่าความถูกต้อง ค่าความแม่นยำ ค่าความระลึก ในการวัดประสิทธิภาพของแบบจำลอง พบว่าเทคนิคซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนสร้างแบบจำลองที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุด

จากปัญหาการตัดคำที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของแบบจำลองและการวิจัยในปัจจุบันด้านการเปรียบเทียบวิธีการตัดคำจากความคิดเห็นในสื่อสังคมออนไลน์ต่อปัญญาประดิษฐ์ ยังมีการวิจัยเป็นจำนวนน้อย ดังนั้นผู้วิจัยจึงสนใจที่จะศึกษาการตัดคำด้วย เทคนิค Newmm เทคนิค Deepcut เทคนิค Longest และเทคนิค Attacut ใน Python Library PyThaiNLP นำมาใช้ในการตัดคำภาษาไทยและเทคนิคนาอีฟเบย์ เทคนิคซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน เทคนิคการหาเพื่อนบ้านใกล้ที่สุด เทคนิคการเรียนรู้ของต้นไม้ตัดสินใจ ซี 4.5 มาใช้ในการสร้างแบบจำลองและวัดประสิทธิภาพในการตัดคำ ผู้วิจัยได้ใช้หลักการ 10-Fold Cross Validation ในการแบ่งข้อมูล โดยแบ่งข้อมูลออกเป็นชุดฝึกสอนและชุดทดสอบ การแสดงประสิทธิภาพของการตัดคำด้วย ค่าความถูกต้อง ค่าความแม่นยำ ค่าความระลึก และค่าคะแนนเอฟ 1 (F1-Score)

วิธีดำเนินการวิจัย

วิธีดำเนินการวิจัยนี้ประกอบด้วย 4 ขั้นตอน ได้แก่ การเตรียมข้อมูล การคัดเลือกคุณลักษณะและการกำหนดคลาส การสร้างแบบจำลอง การวัดประสิทธิภาพของแบบจำลอง (Maisook and Thongkam, 2025) โดยมีรายละเอียดดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ขั้นตอนการเพิ่มประสิทธิภาพการวิเคราะห์ความคิดเห็นด้วยเทคนิคการตัดคำ

1. การเตรียมข้อมูล

1.1 รวบรวมข้อมูล รวบรวมความคิดเห็น (Comment) ที่เกี่ยวข้องกับปัญญาประดิษฐ์จากสื่อสังคมออนไลน์ จำนวนทั้งหมด 8,091 ความคิดเห็น ตั้งแต่วันที่ 21 มิถุนายน 2560 ถึงวันที่ 24 พฤศจิกายน 2567 แล้วใช้โปรแกรม Web Scraper Chrome Extension ดึงข้อมูลจากเว็บไซต์ไปเก็บไว้ที่ ไฟล์ Microsoft Excel

1.2 ทำความสะอาดข้อมูล

การกำจัดคำหยุด (Stopword Removal) กำจัดตัวเลข กำจัดตัวอักษรภาษาอังกฤษ กำจัดสัญลักษณ์ กำจัดช่องว่าง

การทำคำให้เป็นมาตรฐาน เชิงรูปแบบ (Text Normalization) การทำให้รูปแบบข้อความเป็นมาตรฐาน กำจัดสระและวรรณยุกต์ในภาษาไทยบางตัวที่ไม่จำเป็นต่อการวิเคราะห์คำออก ได้แก่ ไม้ยกมก (ๆ) ไปยาลน้อย (ฯ) ไปยาลใหญ่ (ฯลฯ) เช่น คำว่า “ดีๆๆๆ” ⟶ “ดี” กำจัดการลากเสียง หรือ พิมพ์ตัวอักษรซ้ำ เพื่อเน้นอารมณ์ เช่น คำว่า “ดีมากกกกก” ⟶ “ดีมาก”

การนับจำนวนคำ (Word Count) นับจำนวนคำในแต่ละความคิดเห็นจากความคิดเห็นทั้งหมด 8,091 ความคิดเห็น โดยใช้เทคนิคการตัดคำทั้ง 4 เทคนิค ได้แก่ เทคนิค Newmm เทคนิค Deepcut เทคนิค Longest และเทคนิค Attacut คัดความคิดเห็นที่น้อยกว่า 10 คำ ที่เป็นความคิดเห็นเดียวกัน จากทั้ง 4 เทคนิคออก เนื่องจากความคิดเห็นเหล่านั้นสั้นเกินไป ไม่สามารถสื่อได้ถึงอารมณ์ ความรู้สึก เหลือความคิดเห็น จำนวน 2,104 ความคิดเห็น

การคัดความคิดเห็นที่ไม่เกี่ยวข้อง (Irrelevant Comment Removal) คัดความคิดเห็นที่ไม่เกี่ยวข้องกับปัญญาประดิษฐ์ออก เช่น ความคิดเห็นด้านระบบเสียง ระบบภาพของวิดีโอในสื่อสังคมออนไลน์ ความคิดเห็นต่อพิธีกรผู้บรรยาย ความคิดเห็นเชิงปรัชญา แนวคิด เป็นต้น

การทำคำให้เป็นมาตรฐาน เชิงความหมาย (Lexical Normalization) การปรับคำให้มีความหมายมาตรฐานเดียวกัน แก้ตัวอักษรย่อเป็นคำเต็ม เช่น คำว่า “ตปท” ⟶ “ต่างประเทศ” แก้คำผิด คำตก เช่น คำว่า “คำนวน” ⟶ “คำนวณ” แก้คำภาษาถิ่นเป็นภาษากลาง เช่น คำว่า “ปึก” ⟶ “โง่”

การคัดความคิดเห็นที่ไม่เกี่ยวข้องและการทำคำให้เป็นมาตรฐานเชิงความหมาย ผู้วิจัยทำการพิจารณาทุกความคิดเห็น โดยมีผู้ทรงคุณวุฒิด้านภาษาไทยช่วยพิจารณา และมีการใช้พจนานุกรมประกอบ ในขั้นตอนสุดท้ายของการเตรียมข้อมูล ทำให้เหลือความคิดเห็นที่สามารถนำมาใช้งานได้จริงจำนวน 1,767 ความคิดเห็น

1.3 ตัดคำจากความคิดเห็น 1,767 ความคิดเห็น โดยใช้เครื่องมือ Python Library PyThaiNLP ไลบรารีประมวลผลภาษาธรรมชาติของภาษาไทยแบบ Open-Source ซึ่งพัฒนาด้วยภาษา Python (Phatthiyaphaibun et al., 2023) เช่น การกำกับหน้าที่ของคำ (Part-of-Speech Tagging) การแบ่งหน่วยของข้อความตามหลักภาษาศาสตร์ (พยางค์ คำ และประโยค) (Phatthiyaphaibun, 2020) (PyThaiNLP, 2024) ตัดคำด้วยเทคนิคการตัดคำ 4 เทคนิค ได้แก่

เทคนิค Newmm ใช้วิธีการตัดคำแบบพจนานุกรม (Dictionary-based) โดยหลักการใช้ Maximal Matching ภายใต้ขอบเขตของ Thai Character Cluster (TCC) พร้อมกฎ TCC ที่ปรับปรุงแล้ว Newmm มีความเรียบง่ายและประสิทธิภาพการคำนวณ สำหรับงานตัดคำภาษาไทยทั่วไป (PyThaiNLP, 2024)

เทคนิค Deepcut ใช้วิธีการตัดคำแบบเรียนรู้จากข้อมูล (Learning-based Approaches) ใช้แบบเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning) โดยโครงสร้างใช้ Character Embeddings และ Character Type Embeddings เป็นคุณลักษณะนำเข้า ใช้ Convolutional Neural Network (CNN) แบบมิติเดียว พร้อมการจำแนกประเภทไบนารีเพื่อระบุตัวอักษรเริ่มต้นของคำได้อย่างแม่นยำ (Laosen et al., 2024)

เทคนิค Longest ใช้วิธีการตัดคำแบบพจนานุกรม (Dictionary-based) โดยใช้วิธี Longest Matching หลักการคือ ค้นหาขอบเขตคำโดยการเลือก “คำที่ยาวที่สุดเท่าที่เป็นไปได้” จากพจนานุกรมในข้อความนั้น (Phatthiyaphaibun, 2020; PyThaiNLP, 2024)

เทคนิค Attacut ใช้วิธีการตัดคำแบบเรียนรู้จากข้อมูล (Learning-based Approaches) ใช้เครือข่ายประสาทเชิงลึก (Deep Neural Network) ใช้ CNN ในการตัดคำอย่างมีประสิทธิภาพ โดย Syllable Embeddings ร่วมกับ Character Embeddings ทำหน้าที่เป็นคุณลักษณะนำเข้า นอกจากนี้ยังใช้ Dilated CNN Filters เพื่อจับรูปแบบทางภาษาไทยที่ซับซ้อนและละเอียดอ่อน (PyThaiNLP, 2024; Laosen et al., 2024)

2. การคัดเลือกคุณลักษณะและการกำหนดคลาส

2.1 การคัดเลือกคุณลักษณะ

การคัดเลือกคุณลักษณะ ผู้วิจัยใช้วิธีอิงคลังศัพท์ (Lexicon-based Approach) โดยอาศัยพจนานุกรมหรือคลังคำที่มีการกำหนดค่าความรู้สึกไว้ล่วงหน้า เพื่อใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงในการวิเคราะห์ข้อความ (Noonpakdee et al., 2023) ซึ่งวิธีดังกล่าวเป็นวิธีพื้นฐานที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย เนื่องจากสามารถวิเคราะห์ข้อความได้โดยไม่จำเป็นต้องใช้ข้อมูลฝึกสอน ต่างจากวิธีการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning-Based) โดยทำการตรวจสอบคำในประโยคที่มีความหมายเชิงบวกหรือเชิงลบ และนำมาประเมินความรู้สึกโดยรวมของข้อความ (Sadia et al., 2018)

ในขั้นตอนการคัดเลือกคุณลักษณะ ผู้วิจัยเริ่มจากการสร้างถุงคำ (Bag of Word) จากนั้นจึงทำการลดรูปคำให้อยู่ในรูปของรากศัพท์ (Stemming) เนื่องจากผลลัพธ์จากการตัดคำอาจมีความคลาดเคลื่อน เช่น การตัดคำขาดหรือเกิน ส่งผลให้ได้คำที่ไม่ถูกต้อง จึงต้องมีการปรับแก้คำให้ถูกต้อง เช่น คำว่า “คงตกงาน” ⟶ “ตกงาน” “เป็นโลภ” ⟶ “โลภ” “หน้าตกใจ” ⟶ “ตกใจ” เป็นต้น โดยอ้างอิงรากศัพท์จากพจนานุกรม

ต่อมาผู้วิจัยได้ทำการกำหนดประเภทของคำ โดยใช้เครื่องมือ Python Library PyThaiNLP คลังข้อความ Orchid ud และ Pud ประกอบกับพจนานุกรมเพื่อกำหนดประเภทของคำ แล้วเลือกเฉพาะคำที่เป็นประเภทคำคุณศัพท์ คำกริยา คำกริยาวิเศษณ์ มาใช้ในการวิเคราะห์ โดยคำประเภทนี้สามารถสื่อได้ถึงอารมณ์ ความรู้สึก

จากนั้น คำที่ได้จะถูกนำมากำหนดค่าความรู้สึก (Sentiment Scoring) เนื่องจากในปัจจุบันภาษาไทยยังขาดพจนานุกรมความรู้สึก (Sentiment Lexicon) ที่ได้รับการยอมรับเป็นมาตรฐานดั่งเช่นภาษาอังกฤษ (Sadia et al., 2018) ผู้วิจัยจึงได้ทำการพิจารณาคำแต่ละคำ ซึ่งในกรณีที่คำมีความกำกวม ผู้วิจัยได้ใช้ ChatGPT เป็นเครื่องมือช่วยวิเคราะห์ร่วมกับการตรวจสอบโดยผู้ทรงคุณวุฒิด้านภาษาไทย เพื่อพิจารณาความถูกต้อง ทั้งนี้คำที่มีความหมายเชิงบวกจะถูกกำหนดค่าเป็น 1 คำที่มีความหมายเชิงลบกำหนดค่าเป็น -1 และคำที่ไม่สามารถระบุความหมายเชิงบวกหรือลบได้จะกำหนดค่าเป็น 0 และไม่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การคัดเลือกคุณลักษณะจากถุงคำโดยระบุค่าความรู้สึก เชิงบวก และเชิงลบ

คำ	ประเภทคำ	ค่าความรู้สึก
เลวร้าย	คำคุณศัพท์ (ADJ)	-1
ตกงาน	คำกริยา (VERB)	-1
ชอบ	คำกริยา (VERB)	1
ลำบาก	คำกริยาวิเศษณ์ (ADV)	-1
ห้าม	คำกริยา (VERB)	-1

2.2 การกำหนดคลาส เริ่มจากการหาความถี่ โดยการนับจำนวนคำเดียวกันที่พบในความคิดเห็นเดียวกัน และคำนึงถึงค่าความรู้สึก เช่น คำว่า ห้าม มีค่าความรู้สึก เป็น -1 มีการพูดถึง 2 ครั้ง จะได้ค่าความถี่เท่ากับ -2 หรือคำนวณได้จากจำนวนคำที่พบคูณด้วยค่าความรู้สึกของคำ จากนั้นหาผลรวมของคำในแต่ละความคิดเห็น ผลที่ได้จะสามารถแบ่งคลาสออกได้ 3 คลาส คือ กรณีที่ 1 หากผลรวมมีค่าเป็นบวก ความคิดเห็นนั้นจะอยู่ในคลาส P (Positive) กรณีที่ 2 หากผลรวมมีค่าเป็นลบ ความคิดเห็นนั้นจะอยู่ในคลาส N (Negative) และกรณีที่ 3 หากผลรวมมีค่าเป็น 0 ความคิดเห็นนั้นจะอยู่ในคลาส NE ดังตารางที่ 2 และความคิดเห็นที่มีคลาสเป็น NE นั้นจะถูกตัดออกจากชุดข้อมูล ดังรูปที่ 2 จากนั้นทำการตัดคอลัมน์ SUM เพื่อนำข้อมูลไปสร้างแบบจำลองต่อไป

ตารางที่ 2 จำนวนคลาส P (Positive) N (Negative) และ NE

เทคนิคการตัดคำ	P (Positive)	N (Negative)	คลาส NE
Newmm	806	509	231
Deepcut	741	520	219
Longest	814	500	233
Attacut	740	534	207

กลัว	ดี	พักผ่อน	พัฒนา	ยิง	ร้าย	ลบ	ล้าง	สั้ง	หยุด	ห้าม	แย่งงาน	..	..	SUM	CLASS
-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	..	..	0	NE
-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	..	..	1	P
0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	..	..	2	P
0	0	0	0	-1	0	0	0	-1	0	0	0	..	..	-2	N
-1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	..	..	2	P
-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	..	..	-2	N
0	4	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	..	..	3	P
0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	..	..	1	P
0	0	0	2	0	0	0	0	0	-2	0	0	..	..	0	NE
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-2	0	..	..	-1	N

รูปที่ 2 ตัวอย่างข้อมูลความถี่ของคำในการกำหนดคลาส

3. การสร้างแบบจำลอง

การสร้างแบบจำลองเพื่อการจำแนก ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ใช้โปรแกรม Weka เวอร์ชั่น 3.8.6 โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ตามค่าเริ่มต้นของโปรแกรม ดังนี้

3.1 เทคนิคนาอีฟเบย์ (John and Langley, 1995) เป็นเทคนิคการจำแนกตามทฤษฎีของเบย์ส์ โดยใช้สูตรทางคณิตศาสตร์ในการคำนวณความน่าจะเป็นของเหตุการณ์ (Shang, 2024) ข้อดีใช้งานง่าย มีความรวดเร็ว มีประสิทธิภาพดี แม้มีข้อมูลน้อย สามารถวิเคราะห์ข้อมูลที่เป็นเส้นตรงได้ดี รองรับข้อมูลได้ทั้งแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง (Ray, 2019; Mohammadi et al., 2019; Sheth et al., 2022; Iakovidis and Bozzeda, 2025) ข้อจำกัดใช้เวลามากถ้าคุณลักษณะเป็นตัวแปรต่อเนื่อง ใช้หน่วยความจำมากกว่าเทคนิคอื่น ๆ เมื่อมีตัวแปรหลายตัว (Ray, 2019; Mohammadi et al., 2019 Iakovidis and Bozzeda, 2025) ผู้วิจัยไม่ได้ใช้พารามิเตอร์ Kernel Estimator และ Supervised Discretization

3.2 เทคนิคซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน (Chang and Lin, 2011) ใช้สำหรับการจำแนกประเภทข้อมูลออกเป็น 2 Class ด้วยระยะห่างที่มากที่สุด (Maximum Margin) (Aasim et al., 2024) หลักการ คือ การหา Hyperplane เป็นการหาจุดข้อมูลที่อยู่ใกล้กับเส้นแบ่งพรมแดนข้อมูลทั้งสองฝั่ง (Methachaloemphat, 2022) ข้อดีสามารถจัดการฟังก์ชันที่ซับซ้อนได้ หากกำหนด Kernel Function ที่เหมาะสม (Ray, 2019) มีความทนทานต่อปัญหา Overfitting โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่ข้อมูลมีมิติสูง (Aprilianti et al., 2025) สามารถหาขอบเขตการตัดสินใจที่ซับซ้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Prakash and Poulose, 2025) ข้อจำกัด ประสิทธิภาพจะลดลงเมื่อชุดข้อมูลมีขนาดใหญ่มากเพราะใช้เวลาฝึกนาน การหา Kernel Function ที่เหมาะสมทำได้ยาก ทำงานได้ไม่ดีเมื่อข้อมูลมีสัญญาณรบกวนมาก (Noisy Data) (Ray, 2019) ผู้วิจัยได้ใช้พารามิเตอร์ Logistic ใช้ Poly Kernel และ Epsilon = 1.0E-12

3.3 เทคนิคการหาเพื่อนบ้านใกล้ที่สุด (Aha et al., 1991) การกำหนดคลาสของข้อมูลหรือชุดตัวอย่างใหม่จะถูกคาดการณ์ให้อยู่ในคลาสเดียวกันกับเพื่อนบ้านที่ใกล้ที่สุด โดยใช้เทคนิค Monte Carlo สามารถกำหนดพื้นที่ของตัวอย่างใหม่บางอย่างได้โดยไม่ต้องประเมินฟังก์ชันจำแนกเชิงเส้น (LSF) (Khunsuk and Thongkam, 2020; Roudak et al., 2024) ข้อดี เป็นเทคนิคที่เรียบง่ายและเข้าใจง่าย สามารถนำไปใช้งานได้ง่าย สร้างแบบจำลองได้รวดเร็วและไม่ต้องใช้การฝึกแบบจำลองที่ซับซ้อน สามารถรองรับข้อมูลที่มีหลายป้ายกำกับ (Multiple Class Labels) ข้อจำกัด การจำแนกข้อมูลใหม่แต่ละครั้ง ต้องคำนวณระยะทางของ K เพื่อนบ้านที่ใกล้ที่สุดซึ่งใช้เวลามาก เมื่อขนาดของชุดข้อมูลฝึกมีขนาดใหญ่ขึ้น การประมวลผลจะซับซ้อนและใช้เวลามากขึ้น ความแม่นยำจะลดลง (Ray, 2019) ผู้วิจัยได้ใช้พารามิเตอร์ LinearNN Search ในการหาเพื่อนบ้านใกล้ที่สุด

3.4 เทคนิคการเรียนรู้ของต้นไม้ตัดสินใจ ซี 4.5 เป็นเทคนิคที่อิงตามกฎ If-Then เรียนรู้จากการคาดคะเนเหตุการณ์ต่าง ๆ ที่อาจเกิดขึ้น โดยมีการตั้งเงื่อนไขเมื่อเจอเหตุการณ์ต่าง ๆ ให้แสดงผลลัพธ์อย่างไร (Rodríguez et al., 2024) นำเสนอในรูปแบบของโครงสร้างผังต้นไม้ แบ่งชุดข้อมูลออกเป็นส่วนย่อย ๆ สุดท้ายแล้วจะนำไปสู่การพยากรณ์หรือการตัดสินใจที่ (Prakash and Poulose, 2025) ข้อดีใช้ได้ทั้งกับปัญหาการจำแนกและการถดถอย เข้าใจง่ายและตีความได้สะดวก รองรับทั้งข้อมูลเชิงหมวดหมู่และเชิงปริมาณ สามารถจัดการกับค่าที่หายไปได้ โดยแทนค่าด้วยค่าที่มีความน่าจะเป็นมากที่สุด (Ray, 2019) สามารถทำงานได้ดีเมื่อจำนวนคลาสน้อย (Mohammadi et al., 2019) ข้อจำกัดอาจเกิด Overfitting ได้ง่าย (Prakash and Poulose, 2025) อาจไม่เสถียร (Unstable) หากข้อมูลเปลี่ยนเพียงเล็กน้อย ควบคุมขนาดของต้นไม้ได้ยาก (Ray, 2019) ผู้วิจัยได้ใช้พารามิเตอร์การตัดกิ่ง (Pruned) ใช้การแตกกิ่งมากกว่า 2 ทาง ใช้ Collapse Tree ใช้ Subtree Raising และ Confidence Factor = 0.25

4. การวัดประสิทธิภาพของแบบจำลอง

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเทคนิคที่นำมาใช้สร้างแบบจำลอง ว่าทำงานได้ดีมีประสิทธิภาพมากน้อยขนาดไหน ตามเกณฑ์ที่กำหนดไว้ (Naiyjit, 2023) ในงานวิจัยนี้ได้ใช้หลักการ 10-Fold Cross Validation เป็นหลักการที่ใช้ในการแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ชุด คือ ชุดฝึกสอน (Training Set) และชุดทดสอบ (Testing Set) เพื่อประเมิน (Evaluate) ประสิทธิภาพของแบบจำลอง (Soontranon, 2024) โดยแบ่งข้อมูลออกเป็น 10 ส่วนเท่า ๆ กัน ใช้ 9 ส่วนเป็นชุดฝึกสอนที่เหลืออีก 1 ส่วนเป็นชุดทดสอบ ทำซ้ำการฝึกสอนและทดสอบแบบจำลองทั้งหมด 10 ครั้ง โดยสลับใช้ส่วนของข้อมูลที่แตกต่างกันในการทดสอบแต่ละครั้ง เพื่อให้ทำให้ทุกส่วนของข้อมูลได้ถูกใช้เป็นทั้งข้อมูลฝึกสอนและข้อมูลทดสอบ (Malakouti et al., 2023) จากนั้นทำการหาค่าเฉลี่ยของค่าความถูกต้อง ค่าความแม่นยำ ค่าความระลึก และค่าคะแนนเอฟ 1 เพื่อแสดงประสิทธิภาพแบบจำลอง

ค่าความถูกต้อง คือ ค่าที่แบบจำลองสามารถจำแนกความคิดเห็นเชิงบวกและเชิงลบได้ถูกต้องต่อจำนวนความคิดเห็นทั้งหมด ดังสมการที่ (1)

$$Accuracy = \frac{TN + TP}{TP + FP + TN + FN} \quad (1)$$

ค่าความแม่นยำ คือ ค่าที่แบบจำลองสามารถจำแนกความคิดเห็นเชิงบวกได้ถูกต้อง ต่อผลรวมของค่าที่แบบจำลองสามารถจำแนกความคิดเห็นเชิงบวกได้ถูกต้องกับค่าที่แบบจำลองสามารถจำแนกความคิดเห็นเชิงบวกได้

ไม่ถูกต้อง ดังสมการที่ (2)

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} \quad (2)$$

ค่าความระลึก คือ ค่าที่แบบจำลองสามารถจำแนกความคิดเห็นเชิงบวกได้ถูกต้อง ต่อผลรวมของค่าที่แบบจำลองสามารถจำแนกความคิดเห็นเชิงบวกได้ถูกต้องกับค่าที่แบบจำลองสามารถจำแนกความคิดเห็นเชิงลบได้ไม่ถูกต้อง ดังสมการที่ (3)

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN} \quad (3)$$

ค่าคะแนนเอฟ 1 คือ ค่าความสมดุลระหว่างความแม่นยำและค่าความระลึก ดังสมการที่ (4)

$$F1 - Score = 2 \times \frac{Precision \times Recall}{Precision + Recall} \quad (4)$$

โดยที่

True Positive (TP) คือ ค่าที่แบบจำลองสามารถจำแนกความคิดเห็นเชิงบวกได้ถูกต้อง
True Negative (TN) คือ ค่าที่แบบจำลองสามารถจำแนกความคิดเห็นเชิงลบได้ถูกต้อง
False Positive (FP) คือ ค่าที่แบบจำลองสามารถจำแนกความคิดเห็นเชิงบวกได้ไม่ถูกต้อง
False Negative (FN) คือ ค่าที่แบบจำลองสามารถจำแนกความคิดเห็นเชิงลบได้ไม่ถูกต้อง

ผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อค้นหาเทคนิคการตัดคำเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของแบบจำลอง การจำแนกความคิดเห็นของคนไทยต่อปัญญาประดิษฐ์ โดยวิเคราะห์เทคนิคการตัดคำ ใน Python Library PyThaiNLP จำนวน 4 เทคนิค ได้แก่ เทคนิค Newmm เทคนิค Deepcut เทคนิค Longest และเทคนิค Attacut เก็บรวบรวมข้อมูลความคิดเห็นของคนไทยต่อปัญญาประดิษฐ์จากสื่อสังคมออนไลน์ได้ข้อมูลทั้งหมด 1,767 ความคิดเห็น จากการทดลองสามารถวัดประสิทธิภาพของแบบจำลอง ด้วยค่าความถูกต้อง ค่าความแม่นยำ ค่าความระลึก และค่าคะแนนเอฟ 1 ดังตารางที่ 3 - 6

ตารางที่ 3 ค่าความถูกต้อง ของแบบจำลอง

เทคนิคการจำแนก	เทคนิคการตัดคำ			
	Newmm	Deepcut	Longest	Attacut
NB	83.73	86.36	82.88	84.54
SVM	90.49	93.42	91.10	92.46
KNN	81.75	83.43	81.66	83.20
DT C4.5	71.33	72.16	70.78	71.90

จากตารางที่ 3 แสดงค่าความถูกต้องในการจำแนกของแบบจำลองที่สร้างโดยเทคนิค NB SVM KNN และ DT C4.5 ที่ใช้การตัดคำด้วยเทคนิค Newmm Deepcut Longest และ Attacut พบว่าการสร้างแบบจำลองเพื่อการจำแนกด้วยเทคนิค SVM ให้ค่าความถูกต้องสูงสุด เมื่อใช้เทคนิค Deepcut ในการตัดคำที่ร้อยละ 93.42 รองลงมาเทคนิค Attacut ในการตัดคำให้ค่าความถูกต้องร้อยละ 92.46 เทคนิค Longest ให้ค่าความถูกต้องร้อยละ 91.1 และเทคนิค Newmm ให้ค่าความถูกต้องร้อยละ 90.49 ตามลำดับ แต่เทคนิค Longest ให้ค่าความถูกต้องน้อยที่สุดเมื่อสร้างแบบจำลองเพื่อการจำแนกด้วยเทคนิค DT C4.5 ต่ำที่สุดร้อยละ 70.78

ตารางที่ 4 ค่าความแม่นยำของแบบจำลอง

เทคนิคการจำแนก	เทคนิคการตัดคำ			
	Newmm	Deepcut	Longest	Attacut
NB	82.56	92.02	79.32	87.66
SVM	92.67	92.18	94.23	91.18
KNN	74.59	87.36	75.05	86.94
DT C4.5	71.43	78.85	69.86	71.90

จากตารางที่ 4 แสดงค่าความแม่นยำในการจำแนกของแบบจำลองที่สร้างโดยเทคนิค NB SVM KNN และ DT C4.5 ที่ใช้การตัดคำด้วยเทคนิค Newmm Deepcut Longest และ Attacut พบว่าการสร้างแบบจำลองเพื่อการจำแนกด้วยเทคนิค SVM ให้ค่าความแม่นยำสูงสุด เมื่อใช้เทคนิค Longest ในการตัดคำที่ร้อยละ 94.23 รองลงมาเทคนิค Newmm ในการตัดคำให้ค่าความแม่นยำร้อยละ 92.67 เทคนิค Deepcut ให้ค่าความแม่นยำร้อยละ 92.18 และเทคนิค Attacut ให้ค่าความแม่นยำร้อยละ 91.18 ตามลำดับ แต่เทคนิค Longest ให้ค่าความแม่นยำน้อยที่สุดเมื่อสร้างแบบจำลองเพื่อการจำแนกด้วยเทคนิค DT C4.5 ต่ำที่สุดร้อยละ 69.86

ตารางที่ 5 ค่าความระลึกของแบบจำลอง

เทคนิคการจำแนก	เทคนิคการตัดคำ			
	Newmm	Deepcut	Longest	Attacut
NB	73.48	84.08	74.40	85.41
SVM	81.93	97.03	81.60	96.35
KNN	80.16	83.94	77.60	83.65
DT C4.5	43.22	71.93	40.80	84.73

จากตารางที่ 5 แสดงค่าความระลึกในการจำแนกของแบบจำลองที่สร้างโดยเทคนิค NB SVM KNN และ DT C4.5 ที่ใช้การตัดคำด้วยเทคนิค Newmm Deepcut Longest และ Attacut พบว่าการสร้างแบบจำลองเพื่อการจำแนกด้วยเทคนิค SVM ให้ค่าความระลึกสูงสุด เมื่อใช้เทคนิค Deepcut ในการตัดคำที่ร้อยละ 97.03 รองลงมาเทคนิค Attacut ในการตัดคำให้ค่าความระลึกร้อยละ 96.35 เทคนิค Newmm ให้ค่าความระลึกร้อยละ 81.93 และเทคนิค Longes ให้ค่าความระลึกร้อยละ 81.6 ตามลำดับ แต่เทคนิค Longest ให้ค่าความระลึกน้อยที่สุดเมื่อสร้างแบบจำลองเพื่อการจำแนกด้วยเทคนิค DT C4.5 ต่ำที่สุดร้อยละ 40.8

ตารางที่ 6 ค่าคะแนนเอฟ 1 ของแบบจำลอง

เทคนิคการจำแนก	เทคนิคการตัดคำ			
	Newmm	Deepcut	Longest	Attacut
NB	77.75	87.87	76.78	86.52
SVM	86.97	94.54	87.46	93.69
KNN	77.27	85.62	76.30	85.26
DT C4.5	53.86	75.23	51.52	77.79

จากตารางที่ 6 แสดงค่าคะแนนเอฟ 1 ในการจำแนกของแบบจำลองที่สร้างโดยเทคนิค NB SVM KNN และ DT C4.5 ที่ใช้การตัดคำด้วยเทคนิค Newmm Deepcut Longest และ Attacut พบว่าการสร้างแบบจำลองเพื่อการจำแนก

ด้วยเทคนิค SVM ให้ค่าคะแนนเอฟ 1 สูงสุด เมื่อใช้เทคนิค Deepcut ในการตัดคำที่ร้อยละ 94.54 รองลงมาเทคนิค Attacut ในการตัดคำให้ค่าคะแนนเอฟ 1 ร้อยละ 93.69 เทคนิค Longest ให้ค่าคะแนนเอฟ 1 ร้อยละ 87.46 และเทคนิค Newmm ให้ค่าคะแนนเอฟ 1 ร้อยละ 86.97 ตามลำดับ แต่เทคนิค Longest ให้ค่าคะแนนเอฟ 1 น้อยที่สุด เมื่อ สร้างแบบจำลองเพื่อการจำแนกด้วยเทคนิค DT C4.5 ต่ำที่สุดร้อยละ 51.52

การอภิปรายผล

จากผลการวิจัยพบว่า การตัดคำด้วยเทคนิค Deepcut ซึ่งเป็นวิธีการตัดคำแบบเรียนรู้จากข้อมูล สามารถจัดการความคิดเห็นที่มีคำใหม่หรือคำไม่เป็นทางการได้ดี เมื่อนำมาสร้างแบบจำลองด้วยเทคนิคซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน ซึ่งสามารถจัดการข้อมูลที่มีมิติสูงและความคิดเห็นที่ซับซ้อนได้ดี ทั้งคำที่เป็นทางการ คำไม่เป็นทางการ และศัพท์ใหม่ ส่งผลให้การใช้เทคนิคดังกล่าวร่วมกันทำให้ได้ผลการทดลองที่ดีที่สุด โดยให้ค่าความถูกต้องที่ร้อยละ 93.42 ค่าความระลึกที่ร้อยละ 97.03 และค่าคะแนนเอฟ 1 สูงสุดที่ร้อยละ 94.54 ซึ่งคล้ายกับงานวิจัยของ Soisoonthorn et al. (2023) ที่ตัดคำด้วยเทคนิค Deepcut โดยให้ผลลัพธ์ที่สูงกว่าเทคนิค Newmm และเทคนิค Longest คล้ายกับงานวิจัยของ Seeha et al. (2020) ที่ตัดคำด้วยเทคนิค Deepcut โดยให้ผลลัพธ์ที่สูงกว่าเทคนิค Newmm และเทคนิค Attacut ต่างจากงานวิจัยของ Damrongkamoltip et al. (2024) และต่างจากงานวิจัยของ Laosen et al. (2024) ที่ตัดคำด้วยเทคนิค Attacut โดยให้ผลลัพธ์ที่สูงกว่าเทคนิค Deepcut และเทคนิค Newmm

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อค้นหาเทคนิคการตัดคำเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของแบบจำลอง การจำแนกความคิดเห็นของคนไทยต่อปัญญาประดิษฐ์ จากข้อมูลความคิดเห็นของคนไทยต่อปัญญาประดิษฐ์จากสื่อสังคมออนไลน์จำนวน 8,091 ความคิดเห็น จากนั้นทำความสะอาดข้อมูลจนเหลือ 1,767 ความคิดเห็น ทำการตัดคำด้วยเทคนิค Newmm เทคนิค Deepcut เทคนิค Longest และเทคนิค Attacut คัดเลือกคุณลักษณะคำที่ได้จากกระบวนการตัดคำ โดยการกำหนดประเภทของคำ และคัดเลือกเฉพาะคำประเภท คำคุณศัพท์ คำกริยา คำกริยาวิเศษณ์ กำหนดค่าความรู้สึกของคำ และคัดเลือกคำที่มีค่าความรู้สึกเชิงบวกและเชิงลบ จากนั้นทำการกำหนดคลาส จากการหาความถี่ของคำเดียวกันที่พบในความคิดเห็นเดียวกัน ทำให้สามารถแบ่งคลาสได้ 3 คลาส โดยเลือกใช้ความคิดเห็นที่อยู่ในคลาส P (Positive) และความคิดเห็นที่อยู่ในคลาส N (Negative) นำมาสร้างแบบจำลอง วัดประสิทธิภาพในการตัดคำใช้ 4 เทคนิค คือ เทคนิคนาอีฟเบย์ เทคนิคซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน เทคนิคการหาเพื่อนบ้านใกล้ที่สุด และเทคนิคการเรียนรู้ของต้นไม้ตัดสินใจ ซี 4.5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของเทคนิคที่นำมาใช้สร้างแบบจำลอง ด้วยหลักการ 10-Fold Cross Validation วัดค่าความถูกต้อง ค่าความแม่นยำ ค่าความระลึก และค่าคะแนนเอฟ 1 ผลการวิจัยพบว่า

1. การตัดคำด้วยเทคนิค Deepcut ให้ผลที่ดีที่สุดในการจำแนกความคิดเห็น โดยให้ค่าความถูกต้องที่ร้อยละ 93.42 ค่าความระลึกที่ร้อยละ 97.03 และค่าคะแนนเอฟ 1 สูงสุดที่ร้อยละ 94.54
2. การตัดคำด้วยเทคนิค Longest ให้ผลที่ต่ำที่สุดในการจำแนกความคิดเห็น โดยให้ค่าความถูกต้องที่ร้อยละ 70.78 ค่าความแม่นยำที่ร้อยละ 69.86 ค่าความระลึกที่ร้อยละ 40.8 และค่าคะแนนเอฟ 1 ที่ร้อยละ 51.52
3. การสร้างแบบจำลองเพื่อการจำแนกด้วยเทคนิคซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน ให้ผลที่ดีที่สุดในการจำแนกความคิดเห็น โดยให้ค่าความถูกต้องที่ร้อยละ 93.42 ค่าความระลึกที่ร้อยละ 97.03 และค่าคะแนนเอฟ 1 ที่ร้อยละ 94.54
4. การสร้างแบบจำลองเพื่อการจำแนกด้วยเทคนิคการเรียนรู้ของต้นไม้ตัดสินใจ ซี 4.5 ให้ผลที่ต่ำที่สุดในการจำแนกความคิดเห็น โดยให้ค่าความถูกต้องที่ร้อยละ 70.78 ค่าความแม่นยำที่ร้อยละ 69.86 ค่าความระลึกที่ร้อยละ 40.8 และค่าคะแนนเอฟ 1 ที่ร้อยละ 51.52

ข้อเสนอแนะ

จากผลการวิจัยในครั้งนี้ พบว่าการตัดคำด้วยเทคนิค Deepcut ยังไม่สามารถตัดคำภาษาไทยได้ถูกต้องทั้งหมด เนื่องจากภาษาไทยไม่มีการแบ่งวรรค และภาษาไทยมีการใช้คำประสมเป็นการรวมกันของหลายคำหรือหลายพยางค์ ทำให้การตัดคำให้ถูกต้องทั้งหมดเป็นไปได้ยาก ดังนั้น งานวิจัยในอนาคต ควรพิจารณาการนำเทคนิคการตัดคำแบบอื่น ๆ ที่ทันสมัยมาประยุกต์ใช้และวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการตัดคำในเชิงลึก โดยมีการเปรียบเทียบเพิ่มเติม เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดียิ่งขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณข้อมูลความคิดเห็นของประชาชนคนไทยที่แสดงความคิดเห็นต่อปัญญาประดิษฐ์บนสื่อสังคมออนไลน์ YouTube Facebook TikTok และ Pantip

References

Aasim, M., Katırcı, R., Acar, A.Ş. and Ali, S.A. (2024). A Comparative and Practical Approach Using Quantum Machine Learning (QML) and Support Vector Classifier (SVC) for Light Emitting Diodes Mediated In Vitro Micropropagation of Black Mulberry (*Morus nigra* L.). *Industrial Crops and Products*, 213. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.118397

Aha, D.W., Kibler, D. and Albert, M.K. (1991). Instance-Based Learning Algorithms. *Machine Learning*, 6, 37-66. https://doi.org/10.1007/BF00153759

Aprilianti, H., Mustofa, H., Umam, K. and Handayani, M.R. (2025). Comparative Study of SVM, KNN, and Naïve Bayes for Sentiment Analysis of Religious Application Reviews. *Journal of Applied Informatics and Computing*, 9(3), 920-927. https://jurnal.polibatam.ac.id/index.php/JAIC/article/view/9482

Bowornlertsutee, P. and Paireekreng, W. (2022). Sentiment Analysis Techniques of Online Product Reviews. *Recent Science and Technology*, 14(3), 755-769. https://li01.tci-thaijo.org/index.php/rmutsvrj/article/view/245470

Chang, C.C. and Lin, C.J. (2011). LIBSVM: A Library for Support Vector Machines. *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology*, 2(3), 1-27. https://doi.org/10.1145/1961189.1961199

Chantanapelin, S., Keatchalermkun, S., Srivichai, M. and Srichai, P. (2024). Marketing Strategies for Developing and Managing Tourist Attractions Post-Covid 19 Pandemic: a Market Research Review Through Sentiment Analysis of Online Media Via Chat GPT Mechanism Case Study: Chiang Rai Night Bazaar Tourism Market. *Journal of Management and Marketing*, 11(2), 24-39. https://so05.tci-thaijo.org/index.php/mmr/article/view/269115

Charmanas, K., Georgiou, K., Papageorgiadis, K., Mittas, N. and Angelis, L. (2026). A Topic-Oriented Trend Analysis Framework for Stack Exchange Questions: Case Study on ChatGPT Related Queries on Stack Overflow. *Information and Software Technology*, 190. https://doi.org/10.1016/j.infsof.2025.107969

Damrongkamoltip, K., Ruenlek, K., Limprasert, W. and Boonkwan, P. (2024). Comparing a Thai Words Segmentation Methods in the LST20 Dataset. *Journal of Computer and Creative Technology*, 2(2), 61-70. https://so13.tci-thaijo.org/index.php/jcct/article/view/679

Demir, N.Y. and Egbert, J. (2026). Register Alignment of ChatGPT-Generated Academic Texts. *Applied Corpus Linguistics*, 6(1). https://doi.org/10.1016/j.acorp.2025.100174

Duangtham, S., Lertritrungrot, S., Hongboonmee, N. and Massagram, W. (2025). Leveraging PyThaiNLP for Sentiment Analysis of Thai Online Text: A Comparative Study of Logistic Regression and Support Vector Machine. *Journal of Applied Informatics and Technology*, 7(2), 268-282. https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/jait/article/view/256625

Handayani, H., Novita, R., Permana, I. and Megawati. (2024). Sentiment Analysis of X Users on Iconnet Service Provider Using Naïve Bayes and Support Vector Machine. *Proceedings of the 2024 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Mechatronics Systems (AIMS)*, 1-6. https://doi.org/10.1109/AIMS61812.2024.10512562

Iakovidis, I. and Bozzeda, F. (2025). Applications of Machine Learning Algorithms to a Sandy Beaches Ecological Database: an Empirical and Critical Comparison. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 326. https://doi.org/10.1016/j.ecss.2025.109539

John, G.H. and Langley, P. (1995). Estimating Continuous Distributions in Bayesian Classifiers. In P. Besnard & S. Hanks (Eds.), *Proceedings of the Eleventh Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence* (pp. 338-345). Morgan Kaufmann.

Kaya, A. and Yildiz, G.N. (2026). The Evolution of Publications on Applications of Artificial Intelligence to Nursing Care: A Bibliometric and Visual Mapping Approach. *Nursing Outlook*, 74(1). https://doi.org/10.1016/j.outlook.2025.102609

Khunsuk, T. and Thongkam, J. (2020). Feature Selection Method for Improving Customer Reviews Classification. *RMUTI JOURNAL Science and Technology*, 13(1), 129-143. https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/rmutijo/article/view/188091

Laosen, N., Laosen, K. and Paklao, T. (2024). Named Entity Recognition for Thai Historical Data. In *2024 21st International Joint Conference on Computer Science and Software Engineering (JCSSE)* (pp. 528-533). IEEE. https://doi.org/10.1109/JCSSE61278.2024.10613644

Laowsungsuk, P., Jinda, A. and Sitthisarn, S. (2017). Sentiment Analysis of Restaurant Reviews on Review Web Sites. *Thaksin University Journal*, 20(1), 39-47. https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/tsujournal/article/view/90081

Maisook, P. and Thongkam, J. (2025). Classifying Thai Social Media Opinions in the Covid Vaccine Using Text Mining. *Journal of Science and Technology Buriram Rajabhat University*, 9(1), 17-30. https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/scibru/article/view/256167

Malakouti, S.M., Menhaj, M.B. and Suratgar, A.A. (2023). The Usage of 10-Fold Cross-Validation and Grid Search to Enhance ML Methods Performance in Solar Farm Power Generation Prediction. *Cleaner Engineering and Technology*, 15. https://doi.org/10.1016/j.clet.2023.100664

Manhem, M., Dolah, S., Chunkaew, S. and Mak-on, S. (2020). Model for the Classification of Feelings of Reviews Using Techniques Decision Trees Case Studies Hotel Reservation Web Site. *Journal of Science and Technology, Songkhla Rajabhat University*, 1(2), 69-79. https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/SciAndTechSkru/article/view/244056

Md Suhaimin, M.S., Ahmad Hijazi, M.H., Moung, E.G., Nohuddin, P.N.E., Chua, S. and Coenen, F. (2023). Social Media Sentiment Analysis and Opinion Mining in Public Security: Taxonomy, Trend Analysis, Issues and Future Directions. *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, 35(9). https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2023.101776

Methachaloemphat, R. (2022, 19 August). *Applying Machine Learning to Industrial Applications (Part 1)*. https://www.nectec.or.th/news/news-public-document/machine-learning-manufact-1.html

Mohammadi, M., Dawodi, M., Wada, T. and Ahmadi, N. (2019). Comparative Study of Supervised Learning Algorithms for Student Performance Prediction. In *2019 International Conference on Artificial Intelligence in Information and Communication (ICAIIC)* (pp. 124-127). IEEE. https://doi.org/10.1109/ICAIIC.2019.8669085

Naiyjit, K. (2023, 9 March). *Evaluation Metrics for Deep Learning Models*. Kittimasak. https://kittimasak.com/evaluation-metrics-deep-learning/

Noonpakdee, W., Oranop na Ayutthaya, C. and Yuwakosol, S. (2023). Lexicon Construction for Sentiment Analysis in Media Quality Rating. *Journal of Roi Kaensarn Academi*, 8(5), 512-526. https://so02.tci-thaijo.org/index.php/JRKSA/article/view/261233

Phaewattanakul, K. and Luenam, P. (2014). Opinion Mining from Online Social Networks. *Modern Management Frontier Journal*, 11(2), 11-20. https://so04.tci-thaijo.org/index.php/stou-sms-pr/article/view/16934

Phatthiyaphaibun, W., Chaovavanich, K., Polpanumas, C., Suriyawongkul, A., Lowphansirikul, L. and Chormai, P. (2020, 17 July). *PyThaiNLP*. Github. https://github.com/PyThaiNLP/pythainlp/blob/dev/README_TH.md

Phatthiyaphaibun, W., Chaovavanich, K., Polpanumas, C., Suriyawongkul, A., Lowphansirikul, L., Chormai, P., Limkonchotiwat, P., Suntorntip, T. and Udomcharoenchaikit, C. (2023). PyThaiNLP: Thai natural language processing in Python. In *Proceedings of the 3rd Workshop for Natural Language Processing Open Source Software (NLP-OSS 2023)* (pp. 25-36). Association for Computational Linguistics. https://doi.org/10.18653/v1/2023.nlposs-1.4

Prakash, A. and Poulose, A. (2025). Electroencephalogram-Based Emotion Recognition: a Comparative Analysis of Supervised Machine Learning Algorithms. *Data Science and Management*, 8(3), 342-360. https://doi.org/10.1016/j.dsm.2024.12.004

PyThaiNLP. (2024, 16 May). *Pythainlp Tokenize*. Pythainlp. https://pythainlp.org/docs/5.0/api/tokenize.html

Ray, S. (2019). A Quick Review of Machine Learning Algorithms. In *2019 International Conference on Machine Learning, Big Data, Cloud and Parallel Computing (COMITCon)* (pp. 35-39). IEEE. https://doi.org/10.1109/COMITCon.2019.8862451

Rodríguez, D.M., Cuéllar, M.P. and Morales, D.P. (2024). On the Fusion of Soft-Decision-Trees and Concept-Based Models. *Applied Soft Computing*, 160. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2024.111632

Roudak, M.A., Farahani, M. and Hosseinbeigi, F.B. (2024). Extension of K-Nearest Neighbors and Introduction of an Applicable Prediction Criterion for a Novel Monte Carlo Simulation-Based Method in Structural Reliability. *Structures*, 66. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.106867

Sadia, A., Khan, F. and Bashir, F. (2018). An Overview of Lexicon-Based Approach For Sentiment Analysis. In *2018 3rd International Electrical Engineering Conference (IEEC 2018)*. https://ieec.neduet.edu.pk/2018/Papers_2018/15.pdf

Sancoko, S.D., Diwandari, S. and Fachrie, M. (2022). Ensemble Learning for Sentiment Analysis on Twitter Data Related to Covid-19 Preventions. In *Proceedings of the 2022 International Conference on Information Technology Research and Innovation (ICITRI)* (pp. 89-94). IEEE. https://doi.org/10.1109/ICITRI56423.2022.9970234

Seeha, S., Bilan, I., Mamani Sanchez, L., Huber, J., Matuschek, M. and Schütze, H. (2020). ThaiLMCut: Unsupervised Pretraining for Thai Word Segmentation. In *Proceedings of the Twelfth Language Resources and Evaluation Conference*, (pp. 6947-6957). European Language Resources Associationhttps://aclanthology.org/2020.lrec-1.858/

Shang, Y. (2024). Prevention and Detection of DDOS Attack in Virtual Cloud Computing Environment Using Naive Bayes Algorithm of Machine Learning. *Measurement: Sensors*, 31. https://doi.org/10.1016/j.measen.2023.100991

Sheth, V., Tripathi, U. and Sharma, A. (2022). A Comparative Analysis of Machine Learning Algorithms for Classification Purpose. *Procedia Computer Science*, 215, 422-431. https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.12.044

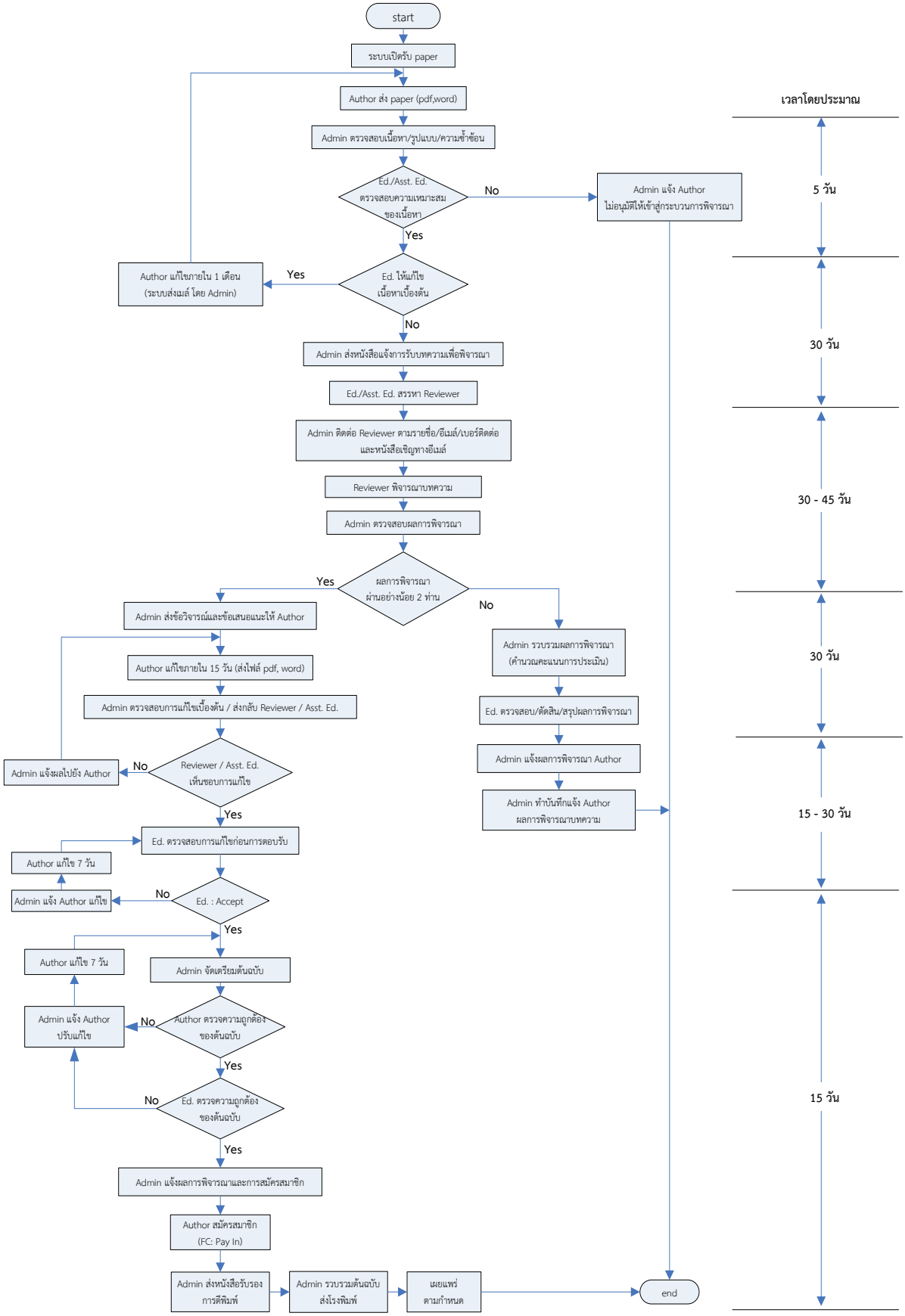
Soisoonthorn, T., Unger, H. and Maliyaem, M. (2023). Thai Word Segmentation with a Brain-Inspired Sparse Distributed Representations Learning Memory. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2023. https://doi.org/10.1155/2023/8592214

Soontranon, N. (2024, 24 April). *K-Fold Cross Validation*. Nerd. https://www.nerd-data.com/k-folds-cross-validation/

Turmuzi, M., Azmi, S. and Kertiyani, N.M.I. (2026). ChatGPT in School Mathematics Education: A Systematic Review of Opportunities, Challenges, and Pedagogical Implications. *Teaching and Teacher Education*, 170. https://doi.org/10.1016/j.tate.2025.105286



RMUTI Journal


start
ระบบเปิดรับ paper
Author ส่ง paper (pdf,word)
Admin ตรวจสอบเนื้อหา/รูปแบบ/ความซ้ำซ้อน
Ed./Asst. Ed. ตรวจสอบความเหมาะสมของเนื้อหา
No
Admin แจ้ง Author ไม่อนุมัติให้เข้าสู่กระบวนการพิจารณา
Yes
Ed. ให้แก้ไขเนื้อหาเบื้องต้น
Yes
Author แก้ไขภายใน 1 เดือน (ระบบส่งเมล์ โดย Admin)
No
Admin ส่งหนังสือแจ้งการรับบทความเพื่อพิจารณา
Ed./Asst. Ed. สรรหา Reviewer
Admin ติดต่อ Reviewer ตามรายชื่อ/อีเมล์/เบอร์ติดต่อ และหนังสือเชิญทางอีเมล์
Reviewer พิจารณาบทความ
Admin ตรวจสอบผลการพิจารณา
ผลการพิจารณาผ่านอย่างน้อย 2 ท่าน
Yes
No
Admin ส่งข้อวิจารณ์และข้อเสนอแนะให้ Author
Admin รวบรวมผลการพิจารณา (คำนวณคะแนนการประเมิน)
Author แก้ไขภายใน 15 วัน (ส่งไฟล์ pdf, word)
Ed. ตรวจสอบ/ตัดสิน/สรุปผลการพิจารณา
Admin ตรวจสอบการแก้ไขเบื้องต้น / ส่งกลับ Reviewer / Asst. Ed.
Admin แจ้งผลการพิจารณา Author
Admin แจ้งผลไปยัง Author
No
Reviewer / Asst. Ed. เห็นชอบการแก้ไข
Admin ทำบันทึกแจ้ง Author ผลการพิจารณาบทความ
Yes
Ed. ตรวจสอบการแก้ไขก่อนการตอบรับ
Author แก้ไข 7 วัน
Admin แจ้ง Author แก้ไข
No
Ed. : Accept
Yes
Author แก้ไข 7 วัน
Admin จัดเตรียมต้นฉบับ
Admin แจ้ง Author ปรับแก้ไข
No
Author ตรวจความถูกต้องของต้นฉบับ
Yes
No
Ed. ตรวจความถูกต้องของต้นฉบับ
Yes
Admin แจ้งผลการพิจารณาและการสมัครสมาชิก
Author สมัครสมาชิก (FC: Pay In)
Admin ส่งหนังสือรับรองการตีพิมพ์
Admin รวบรวมต้นฉบับส่งโรงพิมพ์
เผยแพร่ตามกำหนด
end
เวลาโดยประมาณ
5 วัน
30 วัน
30 - 45 วัน
30 วัน
15 - 30 วัน
15 วัน

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

1. ประเภทของบทความที่ตีพิมพ์

1.1 บทความวิจัย (Research article) เป็นบทความที่ได้จากงานวิจัย

1.2 บทความวิชาการ (Academic article) เป็นบทความที่มีลักษณะดังนี้

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

2. รูปแบบการพิมพ์บทความ

การตั้งค่าหน้ากระดาษ

- **ระยะขอบ**

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

  ขอบขวา (Right Margin) 2.5 ซม. ขอบซ้าย (Left Margin) 2.5 ซม.
- **ระยะห่างบรรทัด** 1 เท่า
- **รูปแบบตัวอักษร** 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 ชิดซ้ายหน้ากระดาษไว้ด้านล่างรูปภาพ ตามด้วยคำอธิบายชื่อรูปที่เป็นตัวอักษรขนาด 15 ตัวปกติ

3. ส่วนประกอบของบทความแต่ละประเภท

3.1 บทความวิจัย จะประกอบไปด้วย

ก. ส่วนปก

1. ชื่อบทความ (Title) ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ควรสั้นกระทัดรัด ไม่ยาวเกินไป และสื่อความหมายของเรื่องที่ทำได้อย่างชัดเจน บทความภาษาไทยชื่อเรื่องต้องมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ บทความภาษาอังกฤษชื่อเรื่องไม่ต้องมีภาษาไทย

2. ชื่อผู้เขียน (Authors) ชื่อเต็ม - นามสกุลเต็ม ของผู้เขียนทุกคน โดยให้รายละเอียดต้นสังกัดของผู้เขียนไว้ที่บรรทัดล่างสุดของหน้าแรก พร้อมทั้งระบุชื่อผู้เขียนประสานงาน (Corresponding Author) ด้วยการระบุเบอร์โทรศัพท์ และ E-mail Address ที่สามารถติดต่อได้ และให้ใส่เครื่องหมายดอกจันทร์ตัวยกกำกับไว้ต่อท้ายนามสกุล 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 <u>ความยาวของบทคัดย่อภาษาอังกฤษ กำหนดให้มีความยาวได้ไม่เกิน 300 คำ</u> และไม่มีการใส่เอกสารอ้างอิงในบทคัดย่อ

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

****หมายเหตุ :<u>เนื้อหาส่วนปกจะต้องเขียนให้อยู่ในกระดาษจำนวน 1 หน้า เท่านั้น</u>**

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/หรือตารางประกอบการอธิบายผลในตารางและรูปภาพต้องไม่ซ้ำซ้อนกัน รูปภาพและตารางของบทความที่เป็นภาษาไทยให้บรรยายเป็นภาษาไทย รูปภาพและตารางของบทความที่เป็นภาษาอังกฤษ ให้บรรยายเป็นภาษาอังกฤษ

4. การอภิปรายผล (Discussion) เป็นการอภิปรายผลการวิจัย เพื่อให้ผู้อ่านมีความเห็นคล้อยตามเพื่อเปรียบเทียบกับผลการวิจัยของผู้อื่น พร้อมทั้งเสนอแนวทางที่จะนำไปใช้ประโยชน์ผลการวิจัยและการอภิปรายผล (Results and Discussion) อาจนำมาเขียนตอนเดียวกันได้

5. บทสรุป (Conclusion) สรุปประเด็น และสาระสำคัญของการวิจัย เป็นเนื้อหาที่ไม่ซ้ำกับบทคัดย่อ อาจมีข้อเสนอแนะหรือการนำผลวิจัยไปใช้ประโยชน์

6. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgements) เพื่อแสดงความขอบคุณแก่ผู้ให้ความช่วยเหลือในการวิจัย และได้รับการสนับสนุนทุนวิจัย อาจมีหรือไม่มีก็ได้

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

ชื่อผู้แต่./(ปีที่พิมพ์)./*ชื่อหนังสือ*/(พิมพ์ครั้งที่)./สำนักพิมพ์.

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

ชื่อผู้แต่./(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* (4^{th}ed). Englewood Cliffs, Prentice Hall, Inc., New Jersey.

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

Jacobeer, 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./(ปีพิมพ์)./*ชื่อหนังสือ*/(พิมพ์ครั้งที่)./https://doi.org/xxxxxxxx

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

ตัวอย่างเช่น

Starke, J.R. (2011). Tuberculosis: Mycobacterium tuberculosis. In R.M. Khegman, 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 (ให้นามสกุลขึ้นก่อน ตามด้วยตัวอักษรย่อตัวแรกของชื่อตัว ชื่อกลาง ตามลำดับ)./(ปีที่พิมพ์)./ชื่อบทความ./*ชื่อวารสาร (ให้ใช้ชื่อเต็ม)*,/ปีที่(ฉบับที่),/หน้าแรก-หน้าสุดท้าย.

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

ชื่อผู้แต่ง (ให้นามสกุลขึ้นก่อน 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., Wongsa, 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:/ชื่อเรื่องย่อย./*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) ชื่อรูปภาพ**ห้าม**ขึ้นต้นด้วยคำว่า “แสดง”

2) รูปภาพ ให้ระบุลำดับที่ของรูปโดยใช้คำว่า “รูปที่...” และต้องมีคำอธิบายใส่ไว้ใต้รูปและอยู่ในเนื้อหาบทความเรียงลำดับรูปภาพในการอ้างถึง เช่น รูปที่ 1 รูปที่ 1-3

3) จัดรูปภาพไว้กึ่งกลางหน้ากระดาษใกล้ตำแหน่งที่มีการระบุถึงรูปภาพ และคำอธิบายจัดชิดซ้ายหน้ากระดาษ ดังรูปที่ 1

4) ไฟล์ของรูปภาพต้องเป็นไฟล์ที่มีนามสกุล .jpg, .png, .tiff หรือ .eps เท่านั้น ความละเอียดไม่ต่ำกว่า 300 dpi

5) ลายเส้นที่ปรากฏบนรูปภาพต้องมีความคมชัด กรณีที่เป็นรูปกราฟ 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 เพื่อให้สามารถเข้าใจได้เมื่อมีการจัดพิมพ์แบบขาว - ดำ

9) ขนาดของรูปต้องไม่ใหญ่เกินกว่าความกว้างของหน้ากระดาษที่กำหนดไว้

10) หากเป็นการคัดลอกรูปภาพมาจากที่อื่น ผู้เขียนควรมีการอ้างอิงแหล่งที่มาให้ถูกต้อง

7. รูปแบบการใส่ตารางในเนื้อหาบทความ

1) ชื่อตาราง**ห้าม**ขึ้นต้นด้วยคำว่า “แสดง”

2) ตาราง ให้ระบุลำดับที่ของตารางโดยใช้คำว่า “ตารางที่...” และต้องมีคำอธิบายใส่ไว้เหนือตารางและอยู่ในเนื้อหาบทความเรียงลำดับตารางในการอ้างถึง เช่น ตารางที่ 1 ตารางที่ 1-3

3) จัดคำอธิบายไว้ชิดขอบด้านซ้ายของหน้ากระดาษใกล้ตำแหน่งที่มีการระบุถึงตาราง และตารางอยู่กึ่งกลางหน้ากระดาษ ควรจัดเนื้อหาตารางให้อยู่บนหน้าเดียวกัน ดังตารางที่ 1 กรณีที่ตารางมีความยาวเกินหน้ากระดาษให้ใส่ชื่อตาราง “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

$$y = ax + b \tag{1}$$

4) ทุกสมการต้องมีการอ้างถึงในเนื้อหา ให้เรียงลำดับสมการโดยการเขียนไว้ในวงเล็บ ( ) เช่นเดียวกับที่ปรากฏในสมการ

5) การเว้นระยะบรรทัด ก่อนสมการ ให้เว้น 1 บรรทัด และหลังสมการ ให้เว้น 1 บรรทัด

9. การดำเนินงานของกองบรรณาธิการ

1) ทุกบทความที่ส่งเข้าวารสาร ต้องส่งผ่านระบบออนไลน์ที่ https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/rmutijo/index

2) บทความที่ถูกส่งเข้ามายังระบบ กองบรรณาธิการจะพิจารณาบทความเบื้องต้นเกี่ยวกับความถูกต้องของรูปแบบทั่วไป **<u>บทความที่ไม่ดำเนินการตามรูปแบบที่กำหนดจะไม่รับเข้าสู่กระบวนการพิจารณา</u>**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 และการใช้ประโยชน์นวัตกรรมเทคโนโลยี (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 อีเมล์ 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 ยินยอมให้มีสิทธิ์ในการเลือกสรรหาผู้กลั่นกรองโดยอิสระเพื่อพิจารณาต้นฉบับที่ข้าพเจ้า (และผู้แต่งร่วม) ส่งมา ยินยอมให้กองบรรณาธิการสามารถตรวจแก้ไขต้นฉบับดังกล่าวได้ตามที่เห็นสมควร และข้าพเจ้า “ขอรับรองว่า บทความนี้ไม่เคยลงตีพิมพ์ในวารสารใดมาก่อน ไม่อยู่ระหว่างการพิจารณาจากวารสารอื่น และยินยอมว่าบทความที่ตีพิมพ์ลงในวารสารวิชาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ถือเป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน”

หากข้าพเจ้ามีความประสงค์ในการขอยกเลิกการพิจารณาบทความหลังจากวันที่ได้รับหนังสือยืนยันการรับบทความ **ข้าพเจ้ายินดีดำเนินการตามกระบวนการของ**กองบรรณาธิการวารสาร RMUTI Journal

ลงชื่อ…….

(…….)



หนังสือรับรองการตีพิมพ์บทความ
วารสารงานวิจัยด้านวิทยาศาสตร์สมัยใหม่ และการใช้ประโยชน์นวัตกรรมเทคโนโลยี
(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 และการใช้ประโยชน์นวัตกรรมเทคโนโลยี
(RMUTI Journal)
Research on Modern science and Utilizing Technological Innovation Journal
(RMUTI Journal)
ปีที่..... ฉบับที่.....(.....-..... พ.ศ.....)



(.....)
บรรณาธิการวารสาร RMUTI Journal
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน



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

ข้าพเจ้า (นาย/นาง/นางสาว)……..……

สังกัดหน่วยงาน ……

มีความประสงค์ขอถอนการพิจารณาบทความ รหัสบทความ ……..เรื่อง ……..

……..

...……...……...……

...……...……...……

ที่ได้ส่งเข้ามายังวารสารระบบการจัดการวารสารออนไลน์ RMUTI Journal เมื่อวันที่ ……..

เนื่องจาก (ระบุเหตุผลในการถอนบทความ)……

...……...……...……

...……...……...……

ลงชื่อ……..ผู้ถอนบทความ

(……)



RMUTI Journal



RMUTI Journal

Research on Modern science and Utilizing Technological Innovation Journal

Vol. 19 No. 2 May-August 2026

ISSN: 3027-6756 (Online)

Institute of Research and Development
Rajamangala University of Technology Isan
744 Suranarai Road, Meuang, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand
Tel. (66) 4423 3063 Fax. (66) 4423 3064
E-mail : rmuti.journai@gmail.com