



Research on Modern science and Utilizing Technological Innovation Journal

(RMUTI Journal)

RMUTI Journal

Vol. 17 No. 2 May–August 2024

2024



INSTITUTE OF RESEARCH AND DEVELOPMENT
RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY ISAN

RMUTI Journal ได้รับการประเมินคุณภาพให้อยู่ในฐานข้อมูล
ของศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (TCI) กลุ่มที่ 2

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

วัตถุประสงค์

1. เพื่อเป็นสื่อกลางในการแลกเปลี่ยนองค์ความรู้ด้านวิชาการ ด้านงานวิจัย และสิ่งประดิษฐ์ระหว่างนักวิชาการ และนักวิจัยกับผู้ที่สนใจทั่วไป
2. เพื่อเผยแพร่ผลงานทางวิชาการ ผลงานวิจัย และสิ่งประดิษฐ์ของนักวิชาการและนักวิจัยสู่สาธารณชน

หลักเกณฑ์การส่งบทความ

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

ประเภทของบทความที่ตีพิมพ์ บทความวิจัย และบทความวิชาการ

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

เจ้าของ

สถาบันวิจัยและพัฒนา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

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

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

E-mail : rmuti.journal@gmail.com

ตีพิมพ์เผยแพร่ราย 4 เดือน ปีละ 3 ฉบับ

ฉบับที่ 1 ประจำเดือนมกราคม - เดือนเมษายน

ฉบับที่ 2 ประจำเดือนพฤษภาคม - เดือนสิงหาคม

ฉบับที่ 3 เดือนกันยายน - เดือนธันวาคม

ชื่อวารสารใหม่เริ่มใช้ปีที่ 16 ฉบับที่ 3 (กันยายน - ธันวาคม) เป็นต้นไป

ลิขสิทธิ์

ต้นฉบับที่ได้รับการตีพิมพ์ ถือเป็นลิขสิทธิ์ของวารสาร RMUTI Journal และบทความในวารสารเป็นแนวคิดของผู้แต่ง มิใช่เป็นความคิดของคณะกรรมการจัดทำวารสาร และมีใช่เป็นความรับผิดชอบของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

วารสารงานวิจัยด้านวิทยาศาสตร์สมัยใหม่ และการใช้ประโยชน์นวัตกรรมเทคโนโลยี
(RMUTI Journal)

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

ที่ปรึกษากองบรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.โมษิต	ศรีภูธร	อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
รองศาสตราจารย์ ดร.ศักดิ์ระวี	ระวีกุล	ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
รองศาสตราจารย์ ดร.วีรชัย	พุทธรังค์	ประธานหลักสูตรนิติวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กองบรรณาธิการ

ศาสตราจารย์เกียรติคุณ ดร.พีระศักดิ์	ศรีนิเวศน์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ศาสตราจารย์ ญาณวิทย์ ดร.เมธา	วรรณพัฒน์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ศาสตราจารย์ ดร.กุลเชษฐ์	เพียรทอง	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ศาสตราจารย์ ดร.เจษฎา	ธาริบุญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ฤทธิ์	สมบัติสมภาพ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.ตะวัน	สุขน้อย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ศาสตราจารย์ ดร.ทวนทอง	จุฑาเกตุ	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ศาสตราจารย์ ดร.ปารเมศ	ชุติมา	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.เปี่ยมศักดิ์	เมนะเสวต	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.พิเชษฐ	ลิ้มสุวรรณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล	เหล่าสุวรรณ	มหาวิทยาลัยหาดใหญ่
ศาสตราจารย์ ดร.รัตติก	ยัมนิรัญ	สถาบันวิทยสิริเมธี
ศาสตราจารย์ ดร.วินัย	ประสมพิทยากัญจน์	มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์
ศาสตราจารย์ ดร.ศุภชัย	ปทุมนากุล	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ศาสตราจารย์ ดร.สำเริง	จักรใจ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.สุชาติ	ลิ้มกตัญญู	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ศาสตราจารย์ ดร.สมชาติ	โสภณธรรมฤทธิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.สุทธวัฒน์	เบญจกุล	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ศาสตราจารย์ นาวาอากาศโท ดร.สรวุฒิ	สุจิตจร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ศาสตราจารย์ ดร.อรอนงค์	นัยวิกุล	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.กนกอร	อินทราพิเชฐ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รองศาสตราจารย์ ดร.กนต์ธร	ชำนาญประศาสน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รองศาสตราจารย์ ดร.คงศักดิ์	ธาดุทอง	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.คณิต	มุกดาใส	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.จักรี	ศรีนนท์ฉัตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.ชนกพร	เผ่าศิริ	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.ณัฐวิวัฒน์	พลดี	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริศ	สามารถ	มหาวิทยาลัยขอนแก่น

กองบรรณาธิการ (ต่อ)

รองศาสตราจารย์ ดร.นิรัช
รองศาสตราจารย์ ดร.ปราโมทย์
รองศาสตราจารย์ ดร.ปรีชา
รองศาสตราจารย์ ดร.มนัส
รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภชัย
รองศาสตราจารย์ ดร.วุฒิพล
รองศาสตราจารย์ ดร.สมพงษ์
รองศาสตราจารย์ ดร.สมพร
รองศาสตราจารย์ ดร.สิทธิชัย
รองศาสตราจารย์ ดร.สรายุธ
รองศาสตราจารย์ อุดมศักดิ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นาถ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรภาพ
รองศาสตราจารย์ ดร.จิตติวัฒน์
รองศาสตราจารย์ ดร.เชิดศักดิ์
รองศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต
รองศาสตราจารย์ ดร.ปกิต
รองศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไกรสิทธิ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คมเดช
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักษดา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาคริต
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพล
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เดือนเพ็ญ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัฐพล
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รตินันท์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รพีพงศ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศศิพันธ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุจิตรา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อดิศักดิ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์อนุชา
ดร.จารุพงษ์
ดร.ฉันทพิชญ์
ดร.เยวพา
ดร.รักษาดิ
ดร.วัชรินทร์
ดร.สุกัญญา

รองศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ศักดิ์

นางสาววลีรักษ์

สุดสังข์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
แพ่งคำ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
กอเจริญ วิทยาลัยเทคโนโลยีจิตรลดา
ชัยจันทร์ มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์
สิงห์ยะบุศย์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
สินธุนาวรัตน์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ดุยจินดาชบาพร มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ไชยะ จังหวัดฉะเชิงเทรา
แสงอาทิตย์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
เดชปัญญา มหาวิทยาลัยบูรพา
สารบุตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง

สุขศีล มหาวิทยาลัยนครพนม
แก้วสวัสดิวงศ์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
นิติกานจนธาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
สุขศิริพัฒน์พงศ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
กฤตาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
กำบุญมา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
อัศวสุชี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
วสุเพ็ญ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ภาพพัฒนบุรี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ธำรงวุฒิ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
นวลฉิมพลี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
พิสิฐพิพัฒน์สิน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
วงศ์สอน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
สมนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
เหลื่อมพล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
เปี่ยมสุวรรณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
วงศ์สุทธาวาส มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
อุ้นเรือน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ทาร์จิง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
กลั่นน้อย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
บรรเทา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ชามาตย์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ความหมั่น มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
กลั่นกล้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ชาติบุปผาพันธ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
คำหล้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

บรรณาธิการ

โยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

ฝ่ายจัดการและธุรการ

ศรีศิลป์ไชย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

สารบัญ Table of Contents

บทความวิจัย (Research Articles)

- การหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความหยาบผิวและขนาดของชิ้นงานในการตัดอะคริลิกด้วยเครื่องตัดเลเซอร์ CO₂ โดยใช้วิธีทาคุชิ 1
Optimal Value of Factors Affecting Surface Roughness and Workpiece Dimension on Acrylic Cutting with a CO₂ Laser Cutter Machine Using the Taguchi Method
วีระพล ทับทิมดี, บรรพจน์ มีสา และประเวช เชื้อวงศ์
Weerapol Taptimdee, Banpot Meesa, and Prawach Chourwong
- แบบจำลองกำหนดการเชิงจำนวนเต็มแบบผสมสำหรับการแก้ปัญหาสถานที่ตั้งและการจัดเส้นทางแบบสองระดับในห่วงโซ่อุปทานชีวมวล 17
A Mixed-Integer Programming Model for Solving a Two-Level Location-Routing Problem in Biomass Supply Chains
เจ้านาย ครุฑไชยันต์ และเอื้ออารี บุญเพิ่ม
Jaonai Krutchaiyan and Aua-aree Boonperm
- การสังเคราะห์และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของโพรบฟลูออเรสเซนต์ฟลาโวนอล (3-hydroxy-2-(pyren-1-yl)-4H-chromen-4-one) 31
D Synthesis and Antioxidant Activity of a Flavonol-Based Fluorescent Probe (3-hydroxy-2-(pyren-1-yl)-4H-chromen-4-one)
จุฑามาศ ดวงกมล, ปรียาภรณ์ เพ็ญสังกะ, อรรธยา นนทิวรรณ, ธนากร ศิริอนันต์มณี, ณัฐพัชร สหพัฒน์สมบัติ, อมลรดา สาถิ่น และณชิตา วงศ์อภิชาติ
Chuthamat Duangkamol, Pariyaporn Piasangka, Attaya Nontiwantok, Thanakorn Siriananmanee, Natapat Sahaphatsombut, Amolrada Sathin, and Nachicha Wongapichart
- การศึกษาแนวทางการปรับปรุงอาคารตามมาตรฐาน BEC (Building Energy Code) : กรณีศึกษาอาคารเฉลิมพระเกียรติ 56 พรรษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา 45
The Study of Building Development of Building Energy Code: A Case Study Chaloe Phrakiat 56th Phansa Building at Rajamangala University of Technology Lanna
กาญจนา ปะทะนอมเป้, กิตติกุล ศิริเมืองมูล, สุภาวรรณ ปันติ, ภาวิดา ชีวะะพันธ์ และภุมินทร์ พุทธโกมุท
Khanjana Patanompee, Kittikul Sirimeungmoon, Supawan Pundi, Pawida Cheewayaphan, and Bhumin Bhutdhakomut
- การวิเคราะห์ตัวแปรของท่อผนังบางรูปหลายเหลี่ยมเติมโฟมภายใต้แรงบิดโดยออกแบบการทดลอง Parametric Analysis of Foam-Filled Polygonal Thin-walled Tubes Subjected to Torque using Experimental Design 63
Parametric Analysis of Foam-Filled Polygonal Thin-walled Tubes Subjected to Torque using Experimental Design
สมญา ภูณะยา
Somya Poonay
- ผลของการทดแทนแป้งสาลีด้วยผงกะหล่ำดอกต่อคุณภาพของคุกกี้ตุล 76
Effect of Substitution of Wheat Flour with Cauliflower Powder on Qualities in Tuile Cookies
บุษบา มะโนแสน, จิรัชต์ กันทะขู้, สุทธิดา ปัญญาอินทร์, ประกิจ ทิมขำ และเกวลิณ แซ่หลอ
Busaba Manosan, Jirarat Kantakhoo, Sutthida Punyain, Prakit Timkum, and Kewalin Saelo

สารบัญ (ต่อ)
Table of Contents (Cont.)

บทความวิจัย (Research Articles)

สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงและลักษณะทางกายภาพที่มีผลต่อความเข้มแสงภายในห้องเรียนแบบบรรยาย 87
ในมหาวิทยาลัยแห่งหนึ่ง กรุงเทพมหานคร

**The Reflective Coefficient and Physical Characteristics on Light Intensity in Lecture
Classrooms at a University, Bangkok**

ณัฐจิต อ้นเมฆ, บุตรี เทพทอง, กิจจา จิตรภิรมย์, เชิดศิริ นิลผาย, พนิดา กามูณี และณาน ปัทมะ พลยง
*Nutthajit Onmek, Budtree Thepthong, Kitja Chitpirom, Chirdsiri Ninpai, Panida Kamunee,
and Chan Pattama Polyong*

On Certain Properties of the Laplace-type Integral Transform Via Post Quantum Calculu 96

Sansumpan Jirakulchaiwong and Kamsing Nonlaopon

การหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความหยาบผิวและขนาดของชิ้นงานในการตัดอะคริลิกด้วยเครื่องตัดเลเซอร์ CO₂ โดยใช้วิธีทากูชิ

Optimal Value of Factors Affecting Surface Roughness and Workpiece Dimension on Acrylic Cutting with a CO₂ Laser Cutter Machine Using the Taguchi Method

วีระพล ทับทิมดี¹ บรรพจน์ มีสา¹ และประเวช เชื้อวงษ์^{1*}

Weerapol Taptimdee¹ Banpot Meesa¹ and Prawach Chourwong^{1*}

Received: January 23, 2024; Revised: April 30, 2024; Accepted: May 1, 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความหยาบผิวและขนาดของชิ้นงานในการตัดอะคริลิกด้วยเครื่องตัดเลเซอร์ CO₂ โดยใช้วิธีทากูชิเพื่อวิเคราะห์ถึงปัจจัยที่เหมาะสมตามหลักการทางสถิติ จากนั้นวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบ ANOVA ปัจจัยในการทดลองแบ่งออกเป็น 3 ปัจจัย โดยปัจจัยแรก คือ ความเร็วในการเคลื่อนที่มี 3 ระดับ ได้แก่ 1 1.5 และ 2 มิลลิเมตรต่อวินาที ปัจจัยที่สอง คือ กำลังไฟสูงสุดมี 3 ระดับ ได้แก่ 70 80 และ 90 % และปัจจัยที่สาม คือ กำลังไฟต่ำสุดมี 3 ระดับ ได้แก่ 70 80 และ 90 % ค่าความหยาบผิวของตัวอย่างจะถูกวัดด้วยเครื่องวัดความหยาบผิวแบบพกพาและขนาดของตัวอย่างจะทำการวัดด้วยไมโครมิเตอร์วัดนอก ค่าความละเอียด 0.001 มิลลิเมตร เพื่อหาค่าความคลาดเคลื่อนของขนาดหลังการตัดผลจากการวิเคราะห์พบว่า ปัจจัยด้านความเร็วส่งผลต่อค่าความหยาบผิวและความคลาดเคลื่อนของขนาดหลังการตัดอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเพิ่มความเร็วในการเคลื่อนที่ให้สูงขึ้นจะทำให้ค่าความหยาบผิวลดลง ปัจจัยหลักที่ส่งผลให้ค่าความหยาบผิวน้อยที่สุดคือ ความเร็ว 1.0 มิลลิเมตรต่อวินาที กำลังไฟสูงสุดและกำลังต่ำสุด 90 % ปัจจัยหลักที่ส่งผลให้ค่าความคลาดเคลื่อนของขนาดหลังการตัดน้อยที่สุดคือ ความเร็ว 2.0 มิลลิเมตรต่อวินาที กำลังไฟสูงสุดและกำลังต่ำสุด 80 %

คำสำคัญ : วิธีทากูชิ; ค่าความหยาบผิว; ความคลาดเคลื่อนของขนาด

¹ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์

¹ Faculty of Industrial Technology, Rajabhat Rajanagarindra University

* Corresponding Author; Tel. 08 1715 8999, E - mail: pravate@techno.rru.ac.th

Abstract

This research investigates the factors that affect the surface roughness and dimension of acrylic workpieces cut with a CO₂ laser machine. The Taguchi method is used to analyze the factors according to statistical principles, followed by an analysis of variance (ANOVA). The experimental factors are divided into three levels: speed (1, 1.5, and 2 mm/s), maximum power (70, 80, and 90 %), and minimum power (70, 80, and 90 %). The surface roughness of the specimen will be measured using a portable surface roughness machine, while the size of the specimen will be measured using an external micrometer with a precision of 0.001 mm, to determine the post-cutting error dimensional. The results show that the speed factor significantly affects the surface roughness and error dimension after cutting. Increasing the movement speed results in a decrease in surface roughness. The main factors that result in the least surface roughness are a speed of 1.0 mm/s, maximum power, and minimum power of 90 %. The main factors that result in the least error dimension after cutting are a speed of 2.0 mm/s, maximum power, and minimum power of 80 %.

Keywords: Taguchi Method; Surface Roughness; Error Dimension

บทนำ

พลาสติกจัดอยู่ในกลุ่มของวัสดุโพลิเมอร์ที่นิยมนำมาใช้ในการอุตสาหกรรมการผลิตเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งพลาสติกชนิด PMMA (Poly Methyl Methacrylate) หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า “อะคริลิก (Acrylic)” ซึ่งถูกนำมาใช้งานในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ งานอิเล็กทรอนิกส์ ผลิตภัณฑ์ในชีวิตประจำวัน เป็นต้น [1] - [2] เนื่องจากอะคริลิกมีสมบัติโดดเด่นในด้านความเหนียว (Toughness) การต้านทานความร้อน ความโปร่งใส (Transparent) สามารถขึ้นรูปได้ง่าย และเมื่อรวมกับการมีความหนาแน่นต่ำ ซึ่งเป็นสมบัติประจำตัวของพลาสติกแล้ว อะคริลิกจึงเป็นวัสดุชนิดหนึ่งที่นิยมนำมาใช้ทดแทนวัสดุอื่น ๆ ในงานที่หลากหลายในการนำอะคริลิกมาใช้งาน ขั้นตอนหนึ่งในนั้นคือ การตัดอะคริลิกให้ได้ขนาดและรูปร่างต่าง ๆ ตามที่ต้องการ ในการตัดอะคริลิกให้ขาดจากกันจะมีวิธีการที่หลากหลาย เช่น การใช้เลื่อย การใช้เครื่องซีเอ็นซี หรือการใช้เครื่องตัดเลเซอร์ CO₂ เป็นต้น ในปัจจุบันมีความนิยมใช้เครื่องตัดเลเซอร์ CO₂ กันอย่างแพร่หลายเนื่องจากสามารถแกะสลักและตัดวัสดุได้หลายชนิด เช่น พลาสติก ไม้ อะคริลิก กระดาษ ยาง กระจก เป็นต้น [3] อีกทั้งเครื่องตัดเลเซอร์ CO₂ ยังมีข้อดีอีกหลายประการ เช่น เครื่องตัดมีขนาดเล็ก ราคาถูก สามารถตัดชิ้นงานที่มีความซับซ้อนสูงและตัดได้อย่างรวดเร็ว [4] เหมาะกับงานขอบบางและเปราะ คุณสมบัติของพื้นผิวสุดท้ายสามารถทำได้ในขั้นตอนเดียวและไม่จำเป็นต้องตกแต่งในขั้นตอนสุดท้ายเพื่อให้ผิวเรียบ [5] ซึ่งทำให้มีผู้สนใจในงานตัดอะคริลิกด้วยเครื่องตัดเลเซอร์ CO₂ ทั้งกลุ่มอุตสาหกรรมขนาดกลาง ขนาดเล็ก มหาวิทยาลัยและผู้สนใจทั่วไปเพิ่มมากขึ้น จากการศึกษางานวิจัยก่อนหน้านี้พบว่า [6] ได้ศึกษาถึงปัจจัยและบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) ของชิ้นงานอะคริลิกที่ตัดด้วยเครื่องตัดเลเซอร์ CO₂ โดยศึกษาปัจจัยด้านกระแสไฟ ความเร็วและระยะห่างของ Nozzle ถึงชิ้นงานพบว่า เมื่อกระแสไฟและความเร็วตัดสูงขึ้น จะส่งผลต่ออัตราการกำจัดเนื้อวัสดุ (Material Removal Rate: MRR) สูงขึ้นและพื้นที่ HAZ จะลดลงเมื่อระยะห่างของ Nozzle ถึงชิ้นงานเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ [7] ได้ศึกษาถึงอิทธิพลของค่าความละเอียด (Resolution) ที่ส่งผลต่อค่าความหยาบผิวในการตัดแผ่นอะคริลิกด้วยเครื่องตัดเลเซอร์ CO₂ โดยศึกษาปัจจัยด้านกำลัง (Power) ความเร็วและค่าความละเอียดพบว่า ค่าความหยาบผิวจะลดลงตามค่าความละเอียดที่เพิ่มขึ้น

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยอีกหลายฉบับที่ศึกษาถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อการตัดด้วยเครื่องตัดเลเซอร์ CO₂ เช่น การออกแบบการวิเคราะห์ และการผลิตแผ่นไมโครเน็ลโพลีเมอร์โดยใช้เครื่องตัดเลเซอร์ CO₂ [8] ลักษณะของรูหลังการเจาะด้วยเครื่องตัดเลเซอร์ CO₂ บน PMMA [9] การศึกษาพารามิเตอร์กระบวนการตัดเฉือนของเครื่องตัดเลเซอร์ CO₂ บนอะคริลิก [10] เป็นต้น อย่างไรก็ตาม การตัดอะคริลิกด้วยเครื่องตัดเลเซอร์ CO₂ นั้นอาจพบปัญหาได้หลายประการ ได้แก่ การตัดไม่ขาด ขอบตัดไม่เรียบ ขนาดชิ้นงานไม่ได้ตามแบบ เป็นต้น ซึ่งปัญหาเหล่านี้สามารถส่งผลกระทบต่อคุณภาพของงานตัดได้ ดังนั้นการศึกษถึงการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของการตัดด้วยเครื่องตัดเลเซอร์ CO₂ ให้เหมาะสมกับวัสดุอะคริลิกจึงเป็นสิ่งจำเป็น

ดังนั้นในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยที่ส่งผลต่อความหนาผิวและขนาดของชิ้นงานในการตัดอะคริลิก ด้วยเครื่องตัดเลเซอร์ CO₂ โดยใช้วิธีการทางสถิติ จากนั้นวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบ ANOVA เพื่อศึกษาความแปรปรวนของปัจจัยที่ส่งผลต่อสภาวะที่เหมาะสมในการตัดอะคริลิก โดยพิจารณาถึงปัจจัยหลักในการทดลองจำนวน 3 ปัจจัย คือ ความเร็วในการเคลื่อนที่ กำลังไฟสูงสุด กำลังไฟต่ำสุด และตัวแปรตอบสนองคือความหนาผิวและความคลาดเคลื่อนของขนาดชิ้นงานหลังการตัด ผลการทดลองนี้จะช่วยให้ผู้ทำงานในด้านตัดอะคริลิก ด้วยเครื่องตัดเลเซอร์ CO₂ ทั้งกลุ่มอุตสาหกรรมขนาดเล็ก ขนาดกลาง และผู้สนใจนำไปเป็นแนวทางในการใช้งานต่อไปในอนาคตได้

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วิธีทางสถิติเป็นวิธีการหนึ่งในการประยุกต์การออกแบบการทดลอง (DOE) เพื่อหาค่าปัจจัยของกระบวนการที่ดีที่สุด โดยวิเคราะห์ทั้งปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable Factor) และปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable Factor) ซึ่งปัจจัยเหล่านี้จะถูกแปลงให้อยู่ในรูปของ S/N Ratio เพื่อใช้ในการหาเป้าหมายที่ถูกต้องในการหาค่าที่ดีที่สุด (Optimize) โดยสามารถวิเคราะห์ได้ 3 กรณี คือ กรณีค่ายิ่งมากยิ่งดี (Larger is Better) กรณีค่าตรงเป้าหมายดีที่สุด (Target Value is Better) และกรณีค่ายิ่งน้อยยิ่งดี (Smaller is Better) วิธีทางสถิติเป็นเครื่องมือทางสถิติที่ใช้ในการออกแบบการทดลองโดยให้มีการทดลองจำนวนน้อยที่สุด วิธีทางสถิติเสนอแนวทางการออกแบบที่ตรงไปตรงมาและเป็นระบบ ซึ่งอาศัยอาร์เรย์มุมฉาก (Orthogonal Arrays) เพื่อหลีกเลี่ยงการดำเนินการทดสอบจำนวนมากรวมกัน [11] วิธีการนี้สามารถใช้เพื่อกำหนดความสำคัญของตัวแปรการออกแบบและการรวมกันของตัวแปรตอบสนองหนึ่งรายการขึ้นไป นอกจากนี้ยังสามารถเลือกอันดับของปัจจัยที่ควบคุมอินพุตได้ เพื่อให้ความแปรผันในการตอบสนองของกระบวนการเนื่องจากปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้นั้นไร้ผลโดยการเลือกค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยที่ควบคุมได้ของกระบวนการ ซึ่งจะลดผลกระทบของปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ให้เหลือน้อยที่สุด [12] ด้วยเหตุผลเหล่านี้ วิธีทางสถิติจึงถือเป็นวิธีการออกแบบการทดลองเชิงสถิติที่มีประสิทธิภาพ ซึ่งช่วยประหยัดเวลาและต้นทุน อีกทั้งยังช่วยเพิ่มผลผลิตของระบบวิศวกรรมอีกด้วยในการใช้งานเครื่องจักรสามารถใช้วิธีทางสถิติ เพื่อเลือกอันดับที่เหมาะสมที่สุดของพารามิเตอร์กระบวนการซึ่งช่วยลดความแปรผันในสมมติการณ์การทำงานของตัวแปรตอบสนองของกระบวนการตัดเฉือนให้เหลือน้อยที่สุดทั้งปัจจัยที่ควบคุมได้และปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ส่งผลต่อสมมติการณ์การทำงานเหล่านี้ อย่างไรก็ตามผลกระทบต่อการประสิทธิภาพของกระบวนการสามารถลดลงได้โดยการเลือกอันดับของปัจจัยอินพุตที่เหมาะสม [13] วิธีทางสถิติมีข้อดีหลายประการเมื่อเทียบกับ Factorial Design ซึ่งสามารถยกขึ้นมาพิจารณาได้ดังนี้

1. ลดตัวแปรที่ไม่สนใจ วิธีทางสถิติมุ่งเน้นการลดผลกระทบจากตัวแปรที่ไม่สนใจ (Nuisance Variables) ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อผลลัพธ์ โดยการใช้ Orthogonal Arrays (OA) เพื่อลดจำนวนการทดลอง ทำให้วิธีทางสถิติเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการลดตัวแปรที่ไม่สนใจอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้นเมื่อเทียบกับ Factorial Design ที่มักจะต้องทดลองทุกค่าของตัวแปรที่สนใจทั้งหมด

2. การวิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ง่ายและตรวจสอบได้ง่าย วิธีทางสถิติใช้เทคนิคการวิเคราะห์ที่สามารถระบุตัวแปรที่ส่งผลต่อผลลัพธ์มากที่สุดได้ และสามารถตรวจสอบผลลัพธ์ได้ง่าย โดยไม่ต้องใช้วิธีทางสถิติที่ซับซ้อนเท่ากับ Factorial Design ซึ่งอาจจำเป็นต้องใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Variance Analysis) หรือการใช้โมเดลทางสถิติที่ซับซ้อนขึ้น

3. ประหยัดเวลาและทรัพยากร เนื่องจากวิธีทางสถิติลดจำนวนการทดลองที่ต้องทำลง จึงทำให้ประหยัดเวลาและทรัพยากรมากขึ้นเมื่อเทียบกับ Factorial Design ที่ต้องทดลองทุกค่าของตัวแปรที่สนใจทั้งหมด

ดังนั้นวิธีทางสถิติเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการลดตัวแปรที่ไม่สนใจ ลดการใช้ทรัพยากร และทำให้การวิเคราะห์ผลลัพธ์เป็นไปอย่างง่ายและมากขึ้นเมื่อเทียบกับ Factorial Design ในบางกรณีที่เหมาะสม อย่างไรก็ตามวิธีการทางสถิติยังคงมีข้อจำกัด เช่น

1. ไม่ครอบคลุมทุกค่าของตัวแปร วิธีทางสถิติมักจะใช้ Orthogonal Arrays (OA) เพื่อลดจำนวนการทดลอง ซึ่งอาจทำให้ไม่สามารถครอบคลุมทุกค่าของตัวแปรที่สนใจได้

2. การใช้ S/N Ratio อาจไม่เหมาะสมในกรณีที่มีข้อมูลไม่ต่อเนื่องหรือมีการวัดผลลัพธ์ที่ซับซ้อน

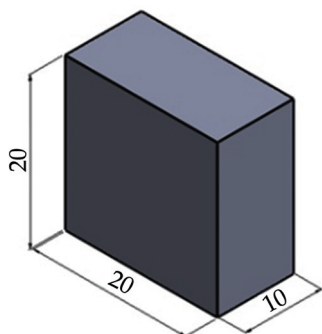
จากการศึกษางานวิจัยก่อนหน้านี้พบว่า มีงานวิจัยจำนวนมากได้นำวิธีทางสถิติมาหาปัจจัยที่ดีที่สุด เช่น [14] ได้ศึกษาถึงการเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการตัดด้วยเครื่องตัดเลเซอร์ CO₂ บนการตัดอะคริลิกโดยใช้การวิเคราะห์เชิงสัมพันธ์ของด้วยวิธีทางสถิติ เกรย์และวิธีการตอบสนองพื้นผิว โดยวิเคราะห์ปัจจัย 3 ปัจจัย ได้แก่ กำลังเลเซอร์ ความเร็วตัดและระยะห่างของ Nozzle ถึงชิ้นงาน จากผลการทดลองพบว่า พารามิเตอร์กระบวนการที่เหมาะสมที่สุดคือ กำลังเลเซอร์ 65 % ความเร็วในการตัด 4 มิลลิเมตรต่อวินาที และระยะห่างของหัวตัด 4 มิลลิเมตร ในขณะที่จากผลลัพธ์ของวิธี RSM พารามิเตอร์กระบวนการที่เหมาะสมที่สุดคือ 75 % ของกำลังเลเซอร์ ความเร็วในการตัด 5.9 มิลลิเมตรต่อวินาที และระยะห่างของหัวตัด 3 มิลลิเมตร นอกจากนี้ [15] ได้ศึกษาถึงการตรวจสอบผลกระทบของพารามิเตอร์กระบวนการ FDM ต่อสมบัติเชิงกลของตัวอย่าง PA12 ที่พิมพ์แบบสามมิติโดยใช้วิธีทางสถิติในการออกแบบการทดลองแบบ L8 โดยกำหนดปัจจัยด้านความหนา อุณหภูมิเครื่องอัดรีด โครงสร้างชิ้นงาน และอัตราการยึดติด พบว่า ความหนาเป็นปัจจัยที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดในการปรับปรุงสมบัติทางกล ความต้านทานแรงดึงและความต้านทานแรงกระแทกที่เหมาะสมที่สุดที่กำหนดสำหรับพารามิเตอร์กระบวนการ คือ 0.25 มิลลิเมตร 50 % เส้นตรง และ 250 °C ตามลำดับ นอกจากนี้ [16] ได้ศึกษาถึงการเพิ่มประสิทธิภาพพารามิเตอร์การพิมพ์ 3 มิติโดยใช้วิธีทางสถิติเพื่อตรวจสอบสมบัติทางกลของอะคริลไนไตรล์ สไตรีน อะคริเลต (ASA) โดยศึกษาปัจจัยด้านการวางแนว อุณหภูมิการพิมพ์ ความสูงของชั้น สารเติม และมุมแรสเตอร์พบว่า ความหนาแน่นของสารเติมและความสูงของชั้นมีอิทธิพลมากที่สุด

วิธีดำเนินการวิจัย

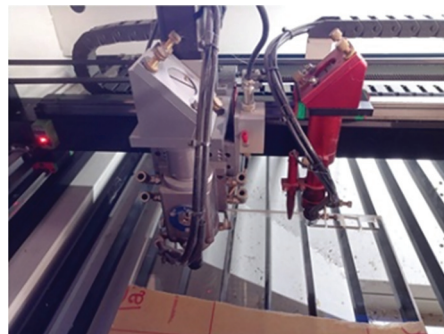
1. วัสดุและเครื่องมือ

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ อะคริลิกใสเกรดการค้า หนา 10 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นวัสดุที่นิยมใช้มากในการทำเป็นแม่พิมพ์หรือทำเป็นผลิตภัณฑ์ตกแต่ง งานป้ายต่าง ๆ เนื่องจากมันมีความใสคล้ายแก้ว มีความคงทนและแข็งแรง อะคริลิกจะถูกตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 20 x 20 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องตัดเลเซอร์ CO₂ (LINTCNC รุ่น LT-1390, China) ดังรูปที่ 1 ข้อกำหนดและคุณลักษณะของเครื่องตัดเลเซอร์ CO₂ ดังตารางที่ 1 การตัดชิ้นงานด้วยเครื่องตัดเลเซอร์แบบ CO₂ นั้น จะมีแหล่งกำเนิดลำแสงเป็นหลอดแก้วแบบปิดผนึกภายในเต็มไปด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) เมื่อปล่อยกระแสไฟฟ้าแรงสูงไปทำปฏิกิริยากับอนุภาคก๊าซภายในหลอดแก้ว จะทำให้เกิดเป็นลำแสงที่มีพลังงานความร้อนสูงและส่งถ่ายพลังงานความร้อนผ่านเลนส์สะท้อนแสงมายังหัว Nozzle ซึ่งมีเลนส์โฟกัสอยู่ภายในเพื่อบีบลำแสงให้แคบและมีความเข้มสูงเพียงพอที่จะทำให้ชิ้นงานหลอมละลายและขาดออกจากกัน [17] - [18] หลักการทำงานของเครื่องตัดเลเซอร์ CO₂ ดังรูปที่ 2 ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ทำการตัดชิ้นงานด้วยเครื่องตัดเลเซอร์ CO₂ ตามแบบงานที่กำหนด โดยเริ่มต้นจากการออกแบบชิ้นงานด้วยโปรแกรม RD Works V8.0 ซึ่งสามารถส่งผ่านข้อมูลผ่านบอร์ดควบคุมแบบ Ruida Controller ทำให้เครื่องจักรทำงานตามแบบได้ โปรแกรมสามารถกำหนดค่าตัวแปรต่าง ๆ ในการตัดงานได้ เช่น ระยะห่างระหว่างหัวตัด (Nozzle) ถึงผิวบนชิ้นงาน (ปรับตั้งแบบอัตโนมัติ) ความเร็ว (Speed) กำลังสูงสุด

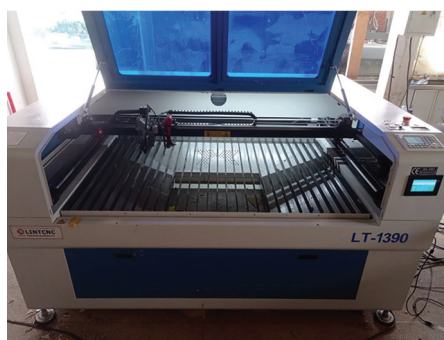
(Max Power) และกำลังต่ำสุด (Min Power) เป็นต้น โดยค่ากำลังสูงสุด (Max Power) คือ ระดับพลังงานที่ใช้สำหรับเลเซอร์ขึ้นงานเมื่อเดินเป็นเส้นตรงที่ความเร็วตามที่ถูกตั้งค่าไว้ ส่วนค่ากำลังต่ำสุด (Min Power) คือ ระดับพลังงานที่ใช้สำหรับเดินแนวเส้นโค้งหรือการเดินในแนวเส้นตรงที่ความเร็วต่ำเท่านั้น ในระบบ Ruida Controller จะเริ่มต้นใช้ “Min Power” เมื่อเป็นความเร็วเริ่มต้น (หรือความเร็วเชิงมุม) และจะค่อย ๆ เพิ่มกำลังเข้าสู่ “Max Power” เมื่อถึงความเร็วที่กำหนด



(ก) ขนาดชิ้นงานตัวอย่าง



(ข) หัวตัด (Nozzle)

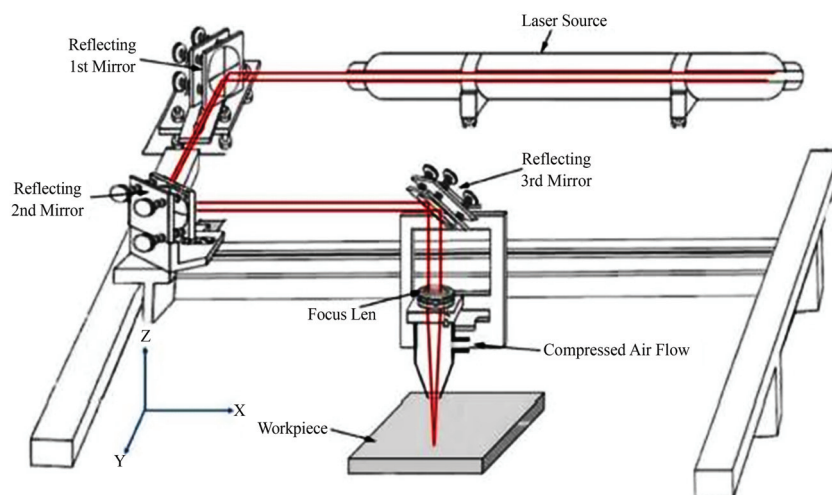


(ค) เครื่องตัดเลเซอร์ CO₂

รูปที่ 1 ชิ้นงานตัวอย่างและเครื่องตัดเลเซอร์ CO₂

ตารางที่ 1 ข้อกำหนดและคุณลักษณะของเครื่องตัดเลเซอร์ CO₂

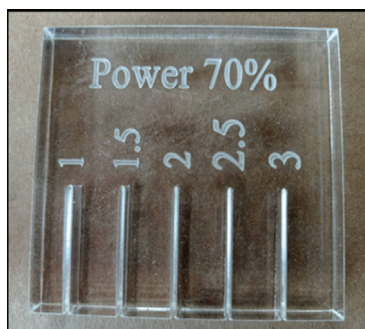
เครื่องหมายการค้า	กำลังแสงเลเซอร์	มอเตอร์	ขนาดตัวเครื่องของตำแหน่ง	ความแม่นยำ
LINTCNC	100 W	สเต็ปเปอร์มอเตอร์	1980 x 1140 x 1220 มิลลิเมตร	< 0.01
รุ่น	หลอดเลเซอร์	พื้นที่ทำงาน	การระบายความร้อนของท่อเลเซอร์	ความเที่ยงตรงในการสแกนสูงสุด
LT-1390	หลอดแก้ว CO ₂ แบบปิดผนึก	1300 x 900 มิลลิเมตร	ระบายความร้อนด้วยน้ำ	0.0254 มิลลิเมตร



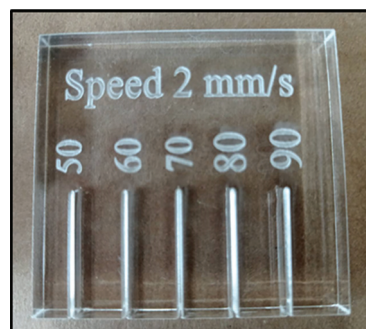
รูปที่ 2 หลักการทำงานของเครื่องตัดเลเซอร์ CO₂ [19]

2. การกำหนดปัจจัยการทดลองทางสถิติ

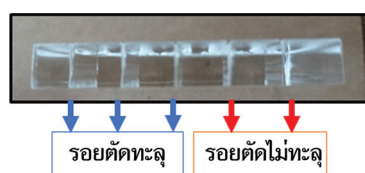
การกำหนดปัจจัยการทดลองเป็นการกำหนดปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อตัวอย่างหลังการตัดด้วยเครื่องตัดเลเซอร์ CO₂ ซึ่งปัจจัยการทดลองประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ปัจจัยคงที่และปัจจัยแปรผัน โดยปัจจัยคงที่ได้แก่ ระยะทางระหว่างหัวตัด (Nozzle) ถึงผิวบนชิ้นงานเท่ากับ 14 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นค่าที่โรงงานผลิตแนะนำ และปัจจัยแปรผัน ได้แก่ ความเร็ว (Speed) กำลังสูงสุด (Max Power) กำลังต่ำสุด (Min Power) ตัวแปรตอบสนองคือ ค่าความหนาผิวและความคลาดเคลื่อนของขนาดตัวอย่างหลังการตัด ในการกำหนดระดับของปัจจัยการทดลอง ผู้วิจัยได้ทดลองตัดชิ้นงานโดยกำหนดค่าปัจจัยที่แตกต่างกันเพื่อทดสอบหาความเร็วกำลังสูงสุดและกำลังต่ำสุดที่ทำให้สามารถตัดชิ้นงานให้ขาดออกจากกันได้ โดยเริ่มต้นจากการกำหนดกำลังสูงสุดและต่ำสุดที่ 70 % ของกำลังแสงเลเซอร์ ปรับค่าความเร็วในการเคลื่อนที่ 5 ระดับ ได้แก่ 1 1.5 2 2.5 และ 3 มิลลิเมตรต่อวินาที ตามลำดับ ดังรูปที่ 3(ก) และ (ค) พบว่า ที่ความเร็ว 1 1.5 และ 2 มิลลิเมตรต่อวินาที รอยตัดจะขาดจากผิวด้านบนทะลุลงสู่ผิวด้านล่าง แต่เมื่อความเร็วในการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้นเป็น 2.5 และ 3 มิลลิเมตรต่อวินาที จะพบว่า รอยตัดจะขาดจากผิวด้านบนแต่ไม่ทะลุลงสู่ผิวด้านล่าง ซึ่งเมื่อความเร็วในการเคลื่อนที่เพิ่มมากขึ้นการหลอมละลายทะลุลงสู่ผิวด้านล่างจะยิ่งลดต่ำลง ในการทดลองลำดับต่อมาเป็นการหากำลังสูงสุดและต่ำสุดที่ทำให้ชิ้นงานขาดออกจากกันเมื่อกำหนดความเร็วในการเคลื่อนที่คงที่เท่ากับ 2 มิลลิเมตรต่อวินาที โดยกำหนดกำลังสูงสุดและกำลังต่ำสุด 5 ระดับ ได้แก่ 50 60 70 80 และ 90 % ของกำลังแสงเลเซอร์ ตามลำดับ ดังรูปที่ 3(ข) และ (ง) พบว่า เมื่อทดลองตัดด้วยกำลังสูงสุดและกำลังต่ำสุดเท่ากับ 50 และ 60 % รอยตัดจะขาดจากผิวด้านบนแต่ไม่ทะลุลงสู่ผิวด้านล่าง เมื่อตัดด้วยกำลังสูงสุดและกำลังต่ำสุดเท่ากับ 70 80 และ 90 % รอยตัดจะขาดจากผิวทะลุลงสู่ผิวด้านล่าง อาจกล่าวได้ว่าเมื่อกำลังสูงสุดและกำลังต่ำสุดเพิ่มมากขึ้นการหลอมละลายทะลุลงสู่ผิวด้านล่างจะยิ่งมากขึ้น ซึ่งผลเช่นนี้เป็นไปตามข้อกำหนดของเครื่องตัดเลเซอร์รุ่นนี้ กำหนดไว้ว่าจะสามารถตัดอะคริลิกได้ที่ความหนาสูงสุดไม่เกิน 15 มิลลิเมตร ดังนั้นหากต้องการตัดอะคริลิกที่มีความหนาสูง การกำหนดความเร็วในการเคลื่อนที่ที่จะต้องต่ำและกำลังไฟจะต้องสูง



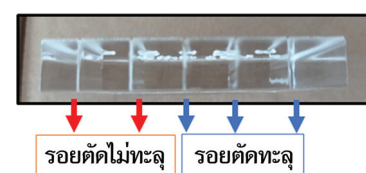
(ก) รอยตัดจากผิวด้านบน
กำลังไฟสูงสุดและต่ำสุด 70 %
ความเร็วในการเคลื่อนที่ 1 - 3 มม./วินาที



(ข) รอยตัดจากผิวด้านบน
ความเร็วในการเคลื่อนที่ 2 มม./วินาที
กำลังไฟสูงสุดและต่ำสุด 50 - 90 %



(ค) รอยตัดจากผิวด้านข้าง
กำลังไฟสูงสุดและต่ำสุด 70 %
ความเร็วในการเคลื่อนที่ 1 - 3 มม./วินาที
รูปที่ 3 การทดสอบหาระดับปัจจัยการทดลองในด้านกำลังไฟและความเร็วในการตัด



(ง) รอยตัดจากผิวด้านข้าง
ความเร็วในการเคลื่อนที่ 2 มม./วินาที
กำลังไฟสูงสุดและต่ำสุด 50 - 90 %

จากการทดสอบหาระดับปัจจัยการทดลอง ดังรูปที่ 3 ทำให้สามารถกำหนดระดับของปัจจัยทั้งในด้านความเร็วในการเคลื่อนที่ กำลังสูงสุดและกำลังต่ำสุดได้ โดยความเร็วในการเคลื่อนที่มี 3 ระดับ คือ 1 1.5 และ 2 มิลลิเมตรต่อวินาที และกำลังสูงสุดและกำลังต่ำสุดมี 3 ระดับ คือ 70 80 และ 90 % ดังนั้นในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจึงได้ใช้การออกแบบการทดลองแบบทากูชิ โดยมีปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อตัวอย่างทั้งหมด 3 ปัจจัย โดยแต่ละปัจจัยมี 3 ระดับ ดังตารางที่ 2 และใช้ Orthogonal Array แบบ L9 (3³) ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 2 ปัจจัยและระดับของปัจจัยในการทดลอง

ปัจจัย	ระดับของปัจจัย			หน่วย
	ต่ำ (-1)	กลาง (0)	สูง (+1)	
Speed (S)	1	1.5	2	mm/s
Max Power (P1)	70	80	90	%
Min Power (P2)	70	80	90	%
ตัวแปรตอบสนอง	ความหนาแน่นผิวและความคลาดเคลื่อนของขนาดหลังการตัด			

ตารางที่ 3 Orthogonal Array L9 (3³)

Run Order	Speed (mm/s)	Max Power (%)	Min Power (%)
1	1.0	70	70
2	1.0	80	80
3	1.0	90	90

ตารางที่ 3 Orthogonal Array L9 (3³) (ต่อ)

Run Order	Speed (mm/s)	Max Power (%)	Min Power (%)
4	1.5	70	80
5	1.5	80	90
6	1.5	90	70
7	2.0	70	90
8	2.0	80	70
9	2.0	90	80

3. การวัดค่าความหยาบผิวและขนาดตัวอย่าง

การวัดค่าความหยาบผิวจะทำการวัดด้วยเครื่องวัดความหยาบผิวแบบพกพา (Mitutoyo รุ่น SJ-210, Japan) และสอบเทียบด้วยแผ่นเทียบผิวมาตรฐาน Mitutoyo Ra 2.97 ไมโครเมตร ดังรูปที่ 4 โดยวัดค่าเฉลี่ยความหยาบผิวแบบ Ra (Arithmetical Roughness Mean) ซึ่งเป็นการวัดค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของพื้นที่ผิวที่วัดได้ การวัดค่าความหยาบผิวจะทำการวัดบนพื้นผิวชิ้นงานตามแนวเส้นตรงทั้ง 4 ด้าน ๆ ละ 2 จุด รวมทั้งสิ้น 8 จุดต่อตัวอย่าง จากนั้นนำค่าความหยาบผิวที่วัดได้มาหาค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน การวัดขนาดตัวอย่างหลังการตัดจะทำการวัดด้วยไมโครมิเตอร์วัดนอก (Insize รุ่น 3210-25A, China) ช่วงการวัด 0 - 25 มิลลิเมตร ค่าความละเอียด 0.001 มิลลิเมตร โดยทำการวัดขนาดตัวอย่างด้านกว้าง 2 จุด และด้านยาว 2 จุด รวมทั้งสิ้น 4 จุดต่อตัวอย่าง นำค่าที่วัดได้มาหาค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากนั้นหาค่าร้อยละของความคลาดเคลื่อนของขนาดหลังการตัด (Error Dimension) ดังสมการที่ (1)



(ก) เครื่องวัดความหยาบผิว Mitutoyo รุ่น SJ-210

(ข) แผ่นเทียบผิวมาตรฐาน

รูปที่ 4 เครื่องวัดความหยาบผิวแบบพกพา (Mitutoyo รุ่น SJ-210, Japan) และแผ่นเทียบผิวมาตรฐาน Mitutoyo Ra 2.97 ไมโครเมตร

$$\text{Error Dimension} = \frac{\text{ขนาดที่ต้องการ} - \text{ขนาดที่วัดได้}}{\text{ขนาดที่ต้องการ}} \times 100 \quad (1)$$

4. การทดลองเพื่อยืนยันผล

การทดลองเพื่อยืนยันผลจะเป็นการทดลองเพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จริงกับค่าที่คำนวณได้จากสมการสัมประสิทธิ์การถดถอยสำหรับค่าความหยาบผิวและสมการสัมประสิทธิ์การถดถอยสำหรับความคลาดเคลื่อนของขนาดหลังการตัด โดยการตัดชิ้นงานตัวอย่างจำนวน 10 ตัวอย่าง สำหรับวัดค่าความหยาบผิวและชิ้นงานตัวอย่างจำนวน 10 ตัวอย่าง สำหรับวัดค่าความคลาดเคลื่อนของขนาดหลังการตัด จากนั้นหาค่าเฉลี่ยและกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ต้องไม่มากกว่า 15 %

ผลการทดลอง

1. ผลของค่าความหยาบผิวและค่าความคลาดเคลื่อนของขนาดหลังการตัด

ในการทดลองแบบทากูชิ จะใช้การทดลองทั้งสิ้น 9 การทดลอง โดยตัวอย่างทั้ง 9 การทดลอง จะถูกนำมาวัดค่าความหยาบผิวแบบ Ra และทำการวัดขนาดของตัวอย่างหลังการตัดด้วยเครื่องตัดเลเซอร์ CO₂ จากนั้นจึงนำค่าที่วัดได้ไปดำเนินการหาค่าความคลาดเคลื่อนของขนาดหลังการตัด ผลที่ได้ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการวัดค่าความหยาบผิว (Ra) ขนาดของตัวอย่างหลังการตัดและค่าความคลาดเคลื่อนของขนาดหลังการตัด

Run Order	Speed (mm/s)	Max Power (%)	Min Power (%)	Ra (ไมโครเมตร)	S.D. Ra	Dimension (mm)	S.D. Dim	Error Dimension (%)
1	1.0	70	70	0.184	0.079	14.499	0.013	3.34
2	1.0	80	80	0.159	0.068	14.544	0.008	3.04
3	1.0	90	90	0.118	0.034	14.445	0.007	3.70
4	1.5	70	80	0.217	0.086	14.609	0.030	2.61
5	1.5	80	90	0.168	0.051	14.670	0.210	2.20
6	1.5	90	70	0.183	0.065	14.563	0.037	2.92
7	2.0	70	90	0.185	0.109	14.621	0.021	2.53
8	2.0	80	70	0.193	0.085	14.622	0.111	2.52
9	2.0	90	80	0.200	0.025	14.651	0.087	2.33

การวิเคราะห์ผลการทดลองการหาสภาวะที่เหมาะสมในการตัดอะคริลิกด้วยเครื่องตัดเลเซอร์ CO₂ ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ปัจจัยด้านความเร็ว กำลังสูงสุดและกำลังต่ำสุด โดยผู้วิจัยได้นำค่าความหยาบผิว (Ra) และค่าความคลาดเคลื่อนของขนาดหลังการตัด มาพิจารณาวิเคราะห์ปัจจัยรบกวน (S/N Ratio) ด้วยโปรแกรม Minitab 18 โดยในงานวิจัยนี้ต้องการให้ค่าความหยาบผิวและค่าความคลาดเคลื่อนของขนาดหลังการตัดมีค่าน้อยที่สุด จึงได้พิจารณาเลือก “ค่ายิ่งน้อยยิ่งดี (Smaller is Better)” คือค่าที่ดีที่สุด ดังสมการที่ (2) และผลการวิเคราะห์ปัจจัยรบกวนของเทคนิคทากูชิ ดังตารางที่ 5

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left[\sum_{i=1}^n \frac{y^2}{n} \right] \quad (2)$$

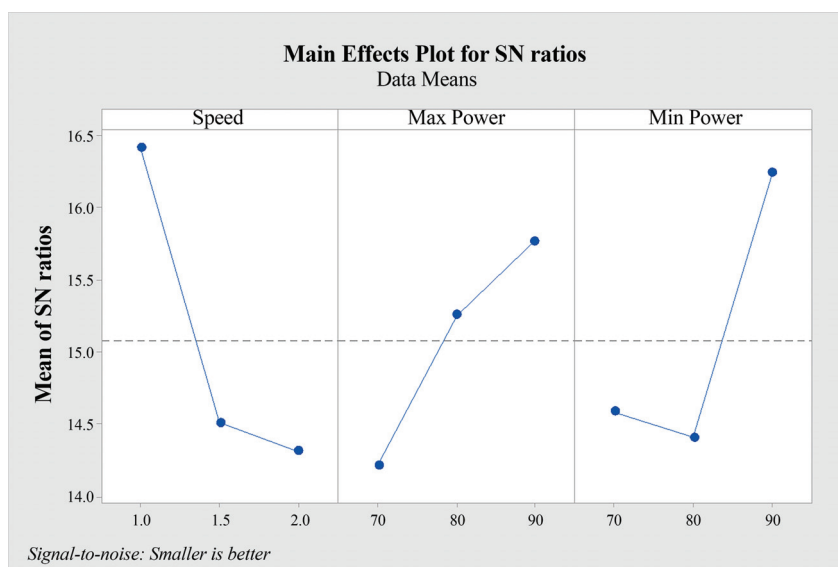
เมื่อ

S/N คือ อัตราส่วนสัญญาณไปยังสิ่งรบกวน (Signal to Noise Ratio)
 y คือ ค่าของตัวแปรตาม (Response Variable)
 n คือ จำนวนชุดข้อมูล

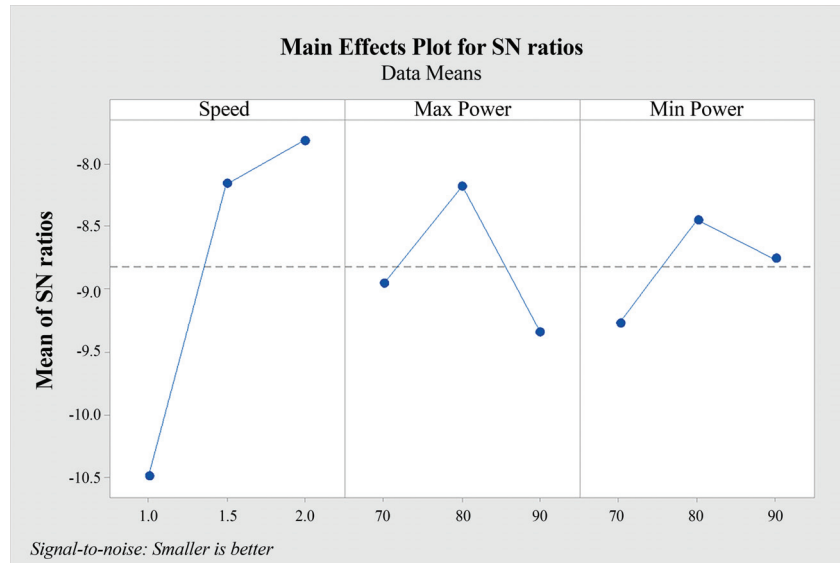
ตารางที่ 5 ค่า S/N Ratio ของค่าความหยาบผิว (Ra) และค่าความคลาดเคลื่อนของขนาดหลังการตัด

Run Order	Speed (mm/s)	Max Power (%)	Min Power (%)	S/N ratio of Ra (ไมโครเมตร)	S/N ratio of Error Dimension (%)
1	1.0	70	70	14.7036	-10.4749
2	1.0	80	80	15.9721	-9.6575
3	1.0	90	90	18.5624	-11.3640
4	1.5	70	80	13.2708	-8.3328
5	1.5	80	90	15.4938	-6.8485
6	1.5	90	70	14.7510	-9.3077
7	2.0	70	90	14.6566	-8.0624
8	2.0	80	70	14.2889	-8.0280
9	2.0	90	80	13.9794	-7.3471

ตารางที่ 5 แสดงผลค่า S/N Ratio ของค่าความหยาบผิว (Ra) และค่าความคลาดเคลื่อนของขนาดหลังการตัด จากสมการที่ (2) ค่ายิ่งน้อยยิ่งดี (Smaller is Better) ตามการออกแบบการทดลองของทากูชิแบบ Orthogonal Array L9 (3^3) พบว่า S/N Ratio ของค่าความหยาบผิว (Ra) ที่มีค่ามากที่สุดที่ 18.5624 ไมโครเมตร ซึ่งได้จากปัจจัยด้านความเร็วในการตัด 1 มิลลิเมตรต่อวินาที และกำลังสูงสุดและต่ำสุดเท่ากับ 90 % ส่วน S/N Ratio ของความคลาดเคลื่อนของขนาดหลังการตัดที่มีค่ามากที่สุดที่ -6.8485 ไมโครเมตร ซึ่งได้จากปัจจัยด้านความเร็วในการตัด 1.5 มิลลิเมตรต่อวินาที และกำลังสูงสุด 80 % และกำลังต่ำสุดเท่ากับ 90 % อย่างไรก็ตามผลที่ได้นี้เกิดจากตัวอย่างการทดลองเพียง 9 ตัวอย่างเท่านั้น ดังนั้นเพื่อให้ครอบคลุมปัจจัยทั้งหมดที่มีผลกระทบต่อค่าความหยาบผิว (Ra) และค่าความคลาดเคลื่อนของขนาดหลังการตัด จึงต้องทำการวิเคราะห์ปัจจัยแต่ละปัจจัยและแต่ละระดับของปัจจัย โดยการวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยหลักของค่าความหยาบผิว ดังรูปที่ 4 และผลกระทบของปัจจัยหลักของความคลาดเคลื่อนของขนาดหลังการตัด ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ผลกระทบของปัจจัยหลักสำหรับ S/N Ratio ของค่าความหยาบผิว



รูปที่ 6 ผลกระทบของปัจจัยหลักสำหรับค่า S/N Ratio ของค่าคลาดเคลื่อนของขนาดหลังการตัด

จากรูปที่ 5 แสดงผลกระทบของปัจจัยหลักสำหรับค่า S/N Ratio ของค่าความหยาบผิวพบว่า เมื่อพิจารณาถึงผลกระทบของปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อค่าความหยาบผิวทั้ง 3 ปัจจัย ได้แก่ ความเร็ว กำลังสูงสุด และกำลังต่ำสุด จะเห็นได้ว่าปัจจัยหลักสำหรับค่า S/N Ratio ที่ส่งผลให้ค่าความหยาบผิวน้อยที่สุด คือความเร็ว 1.0 มิลลิเมตรต่อวินาที กำลังสูงสุดและกำลังต่ำสุด 90 % ซึ่งจะทำให้ค่าความหยาบผิวน้อยที่สุดที่ 0.118 ไมโครเมตร เมื่อเพิ่มความเร็วในการเคลื่อนที่ให้สูงขึ้นจะทำให้ค่าเฉลี่ยของ S/N Ratio ของค่าความหยาบผิวลดลง [7], [14] ซึ่งตรงกันข้ามกับค่ากำลังสูงสุดและกำลังต่ำสุด เมื่อเพิ่มกำลังสูงสุดและกำลังต่ำสุดให้สูงขึ้นจะทำให้ค่าเฉลี่ยของ S/N Ratio ของค่าความหยาบผิวเพิ่มขึ้น ผลเช่นนี้เกิดจากความเร็วในการตัดที่ต่ำ กำลังเลเซอร์ที่สูงจะส่งผลให้คุณภาพของพื้นผิวดีขึ้นเนื่องจากเกิดความร้อนสูงในบริเวณที่ถูกตัดทำให้การกำจัดโลหะหลอมเหลวออกจากบริเวณตัดได้อย่างมีประสิทธิภาพ ความเร็วในการตัดที่สูงขึ้นทำให้พื้นผิวหยาบขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิลดลง การเพิ่มกำลังเลเซอร์จะปรับปรุงการไหลของการหลอมในบริเวณการตัด และส่งผลให้คุณภาพพื้นผิวดีขึ้น [20] - [21]

จากรูปที่ 6 แสดงผลกระทบของปัจจัยหลักสำหรับค่า S/N Ratio ของค่าคลาดเคลื่อนของขนาดหลังการตัดพบว่า เมื่อพิจารณาถึงผลกระทบของปัจจัยหลักสำหรับค่า S/N Ratio ที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของขนาดหลังการตัด จะเห็นได้ว่า เมื่อเพิ่มความเร็วในการเคลื่อนที่ให้สูงขึ้นจาก 1 มิลลิเมตรต่อวินาที ไปจนถึง 2 มิลลิเมตรต่อวินาที จะทำให้ค่าเฉลี่ยของ S/N Ratio ของค่าความคลาดเคลื่อนของขนาดหลังการตัดจะเพิ่มขึ้น [7], [14] ซึ่งแตกต่างกับค่ากำลังสูงสุดและกำลังต่ำสุด เมื่อเพิ่มกำลังสูงสุดและกำลังต่ำสุดให้สูงขึ้นจาก 70 % ไป 80 % จะทำให้ค่าเฉลี่ยของ S/N Ratio ของค่าความคลาดเคลื่อนของขนาดหลังการตัดจะเพิ่มขึ้นและลดลง เมื่อกำลังสูงสุดและกำลังต่ำสุดเพิ่มขึ้นจาก 80 % ไปจนถึง 90 % ดังนั้นปัจจัยหลักที่ส่งผลให้ค่าความคลาดเคลื่อนของขนาดหลังการตัดน้อยที่สุด คือ ความเร็ว 2.0 มิลลิเมตรต่อวินาที กำลังสูงสุดและกำลังต่ำสุด 80 % ซึ่งจะทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนของขนาดหลังการตัดน้อยที่สุด ผลนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ [17] ที่กล่าวว่า ความเร็วในการเคลื่อนที่ของเลเซอร์เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับทั้งความหยาบของพื้นผิวและความคลาดเคลื่อนของขนาด ความเร็วในการเคลื่อนที่ของเลเซอร์ที่สูงขึ้นทำให้ความหยาบของพื้นผิวเพิ่มขึ้นและความคลาดเคลื่อนของขนาดลดลง

2. การวิเคราะห์ความแปรปรวน

หลังจากวิเคราะห์ปัจจัยการทดลองด้วยเทคนิคทางสถิติแล้ว ผู้วิจัยจึงได้ทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบ ANOVA เพื่อศึกษาความแปรปรวนของปัจจัยที่ส่งผลต่อสภาวะที่เหมาะสมในการตัดอะคริลิกด้วยเครื่องตัดเลเซอร์ CO₂ ในการวิเคราะห์ความแปรปรวนจะใช้ระดับความเชื่อมั่นที่ 95 % ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน

ของค่าความหยาบผิว ดังตารางที่ 6 สามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยสำหรับค่าความหยาบผิวได้ ดังสมการที่ (3) และผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความคลาดเคลื่อนของขนาดหลังการตัด ดังตารางที่ 7 สามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยสำหรับความคลาดเคลื่อนของขนาดหลังการตัดได้ ดังสมการที่ (4)

ตารางที่ 6 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของความหยาบผิว

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	3	0.004806	0.001602	5.03	0.057
Speed	1	0.002282	0.002282	7.16	0.044*
Max Power	1	0.001204	0.001204	3.78	0.109
Min Power	1	0.001320	0.001320	4.15	0.097
Error	5	0.001592	0.000318		
Total	8	0.006398			
S = 0.0178459		R-sq = 75.11 %		R-sq(adj) = 60.18 %	

สมการสัมประสิทธิ์การถดถอยสำหรับค่าความหยาบผิว

$$Ra = 0.3521 + 0.0390 \text{ Speed} - 0.001417 \text{ Max Power} - 0.001483 \text{ Min Power} \quad (3)$$

จากตารางที่ 6 แสดงให้เห็นว่า ปัจจัยด้านกำลังสูงสุดและกำลังต่ำสุดไม่มีผลต่อค่าความหยาบผิวของ อะคริลิก หลังการตัดด้วยเครื่องตัดเลเซอร์อย่างมีนัยสำคัญ โดยปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าความหยาบผิวอย่างมีนัยสำคัญคือ ปัจจัยด้านความเร็ว โดยสมการสัมประสิทธิ์การถดถอยสำหรับค่าความหยาบผิวดังสมการที่ (3)

ตารางที่ 7 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความคลาดเคลื่อนของขนาดหลังการตัด

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	3	1.27223	0.42408	3.17	0.123
Speed	1	1.21500	1.21500	9.07	0.030
Max Power	1	0.03682	0.03682	0.27	0.622*
Min Power	1	0.02042	0.02042	0.15	0.712*
Error	5	0.66966	0.13393		
Total	8	1.94189			
S = 0.365966		R-sq = 65.52 %		R-sq(adj) = 44.82 %	

สมการสัมประสิทธิ์การถดถอยสำหรับความคลาดเคลื่อนของขนาดหลังการตัด

$$\text{Error Dimension} = 3.99 - 0.900 \text{ Speed} + 0.0078 \text{ Max Power} - 0.0058 \text{ Min Power} \quad (4)$$

จากตารางที่ 7 แสดงให้เห็นว่า ปัจจัยด้านความเร็วในการตัดมีผลกระทบต่อขนาดของชิ้นงาน หลังการตัดอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งมีค่า P-Value ไม่เกินระดับนัยสำคัญ 0.05 ในส่วนปัจจัยด้านกำลังสูงสุดและกำลังต่ำสุดไม่มีผลกระทบต่อขนาดของชิ้นงานหลังการตัดอย่างมีนัยสำคัญ โดยสมการสัมประสิทธิ์การถดถอยสำหรับความคลาดเคลื่อนของขนาดหลังการตัด ดังสมการที่ 4

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของความหยาบผิวและค่าความคลาดเคลื่อนของขนาด หลังการตัด ดังตารางที่ 6 และตารางที่ 7 พบว่า ค่า R-sq(adj) มีค่าเท่ากับ 60.18 % และ 44.82 % สามารถ

อธิบายได้ว่า ค่า $R\text{-sq}(\text{adj})$ ที่มีค่าต่ำกว่า 80 % แสดงถึงโมเดลไม่สามารถอธิบายความแปรปรวนได้ดีพอ โดยโมเดล Linear Regression ที่ได้รับการทดสอบ ไม่สามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้อย่างเหมาะสม ซึ่งอาจจะเกิดจากมีบางตัวแปรที่ใช้ในการทดลองส่งผลต่อตัวแปรตามมาก ในการดำเนินการวิจัยในอนาคตควรเพิ่มจำนวนสิ่งตัวอย่างให้มากขึ้น และใช้วิธี Blocking ตัวแปรที่มีแนวโน้มว่าจะมีความแปรปรวนมากกับตัวแปรตาม

3. การทดลองเพื่อยืนยันผล

ผลการคำนวณจากสมการสัมประสิทธิ์การถดถอยสำหรับค่าความหยาบผิว (สมการที่ (3)) จะได้ค่า R_a เท่ากับ 0.139 ไมโครเมตร โดยแทนค่าความเร็วตัดเท่ากับ 1 มิลลิเมตรต่อวินาที กำลังไฟสูงสุดและต่ำสุดเท่ากับ 90 % ส่วนค่าความคลาดเคลื่อนของขนาดหลังการตัด (สมการที่ (4)) จะเท่ากับ 2.35 % ที่ความเร็วตัดเท่ากับ 2 มิลลิเมตรต่อวินาที กำลังไฟสูงสุดและกำลังไฟต่ำสุดเท่ากับ 80 %

ผลการทดลองวัดค่าความหยาบผิวซ้ำ ดังตารางที่ 8 โดยใช้ตัวอย่างจำนวน 10 ตัวอย่าง (ค่าเฉลี่ยจากการวัดบนพื้นผิวทั้ง 4 ด้านละ 1 จุด) พบว่า ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของตัวอย่างทั้ง 10 ตัวอย่างมีค่าเท่ากับ 0.1508 ไมโครเมตร ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.02 ซึ่งแตกต่างจากค่าความหยาบผิวที่ได้จากสมการสัมประสิทธิ์การถดถอยอยู่ 0.0118 ไมโครเมตร คิดเป็นร้อยละ 8.5 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ผลการวัดค่าความคลาดเคลื่อนของขนาดหลังการตัดซ้ำ โดยใช้ตัวอย่างจำนวน 10 ตัวอย่าง (ค่าเฉลี่ยจากการวัด 2 จุด) ดังตารางที่ 9 พบว่า ค่าความคลาดเคลื่อนของขนาดหลังการตัดเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 2.542 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.123 ซึ่งแตกต่างจากค่าความคลาดเคลื่อนของขนาดหลังการตัดที่ได้จากสมการสัมประสิทธิ์การถดถอยอยู่ 0.192 คิดเป็นร้อยละ 8.17 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

ตารางที่ 8 ผลการวัดค่าความหยาบผิวซ้ำ

ตัวอย่าง ที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Average
R_a	0.135	0.137	0.155	0.156	0.168	0.160	0.143	0.159	0.129	0.168	0.1508
S.D.	0.011	0.021	0.025	0.032	0.030	0.024	0.010	0.028	0.010	0.008	0.020

ตารางที่ 9 ผลการวัดค่าความคลาดเคลื่อนของขนาดหลังการตัดซ้ำ

ตัวอย่าง ที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Average
Error	2.567	2.403	2.367	2.180	2.313	2.207	2.670	2.790	2.253	2.767	2.452
Dimension											
S.D.	0.170	0.101	0.208	0.027	0.198	0.016	0.077	0.136	0.013	0.287	0.123

สรุปผล

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความหยาบผิวและขนาดของชิ้นงานในการตัดอะคริลิกด้วยเครื่องตัดเลเซอร์ CO_2 โดยวิธีทากูชิ ผลการทดลองได้รับการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อทำความเข้าใจถึงอิทธิพลของปัจจัย ได้แก่ ความเร็ว กำลังสูงสุดและกำลังต่ำสุด ผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ปัจจัยด้านความเร็วส่งผลต่อค่าความหยาบผิวและความคลาดเคลื่อนของขนาดหลังการตัดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

2. เมื่อลดความเร็วในการเคลื่อนที่ให้ต่ำลง และเพิ่มกำลังสูงสุดและกำลังต่ำสุดให้สูงขึ้น จะทำให้ค่าความหยาบผิวลดลง เนื่องจากเกิดความร้อนสูงในบริเวณที่ถูกตัดทำให้การกำจัดโลหะหลอมเหลวออกจากบริเวณตัดได้อย่างมีประสิทธิภาพและส่งผลให้คุณภาพพื้นผิวดีขึ้น

3. ค่าความหยาบผิว (Ra) สำหรับการทดลองโดยวิธีทากูชิ แบบ Orthogonal Array L9 อยู่ระหว่าง 0.118 ถึง 0.217 ไมโครเมตร ซึ่งปัจจัยหลักที่ส่งผลให้ค่าความหยาบผิวน้อยที่สุด คือความเร็ว 1.0 มิลลิเมตรต่อวินาที กำลังสูงสุดและกำลังต่ำสุด 90 %

4. ค่าความคลาดเคลื่อนของขนาดหลังการตัดสำหรับการทดลองโดยวิธีทากูชิ แบบ Orthogonal Array L9 อยู่ระหว่าง 2.20 ถึง 3.70 % ซึ่งปัจจัยหลักที่ส่งผลให้ค่าความคลาดเคลื่อนของขนาดหลังการตัดน้อยที่สุด คือ ความเร็ว 2.0 มิลลิเมตรต่อวินาที กำลังสูงสุดและกำลังต่ำสุด 80 %

5. ผลของงานวิจัยนี้สามารถนำไปเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้การตัดอะคริลิกกับเครื่องตัดเลเซอร์ CO₂ ที่มีกำลังของหลอดเลเซอร์ที่ใกล้เคียงกันได้

ข้อเสนอแนะ

1. งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองกับเครื่องตัดเลเซอร์ CO₂ ที่มีกำลังของหลอดเลเซอร์ขนาด 100 วัตต์เท่านั้น โดยเครื่องตัดเลเซอร์ CO₂ ที่มีขายทั่วไปในท้องตลาดนั้นจะมีกำลังของหลอดเลเซอร์ที่แตกต่างกัน ตั้งแต่ 50 80 100 130 และ 150 วัตต์ เป็นต้น หากกำลังของหลอดเลเซอร์เปลี่ยนไป อาจส่งผลต่อปัจจัยในการตัดที่แตกต่างออกไป

2. ถึงแม้ว่าการตัดชิ้นงานให้ขาดออกจากกัน โดยใช้ความเร็วในการเคลื่อนที่ต่ำและใช้กำลังสูงขึ้น จะทำให้ผิวเรียบที่สุดตามผลการทดลอง แต่อย่างไรก็ตามการตัดชิ้นงานโดยเริ่มต้นจากผิวบนจนทะลุลงสู่ผิวด้านล่างอาจทำให้เกิดความเอียงหรือการโก่งที่ผิวชิ้นงานได้ ดังนั้นงานวิจัยต่อไปจะเป็นการศึกษาถึงผลกระทบของความเร็วและกำลังที่ส่งผลต่อคุณภาพของชิ้นงานหลังการตัดด้วยเครื่องตัดเลเซอร์ CO₂

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการและโลจิสติกส์ โครงการจัดตั้งคณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องวัดความหยาบผิว และขอขอบคุณสาขาวิชาทัศนศิลป์ และมีเดียอาร์ต คณะมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏราชชนครินทร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือ สถานที่ และสิ่งอำนวยความสะดวกต่าง ๆ ให้กับทีมงานวิจัย งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

References

- [1] Pawar, E. (2016). A Review Article on Acrylic PMMA. **IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering**. Vol. 13, Issue 2, pp. 1-4. DOI: 10.9790/1684-1302010104
- [2] Hwayyin, R. N. and Hammood, A. S. (2019). Improving the Properties of Acrylic by Creating Crack Using Laser Beam. In **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. Vol. 579, DOI: 10.1088/1757-899X/579/1/012042
- [3] Mushtaq, R. T., Wang, Y., Rehman, M., Khan, A. M., and Mia, M. (2020). State-of-the-Art and Trends in CO₂ Laser Cutting of Polymeric Materials-A Review. **Materials**. Vol. 13, Issue 17, pp. 1-23. DOI: 10.3390/ma13173839
- [4] Wangikar, S. S., Dixit, M. M., Wadekar, S. G., Nagtilak, H. R., Hingmire, N. D., and Shinde, D. P. (2021). Parametric Influence Study for Laser Cutting on Acrylic. In **Proceedings of National Conference on Relevance of Engineering and Science for Environment and Society**. pp. 104-107. DOI: 10.21467/proceedings.118.15

- [5] Moradi, M., Moghadam, M. K., Shamsborhan, M., Beiranvand, Z. M., Rasouli, A., Vahdati, M., Bakhtiari, A., and Bodaghi, M. (2021). Simulation, Statistical Modeling, and Optimization of CO₂ Laser Cutting Process of Polycarbonate Sheets. **Optik**. Vol. 225, DOI: 10.1016/j.ijleo.2020.164932
- [6] Palanisamy, C., Efzan, M. N. E., and Wen, C. C. (2023). Parametric and Heat Affected Zone Study on CO₂ Laser Cutting of Acrylic. **MethodsX**. Vol. 10, DOI: 10.1016/j.mex.2023.102125
- [7] Varsi, A. and Gupta, A. (2022). Influence of Resolution on Surface Roughness During CO₂ Laser Beam Machining. **International Journal of Mechanical Engineering**. Vol. 7, No. 1, pp. 4797-4805
- [8] Anbazhagan, G., Suseela, S. B., and Sankararajan, R. (2023). Design, Analysis and Fabrication of Solid Polymer Microneedle Patch Using CO₂ Laser and Polymer Molding. **Drug Delivery and Translational Research**. Vol. 13, pp. 1813-1827. DOI: 10.1007/s13346-023-01296-w
- [9] Shehab, A. A., Naemah, I. M., Al-Bawee, A., and Al-Ezzi, A. (2020). Hole Characteristic of CO₂ Laser Drilling of Poly-methyl Methacrylate PMMA. **Journal of Mechanical Engineering Research and Developments**. Vol. 43, No. 3, pp. 186-196
- [10] Pathak, A., Siddiqui, T. U., and Hussian, F. (2019). Investigation of Process Parameters of CO₂ Laser Beam Machining on Acrylic. **International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology**. Vol. 8, Issue 5, pp. 4751-4757. DOI: 10.15680/IJIRSET.2019.0805159
- [11] Hanizam, H., Salleh, M. S., Omar, M. Z., and Sulong, A. B. (2019). Optimisation of Mechanical Stir Casting Parameters for Fabrication of Carbon Nanotubes-aluminium Alloy Composite Through Taguchi Method. **Journal of Materials Research and Technology**. Vol. 8, Issue 2, pp. 2223-2231. DOI: 10.1016/j.jmrt.2019.02.008.
- [12] Rao, R. V. (2011). **Advanced Modeling and Optimization of Manufacturing Processes: International Research and Development**. Springer Science & Business Media
- [13] Elsheikh, A. H., Deng, W., and Showaib, E. A. (2020). Improving Laser Cutting Quality of Polymethylmethacrylate Sheet: Experimental Investigation and Optimization. **Journal of Materials Research and Technology**. Vol. 9, Issue 2, pp. 1325-1339. DOI: 10.1016/j.jmrt.2019.11.059
- [14] Oktatian, E., Rosyidi, C. N., Pujiyanto, E., and Oktatian, E. M. (2021). Optimization of CNC CO₂ Laser Cutting Process Parameters on Acrylic Cutting Using Taguchi Grey Relational Analysis and Response Surface Methodology. **Research Square**. DOI: 10.21203/rs.3.rs-1048691/v1
- [15] Kam, M., İpekçi, A., and Şengül, Ö. (2023). Investigation of the Effect of FDM Process Parameters on Mechanical Properties of 3D Printed PA12 Samples Using Taguchi Method. **Journal of Thermoplastic Composite Materials**. Vol. 36, Issue 1, pp. 307-325. DOI: 10.1177/08927057211006459
- [16] Hameed, A. Z., Aravind Raj, S., Kandasamy, J., Shahzad, M. A., and Baghdadi, M. A. (2022). 3D Printing Parameter Optimization Using Taguchi Approach to Examine Acrylonitrile Styrene Acrylate (ASA) Mechanical Properties. **Polymers**. Vol. 14, No. 16, pp. 1-15. DOI: 10.3390/polym14163256
- [17] Ninikas, K., Kechagias, J., and Salonitis, K. (2021). The Impact of Process Parameters on Surface Roughness and Dimensional Accuracy During CO₂ Laser Cutting of PMMA Thin Sheets. **Journal of Manufacturing and Material Processing**. Vol. 5, Issue 3, DOI: 10.3390/jmmp5030074



- [18] Badoniya, P. (2018). CO₂ Laser Cutting of Different Materials-A Review. **International Journal of Engineering Research and Technology (IRJET)**. Vol. 5, Issue 6, pp. 2103-2115
- [19] Khan, M. M. A., Saha, S., Romoli, L., and Kibria, M. H. (2021). Optimization of Laser Engraving of Acrylic Plastics from the Perspective of Energy Consumption, CO₂ Emission and Removal Rate. **Journal of Manufacturing and Materials Processing**. Vol. 5, Issue 3, DOI: 10.3390/jmmp5030078
- [20] Sharifi, M. and Akbari, M. (2019). Experimental Investigation of the Effect of Process Parameters on Cutting Region Temperature and Cutting Edge Quality in Laser Cutting of AL6061T6 Alloy. **International Journal for Light and Electron Optics**. Vol. 184, pp. 457-463. DOI: 10.1016/j.ijleo.2019.04.105
- [21] Khoshaim, A. B., Elsheikh, A. H., Moustafa, E. B., Basha, M., and Showaib, E. A. (2021). Experimental Investigation on Laser Cutting of PMMA Sheets: Effects of Process Factors on Kerf Characteristics. **Journal of Materials Research and Technology**. Vol. 11, pp. 235-246. DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.01.012

แบบจำลองกำหนดการเชิงจำนวนเต็มแบบผสมสำหรับการแก้ปัญหา
สถานที่ตั้งและการจัดเส้นทางแบบสองระดับในห่วงโซ่อุปทานชีวมวล

A Mixed-Integer Programming Model for Solving a Two-Level Location-Routing Problem in Biomass Supply Chains

เจ้านาย ครุฑไชยันต์¹ และเอื้ออารี บุญเพิ่ม^{1*}

Jaonai Krutchaiyan¹ and Aua-aree Boonperm^{1*}

Received: June 3, 2024; Revised: July 5, 2024; Accepted: July 10, 2024

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้นำเสนอแบบจำลองกำหนดการเชิงจำนวนเต็มแบบผสมเพื่อแก้ปัญหาสถานที่ตั้งและจัดเส้นทางเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการจัดการห่วงโซ่อุปทานชีวมวลแบบสองระดับ โดยมีเป้าหมายในการเลือกศูนย์รวบรวมไม้และกำหนดเส้นทางการขนส่งจากพื้นที่ในป่าไม้ไปยังศูนย์รวบรวมและจัดเส้นทางจากศูนย์รวบรวมไปยังโรงกลั่นชีวภาพ เพื่อให้ได้ต้นทุนรวมที่ต่ำที่สุด เนื่องจากแบบจำลองเริ่มต้นเป็นแบบจำลองไม่เชิงเส้น ผู้วิจัยจึงได้ทำการแปลงแบบจำลองให้เป็นแบบจำลองเชิงเส้นเพื่อให้แบบจำลองสามารถหาผลลัพธ์ได้ เมื่อทดสอบแบบจำลองที่นำเสนอด้วยข้อมูลชีวมวลพบว่า ผลลัพธ์ที่ได้จากการจัดเส้นทางทั้งสองระดับสามารถลดค่าใช้จ่ายโดยรวมได้ถึง 12.92 % เมื่อเปรียบเทียบกับ การจัดเส้นทางเพียงระดับเดียว ดังนั้น ผลลัพธ์ที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพโลจิสติกส์ของห่วงโซ่อุปทานชีวมวลในประเทศไทย ซึ่งจะส่งเสริมการพัฒนาพลังงานชีวมวลที่ยั่งยืนในอนาคตได้

คำสำคัญ : แบบจำลองกำหนดการเชิงจำนวนเต็มแบบผสม; ปัญหาสถานที่ตั้งและการจัดเส้นทางแบบสองระดับ; ห่วงโซ่อุปทานชีวมวล; เทคนิคการแปลงเชิงเส้น

¹ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (ศูนย์รังสิต)

¹ Faculty of Science and Technology, Thammasat University

* Corresponding Author; Tel. 08 1735 2453, E - mail: aua-aree@mathstat.sci.tu.ac.th

Abstract

This study presents a mixed-integer programming model to address the location and routing problem for optimizing a two-level biomass supply chain. The primary objective is to select collection points and determine transportation routes from forest areas to collection points and from these points to biorefineries to minimize the total cost. While the initial model is non-linear, a linearization approach facilitates efficient solution finding. Real-world biomass data is used to evaluate the model's effectiveness. The results demonstrate that the two-level routing strategy significantly reduces overall costs by up to 12.92 % compared to a single-level approach. Consequently, the findings of this study can enhance the logistics efficiency of the biomass supply chain in Thailand, promoting the sustainable development of biomass energy in the future.

Keywords: Mixed-Integer Programming Model; Two-Level Location-Routing Problem; Biomass Supply Chains; Linearization Technique

บทนำ

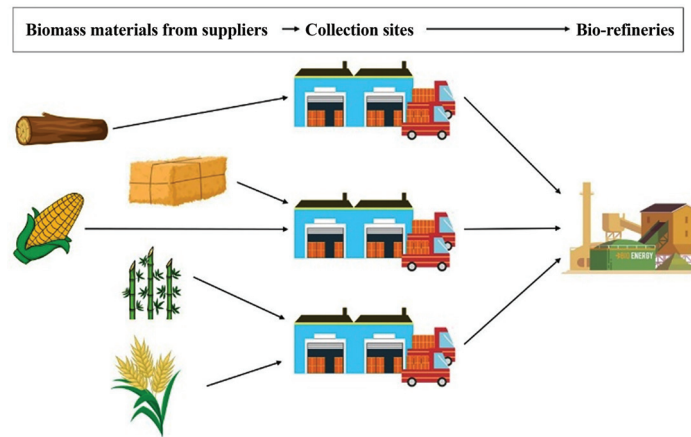
ปัญหาพลังงานเป็นหนึ่งในความท้าทายที่สำคัญในศตวรรษที่ 21 ซึ่งมีผลกระทบต่อทุกด้านของชีวิตมนุษย์และสิ่งแวดล้อม การพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น น้ำมัน ถ่านหิน และก๊าซธรรมชาติ นำไปสู่การปล่อยก๊าซเรือนกระจกซึ่งเป็นสาเหตุหลักของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ นอกจากนี้การขุดเจาะและการสกัดเชื้อเพลิงฟอสซิลยังสร้างความเสียหายต่อสิ่งแวดล้อม ทั้งการรุกรานป่า การทำลายถิ่นที่อยู่อาศัยของสัตว์ และการก่อให้เกิดมลพิษทางน้ำและอากาศ ในขณะเดียวกันทรัพยากรเหล่านี้ก็มีจำกัดและกำลังลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งก่อให้เกิดความไม่มั่นคงทางพลังงานและผลกระทบทางเศรษฐกิจทั่วโลก

การหาแหล่งพลังงานทางเลือกที่สะอาดและยั่งยืนจึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างเร่งด่วน พลังงานหมุนเวียน เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานน้ำ และพลังงานชีวมวล กลายเป็นทางเลือกที่น่าสนใจเพราะสามารถใช้ทรัพยากรธรรมชาติที่ไม่มีวันหมดและมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยกว่า อย่างไรก็ตามการปรับเปลี่ยนไปใช้พลังงานทางเลือกยังคงเผชิญกับความท้าทายหลายประการ เช่น ความไม่แน่นอนของแหล่งพลังงานหมุนเวียน ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งและบำรุงรักษาสูง รวมถึงการปรับเปลี่ยนโครงสร้างพื้นฐานด้านพลังงานที่มีอยู่ การแก้ไขปัญหาดังกล่าวอย่างยั่งยืนจึงต้องอาศัยการวิจัยและนวัตกรรมเทคโนโลยี รวมถึงการสนับสนุนทางนโยบายจากภาครัฐและความร่วมมือระหว่างประเทศเพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสร้างอนาคตที่มั่นคงและยั่งยืน

จากข้อมูลของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน [1] ได้มีการระบุการใช้พลังงานทดแทนอยู่ที่ 14.11 % ของความต้องการพลังงานทั้งหมด โดยมีการใช้พลังงานชีวมวลคิดเป็น 7.65 % ของการใช้พลังงานทดแทนทั้งหมดในปัจจุบัน ดังนั้น ชีวมวลจึงมีบทบาทสำคัญในการผลิตไฟฟ้าและความร้อน จากศักยภาพของพลังงานทดแทนนี้ แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2561 - 2580 (AEDP2018) ของรัฐบาลจึงมีเป้าหมายที่จะเพิ่มการใช้พลังงานหมุนเวียนให้ถึง 30 % ภายในปี พ.ศ. 2580 และพลังงานชีวมวลจึงกลายเป็นกุญแจสำคัญในการบรรลุเป้าหมายนี้

พลังงานชีวมวลเป็นพลังงานที่ได้จากวัสดุชีวภาพหรือสิ่งมีชีวิตที่มีอยู่ในธรรมชาติ เช่น พืช เศษไม้ เศษเหลือจากการเกษตร ขยะอินทรีย์ และมูลสัตว์ ซึ่งการนำวัสดุเหล่านี้มาใช้เป็นพลังงานเป็นวิธีการที่ยั่งยืนและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากชีวมวลเป็นแหล่งพลังงานที่สามารถผลิตใหม่ได้ ต่างจากเชื้อเพลิง

ฟอสซิลที่มีอยู่อย่างจำกัด โดยห่วงโซ่อุปทานชีวมวล (Biomass Supply Chain - BSC) จะครอบคลุมทุกขั้นตอนที่เกี่ยวข้องในกระบวนการนี้ ซึ่งจะเริ่มตั้งแต่การจัดหาและการเก็บเกี่ยวไปจนถึงการขนส่ง การแปรรูป และการนำไปใช้ผลิตพลังงานในที่สุด ชีวมวลสามารถแปลงเป็นพลังงานได้หลายวิธี เช่น การเผาไหม้ การหมัก หรือกระบวนการทางเคมี ซึ่งเป็นทางเลือกที่ยั่งยืนและยืดหยุ่นแทนการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล



รูปที่ 1 ตัวอย่างห่วงโซ่อุปทานชีวมวล

จากรูปที่ 1 ห่วงโซ่อุปทานชีวมวล (BSC) เริ่มต้นด้วยการจัดหาวัตถุดิบชีวมวล เช่น เศษไม้หรือเศษเหลือจากการเกษตร จากนั้นวัตถุดิบชีวมวลจะถูกขนส่งไปยังโรงงานแปรรูปหรือโรงไฟฟ้าชีวมวล (Bio-Refinery) ที่ซึ่งชีวมวลถูกเปลี่ยนเป็นรูปแบบที่ใช้งานได้ผ่านกระบวนการต่าง ๆ เช่น การสับ การบด หรือการทำเป็นเม็ด โดยขั้นตอนสุดท้ายคือการใช้ชีวมวลแปรรูปเพื่อผลิตไฟฟ้า ความร้อน หรือเชื้อเพลิงชีวภาพ อย่างไรก็ตามหนึ่งในประเด็นสำคัญในห่วงโซ่อุปทาน คือ การขนส่งภายในห่วงโซ่อุปทานชีวมวล ซึ่งเกี่ยวข้องกับขั้นตอนที่ซับซ้อน เช่น การจัดหา การแปรรูป ซึ่งปัญหาเหล่านี้อาจเกี่ยวข้องกับปัญหาการเลือกสถานที่ตั้ง (Facility Location Problem: FLP) ซึ่งสามารถนำมาแก้ปัญหาการจัดการห่วงโซ่อุปทานชีวมวลได้ เช่น [2] ได้ประยุกต์ใช้รูปแบบปัญหา FLP โดยสร้างแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์เพื่อแก้ปัญหาการหาตำแหน่งที่ตั้งที่เหมาะสมของโรงกลั่นชีวภาพและตำแหน่งศูนย์รวบรวมก่อนส่งวัตถุดิบชีวมวลไปยังโรงกลั่นชีวภาพ นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยอีกมากมายที่นำรูปแบบปัญหา FLP มาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาห่วงโซ่อุปทานชีวมวล [3] - [5]

อีกหนึ่งปัญหาที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการจัดการห่วงโซ่อุปทานชีวมวล คือ ปัญหาการจัดเส้นทางของยานพาหนะ (Vehicle Routing Problem: VRP) [6] - [8] ซึ่งปัญหา VRP ถูกนำมาใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการขนส่งชีวมวลจากแหล่งกำเนิดไปยังโรงงานแปรรูปหรือโรงไฟฟ้าชีวมวล โดยจะช่วยลดต้นทุน เพิ่มประสิทธิภาพลดการปล่อยมลพิษ และเพิ่มความยั่งยืน เช่น การจัดส่งไม้จากป่าไปยังโรงงานแปรรูป หรือขนส่งเศษวัสดุทางการเกษตรจากฟาร์มไปยังโรงงานผลิตพลังงานชีวมวล ซึ่งมีงานวิจัยอีกมากมายที่นำรูปแบบปัญหา VRP มาใช้ในการแก้ปัญหาห่วงโซ่อุปทานชีวมวล [9] - [12]

จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นว่า ปัญหา FLP และปัญหา VRP สามารถนำมาใช้ในการแก้ปัญหาห่วงโซ่อุปทานชีวมวล ทั้งการเลือกสถานที่ตั้งที่เหมาะสมและการจัดเส้นทางในการขนส่งชีวมวลให้มีประสิทธิภาพได้ ต่อมานักวิจัยจึงได้รวมปัญหา FLP และปัญหา VRP เข้าด้วยกัน และเรียกปัญหานี้ว่า ปัญหาสถานที่ตั้งและการจัดเส้นทาง (Location-Routing Problem: LRP) [13] - [15] ซึ่งปัญหา LRP แบบดั้งเดิมจะเกี่ยวข้องกับการกำหนดตำแหน่งของโรงงานและเส้นทางของยานพาหนะ ซึ่งปัญหาเหล่านี้ได้รับการศึกษาอย่างแพร่หลายในธุรกิจขนส่ง ต่อมานักวิจัยได้นำวิธีการแก้ปัญหา LRP มาประยุกต์ใช้ในการจัดการห่วงโซ่อุปทานชีวมวล เช่น [16] ได้มีการประยุกต์ใช้การแก้ปัญหาแบบ LRP เพื่อการจัดการห่วงโซ่อุปทานชีวมวล โดยต้องการพิจารณาการขนส่งไม้ชีวมวลจากแหล่งผลิตไปยังศูนย์รวบรวม โดยใช้วิธีการแบ่งกลุ่มด้วยวิธีเคมีน (K-Mean Clustering) เพื่อหาตำแหน่งของศูนย์รวบรวม จากนั้นจึงจัดเส้นทางสำหรับการขนส่งระหว่างแหล่งผลิตไม้ชีวมวลกับศูนย์

รวบรวมในภายหลัง นอกจากนี้ยังได้มีการศึกษาปัญหา FLP โดยนักวิจัยได้กำหนดจำนวนสถานที่ตั้งก่อนการเลือกสถานที่ตั้งด้วยวิธีการจัดกลุ่ม หลังจากนั้นจึงได้นำจำนวนที่ได้มาคิดกับการขนส่งต่อไป ซึ่งทั้งสองงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้น ได้ประยุกต์ใช้วิธีการจัดกลุ่มเพื่อให้การคำนวณในการจัดเส้นทางง่ายขึ้น และในปี ค.ศ. 2024 [18] ได้เสนอแบบจำลองแบบหลายวัตถุประสงค์ของปัญหา LRP เพื่อรวบรวมชีวมวลปาล์มในมาเลเซีย โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดต้นทุนและเพิ่มประสิทธิภาพการดำเนินงาน ซึ่งงานวิจัยนี้ยังครอบคลุมความยั่งยืนทางสังคมและสิ่งแวดล้อม โดยสามารถลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้

สำหรับงานวิจัยส่วนใหญ่ที่ประยุกต์ใช้ปัญหา LRP ในการแก้ปัญหา จะพิจารณาการขนส่งในระดับเดียวกัน นั่นคือการเลือกสถานที่ตั้งของศูนย์รวบรวมและจัดเส้นทางในการขนส่งระหว่างแหล่งผลิตชีวมวลกับศูนย์รวบรวม อย่างไรก็ตาม ในบริบทของห่วงโซ่อุปทานชีวมวล การขนส่งจะทำงานในสองระดับ ซึ่งปัญหาในรูปแบบนี้จะเรียกว่า ปัญหาสถานที่ตั้งและการจัดเส้นทางแบบสองระดับ (Two-Level Location-Routing Problem: TLRP) โดยในระดับแรกจะเกี่ยวข้องกับการขนส่งวัตถุดิบชีวมวลจากแหล่งผลิตไปยังศูนย์รวบรวม ซึ่งต้องมีการกำหนดศูนย์รวบรวมเพื่อจัดเก็บวัตถุดิบชีวมวล และระดับที่สองประกอบด้วย การขนส่งวัตถุดิบชีวมวลจากศูนย์รวบรวมไปยังโรงไฟฟ้าชีวมวล ซึ่งโครงสร้างทั้งสองระดับนี้แสดงให้เห็นถึงความซับซ้อนของห่วงโซ่อุปทาน เนื่องจากต้องมีการประสานงานระหว่างขั้นตอนต่าง ๆ ของการขนส่งและการจัดเก็บเพื่อรวบรวมก่อนขนส่งไปยังโรงไฟฟ้าชีวมวล ในปี ค.ศ. 2021 [19] ได้นำเสนอการแก้ปัญหา TLRP ซึ่งเป็นการขนส่งวัตถุดิบชีวมวลจากเกษตรกรไปยังศูนย์รวบรวมและส่งต่อไปยังโรงกลั่นชีวภาพ โดยได้เสนอแบบจำลองกำหนดการเชิงจำนวนเต็มแบบผสมเพื่อลดต้นทุนในการดำเนินการและใช้วิธีฮิวริสติกในการแก้ปัญหา ซึ่งในระดับแรกจะเกี่ยวข้องกับการจัดการปัญหา LRP เพื่อเลือกตำแหน่งของศูนย์รวบรวมและจัดเส้นทางการขนส่งระหว่างเกษตรกรแต่ละราย ไปยังศูนย์รวบรวม ในขณะที่การขนส่งระดับที่ 2 จะเป็นการส่งโดยตรงจากศูนย์รวบรวมไปยังโรงกลั่นชีวภาพ และเมื่อเร็ว ๆ นี้ [20] ได้เสนอแบบจำลองแบบหลายวัตถุประสงค์ของปัญหา TLRP เพื่อการจัดการห่วงโซ่อุปทานชีวมวลแบบสองระดับ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดต้นทุนทางเศรษฐกิจและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้ ซึ่งงานวิจัยนี้ จะมีการพิจารณาการจัดเส้นทางขนส่งในระดับที่ 1 เท่านั้น ในขณะที่การขนส่งระดับที่ 2 จะเป็นการส่งโดยตรงจากศูนย์รวบรวมไปยังโรงกลั่นชีวภาพ

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับปัญหา TLRP พบว่า งานวิจัยส่วนใหญ่จะมีการเลือกสถานที่ตั้งและจัดเส้นทางเพียงในระดับที่ 1 แต่ในระดับที่ 2 จะเป็นการส่งสินค้าหรือวัตถุดิบชีวมวลจากศูนย์รวบรวมไปยังปลายทางโดยตรง [21] - [22] ซึ่งในกรณีนี้จะทำให้มีการใช้รถขนส่งเท่ากับจำนวนจุดรวบรวมที่ถูกเลือก ซึ่งถ้าในกรณีที่บางศูนย์รวบรวมมีปริมาณสินค้าหรือวัตถุดิบชีวมวลในปริมาณน้อย การส่งโดยใช้จำนวนรถเท่ากับศูนย์รวบรวมอาจทำให้เสียค่าใช้จ่ายมากขึ้น ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงต้องการนำเสนอวิธีการแก้ปัญหา TLRP โดยจะประยุกต์ใช้ในการจัดการห่วงโซ่อุปทานชีวมวล โดยแบบจำลองที่นำเสนอจะพิจารณาการขนส่งในระดับที่ 2 เพิ่มเติม ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะสามารถลดต้นทุนในการจัดการโดยรวมได้ เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้น ตารางที่ 1 จะแสดงการจัดหมวดหมู่งานวิจัยตามหัวข้อต่าง ๆ ซึ่งประกอบด้วยห่วงโซ่อุปทานชีวมวล (BSC) ปัญหา FLP VRP LRP และ TLRP รวมทั้งการจัดเส้นทางในระดับที่ 2 ของปัญหา TLRP ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับห่วงโซ่อุปทานชีวมวลและการแก้ปัญหาสถานที่ตั้งและการจัดเส้นทางแบบสองระดับ

ปี ค.ศ.	บทความ	BSC	FLP	VRP	LRP	TLRP	จัดเส้นทางในระดับที่ 2
1972	[14]		✓	✓	✓		
1987	[7]			✓			
1998	[10]	✓		✓			

ตารางที่ 1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับห่วงโซ่อุปทานชีวมวลและการแก้ปัญหาสถานที่ตั้งและการจัดเส้นทางแบบสองระดับ (ต่อ)

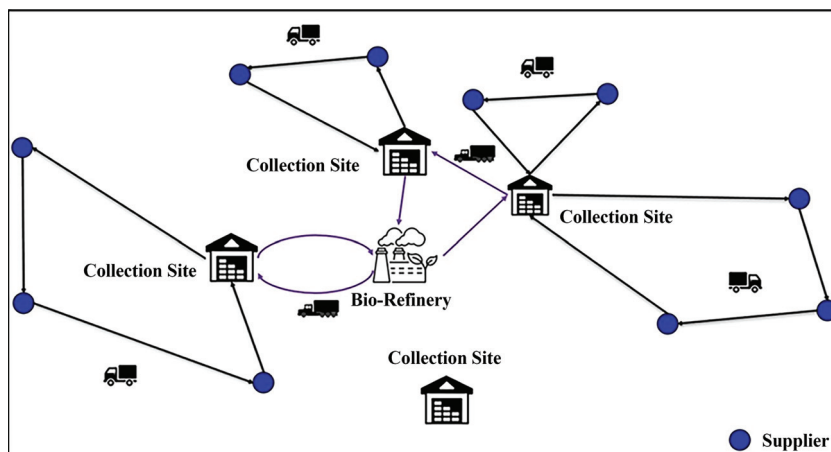
ปี ค.ศ.	บทความ	BSC	FLP	VRP	LRP	TLRP	จัดเส้นทางในระดับที่ 2
2007	[11]	✓		✓			
2009	[12]	✓		✓			
2011	[2]	✓	✓				
2012	[3]	✓	✓				
2018	[4]	✓	✓				
2018	[5]	✓	✓				
2021	[19]	✓	✓	✓	✓	✓	
2023	[21]			✓		✓	
2023	[22]		✓	✓	✓		
2023	[13]	✓		✓			
2023	[16]	✓	✓	✓	✓		
2024	[17]	✓	✓				
2024	[18]	✓	✓	✓	✓		
2024	[20]	✓	✓	✓	✓	✓	
2024	This study	✓	✓	✓	✓	✓	✓

วิธีดำเนินการวิจัย

ในงานวิจัยนี้จะนำเสนอแบบจำลองกำหนดการเชิงจำนวนเต็มแบบผสมเพื่อแก้ปัญหาการจัดการห่วงโซ่อุปทานชีวมวลแบบสองระดับ โดยต้องการเลือกศูนย์รวบรวมเพื่อแปรรูปไม้ชีวมวลและจัดเส้นทางขนส่งไปยังโรงกลั่นชีวภาพ และวัตถุประสงค์ของแบบจำลองคือ การพิจารณาถึงต้นทุนที่ต่ำที่สุด ซึ่งในงานวิจัยนี้มีวิธีดำเนินการวิจัย ดังนี้

1. การกำหนดปัญหา

ในการศึกษานี้จะพิจารณาการขนส่งด้านชีวมวลที่เป็นการขนส่งไม้เป็นหลัก โดยจะพิจารณาการรวบรวมไม้ชีวมวลจากแต่ละพื้นที่ในป่าไม้ไปยังศูนย์รวบรวมเพื่อแปรรูปไม้ก่อนขนส่งต่อไปยังโรงกลั่นชีวภาพ และในบางพื้นที่รถขนาดใหญ่อาจไม่สามารถเข้าไปเพื่อรวบรวมไม้ได้ ซึ่งต้องใช้รถขนาดเล็กในการรวบรวม ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงแบ่งระดับการขนส่งออกเป็นสองระดับ นั่นคือ รวบรวมไม้ชีวมวลจากแต่ละพื้นที่ซึ่งต่อไปนี้จะเรียกว่า Supplier และขนส่งไปยังศูนย์รวบรวมเพื่อแปรรูปไม้และจะเรียกศูนย์รวบรวมนี้ว่า Collection Site ซึ่งจะใช้รถขนาดเล็กในการรวบรวม และจะเรียกระดับการจัดการนี้ว่าระดับที่ 1 ซึ่งในระดับที่ 1 นี้จะมีการคัดเลือก Collection Site เพื่อรวบรวมไม้จาก Supplier หลังจากนั้นไม้ที่ผ่านการแปรรูปจาก Collection Site จะถูกรวบรวมไปยังโรงกลั่นชีวภาพ (Bio-Refinery) ซึ่งการรวบรวมนี้จะเป็นการจัดเส้นทางในระดับที่ 2 และรูปแบบนี้จะอยู่ในรูปแบบปัญหา TLRP โดยในแต่ละระดับจะต้องจัดเส้นทางในการขนส่ง นั่นคือ จัดเส้นทางจาก Supplier ไปยัง Collection Site ที่ถูกเลือก และจัดเส้นทางเพื่อรวบรวมไม้จาก Collection Site ไปยัง Bio-Refinery ตัวอย่างผลลัพธ์ของปัญหา TLRP สำหรับการจัดการห่วงโซ่อุปทานชีวมวลดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ตัวอย่างผลลัพธ์ของปัญหา TLRP สำหรับการจัดการห่วงโซ่อุปทานซังมวอล

สำหรับสมมติฐานของแบบจำลองที่นำเสนอ เป็นดังนี้

1. ยานพาหนะในระดับเดียวกันต้องเป็นยานพาหนะประเภทเดียวกัน และความจุของยานพาหนะในระดับที่ 1 และระดับที่ 2 แตกต่างกัน โดยความจุของยานพาหนะในระดับที่ 1 น้อยกว่าความจุของยานพาหนะในระดับที่ 2
2. ยานพาหนะที่ใช้ในระดับที่ 1 ไม่สามารถขนส่งในระดับที่ 2 ได้ และยานพาหนะที่ใช้ในระดับที่ 2 ไม่สามารถขนส่งในระดับที่ 1 ได้
3. ความจุของ Collection Site ต้องน้อยกว่าหรือเท่ากับความจุของยานพาหนะในระดับที่ 2
4. ไม่มีเส้นทางระหว่าง Collection Site ในการขนส่งระดับที่ 1
5. ไม่มีเส้นทางจาก Supplier ไปยัง Bio-Refinery โดยตรง มีเพียงเส้นทางจาก Collection Site ไปยัง Bio-Refinery เท่านั้น
6. ไม่มีเส้นทางระหว่าง Bio-Refinery ในการขนส่งระดับที่ 2
7. ปริมาณของไม้ซังมวอลในแต่ละ Supplier ต้องไม่เกินความจุของยานพาหนะในระดับที่ 1
8. ปริมาณรวมของไม้ซังมวอลในแต่ละ Collection Site จะต้องถูกส่งต่อไปยัง Bio-Refinery ทั้งหมด
2. การสร้างแบบจำลองกำหนดการเชิงจำนวนเต็มแบบผสม

ในการศึกษานี้จะนำเสนอแบบจำลองกำหนดการเชิงจำนวนเต็มแบบผสม (Mixed-Integer Programming Model: MIP) สำหรับปัญหาการเลือกสถานที่ตั้งของ Collection Site และการจัดเส้นทางสำหรับห่วงโซ่อุปทานซังมวอลแบบสองระดับ โดยต้องการลดต้นทุนในการดำเนินการต่ำที่สุด สำหรับแบบจำลองที่นำเสนอประกอบด้วย เซต พารามิเตอร์ และตัวแปรตัดสินใจ ดังตารางที่ 2 - 4

ตารางที่ 2 เซตที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองที่นำเสนอ

เซต	นิยาม
V_1	เซตของ Supplier ทั้งหมด
V_2	เซตของ Collection Site ทั้งหมด
B	เซตของ Bio-Refinery ทั้งหมด
L_1	เซตของ Supplier และ Collection Site ($V_1 \cup V_2$)
L_2	เซตของ Collection Site และ Bio-Refinery ($V_2 \cup B$)
K_1	เซตของยานพาหนะในระดับที่ 1
K_2	เซตของยานพาหนะในระดับที่ 2

ตารางที่ 3 พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองที่นำเสนอ

พารามิเตอร์	นิยาม
d'_{ij}	ระยะทางระหว่างจุด i และจุด j ในระดับที่ 1
f_i	ค่าใช้จ่ายในการเปิดใช้งาน Collection Site i
c	ค่าใช้จ่ายต่อระยะทาง 1 กิโลเมตร
vc_1	ค่าใช้จ่ายคงที่สำหรับยานพาหนะ 1 คัน ในระดับที่ 1
n_1	จำนวนของ Supplier ทั้งหมด
n_2	จำนวนของ Collection Site ทั้งหมด
d''_{ij}	ระยะทางระหว่างจุด i และจุด j ในระดับที่ 2
vc_2	ค่าใช้จ่ายคงที่สำหรับยานพาหนะ 1 คัน ในระดับที่ 2
$vcap_1$	ความจุของยานพาหนะระดับที่ 1
$vcap_2$	ความจุของยานพาหนะระดับที่ 2
$CScap$	ความจุของ Collection Site
p_i	จำนวนของไม้ซี้วมวลที่รวบรวมได้สำหรับ Supplier i

ตารางที่ 4 ตัวแปรตัดสินใจที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองที่นำเสนอ

ตัวแปรตัดสินใจ	นิยาม
x_{ijk}	$\begin{cases} 1, & \text{ถ้ามีเส้นทางจาก } i \text{ ไป } j \text{ ด้วยยานพาหนะ } k \text{ โดยที่ } i, j \in L_1 \text{ และ } k \in K_1 \\ 0, & \text{กรณีอื่น ๆ} \end{cases}$
y_i	$\begin{cases} 1, & \text{ถ้า Collection Site } i \text{ ถูกเปิด โดยที่ } i \in V_2 \\ 0, & \text{กรณีอื่น ๆ} \end{cases}$
z_{ij}	$\begin{cases} 1, & \text{ถ้า Supplier } i \text{ ส่งไม้ซี้วมวลไปยัง Collection Site } j \text{ โดยที่ } i \in V_1 \text{ และ } j \in V_2 \\ 0, & \text{กรณีอื่น ๆ} \end{cases}$
a_{ijk}	$\begin{cases} 1, & \text{ถ้ามีเส้นทางจาก } i \text{ ไป } j \text{ ด้วยยานพาหนะ } k \text{ โดยที่ } i, j \in L_2 \text{ และ } k \in K_2 \\ 0, & \text{กรณีอื่น ๆ} \end{cases}$
b_{ij}	$\begin{cases} 1, & \text{ถ้า Collection Site } i \text{ ส่งไม้ซี้วมวลไปยัง Bio-Refinery } j \text{ โดยที่ } i \in V_2 \text{ และ } j \in B \\ 0, & \text{กรณีอื่น ๆ} \end{cases}$
U'_{ik}	ตัวแปรเสริมเพื่อกำจัดทวิรยะในลำดับที่ 1 โดยที่ $i, j \in V_1$ และ $k \in K_1$
U''_{ik}	ตัวแปรเสริมเพื่อกำจัดทวิรยะในลำดับที่ 2 โดยที่ $i, j \in V_2$ และ $k \in K_2$

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาที่มีวัตถุประสงค์ คือ การลดต้นทุนให้ต่ำที่สุด (Minimum Cost) ซึ่งจะนับรวมค่าใช้จ่ายในการเปิดใช้งาน Collection Site ค่าใช้จ่ายคงที่สำหรับการใช้ยานพาหนะในระดับที่ 1 ค่าใช้จ่ายตามระยะทางในระดับที่ 1 ค่าใช้จ่ายคงที่สำหรับการใช้ยานพาหนะในระดับที่ 2 และค่าใช้จ่ายตามระยะทางในระดับที่ 2 ดังนั้น ฟังก์ชันวัตถุประสงค์สามารถเขียนได้ดังฟังก์ชันที่ (1) และจากสมมติฐานของแบบจำลองที่กล่าวมาข้างต้น แบบจำลองกำหนดการเชิงจำนวนเต็มแบบผสม สำหรับปัญหาการเลือกสถานที่ตั้งของ Collection Site และการจัดเส้นทางสำหรับท่วงโซ่อุปทานซี้วมวลแบบสองระดับสามารถเขียนได้ดังเงื่อนไขที่ (2) - (31)

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function)

$$\min \sum_{i \in V_2} f_i y_i + vc_1 \sum_{i \in L_1} \sum_{j \in L_1} \sum_{k \in K_1} x_{ijk} + c \sum_{i \in L_1} \sum_{j \in L_1} \sum_{k \in K_1} d'_{ij} x_{ijk} + vc_2 \sum_{i \in B} \sum_{j \in V_2} \sum_{k \in K_2} a_{ijk} + c \sum_{i \in L_2} \sum_{j \in L_2} \sum_{k \in K_2} d''_{ij} a_{ijk} \quad (1)$$

เงื่อนไขบังคับ (Constraint)

$$\sum_{i \in L_1, i \neq j} \sum_{k \in K_1} x_{ijk} = 1; \quad \forall j \in V_1 \quad (2)$$

$$\sum_{i \in L_1, i \neq j} x_{ijk} = \sum_{i \in L_1, i \neq j} x_{jik}; \quad \forall j \in L_1, \forall k \in K_1 \quad (3)$$

$$\sum_{i \in V_2} \sum_{j \in V_2} \sum_{k \in K_1} x_{ijk} = 0; \quad (4)$$

$$\sum_{i \in V_2} \sum_{j \in V_1} x_{ijk} \leq 1; \quad \forall k \in K_1 \quad (5)$$

$$\sum_{j \in V_1} \sum_{k \in K_1} x_{ijk} \leq My_i; \quad \forall i \in V_2 \quad (6)$$

$$\sum_{j \in V_2} z_{ij} = 1; \quad \forall i \in V_1 \quad (7)$$

$$\sum_{i \in V_1} z_{ij} \leq My_j; \quad \forall j \in V_2 \quad (8)$$

$$-z_{ij} + \sum_{l \in L_1} (x_{ilk} + x_{jlk}) \leq 1; \quad \forall i \in V_1, \forall j \in V_2, \forall k \in K_1 \quad (9)$$

$$\sum_{j \in L_1} \sum_{k \in K_1} x_{ijk} \geq y_i; \quad \forall i \in V_2 \quad (10)$$

$$\sum_{i \in L_1} \sum_{k \in K_1} x_{ijk} \geq y_j; \quad \forall j \in V_2 \quad (11)$$

$$U'_{ik} - U'_{jk} + n_1 x_{ijk} \leq n_1 - 1; \quad \forall i, j \in V_1, \forall k \in K_1 \quad (12)$$

$$\sum_{i \in L_2, i \neq j} \sum_{k \in K_2} a_{ijk} = y_j; \quad \forall j \in V_2 \quad (13)$$

$$\sum_{i \in L_2, i \neq j} a_{ijk} = \sum_{i \in L_2, i \neq j} a_{jik}; \quad \forall j \in L_2, \forall k \in K_2 \quad (14)$$

$$\sum_{i \in B} \sum_{j \in B} \sum_{k \in K_2} a_{ijk} = 0; \quad (15)$$

$$\sum_{i \in B} \sum_{j \in V_2} a_{ijk} \leq 1; \quad \forall k \in K_2 \quad (16)$$

$$\sum_{j \in B} b_{ij} = y_i; \quad \forall i \in V_2 \quad (17)$$

$$-b_{ij} + \sum_{l \in L_2} (a_{ilk} + a_{jlk}) \leq 1; \quad \forall i \in V_2, \forall j \in B, \forall k \in K_2 \quad (18)$$

$$\sum_{j \in V_2} \sum_{k \in K_2} a_{ijk} \geq 1; \quad \forall i \in B \quad (19)$$

$$\sum_{i \in V_2} \sum_{k \in K_2} a_{ijk} \geq 1; \quad \forall j \in B \quad (20)$$

$$U''_{ik} - U''_{jk} + n_2 a_{ijk} \leq n_2 - 1; \quad \forall i, j \in V_2, \forall k \in K_2 \quad (21)$$

$$\sum_{i \in V_1} \sum_{j \in L_1} p_i x_{ijk} \leq vcap_1; \quad \forall k \in K_1 \quad (22)$$

$$\sum_{i \in V_1} p_i z_{ij} \leq y_j CScap; \quad \forall j \in V_2 \quad (23)$$

$$\sum_{i \in V_1} \sum_{j \in V_2} \sum_{l \in L_2} p_i z_{ij} a_{ljk} \leq vcap_2; \quad \forall k \in K_2 \quad (24)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\}; \quad \forall i, j \in L_1, \forall k \in K_1 \quad (25)$$

$$y_i \in \{0,1\}; \quad \forall i \in V_2 \quad (26)$$

$$z_{ij} \in \{0,1\}; \quad \forall i \in V_1, \forall j \in V_2 \quad (27)$$

$$U'_{ik} \geq 0; \quad \forall i \in V_1, \forall k \in K_1 \quad (28)$$

$$a_{ijk} \in \{0,1\}; \quad \forall i, j \in L_2, \forall k \in K_2 \quad (29)$$

$$b_{ij} \in \{0,1\}; \quad \forall i \in V_2, \forall j \in B \quad (30)$$

$$U''_{ik} \geq 0; \quad \forall i \in V_2, \forall k \in K_2 \quad (31)$$

โดยเงื่อนไขบังคับทั้งหมดจะถูกแบ่งเป็นเงื่อนไขสำหรับการจัดเส้นทางในระดับที่ 1 (เงื่อนไขที่ (2) - (12)) และเงื่อนไขบังคับสำหรับการจัดเส้นทางในระดับที่ 2 (สมการที่ (13) - (21)) เงื่อนไขด้านความจุ (เงื่อนไขที่ (22) - (24)) และเงื่อนไขของตัวแปรตัดสินใจ (เงื่อนไขที่ (25) - (31)) โดยความหมายของแต่ละเงื่อนไขอธิบายได้ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ความหมายและคำอธิบายของเงื่อนไขบังคับของแบบจำลองที่นำเสนอ

เงื่อนไขที่	ความหมายและคำอธิบาย
(2)	แต่ละ Supplier จะต้องมียานพาหนะเข้ามา 1 เส้นทาง
(3)	สำหรับทุกจุดในระดับที่ 1 ยานพาหนะที่เข้าและออกในทุก ๆ จุดจะต้องเป็นคันเดียวกัน
(4)	ไม่มีเส้นทางระหว่าง Collection Site ในระดับที่ 1
(5)	สำหรับยานพาหนะทุกคันเริ่มต้นที่ Collection Site ไม่เกิน 1 เส้นทาง
(6)	การเดินทางจะต้องมาจาก Collection Site ที่เปิดเท่านั้น
(7)	Supplier ทุกรายต้องส่งไม้ชีวมวลไปที่ Collection Site 1 แห่งเท่านั้น
(8)	Supplier ทุกรายต้องส่งไม้ชีวมวลไปที่ Collection Site ที่ถูกเปิดเท่านั้น
(9)	กำหนดระบบการจัดส่งให้แต่ละ Supplier ส่งไม้ชีวมวลไปยัง Collection Site เพียงหนึ่งจุดเท่านั้น
(10) - (11)	กำหนดให้ในระดับที่ 1 ทุกเส้นทางเริ่มและสิ้นสุดที่ Collection Site
(12)	ป้องกันการเกิดทวิรยะใน ระดับที่ 1 (การเดินทางระหว่าง Supplier โดยไม่ผ่าน Collection Site)
(13)	แต่ละ Collection Site ที่เปิดจะต้องมีเส้นทางเข้ามา 1 เส้นทาง
(14)	สำหรับทุกจุดในระดับที่ 2 ยานพาหนะที่เข้าและออกในทุก ๆ จุดจะต้องเป็นคันเดียวกัน
(15)	ไม่มีเส้นทางระหว่าง Bio-Refinery โดยตรง
(16)	สำหรับยานพาหนะทุกคันเริ่มต้นที่ Bio-Refinery ไม่เกิน 1 เส้นทาง
(17)	แต่ละ Collection Site ที่เปิด จะมีเส้นทางไป Bio-Refinery 1 แห่ง
(18)	กำหนดระบบการจัดส่งให้แต่ละ Collection Site ส่งไม้ชีวมวลไปยัง Bio-Refinery เพียงหนึ่งจุด
(19) - (20)	กำหนดให้ในระดับที่ 2 ทุกเส้นทางเริ่มและสิ้นสุดที่ Bio-Refinery
(21)	ป้องกันการเกิดทวิรยะใน ระดับที่ 2

ตารางที่ 5 ความหมายและคำอธิบายของเงื่อนไขบังคับของแบบจำลองที่นำเสนอ (ต่อ)

เงื่อนไขที่	ความหมายและคำอธิบาย
(22)	จำนวนไม้ซิวมวลไม่เกินความจุของยานพาหนะในระดับที่ 1
(23)	จำนวนไม้ซิวมวลไม่เกินความจุของ Collection Site
(24)	จำนวนไม้ซิวมวลไม่เกินความจุของยานพาหนะในระดับที่ 2
(25) - (31)	ค่าของตัวแปรตัดสินใจทั้งหมด

3. การแปลงฟังก์ชันให้เป็นฟังก์ชันเชิงเส้น

จากแบบจำลองที่นำเสนอ จะเห็นว่า เงื่อนไขที่ (24) เป็นฟังก์ชันไม่เชิงเส้น (Nonlinear Function) นั่นคือ พจน์ $z_{ij}a_{ljk}$ ซึ่งเป็นการคูณกันของตัวแปรตัดสินใจสองตัวแปร ซึ่งจะทำให้แบบจำลองไม่สามารถหาผลลัพธ์ได้โดยง่าย ดังนั้น เพื่อให้แบบจำลองสามารถหาผลลัพธ์ได้จึงต้องทำการแปลงให้เป็นฟังก์ชันเชิงเส้น (Linearization) และเนื่องจาก z_{ij} และ a_{ljk} เป็นตัวแปรทวิภาค ดังนั้น เราสามารถกำหนดตัวแปรตัดสินใจใหม่ โดยกำหนดให้ $za_{ijkl} = z_{ij}a_{ljk}$ ซึ่งมีความหมายเป็นดังนี้

$$za_{ijkl} = \begin{cases} 1, & \text{ถ้ามีเส้นทางจาก } i \text{ ไป } j \text{ ในระดับที่ 1 และส่งต่อไปยัง } l \text{ ด้วยยานพาหนะ } k \text{ ในระดับที่ 2} \\ & \text{โดยที่ } i \in V_1, j \in V_2, l \in L_2 \text{ และ } k \in K_2 \\ 0, & \text{กรณีอื่น ๆ} \end{cases}$$

ดังนั้น เงื่อนไขที่ (24) จะถูกแปลงเป็นดังเงื่อนไขที่ (32)

$$\sum_{i \in V_1} \sum_{j \in V_2} \sum_{l \in L_2} p_i za_{ijkl} \leq vcap_2; \quad \forall k \in K_2 \quad (32)$$

และเพิ่มเงื่อนไขใหม่เพื่อให้ผลลัพธ์ที่ได้ยังคงสอดคล้องกับเงื่อนไขเดิม ดังเงื่อนไขที่ (33) - (35)

$$za_{ijkl} \leq z_{ij}; \quad \forall i \in V_1, \forall j \in V_2, \forall k \in K_2, \forall l \in L_2 \quad (33)$$

$$za_{ijkl} \leq a_{ljk}; \quad \forall i \in V_1, \forall j \in V_2, \forall k \in K_2, \forall l \in L_2 \quad (34)$$

$$z_{ij} + a_{ljk} \leq za_{ijkl} + 1; \quad \forall i \in V_1, \forall j \in V_2, \forall k \in K_2, \forall l \in L_2 \quad (35)$$

จากเงื่อนไข (33) - (34) จะได้ว่า ถ้า $z_{ij} = 0$ หรือ $a_{ljk} = 0$ จะได้ว่า $za_{ijkl} = 0$ ซึ่งจะสอดคล้องกับเงื่อนไขที่ (33) - (35) และถ้า $z_{ij} = 1$ และ $a_{ljk} = 1$ จะได้ว่า $za_{ijkl} = 1$ ซึ่งจะสอดคล้องกับเงื่อนไขที่ (33) - (35) นั่นคือ ผลลัพธ์ที่ได้ของตัวแปรใหม่ za_{ijkl} ยังคงมีค่าเท่ากับ $z_{ij}a_{ljk}$

จากการแปลงเชิงเส้น จะได้ว่า แบบจำลองกำหนดการเชิงจำนวนเต็มแบบผสมสำหรับการแก้ปัญหาห่วงโซ่อุปทานซิวมวลแบบสองระดับ จะประกอบด้วย ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ (1) และเงื่อนไขที่ (2) - (23) และเงื่อนไขที่ (25) - (35)

ผลการวิจัย

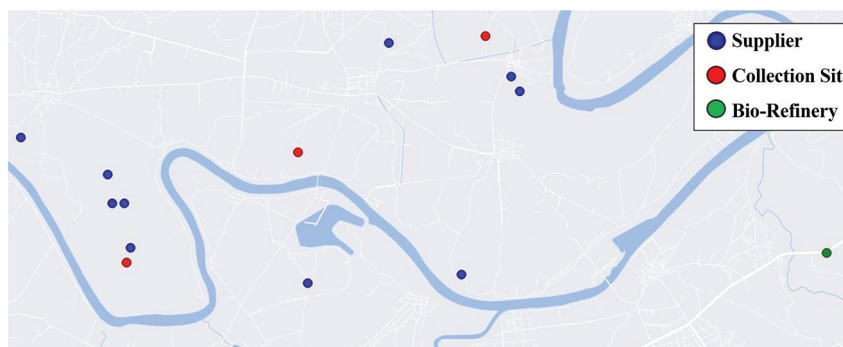
สำหรับการทดสอบแบบจำลองที่นำเสนอ ในงานวิจัยนี้จะใช้ข้อมูลไม้ซิวมวลจากงานวิจัยของ [16] ซึ่งรายละเอียดของข้อมูลที่ใช้ทดสอบ ได้แก่ ตำแหน่งของ Supplier และจำนวนไม้ซิวมวลที่จัดหาได้สำหรับแต่ละ Supplier และตำแหน่งของ Collection Site ซึ่งในงานวิจัยนี้จะคัดเลือก Supplier ที่มีปริมาณไม้ซิวมวลมากเป็น

Collection Site เพิ่มเติม และบาง Supplier ได้ถูกตัดออกจากการพิจารณาเนื่องจากกระยะทางไกลกว่าจุดอื่น ๆ มาก ดังนั้น ในกรณีศึกษานี้ จะมี Supplier จำนวน 10 จุด และ Collection Site จำนวน 3 จุด โดยรายละเอียดแต่ละจุดดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ตำแหน่งละติจูด ลองจิจูด และปริมาณไม้ซี้วมวลของแต่ละ Supplier

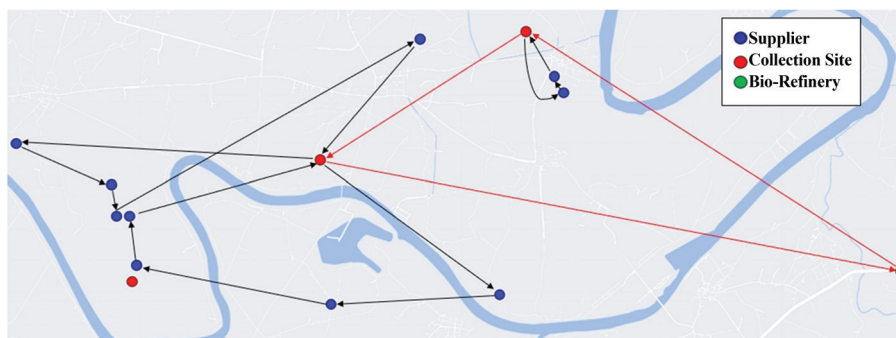
ตำแหน่ง	ละติจูด	ลองจิจูด	ปริมาณไม้ซี้วมวล (กก.)
Collection Site 1	15.1505030	104.6584878	-
Collection Site 2	15.1344963	104.6327180	-
Collection Site 3	15.1673784	104.6866989	-
Supplier 1	15.1615522	104.6905147	57
Supplier 2	15.1526875	104.6168721	396
Supplier 3	15.1366762	104.6333192	849
Supplier 4	15.1472667	104.6299594	113
Supplier 5	15.1430998	104.6305810	396
Supplier 6	15.1430998	104.6324031	226
Supplier 7	15.1593389	104.6918025	396
Supplier 8	15.1315736	104.6599839	113
Supplier 9	15.1664174	104.6721321	226
Supplier 10	15.1327825	104.6830828	283

สำหรับการแก้ปัญหานี้ จะต้องมีข้อมูลเพิ่มเติม นั่นคือ ตำแหน่งของ Bio-Refinery ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้คัดเลือกตำแหน่งที่ใกล้เคียงกับข้อมูลจริง โดยตำแหน่ง Supplier, Collection Site และ Bio-Refinery ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ตำแหน่ง Supplier, Collection Site และ Bio-Refinery บนแผนที่จริง

หลังจากทราบตำแหน่งของ Supplier, Collection Site และ Bio-Refinery ระยะทางระหว่างตำแหน่งต่าง ๆ จะถูกคำนวณด้วยระยะทางจริงจาก Google Map และนอกจากข้อมูลด้านตำแหน่งต่าง ๆ ที่ได้มาแล้ว จะมีข้อมูลความจุของยานพาหนะในระดับที่ 1 ซึ่งถูกกำหนดให้เป็น 1,500 กิโลกรัม ความจุของยานพาหนะในระดับที่ 2 เป็น 5,000 กิโลกรัม รวมถึงค่าใช้จ่ายคงที่สำหรับยานพาหนะในระดับที่ 1 และ 2 จะอยู่ที่ 1,500 บาท และ 4,000 บาท และมีค่าใช้จ่ายคิดตามระยะทางโดยคิดค่าน้ำมันลิตรละ 33 บาท จากข้อมูลข้างต้น เมื่อนำแบบจำลองที่นำเสนอมาหาผลลัพธ์ด้วยซอฟต์แวร์ Gurobi โดยใช้โปรแกรม Python ซึ่งใช้เวลาประมวลผลจนกระทั่งได้ผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุด คือ 65,965 วินาที และผลลัพธ์ของตำแหน่งของ Collection Site ที่ถูกเปิด เส้นทางขนส่งทั้งระดับที่ 1 และระดับที่ 2 ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ผลลัพธ์ที่เหมาะสมที่สุดของตำแหน่ง Collection Site ที่ถูกเปิดและเส้นทางการขนส่งทั้งสองระดับ

จากรูปที่ 3 จะได้ว่า จะต้องเปิด Collection Site จำนวน 2 จุด และใช้รถจำนวน 3 คัน ในระดับที่ 1 และในระดับที่ 2 จะใช้รถเพียงคันเดียวในการขนส่งทั้งหมด โดยจะได้ค่าใช้จ่ายรวมต่ำที่สุดอยู่ที่ 29,277.43 บาท และเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการขนส่งไม้ชีวมวลแบบสองระดับ โดยที่ไม่มีการจัดเส้นทางในระดับที่ 2 พบว่า จะมีค่าใช้จ่ายรวมอยู่ที่ 33,619.97 บาท ซึ่งแบบจำลองที่นำเสนอสามารถลดค่าใช้จ่ายได้ถึง 4,342.54 บาท ซึ่งคิดเป็น 12.92 %

อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอแบบจำลองกำหนดการเชิงจำนวนเต็มแบบผสมเพื่อแก้ปัญหาการจัดการห่วงโซ่อุปทานชีวมวลแบบสองระดับ โดยต้องการเลือกจุดรวบรวมไม้จาก Supplier และจัดเส้นทางการขนส่งจากแต่ละ Supplier ไปยัง Collection Site และจัดเส้นทางการขนส่งจาก Collection Site ไปยัง Bio-Refinery ซึ่งวัตถุประสงค์ของแบบจำลองจะพิจารณาถึงต้นทุนรวมที่ต่ำที่สุด อย่างไรก็ตาม แบบจำลองที่นำเสนอเริ่มต้นเป็นแบบจำลองไม่เชิงเส้น ดังนั้น เพื่อให้แบบจำลองสามารถหาผลลัพธ์ได้ ผู้วิจัยจึงได้แปลงแบบจำลองให้เป็นแบบจำลองเชิงเส้น และเมื่อทดสอบแบบจำลองด้วยข้อมูลไม้ชีวมวลจริง พบว่าผลลัพธ์ของแบบจำลองที่มีการจัดเส้นทางทั้งสองระดับสามารถลดค่าใช้จ่ายโดยรวมได้ เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการจัดเส้นทางเพียงระดับเดียว เนื่องจากการจัดเส้นทางในระดับที่ 2 สามารถลดจำนวนของยานพาหนะที่ใช้ในการขนส่งได้ อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยนี้ข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบยังเป็นข้อมูลขนาดเล็ก แต่การหาผลลัพธ์ยังใช้เวลาค่อนข้างมาก ซึ่งเมื่อปัญหามีขนาดใหญ่มากขึ้น การหาผลลัพธ์อาจใช้เวลานานมากยิ่งขึ้น ดังนั้น งานวิจัยในอนาคตจึงสามารถมุ่งเน้นการพัฒนาวิธีฮิวริสติกเพื่อหาผลลัพธ์สำหรับปัญหาที่มีขนาดใหญ่ขึ้นได้

References

- [1] Department of Alternative Energy Development and Efficiency, Ministry of Energy of Thailand. (2020). **Alternative Energy Development Plan 2018-2037 (AEDP 2018-2037)**. Access (15 May 2024). Available (<https://policy.asiapacificenergy.org/node/4351>)
- [2] Bowling, I. M., Ponce-Ortega, J. M., and El-Halwagi, M. M. (2011). Facility Location and Supply Chain Optimization for a Biorefinery. **Industrial & Engineering Chemistry Research**. Vol. 50, No. 10, pp. 6276-6286. DOI: 10.1021/ie101921y
- [3] Johnson, D. M., Jenkins, T. L., and Zhang, F. (2012). Methods for Optimally Locating a Forest Biomass-to-Biofuel Facility. **Biofuels**. Vol. 3, Issue 4, pp. 489-503. DOI: 10.4155/bfs.12.34

- [4] Woo, H., Acuna, M., Moroni, M., Taskhiri, M. S., and Turner, P. (2018). Optimizing the Location of Biomass Energy Facilities by Integrating Multi-Criteria Analysis (MCA) and Geographical Information Systems (GIS). **Forests**. Vol. 9, Issue 10, DOI: 10.3390/f9100585
- [5] Nguyen, D. H. and Chen, H. (2018). Supplier Selection and Operation Planning in Biomass Supply Chains with Supply Uncertainty. **Computers & Chemical Engineering**. Vol. 118, pp. 103-117. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2018.07.012
- [6] Costa, Y. and Melo, T. (2024). **Facility Location Modeling in Supply Chain Network Design: Current State and Emerging Trends**. In: Sarkis, J. (eds) The Palgrave Handbook of Supply Chain Management. Palgrave Macmillan, Cham. DOI: 10.1007/978-3-031-19884-7_101
- [7] Solomon, M. (1987). Algorithms for the Vehicle Routing and Scheduling Problems with Time Window Constraints. **Operations Research**. Vol. 35, No. 2, pp. 254-265
- [8] Tan, S.-Y. and Yeh, W.-C. (2021). The Vehicle Routing Problem: State-of-the-Art Classification and Review. **Applied Sciences**. Vol. 11, Issue 21, DOI: 10.3390/app112110295
- [9] Gracia, C., Velazquez-Martí, B., and Estornell, J. (2014). An Application of the Vehicle Routing Problem to Biomass Transportation. **Biosystems Engineering**. Vol. 124, pp. 40-52. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2014.06.009
- [10] Allen, J., Browne, M., Hunter, A., Boyd, J., and Palmer, H. (1998). Logistics Management and Costs of Biomass Fuel Supply. **International Journal of Physical Distribution & Logistics Management**. Vol. 28, No. 6, pp. 463-477. DOI: 10.1108/09600039810245120
- [11] Searcy, E., Flynn, P., Ghafoori, E., and Kumar, A. (2007). The Relative Cost of Biomass Energy Transport. **Applied Biochemistry and Biotechnology**. Vol. 137, pp. 639-652. DOI: 10.1007/s12010-007-9085-8
- [12] Perpina, C., Alfonso, D., Pérez-Navarro, A., Penalvo, E., Vargas, C., and Cárdenas, R. (2009). Methodology Based on Geographic Information Systems for Biomass Logistics and Transport Optimisation. **Renewable Energy**. Vol. 34, Issue 2, pp. 555-565. DOI: 10.1016/j.renene.2008.05.047
- [13] Sajida, K., Nazir Maryam, S., Kausar, N., Agarwal, P., Ozbilge, E., and Bulut, A. (2023). Optimizing Transportation Cost for Biomass Supply Chain. **Thermal Science**. Vol. 27, Special Issue 1, pp. S245-S251
- [14] Cooper, L. (1972). The Transportation-Location Problem. **Operations Research**. Vol. 20, No. 1, pp. 94-108. DOI: 10.1287/opre.20.1.94
- [15] Drexler, M. and Schneider, M. (2015). A Survey of Variants and Extensions of the Location-Routing Problem. **European Journal of Operational Research**. Vol. 241, Issue 2, pp. 283-308. DOI: 10.1016/j.ejor.2014.08.030
- [16] Ransikarbum, K., Wattanasang, N., and Madathil, S. C. (2023). Analysis of Multi-Objective Vehicle Routing Problem with Flexible Time Windows: The Implication for Open Innovation Dynamics. **Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity**. Vol. 9, Issue 1, DOI: 10.1016/j.joitmc.2023.100024
- [17] Yunusoglu, P., Ozsoydan, F. B., and Bilgen, B. (2024). A Machine Learning-Based Two-Stage Approach for the Location of Undesirable Facilities in the Biomass-to-Bioenergy Supply Chain. **Applied Energy**. Vol. 362, DOI: 10.1016/j.apenergy.2024.122961



- [18] Yeng, F. F., Zainuddin, Z. M., and Pheng, H. S. (2024). Optimizing Palm Oil Biomass Supply Chain Logistics through Multi-Objective Location-Routing Model. **Malaysian Journal of Fundamental and Applied Sciences (MJFAS)**. Vol. 20, No. 2, pp. 247-265
- [19] Cao, J. X., Zhang, Z., and Zhou, Y. (2021). A Location-Routing Problem for Biomass Supply Chains. **Computers & Industrial Engineering**. Vol. 152, DOI: 10.1016/j.cie.2020.107017
- [20] Wang, C., Cao, T., Nguyen, D. D., and Dang, T. (2024). Bi-Objective Optimization Modeling for Biomass Supply Chain Planning. **Measurement and Control**. Vol. 362, DOI: 10.1177/00202940241226603
- [21] Xu, R., Huang, Y., and Xiao, W. (2023). A Two-Level Variable Neighborhood Descent for a Split Delivery Clustered Vehicle Routing Problem with Soft Cluster Conflicts and Customer-Related Costs. **Sustainability**. Vol. 15, No. 9, pp. 1-22
- [22] Ghasemi, P., Hemmaty, H., Chobar, A. P., Heidari, M. R., and Keramati, M. (2023). A Multi-Objective and Multi-Level Model for Location-Routing Problem in the Supply Chain Based on the Customer's Time Window. **Journal of Applied Research on Industrial Engineering**. Vol. 10, Issue 3, pp. 412-426. DOI: 10.22105/jarie.2022.321454.1414

การสังเคราะห์และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของโพรบฟลูออเรสเซนต์ฟลาโวนอล (3-hydroxy-2-(pyren-1-yl)-4H-chromen-4-one) Synthesis and Antioxidant Activity of a Flavonol-Based Fluorescent Probe (3-hydroxy-2-(pyren-1-yl)-4H-chromen-4-one)

จุฑามาศ ดวงกมล^{1*} ปรียาภรณ์ เพียสังกะ² อรรถยา นนทิวรรธก³ ธนากร ศิริอนันต์มณี⁴
ณัฐพัชร สหพัฒน์สมบัติ⁵ อมลรดา สาธิน⁶ และณิชา วงศ์อภิชาติ⁷
Chuthamat Duangkamol^{1*} Pariyaporn Piasangka² Attaya Nontiwantok³ Thanakorn Siriananmanee⁴
Natapat Sahaphatsombut⁵ Amolrada Sathin⁶ and Nachicha Wongapichart⁷

Received: April 10, 2024; Revised: July 4, 2024; Accepted: July 10, 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติทางแสง และฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH Assay ปริมาณฟีนอลิกรวม และปริมาณฟลาโวนอยด์รวมของโพรบฟลูออเรสเซนต์ฟลาโวนอล (3-hydroxy-2-(pyren-1-yl)-4H-chromen-4-one) โดยฟลาโวนอลที่ได้นำมาทดสอบสมบัติการดูดกลืนแสงและการเปล่งแสง ทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วย 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) ทดสอบปริมาณฟีนอลิกรวมด้วย Folin-Ciocalteu's Reagent โดยใช้กรดแกลลิกเป็นสารมาตรฐาน และทดสอบปริมาณฟลาโวนอยด์รวมโดยใช้เคอวิชทินเป็นสารมาตรฐาน ผลการศึกษาพบว่าฟลาโวนอลมีสมบัติการดูดกลืนแสงโดยกระตุ้นแสงที่ 355 นาโนเมตร และค่าการเปล่งแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 418 นาโนเมตร (Ex 355 nm/Em 418 nm) นอกจากนี้ยังพบว่าสารสังเคราะห์ฟลาโวนอลมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ โดยมีเปอร์เซ็นต์การต้านออกซิเดชันของ DPPH Radicals อยู่ที่ 44.7 เปอร์เซ็นต์ที่ 10 mg/mL มีปริมาณฟีนอลิกรวมและปริมาณฟลาโวนอยด์รวมเท่ากับ 1.239 ± 0.043 mgGAE/gDW และ 1.312 ± 0.014 mgCE/gDW จะเห็นว่าสารสังเคราะห์ฟลาโวนอลมีคุณสมบัติต้านออกซิเดชันที่ดี ซึ่งสามารถนำข้อมูลจากการวิจัยนี้ไปพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์และพัฒนาในทางการแพทย์ต่อไป

คำสำคัญ : ฟลาโวนอล; สารเรืองแสง; ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ; ปริมาณฟีนอลิก; ปริมาณฟลาโวนอยด์

¹ คณะสหเวชศาสตร์ มหาวิทยาลัยปทุมธานี

² โรงเรียนขอนแก่นวิทยายน

³ โรงเรียนนานาชาติสิงคโปร์ ธนบุรี, กรุงเทพมหานคร

⁴ โรงเรียนนานาชาติฮาร์โรว์, กรุงเทพมหานคร

⁵ โรงเรียนสาธิตนานาชาติ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพมหานคร

⁶ โรงเรียนระยองวิทยาคม ระยอง

⁷ อ็อกฟอด อินเทอร์เน็ตเซ็นแนล คอเลจ, สหราชอาณาจักร

* Corresponding Author, Tel. 08 0404 0816, E - mail: chuthamat.d@ptu.ac.th

¹ Faculty of Allied Health Sciences, Pathumthani University² Khon Kaen Wittayayon School³ Singapore International School Thonburi, Bangkok⁴ Harrow International School, Bangkok⁵ King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang International Demonstration School, Bangkok⁶ Rayongwittayakom School, Rayong⁷ Oxford International College, United Kingdom

Abstract

The purpose of this study was to investigate the absorption, emission properties, antioxidant activities, total phenolic compound, and total flavonoid contents of the flavonol-based fluorescent probe (3-hydroxy-2-(pyren-1-yl)-4H-chromen-4-one). The antioxidant activity was evaluated using the 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) assay. Total phenolic content was also determined using Folin-Ciocalteu's reagent with gallic acid as a standard, as well as total flavonoid content using quercetin as a standard substance. The results found that flavonols have absorption properties. It has the highest absorbance at 355 nm and the highest emission at 418 nm (Ex 355 nm / Em 418 nm). Furthermore, synthetic flavonols were discovered to have antioxidant properties, with DPPH radicals showing a 44.7 % anti-oxidation value at 10 mg/mL. Total phenolic content and total flavonoids were 1.239 ± 0.043 mgGAE/gDW and 1.312 ± 0.014 mgCE/gDW. Therefore, synthetic flavonols exhibit antioxidant activity. The findings of this study can be used to develop new products as well as medical research.

Keywords: Flavonols; Fluorescent Probe; Antioxidants; Phenolic Content; Flavonoid Content

บทนำ

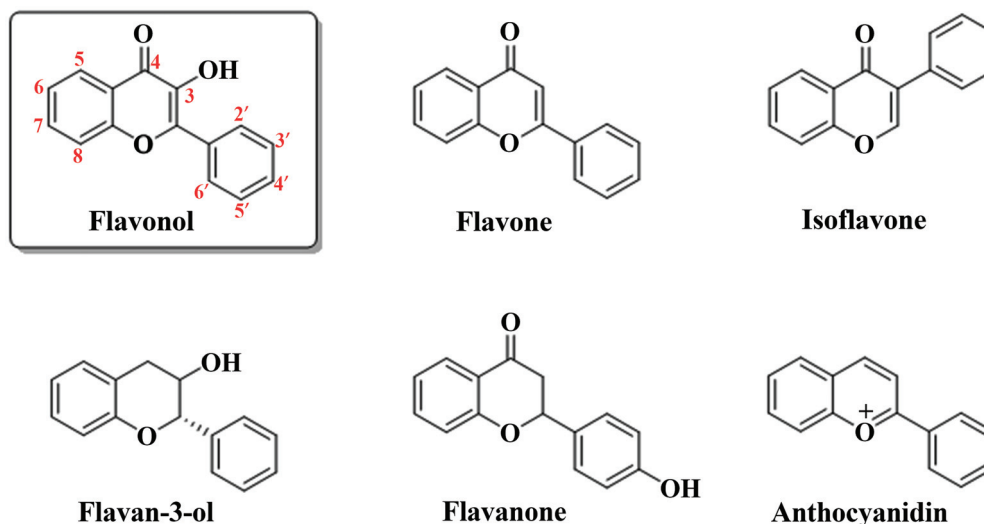
ฟลาโวนอล ฟลาโวน ฟลาวาโนน และไอโซฟลาโวน เป็นสารประกอบชนิดหนึ่งในกลุ่มของฟลาโวนอยด์ [1] - [3] โครงสร้างทางเคมีของฟลาโวนอลจะมีลักษณะคล้ายคลึงกับฟลาโวนแต่จะแตกต่างกันโดยที่ฟลาโวนอลจะมีหมู่ไฮดรอกซี (-OH) อยู่ตรงคาร์บอนตำแหน่งที่สามในโครงสร้างดังรูปที่ 1 [4] - [6] ฟลาโวนและฟลาโวนอลสามารถพบได้ในพืชโดยโครงสร้างที่พบมากที่สุดในพืชคือกลุ่มโครงสร้างที่มี β -ring hydroxylation ในตำแหน่งที่ 3' และ 4' ทั้งสองตำแหน่ง และกลุ่มโครงสร้างที่มีอยู่ตำแหน่งที่ 4' เท่านั้น (รูปที่ 1) มีชื่อเรียกว่า เควอซีทิน (Quercetin) และแคมป์เฟอร์อล (Kaempferol) ตามลำดับ [4], [7] พืชสังเคราะห์ฟลาโวนอลขึ้นเพื่อตอบสนองต่อจุลินทรีย์และการติดเชื้อ [8] - [11] รวมไปถึงทำหน้าที่ตอบสนองต่อแสงอาทิตย์และเพื่อกรองแสง UV-B ในขณะที่พืชทำการสังเคราะห์แสงซึ่งจะสะสมอยู่บนผิวชั้นนอกของเนื้อเยื่อพืช [12] - [13]

ในธรรมชาติสารประกอบฟลาโวนอลมีฤทธิ์ทางชีวภาพ และทางด้านเภสัชวิทยาที่หลากหลาย เช่น ฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระ [14] - [15] ด้านเชื้อแบคทีเรีย และต้านมะเร็ง [9] - [10], [16] ในปัจจุบันอนุพันธ์ของฟลาโวนอลยังถูกนำมาใช้ทางด้านเภสัชกรรม เช่น ยาที่มีส่วนผสมของ P-vitamin [17] - [19] นอกจากนี้ฟลาโวนอลจัดเป็นสีย้อมชนิดหนึ่งที่ได้จากธรรมชาติโดยให้สีเป็นสีเหลืองพบได้ในพืชต่าง ๆ ทั่วโลก [17] แต่ในธรรมชาติฟลาโวนอลมีปริมาณจำกัด จึงไม่เพียงพอต่อการนำมาใช้ทำสีย้อม และจะต้องบริโภคในปริมาณมากจึงจะเพียงพอต่อความต้องการของร่างกาย ดังนั้นนักวิทยาศาสตร์จึงได้ทำการสังเคราะห์อนุพันธ์ฟลาโวนอลจาก 2-ไฮดรอกซีอะซิโตฟีโนน (2-hydroxyacetophenone) กับแอลดีไฮด์ [9] - [10], [20] เพื่อให้มีปริมาณเพียงพอต่อความต้องการของมนุษย์

สารประกอบฟลาโวนอยด์ยังได้รับความสนใจในด้านการใช้เป็นสารเรืองแสง [21] - [23] ซึ่งเกิดจากโครงสร้างภายในโมเลกุลที่อยู่ในสภาวะกระตุ้นเกิดการถ่ายโอนโปรตอน (Excited State Intramolecular Proton Transfer (ESIPT)) [24] จึงส่งผลให้เกิดไอโซเมอร์ไรเซชันของฟลาโวนอยด์โดยสารเปลี่ยนโครงสร้างจากไอโซเมอร์หนึ่งไปเป็นอีกไอโซเมอร์หนึ่ง จากสภาวะพื้น (Normal Form) ไปสภาวะกระตุ้น (Phototautomer Form) หลังจากไอโซเมอร์เข้าสู่สภาวะกระตุ้นแล้วก็จะกลับคืนสู่สภาวะพื้น พร้อมกับการปล่อยโปรตอนออกมาในพลังงานที่ต่างกัน ด้วยเหตุนี้จึงมีการปล่อยพลังงานในรูปแบบสเปกตรัมการเรืองแสงของฟลาโวนอยด์ในตัวอย่างต่าง ๆ ซึ่งจะปรากฏพีคที่แตกต่างกันสองพีค ฟลาโวนอยด์ที่อยู่ในรูปปกติ และ Tautomeric Forms [17], [25] - [27] ตำแหน่งสูงสุดของการเรืองแสงจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของความเข้มข้น และช่วงของตัวอย่างหรือนิวคลีโอฟิลิกซิตีของตัวทำละลาย [17], [28]

3-hydroxy-2-(pyren-1-yl)-4H-chromen-4-one เป็นสารฟลาโวนอยด์สังเคราะห์ที่ถูกค้นพบเมื่อไม่นานมานี้ ซึ่งมีระบบคอนจูเกตที่มากของวง Pyrene ทำให้มีความไวต่อแสงสูงภายใต้แสงที่มองเห็นได้ [29] และมีวิธีการสังเคราะห์ที่ง่ายให้ร้อยละผลผลิตที่สูง ซึ่งเหมาะแก่การนำมาศึกษาและพัฒนาไปเป็นสีย้อมสำหรับการตรวจจับกับเซลล์มะเร็งในอนาคต

จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าสารในกลุ่มของฟลาโวนอยด์ รวมถึง 3-hydroxy-2-(pyren-1-yl)-4H-chromen-4-one เป็นสารที่มีคุณสมบัติในการเรืองแสง และมีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระสูง ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้เป็นประโยชน์ต่อสุขภาพ และมีความสำคัญทางด้านการแพทย์เป็นอย่างมาก 3-hydroxy-2-(pyren-1-yl)-4H-chromen-4-one ยังไม่เป็นที่รู้จักอย่างกว้างขวาง และยังไม่มีการศึกษาทางด้านสมบัติทางแสงและด้านฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระอย่างลึกซึ้ง ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีความประสงค์ที่จะศึกษาสมบัติทางแสงฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ปริมาณสารฟีนอลิก และปริมาณสารฟลาโวนอยด์ทั้งหมดเพื่อพัฒนาสารสังเคราะห์ไปสู่ทางการแพทย์เพื่อลดอันตรายจากภาวะปริมาณอนุมูลอิสระสูงในร่างกาย [17]



รูปที่ 1 โครงสร้างของสารประกอบ ฟลาโวนอยด์ ฟลาโวน ไอโซฟลาโวน ฟลาแวน-3-อล ฟลาโวนอน และแอนโทไซยานิดิน ที่เป็นสารประกอบในกลุ่มของฟลาโวนอยด์

วัตถุประสงค์การศึกษา

เพื่อศึกษาสมบัติทางแสง และฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระของโพรบฟลูออเรสเซนต์ ฟลาโวนอยด์ (3-hydroxy-2-(pyren-1-yl)-4H-chromen-4-one)

วิธีการดำเนินการศึกษา

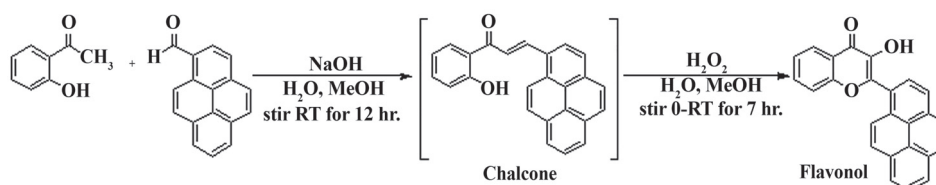
1. วัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในการสังเคราะห์และวิเคราะห์ **3-hydroxy-2-(pyren-1-yl)-4H-chromen-4-one** ใช้อุปกรณ์แก้วที่แห้งที่อุณหภูมิ 100 °C รีเอเจนต์และตัวทำละลายทั้งหมดซื้อจากบริษัท Sigma Aldrich, TCI (โตเกียว, ญี่ปุ่น), Carlo Erba (Emmendingen, เยอรมนี), Acros (Geel, เบลเยียม), Merck (Rahway, NJ, USA) และนำมาใช้โดยไม่ต้องทำให้บริสุทธิ์เพิ่ม สำหรับสารสังเคราะห์ถูกทำให้บริสุทธิ์โดยวิธีคอลัมน์โครมาโทกราฟีจะใช้ซิลิกาเจลสำหรับคอลัมน์โครมาโทกราฟี (Carlo Erba) ซึ่งทำหน้าที่เป็นเฟสที่อยู่นิ่ง ส่วนโครมาโทกราฟีแผ่นบาง (TLC) จะใช้ซิลิกาเจล 60 F254 (Merck) และนำไปส่องภายใต้ดูวูวที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร

การวัดค่าการดูดกลืนแสง และการเรืองแสงโดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ UV-vis (Agilent Technologies Cary 300, Santa Clara, CA, USA) และเครื่องวัดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์เรืองแสง (PerkinElmer LS55, Liantrisant, UK) นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี (NMR) (^1H และ ^{13}C NMR) ถูกใช้ที่อุณหภูมิห้องโดยเครื่อง Bruker (500 MHz) (Rheinstetten ประเทศเยอรมนี) โดยมี TMS เป็นข้อมูลอ้างอิง ภายใต้เงื่อนไข ESI แมสสเปกโตรเมตรีความละเอียดสูง (HRMS) จะถูกบันทึกบนแมสสเปกโตรมิเตอร์

2. การสังเคราะห์ **3-hydroxy-2-(pyren-1-yl)-4H-chromen-4-one (BCD-29)** [31]

ซึ่ง 2-hydroxyacetophenone (2.73 กรัม, 2.4 มิลลิโมล, 20 มิลลิโมล) ลงในขวดก้นกลมขนาด 150 มิลลิลิตร จากนั้นเติมตัวทำละลายเมทานอลลงไป 40 มิลลิลิตร ใส่แมกเนติกบาร์ลงไปแล้วปิดด้วยจุกปิดแก้ว จากนั้นนำไปกวนบนเครื่อง Stirrer ให้สารละลายผสมจนเข้ากัน จากนั้นเติมสารละลาย 60 เปอร์เซ็นต์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ในน้ำลงไป 40 มิลลิลิตรจะมีความร้อนเกิดขึ้นจนสารละลายต่อไปจนอุณหภูมิลดลงมาเท่ากับอุณหภูมิห้องแล้วทำการเติม 4.6 กรัม (20 มิลลิโมล) ของ pyrene-1-carbaldehyde ลงไปจนต่อเป็นเวลา 12 ชั่วโมงจนกว่าปฏิกิริยาจะเกิดสมบูรณ์ หลังจากปฏิกิริยาเกิดสมบูรณ์เติมน้ำเย็นลงไป 50 มิลลิลิตร และเติมกรดไฮโดรคลอริกลงไปเพื่อปรับ pH ให้เท่ากับ 2 จะได้ตะกอนของแข็งสีเหลืองแล้วนำไปกรองล้างด้วยน้ำกลั่น เพื่อกำจัดกรดจนหมด หลังจากนั้นเติมสารละลายไดคลอโรมีเทนลงไปเพื่อทำการสกัดปริมาณ 30 มิลลิลิตร จำนวน 3 ครั้ง และตามด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์คาร์บอเนต 100 มิลลิลิตร นำสารละลายชั้นไดคลอโรมีเทนมาเติมสารดูดความชื้นโซเดียมซัลเฟต แล้วนำสารละลายที่ได้ไประเหยด้วยเครื่องกลั่นระเหยสุญญากาศ จากนั้นจะทำให้บริสุทธิ์ด้วยวิธีการตกผลึกโดยใช้เอทานอลจะได้ผลิตภัณฑ์ Chalcone (รูปที่ 2) หากเช็ค TLC แล้วสารที่ได้ยังไม่บริสุทธิ์จะทำให้บริสุทธิ์ด้วยวิธีคอลัมน์ โครมาโทกราฟีโดยใช้สารละลายผสมที่ชะล้างคอลัมน์ เป็น 50 เปอร์เซ็นต์ เอทิลอะซิเตตในเฮกเซน

นำ Chalcone 30 มิลลิโมล ใส่ลงไปในขวดก้นกลมขนาด 150 มิลลิลิตร แล้วเติม 20 เปอร์เซ็นต์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ในเมทานอลลงไป 40 มิลลิลิตร นำสารผสมที่ได้ใส่ลงไปในอ่างน้ำแข็งและกวนให้ สารละลายผสมเข้ากัน จากนั้นเติม 30 เปอร์เซ็นต์ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ลงไป 30 มิลลิลิตร ลงไปอย่างช้า ๆ เมื่อสารผสมเข้ากันแล้วให้นำออกจากอ่างน้ำแข็งและกวนต่อไปอีก 7 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง จะเริ่มสังเกตเห็น ของแข็งค่อย ๆ ก่อตัวขึ้น เมื่อปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์จะนำตะกอนที่ได้มากรองแล้วเอามาล้างด้วยอีเทอร์ และนำตะกอนที่ได้ไปอบจนแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส หลังจากการสังเคราะห์ (Flavonol) แห้งแล้วนำมาชั่ง เพื่อคำนวณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เท่ากับ 78 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 2 ขั้นตอนการสังเคราะห์สารประกอบ 3-hydroxy-2-(pyren-1-yl)-4H-chromen-4-one

3. การหามวลโมเลกุลโดยเทคนิคมาลดี อิมเมจิง-ทอพ แมสสเปกโตรมิเตอร์

ชั่ง 3-hydroxy-2-(pyren-1-yl)-4H-chromen-4-one ประมาณ 1 มิลลิกรัม ลงไปในแอพเพนดรอปปขนาด 2 mL แล้วเติมตัวทำละลายไคลโอโรฟอร์มลงไป 1.5 mL เขย่าให้สารละลายผสมจนเป็นเนื้อเดียวกัน หลังจากนั้นจะทำการปิเปตสารละลายตัวอย่างมา 1 μ L ผสมกับสารละลายเมทริกซ์ แล้วทำการปิเปตสารละลายผสม 0.5 μ L ใส่ลงบนแผ่นแท็กกลาไรซินิมและทำให้แห้ง หลังจากนั้นนำแผ่นแท็กกลาไปเข้าเครื่อง MALDI-TOF Mass Spectrometer (JEOL JMS-S3000) แล้วฉายรังสีด้วยเลเซอร์ UV (ความยาวคลื่นประมาณ 350 นาโนเมตร) ทลาย ๆ จุดบนแผ่นแท็กกลาที่มีสารตัวอย่างเครื่องจะบันทึกผลเป็นสเปกตรัมและระบุน้ำหนักโมเลกุล

4. การศึกษาโครงสร้างสารโดยใช้เทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรมิเตอร์ (NMR)

ชั่ง 3-hydroxy-2-(pyren-1-yl)-4H-chromen-4-one 30 มิลลิกรัมใส่ลงไปในแอพเพนดรอปปขนาด 2 mL หลังจากนั้นเติมตัวทำละลาย Deuterated Chloroform ลงไป 1 mL เขย่าให้สารละลายผสมจนเป็นเนื้อเดียวกัน หลังจากนั้นปิเปตสารละลายตัวอย่างมา 0.5 mL แล้วเติมลงไปในหลอด NMR Tube ปิดฝาหลอด แล้วนำไปรันหาโปรตอน และคาร์บอนของสาร 3-hydroxy-2-(pyren-1-yl)-4H-chromen-4-one ด้วยเครื่อง NMR ความถี่ 500 MHz

5. การวิเคราะห์คุณสมบัติทางแสง

เตรียม Stock Solution ของ 3-hydroxy-2-(pyren-1-yl)-4H-chromen-4-one ให้มีความเข้มข้น 1,000 mM ด้วยตัวทำละลายไดเมทิลซัลฟอกไซด์ (DMSO) หลังจากนั้นนำฟอยล์มาพันรอบ ๆ ขวดสารละลาย เพื่อไม่ให้โดนแสงก่อนนำไปทดสอบ

การวิเคราะห์คุณสมบัติทางแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Agilent Technologies Cary 300, Santa Clara, CA, USA) จะตั้งค่าที่เครื่องเป็นแบบสแกนสเปกตรัมหลังจากนั้นจะทำการเตรียมตัวอย่างโดยทำการปิเปตตัวทำละลายชนิดต่าง ๆ เช่น อะซิโตนไครล์ ไคลโอโรฟอร์ม ไดเมทิลฟอร์มาไมด์ เอทานอล ฯลฯ มา 2,475 μ L ลงไปใน Cuvette ขนาด 3,000 μ L หลังจากนั้นทำการปิเปตสารละลายจาก Stock Solution มา 25 μ L ใส่ลงไปผสมกับตัวทำละลายที่เตรียมไว้ให้เป็นเนื้อเดียวกันแล้วนำไปวัดค่า ก่อนทำการวัดค่าของแต่ละตัวทำละลายทุกครั้งจะต้องทำการวัดค่าของ Blank ก่อนเสมอโดยใช้ตัวทำละลายที่ปราศจากสารละลายตัวอย่างเป็น Blank

การวิเคราะห์คุณสมบัติทางแสงด้วยเครื่องโดยใช้เครื่องวัดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์เรืองแสง (PerkinElmer LS55, Liantrisant, UK) โดยทำการตั้งค่าการกระตุ้นแสงที่ 355 nm เริ่มสแกนสเปกตรัมตั้งแต่ 200 - 750 nm เมื่อตั้งค่าเครื่องเสร็จแล้วจึงจะทำการเตรียมสารละลายตัวอย่าง โดยการเตรียมสารละลายตัวอย่าง จะทำการเตรียมเช่นเดียวกันกับการเตรียมสารละลายตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติทางแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ และทำการวัดค่า Blank เช่นกัน

6. การทดสอบฤทธิ์ของ 3-hydroxy-2-(pyren-1-yl)-4H-chromen-4-one (BCD-29)

6.1 การทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระโดยวิธี DPPH Radical Scavenging Assay [30]

นำ 3-hydroxy-2-(pyren-1-yl)-4H-chromen-4-one ที่สังเคราะห์ได้มาทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระโดยวิธี DPPH Radical Scavenging Assay เทียบกับสารละลายมาตรฐานกรดแอสคอร์บิก (Ascorbic Acid) หรือวิตามินซี เตรียมสารละลาย 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) ความเข้มข้น 0.25 mM ในเอทานอล 95 เปอร์เซ็นต์ และเตรียมสารมาตรฐานกรดแอสคอร์บิก หรือวิตามินซี (50,000 μ g/mL) โดยการเจือจางด้วยน้ำกลั่นเพื่อให้ได้ความเข้มข้น 125 250 500 1,000 2,500 5,000 และ 10,000 μ g/mL ตามลำดับ

เตรียมสารตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้ให้มีความเข้มข้น 125 250 500 1,000 2,500 5,000 และ 10,000 μ g/mL โดยนำสารสกัด 20 μ L ใส่ลง 96 Well Plate จากนั้นเติมสารละลายที่มีสารละลาย DPPH 180 μ L ผสมกับสารมาตรฐาน สารสกัดตัวอย่าง หรือ Blank ตั้งทิ้งไว้ในที่มืด 30 นาที ที่อุณหภูมิห้อง และนำไปวัดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง Microplate Reader ยี่ห้อ BioTek รุ่น Synergy H1 จากนั้นนำค่าการดูดกลืนแสงมาคำนวณร้อยละ Free Radical Scavenging Activity หรือ

% Scavenging Activity ซึ่งค่าที่ได้จะหมายถึงเปอร์เซ็นต์การออกฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ หรือค่าที่แสดงถึงการจับกันระหว่างสารต้านอนุมูลอิสระกับอนุมูลอิสระ ซึ่งหาได้จากสูตร

$$\text{Scavenging Activity (\%)} = \frac{(A_0 - A_1)}{A} \times 100$$

เมื่อ

A_0 คือ ค่าการดูดกลืนแสงของ Control
 A_1 คือ ค่าการดูดกลืนแสงของสารตัวอย่าง

6.2 การวิเคราะห์สารประกอบฟีนอลิกรวม โดยวิธี Folin-Ciocalteu Colorimetric Method [31]
 เตรียมสารละลายมาตรฐานกรดแกลลิก (Gallic Acid) 0 - 10,000 $\mu\text{g/mL}$ โดยเจือจางด้วย 95 เปอร์เซ็นต์ เอทานอลให้ได้ความเข้มข้น 125 250 500 1,000 2,500 5,000 และ 10,000 $\mu\text{g/mL}$

เตรียมสารสังเคราะห์ฟลาโวนอยด์โดยเจือจางด้วย 95 เปอร์เซ็นต์ เอทานอล ตามความเข้มข้นของกรดแกลลิก จากนั้นนำสารสังเคราะห์ 20 μL ใส่ลงใน 96 Well Plate จากนั้นเติมสารละลายที่มีสารละลาย 10 เปอร์เซ็นต์ Folin-Ciocalteu Reagent (FCR) (w/v) 100 μL ลงใน 96 Well Plate ตั้งทิ้งไว้ 6 นาที ที่อุณหภูมิห้องในที่มืด จากนั้นเติม 15 เปอร์เซ็นต์ โซเดียมคาร์บอเนต (Sodium Carbonate; Na_2CO_3) (w/v) ปริมาตร 80 μL ตั้งทิ้งไว้ 90 นาที ที่อุณหภูมิห้องในที่มืด จากนั้นนำไปวัดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 750 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง Microplate Reader ยี่ห้อ BioTek รุ่น Synergy H1 แล้วนำไปคำนวณหาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกในสารสกัด เปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานของกรดแกลลิกในหน่วยมิลลิกรัมสมมูลของกรดแกลลิกต่อกรัมของสารสกัด

6.3 การวิเคราะห์สารประกอบฟลาโวนอยด์ (Total Flavonoid Content) โดยวิธี Aluminium Chloride Colorimetric Method

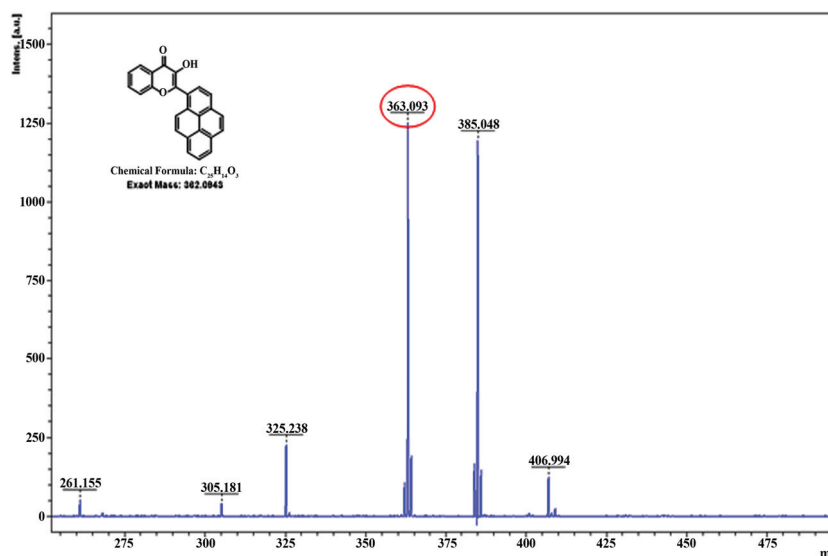
เตรียมสารละลายมาตรฐานเคอซีทิน 0 - 10,000 $\mu\text{g/mL}$ โดยเจือจางด้วย 95 เปอร์เซ็นต์ เอทานอลให้ได้ความเข้มข้น 125 250 500 1,000 2,500 5,000 และ 10,000 $\mu\text{g/mL}$

นำสารสังเคราะห์ฟลาโวนอยด์เจือจางด้วย 95 เปอร์เซ็นต์ เอทานอล ตามความเข้มข้นของเคอซีทิน จากนั้นเติมลงใน 96 Well Plate ปริมาตร 20 μL ที่มีน้ำกลั่น 40 μL ตามด้วยโซเดียมไนเตรท ความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 20 μL ตั้งไว้นาน 5 นาที ตามด้วยอะลูมิเนียมคลอไรด์ความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 20 μL ตั้งไว้นาน 6 นาที ตามด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 โมลาร์ ปริมาตร 100 μL นำมาวัดค่า OD ทันทีที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร ทำการทดลอง 3 ซ้ำ โดยใช้เคอซีทิน เป็น Positive Control

ผลการวิจัย

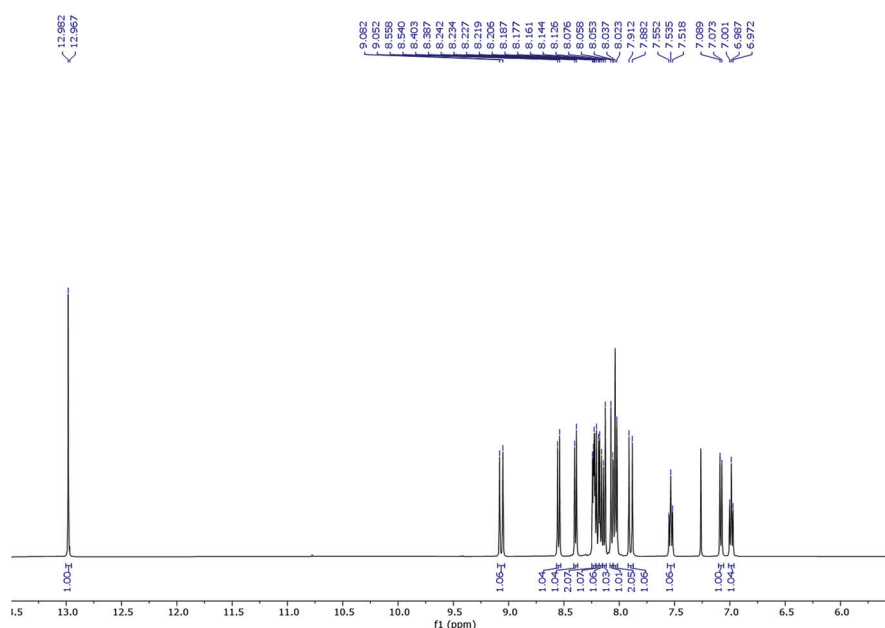
1. มลติ อิมเมจิง-ทอพ แมสสเปกโตรมิเตอร์ และนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี (NMR)

การศึกษาการหามวลโมเลกุลของสารสังเคราะห์ 3-hydroxy-2-(pyren-1-yl)-4H-chromen-4-one โดยใช้เทคนิคมลติ อิมเมจิง-ทอพ แมสสเปกโตรมิเตอร์ เทียบมวลโมเลกุลของโครงสร้างที่หาได้จากสูตรโมเลกุลซึ่งมีค่าเท่ากับ 362.0943 พบว่าพีคของสารสังเคราะห์ที่ได้รับการบันทึกปรากฏพีคของไอออน $\text{C}_{25}\text{H}_{14}\text{O}_3^+$ ที่ค่ามวลต่อประจุ (m/z) 363.093 (รูปที่ 3)



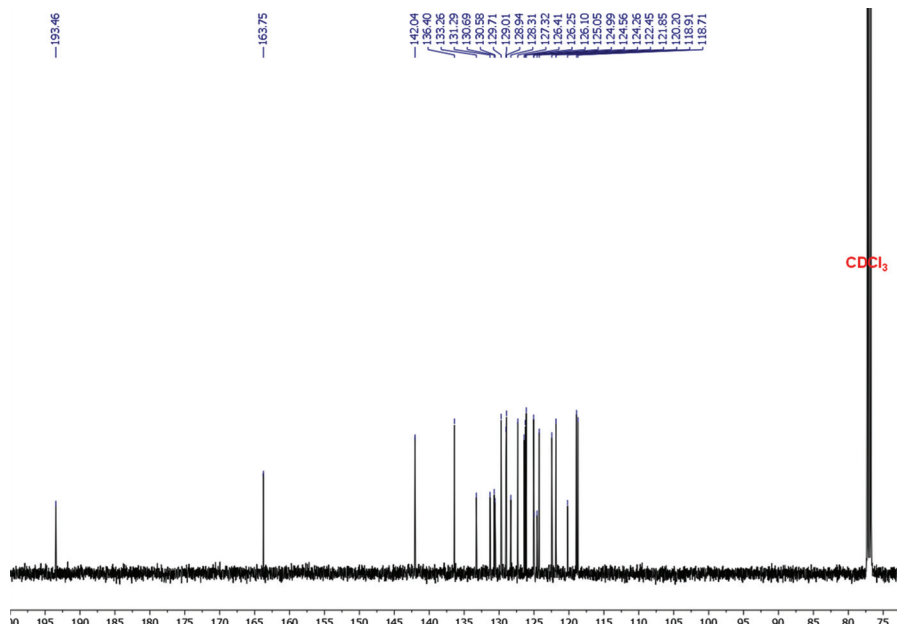
รูปที่ 3 สเปกตรัมมวลโมเลกุลของ 3-hydroxy-2-(pyren-1-yl)-4H-chromen-4-one ที่ได้จากการบันทึกโดยใช้เทคนิคแมสสเปกโตรเมตรี

การศึกษาพิสูจน์โครงสร้างโมเลกุลของ 3-hydroxy-2-(pyren-1-yl)-4H-chromen-4-one โดยอาศัยปรากฏการณ์การดูดกลืนพลังงานสนามแม่เหล็กในย่านความถี่สัญญาณวิทยุด้วยเทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี (NMR) ผลการศึกษาสมบัติเฉพาะของนิวเคลียสของโปรตอน (^1H) ที่ได้รับการบันทึกปรากฏพิคแสดงดังรูปที่ 4 และมีค่า Chemical Shift (δ) = ระยะห่างของสารที่พิจารณาจากสารอ้างอิง (Hz) หน่วยเป็น ppm ความถี่ของ NMR Spectrometer (MHz) ดังนี้ ^1H NMR (500 MHz, CDCl_3) δ 12.98 (s, 1H), 9.07 (d, $J = 15.0$ Hz, 1H), 8.55 (d, $J = 10.0$ Hz, 1H), 8.40 (d, $J = 5.0$ Hz, 1H), 8.23 (dd, $J = 5.0$, 5.0 Hz, 2H), 8.20 (d, $J = 10.0$ Hz, 1H), 8.17 (d, $J = 10.0$ Hz, 1H), 8.14 (d, $J = 5.0$ Hz, 1H), 8.07 (d, $J = 10.0$ Hz, 1H), 8.04 (t, $J = 10.0$ Hz, 2H), 7.90 (d, $J = 15.0$ Hz, 1H), 7.54 (t, $J = 5.0$ Hz, 1H), 7.08 (d, $J = 10.0$ Hz, 1H), 6.99 (t, $J = 5.0$ Hz, 1H)



รูปที่ 4 สเปกตรัมโปรตอนของ 3-hydroxy-2-(pyren-1-yl)-4H-chromen-4-one ที่ได้จากการบันทึกโดยใช้เทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ (^1H NMR) ในตัวทำละลายคลอโรฟอร์มดีวเทอเรต

ผลการศึกษสมบัติเฉพาะของนิวเคลียสของคาร์บอน (^{13}C) ที่ได้รับการบันทึกปรากฏพิคดังรูปที่ 5 และมีค่า Chemical Shift (δ) = ระยะห่างของสารที่พิจารณาจากสารอ้างอิง (Hz) หน่วยเป็น ppm ความถี่ของ NMR Spectrometer (MHz) ดังนี้ ^{13}C NMR (125 MHz, CDCl_3) δ 193.5, 163.8, 142.0, 136.4, 133.3, 131.3, 130.7, 130.6, 129.7, 129.0, 128.9, 128.3, 127.3, 126.4, 126.3, 126.1, 125.1, 125.0, 124.6, 124.3, 122.5, 121.9, 120.2, 118.91, 118.7



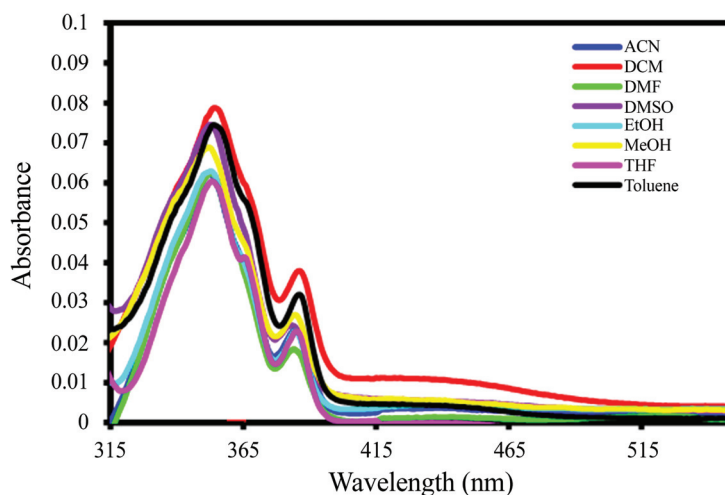
รูปที่ 5 สเปกตรัมคาร์บอนของ 3-hydroxy-2-(pyren-1-yl)-4H-chromen-4-one ที่ได้จากการบันทึกโดยใช้เทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ (^{13}C NMR) ในตัวทำละลายคลอโรฟอร์มดิฟเทอเรต

2. คุณสมบัติทางแสง

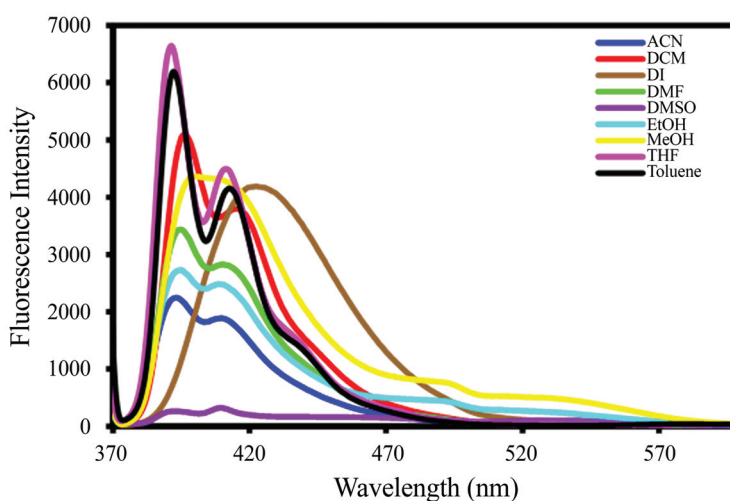
การศึกษาคุณสมบัติทางแสงของ 3-hydroxy-2-(pyren-1-yl)-4H-chromen-4-one โดยใช้ตัวทำละลายที่มีขั้วต่างกัน ได้แก่ อะซิโตนไทรล์ (ACN) ไดคลอโรมีเทน (DCM) ไดเมทิลฟอล์มาไมด์ (DMF) ไดเมทิลซัลฟอกไซด์ (DMSO) เอทานอล (EtOH) เมทานอล (MeOH) เตตระไฮโดรฟลูแรน (THF) และโทลูอีน (Toluene) ดังรูปที่ 6 และ 7 ซึ่งจะปรากฏพิคที่แตกต่างกันสองพิค คือฟลาโวนอลที่อยู่ในรูปปกติ และ Tautomeric Forms เทคนิค UV-Vis Absorption รูปที่ 6 พบว่ามีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 355 นาโนเมตร จากผลการทดลองการหาการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ได้นี้จะถูกนำไปใช้ในการทดสอบคุณสมบัติทางแสงด้วยเทคนิคการวัดค่าการเปล่งแสงของ 3-hydroxy-2-(pyren-1-yl)-4H-chromen-4-one รูปที่ 7 Fluorescent Spectra มีค่าการเปล่งแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 418 นาโนเมตร (Excited at 355 nm) ซึ่งตัวทำละลายที่มีขั้วต่ำ Polarity Index อยู่ในช่วง 2.4 - 4 เช่น ไดคลอโรมีเทน โทลูอีน และเตตระไฮโดรฟลูแรน จะสามารถทำให้ 3-hydroxy-2-(pyren-1-yl)-4H-chromen-4-one มีการเปล่งแสงออกมาได้เข้มที่สุด (Fluorescence Intensity) ค่าการเปล่งแสงสูงสุดอยู่ในช่วง 5,200 - 6,800

ฟลาโวนอล 3-hydroxy-2-(pyren-1-yl)-4H-chromen-4-one มีขั้วต่ำจึงสามารถละลายได้ดีในตัวทำละลายที่มีขั้วต่ำซึ่งสัมพันธ์กับทฤษฎี Like Dissolves Like ดังนั้นเมื่อใช้ตัวทำละลายที่มีขั้วต่ำเตรียมสารละลายจึงทำให้มีการเปล่งแสงออกมาได้เข้มที่สุด และเมื่อใช้ตัวทำละลายที่มีขั้วเพิ่มขึ้น Polarity Index อยู่ในช่วง 5.1 - 7.2 เช่น อะซิโตนไทรล์ ไดเมทิลฟอล์มาไมด์ ไดเมทิลซัลฟอกไซด์ เอทานอล และเมทานอล พบว่าจะมีค่าการเปล่งแสงลดลงมาเรื่อย ๆ ตามลำดับ

ความยาวคลื่นของแสงสีฟ้าที่อยู่ในช่วงประมาณ 400 - 500 นาโนเมตร ซึ่งแสงในช่วงความยาวคลื่นนี้จะมีประสิทธิภาพมากที่สุดสำหรับการรักษาภาวะบิลิรูบินในเลือดสูง แต่ต้องควบคุมปริมาณความเข้มแสงให้เหมาะสมเนื่องจากแสงในช่วงความยาวคลื่นนี้มีพลังงานสูงทำให้สามารถในการทะลุลงจอบุรุษตาได้ จากการทดลอง 3-hydroxy-2-(pyren-1-yl)-4H-chromen-4-one มีค่าการเปล่งแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 418 นาโนเมตร ซึ่งอาจจะมีมีการนำมาประยุกต์ใช้งานทางด้านการแพทย์ต่อไปได้ในอนาคต



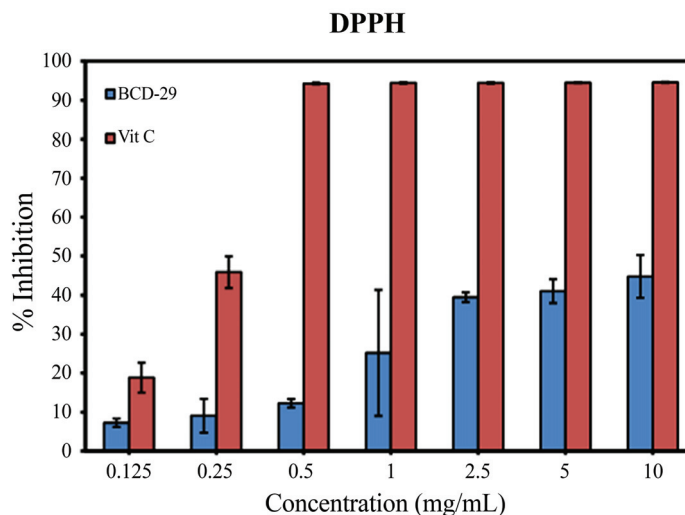
รูปที่ 6 UV-Vis Absorption ของ 3-hydroxy-2-(pyren-1-yl)-4H-chromen-4-one ที่มีความเข้มข้น 10 μM ในตัวทำละลายที่แตกต่างกัน



รูปที่ 7 Fluorescent Spectra ของ 3-hydroxy-2-(pyren-1-yl)-4H-chromen-4-one ที่มีความเข้มข้น 10 μM ในตัวทำละลายที่แตกต่างกันโดย Excitation Wavelength ที่ 355 nm

3. การทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของ 3-hydroxy-2-(pyren-1-yl)-4H-chromen-4-one

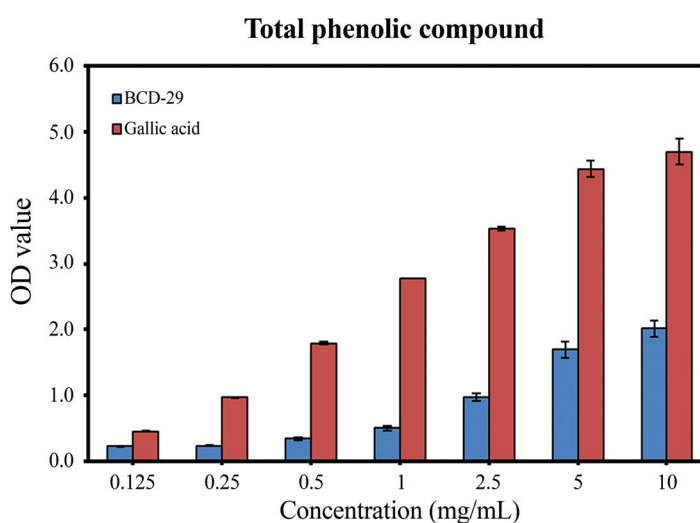
การศึกษาการต้านออกซิเดชันของฟลาโวนอยด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธี DPPH Radical Scavenging Assay พบว่าความเข้มข้นของวิตามินซีที่ 0.25 mg/mL มีค่าเปอร์เซ็นต์การต้านออกซิเดชันของ DPPH Radicals อยู่ที่ 45.9 เปอร์เซ็นต์ ความเข้มข้นของ 3-hydroxy-2-(pyren-1-yl)-4H-chromen-4-one (BCD-29) ที่ความเข้มข้น 1 2.5 5 และ 10 mg/mL มีค่าเปอร์เซ็นต์การต้านออกซิเดชันเป็น 25.2 39.5 41.0 และ 44.7 ตามลำดับ ดังรูปที่ 8 ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าสังเคราะห์ฟลาโวนอยด์มีความสามารถในการต้านออกซิเดชันสูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น และมีประสิทธิภาพในการต้านออกซิเดชันใกล้เคียงกับวิตามินซี แต่ความเข้มข้นของสารตัวอย่างที่ใช้สูงกว่าวิตามินซี 40 เท่า



รูปที่ 8 กราฟแสดงร้อยละการยับยั้งอนุมูลอิสระ (% Inhibition) กับความเข้มข้น (mg/mL) ของสารสังเคราะห์ฟลาโวนอลเปรียบเทียบกับวิตามินซี

4. การวิเคราะห์สารประกอบฟีนอลิกรวมของ 3-hydroxy-2-(pyren-1-yl)-4H-chromen-4-one

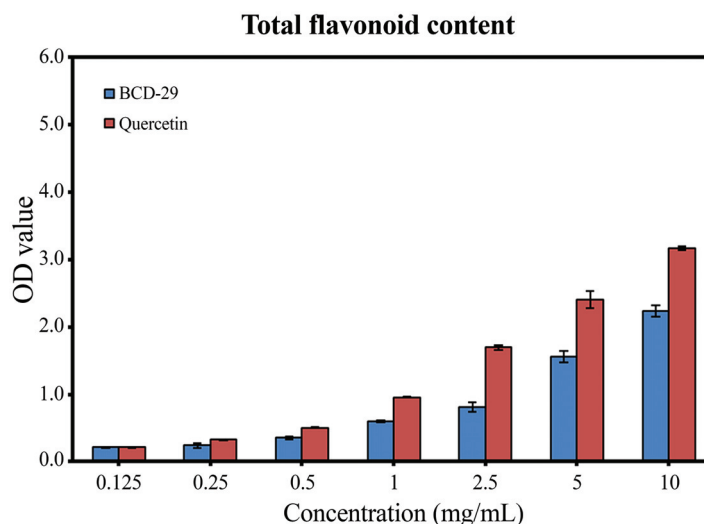
การศึกษาผลการวิเคราะห์สารประกอบฟีนอลิกรวมในสารสังเคราะห์ฟลาโวนอลแสดงให้เห็นถึงปริมาณสารประกอบฟีนอลิกที่มีอยู่ในตัวอย่างเมื่อเทียบกับกรดแกลลิกที่ใช้เป็น Positive Control (รูปที่ 9) จากผลการทดลองความเข้มข้นของกรดแกลลิกที่ 0.25 0.5 1 และ 2.5 mg/mL มีค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายตัวอย่าง หรือ Optical Density (OD) อยู่ที่ 0.965 1.790 2.775 และ 3.932 ตามลำดับ โดยค่า OD ที่สูงขึ้นแปรผันตรงกับปริมาณสารประกอบฟีนอลิกที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้สารสังเคราะห์ฟลาโวนอลที่มีความเข้มข้นเดียวกันกับกรดแกลลิกมีค่า OD อยู่ที่ 0.232 0.337 0.499 และ 0.964 ตามลำดับ จากผลการวิเคราะห์สารประกอบฟีนอลิกรวมที่พบในสารสังเคราะห์ฟลาโวนอลที่ความเข้มข้น 2.5 mg/mL จะมีค่า OD ใกล้เคียงกันอย่างมีนัยสำคัญที่ความเข้มข้น 0.25 mg/mL ของกรดแกลลิกโดยมีสมการเส้นตรง คือ $y = 0.7971x - 0.4886$, $R^2 = 0.9907$ พบว่ามีค่าเท่ากับ 1.239 ± 0.043 mgGAE/gDW ดังตารางที่ 1



รูปที่ 9 กราฟแสดงปริมาณค่าการดูดกลืนแสงของสารสังเคราะห์ฟลาโวนอลที่แสดงถึงปริมาณสาร Phenolic Compounds กับความเข้มข้น (mg/mL) เปรียบเทียบกับกรดแกลลิก

5. การวิเคราะห์สารประกอบฟลาโวนอยด์ของ 3-hydroxy-2-(pyren-1-yl)-4H-chromen-4-one

การศึกษาการวิเคราะห์สารประกอบฟลาโวนอยด์ของสารสังเคราะห์ฟลาโวนอลเทียบกับสารมาตรฐาน เควอซีทิน (Quercetin) มีสมการเส้นตรง คือ $y = 0.6797x - 0.2929$, $R^2 = 0.9927$ ผลพบว่ามีความเท่ากับ 1.312 ± 0.014 mgCE/gDW ดังตารางที่ 1 ผลการทดลองพบว่าที่ความเข้มข้น 0.125 mg/mL ของสารสังเคราะห์ จะมีค่า OD เท่ากับสารมาตรฐาน และจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 10 ถ้าเทียบจากผลการวิเคราะห์ข้างต้นจะเห็นว่าปริมาณฟีนอลิกรวม (1.239 ± 0.043 mgGAE/gDW) มีค่าน้อยกว่าปริมาณฟลาโวนอยด์รวม (1.312 ± 0.014 mgCE/gDW) ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับโครงสร้างทางเคมีของฟลาโวนอลซึ่งเป็นสารกลุ่มฟลาโวนอยด์



รูปที่ 10 กราฟแสดงปริมาณค่าการดูดกลืนแสงของสารสังเคราะห์ฟลาโวนอลที่แสดงถึงปริมาณสาร Flavonoid กับความเข้มข้น (mg/mL) เปรียบเทียบกับเควอซีทิน (Quercetin)

ตารางที่ 1 ปริมาณฟีนอลิกรวม (TPC) และปริมาณฟลาโวนอยด์รวม (TFC) ของ 3-hydroxy-2-(pyren-1-yl)-4H-chromen-4-one

วิเคราะห์	ค่าการดูดกลืนแสง			
	1	2	3	เฉลี่ย $\pm$ S.D.
TPC (mgGAE/gDW)	0.456	0.540	0.500	0.499 $\pm$ 0.034
	ปริมาณรวม (mg/gDW)			
	1	2	3	เฉลี่ย $\pm$ S.D.
	1.185	1.290	1.240	1.239 $\pm$ 0.043
TFC (mgCE/gDW)	ค่าการดูดกลืนแสง			
	1	2	3	เฉลี่ย $\pm$ S.D.
	0.586	0.603	0.608	0.599 $\pm$ 0.009
	ปริมาณรวม (mg/gDW)			
	1	2	3	เฉลี่ย $\pm$ S.D.
	1.293	1.318	1.325	1.312 $\pm$ 0.014

All data were expressed as mean $\pm$ S.D. for 3 replications

สรุปผลการวิจัย

โดยสรุปสารสังเคราะห์ 3-hydroxy-2-(pyren-1-yl)-4H-chromen-4-one มีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ ที่ความเข้มข้น 10 mg/mL เท่ากับ 44.7 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเทียบเท่ากับการใช้วิตามินซีที่ 0.25 mg/mL มีปริมาณ ฟีนอลิกรวมและปริมาณฟลาโวนอยด์รวมเท่ากับ 1.239 ± 0.043 mgGAE/gDW และ 1.312 ± 0.014 mgCE/gDW มีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 355 นาโนเมตร และค่าการเปล่งแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 418 นาโนเมตร ซึ่งความยาวคลื่นในช่วงนี้มีบทบาทสำคัญทางด้านการแพทย์ ดังนั้นสารสังเคราะห์ในกลุ่มของ ฟลาโวนอลเป็นอีกหนึ่งกลุ่มที่ยังคงมีความน่าสนใจที่จะนำมาศึกษาและพัฒนาประยุกต์ใช้ด้านการแพทย์ในอนาคต

References

- [1] Herrmann, K. (1976). Flavonols and Flavones in Food Plants: A Review. **International Journal of Food Science & Technology**. Vol. 11, Issue 5, pp. 433-448. DOI: 10.1111/j.1365-2621.1976.tb00743.x
- [2] Mahmud, A. R., Ema, T. I., Siddiquee, M. F.-R., Shahriar, A., Ahmed, H., Mosfeq-Ul-Hasan, M., Rahman, N., Islam, R., Uddin, M. R., and Mizan, M. F. R. (2023). Natural Flavonols: Actions, Mechanisms, and Potential Therapeutic Utility for Various Diseases. **Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences**. Vol. 12, p. 47. DOI: 10.1186/s43088-023-00387-4
- [3] Hollman, P. C. H. and Arts, I. C. W. (2000). Flavonols, Flavones and Flavanols-Nature, Occurrence and Dietary Burden. **Journal of the Science of Food and Agriculture**. Vol. 80, Issue 7, pp. 1081-1093. DOI: 10.1002/(SICI)1097-0010(20000515)80:7<1081::AID-JSFA566>3.0.CO;2-G
- [4] Şöhretoğlu, D. and Sari, S. (2020). Flavonoids as Alpha-Glucosidase Inhibitors: Mechanistic Approaches Merged with Enzyme Kinetics and Molecular Modelling. **Phytochemistry Review**. Vol. 19, Issue 5, pp. 1081-1092. DOI: 10.1007/s11101-019-09610-6
- [5] Gervasi, T., Calderaro, A., Barreca, D., Tellone, E., Trombetta, D., Ficarra, S., Smeriglio, A., Mandalari, G., and Gattuso, G. (2022). Biotechnological Applications and Health-Promoting Properties of Flavonols: An Updated View. **International Journal of Molecular Sciences**. Vol. 23, Issue 3, p. 1710. DOI: 10.3390/ijms23031710
- [6] Shen, N., Wang, T., Gan, Q., Liu, S., Wang, L., and Jin, B. (2022). Plant Flavonoids: Classification, Distribution, Biosynthesis, and Antioxidant Activity. **Food Chemistry**. Vol. 383, DOI: 10.1016/j.foodchem.2022.132531
- [7] Ojha, M. D., Yadav, A., and Hariprasad, P. (2023). Analyzing the Potential of Selected Plant Extracts and Their Structurally Diverse Secondary Metabolites for α -glucosidase Inhibitory Activity: *in vitro* and *in silico* Approach. **Journal of Biomolecular Structure and Dynamics**. Vol. 41, Issue 19, pp. 9523-9538. DOI: 10.1080/07391102.2022.2142847
- [8] Kumar, S. and Pandey, A. K. (2013). Phenolic Content, Reducing Power and Membrane Protective Activities of *Solanum xanthocarpum* Root Extracts. **Vegetos**. Vol. 26, Issue 1, pp. 301-307. DOI: 10.5958/j.2229-4473.26.1.043
- [9] Kumar, S. and Pandey, A. K. (2013). Chemistry and Biological Activities of Flavonoids: An Overview. **The Scientific World Journal**. Vol. 2013, Article ID 162750, pp. 1-16. DOI: 10.1155/2013/162750

- [10] Boudérias, S., Teszlák, P., Jakab, G., and Körösi, L. (2020). Age-and Season-Dependent Pattern of Flavonol Glycosides in Cabernet Sauvignon Grapevine Leaves. **Scientific Reports**. Vol. 10, Issue 1, Article Number 14241. DOI: 10.1038/s41598-020-70706-7
- [11] Liu, L., Gregan, S., Winefield, C., and Jordan, B. (2015). From UVR8 to Flavonol Synthase: UV-B-Induced Gene Expression in Sauvignon Blanc Grape Berry. **Plant, Cell & Environment**. Vol. 38, Issue 5, pp. 905-919. DOI: 10.1111/pce.12349
- [12] Gregan, S. M., Wargent, J. J., Liu, L., Shinkle, J., Hofmann, R., Winefield, C., Trought, M., and Jordan, B. (2012). Effects of Solar Ultraviolet Radiation and Canopy Manipulation on the Biochemical Composition of Sauvignon Blanc Grapes. **Australian Journal of Grape and Wine Research**. Vol. 18, Issue 2, pp. 227-238. DOI: 10.1111/j.1755-0238.2012.00192.x
- [13] Castillo-Muñoz, N., Gómez-Alonso, S., García-Romero, E., and Hermosín-Gutiérrez, I. (2007). Flavonol Profiles of Vitis vinifera Red Grapes and Their Single-Cultivar Wines. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. Vol. 55, Issue 3, pp. 992-1002. DOI: 10.1021/jf062800k
- [14] Pietta, P.-G. (2000). Flavonoids as Antioxidants. **Journal of Natural Products**. Vol. 63, Issue 7, pp. 1035-1042. DOI: 10.1021/np9904509
- [15] Agati, G., Azzarello, E., Pollastri, S., and Tattini, M. (2012). Flavonoids as Antioxidants in Plants: Location and Functional Significance. **Plant Science**. Vol. 196, pp. 67-76. DOI: 10.1016/j.plantsci.2012.07.014
- [16] Heim, K. E., Tagliaferro, A. R., and Bobilya, D. J. (2002). Flavonoid Antioxidants: Chemistry, Metabolism and Structure-Activity Relationships. **The Journal of Nutritional Biochemistry**. Vol. 13, Issue 10, pp. 572-584. DOI: 10.1016/S0955-2863(02)00208-5
- [17] Bondar, O. P., Pivovarenko, V. G., and Rowe, E. S. (1998). Flavonols-New Fluorescent Membrane Probes for Studying the Interdigitation of Lipid Bilayers. **Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Biomembranes**. Vol. 1369, Issue 1, pp. 119-130. DOI: 10.1016/S0005-2736(97)00218-6
- [18] Klymchenko, A. S., Ozturk, T., and Demchenko, A. P. (2002). Synthesis of Furanochromones: A New Step in Improvement of Fluorescence Properties. **Tetrahedron Letters**. Vol. 43, Issue 39, pp. 7079-7082. DOI: 10.1016/S0040-4039(02)01547-2
- [19] Chou, P. T., Martinez, M. L., and Clements, J. H. (1993). Reversal of Excitation Behavior of Proton-Transfer vs. Charge-Transfer by Dielectric Perturbation of Electronic Manifolds. **The Journal of Physical Chemistry**. Vol. 97, Issue 11, pp. 2618-2622
- [20] Pandey, A. K. (2007). Anti-Staphylococcal Activity of a Pan-Tropical Aggressive and Obnoxious Weed Parthenium Histerophorus: An *in vitro* Study. **National Academy Science Letters**. Vol. 30, Issue 11/12, 383-386.
- [21] Reszka, M., Serdiuk, I. E., Kozakiewicz, K., Nowacki, A., Myszk, H., Bojarski, P., and Liberek, B. (2020). Influence of a 4'-Substituent on the Efficiency of Flavonol-Based Fluorescent Indicators of β -Glycosidase Activity. **Organic & Biomolecular Chemistry**. Vol. 18, Issue 38, pp. 7635-7648
- [22] Sentchouk, V. and Bondaryuk, E. (2007). Fluorescent Analysis of Interaction of Flavonols with Hemoglobin and Bovine Serum Albumin. **Journal of Applied Spectroscopy**. Vol. 74, Issue 5, pp. 731-737. DOI: 10.1007/s10812-007-0117-5

- [23] Höfener, S., Kooijman, P. C., Groen, J., Ariese, F., and Visscher, L. (2013). Fluorescence Behavior of (Selected) Flavonols: A Combined Experimental and Computational Study. **Physical Chemistry Chemical Physics**. Vol. 30, pp. 12572-12581. DOI: 10.1039/C3CP44267E
- [24] Ameer-Beg, S., Ormson, S. M., Brown, R. G., Matousek, P., Towrie, M., Nibbering, E. T., Foggi, P., and Neuwahl, F. V. (2001). Ultrafast Measurements of Excited State Intramolecular Proton Transfer (ESIPT) in Room Temperature Solutions of 3-Hydroxyflavone and Derivatives. **The Journal of Physical Chemistry A**. Vol. 105, Issue 15, pp. 3709-3718. DOI: 10.1021/jp0031101
- [25] Ormson, S. M., Brown, R. G., Vollmer, F., and Rettig, W. (1994). Switching Between Charge-and Proton-Transfer Emission in the Excited State of a Substituted 3-Hydroxyflavone. **Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry**. Vol. 81, Issue 2, pp. 65-72. DOI: 10.1016/1010-6030(94)03778-7
- [26] Ameer-Beg, S., Ormson, S. M., Poteau, X., and Brown, R. G., Foggi, P., Bussotti, L., and Neuwahl, F. V. (2004). Ultrafast Measurements of Charge and Excited-State Intramolecular Proton Transfer in Solutions of 4'-(N, N-dimethylamino) Derivatives of 3-Hydroxyflavone. **The Journal of Physical Chemistry A**. Vol. 108, Issue 34, pp. 6938-6943. DOI: 10.1021/Jp048512d
- [27] Doroshenko, A. O., Posokhov, E. A., Verezubova, A. A., and Ptyagina, L. M. (2000). Excited State Intramolecular Proton Transfer Reaction and Luminescent Properties of the Ortho-Hydroxy Derivatives of 2, 5-diphenyl-1, 3, 4-oxadiazole. **Journal of Physical Organic Chemistry**. Vol. 13, Issue 5, pp. 253-265. DOI: 10.1002/1099-1395(200005)13:5<253::AID-POC238>3.0.CO;2-D
- [28] Swinney, T. and Kelley, D. (1993). Proton Transfer Dynamics in Substituted 3-Hydroxyflavones: Solvent Polarization Effects. **The Journal of Chemical Physics**. Vol. 99, Issue 1, pp. 211-221. DOI: 10.1063/1.465799
- [29] Tehfe, M.-A., Dumur, F., Xiao, P., Graff, B., Morlet-Savary, F., Fouassier, J.-P., Gigmes, D., and Lalevée, J. (2013). New Chromone Based Photoinitiators for Polymerization Reactions Under Visible Light. **Polymer Chemistry**. Vol. 4, Issue 15, pp. 4234-4244. DOI: 10.1039/C3PY00536D
- [30] Singsai, K., Sakdavirote, A., Wechpanishkitkul, K., and Moonsamai, A. (2020). The Comparison of Phenolic Compounds, Flavonoids and Antioxidant Activities of the Ethanolic Extracts of Shoots, Leaves, Fruits and Seeds of *Leucaena Leucocephala*. **Naresuan Phayao Journal**. Vol. 13, No. 3, pp. 66-73
- [31] Blainski, A., Lopes, G., and Mello, J. (2013). Application and Analysis of the Folin Ciocalteu Method for the Determination of the Total Phenolic Content from *Limonium Brasiliense* L. **Molecules**. Vol. 18, pp. 6852-6865. DOI: 10.3390/molecules18066852

การศึกษาแนวทางการปรับปรุงอาคารตามมาตรฐาน BEC (Building Energy Code) : กรณีศึกษาอาคารเฉลิมพระเกียรติ 56 พรรษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

The Study of Building Development of Building Energy Code: A Case Study Chaloe Phrakiat 56th Phansa Building at Rajamangala University of Technology Lanna

กาญจนา ปะทะนอมปี^{1*} กิตติกุล ศิริเมืองมูล¹ สุภาวรรณ ปันดี¹ ภาวิดา ชีวะะพันธ์¹ และภุมินทร์ พุทธโกมุท¹
Khanjana Patanompee^{1*} Kittikul Sirimeungmoon¹ Supawan Pundi¹ Pawida Cheewayaphan¹
and Bhumin Bhutdhakomut¹

Received: March 11, 2024; Revised: July 9, 2024; Accepted: July 10, 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการใช้พลังงานสุทธิของอาคารกรณีศึกษา: อาคารเฉลิมพระเกียรติ 56 พรรษา มีลักษณะการใช้งาน 8 ชั่วโมง และเป็นอาคารที่มีการดำเนินการกิจกรรมและการใช้งานมากกว่า 10 - 15 ปี จำเป็นจะต้องมีการปรับปรุงเพื่อการอนุรักษ์พลังงานตามกฎหมายกระทรวงฯ โดยทำการศึกษาแบบทางสถาปัตยกรรมและสำรวจอาคารเพื่อประเมินค่าการใช้พลังงานในอาคาร วัสดุในระบบกรอบอาคาร งานระบบประกอบอาคาร เพื่อประเมินค่าการใช้พลังงานในอาคารด้วยโปรแกรมตรวจสอบค่าการอนุรักษ์พลังงานออนไลน์ (BEC Web-based) และเปรียบเทียบกับเกณฑ์กฎหมาย เรื่อง การกำหนดประเภทหรือขนาดของอาคาร และมาตรฐาน หลักเกณฑ์ในการออกแบบเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ. 2563 เพื่อเสนอแนวทางการปรับปรุง ผลการศึกษาพบว่า กรอบอาคารมีค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของผนัง 53.251 W/m^2 และค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคา 37.305 W/m^2 ซึ่งสูงกว่าที่เกณฑ์กฎหมายฯ กำหนด คือสูงกว่า 50 W/m^2 และ 10 W/m^2 ส่วนงานระบบประกอบอาคารเป็นไปตามเกณฑ์ จึงทำการเสนอปรับปรุงอาคาร โดยการเพิ่มฟิล์มกันความร้อนที่มีการเคลือบสารลดความร้อนบนเนื้อฟิล์ม และเพิ่มฉนวนกันความร้อนหลังคาที่มีคุณสมบัติการนำความร้อนต่ำและค่าต้านทานความร้อนสูงพบว่า ค่า OTTV และ

¹ คณะศิลปกรรมและสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

¹ Faculty of Arts and Architecture, Rajamangala University of Technology Lanna

* Corresponding Author, Tel. 06 5964 2664, E - mail: mikan.change@gmail.com

ค่า RTTV ลดลงเท่ากับ 38.74 W/m^2 และ 9.50 W/m^2 และการใช้พลังงานโดยรวมของอาคารจากเดิมที่ต่ำกว่าอาคารอ้างอิงอยู่ที่ 303,831.88 kWh/Year เมื่อทำการปรับปรุงส่งผลให้ลดลงจากเดิมเท่ากับ 261,010.92 kWh/Year ด้านงบประมาณความเป็นไปได้ในการลงทุนประมาณ 1,761,351.93 บาท ระยะคืนทุน 9.72 ปี และช่วยให้มหาวิทยาลัยประหยัดค่าใช้จ่ายไฟฟ้าลดลงคิดเป็นร้อยละ 53.96 หลังจากการก่อสร้างปรับปรุงอาคาร

คำสำคัญ : อาคารเรียน; ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของผนัง; ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคา; พลังงาน; โปรแกรม BEC Web-based

Abstract

This research studied the net energy use of a building: Chaloeam Phrakiat 56th Anniversary Building. The building was utilized for 8 hours and has been in operation for over 10 - 15 years, necessitating improvements for energy conservation according to ministerial regulations. Architectural studies and building surveys were conducted to assess energy usage in the building, including the building materials and building systems, and to simulate the building using the online Building Energy Code (BEC) Web-based program. The results were compared with the Ministerial Regulation Prescribing Type or Size of Building and Standard, Criteria and Procedure in Designing Building for Energy Conservation B.E. 2563 (2020) to propose improvement measures. The study results found that the total heat transfer value of the walls was 53.251 W/m^2 , and the roof was 37.305 W/m^2 , which exceeded the ministerial regulation criteria of 50 W/m^2 and 10 W/m^2 . The building systems met the ministerial criteria. The proposed improvements included adding heat-insulating film coated with heat-reducing substances and increasing roof insulation with low thermal conductivity and high thermal resistance properties. As a result, the OTTV and RTTV values decreased by 38.74 W/m^2 and 9.50 W/m^2 . The overall energy consumption of the building, which was initially less than the reference building at 303,831.88 kWh/year, was reduced to 261,010.92 kWh/year after the improvements. In terms of the budget, the investment feasibility was approximately 1,761,351.93 Baht, with a payback period of 9.72 years. This leads to potential cost saving for the university by reducing electricity expenses by 53.96 % after the building improvement.

Keywords: Educational Building; Overall Thermal Transfer Value; Roof Thermal Transfer Value; Energy; BEC Web-based

บทนำ

ปัจจุบันการใช้พลังงานในประเทศไทย มีปริมาณที่เพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง เพื่อตอบสนองความต้องการของภาคประชาชน ภาคธุรกิจและอุตสาหกรรม แต่เนื่องจากทรัพยากรพลังงานภายในประเทศมีค่อนข้างจำกัด จึงต้องพึ่งพาการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศ แนวทางสำคัญที่จะช่วยลดอัตราการใช้พลังงานในประเทศ คือการส่งเสริมให้มีการใช้พลังงานอย่างประหยัดและมีประสิทธิภาพในทุกภาคส่วน [1]

จากปัญหาที่เกิดขึ้นดังกล่าว กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานได้ออกกฎกระทรวงกำหนดประเภทหรือขนาดของอาคาร และมาตรฐานหลักเกณฑ์และวิธีการในการออกแบบอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ. 2563 หรือที่เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า เกณฑ์มาตรฐานอาคารด้านพลังงาน (Building Energy Code หรือ BEC) [2]

บังคับอาคารตามกฎหมายที่มีการก่อสร้างอาคารหรือดัดแปลงที่มีพื้นที่รวมทั้งหมดตั้งแต่ 2,000 ตารางเมตรขึ้นไป และอยู่ใน 9 ประเภท ได้แก่ โรงมหรสพ โรงแรม สถานบริการ สถานพยาบาล สถานศึกษา ห้างสรรพสินค้า อาคารชุด อาคารชุมนุม ต้องมีการออกแบบอาคารให้เป็นไปตามมาตรฐาน หลักเกณฑ์และวิธีการในการออกแบบเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน ซึ่งกฎกระทรวงฯ ได้มีการบังคับใช้เมื่อวันที่ 13 มีนาคม พ.ศ. 2564 ที่ผ่านมา โดยที่อาคารในภาครัฐที่มีการก่อสร้างและใช้งานในระยะเวลา 10 - 15 ปีที่ผ่านมา จำเป็นจะต้องมีการปรับปรุงเพื่อการอนุรักษ์พลังงานตามกฎหมายกระทรวงฯ

อาคารเฉลิมพระเกียรติ 56 พรรษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี มีลักษณะการใช้งาน 8 ชั่วโมง ซึ่งมีทั้งส่วนสำนักงานและห้องเรียน ตามกฎกระทรวงฯ ข้างต้นที่ต้องมีการออกแบบอาคารให้เป็นไปตามมาตรฐาน และเข้าข่ายอาคารที่มีการก่อสร้างและใช้งานอยู่ในระยะเวลา 10 - 15 ปี และตามนโยบายการจัดการพลังงานของทางมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จะดำเนินการและพัฒนาระบบการจัดการพลังงานและสิ่งแวดล้อมอย่างเหมาะสม โดยกำหนดให้การอนุรักษ์พลังงานและสิ่งแวดล้อม เป็นส่วนหนึ่งของหน่วยงานให้สอดคล้องกับกฎหมายและข้อกำหนดอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง [3] จึงเลือกอาคารเฉลิมพระเกียรติ 56 พรรษา (รูปที่ 1) เป็นอาคารกรณีศึกษา เนื่องจากกิจกรรมและการใช้งานของอาคารเป็นรูปแบบอาคารเรียนและสำนักงานที่มีกลุ่มผู้ใช้งานที่แน่นอนและมีการใช้พลังงานที่ค่อนข้างมาก ขนาดอาคารและการแบ่งพื้นที่ชัดเจนเหมาะสมต่อการศึกษา สะดวกต่อการเข้าไปสำรวจเก็บข้อมูล และยังเป็นประโยชน์ให้แก่มหาวิทยาลัย ที่จะนำผลการศึกษาไปเป็นแนวทางการปรับปรุงอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงานต่อไป



รูปที่ 1 อาคารกรณีศึกษา: อาคารเฉลิมพระเกียรติ 56 พรรษา

จากการศึกษากระบวนการและวิธีการประเมินค่าการอนุรักษ์พลังงานของอาคาร [4] พบว่า โปรแกรม BEC หรือ Building Energy Code เป็นเครื่องมือคำนวณค่าการอนุรักษ์พลังงานตามเกณฑ์มาตรฐานการออกแบบเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน ซึ่งประกอบด้วย ระบบเปลือกอาคาร ผังอาคาร และหลังคาอาคาร ระบบไฟฟ้าแสงสว่าง ระบบปรับอากาศ อุปกรณ์ผลิตน้ำร้อน การใช้พลังงานหมุนเวียนและการใช้พลังงานโดยรวมของอาคาร โดยโปรแกรม BEC ได้บรรจุค่าเกณฑ์มาตรฐานและสมการการคำนวณตามที่กฎกระทรวงฯ กำหนด และได้มีการนำไปเป็นเครื่องมือ เพื่อศึกษาประสิทธิภาพด้านการอนุรักษ์พลังงานของอาคาร อาทิตถศึกษาแนวทางการปรับปรุงอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน กรณีศึกษาอาคารสถานศึกษาของ [5] วิธีการดำเนินการวิจัยคือ กำหนดอาคารที่จะทำการศึกษาเป็นอาคารสถานศึกษา ซึ่งเข้าข่ายอาคาร 9 ประเภทตามกฎหมายกระทรวงฯ โดยได้ใช้เครื่องมือในการจำลอง คือ โปรแกรม BEC (BEC Version 1.0.5) ในการประเมินค่าการใช้พลังงานและประสิทธิภาพพลังงานระหว่างระบบ ผลการวิจัยพบว่า แนวทางในการอนุรักษ์พลังงานในอาคารที่ใช้เดิมนั้นสามารถทำให้อาคารประหยัดพลังงานได้ โดยการปรับปรุงวัสดุกรอบอาคารที่มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนต่ำ (U-Value) ซึ่งจากการปรับปรุงวัสดุดังกล่าวทำให้อาคารกรณีศึกษา มีค่า OTTV และค่า RTTV ในส่วนที่มีการปรับอากาศ สามารถผ่านตามเกณฑ์มาตรฐาน และความเป็นไปได้ในการลงทุนเพื่อปรับปรุงอาคารนั้น

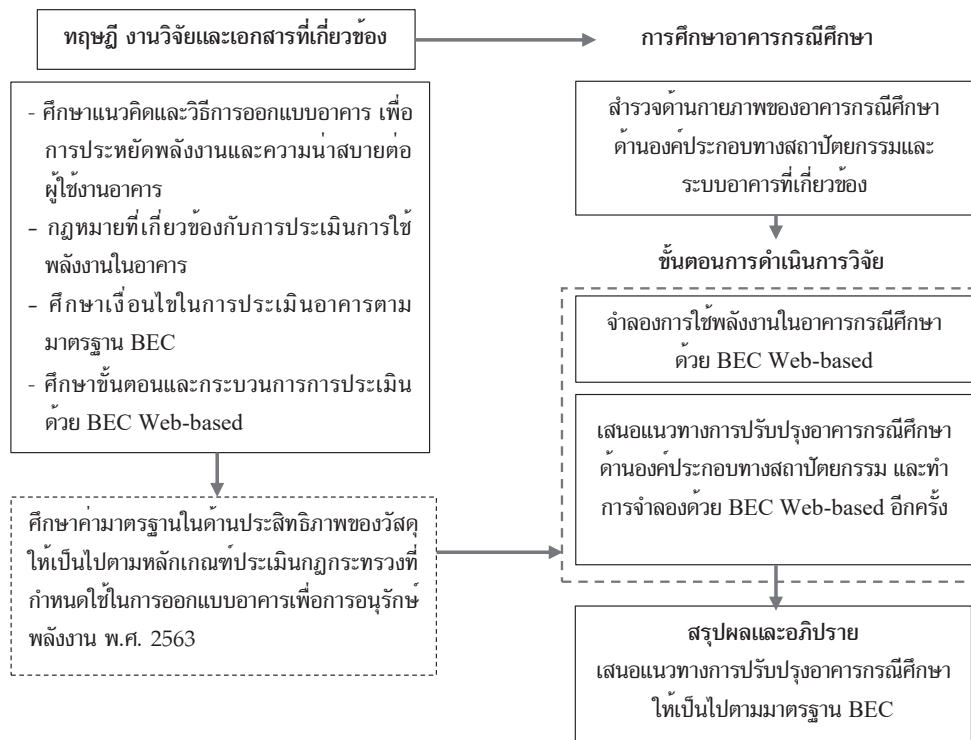
ค่าใช้จ่ายในการปรับปรุงอาคารเพิ่มขึ้น 2.02 % ของราคาก่อสร้าง การใช้พลังงานไฟฟ้าลดลงคิดเป็น 6.23 % ของการใช้พลังงานอาคารก่อนการปรับปรุง และการศึกษาของ [6] ได้ศึกษาแนวทางการปรับปรุงอาคาร สำนักงานสาธารณสุขจังหวัด เพื่อการประหยัดพลังงาน ซึ่งอยู่ในประเภทกลุ่มอาคารที่ใช้งาน 8 ชั่วโมง เช่นเดียวกับ อาคารกรณีศึกษา โดยมีวิธีการดำเนินการวิจัยคือ ทำการศึกษาลักษณะทางกายภาพของอาคาร รวบรวมข้อมูล เพื่อนำมากำหนดแนวทางการปรับปรุงกรอบอาคาร และใช้โปรแกรม BEC (BEC Version 1.0.6) เป็นเครื่องมือ ในการประเมินผลการใช้พลังงานไฟฟ้าในอาคารก่อนการปรับปรุง และทำการนำแนวทางการปรับปรุงดังกล่าว มาศึกษาความคุ้มค่าของการลงทุน เพื่อให้ได้แนวทางที่เหมาะสม โดยผลการศึกษาพบว่า กรอบอาคารก่อน การปรับปรุงไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนด จึงได้เสนอแนวทางการปรับปรุงให้ผ่านเกณฑ์และเหมาะสมด้านการลงทุน แบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีที่ 1 ปรับปรุงเฉพาะผนังทึบ โดยเสริมแผ่นยิปซัมหนา 9 มม. ชนิดบุนน EPS หนา 35 มม. และเว้นช่องอากาศ 3 ซม. ทำให้ค่า OTTV ลดลง ระยะคืนทุน 5.43 ปี เป็นแนวทางที่ค่าลงทุนถูก และคืนทุนเร็วที่สุด กรณีที่ 2 ปรับปรุงผนังทึบร่วมกับผนังโปร่งแสง โดยเสริมแผ่นยิปซัมหนา 12 มม. ชนิดบุแผ่นอลูมิเนียมพอยล์ และเว้นช่องอากาศ 9 ซม. ร่วมกับการเปลี่ยนชนิดกระจก เป็นกระจกโพลีคาร์บอเนต 6 มม. (SHGC 0.55) ทำให้ค่า OTTV ลดลง ระยะคืนทุน 5.36 ปี เป็นแนวทางที่สามารถลดการใช้พลังงาน ได้สูงสุดและคืนทุนเร็วที่สุด ส่วนการปรับปรุงหลังคาอาคาร โดยการปูฉนวนใยแก้วแบบม้วน หนา 75 มม. หุ้มด้วยอลูมิเนียมพอยล์เหนือฝ้าเพดานเดิมมีค่า RTTV ลดลง ระยะคืนทุน 1.24 ปี เป็นแนวทางที่ค่าลงทุนถูก และคืนทุนเร็วที่สุด เมื่อพิจารณาความเหมาะสมด้านการลงทุนกับแนวทางการปรับปรุง โดยพิจารณาที่ระยะคืนทุน พบว่าแนวทางที่ประหยัดพลังงานมากที่สุด อาจจะไม่ใช่วิธีที่เหมาะสมด้านการลงทุน เนื่องจากอาจเป็น แนวทางที่มีค่าใช้จ่ายสูงได้ จากการศึกษางานวิจัยข้างต้นพบว่า แนวทางการปรับปรุงกรอบอาคาร เพื่อให้ค่า การถ่ายเทความร้อนรวมผ่านตามข้อกำหนดฯ กำหนด จะต้องเพิ่มความต้านทานความร้อนของกรอบอาคาร เช่น การปรับปรุงผนังทึบและหลังคา ต้องมีการเพิ่มฉนวน การปรับปรุงผนังโปร่งแสง อาจจะทำโดยการเปลี่ยน ชนิดกระจกหรือติดฟิล์มกันความร้อน การใช้โปรแกรม BEC จะต้องทำการศึกษารายละเอียดของส่วนประกอบ ของอาคารให้ชัดเจน ทั้งส่วนกรอบอาคารและงานระบบที่เกี่ยวข้อง เพื่อจะทำให้ทราบปริมาณการใช้พลังงาน ได้อย่างถูกต้อง และปัจจุบันตามนโยบาย Thailand 4.0 ของประเทศไทย และ Energy 4.0 ของกระทรวงพลังงาน ได้พัฒนาและปรับปรุงโปรแกรม BEC ให้สามารถใช้งานผ่านระบบอินเทอร์เน็ต เรียกว่า “โปรแกรม BEC Web-based” ซึ่งสามารถป้อนข้อมูล ประเมินผลและจัดเก็บข้อมูลผ่านระบบอินเทอร์เน็ตได้ ซึ่งระบบการทำงาน โดยพื้นฐานคล้ายกับโปรแกรม BEC เดิม

งานวิจัยนี้ศึกษาอาคารกรณีศึกษาอาคารเฉลิมพระเกียรติ 56 พรรษา เนื่องจากอาคารดังกล่าว เป็นอาคารสูง 8 ชั้น พื้นที่ใช้สอยทั้งหมด 9,544.28 ตารางเมตร และดำเนินกิจกรรมและการใช้งานมากกว่า 10 - 15 ปี เป็นรูปแบบอาคารเรียนและสำนักงาน (8 ชั่วโมง) ที่มีกลุ่มผู้ใช้งานที่แน่นอน และมีการใช้พลังงาน ที่ค่อนข้างมาก จึงเหมาะแก่การศึกษาโดยใช้โปรแกรม BEC Web-based เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ เกี่ยวกับประสิทธิภาพการใช้พลังงานในอาคาร ซึ่งมีวัตถุประสงค์ของการวิจัย เพื่อการประเมินค่าการใช้พลังงาน โดยรวมของอาคารระหว่างการใช้งานในรอบ 1 ปี ของอาคารกรณีศึกษา (Whole Building Energy) รวมถึง ศึกษาวัสดุกรอบอาคาร งานระบบประกอบอาคารที่เกี่ยวข้อง เพื่อการวิเคราะห์และเสนอแนวทางปรับปรุงอาคาร ให้เหมาะสมและมีประสิทธิภาพด้านพลังงานมากขึ้น ให้เป็นไปตามที่กฎกระทรวงฯ กำหนดและยังเป็นประโยชน์ ให้แก่มหาวิทยาลัย ที่จะนำผลการศึกษานี้ ไปเป็นแนวทางการปรับปรุงอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงานต่อไป

วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษาแนวทางการปรับปรุงอาคารตามมาตรฐาน BEC โดยวิเคราะห์ผลการใช้พลังงานโดยรวมทั้งอาคาร มีการแสดงผลในส่วนของการถ่ายเทความร้อนของกรอบอาคาร (OTTV และ RTTV) ปริมาณการใช้ไฟฟ้า ในระบบแสงสว่าง และประสิทธิภาพของเครื่องปรับอากาศ นำมาเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานและสมการ การคำนวณตามที่กฎกระทรวงฯ กำหนด เพื่อสรุปผลพร้อมทั้งเสนอแนะแนวทางการปรับปรุงอาคารกรณีศึกษา

ให้เป็นไปตามมาตรฐาน BEC ต่อไป ซึ่งมีกรอบแนวคิดในการดำเนินงานตามรูปที่ 2 ดังนี้



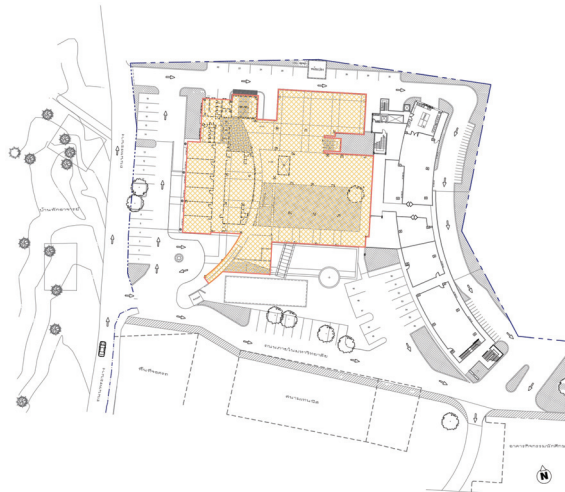
รูปที่ 2 วิธีดำเนินการวิจัย

ลักษณะทางกายภาพของอาคารกรณีศึกษา

อาคารกรณีศึกษา อาคารเฉลิมพระเกียรติ 56 พรรษา ตามกฎกระทรวงกำหนดประเภท หรือขนาดของอาคารและมาตรฐาน หลักเกณฑ์ และวิธีการในการออกแบบอาคาร เพื่อการอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ. 2563 ได้กำหนดให้อาคารที่มีลักษณะการใช้งานรูปแบบนี้ อยู่ในกลุ่มอาคารประเภทที่ 1 สำนักงานและสถานศึกษาที่มีการใช้งาน 8 ชั่วโมงต่อวัน [7]

โดยมีรายละเอียดข้อมูลที่ใช้ในการประเมินค่าการใช้พลังงานในอาคารดังนี้ อาคารกรณีศึกษา เป็นอาคารสูง 8 ชั้น ตั้งอยู่ภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงใหม่ ดังรูปที่ 3 มีพื้นที่ใช้สอยรวม 9,544.28 ตารางเมตร พื้นที่ปรับอากาศ 3,753.89 ตารางเมตร พื้นที่ไม่ปรับอากาศ 5,790.39 ตารางเมตร และพื้นที่จอดรถในอาคาร 443.616 ตารางเมตร ด้านทิศตะวันตกติดกับถนนพระนาง ด้านทิศเหนือติดกับอาคารหอพัก ทิศตะวันออกติดกับอาคาร (ที่พักรายวัน) และทิศใต้ติดกับถนนภายในมหาวิทยาลัยและที่จอดรถ

กรอบอาคาร (Envelop) : ประกอบด้วย ผนังก่ออิฐมวลเบา และกระจกใส ร่วมกับอุปกรณ์บังแดดหลังคา 2 แบบ คือ หลังคาคอนกรีต และหลังคาแผ่นเหล็กกริดลอน โดยรายละเอียดตามตารางที่ 1 - 3 เพื่อนำไปกรอกในโปรแกรม BEC Web-based หาค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของผนังด้านนอกอาคารในส่วนที่มีการปรับอากาศ (OTTV) และค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคาอาคารในส่วนที่มีการปรับอากาศ (RTTV) ต่อไป



รูปที่ 3 ผังบริเวณอาคารเฉลิมพระเกียรติ 56 พรรษา

ตารางที่ 1 รายละเอียดของกรอบอาคารส่วนผนังทึบ

แบบที่ 1 ผนังก่ออิฐมวลเบา ครึ่งแผ่น

ปูนฉาบ (0.0125 ม.) ← → ปูนฉาบ (0.0125 ม.)

← → อิฐมวลเบา (0.075 ม.)

0.10 ม.

แบบที่ 2 ผนังก่ออิฐมวลเบา เต็มแผ่น

ปูนฉาบ (0.0125 ม.) ← → ปูนฉาบ (0.0125 ม.)

← → อิฐมวลเบา (0.175 ม.)

0.20 ม.

แบบที่ 3 ผนัง 2 ชั้น มี Air Gap 0.425 ม.

ปูนฉาบ (0.0125 ม.) ← → ปูนฉาบ (0.0125 ม.)

← → อิฐมวลเบา (0.075 ม.)

Air Gap : 0.425 m

← → อิฐมวลเบา (0.075 ม.)

← → ปูนฉาบ (0.0125 ม.)

0.60 ม.

แบบที่ 4 ผนังก่ออิฐมวลเบา โครงเคร่าเหล็กบุโลหะบาง

เหล็กแผ่น (0.004 ม.) ← → ยิปซัมบอร์ด (0.012 ม.)

← → อิฐมวลเบา (0.175 ม.)

Air Gap : 1.50 m

← → อิฐมวลเบา (0.175 ม.)

← → ยิปซัมบอร์ด (0.012 ม.)

1.70 ม.

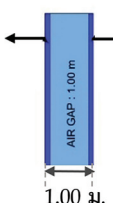
แบบที่ 5 ผนังก่ออิฐมวลเบา กรูฟองน้ำด้านใน

ปูนฉาบ (0.0125 ม.) ← → แผ่นดูดซับเสียง (0.05 ม.)

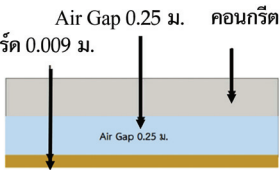
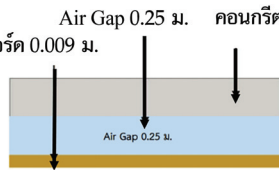
← → อิฐมวลเบา (0.075 ม.)

0.15 ม.

ตารางที่ 2 รายละเอียดของกรอบอาคารส่วนผนังโปร่งแสง

แบบที่ 1 ผนังกระจกใส 12 มม. + กระจกใส 10 มม.		แบบที่ 2 ผนังกระจกใส 6 มม.+กระจกใสติดตาย 10 มม.	
กระจกใส 12 มม. (0.012 ม.)		กระจกใส 6 มม. (0.006 ม.)	กระจกใส 10 มม. (0.010 ม.)
	1.00 ม.	0.516 ม.	
แบบที่ 3 กระจกใส 12 มม.		แบบที่ 4 กระจกใส 10 มม.	
กระจกใส 12 มม. (0.012 ม.)		กระจกใส 10 มม. (0.010 ม.)	
แบบที่ 5 กระจกใส 6 มม.			
กระจกใส 6 มม. (0.006 ม.)			

ตารางที่ 3 รายละเอียดของกรอบอาคารส่วนหลังคา

แบบที่ 1 หลังคาคอนกรีต	แบบที่ 2 หลังคาแผ่นเหล็กกริดลอน
	

อุปกรณ์ที่ใช้ในระบบไฟฟ้าแสงสว่าง (Lighting System): ประกอบด้วย อุปกรณ์ให้แสงสว่าง คือ หลอดฟลูออเรสเซนต์ T8 แบบเปลือย กล่องเหล็ก (แบบสะท้อน), หลอดฟลูออเรสเซนต์แบบกลม กล่องเหล็กกลม, หลอดคอมแพคฟลูออเรสเซนต์ (หลอดตะเกียบ) และหลอดไฟแอลอีดี ร่วมกับบัลลาสต์แกนเหล็กประสิทธิภาพสูง โดยรายละเอียดตามตารางที่ 4 และรูปที่ 4 เพื่อนำไปกรอกในโปรแกรม BEC Web-based ทาปริมาณการใช้พลังงานในระบบไฟฟ้าแสงสว่างของอาคาร

ตารางที่ 4 รายละเอียดและจำนวนของหลอดไฟภายในอาคารเฉลิมพระเกียรติ 56 พรรษา

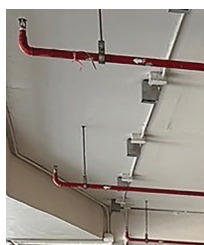
หลอดไฟ	ขนาดวัตต์ต่อชุดดวงโคม	จำนวน (ชุดดวงโคม)	พื้นที่ใช้งาน
1. หลอดฟลูออเรสเซนต์ T8 แบบเปลือย ขนาด 1 x 36 วัตต์ ใช้กับบัลลาสต์แกนเหล็ก ประสิทธิภาพสูง 6 วัตต์	- ชุดโคมฟลูออเรสเซนต์ T8 (1 x 36) + 6 = 42 วัตต์	60	ที่จอดรถใต้ดิน/ ใต้ถุนชั้น 1/ ทางเดิน/ ห้องงานระบบ
2. หลอดฟลูออเรสเซนต์ T8 แบบเปลือย ขนาด 2 x 36 วัตต์ ใช้กับบัลลาสต์แกนเหล็ก ประสิทธิภาพสูง 6 วัตต์	- ชุดโคมฟลูออเรสเซนต์ T8 (2 x 36) + 6 = 78 วัตต์	470	ห้องเตรียมสอน/ ศูนย์ภาษา/ ห้องปฏิบัติการครัว/ ห้องเรียน

ตารางที่ 4 รายละเอียดและจำนวนของหลอดไฟภายในอาคารเฉลิมพระเกียรติ 56 พรรษา (ต่อ)

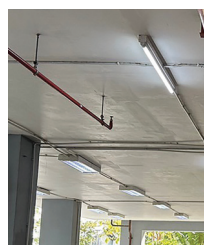
หลอดไฟ	ขนาดวัตต์ต่อชุดดวงโคม	จำนวน (ชุดดวงโคม)	พื้นที่ใช้งาน
3. หลอดฟลูออเรสเซนต์แบบกลม ขนาด 1 x 32 วัตต์ ใช้กับบัลลาสต์แกนเหล็ก ประสิทธิภาพสูง 6 วัตต์	- ชุดโคมฟลูออเรสเซนต์ แบบกลม (1 x 32) + 6 = 38 วัตต์	69	ห้องน้ำ
4. หลอดฟลูออเรสเซนต์ T8 แบบเปลือย ขนาด 1 x 18 วัตต์ ใช้กับบัลลาสต์แกนเหล็ก ประสิทธิภาพสูง 6 วัตต์	- ชุดโคมฟลูออเรสเซนต์ T8 (1 x 18) + 6 = 24 วัตต์	48	ห้องเก็บของ
5. หลอดคอมแพคฟลูออเรสเซนต์ ขนาด 11 วัตต์	11 วัตต์	180	บันได/โถงลิฟท์/ ทางเดิน
6. หลอดไฟแอลอีดีขนาด 12 วัตต์	12 วัตต์	89	ทางเดินเชื่อมอาคาร



(ก) ห้องเรียน



(ข) ใต้ถุนชั้น 1



(ค) ทางเดินเชื่อมอาคาร



(ง) ทางเดิน

รูปที่ 4 ลักษณะดวงโคมและหลอดไฟภายในอาคารเฉลิมพระเกียรติ 56 พรรษา

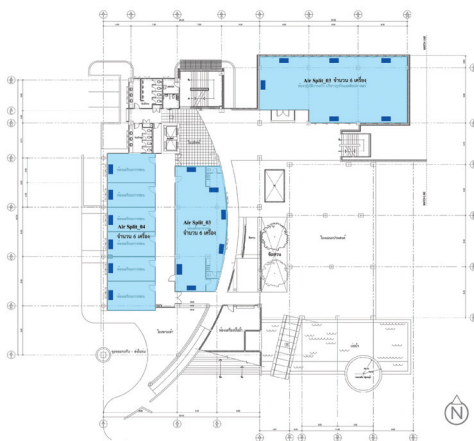
ระบบปรับอากาศ (Air Conditioning System) : พื้นที่ปรับอากาศภายในอาคาร ได้แก่ ห้องทำงาน ห้องเรียน ห้องปฏิบัติการครัว ห้องพักอาจารย์ และห้องประชุม มีการใช้เครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วน (Split Type) และเครื่องปรับอากาศแบบชุด (Package Unit) โดยรายละเอียดและจำนวนเครื่อง ตามตารางที่ 5 และรูปที่ 5 เพื่อนำไปกรอกในโปรแกรม BEC Web-based ทหาปริมาณการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศของอาคาร

ตารางที่ 5 รายละเอียดเครื่องปรับอากาศและจำนวนของแต่ละพื้นที่ภายในอาคารเฉลิมพระเกียรติ 56 พรรษา

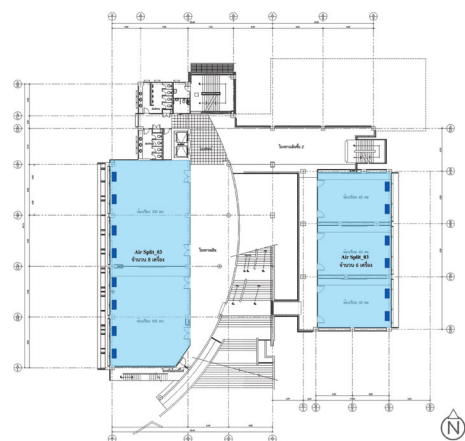
เครื่องปรับอากาศ	อัตราการทำความเย็น (BTU/hr)	พลังงานที่ใช้ (kW)	COP (ค่าสัมประสิทธิ์ สมรรถนะขั้นต่ำ)	พื้นที่ใช้งาน (เครื่อง)	จำนวน
1. เครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วน					
Air Split_01	12,000	1.090	3.226	ห้องทำงาน ชั้น 6 - 7	8
Air Split_02	24,000	2.180	3.226	ห้องทำงาน ชั้น 7	5
Air Split_03	26,560	2.250	3.459	ห้องเรียน ชั้น 1 - 6 ห้องปฏิบัติการครัว ชั้น 1	
Air Split_04	30,510	2.500	3.576	ห้องเตรียมสอน ชั้น 1 ห้องทำงาน ชั้น 7 - 8	8
Air Split_05	32,000	2.910	3.226	ห้องทำงาน ชั้น 6	2

ตารางที่ 5 รายละเอียดเครื่องปรับอากาศและจำนวนของแต่ละพื้นที่ภายในอาคารเฉลิมพระเกียรติ 56 พรรษา (ต่อ)

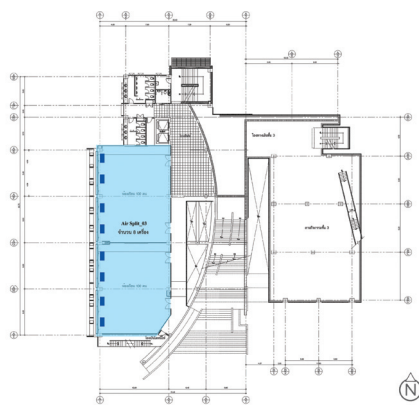
เครื่องปรับอากาศ	อัตราการทำความเย็น (BTU/hr)	พลังงานที่ใช้ (kW)	COP (ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะขั้นต่ำ)	พื้นที่ใช้งาน (เครื่อง)	จำนวน
Air Split_06	36,000	3.270	3.226	ห้องทำงาน ชั้น 6 - 7	5
2. เครื่องปรับอากาศแบบชุด					
Package Air_01	110,000	9.160	3.519	ห้องประชุมรวม Slope ชั้น 4	4



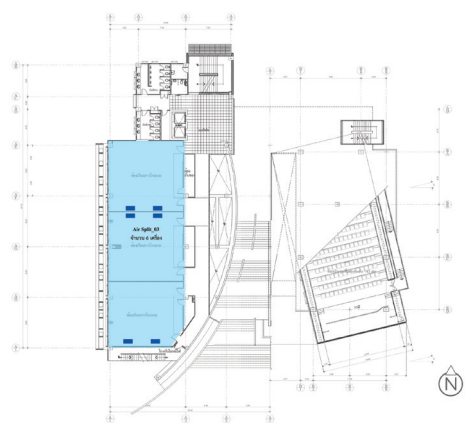
(ก) แปลนชั้นที่ 1



(ข) แปลนชั้นที่ 2

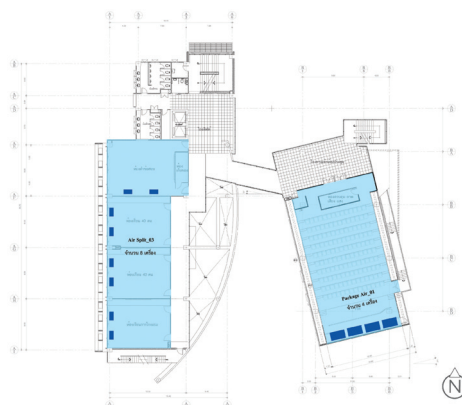


(ค) แปลนชั้นที่ 3



(ง) แปลนชั้นที่ 4

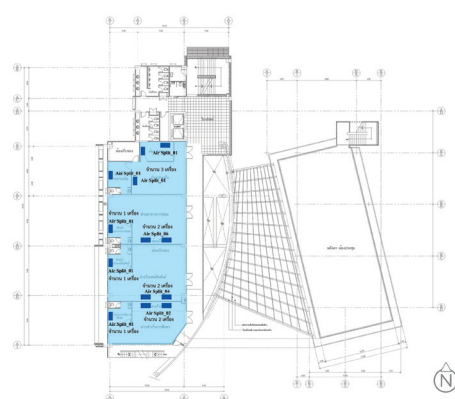
รูปที่ 5 ตำแหน่งเครื่องปรับอากาศและจำนวนภายในอาคารเฉลิมพระเกียรติ 56 พรรษา



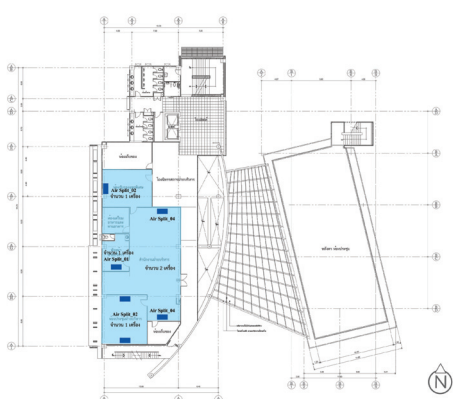
(จ) แปลนชั้นที่ 5



(ฉ) แปลนชั้นที่ 6



(ช) แปลนชั้นที่ 7



(ซ) แปลนชั้นที่ 8

รูปที่ 5 ตำแหน่งเครื่องปรับอากาศและจำนวนภายในอาคารเฉลิมพระเกียรติ 56 พรรษา (ต่อ)

อุปกรณ์ผลิตน้ำร้อน (Hot Water System) : ไม่มี

พลังงานหมุนเวียน (Renewable Energy) : ไม่มี

จากการเก็บข้อมูล อาคารเฉลิมพระเกียรติ 56 พรรษา สามารถกำหนดพื้นที่ที่พิจารณาโดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนพื้นที่ปรับอากาศ เพื่อหาค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของผนังด้านนอกอาคาร (OTTV) และค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคาอาคาร (RTTV) และปริมาณการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศของอาคาร ส่วนพื้นที่ไม่ปรับอากาศเพื่อหาปริมาณการใช้พลังงานในระบบไฟฟ้าแสงสว่างของอาคาร ซึ่งข้อมูลทั้งหมดนี้นำไปกรอกในโปรแกรม BEC Web-based ต่อไป

ผลการศึกษา

1. งานวิจัยนี้พบว่า ค่าการใช้พลังงานโดยรวมของอาคารเฉลิมพระเกียรติ 56 พรรษา อยู่ที่ 303,831.88 kWh/Year ซึ่งผ่านตามเกณฑ์มาตรฐาน แต่เมื่อทำการเสนอแนวทางการปรับปรุงกรอบอาคาร โดยการเพิ่มฟิล์มกันความร้อนที่ได้รับมาตรฐานฟิล์มประหยัดพลังงานเบอร์ 5 ซึ่งมีคุณสมบัติลดแสงจาลดความร้อนและป้องกันรังสียูวี [8] ให้กับกระจกใส และเพิ่มฉนวนกันความร้อน มีค่าการนำความร้อนต่ำ และต้านทานความร้อนได้ดีที่ช่วยลดปริมาณความร้อนที่เข้าสู่อาคาร [9] บริเวณหลังคาทั้ง 2 แบบ ทำให้ค่าการใช้พลังงานโดยรวมของอาคารลดลงจากเดิมถึง 42,820.96 kWh/Year ดังตารางที่ 6

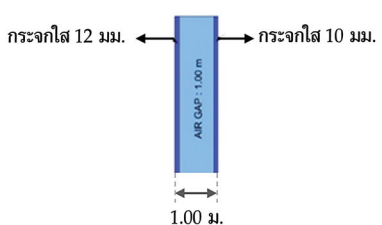
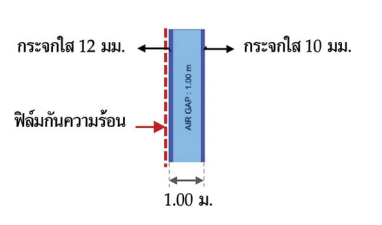
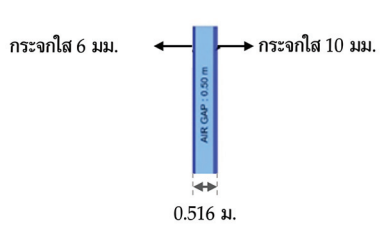
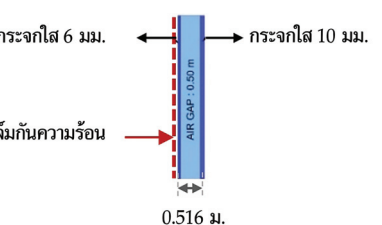
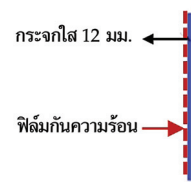
ตารางที่ 6 สรุปผลค่าการใช้พลังงานในอาคารกรณีศึกษาตลอดทั้งปี และแนวทางการปรับปรุง

รายละเอียด	อาคารที่ออกแบบ	อาคารอ้างอิง	ผลการเปรียบเทียบ
ตามแบบก่อสร้าง			
Whole Building Energy (kWh/Year)	303,831.88	383,191.570	79,359.69
ปรับปรุงระบบกรอบอาคาร			
Whole Building Energy (kWh/Year)	261,010.92	383,191.570	122,180.65

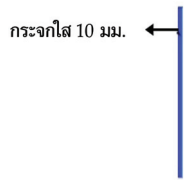
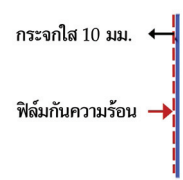
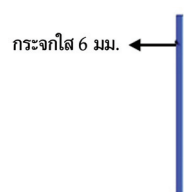
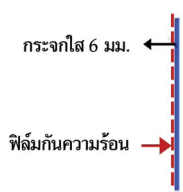
2. จากวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาวัสดุกรอบอาคารกรณีศึกษา งานระบบต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง เพื่อการวิเคราะห์ และเสนอแนวทางปรับปรุงอาคารให้เป็นไปตามมาตรฐาน BEC โดยที่อ้างอิงการพิจารณาตามกฎหมายกระทรวงฯ พ.ศ. 2563 ในทางเลือกที่ 1 ต้องผ่านเกณฑ์ทุกระบบ [10] พบว่า กรอบอาคารส่วนผนังทึบไม่ได้มีการเสนอปรับปรุง แต่กรอบอาคารส่วนผนังโปร่งแสงและหลังคา มีการเสนอปรับปรุง โดยมีรูปแบบการติดตั้งตามตารางที่ 7 - 8 และรายละเอียดงานระบบต่าง ๆ ของอาคารกรณีศึกษา ดังนี้

2.1 กรอบอาคาร (Envelope) ในส่วนผนังโปร่งแสงและหลังคาของอาคาร

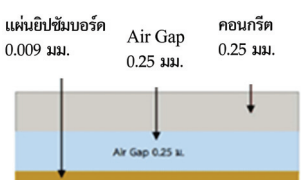
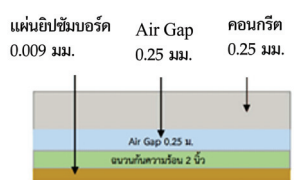
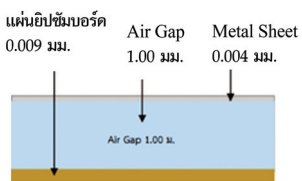
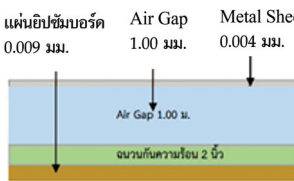
ตารางที่ 7 กรอบอาคารส่วนผนังโปร่งแสงและแนวทางการปรับปรุง

ตามแบบก่อสร้าง	ปรับปรุงวัสดุกรอบอาคาร
แบบที่ 1 กระฉกใส 12 มม. + กระฉกใส 10 มม. 	แบบที่ 1 กระฉกใส 12 มม. + กระฉกใส 10 มม. + ฟิล์มกันความร้อน PR50 
แบบที่ 2 กระฉกใส 6 มม. + กระฉกใสติดตาย 10 มม. 	แบบที่ 2 กระฉกใส 6 มม. + กระฉกใสติดตาย 10 มม. + ฟิล์มกันความร้อน 
แบบที่ 3 กระฉกใส 12 มม. 	แบบที่ 3 กระฉกใส 12 มม. + ฟิล์มกันความร้อน 

ตารางที่ 7 กรอบอาคารส่วนผนังโปร่งแสงและแนวทางการปรับปรุง (ต่อ)

ตามแบบก่อสร้าง	ปรับปรุงวัสดุกรอบอาคาร
แบบที่ 4 กระจกใส 10 มม. 	แบบที่ 4 กระจกใส 10 มม. + พิล์มกันความร้อน 
แบบที่ 5 ผนังกระจกใส 6 มม. 	แบบที่ 5 กระจกใส 6 มม. + พิล์มกันความร้อน 

ตารางที่ 8 กรอบอาคารส่วนหลังคาและแนวทางการปรับปรุง

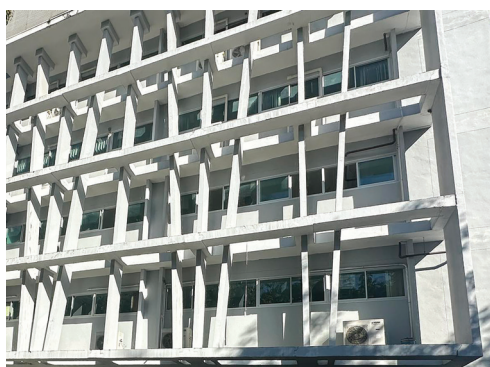
ตามแบบก่อสร้าง	ปรับปรุงวัสดุกรอบอาคาร
แบบที่ 1 หลังคาคอนกรีต 	แบบที่ 1 หลังคาคอนกรีต + ฉนวนกันความร้อนหนา 2 นิ้ว 
แบบที่ 2 หลังคาแผ่นเหล็กกริดลอน 	แบบที่ 2 หลังคาแผ่นเหล็กกริดลอน + ฉนวนกันความร้อนหนา 2 นิ้ว 

อุปกรณ์บังแดดของอาคาร มีลักษณะเป็นแผ่นคอนกรีตแนวดิ่งและแนวนอน โดยอุปกรณ์บังแดดแนวดิ่งมีขนาดกว้าง 1.20 เมตร หนา 0.15 เมตร ห่างจากผนัง 0.70 เมตร อุปกรณ์บังแดดแนวนอนมีขนาดกว้าง 0.70 เมตร สูงจากพื้น 3.50 เมตร โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การบังแดด (SC) ของอุปกรณ์บังแดด ดังตารางที่ 9 และรูปที่ 6

ตารางที่ 9 ค่าสัมประสิทธิ์การบังแดดของอุปกรณ์บังแดด (SC) ของผนังแต่ละทิศ

ขนาดกระจกหน้าต่าง	ค่า SC ของอุปกรณ์บังแดด			
	WW	NN	EE	SS
3.60 x 2.70	0.84	-	-	-
7.40 x 1.00	0.54	-	0.56	-
1.40 x 6.50	0.56	-	-	-
2.40 x 2.00	0.60	-	-	-
24.00 x 1.00	-	0.56	-	-

หมายเหตุ: ค่า SC ของอุปกรณ์บังแดดคำนวณจากโปรแกรม BEC Web-based



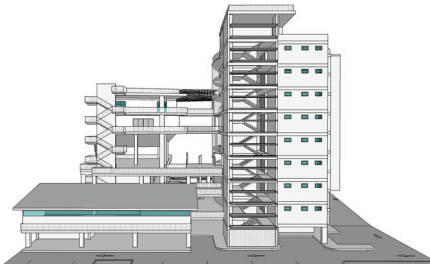
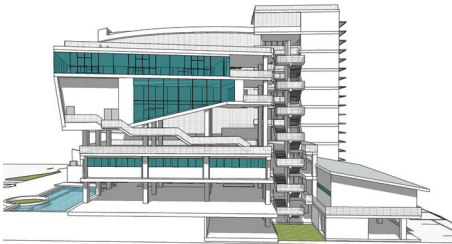
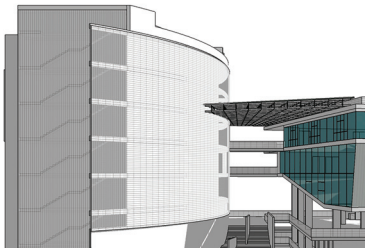
รูปที่ 6 อุปกรณ์บังแดดภายนอกของอาคารเฉลิมพระเกียรติ 56 พรรษา

อัตราส่วนพื้นที่หน้าต่างโปร่งแสงต่อพื้นที่ผนังทั้งหมด (WWR) อาคารเฉลิมพระเกียรติ 56 พรรษา มีอัตราส่วนพื้นที่หน้าต่างโปร่งแสงต่อพื้นที่ผนังทั้งหมด ในแต่ละทิศตามรายละเอียดของตารางที่ 10 โดยได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม BEC Web-based

ตารางที่ 10 อัตราส่วนพื้นที่หน้าต่างโปร่งแสงต่อพื้นที่ผนังทั้งหมด (WWR)

ทิศ	รูปด้าน	WWR
ทิศตะวันตก (90 องศา)		34 %

ตารางที่ 10 อัตราส่วนพื้นที่หน้าต่างโปร่งแสงต่อพื้นที่ผนังทั้งหมด (WWR) (ต่อ)

ทิศ	รูปด้าน	WWR
ทิศเหนือ (180 องศา)		41 %
ทิศตะวันออก (270 องศา)		47 %
ทิศใต้ (0 องศา)		37 %

2.2 ระบบไฟฟ้าแสงสว่าง (Lighting System) จากการสำรวจอาคารเฉลิมพระเกียรติ 56 พรรษา ประกอบด้วย อุปกรณ์ให้แสงสว่าง คือ หลอดฟลูออเรสเซนต์ T8 แบบเปลือย กล้องเหล็ก (แบบมี Reflexion), หลอดฟลูออเรสเซนต์แบบกลม กล้องเหล็กกลม, หลอดคอมแพคฟลูออเรสเซนต์ (หลอดตะเกียบ) และหลอดไฟแอลอีดี ร่วมกับบัลลาสต์แกนเหล็กประสิทธิภาพสูง โดยผลปริมาณการใช้พลังงานในระบบไฟฟ้าแสงสว่างพบว่า อุปกรณ์ระบบไฟฟ้าแสงสว่างมีกำลังไฟรวมทั้งหมด 47,846 วัตต์ ใช้ในพื้นที่อาคารทั้งหมด 9,544.28 ตารางเมตร คิดเป็นกำลังไฟฟ้าส่องสว่างภายในอาคาร (Lighting Power Density, LPD) เท่ากับ 5.01 วัตต์ต่อตารางเมตร ผ่านตามเกณฑ์กฎกระทรวงฯ โดยมีรายละเอียดตามตารางที่ 11

ตารางที่ 11 ค่ากำลังไฟฟ้าส่องสว่างของอาคารเฉลิมพระเกียรติ 56 พรรษา เทียบตามเกณฑ์ในกฎกระทรวงฯ

รายละเอียด	ค่าที่ได้
กำลังไฟรวมทั้งหมด	47,846 วัตต์
พื้นที่อาคารทั้งหมด	9,544.28 ตารางเมตร
ค่ากำลังไฟฟ้าส่องสว่าง (LPD) ของอาคารเฉลิมพระเกียรติ 56 พรรษา	5.01 วัตต์ต่อตารางเมตร
ค่ากำลังไฟฟ้าส่องสว่าง (LPD) ตามเกณฑ์ในกฎกระทรวงฯ	10 วัตต์ต่อตารางเมตร
ประเมินผล	ผ่าน

2.3 ระบบปรับอากาศ (Air Conditioning System) จากการสำรวจอาคารเฉลิมพระเกียรติ 56 พรรษา พบว่า มีการใช้งานระบบปรับอากาศอยู่ 2 แบบ คือ เครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วน (Split Type) และเครื่องปรับอากาศแบบชุด (Package Unit) ซึ่งต้องมีค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (COP) ไม่ต่ำกว่าเกณฑ์ที่กฎกระทรวงฯ กำหนดพบว่าการประเมินผลค่า COP ของระบบปรับอากาศอาคารเฉลิมพระเกียรติ 56 พรรษา ด้วยโปรแกรม BEC Web-based ผ่านตามเกณฑ์กฎกระทรวงฯ โดยมีรายละเอียดตามตารางที่ 12

ตารางที่ 12 ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (COP) ของอาคารเฉลิมพระเกียรติ 56 พรรษา เทียบตามเกณฑ์ในกฎกระทรวงฯ

รายละเอียด	ค่า COP
เครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วน	3.226, 3.459 และ 3.576
เครื่องปรับอากาศแบบชุด	3.519
ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (COP)	3.22
ประเมินผล	ผ่าน

3. จากการศึกษาข้างต้น โดยอ้างอิงการพิจารณาตามกฎกระทรวงฯ พ.ศ. 2563 ในทางเลือกที่ 1 ต้องผ่านเกณฑ์ทุกระบบพบว่า ค่าการใช้พลังงานของอาคารเฉลิมพระเกียรติ 56 พรรษา ในส่วนงานระบบที่เกี่ยวข้องของอาคารผ่านตามเกณฑ์ที่กฎกระทรวงฯ กำหนด แต่ส่วนกรอบอาคาร (ผนังโปร่งแสงและหลังคา) ไม่ผ่านตามเกณฑ์กฎกระทรวงฯ ผู้วิจัยจึงเสนอแนวทางการออกแบบปรับปรุงกรอบอาคาร โดยการเลือกใช้วัสดุเพื่อให้เหมาะสมและมีประสิทธิภาพด้านพลังงานมากขึ้น ตามมาตรฐานการพิจารณากฎกระทรวง เรื่องการกำหนดประเภทหรือขนาดของอาคาร และมาตรฐาน หลักเกณฑ์ในการออกแบบเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ. 2563 โดยมีรายละเอียดตามตารางที่ 13

ตารางที่ 13 เปรียบเทียบค่าการใช้พลังงานในอาคารเฉลิมพระเกียรติ 56 พรรษา ระหว่างแบบก่อสร้างเดิมกับแนวทางปรับปรุง

	รายละเอียด	อาคารที่ออกแบบ	เกณฑ์มาตรฐาน	ผลการประเมิน
ระบบกรอบอาคารตามแบบก่อสร้าง	OTTV (A/C Zone)	53.251 W/m ²	50 W/m ²	ไม่ผ่าน
	RTTV (A/C Zone)	37.305 W/m ²	10 W/m ²	ไม่ผ่าน
	Lighting System	5.01 W/m ²	10 W/m ²	ผ่าน
	Air Conditioning System (COP)	3.22, 3.459, 3.576, 3.519	3.22	ผ่าน
	Whole Building Energy (kWh/Year)	303,831.88	383,191.570	ผ่าน
ปรับปรุงระบบกรอบอาคาร	OTTV (A/C Zone)	38.74 W/m ²	50 W/m ²	ผ่าน
	RTTV (A/C Zone)	9.50 W/m ²	10 W/m ²	ผ่าน
	Lighting System	5.01 W/m ²	10 W/m ²	ผ่าน
	Air Conditioning System (COP)	3.22, 3.459, 3.576, 3.519	3.22	ผ่าน
	Whole Building Energy (kWh/Year)	261,010.92	383,191.570	ผ่าน

ดังนั้นการศึกษาตามวัตถุประสงค์พบว่า การปรับเปลี่ยนวัสดุกรอบอาคาร ทำให้ค่าการถ่ายเทความร้อนในระบบกรอบอาคาร และค่าการใช้พลังงานโดยรวม (Whole Building Energy) ลดลง

อภิปรายผล

การประเมินอาคาร เพื่อการอนุรักษ์พลังงานตามหลักเกณฑ์และวิธีการคำนวณของกฎกระทรวงฯ อาคารต้องมีการพิจารณาผ่านเกณฑ์ 2 ทางเลือก โดยทางเลือกที่ 1 คือการผ่านเกณฑ์ทุกระบบ ได้แก่ ระบบกรอบอาคาร ระบบไฟฟ้าแสงสว่าง และระบบปรับอากาศ แต่ถ้าหากไม่ผ่านเกณฑ์รายระบบใดระบบหนึ่ง ให้พิจารณาทางเลือกที่ 2 คือการผ่านเกณฑ์การใช้พลังงานรวมของอาคารต่อปี โดยต้องมีค่าต่ำกว่าค่าการใช้พลังงานโดยรวมของอาคารอ้างอิงตามกฎกระทรวง ทั้งนี้ ทางเลือกที่ 1 และทางเลือกที่ 2 นั้น หากในอาคารมีการใช้อุปกรณ์ผลิตน้ำร้อน อุปกรณ์ดังกล่าวนี้ต้องผ่านข้อกำหนดด้วยเช่นกัน [11]

งานวิจัยนี้ได้ทำการประเมินอาคารเฉลิมพระเกียรติ 56 พรรษา ซึ่งผลการประเมินค่าการอนุรักษ์พลังงานของอาคารพบว่า ไม่ผ่านการพิจารณาทางเลือกที่ 1 ในระบบกรอบอาคาร ส่วนระบบไฟฟ้าแสงสว่างและระบบปรับอากาศผ่านเกณฑ์ตามรายระบบ แต่ในทางเลือกที่ 2 อาคารเฉลิมพระเกียรติ 56 พรรษา ผ่านเกณฑ์การใช้พลังงานรวมของอาคารต่อปีที่มีค่าต่ำกว่าอาคารอ้างอิง ตามตารางที่ 13

จากการวิเคราะห์อาคารเฉลิมพระเกียรติ 56 พรรษา สามารถยื่นการประเมินการอนุรักษ์พลังงานของอาคารในทางเลือกที่ 2 ได้ และพิจารณาเรื่องค่าใช้จ่ายไฟฟ้าของอาคารประมาณ 335,691.50 บาท/ปี แต่หากทำการยื่นในทางเลือกที่ 1 โดยการปรับปรุงระบบกรอบอาคารตามที่เสนอในงานวิจัยนี้ คือ การปรับปรุงวัสดุกรอบอาคาร 2 ส่วน คือ ส่วนของผนังอาคารที่เป็นผนังโปร่งแสงหรือกระจก ให้มีการติดฟิล์มกันความร้อนที่เคลือบสารลดความร้อนบนเนื้อฟิล์ม แต่ยังให้แสงผ่านเข้ามาในพื้นที่ใช้งาน และส่วนของหลังคา เสนอปรับปรุงโดยการเพิ่มฉนวนกันความร้อนที่มีคุณสมบัติการนำความร้อนต่ำ ด้านทานความร้อนสูง ที่ช่วยลดปริมาณความร้อนเข้าสู่อาคารพบว่า ค่า OTTV และค่า RTTV ลดลงตามตารางที่ 13 และส่งผลให้ค่าการใช้พลังงานรวมของอาคารที่ได้ปรับปรุงลดลงจากเดิมร้อยละ 14.09 ส่วนการพิจารณาเรื่องค่าใช้จ่ายไฟฟ้าของอาคารได้ประมาณ 181,139.13 บาท/ปี ซึ่งลดลงจากเดิมก่อนการปรับปรุงคิดเป็นร้อยละ 53.96 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ [12] ในการเสนอปรับปรุงระบบกรอบอาคาร ทำให้ค่าการใช้พลังงานลดลงจากเดิมร้อยละ 13.15 ของพลังงานที่ใช้ก่อนการปรับปรุงและสามารถลดค่าใช้จ่ายไฟฟ้าได้เช่นกัน

ดังนั้นผู้วิจัยจึงขอเสนอการปรับปรุงในทางเลือกที่ 1 เพื่อช่วยใหัมหาวิทยาลัยประหยัดงบประมาณในการใช้จ่ายเกี่ยวกับไฟฟ้าและได้เสนอความเป็นไปได้ในการลงทุน เพื่อปรับปรุงอาคารให้เป็นอาคารอนุรักษ์พลังงาน โดยสรุปค่าใช้จ่ายในการปรับปรุงอาคาร ตามตารางที่ 14

ตารางที่ 14 สรุปค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างปรับปรุงอาคารเฉลิมพระเกียรติ 56 พรรษา

ลำดับ	รายการ	จำนวน	หน่วย	ค่าวัสดุ		ค่าแรงงาน		รวมทั้งหมด
				ราคา/หน่วย	รวม (บาท)	ราคา/หน่วย	รวม (บาท)	
1	งานร้อยฝ้าเพดาน	650.71	ตร.ม.	-	-	25.00	16,267.75	16,267.75
2	งานติดตั้งฉนวนฝ้าเพดานหนา 2 นิ้ว	650.71	ตร.ม.	250.00	162,677.50	25.00	16,267.75	178,945.25

ตารางที่ 14 สรุปค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างปรับปรุงอาคารเฉลิมพระเกียรติ 56 พรรษา (ต่อ)

ลำดับ	รายการ	จำนวน	หน่วย	ค่าวัสดุ		ค่าแรงงาน		รวม ทั้งหมด (บาท)
				ราคา/ หน่วย	รวม (บาท)	ราคา/ หน่วย	รวม (บาท)	
3	งานติดตั้งยิปซัม บอร์ดหนา 9 มม.	650.71	ตร.ม.	298.00	193,911.58	75.00	48,803.25	242,714.83
4	งานติดฟิล์มกัน ความร้อนที่ กระจก	733.88	ตร.ม.	1,240.00	910,011.20	-	-	910,011.20
รวมค่าวัสดุและค่าแรงงาน								1,347,939.03
ค่า Factor F = 1.3067								413,412.90
รวมค่าก่อสร้าง								1,761,351.93

สรุปค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างปรับปรุงอาคารข้างต้น ผู้ความเป็นไปได้ในการลงทุนประมาณ 1,761,351.93 บาท สามารถคืนทุนได้ 9.72 ปี หลังจากการก่อสร้างปรับปรุงอาคาร ซึ่งงานวิจัยนี้จึงได้เสนอแนวทางดังกล่าว เพื่อเป็นประโยชน์แก่มหาวิทยาลัยในการพิจารณางบประมาณในการปรับปรุงอาคารต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยมุ่งเน้นในการศึกษาด้านการใช้พลังงานภายในอาคาร ที่จะนำไปสู่การอนุรักษ์พลังงาน เพื่อเสนอแนวทางการปรับปรุงอาคารเฉลิมพระเกียรติ 56 พรรษา ซึ่งผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณ นักวิชาการ คณาจารย์ และบุคลากร กองพัฒนาอาคารสถานที่ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ที่ได้ให้การอนุเคราะห์ข้อมูล และร่วมกันปฏิบัติงานกันอย่างเต็มที่ ที่ส่งผลทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

References

- [1] Ministry of Energy. (2011). **20-year Energy Conservation Plan (2011-2030)**. Access (15 May 2024). Available (https://webkc.dede.go.th/testmax/sites/default/files/_Thai.pdf)
- [2] Department of Alternative Energy Development and Efficiency. (2022). **Regulation of Laws Conservation Energy Building BEC**. Access (15 May 2022). Available (<https://bec.dede.go.th/requirements-of-the-law/>)
- [3] Rajamangala University of Technology Lanna. (2020). **Energy Management Policy**. Access (15 May 2024). Available (https://webs.rmutil.ac.th/assets/upload/files/_2020.pdf)
- [4] Department of Alternative Energy Development and Efficiency. (2018). **BEC Web-based Program Handbook**. Bangkok: Ministry of Energy
- [5] Poophet, M. and Khunthong, J. (2016). The Study of Building Development for Energy Efficiency: Case Study of Educational Buildings. **Building Innovation 2016: B-inno2016**. pp. 358-366. (in Thai)

- [6] Sopit, C. (2016). Renovation Strategies to Improve Energy Saving for Provincial Health Office. **Veridian E-Journal Silpakorn University (Humanities, Social Science and Arts)**. Vol. 9, No. 1, pp. 1703-1716 (in Thai)
- [7] Coordinating Center for Energy Conservation building Design. (2016). **Basic Guidelines for Designing Architecturally High-Performance Energy Conservation Buildings**. Bangkok : Department of Alternative Energy Development and Efficiency
- [8] Good Film Shop. (2018). **Building Film Information**. Access (15 August 2023). Available (<https://goodfilmshop.com>)
- [9] SCG E-Newsletter. (2022). **Insulation for Ceilings**. Access (15 August 2022). Available (<https://www.scgsmartliving.com/product/thermal-insulation/thermal-insulation-for-ceiling>)
- [10] Ministerial Regulations Specify the Type. or the Size of the Building and Standards, Criteria and Methods for Designing Buildings for Energy Conservation, (B.E. 2020). **Government Gazette**. Vol. 137, Part 94. pp. 7-11
- [11] Department of Alternative Energy Development and Efficiency. (2024). **Design Standards and Criteria Buildings for Energy Conservation According to Law**. Access (29 June 2024). Available (<http://berc.dede.go.th/>)
- [12] Sonthicha, S. and Roho, S. (2021). Guideline of Educational Building Development for Evaluation Energy Efficiency, Case Study of Educational Building and Operational Technology at Suan Sunandha Rajabhat University. **Journal of Building Energy & Environment**. Vol. 4, No. 1, pp. 56-74

การวิเคราะห์ตัวแปรของท่อผนังบางรูปหลายเหลี่ยมเติมโฟมภายใต้แรงบิด
โดยออกแบบการทดลอง

Parametric Analysis of Foam-Filled Polygonal Thin-walled Tubes Subjected to Torque using Experimental Design

สมญา ภูณะยา*

Somya Poonay*

Received: April 16, 2024; Revised: July 9, 2024; Accepted: July 10, 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เน้นการศึกษาตัวแปรของท่อผนังบางรูปหลายเหลี่ยมเติมโฟมภายใต้แรงบิดโดยวิธีการทดลอง ได้แก่ ท่อวงกลม ท่อแปดเหลี่ยม ท่อหกเหลี่ยม และท่อสี่เหลี่ยม ท่อทุกตัวจะมีความยาวเส้นรอบรูปของหน้าตัดและความยาวเท่ากัน การวิเคราะห์จะพิจารณาผลกระทบของความหนาแน่นโฟมและจำนวนหน้าตัดที่เพิ่มขึ้น ส่วนตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์ ได้แก่ แรงเฉื่อย แรงสูงสุด พลังงานดูดซับ และพลังงานดูดซับจำเพาะ ผลการทดลองพบว่า พฤติกรรมความเสียหายจะเริ่มต้นที่ปลายด้านหนึ่งของท่อและเกิดจำนวนของเส้นการพับเพิ่มขึ้นตามมุมบิดที่เพิ่มขึ้น ผลของความหนาแน่นโฟม พบว่าความหนาแน่นโฟมที่ 100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ให้แรงเฉื่อย แรงสูงสุด พลังงานดูดซับและพลังงานดูดซับจำเพาะสูงสุด และความหนาแน่น 50 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่ำสุด ส่วนผลของรูปร่างหน้าตัดพบว่า ท่อวงกลมจะให้แรงเฉื่อย แรงสูงสุด พลังงานดูดซับและพลังงานดูดซับจำเพาะสูงสุด รองลงมาเป็นท่อแปดเหลี่ยม หกเหลี่ยม และท่อสี่เหลี่ยมต่ำสุด ตามลำดับ

คำสำคัญ : ท่อหลายเหลี่ยม; แรงบิด; เติมโฟม; การทดลอง

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

¹ Faculty of Engineering, Ubonratchathani University

* Corresponding Author, Tel. 08 2951 4114, E - mail: somya.p@ubu.ac.th

Abstract

This paper focuses on the parametric study of foam-filled polygonal thin-walled tubes subjected to torsion using experiments. The tube shapes include circle, octagonal, hexagonal, and square. The tubes have the same perimeter, length, and material. The effects of foam density and the number of polygon corners are also investigated. The parameters for analysis are average force, maximum force, absorbed energy, and specific absorbed energy. The experimental results show that failure behavior starts at one end of the tube, and the number of hinge lines increases with the torsional angle. The results for foam density concluded that the average force, maximum force, absorbed energy, and specific absorbed energy of foam with a density of 100 kg/m^3 are the highest, while those of foam with a density of 50 kg/m^3 are the lowest. Furthermore, the results for polygonal shapes indicate that the circular tube has the highest average force, maximum force, absorbed energy, and specific absorbed energy, followed by the octagonal and hexagonal tubes, with the square tube being the lowest.

Keywords: Polygonal Tubes; Torque; Foam-filled; Experiment

บทนำ

การพัฒนาตัวดูดซับพลังงานหรือตัวกันชน ให้มีความสามารถในการดูดซับพลังงานสูงเนื่องจากพลังงานจลน์ที่มากระทำ เพื่อช่วยลดความเสียหายของโครงสร้างหลักและเพิ่มความปลอดภัยต่อมนุษย์เนื่องจากอุบัติเหตุลดการบาดเจ็บและการสูญเสียชีวิตของผู้ใช้โครงสร้างเหล่านี้ ตัวแปรที่สำคัญใช้ในการวิเคราะห์เพื่อหาความสามารถในการดูดซับพลังงานของตัวดูดซับพลังงาน ได้แก่ แรงเฉลี่ย แรงสูงสุด พลังงานดูดซับ และพลังงานดูดซับจำเพาะ เป็นต้น มีนักวิจัยจำนวนมากที่ทำการศึกษาค้นคว้าตัวดูดซับพลังงาน ซึ่งจะมีวิธีวิเคราะห์ 3 วิธีเพื่อหาคำตอบคือ วิธีทางทฤษฎี [1] - [7] วิธีการทดลอง [8] - [9] และวิธีทางจำลองทางคอมพิวเตอร์ [10] - [12] การเพิ่มประสิทธิภาพของตัวดูดซับพลังงาน สามารถจำแนกตามความสนใจของนักวิจัย เช่น จำแนกตามรูปร่าง ท่อสี่เหลี่ยม [2] - [3] โครงสร้างรังผึ้ง [4] ปริมาตรทรงสี่เหลี่ยม [11] - [12] ท่อรูปร่างหลายเหลี่ยม [13] - [15] ท่อกลม [16] กรวยกลม [17] - [18] ท่อรูปดาว [19] และท่อที่มีครีบด้านข้าง [20] เป็นต้น จำแนกคุณสมบัติวัสดุ เช่น การเติมโฟมเข้าไปภายในท่อที่มีรูปร่างต่าง ๆ [20] - [21] จำแนกตามแรงมากระทำ คือ แรงดัด [8] - [9] แรงแนวแกน [16] - [17], [22] แรงบิด [23] เป็นต้น ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาตัวดูดซับพลังงานของท่อที่มีรูปร่างหลายเหลี่ยมและเติมโฟมภายในท่อเพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับพลังงาน โดยแรงที่มากระทำกับท่อเป็นแรงบิด ซึ่งมีผู้วิจัยเกี่ยวกับตัวดูดซับพลังงานที่ใช้แรงบิดน้อยมาก เนื่องจากแรงบิดเป็นแรงที่ต้องอาศัยชิ้นส่วนต่อโยงกับชิ้นส่วนอื่นจึงจะเกิดแรงบิดได้ ส่วนรูปร่างหลายเหลี่ยมที่ทำการศึกษาค้นคว้า คือ ท่อวงกลม ท่อแปดเหลี่ยม ท่อหกเหลี่ยม และท่อสี่เหลี่ยม ที่ความหนาแน่นโฟม 50 75 และ 100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และงานวิจัยนี้ใช้วิธีการวิเคราะห์โดยการทำการทดลอง

วิธีการดำเนินการวิจัย

วิธีการดำเนินการวิจัยของการวิเคราะห์ตัวแปรของท่อหน้าตัดหลายเหลี่ยมเติมโฟมภายใต้แรงบิดด้วยวิธีการทดลอง สามารถแบ่งตามหัวข้อดังนี้

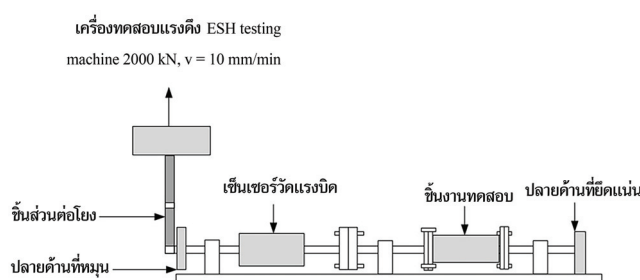
1. ขอบเขตงานวิจัย

1.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นอลูมิเนียมที่มีความหนา 1 มิลลิเมตร ความยาวเส้นรอบวงของหน้าตัด 320 มิลลิเมตร ความยาวของท่อ 150 มิลลิเมตร

- 1.2 ท่อที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ประกอบด้วย ท่อสี่เหลี่ยม ท่อหกเหลี่ยม ท่อแปดเหลี่ยม และท่อวงกลม
- 1.3 โฟมที่ใส่เข้าไปในท่อ จะเป็นโฟมชนิดโพลียูรีเทนที่มีความหนาแน่น 50 75 และ 100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
- 1.4 ความเร็วที่ใช้ในการบดท่ออย่างช้า ๆ เท่ากับ 10 มิลลิเมตรต่อวินาที
- 1.5 ปลายของท่ออีกด้านจะรับแรงบด ส่วนอีกด้านจะถูกยึดแน่นไม่ให้เคลื่อนที่
- 1.6 ค่าที่ได้จากการวัดคือ แรงบดกับมุมบด เพื่อนำไปคำนวณหาตัวแปรที่สำคัญในการวิเคราะห์

2. ชุดทดสอบแรงบด

ชุดทดสอบแรงบด ได้ทำการออกแบบและสร้าง เพื่อใช้ในงานวิจัยนี้ ดังรูปที่ 1 ประกอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงด้วยความเร็ว 10 มิลลิเมตรต่อวินาที เพื่อดึงชิ้นตัวอย่าง 2 ชิ้น ให้หมุนแกนเพลลาเพื่อบดชิ้นงานทดสอบ โดยมีเซ็นเซอร์วัดแรงบด และชิ้นงานทดสอบปลายด้านหนึ่งจะหมุนต่อกับเซ็นเซอร์วัดแรงบด ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งจะยึดแน่น



(ก) ส่วนประกอบชุดมือทดสอบ



(ข) ส่วนประกอบ

รูปที่ 1 ชุดทดสอบแรงบด

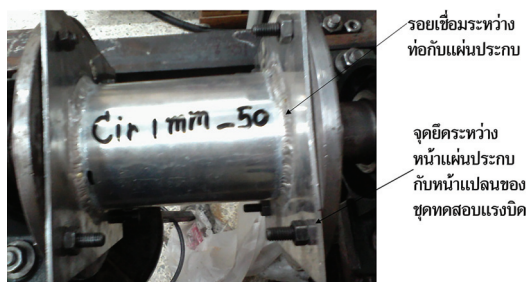
3. การขึ้นรูปชิ้นงาน

ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ ประกอบด้วย ท่อสี่เหลี่ยม ท่อหกเหลี่ยม ท่อแปดเหลี่ยม และท่อวงกลม ในการขึ้นรูปชิ้นงานจะใช้วิธีการขึ้นรูปด้วยเครื่องพับสำหรับท่อสี่เหลี่ยม ท่อหกเหลี่ยม และท่อแปดเหลี่ยม เป็นมุม 90 60 และ 45 องศา ตามลำดับ ส่วนท่อวงกลมจะทำการขึ้นรูปด้วยการม้วนโดยเครื่องม้วนแล้วเชื่อมติดกันที่รอยพับ ปลายทั้งสองข้างของท่อจะเชื่อมติดกับแผ่นอลูมิเนียมพร้อมเจาะรูเพื่อยึดติดกับหน้าแปลนของชุดทดสอบแรงบด ดังรูปที่ 2(ก)

ส่วนการเติมโฟมภายในท่อ ท่อทุก ๆ หน้าตัดจะทำการเติมโฟม ด้วยความหนาแน่น 50 75 และ 100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยโฟมที่เติมจะเป็นโพลียูรีเทนที่เกิดจากการผสมกันของของเหลว 2 ชนิด คือ โพลียอล (Polyol) และไดโซไซยาเนต (Diisocyanate) ในอัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร แล้วกวนให้เข้ากันจึงจะเกิดการขยายตัว ปริมาตรโฟมที่เติมภายในท่อดังตารางที่ 1 และดังรูปที่ 2(ข)

ตารางที่ 1 ปริมาตรโฟมที่เติมเข้าไปในท่อ

ความหนาแน่นโฟม (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	ปริมาตรโฟม (ลูกบาศก์เซนติเมตร)			
	ท่อสี่เหลี่ยม	ท่อหกเหลี่ยม	ท่อแปดเหลี่ยม	ท่อวงกลม
50	19.01	22.10	23.15	24.47
75	28.52	33.15	34.73	36.71
100	38.03	44.20	46.71	48.95



(ก) ชิ้นงานและติดตั้งกับชุดทดสอบแรงบิด



(ข) ผสมน้ำยาโพลียูรีเทนและไดโซยานेटเพื่อให้โฟมเกิดแข็งตัว

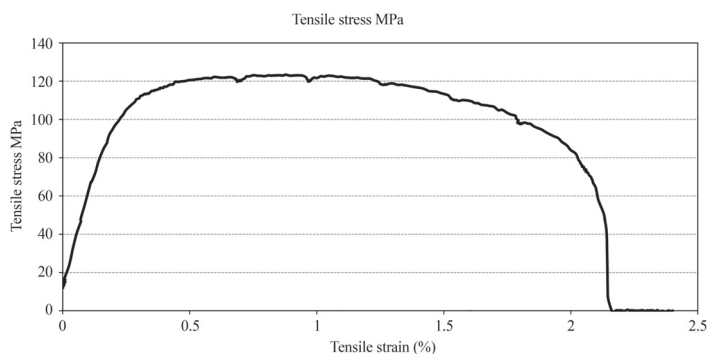
รูปที่ 2 การขึ้นรูปชิ้นงาน

4. คุณสมบัติวัสดุ

การหาคคุณสมบัติของวัสดุของอลูมิเนียมความหนา 1 มิลลิเมตร เป็นไปตามมาตรฐาน British Standard BSEN 1002-1:1990 [24] โดยใช้เครื่องทดสอบแรงดึง โดยการทดสอบและผลการทดสอบ ดังรูปที่ 3 และผลการทดสอบคุณสมบัติวัสดุของอลูมิเนียมพบว่า ความหนาแน่น 2,700 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ยังก์มอดูลัสเฉลี่ย 49.46 จิกะปาสคาล ความเค้นที่จุดคราก 110.38 เมกะปาสคาล และความเค้นประลัย 155.95 เมกะปาสคาล



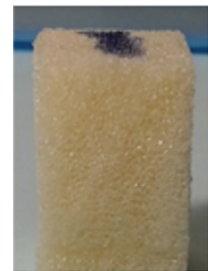
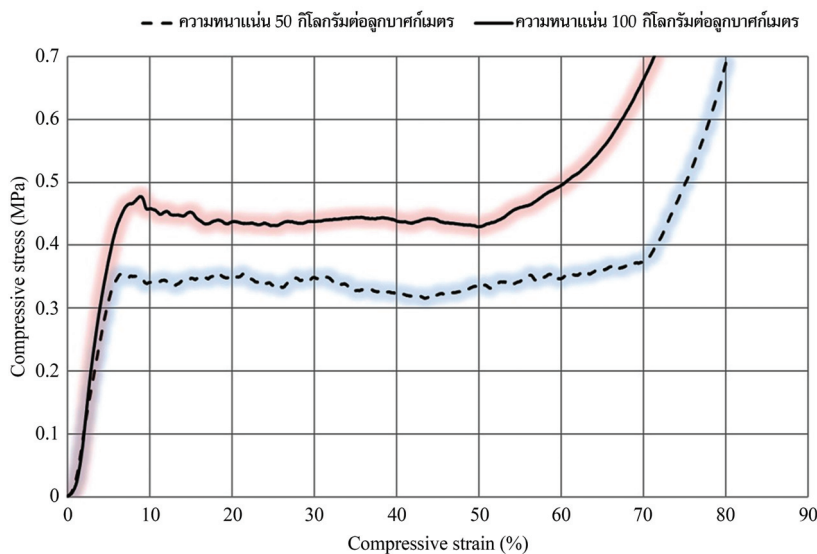
(ก) การทดสอบแรงดึงของอลูมิเนียม



(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นดึงและความเครียดของอลูมิเนียม

รูปที่ 3 การทดสอบและคุณสมบัติวัสดุของอลูมิเนียม

ส่วนคุณสมบัติวัสดุของโฟมหาได้โดยการทดสอบด้วยแรงกด โดยโฟมมีขนาด 12 x 12 x 25.4 มิลลิเมตร ผลที่ได้ดังรูปที่ 4 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกดกับความเครียด



(ก) ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นอัดกับความเครียดอัดของโฟม (ข) การทดสอบโฟม
รูปที่ 4 การทดสอบและคุณสมบัติวัสดุของโฟมที่ความหนาแน่น 50 และ 100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

ส่วนคุณสมบัติของวัสดุโฟมความหนาแน่น 75 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร สามารถหาความสัมพันธ์ของความหนาแน่นโฟม [25] ได้จากสมการที่ (1) โดยทราบค่าความเค้นครากตัว σ_p ที่ความหนาแน่น 50 และ 100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร จากรูปที่ 4(ก)

$$\sigma_p = c \left(\frac{\rho_f}{\rho_{f0}} \right)^m \quad (1)$$

เมื่อ σ_p คือ ความเค้นครากตัว ρ_f คือ ความหนาแน่นโฟม ρ_{f0} คือ ความหนาแน่นโฟมสถานะเริ่มเชิงตัว ส่วนค่าของ c และ m เป็นค่าคงที่ สามารถหาได้จาก 2 สมการ 2 ตัวแปรที่ได้มาจากค่าความหนาแน่นโฟม 50 100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

5. ขั้นตอนการทดลอง

งานวิจัยนี้จะทำการทดลองท่อที่มีรูปร่างหลายเหลี่ยม ประกอบด้วย ท่อสี่เหลี่ยม ท่อหกเหลี่ยม ท่อแปดเหลี่ยม และท่อวงกลม โดยท่อแต่ละรูปร่าง จะถูกเติมโฟมเข้าไปภายในท่อ ที่มีความหนาแน่นโฟม 50 75 และ 100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งการทดลองในแต่ละกรณีจะทำซ้ำ 3 ครั้ง แล้วนำผลการทดลองมาหาค่าเฉลี่ย เพื่อให้ได้ผลการทดลองมีความแม่นยำและน่าเชื่อถือ รวมขั้นตอนการทดลองในงานวิจัยนี้จำนวน 36 ขั้นตอน สำหรับขั้นตอนการทดลอง จากรูปที่ 1(ข) ท่อจะถูกใส่เข้าไปในชุดทดสอบแรงบิด โดยปลายทั้งสองข้างจะยึดกับหน้าแปลนของชุดทดสอบ เครื่องทดสอบแรงบิดจะเคลื่อนที่ขึ้นอย่างช้า ๆ ด้วยความเร็ว 10 มิลลิเมตรต่อนาที เพื่อให้ชิ้นตัวอย่างทั้งสองชิ้นเคลื่อนที่ โดยชิ้นตัวอย่างที่ต่อกับเพลาของชุดทดสอบแรงบิด จะทำให้เพลาหมุนแล้วท่อจะเกิดการบิดตัวรอบแกนของท่อ หลังจากนั้นเซ็นเซอร์วัดแรงบิดจะทำการบันทึกค่าแรงบิดและมุมบิดเพื่อนำไปคำนวณต่อไป

6. ตัวแปรที่สำคัญในการวิเคราะห์

ในการวิเคราะห์ท่อเติมโฟมภายใต้แรงบิด กับการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นโฟมและชนิดของท่อ ตัวแปรที่สำคัญในการวิเคราะห์ มีดังนี้

6.1 แรงสูงสุด หมายถึง แรงสูงสุดที่เกิดขึ้นในกราฟระหว่างแรงบิดกับมุมบิดที่ทำให้ท่อเดิมนิโม่เสียรูปไปเหตุผลในการใช้แรงบิดสูงสุด เนื่องจากแรงบิดสูงสุดควรเป็นแรงที่มีค่าน้อยกว่าแรงที่รับได้ของโครงสร้างหลัก ไม่เช่นนั้นโครงสร้างหลักจะเกิดความเสียหายก่อน ซึ่งจะก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้ใช้งานได้

6.2 แรงเฉื่อย หมายถึง แรงเฉื่อยของท่อเดิมนิโม่ที่ได้รับจากกราฟระหว่างแรงบิดกับมุมบิดท่อจะเกิดการบิดตัวจนไม่สามารถบิดได้ เหตุผลที่ใช้แรงเฉื่อย เนื่องจากแรงเฉื่อยที่มีค่าสูงขึ้น จะทำให้ความสามารถการดูดซับพลังงานของท่อสูงขึ้น

6.3 พลังงานดูดซับ หมายถึง พลังงานของท่อที่เกิดการเสียรูปเนื่องจากการบิดตัวของท่อ หาได้จากกราฟพื้นที่ใต้กราฟระหว่างแรงบิดกับระยะบิดตัวของท่อ หรือหาค่าโดยประมาณจากแรงบิดเฉลี่ยคูณด้วยระยะบิดตัวของท่อ ประโยชน์ของพลังงานดูดซับที่มีค่าสูงจะยิ่งดี เพื่อดูดซับพลังงานจลน์ที่มากระทำกับท่อได้มากที่สุด พลังงานดูดซับสามารถหาได้จากสมการที่ (2)

$$E_a = \int Fds \approx F_{ave}S \quad (2)$$

โดยที่

E_a	= พลังงานดูดซับ
F	= แรงบิดที่กระทำกับท่อเดิมนิโม่
ds	= การเปลี่ยนแปลงระยะบิดตัวของชิ้นงาน
F_{ave}	= แรงบิดเฉลี่ย
S	= ระยะบิดตัว

แต่ในทางปฏิบัติพลังงานดูดซับมักจะหาจากแรงเฉื่อยคูณด้วยมุมบิดสุดท้ายของท่อเดิมนิโม่

6.4 พลังงานดูดซับจำเพาะ หมายถึง พลังงานดูดซับของท่อเดิมนิโม่เทียบกับมวลของท่อ พลังงานดูดซับจำเพาะมักจะใช้พิจารณาในกรณีที่ไม่นำน้ำหนักมากเกินไป เช่น รถยนต์ ถ้าตัวโครงสร้างมีน้ำหนักมากเกินไปจะทำให้เกิดการสิ้นเปลืองน้ำมันสูง ดังนั้นพลังงานดูดซับจำเพาะหาได้จากสมการที่ (3)

$$E_s = \frac{E_a}{m} = \frac{\int Fds}{m} \quad (3)$$

โดยที่

E_s	= การดูดซับพลังงานจำเพาะ
F	= แรงบิดที่กระทำกับท่อเดิมนิโม่
ds	= การเปลี่ยนแปลงระยะบิดตัวของชิ้นงาน
m	= มวลของท่อเดิมนิโม่

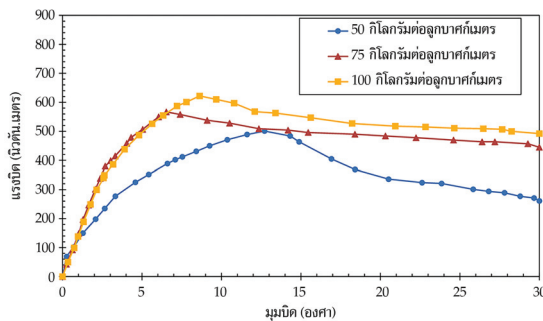
ผลการทดลองและการวิจารณ์

1. ผลตอบสนองของแรงบิดกับพฤติกรรมความเสียหาย

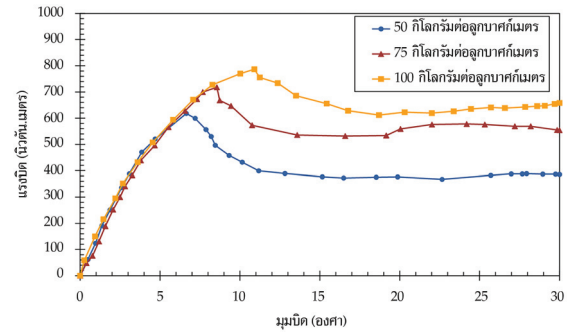
ผลการทดลองของท่อรูปร่างหลายเหลี่ยมเดิมนิโม่ภายใต้แรงบิด ผลตอบสนองจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับมุมบิด ดังรูปที่ 5 ซึ่งรูปร่างของท่อ ประกอบด้วย ท่อสี่เหลี่ยม ท่อหกเหลี่ยม ท่อแปดเหลี่ยม และท่อวงกลม ตามลำดับ โดยท่อแต่ละรูปร่างจะเดิมนิโม่ที่ความหนาแน่น 50 75 และ 100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

จากรูปที่ 5 จะเห็นว่าพฤติกรรมความเสียหายของท่อเดิมนิโม่ทุกตัว จะมีการแบ่งช่วงพฤติกรรมความเสียหายได้ 3 ช่วง คือ ช่วงแรกท่อมีการเสียรูปแบบยืดหยุ่นที่เรียกว่า “ช่วงอีลาสติก” เป็นช่วงที่ท่อเดิมนิโม่รับแรงบิดจากเริ่มต้นไปถึงแรงบิดที่จุดคราก ช่วงนี้เมื่อท่อเดิมนิโม่แรงบิดท่อจะเกิดการบิดตัวจนเกิดการเสียรูป

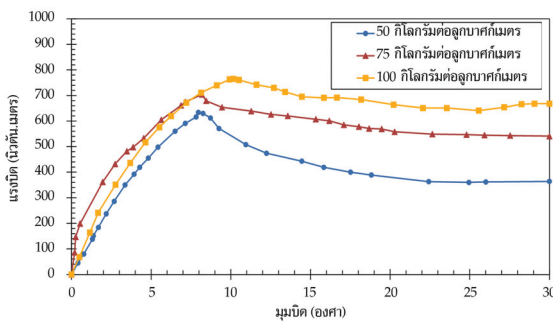
แต่พอปลดแรงบิดออกท่อเติมโฝมจะคืนรูปเข้าที่เดิม ส่วนช่วงที่สองเมื่อเพิ่มแรงบิดต่อไปอีก ท่อจะมีการเสียรูปร่างอย่างถาวร ที่เรียกว่า “ช่วงพลาสติก” เป็นช่วงที่ท่อเติมโฝมจะบิดตัวต่อจากจุดครากไปจนถึงจุดแรงบิดสูงสุดหรือจุดประลัย หลังจากนั้นช่วงที่สาม ท่อเติมโฝมจะเกิดการเสียรูปร่างอย่างรวดเร็วจนกระทั่งหน้าตัดของท่อเติมโฝมเล็กลงเรื่อย ๆ เรียกว่า “ช่วงพังทลาย”



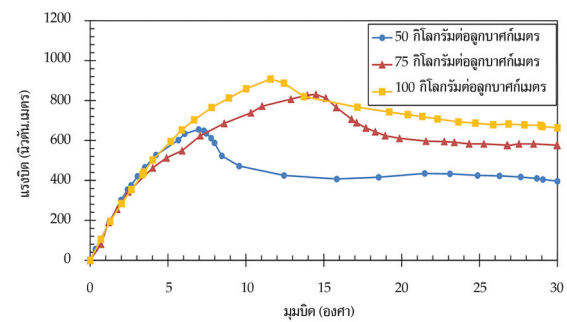
(ก) ท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยม



(ข) ท่อหน้าตัดหกเหลี่ยม



(ค) ท่อหน้าตัดแปดเหลี่ยม



(ง) ท่อหน้าตัดวงกลม

รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับมุมบิดของท่อ



$$50 \frac{kg}{m^3}$$

$$75 \frac{kg}{m^3}$$

$$100 \frac{kg}{m^3}$$

(ก) ท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยม



$$50 \frac{kg}{m^3}$$

$$75 \frac{kg}{m^3}$$

$$100 \frac{kg}{m^3}$$

(ข) ท่อหน้าตัดหกเหลี่ยม

รูปที่ 6 การเสียรูปของท่อเติมโฝม



$$50 \frac{kg}{m^3}$$

$$75 \frac{kg}{m^3}$$

$$100 \frac{kg}{m^3}$$

(ค) ท่อหน้าตัดแปดเหลี่ยม



$$50 \frac{kg}{m^3}$$

$$75 \frac{kg}{m^3}$$

$$100 \frac{kg}{m^3}$$

(ง) ท่อหน้าตัดวงกลม

รูปที่ 6 การเสียรูปของท่อเติมโม่ (ต่อ)

รูปที่ 6 เป็นการเสียรูปของท่อสี่เหลี่ยม ท่อหกเหลี่ยม ท่อแปดเหลี่ยมและท่อวงกลม โดยภายในท่อแต่ละหน้าตัดจะเติมโม่ที่มีความหนาแน่น 50 75 และ 100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ลักษณะการเสียรูปของท่อแต่ละรูปร่างจะเริ่มดันขึ้นที่ปลายด้านหนึ่งของท่อ โดยจะเกิดรอยพับขึ้นด้านข้างท่อซึ่งจำนวนรอยพับจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับลักษณะรูปร่างของท่อและความหนาแน่นโม่ จำนวนรอยพับจะเพิ่มขึ้นตามความยาวของท่อและตามมุมบิดที่เพิ่มขึ้น จนถึงค่าแรงบิดสูงสุดหรือจุดประลัยจำนวนรอยพับตัวด้านข้างของท่อจะมีขีดจำกัดสูงสุดค่าหนึ่ง หลังจากนั้นการเสียรูปของท่อจะอยู่ในช่วงพังทลายกล่าวคือ บริเวณหน้าตัดของท่อแต่ละด้านจะยุบตัวลงไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งหน้าตัดของท่อจะชนติดกันพอดี ทั้งนี้รูปร่างความเสียหายของท่อแต่ละหน้าตัดจะแตกต่างกันไป ซึ่งจะเป็นงานวิจัยที่ทำการศึกษาต่อไป

2. ผลของความหนาแน่นโม่

งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นโม่ที่ใส่เข้าไปภายในของท่อสี่เหลี่ยม ท่อหกเหลี่ยม ท่อแปดเหลี่ยมและท่อวงกลม โดยความหนาแน่นโม่ ประกอบด้วย 50 75 และ 100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ตัวแปรดังตารางที่ 2 ประกอบด้วย แรงเฉื่อย แรงสูงสุด พลังงานดูดซับของท่อ พลังงานดูดซับจำเพาะ และประสิทธิภาพพลังงานดูดซับ ตามลำดับ

จากข้อมูลในตารางที่ 2 นำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสำคัญที่ใช้ในการวิเคราะห์กับผลของความหนาแน่นโม่ดังรูปที่ 7 และสามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้

1) แรงเฉื่อย ดังรูปที่ 7(ก) พบว่าแรงเฉื่อยจะเพิ่มขึ้น ถ้าความหนาแน่นของโม่เพิ่มขึ้น ซึ่งแรงเฉื่อยจะมีผลต่อพลังงานดูดซับของท่อถ้าแรงเฉื่อยเพิ่มขึ้นยิ่งดีมีความสำคัญมาก ดังนั้นความหนาแน่นโม่ 100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรจะให้แรงเฉื่อยสูงสุด

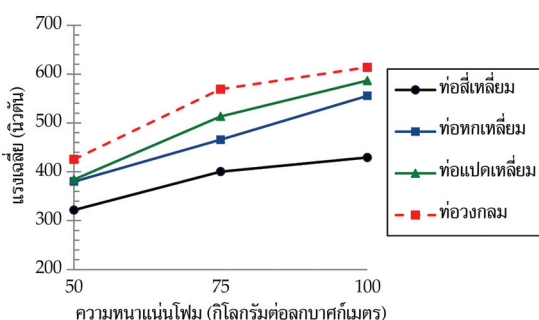
2) แรงสูงสุด ดังรูปที่ 7(ข) พบว่าแรงสูงสุดจะเพิ่มขึ้น ถ้าความหนาแน่นของโม่เพิ่มขึ้น และความหนาแน่นโม่ 100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรจะให้แรงสูงสุด ซึ่งแรงสูงสุดจะมีผลต่อการยุบตัวของท่อถ้าแรงสูงสุดมีค่าสูงจะทำให้ท่อยุบตัวได้ยาก จึงมีผลทำให้พลังงานดูดซับของท่อน้อยลง ซึ่งจะเป็นอันตรายต่อโครงสร้างหลักที่ต้องการความปลอดภัย

3) พลังงานดูดซับ ดังรูปที่ 7(ค) พบว่าพลังงานดูดซับจะเพิ่มขึ้น ถ้าความหนาแน่นของโฟมเพิ่มขึ้น และความหนาแน่นโฟม 100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรจะให้พลังงานดูดซับสูงสุด พลังงานดูดซับของท่อที่มีค่าสูง จะมีความสามารถในการต้านทานพลังงานจลน์ที่มากกระทำกับท่อ ทำให้โครงสร้างหลักมีความปลอดภัยสูง

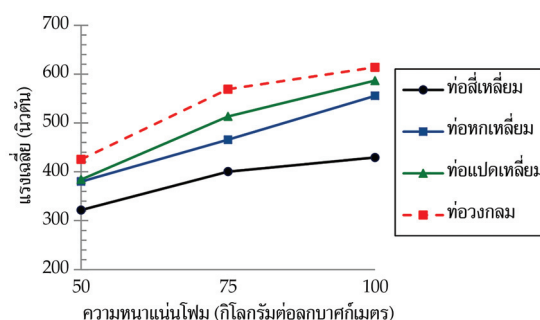
4) พลังงานดูดซับจำเพาะ ดังรูปที่ 7(ง) พบว่าความหนาแน่นของโฟมที่ 75 และ 100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรจะให้ค่าพลังงานดูดซับจำเพาะสูงสุดขึ้นอยู่กับชนิดของท่อ ซึ่งพลังงานดูดซับจำเพาะของทั้งสองความหนาแน่นนี้มีค่าความแตกต่างกันน้อยมาก แต่พลังงานดูดซับจำเพาะของความหนาแน่นของโฟม 50 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรจะมีค่าต่ำสุด ผลของพลังงานดูดซับจำเพาะจะคำนึงถึงมวลของท่อ ซึ่งจะมีผลต่อน้ำหนักของโครงสร้างหลักที่มากขึ้น ดังนั้นถ้าพิจารณาเกี่ยวกับน้ำหนักจึงควรเลือกใช้ท่อที่มีพลังงานดูดซับจำเพาะสูง

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ตัวแปรที่ศึกษา

ชนิดท่อ	ความหนาแน่นโฟม	ตัวแปรสำคัญในการวิเคราะห์				
		มวล (กิโลกรัม)	แรงเฉื่อย (นิวตัน)	แรงสูงสุด (นิวตัน)	พลังงานดูดซับ (จูล)	พลังงานดูดซับจำเพาะ (จูลต่อกิโลกรัม)
ท่อสี่เหลี่ยม	50	0.179	321.63	501	168.54	940.38
	75	0.203	400.30	567	209.76	1032.17
	100	0.227	429.30	622	224.95	990.02
ท่อหกเหลี่ยม	50	0.181	379.98	618	199.11	1098.63
	75	0.208	465.53	718	243.94	1174.15
	100	0.234	555.48	787	291.07	1242.40
ท่อแปดเหลี่ยม	50	0.184	384.37	634	201.41	1095.67
	75	0.212	513.20	704	268.92	1270.85
	100	0.239	586.50	765	307.33	1283.80
ท่อดวงกลม	50	0.187	425.37	655	222.89	1191.51
	75	0.216	569.03	831	298.17	1377.65
	100	0.246	613.70	908	321.58	1308.26

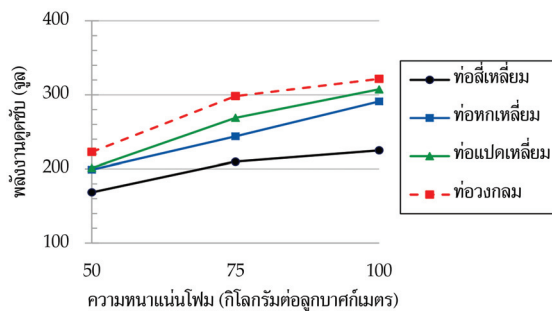


(ก) แรงเฉื่อย

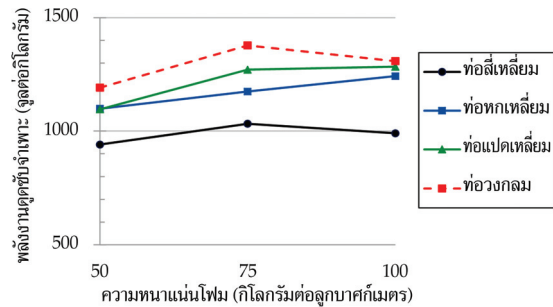


(ข) แรงสูงสุด

รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสำคัญที่ใช้ในการวิเคราะห์กับผลของความหนาแน่นโฟม



(ค) พลังงานดูดซับ



(ง) พลังงานดูดซับจำเพาะ

รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสำคัญที่ใช้ในการวิเคราะห์กับผลของความหนาแน่นโพม (ต่อ)

3. ผลของชนิดท่อ

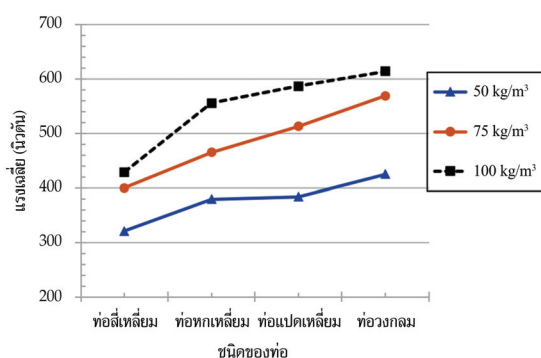
การพิจารณาผลของชนิดท่อที่มีรูปร่างหน้าตัดแตกต่างกัน ได้แก่ ท่อสี่เหลี่ยม ท่อหกเหลี่ยม และท่อวงกลมตามลำดับ กับผลของตัวแปรที่ศึกษา ดังรูปที่ 8 และสามารถอธิบายได้ดังนี้

1) แรงเฉลี่ย ดังรูปที่ 8(ก) พบว่าแรงเฉลี่ยเพิ่มขึ้น ตามจำนวนเหลี่ยมของท่อที่เพิ่มขึ้น คือ ท่อวงกลมมีค่าแรงเฉลี่ยสูงที่สุด รองลงมาเป็นท่อแปดเหลี่ยม ท่อหกเหลี่ยม และท่อสี่เหลี่ยมมีค่าแรงเฉลี่ยต่ำที่สุด

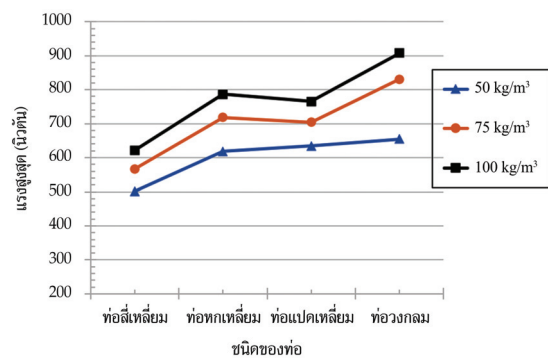
2) แรงสูงสุด ดังรูปที่ 8(ข) พบว่าแรงสูงสุดเพิ่มขึ้นมากที่สุดในท่อวงกลม และท่อสี่เหลี่ยมมีค่าแรงสูงสุดต่ำสุด ส่วนท่อหกเหลี่ยมและท่อแปดเหลี่ยมมีค่าแรงสูงสุดใกล้เคียงกันมากขึ้นขึ้นกับความหนาแน่นโพม

3) พลังงานดูดซับ ดังรูปที่ 8(ค) พบว่าพลังงานดูดซับเพิ่มขึ้น ตามจำนวนเหลี่ยมของท่อที่เพิ่มขึ้น คือ ท่อวงกลมมีพลังงานดูดซับมากที่สุด รองลงมาเป็นท่อแปดเหลี่ยม ท่อหกเหลี่ยม และท่อสี่เหลี่ยมมีพลังงานดูดซับน้อยที่สุด

4) พลังงานดูดซับจำเพาะ ดังรูปที่ 8(ง) พบว่าพลังงานดูดซับจำเพาะเพิ่มขึ้น ตามจำนวนเหลี่ยมที่เพิ่มขึ้น คือท่อวงกลมจะมีพลังงานดูดซับจำเพาะสูงที่สุด รองลงมาเป็นท่อแปดเหลี่ยม ท่อหกเหลี่ยม และท่อสี่เหลี่ยมมาพลังงานดูดซับจำเพาะน้อยที่สุด ทั้งนี้พลังงานดูดซับจำเพาะยังขึ้นขึ้นกับความหนาแน่นโพม จะเห็นว่าท่อวงกลมที่มีความหนาแน่นโพม 75 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีพลังงานดูดซับจำเพาะมากกว่าท่อวงกลมที่มีความหนาแน่นโพม 60 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เนื่องจากท่อวงกลมที่มีความหนาแน่นโพม 60 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีพลังงานดูดซับเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ดังรูปที่ 8(ค) เมื่อเทียบกับมวลที่เพิ่มขึ้น

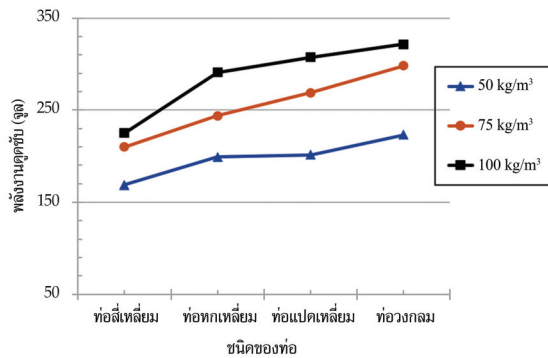


(ก) แรงเฉลี่ย

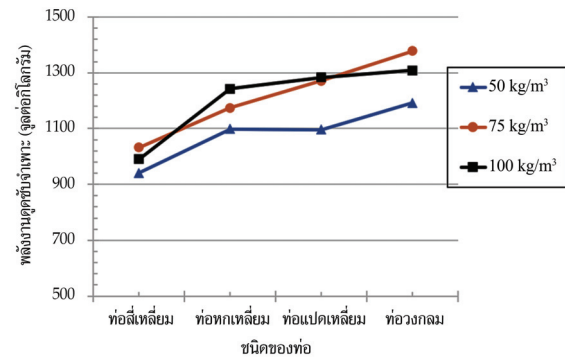


(ข) แรงสูงสุด

รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสำคัญที่ใช้ในการวิเคราะห์กับผลของชนิดท่อ



(ค) พลังงานดูดซับ



(ง) พลังงานดูดซับจำเพาะ

รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสำคัญที่ใช้ในการวิเคราะห์กับผลของชนิดท่อ (ต่อ)

สรุปผล

ผลการศึกษาตัวแปรของท่อที่มีหน้าตัดหลายเหลี่ยมเติมโฟมภายใต้แรงบิดโดยวิธีการทดลอง จะทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นโฟมภายในท่อและชนิดของท่อที่มีรูปร่างหน้าตัดแตกต่างกัน สามารถสรุปได้ว่า

1. พฤติกรรมการเสียหายของท่อจะเริ่มต้นด้วยการเกิดเส้นการพับที่ปลายด้านหนึ่งของท่อ เส้นการพับตัวจะเพิ่มมากขึ้นตามมุมบิดไปของท่อ จำนวนเส้นการพับจะขึ้นอยู่กับชนิดของท่อและความหนาแน่นโฟม
2. ผลของความหนาแน่นโฟม พบว่าความโฟมที่มีความหนาแน่น 100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร จะให้ค่าแรงเฉื่อย แรงสูงสุด พลังงานดูดซับ และพลังงานดูดซับจำเพาะมากที่สุด รองลงมาเป็น ความหนาแน่นโฟม 75 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และความหนาแน่นโฟม 50 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรมีค่าต่ำสุด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับจำนวนเส้นการพับตัวของท่อและความยาวของเส้นการพับตัว
3. ผลรูปร่างของท่อ พบว่า ท่อวงกลมจะให้ค่าแรงเฉื่อย แรงสูงสุด พลังงานดูดซับ และพลังงานดูดซับจำเพาะมากที่สุด รองลงมาเป็น ท่อแปดเหลี่ยม ท่อหกเหลี่ยม และท่อสี่เหลี่ยมมีค่าต่ำสุด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับจำนวนเส้นการพับตัวของท่อและความยาวของเส้นการพับตัว

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ได้ให้ใช้เครื่องทดสอบแรงดึง และขอขอบคุณผู้ให้ทุนวิจัยโดยคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ) และมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

References

- [1] Alexander, J. M. (1960). An Approximate Analysis of the Collapse of Thin Cylindrical Shells Under Axial Loading. **The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics**. Vol. 13, Issue 1, pp. 10-15. DOI: 10.1093/QJMAM/13.1.10
- [2] Kecman, D. (1983). Bending Collapse of Rectangular and Square Section Tubes. **International of Journal Mechanical Science**. Vol. 25, Issue 9-10, pp. 623-636. DOI: 10.1016/0020-7403(83)90072-3
- [3] Wierzbicki, T. and Abramowicz, W. (1983). On the Crushing Mechanics of Thin-Walled Structures. **Journal of Applied Mechanics**. Vol. 50, Issue 4a, pp. 727-734. DOI: 10.1115/1.3167137

- [4] Wierzbicki, T. (1983). Crushing Analysis of Metal Honeycombs. **International of Journal Impact Engineering**. Vol. 1, Issue 2, pp. 157-174. DOI: 10.1016/0734-743X(83)90004-0
- [5] Poonaya, S., Teebonma, U., and Thinvongpituk, C. (2009). Plastic Collapse Analysis of Thin-Walled Circular Tubes Subjected to Bending. **Thin-Walled Structures**. Vol. 47, Issue 6-7, pp. 637-645. DOI: 10.1016/j.tws.2008.11.005
- [6] Huang, J., He, K., Liu, R., and Shi, C. (2022). Theoretical and Numerical Investigation of Mean Crushing Load of Uniform and Non-Uniform Multi-Cell Tube. **Thin-Walled Structures**. Vol. 180, Article ID 109956. DOI: 10.1016/j.tws.2022.109956
- [7] Ge, C., Gao, Q., Wang, L., and Hong, Z. (2020). Theoretical Prediction and Numerical Analysis for Axial Crushing Behavior of Elliptical Aluminium Foam-Filled Tube. **Thin-Walled Structures**. Vol. 149, Article ID 106523. DOI: 10.1016/j.tws.2019.106523
- [8] Elchalakani, M., Zhao, X. L., and Grzebieta, R. H. (2002). Bending Tests to Determine Slenderness Limits for Cold-Formed Circular Hollow Sections. **Journal of Constructional Steel Research**. Vol. 58, Issue 11, pp.1407-1430. DOI: 10.1016/S0143-974X(01)00106-7
- [9] Fu, X. and Zhang, X. (2023). Three-Point Bending of Thin-Walled Arched Beams with Square Sections. **Thin-Walled Structures**. Vol. 182, Part A, Article ID 110201. DOI: 10.1016/j.tws.2022.110201
- [10] Poonaya, S., Thinvongpituk, C., and Teebonma, U. (2007). Comparison of Absorption Energy of Various Section Steel Tubes Under Axial Compression and Bending Loading. The **21st Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand**. Chonburi, Thailand, 17-19 October, p. 32
- [11] Nagel, G. M. and Thambiratnam, D. P. (2005). Computer Simulation and Energy Absorption of Tapered Thin-Walled Rectangular Tubes. **Thin-Walled Structures**. Vol. 43, Issue 8, pp. 1225-1242. DOI: 10.1016/j.tws.2005.03.008
- [12] Nagel, G. M. and Thambiratnam, D. P. (2006). Dynamic Simulation and Energy Absorption of Tapered Thin-Walled Tubes Under Oblique Impact Loading. **International of Journal Impact Engineering**. Vol. 32, Issue 10, pp. 1595-1620. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2005.01.002
- [13] Poonaya, S. and Thinvongpituk, C. (2009). Comparison of Energy Absorption of Various Section Steel Tubes Under Torsion Loading. The **23th Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand**. Chiang Mai, Thailand, 4-7 November, p. 75
- [14] Arayangkul, S., Poonaya, S., and Payom, C. (2014). Absorbed Energy Efficiency of Polygon Thin-Walled Tubes Subjected to Torsion. **Naresuan University Engineering Journal**. Vol. 9, No. 1, pp. 15-24
- [15] Shuguang, Y., Huifen, Z., Mingyang, L., Zhixiang, L., and Ping, X. (2020). Energy Absorption of Origami Tubes with Polygonal Cross-Sections. **Thin-Walled Structures**. Vol. 157, Article ID 107013. DOI: 10.1016/j.tws.2020.107013
- [16] Andrew, K. R. F., England, G. L., and Ghani, E. (1983). Classification of the Axial Collapse of Cylindrical Tubes Under Quasi-Loading. **International of Journal Mechanical Science**. Vol. 5, Issue 9/10, pp. 687-696. DOI: 10.1016/0020-7403(83)90076-0
- [17] Ahmad, Z. and Thambiratnam, D. P. (2009). Dynamic Computer Simulation and Energy Absorption of Foam-Filled Conical Tubes Under Axial Impact Loading. **Computer and Structures**. Vol. 87, Issue 3-4, pp. 185-197. DOI: 10.1016/j.compstruc.2008.10.003

- [18] Ahmad, Z. and Thambiratnam, D. P. (2009). Crushing Response of Foam-Filled Conical Tubes Under Quasi-Static Axial Loading. **Materials and Design**. Vol. 30, Issue 7, pp. 2393-2403. DOI: 10.1016/j.matdes.2008.10.017
- [19] Sahil, G., Anand, C., Sunil, K. S., and Rakesh, C. S. (2019). Crashworthiness Analysis of Foam Filled Star Shape Polygon of Thin-Walled Structure. **Thin-Walled Structures**. Vol. 144, Article ID 106312. DOI: 10.1016/j.tws.2019.106312
- [20] Gang, Z., Suzhen, W., Guangyong, S., Guangyao, L., and Qing, L. (2014). Crushing Analysis of Foam-Filled Single and Bitubal Polygonal Thin-Walled Tubes. **International Journal of Mechanical Sciences**. Vol. 87, pp. 226-240. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2014.06.002
- [21] Seyed, S. B., Hamed, A., and Gholam, H. L. (2023). An Analytical Investigation on the Crushing Behavior of Thin-Walled Tubes Filled with a Foam with Strain Hardening Region. **Thin-Walled Structures**. Vol. 182, Part A, Article ID 110169. DOI: 10.1016/j.tws.2022.110169
- [22] Mamalis, A. G., Manolakos, D. E., Viegela, G. L., Vaxevanidis, N. M., and Johnson, W. (1986). On the Inextensional Axial Collapse of Thin-Walled PVC Conical Shells. **International of Journal Mechanical Science**. Vol. 28, Issue 6, pp. 323-335
- [23] Weigang, C. and Tomasz, W. (2000). Torsional Collapse of Thin-Walled Prismatic Columns. **Thin-Walled Structures**. Vol. 36, Issue 3, pp.181-196. DOI: 10.1016/S0263-8231(99)00043-9
- [24] British Standard. (1990). **Tensile Testing of Metallic Materials**. BS EN 10002-1.
- [25] Reyes, A., Hopperstad, O. S., and Langseth, M. (2004). Aluminum Foam-Filled Extrusions Subjected to Oblique Loading: Experimental and Numerical Study. **International Journal of Solids and Structures**. Vol. 41, Issues 5-6, pp. 1645-1675. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2003.09.053

ผลของการทดแทนแป้งสาลีด้วยผงกะหล่ำดอกต่อคุณภาพของคุกกี้ตุล Effect of Substitution of Wheat Flour with Cauliflower Powder on Qualities in Tuile Cookies

บุษบา มะโนแสน^{1*} จิรรัชต์ กันทะขู¹ สุทธิดา ปัญญาอินทร์¹ ประกิต ทิมขำ¹ และเกวาลิน แซ่หลอ¹
Busaba Manosan^{1*} Jirarat Kantakhoo¹ Sutthida Punyain¹ Prakrit Timkum¹ and Kewalin Saelo¹

Received: May 10, 2024; Revised: July 24, 2024; Accepted: July 24, 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของผงกะหล่ำดอกทั้งหมด 2 ปัจจัย ได้แก่ 1) การให้ความร้อนก่อนอบแห้งโดยการลวกและไม่ลวก และ 2) อุณหภูมิอบแห้งที่ 50 และ 70 °C วางแผนการทดลองแบบ 2×2 Factorial in CRD ตรวจสอบลักษณะสีของผงกะหล่ำดอก พบว่าผงกะหล่ำดอกที่ผ่านการลวกและอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 °C มีค่าความสว่าง (L*) เพิ่มขึ้น ส่วนค่าความเป็นสีแดง (a*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b*) ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ตรวจสอบคุณภาพทางเคมีของผงกะหล่ำดอก พบว่าผงกะหล่ำดอกที่ผ่านการลวกและอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 °C มีปริมาณความชื้น และปริมาณน้ำอิสระ (a_w) น้อยที่สุดในขณะที่ปริมาณใยอาหารมากที่สุด ($p \leq 0.05$) และได้เลือกผงกะหล่ำดอกที่ผ่านการลวกและอบที่อุณหภูมิ 50 °C มาทดแทนแป้งสาลีในคุกกี้ตุลที่ร้อยละ 0 10 20 และ 30 พบว่าเมื่อทดแทนผงกะหล่ำดอกในปริมาณที่เพิ่มขึ้นทำให้ลักษณะด้านสีของคุกกี้มีค่าความสว่าง (L*) ลดลง ค่าความเป็นสีแดง (a*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b*) เพิ่มขึ้น ส่วนความแข็ง (ความกรอบ) ของคุกกี้ตุลลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ในทางกลับกันปริมาณความชื้น ปริมาณน้ำอิสระ (a_w) และปริมาณใยอาหารเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรควบคุม ผลการทดสอบการยอมรับทางประสาทสัมผัสของคุกกี้ตุล พบว่าการทดแทนผงกะหล่ำดอกในปริมาณที่สูงขึ้นทำให้คุกกี้ตุลมีแนวโน้มที่จะได้รับคะแนนความชอบในด้านสี กลิ่นรส รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ส่วนลักษณะปรากฏไม่มีความแตกต่าง ($p > 0.05$) โดยสามารถทดแทนแป้งสาลีด้วยผงกะหล่ำดอกได้ถึงระดับร้อยละ 20 ของน้ำหนักแป้งสาลีโดยมีความชอบโดยรวมสูงสุดไม่ต่างจากสูตรควบคุม ($p > 0.05$)

คำสำคัญ : ผงกะหล่ำดอก; แป้งสาลี; คุกกี้ตุล

¹ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

¹ Faculty of Science and Agricultural Technology, Rajamangala University of Technology Lanna

* Corresponding Author; Tel. 08 4040 3994, E - mail: busaba_kai@hotmail.com

Abstract

This study aims to investigate the factors affecting the quality of cauliflower powder, focusing on two variables: 1) pre-drying heat treatment (blanching and non-blanching) and 2) drying temperature (50 and 70 °C). A 2x2 factorial design in a Completely Randomized Design (CRD) was used. The color characteristics of the cauliflower powder were analyzed, revealing that blanching followed by drying at 50 °C resulted in significantly higher lightness (L^*) and lower redness (a^*) and yellowness (b^*) ($p \leq 0.05$). The chemical quality analysis showed that blanching and drying at 70 °C yielded the lowest moisture content and water activity (a_w), while the dietary fiber content was the highest ($p \leq 0.05$). Cauliflower powder processed with blanching and drying at 50 °C was then used to replace wheat flour in tuile cookies at 0, 10, 20 and 30 % substitution levels. Increased substitution levels resulted in decreased lightness (L^*), increased redness (a^*), and increased yellowness (b^*) of the cookies. The hardness (crispness) of the tuile cookies significantly decreased ($p \leq 0.05$), while the moisture content, water activity (a_w), and dietary fiber content increased to the control formula. Sensory evaluation indicated that higher substitution levels of cauliflower powder led to significantly lower scores for color, flavor, taste, texture, and overall preference ($p \leq 0.05$). However, the appearance did not show significant differences ($p > 0.05$). Substitution of up to 20 % of wheat flour with cauliflower powder was feasible without significantly affecting the overall preference compared to the control formula ($p > 0.05$).

Keywords: Cauliflower Powder; Wheat Flour; Tuile Cookies

บทนำ

ขยะที่เกิดจากอาหารในแต่ละปีมีประมาณ 1,300 ล้านตันต่อปีหรือ 1 ใน 3 ของอาหารที่ผลิตได้ทั่วโลกเป็นขยะอาหารที่ถูกทิ้งไปแบบสูญเปล่าและสร้างก๊าซเรือนกระจกถึงร้อยละ 8 และในแต่ละปีมีขยะที่ถูกฝังกลบมากกว่าหนึ่งพันล้านตัน แต่ในทางกลับกันยังมีประชากรจำนวนหนึ่งไม่สามารถเข้าถึงอาหารเนื่องจากสภาพแวดล้อมสภาพความเป็นอยู่หรืออื่น ๆ การลดปริมาณขยะอาหารจึงเป็นเป้าหมายของ UN ได้ตั้งเป้าหมายให้ปี ค.ศ. 2030 ให้ขยะอาหารที่เหลือจากการจำหน่ายและบริโภคทั่วโลกลดลงร้อยละ 50 ซึ่งขยะอาหารมาจากเศษอาหารหรืออาหารที่เหลือทิ้งจากการบริโภคและอาหารส่วนเกิน (Food Surplus) ที่สามารถบริโภคได้แต่มีลักษณะภายนอกไม่สวยงามหรือไม่ได้มาตรฐานตกเกรด ได้แก่ ผักหรือผลไม้ เช่นกะหล่ำดอกขาวมีรอยดำ รอยขีดหรือเน่าบางส่วนของหัวดอกกะหล่ำที่ไม่สามารถที่จะจำหน่ายหากนำไปทิ้งก็จะมีปริมาณขยะที่เพิ่มขึ้น

กะหล่ำดอก หรือดอกกะหล่ำเป็นผักตระกูลกะหล่ำที่มีลักษณะคล้ายบรอกโคลี พืชตระกูลนี้ จะรวมถึงกะหล่ำปลี คะน้า วอเตอร์เครส กะหล่ำปลีแดง กวางตุ้งฮ่องเต้ ผักกาดขาวปลี กะหล่ำดอกเป็นผักที่รับประทานส่วนที่เรียกว่า ดอก แต่ความจริงไม่ใช่ดอกเป็นเพียงส่วนของที่เกิดจากดอกจริงซึ่งเรียกว่า เคิร์ด (Curd) อยู่บริเวณปลายยอดของต้นดอก เคิร์ดมีลักษณะเป็นก้อนสีขาวครีมอัดตัวกันแน่นถ้าอากาศเย็นพอเคิร์ดจะยึดตัวและมีช่อดอกออกมา กะหล่ำดอกเป็นพืชที่อุดมไปด้วยใยอาหารและสารอาหารหลายชนิด ซึ่งเป็นพืชที่มีประโยชน์ต่อสุขภาพทั้งเบต้าแคโรทีน (Beta-Carotene) ลูทีน (Lutein) ซีแซนทีน (Zeaxanthin) รวมทั้งสารอาหารที่สำคัญอย่างโคลีน (Choline) ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มของวิตามินบี ช่วยบำรุงสมอง และป้องกันโรคสมองเสื่อม วิตามินซี วิตามินอี วิตามินเค โฟเลต (Folate) และนอกจากนี้สถาบันมะเร็งแห่งชาติสหรัฐอเมริกาให้ข้อมูลว่าพืชตระกูล

กะหล่ำมีสารกลูโคซิโนเลต (Glucosinolates) เป็นสารพฤกษเคมี ซึ่งเมื่อผ่านระบบการย่อยจะได้สารอินโดล (Indole) และไอโซไทโอไซยาเนต (Isothiocyanate) ซึ่งมีงานวิจัยหลายเรื่องระบุว่าอาจช่วยลดความเสี่ยงในการเป็นมะเร็งชนิดต่าง ๆ ได้ [1] กะหล่ำดอกสามารถช่วยลดน้ำหนัก เนื่องจากเป็นอาหารแคลอรีต่ำสามารถรับประทานแทนอาหารที่มีแคลอรีสูง ๆ ได้ เช่น ข้าว หรือแป้ง เพราะเป็นแหล่งใยอาหารที่ดีและย่อยช้าจึงทำให้รู้สึกอิ่มนาน [2]

ตุเลเป็นผลิตภัณฑ์ขนมอบประเภทคุกกี้ของชาวฝรั่งเศส น้ำหนักเบา แผ่นบางกรอบคล้ายขนมเบื้องของไทย เมื่อรับประทานจะรู้สึกละลายได้ในปาก มีรสหวานโดยส่วนผสมของคุกกี้ตุเล แบบดั้งเดิมประกอบด้วย แป้งสาลี น้ำตาล ไข่ขาว แป้งอัลมอนต์ และเนยละลาย จากส่วนผสมจะพบว่าปริมาณของแป้งข้าวสาลีและน้ำตาลปริมาณสูงมาก และเป็นขนมให้พลังงานสูง ซึ่งการบริโภคอาหารหรือขนมที่มีไขมันสูงจะเพิ่มความเสี่ยงต่อการสะสมคอเลสเตอรอลและโรคหัวใจ เป็นสาเหตุของโรคอ้วน แต่ในผลิตภัณฑ์ที่มีคาร์โบไฮเดรตเชิงซ้อนพบว่าจะไปช่วยลดระดับน้ำตาลในเลือด [3]

ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะนำดอกกะหล่ำที่ถูกคัดทิ้งหรือตกเกรดจากตลาดสดนำมาอบให้เป็นผงเพื่อทดแทนปริมาณแป้งข้าวสาลีในผลิตภัณฑ์คุกกี้ตุเล โดยศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการแปรรูปผงกะหล่ำดอกและปริมาณทดแทนแป้งสาลีในคุกกี้ตุเล ทำการศึกษาคูณภาพทางกายภาพ คุณภาพทางเคมี และศึกษาปริมาณผงกะหล่ำดอกที่เหมาะสมสำหรับผลิตภัณฑ์คุกกี้ตุเลเพื่อเป็นผลิตภัณฑ์ทางเลือกเพื่อสุขภาพแก่ผู้บริโภค

วิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของผงกะหล่ำดอก

เตรียมผงกะหล่ำดอกดังรูปที่ 1 โดยนำกะหล่ำดอกที่ได้จากการคัดทิ้งจากตลาดสดมาตัดแต่งส่วนที่เป็นใบก้านและข้อที่เน่าออก หั่นเป็นข้อล่างทำความสะอาดและนำไปแช่ด้วยสารละลายโพแทสเซียมเมทาไบซัลไฟด์ ความเข้มข้นร้อยละ 0.2 เป็นเวลา 10 นาที ล้างด้วยน้ำสะอาดอีก 1 รอบ แล้วทิ้งให้สะเด็ดน้ำ 5 นาที กำหนดปัจจัยที่ทำการศึกษาดังนี้

ปัจจัยที่ 1 การให้ความร้อนก่อนอบแห้งโดยแบ่งกะหล่ำดอกออกเป็น 2 ส่วน ส่วนที่ 1 ลวกในน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 96 - 98 °C เป็นเวลา 3 นาที [4] ซ้อนขึ้นให้สะเด็ดน้ำพักให้เย็น และส่วนที่ 2 ไม่ลวก จากนั้นหั่นกะหล่ำดอกเป็นชิ้นเล็ก ๆ ก่อนนำไปอบแห้ง

ปัจจัยที่ 2 อุณหภูมิในการอบแห้ง นำกะหล่ำดอกที่เตรียมทั้ง 2 แบบ เข้าตู้อบแห้งแบบลมร้อน (Owner Food, TD10, Bangkok) ที่อุณหภูมิ 50 และ 70 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่อ้างอิงที่ใช้ในการอบแห้งกะหล่ำดอก [3] และแป้งกล้วย [4] อบจนมีความชื้นสุดท้ายไม่เกินร้อยละ 14 (มาตรฐานผลิตภัณฑ์ อุตสาหกรรมแป้งสาลี อเนกประสงค์ มอก. 375-2524) นำกะหล่ำดอกที่ผ่านการอบแห้งมาปั่นให้ละเอียดด้วยเครื่องปั่นผสมอาหารแล้วร่อนด้วยตะแกรงขนาด 300 ไมครอน

นำผงกะหล่ำดอกมาวิเคราะห์ค่าสีด้วยเครื่องวัดสี (HunterLab, ColorFlex EZ, USA) วิเคราะห์ปริมาณน้ำอิสระ (Water Activity: a_w) ด้วยเครื่องวิเคราะห์น้ำอิสระ (Aqua Lab, 4TE, USA) วิเคราะห์ปริมาณความชื้นตามวิธี AOAC (2000) และวิเคราะห์ปริมาณเส้นใยหยาบด้วยวิธี AOAC (2005) วางแผนการทดลองแบบ 2x2 Factorial in CRD วิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ IBM SPSS Version 23 และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

สภาวะการทำแห้งที่เหมาะสมจะถูกนำไปใช้เพื่อเตรียมผงกะหล่ำเพื่อใช้ทดแทนปริมาณแป้งสาลีในคุกกี้ตุเลต่อไป



รูปที่ 1 การเตรียมกะหล่ำดอก (ก) กะหล่ำดอกตกรวด (ข) การตัดแต่งช่อดอก (ค) นำช่อดอกมาหั่นก่อนนำเข้าอบ

2. ศึกษาการทดแทนปริมาณแป้งสาลีด้วยผงกะหล่ำดอกในคุกกี้ตุล

การทดแทนปริมาณแป้งสาลีด้วยผงกะหล่ำดอกในคุกกี้ตุล โดยเลือกผงกะหล่ำดอกที่ได้จากข้อ 1 มาทดแทนแป้งสาลีบางส่วนในคุกกี้ตุล ที่ดัดแปลงจากสูตรพื้นฐานของ [4] ศึกษาการทดแทนปริมาณผงกะหล่ำดอก ในปริมาณร้อยละ 0 10 20 และ 30 ของน้ำหนักแป้งสาลี และมีส่วนผสมอื่น ๆ ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 อัตราส่วนของส่วนผสมคุกกี้ตุลที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยผงกะหล่ำดอกในระดับต่าง ๆ

ส่วนผสม (กรัม)	ปริมาณผงกะหล่ำดอกที่ทดแทนแป้งสาลี (ร้อยละของน้ำหนักแป้งสาลี)			
	0	10	20	30
แป้งสาลีอเนกประสงค์	52	46.80	41.60	36.40
ผงกะหล่ำดอก	0	5.20	10.40	15.60
ไข่ขาว	78	78	78	78
น้ำตาลทรายปน	32	32	32	32
เนยเค็ม	40	40	40	40

ที่มา: ดัดแปลงมาจาก [4]

ขั้นตอนการทำคุกกี้ตุล เริ่มจากตีไข่ขาวกับน้ำตาลทรายจนตั้งยอดอ่อน ร่อนแป้งสาลีกับผงกะหล่ำดอก ลงไปตีผสมให้เข้ากัน จากนั้นใส่เนยที่ละลายแล้วลงไปตีผสมให้เข้ากันอีกครั้ง นำส่วนผสมใส่ในพิมพ์คุกกี้ตุล ปาดให้ผิวหน้าเรียบเสมอกัน โรยหน้าคุกกี้ด้วยอัลมอนด์และนำเข้าอบที่อุณหภูมิ 150 °C เป็นเวลา 15 - 20 นาที นำออกจากเตาอบพักให้เย็นและบรรจุใส่ถุงซีลปิดผนึกเพื่อทดสอบคุณภาพต่อไป

2.1 คุณภาพทางกายภาพและทางเคมี

1) วัดค่าสี L^* a^* b^* ด้วยเครื่องวัดสี (Hunter Lab, Color Flex EZ, USA) เตรียมคุกกี้ตุล ใส่ในตลับสำหรับใส่ตัวอย่าง นำไปวัดค่าสีด้วยเครื่องวัดสีที่มีรูเปิดขนาด 1 นิ้ว โดยใช้แหล่งแสง D65 และ ค่ามุมสังเกต 10 องศา ค่า L^* คือค่าความสว่าง ค่า a^* คือค่าความเป็นสีแดงและสีเขียว ค่า b^* คือค่าความเป็นสีเหลืองและน้ำเงิน ทำการทดลอง 3 ซ้ำ

2) วัดเนื้อสัมผัส โดยใช้เครื่องวัดเนื้อสัมผัส (Brookfield Texture Analyzer, CT3, USA) ซึ่งประกอบด้วย Load Cell ขนาด 10 กิโลกรัม ใช้หัววัดทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 2 มิลลิเมตร (TA39) ที่ความเร็ว 2 มิลลิเมตรต่อวินาที [4] ทำการทดลอง 10 ซ้ำ บันทึกค่าแรงกดสูงสุดที่ทำให้คุกกี้แตก รายงานเป็นค่าความแข็ง (กรัม)

3) วัดปริมาณน้ำอิสระ (a_w) ด้วยเครื่องวิเคราะห์น้ำอิสระ (Aqua Lab, 4TE, USA) ทำการทดลอง 3 ซ้ำ

4) วัดปริมาณความชื้นตามวิธีของ AOAC Method 945.32 โดยชั่งตัวอย่าง 5 กรัมใส่ในถ้วยอลูมิเนียมสำหรับหาคความชื้นนำไปอบด้วยตู้อบลมร้อน (TWB Binder, IP 20, Germany) ที่อุณหภูมิ 105 °C จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ทำการทดลอง 3 ซ้ำ

5) วิเคราะห์ใยอาหาร (Gerhardt, FT12, Germany) ด้วยวิธี AOAC 2005 โดยใช้เครื่องวิเคราะห์เส้นใยอาหาร (Gerhardt, FT12, Germany)

วางแผนการทดสอบแบบสุ่มอย่างสมบูรณ์ (CRD) วิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ IBM SPSS Version 23 และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

2.2 การทดสอบลักษณะทางประสาทสัมผัส ประเมินคุณภาพทุกที่ดูแลด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่นรส เนื้อสัมผัส รสชาติ และความชอบโดยรวม ใช้แบบทดสอบชิมชนิด 9 Point Hedonic Scale (9 = ชอบมากที่สุด 1 = ไม่ชอบมากที่สุด) กำหนดเกณฑ์ยอมรับผลิตภัณฑ์คือ ต้องได้คะแนนการยอมรับไม่ต่ำกว่า 5 คะแนน ใช้ผู้ทดสอบชิมที่ไม่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 30 คน วางแผนการทดลองแบบสุ่มในบล็อกสมบูรณ์ (Randomized Complete Block Design; RCBD) วิเคราะห์ความแปรปรวน ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ IBM SPSS Version 23 และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

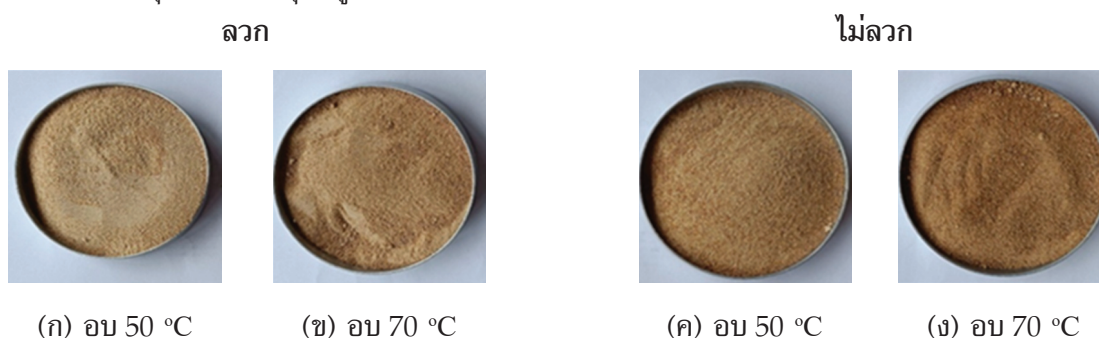
ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. ผลการให้ความร้อนต่อคุณภาพของผงกะหล่ำดอก

การศึกษาปัจจัยการลวกและไม่ลวกกะหล่ำดอกก่อนการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 และ 70 °C พบว่าค่าความสว่าง (L^*) ของผงกะหล่ำดอกมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ดังตารางที่ 3 และรูปที่ 2 - 3 จะเห็นว่าผงกะหล่ำดอกที่ผ่านการลวกและอบแห้งที่ 50 °C มีค่าความสว่างมากที่สุด เนื่องจากการใช้ความร้อนในการลวกสามารถช่วยยับยั้งปฏิกิริยาของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส (PPO) ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีของผงกะหล่ำดอก [5] การลวกกะหล่ำดอกในน้ำเดือดเป็นระยะเวลาสั้น ๆ ทำให้อากาศระหว่างเซลล์ผักที่บดบังสีเขียวของกะหล่ำดอกแพร่กระจายสู่บรรยากาศจึงเห็นสีเขียวจากคลอโรฟิลล์ (Chlorophyll) ได้ชัดเจนยิ่งขึ้น และเมื่อใช้อุณหภูมิในการอบสูงเป็นเวลานานกรดในเซลล์ผักจะเปลี่ยนคลอโรฟิลล์เป็นฟีโอไฟติน (Pheophytin) ทำให้กะหล่ำดอกมีสีน้ำตาลความสว่างจึงลดลง นอกจากนี้กะหล่ำดอกมีคาร์โบไฮเดรตอยู่ร้อยละ 4.42 [6] ซึ่งประกอบด้วย ส่วนของแป้งและน้ำตาล โดยเฉพาะน้ำตาลรีดิวซ์ที่สามารถทำปฏิกิริยากับหมู่อะมิโนในโปรตีนหรือสารประกอบไนโตรเจนอื่น ๆ โดยมีความร้อนเร่งปฏิกิริยาทำให้เกิดสารสีน้ำตาล หรือเรียกว่าปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard Reaction) อัตราเร็วของปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ภาวะที่สารมีความเข้มข้นสูงและอุณหภูมิสูงจะเกิดปฏิกิริยาเร็วที่สุด เนื่องจากเกิด Autocatalytic อัตราเร็วของปฏิกิริยานี้จะเพิ่มขึ้นเป็น 2 - 3 เท่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นทุก 10 °C อาหารที่มีน้ำตาลฟรุกโตสจะทำให้อัตราเร็วเพิ่มขึ้นเป็น 5 - 10 เท่า ความเข้มข้นของสีน้ำตาลจึงเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น [7] ดังนั้นกะหล่ำดอกที่ผ่านการลวกและอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 °C จึงมีค่าความสว่างต่ำกว่าค่าสีแดง (a^*) และค่าสีเหลือง (b^*) สูงกว่ากะหล่ำดอกที่อบที่ 50 °C ดังนั้นกะหล่ำดอกที่ผ่านการลวกและอบที่อุณหภูมิ 50 °C ให้ค่าสีที่ดีที่สุด ปริมาณความชื้นของผงกะหล่ำดอกไม่มีความแตกต่างกัน ($p > 0.05$) แต่ปริมาณน้ำอิสระ (a_w) มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยผงกะหล่ำดอกที่ผ่านการลวกและอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 °C มีปริมาณน้ำอิสระต่ำที่สุด เนื่องจากการลวกทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของผนังเซลล์พืชซึ่งจะทำลายโครงสร้างของเนื้อเยื่อโดยเฉพาะเพกตินจะหลุดออกจากโครงสร้างและละลายไปกับน้ำ ทำให้ความแข็งแรงของผนังเซลล์ลดลง ส่งผลให้น้ำในชิ้นอาหารมีโอกาสระเหยออกไปได้มากขึ้น [8] สอดคล้องกับงานวิจัยของ [9] ที่ศึกษาวิธีการลวกที่แตกต่างกันต่อคุณภาพมันเทศเนื้อสีส้ม โดยเปรียบเทียบการลวก 3 แบบ คือ ลวกด้วยน้ำเดือด ลวกด้วยไอน้ำ และลวกด้วยไมโครเวฟ

พบว่า การลวกด้วยน้ำเดือดทำให้เซลล์เนื้อเยื่อของมันเทศถูกทำลายและสูญเสียน้ำทำให้เนื้อเยื่ออ่อนตัวลง ซึ่งน้ำอิสระ (Free Water) ระบายออกไปได้ง่ายกว่าน้ำยึดเกาะ (Bound Water) ส่งผลให้ปริมาณน้ำอิสระ (a_w) ของผงกะหล่ำดอกลดลง ซึ่งมีความสัมพันธ์กับปริมาณความชื้นและอัตราการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีในอาหาร [5] ดังนั้นกะหล่ำดอกที่ผ่านการลวกและอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 °C จึงมีปริมาณความชื้นและปริมาณน้ำอิสระต่ำที่สุด แต่อย่างไรก็ตามผงกะหล่ำดอกทั้ง 4 การทดลองเป็นไปตามมาตรฐานอาหารแห้งความชื้นไม่เกินร้อยละ 15 และปริมาณน้ำอิสระไม่เกิน 0.6

ปริมาณร้อยละของใยอาหาร พบว่าผงกะหล่ำดอกที่สภาวะต่าง ๆ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยกะหล่ำดอกที่ผ่านการลวกและอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 °C มีปริมาณเส้นใยอาหารมากที่สุดเท่ากับร้อยละ 18.45 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ [10] ที่พบว่าการอบผักหวาน ผักปลั่ง และดอกขจร ที่อุณหภูมิ 70 °C มีปริมาณเส้นใยอาหารมากที่สุด ใยอาหาร (Dietary Fiber) เป็นคาร์โบไฮเดรตที่ประกอบด้วย เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และเพกตินบางส่วน [7] ซึ่งเซลลูโลสจะอยู่รวมตัวกันเป็นเส้นใยขนาดใหญ่และไม่ละลายน้ำหรือตัวทำละลายอื่นใดและทนความร้อนได้สูง [5] มีรายงานว่าผลแอนโชเต (Anchote) ที่ผ่านการลวก มีปริมาณใยอาหารเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับที่ไม่ผ่านการลวก อาจเกิดจากการลวกทำให้ใยอาหารที่ละลายน้ำสูญเสียไปบ้างระหว่างการลวก ดังนั้นการลวกจึงช่วยเพิ่มปริมาณใยอาหารดิบ (Crude Fiber) ดังนั้นปัจจัยในการลวกก่อนอบแห้งและอุณหภูมิในการอบแห้งมีผลต่อองค์ประกอบทางเคมีในด้านปริมาณความชื้น ปริมาณน้ำอิสระ (a_w) และปริมาณร้อยละของใยอาหารของผงกะหล่ำดอกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อศึกษาคุณภาพของผงกะหล่ำดอกพบว่าปริมาณน้ำอิสระและปริมาณความชื้นอยู่ในเกณฑ์ทุกการทดลอง โดยความชื้นสุดท้ายไม่เกินร้อยละ 14 (มาตรฐานผลิตภัณฑ์ อุตสาหกรรมแปรรูปผลไม้กระป๋อง มอก. 375-2524) และปริมาณน้ำอิสระต่ำกว่า 0.6 ตามมาตรฐานอาหารแห้ง ใยอาหารของกะหล่ำดอกที่ผ่านการลวกก่อนอบแห้ง ทั้ง 2 อุณหภูมิมีปริมาณใยอาหารที่ใกล้เคียงกัน จึงใช้คุณภาพด้านสีเป็นหลักเกณฑ์ในการเลือกผงกะหล่ำดอก ดังนั้นผงกะหล่ำดอกที่ลวกและอบที่อุณหภูมิ 50 °C จึงถูกเลือกเพื่อใช้ในการศึกษาผลการทดแทนแป้งสาลีด้วยผงกะหล่ำดอกต่อคุณภาพของคุกกี้ต่อไป



รูปที่ 2 ลักษณะสีผงกะหล่ำดอก

ตารางที่ 3 ประเมินค่าสีและองค์ประกอบทางเคมีของผงกะหล่ำดอก

ลักษณะคุณภาพ	ปัจจัยที่ศึกษา			
	ลวก		ไม่ลวก	
	50 °C*	70 °C	50 °C	70 °C
ค่าสี				
L*	69.17±0.16 ^a	67.15±0.08 ^b	63.90±0.49 ^c	58.90±0.22 ^d
a*	5.69±0.06 ^c	7.27±0.12 ^c	7.61±0.08 ^b	9.39±0.07 ^a
b*	26.11±0.25 ^c	26.45±0.32 ^c	27.84±0.28 ^b	28.40±0.09 ^a
ปริมาณความชื้น ^{ns} (ร้อยละ)	13.39±0.11	13.34±0.03	13.95±0.04	13.43±0.6

ตารางที่ 3 ประเมินค่าสีและองค์ประกอบทางเคมีของผงกะหล่ำดอก (ต่อ)

ลักษณะคุณภาพ	ปัจจัยที่ศึกษา			
	ลวก		ไม่ลวก	
	50 °C*	70 °C	50 °C	70 °C
ปริมาณน้ำอิสระ	0.33±0.00 ^b	0.28±0.01 ^d	0.37±0.00 ^a	0.32±0.00 ^c
ปริมาณใยอาหาร (ร้อยละ)	17.25±0.19 ^b	18.45±0.33 ^a	16.57±0.14 ^c	14.69±0.40 ^d

a [*] , b [*] , c ^{....}	หมายถึง	มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ในแนวนอน
ns	หมายถึง	ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ในแนวนอน
*	หมายถึง	อุณหภูมิในการอบแห้ง
L*	หมายถึง	ค่าความสว่างของสีจาก 0 - 100 (สีดำ - สีขาว)
a*	+ หมายถึง	ค่าสีแดง, - หมายถึง ค่าสีเขียว
b*	+ หมายถึง	ค่าสีเหลือง, - หมายถึง ค่าสีน้ำเงิน

2. ผลการทดแทนแป้งสาลีด้วยผงกะหล่ำดอกต่อคุณภาพของคุกกี้ตุล

1) ค่าสี จากการศึกษากการทดแทนแป้งสาลีด้วยผงกะหล่ำดอกในคุกกี้ตุลที่ร้อยละ 0 10 20 และ 30 ของน้ำหนักแป้งสาลี พบว่าการทดแทนแป้งสาลีด้วยผงกะหล่ำดอกในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความสว่างของคุกกี้ตุลลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ดังตารางที่ 4 จะเห็นว่าค่าความสว่าง (L*) ของคุกกี้ตุลสูตรควบคุม (ร้อยละ 0) มีค่ามากที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากผงกะหล่ำดอกที่ใช้ในการทดลองมีสีเขียวอมน้ำตาลการเติมผงกะหล่ำดอกในปริมาณที่สูงขึ้นจึงทำให้ค่าความสว่างของคุกกี้ตุลลดลงผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ [11] ที่ศึกษากการทดแทนแป้งสาลีด้วยผงบรอกโคลีในผลิตภัณฑ์คุกกี้ที่ร้อยละ 0 3 5 7 และ 9 พบว่าการทดแทนผงบรอกโคลีในปริมาณที่สูงขึ้นจะทำให้คุกกี้มีค่าความสว่าง (L*) ลดลง และงานวิจัยของ [12] ที่ทำการทดลองการเสริมผงผักโขมในคุกกี้ร้อยละ 2 4 6 และ 8 แล้วพบว่าการเสริมผงผักโขมในปริมาณที่สูงขึ้นจะทำให้คุกกี้มีค่าความสว่างของสีลดลง ส่วนค่า a* ที่บ่งบอกถึงค่าสีแดง และค่า b* ที่บ่งบอกถึงค่าสีเหลืองของคุกกี้ตุล พบว่าการทดแทนผงกะหล่ำดอกในปริมาณที่สูงขึ้นมีผลทำให้ค่าความเป็นสีแดง และสีเหลืองของคุกกี้ตุลเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ดังรูปที่ 3 อาจเกิดจากปฏิกิริยาสีน้ำตาลที่ไม่มีเอนไซม์ (Mallard Reaction) เป็นปฏิกิริยาระหว่างหมู่คาร์บอนิล (Carbonyl) ของน้ำตาลรีดิวซ์ในหมู่เอมีนของโมเลกุลโปรตีนไข่ขาวในส่วนผสมเกิดเป็นสารไกลโคซิล (N-Substituted Glycosylamine) ที่เกิดปฏิกิริยาค่อเนื่องจนเป็นสีน้ำตาลโดยมีความร้อนเป็นปัจจัยในการเร่งปฏิกิริยาเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น [7]



รูปที่ 3 คุกกี้ตุลที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยผงกะหล่ำดอกในระดับต่าง ๆ

2) ความแข็ง การทดสอบเนื้อสัมผัสของคุกกี้ตุล (Hardness) พบว่าการทดแทนแป้งสาลีด้วยผงกะหล่ำดอกในปริมาณที่สูงขึ้นทำให้ความแข็งของคุกกี้ตุลลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อเทียบกับสูตรควบคุม (ร้อยละ 0) ดังตารางที่ 4 เนื่องจากในกะหล่ำดอกมีเซลลูโลสเป็นส่วนประกอบซึ่งจัดเป็นโพลีแซ็กคาไรด์สายตรงของน้ำตาลกลูโคสที่พบมากในผนังเซลล์ของพืช ซึ่งจะเพิ่มความเหนียวให้กับผลิตภัณฑ์ [7] ดังนั้น

การทดแทนแป้งสาลีด้วยผงกะหล่ำดอกในปริมาณที่เพิ่มขึ้นจึงทำให้คุกกี้ดูเลมีความแข็งลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ [13] ทำเวเฟอร์ปราศจากกลูเตนโดยใช้แป้งข้าวเจ้าและเสริมผงเอลเดอร์เบอร์รี่และไซเคเบอร์รี่ในปริมาณร้อยละ 1 2 3 4 และ 5 พบว่าการเติมผงไซเคเบอร์รี่ที่เพิ่มขึ้นทำให้ความแข็งของเวเฟอร์ลดลง และงานวิจัยของ [11] ที่ศึกษาการทดแทนแป้งสาลีด้วยผงบรอกโคลีในคุกกี้ที่ร้อยละ 0 3 5 7 และ 9 พบว่าการทดแทนแป้งสาลีด้วยผงบรอกโคลีในปริมาณที่เพิ่มขึ้นทำให้ความแข็งของคุกกี้ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ 4 ลักษณะทางกายภาพของคุกกี้ดูเล

ลักษณะทางกายภาพ	ปริมาณผงกะหล่ำดอกที่ทดแทนแป้งสาลี (ร้อยละ)			
	(ร้อยละของน้ำหนักแป้งสาลี)			
	0	10	20	30
ค่าสี				
L*	64.50±0.70 ^a	61.19±0.59 ^b	61.70±0.08 ^b	58.89±0.97 ^c
a*	1.77±0.35 ^c	4.84±0.37 ^b	5.72±0.12 ^b	6.77±0.77 ^a
b*	32.57±0.73 ^d	35.79±0.18 ^c	37.46±0.64 ^b	39.13±0.79 ^a
ความแข็ง (กรัม)	835.50±45.04 ^a	785.00±30.87 ^a	619.33±73.16 ^b	595.17±46.67 ^b

a, b, c... หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ในแนวนอน

L* หมายถึง ค่าความสว่างของสีจาก 0 - 100 (สีดำ - สีขาว)

a* + หมายถึง ค่าสีแดง, - หมายถึง ค่าสีเขียว

b* + หมายถึง ค่าสีเหลือง, - หมายถึง ค่าสีน้ำเงิน

3) ปริมาณความชื้น และปริมาณน้ำอิสระ (a_w) การศึกษาปริมาณความชื้นและปริมาณน้ำอิสระของคุกกี้ดูเลที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยผงกะหล่ำดอกที่ระดับต่าง ๆ จากการทดลองพบว่าการทดแทนแป้งสาลีด้วยผงกะหล่ำดอกในปริมาณที่สูงขึ้นจะทำให้ค่าปริมาณความชื้น และปริมาณน้ำอิสระของคุกกี้ดูเลเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ดังตารางที่ 5 เส้นใยอาหาร ที่อยู่ในคุกกี้มีคุณสมบัติกักเก็บความชื้น ความชื้นของคุกกี้จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณส่วนผสมที่เสริมลงในคุกกี้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ [14] ที่ศึกษาผลกระทบและการต้านอนุมูลอิสระของคุกกี้แครอทดำ โดยทดแทนผงแครอทในคุกกี้ที่ระดับร้อยละ 5 10 และ 15 พบว่าความชื้นของคุกกี้เพิ่มขึ้นเมื่อทดแทนปริมาณผงแครอทเพิ่มขึ้น และงานวิจัยของ [15] ที่ศึกษาการเสริมผงดอกโสนในคุกกี้เนยที่ร้อยละ 0 3 6 และ 9 พบว่าเมื่อเติมปริมาณผงดอกโสนในคุกกี้เพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณความชื้นของคุกกี้เพิ่มขึ้น ($p \leq 0.05$) เมื่อปริมาณความชื้นในคุกกี้ดูเลเพิ่มขึ้นจึงให้ความแข็งของคุกกี้ดูเลลดลง

4) ปริมาณใยอาหาร ผลการวิเคราะห์ปริมาณใยอาหารในคุกกี้ดูเลที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยผงกะหล่ำดอกที่ระดับต่าง ๆ พบว่าการทดแทนแป้งสาลีด้วยผงกะหล่ำดอกในปริมาณที่สูงขึ้นจะทำให้ปริมาณใยอาหารของคุกกี้ดูเลเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ดังตารางที่ 5 เนื่องจากกะหล่ำดอกเป็นพืชที่มีองค์ประกอบของเซลลูโลสที่อยู่ในกลุ่มใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำ [7] มีใยอาหารอยู่ร้อยละ 17.25 ส่วนในแป้งสาลีมีใยอาหารอยู่ร้อยละ 11 ผงกะหล่ำดอกที่วิเคราะห์ได้มีปริมาณเส้นใยอาหารมากกว่า เมื่อทดแทนผงกะหล่ำดอกลงในคุกกี้ดูเลปริมาณที่เพิ่มขึ้นจึงทำให้คุกกี้ดูเลปริมาณใยอาหารเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ [3] ที่ศึกษาการทดแทนผงกะหล่ำดอกในขนมปังบาลาดีที่ร้อยละ 0 5 10 15 และ 20 พบว่าการทดแทนผงกะหล่ำดอกในปริมาณที่เพิ่มขึ้นทำให้ใยอาหารในผลิตภัณฑ์ขนมปังเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) และงานวิจัยของ [16] ที่ศึกษาการทดแทนแป้งสาลีด้วยผงกะหล่ำดอกในบิสกิตที่ร้อยละ 0 10 15 และ 20 พบว่าการทดแทนผงกะหล่ำดอกในปริมาณที่เพิ่มขึ้นทำให้ใยอาหารในผลิตภัณฑ์บิสกิตเพิ่มขึ้น ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ 5 คุณภาพทางเคมีของคุกกี้ตุล

ลักษณะคุณภาพ	ปริมาณผงกะหล่ำดอกที่ทดแทนแป้งสาลี (ร้อยละ)			
	0	10	20	30
ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)	1.62±0.04 ^c	1.55±0.01 ^c	2.35±0.01 ^b	2.45±0.03 ^a
ปริมาณน้ำอิสระ	0.37±0.01 ^c	0.43±0.01 ^b	0.43±0.00 ^a	0.43±0.01 ^a
ปริมาณใยอาหาร (ร้อยละ)	1.50±0.34 ^c	1.81±0.03 ^c	3.02±0.77 ^b	4.80±0.77 ^a

^{a, b, c} หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ในแนวนอน

3. ผลการยอมรับทางประสาทสัมผัสของคุกกี้ตุล

การประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสของผู้บริโภคต่อผลิตภัณฑ์คุกกี้ตุลที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยผงกะหล่ำดอกร้อยละ 0 10 20 และ 30 ของน้ำหนักแป้งสาลีด้วยการให้คะแนนแบบ 9 Point Hedonic Scale โดยให้ผู้ทดสอบ 30 คน ประเมินความชอบทางด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่นรส รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม ผลการทดสอบที่ได้ดังตารางที่ 6 พบว่าผู้ทดสอบชิมให้คะแนนความชอบด้านลักษณะปรากฏของคุกกี้ตุลไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) โดยให้คะแนนความชอบด้านลักษณะปรากฏที่ได้อยู่ในช่วง 7.23 - 7.30 คะแนน ซึ่งคะแนนดังกล่าวอยู่ในช่วงชอบปานกลาง โดยผู้ทดสอบชิมให้คะแนนความชอบด้านลักษณะปรากฏของคุกกี้ที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยผงกะหล่ำดอกที่ร้อยละ 10 มากที่สุดเท่ากับ 7.30 (ชอบปานกลาง)

ผลการประเมินความชอบด้านสีพบว่าคุกกี้ตุลที่ทดแทน แป้งสาลีด้วยผงกะหล่ำดอกร้อยละ 0 10 20 และ 30 ของน้ำหนักแป้งสาลีมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยสูตรที่ได้รับคะแนนมากที่สุดคือ การทดแทนปริมาณผงกะหล่ำดอกที่ร้อยละ 10 และ 20 ซึ่งมีคะแนนความชอบเท่ากับ 7.80 และ 7.77 (ชอบปานกลาง) อาจเกิดจากการทดแทนผงกะหล่ำดอกลงไปทำให้ลักษณะสีของคุกกี้ตุลมีความเป็นสีเหลืองอมน้ำตาลชัดเจนเพิ่มขึ้นจึงทำให้ได้รับคะแนนมากที่สุด และเมื่อทดแทนผงกะหล่ำดอกถึงร้อยละ 30 จะเห็นว่าคะแนนลดลงเนื่องจากสีน้ำตาลของคุกกี้ตุลเข้มเกินไป

ผลประเมินความชอบด้านกลิ่นรส รสชาติ และเนื้อสัมผัส พบว่าการทดแทนแป้งสาลีด้วยผงกะหล่ำดอกในปริมาณที่สูงขึ้นมีผลทำให้คะแนนความชอบของคุกกี้ตุลลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจากการทดแทนแป้งสาลีด้วยผงกะหล่ำดอกที่เพิ่มขึ้นทำให้มีกลิ่นรสของกะหล่ำดอกที่ฉุนเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรควบคุม ปกติพืชตระกูลกะหล่ำจะมีสาร S-methyl-L-cysteine Sulfoxide เมื่อรับประทานจะถูกย่อยด้วยเอนไซม์ Cysteine Lyases ที่ผลิตโดยเชื้อจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในปากทำให้เกิดสาร Dimethyl Trisulfide ให้เกิดกลิ่นในผลิตภัณฑ์เมื่อชิม เช่นเดียวกับผลประเมินความชอบด้านเนื้อสัมผัสที่มีแนวโน้มลดลงเมื่อทดแทนแป้งสาลีด้วยผงกะหล่ำดอกในปริมาณที่สูงขึ้นทำให้คุกกี้ตุลมีเนื้อสัมผัสนุ่มลง อาจเนื่องมาจากใยอาหารที่พบในผงกะหล่ำดอกที่มีคุณสมบัติกักเก็บน้ำหรือความชื้นได้ดี ทำให้เนื้อสัมผัสของคุกกี้ตุลที่ทดแทนด้วยผงกะหล่ำดอก ร้อยละ 30 ได้รับการยอมรับน้อยที่สุดในระดับชอบเล็กน้อย (6.17 คะแนน)

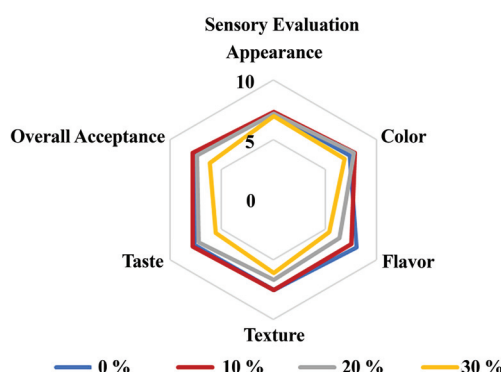
ผลประเมินความชอบโดยรวม พบว่าการทดแทนแป้งสาลีด้วยผงกะหล่ำดอกในปริมาณที่สูงขึ้นมีผลทำให้คะแนนความชอบด้านความชอบโดยรวมของคุกกี้ตุลที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยผงกะหล่ำดอกมีแนวโน้มที่จะลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ดังตารางที่ 6 และรูปที่ 4 แต่คุกกี้ที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยผงกะหล่ำดอกที่ร้อยละ 0 10 และ 20 ได้คะแนนความชอบโดยรวมไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) คะแนนอยู่ในช่วง 7.37 - 7.67 (ชอบปานกลาง)

ตารางที่ 6 คะแนนการยอมรับทางประสาทสัมผัสของคุกกี้ตุล

ลักษณะที่ทดสอบ	ปริมาณผงกะหล่ำดอกที่ทดแทนแป้งสาลี (ร้อยละ)			
	0	10	20	30
ลักษณะปรากฏ ^{ns}	7.23±0.73	7.30±0.75	7.27±0.64	7.27±0.74
สี	7.37±0.61 ^b	7.80±0.71 ^a	7.77±0.68 ^a	6.87±0.73 ^c
กลิ่นรส	8.37±0.61 ^a	7.50±0.68 ^b	6.40±0.62 ^c	5.37±0.67 ^d
เนื้อสัมผัส	7.60±0.72 ^a	7.57±0.73 ^a	7.00±0.83 ^b	6.17±0.70 ^c
รสชาติ	7.60±0.89 ^a	7.80±0.76 ^a	7.17±0.65 ^c	5.60±0.77 ^d
ความชอบโดยรวม	7.60±0.77 ^a	7.67±0.66 ^a	7.37±0.96 ^a	6.13±0.68 ^b

a, b, ... หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ในแนวนอน

ns หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ในแนวนอน



รูปที่ 4 คะแนนการยอมรับทางประสาทสัมผัสของคุกกี้ตุล

สรุปผลการทดลอง

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพผงกะหล่ำดอก โดยการลวกและไม่ลวก อบแห้งที่อุณหภูมิ 50 และ 70 °C พบว่าผงกะหล่ำดอกที่ผ่านการลวกและอบแห้งที่ 50 °C มีค่าความสว่าง (L^*) เพิ่มขึ้น ส่วนค่าความเป็นสีแดง (a^*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ผงกะหล่ำดอกที่ผ่านการลวกและอบแห้งที่ 70 °C มีปริมาณความชื้น ปริมาณน้ำอิสระต่ำที่สุด และมีปริมาณใยอาหารมากที่สุด และการศึกษาการทดแทนแป้งสาลีด้วยผงกะหล่ำดอกในคุกกี้ตุล พบว่าเมื่อปริมาณผงกะหล่ำดอกเพิ่มขึ้นทำให้ค่าความสว่าง (L^*) ของคุกกี้ตุลลดลง ส่วนค่าความเป็นสีแดง (a^*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) เพิ่มขึ้น ในขณะที่ความแข็ง (ความกรอบ) ของคุกกี้ตุลลดลง ($p \leq 0.05$) นอกจากนี้การทดแทนผงกะหล่ำดอกในปริมาณที่มากขึ้นทำให้คุกกี้ตุลมีปริมาณความชื้น ปริมาณน้ำอิสระ (a_w) และปริมาณใยอาหารเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ปริมาณผงกะหล่ำดอกที่ใช้ทดแทนแป้งสาลีมีผลต่อคุณภาพทางประสาทสัมผัสของคุกกี้ตุล โดยการทดแทนผงกะหล่ำดอกในปริมาณที่สูงขึ้นจะทำให้คุกกี้ตุลมีแนวโน้มที่จะได้รับคะแนนความชอบ ในด้านสี กลิ่นรส รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ยกเว้นลักษณะปรากฏ ไม่มีความแตกต่าง ($p > 0.05$) ดังนั้นคุกกี้ตุลสามารถทดแทนแป้งสาลีด้วยผงกะหล่ำดอกได้ถึงระดับร้อยละ 20 ของน้ำหนักแป้งสาลี

References

- [1] Kulvitit, K. (2005). **Processing Handling of Cauliflower Before Storage, Rajamangala University of Technology**. Access (11 April 2024). Available (<https://library.oarit.rmuti.ac.th/lib/>)
- [2] Rattanaphan, W. (2022). **Cauliflower**. Access (17 May 2023). Available (<https://ihealzy.com/cauliflower/>)
- [3] Jiamjariyatam, R., Promphen, P., and Boonburapong, B. (2020). Development of Tuile from Banana Flour. **Burapha Science Journal**. Vol. 25, No. 2, pp. 464-481
- [4] Hegazy, A. E. and Ammar, M. S. (2019). Utilization of Cauliflower (*Brassica oleracea* L. ssp. botrytis) Stem Flour in Improving Balady Bread Quality. **Al-Azhar Journal of Agricultural Research**. Vol. 44, No. 1, pp. 140-149. DOI: 10.21608/ajar.2019.59703
- [5] Leenanurak, S. (1998). **Fruit and Vegetable Processing**. Maejo University, Chiang Mai. p. 201
- [6] Allah, B. B., Xia, X., and Saghir, A. S. (2015). Proximate and Mineral Compositions of Dried Cauliflower (*Brassica Oleracea* L.) Grown In Sindh, Pakistan. **Journal of Food and Nutrition Research**. Vol. 3, No. 3, pp. 213-219. DOI: 10.12691/jfnr-3-3-14
- [7] Rattanpanone, N. (2002). **Food Chemistry**. Bangkok: Odeon Store Publishers
- [8] Changthog, N. and Chunthanom, P. (2017). The Effect of Seasoning Fried Log White Mushroom Processing on the Consumer Acceptance. **Khon Kaen Agriculture Journal**. Vol. 45, No. 1, pp. 1611-1616 (in Thai)
- [9] Charoenphun, N. and Meemuk, N. (2018). Effects of Different Blanching Methods on Quality of Orange Sweet Potatoes. **Journal of Science and Technology**. Vol. 26, No. 6, pp. 981-992 (in Thai)
- [10] Liaotrakun, W. and Liaotrakun, W. (2020). Effect of Pre - Treatments and Drying Temperatures on Physicochemical Properties and Microbial Counts of Dried Indigen Ous Vegetables. **Thai Science and Technology Journal**. Vol. 29, No. 1, pp. 134-147 (in Thai)
- [11] Lim, E. J. and Kim, J. Y. (2009). Quality Characteristics of Cookies Added with Broccoli (*Brassica oleracea* var. italica Plenck) Powder. **Journal of the East Asian Society of Dietary Life**. Vol. 19, pp. 210-215
- [12] Deemmart, J., Boonprasid, N., Yamchomsuan, C., and Thiakson, S. (2018). Nutritional Supplementation Using Spinach Powder in Butter Cookies. **Udon Thani Rajabhat University Journal of Science and Technology**. Vol. 6, No. 2, pp. 43-52 (in Thai)
- [13] Kim, S. Y., O, H. B., Lee, P. R., and Kim, Y. S. (2018). Quality Characteristics, Antioxidant Activity and Sensory Properties of Cookies Added with Freekeh Powder. **Korean J. Culinary Res.** Vol. 24, No. 9, pp. 18-29
- [14] Cho, M. R. and Chung, H. J. (2019). Quality Characteristics and Antioxidant Activity of Cookies Made with Black Carrot Powder. **Journal of the Korean Society of Food Culture**. Vol. 34, Issue 5, pp. 612-619. DOI: 10.7318/KJFC/2019.34.5.612
- [15] Khumkhom, S. (2018). Effect of Additional Dried Sesbania (*Sesbania Javanica* MIQ) Flower Powder on Physical, Nutritional and Organoleptic Characteristics of Butte Cookies. **Phranak Rajabhat Research (Science and Technology)**. Vol. 13, No. 1, pp. 139-154 (in Thai)
- [16] Ribeiro, T. C., Abreu, J. P., Freitas, M. C. J., Pumar, M., and Teodoro, A. J. (2015). Substitution of Wheat Flour with Cauliflower Flour in Bakery Products: Effects on Chemical, Physical, Antioxidant Properties and Sensory Analyses. **International Food Research Journal**. Vol. 22, No. 2, pp. 532-538

สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงและลักษณะทางกายภาพที่มีผลต่อความเข้มแสง ภายในห้องเรียนแบบบรรยายในมหาวิทยาลัยแห่งหนึ่ง กรุงเทพมหานคร The Reflective Coefficient and Physical Characteristics on Light Intensity in Lecture Classrooms at a University, Bangkok

ณัฐจิต อันเมฆ¹ บุตรี เทพทอง¹ กิจจา จิตรภิมย์¹ เชิดศิริ นิลผาย¹ พนิดา กามูณี¹ และฉาน ปัทมะ พลยง^{1*}
Nutthajit Onmek¹ Budtree Thepthong¹ Kitja Chitpirom¹ Chirdsiri Ninpai¹ Panida Kamunee¹
and Chan Pattama Polyong^{1*}

Received: June 3, 2024; Revised: July 30, 2024; Accepted: August 1, 2024

บทคัดย่อ

ความเข้มของแสงสว่างในห้องเรียนมีผลกับการเรียนรู้ การศึกษาแสงสว่างในอาคารเรียนในมหาวิทยาลัยเขตเมืองที่เป็นอาคารสูงยังพบไม่มากนัก รวมถึงปัจจัยทางกายภาพที่อาจส่งผลต่อแสงสว่าง การศึกษาเชิงสำรวจครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงและลักษณะทางกายภาพที่มีผลต่อความเข้มแสงสว่างในห้องเรียนแบบบรรยาย 3 ขนาด ได้แก่ เล็ก กลาง และใหญ่ จำนวน 42 ห้องเรียน ภายในมหาวิทยาลัยแห่งหนึ่ง เครื่องมือที่ใช้ คือ เครื่องลักซ์มิเตอร์และแบบสังเกต สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ ประกอบด้วย จำนวน ร้อยละ ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน One-Way ANOVA และ Pearson's Correlation ผลการศึกษาพบว่า ห้องเรียนขนาดเล็กและขนาดใหญ่ ส่วนใหญ่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน อย่างไรก็ตามห้องเรียนขนาดกลางไม่ผ่านเกณฑ์ร้อยละ 62.0 โดยห้องเรียนขนาดใหญ่มีค่าเฉลี่ยความเข้มของแสงสว่างมากที่สุดเท่ากับ 652.09 (S.D. = 31.61) ลักซ์ เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแสงสว่างของห้องเรียนทั้ง 3 ขนาด พบมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) สำหรับค่าสัมประสิทธิ์สะท้อนพื้นและผนังพบว่า พื้นสีขาวมีค่าสัมประสิทธิ์มากที่สุด และสีที่แตกต่างกันมีค่าสัมประสิทธิ์สะท้อนของแสงสว่างแตกต่างกัน ($p < 0.05$) ในห้องเรียนขนาดเล็กมีค่าสัมประสิทธิ์สะท้อนแสงที่ผิวสัมผัสเชิงบวกกับความเข้มของแสงสว่าง ($p < 0.05$) สำหรับห้องเรียนขนาดกลางพบความเข้มแสงจากแสงประดิษฐ์มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับความเข้มของแสงสว่าง ($p < 0.05$) ค่าสัมประสิทธิ์สะท้อนแสงมีผลต่อความเข้มแสงสว่าง ซึ่งเป็นผลมาจากสีของพื้น และผนัง รวมทั้งแสงจากหลอดไฟและแสงจากภายนอก และห้องเรียนควรมีการตรวจวัดความเข้มของแสงให้อยู่ในค่ามาตรฐานเท่ากับ 400 - 500 ลักซ์ สำหรับงานอ่านและเขียน ห้องเรียนควรทาด้วยผนังสีขาว และหากตรวจวัดแสงไม่เพียงพอควรเพิ่มหลอดไฟหรือกำลังวัตต์ไฟซึ่งเป็นแสงประดิษฐ์

คำสำคัญ : สัมประสิทธิ์สะท้อนแสง; ความเข้มแสงสว่าง; ห้องเรียนมหาวิทยาลัย

¹ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา

¹ Faculty of Science and Technology, Bansomdejchaopraya Rajabhat University

* Corresponding Author, Tel. 08 7995 3306, E - mail: chan.bsru@gmail.com

Abstract

The intensity of light in the classroom affects learning. There are few studies of lighting in classrooms in urban university buildings with tall buildings, including physical factors that may affect lighting. The objective of this exploratory study was to investigate the reflectance coefficient and the physical characteristics that affect light intensity in three lecture-style classrooms: small, medium, and large, comprising a total of 42 classrooms at a university. The tools used are a lux meter and an observation form. The statistics used in the analysis include number, percentage, mean, standard deviation, One-way ANOVA, and Pearson's correlation. The results of the study found that the most small and large classrooms met the standards. On the other hand, in medium-sized classrooms, 62.0 % did not pass the standards. The large classrooms have the highest average light intensity, equal to 652.09 (S.D. = 31.61). When comparing the average lighting intensity of the three classroom sizes, it was found that there were statistically significant differences ($p < 0.05$). For floor and wall reflection coefficients, it was found that white floors had the highest coefficient and different colors had significantly different light reflection coefficients ($p < 0.05$). In small classrooms, the surface light reflection coefficient is positive related to the light intensity ($p < 0.05$). In medium-sized classrooms, it was found that the light intensity from artificial light was significantly positively related to the light intensity ($p < 0.05$). The intensity of light is influenced by the reflection coefficient. This is caused by the floor and wall colors, in addition to the illumination from light bulbs and outside light. Classrooms should measure light intensity to a standard value of 400 - 500 lux for reading and writing tasks. The classrooms should have white walls, and if the light measurement is insufficient, should increase the light bulb or the wattage of the light, which is artificial light.

Keywords: Reflective Coefficient; Lighting Intensity; University Classroom

บทนำ

แสงสว่างภายในอาคารเรียนส่งผลต่อประสิทธิภาพของผู้เรียน โดยแสงสว่างเป็นสภาพแวดล้อมที่สามารถกระตุ้นให้ผู้เรียนเพิ่มการเรียนรู้ [1] มีรายงานทบทวนวรรณกรรมอย่างเป็นระบบพบว่า มีบทความ 18 ฉบับ ได้กล่าวถึงแสงสว่างในห้องเรียนส่งผลต่อการรับรู้ และได้รับการพิสูจน์แล้วในแง่ของผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน อัตราความสนใจ ความเร็วในการทำงาน และประสิทธิภาพการทำงาน [2] นอกจากนี้ความสัมพันธ์ระหว่างแสงกับอารมณ์พบว่าผู้ที่อยู่ในที่มีมืดหรือแสงสว่างไม่เพียงพอจะส่งผลต่ออารมณ์เชิงลบ ทั้งนี้อารมณ์สามารถปรับไปในทิศทางที่ดีเมื่อมีแสงสว่างเพิ่มมากขึ้น [3] ดังนั้นแสงสว่างมีผลต่อการอ่าน เขียน และความสนใจของผู้เรียนซึ่งหน่วยงานสถานศึกษาควรให้ความสำคัญ

สถานศึกษาทั้งในและต่างประเทศมีรายงานการสำรวจแสงสว่างในห้องเรียน ซึ่งอาจพบความแตกต่างกันขึ้นกับลักษณะภูมิอากาศและพฤติกรรมสังคม มีการสำรวจแสงสว่างในห้องเรียนของประเทศไทย โดยตรวจวัดแสงสว่างในห้องเรียนประถมศึกษาแห่งหนึ่งในจังหวัดขอนแก่นพบว่า ห้องเรียนหลักสูตรภาษาอังกฤษ (English Program) ตรวจวัดแสงทั้งหมด 69 จุด มีเพียง 8 จุดเท่านั้นที่แสงสว่างผ่านเกณฑ์มาตรฐาน [4] นอกจากนี้ยังพบแสงสว่างในห้องเรียนจังหวัดชลบุรีจำนวน 40 จุด พบห้องเรียนที่มีแสงสว่างตามเกณฑ์มาตรฐานเพียงร้อยละ 12.5 [5] ซึ่งเกิดได้จากสภาพภูมิอากาศในประเทศไทยอยู่ในเขตร้อน ในห้องเรียนจึงปิดหน้าต่าง

ซึ่งเป็นการปิดรับแสงจากธรรมชาติไปด้วย สำหรับต่างประเทศมีศึกษาในสหราชอาณาจักรได้ตรวจวัดแสงสว่างจำนวน 90 ห้องเรียน พบแสงสว่างจำเกินกว่าค่าแนะนำไว้ร้อยละ 88.0 อย่างไรก็ตามแสงสว่างที่ไม่เพียงพอหรือมากเกินไปส่งผลต่อสุขภาพการมองเห็นและประสิทธิภาพการเรียนรู้ได้ [4], [6]

การแก้ไขปัญหาแสงสว่างในห้องเรียน สามารถเพิ่มกำลังส่องสว่างของแสงและการใช้แสงจากธรรมชาติแล้วยังมีความพยายามในการแก้ไขในปัญหาด้วยการปรับสภาพแวดล้อมในห้องเรียน โดยเน้นประเด็นของสี การแบ่งแยกของสี การตั้งค่าสี [7] ความเข้มของแสงสะท้อนที่แตกต่างกัน เช่น พื้นสีขาวของกระดาน (Whiteboard) [6] ที่ผ่านมาการศึกษาเกี่ยวกับแสงและการสะท้อนมีความเกี่ยวข้องกับเชิงพาณิชย์ เช่น แสงและสีของผนังที่มีผลต่อความรู้สึกพึงพอใจของผู้ป่วยในโรงพยาบาลเอกชน [8] หรือมีการศึกษาเกี่ยวกับสีผนัง พื้น เพดาน และสภาพแวดล้อมในพื้นที่ห้องโถงของอาคารชุดเช่าขาย [9] ซึ่งการศึกษาแสงสว่างจากสีของผนังและวัสดุในห้องเรียนยังพบข้อมูลจำกัด

ความเข้มของแสงสว่างมีผลต่อการเรียนรู้ [1] และอารมณ์ [3] จากการทบทวนเห็นได้ว่า แสงสว่างในห้องเรียนในประเทศไทยมีแสงสว่างที่ไม่เพียงพอ โดยส่วนมากปิดรับแสงจากธรรมชาติ แนวทางแก้ไขที่เหมาะสมจึงควรปรับสภาพแวดล้อมในห้องเรียน ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้จึงได้มุ่งเน้นถึงการตรวจวัดความเข้มแสงสว่างภายในห้องเรียน ประเมินความเหมาะสมกับค่ามาตรฐานแสงสว่างของประเทศไทยและต่างประเทศ รวมถึงวิเคราะห์ร่วมกับสภาพแวดล้อมที่อยู่ในห้องเรียนเพื่อคำนวณการสะท้อนแสง ที่ผ่านมาในประเทศไทยยังไม่มีมีการประเมินทางอาชีวอนามัยและความปลอดภัยของผู้เรียน เคยมีบางฉบับได้กล่าวถึงแสงสว่างที่ส่งผลต่อความพึงพอใจของลูกค้าเชิงพาณิชย์ [9] การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง และลักษณะทางกายภาพที่มีผลความเข้มแสงในห้องเรียนแบบบรรยาย เพราะผู้เรียนมีโอกาสนั่งประจำที่เดิมเป็นระยะเวลานาน ๆ จึงรับสัมผัสแสง ณ จุด ๆ นั้นนานไปด้วย ผลของการศึกษานำไปสู่คำแนะนำหรือการปรับสภาพแวดล้อมในการเพิ่มความเข้มของแสงในห้องเรียนได้มากขึ้นต่อไป

วิธีดำเนินการวิจัย

รูปแบบการศึกษา

การศึกษาครั้งนี้เป็นรูปแบบภาคตัดขวาง (Cross-Sectional Study) เก็บรวบรวมข้อมูลในห้องเรียนจำนวน 42 ห้อง ที่มีขนาดแตกต่างกัน ซึ่งมีขนาดเล็ก กลาง และใหญ่ โดยแบ่งตามจำนวนความจุของที่นั่งในห้องเรียนแบ่งเป็นที่นั่งน้อยกว่า 40, 41 - 60 และมากกว่า 60 ที่นั่ง ตามลำดับ พิจารณาตามเกณฑ์มาตรฐานห้องเรียน [10] ร่วมกับการกำหนดจำนวนการรับนักศึกษาเข้าเรียนของแต่ละสาขาวิชา ของมหาวิทยาลัย

เครื่องมือในการวิจัยและคุณภาพ

เครื่องมือที่ใช้ในครั้งนี้แบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ แบบสังเกต และชุดตรวจวัดแสงสว่าง ดังนี้

1. แบบสังเกต ใช้สังเกตสิ่งแวดล้อมในห้องเรียน แบบสังเกตมีประเด็นโครงสร้างของเนื้อหาครอบคลุมแสงจากธรรมชาติ สีของห้องเรียน ผนัง เพดาน และพื้น และแบบบันทึกปลายเปิดเกี่ยวกับสภาพแวดล้อมโดยทั่วไป สำหรับคุณภาพของเครื่องมือผ่านการพิจารณาความตรง (Validity) ซึ่งเป็นการวัดเนื้อหาทางวิชาการ ประเด็นของการสำรวจ และการบันทึกผลที่เหมาะสมกับวัตถุประสงค์ (Index of Item Objective Congruence: IOC) จากผู้ผู้เชี่ยวชาญจำนวน 3 คน ได้แก่ ด้านอาชีวอนามัย ด้านความปลอดภัย และด้านสุขศาสตร์อุตสาหกรรม แบบสังเกตที่ได้มีค่า IOC อยู่ระหว่าง 0.67 - 1.00 ผ่านตามการวัดผลและประเมินผลของเครื่องมือ

2. ชุดอุปกรณ์ตรวจวัดแสงสว่าง ได้แก่ เครื่องลักซ์มิเตอร์ (Lux Meter) และตลับเมตร เพื่อตรวจความเข้มของแสงสว่าง โดยใช้เครื่องรุ่น Digicon LX-72 หมายเลขเครื่อง 61-11-808312-208-00502-0001 สำหรับคุณภาพของเครื่องมือผ่านการสอบเทียบจากบริษัทผู้ผลิตประจำปี

การรวบรวมข้อมูล

1. การสังเกต ก่อนการตรวจวัดความเข้มของแสงสว่าง คณะผู้วิจัยได้สังเกตและจดบันทึกรายละเอียดที่มีผลต่อความเข้มของแสงสว่าง เช่น สีของห้องเรียน ผนัง เพดาน พื้น สภาพแวดล้อมทั่วไป และสภาพอากาศขณะนั้น โดยแบ่งการบันทึก 1 ฉบับต่อ 1 ห้อง หลังจากนั้นได้ทำการตรวจวัดความเข้มของแสงสว่าง

2. การตรวจวัดความเข้มของแสง โดยแบ่งการรวบรวมออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ การตรวจความเข้มแสงแบบพื้นที่ทั่วไปและวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง ทั้งนี้การตรวจวัดแบบพื้นที่ทั่วไปในแต่ละห้องคณะผู้วิจัยได้รวบรวมข้อมูลโดยวัดพื้นที่ด้วยคัลลิเบรเตอร์และแบ่งพื้นที่ออกเป็น 2×2 เมตร [11] เพื่อกำหนดจุดตรวจวัดในห้องเรียน ทั้งนี้จำนวนตรวจวัดทั้งหมดในห้องได้นำมาหาค่าเฉลี่ยความเข้มของแสงสว่างของห้องเรียนนั้น ๆ สำหรับการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง ได้วัดที่จุดความส่องสว่างของแสงที่สะท้อนจากพื้นผิวและแสงที่ตกกระทบพื้นผิว โดยนำเครื่องลักซ์มิเตอร์หันเข้าหาวัตถุโดยห่างจากวัตถุประมาณ 6 นิ้ว จากนั้นนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาสัมประสิทธิ์ของการสะท้อน

การแปลผลความเข้มของแสงสว่าง

ความเข้มของแสง ได้แปลผลตามเกณฑ์มาตรฐานของประเทศไทยและหน่วยงานสากล โดยกฎกระทรวงของกระทรวงแรงงาน [12] ได้กำหนดไว้ 400 - 500 ลักซ์ สำหรับหน่วยงานนานาชาติที่เป็นที่ยอมรับ ได้แก่ สมาคมวิศวกรรมศาสตร์แสงสว่างแห่งอเมริกาเหนือ (Illuminating Engineering Society of North America, IESNA) [13] กำหนดไว้ 500 ลักซ์ และคณะกรรมการระหว่างประเทศว่าด้วยการส่องสว่าง (International Commission on Illumination, CIE) [14] กำหนดไว้ 300 - 500 - 750 ลักซ์ ทั้งนี้การแปลผลแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ผ่านเกณฑ์ และไม่ผ่านเกณฑ์

สัมประสิทธิ์การสะท้อนของแสง ได้คำนวณค่าการสะท้อนของพื้นผิววัตถุ [15] จากสูตร

$$\text{สัมประสิทธิ์การสะท้อนของแสง} = \frac{\text{ค่าความส่องสว่างของแสงที่สะท้อนจากพื้นผิว}}{\text{ค่าความส่องสว่างของแสงที่ตกกระทบพื้นผิว}}$$

การแปลผลสัมประสิทธิ์สะท้อนของแสงสว่างในครั้งนี้ใช้ค่าที่ได้จากสูตรนำไปคำนวณค่าเฉลี่ยและใช้ในการทดสอบทางสถิติเชิงอนุมานต่อไป

สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์

ตัวแปรที่สำคัญ ได้แก่ แสงสว่างที่ตรวจวัด ผู้วิจัยได้นำไปทดสอบด้วย Kolmogorov-Smirnov Test เพื่อวัดการกระจายของข้อมูล โดยข้อมูลมีการกระจายเป็นปกติจึงนำไปทดสอบสถิติอนุมาน สำหรับการศึกษานี้ใช้สถิติแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ สถิติพรรณนาและอนุมาน โดยสถิติพรรณนา ได้คำนวณความเข้มของแสงสว่างเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานต่าง ๆ แสดงผลด้วยค่าความถี่ และร้อยละ และปริมาณของแสงได้ตรวจวัดได้วิเคราะห์ด้วยค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน สำหรับสถิติอนุมาน ได้เปรียบเทียบขนาดของห้องกับปริมาณความเข้มของแสงสว่างด้วย One-Way ANOVA เปรียบเทียบระหว่างค่าสัมประสิทธิ์สะท้อนพื้นและผนังกับสีต่าง ๆ หากลักษณะทางกายภาพมี 2 สี ใช้สถิติ Independent Sample T-Test และหากมีมากกว่าหรือเท่ากับ 3 สี ใช้สถิติ One-Way ANOVA และทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์สะท้อนกับปริมาณความเข้มของแสงสว่างด้วย Pearson's Correlation กำหนดระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05

ผลการศึกษา

ความเข้มของแสงสว่างในห้องเรียน

ผลการศึกษาในห้องเรียน 3 ขนาด ได้แก่ เล็ก กลาง และใหญ่ จำนวน 42 ห้องเรียน ทั้งนี้ห้องเรียนขนาดเล็กและขนาดใหญ่ส่วนใหญ่ผ่านเกณฑ์ สำหรับห้องเรียนขนาดกลางเมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานไทยพบว่าร้อยละ 62.0 ไม่ผ่านเกณฑ์โดยห้องเรียนขนาดใหญ่มีค่าเฉลี่ยความเข้มของแสงสว่างมากที่สุดเท่ากับ 652.09 (S.D. = 31.61) ลักซ์ รองลงมาเป็นห้องขนาดเล็กและกลางค่าเฉลี่ยเท่ากับ 561.67 (S.D. = 115.16) และ 413.87 (S.D. = 173.35) ลักซ์ เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแสงสว่างของห้องเรียนทั้ง 3 ขนาด พบมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) (ตารางที่ 1) ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบรายคู่พบว่า ห้องเรียนขนาดกลางมีค่าเฉลี่ยแสงสว่างต่ำกว่าห้องเรียนขนาดเล็กและขนาดใหญ่อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และห้องเรียนขนาดใหญ่มีค่าเฉลี่ยแสงสว่างมากกว่าห้องเรียนขนาดกลางและขนาดเล็กอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ผลจากการสังเกตสภาพแวดล้อมระหว่างตรวจวัดความเข้มของแสงสว่าง โดยเห็นว่า มหาวิทยาลัยที่เป็นพื้นที่วิจัย (Research Area) เป็นตึกอาคารสูง การออกแบบเน้นการใช้แสงธรรมชาติมีหน้าต่างที่แสงสามารถส่องถึงได้มาก โดยเฉพาะห้องเรียนขนาดใหญ่ที่เป็นห้องหลักมีพื้นที่ตามแนวยาวของฝั่งอาคารและในวันที่ตรวจวัดเป็นวันที่มีท้องฟ้าแจ่มใส สำหรับห้องขนาดเล็กหรือห้องขนาดกลาง มักเป็นห้องที่อยู่ตรงกลางที่มีห้องอื่นอยู่ติดกันหรือมุมอาคาร จำนวนหน้าต่างมีน้อยลง ข้อสังเกตเหล่านี้อาจเป็นหนึ่งในปัจจัยที่มีผลต่อค่าความเข้มของแสงสว่างได้

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบระดับความเข้มของแสงสว่างกับค่ามาตรฐานต่าง ๆ

ห้องเรียน	มาตรฐานความเข้มของแสงสว่าง			Mean	S.D.	F-test	p-value
	มาตรฐานไทย	IESNA	CIE				
ห้องเรียนขนาดเล็ก (n = 13)							
จำนวน (ร้อยละ)							
ผ่านเกณฑ์	11 (84.6)	10 (77.0)	10 (77.0)	561.67	115.16	9.898	<0.001*
ไม่ผ่านเกณฑ์	2 (15.4)	3 (23.0)	3 (23.0)				
ห้องเรียนขนาดกลาง (n = 21)							
ผ่านเกณฑ์	8 (38.0)	8 (38.0)	8 (38.0)	373.87	173.35		
ไม่ผ่านเกณฑ์	13 (62.0)	13 (62.0)	13 (62.0)				
ห้องเรียนขนาดใหญ่ (n = 8)							
ผ่านเกณฑ์	6 (75.0)	8 (100.0)	8 (100.0)	652.09	31.61		
ไม่ผ่านเกณฑ์	2 (25.0)	0 (0.0)	0 (0.0)				

หมายเหตุ: จำนวน (ร้อยละ), มาตรฐานไทย = 400 - 500 ลักซ์, IESNA = 500 ลักซ์ และ CIE = 300 - 500 - 750 ลักซ์

* มีนัยสำคัญทางสถิติ $p < 0.05$

เปรียบเทียบระหว่างค่าสัมประสิทธิ์สะท้อนพื้นผนัง และเพดานกับสีต่าง ๆ

ผลการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์สะท้อนพื้นผนัง และเพดานพบว่า สีขาวมีค่าสัมประสิทธิ์ทั้งพื้นและผนังมากที่สุดเท่ากับ 0.768 (S.D. = 0.068) และ 0.774 (S.D. = 0.035) เมื่อเปรียบเทียบสีต่าง ๆ กับค่าสัมประสิทธิ์สะท้อนของแสงสว่างของพื้นและผนังพบว่า ความเข้มของแสงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) สำหรับค่าสัมประสิทธิ์สะท้อนแสงสว่างของเพดานระหว่างสีต่าง ๆ ไม่แตกต่างกัน (ตารางที่ 2)

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบระหว่างค่าสัมประสิทธิ์สะท้อนพื้นผนังและเพดานกับสีต่าง ๆ

สี	ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน		F-test	p-value
	Mean	S.D.		
พื้น ¹				
ขาว (n = 18)	0.768	0.068	11.917	<0.001*
เทาอ่อน (n = 12)	0.604	0.142		
น้ำตาล (n = 5)	0.396	0.199		
เขียวอ่อน (n = 2)	0.715	0.007		
ครีม (n = 5)	0.682	0.042		
ผนัง ¹				
ขาว (n = 30)	0.774	0.035	14.311	<0.001*
ฟ้า (n = 4)	0.625	0.097		
เขียวอ่อน (n = 4)	0.705	0.065		
ครีม (n = 4)	0.755	0.019		
เพดาน ²			T-Test	p-value
ขาว (n = 31)	0.742	0.037	0.186	0.663
ครีม (n = 11)	0.711	0.024		

หมายเหตุ: ¹ ใช้สถิติ One-Way ANOVA, ² ใช้สถิติ Independent T-Test, * มีนัยสำคัญทางสถิติ $p < 0.05$

ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การสะท้อนของพื้นผิวภายในห้องเรียนกับความเข้มของแสงสว่าง ผลการศึกษาสัมประสิทธิ์การสะท้อนของพื้นผิวภายในห้องเรียนขนาดต่าง ๆ กับความเข้มของแสงสว่าง พบว่า ในห้องเรียนขนาดเล็กมีค่าสัมประสิทธิ์สะท้อนแสงที่ผิวสัมพันธ์กับความเข้มของแสงสว่าง สำหรับในห้องเรียนขนาดกลางพบความเข้มแสงจากแสงประดิษฐ์มีความสัมพันธ์กับความเข้มของแสงสว่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) (ตารางที่ 3)

ตารางที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การสะท้อนของพื้นผิวภายในห้องเรียนกับความเข้มของแสงสว่าง

ปัจจัย	ความเข้มของแสงสว่าง					
	ขนาดเล็ก		ขนาดกลาง		ขนาดใหญ่	
	r	p-value	r	p-value	r	p-value
ค่าสัมประสิทธิ์ผนัง	0.575	0.025*	0.198	0.390	0.298	0.473
ค่าสัมประสิทธิ์เพดาน	0.075	0.791	0.109	0.637	0.297	0.474
ค่าสัมประสิทธิ์พื้น	0.122	0.665	-0.059	0.799	-0.364	0.375
พื้นที่แหล่งแสงธรรมชาติ	0.207	0.459	0.383	0.086	0.696	0.055
ความเข้มแสงจากแสงประดิษฐ์	0.059	0.834	0.467	0.033*	0.122	0.774

หมายเหตุ: ใช้สถิติ Pearson's Correlation, * มีนัยสำคัญทางสถิติ $p < 0.05$

การอภิปรายผล

การตรวจวัดความเข้มของแสงสว่างในห้องเรียนในประเทศไทยที่ผ่านมีการศึกษาในห้องเรียนโรงเรียนประถมศึกษา [4] - [5] อย่างไรก็ตามในระดับอุดมศึกษายังมีข้อมูลจำกัด การศึกษาครั้งนี้ได้ศึกษาในห้องเรียนของมหาวิทยาลัย

ที่ตั้งอยู่ในกรุงเทพมหานคร ซึ่งเป็นเขตเมืองที่อาคารเรียนส่วนใหญ่เป็นอาคารสูง และได้สำรวจสภาพแวดล้อมในห้องเพื่อประเมินการสะท้อนของแสงสว่าง เพื่อเกิดประโยชน์สำหรับคำแนะนำเพิ่มมากขึ้น อนึ่งแสงสว่างกับประสิทธิภาพการเรียนรู้ถือเป็นประเด็นที่สำคัญสำหรับวัยเรียน [1] ทั้งนี้มีการอภิปรายผลตามผลการศึกษาดังนี้

การตรวจวัดความเข้มของแสงสว่างของห้องเรียน 3 ขนาดครั้งนี้ พบค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 373.87 - 652.09 ลักซ์ อย่างไรก็ตามพบห้องเรียนขนาดกลางไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานร้อยละ 62.0 ซึ่งประกาศกรมสวัสดิการและคุ้มครองแรงงาน [12] ได้กำหนดค่ามาตรฐานแสงสว่างในห้องสำนักงาน ห้องบรรยาย ห้องสืบค้นหนังสือหรือเอกสาร 400 - 500 ลักซ์ ทั้งนี้ห้องเรียนขนาดเล็กและขนาดใหญ่มีจำนวนห้องเรียนที่ไม่ผ่านมาตรฐานของกรมสวัสดิการและคุ้มครองแรงงาน เนื่องจากปริมาณแสงสว่างที่ตรวจวัดได้เกินค่ามาตรฐานจำนวน 4 ห้องเรียนสำหรับเกณฑ์แนะนำของต่างประเทศไม่ได้กำหนดค่าแสงสว่างสูงสุดไว้ อย่างไรก็ตามผลการตรวจวัดแสงสว่างที่ได้ครั้งนี้มีความแตกต่างจากผลตรวจวัดแสงสว่างในห้องเรียนที่ผ่านมาในประเทศไทย โดยมีการศึกษาสำรวจแสงสว่างในห้องเรียนในโรงเรียนแห่งหนึ่งในจังหวัดชลบุรี พบค่าแสงสว่างอยู่ระหว่าง 152 - 468 ลักซ์ มีจุดที่ไม่ผ่านเกณฑ์มากถึงร้อยละ 87.5 และการศึกษาห้องเรียนในจังหวัดขอนแก่นพบว่า เกือบทั้งหมดที่ตรวจวัดแสงสว่างในห้องเรียนมีค่าไม่ผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานเช่นกัน [4] ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากความแตกต่างของอาคารเรียน ซึ่งการศึกษาครั้งนี้เป็นอาคารเรียนในมหาวิทยาลัยในเขตกรุงเทพมหานคร จากการสังเกตได้ว่าอาคารเรียนส่วนใหญ่เป็นอาคารขนาดใหญ่และสูง นอกจากนี้หน้าตาสถาปัตยกรรมของมหาวิทยาลัยและโรงเรียนมีความแตกต่างกัน อาคารในมหาวิทยาลัยส่วนใหญ่เป็นกระโจมโรงเรียนเป็นหน้าตาสถาปัตยกรรม ดังนั้นโอกาสที่ได้รับแสงจากแสงธรรมชาติช่วยทางหน้าต่างในมหาวิทยาลัยจึงมากกว่าโรงเรียน จึงเป็นข้อสังเกตที่สำคัญถึงสภาพแวดล้อมของพื้นที่ที่ตรวจวัดเป็นปัจจัยที่จำเป็นในการบันทึกพร้อมด้วยนอกจากผลการตรวจวัด

พื้นที่สีผิวมีค่าสัมประสิทธิ์สะท้อนทั้งบริเวณพื้นและผนังมากที่สุดเท่ากับ 0.768 (S.D. = 0.068) และ 0.774 (S.D. = 0.035) และเมื่อเปรียบเทียบสีต่าง ๆ กับค่าสัมประสิทธิ์สะท้อนของแสงสว่างพบว่า สีที่แตกต่างกันมีค่าสัมประสิทธิ์สะท้อนที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) สอดคล้องกับรายงานกล่าวถึงการสะท้อนของแสงสว่างไว้ว่า ในสภาวะปกติเมื่อแสงตกกระทบวัตถุจะมีแสงบางส่วนที่สะท้อนทางผิวของวัตถุนั้นสะท้อนกลับตั้งแต่ร้อยละ 1 - 90 ขึ้นอยู่กับผิวของวัตถุและความสม่ำเสมอ โดยสีของวัตถุที่มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนมากที่สุดคือ สีขาว และสีครีม อยู่ระหว่าง 0.70 - 0.80 [16] เห็นได้ว่า ห้องเรียนที่ทาสีขาว มีสภาพผิวเรียบ และพื้นที่ห้องขนาดเล็กจะมีกำลังการสะท้อนที่มากกว่าพื้นที่ห้องเรียนขนาดใหญ่และมีสีอื่น ๆ อีกทั้งมีการศึกษาที่ผ่านมามีผลสอบถามถึงความพึงพอใจของกลุ่มตัวอย่างที่มีต่อแสงและสีพบว่า กลุ่มตัวอย่างมีความพึงพอใจต่อสภาพแวดล้อมที่เป็นผนังสีขาวมากที่สุด [17] และแสงสีขาวเป็นสีที่ชื่นชอบของคนในทุกช่วงอายุ ซึ่งระดับการศึกษาของกลุ่มตัวอย่างที่สูงขึ้นมีผลต่อการชื่นชอบของสีเปลี่ยนแปลงไป [18] ดังนั้นจึงเป็นข้อแนะนำได้ว่า ผนังสีขาวและพื้นสีอ่อนมีความเหมาะสมสำหรับห้องเรียน ซึ่งมีกำลังสะท้อนที่มากกว่าสีอื่น ๆ และอาจสร้างความพึงพอใจให้กับผู้ที่ใช้งานห้องได้

ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง ลักษณะทางกายภาพภายในห้องเรียนขนาดต่าง ๆ กับความเข้มของแสงสว่างพบว่า ในห้องเรียนขนาดเล็กมีค่าสัมประสิทธิ์สะท้อนแสงที่ผิวสัมพันธ์กับความเข้มของแสงสว่าง สำหรับในห้องเรียนขนาดกลางพบความเข้มแสงจากแสงประดิษฐ์มีความสัมพันธ์กับความเข้มของแสงสว่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อวิเคราะห์รายคู่พบ ห้องเรียนขนาดกลางมีค่าเฉลี่ยแสงสว่างต่ำกว่าห้องเรียนขนาดเล็กและขนาดใหญ่อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) อาจเนื่องมาจากห้องเรียนขนาดกลางมักเป็นห้องอยู่บริเวณส่วนกลางที่มีห้องอื่น ๆ ติดกันหรือมุมของอาคาร แต่ห้องเรียนขนาดใหญ่มักอยู่ยาวตลอดฝั่งของชั้นอาคารจึงมีการรับแสงจากธรรมชาติได้มากกว่า ดังนั้นห้องเรียนขนาดกลางรวมถึงขนาดเล็กจึงอาศัยแสงสะท้อนและแสงจากหลอดไฟประดิษฐ์มากกว่าขนาดใหญ่และขนาดของห้องเรียนมีพื้นที่ผิวการสะท้อนที่แตกต่างกัน เป็นไปตามทฤษฎีของสีและการมองเห็นซึ่งขึ้นอยู่กับสิ่งแวดล้อมรอบข้าง กล่าวคือ แสงจากธรรมชาติหรือประดิษฐ์ที่มนุษย์มองเห็นเกิดจากความไม่สมดุลของแสงสีขาว โดยสีใดมีพลังงานสูงสุดจะมีอิทธิพลแสดงสีนั้นออกมาอย่างชัดเจน ทั้งนี้วัตถุ ผนัง หรือพื้นสามารถดูดกลืนแสงอื่นไว้หมดแล้วสะท้อนแสงสีของวัตถุนั้นออกมาได้ [17] ยกตัวอย่างได้ว่า หากผนังห้องเรียนเป็นสีขาวเมื่อมีแสงส่องสว่างจะสะท้อน

สีโทนว้างมากขึ้น ในตรงข้ามหากแสงสีขาวส่องสะท้อนในสีทึบเข้ม เช่น ผนังสีแดง ความส่องสว่างจะน้อยลงไปทางดำได้หากความเข้มของแสงน้อย ดังนั้นความสว่างของห้องจึงขึ้นอยู่กับสีของวัตถุ นอกจากนี้ในห้องเรียนขนาดใหญ่อาจได้รับแสงจากหลายทิศทาง จำนวนหลอดไฟ และหน้าต่าง ทำให้มีแสงสว่างที่มากกว่าห้องอื่น ๆ

สรุปผล

ห้องเรียนในมหาวิทยาลัย ส่วนใหญ่มีความเข้มแสงสว่างผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ขนาดของห้องเรียนที่แตกต่างกัน มีความเข้มแสงสว่างแตกต่างกันไปด้วย ลักษณะทางกายภาพพบพื้นและผนังสีขาวมีค่าสัมประสิทธิ์มากที่สุด ความเข้มของแสงจากแสงประดิษฐ์มีความสัมพันธ์กับปริมาณแสงสว่างในห้องเรียนขนาดกลาง ซึ่งผลการศึกษาพบห้องเรียนขนาดกลางส่วนใหญ่มีแสงสว่างที่ไม่ผ่านมาตรฐาน ดังนั้นจึงแนะนำให้เพิ่มกำลังวัตต์หรือเช็คค่าความสะอาดหลอดไฟ มีระบบการตรวจสอบการดูแลรักษาอย่างสม่ำเสมอ อย่างไรก็ตามข้อจำกัดของการนำผลวิจัยไปใช้ คือการตรวจวัดห้องเรียนในครั้งนี้เป็นการตรวจวัดในห้องเรียนสภาพจริง ดังนั้นห้องเรียนในบางห้องมีความแตกต่างกันทางกายภาพ เช่น รูปทรงการออกแบบ การตกแต่ง รวมถึงสีของห้องเรียนส่วนใหญ่เป็นสีขาวมากกว่าสีอื่น ๆ อยู่มาก ซึ่งไม่ใช่ผลจากการทดลองที่สามารถควบคุมปัจจัยขนาดหรือรูปทรงของห้องให้เหมือนกันได้ทั้งหมดหรือห้องที่มีสัดส่วนของการทาสีจำนวนพอ ๆ กันดังนั้นควรพิจารณาจากบริบทของมหาวิทยาลัยที่คล้ายกัน รวมถึงเป็นอาคารสูงที่มีตึกติดกันจำนวนมากซึ่งอาจเป็นปัจจัยที่สำคัญในการจำกัดแสงธรรมชาติที่ส่องผ่านเข้ามายังห้องเรียนได้

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณผู้ช่วยวิจัยประกอบด้วยนางสาวสุวิ ฒ พัทลุง นางสาวสุนิศา ทอกกิ่ง และนางสาวลัดดา พวงจำปา ที่ช่วยในการวัดขนาดของห้องเรียนเพื่อกำหนดจุดตรวจวัดและบันทึกข้อมูล

References

- [1] Samani, S. A. and Samani, S. A. (2012). The Impact of Indoor Lighting on Students' Learning Performance in Learning Environments: A Knowledge Internalization Perspective. **International Journal of Business and Social Science**. Vol. 3, No. 24, pp. 127-136
- [2] Mogas-Recalde, J. and Palau, R. (2021). Classroom Lighting and its Effect on Student Learning and Performance: Towards Smarter Conditions. In Mealha, Ó., Rehm, M., Rebedea, T. (eds) **Ludic, Co-design and Tools Supporting Smart Learning Ecosystems and Smart Education**. Smart Innovation, Systems and Technologies. Vol. 197, Springer, Singapore. DOI: 10.1007/978-981-15-7383-5_1
- [3] Küller, R., Ballal, S., Laike, T., Mikellides, B., and Tonello, G. (2006). The Impact of Light and Colour on Psychological Mood: A Cross-Cultural Study of Indoor Work Environments. **Ergonomics**. Vol. 49, Issue 14, pp. 1496-1507. DOI: 10.1080/00140130600858142
- [4] Kittikong, P., Sakunkoo, P., Khuancharee, K., and Arkkarachiphong, K. (2017). Quantity of Illumination and Physical Characteristics in the Classroom that Affects Student's Fatigue of Eyes Feeling Case Study: A Primary School at Khon Kaen Province. **Journal of The Office of DPC7 Khon Kaen**. Vol. 24, No. 3, pp. 10-18 (in Thai)

- [5] Hongsa, T. and Polyong, C. P. (2023). Risk Assessment of Ergonomics and School Environment that are Conducive to Good Health of Students and Staff in a Primary School, Chonburi Province: A Pilot Study. In **The 7th International and National Rajabhat Research Academic Conference**. pp. 85-95. Sakon Nakhon: Sakon Nakhon Rajabhat University Publisher (in Thai)
- [6] Winterbottom, M. and Wilkins, A. (2009). Lighting and Discomfort in the Classroom. **Journal of Environmental Psychology**. Vol. 29, Issue 1, pp. 63-75. DOI: 10.1016/j.jenvp.2008.11.007
- [7] Liu, Q., Huang, Z., Li, Z., Pointer, M. R., Zhang, G., Liu, Z., Gong, H., and Hou, Z. (2020). A Field Study of the Impact of Indoor Lighting on Visual Perception and Cognitive Performance in Classroom. **Applied Sciences**. Vol. 10, Issue 21, p. 7436. DOI: 10.3390/app10217436
- [8] Minovic, S., Vincze, G., Fink, A., Fischerauer, S. F., Sadoghi, P., Leithner, A., Kamolz, L. P., Tscheliessnigg, K., and Bernhardt, G. A. (2022). Positive Effect of Colors and Art in Patient Rooms on Patient Recovery After Total Hip or Knee Arthroplasty: A Randomized Controlled Trial. **Wien KlinWochenschr**. Vol. 134, pp. 221-226. DOI: 10.1007/s00508-021-01936-6
- [9] Katunský, D., Dolníková, E., Dolník, B., and Krajníková, K. (2022). Influence of Light Reflection from the Wall and Ceiling Due to Color Changes in the Indoor Environment of the Selected Hall. **Applied Sciences**. Vol. 12, Issue 10, p. 5154. DOI: 10.3390/app12105154
- [10] Announcement of the Department of Labor Protection and Welfare. (2018). **Criteria and Measurement Methods and Analysis of Working Conditions Regarding Levels of Heat, Light, or Noise, Including Duration and the Type of Business That Must be Operated**. Royal Gazette (in Thai)
- [11] Announcement of the Department of Labor Protection and Welfare. (2018). **The Equivalence of Educational Qualifications Not Lower Than a Bachelor's Degree in Occupational Health and Safety**. Royal Gazette (in Thai)
- [12] Announcement of the Department of Labor Protection and Welfare. (2018). **Regarding Lighting Intensity Standard**. Royal Gazette (in Thai)
- [13] Illuminating Engineering Society of North America (IESNA). (2000). **IESNA Lighting Handbook**. Avenue, N.Y.: McGraw-HillPublishers
- [14] Department of Occupational Safety and Health. (2018). **Guidelines on Occupational Safety and Health for Lighting at Workplace**. Ministry of Human Resources. Malaysia
- [15] Egan, M. D. and Olgyey, V. W. (1983). **Architectural Lighting**. Avenue, N.Y.: McGraw-Hill Publishers
- [16] Tongtrongsap, K. and Meesuk, P. (2018). The Effect of Walls Colors of Artificial Light from T8 LED Lamps on Generating of Electricity from Solar Cells. **Burapha Science Journal**. Vol. 23, No. 3, pp. 1317-1329 (in Thai)
- [17] Wongmaso, K. and Ingkharojrit, W. (2019). **Characteristics of Color and Light on Women's Satisfaction: A Case Study of Cosmetic Counters**. Master of Architecture Faculty of Architecture Chulalongkorn University. Bangkok (in Thai)
- [18] Hanafy, I. and Sanad, R. (2015). Colour Preferences According to Educational Background. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**. Vol. 205, pp. 437-444. DOI: 10.1016/j.sbspro.2015.09.034

On Certain Properties of the Laplace-type Integral Transform Via Post Quantum Calculus

Sansumpan Jirakulchaiwong¹ and Kamsing Nonlaopon^{1*}

Received: April 24, 2024; Revised: July 7, 2024; Accepted: July 10, 2024

Abstract

In this paper, we apply the notion of (p,q) -calculus or post quantum calculus to establish theoretical results of (p,q) -analogues of Laplace-type integral transform of the first and second kind, which is a symmetric relation between (p,q) -analogues of the Laplace-type integral and Laplace transforms. Additionally, we discuss (p,q) -analogues of Laplace-type integral transform on various classes of some (p,q) -special functions, (p,q) -exponential function, (p,q) -trigono-metric types, (p,q) -differential operator, and (p,q) -convolution theorem. Finally, we establish results related to (p,q) -Aleph function.

Keywords: (p,q) -Integral Transform; (p,q) -Calculus; (p,q) -Convolution Theorem; (p,q) -Aleph Function

¹ Faculty of Science, Khon Kaen University

* Corresponding Author, Tel. 08 6642 1582, E - mail: nkamsi@kku.ac.th

Introduction

Quantum calculus, also called q -calculus known as calculus without limits, has been used in the applications of diverse areas such as mathematics, applied mathematics, and physics. Euler was the first mathematician to study quantum calculus in the early eighteenth, which Gauss and Ramanujan later developed. In 1910, Jackson [1], [2] introduced the q -derivative, or Jackson derivative, and the q -integral, or Jackson integral. Many researchers have come up with the generalization and development of the q -calculus as found in [3] - [12] and their respective references. Also, the fundamental explanation of the q -calculus aspects can be found in the book by Kac and Cheung [13].

Around a decade ago, the topic of the q -integral transform piqued many researchers' interest, leading to various investigation forms. Many researchers study the properties of q -integral transform such as q -Laplace transform of two variables [14], q -analogues of Sumudu transform [15], q -analogues of the Laplace transform [16], q -analogues of the natural transform [17], q -analogues of the Laplace-type integral transform [18], and q -theory of the q -Mellin transform [19], see [20] - [22] for more details.

The post quantum calculus, indicated as (p, q) -calculus, is a generalized form of q -calculus that was first considered in 1991 by Chakrabarti and Jagannathan [23]. It is pertinent that the direct substitution of q by q/p in q -calculus cannot provide valid quantum calculus; however, if $p = 1$ in (p, q) -calculus, it will reduce to q -calculus. In 2013, Sadjang [24] studied the concept of the (p, q) -derivative, the (p, q) -integration, the fundamental theorem of (p, q) -calculus, and the (p, q) -Taylor formulas. The studies and developments of the (p, q) -calculus have been conducted many times as found in [25] - [28] and their references. A slew of extensive research about (p, q) -integral transforms can also be seen lately. many researchers study the properties of (p, q) -integral transform and apply some (p, q) -differential equations such as (p, q) -analogues of the Laplace transform [29], (p, q) -analogues of the Sumudu transform [30], and (p, q) -analogues of Laplace-type integral transforms [31].

Many integral transforms are created to solve diverse differential equations. One of the most well-known integral transforms is the Laplace transform, which is widely and extensively used in several branches of applied mathematics and engineering [32]. In 1991, Yurekli and Sasek [33] established a new integral transform, called the Laplace-type integral transform, which is defined by

$$L_2(F(\kappa); \xi) = \int_0^{\infty} \kappa F(\kappa) \exp(-\kappa^2 \xi^2) d\kappa, \quad \operatorname{Re}(\xi) > 0.$$

It is a close relation to the Laplace transform given as

$$L_2(F(\kappa); \xi) = \frac{1}{2} L(F(\sqrt{\kappa}); \xi^2).$$

In the past century, the generalized H -functions have been established. In 1998, Sudland et al. [34] introduced a generalization of Saxena's I -function [35], which is considered to be another form of the generalization of Fox's H -function. This function is also named as Aleph function. In 2019, Bhat et al. [36] introduced q -Sumudu and q -Laplace transforms of the q -analogue of Aleph function. In 2020, Tassaddiq extended Bhat's and others' study to (p, q) -Sumudu and (p, q) -Laplace transforms based on (p, q) -Aleph function [37].

We are greatly inspired by a series of the above-mentioned literature, and therefore, propose to extend the q -analogues of the Laplace type integral transform to this new (p, q) -analogues of the Laplace type integral transform of the first and second kind while giving some

properties such as (p, q) -special functions, (p, q) -exponential function, (p, q) -trigonometric types, (p, q) -differential operator, and (p, q) -Aleph function, which could be practically be utilized to solve some (p, q) -differential equations.

The outline of this paper is as follows: Section 2 consists of some basic knowledge of q and (p, q) -calculus that is used in the following sections; Section 3 is comprised of some (p, q) -special functions of the (p, q) -analogues of Laplace-typed integral transform; Section 4 demonstrates the (p, q) -differential operator; Section 5 shows the (p, q) -convolution theorem; in Section 6, we write (p, q) -analogues of Laplace-typed integral transform for (p, q) -Aleph function; and the last section includes the conclusion.

The q and (p, q) -calculus

In this section, some mathematical symbols used in the (p, q) -calculus are denoted to be of help in further study and can be found in [23] - [25], [29]. In the entirety of this work, let $0 < q < p \leq 1$ be constants. If $p = 1$, then we can reduce (p, q) of any forms to q -classical, see [13].

The (p, q) -number for $n \in \mathbb{N}$ is defined by

$$[n]_{p,q} = p^{n-1} + p^{n-2}q + \dots + q^{n-1} = \begin{cases} \frac{p^n - q^n}{p - q}, & \text{if } p, q \neq 1; \\ [n]_q, & \text{if } p = 1; \\ n, & \text{if } p = 1 \text{ and take } \lim_{q \rightarrow 1}. \end{cases} \quad (1)$$

Also, we write the (p, q) -factorial for $n \in \mathbb{N}$ is defined as

$$[n]_{p,q}! = \begin{cases} \prod_{j=1}^n [j]_{p,q} = [1]_{p,q} [2]_{p,q} \cdots [n]_{p,q}, & \text{if } n \geq 1; \\ 1, & \text{if } n = 0. \end{cases} \quad (2)$$

If $p = 1$ in (1) and (2), then we called this the q -number and q -factorial, respectively, see [13].

The (p, q) -derivatives of a function $F: [0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}$ is defined by

$$\begin{aligned} D_{p,q}F(x) &= \frac{F(px) - F(qx)}{(p-q)x}, \quad x \neq 0, \\ D_{p,q}F(0) &= \lim_{x \rightarrow 0} D_{p,q}F(x). \end{aligned} \quad (3)$$

If $p = 1$ in (3), then we called this the q -derivative of the function F , see [13].

The (p, q) -derivatives of higher order are given by

$$(D_{p,q}^0 F)(x) = F(x) \quad \text{and} \quad (D_{p,q}^k F)(x) = D_{p,q}(D_{p,q}^{k-1} F)(x), \quad k \in \mathbb{N}.$$

Example 2.1 Define the function $F: [0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}$ by $F(x) = x^3 + x^2 + 2x + r$, where r is a constant, then

$$\begin{aligned} D_{p,q}(x^3 + x^2 + 2x + r) &= \frac{(p^3x^3 + p^2x^2 + 2px + r) - (q^3x^3 + q^2x^2 + 2qx + r)}{(p-q)x} \\ &= \frac{(p^3 - q^3)x^3 + (p^2 - q^2)x^2 + 2x(p-q)}{(p-q)x} \\ &= (p^2 + pq + q^2)x^2 + (p + q)x + 2 \\ &= [3]_{p,q}x^2 + [2]_{p,q}x + 2. \end{aligned}$$

The (p, q) -derivatives of the product and quotient rules of two functions are as follows:

$$D_{p,q}(F(\kappa)g(\kappa)) = F(p\kappa)D_{p,q}g(\kappa) + g(q\kappa)D_{p,q}F(\kappa), \quad (4)$$

and

$$D_{p,q}\left(\frac{F(\kappa)}{g(\kappa)}\right) = \frac{g(q\kappa)D_{p,q}F(\kappa) - F(q\kappa)D_{p,q}g(\kappa)}{g(p\kappa)g(q\kappa)}, \quad g(\kappa) \neq 0. \quad (5)$$

If $p = 1$ in (4) and (5), then we called these the q -derivative of the product and quotient rules of two functions, respectively, see [13].

The (p, q) -integral from 0 to a and from 0 to ∞ of F are defined as

$$\int_0^a F(\kappa) d_{p,q}\kappa = (p - q)a \sum_{k=0}^{\infty} \frac{q^k}{p^{k+1}} F\left(\frac{q^k}{p^{k+1}}a\right) \quad (6)$$

and

$$\int_0^{\infty} F(\kappa) d_{p,q}\kappa = (p - q) \sum_{k=-\infty}^{\infty} \frac{q^k}{p^{k+1}} F\left(\frac{q^k}{p^{k+1}}\right), \quad (7)$$

respectively. If $p = 1$ in (6) and (7), then we called these the q -integral from 0 to a and from 0 to ∞ , respectively, see [13].

The (p, q) -integral in an interval $[a, b]$ of $D_{p,q}F$ is given by

$$\int_a^b D_{p,q}F(\kappa) d_{p,q}\kappa = F(b) - F(a).$$

The (p, q) -integration by parts representation as

$$\int_a^b g(q\kappa) D_{p,q}F(\kappa) d_{p,q}\kappa = F(b)g(b) - F(a)g(a) - \int_a^b F(p\kappa) (D_{p,q}g(\kappa)) d_{p,q}\kappa, \quad (8)$$

also note that $b = \infty$ is allowed. If $p = 1$ in (8), then we called this the q -integration by parts, see [13].

The two types of (p, q) -exponential functions are defined in [29] as follows:

$$e_{p,q}(\kappa) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{p^{\binom{n}{2}}}{[n]_{p,q}!} \kappa^n, \quad (9)$$

$$E_{p,q}(\kappa) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{q^{\binom{n}{2}}}{[n]_{p,q}!} \kappa^n. \quad (10)$$

If $p = 1$ in (9) and (10), then we called these the q -exponential function, see [13].

In addition, the derivative of the (p, q) -exponential functions are given as

$$\begin{aligned} D_{p,q}e_{p,q}(n\kappa) &= ne_{p,q}(nq\kappa), \\ D_{p,q}E_{p,q}(n\kappa) &= nE_{p,q}(nq\kappa). \end{aligned}$$

The (p, q) -trigonometric functions cosine and sine are as follows:

$$\cos_{p,q}(\kappa) = \frac{e_{p,q}(i\kappa) + e_{p,q}(-i\kappa)}{2} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n p^{\binom{2n}{2}}}{[2n]_{p,q}!} \kappa^{2n}, \quad (11)$$

$$\text{Cos}_{p,q}(\kappa) = \frac{E_{p,q}(i\kappa) + E_{p,q}(-i\kappa)}{2} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n q^{\binom{2n}{2}}}{[2n]_{p,q}!} \kappa^{2n}, \quad (12)$$

$$\sin_{p,q}(\kappa) = \frac{e_{p,q}(i\kappa) - e_{p,q}(-i\kappa)}{2i} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n p^{\binom{2n+1}{2}}}{[2n+1]_{p,q}!} \kappa^{2n+1}, \quad (13)$$

$$\sin_{p,q}(\kappa) = \frac{E_{p,q}(i\kappa) - E_{p,q}(-i\kappa)}{2i} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n q^{\binom{2n+1}{2}}}{[2n+1]_{p,q}!} \kappa^{2n+1}. \quad (14)$$

If $p = 1$ in (11)-(14), then we called this the q -analogues of the trigonometric functions cosine and sine, see [13].

The function of the hyperbolic (p, q) -cosine and the hyperbolic (p, q) -sine of κ are as follows:

$$\cosh_{p,q}\kappa = \frac{e_{p,q}(\kappa) + e_{p,q}(-\kappa)}{2} \quad \text{and} \quad \sinh_{p,q}\kappa = \frac{e_{p,q}(\kappa) - e_{p,q}(-\kappa)}{2}. \quad (15)$$

If $p = 1$ in (15), then we called this the hyperbolic (p, q) -cosine and the hyperbolic (p, q) -sine functions, see [16].

The first kind of the (p, q) -gamma function is defined in [29] as follows:

$$\Gamma_{p,q}(n) = p^{\frac{n(n-1)}{2}} \int_0^{\infty} \kappa^{n-1} E_{p,q}(-q\kappa) d_{p,q}\kappa. \quad (16)$$

It satisfies the following properties:

$$\Gamma_{p,q}(n+1) = [n]_{p,q} \Gamma_{p,q}(n) \quad \text{and} \quad \Gamma_{p,q}(n+1) = [n]_{p,q}!. \quad (17)$$

If $p = 1$ in (16) and (17), then we called these the q -gamma function of the first kind and properties of q -gamma function, respectively, see [13].

The second kind of the (p, q) -gamma function is defined in [29] as follows:

$$\gamma_{p,q}(n) = q^{\frac{n(n-1)}{2}} \int_0^{\infty} \kappa^{n-1} e_{p,q}(-p\kappa) d_{p,q}\kappa.$$

The above equation satisfies the following properties:

$$\gamma_{p,q}(n+1) = [n]_{p,q} \gamma_{p,q}(n) \quad \text{and} \quad \gamma_{p,q}(n+1) = [n]_{p,q}!. \quad (18)$$

The (p, q) -integral on $(0, \infty)$ for $\beta \in \mathbb{R} \setminus \{0\}$ is given by

$$\int_0^{\infty} F(\beta\kappa) d_{p,q}\kappa = \frac{1}{\beta} \int_0^{\infty} F(\kappa) d_{p,q}\kappa. \quad (19)$$

The (p, q) -beta function is defined as

$$B_{p,q}(s, t) = \int_0^1 \kappa^{s-1} (1 - q\kappa)_{p,q}^{t-1} d_{p,q}\kappa. \quad (20)$$

The relation between the (p, q) -gamma function and the (p, q) -beta function is

$$B_{p,q}(s, t) = p^{\frac{(t-1)(2s+t-2)}{2}} \frac{\Gamma_{p,q}(s) \Gamma_{p,q}(t)}{\Gamma_{p,q}(s+t)}. \quad (21)$$

If $p = 1$ in (20) and (21), then we called these the q -beta function and the relation between the q -gamma function and the q -beta function, see [13].

The (p, q) -Aleph function is defined by Jain et al. [27] as follows:

$$\aleph_{p_i, q_i; \tau_i; r}^{m, n} \left(z; (p, q) \middle| \begin{matrix} (a_j, A_j)_{1, n} \\ (b_j, B_j)_{1, m} \end{matrix}; [\tau_i(a_{ji}, A_{ji})]_{n+1, p_i} \right) = \int_L \frac{\frac{1}{2\pi\psi} \prod_{j=1}^m \Gamma_{p,q}(b_j + B_j s) \prod_{j=1}^n \Gamma_{p,q}(1 - a_j - A_j s) \pi z^{-s} d_{p,q}s}{\sum_{i=1}^r \tau_i \left[\prod_{j=m+1}^{q_i} \Gamma_{p,q}(1 - b_{ji} - B_{ji} s) \prod_{j=n+1}^{p_i} \Gamma_{p,q}(a_{ji} + A_{ji} s) \Gamma_{p,q}(s) \Gamma_{p,q}(1-s) \sin \pi s \right]}, \quad (22)$$

where $z \neq 0$, $\psi = \sqrt{-1}$, and L is contour of integration running from $-\infty$ to $+\infty$ in such a manner so that all poles of $\Gamma_{p,q}(b_j + B_j s)$; $1 \leq j \leq m$ are to right of the path and those of $\Gamma_{p,q}(1 - a_j - A_j s)$; $1 \leq j \leq n$, are to left. The integral converges if $\text{Re}[\text{slog}(z) - \log(\sin(\pi s))] < 0$, for large values of $|s|$ on the contour L . If $p = 1$ in (22), then we called this the q -Aleph function, see [11].

The (p, q) -analogues of Laplace-type integral transform to some (p, q) -special functions

In this section, we evaluate ${}_{p,q}L_2$ (first kind) and ${}_{p,q}\mathbb{L}_2$ (second kind) of some special functions, which are defined in Definition 3.1.

Definition 3.1 The (p, q) -analogues of Laplace-type integral transform of function $F(\kappa)$, $\text{Re}(\xi) > 0$ is defined by

$${}_{p,q}L_2(F(\kappa); \xi) = \int_0^\infty \kappa F(\kappa) E_{p,q}(-q\kappa^2 \xi^2) d_{p,q}\kappa, \quad (23)$$

and

$${}_{p,q}\mathbb{L}_2(F(\kappa); \xi) = \int_0^\infty \kappa F(\kappa) e_{p,q}(-p\kappa^2 \xi^2) d_{p,q}\kappa. \quad (24)$$

If $p = 1$ in (23) and (24), then (23) and (24) reduce to the q -analogues of Laplace-type integral transform of function $F(\kappa)$, which appeared in [17].

Theorem 3.1 (Linearity): Let $F(\kappa)$ and $g(\kappa)$ be two functions, then the following formula holds:

- (i) ${}_{p,q}L_2(\mu F(\kappa) + \phi g(\kappa); \xi) = \mu {}_{p,q}L_2(F(\kappa); \xi) + \phi {}_{p,q}L_2(g(\kappa); \xi);$
- (ii) ${}_{p,q}\mathbb{L}_2(\mu F(\kappa) + \phi g(\kappa); \xi) = \mu {}_{p,q}\mathbb{L}_2(F(\kappa); \xi) + \phi {}_{p,q}\mathbb{L}_2(g(\kappa); \xi);$

where μ and ϕ are constants.

Proof. Theorem 3.1 follows immediately from Definition 3.1. □

Theorem 3.2 (Scaling): Let $f(\omega\kappa)$ be a function, then the following formula holds:

- (i) ${}_{p,q}L_2(F(\omega\kappa); \xi) = \frac{1}{\omega^2} {}_{p,q}L_2(F(\kappa); \frac{\xi}{\omega});$
- (ii) ${}_{p,q}\mathbb{L}_2(F(\omega\kappa); \xi) = \frac{1}{\omega^2} {}_{p,q}\mathbb{L}_2(F(\kappa); \frac{\xi}{\omega});$

where ω are constants.

Proof. The proof of part (i) and (ii) using (19), (23), and (24), and we get

$$\begin{aligned}
 {}_{p,q}L_2(F(\omega\kappa); \xi) &= \int_0^\infty \kappa F(\omega\kappa) E_{p,q}(-q\kappa^2\xi^2) d_{p,q}\kappa \\
 &= \frac{1}{\omega^2} \int_0^\infty \kappa F(\kappa) E_{p,q}\left(-q\kappa^2\left(\frac{y}{\sqrt{\omega}}\right)^2\right) d_{p,q}\kappa \\
 &= \frac{1}{\omega^2} {}_{p,q}L_2(F(\kappa); \frac{\xi}{\sqrt{\omega}}).
 \end{aligned}$$

${}_{p,q}\mathbb{L}_2(F(\omega\kappa); \xi)$ can be proven similarly. □

Theorem 3.3 For $f(\kappa) = \kappa^{2n}$, $n \in \mathbb{N}$, the following properties hold:

$$\begin{aligned}
 \text{(i)} \quad {}_{p,q}L_2(\kappa^{2n}; \xi) &= \frac{[n]_{p,q}!}{[2]_{p,q} p^{\frac{n(n+1)}{2}} \xi^{2n+2}}; \\
 \text{(ii)} \quad {}_{p,q}\mathbb{L}_2(\kappa^{2n}; \xi) &= \frac{[n]_{p,q}!}{[2]_{p,q} q^{\frac{n(n+1)}{2}} \xi^{2n+2}}.
 \end{aligned}$$

Proof. The proof of part (i) requires the use of (16) and (23). We get

$${}_{p,q}L_2(\kappa^{2n}; \xi) = \int_0^\infty \kappa^{2n+1} E_{p,q}(-q\kappa^2\xi^2) d_{p,q}\kappa.$$

By the change of variables $\kappa^2\xi^2 = z$, we obtain $d_{p,q}\kappa = \frac{d_{p,q}z}{[2]_{p,q}\kappa\xi^2}$ and get that

$$\begin{aligned}
 {}_{p,q}L_2(\kappa^{2n}; \xi) &= \frac{1}{[2]_{p,q} \xi^{2n+2}} \int_0^\infty z^n E_{p,q}(-qz) d_{p,q}z \\
 &= \frac{[n]_{p,q}!}{[2]_{p,q} p^{\frac{n(n+1)}{2}} \xi^{2n+2}}.
 \end{aligned}$$

The proof of part (ii) of this theorem follows a similar process from the proof of part (i). Therefore, the proof is completed. □

Theorem 3.4 For $n \in \mathbb{N}$, then the following properties hold:

$$\begin{aligned}
 \text{(i)} \quad {}_{p,q}L_2(e_{p,q}(n\kappa^2); \xi) &= \frac{p}{[2]_{p,q}(p\xi^2-n)} \quad (n < p\xi^2); \\
 \text{(ii)} \quad {}_{p,q}\mathbb{L}_2(e_{p,q}(n\kappa^2); \xi) &= \frac{1}{[2]_{p,q}\xi^2} \sum_{k=0}^\infty \frac{p^{\binom{k}{2}} n^k}{q^{\frac{k(k+1)}{2}} \xi^{2k}}; \\
 \text{(iii)} \quad {}_{p,q}L_2(E_{p,q}(n\kappa^2); \xi) &= \frac{1}{[2]_{p,q}\xi^2} \sum_{k=0}^\infty \frac{q^{\binom{k}{2}} n^k}{p^{\frac{k(k+1)}{2}} \xi^{2k}}; \\
 \text{(iv)} \quad {}_{p,q}\mathbb{L}_2(E_{p,q}(n\kappa^2); \xi) &= \frac{q}{[2]_{p,q}(q\xi^2-n)} \quad (n < q\xi^2).
 \end{aligned}$$

Proof. The proof of part (i) utilizes (9), (23), and Theorem 3.3(i), and we have

$$\begin{aligned}
 {}_{p,q}L_2(e_{p,q}(n\kappa^2); \xi) &= \int_0^\infty \kappa e_{p,q}(n\kappa^2) E_{p,q}(-q\kappa^2\xi^2) d_{p,q}\kappa \\
 &= \int_0^\infty \kappa \sum_{k=0}^\infty \frac{p^{\binom{k}{2}} (n\kappa^2)^k}{[k]_{p,q}!} E_{p,q}(-q\kappa^2\xi^2) d_{p,q}\kappa \\
 &= \sum_{k=0}^\infty \frac{p^{\binom{k}{2}} n^k}{[k]_{p,q}!} \int_0^\infty \kappa^{2k+1} E_{p,q}(-q\kappa^2\xi^2) d_{p,q}\kappa.
 \end{aligned}$$

By the change of variables $\kappa^2 \xi^2 = z$, the equation above can be written as follows:

$$\begin{aligned}
 {}_{p,q}L_2(e_{p,q}(n\kappa^2); \xi) &= \sum_{k=0}^{\infty} \frac{p^{\binom{k}{2}} n^k}{[k]_{p,q}!} \frac{\Gamma_{p,q}(k+1)}{[2]_{p,q} p^{\frac{k(k+1)}{2}} y^{2k+2}} \\
 &= \sum_{k=0}^{\infty} \frac{p n^k}{[2]_{p,q} p^{\frac{k(k+1)}{2}} \xi^{2k+2}} \\
 &= \frac{1}{[2]_{p,q} \xi^2} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{n^k}{p^k \xi^{2k}} \\
 &= \frac{p}{[2]_{p,q} (p \xi^2 - n)} \quad (n < p \xi^2).
 \end{aligned}$$

The proof of part (ii) share a similar process from the proof of part (i), which can be written as follows:

$${}_{p,q}\mathbb{L}_2(e_{p,q}(n\kappa^2); \xi) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{p^{\binom{k}{2}} n^k}{[k]_{p,q}!} \int_0^{\infty} \kappa^{2k+1} e_{p,q}(-p\kappa^2 \xi^2) d_{p,q} \kappa.$$

The proof of part (iii) and (iv) proceeds in the similar manners from the proof of part (i). Hence, the proof is completed. $\square$

Theorem 3.5 For $n \in \mathbb{N}$, then the following properties hold:

$$\begin{aligned}
 \text{(i)} \quad {}_{p,q}L_2(\cos_{p,q}(n\kappa^2); \xi) &= \frac{p^2 \xi^2}{[2]_{p,q} (p^2 \xi^4 + n^2)} \quad (n^2 < p^2 \xi^4); \\
 \text{(ii)} \quad {}_{p,q}\mathbb{L}_2(\cos_{p,q}(n\kappa^2); \xi) &= \frac{1}{[2]_{p,q} \xi^2} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k p^{\binom{2k}{2}} n^{2k}}{q^{k(2k+1)} \xi^{4k}}; \\
 \text{(iii)} \quad {}_{p,q}L_2(\text{Cos}_{p,q}(n\kappa^2); \xi) &= \frac{1}{[2]_{p,q} \xi^2} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k q^{\binom{2k}{2}} n^{2k}}{p^{k(2k+1)} \xi^{4k}}; \\
 \text{(iv)} \quad {}_{p,q}\mathbb{L}_2(\text{Cos}_{p,q}(n\kappa^2); \xi) &= \frac{q^2 \xi^2}{[2]_{p,q} (q^2 \xi^4 + n^2)} \quad (n^2 < q^2 \xi^4).
 \end{aligned}$$

Proof. The proof of part (i) can be done using (11), (16), and (23), and we obtain the following:

$$\begin{aligned}
 {}_{p,q}L_2(\cos_{p,q}(n\kappa^2); \xi) &= \int_0^{\infty} \kappa \cos_{p,q}(n\kappa^2) E_{p,q}(-q\kappa^2 \xi^2) d_{p,q} \kappa \\
 &= \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k p^{\binom{2k}{2}} n^{2k}}{[2k]_{p,q}!} \int_0^{\infty} \kappa^{4k+1} E_{p,q}(-q\kappa^2 \xi^2) d_{p,q} \kappa.
 \end{aligned}$$

By applying the change of variables $\kappa^2 \xi^2 = z$, the equation above can be put into the form

$$\begin{aligned}
 {}_{p,q}L_2(\cos_{p,q}(n\kappa^2); \xi) &= \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k p^{\binom{2k}{2}} n^{2k}}{[2k]_{p,q}!} \frac{1}{[2]_{p,q} \xi^{4k+2}} \int_0^{\infty} z^{2k} E_{p,q}(-qz) d_{p,q} z \\
 &= \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k p^{\binom{2k}{2}} n^{2k} \Gamma_{p,q}(2k+1)}{[2k]_{p,q}! [2]_{p,q} p^{k(2k+1)} \xi^{4k+2}} \\
 &= \frac{1}{[2]_{p,q} \xi^2} \sum_{k=0}^{\infty} \left(-\frac{n^2}{p^2 \xi^4} \right)^k \\
 &= \frac{p^2 \xi^2}{[2]_{p,q} (p^2 \xi^4 + n^2)} \quad (n^2 < p^2 \xi^4).
 \end{aligned}$$

The proof of part (ii) uses a similarly process from part (i). We write

$${}_{p,q}\mathbb{L}_2(\cos_{p,q}(n\kappa^2); \xi) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k p^{\binom{2k}{2}} n^{2k}}{[2k]_{p,q}!} \int_0^{\infty} \kappa^{4k+1} e_{p,q}(-q\kappa^2 \xi^2) d_{p,q}\kappa.$$

The proof of part (iii) and (iv) follows the same procedure from the proof of part (i). Hence, the proof is completed. $\square$

Theorem 3.6 For $n \in \mathbb{N}$, then the following properties hold:

$$\begin{aligned} \text{(i)} \quad {}_{p,q}\mathbb{L}_2(\sin_{p,q}(n\kappa^2); \xi) &= \frac{np}{[2]_{p,q}(p^2\xi^4+n^2)} \quad (n^2 < p^2\xi^4); \\ \text{(ii)} \quad {}_{p,q}\mathbb{L}_2(\sin_{p,q}(n\kappa^2); \xi) &= \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k p^{\binom{2k+1}{2}} n^{2k+1}}{[2]_{p,q} q^{(k+1)(2k+1)} \xi^{4k+4}}; \\ \text{(iii)} \quad {}_{p,q}\mathbb{L}_2(\sin_{p,q}(n\kappa^2); \xi) &= \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k q^{\binom{2k+1}{2}} n^{2k+1}}{[2]_{p,q} p^{(k+1)(2k+1)} \xi^{4k+4}}; \\ \text{(iv)} \quad {}_{p,q}\mathbb{L}_2(\sin_{p,q}(n\kappa^2); \xi) &= \frac{nq}{[2]_{p,q}(q^2\xi^4+n^2)} \quad (n^2 < q^2\xi^4). \end{aligned}$$

Proof. The proof of this theorem follows the definitions and proceeds according to Theorem 3.5. The details are, therefore, omitted. $\square$

Theorem 3.7 For $n \in \mathbb{N}$, then the following properties hold:

$$\begin{aligned} \text{(i)} \quad {}_{p,q}\mathbb{L}_2(\cosh_{p,q}(n\kappa^2); \xi) &= \frac{p^2\xi^2}{[2]_{p,q}(p^2\xi^4-n^2)} \quad (n^2 < p^2\xi^4); \\ \text{(ii)} \quad {}_{p,q}\mathbb{L}_2(\sinh_{p,q}(n\kappa^2); \xi) &= \frac{np}{[2]_{p,q}(p^2\xi^4-n^2)} \quad (n^2 < p^2\xi^4). \end{aligned}$$

Proof. The proof of Theorem 3.7 directly follows from (15), Theorem 3.5 and 3.6; therefore, details are omitted. $\square$

Theorem 3.8 (Transforms of the Heaviside function): For $b \geq 0$, let

$$H(\kappa - b) = \begin{cases} 1, & \text{for } \kappa \geq b; \\ 0, & \text{for } 0 \leq \kappa \leq b. \end{cases} \quad (25)$$

Then, we have

$$\begin{aligned} \text{(i)} \quad {}_{p,q}\mathbb{L}_2(H(\kappa - b); \xi) &= \frac{E_{p,q}(-b)}{[2]_{p,q}\xi^2}; \\ \text{(ii)} \quad {}_{p,q}\mathbb{L}_2(H(\kappa - b); \xi) &= \frac{e_{p,q}(-b)}{[2]_{p,q}\xi^2}. \end{aligned}$$

Proof. The proof of part (i) using (23) and (25). We obtain

$$\begin{aligned} {}_{p,q}\mathbb{L}_2(H(\kappa - b); \xi) &= \int_0^{\infty} \kappa H(\kappa - b) E_{p,q}(-q\kappa^2 \xi^2) d_{p,q}\kappa \\ &= \int_b^{\infty} \kappa E_{p,q}(-q\kappa^2 \xi^2) d_{p,q}\kappa. \end{aligned}$$

By the change of variables $z = \kappa^2 \xi^2$, we get $d_{p,q}\kappa = \frac{1}{[2]_{p,q}\xi^2} d_{p,q}z$, and we obtain

$${}_{p,q}\mathbb{L}_2(H(\kappa - b); \xi) = \frac{1}{[2]_{p,q}\xi^2} \int_b^{\infty} E_{p,q}(-qz) d_{p,q}z$$

$$\begin{aligned}
 &= -\frac{1}{[2]_{p,q}\xi^2} \int_b^\infty D_{p,q} E_{p,q}(-z) d_{p,q}z \\
 &= \frac{E_{p,q}(-b)}{[2]_{p,q}\xi^2}.
 \end{aligned}$$

The proof of part (ii) follows the same procedure from the proof of part (i). Hence, the proof is completed.

Theorem 3.9 (Transforms of the Dirac delta function): For $b \geq 0$, let

$$f_k(\kappa - b) = \begin{cases} \frac{1}{k}, & \text{for } b \leq \kappa \leq b + k; \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (26)$$

If $\delta(\kappa - b)$ denotes the limit of f_k as $k \rightarrow 0$, then we have

$$\begin{aligned}
 \text{(i)} \quad {}_{p,q}L_2(\delta(\kappa - b); \xi) &= \frac{E_{p,q}(-qb)}{[2]_{p,q}\xi^2}, \\
 \text{(ii)} \quad {}_{p,q}\mathbb{L}_2(\delta(\kappa - b); \xi) &= \frac{e_{p,q}(-pb)}{[2]_{p,q}\xi^2},
 \end{aligned}$$

where δ is the Dirac delta function.

Proof. The proof of part (i) using (23) and (26). We get

$$\begin{aligned}
 {}_{p,q}L_2(f_k(\kappa - b); \xi) &= \int_0^\infty \kappa f_k(\kappa - b) E_{p,q}(-q\kappa^2\xi^2) d_{p,q}\kappa \\
 &= \frac{1}{k} \int_b^{b+k} \kappa E_{p,q}(-q\kappa^2\xi^2) d_{p,q}\kappa.
 \end{aligned}$$

By the change of variables $z = \kappa^2\xi^2$, we get $d_{p,q}\kappa = \frac{1}{[2]_{p,q}\xi^2} d_{p,q}z$, and we obtain

$$\begin{aligned}
 {}_{p,q}L_2(f_k(\kappa - b); \xi) &= \frac{1}{[2]_{p,q}\xi^2 k} \int_b^{b+k} E_{p,q}(-qz) d_{p,q}z \\
 &= -\frac{1}{[2]_{p,q}\xi^2 k} \int_b^{b+k} D_{p,q} E_{p,q}(-z) d_{p,q}z \\
 &= -\frac{1}{[2]_{p,q}\xi^2 k} [E_{p,q}(-(b+k)) - E_{p,q}(-b)].
 \end{aligned}$$

If we take the limit of f_k as $k \rightarrow 0$, then

$${}_{p,q}L_2(\delta(\kappa - b); \xi) = \lim_{k \rightarrow 0} {}_{p,q}L_2(f_k(\kappa - b); \xi) = \frac{E_{p,q}(-qb)}{[2]_{p,q}\xi^2}.$$

The proof of part (ii) follows the same procedure from the proof of part (i). Hence, the proof is completed. $\square$

The (p, q) -analogues of Laplace-type integral transform to the first order (p, q) -differential operator

We offer this section to computations related to the ${}_{p,q}L_2$ and ${}_{p,q}\mathbb{L}_2$, and some differential operators. First and foremost, we derive the following theorem:

Theorem 4.1 Let $\operatorname{Re}(\xi) > 0$. Then, we have

$$D_{p,q}E_{p,q}(-\kappa^2\xi^2) = -\kappa\xi^2 \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k q^{\binom{k+1}{2}}}{[k]_{p,q}!} (p^{k+1} + q^{k+1}) \xi^{2k} \kappa^{2k}. \quad (27)$$

Proof. Taking (p, q) -derivative on $E_{p,q}(-\kappa^2\xi^2)$ with respect to κ and shifting the lower bound of the summation, we get

$$\begin{aligned} D_{p,q}E_{p,q}(-\kappa^2\xi^2) &= D_{p,q} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{q^{\binom{k}{2}} (-\kappa^2\xi^2)^k}{[k]_{p,q}!} \\ &= \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^k q^{\binom{k}{2}}}{[k]_{p,q}!} [2k]_{p,q} \kappa^{2k-1} \xi^{2k} \\ &= \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^k q^{\binom{k}{2}}}{[k]_{p,q}!} (p^k + q^k) [k]_{p,q} \kappa^{2k-1} \xi^{2k} \\ &= -\kappa\xi^2 \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k q^{\binom{k+1}{2}}}{[k]_{p,q}!} (p^{k+1} + q^{k+1}) \xi^{2k} \kappa^{2k}. \end{aligned}$$

Hence, the proof of this theorem is completed. $\square$

Theorem 4.2 Let $\operatorname{Re}(\xi) > 0$. Then, we have

$$D_{p,q}e_{p,q}(-\kappa^2\xi^2) = -\kappa\xi^2 \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k p^{\binom{k+1}{2}}}{[k]_{p,q}!} (p^{k+1} + q^{k+1}) \xi^{2k} \kappa^{2k}. \quad (28)$$

Proof. The proof of Theorem 4.2 is similar to the one of Theorem 4.1, which can be expressed by

$$\begin{aligned} D_{p,q}e_{p,q}(-\kappa^2\xi^2) &= D_{p,q} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{p^{\binom{k}{2}} (-\kappa^2\xi^2)^k}{[k]_{p,q}!} \\ &= -\kappa\xi^2 \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k p^{\binom{k+1}{2}}}{[k]_{p,q}!} (p^{k+1} + q^{k+1}) \xi^{2k} \kappa^{2k}. \end{aligned}$$

Therefore, the proof is completed. $\square$

Theorem 4.3 Let $\nabla_{p,q} F(\kappa) = \frac{1}{\kappa} D_{p,q} F(\kappa)$ and $\operatorname{Re}(\xi) > 0$. Then, we have

$${}_{p,q}L_2(\nabla_{p,q} F(\kappa); \xi) = -F(0) + \frac{\xi^2}{p} {}_{p,q}L_2\left(F(\kappa); \frac{\xi}{\sqrt{p}}\right) + \frac{q\xi^2}{p^2} {}_{p,q}L_2\left(F(\kappa); \frac{\sqrt{q}\xi}{p}\right). \quad (29)$$

Proof. According to the (p, q) -integration by parts (8) and Theorem 4.1, we can write

$$\begin{aligned} {}_{p,q}L_2(\nabla_{p,q} F(\kappa); \xi) &= \int_0^{\infty} D_{p,q}F(\kappa) E_{p,q}(-q\kappa^2\xi^2) d_{p,q}\kappa \\ &= \lim_{a \rightarrow \infty} [F(\kappa) E_{p,q}(-\kappa^2\xi^2)]_{\kappa=0}^a - \int_0^{\infty} F(p\kappa) D_{p,q}E_{p,q}(-\kappa^2\xi^2) d_{p,q}\kappa \\ &= -F(0) - \int_0^{\infty} F(p\kappa) D_{p,q}E_{p,q}(-\kappa^2\xi^2) d_{p,q}\kappa \\ &= -F(0) + \xi^2 \int_0^{\infty} \kappa F(p\kappa) \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k q^{\binom{k+1}{2}}}{[k]_{p,q}!} (p^{k+1} + q^{k+1}) \xi^{2k} \kappa^{2k} d_{p,q}\kappa \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= -F(0) + \xi^2 \int_0^\infty \kappa F(p\kappa) \sum_{k=0}^\infty \frac{(-1)^k q^{\binom{k+1}{2}}}{[k]_{p,q}!} p^{k+1} \xi^{2k} \kappa^{2k} d_{p,q} \kappa \\
 &\quad + \xi^2 \int_0^\infty \kappa F(p\kappa) \sum_{k=0}^\infty \frac{(-1)^k q^{\binom{k+1}{2}}}{[k]_{p,q}!} q^{k+1} \xi^{2k} \kappa^{2k} d_{p,q} \kappa.
 \end{aligned}$$

By the change of variables $p\kappa = z$, we get $d_{p,q} \kappa = \frac{1}{p} d_{p,q} z$, and we obtain

$$\begin{aligned}
 {}_{p,q}L_2(\nabla_{p,q} F(\kappa); \xi) &= -f(0) + p^{-1} \xi^2 \int_0^\infty z F(z) \sum_{k=0}^\infty \frac{(-1)^k q^{\binom{k+1}{2}}}{[k]_{p,q}!} p^{-k} \xi^{2k} z^{2k} d_{p,q} z \\
 &\quad + qp^{-2} \xi^2 \int_0^\infty z F(z) \sum_{k=0}^\infty \frac{(-1)^k q^{\binom{k+1}{2}}}{[k]_{p,q}!} q^k \xi^{2k} z^{2k} p^{-2k} d_{p,q} z.
 \end{aligned}$$

Next, multiplying $q^{-k} q^k$, we have

$$\begin{aligned}
 {}_{p,q}L_2(\nabla_{p,q} F(\kappa); \xi) &= -F(0) + p^{-1} \xi^2 \int_0^\infty z F(z) \sum_{k=0}^\infty \frac{(-1)^k q^{\binom{k+1}{2}}}{[k]_{p,q}!} q^{-k} q^k p^{-k} \xi^{2k} z^{2k} d_{p,q} z \\
 &\quad + qp^{-2} \xi^2 \int_0^\infty z F(z) \sum_{k=0}^\infty \frac{(-1)^k q^{\binom{k+1}{2}}}{[k]_{p,q}!} q^{-k} q^k q^k \xi^{2k} z^{2k} p^{-2k} d_{p,q} z \\
 &= -F(0) + p^{-1} \xi^2 \int_0^\infty z F(z) \sum_{k=0}^\infty \frac{(-1)^k q^{\binom{k}{2}}}{[k]_{p,q}!} q^k p^{-k} \xi^{2k} z^{2k} d_{p,q} z \\
 &\quad + qp^{-2} \xi^2 \int_0^\infty z F(z) \sum_{k=0}^\infty \frac{(-1)^k q^{\binom{k}{2}}}{[k]_{p,q}!} q^{2k} \xi^{2k} z^{2k} p^{-2k} d_{p,q} z \\
 &= -F(0) + p^{-1} \xi^2 \int_0^\infty z F(z) E_{p,q} \left(-\frac{q \xi^2 z^2}{p} \right) d_{p,q} z \\
 &\quad + qp^{-2} \xi^2 \int_0^\infty z F(z) E_{p,q} \left(-\frac{q^2 \xi^2 z^2}{p^2} \right) d_{p,q} z \\
 &= -F(0) + \frac{\xi^2}{p} {}_{p,q}L_2 \left(F(\kappa); \frac{\xi}{\sqrt{p}} \right) + \frac{q \xi^2}{p^2} {}_{p,q}L_2 \left(F(\kappa); \frac{\sqrt{q} \xi}{p} \right).
 \end{aligned}$$

This completes the proof of the theorem. □

Theorem 4.4 Let $\nabla_{p,q} F(\kappa) = \frac{1}{\kappa} D_{p,q} F(\kappa)$ and $\text{Re}(\xi) > 0$. Then, we have

$${}_{p,q}L_2(D_{p,q} F(\kappa); \xi) = -F(0) + \frac{\xi^2}{q^2} {}_{p,q}L_2 \left(F(\kappa); \frac{\sqrt{p} \xi}{q} \right) + \xi^2 {}_{p,q}L_2 \left(F(\kappa); \frac{\xi}{\sqrt{q}} \right). \quad (30)$$

Proof. Using (8) and Theorem 4.2, we have

$$\begin{aligned}
 {}_{p,q}L_2(\nabla_{p,q} F(\kappa); \xi) &= \int_0^\infty D_{p,q} F(\kappa) e_{p,q}(-p\kappa^2 \xi^2) d_{p,q} \kappa \\
 &= \lim_{a \rightarrow \infty} [F(\kappa) e_{p,q}(-\kappa^2 \xi^2)]_{\kappa=0}^a - \int_0^\infty F(q\kappa) D_{p,q} e_{p,q}(-\kappa^2 \xi^2) d_{p,q} \kappa \\
 &= -F(0) + \xi^2 \int_0^\infty \kappa F(q\kappa) \sum_{k=0}^\infty \frac{(-1)^k p^{\binom{k+1}{2}}}{[k]_{p,q}!} (p^{k+1} + q^{k+1}) \xi^{2k} \kappa^{2k} d_{p,q} \kappa \\
 &= -F(0) + \xi^2 \int_0^\infty \kappa F(q\kappa) \sum_{k=0}^\infty \frac{(-1)^k p^{\binom{k+1}{2}}}{[k]_{p,q}!} p^{k+1} \xi^{2k} \kappa^{2k} d_{p,q} \kappa \\
 &\quad + \xi^2 \int_0^\infty \kappa F(q\kappa) \sum_{k=0}^\infty \frac{(-1)^k p^{\binom{k+1}{2}}}{[k]_{p,q}!} q^{k+1} \xi^{2k} \kappa^{2k} d_{p,q} \kappa.
 \end{aligned}$$

Therefore, by the change of variables $q\kappa = z$, we get $d_{p,q}\kappa = \frac{1}{q}d_{p,q}z$, and the equation above can be rearranged to the following form:

$$\begin{aligned}
 {}_{p,q}\mathbb{L}_2(\nabla_{p,q} F(\kappa); \xi) &= -F(0) + q^{-2}\xi^2 \int_0^\infty zF(z) \sum_{k=0}^\infty \frac{(-1)^k p^{\binom{k+1}{2}}}{[k]_{p,q}!} p^{k+1} \xi^{2k} z^{2k} q^{-2k} d_{p,q}z \\
 &\quad + q^{-1}\xi^2 \int_0^\infty zF(z) \sum_{k=0}^\infty \frac{(-1)^k p^{\binom{k+1}{2}}}{[k]_{p,q}!} q^{k+1} \xi^{2k} z^{2k} q^{-2k} d_{p,q}z.
 \end{aligned}$$

Next, multiplying the previous equation by $p^{-k}p^k$, we get

$$\begin{aligned}
 {}_{p,q}\mathbb{L}_2(\nabla_{p,q} F(\kappa); \xi) &= -F(0) + q^{-2}\xi^2 \int_0^\infty zF(z) \sum_{k=0}^\infty \frac{(-1)^k p^{\binom{k+1}{2}}}{[k]_{p,q}!} p^{-k} p^k p^{k+1} \xi^{2k} z^{2k} q^{-2k} d_{p,q}z \\
 &\quad + q^{-1}\xi^2 \int_0^\infty zF(z) \sum_{k=0}^\infty \frac{(-1)^k p^{\binom{k+1}{2}}}{[k]_{p,q}!} p^{-k} p^k q^{k+1} \xi^{2k} z^{2k} q^{-2k} d_{p,q}z \\
 &= -F(0) + q^{-2}p\xi^2 \int_0^\infty zF(z) \sum_{k=0}^\infty \frac{(-1)^k p^{\binom{k}{2}}}{[k]_{p,q}!} p^{2k} \xi^{2k} z^{2k} q^{-2k} d_{p,q}z \\
 &\quad + \xi^2 \int_0^\infty zF(z) \sum_{k=0}^\infty \frac{(-1)^k p^{\binom{k}{2}}}{[k]_{p,q}!} p^k \xi^{2k} z^{2k} q^{-k} d_{p,q}z \\
 &= -F(0) + q^{-2}p\xi^2 \int_0^\infty zF(z) e_{p,q}\left(-\frac{p^2\xi^2 z^2}{q^2}\right) d_{p,q}z \\
 &\quad + \xi^2 \int_0^\infty zF(z) e_{p,q}\left(-\frac{p\xi^2 z^2}{q}\right) d_{p,q}z \\
 &= -F(0) + \frac{\xi^2}{q^2} {}_{p,q}\mathbb{L}_2\left(F(\kappa); \frac{\sqrt{p}\xi}{q}\right) + \xi^2 {}_{p,q}\mathbb{L}_2\left(F(\kappa); \frac{\xi}{\sqrt{q}}\right).
 \end{aligned}$$

Hence, the proof is completed. $\square$

The (p, q) -analogues of Laplace-type integral transform to the (p, q) -convolution theorem

In this section, we put an emphasis on giving a (p, q) -convolution theorem for the ${}_{p,q}\mathbb{L}_2$ (${}_{p,q}\mathbb{L}_2$ is similar). Let us assume $F(\kappa) = \kappa^{2\gamma}$ and $g(\kappa) = \kappa^{2\beta-1}$, $\gamma, \beta > 0$, then the (p, q) -convolution product is defined for F and g as

$$(F * g)_{p,q}(\kappa) = \int_0^t F(\eta)g(\kappa - q\eta)d_{p,q}\eta. \quad (31)$$

If $p = 1$ in (31), then (31) reduces to the q -convolution theorem, which appeared in [16].

Theorem 5.1 If $F(\kappa) = \kappa^{2\gamma}$ and $g(\kappa) = \kappa^{2\beta-1}$, $\gamma, \beta > 0$, then

$${}_{p,q}\mathbb{L}_2[(F * g)_{p,q}(\kappa); \xi] = \frac{p^{(\gamma\beta^2 - \gamma^2 + 2\beta\gamma - 9\gamma - 5\beta)/2} \Gamma_{p,q}(2\gamma+1) \Gamma_{p,q}(2\beta) \Gamma_{p,q}(\gamma+\beta+1)}{[2]_{p,q} \Gamma_{p,q}(2\gamma+2\beta+1) \xi^{2\gamma+2\beta+2}}.$$

Proof. Using (20) and (31), we get

$$(F * g)_{p,q}(\kappa) = \int_0^t \eta^{2\gamma}(\kappa - q\eta)^{2\beta-1} d_{p,q}\eta$$

$$\begin{aligned}
 &= \kappa \int_0^1 r^{2\gamma} \kappa^{2\gamma} (\kappa - qrt)^{2\beta-1} d_{p,q} r \\
 &= \kappa^{2\gamma+2\beta} \int_0^1 r^{2\gamma} (1 - qr)^{2\beta-1} d_{p,q} r \\
 &= \kappa^{2\gamma+2\beta} B_{p,q}(2\gamma + 1, 2\beta).
 \end{aligned}$$

Taking ${}_{p,q}L_2$ in the equation above and using (21), we can write

$$\begin{aligned}
 {}_{p,q}L_2[(F * g)_{p,q}(\kappa); \xi] &= B_{p,q}(2\gamma + 1, 2\beta) \int_0^\infty \kappa^{2\gamma+2\beta} E_{p,q}(-q\kappa^2 \xi^2) d_{p,q} \kappa \\
 &= p^{(2\beta-1)(4\gamma+2\beta)} \frac{\Gamma_{p,q}(2\gamma+1) \Gamma_{p,q}(2\beta)}{\Gamma_{p,q}(2\gamma+2\beta+1)} {}_{p,q}L_2(\kappa^{2(\gamma+\beta)}; \xi) \\
 &= p^{(2\beta-1)(4\gamma+2\beta)} \frac{\Gamma_{p,q}(2\gamma+1) \Gamma_{p,q}(2\beta)}{\Gamma_{p,q}(2\gamma+2\beta+1)} \frac{[\gamma+\beta]_{p,q}!}{[2]_{p,q} p^{\frac{(\gamma+\beta)(\gamma+\beta+1)}{2}} \xi^{2\gamma+2\beta+2}} \\
 &= \frac{p^{(7\beta^2-\gamma^2+2\beta\gamma-9\gamma-5\beta)/2} \Gamma_{p,q}(2\gamma+1) \Gamma_{p,q}(2\beta) \Gamma_{p,q}(\gamma+\beta+1)}{[2]_{p,q} \Gamma_{p,q}(2\gamma+2\beta+1) \xi^{2\gamma+2\beta+2}}.
 \end{aligned}$$

This completes the proof of the theorem. $\square$

The (p, q) -analogues of Laplace-type integral transform to the (p, q) -Aleph function

In this section, we derive ${}_{p,q}L_2$ and ${}_{p,q}\mathbb{L}_2$ of the (p, q) -Aleph function with the help of Mellin–Barnes-type integral and (p, q) -gamma function [38]. Now, we use notation

$$\aleph_{p_i, q_i; \tau_i; r}^{m, n} \left(z; (p, q) \middle| \begin{matrix} (a_j, A_j)_{1, n} \\ (b_j, B_j)_{1, m} \end{matrix}; [\tau_i(a_{ji}, A_{ji})]_{n+1, p_i} \right) := \frac{1}{2\pi\psi} \int_L \Lambda_{p_i, q_i, \tau_i; r}^{m, n}(A_j; B_j; s) \pi z^{-s} d_{p, q} s$$

where

$$\Lambda_{p_i, q_i, \tau_i; r}^{m, n}(A_j; B_j; s) = \frac{\prod_{j=1}^m \Gamma_{p, q}(b_j + B_j s) \prod_{j=1}^n \Gamma_{p, q}(1 - a_j - A_j s)}{\sum_{i=1}^r \tau_i \left[\prod_{j=m+1}^{q_i} \Gamma_{p, q}(1 - b_{ji} - B_{ji} s) \prod_{j=n+1}^{p_i} \Gamma_{p, q}(a_{ji} + A_{ji} s) \Gamma_{p, q}(s) \Gamma_{p, q}(1 - s) \sin \pi s \right]}.$$

Furthermore, taking $\tau_i = 1$ in (22), we get the (p, q) -analogue of I-function defined by Ahmad et al. [28] as follows:

$$I_{p_i, q_i; r}^{m, n} \left(z; (p, q) \middle| \begin{matrix} (a_j, A_j)_{1, n} \\ (b_j, B_j)_{1, m} \end{matrix}; [(a_{ji}, A_{ji})]_{n+1, p_i} \right) = \frac{1}{2\pi\psi} \int_L \Lambda_{p_i, q_i, 1; r}^{m, n}(A_j; B_j; s) \pi z^{-s} d_{p, q} s. \quad (32)$$

Taking $r = 1$ in (32), we will get the (p, q) -analogue of Fox's H-function defined by Ahmad et al. [28] as follows:

$$H_{P, Q}^{m, n} \left(z; (p, q) \middle| \begin{matrix} (a_j, A_j)_{1, P} \\ (b_j, B_j)_{1, Q} \end{matrix} \right) = \frac{1}{2\pi\psi} \int_L \Lambda_{p_i, q_i, 1; 1}^{m, n}(A_j; B_j; s) \pi z^{-s} d_{p, q} s. \quad (33)$$

Taking $A_j = B_j = 1$ in (33), we will get the (p, q) -analogue of Meijer's G-function defined by Pathak et al. [39] as follows:

$$G_{p,q}^{m,n} \left(z; (p, q) \middle| \begin{matrix} (a_1, a_2, \dots, a_p) \\ (b_1, b_2, \dots, b_q) \end{matrix} \right) = \frac{1}{2\pi\psi} \int_L \Lambda_{p_i, q_i, 1, 1}^{m,n} (1; 1; s) \pi z^{-s} d_{p,q} s.$$

If $p = 1$, then the above results of (p, q) -analogue change to well-known results of I-function, H-function, and G-function [11].

Theorem 6.1 Let $z, \rho \in \mathbb{C}$ and $\text{Re}(s) > 0$. Further, let $A_j, B_j, A_{ji}, B_{ji} \in \mathbb{R}^+$, $a_j, b_j, a_{ji}, b_{ji} \in \mathbb{C}$ ($i = 1, 2, \dots, p_i; j = 1, 2, \dots, q_i$), $\tau_i > 0$ for $i = 1, 2, \dots, r$. The conditions as given in above for (p, q) -Aleph function also holds. Then, the ${}_{p,q}L_2$ of the $\aleph$ -function exists and the following relation holds,

$${}_{p,q}L_2 \left(\aleph^{2\rho+1}_{p_i, q_i, \tau_i, r} \left(z; (p, q) \middle| \begin{matrix} (a_j, A_j)_{1,n} \cdots [\tau_i(a_{ji}, A_{ji})]_{n+1, p_i} \\ (b_j, B_j)_{1,m} \cdots [\tau_i(b_{ji}, B_{ji})]_{m+1, q_i} \end{matrix} \right) \right) = \begin{cases} \frac{1}{[1+\rho]_{p,q}[2]_{p,q} p^{\frac{\rho(\rho+1)}{2}} \xi^{2\rho+2}} \aleph^{m+1,n}_{p_i, q_i+1, \tau_i, r} \\ \times \left(z; (p, q) \middle| \begin{matrix} (a_j, A_j)_{1,n} \cdots [\tau_i(a_{ji}, A_{ji})]_{n+1, p_i} \\ (\rho, 0)(b_j, B_j)_{1,m} \cdots [\tau_i(b_{ji}, B_{ji})]_{m+1, q_i} \end{matrix} \right), \\ \text{if } \Gamma_{p,q}(b_j + B_j s) \text{ is compared with } \Gamma_{p,q}(\rho); \\ \frac{1}{[1+\rho]_{p,q}[2]_{p,q} p^{\frac{\rho(\rho+1)}{2}} \xi^{2\rho+2}} \aleph^{m+1,n}_{p_i, q_i+1, \tau_i, r} \\ \times \left(z; (p, q) \middle| \begin{matrix} (a_j, A_j)_{1,n} \cdots [\tau_i(a_{ji}, A_{ji})]_{n+1, p_i} \\ (\rho, 0)(b_j, B_j)_{1,m} \cdots [\tau_i(b_{ji}, B_{ji})]_{m+1, q_i} \end{matrix} \right), \\ \text{if } \Gamma_{p,q}(1 - a_j + a_j s) \text{ is compared with } \Gamma_{p,q}(\rho). \end{cases} \quad (34)$$

Proof. In the proof of (34), we first express the (p, q) -analogue of $\aleph$ -function occurring on the left hand side of the (34) in terms of Mellin–Barnes contour integral and apply ${}_{p,q}L_2$, then we obtain (say Δ).

$$\begin{aligned} \Delta &= \int_0^\infty \aleph^{2\rho+1}_{p_i, q_i, \tau_i, r} \left(z; (p, q) \middle| \begin{matrix} (a_j, A_j)_{1,n} \cdots [\tau_i(a_{ji}, A_{ji})]_{n+1, p_i} \\ (b_j, B_j)_{1,m} \cdots [\tau_i(b_{ji}, B_{ji})]_{m+1, q_i} \end{matrix} \right) E_{p,q}(-q\aleph^2\xi^2) d_{p,q} \aleph \\ &= \int_0^\infty \frac{\aleph^{2\rho+1}}{2\pi\psi} \int_L \Lambda_{p_i, q_i, \tau_i, r}^{m,n}(A_j; B_j; s) \pi z^{-s} E_{p,q}(-q\aleph^2\xi^2) d_{p,q} \aleph d_{p,q} s \\ &= \frac{1}{2\pi\psi} \int_L \Lambda_{p_i, q_i, \tau_i, r}^{m,n}(A_j; B_j; s) \pi z^{-s} \int_0^\infty \aleph^{2\rho+1} E_{p,q}(-q\aleph^2\xi^2) d_{p,q} \aleph d_{p,q} s. \end{aligned}$$

By changing variable with $\aleph^2\xi^2$ and using (17), we arrive at

$$\Delta = \frac{1}{[1+\rho]_{p,q}[2]_{p,q} p^{\frac{\rho(\rho+1)}{2}} \xi^{2\rho+2}} \times \frac{1}{2\pi\psi} \int_L \frac{\prod_{j=1}^m \Gamma_{p,q}(b_j + B_j s) \prod_{j=1}^n \Gamma_{p,q}(1 - a_j - A_j s) \pi z^{-s} \Gamma_{p,q}(\rho)}{\prod_{i=1}^r \tau_i \left[\prod_{j=m+1}^{q_i} \Gamma_{p,q}(1 - b_{ji} - B_{ji} s) \prod_{j=n+1}^{p_i} \Gamma_{p,q}(a_{ji} + A_{ji} s) \Gamma_{p,q}(s) \Gamma_{p,q}(1 - s) \sin \pi s \right]} d_{p,q} s.$$

Case 1: we consider $\Gamma_{p,q}(b_j + B_j s)$ and compare it with $\Gamma_{p,q}(\rho)$. Then, we get

$$\Delta = \frac{1}{[1+\rho]_{p,q}[2]_{p,q} p^{\frac{\rho(\rho+1)}{2}} \xi^{2\rho+2}} \aleph^{m+1,n}_{p_i, q_i+1, \tau_i, r} \left(z; (p, q) \middle| \begin{matrix} (a_j, A_j)_{1,n} \cdots [\tau_i(a_{ji}, A_{ji})]_{n+1, p_i} \\ (\rho, 0)(b_j, B_j)_{1,m} \cdots [\tau_i(b_{ji}, B_{ji})]_{m+1, q_i} \end{matrix} \right).$$

Case 2: we consider $\Gamma_{p,q}(1 - a_j + a_j s)$ and compare it with $\Gamma_{p,q}(\rho)$. Then, we get

$$\Delta = \frac{1}{[1 + \rho]_{p,q}[2]_{p,q} p^{\frac{\rho(\rho+1)}{2}} \xi^{2\rho+2}} \aleph_{p_i+1, q_i, \tau_i; r}^{m, n+1} \left(z; (p, q) \middle| \begin{matrix} (1 - \rho, 0)(a_j, A_j)_{1,n} \cdots [\tau_i(a_{ji}, A_{ji})]_{n+1, p_i} \\ (b_j, B_j)_{1,m} \cdots [\tau_i(b_{ji}, B_{ji})]_{m+1, q_i} \end{matrix} \right).$$

By interpreting the Mellin–Barnes counter integral obtained in terms of the (p, q) -analogue of $\aleph$ -function, we acquire the result (34). Therefore, the proof is completed. $\square$

Theorem 6.2 Let $z, \rho \in \mathbb{C}$ and $\text{Re}(s) > 0$. Further, let $A_j, B_j, A_{ji}, B_{ji} \in \mathbb{R}^+$, $a_j, b_j, a_{ji}, b_{ji} \in \mathbb{C}$ ($i = 1, 2, \dots, p_i; j = 1, 2, \dots, q_i$), $\tau_i > 0$ for $i = 1, 2, \dots, r$. The conditions as given in above for (p, q) -Aleph function also holds. Then, the ${}_{p,q}\mathbb{L}_2$ of the $\aleph$ -function exists and the following relation holds,

$${}_{p,q}\mathbb{L}_2 \left(\aleph_{p_i, q_i, \tau_i; r}^{m, n} \left(z; (p, q) \middle| \begin{matrix} (a_j, A_j)_{1,n} \cdots [\tau_i(a_{ji}, A_{ji})]_{n+1, p_i} \\ (b_j, B_j)_{1,m} \cdots [\tau_i(b_{ji}, B_{ji})]_{m+1, q_i} \end{matrix} \right) \right) \\ = \begin{cases} \frac{1}{[1 + \rho]_{p,q}[2]_{p,q} p^{\frac{\rho(\rho+1)}{2}} \xi^{2\rho+2}} \aleph_{p_i, q_i+1, \tau_i; r}^{m+1, n} \\ \times \left(z; (p, q) \middle| \begin{matrix} (a_j, A_j)_{1,n} \cdots [\tau_i(a_{ji}, A_{ji})]_{n+1, p_i} \\ (\rho, 0)(b_j, B_j)_{1,m} \cdots [\tau_i(b_{ji}, B_{ji})]_{m+1, q_i} \end{matrix} \right), \\ \text{if } \gamma_{p,q}(b_j + B_j s) \text{ is compared with } \gamma_{p,q}(\rho); \\ \frac{1}{[1 + \rho]_{p,q}[2]_{p,q} p^{\frac{\rho(\rho+1)}{2}} \xi^{2\rho+2}} \aleph_{p_i+1, q_i, \tau_i; r}^{m, n+1} \\ \times \left(z; (p, q) \middle| \begin{matrix} (a_j, A_j)_{1,n} \cdots [\tau_i(a_{ji}, A_{ji})]_{n+1, p_i} \\ (\rho, 0)(b_j, B_j)_{1,m} \cdots [\tau_i(b_{ji}, B_{ji})]_{m+1, q_i} \end{matrix} \right), \\ \text{if } \gamma_{p,q}(1 - a_j + a_j s) \text{ is compared with } \gamma_{p,q}(\rho). \end{cases} \quad (35)$$

Proof. In the proof of (35), we first express the (p, q) -analogue of $\aleph$ -function occurring on the left hand side of the (35) in terms of Mellin–Barnes contour integral and apply ${}_{p,q}\mathbb{L}_2$, then we obtain (say Θ).

$$\begin{aligned} \Theta &= \int_0^\infty \kappa^{2\rho+1} \aleph_{p_i, q_i, \tau_i; r}^{m, n} \left(z; (p, q) \middle| \begin{matrix} (a_j, A_j)_{1,n} \cdots [\tau_i(a_{ji}, A_{ji})]_{n+1, p_i} \\ (b_j, B_j)_{1,m} \cdots [\tau_i(b_{ji}, B_{ji})]_{m+1, q_i} \end{matrix} \right) e_{p,q}(-p\kappa^2 \xi^2) d_{p,q} \kappa \\ &= \int_0^\infty \frac{\kappa^{2\rho+1}}{2\pi\psi} \int_L \Lambda_{p_i, q_i, \tau_i; r}^{m, n}(A_j; B_j; s) \pi z^{-s} e_{p,q}(-p\kappa^2 \xi^2) d_{p,q} \kappa d_{p,q} s \\ &= \frac{1}{2\pi\psi} \int_L \Lambda_{p_i, q_i, \tau_i; r}^{m, n}(A_j; B_j; s) \pi z^{-s} \int_0^\infty \kappa^{2\rho+1} e_{p,q}(-p\kappa^2 \xi^2) d_{p,q} \kappa d_{p,q} s. \end{aligned}$$

By changing variable with $\kappa^2 \xi^2$ and using (18), we arrive at

$$\begin{aligned} \Theta &= \frac{1}{[1 + \rho]_{p,q}[2]_{p,q} p^{\frac{\rho(\rho+1)}{2}} \xi^{2\rho+2}} \\ &\times \frac{1}{2\pi\psi} \int_L \frac{\prod_{j=1}^m \gamma_{p,q}(b_j + B_j s) \prod_{j=1}^n \gamma_{p,q}(1 - a_j - A_j s) \pi z^{-s} \gamma_{p,q}(\rho)}{\left[\prod_{i=1}^r \tau_i \left[\prod_{j=m+1}^{q_i} \gamma_{p,q}(1 - b_{ji} - B_{ji} s) \prod_{j=n+1}^{p_i} \gamma_{p,q}(a_{ji} + A_{ji} s) \gamma_{p,q}(s) \gamma_{p,q}(1 - s) \sin \pi s \right] \right]} d_{p,q} s. \end{aligned}$$

Case 1: we consider $\gamma_{p,q}(b_j + B_j s)$ and compare it with $\gamma_{p,q}(\rho)$. Then, we get

$$\Theta = \frac{1}{[1 + \rho]_{p,q}[2]_{p,q} p^{\frac{\rho(\rho+1)}{2}} \xi^{2\rho+2}} \mathfrak{N}_{p_i, q_i+1, \tau_i; r}^{m+1, n} \left(z; (p, q) \middle| \begin{matrix} (a_j, A_j)_{1, n} \cdots [\tau_i(a_{ji}, A_{ji})]_{n+1, p_i} \\ (\rho, 0)(b_j, B_j)_{1, m} \cdots [\tau_i(b_{ji}, B_{ji})]_{m+1, q_i} \end{matrix} \right).$$

Case 2: we consider $\gamma_{p,q}(1 - a_j + a_j s)$ and compare it with $\gamma_{p,q}(\rho)$. Then, we get

$$\Theta = \frac{1}{[1 + \rho]_{p,q}[2]_{p,q} p^{\frac{\rho(\rho+1)}{2}} \xi^{2\rho+2}} \mathfrak{N}_{p_i+1, q_i, \tau_i; r}^{m, n+1} \left(z; (p, q) \middle| \begin{matrix} (1 - \rho, 0)(a_j, A_j)_{1, n} \cdots [\tau_i(a_{ji}, A_{ji})]_{n+1, p_i} \\ (b_j, B_j)_{1, m} \cdots [\tau_i(b_{ji}, B_{ji})]_{m+1, q_i} \end{matrix} \right).$$

By interpreting the Mellin–Barnes counter integral obtained in terms of the (p, q) -analogue of $\mathfrak{N}$ -function, we acquire the result (35). Therefore, the proof is completed. $\square$

Corollary 6.1 Let $\text{Re}(\xi) > 0$. Then, we have

(i) if we choose $\tau_i = 1$ in (34), then we called this the (p, q) -analogue of Laplace-type integral transform of I-function as follows:

$$\begin{aligned}
 & {}_{p,q}L_2 \left(\kappa^{2\rho+1} I_{p_i, q_i; r}^{m, n} \left(z; (p, q) \middle| \begin{matrix} (a_j, A_j)_{1, n} \cdots [(a_{ji}, A_{ji})]_{n+1, p_i} \\ (b_j, B_j)_{1, m} \cdots [(b_{ji}, B_{ji})]_{m+1, q_i} \end{matrix} \right) \right) \\
 &= \begin{cases} \frac{1}{[1 + \rho]_{p,q}[2]_{p,q} p^{\frac{\rho(\rho+1)}{2}} \xi^{2\rho+2}} I_{p_i, q_i+1; r}^{m+1, n} \\ \times \left(z; (p, q) \middle| \begin{matrix} (a_j, A_j)_{1, n} \cdots [(a_{ji}, A_{ji})]_{n+1, p_i} \\ (\rho, 0)(b_j, B_j)_{1, m} \cdots [(b_{ji}, B_{ji})]_{m+1, q_i} \end{matrix} \right), \\ \text{if } \Gamma_{p,q}(b_j + B_j s) \text{ is compared with } \Gamma_{p,q}(\rho); \\ \frac{1}{[1 + \rho]_{p,q}[2]_{p,q} p^{\frac{\rho(\rho+1)}{2}} \xi^{2\rho+2}} I_{p_i+1, q_i; r}^{m, n+1} \\ \times \left(z; (p, q) \middle| \begin{matrix} (1 - \rho, 0)(a_j, A_j)_{1, n} \cdots [(a_{ji}, A_{ji})]_{n+1, p_i} \\ (b_j, B_j)_{1, m} \cdots [(b_{ji}, B_{ji})]_{m+1, q_i} \end{matrix} \right), \\ \text{if } \Gamma_{p,q}(1 - a_j + a_j s) \text{ is compared with } \Gamma_{p,q}(\rho). \end{cases}
 \end{aligned}$$

(ii) If we choose $\tau_i = 1, r = 1, p_i = P$, and $q_i = Q$ in (34), then we called this the (p, q) -analogue of Laplace-type integral transform of H-function as follows:

$$\begin{aligned}
 & {}_{p,q}L_2 \left(\kappa^{2\rho+1} H_{P, Q}^{m, n} \left(z; (p, q) \middle| \begin{matrix} (a_j, A_j)_{1, P} \\ (b_j, B_j)_{1, Q} \end{matrix} \right) \right) \\
 &= \begin{cases} \frac{1}{[1 + \rho]_{p,q}[2]_{p,q} p^{\frac{\rho(\rho+1)}{2}} \xi^{2\rho+2}} H_{P, Q+1}^{m+1, n} \left(z; (p, q) \middle| \begin{matrix} (a_j, A_j)_{1, P} \\ (\rho, 0)(b_j, B_j)_{1, Q} \end{matrix} \right), \\ \text{if } \Gamma_{p,q}(b_j + B_j s) \text{ is compared with } \Gamma_{p,q}(\rho); \\ \frac{1}{[1 + \rho]_{p,q}[2]_{p,q} p^{\frac{\rho(\rho+1)}{2}} \xi^{2\rho+2}} H_{P+1, Q}^{m, n+1} \left(z; (p, q) \middle| \begin{matrix} (1 - \rho, 0)(a_j, A_j)_{1, P} \\ (b_j, B_j)_{1, Q} \end{matrix} \right), \\ \text{if } \Gamma_{p,q}(1 - a_j + a_j s) \text{ is compared with } \Gamma_{p,q}(\rho). \end{cases}
 \end{aligned}$$

(iii) If we choose $\tau_i = 1, r = 1, p_i = P, q_i = Q$, and $A_j = B_j = 1$ in (34), then we called this the (p, q) -analogue of Laplace-type integral transform of G-function as follows:

$$\begin{aligned}
 & {}_{p,q}L_2 \left(\kappa^{2\rho+1} G_{P,Q}^{m,n} \left(z; (p,q) \middle| \begin{smallmatrix} (a_1, a_2, \dots, a_P) \\ (b_1, b_2, \dots, b_Q) \end{smallmatrix} \right) \right) \\
 &= \begin{cases} \frac{1}{[1+\rho]_{p,q} [2]_{p,q} p^{\frac{\rho(\rho+1)}{2}} \xi^{2\rho+2}} G_{P,Q+1}^{m+1,n} \left(z; (p,q) \middle| \begin{smallmatrix} (a_1, a_2, \dots, a_P) \\ (\rho, 0) (b_1, b_2, \dots, b_Q) \end{smallmatrix} \right), \\ \text{if } \Gamma_{p,q}(b_j + B_j s) \text{ is compared with } \Gamma_{p,q}(\rho); \\ \frac{1}{[1+\rho]_{p,q} [2]_{p,q} p^{\frac{\rho(\rho+1)}{2}} \xi^{2\rho+2}} G_{P+1,Q}^{m,n+1} \left(z; (p,q) \middle| \begin{smallmatrix} (1-\rho, 0) (a_1, a_2, \dots, a_P) \\ (b_1, b_2, \dots, b_Q) \end{smallmatrix} \right), \\ \text{if } \Gamma_{p,q}(1-a_j + a_j s) \text{ is compared with } \Gamma_{p,q}(\rho). \end{cases}
 \end{aligned}$$

The ${}_{p,q}\mathbb{L}_2$ is similar to the (i), (ii) and (iii), but only changes the $p^{\frac{\rho(\rho+1)}{2}}$ to $q^{\frac{\rho(\rho+1)}{2}}$.

Conclusion

In this work, we introduced the properties of the (p,q) -analogues of Laplace-type integral transform of the ${}_{p,q}L_2$ and ${}_{p,q}\mathbb{L}_2$ which consisted of the (p,q) -special functions, (p,q) -trigonometric types, (p,q) -differential operator, and (p,q) -convolution theorem. Also, we introduced (p,q) -Aleph function and obtained some interesting results by applying ${}_{p,q}L_2$ and ${}_{p,q}\mathbb{L}_2$. In the future study, we see the potential to unlock a novel way to solve some (p,q) differential equations with all of the results derived through this research.

Acknowledgements

The authors of the paper are grateful to the editorial board and reviewers for the careful reading and helpful suggestions which led to an improvement of our original manuscript.

References

- [1] Jackson, F. H. (1910). On a q -Definite Integrals. **The Quarterly Journal of Pure and Applied Mathematics**. Vol. 41, No. 2, pp. 193-203
- [2] Jackson, F. H. (1910). q -Difference Equations. **American Journal of Mathematics**. Vol. 32, No. 4, pp. 305-314. DOI: 10.2307/2370183
- [3] Ernst, T. (2012). **A Comprehensive Treatment of q -Calculus**. Springer: Basel
- [4] Aral, A., Gupta, V., and Agarwal, R. P. (2013). **Applications of q -Calculus in Operator Theory**. Springer Science + Business Media: New York
- [5] Sole, A. D. and Kac, V. (2003). **On Integral Representations of q -Gamma and q -Beta Functions**. Access (20 January 2023). Available (<https://arxiv.org/abs/math/0302032>)
- [6] Tariboon, J. and Ntouyas, S. K. (2013). Quantum Calculus on Finite Intervals and Applications to Impulsive Difference Equations. **Advances in Difference Equations**. Vol. 2013, pp. 1-19. DOI: 10.1186/1687-1847-2013-282
- [7] Tariboon, J. and Ntouyas, S. K. (2014). Quantum Integral Inequalities on Finite Intervals. **Journal of Inequalities and Applications**. Vol. 2014, pp. 1-13. DOI: 10.1186/1029-242X-2014-121

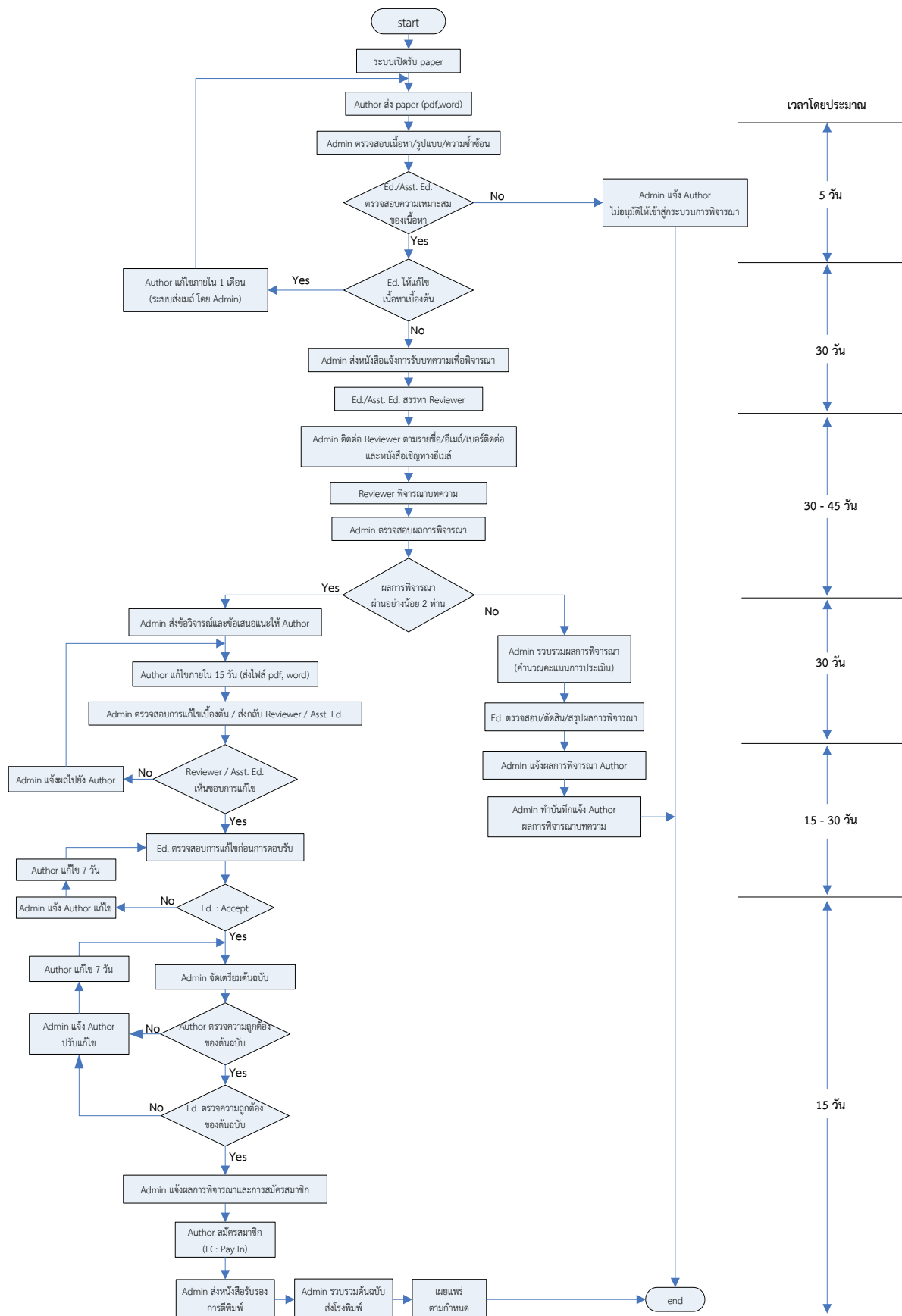
- [8] Jhathanam, S., Tariboon, J., Ntouyas, S. K., and Nonlaopon, K. (2019). On q-Hermite-Hadamard Ibequalities for Differentiable Convex Function. **Mathematics**. Vol. 7, Issue 7, pp. 1-9. DOI: 10.3390/math7070632
- [9] Prabseang, J., Nonlaopon, K., and Tariboon, J. (2019). Quantum Hermite-Hadamard Inequalities for Double Integral and q-Differentiable Convex Functions. **Journal of Mathematical Inequalities**. Vol. 13, No. 3, pp. 675-686. DOI: 10.7153/jmi-2019-13-45
- [10] Ahmad, B., Alsaedi, A., and Ntouyas, S. K. (2012). A Study of Second-Order q-Difference Equations with Boundary Conditions. **Advances in Difference Equations**. Vol. 2012, pp. 1-10. DOI: 10.1186/1687-1847-2012-35
- [11] Ahmad, A., Jain, R., and Jain, D. K. (2017). q-Analogue of Aleph-Function and Its transformation Formula with q-Derivative. **Journal of Statistics Applications & Probability**. Vol. 6, No. 3, pp. 1-9. DOI: 10.18576/jsap/060312
- [12] Ahmad, B., Ntouyas, S. K., and Purnaras, I. K. (2012). Existence Results for Nonlinear q-Difference Equations with Nonlocal Boundary Conditions. **Communications in Nonlinear Analysis**. Vol. 19, pp. 59-72
- [13] Kac, V. and Cheung, P. (2002). **Quantum Calculus**. Springer-Verlag: New York
- [14] Ganie, J. A. and Jain, R. (2020). On a System of q-Laplace Transform of Two Variables with Applications. **Journal of Computational and Applied Mathematics**. Vol. 366, pp. 1-12. DOI: 10.1016/j.cam.2019.112407
- [15] Albayrak, D., Purohit, S. D., and Uçar, F. (2013). On q-Analogues of Sumudu Transform. **Analele Stiintifice ale Universitatii Ovidius Constanta, Seria Matematica**. Vol. 21, No. 1, pp. 239-260. DOI: 10.2478/auom-2013-0016
- [16] Chung, W. S., Kim, T., and Kwon, H. I. (2014). On the q-Analog of the Laplace Transform. **Russian Journal of Mathematical Physics**. Vol. 21, No. 2, pp. 156-168. DOI: 10.1134/S1061920814020034
- [17] Al-Omari, S. K. Q. (2018). Certain Results Related to the N-Transform of a Certain Class of Functions and Differential Operators. **Advances in Difference Equations**. Vol. 2018, pp. 1-14. DOI: 10.1186/s13662-017-1457-y
- [18] Al-Omari, S. K. Q. (2020). q-Analogues and Properties of the Laplace-Type Integral Operator in the Quantum Calculus Theory. **Journal of Inequalities and Applications**. Vol. 2020, pp. 1-14. DOI: 10.1186/s13660-020-02471-0
- [19] Al-Omari, S. K. Q. (2021). Estimates and Properties of Certain q-Mellin Transform on Generalized q-Calculus Theory. **Advances in Difference Equations**. Vol. 2021, pp. 1-15. DOI: 10.1186/s13662-021-03391-z
- [20] Uçar, F. and Albayrak, D. (2011). On q-Laplace Type Integral Operators and Their Applications. **Journal of Difference Equations and Applications**. Vol. 18, Issue 6, pp. 1001-1014. DOI: 10.1080/10236198.2010.540572
- [21] Alp, N. and Sarikaya, M. Z. (2023). q-Laplace Transform on Quantum Integral. **Kragujevac Journal of Mathematics**. Vol. 47, No. 1, pp. 153-164
- [22] Al-Khairi, R. T. (2020). q-Laplace Type Transforms of q^2 - Analogues of Bessel Functions. **Journal of King Saud University-Science**. Vol. 32, No. 1, pp. 563-566. DOI: 10.1016/j.jksus.2018.08.012

- [23] Chakrabarti, R. and Jagannathan, R. (1991). A (p,q) -Oscillator Realization of Two-Parameter Quantum Algebras. **Journal of Physics A: Mathematical and General**. Vol. 24, pp. 711-718. DOI: 10.1088/0305-4470/24/13/002
- [24] Sadjang, P. N. (2018). On the Fundamental Theorem of (p,q) -Calculus and Some (p,q) -Taylor Formulas. **Results in Mathematics**. Vol. 73, No. 39, pp. 1-21. DOI: 10.1007/s00025-018-0783-z
- [25] Milovanovic, G. V., Gupta, V., and Malik, N. (2018). (p,q) -Beta Functions and Applications in Approximation. **Boletín de la Sociedad Matemática Mexicana**. Vol. 24, pp. 219-237. DOI: 10.1007/s40590-016-0139-1
- [26] Prabseang, J., Nonlaopon, K., Tariboon, J., and Ntouyas, S. K. (2021). Refinements of Hermite-Hadamard Inequalities for Continuous Convex Functions Via (p,q) -Calculus. **Mathematics**. Vol. 9, Issue 4, pp. 1-12. DOI: 10.3390/math9040446
- [27] Jain, A., Bhat, A. A., Jain, R., and Jain, D. K. (2021). Certain Results of (p,q) -Analogue of Aleph-Function with (p,q) -Derivative. **Journal of Statistics Applications & Probability Letters**. Vol. 10, Issue 1, pp. 45-52. DOI: 10.18576/jsap/100105
- [28] Ahmad, A., Jain, R., and Jain, D. K. (2017). Certain Results of (p,q) -Analogue of I-Function with (p,q) -Derivative. In **Proceedings of the MSSCID-2017**. 20th Annual Conference of VPI. pp. 31-44. India: Jaipur
- [29] Sadjang, P. N. (2017). On Two (p,q) -Analogues of the Laplace Transform. **Journal of Difference Equations and Applications**. Vol. 23, No. 9, pp. 1562-1583. DOI: 10.1080/10236198.2017.1340469
- [30] Sadjang, P. N. (2019). **On (p,q) -Analogues of the Sumudu Transform**. Access (20 January 2023). Available (10.13140/RG.2.2.34688.48645)
- [31] Jirakulchaiwong, S., Nonlaopon, K., Tariboon, J., Ntouyas S. K., and Kim, H. (2021). On (p,q) -Analogues of Laplace-Typed Integral Transforms and Applications. **Symmetry**. Vol. 13, Issue 4, pp. 1-22. DOI: 10.3390/sym13040631
- [32] Schiff, J. L. (1999). **The Laplace Transform Theory and Application**. Springer: New York
- [33] Yurekli, O. and Sadek, I. (1991). A Parseval-Goldstein Type Theorem on the Widder Potential Transform and Its Applications. **International Journal of Mathematics and Mathematical Sciences**. Vol. 14, No. 3, pp. 517-524. DOI: 10.1155/S0161171291000704
- [34] Sudland, N., Baumann, B., and Nonnenmacher, T. F. (1998). Open Problem: Who knows about the Aleph-function?. **Fractional Calculus and Applied Analysis**. Vol. 1, pp. 401-402
- [35] Saxena, V. P. (2008). **The I-function**; Anamaya publishers. New Delhi: India
- [36] Bhat, A. A., Singh, G., Jain, R., and Jain, D. K. (2019). q -Sumudu and q -Laplace Transforms of the Basic Analogue of Aleph-Function. **Far East Journal of Mathematical Sciences**. Vol. 118, No. 2, pp. 189-211. DOI: 10.17654/MS118020189
- [37] Tassaddiq, A., Bhat, A. A., Jain, D. K., and Ali, F. (2020). On (p,q) -Sumudu and (p,q) -Laplace Transforms of the Basic Analogue of Aleph-Function. **Symmetry**. Vol. 12, pp. 1-17
- [38] Mathai, A. M., Saxena, R. K., and Haubold, H. J. (2010). **The H-Function: Theory and Applications**. Springer: New York
- [39] Pathak, S. and Jain, R. (2017). Some Identities Involving (p,q) -Analogue of Meijer's G-Function. **Indian Academy Of Mathematics in Navlakha, Indore**. Vol. 39, pp. 137-146



RMUTI Journal

วารสารงานวิจัยด้านวิทยาศาสตร์สมัยใหม่ และการใช้ประโยชน์นวัตกรรมเทคโนโลยี (RMUTI Journal)



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

1. ประเภทของบทความที่ตีพิมพ์

1.1 บทความวิจัย (Research article) เป็นบทความที่ได้จากงานวิจัย

1.2 บทความวิชาการ (Academic article) เป็นบทความที่มีลักษณะดังนี้

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

2. รูปแบบการพิมพ์บทความ

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 บทความภาษาไทยใช้ TH SarabunPSK
บทความภาษาอังกฤษใช้ Times New Roman
- การย่อหน้า 7 ตัวอักษร พิมพ์ตัวที่ 8
- จำนวนหน้า 12 หน้า แต่ไม่ควรเกิน 15 หน้า
- ชื่อบทความ ภาษาไทย ขนาดตัวอักษร 24 ตัวหนา
ภาษาอังกฤษ ขนาดตัวอักษร 20 ตัวหนา
- ชื่อผู้เขียน ภาษาไทย ขนาดตัวอักษร 18 และจัดชิดซ้าย
ภาษาอังกฤษ ขนาดตัวอักษร 14 และจัดชิดซ้าย
- ตัวเลขยก (ต่อท้ายนามสกุล) ขนาดตัวอักษร 18
- ที่อยู่ ภาษาไทย ขนาดตัวอักษร 14
ภาษาอังกฤษ และภาษาอังกฤษ 10
- ชื่อหัวเรื่องหลักในบทความ เช่น “บทคัดย่อ” “คำสำคัญ” “วิธีดำเนินการ” “ผลการวิจัย”
“สรุปผลการวิจัย” “กิตติกรรมประกาศ” “เอกสารอ้างอิง” จัดชิดซ้ายหน้ากระดาษ
 - กรณีบทความภาษาไทย ขนาดตัวอักษร 20 ตัวหนา
 - กรณีบทความภาษาอังกฤษ ขนาดตัวอักษร 16 ตัวหนา
- ชื่อหัวเรื่องรอง จัดชิดซ้ายหน้ากระดาษ
 - กรณีบทความภาษาไทย ขนาดตัวอักษร 16 ตัวหนา
 - กรณีบทความภาษาอังกฤษ ขนาดตัวอักษร 12 ตัวหนา
- เนื้อหาในส่วนต่าง ๆ และคำสำคัญ
 - กรณีบทความภาษาไทย ขนาดตัวอักษร 16
 - กรณีบทความภาษาอังกฤษ ขนาดตัวอักษร 12

- ชื่อตาราง

กรณีบทความภาษาไทย ชื่อความ “ตารางที่ x” ใช้ขนาดตัวอักษร 16 ตัวหนา วางด้านบน ชิดซ้ายหน้ากระดาษ ตามด้วยชื่อตารางที่เป็นตัวอักษรขนาด 16 ไม่หนา

กรณีบทความภาษาอังกฤษ ชื่อความ “Table x” ใช้ขนาดตัวอักษร 12 ตัวหนา วางด้านบน ชิดซ้ายหน้ากระดาษ ตามด้วยชื่อตารางที่เป็นตัวอักษรขนาด 12 ไม่หนา

- ชื่อรูปภาพ

กรณีบทความภาษาไทย ชื่อความ “รูปที่ x” ใช้ขนาดตัวอักษร 16 ตัวหนา วางด้านล่าง ชิดซ้ายหน้ากระดาษ ตามด้วยคำชื่อรูปที่เป็นตัวอักษรขนาด 16 ไม่หนา

กรณีบทความภาษาอังกฤษ ชื่อความ “Figure x” ใช้ขนาดตัวอักษร 12 ตัวหนา วางด้านล่าง ชิดซ้ายหน้ากระดาษ ตามด้วยคำชื่อรูปที่เป็นตัวอักษรขนาด 12 ไม่หนา

3. ส่วนประกอบของบทความแต่ละประเภท

3.1 บทความวิจัย จะประกอบไปด้วย

ก. ส่วนปก

1. ชื่อบทความ (Title) ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ควรกระชับรัด ไม่ยาวเกินไป บทความภาษาไทยชื่อเรื่องต้องมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ บทความภาษาอังกฤษชื่อเรื่องไม่ต้องมีภาษาไทย

2. ชื่อผู้เขียน (Authors) ชื่อเต็ม - นามสกุลเต็ม ของผู้เขียนทุกคน โดยให้รายละเอียดต้นสังกัดของผู้เขียนไว้ที่บรรทัดล่างสุดของหน้าแรก พร้อมทั้งระบุชื่อผู้เขียนประสานงาน (Corresponding Author) ด้วยการระบุ เบอร์โทรศัพท์ และ E-mail Address ที่สามารถติดต่อได้ และให้ใส่เครื่องหมายดอกจัน (*) ด้วยยกเว้นถ้าชื่อผู้เขียนนามสกุล และตัวเลขนอก ให้เขียนไว้ต่อท้ายนามสกุล เพื่อระบุที่อยู่ของผู้เขียน

3. บทคัดย่อ (Abstract) ควรสั้น ตรงประเด็น ครอบคลุมสาระสำคัญของบทความ ประกอบด้วย เนื้อหา ได้แก่ วัตถุประสงค์ วิธีการ ผลการวิจัย และการอภิปรายผล เป็นต้น โดยเขียนลงใน 1 ย่อหน้า ถ้าบทความเป็นภาษาไทย จะต้องมีบทคัดย่อภาษาไทย 1 ย่อหน้า และภาษาอังกฤษ 1 ย่อหน้า โดยให้ภาษาไทยขึ้นก่อน เนื้อความในบทคัดย่อภาษาไทยและภาษาอังกฤษต้องมีความหมายเดียวกัน ความยาวของบทคัดย่อภาษาอังกฤษ กำหนดให้มีความยาวได้ไม่เกิน 300 คำ

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

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

ข. ส่วนเนื้อหา

1. บทนำ (Introduction) เพื่ออธิบายถึงความสำคัญของปัญหา และวัตถุประสงค์ของการวิจัย รวมถึงการทบทวนวรรณกรรม และเอกสารที่เกี่ยวข้อง

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

3. ผลการวิจัย (Results) เสนอผลการทดลองอย่างชัดเจน ตรงประเด็น ควรมีรูปภาพและ/หรือ ตารางประกอบการอธิบายผลในตารางและรูปภาพ ต้องไม่ซ้ำซ้อนกัน รูปภาพและตารางของบทความที่เป็นภาษาไทย ให้บรรยายเป็นภาษาไทย รูปภาพและตารางของบทความที่เป็นภาษาอังกฤษ ให้บรรยายเป็นภาษาอังกฤษ

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

5. บทสรุป (Conclusion) สรุปประเด็น และสาระสำคัญของการวิจัย

6. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgements) เพื่อแสดงความขอบคุณแก่ผู้ให้ความช่วยเหลือในการวิจัย อาจมีหรือไม่ก็ได้

7. เอกสารอ้างอิง (References) เป็นรายการเอกสารที่ถูกอ้างไว้ในส่วนของเนื้อเรื่อง เพื่อใช้เป็นหลักในการค้นคว้าวิจัย จำนวนเอกสารที่นำมาอ้างอิงตอนท้ายต้องมีจำนวนตรงกับที่ถูกอ้างอิงไว้ในส่วนของเนื้อเรื่องที่ปรากฏในบทความเท่านั้น การจัดเรียงให้เรียงตามลำดับการอ้างอิงในเนื้อหาโดยให้ยึดถือรูปแบบการเขียนเอกสารอ้างอิงตามที่ทางวารสาร 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)

การอ้างอิงเอกสารในเนื้อเรื่องใช้รูปแบบ IEEE ระบบตัวเลข (Numerical System) เท่านั้น โดยรายการอ้างอิงเอกสารให้จัดชิดซ้ายหน้ากระดาษ หมายเลขลำดับของเอกสารอ้างอิงในเครื่องหมายเล็บกรอบสี่เหลี่ยม ตัวอย่างเช่น [1] เป็นต้น หากเป็นการอ้างอิงเอกสารหลายฉบับในเวลาเดียวกัน ให้ใส่หมายเลขอ้างอิงเรียงตามลำดับจากน้อยไปหามาก เช่น [1] - [3] หรือ [1] - [2], [5] เป็นต้น

การเขียนรายการเอกสารอ้างอิง (Reference List)

1) หนังสือ

[X] ผู้แต่ง. (ปีที่พิมพ์). ชื่อหนังสือ. ครั้งที่พิมพ์(ถ้ามี). เมืองที่พิมพ์: สำนักพิมพ์
ตัวอย่างเช่น

[1] Herren, Ray V. (1994). **The Science of Animal Agriculture**. Albany, N.Y.: Delmar Publishers

2) หนังสือแปล

[X] ผู้แต่ง. (ปีที่พิมพ์). ชื่อเรื่องของหนังสือแปล แปลจาก(ชื่อเรื่องในภาษาเดิม). โดย ชื่อผู้แปล. ครั้งที่พิมพ์(ถ้ามี). เมืองที่พิมพ์: สำนักพิมพ์

ตัวอย่างเช่น

[2] Grmek, Mirko D. (1990). **History of AIDS : Emerging and Origin of a Modern Pandemic**. Translated by Russell C. Maulitz, and Jacalyn Duffin. Princeton, N.J.: University Press

3) บทความหรือบทในหนังสือ

[X] ผู้เขียนบทความ. (ปีที่พิมพ์). ชื่อบทความ. ชื่อเรื่อง. ชื่อบรรณาธิการหรือผู้รวบรวม(ถ้ามี). หน้า เลขหน้า. สถานที่พิมพ์: สำนักพิมพ์

ตัวอย่างเช่น

[3] McTaggart, J. M. E. (1993). The Unreality of Time. **Philosophy of Time**. Robin Le Poidevin, and Murray MacBeath, eds. pp. 23-34. Oxford: Oxford University Press

4) บทความในหนังสือรายงานประชุมทางวิชาการ/สัมมนาทางวิชาการ

- [X] ผู้เขียนบทความ. (ปีที่พิมพ์). ชื่อบทความ. ชื่อบรรณาธิการ(ถ้ามี). ชื่อเรื่องรายงานการประชุม. หน้า เลขหน้า. สถานที่พิมพ์: สำนักพิมพ์

ตัวอย่างเช่น

- [4] Beales, P. F. (1980). The Status of Malaria in Southeast Asia. **Proceedings of the Third Asian Congress of Pediatrics**. Aree Valyasevi, and Vidhaya Mekanandha, eds. pp. 52-58. Bangkok: Bangkok Medical Publisher

5) วารสาร

- [X] ผู้เขียนบทความ. (ปีที่พิมพ์). ชื่อบทความ. ชื่อวารสาร. ปีที่. , ฉบับที่. , หน้า เลขหน้า. (in Thai)/DOI:

ตัวอย่างเช่น

- [5] Vitsanusat, A. and Phachirarat, S. (2015). Measurement of Radon in Drinking Water at Amphur Meaung, Khonkhaen Province with Ionization chamber. **RMUTI Journal Science and Technology**. Vol. 8, No. 2, pp. 12-20

6) บทความในหนังสือพิมพ์

- [X] ชื่อผู้เขียน. (ปี. วัน. เดือน). ชื่อบทความ. ใน ชื่อหนังสือพิมพ์. หน้า เลขหน้า

ตัวอย่างเช่น

- [6] Vitit Muntarbhorn. (1994. 21. March). **The Sale of Children as a Global Dilemma**. Bangkok Post. p. 4

7) บทความในสารานุกรม

- [X] ชื่อผู้เขียนบทความ. (ปีที่พิมพ์). ชื่อบทความ. ใน. ชื่อสารานุกรม. เล่มที่: หน้า เลขหน้า-เลขหน้า

ตัวอย่างเช่น

- [7] Morrow, Blaine Victor. (1993). Standards for CD-Rom Retrieval. **Encyclopedia of Library and Information Science**. Vol. 51, pp. 380-389

8) วิทยานิพนธ์

- [X] ผู้เขียนวิทยานิพนธ์. (ปีที่พิมพ์). ชื่อวิทยานิพนธ์. ระดับวิทยานิพนธ์ ชื่อสาขา คณะ มหาวิทยาลัย

ตัวอย่างเช่น

- [8] Phillips, O. C., Jr. (1962). **The Indfluence of Ovidd on Lucan's Bellum Civil**. Ph.D. Dissertation University of Chicago

9) สื่ออิเล็กทรอนิกส์ (สื่ออิเล็กทรอนิกส์) : www

- [X] ผู้เขียน. ปี. ชื่อบทความ. ชื่อวารสารหรือนิตยสาร. ปีที่(เดือนหรือฉบับที่): เลขหน้า(ถ้ามี). เข้าถึงเมื่อ (วัน เดือน ปีที่ค้นข้อมูล). เข้าถึงได้จาก (ที่อยู่ของบทความหรือสื่ออิเล็กทรอนิกส์ URL)

ตัวอย่างเช่น

- [9] Department of the Environment and Heritage. (1999). **Guide to Department and Agency Libraries**. Access (17 November 2000). Available (<http://www.erin.gov.au/library/guide.html>)

10) ผู้แต่งเป็นหน่วยงาน

- [X] ชื่อหน่วยงาน. (ปีที่พิมพ์). ชื่อหนังสือ เล่มที่(ถ้ามี). ครั้งที่พิมพ์(ถ้ามี). เมืองที่พิมพ์: สำนักพิมพ์

ตัวอย่างเช่น

- [10] Prince of Songkla University. (2009). **Annual Report 2008**. Songkhla: Prince of Songkla University

11) มีเฉพาะชื่อบรรณาธิการเป็นผู้รวบรวม

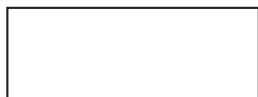
- [X] ชื่อบรรณาธิการ หรือผู้รวบรวม หรือผู้เรียบเรียง. (ปีที่พิมพ์). ชื่อหนังสือ. เล่มที่ (ถ้ามี) ครั้งที่พิมพ์(ถ้ามี) เมืองที่พิมพ์: สำนักพิมพ์

ตัวอย่างเช่น

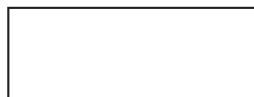
- [11] Rueangwit Limpanat. (2000). **Local - India**. Chonburi: Department of History Faculty of Humanities And social science Burapa university

5. รูปแบบการใส่รูปภาพในเนื้อหาบทความ

- 1) ชื่อรูปภาพห้ามขึ้นต้นด้วยคำว่า “แสดง”
- 2) รูปภาพที่แสดงต้องมีคำอธิบายอยู่ในเนื้อหาบทความที่มีการระบุถึงรูปภูษนั้น ๆ
- 3) คำอธิบายรูปภาพ ให้เขียนไว้ได้รูปภาพแต่ละรูปภาพ โดยจัดรูปภาพไว้กึ่งกลางหน้ากระดาษ และคำอธิบายจัดชิดซ้ายหน้ากระดาษ
- 4) ไฟล์ของรูปภาพต้องเป็นไฟล์ที่มีนามสกุล .jpg, .png, .tiff หรือ .eps เท่านั้น ความละเอียดไม่ต่ำกว่า 300 dpi
- 5) ลายเส้นที่ปรากฏบนรูปภาพต้องมีความคมชัด กรณีที่เป็นรูปภาพ ต้องระบุชื่อแกนต่าง ๆ ให้ครบถ้วน
- 6) กรณีที่มีรูปภาพย่อย ควรจัดให้รูปภาพย่อยทั้งหมดอยู่ในหน้าเดียวกัน สำหรับบทความภาษาไทย ให้เขียนคำบรรยายใต้ชื่อรูปย่อยแต่ละรูป และกำหนดลำดับของรูปภาพด้วยตัวอักษร ตัวอย่างเช่น



(ก) รูปย่อยที่ 1



(ข) รูปย่อยที่ 2

รูปที่ 1 ตัวอย่างการเขียนคำอธิบายรูปภาพ

- สำหรับบทความภาษาอังกฤษ ให้ใช้อักษร (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

6. รูปแบบการใส่ตารางในเนื้อหาบทความ

- 1) ชื่อตารางห้ามขึ้นต้นด้วยคำว่า “แสดง”
- 2) ตารางที่แสดงต้องมีคำอธิบายอยู่ในเนื้อหาบทความที่มีการระบุถึงตารางนั้น ๆ
- 3) คำอธิบายตาราง ให้เขียนไว้ด้านบนของตาราง โดยจัดคำอธิบายไว้ชิดขอบด้านซ้ายของหน้ากระดาษ และตารางอยู่กึ่งกลางหน้ากระดาษ ควรจัดเนื้อหาตารางให้อยู่บนหน้าเดียวกัน กรณีที่ตารางมีความยาวเกินหน้ากระดาษ ให้ใส่ชื่อตาราง “ตารางที่ x” ไว้ที่ด้านบนของตารางในหน้าแรก และใส่ชื่อตาราง “ตารางที่ x (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

7. รูปแบบการใส่สมการในเนื้อหาบทความ

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

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

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

8. การดำเนินงานของกองบรรณาธิการ

1) บทความที่ส่งเข้าวารสาร ต้องส่งผ่านระบบออนไลน์ที่ <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/rmutijo/index>

2) บทความที่ถูกส่งเข้ามาในระบบ กองบรรณาธิการจะพิจารณาบทความเบื้องต้นเกี่ยวกับความถูกต้องของรูปแบบทั่วไป บทความที่ไม่ดำเนินการตามรูปแบบที่กำหนดจะไม่รับเข้าสู่กระบวนการพิจารณาโดยผู้ทรงคุณวุฒิ และจะส่งกลับเพื่อทำการแก้ไข ดังนั้น เพื่อให้เกิดความรวดเร็วในเข้าสู่กระบวนการพิจารณาผล ผู้เขียนควรดำเนินการจัดทำวารสารให้ถูกต้องตามรูปแบบที่กำหนดอย่างเคร่งครัด

3) เมื่อบทความผ่านการพิจารณาให้ตีพิมพ์ลงในวารสาร และผู้เขียนได้ดำเนินการจัดเตรียมเอกสารต่าง ๆ อย่างถูกต้อง ครบถ้วนตามข้อกำหนดของวารสารเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ผู้เขียนจะได้รับหนังสือรับรองการตีพิมพ์บทความเพื่อเป็นการยืนยัน

4) หากทางวารสารตรวจพบว่าบทความที่ถูกส่งเข้ามามีการคัดลอก หรือเผยแพร่ในที่อื่น ๆ ก่อนหน้า หรือมีการดำเนินการใด ๆ อันเป็นการกระทำที่ผิดจรรยาบรรณของนักวิจัย ทางวารสารจะดำเนินการทำหนังสือแจ้งไปยังหน่วยงานต้นสังกัด และระงับการพิจารณาและรับบทความจากผู้เขียนบทความนั้นเป็นระยะเวลาอย่างน้อย 5 ปี



หมายเลขบทความ

(สำหรับเจ้าหน้าที่)

แบบฟอร์มการส่งบทความ

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

วันที่

ข้าพเจ้า (นาย/นาง/นางสาว)

ระดับการศึกษาสูงสุด ตำแหน่งทางวิชาการ

หน่วยงาน

ที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้สะดวก

โทรศัพท์.....โทรสาร.....โมบาย.....

e-mail.....

ขอส่ง ☐ บทความวิจัย ☐ บทความวิชาการ

สาขาของบทความ (กรุณาเลือก)

☐ Chemistry

☐ Engineering

☐ Materials Science

☐ Environmental Science

☐ Mathematics

ชื่อบทความ (ภาษาไทย)

.....

.....

(ภาษาอังกฤษ)

.....

.....

ชื่อผู้เขียนร่วม (พร้อมคำนำหน้าชื่อ อีเมล และเบอร์โทรศัพท์)

1.

2.

3.

4.

5.

ขอเสนอชื่อผู้ทรงคุณวุฒิที่มีความเชี่ยวชาญในสาขาที่เกี่ยวข้อง

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

คุณวุฒิ.....สาขาที่เชี่ยวชาญ.....

หน่วยงานที่สังกัด.....

ที่อยู่สำหรับส่งเอกสาร.....

.....

หมายเลขโทรศัพท์.....Email.....

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

คุณวุฒิ.....สาขาที่เชี่ยวชาญ.....

หน่วยงานที่สังกัด.....

ที่อยู่สำหรับส่งเอกสาร.....

.....

หมายเลขโทรศัพท์.....Email.....

หมายเหตุ

1. ผู้ทรงคุณวุฒิต้องมีตำแหน่งทางวิชาการ ระดับ ผศ. ขึ้นไป หรือจบการศึกษาระดับปริญญาเอก และต้องไม่สังกัดหน่วยงานเดียวกับผู้ประพันธ์

2. กองบรรณาธิการขอสงวนสิทธิ์ในการเป็นผู้พิจารณาคัดเลือกผู้ทรงคุณวุฒิเพื่อพิจารณาผลงานทางวิชาการ

ข้าพเจ้าได้รับทราบและยินดีปฏิบัติตามเงื่อนไขและข้อกำหนดต่าง ๆ ในแบบฟอร์มแนบท้าย ซึ่งมีรายละเอียดอยู่ใน “คำแนะนำผู้เขียน” ที่ทางกองบรรณาธิการวารสาร RMUTI Journal ได้กำหนดขึ้น และยินดีให้กองบรรณาธิการมีสิทธิ์ที่จะไม่รับพิจารณา หากไม่จัดรูปแบบตามที่กำหนด ยินยอมให้มีสิทธิ์ในการเลือกสรรหาผู้กลั่นกรองโดยอิสระเพื่อพิจารณาด่วนฉบับที่ข้าพเจ้า (และผู้แต่งร่วม) ส่งมา ยินยอมให้กองบรรณาธิการสามารถตรวจแก้ไขต้นฉบับดังกล่าวได้ตามที่เห็นสมควร และข้าพเจ้า “ขอรับรองว่า บทความนี้ไม่เคยลงตีพิมพ์ในวารสารใดมาก่อน ไม่อยู่ระหว่างการพิจารณาจากวารสารอื่น และยินยอมว่าบทความที่ตีพิมพ์ลงในวารสารวิชาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ถือเป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี”

หากข้าพเจ้ามีความประสงค์ในการขอยกเลิกการพิจารณาบทความหลังจากวันที่ได้รับหนังสือยืนยันการรับบทความ ข้าพเจ้ายินดีดำเนินการตามกระบวนการของกองบรรณาธิการวารสาร RMUTI Journal

ลงชื่อ.....

(.....)



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

ขอรับรองว่าบทความ.....

เรื่อง
.....
โดย
.....

ได้ผ่านการประเมินจากคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิที่มีความเชี่ยวชาญ
และมาจากหลากหลายสถาบันจำนวน ๓ ท่าน
แบบผู้ทรงคุณวุฒิและผู้แต่งไม่ทราบชื่อกันและกัน (double-blind review)
และตีพิมพ์ในวารสารงานวิจัยด้านวิทยาศาสตร์สมัยใหม่ และ การใช้ประโยชน์นวัตกรรมเทคโนโลยี
(RMUTI Journal)

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

ปีที่..... ฉบับที่.....(.....-..... พ.ศ.....)



(.....)

บรรณาธิการวารสาร RMUTI Journal
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน



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

ข้าพเจ้า (นาย/นาง/นางสาว).....

สังกัดหน่วยงาน

มีความประสงค์ขออนุญาตพิจารณาบทความ รหัสบทความเรื่อง

.....

.....

.....

ที่ได้ส่งเข้ามายังวารสารระบบการจัดการวารสารออนไลน์ RMUTI Journal เมื่อวันที่

เนื่องจาก (ระบุเหตุผลในการถอนบทความ).....

.....

.....

ลงชื่อ.....ผู้ถอนบทความ

(.....)



RMUTI Journal



RMUTI Journal

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

Vol. 17 No. 2 May-August 2024

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