



Research on Modern science and Utilizing Technological Innovation Journal

(RMUTI Journal)

RMUTI Journal

Vol. 17 No. 3 September-December 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 บทความทุกบทความจะต้องผ่านการพิจารณาโดยผู้ทรงคุณวุฒิที่เชี่ยวชาญแบบผู้ทรงคุณวุฒิและผู้แต่งไม่ทราบชื่อกันและกัน (double-blind review)

เจ้าของ

สถาบันวิจัยและพัฒนา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

744 ถ.สุรนารายณ์ 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.วีรัชย์	พุทธวงศ์	ประธานหลักสูตรนิติวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กองบรรณาธิการ

ศาสตราจารย์เกียรติคุณ ดร.พีระศักดิ์	ศรีนิเวศน์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ศาสตราจารย์ ญาณวิทย์ ดร.เมธา	วรรณพัฒน์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ศาสตราจารย์ ดร.กุลเชษฐ์	เพียรทอง	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ศาสตราจารย์ ดร.เจษฎา	ธารีบุญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ฤทธิ์	สมบัติสมภพ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.ตะวัน	สุชน้อย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ศาสตราจารย์ ดร.ทวนทอง	จตุทาเกตุ	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ศาสตราจารย์ ดร.ปารเมศ	ชุติมา	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.เปี่ยมศักดิ์	เมนะเศวต	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.พิเชษฐ	ลิมสุวรรณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล	เหล่าสุวรรณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.มนัส	ชัยจันทร์	มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์
ศาสตราจารย์ ดร.รัตติกกร	ยี่มนิรัฐ	สถาบันวิทยสิริเมธี
ศาสตราจารย์ ดร.วินัย	ประลมพ์กาญจน์	มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์
ศาสตราจารย์ ดร.ศุภชัย	ปทุมนากุล	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ศาสตราจารย์ ดร.ศุภชัย	สิงห์ยะบุศย์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ศาสตราจารย์ ดร.สำเริง	จักรใจ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.สุชาติ	ลิมกตัญญู	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ศาสตราจารย์ ดร.สมชาติ	โสภณรณฤทธิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.สุทธวัฒน์	เบญจกุล	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ศาสตราจารย์ ดร.สรารุณี	สุจิตจร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ศาสตราจารย์ ดร.อรอนงค์	นัยวิกุล	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.กนกอร	อินทราพิเชฐ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รองศาสตราจารย์ ดร.กนต์ธร	ชานีประศาสน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รองศาสตราจารย์ ดร.คงศักดิ์	ธาดาทอง	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.คณิต	มุกดาใส	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.จักรี	ศรีนนท์ฉัตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.ชนกพร	เผ่าศิริ	มหาวิทยาลัยขอนแก่น

กองบรรณาธิการ (ต่อ)

รองศาสตราจารย์ ดร.ณัฐวิวัฒน์	พลดี	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.ตรีศ	สามารถ	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.นิรัช	สุคสังข์	มหาวิทยาลัยนเรศวร
รองศาสตราจารย์ ดร.ปราโมทย์	แพ่งคำ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รองศาสตราจารย์ ดร.ปรีชา	กอเจริญ	วิทยาลัยเทคโนโลยีจิตรลดา
รองศาสตราจารย์ ดร.วุฒิพล	สินธุนาวรัตน์	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.สมพงษ์	คุณย์จินดาชบาพร	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.สมพร	ไชยะ	จังหวัดฉะเชิงเทรา
รองศาสตราจารย์ ดร.สิทธิชัย	แสงอาทิตย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รองศาสตราจารย์ ดร.สรายุธ	เดชะปัญญา	มหาวิทยาลัยบูรพา
รองศาสตราจารย์ อุคมศักดิ์	สาริบุตร	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นาถ	สุขศีล	มหาวิทยาลัยนครพนม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรภาพ	แก้วสวัสดิ์วงศ์	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.จิตติวัฒน์	นธิกาญจนธาร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
รองศาสตราจารย์ ดร.เชิดศักดิ์	สุขศิริพัฒน์พงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
รองศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต	กฤตาคม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
รองศาสตราจารย์ ดร.ปกิต	กำบุญมา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
รองศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์	อัครวสุชี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไกรสิทธิ์	วสุเพ็ญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คมเดช	ภาพพัฒนบุรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักษดา	อัครวุฒิ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาคริต	นวลฉิมพลี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพล	พิสิฐพิพัฒน์สิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เดือนเพ็ญ	วงศ์สอน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัฐพล	สมนา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รตินันท์	เหลื่อมพล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รพีพงศ์	เปี่ยมสุวรรณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศศิพันธ์	วงศ์สุทธาวาส	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุจิตรา	อุ้นเรือน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อดิศักดิ์	ทาร์จริง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์อนุชา	กล้าน้อย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ดร.จาร์พงษ์	บรรเทา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ดร.ฉันทพิชญ์	ชามาตย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ดร.เยาวพา	ความหมั่น	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ดร.รักษชาติ	กลิ่นกล้า	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ดร.วัชรินทร์	ชาติบุปผาพันธ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ดร.สุกัญญา	คำทล้า	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

บรรณาธิการ

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

ฝ่ายจัดการและธุรการ

นางสาววลีรักษ์	ศรีศิลป์ไชย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
----------------	-------------	----------------------------------

สารบัญ
Table of Contents

บทความวิจัย (Research Articles)

การพัฒนาผลิตภัณฑ์สบู่ดินสอพองและสบู่ดินสอพองผสมสารสกัดดอกอัญชัน Development of Marl Soap and Marl Mixed with Butterfly Pea Flower Extract Soap ปิยวรรณ พันสี และพิมพ์มาดา คล้ายทองปาน <i>Piyawan Phansi and Pimmada Klaythongpan</i>	1
การผลิตแป้งทนย่อยจากแป้งข้าวโดยการหมักร่วมกับพุลูลานเนสและการเกิดรีโทรเกรเดชัน Production of Resistant Starch from Legume Flour by Co-Fermentation and Using Pullulanase and Retrogradation สุทธิดา วิทนานาลัย <i>Suttida Wittanalai</i>	12
การศึกษาเสถียรภาพลาดดินภายใต้น้ำหนักบรรทุกทุกจากแผ่นดินไหว ณ โรงเรียนนายเรืออากาศ นวมินทราชตรีวิทยาราช ตำบลมิตรภาพ อำเภอมวกเหล็ก จังหวัดสระบุรี A Study of Slope Stability under Seismic Loads at Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy, Mittraphap Subdistrict, Muak Lek District, Saraburi Province อริสมันต์ แสงธงทอง และพงษ์ฤทธิ์ นิติววงศ์ <i>Arissaman Sangthongtong and Pongrit Nitiwong</i>	24
การศึกษาความเหมาะสมของระยะลูกรีดเครื่องรีดแผ่นยางแบบ 4 ลูกรีด Study the Appropriate Value of the Roller Clearance in a 4-Roll Raw Rubber Sheet Rolling Machine สุรสิทธิ์ พอค้า, ใจไล ชาเสนและอนุวัช แสนพงษ์ <i>Surasit Phopha, Chailai Sasen, and Anuwat Saenpong</i>	40
การศึกษาหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการตัดวัสดุเหล็กเหนียวด้วยเครื่องตัดพลาสมา A Study of Suitable Parameters for Cutting Mild Steel by Using Plasma Machine จุฑาศินี พรพุทธศรี และอรอนนท์ อิศรมงคลรักษ์ <i>Jutasinee Pornputhasri and Arnon Isaramongkolrak</i>	51
ผลของวัสดุปลูกต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของคะน้าใบหยิก Effects of Substrate Media on Growth and Yield of Curl Leaf Kale ประภัสสร สมบัติศรี <i>Prapatsorn Sombatsri</i>	62
สมบัติเชิงกลและโครงสร้างจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์เฟสติกจากเถ้าลอยแคลเซียมสูงผสมผงเส้นใยบะซอลต์ จากฉนวนกันความร้อนเหลือทิ้ง Mechanical and Microstructural Properties of Geopolymer Paste from High Calcium Fly Ash Containing Basalt Fiber Powder from Waste Insulation อาดัม ศัพทมงคล, ไพฑูรย์ นาแซง, อำพล วงศ์ษา, วันโชค เครือหงษ์, วันชัย สะตะ และปริญญา จินดาประเสริฐ <i>Adam Saptamongkol, Phaithun Nasaeng, Ampol Wongsas, Wunchock Kroehong, Vanchai Sata, and Prinya Chindapasirt</i>	70

สารบัญ (ต่อ)
Table of Contents (Cont.)

บทความวิจัย (Research Articles)

การศึกษาผลกระทบของโมเดลการจัดสรรเวลา 8+8+8 ต่อประสิทธิภาพการทำงานและคุณภาพชีวิต:
กรณีศึกษาเปรียบเทียบระหว่างประเทศ 84

**The Impact of the 8+8+8 Time Allocation Model on Work Productivity and Quality of Life:
A Comparative International Case Study**

ชลธิศ เสือนุ่ม

Cholatis Suanoom

Development of Date Fruit (*Phoenix dactylifera* L.) Wine 100

*Kanokwan Tandee, Junjira Wanchana, Nunnapat Rahong, Rungarun Choocherd, Wannapa Chouypradit,
Chaiyot Sumritsakun, Sila Kittiwachana, and Sugunya Mahatheeranon*

การพัฒนาผลิตภัณฑ์สบู่ดินสอพองและสบู่ดินสอพองผสมสารสกัดดอกอัญชัน Development of Marl Soap and Marl Mixed with Butterfly Pea Flower Extract Soap

ปิยวรรณ พันสี^{1*} และพิมพ์มาดา คล้ายทองปาน¹

Piyawan Phansi^{1*} and Pimmada Klaythongpan¹

Received: June 29, 2024; Revised: August 8, 2024; Accepted: August 9, 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์สบู่กลีเซอรีนที่มีส่วนผสมของดินสอพองซึ่งเป็นวัตถุดิบที่ผลิตได้มากในจังหวัดลพบุรี และสารสกัดดอกอัญชัน (*Clitoria ternatea* L.) โดยศึกษาเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีของสบู่ที่มีส่วนประกอบต่างกันจำนวน 7 สูตร ผลการศึกษาพบว่า สบู่ไม่มีสิ่งแปลกปลอม ค่าสีของสบู่ที่เติมดินสอพองมีค่า L^* a^* และ b^* เท่ากับ 62.99 ± 0.40 ถึง 69.50 ± 0.29 , 0.26 ± 0.04 ถึง 1.41 ± 0.13 และ 8.05 ± 0.23 ถึง 11.73 ± 0.51 ตามลำดับ ค่าสีของสบู่เติมดินสอพองและสารสกัดดอกอัญชันมีค่า L^* a^* และ b^* เท่ากับ 44.78 ± 1.19 ถึง 55.34 ± 1.51 , -11.75 ± 0.01 ถึง -7.78 ± 0.52 และ -1.12 ± 0.28 ถึง 2.93 ± 0.60 ตามลำดับ ค่าสีของสบู่เติมดินสอพอง สารสกัดดอกอัญชัน และขมิ้นมีค่า L^* a^* และ b^* เท่ากับ 40.90 ± 0.28 , 6.65 ± 0.09 และ 27.27 ± 0.44 ตามลำดับ สบู่ทุกสูตรมีค่าปริมาตรฟอง 72.67 ± 1.53 ถึง 75.00 ± 2.18 มิลลิลิตร ความคงทนของฟอง 68.50 ± 1.32 ถึง 71.67 ± 2.52 มิลลิลิตร การสึกกร่อนร้อยละ 15.52 ± 1.78 ถึง 16.57 ± 1.75 และมีค่า pH 9.70 - 9.86 ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสบู่เปรียบเทียบกับสารมาตรฐานกรดแอสคอร์บิกเท่ากับ 2.16 ± 0.11 ถึง 4.65 ± 0.36 AAE/สบู่ 1 กรัม สบู่ที่เติมสารสกัดอัญชันและขมิ้นมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระสูงกว่าสบู่ชุดควบคุม ผลการประเมินความพึงพอใจต่อผลิตภัณฑ์สบู่และบรรจุภัณฑ์สบู่ของกลุ่มตัวอย่าง 20 คน อยู่ในระดับพึงพอใจมาก ดังนั้นสบู่ที่พัฒนาขึ้นจึงใช้เป็นผลิตภัณฑ์สบู่ต้นแบบแก่ชุมชนได้

คำสำคัญ : สบู่; ดินสอพอง; ดอกอัญชัน; สารสกัด; ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ

¹ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี

¹ Faculty of Science and Technology, Thepsatri Rajabhat University

* Corresponding Author, Tel. 08 3187 0971, E - mail: piyawan.p@lawasri.tru.ac.th

Abstract

This research aimed to develop glycerin soap products containing marl, a raw material abundantly produced in Lopburi province, and butterfly pea flower extract (*Clitoria ternatea* L.). The physical and chemical properties of seven different soap formulations were studied and compared. The results of the study indicated that the soap has no foreign substances. The color values expressed as L^* , a^* and b^* of the marl soap ranged from 62.99 ± 0.40 to 69.50 ± 0.29 , 0.26 ± 0.04 to 1.41 ± 0.13 , and 8.05 ± 0.23 to 11.73 ± 0.51 , respectively. For the soap containing marl and butterfly pea extract, the L^* , a^* , and b^* values ranged from 44.78 ± 1.19 to 55.34 ± 1.51 , -11.75 ± 0.01 to -7.78 ± 0.52 , and 1.12 ± 0.28 to 2.93 ± 0.60 , respectively. The color values for the soap containing marl, butterfly pea, and turmeric extracts, the L^* , a^* , and b^* values were 40.90 ± 0.28 , 6.65 ± 0.09 , and 27.27 ± 0.44 , respectively. All soap formulas exhibited bubble volume values ranging from 72.67 ± 1.53 to 75.00 ± 2.18 mL, bubble durability from 68.50 ± 1.32 to 71.67 ± 2.52 mL, erosion percentage from 15.52 ± 1.78 to 16.57 ± 1.75 , and pH values between 9.70 to 9.86. The antioxidant activity of the soap, compared to the ascorbic acid standard, ranged from 2.16 ± 0.11 to 4.65 ± 0.36 AAE/gram of soap. Soap with added butterfly pea extract and turmeric demonstrated higher antioxidant activity than the control soap. The satisfaction assessment results for the soap products and packaging among a sample of 20 people were very satisfactory. Therefore, the developed soap can be used as a prototype product for the community.

Keywords: Soap; Marl; Butterfly Pea; Extract; Antioxidant

บทนำ

สบู่เป็นผลิตภัณฑ์ที่นิยมใช้ในการทำความสะอาดร่างกายในชีวิตประจำวัน ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างไขมันหรือเกลือของกรดไขมันกับด่าง (Saponification) สบู่มีคุณสมบัติสามารถละลายได้ในน้ำและน้ำมัน ดังนั้นจึงสามารถใช้สบู่ในการชำระสิ่งสกปรกออกจากผิวหนังได้ และการล้างมือด้วยสบู่ยังช่วยลดการแพร่กระจายของไวรัสและแบคทีเรียซึ่งช่วยป้องกันไวรัสโคโรนา 2019 (Covid-19) และโรคทางเดินอาหาร [1] ดังนั้นผลิตภัณฑ์สบู่จึงเป็นผลิตภัณฑ์ที่จำเป็นสำหรับทั้งใช้ในครัวเรือน และสถานที่อื่น ๆ ที่มีผู้คนจำนวนมาก เช่น โรงเรียน สำนักงาน ร้านอาหาร ตลาด ห้างสรรพสินค้า ห้องน้ำสาธารณะ เป็นต้น [2] นอกจากนี้ในกระบวนการผลิตสบู่อาจมีการเติมส่วนประกอบต่าง ๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของสบู่และความหลากหลายของผลิตภัณฑ์ เช่น การเติมวิตามิน น้ำมันหอมระเหย สารสกัดสมุนไพร เป็นต้น ทำให้ได้สบู่ที่มีคุณสมบัติต่าง ๆ เช่น สบู่บำรุงผิว สบู่สำหรับผิวแพ้ง่าย สบู่ลดสิว และสบู่ต้านอนุมูลอิสระ [1], [3] - [4]

ดินสอพอง (White Clay) หรือดินมาร์ล (Marl) เกิดจากการผุพังของหินปูนและมีการสะสมตัวใหม่ในสภาพแวดล้อมที่เป็นที่ลุ่ม มีองค์ประกอบที่สำคัญ คือ แคลเซียมคาร์บอเนต และมีส่วนประกอบอื่น ๆ เช่น ซิลิกอนออกไซด์ อะลูมิเนียมออกไซด์ และเหล็กออกไซด์ เป็นต้น [5] - [6] ในประเทศไทยมีแหล่งผลิตดินสอพองที่สำคัญอยู่ที่ตำบลทะเลชุบศร อำเภอเมืองลพบุรี จังหวัดลพบุรี ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำดินมาร์ลมาบดร่อนผสมน้ำแล้วกรองให้สะอาด [5], [7] - [8] ปัจจุบันมีการนำดินสอพองมาใช้ประโยชน์หลากหลายได้แก่ ใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการผลิตไข่เค็มเพื่อดูดซับความเค็มของไข่เค็ม [7] ใช้ในการสร้างสรรค์งานทัศนศิลป์ [9] และใช้เป็นส่วนผสมเครื่องหอมและเครื่องสำอาง เช่น ผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดหน้าอายแชโดว์ แชมพู ครีมหาผิว ผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดผิว เนื่องจากดินสอพองมีสรรพคุณทางยา คือ สามารถแก้เม็ดผดผื่นคัน ระบุเหงื่อ ดับพิษร้อน และช่วยขัดผิว ทำให้ผิวพรรณสดใส [10] - [12] ดังนั้น

งานวิจัยนี้จึงสนใจพัฒนาผลิตภัณฑ์สบู่ที่มีส่วนผสมของดินสอพองและเติมสมุนไพรที่สามารถหาได้ง่ายในท้องถิ่น คือ ดอกอัญชัน (*Clitoria ternatea* L.) ซึ่งอัญชันเป็นพืชที่สามารถใช้ประโยชน์ในเชิงสมุนไพรอย่างหลากหลาย และยังสามารถปลูกได้ทุกพื้นที่ของประเทศไทย ในดอกอัญชันมีสารแอนโทไซยานิน (Anthocyanin) ซึ่งเป็นสารที่ให้สีแดงและสีน้ำเงิน มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant) ช่วยชะลอการเกิดริ้วรอย ทำให้ผิวดูอ่อนเยาว์ ลดการอักเสบในผิวหนัง และลดการเกิดสิว [13] - [14] และยังมีคุณสมบัติเป็นอินดิเคเตอร์ (Indicator) สามารถเปลี่ยนแปลงสีเมื่ออยู่ในสารละลายที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง หรือ pH ต่างกัน [15] ซึ่งสารแอนโทไซยานินนี้สามารถใช้เป็นส่วนผสมของเครื่องสำอางได้ เช่น ใช้เป็นส่วนผสมของสบู่ [16] เป็นส่วนผสมของบลัชออน (Blush On) เพื่อทำให้เกิดเฉดสีแดงซึ่งใช้สำหรับแต่งสีแก้ม [17] นอกจากนี้ยังมีสูตรสบู่ที่เติมผงขมิ้น (*Curcuma longa* L.) เนื่องจากในขมิ้นมีสารกลุ่มเคอร์คิวมินอยด์ที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและช่วยบำรุงผิวพรรณ [18] และยังเป็น การเพิ่มความหลากหลายของสีสบู่อีกด้วย

ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ การพัฒนาผลิตภัณฑ์สบู่กลีเซอรีนที่เติมดินสอพอง และเติมสมุนไพร เพื่อเพิ่มฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสบู่ ได้แก่ สารสกัดดอกอัญชัน และผงขมิ้น เพื่อเพิ่มคุณสมบัติในการบำรุงผิวของสบู่ โดยสูตรสบู่ประกอบด้วย สบู่มีส่วนผสมของดินสอพอง สบู่ที่มีการเติมดินสอพองและสารสกัดดอกอัญชัน และสบู่ที่มีการเติมดินสอพอง สารสกัดดอกอัญชัน และผงขมิ้น แล้วศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของสบู่ที่พัฒนาขึ้น และประเมินความพึงพอใจต่อผลิตภัณฑ์สบู่และบรรจุภัณฑ์สบู่ เพื่อผลิตสบู่ที่มีคุณภาพเอกลักษณ์ของชุมชน สามารถผลิตใช้ในครัวเรือน และสามารถต่อยอดสร้างรายได้ให้แก่ชุมชนในอนาคต

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมดินสอพองและสารสกัดดอกอัญชัน

ดินสอพอง ซื้อจากร้านจำหน่ายดินสอพอง อำเภอเมืองลพบุรี จังหวัดลพบุรี โดยนำมาบดเป็นผงดอกอัญชัน ซื้อจากเกษตรกรผู้ปลูกดอกอัญชันในจังหวัดลพบุรี สารสกัดดอกอัญชันเตรียมโดยชั่งดอกอัญชันสด 10 กรัม สกัดด้วยน้ำปราศจากไอออน 150 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส 15 นาที แล้วกรองด้วยผ้าขาวบางและกระดาษกรอง (Whatman no. 1, สหราชอาณาจักร) ดังรูปที่ 1



(ก) ดินสอพอง



(ข) สารสกัดดอกอัญชัน

รูปที่ 1 ส่วนผสมที่ใช้เติมในสบู่

2. วิธีการทำสบู่

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาเปรียบเทียบสบู่ทั้งหมด 7 สูตร ซึ่งแต่ละสูตรมีส่วนประกอบของเบสกลีเซอรีนชนิดใส 25 กรัม (น้ำหนักโดยเฉลี่ย 25.27 ± 0.23 กรัม) ดังตารางที่ 1 ประกอบด้วย สบู่ชุดควบคุม (M1) สบู่เติมดินสอพอง (M2 - M3) สบู่เติมดินสอพองและสารสกัดดอกอัญชัน (M4 - M6) และสบู่เติมดินสอพอง สารสกัดดอกอัญชัน และผงขมิ้น (M7) ซึ่งผงขมิ้นซื้อจากร้านจำหน่ายในจังหวัดลพบุรี การทำสบู่เริ่มจากละลายเบสสบู่กลีเซอรีนด้วยไฟอ่อน ๆ แล้วเติมส่วนผสมที่เตรียมไว้ คนให้เป็นเนื้อเดียวกันแล้วเทใส่แม่พิมพ์สบู่แบบซิลิโคนรูปสี่เหลี่ยม ขอบมน ขนาดกว้าง 3.5 เซนติเมตร ยาว 5.8 เซนติเมตร ลึก 1.8 เซนติเมตร และแกะออกจากแม่พิมพ์เมื่อสบู่แห้ง

ตารางที่ 1 ส่วนประกอบของสบู่

สูตรสบู่	เบสกลีเซอรีน (กรัม)	ดินสอพอง (กรัม)	สารสกัดดอกอัญชัน (มิลลิลิตร)	ผงขมิ้น (กรัม)
M1	25	-	-	-
M2	25	1	-	-
M3	25	2	-	-
M4	25	1	1	-
M5	25	1	2	-
M6	25	1	3	-
M7	25	1	2	0.05

3. การวิเคราะห์คุณสมบัติสบู่

3.1 การวิเคราะห์สิ่งแปลกปลอมโดยการตรวจพินิจ

การวิเคราะห์สิ่งแปลกปลอมที่ทำโดยการตรวจพินิจด้วยสายตารอบ ๆ ผิวของสบู่เพื่อวิเคราะห์สิ่งแปลกปลอมที่ไม่ใช่ส่วนประกอบที่ใช้ทำสบู่ [19] และใช้กล้องสเตอริโอไมโครสโคป (MDX50, Nikon, Japan) [20] - [21]

3.2 การวิเคราะห์ค่าสี

วิเคราะห์ค่าสีของสบู่ทั้งก้อนด้วยเครื่องวัดค่าสี (HunterLab, ColorFlex EZ, สหรัฐอเมริกา)

3.3 การวิเคราะห์ปริมาณฟองและความคงทนของฟอง

ละลายสบู่ 1 กรัม ในน้ำปราศจากไอออน 20 มิลลิลิตร แล้วเทสารละลายสบู่ลงในกระบอกตวงขนาด 100 มิลลิลิตร ปิดปากกระบอกตวงด้วยพาราฟิล์ม เขย่าขึ้นลง 40 ครั้ง บันทึกปริมาณฟองสบู่ และทิ้งไว้ 5 นาที ทำการทดลอง 3 ซ้ำ [20] - [23] คำนวณปริมาณฟองสบู่และความคงทนของฟองสบู่ ดังสมการที่ (1) - (2)

$$\text{ปริมาณฟองสบู่ (มิลลิลิตร)} = \text{ปริมาณฟองสบู่ (หลังเขย่าทันที)} - \text{ปริมาตรน้ำ} \quad (1)$$

$$\text{ความคงทนฟองสบู่ (มิลลิลิตร)} = \text{ปริมาณฟองสบู่ (หลังเขย่า 5 นาที)} - \text{ปริมาตรน้ำ} \quad (2)$$

3.4 การวิเคราะห์ค่าสีกร่อน

นำสบู่ 10 กรัม แช่ในน้ำอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 นาที แล้วนำสบู่มาหมุนบริเวณบนฝ่ามือ 40 รอบ หลังจากนั้นล้างฟองทิ้งด้วยน้ำสะอาด 1 ครั้ง ทำซ้ำอีก 3 ครั้ง จากขั้นตอนแช่สบู่ในน้ำจนถึงการล้างฟองสบู่ แล้วชั่งน้ำหนักสบู่ [20] - [23] คำนวณค่าร้อยละการสีกร่อน ดังสมการที่ (3)

$$\text{ร้อยละสีกร่อน} = [(W_{\text{ก่อนทดสอบ}} - W_{\text{หลังทดสอบ}}) / W_{\text{ก่อนทดสอบ}}] \times 100 \quad (3)$$

โดยที่ W = น้ำหนักของสบู่ (กรัม)

3.5 การวิเคราะห์ค่ากรด-ด่าง

เตรียมสารละลายสบู่ 1 กรัม ในน้ำปราศจากไอออน 100 มิลลิลิตร แล้ววัดค่ากรด-ด่างด้วยเครื่องพีเอชมิเตอร์

3.6 การวิเคราะห์ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสบู่

วิเคราะห์ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธีดีพีพีเอช (DPPH) สกัดสบู่ 2.5 กรัม ด้วยเอทานอล 10 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นกรองสารละลายด้วยแผ่นเยื่อกรองขนาดรูพรุน 0.45 ไมโครเมตร หลังจากนั้นนำสารละลายตัวอย่างสบู่หรือสารละลายมาตรฐานกรดแอสคอร์บิกทำปฏิกิริยากับสารละลาย

DPPH (2,2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl) ความเข้มข้น 1 มิลลิโมลต่อลิตร เก็บสารละลายในที่มืด 30 นาที แล้ววัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 517 นาโนเมตร ด้วยเครื่องอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Thermo Scientific, Evolution 201 UV-Visible Spectrophotometer, สหรัฐอเมริกา) เปรียบเทียบค่าที่วัดได้กับกราฟมาตรฐานการต้านอนุมูลอิสระของกรดแอสคอร์บิก และคำนวณฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระเป็นค่า Ascorbic Acid Equivalents (AAE) ค่อน้ำหนักสบู่ 1 กรัม [20] - [21], [24]

3.7 การประเมินความพึงพอใจต่อผลิตภัณฑ์สบู่และบรรจุภัณฑ์สบู่

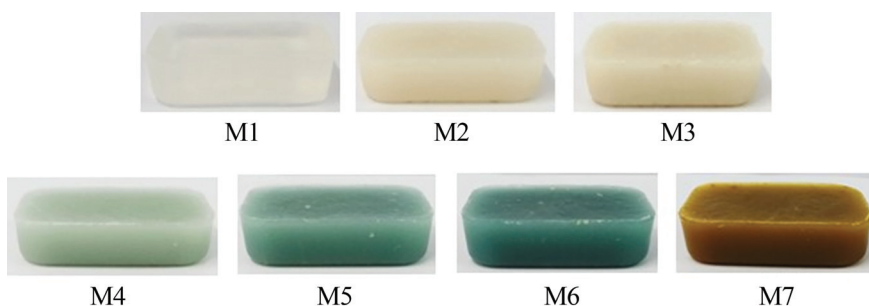
งานวิจัยนี้ทำการประเมินความพึงพอใจต่อผลิตภัณฑ์สบู่และต้นแบบบรรจุภัณฑ์สบู่ โดยใช้กลุ่มตัวอย่างผู้ประเมินกลุ่มเกษตรกรและนักศึกษาในอำเภอเมืองลพบุรี จังหวัดลพบุรี ซึ่งเป็นจำนวน 20 คน ประเด็นการประเมิน ได้แก่ สี กลิ่น ปริมาณฟอง ประสิทธิภาพการชะล้างสิ่งสกปรก การไม่ระคายเคือง ซึ่งทดสอบโดยใช้สบู่ล้างมือ [20] - [21] ความสวยงามของบรรจุภัณฑ์ และความสะดวกในการพกพาของบรรจุภัณฑ์ โดยใช้เกณฑ์วิเคราะห์คะแนนระดับความพึงพอใจ ดังนี้

- 5 คะแนน = ระดับความพึงพอใจมากที่สุด
- 4 คะแนน = ระดับความพึงพอใจมาก
- 3 คะแนน = ระดับความพึงพอใจปานกลาง
- 2 คะแนน = ระดับความพึงพอใจน้อย
- 1 คะแนน = ระดับความพึงพอใจน้อยที่สุด

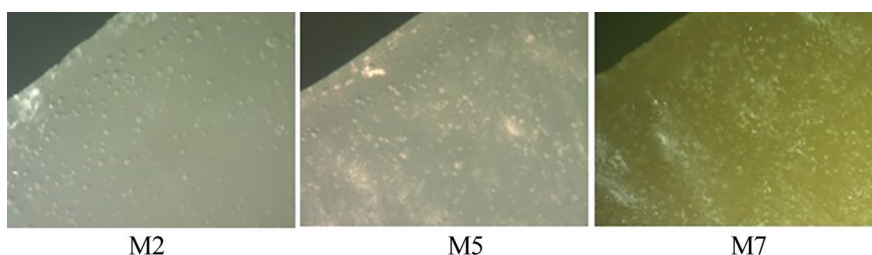
ผลการทดลองและอภิปรายผล

1. ผลการวิเคราะห์สิ่งแปลกปลอมโดยการตรวจพินิจ

สบู่ที่ได้จากการทำสบู่ตามส่วนผสมในตารางที่ 1 มีลักษณะดังรูปที่ 2 สบู่ที่มีการเติมดินสอพองอย่างเดียวจะมีสีขาวขุ่น สบู่ที่มีการเติมดินสอพอง สารสกัดดอกอัญชัน และผงขมิ้นจะได้เฉดสีที่แตกต่างกัน เมื่อตรวจพินิจสิ่งแปลกปลอมด้วยสายตา และจากการส่องและบันทึกภาพด้วยกล้องสเตอริโอไมโครสโคป กำลังขยาย 10 เท่า (รูปที่ 3) พบว่าสบู่ทั้ง 7 สูตร ไม่มีสิ่งแปลกปลอมที่ไม่ใช่ส่วนประกอบของสบู่ ซึ่งเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน สบู่ก้อนกลีเซอรีน มผช. 665/2553 [19]



รูปที่ 2 ลักษณะสบู่แต่ละสูตร



รูปที่ 3 ลักษณะสบู่จากการถ่ายด้วยกล้องสเตอริโอไมโครสโคปกำลังขยาย 10 เท่า

2. ผลการวิเคราะห์ค่าสี

จากการวัดค่าสีของสับู่ พบว่าค่าสีของ L^* ซึ่งเป็นค่าความสว่างมีค่าอยู่ระหว่าง 33.00 ± 0.79 ถึง 69.50 ± 0.29 สับู่ที่มีการเติมดินสอพองซึ่งมีลักษณะเป็นผงสีขาวเช่นเดียวกันจะมีค่า L^* เพิ่มมากขึ้นเมื่อมีการเติมดินสอพองมากขึ้น สับู่ที่มีความสว่างมากที่สุดคือ สูตรสับู่ M3 และสับู่ที่มีการเติมดินสอพอง 1 กรัม และสารสกัดดอกอัญชัน และผงขมิ้น (M4 - M7) จะมีค่า L^* ลดลงเมื่อเทียบกับสับู่ที่มีการเติมดินสอพอง 1 กรัม (M2) ส่วนค่า a^* ของสับู่มีค่าอยู่ระหว่าง -11.75 ± 0.01 ถึง 6.65 ± 0.09 สับู่ดินสอพองที่เติมสารสกัดดอกอัญชัน ปริมาณที่มากขึ้นจะมีโทนสีเขียวมากขึ้น (M4 - M6) และสับู่ที่เติมทั้งดินสอพอง สารสกัดดอกอัญชัน และผงขมิ้น (M7) ทำให้สับู่มีโทนสีแดง และค่า b^* มีค่าอยู่ระหว่าง -4.94 ± 0.35 ถึง 27.27 ± 0.44 สับู่ที่มีการเติมดินสอพอง อย่างเดียวมีสีโทนนีเหลืองมากขึ้นเมื่อเติมดินสอพองมากขึ้น และค่า b^* ลดลงเมื่อเติมสารสกัดอัญชัน ส่วนสับู่สูตร M7 มีการเติมผงขมิ้นจึงมีโทนนีเหลืองเข้ม และมีค่า b^* มากกว่าสับู่ทุกสูตร ในขณะที่สับู่ชุดควบคุม (M1) มีค่า L^* a^* และ b^* เท่ากับ 33.00 ± 0.79 , -0.35 ± 0.05 และ -4.94 ± 0.35 ตามลำดับ (ตารางที่ 2)

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ค่าสีของสับู่

สูตรสับู่	ค่าสีของสับู่		
	$L^* \pm S.D.$	$a^* \pm S.D.$	$b^* \pm S.D.$
M1	33.00 ± 0.79	-0.35 ± 0.05	-4.94 ± 0.35
M2	62.99 ± 0.40	0.26 ± 0.04	8.05 ± 0.23
M3	69.50 ± 0.29	1.41 ± 0.13	11.73 ± 0.51
M4	55.34 ± 1.51	-7.78 ± 0.52	2.93 ± 0.60
M5	46.63 ± 1.03	-10.45 ± 0.47	0.34 ± 0.60
M6	44.78 ± 1.19	-11.75 ± 0.01	-1.12 ± 0.28
M7	40.90 ± 0.28	6.65 ± 0.09	27.27 ± 0.44

ข้อมูลแสดงค่าเฉลี่ย \pm S.D. (n = 3)

3. ผลการวิเคราะห์ปริมาตรฟองและความคงทนของฟอง

ผลการวิเคราะห์ปริมาตรฟองและความคงทนของฟองสับู่ทั้ง 7 สูตร มีค่าใกล้เคียงกัน โดยปริมาตรฟองมีค่าระหว่าง 72.67 ± 1.53 ถึง 75.00 ± 2.18 มิลลิลิตร และค่าความคงทนของฟองอยู่ระหว่าง 68.50 ± 1.32 ถึง 71.67 ± 2.52 มิลลิลิตร ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ดี และมีความสอดคล้องกับงานวิจัยอื่น ๆ เช่น รายงานวิจัยผลิตภัณฑ์สับู่ถ่านกะลามะพร้าวร่วมกับว่านตาลเดี่ยวและย่านางมีค่าปริมาตรฟอง $68.33 - 80.67$ มิลลิลิตร และความคงทนของฟองมีค่า $64.67 - 75.00$ มิลลิลิตร [22] และรายงานวิจัยผลิตภัณฑ์สับู่สารสกัดใบหม่อนและสับู่สารสกัดชาใบหม่อนผสมขมิ้น มีค่าปริมาตรฟอง $66.33 - 76.67$ และความคงทนของฟอง $62.33 - 70.67$ [20]

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ปริมาตรฟอง ความคงทนของฟอง การลืกร่อน และค่า pH

สูตรสับู่	ปริมาตรฟอง (มิลลิลิตร) \pm S.D.	ความคงทนของฟอง (มิลลิลิตร) \pm S.D.	การลืกร่อน (ร้อยละ) \pm S.D.	pH \pm S.D.
M1	72.67 ± 1.53	68.50 ± 1.32	15.52 ± 1.78	9.70 ± 0.06
M2	73.33 ± 2.31	69.83 ± 1.76	15.66 ± 1.14	9.86 ± 0.02
M3	74.17 ± 1.15	70.33 ± 2.02	15.87 ± 1.69	9.73 ± 0.01
M4	74.50 ± 1.32	70.67 ± 1.04	15.99 ± 0.86	9.76 ± 0.03
M5	74.67 ± 1.53	70.83 ± 1.26	16.10 ± 1.01	9.86 ± 0.11

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ปริมาณฟอง ความคงทนของฟอง การสีกร่อน และค่า pH (ต่อ)

สูตรสบู่	ปริมาณฟอง (มิลลิลิตร) \pm S.D.	ความคงทนของฟอง (มิลลิลิตร) \pm S.D.	การสีกร่อน (ร้อยละ) \pm S.D.	pH \pm S.D.
M6	75.00 \pm 2.18	71.67 \pm 2.52	16.57 \pm 1.75	9.85 \pm 0.02
M7	74.50 \pm 1.32	70.50 \pm 1.80	15.85 \pm 1.39	9.83 \pm 0.13

ข้อมูลแสดงค่าเฉลี่ย \pm S.D. (n = 3)

4. ผลการวิเคราะห์ค่าสีกร่อน

ค่าร้อยละการสีกร่อนของสบู่ทุกสูตรมีค่าระหว่าง 15.52 \pm 1.78 ถึง 16.57 \pm 1.75 ดังตารางที่ 3 ซึ่งใกล้เคียงกับรายงานผลิตภัณฑ์สบู่สารสกัดใบหม่อนและสบู่สารสกัดชาใบหม่อนผสมขมิ้นมีค่าการสีกร่อนร้อยละ 23.09 - 24.90 ซึ่งใช้เบสสบู่กลีเซอรีนชนิดไฮดรอกไซด์เช่นเดียวกับงานวิจัยนี้ [20]

5. ผลการวิเคราะห์ค่ากรด-ด่าง

ค่ากรด-ด่าง หรือค่า pH ของสบู่ที่มีการเติมดินสอพอง สารสกัดดอกอัญชัน และผงขมิ้นมีค่า pH ระหว่าง 9.73 \pm 0.01 ถึง 9.86 \pm 0.11 ในขณะที่เบสกลีเซอรีน (M1) มีค่า pH เท่ากับ 9.70 \pm 0.06 ดังนั้นสบู่ทุกสูตรอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน มพช. 94/2552 และสอดคล้องกับงานวิจัยสบู่ก้อนอื่น ๆ มีค่า pH ระหว่าง 8 - 10 [20], [23], [25] - [26]

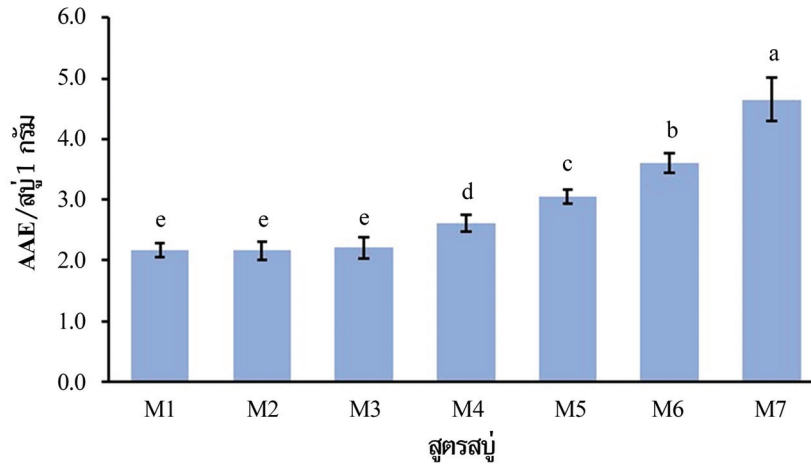
6. ผลการวิเคราะห์ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสบู่

จากการศึกษาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสบู่ทุกสูตรด้วยวิธีดีพีพีเอช (DPPH) และเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานกรดแอสคอร์บิกพบว่ามีค่าระหว่าง 2.16 \pm 0.11 ถึง 4.65 \pm 0.36 AAE/สบู่ 1 กรัม และจากการวิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติโดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA Analysis) เปรียบเทียบสิ่งทดลองทั้งหมดที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และวิเคราะห์ความแตกต่างด้วยวิธี Duncan's Test (SPSS Statistics 25, IBM, สหรัฐอเมริกา) พบว่าสบู่สูตร M4 - M5 มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) โดยสบู่ที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระสูงที่สุดคือ สูตรสบู่ M7 ซึ่งมีการเติมทั้งดินสอพอง สารสกัดดอกอัญชัน และขมิ้น มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ 4.65 \pm 0.36 AAE/สบู่ 1 กรัม รองลงมาคือ สบู่สูตร M6, M5 และ M4 มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระเท่ากับ 3.61 \pm 0.16, 3.05 \pm 0.12 และ 2.61 \pm 0.14 AAE/สบู่ 1 กรัม ตามลำดับ ในขณะที่สูตรสบู่ M1 - M3 ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระน้อยที่สุด มีค่าระหว่าง 2.16 \pm 0.11 ถึง 2.21 \pm 0.17 AAE/สบู่ 1 กรัม และทั้ง 3 สูตรมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) ดังรูปที่ 4 ดังนั้นการเติมสารสกัดดอกอัญชันมากขึ้นจะทำให้ได้สบู่ที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระสูงขึ้น (M4 - M6) ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระสบู่สูตร M5 ซึ่งมีการเติมสารสกัดดอกอัญชัน 2 มิลลิลิตร มีค่ามากกว่าฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระสบู่สูตร M7 ซึ่งเติมสารสกัดดอกอัญชัน 2 มิลลิลิตร และผงขมิ้น 0.05 กรัม ดังนั้นการเติมผงขมิ้นทำให้ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสบู่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับการเติมสารสกัดดอกอัญชันอย่างเดียว เนื่องจากฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระมาจากทั้งสารสกัดดอกอัญชันที่อุดมไปด้วยสารแอนโทไซยานิน [13] และในขมิ้นชั้นมีสารเคอร์คิวมินนอยด์ [18]

7. ผลการประเมินความพึงพอใจต่อผลิตภัณฑ์สบู่และบรรจุภัณฑ์สบู่

การประเมินความพึงพอใจต่อผลิตภัณฑ์สบู่และบรรจุภัณฑ์สบู่ใช้ตัวแทนสบู่ 3 สูตร ที่มีส่วนผสมต่างกัน ได้แก่ สบู่ที่เติมดินสอพองอย่างเดียว (M2) สบู่เติมดินสอพองและสารสกัดดอกอัญชัน (M5) และสบู่เติมดินสอพอง สารสกัดดอกอัญชัน และขมิ้น (M7) และมีต้นแบบบรรจุภัณฑ์เป็นกล่องสี่เหลี่ยม ดังรูปที่ 5 ผลการประเมินจากผู้ประเมินจำนวน 20 คน พบว่าคะแนนความพึงพอใจสีของสบู่อยู่ระหว่าง 4.55 \pm 0.51 ถึง 4.75 \pm 0.44 คะแนน ความพึงพอใจกลิ่นอยู่ระหว่าง 4.20 \pm 0.62 ถึง 4.30 \pm 0.47 คะแนน คะแนนความพึงพอใจปริมาณฟองอยู่ระหว่าง 4.50 \pm 0.51 ถึง 4.55 \pm 0.60 คะแนน คะแนนความพึงพอใจประสิทธิภาพการชะล้างสิ่งสกปรก 4.65 \pm 0.49 ถึง 4.70 \pm 0.47 คะแนน และคะแนนการไม่ระคายเคืองมีค่าเฉลี่ย 4.90 \pm 0.31 ซึ่งคะแนนความพึงพอใจ

ต่อผลิตภัณฑ์สบู่ทั้งหมดอยู่ในระดับพึงพอใจมาก (ตารางที่ 4) ส่วนผลการประเมินความพึงพอใจต่อบรรจุภัณฑ์สบู่ มีคะแนนความพึงพอใจต่อความสวยงามของบรรจุภัณฑ์ระหว่าง 4.32 ± 0.48 ถึง 4.55 ± 0.51 คะแนน และคะแนนความสะดวกในการพกพาของบรรจุภัณฑ์อยู่ระหว่าง 4.75 ± 0.44 ถึง 4.80 ± 0.41 อยู่ในระดับพึงพอใจมาก



รูปที่ 4 ค่าฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสบู่ โดย ^{a-c} แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของค่าเฉลี่ย (n = 3)



รูปที่ 5 ต้นแบบบรรจุภัณฑ์สบู่

ตารางที่ 4 คะแนนพึงพอใจต่อผลิตภัณฑ์สบู่และต้นแบบบรรจุภัณฑ์

ประเด็นการประเมิน	M2	M5	M7
	คะแนน±S.D.	คะแนน±S.D.	คะแนน±S.D.
สี	4.55±0.51	4.65±0.49	4.75±0.44
กลิ่น	4.20±0.62	4.30±0.47	4.25±0.55
ปริมาณฟอง	4.50±0.51	4.55±0.60	4.55±0.51
ประสิทธิภาพการชะล้างสิ่งสกปรก	4.65±0.49	4.70±0.47	4.65±0.59
การไม่ระคายเคือง	4.90±0.31	4.90±0.31	4.90±0.31
ความสวยงามของบรรจุภัณฑ์	4.32±0.48	4.50±0.51	4.55±0.51
ความสะดวกในการพกพาของบรรจุภัณฑ์	4.80±0.41	4.79±0.42	4.75±0.44

ข้อมูลแสดงค่าเฉลี่ย±S.D. (n = 20)

สรุปผลการทดลอง

ผลิตภัณฑ์สบู่กลีเซอรินทุกสูตร ทั้งสูตรที่มีการเติมดินสอพองอย่างเดียว สูตรเติมดินสอพองและสารสกัดดอกอัญชัน และสบู่สูตรเติมดินสอพอง สารสกัดดอกอัญชันและผงขมิ้น มีลักษณะเจดสีที่แตกต่างกัน สบู่ไม่มีสิ่งแปลกปลอมที่ไม่ใช่ส่วนประกอบของสบู่ ค่าปริมาตรฟอง ค่าความคงทนของฟอง ค่าการสึกกร่อน และค่าความเป็นกรด-ด่างของสบู่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานสบู่ก้อน จากการเปรียบเทียบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสบู่โดยใช้ Duncan's Test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 พบว่าสบู่ที่มีการเติมสารสกัดอัญชันและผงขมิ้นมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระสูงกว่าสบู่ชุดควบคุม และสบู่ที่มีการเติมดินสอพองอย่างเดียว และการเติมสารสกัดดอกอัญชันในปริมาณมากขึ้นจะทำให้ได้สบู่ที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระสูงขึ้น โดยสูตรสบู่ที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระสูงสุดคือ สูตรสบู่ M7 ที่มีส่วนผสมดินสอพอง สารสกัดดอกอัญชัน และขมิ้น รองลงมาคือ สบู่สูตร M6 M5 และ M4 ที่เติมดินสอพองปริมาณเท่ากัน และเติมสารสกัดดอกอัญชันปริมาตร 3 2 และ 1 มิลลิลิตร ตามลำดับ จากการประเมินความพึงพอใจต่อผลิตภัณฑ์สบู่ และต้นแบบบรรจุภัณฑ์สบู่ โดยมีประเด็นการประเมินความพึงพอใจต่อผลิตภัณฑ์สบู่ ได้แก่ สี กลิ่น ปริมาตรฟอง ประสิทธิภาพการชะล้างสิ่งสกปรก และการไม่ระคายเคือง และประเด็นการประเมินความพึงพอใจต่อบรรจุภัณฑ์สบู่ ได้แก่ ความสวยงามของบรรจุภัณฑ์ และความสะดวกในการพกพาของบรรจุภัณฑ์ ผลการประเมินพบว่าสบู่ทุกสูตรมีคะแนนความพึงพอใจต่อผลิตภัณฑ์สบู่และบรรจุภัณฑ์สบู่อยู่ในระดับพึงพอใจมาก ดังนั้นผลิตภัณฑ์สบู่ที่พัฒนาขึ้นจึงสามารถใช้เป็นต้นแบบผลิตภัณฑ์สบู่ของชุมชน และยังเป็นการสร้างมูลค่าเพิ่มให้แก่สมุนไพรและดินสอพอง ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่ผลิตได้มากในชุมชนท้องถิ่นอีกด้วย

ข้อเสนอแนะในการพัฒนางานวิจัยในอนาคต

องค์ความรู้ที่สามารถพัฒนาต่อยอดได้โดยอาจมีการเพิ่มส่วนผสมอื่น ๆ เพิ่มเติม เช่น ตัวยาหรือสารสกัดสมุนไพรอื่น ๆ เพื่อเพิ่มฤทธิ์ทางยาหรือคุณสมบัติการบำรุงผิวของสบู่ รวมถึงการศึกษาอายุการเก็บรักษา (Shelf-Life) สบู่

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณทุนสนับสนุนวิจัยจากมหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี (ปีงบประมาณ 2567) ที่ให้แก่ ผศ.ดร. ปิยวรรณ พันสี และขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และศูนย์วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และเครื่องมือในการทำวิจัย

References

- [1] Chirani, M. R., Kowsari, E., Teymourian, T., and Ramakrishna, S. (2021). Environmental Impact of Increased Soap Consumption During COVID-19 Pandemic: Biodegradable Soap Production and Sustainable Packaging. *Science of The Total Environment*. Vol. 796, 149013, pp. 1-11. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.149013
- [2] Chamchoi, N., Bulsathaporn, A., and Bunyagidj, C. (2021). COVID-19: Prevention Under Environmental Health Perspective. *Journal of Health Science*. Vol. 30, No. Supplement 2, pp. 376-388 (in Thai)
- [3] Wisungre, S., Chumanee, S., Duengngai, K., Deechan, S., Paratang, P., Mechai, N., Klumkool, S., and Srikaew, N. (2022). Development of Herbal Liquid Soap from *Areca catechu* L. Extract Toward the Community Product Standard. *Journal of Science and Technology Buriram Rajabhat University*. Vol. 7, No. 1, pp. 47-58 (in Thai)

- [4] Thitiwongsawet, P., Wongjanla, S., and Jandawong, W. (2016). Antibacterial Soaps Containing the Crude Extracts of *Phyllanthus Emblica* Linn. Fruits. **Srinakharinwirot University Journal of Sciences and Technology**. Vol. 8, No. 15, pp. 27-39 (in Thai)
- [5] Janwitayanuchit, W., Wongtrakul, P., Ponsim, P., Ngamurulert, S., Semsri, S., and Janwitayanuchit, I. (2023). Physicochemical Properties, Cytotoxicity, and Marl Sterilization. **Huachiew Chalermprakiet Science and Technology Journal**. Vol. 9, No. 1, pp. 109-118 (in Thai)
- [6] Al-hokabi, A., Hasan, M., Amran, M., Fediuk, R., Vatin, N. I., and Klyuev, S. (2021). Improving the Early Properties of Treated Soft Kaolin Clay with Palm Oil Fuel Ash and Gypsum. **Sustainability**. Vol. 13, 10910, pp. 1-18. DOI: 10.3390/su131910910
- [7] Puangpejara, K., Kamnuanchai, S., Srikanjanarak, S., and Phermpiam, P. (2020). The Development of Pandanus Salted Egg Product with White Clay Filler of Occupation Group at Thanonyai Sub-district, Mueang District, Lop Buri Province. **Rajabhat Chiang Mai Research Journal**. Vol. 21, No. 2, pp. 167-183 (in Thai)
- [8] Sa-adsin, W. and Pantian, S. (2022). Glass Preparation with Marly Limestone from Lopburi. **Journal of Science and Technology CRRU**. Vol. 1, No. 2, pp. 68-72 (in Thai)
- [9] Charoensup, A., Jangsuwan, N., and Chayawat, J. (2020). The Application of Marl Clay in Thai Craftmanship. **Journal of Research and Development Institute, Rajabhat Maha Sarakham University**. Vol. 7, No. 2, pp. 599-612 (in Thai)
- [10] Gamoudi, S. and Srasra, E. (2018). Green Synthesis and Characterization of Colored Tunisian Clays: Cosmetic Applications. **Applied Clay Science**. Vol. 165, pp. 17-21. DOI: 10.1016/j.clay.2018.07.042
- [11] Abu Hanifah, N. Z. H., Hashim, S., Hassan, H. J., Fahmi, M. R., Sanusi, M. S. M., and Othman, N. K. (2023). Radiation Hazard Assessments of Natural Radioactivity in Clay-Based Cosmetic Products in Malaysia. **Radiation Physics and Chemistry**. Vol. 202, DOI: 10.1016/j.radphyschem.2022.110583
- [12] Aja, A. A. and Randy, G. J. (2013). Physical Properties of Kaolin Used in Soap Production in Nigeria. **The International Journal of Engineering and Science (IJES)**. Vol. 2, Issue 10, pp. 10-15
- [13] Singh, R., Yu, C. C., Chen, G. W., Chen, C. H., Sinaki, N. Y., Lin, J., and Koksel, F. (2022). Butterfly Pea Flower as a Novel Ingredient to Produce Antioxidant-Enriched Yellow Pea-Based Breakfast Cereals. **Foods**. Vol. 11, Issue 21, pp. 1-14. DOI: 10.3390/foods11213447
- [14] Havananda, T. and Leungwilai, K. (2019). Effect of Harvest Time and Season on Antioxidant Activity, Anthocyanin and Total Phenolic Content of Butterfly Pea Flower. **King Mongkut's Agricultural Journal**. Vol. 37, No. 4, pp. 655-661 (in Thai)
- [15] Nur Faedah Syahirah, L., Muhammad Umar Lutfi, M. Y., Atika, A., Muhammad Hafiz, R., Muhammad Zulhelmi, O. A., Mohd Ariff Adzhan, O., and Khor, P. Y. (2018). A Comparative Analysis of *Clitoria ternatea* Linn. (Butterfly Pea) Flower Extract as Natural Liquid pH Indicator and Natural pH Paper. **Dhaka University Journal of Pharmaceutical Sciences**. Vol. 17, No. 1, pp. 97-103. DOI: 10.3329/dujps.v17i1.37125
- [16] Malahayati, E. N., Anggraini, D. P., and Kusuma, L. N. (2023). Quality Evaluation of Transparent Soap from Whey Waste with Butterfly Pea Flower Extract (*Clitoria ternatea* L.). **Indonesian Journal of Biology Education**. Vol. 6, No. 2, pp. 69-77. DOI: 10.31002/ijobev6i2.1056

- [17] Louritha, N. and Kanlayavattanakul, M. (2023). Sustainable Approach to Natural Makeup Cosmetics Containing Microencapsulated Butterfly Pea Anthocyanins. **Sustainable Chemistry and Pharmacy**. Vol. 32, 101005, pp. 1-7. DOI: 10.1016/j.scp.2023.101005
- [18] Stanić, Z. (2017). Curcumin, a Compound from Natural Sources, a True Scientific Challenge - A Review. **Plant Foods for Human Nutrition**. Vol. 72, No. 1, pp. 1-12. DOI: 10.1007/s11130-016-0590-1
- [19] Thai Industrial Standards Institute. (2010). Glycerin Bar Soap (665/2010). **Ministry of Industry**. pp. 1-5 (in Thai)
- [20] Phansi, P., Sura, J., and Duangsrikaew, K. (2023). Study on Antioxidant and Antibacterial Activity of Mulberry Leaf Tea Extract Soap and Mulberry Leaf Tea Extract Mixed with Turmeric Soap. **RMUTP Research Journal Sciences and Technology**. Vol. 17, No. 2, pp. 115-125 (in Thai)
- [21] Phansi, P., Raksaphakdee, S., and Duangsrikaew, K. (2024). Study on Antioxidant Activities of Soaps with Coffee Ground Extract and Soaps with Mixed Coffee Ground Extract and Mulberry Leaf Extract. **Science and Engineering Connect**. Vol 47, No. 1, pp. 26-41 (in Thai)
- [22] Ngahom, R. and Suebkumpet, J. (2018). Coconut Shell Charcoal Soap Mixed with *Hypoxis aurea* and *Tiliacora triandra*. **Journal of Science and Technology**. Vol. 2, No. 2, pp. 37-50 (in Thai)
- [23] Ngahom, R., Namussika, M., and Boonshoo, S. (2020). Producing Marigold, Volcanic Soil, and Rock Soap. **Journal of Science and Technology**. Vol. 4, No. 2, pp. 27-39 (in Thai)
- [24] Phansi, P., Tumma, P., Thuankhunthod, C., Danchana, K., and Cerdà, V. (2021). Development of a Digital Microscope Spectrophotometric System for Determination of the Antioxidant Activity and Total Phenolic Content in Teas. **Analytical Letters**. Vol. 54, Issue 17, pp. 2727-2735. DOI: 10.1080/00032719.2021.1886304
- [25] Azme, S. N. K., Yusoff, N. S. I. M., Chin, L. Y., Mohd, Y., Hamid, R. D., Jalil, M. N., Zaki, H. M., Saleh, S. H., Ahmat, N., Manan, M. D. F. A., Yury, N., Hum, N. N. F., Latif, F. A., and Zain, Z. M. (2023). Recycling Waste Cooking Oil into Soap: Knowledge Transfer Through Community Service Learning. **Cleaner Waste Systems**. Vol. 4, 100084, DOI: 10.1016/j.clwas.2023.100084
- [26] Thirunavukkarasu, A., Nithya, R., Sivashankar, R., Sathya, A. B., Rangabhashiyam, S., Pasupathi, S. A., Prakash, M., and Nishanth, M. (2023). Green Soap Formulation: An Insight Into the Optimization of Preparations and Antifungal Action. **Biomass Conversion and Biorefinery**. Vol. 13, pp. 299-310. DOI: 10.1007/s13399-020-01094-1

การผลิตแป้งทนย่อยจากแป้งถั่วโดยการหมักร่วมกับพุลูลาเนสและการเกิดรีโทรเกรเดชัน

Production of Resistant Starch from Legume Flour by Co-Fermentation and Using Pullulanase and Retrogradation

สุทธิดา วิทนาลัย*

Suttida Wittanalai*

Received: March 2, 2024; Revised: August 9, 2024; Accepted: August 14, 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการหมักร่วมกับการใช้พุลูลาเนสและการเกิดรีโทรเกรเดชันต่อปริมาณและคุณสมบัติของแป้งทนย่อยด้วยเอนไซม์ (Resistant Starch: RS) ในแป้งถั่ว โดยหมักแป้งฟลาวถั่ว (ถั่วเขียว ถั่วแดง และถั่วเหลือง) ด้วยการหมักธรรมชาติเป็นเวลา 1 วัน จากนั้นนำแป้งฟลาวถั่วที่ผ่านกระบวนการหมักมาตัดพันธะ α -1,6-Glycosidic Linkages ด้วยพุลูลาเนส (40 ยูนิตต่อกรัม) ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 24 36 และ 48 ชั่วโมง เมื่อเปรียบเทียบระดับการย่อยด้วยพุลูลาเนส พบว่าระยะเวลาการบ่มเอนไซม์ที่เหมาะสมคือ 24 ชั่วโมง เมื่อนำฟลาวถั่วหมักที่ผ่านการตัดพันธะกึ่งมาบ่มที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 3 5 7 และ 14 วัน พบว่าระยะเวลาการเกิดรีโทรเกรเดชันที่เหมาะสมคือ 14 วัน ซึ่งมีปริมาณ RS สูงที่สุด เมื่อนำแป้งทนย่อยของถั่วที่ผ่านการตัดแปรรูป ศึกษาลักษณะรูปร่างของเม็ดแป้งด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ไม่พบลักษณะเม็ดแป้ง และมีรูปร่างไม่แน่นอน เมื่อศึกษาโครงสร้างผลึก ด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD) พบว่าแป้งทนย่อยของถั่วทั้ง 3 ชนิด มีรูปร่างผลึกแบบ A จากผลการทดลองพบว่ากระบวนการที่ใช้ในการตัดแปรรูปทำให้ได้ปริมาณ RS เพิ่มขึ้น และลักษณะเม็ดแป้งและโครงสร้างผลึกที่เปลี่ยนแปลงไปทำให้ได้แป้งทนย่อยที่มีความหลากหลายที่จะนำไปประยุกต์ใช้เป็นส่วนประกอบของอาหารเพื่อสุขภาพได้

คำสำคัญ : แป้งทนย่อย; แป้งถั่ว; พุลูลาเนส; รีโทรเกรเดชัน

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์

Faculty of Science and Technology, Uttaradit Rajabhat University

* Corresponding Author, Tel. 08 9858 6805, E - mail: suttida_wit@uru.ac.th

Abstract

This research aimed to investigate the effect of fermentation and using pullulanase and retrogradation time on resistant starch (RS) content and properties of legume flour. The legume flours (mung bean, red kidney bean and soybean) were naturally fermented for 1 day and the fermented legume flours were debranched by hydrolyze the α -1,6-Glycosidic Linkages by pullulanase (40 U/g) at 50 °C for 12 24 36 and 48 hours. The optimal incubation time with high degree of pullulanase hydrolysis was 24 hours. The fermented debranched flours were then induced at 4 °C for 1 3 5 7 and 14 days. The results showed that the optimum retrogradation time was 14 days with high RS content. The modified resistant starch was analyzed its granule structure by Scanning Electron Microscope (SEM) and showed that there was not found the granule starch with an irregular shape. The crystalline structure of the modified resistant starch by X-Ray diffractometer (XRD) showed that all 3 kinds of legumes were A-type patterns. It was found from this study that the process used to modify the starch can increase the RS content with the different granule structure and crystalline structure, resulting in a variety of resistant starch that could be applied as food ingredients in healthy foods.

Keywords: Resistant Starch; Legume Flour; Pullulanase; Retrogradation

บทนำ

ถั่ว จัดว่าเป็นธัญพืชที่มีการบริโภคทั่วโลกในปริมาณสูง เนื่องจากมีราคาถูกและมีคุณค่าทางโภชนาการสูง องค์ประกอบของถั่วมีโปรตีนร้อยละ 16 - 33 มีเส้นใยอาหารร้อยละ 19 - 28 และยังมีวิตามิน เกลือแร่ และ กรดไขมันไม่อิ่มตัว ปัจจุบันมีการนำถั่วและผลิตภัณฑ์แปรรูปจากถั่วมาใช้ในอาหารเพื่อสุขภาพเพิ่มมากขึ้น ซึ่งในอุตสาหกรรมอาหารนิยมนำถั่วมาแปรรูปเป็นผงแป้งก่อนนำไปใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ผงแป้งถั่วแต่ละชนิดมีความแตกต่างทั้งทางด้านองค์ประกอบ โครงสร้างภายใน คุณสมบัติ มีงานวิจัยที่นำแป้งถั่ว มาใช้ทดแทนในส่วนประกอบของอาหาร เช่น การใช้แป้งถั่วเหลืองพร้อมไขมันทดแทนแป้งสาลีในเค้กชิฟฟอน [1] และการนำแป้งถั่วแดงมาใช้ทดแทนแป้งสาลีในหมั่นโถว ซึ่งสามารถเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ให้กับหมั่นโถว [2] เป็นต้น

อาหารเพื่อสุขภาพ (Healthy Foods) หรืออาหารฟังก์ชัน (Functional Foods) กำลังได้รับความนิยม ในปัจจุบัน แป้ง (Starch) เป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญของมนุษย์และเป็นองค์ประกอบหลักของอาหารหลายชนิด แป้งสามารถถูกย่อยด้วยเอนไซม์และได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็นกลูโคส ซึ่งจะดูดซึมเข้าสู่กระแสเลือด นอกจากนี้ ยังมีแป้งอีกกลุ่มหนึ่งที่ไม่สามารถถูกย่อยด้วยเอนไซม์ในลำไส้เล็ก และไม่สามารถดูดซึมภายในลำไส้เล็กของมนุษย์ เรียกแป้งกลุ่มนี้ว่า แป้งหรือสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ (Resistant Starch) สามารถแบ่งแป้งทนย่อย ด้วยเอนไซม์ได้ 4 ประเภท ได้แก่ RS1 เป็นแป้งที่มีลักษณะกายภาพขัดขวางการทำงานของเอนไซม์ พบในพืชตระกูลถั่ว RS2 เป็นเม็ดแป้งดิบที่ทนต่อการทำงานของเอนไซม์ พบในแป้งกล้วยดิบ แป้งมันฝรั่งดิบ RS3 เป็นแป้งคืนตัว (Retrograded Starch) ที่ถูกนำมาให้ความร้อนจนเกิดเจลาทิโนเซชัน เมื่อทำให้เย็นลงจะเกิดการเรียงตัวของโมเลกุลใหม่ และ RS4 เป็นแป้งที่เกิดจากการตัดแปรโดยใช้สารเคมีคลอซิง [3] สมบัติของแป้งที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ คือ อนุภาคเล็ก ไม่มีรสชาติ การอมน้ำต่ำ มีการพองตัวและความหนืดสูง และมีคุณสมบัติเทียบเท่ากับใยอาหาร [4] ทำให้สามารถนำไปใช้เป็นส่วนประกอบในผลิตภัณฑ์อาหาร เพื่อสุขภาพได้หลายชนิด

แหล่งของแป้งทนย่อยสามารถพบได้ในธัญพืช มันฝรั่ง พืชตระกูลถั่ว และกล้วย พืชตระกูลถั่ว นอกจากเป็นพืชที่มีโปรตีนปริมาณสูงแล้ว ยังมีปริมาณแป้งทนย่อยสูง ดังนั้นจึงมีการศึกษาเกี่ยวกับเทคนิคและสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการผลิตแป้งทนย่อยจากถั่ว กระบวนการผลิตแป้งทนย่อยนั้นสามารถทำได้โดยการตัดแปรงโดยใช้วิธีที่แตกต่างกันเพื่อเพิ่มปริมาณ RS ในพืชชนิดต่าง ๆ เช่น การใช้ความร้อนขึ้น การใช้เอนไซม์ในการย่อยแป้ง การใช้ความร้อนร่วมกับเอนไซม์ และกระบวนการหมัก เป็นต้น การหมักแป้งทางธรรมชาติจะมีแบคทีเรียกรดแลคติกที่มีบทบาทสำคัญในกระบวนการหมัก โดยแบคทีเรียจะผลิตเอนไซม์ย่อยแป้ง ซึ่งสามารถย่อยโมเลกุลแป้งได้เป็นน้ำตาล หรือโอลิโกแซคคาไรด์ ทำให้ปริมาณอะไมโลสเพิ่มขึ้นและเกิดการสร้างสารเมแทบอไลต์อื่น ๆ เช่น กรดแลคติก เอทานอล คาร์บอนไดออกไซด์ ไดอะซิติล เป็นต้น จากการศึกษาของ [5] ได้ใช้กระบวนการหมักธรรมชาติในการย่อยแป้งข้าวพันธุ์เหลืองประทีพร่วมกับการให้ความร้อนและความชื้น โดยแป้งที่ผ่านการหมัก 1 วัน และผ่านกระบวนการให้ความร้อนร่วมกับความชื้นที่ระดับ 25 % และอุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ทำให้ปริมาณ RS สูงขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณ RS สามารถใช้พอลูลานเนสซึ่งเป็นเอนไซม์ที่มีความจำเพาะในการย่อยพันธะ α -1,6 Glycosidic Linkages ของโมเลกุลแป้งมีผลให้ปริมาณ RS เพิ่มขึ้น ซึ่งเมื่อใช้ร่วมกับการเกิดรีโทรเกรเดชัน (Retrogradation) ที่มีการให้ความร้อนจนแป้งเกิดเจลาตีไนเซชันแล้วทำให้เย็นลงจะเกิดการเรียงตัวใหม่ของอะไมโลสจะทำให้ปริมาณ RS เพิ่มขึ้น และยังพบว่าสภาวะที่ใช้ในการเก็บรักษา สตาร์ชที่เกิดรีโทรเกรเดชัน ระยะเวลาและอุณหภูมิที่ใช้ในการเก็บรักษา มีความสัมพันธ์กัน งานวิจัยของ [6] ได้นำสตาร์ชถั่วเขียว ถั่วดำ ถั่วแดงหลวงที่ผ่านการตัดพันธะ α -1,6-Glycosidic Linkages ด้วยพอลูลานเนสปริมาณ 0.02 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 36 ชั่วโมง มาตัดแปรงร่วมกับกระบวนการให้ความร้อนขึ้น พบว่าสตาร์ชถั่วทั้งสามชนิดมีปริมาณแป้งทนย่อยเพิ่มสูงขึ้น

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนากระบวนการผลิตแป้งทนย่อยในพืชตระกูลถั่วด้วยกระบวนการหมักและการใช้พอลูลานเนสซึ่งทำหน้าที่ตัดพันธะ α -1,6-Glycosidic Linkages ของแป้งร่วมกับการเกิดรีโทรเกรเดชันเพื่อตัดแปรงจากถั่วให้มีปริมาณแป้งทนย่อยเพิ่มสูงขึ้น เพื่อการนำไปประยุกต์เป็นส่วนประกอบของอาหารในผลิตภัณฑ์อาหารเพื่อสุขภาพ (Functional Food) ที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูงและเป็นการเพิ่มมูลค่าของพืชตระกูลถั่วที่ปลูกในประเทศไทย

วิธีดำเนินการ

1. การเตรียมแป้งฟลาวถั่วที่ผ่านกระบวนการหมัก

นำเมล็ดถั่วเขียว (*Vigna radiata*) ถั่วแดง (*Phaseolus vulgaris*) และถั่วเหลือง (*Glycine max*) มาล้างน้ำจนสะอาด แล้วนำไปแช่น้ำที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 3 ชั่วโมง เทน้ำทิ้งแยกเอาเปลือกออก แล้วนำถั่วแต่ละชนิดผสมกับน้ำ อัตราส่วนระหว่างถั่วกับน้ำเท่ากับ 1:2 ปั่นถั่วให้ละเอียดแล้วใส่ภาชนะแบบปิด หมักทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง เมื่อครบระยะเวลาหมักให้กรองน้ำทิ้งด้วยผ้าขาวบาง แล้วนำถั่วที่ผ่านการกรองใส่ถาดอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง นำไปคบเป็นผง แล้วนำมาผ่านตะแกรงร่อนขนาด 100 Mesh ได้แป้งฟลาวถั่วที่ผ่านกระบวนการหมัก วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแป้งฟลาวดั้งเดิม และแป้งฟลาวที่ผ่านการหมัก โดยวิเคราะห์ปริมาณอะไมโลส ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ และปริมาณแป้งทนย่อย

2. ศึกษาระยะเวลาตัดพันธะ α -1,6-Glycosidic Linkages ในแป้งฟลาวของพอลูลานเนสและระยะเวลาการเกิดรีโทรเกรเดชันในการผลิต RS

เตรียมสารแขวนลอยแป้งฟลาวที่ผ่านการหมักของถั่วเขียว ถั่วเหลือง ถั่วแดง เข้มข้นร้อยละ 8 โดยชั่งแป้งฟลาวถั่วตัวอย่างละ 8 กรัมใส่ในสารละลาย 0.1 โมลาร์ อะซิเตทบัฟเฟอร์ pH 5.2 ปริมาตร 100 มิลลิกรัม คนให้เข้ากันจากนั้นนำไปให้ความร้อนด้วยเครื่อง Autoclave ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ทำให้เย็นลงที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และเติมพอลูลานเนสที่มีความเข้มข้น 40 ยูนิต์ต่อกรัม เพื่อตัดสายกิ่ง (Debranching) ที่เกิดจากพันธะ α -1,6-Glycosidic Linkages แล้วนำไปบ่มที่อุณหภูมิ

50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 24 36 และ 48 ชั่วโมง จากนั้นนำไปให้ความร้อนด้วยเครื่อง Autoclave ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที นำสารละลายแป้งฟลาวที่ได้ตั้งทิ้งไว้จนมีอุณหภูมิเท่าอุณหภูมิห้อง นำแป้งฟลาวที่ผ่านการตัดสายพันธะกึ่งที่ระยะเวลาต่าง ๆ ไปวิเคราะห์หาปริมาณการย่อยด้วยพุลูลาเนส (Degree of Pullulanase Hydrolysis; % D.H.) โดยวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ และปริมาณน้ำตาล (ตัดแปลงจากวิธีของ [4]) แล้วคำนวณค่า % D.H. ดังสมการที่ (1) เลือกระยะเวลาของเอนไซม์ที่ใช้ในการตัดสายพันธะกึ่งที่มีระดับการย่อยด้วยพุลูลาเนสสูงที่สุดไปใช้ในการทดลองต่อไป

$$\text{ระดับการย่อยด้วยพุลูลาเนส} = \frac{\text{ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์หลังจากถูกย่อยด้วยพุลูลาเนส}}{\text{ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดหลังจากถูกย่อยด้วยพุลูลาเนส}} \times 100 \quad (1)$$

% D.H.

นำแป้งฟลาวที่ผ่านกระบวนการหมักแล้วตัดสายพันธะกึ่งด้วยพุลูลาเนสโดยใช้ระยะเวลาที่มีระดับการย่อยด้วยพุลูลาเนสสูงที่สุด ให้ความร้อนด้วย Autoclave อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0 1 3 7 และ 14 วัน แล้วนำตัวอย่างไปทำแห้งด้วยเครื่องอบลมร้อน ร้อนผ่านตะแกรงขนาด 100 Mesh บรรจุในถุงอะลูมิเนียมฟอยด์ และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส (ตัดแปลงจากวิธีของ [6]) จากนั้นนำแป้งที่ผ่านการเกิดรีโทรเกรเดชันที่ผลิตได้ไปวิเคราะห์เปรียบเทียบปริมาณ RS แล้วเลือกระยะเวลาการเก็บรักษาที่มีปริมาณ RS สูงที่สุดใช้เป็นสภาวะในการผลิตแป้งทนย่อยที่ผ่านกระบวนการหมัก ร่วมกับการใช้พุลูลาเนสและการเกิดรีโทรเกรเดชัน นำแป้งทนย่อยที่ได้วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี และลักษณะโครงสร้างของแป้งทนย่อยต่อไป

3. การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

3.1 การวิเคราะห์ปริมาณ RS (ตามวิธีการของ [7]) วิเคราะห์ปริมาณ RS โดยการชั่งแป้งฟลาวถั่ว 0.5 กรัม ลงในฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 6.0 ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน และเติมอะไมเลส 0.2 กรัม นำไปบ่มในอ่างน้ำร้อนควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที ทำให้เย็นแล้วปรับ pH ให้เท่ากับ 4.5 ด้วยสารละลายไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.275 นอร์มอล เติมอะไมโลกลูโคซิเดส 0.5 มิลลิลิตร นำไปบ่มในอ่างน้ำร้อนควบคุมอุณหภูมิที่ 60 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที แล้วทำให้เย็น เติมสารละลายโปรติเอส 0.5 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องนาน 30 นาที จากนั้นนำไปเทวียงแยกที่ 3,000 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส นาน 10 นาที ล้างตะกอน 2 ครั้ง ด้วยเอทานอลเข้มข้นร้อยละ 85 และน้ำกลั่น ตามลำดับ กรองผ่านชุดกรองสุญญากาศ นำตะกอนที่เหลืออยู่ในกระดาศกรอง ไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที จากนั้นนำน้ำหนักที่เหลืออยู่คำนวณหาปริมาณ RS ดังสมการที่ (2)

$$\text{ปริมาณ RS (ร้อยละ)} = \frac{\text{น้ำหนักของส่วนที่ไม่ละลายน้ำที่เหลืออยู่ (กรัม)}}{\text{น้ำหนักของตัวอย่าง (กรัม)}} \times 100 \quad (2)$$

3.2 การวิเคราะห์ปริมาณอะไมโลส ตามวิธีการของ [8]

3.3 การวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ โดยวิธี DNS Method [9] ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด โดยวิธี Phenol-sulfuric [10]

3.4 การวิเคราะห์โปรตีน เถ้า เส้นใย ไขมัน และความชื้น ตามวิธีการของ AOAC [11] และร้อยละคาร์โบไฮเดรต คำนวณจากสูตร = 100 - (ร้อยละโดยน้ำหนักแห้งของโปรตีน + เถ้า + เส้นใย + ไขมัน + ความชื้น)

4. การศึกษาลักษณะโครงสร้างของแป้งทนย่อย

4.1 รูปร่างของเม็ดแป้ง ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) โดยนำตัวอย่างแป้งมากระจายลงบนแท่นตัวอย่าง ทำการเคลือบผิวหน้าตัวอย่างด้วยทอง นำตัวอย่างที่เตรียมเสร็จแล้วมาส่องด้วยเครื่อง SEM ที่กำลังขยาย 100 500 1,000 และ 5,000 เท่า โดยกำหนดค่า kV เท่ากับ 10

4.2 การกระจายตัวของเม็ดแป้ง ศึกษาขนาดและการกระจายตัวของเม็ดแป้งด้วยเครื่อง Laser Diffraction Particle Size Analyzer โดยใช้ He-Ne เป็นแหล่งกำเนิดคลื่นแสง การวัดครอบคลุมขนาดอนุภาค 1 - 3,000 ไมโครเมตร

4.3 รูปแบบโครงสร้างผลึก ด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD) กำหนดสภาวะตัวกำเนิด X-ray ที่ 40 kV และ 40 mA และมุมสแกน 2 θ จาก 4° - 45° ในอัตราสแกน 0.1°/ นาที

5. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ ทำการทดลอง 3 ซ้ำ ใช้แผนการทดลองแบบสุ่มอย่างสมบูรณ์ (Completely Randomized Design; CRD) ในการวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของปริมาณอะไมโลส ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ และปริมาณ RS ระหว่างแป้งฟลาวเวอร์ดั้งเดิม และแป้งฟลาวเวอร์ที่ผ่านกระบวนการหมัก ใช้สถิติ T-Test โดยกำหนดนัยสำคัญที่ 0.05 (ช่วงความเชื่อมั่นร้อยละ 95) สำหรับการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแป้งฟลาวเวอร์ที่ผ่านกระบวนการหมัก ตัดกิ่งด้วยพลูลูแลนและการเกิดรีโทรเกรเดชัน วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติโดยใช้ Analysis of Variance (ANOVA) และวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ผลการวิจัย

1. ผลของการหมักต่อองค์ประกอบของแป้งฟลาวเวอร์

องค์ประกอบของแป้งฟลาวเวอร์เขียว ถั่วแดง และถั่วเหลืองดั้งเดิม และแป้งฟลาวเวอร์ที่ผ่านกระบวนการหมัก ดังตารางที่ 1 พบว่า การหมักแป้งฟลาวเวอร์เป็นระยะเวลา 1 วัน ส่งผลให้ปริมาณอะไมโลส และปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์เพิ่มขึ้น ($p < 0.05$) เนื่องจากในกระบวนการหมักแป้งด้วยจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในธรรมชาติ ซึ่งแป้งฟลาวเวอร์เขียวมีปริมาณอะไมโลสสูงที่สุด โดยเมื่อหมักแล้วแป้งฟลาวเวอร์เขียวมีอะไมโลสร้อยละ 34.67 ± 1.00 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์พบในแป้งฟลาวเวอร์แดงมากที่สุด เมื่อหมักแล้วแป้งฟลาวเวอร์แดงมีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ 8.67 ± 0.06 มก./ก. ส่วนปริมาณ RS ในแป้งฟลาวเวอร์ทั้ง 3 ชนิด มีแนวโน้มลดลงเมื่อผ่านกระบวนการหมัก ($p < 0.05$) ซึ่งแป้งฟลาวเวอร์แดงมีปริมาณ RS สูงที่สุด เมื่อหมักแล้วมีปริมาณ RS ร้อยละ 25.06 ± 1.22

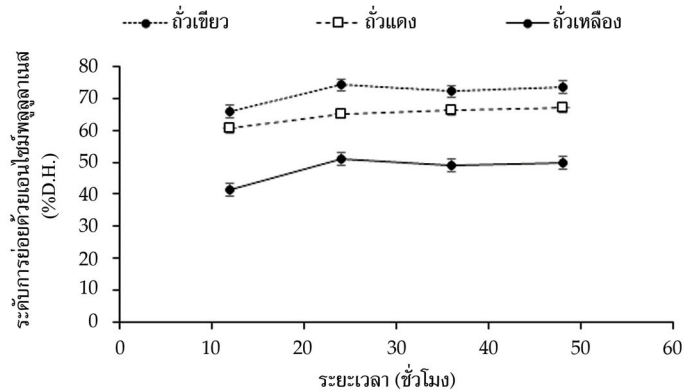
ตารางที่ 1 องค์ประกอบของแป้งฟลาวเวอร์ดั้งเดิม และแป้งฟลาวเวอร์ที่ผ่านกระบวนการหมัก

องค์ประกอบ	แป้งฟลาวเวอร์		
	แป้งฟลาวเวอร์เขียว	แป้งฟลาวเวอร์แดง	แป้งฟลาวเวอร์เหลือง
ปริมาณอะไมโลส (ร้อยละ)			
ดั้งเดิม	$32.01^b \pm 0.97$	$20.42^b \pm 0.88$	$10.82^b \pm 0.75$
หมัก	$34.67^a \pm 1.00$	$23.32^a \pm 0.78$	$14.87^a \pm 0.98$
ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (มก./ก.)			
ดั้งเดิม	$1.35^b \pm 0.03$	$4.56^b \pm 0.07$	$0.49^b \pm 0.02$
หมัก	$5.44^a \pm 0.04$	$8.67^a \pm 0.06$	$0.95^a \pm 0.01$
ปริมาณ RS (ร้อยละ)			
ดั้งเดิม	$22.08^a \pm 0.70$	$28.45^a \pm 1.03$	$16.35^a \pm 0.59$
หมัก	$19.67^b \pm 0.89$	$25.06^b \pm 1.22$	$14.80^b \pm 0.45$

หมายเหตุ: ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งของแป้งฟลาวเวอร์แต่ละชนิดแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ของแต่ละองค์ประกอบ

2. ผลของระยะเวลาตัดกิ่งของพอลลูลาเนส

จากการศึกษาผลของระยะเวลาตัดกิ่งของพอลลูลาเนส ความเข้มข้น 40 ยูนิต์ต่อกรัม ต่อระดับการย่อยด้วยพอลลูลาเนส (% D.H.) ของแป้งฟลาวถั่วเขียว ถั่วแดง และถั่วเหลืองที่ผ่านการหมักเป็นระยะเวลา 1 วัน ดังรูปที่ 1 แป้งฟลาวถั่วเขียวหมัก และแป้งฟลาวถั่วเหลืองหมักมี % D.H. สูงสุดเมื่อบ่มเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง เท่ากับ 74.22 % และ 51.02 % ในขณะที่แป้งฟลาวถั่วแดงหมักมี % D.H. เพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการบ่มเพิ่มขึ้น จาก 60.63 % เป็น 67.01 % เมื่อพิจารณาผลของระยะเวลาการบ่มพอลลูลาเนสในแป้งฟลาวถั่วหมักทั้ง 3 ชนิด พบว่า % D.H. ที่เวลา 24 36 และ 48 ชั่วโมง แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ดังนั้นจึงเลือกระยะเวลาในการตัดกิ่งที่บ่มเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ในการเกิดรีโทรเกรเดชันในการทดลองต่อไป



รูปที่ 1 ระดับการย่อยด้วยพอลลูลาเนส (% D.H.) ของแป้งฟลาวถั่วที่ใช้เอนไซม์ตัดกิ่งที่ระยะเวลาแตกต่างกัน

3. ผลของระยะเวลาการเกิดรีโทรเกรเดชันต่อปริมาณ RS

ผลการศึกษาระยะเวลาการเกิดรีโทรเกรเดชันต่อปริมาณ RS ของแป้งฟลาวถั่วที่ผ่านกระบวนการหมัก ร่วมกับการตัดกิ่งด้วยพอลลูลาเนสความเข้มข้น 40 ยูนิต์ต่อกรัมเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง และเกิดรีโทรเกรเดชัน ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 0 1 3 7 และ 14 วัน ดังตารางที่ 2 พบว่าเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษา เพิ่มขึ้นจาก 1 วัน เป็น 14 วัน แป้งฟลาวถั่วทั้ง 3 ชนิด มีปริมาณ RS เพิ่มขึ้น โดยแป้งฟลาวถั่วเขียวมีปริมาณ RS เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 21.65 เป็น 30.98 ($p<0.05$) แป้งฟลาวถั่วแดงมีปริมาณ RS เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 25.66 เป็น 33.02 ($p<0.05$) และแป้งฟลาวถั่วเหลืองมีปริมาณ RS เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 19.65 เป็น 28.44 ($p<0.05$) เมื่อเปรียบเทียบแป้งฟลาวถั่วเขียว ถั่วแดง และถั่วเหลือง พบว่ามีปริมาณ RS แตกต่างกัน โดยแป้งฟลาวถั่วแดง มีปริมาณ RS มากที่สุด รองลงมาคือแป้งฟลาวถั่วเขียว และถั่วเหลือง ($p<0.05$)

ตารางที่ 2 ปริมาณ RS ของแป้งฟลาวถั่วผ่านกระบวนการหมักร่วมกับการตัดกิ่งด้วยพอลลูลาเนสและเกิดรีโทรเกรเดชันที่ 4 องศาเซลเซียสที่ระยะเวลาแตกต่างกัน

ระยะเวลา (วัน)	ปริมาณ RS (ร้อยละ)		
	แป้งฟลาวถั่วเขียว	แป้งฟลาวถั่วแดง	แป้งฟลาวถั่วเหลือง
0	21.02 ^{Bc} ±0.24	24.78 ^{Ad} ±0.44	19.11 ^{Cd} ±0.30
1	21.65 ^{Bbc} ±0.12	25.66 ^{Ad} ±0.19	19.65 ^{Cd} ±0.22
3	25.72 ^{Bb} ±0.40	27.54 ^{Ac} ±0.22	22.37 ^{Cc} ±0.48
7	28.02 ^{Aa} ±0.66	30.00 ^{Bb} ±0.47	25.64 ^{Cb} ±0.17
14	30.98 ^{Aa} ±0.56	33.02 ^{Ba} ±0.36	28.44 ^{Ca} ±0.68

หมายเหตุ: ตัวอักษร ^{a,b,c} ที่แตกต่างกันในแนวตั้งแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

ตัวอักษร ^{A,B,C} ที่แตกต่างกันในแนวนอนแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

4. ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี และลักษณะโครงสร้างของแป้งท่อย่อย

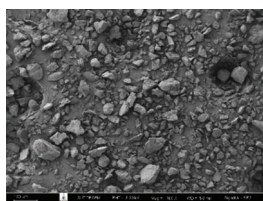
แป้งท่อย่อยถั่วเขียว ถั่วแดง และถั่วเหลือง ที่ผ่านกระบวนการตัดแปรด้วยการหมักธรรมชาติ 1 วัน แล้วตัดกึ่งด้วยพลูลูลาเนส (40 ยูนิตต่อกรัม) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นบ่มที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส โดยใช้ระยะเวลาในการเก็บรักษา 14 วัน องค์ประกอบทางเคมีของแป้งท่อย่อย ซึ่งแสดงค่าร้อยละต่อน้ำหนักแห้งของแป้งท่อย่อย ดังตารางที่ 3 พบว่าแป้งท่อย่อยทั้ง 3 ชนิดมีปริมาณโปรตีนระหว่างร้อยละ 22.03±2.01 ถึง 34.21±3.00 ปริมาณเถ้าอยู่ในช่วงร้อยละ 1.67±0.02 ถึง 2.50±0.08 เส้นใยมีปริมาณร้อยละ 38.51±1.12 ถึง 51.10±3.05 ไขมันมีปริมาณร้อยละ 1.15±0.49 ถึง 1.74±0.27 และความชื้นมีปริมาณร้อยละ 5.42±0.88 ถึง 8.58±0.56 โดยแป้งท่อย่อยถั่วเหลืองมีปริมาณโปรตีน ไขมันสูงที่สุด ส่วนแป้งท่อย่อยถั่วแดงมีปริมาณเถ้า เส้นใย และความชื้นสูงที่สุด ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีของแป้งท่อย่อยทั้ง 3 ชนิด มีความแตกต่างกัน ซึ่งความแตกต่างขององค์ประกอบทางเคมีของพืชตระกูลถั่ว ขึ้นอยู่กับชนิดถั่ว พันธุกรรม สายพันธุ์ และสิ่งแวดล้อมในการปลูก

ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งท่อย่อยถั่วจากกระบวนการหมัก ตัดกึ่งด้วยพลูลูลาเนสและการเกิดรีโทรเกรเดชันโดยบ่มที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14 วัน

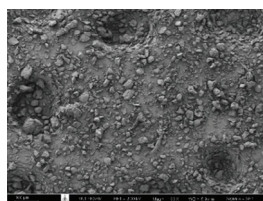
องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละของน้ำหนักแห้ง)	ชนิดแป้งท่อย่อย		
	ถั่วเขียว	ถั่วแดง	ถั่วเหลือง
โปรตีน (Protein)	22.03±2.01 ^b	23.42±1.42 ^b	34.21±3.00 ^a
เถ้า (Ash)	1.67±0.02 ^b	2.50±0.08 ^a	1.99±0.03 ^b
เส้นใย (Crude Fiber)	38.51±1.12 ^c	51.10±3.05 ^a	46.97±2.41 ^b
ไขมัน (Fat Oil)	1.22±0.50 ^b	1.15±0.49 ^b	1.74±0.27 ^a
ความชื้น (Moisture)	8.16±0.62 ^a	8.58±0.56 ^a	5.42±0.88 ^b
คาร์โบไฮเดรต (Carbohydrate)	28.41±1.34 ^a	13.25±1.02 ^b	9.67±0.98 ^c

หมายเหตุ: a, b และ c หมายถึง ค่าเฉลี่ยในแนวนอนที่มีตัวอักษรกำกับต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

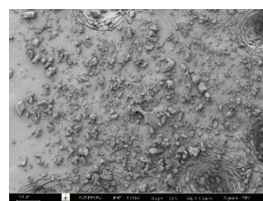
การตรวจสอบลักษณะรูปร่างของเม็ดแป้งของแป้งท่อย่อยถั่วเขียว ถั่วเหลือง และถั่วแดงด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ดังรูปที่ 2 ผลการตรวจสอบไม่พบลักษณะของเม็ดแป้งของแป้งท่อย่อยทั้ง 3 ชนิด ทั้งนี้เนื่องจากเนื่องมาจากกระบวนการที่ใช้ในการผลิตแป้งท่อย่อยทำให้เกิดการทำลายความเป็นผลึกของเม็ดแป้ง



(ก) ถั่วเขียว



(ข) ถั่วแดง

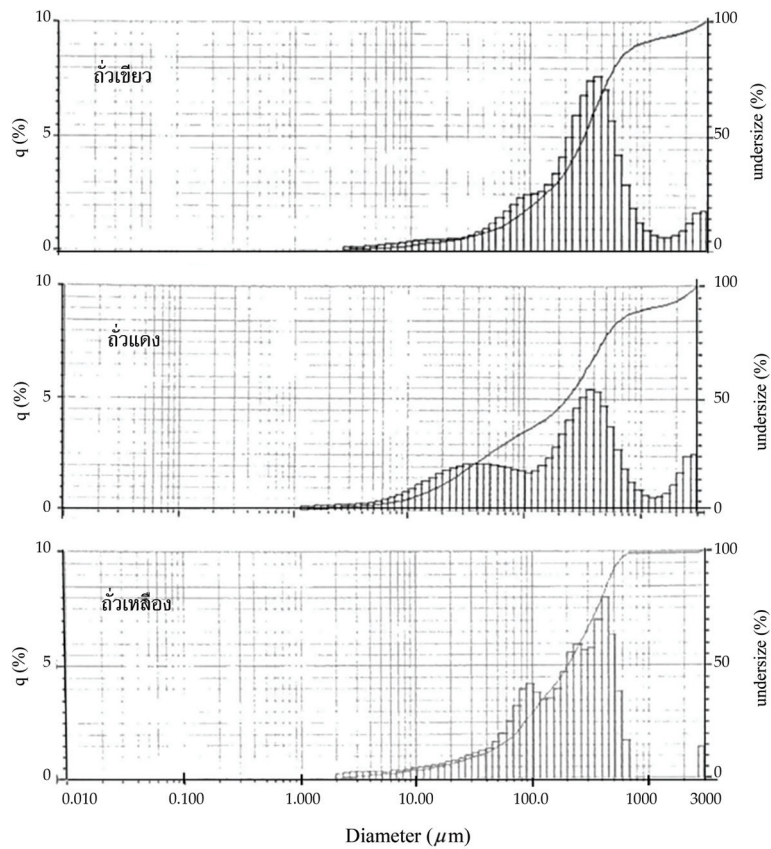


(ค) ถั่วเหลือง

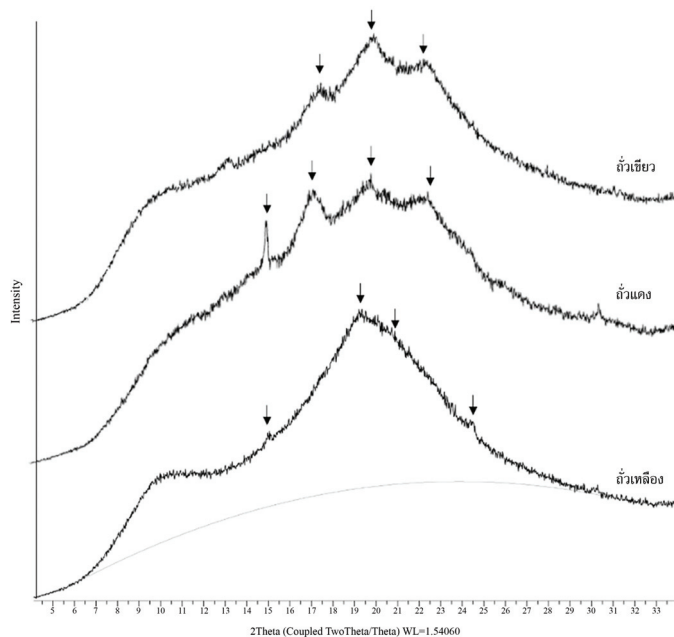
รูปที่ 2 ลักษณะรูปร่างเม็ดแป้งของแป้งท่อย่อยจากถั่ว กำลังขยาย 100 เท่า ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)

การตรวจสอบศึกษาขนาดและการกระจายตัวของเม็ดแป้งด้วยเครื่อง Laser Diffraction Particle Size Analyzer ดังรูปที่ 3 พบว่าแป้งท่อย่อยถั่วเขียว ถั่วแดง และถั่วเหลือง มีขนาด 433.61 264.61 และ 443.97 ไมโครเมตร ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของแป้งท่อย่อยถั่วทั้ง 3 ชนิดด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer ดังรูปที่ 4 ซึ่งพบว่าแป้งท่อย่อยถั่วเขียวและถั่วแดงแสดงโครงสร้างผลึกแบบ A

โดยมีพีคที่ตำแหน่งมุม 2θ เท่ากับ 17.45 19.90 และ 22.50 ในขณะที่แป้งทeny่อยถั่วเหลืองมีพีคที่ตำแหน่งมุม 2θ เท่ากับ 14.85 17.45 19.90 และ 24.50 แสดงลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ A เช่นกัน



รูปที่ 3 ขนาดและการกระจายตัวของเม็ดแป้งของแป้งทeny่อย ถั่วเขียว ถั่วแดง และถั่วเหลือง ด้วยเครื่อง Laser Diffraction Particle Size Analyzer



รูปที่ 4 รูปแบบโครงสร้างผลึกของเม็ดแป้งของแป้งทeny่อย ถั่วเขียว ถั่วแดง และถั่วเหลือง ด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD)

อภิปรายผล

การหมักแป้งฟลาวัวเป็นระยะเวลา 1 วัน ส่งผลให้องค์ประกอบของแป้งฟลาวัวข้าว ถั่วแดง และ ถั่วเหลืองเปลี่ยนแปลง โดยทำให้ปริมาณอะไมโลสและปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์เพิ่มขึ้น ($p < 0.05$) เนื่องจาก ในกระบวนการหมักแป้งด้วยจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในธรรมชาติ จุลินทรีย์ที่มีบทบาทสำคัญคือ จุลินทรีย์กลุ่มแบคทีเรีย กรดแลคติกที่สามารถผลิตเอนไซม์สำหรับย่อยแป้ง เช่น แอลฟา-อะไมเลส เบต้า-อะไมเลส และอะไมโลไกลโคซิเดส ทำให้ระหว่างการหมักปริมาณกลูโคส และมอลโตสเพิ่มขึ้นและหลังจากนั้นจะถูกเปลี่ยนเป็นสารเมแทบอไลต์อื่น ๆ เช่น กรดแลคติก เอทานอล เนื่องจากกิจกรรมของจุลินทรีย์ [12] ส่งผลให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ และอะไมโลส เพิ่มขึ้นระหว่างการหมัก สอดคล้องกับงานวิจัยของ [5] กรดอินทรีย์ที่จุลินทรีย์ผลิตขึ้นสามารถเข้าไปตัดโมเลกุลของอะไมโลเพคตินได้เป็นโมเลกุลสายตรงที่เป็นสายสั้น ๆ ทำให้แป้งหมักมีปริมาณอะไมโลสสูงขึ้น ส่วนปริมาณ แป้งทนย่อยในแป้งฟลาวัวทั้ง 3 ชนิด มีแนวโน้มลดลงเมื่อผ่านกระบวนการหมัก ($p < 0.05$) เนื่องจาก เกิดการย่อยตามธรรมชาติ (Natural Hydrolysis) ของแป้งทนย่อยประเภท RS2 เพื่อนำไปใช้เป็นแหล่งคาร์บอน ของจุลินทรีย์ในการเจริญเติบโตทำให้เกิดการสลายพันธะในแป้งเป็นน้ำตาลหรือโอลิโกแซคคาไรด์ และ อาจเนื่องจากกิจกรรมของจุลินทรีย์มีผลต่อการสูญเสียความสมบูรณ์ของโครงสร้างเม็ดแป้ง (Structure Integrity) โมเลกุลอะไมโลสและถูกย่อยจนเป็นสายสั้นมากเกินไป จึงไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาระหว่างสายโมเลกุลให้เกิด เป็นโครงสร้างผลึกแป้งทนย่อยได้ ทำให้ปริมาณแป้งทนย่อยลดลง [13] สอดคล้องกับการทดลองของ [14] ที่พบว่า การหมักแป้งเผือก (Taro Flour) ด้วยแบคทีเรียแลคติกเป็นเวลา 18 ชั่วโมง ส่งผลให้ปริมาณน้ำตาล รีดิวซ์เพิ่มขึ้น ปริมาณแป้งทนย่อยลดลง และถ้านำแป้งเผือกที่ผ่านกระบวนการหมักไปตัดแปรต่อด้วยกระบวนการ Autoclaving-Cooling จะทำให้ปริมาณแป้งทนย่อยเพิ่มขึ้น 2.8 เท่า

พอลูลานเนสเป็นเอนไซม์ตัดกิ่งที่มีความจำเพาะในการสลายพันธะ α -1,6 Glycosidic Linkages ในโมเลกุล ของแป้งทำให้ได้พอลิเมอร์สายตรงของอะไมโลส ระดับการย่อยสลายด้วยพอลูลานเนสมีความสัมพันธ์กับปริมาณ น้ำตาลรีดิวซ์และปริมาณน้ำตาลทั้งหมด ซึ่งเมื่อระยะเวลาในการตัดสายกิ่งเพิ่มขึ้น ปริมาณน้ำตาลทั้ง 2 ชนิด จะเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ [15] ได้ศึกษาการตัดสายกิ่งสตาร์ชข้าว พบว่าเมื่อระยะเวลาการตัดสาย กิ่งเพิ่มขึ้น จากการบ่มด้วยเอนไซม์ 0 ถึง 48 ชั่วโมง ระดับการถูกย่อยด้วยพอลูลานเนสมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.44 เป็น 1.55 % และการศึกษาผลของการย่อยสตาร์ชกล้วยด้วยพอลูลานเนสพบว่าปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์จากการย่อย ด้วยพอลูลานเนสเพิ่มขึ้นใน 4 ชั่วโมง หลังจากนั้นเริ่มคงที่เมื่อระยะเวลาการย่อยนานขึ้น [16]

การตัดแปรแป้งด้วยกระบวนการหมักและการตัดสายกิ่งด้วยพอลูลานเนสก่อนทำการรีโทรเกรดชัน จะทำให้ปริมาณแป้งทนย่อยด้วยเอนไซม์ชนิดที่ 3 (RS3) มีปริมาณเพิ่มสูงขึ้น โดยพอลูลานเนสจะเข้าไป ทำการย่อยตรงบริเวณที่เป็นสายกิ่งของอะไมโลเพคติน ทำให้ได้พอลิเมอร์สายตรงของอะไมโลส ซึ่งสามารถ จัดเรียงตัวเป็นโครงสร้างสามมิติที่มีความแข็งแรงมากขึ้น ส่งผลทำให้มี RS เพิ่มขึ้น [4] ระยะเวลาการเกิดรีโทรเกรดชันมีผลต่อปริมาณ RS งานวิจัยของ [6] พบว่าระยะเวลาการเก็บรักษาสตาร์ชข้าว ข้าว ถั่วดำ และถั่วแดงหลวงที่ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์ตัดกิ่ง (พอลูลานเนส 0.02 มิลลิลิตรต่อกรัม) และ เกิดรีโทรเกรดชันที่ 4 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 14 วัน ทำให้ปริมาณ RS ของถั่วทั้ง 3 ชนิดสูงที่สุด และ จากรายงานของ [17] ซึ่งได้ทำการศึกษาการผลิตสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์จากสตาร์ชถั่วลูกไก่ (Chickpea) พบว่ากระบวนการย่อยสตาร์ช (Hydrolysis) ด้วยพอลูลานเนส (40 ยูนิตต่อกรัม นาน 10 ชั่วโมง) จากนั้น ให้ความร้อนโดยการ Autoclave ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที แล้วเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง สามารถทำให้ปริมาณ RS ของสตาร์ชถั่วลูกไก่เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 16 เป็น 32 ($p < 0.05$)

การผลิตแป้งทนย่อยด้วยเอนไซม์จากแป้งข้าวโดยการหมักธรรมชาติ 1 วัน ร่วมกับการใช้พอลูลานเนส ตัดกิ่งเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และการเกิดรีโทรเกรดชันที่บ่มไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14 วัน องค์ประกอบทางเคมีของแป้งทนย่อยทั้ง 3 ชนิด มีความแตกต่างกัน ซึ่งความแตกต่างขององค์ประกอบทางเคมี ของพืชตระกูลถั่ว ขึ้นอยู่กับชนิดถั่ว พันธุกรรม สายพันธุ์ และสิ่งแวดล้อมในการปลูก เมื่อตรวจสอบลักษณะรูปร่าง

ของเม็ดแป้งของแป้งท่อยั่วข้าว ข้าวเหนียว และข้าวแดง ด้วยเครื่อง SEM ไม่พบลักษณะของเม็ดแป้งของแป้งท่อยั่วทั้ง 3 ชนิด ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากกระบวนการที่ใช้ในการผลิตแป้งท่อยั่วทำให้เกิดการทำลายความเป็นผลึกของเม็ดแป้ง เม็ดแป้งของพืชที่พบในธรรมชาติจะมีขนาด รูปร่าง และลักษณะแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับแหล่งแป้งนั้น ๆ เช่น เม็ดแป้งข้าวเจ้ามีพื้นผิวที่เรียบ รูปร่างหลายเหลี่ยม เมล็ดแป้งพุทธรักษา มีรูปร่างยาวรี คล้ายรูปไข่ แบน ผิวเรียบ เป็นต้น [18] แต่อย่างไรก็ตามกระบวนการที่ใช้ในการคัดแปรแป้งบางกระบวนการอาจมีผลทำให้เกิดการทำลายความเป็นผลึกของเม็ดแป้ง และโมเลกุลภายในเม็ดแป้งเกิดการผลึกกัน เม็ดแป้งจึงแตกตัวออก ซึ่งผลการทดลองที่พบลักษณะของเม็ดแป้งของข้าวทั้ง 3 ชนิดนี้ ถูกทำลายทำให้ไม่พบลักษณะเม็ดแป้ง สอดคล้องกับงานวิจัยของ [19] ที่ผลิตแป้งท่อยั่วจากแป้งข้าวโพดเหนียว (Waxy Maize Starch) โดยกระบวนการตัดกิ่งด้วยพลาสมาแล้วร่วมกับการเกิดรีโทรเกรเดชันพบว่า โครงสร้างของเม็ดแป้งถูกทำลาย มีลักษณะเป็นรูปร่างที่ไม่แน่นอน (Irregular Shape) และเมื่อวิเคราะห์ที่โครงสร้างผลึกของแป้งท่อยั่วข้าวทั้ง 3 ชนิดด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer แป้งท่อยั่วข้าวทั้ง 3 ชนิด มีผลึกแบบ A การคัดแปรแป้งอาจส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการจัดเรียงตัวของโครงสร้างผลึก เนื่องจากเกิดการระเหยของโมเลกุลน้ำที่อยู่บริเวณช่องว่างตรงกลางของโครงสร้างผลึกทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของสายโมเลกุลเกลียวคู่เข้าไปแทนที่ส่งผลต่อการจัดเรียงตัวของโครงสร้างผลึกได้ [20] โดยการศึกษาของ [19] ได้รายงานว่ามีแป้งข้าวโพดเหนียวดั้งเดิมมีโครงสร้างผลึกแบบ A แต่เมื่อผ่านโดยกระบวนการตัดกิ่งด้วยพลาสมาแล้วร่วมกับการเกิดรีโทรเกรเดชัน พบว่าโครงสร้างผลึกเปลี่ยนเป็นแบบ B และยังพบพีคที่ตำแหน่งมุม 2 θ เท่ากับ 14.3 และ 19.8 ซึ่งเป็นลักษณะของผลึกแบบ V ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างผลึกดังกล่าวจะมีผลทำให้สมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งเปลี่ยนแปลงไปด้วย

บทสรุป

การผลิตแป้งท่อยั่วด้วยเอนไซม์จากข้าวเหนียว ข้าวแดง และข้าวเหนียวด้วยการหมักธรรมชาติเป็นเวลา 1 วัน ร่วมกับการใช้พลาสมาแล้วร่วมกับการเกิดรีโทรเกรเดชัน 40 นาทีต่อกรัมเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และการเกิดรีโทรเกรเดชันที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส โดยใช้ระยะเวลาในการเก็บรักษา 14 วัน พบว่าปริมาณ RS ในแป้งท่อยั่วเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งฟลาวัวดั้งเดิม โดยแป้งท่อยั่วจากข้าวเหนียวมีปริมาณ RS เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 22.08 \pm 0.70 เป็น 30.98 \pm 0.56 แป้งท่อยั่วข้าวแดง RS เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 28.45 \pm 1.03 เป็น 33.02 \pm 0.36 และแป้งท่อยั่วข้าวเหนียวเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 16.35 \pm 0.59 เป็น 28.44 \pm 0.68 กระบวนการที่ใช้ในการผลิตแป้งท่อยั่วนี้มีผลทำให้โครงสร้างของเม็ดแป้งและผลึกของเม็ดแป้งถูกทำลายและเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งอาจส่งผลให้คุณสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งท่อยั่วจากข้าวแต่ละชนิดเปลี่ยนแปลงไปจากแป้งฟลาวัวดั้งเดิม จึงเป็นการเพิ่มความหลากหลายของคุณสมบัติแป้งฟลาวัว ที่สามารถใช้เป็นทางเลือกในการประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารที่หลากหลาย โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์อาหารเพื่อสุขภาพที่สมบัติน้ำตาลใยอาหาร (Dietary Fiber) และสามารถใช้เป็นส่วนผสมในอาหารเพื่อช่วยในการปรับปรุงเนื้อสัมผัส และกลิ่นรสของอาหารได้

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (ววน.) มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์ ปีงบประมาณ 2565

References

- [1] Punbusayakul, N. (1999). Utilization of Defatted Soy Flour For Partial Replacing of Wheat Flour Chiffon Cake. *Food*. Vol. 29, No. 3, pp. 180-186 (in Thai)

- [2] Wianggwalai, H. and Phuwong, K. (2018). Effect of Red Bean Flour Substituted for Wheat Flour on Physicochemical Properties and Free Radical Scavenging Activities in Steamed Bun (Mantou). **Thai Journal of Science and Technology**. Vol. 7, Supplement 5, pp. 534-543. (in Thai) DOI: 10.14456/tjst.2018.48
- [3] Boonkong, J. (2011). Resistant Starch. **Journal of Food Technology, Siam University**. Vol. 6, No. 1, pp. 1-8 (in Thai)
- [4] Phrukwiwattanakul, P. (2013). **Production of Resistant Starch from Different Types of Starch and Determination of Their Prebiotic Properties**. Master Degree of Science in Food Technology, Prince of Songkla University (in Thai)
- [5] Udomrati, S., Satmalee, P., and Surojanametakul, V. (2015). Production of Resistant Starch from Rice Flour by Fermentation and Hydrothermal Treatment. **KKU Science Journal**. Vol. 43, No. 2, pp. 232-248 (in Thai)
- [6] Rattanasuwan, S. and Chotineeranat, S. (2018). Effect of Production Resistant Starch by Using Pullulanase Enzyme and Retrogradation with Heat-Moisture Treatment on Legume Starch. **Phranakhon Rajabhat Research Journal: Science and Technology**. Vol. 13, No. 2, pp. 133-145 (in Thai)
- [7] Shin, S., Byun, J., Park, K. H., and Moon, T. W. (2004). Effect of Partial Acid Hydrolysis and Heat-Moisture Treatment on Formation of Resistant Tuber Starch. **Cereal Chemistry**. Vol. 81, No. 2, pp. 194-198. DOI: 10.1094/CCHEM.2004.81.2.194
- [8] Juliano, B. O. (1971). A Simplified Assay for Milled Rice Amylose. **Cereal Science Today**. Vol. 16, No. 10, pp. 334-338
- [9] Miller, G. (1959). Use of Dinitrosalicylic Acid Reagent for Determination of Reducing Sugars. **Analytical Chemistry**. Vol. 31, No. 3, pp. 426-428. DOI: 10.1021/ac60147a030
- [10] Dubois, M., Gilles, K. A., Hamilton, J. K., Rebers, P. A., and Smith, F. (1956). Colorimetric Method For Determination of Sugars and Related Substances. **Analytical Chemistry**. Vol. 28, No. 3, pp. 350-356. DOI: 10.1021/ac60111a017
- [11] AOAC. (2000). **Official Methods of Analysis Association of Official Analytical Chemist**. Washington D.C.
- [12] Granito, M. and Álvarez, G. (2006). Lactic Acid Fermentation of Black Bean (*Phaseolus Vulgaris*): Microbiological and Chemical Characterization. **Journal of the Science of Food and Agriculture**. Vol. 86, pp. 1164-1171. DOI: 10.1002/jsfa.2490
- [13] Yadav, B. S., Sharma, A., and Yadav, R. B. (2007). Study of Effect of Natural Fermentation on The Resistant Starch Content of Legume Based Fermented Foods. **Journal of Agricultural Technology**. Vol. 3, No. 1, pp. 21-27
- [14] Setiarto, R. H. B., Jenie, B. S. L., Faridah, D. N., Sakiawan, I., and Sulistiani. (2018). Effect of Lactic Acid Bacteria Fermentation and Autoclaving-Cooling for Resistant Starch and Prebiotic Properties of Modified Taro Flour. **International Food Research Journal**. Vol. 25, No. 4, pp. 1691-1697
- [15] Pongjanta, J., Utaipatanacheep, A., Naivikul, O., and Piyachomkwan, K. (2008). Enzymes-Resistant Starch (RS III) from Pullulanase-Debranched High Amylose Rice Starch. **Agricultural and Natural Resources**. Vol. 42, No. 5, pp. 198-205

- [16] González-Soto, R. A., Agama-Acevedo, E., Solorza-Feria, J., Rendón-Villalobos, R., and Bello-Pérez, L. A. (2004). Resistant Starch Made from Banana Starch by Autoclaving and Debranching. **Starch**. Vol. 56, Issue 10, pp. 495-49. DOI: 10.1002/star.200400283
- [17] Polesi, L. E. and Sarmento, S. B. S. (2011). Structural and Physicochemical Characterization of RS Prepared Using Hydrolysis and Heat Treatments of Chickpea Starch. **Starch**. Vol. 63, Issue 4, pp. 226-235. DOI: 10.1002/star.201000114
- [18] Chatpapamon, C., Pucha-arnon, S., and Uttapap, D. (2016). Effect of Heat-moisture Treatment on Properties and Structure of A- and B-crystalline Type Starches. **KMUTT Research and Development Journal**. Vol. 39, No. 2, pp. 257-270 (in Thai)
- [19] Shi, M., Chen, Y., Yu, S., and Gao, Q. (2013). Preparation and Properties of RS III from Waxy Maize Starch with Pullulanase. **Food Hydrocolloids**. Vol. 33, Issue 1, pp. 19-25. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2013.02.018
- [20] Gunaratne, A. and Hoover, R. (2002). Effect of Heat-Moisture Treatment on The Structure and Physicochemical Properties of Tuber and Root Starches. **Carbohydrate Polymers**. Vol. 49, Issue 4, pp. 425-437. DOI: 10.1016/S0144-8617(01)00354-X

การศึกษาเสถียรภาพลาดดินภายใต้น้ำหนักบรรทุกจากแผ่นดินไหว ณ โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช ตำบลมิตรภาพ อำเภอมวกเหล็ก จังหวัดสระบุรี

A Study of Slope Stability under Seismic Loads at Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy, Mittraphap Subdistrict, Muak Lek District, Saraburi Province

อริสมันต์ แสงธงทอง^{1*} และพงษ์ฤทธิ์ นิติวงศ์¹

Arissaman Sangthongtong^{1*} and Pongrit Nitiwong¹

Received: June 16, 2024; Revised: August 9, 2024; Accepted: August 14, 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเสถียรภาพลาดดินภายใต้แรงแผ่นดินไหว ณ โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช ตำบลมิตรภาพ อำเภอมวกเหล็ก จังหวัดสระบุรี โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (F.S.) ของเสถียรภาพลาดดิน และพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของชั้นดินทั้งทิศทางแนวราบและแนวตั้งที่ระยะห่างจากลาดดินในแนวราบ 2 เมตร งานวิจัยนี้ดำเนินการศึกษาเสถียรภาพลาดดินที่ค่าระดับความชัน 3 ระดับ ได้แก่ 1:1 1:2 และ 1:3 ของดินประเภท C (0.0465 g) และ D (0.0656 g) ที่แบกทานน้ำหนักของอาคารบ้านพักอาศัย 6 ชั้น ภายใต้ผลกระทบจากแรงแผ่นดินไหวในรูปของความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม ซึ่งถูกคำนวณโดยวิธีแรงสถิตเทียบเท่าตามมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง (มยพ. 1301/1302-61) ข้อมูลพารามิเตอร์จากรายงานผลการเจาะสำรวจดิน (Boring Log) ถูกใช้ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สองมิติ โดยทำการสร้างแบบจำลองคุณลักษณะชั้นดินด้วยวิธี Mohr - coulomb ที่ประกอบไปด้วย ชั้นดินเหนียว (Undrained Model) ชั้นดินทราย (Drained Model) และชั้นดินแข็ง โดยกำหนดให้ทุกชั้นดินมีการเชื่อมแน่นและส่งผ่านพลังงานให้แก่กัน ผลการศึกษาพบว่า ชั้นดินประเภท C ให้ค่า F.S. มากกว่าชั้นดินประเภท D โดยที่ค่า F.S. จะแปรผันกับค่าระดับความชันของลาดดินที่ระดับความชัน 1:1 1:2 และ 1:3 ตามลำดับ ในส่วนของการเคลื่อนตัวในทั้งสองทิศทาง ชั้นดินประเภท D ให้ผลการเคลื่อนตัวทั้ง 2 ทิศทางสูงกว่าชั้นดินประเภท C โดยแปรผันกับค่าระดับความชันของลาดดินที่ระดับความชัน 1:3 1:2 และ 1:1 ตามลำดับ

คำสำคัญ: แรงแผ่นดินไหว; มยพ. 1301/1302-61; ไฟไนต์เอลิเมนต์; ความลาด; เสถียรภาพ

¹ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา กองวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและโยธา กองการศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

¹ Civil Engineering, Department Division of Education, Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy

* Corresponding Author, Tel. 06 3224 1755, E - mail: arissaman@rtaf.mi.th

Abstract

This research studied the stability of soil slopes under seismic loads at Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Thai Air Force Academy, Mittraphap Subdistrict, Muak Lek District, Saraburi Province. The objective of this research is to examine the Factor of Safety (F.S.) for slope stability and the displacement behavior of soil layers in both horizontal and vertical directions at a horizontal distance of 2 meters from the slope. This study investigated the stability at three slope inclination levels: 1:1, 1:2, and 1:3 of soil type C (0.0465 g) and type D (0.0656 g) which supported the weight of a 6-story residential building. These slopes were subjected to the impact of seismic loads in terms of the spectral response acceleration, which was calculated by the equivalent static force method according to the Department of Public Works and Town & Country Planning standards (DPT 1301/1302-61). The soil parameters from the Boring Log reports were utilized in the analysis using the two-dimensional finite element method. The soil profile was modeled employing the Mohr-Coulomb approach, comprising clay layers (Undrained model), sand layers (Drained model), and hard soil layers, which were assumed to be tightly bonded and capable of transmitting energy to each other. The results indicated that soil type C has a higher F.S. than soil type D, with the F.S. fluctuating according to the slope inclination ratios of 1:1, 1:2, and 1:3, respectively. In terms of displacement in both directions, soil type D exhibited greater movement than soil type C, with displacement varying according to the slope inclination ratios of 1:3, 1:2, and 1:1, respectively.

Keywords: Seismic Load; DPT1301/1302-61; Finite Element; Slope; Stability

บทนำ

จากรายงานฉบับสมบูรณ์ โครงการจ้างศึกษาพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อนที่คาดว่าจะมีพลัง รอยเลื่อนลำตะคองของกรมทรัพยากรธรณี กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมพบว่า โรงเรียนนายเรืออากาศ นวมินทราชตรียาธิราช ตำบลมิตรภาพ อำเภอมวกเหล็ก จังหวัดสระบุรี ตั้งอยู่ท่ามกลางรอยเลื่อนแผ่นดินไหว 3 รอยเลื่อน ประกอบไปด้วย รอยเลื่อนมวกเหล็ก รอยเลื่อนลำพญากลาง และรอยเลื่อนลำตะคอง โดยที่รอยเลื่อนที่พาดผ่านอำเภอมวกเหล็ก คือ รอยเลื่อนลำตะคอง ซึ่งมีรอยเลื่อนย่อยพาดผ่านอำเภอมวกเหล็ก จำนวน 2 รอยเลื่อนย่อย ประกอบไปด้วย รอยเลื่อนย่อยซับซาม ตำบลซับสนุ่น อำเภอมวกเหล็ก จังหวัดสระบุรี มีความยาว 28 กิโลเมตร และรอยเลื่อนย่อยปางหัวช้าง ตำบลหนองย่างเสือ อำเภอมวกเหล็ก จังหวัดสระบุรี มีความยาว 10 กิโลเมตร เมื่ออ้างอิงประกาศกรมอุตุนิยมวิทยา เรื่อง อัปเดตข้อมูลแผ่นดินไหวที่อำเภอปากช่อง จังหวัดนครราชสีมา พบว่า ในอดีตเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหวขนาด 3.0 ริกเตอร์ จำนวน 2 ครั้ง โดยครั้งที่ 1 ประกาศ ณ วันที่ 25 กรกฎาคม พ.ศ. 2535 มีจุดเหนือเกิดศูนย์แผ่นดินไหวที่ละติจูด 15.00 องศาเหนือ ลองจิจูด 101.00 องศาตะวันออกบริเวณทิศตะวันตกของเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ จังหวัดลพบุรี และครั้งที่ 2 ประกาศ ณ วันที่ 14 ตุลาคม พ.ศ. 2559 มีจุดเหนือเกิดศูนย์แผ่นดินไหวที่ละติจูด 14.69 องศาเหนือ ลองจิจูด 101.38 องศาตะวันออกบริเวณอำเภอปากช่อง จังหวัดนครราชสีมา โดยทั้ง 2 เหตุการณ์เกิดขึ้นจากการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อนลำตะคองที่มีความยาวของรอยเลื่อน 24 กิโลเมตร ซึ่งส่งผลให้ประชาชนในอำเภอมวกเหล็ก รับรู้ถึงแรงสั่นสะเทือน แต่ไม่มีรายงานความเสียหาย ด้วยเหตุนี้จึงดำเนินการตรวจสอบพื้นที่โดยรอบโรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทราชตรียาธิราช โดยใช้ข้อมูลทางธรณีวิทยาจากรายงานผลการเจาะสำรวจดิน (Boring Log) และข้อมูลสารสนเทศภูมิศาสตร์จากแผนที่ GIS (Geographic Information System) พบว่า ลาดดินในพื้นที่โรงเรียนนายเรือ

อากาศนวมินทกษัตริยาธิราช เป็นลาดดินที่ผสมผสานระหว่างลาดดินธรรมชาติ (Natural Slope) และลาดดินจากการกระทำของมนุษย์ (Man Made Slope) ที่ความชัน 1:1 1:2 และ 1:3 อีกทั้งด้านหลังของพื้นที่โรงเรียนฯ เป็นเขามะกอก ที่เป็นภูเขาหิน และมีหน้าผาสูงชัน ซึ่งอาจเกิดความเสียหายได้หากเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหวขึ้น [1] การวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดิน เป็นเหตุการณ์ที่คาดการณ์ล่วงหน้าได้โดยการตรวจวัดหรือวิเคราะห์หาสาเหตุ เพื่อการออกแบบแก้ไข โดยจะส่งผลให้ความเสี่ยงเป็นศูนย์ หากรู้เท่าทันและปรับปรุงแก้ไขได้ทันที่ ซึ่งวิธีการวิเคราะห์ที่เหมาะสมในปัจจุบัน คือ วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) [2] - [3] โดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์สำเร็จรูปที่ใช้เทคนิคทางการวิเคราะห์เชิงตัวเลขเพื่อวิเคราะห์และแก้ไขปัญหาด้านวิศวกรรมเทคนิคธรณี ซึ่งในงานวิจัยฉบับนี้ดำเนินการใช้ทฤษฎี Pseudo Static Analysis [4] - [6] ร่วมกับน้ำหนักกระทำต่อลาดดิน ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ค่าการตอบสนองต่อแรงแผ่นดินไหวที่กำหนดให้มวลดินต้องรับแรง Body Force จากแรงแผ่นดินไหว โดยอยู่ในรูปของค่าความเร่งในแนวราบ

งานวิจัยนี้จึงดำเนินการศึกษาความปลอดภัยในการรับน้ำหนักโครงสร้างของชั้นดินที่ได้รับผลกระทบจากแรงแผ่นดินไหวและเสถียรภาพของพื้นที่ลาดดิน ในพื้นที่กรณีศึกษาโรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช ตำบลมิตรภาพ อำเภอแม่เหล็ก จังหวัดสระบุรี สำหรับอาคารบ้านพักอาศัย 6 ชั้น เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (F.S.) ของเสถียรภาพลาดดิน และพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของชั้นดินทั้งทิศทางแนวราบและแนวตั้ง ที่ระยะห่างจากลาดดินในแนวราบ 2 เมตร เพื่อนำเสนอแนวทางการป้องกัน การแก้ไขความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้น และก่อให้เกิดประโยชน์สำหรับวิศวกร สถาปนิก ผู้รับเหมาก่อสร้าง และชุมชนในพื้นที่ต่อไป

วิธีดำเนินการวิจัย

1. ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม

1.1 ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับพื้นที่อำเภอแม่เหล็ก จังหวัดสระบุรี

ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมของแผ่นดินไหวรุนแรงสูงสุดพิจารณา (Maximum Considered Earthquake) ที่คาบการสั่น 0.2 วินาที (S_S) และคาบการสั่น 1 วินาที (S_1) ได้มาจากการวิเคราะห์ความเสี่ยงภัยแผ่นดินไหว โดยสมมติให้สภาพชั้นดินในทุกพื้นที่เป็นแบบดินแข็งหรือหินที่มีความเร็วคลื่นเฉือนโดยเฉลี่ยในช่วงจากผิวดินถึงความลึก 30 เมตร (\bar{v}_s) เท่ากับ 760 เมตรต่อวินาที ซึ่ง ณ อำเภอแม่เหล็ก จังหวัดสระบุรีมีค่า S_S เท่ากับ 0.057 และค่า S_1 เท่ากับ 0.041 [7] - [8]

1.2 ประเภทของชั้นดิน ณ ที่ตั้งอาคารบ้านพักอาศัย 6 ชั้น

สภาพชั้นดิน ณ บริเวณที่ตั้งของอาคารบ้านพักอาศัย 6 ชั้น มีผลกระทบต่อระดับความรุนแรงของการสั่นสะเทือนจากแรงแผ่นดินไหว ดังนั้นการนำค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม จากหัวข้อ 1.1 มาใช้ในการออกแบบ จึงจำเป็นต้องปรับแก้ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมให้เหมาะสมกับสภาพดิน ณ บริเวณที่ตั้งของอาคาร โดยประเภทของชั้นดินของอาคารบ้านพักอาศัย 6 ชั้น เลือกใช้ชั้นดินประเภท C ชั้นดินแข็ง และชั้นดินประเภท D ชั้นดินปกติ [7] - [8]

1.3 การปรับแก้ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม

ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมของแผ่นดินไหวรุนแรงสูงสุดที่พิจารณา ณ บริเวณที่ตั้งของอาคาร สามารถปรับแก้ค่าให้เหมาะสมกับประเภทของชั้นดิน ณ ที่ตั้งอาคาร ด้วยสมการที่ (1) - (2) [7] - [8]

$$S_{MS} = F_a S_s \quad (1)$$

$$S_{M1} = F_v S_1 \quad (2)$$

โดยที่

S_{MS} คือ ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่คาบการสั่น 0.2 วินาที ที่ถูกปรับแก้เนื่องจากผลของชั้นดิน ณ ที่ตั้งอาคาร

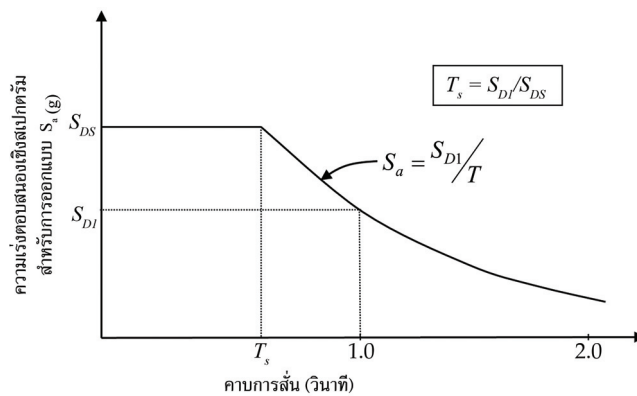
- S_{M1} คือ ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่คาบการสั่น 1.0 วินาที ที่ถูกปรับแก้เนื่องจากผลของชั้นดิน ณ ที่ตั้งอาคาร
- F_a คือ สัมประสิทธิ์สำหรับชั้นดิน ณ ที่ตั้งอาคาร สำหรับคาบการสั่น 0.2 วินาที สำหรับชั้นดินประเภท C ชั้นดินแข็งมีค่า 1.2 ที่ $S_a \leq 0.25$ และชั้นดินประเภท D ชั้นดินปกตมีค่า 1.6 ที่ $S_a \leq 0.25$
- F_v คือ สัมประสิทธิ์สำหรับชั้นดิน ณ ที่ตั้งอาคาร สำหรับคาบการสั่น 1 วินาที สำหรับชั้นดินประเภท C ชั้นดินแข็งมีค่า 1.7 ที่ $S_1 \leq 0.25$ และชั้นดินประเภท D ชั้นดินปกตมีค่า 2.4 ที่ $S_1 \leq 0.25$

1.4 การปรับค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบ

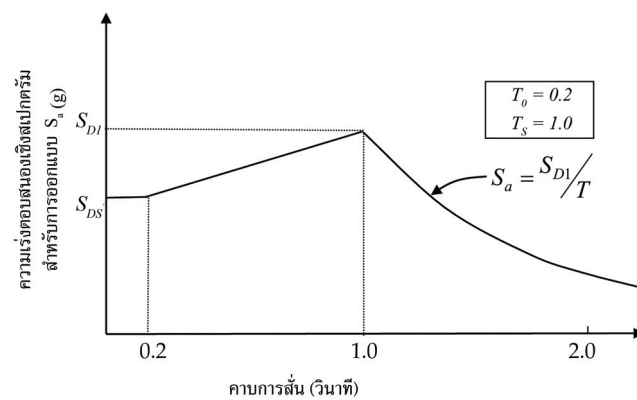
ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบที่คาบการสั่น 0.2 วินาที (S_{DS}) และที่คาบการสั่น 1 วินาที (S_{D1}) คำนวณจากสมการที่ (3) - (4) ดังรูปที่ 1 และ 2

$$S_{DS} = \frac{2}{3} S_{MS} \tag{3}$$

$$S_{D1} = \frac{2}{3} S_{M1} \tag{4}$$



รูปที่ 1 ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบด้วยวิธีแรงสถิตเทียบเท่าสำหรับพื้นที่ทั่วประเทศ (ยกเว้นแอ่งกรุงเทพ) ที่มีค่า $S_{D1} \leq S_{DS}$ [7] - [8]



รูปที่ 2 ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบด้วยวิธีแรงสถิตเทียบเท่าสำหรับพื้นที่ทั่วประเทศ (ยกเว้นแอ่งกรุงเทพ) ที่มีค่า $S_{D1} \leq S_{DS}$ [7] - [8]

2. การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน

การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน (Slope Stability) แบ่งเป็นลาดดินธรรมชาติ และลาดดินจากการกระทำของมนุษย์ โดยลาดดินในพื้นที่โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราชเป็นลาดดินที่ผสมผสานทั้ง 2 รูปแบบ ซึ่งสาเหตุการพังทลายของลาดดิน เกิดจากการรบกวนรูปแบบต่าง ๆ อาทิเช่น น้ำหนักภายนอก ฤดูกาลที่เปลี่ยนแปลง แรงโน้มถ่วงของโลก แรงเนื่องจากการซึมของน้ำ (Seepage of Water) การเกิดการร่อนของผิวลาดเนื่องจากการไหลของน้ำ การลดลงของระดับน้ำหน้าลาดดิน (Draw Down Effect) ผลจากแรงสั่นสะเทือนแผ่นดินไหว โดยแบ่งการพังทลายของลาดดิน ออกเป็น 2 ประเภท [9] - [10]

2.1 ลาดดินแบบต่อเนื่องไม่จำกัด (Infinite Slope) เกิดการพังทลายอย่างต่อเนื่องขยายเป็นพื้นที่กว้าง

2.2 ลาดดินแบบจำกัด (Finite Slope) เกิดการพังทลายบริเวณจำกัดไม่แผ่ขยายพื้นที่

โดยในการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน ด้วยวิธีลาดดินแบบจำกัด เลือกใช้การพังทลายแบบส่วนหนึ่งของวงกลม (Circular Slip) ซึ่งใช้หลักการวิเคราะห์โดยวิธี Principle of Slice เพื่อใช้แก้ปัญหาของสมการสมดุลย์ โดยมีหลักการดังนี้ คือ [11] - [12]

2.2.1 สมดุลของแรงภายในชิ้นแนวดิ่ง (Force Equilibrium of Single Slice)

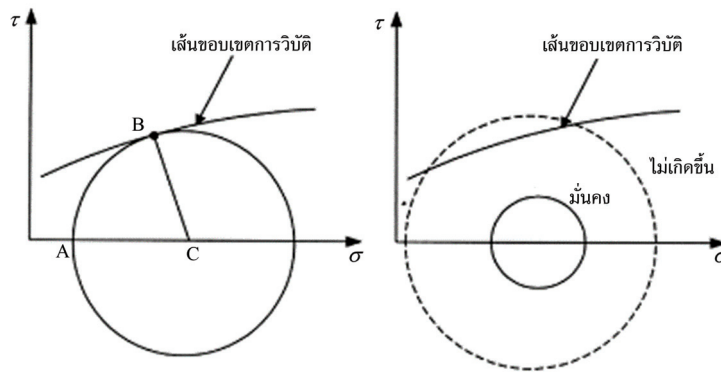
2.2.2 สมดุลของโมเมนต์ภายในชิ้นแนวดิ่ง (Moment Equilibrium of Single Slice)

2.2.3 สมดุลของแรงของชิ้นแนวดิ่งทั้งหมด (Force Equilibrium of Total Mass)

2.2.4 สมดุลของโมเมนต์ของชิ้นแนวดิ่งทั้งหมด (Moment Equilibrium of Total Mass)

3. กำลังเฉือนของลาดดิน (Shear Strength)

มวลดินจะเกิดการพิบัติเมื่อวงกลมของมอร์ที่แทนสภาพของหน่วยแรงในมวลดินสัมผัสกับเส้นขอบเขตการพิบัติ (Failure Envelop) ทั้งนี้หากวงกลมของมอร์อยู่ภายในหรือต่ำกว่าเส้นขอบเขตการพิบัติมวลดินจะสามารถรับแรงต่อไปได้โดยไม่พิบัติ [13] - [15] ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนกับหน่วยแรงตั้งฉาก [11]

โดย Mohr and Coulomb แนะนำความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนกับหน่วยแรงตั้งฉากที่ระนาบใด ๆ ของมวลดินในรูปของสมการเชิงเส้นตรงแสดงขอบเขตการวิบัติของมวลดิน ดังสมการที่ (5) - (6) [13] - [15]

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (5)$$

เมื่อ

τ = หน่วยแรงเฉือนที่จุดพิบัติหรือค่ากำลังเฉือนของดิน (Shear Strength of Soil)

σ = หน่วยแรงตั้งฉากบนระนาบแรงเฉือน (Normal Stress)

c = การยึดเกาะกันของเม็ดดิน (Cohesion)

ϕ = มุมเสียดทานภายในของเม็ดดิน (Internal Friction Angle)

$$\tau = c' + \sigma' \tan \phi' \tag{6}$$

เมื่อ

τ = หน่วยแรงตั้งฉากประสิทธิผลบนระนาบแรงเฉือน = $\sigma - u$

σ' = แรงดันน้ำ (Pore Water Pressure)

c' = การยึดเกาะกันประสิทธิผลของเม็ดดิน (Effective Cohesion)

ϕ' = มุมเสียดทานภายในประสิทธิผลของเม็ดดิน

4. การคำนวณหาค่า Factor of Safety (F.S.)

วิธี Phi-c Reduction เป็นหลักการที่ใช้เพื่อหาค่า F.S. ของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้หลักการลดทอนค่ากำลังของตัวแปร $\tan \phi$ และ c ลงจนกระทั่งโครงสร้างเกิดการพิบัติดังสมการที่ (7) [3]

$$F.S. = \frac{\text{Available Strength}}{\text{Strength at Failure}} \tag{7}$$

งานวิจัยนี้อาศัยแบบจำลอง Mohr-Coulomb Model สำหรับจำลองพื้นผิววิบัติ (Yield Surface) และกำหนดพฤติกรรมของดินเป็นลักษณะ Elastic-Plastic ซึ่งพื้นผิววิบัติจะถูกกำหนดโดยคุณสมบัติของดิน (Soil Parameter) ที่ใส่เข้าไป ซึ่งจะไม่ขึ้นอยู่กับความเครียดและหน่วยแรงใด ๆ ก็ตามที่อยู่ภายในขอบเขตของพื้นผิววิบัติ ซึ่งจะมีพฤติกรรมเป็นอีลาสติก (Elastic) โดยสมบูรณ์ [3]

5. ชั้นดินในแบบจำลอง

จากการเจาะสำรวจชั้นดิน ณ อาคารบ้านพักอาศัย 6 ชั้น ทำให้สามารถสรุปค่าพารามิเตอร์ [16] - [19] ที่ใช้ในการวิจัยดังตารางที่ 1 ซึ่งพบว่า ที่ระดับ 0 - 2 m เป็นชั้นดินเหนียวปนทราย ที่ระดับ 2 - 6 m เป็นชั้นทราย และที่ระดับ 6 - 8 m เป็นชั้นดินแข็งหรือหิน ทั้งนี้กำหนดระดับน้ำใต้ดินไว้ที่ -2 m ดังรูปที่ 4

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์จากการเจาะสำรวจชั้นดินที่ใช้ในแบบจำลอง

No.	Depth		Soil Classification	γ (t/m ³)	SPT(N)	c (t/m ³)	ϕ
	from	to					
1	4	0	Fill Material	1.80	-	2	22.0
2	0	2	Very Stiff Sandy Clay	1.75	13	6	-
3	2	4	Dense to Very Dense Sand	2.00	35	-	34.3
4	4	6	Very Dense Sand	2.10	70	-	39.0
5	6	10	Hard Soil	2.20	-	-	42.7

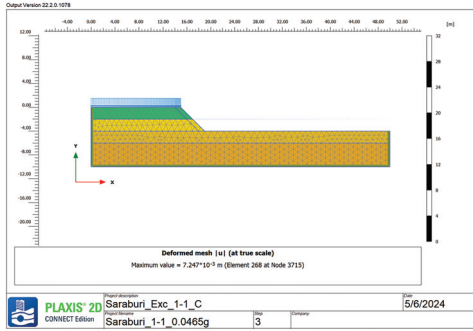
โดยที่

γ คือ หน่วยน้ำหนักของดิน (t/m³)

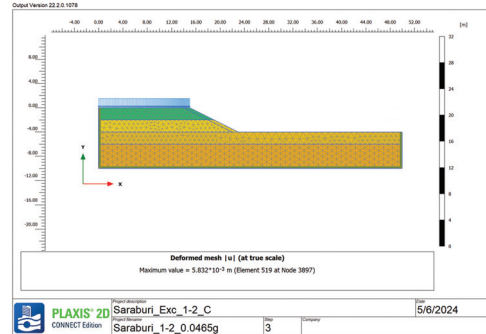
SPT(N) คือ จำนวนครั้งที่นับได้ในการตอกให้ดินยุบ 30 cm

c คือ ค่าแรงยึดเหนี่ยวของดิน (t/m³)

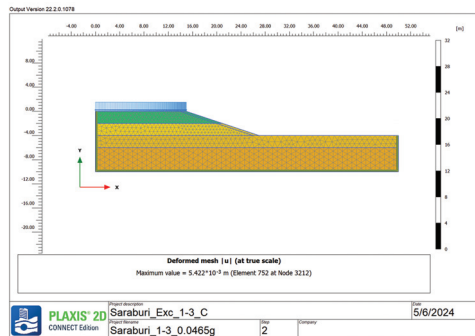
ϕ คือ มุมเสียดทานภายในของดิน (องศา)



(ก) อัตราส่วนความชัน 1:1



(ข) อัตราส่วนความชัน 1:2



(ค) อัตราส่วนความชัน 1:3

รูปที่ 4 แบบจำลองชั้นดินชุด

ผลการทดลองและวิจารณ์

จากการรวบรวมข้อมูลที่ใช้สำหรับงานวิจัย สามารถแสดงผลได้ดังนี้ คือ

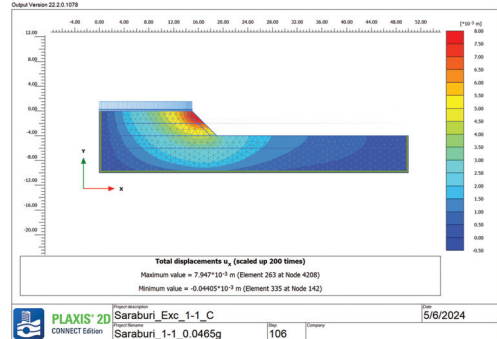
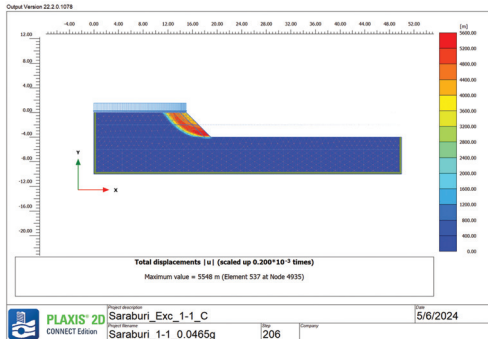
1. ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่ใช้สำหรับดินประเภท C ชั้นดินแข็งที่ 0.0465 g และดินประเภท D ชั้นดินปกติที่ 0.0656 g
2. วิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินใช้วิธีลาดดินแบบจำกัด ภายใต้หลักการสมดุลของแรงภายใน ชั้นแนวตั้ง สมดุลของโมเมนต์ภายในชั้นแนวตั้ง สมดุลของแรงของชั้นแนวตั้งทั้งหมด และสมดุลของโมเมนต์ของชั้นแนวตั้งทั้งหมด ด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D [20]
3. คำนวณค่ากำลังเฉือนของลาดดิน ด้วยวิธี Mohr and Coulomb เพื่อนำไปประมวลผลในโปรแกรม PLAXIS 2D
4. ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองชั้นดิน ได้แก่ หน่วยน้ำหนักของดิน (t/m^3) จำนวนครั้งที่นับได้ในการตอกให้ดินยุบ 30 cm ค่าแรงยึดเหนี่ยวของดิน (t/m^3) และมุมเสียดทานภายในของดิน (องศา)
5. กำหนดค่าอัตราส่วนความปลอดภัยในระยะสั้น (Short-Term) 1-3 ปี (เมื่อมีการก่อสร้างอาคารแล้วเสร็จ) ไม่ต่ำกว่า 1.3 และระยะยาว (Long-Term) ไม่ต่ำกว่า 1.5 ภายใต้มาตรฐานกรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม และ FHWA-NHI [21] - [22]

เมื่อนำข้อมูลทั้งหมดมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D สามารถแสดงผลได้ดังต่อไปนี้

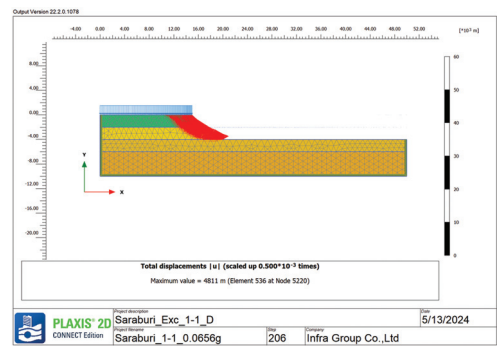
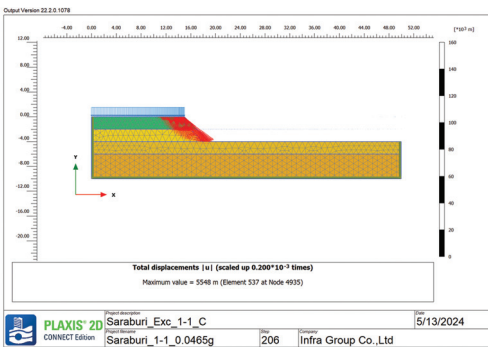
1. กรณีอัตราส่วนความชัน 1:1

อัตราส่วนความปลอดภัยของเสถียรภาพลาดดินที่อัตราส่วนความชัน 1:1 ของดินประเภท C มีค่าเท่ากับ 2.11 และดินประเภท D มีค่า 2.06 ซึ่งดินทั้ง 2 ประเภท มีค่ามากกว่า 1 ดังนั้นลาดดินที่อัตราส่วนความชัน 1:1 มีความปลอดภัยสามารถต้านทานน้ำหนักบรรทุกทุกแบบทวนและแรงแผ่นดินไหวได้ ดังรูปที่ 5

การเคลื่อนตัวของชั้นดินในทิศทางแนวราบและแนวตั้งที่อัตราส่วนความชัน 1:1 ของดินประเภท C ชั้นดินแข็ง (0.0465 g) มีค่าเท่ากับ 6.01 และ -5.10 mm. ในส่วนของดินประเภท D ชั้นดินปกติ (0.0656 g) มีค่าเท่ากับ 6.55 และ -5.16 mm. ดังรูปที่ 6 โดยมีลักษณะการเสียรูปและตำแหน่งที่เกิดการเสียรูป ดังรูปที่ 7

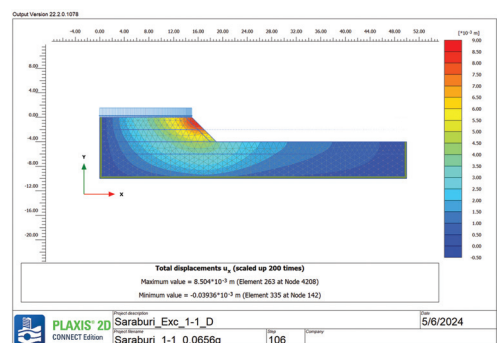
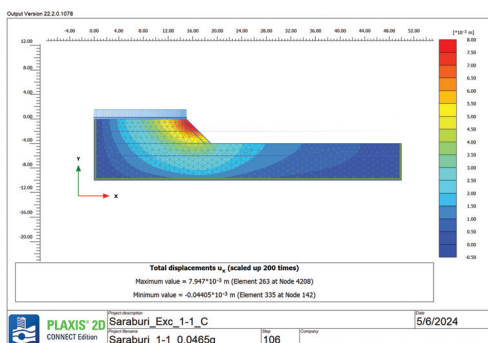


(ก) F.S. = 2.11 ดินประเภท C ชั้นดินแข็ง 0.0465 g (ข) F.S. = 2.06 ดินประเภท D ชั้นดินปกติ 0.0656 g



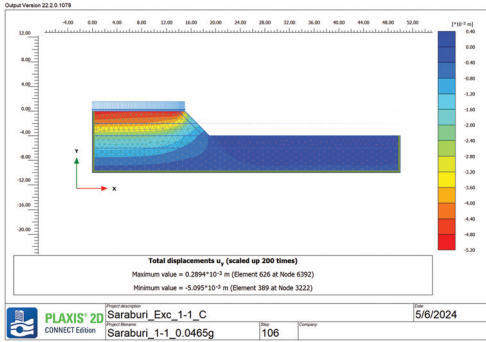
(ค) การเคลื่อนตัวที่ความชัน 1:1 ดินประเภท C ชั้นดินแข็ง 0.0465 g รูปที่ 5 อัตราส่วนความปลอดภัยของเสถียรภาพลาดดินที่อัตราส่วนความชัน 1:1

(ง) การเคลื่อนตัวที่ความชัน 1:1 ดินประเภท D ชั้นดินปกติ 0.0656 g



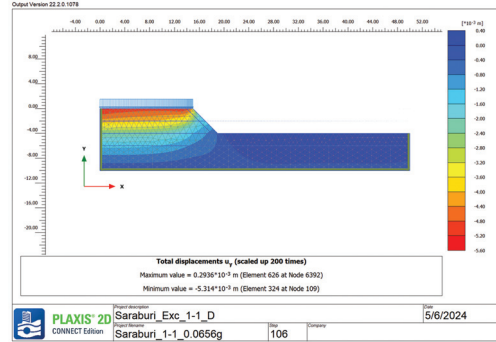
(ก) แนวราบ 6.01 mm. ดินประเภท C ชั้นดินแข็ง 0.0465 g รูปที่ 6 การเคลื่อนตัวของชั้นดินในทิศทางแนวราบและแนวตั้งที่อัตราส่วนความชัน 1:1

(ข) แนวราบ 6.55 mm. ดินประเภท D ชั้นดินปกติ 0.0656 g



(ค) แนวโค้ง -5.10 mm.

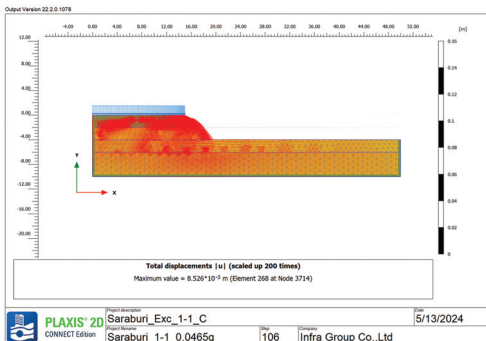
ดินประเภท C ชั้นดินแข็ง 0.0465 g



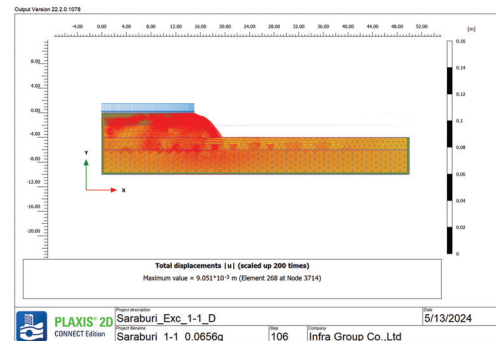
(ง) แนวโค้ง -5.16 mm.

ดินประเภท D ชั้นดินปกติ 0.0656 g

รูปที่ 6 การเคลื่อนตัวของชั้นดินในทิศทางแนวราบและแนวตั้งที่อัตราส่วนความชัน 1:1 (ต่อ)



(ก) ดินประเภท C ชั้นดินแข็ง 0.0465 g



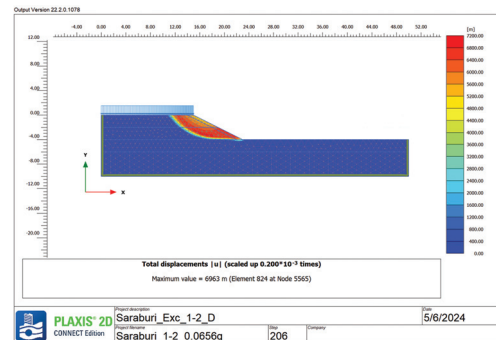
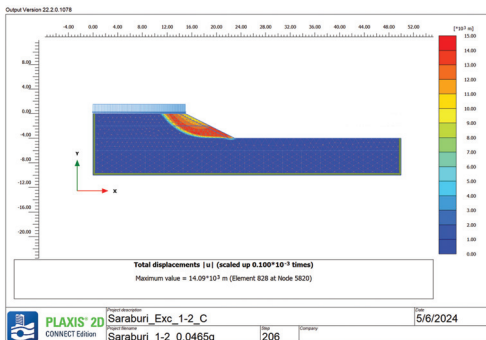
(ข) ดินประเภท D ชั้นดินปกติ 0.0656 g

รูปที่ 7 ลักษณะการเสียรูปและตำแหน่งที่เกิดการเสียรูปที่อัตราส่วนความชัน 1:1

2. อัตราส่วนความชัน 1:2

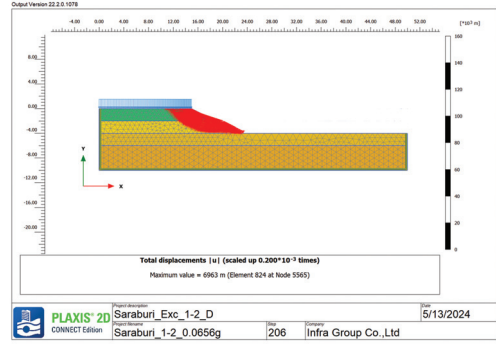
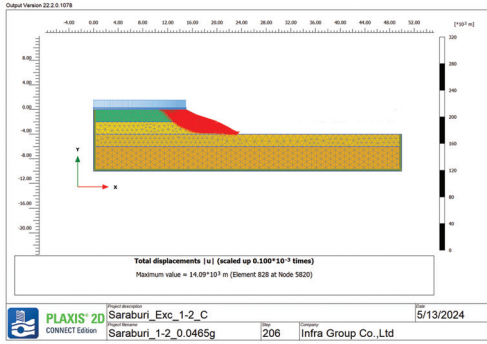
อัตราส่วนความปลอดภัยของเสียรูปลาดดินที่อัตราส่วนความชัน 1:2 ของดินประเภท C มีค่าเท่ากับ 2.62 และดินประเภท D มีค่า 2.54 ซึ่งดินทั้ง 2 ประเภท มีค่ามากกว่า 1 ดังนั้นลาดดินที่อัตราส่วนความชัน 1:2 มีความปลอดภัยสามารถต้านทานน้ำหนักบรรทุกทุกแบบกานและแรงแผ่นดินไหวได้ ดังรูปที่ 8

การเคลื่อนตัวของชั้นดินในทิศทางแนวราบและแนวตั้งที่อัตราส่วนความชัน 1:2 ของดินประเภท C ชั้นดินแข็ง (0.0465 g) มีค่าเท่ากับ 4.98 และ -4.57 mm. ในส่วนของดินประเภท D ชั้นดินปกติ (0.0656 g) มีค่าเท่ากับ 5.49 และ -4.61 mm. ดังรูปที่ 9 โดยมีลักษณะการเสียรูป และตำแหน่งที่เกิดการเสียรูป ดังรูปที่ 10



(ก) F.S. = 2.62 ดินประเภท C ชั้นดินแข็ง 0.0465 g (ข) F.S. = 2.54 ดินประเภท D ชั้นดินปกติ 0.0656 g

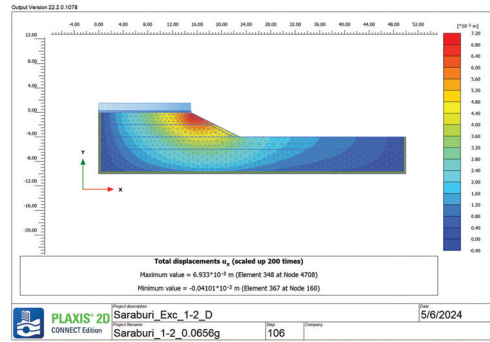
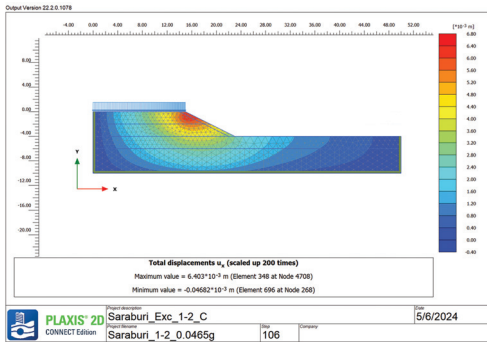
รูปที่ 8 อัตราส่วนความปลอดภัยของเสียรูปลาดดินที่อัตราส่วนความชัน 1:2



(ค) การเคลื่อนตัวที่ความชัน 1:2
ดินประเภท C ชั้นดินแข็ง 0.0465 g

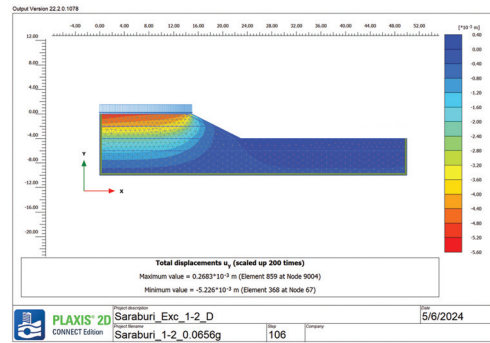
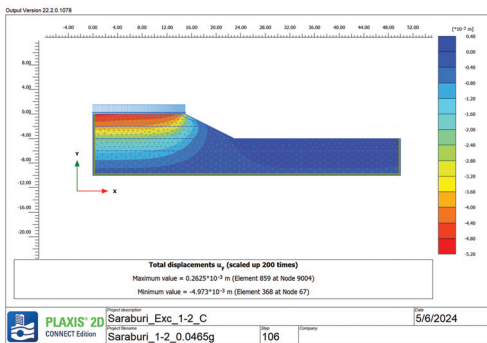
(ง) การเคลื่อนตัวที่ความชัน 1:2
ดินประเภท D ชั้นดินปกติ 0.0656 g

รูปที่ 8 อัตราส่วนความปลอดภัยของเสถียรภาพลาดดินที่อัตราส่วนความชัน 1:2 (ต่อ)



(ก) แนวราบ 4.98 mm.
ดินประเภท C ชั้นดินแข็ง 0.0465 g

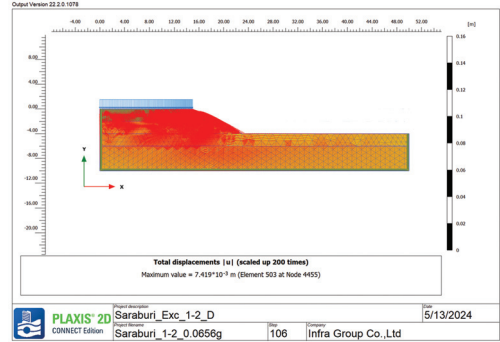
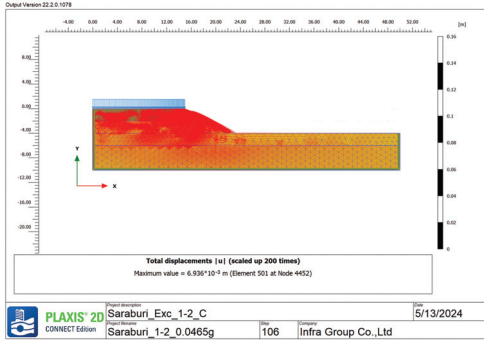
(ข) แนวราบ 5.49 mm.
ดินประเภท D ชั้นดินปกติ 0.0656 g



(ค) แนวตั้ง -4.57 mm.
ดินประเภท C ชั้นดินแข็ง 0.0465 g

(ง) แนวตั้ง -4.61 mm.
ดินประเภท D ชั้นดินปกติ 0.0656 g

รูปที่ 9 การเคลื่อนตัวของชั้นดินในทิศทางแนวราบและแนวตั้งที่อัตราส่วนความชัน 1:2

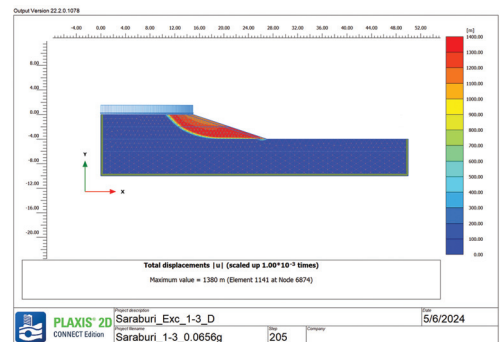
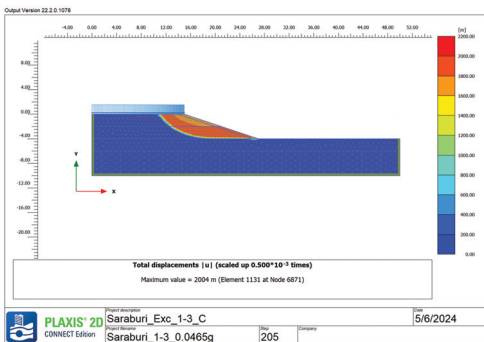


(ค) ดินประเภท C ชั้นดินแข็ง 0.0465 g รูปที่ 10 ลักษณะการเสียรูปและตำแหน่งที่เกิดการเสียรูปที่อัตราส่วนความชัน 1:2

(ง) ดินประเภท D ชั้นดินปกติ 0.0656 g

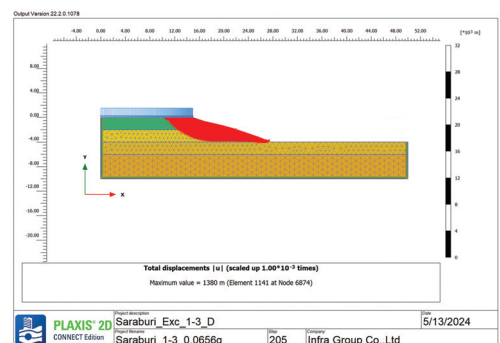
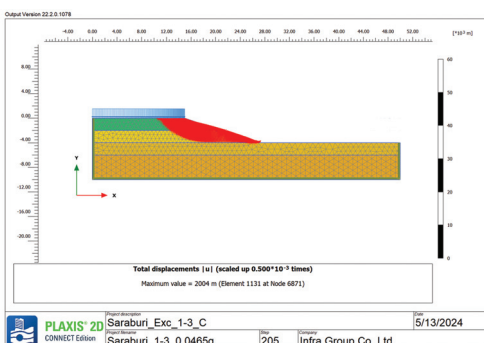
3. อัตราส่วนความชัน 1:3

อัตราส่วนความปลอดภัยของเสียรูปลาดดินที่อัตราส่วนความชัน 1:3 ของดินประเภท C มีค่าเท่ากับ 3.05 และดินประเภท D มีค่า 2.94 ซึ่งดินทั้ง 2 ประเภท มีค่ามากกว่า 1 ดังนั้นลาดดินที่อัตราส่วนความชัน 1:3 มีความปลอดภัยสามารถต้านทานน้ำหนักบรรทุกทุกแบบกานและแรงแผ่นดินไหวได้ ดังรูปที่ 11



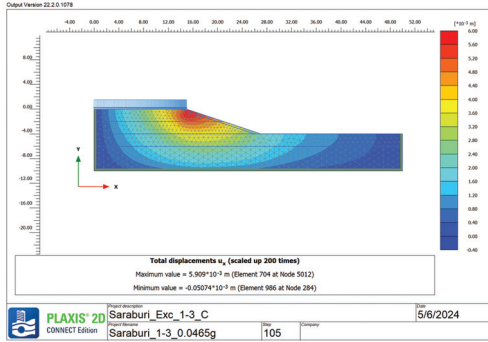
(ก) F.S. = 3.05 ดินประเภท C ชั้นดินแข็ง 0.0465 g

(ข) F.S. = 2.94 ดินประเภท D ชั้นดินปกติ 0.0656 g

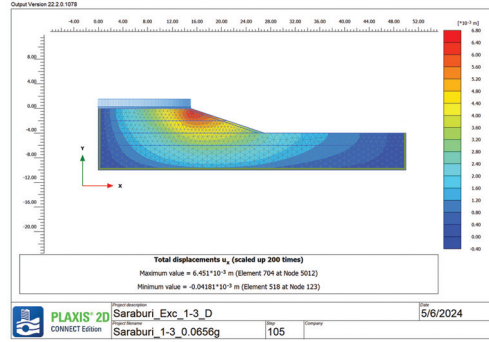


(ค) การเคลื่อนตัวที่ความชัน 1:3 ดินประเภท C ชั้นดินแข็ง 0.0465 g รูปที่ 11 อัตราส่วนความปลอดภัยของเสียรูปลาดดินที่อัตราส่วนความชัน 1:3

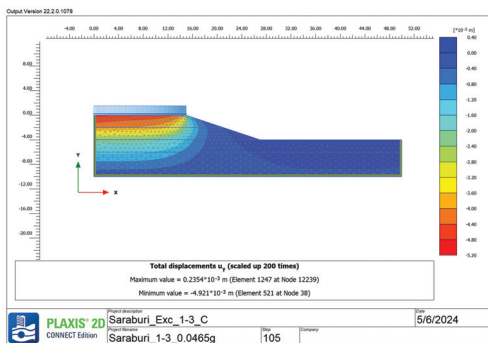
(ง) การเคลื่อนตัวที่ความชัน 1:3 ดินประเภท D ชั้นดินปกติ 0.0656 g



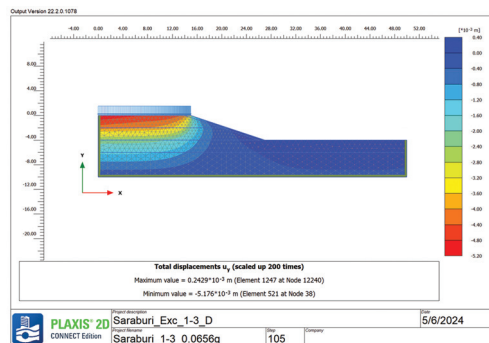
(ก) แนวราบ 4.64 mm.
ดินประเภท C ชั้นดินแข็ง 0.0465 g



(ข) แนวราบ 5.17 mm.
ดินประเภท D ชั้นดินปกติ 0.0656 g

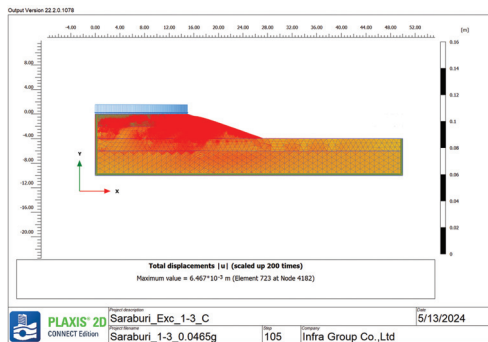


(ค) แนวตั้ง -4.41 mm.
ดินประเภท C ชั้นดินแข็ง 0.0465 g

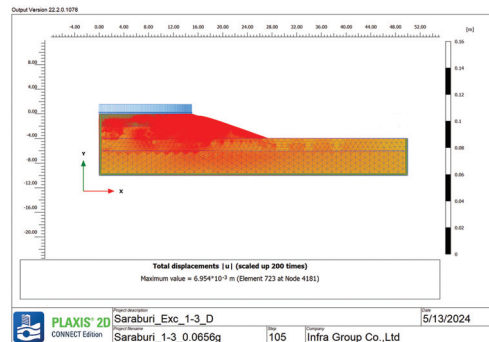


(ง) แนวตั้ง -4.46 mm.
ดินประเภท D ชั้นดินปกติ 0.0656 g

รูปที่ 12 การเคลื่อนตัวของชั้นดินในทิศทางแนวราบและแนวตั้งที่อัตราส่วนความชัน 1:3



(ก) ดินประเภท C ชั้นดินแข็ง 0.0465 g



(ข) ดินประเภท D ชั้นดินปกติ 0.0656 g

รูปที่ 13 ลักษณะการเสียรูปและตำแหน่งที่เกิดการเสียรูปที่อัตราส่วนความชัน 1:3

การเคลื่อนตัวของชั้นดินในทิศทางแนวราบและแนวตั้งที่อัตราส่วนความชัน 1:3 ของดินประเภท C ชั้นดินแข็ง (0.0465 g) มีค่าเท่ากับ 4.64 และ -4.41 mm. ในส่วนของดินประเภท D ชั้นดินปกติ (0.0656 g) มีค่าเท่ากับ 5.17 และ -4.46 mm. ดังรูปที่ 12 โดยมีลักษณะการเสียรูป และตำแหน่งที่เกิดการเสียรูป ดังรูปที่ 13 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D ของเสถียรภาพลาดดินที่มีอัตราส่วนความชัน 1:1 1:2 และ 1:3 ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยและการเคลื่อนตัวในแนวราบและแนวตั้งที่ความชัน 3 ระดับ

Phase	Factor of Safety		Horizontal Displacement (mm)		Vertical Displacement (mm)	
	Zone C	Zone D	Zone C	Zone D	Zone C	Zone D
Excavation Slope 1:1	2.11	2.06	6.01	6.55	-5.10	-5.16
Excavation Slope 1:2	2.62	2.54	4.98	5.49	-4.57	-4.61
Excavation Slope 1:3	3.05	2.94	4.64	5.17	-4.41	-4.46

จากตารางที่ 2 ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของเสถียรภาพลาดดินพื้นที่โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช จะพิจารณาความเสี่ยงจากแผ่นดินไหวเพิ่มเติม โดยกำหนดค่า F.S. ขึ้นภายใต้มาตรฐานกรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม และ FHWA-NHI [21] - [22] ซึ่งค่า F.S. ในระยะสั้น (Short-Term) 1 - 3 ปี (เมื่อมีการก่อสร้างอาคารแล้วเสร็จ) ไม่ต่ำกว่า 1.3 และ F.S. ในส่วนระยะยาว (Long-Term) ไม่ต่ำกว่า 1.5 จากผลการวิเคราะห์พบว่า ค่า F.S. ที่อัตราส่วนความชันทั้ง 3 ระดับ มีค่ามากกว่า 1.3 และ 1.5 โดยค่า F.S. ต่ำสุดอยู่ที่ 2.06 ของระดับความชัน 1:1 ในดินประเภท D ชั้นดินปกติ ที่ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม 0.0656 g ซึ่งมากกว่าค่า F.S. ที่กำหนด อันเนื่องมาจากลักษณะภูมิประเทศ ลักษณะของดินต้นกำเนิด การเรียงตัวของชั้นดิน แรงต้านของดิน และมุมเสียดทานของดินที่มีการเชื่อมต่อกันระหว่างอนุภาคของดินที่ติดกันในลักษณะป้องกันการเคลื่อนตัวของดินไม่ให้อนุภาคดินเกิดการลาดตัวหรือการเคลื่อนไหวของดินได้ ส่งผลให้ดินเกิดเสถียรภาพต้านทานน้ำหนักบรรทุกทุกแบบกานและแรงแผ่นดินไหวได้ เมื่อพิจารณาถึงประเภทของชั้นดินพบว่า ค่า F.S. ของดินประเภท C ชั้นดินแข็งจะมีค่ามากกว่าดินประเภท D ชั้นดินปกติทุกระดับความชัน อันเนื่องมาจากผลของความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่กระทำต่อชั้นดินแปรผันตรงกับประเภทของชั้นดิน หากชั้นดินได้รับการสั่นสะเทือนมากจะส่งผลให้ค่า F.S. ต่ำลง และในส่วนของอัตราส่วนความชันทั้ง 3 ระดับของชั้นดินทั้ง 2 ประเภท จะแปรผกผันกับค่า F.S. กล่าวคือ เมื่อลาดดินมีความชันมาก ค่า F.S. จะต่ำ และเมื่อลาดดินมีความชันต่ำ ค่า F.S. จะสูง อันเนื่องมาจากค่าอัตราส่วนความชันที่มากขึ้นจะทำให้แรงโน้มถ่วงมีความแรงมากขึ้นและในกรณีที่มีแผ่นดินไหวประกอบจะทำให้เพิ่มความเสี่ยงในการเกิดการล้มลงหรือการลาดตัวของดินได้ ทั้งนี้หากพื้นที่มีค่า F.S. ต่ำ การลดความชันของลาดดินจะสามารถเพิ่มค่า F.S. เพื่อให้โครงสร้างหรือสิ่งก่อสร้างมีความปลอดภัยเพิ่มมากขึ้นได้

ในส่วนการเคลื่อนตัวของชั้นดินในทิศทางแนวราบและแนวตั้งพบว่า มีค่าเคลื่อนตัวสูงสุดในทิศทางแนวราบที่ 6.55 mm. (ไปทางขวา) และค่าเคลื่อนตัวสูงสุดในทิศทางแนวตั้งที่ -5.16 mm. (ทรุดตัวลง) เมื่อมีความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม 0.0656 g มากกระทำ ซึ่งค่าการเคลื่อนตัวทั้ง 2 ทิศทาง ไม่เกินค่าการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ทางด้านข้าง (Lateral Story Drift) ตามมาตรฐาน มยพ. 1301/1302-61 [7] ทั้งนี้หากชั้นดินในพื้นที่โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราชมีการเคลื่อนตัวในแนวราบดินจะเกิดการพังทลายในลักษณะไหลลงด้านความชัน (ไปทางขวา) เนื่องจากพื้นที่ด้านขวาเป็นพื้นที่ลาดดินจึงส่งผลให้ชั้นดินเกิดการสั่นไถลลงมาตามระนาบการเคลื่อนที่ สอดคล้องกับ [1] ที่ศึกษาปรากฏการณ์ดินเหลวเมื่อได้รับความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมส่งผลให้ดินขาดเสถียรภาพและเคลื่อนตัวลงในด้านที่มีความชันต่อไป ในส่วนการเคลื่อนตัวในแนวตั้งชั้นดินจะมีการทรุดตัวลง เพราะดินในแนวราบมีการเคลื่อนที่ไปทางขวา ส่งผลกระทบให้ดินเฉือนขาดออกจากกันและมวลดินที่มีน้ำหนักจะเคลื่อนตัวลงสู่ด้านล่างภายใต้แรงโน้มถ่วงจึงส่งผลให้โครงสร้างอาคารด้านบนเกิดความเสียหายได้ต่อไป สอดคล้องกับ [2] ที่ศึกษากำลังรับแรงของฐานรากเสาเข็ม ทั้งนี้เมื่อมีแรงกระทำลงสู่เสาเข็มจะส่งผลให้ค่าแรงเชื่อมต่อกันระหว่างดินและค่าแรงเสียดทานตลอดความยาวระหว่างผิวสัมผัสของเสาเข็มจะถูกการรบกวนส่งผลให้เกิดการทรุดตัวของโครงสร้าง ทั้งนี้เมื่อพิจารณาการพังทลายทั้ง 2 ทิศทางพบว่า ดินในพื้นที่จะมีรูปแบบการพังทลายเฉพาะจุด ด้วยกลไกการเฉือนขาดที่ระนาบ (Translational Slide) [23] - [24] เนื่องจากโครงสร้างชั้นดินในภาพรวมมีการยึดเหนี่ยว

กันแน่นทำให้สามารถต้านทานแรงแผ่นดินไหวได้ หากมีการพังทลายจึงเกิดการพังทลายเฉพาะจุดนั้น ๆ เท่านั้น ด้วยเหตุนี้การที่ความชันของลาดดินมีอัตราส่วนที่มากขึ้น (หรือความชันน้อยลง) โอกาสในการเกิดการเคลื่อนที่ของดินจะลดลง อันเนื่องมาจากความชันที่มากขึ้นจะทำให้แรงโน้มถ่วงลดลง แรงต้านของดินและมุมเสียดทานของดินมากขึ้น ซึ่งทำให้ดินมีความต้านทานต่อการเคลื่อนที่มากขึ้น ทั้งนี้การลดความชันของลาดดินจะช่วยลดความเสี่ยงของการเคลื่อนที่ของดิน อาทิเช่น การล่อลวงล้ม การพังทลาย

เมื่อมีแรงแผ่นดินไหวเกิดขึ้นการเคลื่อนที่ในทิศทางแนวราบจะมีการส่งผ่านพลังงานในรูปแบบคลื่นที่ไปกระตุ้นการเคลื่อนที่ของชั้นดิน โดยชั้นดินอาจเคลื่อนที่ด้วยความเร็วและรุนแรงตามทิศทางของคลื่นนั้น ๆ ทั้งนี้ขึ้นกับความผันผวนของชั้นดิน โดยชั้นดินที่มีความผันผวนน้อยจะเคลื่อนที่น้อยลงในทิศทางนั้น แต่ชั้นดินที่มีความผันผวนมาก หรือเป็นดินที่มีความผันแปร (Heterogeneous Soil) จะมีการเคลื่อนที่มากขึ้น สอดคล้องกับ [16] ที่ศึกษาปฏิสัมพันธ์ด้านจลนศาสตร์ระหว่างชั้นดินและโครงสร้างในแอ่งดินเหนียว ซึ่งแรงจลนศาสตร์จะมีพฤติกรรมที่รุนแรงขึ้นเมื่อคลื่นแผ่นดินไหวเดินทางผ่านรอยต่อของชั้นดินเหนียวที่มีความไม่ต่อเนื่องกันในบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นดินเหนียวอ่อน และชั้นดินเหนียวแข็งที่มีความแข็งต่างกัน และมีโมดูลัสเฉือนที่มีค่าต่างกันมากพอ ในส่วนการเคลื่อนที่ในทิศทางแนวตั้งแรงแผ่นดินไหวจะทำให้เกิดแรงดันยกขึ้น (Uplift) ตามแนวสันคลื่นที่พาดผ่านพื้นที่ และการทรุดตัว (Subsidence) ตามแนวท้องคลื่นที่พาดผ่านพื้นที่ ส่งผลให้อนุภาคดินเกิดการเคลื่อนที่ขึ้นลงแรงยึดเหนี่ยวที่ส่งผ่านกันถูกเฉือนขาดด้วยแรงเฉือน ทำให้พื้นที่เกิดความเสียหายและพังทลายได้ ซึ่งสอดคล้องกับ [25] ที่ศึกษาความเร็วคลื่นเฉือนใต้ผิวดินเพื่อจำแนกประเภทพื้นที่การตอบสนองแผ่นดินไหว หากพื้นที่มีลักษณะเป็นชั้นดินอ่อนถึงดินปกติประกอบกับมีคาบธรรมชาติของพื้นที่ใกล้เคียงกับคาบธรรมชาติของแรงแผ่นดินไหวจะทำให้เกิดการสั่นพ้องและมีการขยายแอมพลิจูดของคลื่นแผ่นดินไหว ส่งผลให้เกิดความเสียหายแก่สิ่งปลูกสร้างได้

สรุปผลและการอภิปรายผล

โดยทั่วไปค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (F.S.) ของเสถียรภาพลาดดิน หากมีค่ามากกว่า 1 แสดงว่า พื้นที่ดังกล่าวมีความปลอดภัยสามารถรับน้ำหนักบรรทุกทุกแบบกานในแนวตั้งได้ [21] ในส่วนงานวิจัยฉบับนี้กำหนดค่า F.S. ของเสถียรภาพลาดดินในระยะสั้น (Short-Term) 1 - 3 ปี (เมื่อมีการก่อสร้างอาคารแล้วเสร็จ) ไม่ต่ำกว่า 1.3 และ F.S. ในส่วนระยะยาว (Long-Term) ไม่ต่ำกว่า 1.5 อันเนื่องมาจากพิจารณาความเสี่ยงจากแผ่นดินไหวเพิ่มเติม [22] ซึ่งจากการวิเคราะห์ผลความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม ค่า F.S. ที่ได้มีค่ามากกว่าค่าที่กำหนดไว้ทุกกรณี เพราะชั้นดินในพื้นที่มีความแข็งแรงสูงซึ่งอ้างอิงจากค่า SPT-N ในรายงานผลการเจาะสำรวจดิน ณ อาคารบ้านพักอาศัย 6 ชั้น ได้ค่ามากกว่า 50 ครั้งต่อความลึก 30 cm รวมถึงพื้นที่อำเภอแม่เหล็ก จังหวัดสระบุรี มีค่า S_v และ S_d ที่ใช้ในการคำนวณความเร่งสูงสุดด้วยชั้นดินประเภท C ชั้นดินแข็ง และชั้นดินประเภท D ชั้นดินปกติที่ 0.0465 g และ 0.0656 g นั้น ไม่ได้ก่อให้เกิดความเสียหาย หรือได้ค่า F.S. ที่น้อยกว่าเกณฑ์ความปลอดภัยที่กำหนด [22] จากผลการวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (F.S.) ของเสถียรภาพลาดดินลดลง และการเคลื่อนตัวของชั้นดินในทิศทางแนวราบและแนวตั้งจะเพิ่มขึ้น
2. อัตราส่วนความชันของลาดดินที่มากขึ้น (ความชันน้อยลง) จะส่งผลให้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (F.S.) ของเสถียรภาพลาดดินมากขึ้น และการเคลื่อนตัวของชั้นดินในทิศทางแนวราบและแนวตั้งลดลง
3. จากผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า หากแรงกระทำแผ่นดินไหวมีค่าสูงจนถึงชั้นลาดดินพังทลายจะเป็นการพังทลายเฉพาะจุด ด้วยกลไกการเฉือนขาดที่ระนาบ (Translational Slide) [23] - [24]
4. เสถียรภาพลาดดินในพื้นที่โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราชมีอัตราส่วนความปลอดภัย (F.S.) สูงกว่าความปลอดภัยที่กำหนด [22] สามารถต้านทานแรงกระทำแผ่นดินไหวได้

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณทุนการศึกษาโครงการวิจัยเพื่อดำรงคุณวุฒิและคุณสมบัติของอาจารย์ โรงเรียนนายเรืออากาศ นวามินทกษัตริยาธิราช ประจำปี พ.ศ. 2567 และคุณปฎิพัทธ์ นิमितพงศ์ถาวร ที่สนับสนุนโปรแกรม PLAXIS 2D ในการดำเนินการวิจัย

References

- [1] Sethabouppha, S. (2022). A Study of Soil Liquefaction Caused by the 2014 Earthquake in Chiang Rai Province. In **The 27th National Convention on Civil Engineering**. GTE23-1-GTE23-8 (in Thai)
- [2] Kanjanakul, C., Pornbunyanon, N., and Chukree, T. (2022). Bearing Capacity Analysis of Embedded Piles in Cohesive Soils with 2D FEM. In **The 27th National Convention on Civil Engineering**. GTE01-1-GTE01-7 (in Thai)
- [3] Kakarndee, W., Soralump, S., and Isrolan, R. (2013). Study of Slope Stability Analysis by Comparing the Limit Equilibrium, Finite Element and Stress Based Method. In **The 18th National Convention on Civil Engineering**. GTE339-GTE346 (in Thai)
- [4] Bilotta, E., Lanzano, G., Russo, G., Santucci de Magistris, F., Aiello, V., Conte, E., Silvestri, F., and Valentino, M. (2007). Pseudostatic and Dynamic Analyses of Tunnels in Trasversal and Longitudinal Direction. In **4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering**. Greece, Paper No. 1550
- [5] Akhlaghi, T. and Nikkar, A. (2014). Evaluation of the Pseudostatic Analyses of Earth Dams Using FE Simulation and Observed Earthquake-Induced Deformations: Case Studies of Upper San Fernando and Kitayama Dams. **The Scientific World Journal**. Vol. 2014, pp. 1-12. DOI: 10.1155/2014/585462
- [6] FatehiI, M., Hosseinpour, I., Chenari, R. J., Meghdad, P., and Javankhoshdel, S. (2022). Deterministic Seismic Stability Analysis of Reinforced Slopes using Pseudo-Static Approach. **Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering**. Vol. 47, pp. 1025-1040. DOI: 10.1007/s40996-022-00970-2
- [7] DPT 1301/1302-61. (2018). **Standard of Earthquake-Resistant Design**. Annual Book of Department of Public Works and Town & Country Planning (in Thai)
- [8] ASCE/SEI 7-16. (2017). **Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures**. Annual Book of American Society of Civil Engineers
- [9] Ratananikom, W. (2019). **Slope Stability Chart of Homogeneous Clay Layer with Uniform Strength**. Burapha University Research Information (in Thai)
- [10] Chalermyanon, T. (2011). **Stability Study of U-Tapao River Bank Due to Erosion**. Faculty of Engineering, Prince of Songkla University (in Thai)
- [11] Khachanan, R. (2015). **Study of Slope Stability by Used Engineering Properties: A Case Study of Theppharat Sichon District**. Master's Thesis, Faculty of Engineering Civil Engineering, Price of Songkla University (in Thai)
- [12] Khongkan, T. (2013). **Blasting Vibration Effect on Rock Slope Stability in a Limestone Quarry**. Master's Thesis, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University (in Thai)

- [13] Soralump, S., Yangsaenpu, S., and Jinakunwipat, M. (2013). The Study of Rock Slope Failure and Design Approach for Improving the Rock Slope Stability: A Case Study of Eastern Railway, Chachoengsao-Suttahip Port Junction, Chonburi Province. In **The 18th National Convention on Civil Engineering**. GTE308-GTE314 (in Thai)
- [14] Kanjanakul, C. (2019). Foundation Design and Slope Failure Protection for A Large Community Building in Khanom, Nakhon Si Thammarat. **International Journal of GEOMATE**. Vol. 18, Issue 70, pp. 88 -93. DOI: 10.21660/2020.70.9287
- [15] Chingulkitniwatana, A. (2020). **Hydrological Responses and Stability Analysis of Rainfall-Induced Shallow Slope Failures**. In Research, Suranaree University of Technology (in Thai)
- [16] Nimitphongthaworn, P. and Boonyatee, T. (2023). A Study of Kinematic Interaction Between Soil and Pile in Bangkok's Subsoils. In **The 28th National Convention on Civil Engineering**. GTE14-1-GTE14-10 (in Thai)
- [17] Suebsinsajjawong, C. and Keawsawasvong, S. (2023). Finite Element Limit Analysis for Stability of Tunnels Considering the Effect of Seismic Force. In **The 28th National Convention on Civil Engineering**. GTE13-1-GTE13-5 (in Thai)
- [18] Jirasakjamroonsri, A. (2017). **Assessment of Seismic Site Effects and Development of Design Response Spectrum in Bangkok Basin**. Doctor of Philosophy, Faculty of Engineering, Thammasat University (in Thai)
- [19] Yodklayan, S., Sujitapan, C., and Chalermyanont, T. (2013). Joint Analysis of Shear Wave Velocity from SH-Wave Refraction and MASW Techniques for SPT-N Estimation. **Songklanakarinn Journal Science Technology**. Vol. 36, No. 3, pp. 333-344
- [20] Jacob, A. S. and Venkataramana, K.(2020). Slope Stability Analysis Under Earthquake Load Using Plaxis Software. **Journal of Advances in Geotechnical Engineering**. Vol. 3, No. 3, pp. 1-8
- [21] DPT 195-62. (2019). **Standard of Construction on Slope**. Annual Book of Department of Public Works and Town & Country Planning (in Thai)
- [22] Elias, V., Christopher, B. B., and Berg, R. R. (2009). **Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes Design & Construction Guidelines**. Publication No. FHWA-NHI-10-024. Vol. 1
- [23] Geotechnical Engineering Research & Development Center. (2016). **The Study of the Safety Criteria from Dam Instruments for Improvement the Lampao Dam in Kalasin Province**. Faculty of Engineering, Kasetsart University (in Thai)
- [24] Semmad, S., Chalermyanont, T., and Chub-uppakarn, T. (2010). Stability Study of U-Tapao Riverbank: A preliminary study. In **The 8th Conference on Engineering and Technology**. pp. 36-40 (in Thai)
- [25] Sawasdee, Y. (2012). **Determination of Subsurface Shear Wave Velocity for Seismic Site Classification in Hatyai, Songkhla Province**. Faculty of Science, Prince of Songkla University (in Thai)

การศึกษาความเหมาะสมของระยะลูกรีดเครื่องรีดแผ่นยางแบบ 4 ลูกรีด

Study the Appropriate Value of the Roller Clearance in a 4-Roll Raw Rubber Sheet Rolling Machine

สุรสิทธิ์ พ็อคำ¹ ไฉไล ชาเสน^{1*} และอนูวัช แสนพงษ์¹

Surasit Phopha¹ Chailai Sasen^{1*} and Anuwat Saenpong¹

Received: June 14, 2024; Revised: August 15, 2024; Accepted: August 19, 2024

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของระยะห่างของชุดขอนรีดดอกที่ 2 ของเครื่องรีดแผ่นยางพาราแบบ 4 ลูกรีด ต่อระยะเวลาในการรีดยางพาราแผ่นและเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องรีดแผ่นยางพาราแบบ 4 ลูกรีด รวมถึงค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการรีด โดยดำเนินการทดลองตามรายละเอียดการปรับระยะห่างชุดขอนแต่ละขอนดังนี้ ชุดขอนรีดลื่นที่ 1 ตั้งระยะห่าง 4.5 มิลลิเมตร ชุดขอนรีดลื่นที่ 2 ตั้งระยะห่าง 3.0 มิลลิเมตร ชุดขอนรีดดอกที่ 1 ตั้งระยะห่าง 2.0 มิลลิเมตร ชุดขอนรีดดอกที่ 2 ตั้งระยะห่าง 3 ระดับ ได้แก่ 1.0 0.5 และ 0.1 มิลลิเมตร ผลการทดลองพบว่า เครื่องรีดแผ่นยางแบบ 4 ลูกรีด สามารถลดระยะเวลาในกระบวนการรีดแผ่นยางพาราจนถึงขั้นสุดท้ายในการรีดลงร้อยละ 82.40 ผลการเปรียบเทียบอัตราการผลิตต่อชั่วโมงพบว่า เครื่องรีดแผ่นยางแบบ 4 ลูกรีด มีอัตราการรีดที่สูงกว่าเครื่องรีดแบบดั้งเดิม โดยสามารถเพิ่มอัตราการผลิตเฉลี่ย 361.083 แผ่นต่อชั่วโมง มีค่าประหยัดพลังงานไฟฟ้าลดลงร้อยละ 58.126 และประสิทธิภาพของเครื่องรีดแผ่นยางแบบ 4 ลูกรีด ที่ปรับระยะห่าง 0.1 มิลลิเมตร มีขนาดความหนาของแผ่นยางพาราเฉลี่ยหลังรีดน้อยที่สุดเท่ากับ 2.14 มิลลิเมตร ได้ตามขนาดมาตรฐาน และประสิทธิภาพการรีดดีที่สุดร้อยละ 88.24

คำสำคัญ : เครื่องรีดยางพาราแผ่น; ลูกรีด; ยางพารา; ยางแผ่น

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

¹ Faculty of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University

* Corresponding Author, Tel. 08 3140 1020, E - mail: Chailai.Sa@ksu.ac.th

Abstract

This research article aimed to study the clearance of the second finishing roller set of the 4-roll raw rubber sheet rolling machine affecting the period of rolling para rubber sheets and 4-roll raw rubber sheet rolling machine efficiency as well as electrical energy consumption to rolling para rubber sheets. The experiments were carried out with the following roller clearance settings for each press roller set: the first smooth roller set will be set to a clearance of 4.5 mm, the second smooth roller set to 3.0 mm, the first finishing roller set to 2.0 mm, and the second finishing roller set will be to three levels: 1.0, 0.5, and 0.1 mm. respectively. The result found that the 4-roll raw rubber sheet rolling machine can significantly reduce the overall raw rubber sheet rolling time, decreasing rolling time by 82.40 %. The comparisons of the production rate per hour represented the 4-roll raw rubber sheet rolling machine performs a higher rubber rolling rate than the traditional rolling machine, with an average rolling rate of 361.08 sheets per hour. Furthermore, electrical energy consumption was reduced by 58.126 %. Adjusting the clearance of the second finishing roller set to 0.1 mm provides the average thickness of rubber sheets after rolling as 2.14 mm. which is the standard size, and obtains the highest rolling efficiency of 88.24 %.

Keywords: Para Rubber Sheet Rolling Machine; Wrought Press Roller; Para Rubber; Rubber Sheet

บทนำ

ประเทศไทยเป็นหนึ่งในประเทศที่มีการปลูกและผลิตยางพารามากที่สุดในโลก ยางพาราเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญ และมีบทบาทสำคัญในการพัฒนาชุมชนและเศรษฐกิจของประเทศ กระบวนการแปรรูปยางพารามีหลายขั้นตอนที่ต้องใช้เทคโนโลยีและเครื่องจักรที่ทันสมัย เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ยางพารา การพัฒนาเครื่องรีดยางพาราและเครื่องจักรที่เกี่ยวข้องมีความสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต ลดต้นทุน และเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตภัณฑ์ยางพารา [1] - [2] การศึกษาเทคโนโลยีการผลิตยางยังให้ข้อมูลเชิงลึกที่มีค่าในด้านต่าง ๆ ของกระบวนการผลิตยางพารา รวมถึงการผสม การอัดรีด การวัลคาไนซ์และการออกแบบผลิตภัณฑ์ยาง การศึกษาเหล่านี้เน้นย้ำถึงบทบาทสำคัญของการควบคุมอย่างแม่นยำในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการ โดยเฉพาะในขั้นตอนการรีดที่ช่องว่างระหว่างลูกกลิ้งต้องถูกควบคุมอย่างรอบคอบเพื่อให้ได้คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ [3] การรีดยางพาราเป็นกระบวนการที่สำคัญในอุตสาหกรรมการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง ซึ่งเกี่ยวข้องกับการขึ้นรูปและปรับผิวยางให้เป็นแผ่นบางหรือเคลือบ กระบวนการควบคุมช่องว่างระหว่างลูกกลิ้งในเครื่องรีดยางพารากึ่งอัตโนมัติเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งในการรักษาคุณภาพและความสม่ำเสมอของผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้าย การควบคุมช่องว่างระหว่างลูกกลิ้งอย่างเหมาะสมจะส่งผลโดยตรงต่อคุณสมบัติทางกล ความสม่ำเสมอของความหนา และประสิทธิภาพโดยรวมของแผ่นยาง ทำให้เป็นประเด็นสำคัญที่นักวิจัยและผู้ผลิตให้ความสนใจ [4] - [5] รวมทั้งการพัฒนาเครื่องรีดยางครบได้แสดงให้เห็นว่าการควบคุมช่องว่างระหว่างลูกกลิ้งอย่างแม่นยำสามารถลดการสูญเสียวัสดุและปรับปรุงคุณภาพโดยรวมของแผ่นยางที่รีดได้อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งพบว่าการตั้งค่าช่องว่างที่เหมาะสมส่งผลให้มีประสิทธิภาพการผลิตสูงและการสูญเสียวัสดุน้อยที่สุด [6] นอกจากนี้ความก้าวหน้าในเทคโนโลยีการควบคุม เช่น การใช้ตัวควบคุมพีซีซีลอจิก ยังแสดงผลลัพธ์ที่น่าพอใจในการรักษาช่องว่างระหว่างลูกกลิ้งให้สม่ำเสมอและปรับปรุงความสม่ำเสมอของแผ่นยางที่ผลิตได้ การนำพีซีซีลอจิกมาใช้ในการควบคุมความเร็วและแรงกดของกระบวนการรีดทำให้ความเสถียรและความแม่นยำของช่องว่างระหว่างลูกกลิ้งเพิ่มขึ้น

ส่งผลให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้ายดีขึ้น [7] เครื่องจักรรีดยางพร้อมรีดหลายที่พัฒนาการวางลูกรีดในแนวตั้งรวม โดยมีระยะห่างชุดลูกรีดคู่แรก 7 มิลลิเมตร ชุดลูกรีดเรียบคู่แรก 5 มิลลิเมตร ชุดลูกรีดเรียบคู่ที่สอง 4 มิลลิเมตร ชุดลูกรีดหลายคู่แรก 3 มิลลิเมตร และชุดรีดหลายคู่ที่สอง 3 มิลลิเมตร ผลการทดลองพบว่า อัตราความเร็วในการรีดยางต่อแผ่นเฉลี่ยไม่น้อยกว่า 185 แผ่นต่อชั่วโมง [8] การรีดยางพาราแบบเดิมมีหลายขั้นตอนและปัญหาหลายอย่าง โดยเฉพาะขั้นตอนการรีดยางพารา ทำให้ผู้ปฏิบัติงานเมื่อยล้าในการทำงาน อีกทั้งการรีดเรียบการรีดหลายจะต้องใช้เครื่องรีดเฉพาะเกิดการเสียเวลาในการเคลื่อนย้ายยางพาราแผ่นไปยังเครื่องรีดแต่ละเครื่องและต้องใช้เวลาการรีดนาน ส่งผลให้กระบวนการผลิตยางพาราแผ่นเรียบเป็นไปด้วยความล่าช้า [9] จากการสำรวจศึกษาข้อมูลเบื้องต้นและสภาพปัญหาของเกษตรกรชาวสวนยางรายย่อยในเขตพื้นที่จังหวัดกาฬสินธุ์ พบว่าเกษตรกรชาวสวนยางประสบปัญหาและมีข้อจำกัดของกระบวนการผลิตยางแผ่นดิบเพื่อสร้างมูลค่าเพิ่มในขั้นตอนของการรีดแผ่นยาง โดยเกษตรกรชาวสวนยางใช้การรีดแผ่นยางด้วยเครื่องรีดแผ่นยางอยู่ 2 แบบ ได้แก่ เครื่องรีดแผ่นยางแบบใช้แรงงานคนในการหมุน และเครื่องรีดแผ่นยางแบบใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเป็นต้นกำลังในการขับ และการรีดโดยเครื่องจักรทั้ง 2 แบบนี้ จำเป็นต้องรีด 2 ขั้นตอนและต้องใช้เครื่องจักรรีดจำนวน 2 เครื่องแยกกัน ประกอบด้วย ขั้นตอนที่ 1 รีดด้วยเครื่องรีดเส้นหรือรีดเรียบ โดยการนำยางที่ผ่านการนวดแล้วเข้าเครื่องรีดเส้นโดยรีดซ้ำประมาณ 3 - 4 ครั้ง และในทุกครั้งที่เสร็จสิ้นการรีดในแต่ละครั้งและในแต่ละแผ่นต้องทำการปรับระยะขอนหรือลูกกลิ้งรีดก่อนทำการรีดในครั้งต่อไปทุกครั้ง เพื่อให้แผ่นยางบางประมาณ 3 - 4 มิลลิเมตร ตามที่ต้องการ ซึ่งเกษตรกรต้องทำการปรับระยะขอนรีดทุกครั้งทุกแผ่น และต้องอาศัยทักษะความชำนาญและเสียเวลาในการปรับแต่ละครั้ง ตลอดจนต้องรีดแผ่นยางคราวละมาก ๆ ซึ่งเป็นผลผลิตที่ได้จากการรีดยางในแต่ละวัน เกษตรกรจึงเกิดความเหนื่อยเมื่อยล้าขณะทำการรีดยางนำไปสู่การปรับระยะขอนรีดเกิดคลาดเคลื่อนได้ส่งผลต่อขนาดความหนาและคุณภาพของยางแผ่นดิบ และขั้นตอนที่ 2 เกษตรกรต้องนำแผ่นยางที่ผ่านการรีดเส้นหรือรีดเรียบมาป้อนเข้าเครื่องรีดดอกหรือรีดหลายอีก 1 ครั้ง เพื่อรีดน้ำและรีดลายเพิ่มพื้นที่ช่วยให้แผ่นยางแห้งเร็วขึ้นเมื่อนำไปผึ่งตาก

ดังนั้น จากสภาพความเป็นมาและปัญหาดังกล่าว คณะผู้วิจัยจึงได้พัฒนาเครื่องรีดแผ่นยางพาราแบบ 4 ลูกรีด โดยงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาความเหมาะสมของช่องว่างระหว่างลูกกลิ้งในเครื่องรีดแผ่นยางแบบ 4 ลูกรีด โดยบทความนี้พิจารณาศึกษาเฉพาะผลของการปรับระยะขอนรีดดอกที่ 2 ต่อระยะเวลาในการรีดยางพาราแผ่นและประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องรีดแผ่นยางพาราแบบ 4 ลูกรีด รวมถึงค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการรีด เนื่องจากชุดรีดดอกที่ 2 เป็นชุดลูกรีดสุดท้าย หากปรับระยะขอนไม่เหมาะสมจะส่งผลต่อคุณภาพของยางแผ่นดิบ เช่น หากปรับห่างเกินไป จะมีผลให้การรีดน้ำออกจากแผ่นยางได้ไม่ดีพอความหนาแผ่นยางมากเกินไปและแผ่นยางอาจมีการฉีกขาดขณะทำการรีด และหากปรับระยะขอนชิดเกินไปจะทำให้แผ่นยางบางเกินขนาดที่เหมาะสม แผ่นยางอาจมีการฉีกขาดขณะทำการรีดและมีการใช้พลังงานไฟฟ้าที่มากขึ้นผลลัพธ์จากการศึกษานี้จะเป็นข้อมูลเพื่อช่วยในการปรับปรุงการควบคุมกระบวนการและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ของกลุ่มวิสาหกิจชุมชนผลิตยางแผ่นขั้นดี

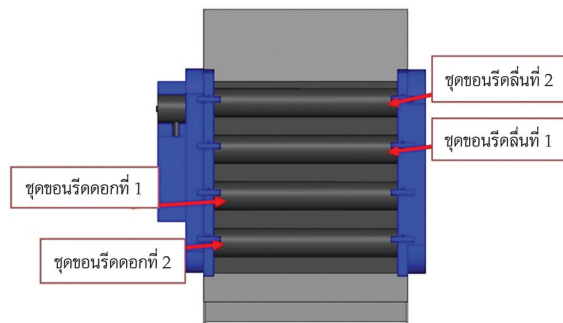
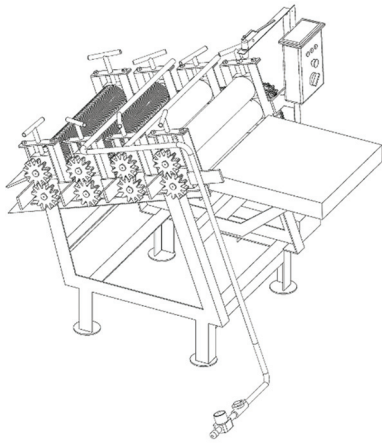
วิธีดำเนินการวิจัย

ลงเก็บข้อมูลพื้นฐานและความต้องการของกลุ่มวิสาหกิจชุมชนผลิตยางแผ่นขั้นดีหนองป่าอ้อย มีสมาชิกกลุ่ม 85 ราย มีที่ตั้งที่บ้านหนองป่าอ้อย หมู่ที่ 1 ตำบลลำห้วยหลวง อำเภอสมเด็จ จังหวัดกาฬสินธุ์ พบว่ากลุ่มมีความต้องการเครื่องจักรในการช่วยทุ่นแรงที่สามารถใช้งานได้สะดวกรวดเร็ว ลดขั้นตอน ประหยัดเวลา แรงงาน และพลังงาน ตลอดจนการลดต้นทุนรวมถึงคุณภาพของแผ่นยางที่ได้ขนาดมาตรฐาน โดยพบว่ามีการบวนการรีดอยู่ 2 ขั้นตอน และต้องใช้เครื่องรีดจำนวน 2 เครื่องเช่นกัน ประกอบด้วย เครื่องรีดเส้นหรือชุดจักรรีดโดยการนำยางที่ผ่านการนวดแล้วเข้าเครื่องรีดเส้นประมาณ 3 - 4 ครั้ง เพื่อให้แผ่นยางบางประมาณ 3 - 4 มิลลิเมตร หลังจากนั้นจึงนำเข้าเครื่องรีดดอกหรือชุดจักรรีดดอกอีก 1 ครั้ง เพื่อช่วยให้แผ่นยางแห้งเร็วขึ้น และนำไปผึ่งตาก

ถือว่าเสร็จสิ้นกระบวนการรีดแผ่นยางพารา ในการหมุนชุดลูกกลิ้ง เพื่อการรีดยางแผ่นดิบแต่ละแผ่นนั้น หากเป็นกรณีที่เกษตรกรผู้ใช้เครื่องรีดเส้นและเครื่องรีดลายแบบใช้มือหมุนในการรีดแผ่นยาง เกษตรกรจะต้องใช้แรงหมุนชุดลูกกลิ้งหลายรอบ หากมียางแผ่นดิบจำนวนมาก ส่งผลให้การผลิตยางแผ่นมีความล่าช้าและเกิดความเหนียวล้าเกินไป ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกษตรกรจะเลยต่อการที่จะทำการผลิตยางแผ่นดิบให้มีความสวยงามและความบางที่ได้ขนาดตามเกณฑ์มาตรฐานขนาด

1. การออกแบบและพัฒนาสร้างเครื่องรีดแผ่นยางแบบกึ่งอัตโนมัติ

การออกแบบและพัฒนาเครื่องรีดแผ่นยางแบบกึ่งอัตโนมัติ ดังรูปที่ 1 โดยเครื่องรีดมีคุณลักษณะที่ประกอบด้วย ลูกรีดเป็นแบบ 4 ขอน (8 ลูกกลิ้ง) แบ่งเป็นชุดขอนรีดเส้นจำนวน 2 ขอน (เส้นผ่านศูนย์กลาง 114 มิลลิเมตร ยาว 610 มิลลิเมตร) และชุดขอนรีดดอกหรือรีดลายจำนวน 2 ขอน (เส้นผ่านศูนย์กลาง 118 มิลลิเมตร ยาว 610 มิลลิเมตร) ใช้มอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 2 แรงม้า (1.49 กิโลวัตต์) ความเร็วรอบ 1,450 รอบต่อนาที เป็นต้นกำลัง ต่อด้วยชุดเกียร์ทดแบบเพื่องตัวหนอน (Worm Gear Reducer) ส่งกำลังด้วยเฟืองและโซ่ลำเลียงในการขับเคลื่อนชุดขอนทุกตัว



(ก) ลักษณะเครื่องรีดแผ่นยางแบบ 4 ลูกรีด
รูปที่ 1 ลักษณะเครื่องรีดแผ่นยางแบบ 4 ลูกรีด

(ข) ลักษณะการวางชุดขอนรีดเส้นและรีดดอก

ติดตั้งระบบควบคุมการทำงาน และทำการทดสอบการทำงานทั้งระบบ คือการทำงานแบบ Manual และระบบการทำงานแบบ Semi-Automatics และปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องให้เครื่องสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพตามขอบเขตการทดลองที่กำหนด

เปรียบเทียบผลการทดลองความหนาของแผ่นยางกับข้อมูลของสำนักงานตลาดกลางยางพารา ได้กำหนดคุณภาพยางแผ่นดิบเพื่อใช้เป็นมาตรฐานที่ชาวสวนยางสามารถนำไปปฏิบัติได้ เมื่อนำยางขายที่ตลาดยางพาราจะขายได้ราคาตรงตามมาตรฐานยางแผ่นดิบมีด้วยกัน 3 ชั้น

ยางแผ่นดิบคุณภาพ 1 มีลักษณะคือ มีความชื้นในแผ่นยางไม่เกิน 1.5 % แผ่นยางมีความยืดหยุ่นดี และมีลายดอกเด่นชัดตลอดแผ่น แผ่นยางบาง มีความหนาของแผ่นยางไม่เกิน 3 มิลลิเมตร

ยางแผ่นดิบคุณภาพ 2 มีลักษณะคือ แผ่นยางมีความสะอาดตลอดแผ่น มีความชื้นในแผ่นยางไม่เกิน 2 % แผ่นยางมีความยืดหยุ่นดี และมีลายดอกเด่นชัด แผ่นยางบางมีความหนาของแผ่นยางไม่เกิน 4 มิลลิเมตร

ยางแผ่นดิบคุณภาพ 3 มีลักษณะคือ แผ่นยางมีความสะอาดหรืออาจมีสิ่งสกปรกและฟองอากาศอยู่ในแผ่นยางได้บ้างเล็กน้อย มีความชื้นในแผ่นยางไม่เกิน 3 % แผ่นยางมีความยืดหยุ่นดี และมีลายดอกเด่นชัด แผ่นยางค่อนข้างหนา มีความหนาของแผ่นยางไม่เกิน 4 มิลลิเมตร เนื้อยางแห้งมีสีค่อนข้างทึบ ไม่โปร่งใสเท่าที่ควร

ยางแผ่นดิบคุณภาพ 4 มีลักษณะคือ แผ่นยางมีความสะอาดหรืออาจมีสิ่งสกปรกและฟองอากาศอยู่ในแผ่นยางได้บ้าง มีความชื้นในแผ่นยางไม่เกิน 4.5 % แผ่นยางมีความยืดหยุ่นดี และมีลายดอกเด่นชัด แผ่นยางหนา มีความหนาของแผ่นยางไม่เกิน 4 มิลลิเมตร เนื้อยางแห้งมีสีคล้ำทึบ ไม่โปร่งใส [9] - [10]

2. การทดลองและเก็บรวบรวมข้อมูล

เพื่อศึกษาผลของระยะห่างขอนรีดดอกที่ 2 ต่อระยะเวลาในการรีดยางพาราแผ่นและประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องรีดยางพาราแบบ 4 ลูกรีด โดยอ้างอิงสมการคำนวณประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องรีดแผ่นยางที่ออกแบบจากสมการที่ (1) จากรูปที่ 1 การจัดวางและจำนวนขอนรีดของเครื่องรีดแผ่นยางแบบ 4 ลูกรีด ซึ่งการทดลองเพื่อเก็บข้อมูลการรีดยางทั้งหมด 10 การทดลอง เตรียมแผ่นยางตามขั้นตอนการทำยางแผ่นรีดตามมาตรฐานการยาง ดังรูปที่ 2 เริ่มจากการเก็บรวบรวมน้ำยางจากสวนยางพันธุ์ RRIM 600 มากรองน้ำยางด้วยตัวกรองลวดเบอร์ 40 และ 60 เพื่อกรองสิ่งสกปรกออก ทำการตวงน้ำยางใส่ในตะกุงและเติมน้ำสะอาดลงในตะกุงที่ใส่น้ำยางด้วยอัตราส่วนผสมระหว่างน้ำยางกับน้ำในอัตรา 3 ส่วน ต่อ 2 ส่วน โดยประมาณ นำกรดฟอร์มิคความเข้มข้นร้อยละ 90 ประมาณ 2 ซ้อนแกง (30 มิลลิลิตร) ผสมน้ำสะอาดประมาณ 3 กระป๋องนม (1,170 มิลลิลิตร) หรืออัตราส่วน 1 ส่วน ต่อ 39 ส่วน กวนให้เข้ากัน สำหรับผสมน้ำยางให้ยางแข็งตัวเร็วขึ้น หลังจากนั้นตวงน้ำกรดที่ผสมน้ำแล้ว 1 กระป๋องนม (390 มิลลิลิตร) เทลงในน้ำยางให้ทั่วตะกุงและใช้ใบพายกวนน้ำยางไปมาประมาณ 6 เทียว ขณะกวนจะมีฟองน้ำยางให้กวาดฟองออกจากตะกุงให้หมด แล้วใช้ภาชนะปิดตะกุงทิ้งไว้ประมาณ 30 - 45 นาที เมื่อยางจับตัวดีแล้วให้เทยางออกจากตะกุงบนพื้นนวดยางเพื่อทำการนวดยางให้หนาเฉลี่ยประมาณ 10 - 20 มิลลิเมตร นำยางแผ่นที่นวดแล้วเข้าเครื่องรีด โดยเตรียมจำนวน 10 แผ่นต่อการทดลอง และกำหนดเงื่อนไขการทดลอง คือ การปรับระยะห่างระหว่างลูกรีดในชุดขอนแต่ละชุด ดังต่อไปนี้ชุดขอนรีดชิ้นที่ 1 ชุดขอนรีดชิ้นที่ 2 และชุดขอนรีดดอกที่ 1 ปรับตั้งระยะห่างไว้ที่ค่าคงที่ ส่วนชุดขอนรีดดอกที่ 2 ซึ่งเป็นชุดที่จะใช้ข้อมูลการทดลองในการพิจารณา มีการปรับตั้งระยะห่างเป็น 3 ระดับ และความสามารถในการรีดจะทำการเปรียบเทียบกับเครื่องรีดยางแบบดั้งเดิมของกลุ่มเกษตรกรที่ใช้ในปัจจุบัน (โดยรีดซ้ำประมาณ 3 - 4 ครั้งด้วยเครื่องรีดชิ้น แล้วจึงนำมารีดดอกด้วยเครื่องรีดดอกอีก 1 ครั้ง) เพื่อศึกษาผลของการปรับระยะห่างขอนรีดดอกที่ 2 ต่อการรีด สำหรับความหนาของแผ่นยางที่ผ่านการรีดจะใช้เวอร์เนียร์คาลิปเปอร์ และค่าพลังงานทางไฟฟ้าจะใช้เพาเวอร์แคลคูลูมิเตอร์ ผลิตภัณฑ์ของ Extech รุ่น 380976 โดยดำเนินการทดลองตามรายละเอียดดังตารางที่ 1 การปรับระยะห่างชุดขอนแต่ละชุดดังนี้

ตารางที่ 1 รายละเอียดการปรับระยะขอนรีด

ชนิดของเครื่องรีด	ปรับระยะห่าง			
	ชุดขอนรีดชิ้นที่ 1 (มิลลิเมตร)	ชุดขอนรีดชิ้นที่ 2 (มิลลิเมตร)	ชุดขอนรีดดอกที่ 1 (มิลลิเมตร)	ชุดขอนรีดดอกที่ 2 (มิลลิเมตร)
1) เครื่องรีดแผ่นยาง แบบ 4 ลูกรีด	4.5	3.0	2.0	1.0 0.5 0.1
	ระยะห่างลูกรีดเครื่องรีดชิ้น (มิลลิเมตร)			ระยะห่างลูกรีดเครื่องรีดดอก (มิลลิเมตร)
	ปรับระยะห่าง ครั้งที่ 1	ปรับระยะห่าง ครั้งที่ 2	ปรับระยะห่าง ครั้งที่ 3	ปรับระยะห่าง ครั้งที่ 1
2) เครื่องรีดแบบดั้งเดิม*				
2.1 เครื่องรีดชิ้น	5±0.5**	3.5±0.5	1.50±0.5	-
2.2 เครื่องรีดดอก	-	-	-	0.1 - 0.5

* เนื่องจากเครื่องแบบดั้งเดิมของเกษตรกรแยกการรีดออกเป็น 2 เครื่อง คือ เครื่องรีดชิ้น และเครื่องรีดดอก

** โดยการปรับระยะตามที่ระบุนี้จะต้องทำการรีด 2 ครั้ง



(ก) การกรองน้ำยาง



(ข) ขึ้นรูปยางแผ่นด้วยล้อยกดตะก



(ค) การเตรียมเป็นแผ่นยางเพื่อให้ยางจับตัวกัน



(ง) การนวดยางให้ได้ความหนาตามต้องการ ก่อนนำเข้าเครื่องรีด



(จ) กระบวนการรีดแผ่นยางด้วย เครื่องรีดแผ่นยางแบบ 4 ลูกรีด



(ฉ) วัดขนาดเพื่อบันทึกผลการทดลอง

รูปที่ 2 ขั้นตอนการทดลองรีดแผ่นยางดิบด้วยเครื่องรีดแผ่นยางแบบ 4 ลูกรีด

$$\%F_E = \frac{W_p}{W_t} \times 100 \quad (1)$$

ประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องรีดแผ่นยางที่ออกแบบ $\%F_E$ พิจารณาจาก ความหนาที่เริ่มต้น ก่อนผ่านกระบวนการรีด (W_t) ความหนาที่ผ่านกระบวนการรีดด้วยเครื่องรีดแผ่นยางแบบ 4 ลูกรีด (W_p)

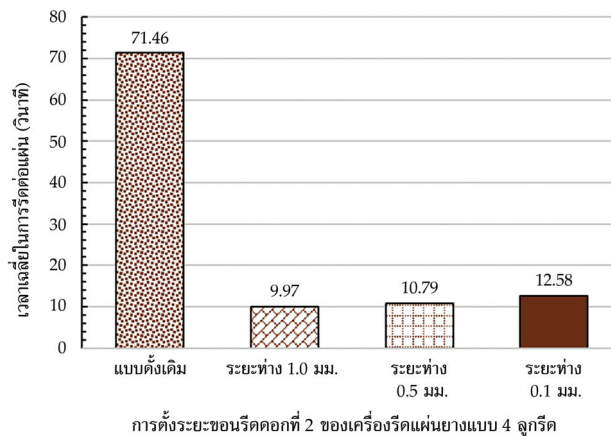
ผลการวิจัยและอภิปรายผล

จากการทดลองเพื่อศึกษาผลของระยะห่างชุดขนรีดดอกที่ 2 ต่อระยะเวลาในการรีดยางพาราแผ่นและประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องรีดยางพาราแบบ 4 ลูกรีด โดยแสดงการเปรียบเทียบผลของระยะห่างชุดขนรีดดอกที่ 2 ต่อระยะเวลาในการรีดยางพาราแผ่น และผลของระยะห่างชุดขนรีดดอกที่ 2 ต่อประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องรีดยาง ผลการทดลองแสดงประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องรีดยางพาราที่ออกแบบ ดังตารางที่ 2 เครื่องรีดแผ่นยางแบบ 4 ลูกรีดกับเครื่องรีดแบบดั้งเดิมของกลุ่มวิสาหกิจชุมชนผลิตยางแผ่นชั้นดีหนองป่าอ้อย หมู่ที่ 1 บ้านหนองป่าอ้อย ตำบลลำห้วยหลวง อำเภอสมเด็จ จังหวัดกาฬสินธุ์

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพ

	ชุดขนรีดดอกที่ 2 ปรับระยะห่าง	เปรียบเทียบประสิทธิภาพตามวัตถุประสงค์	
		เวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการรีดยาง (วินาทีต่อแผ่น)	ความหนาเฉลี่ยต่อแผ่นหลังรีด (มิลลิเมตร)
1) เครื่องรีดแผ่นยาง แบบ 4 ลูกรีด	1.0 มิลลิเมตร	9.97	3.23
	0.5 มิลลิเมตร	10.79	2.72
	0.1 มิลลิเมตร	12.58	2.14
2) เครื่องรีดแบบดั้งเดิม		71.46	3.1

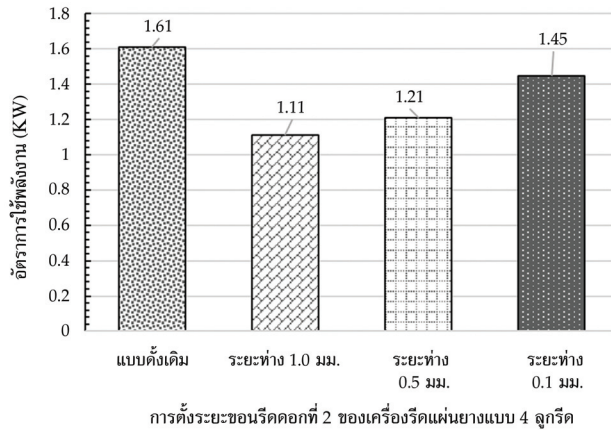
1. ผลของระยะห่างชุดขนรีดดอกที่ 2 ต่อระยะเวลาในการรีดยางพาราแผ่น



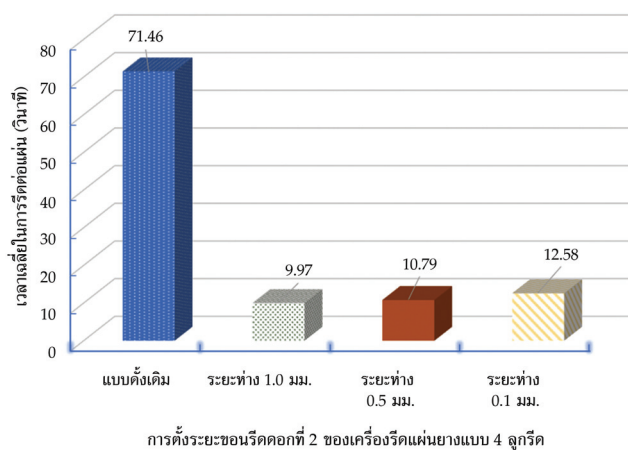
รูปที่ 3 เวลาเฉลี่ยในการรีดแผ่นยางต่อแผ่น โดยหน่วยวินาที

จากรูปที่ 3 ผลการทดลองการรีดแผ่นยางของเครื่องรีดแผ่นยางแบบ 4 ลูกรีด เปรียบเทียบกับเครื่องรีดแบบดั้งเดิมของกลุ่มวิสาหกิจชุมชนผลิตยางแผ่นชั้นดี ชุดขนรีดดอกที่ 2 ที่การปรับระยะห่าง 1.0 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการรีดเฉลี่ยต่อแผ่นน้อยที่สุดเท่ากับ 9.97 วินาที ที่การปรับระยะห่าง 0.5 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการรีดเฉลี่ยต่อแผ่นเท่ากับ 10.79 วินาที และที่การปรับระยะห่าง 0.1 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการรีดเฉลี่ยต่อแผ่นเท่ากับ 12.58 วินาที ตามลำดับ เป็นผลเนื่องมาจากหากทำการปรับระยะห่างชุดขนรีดดอกที่ 2 ให้มีระยะชิดแคบลง จะส่งผลให้ลูกรีดดอกมีแรงกดอัดมากขึ้นและต้องใช้เวลาในการรีดมากกว่าการปรับระยะห่างที่มากกว่า ตลอดจนส่งผลให้ขนาดความบางของแผ่นยางหลังรีดนั้นลดลงตามด้วย อีกทั้งมอเตอร์ต้นกำลังจะรับภาระมากขึ้นตามไปด้วย ส่วนเครื่องรีดแบบดั้งเดิมใช้เวลาในการรีดเฉลี่ยต่อแผ่นมากที่สุดเท่ากับ 71.46 วินาที เหตุผลเนื่องจากเครื่องรีดแบบดั้งเดิมนั้น ต้องทำการรีดถึง 2 ขั้นตอน โดยขั้นตอนแรกจะรีดด้วยเครื่องรีดเส้น

จำนวน 4 ครั้งต่อแผ่น และในการรีดแต่ละครั้งต้องทำการปรับระยะห่างลูกรีดให้แคบลงตามลำดับทุกครั้ง หลังจากนั้นจึงทำการรีดดอกด้วยเครื่องรีดดอก จำนวน 1 ครั้ง ซึ่งต่างกับเครื่องรีดแผ่นยางแบบ 4 ลูกรีดที่สามารถรีดลิ้นและรีดดอกในขั้นตอนเดียว จึงทำให้ประหยัดเวลาและใช้พลังงานน้อยกว่า



รูปที่ 4 อัตราการใช้พลังงาน โดยเทียบต่อแผ่น

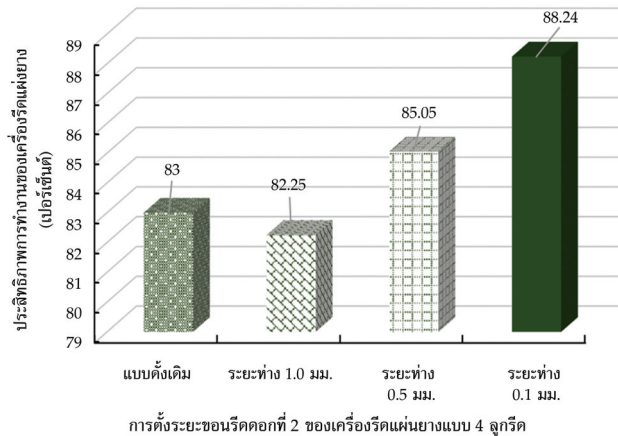


รูปที่ 5 กำลังการผลิตเทียบต่อชั่วโมง

จากรูปที่ 4 แสดงค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าในการรีดยางแผ่นของเครื่องรีดแผ่นยางแบบ 4 ลูกรีด และเครื่องรีดแบบดั้งเดิม พบว่าในเชิงเวลาเฉลี่ย (วินาที) ในการรีดต่อแผ่น ต่ำกว่าเครื่องรีดแบบดั้งเดิมที่ขอนรีดดอกตั้งระยะห่าง 0.1 มิลลิเมตร ซึ่งลดเวลาในการรีดลงร้อยละ 82.40 โดยทั้งนี้เครื่องรีดแผ่นยาง 2 แบบนี้ดอกที่ 2 ตั้งระยะห่าง 1.0 มิลลิเมตรเท่ากัน จากรูปที่ 5 มีอัตราการรีดยางได้ใน 1 ชั่วโมง จำนวน 361.083 แผ่นต่อชั่วโมง หากตั้งค่าขอนรีดระยะห่าง 0.5 มิลลิเมตร มีอัตราการรีดยางได้ใน 1 ชั่วโมง จำนวน 333.642 แผ่นต่อชั่วโมง และหากเครื่องรีดแผ่นยางแบบกึ่งอัตโนมัติตั้งค่าขอนรีดระยะห่าง 0.1 มิลลิเมตร มีอัตราการรีดยางได้ใน 1 ชั่วโมง จำนวน 286.1685 แผ่นต่อชั่วโมง และแบบดั้งเดิมมีอัตราการรีดยางได้ใน 1 ชั่วโมง จำนวน 50.378 แผ่นต่อชั่วโมง ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบอัตราการรีดยางเครื่องรีดแผ่นยางแบบ 4 ลูกรีด มีอัตราการรีดยางสูงกว่า เครื่องรีดแบบดั้งเดิมที่ขอนรีดดอกตั้งระยะห่าง 0.1 มิลลิเมตร โดยสามารถเพิ่มอัตราการรีดเพิ่มขึ้นร้อยละ 468.04 โดยเครื่องทั้ง 2 นี้มีการตั้งขอนรีดดอกที่ 2 ตั้งระยะห่าง 1.0 มิลลิเมตรเท่ากัน และด้านการใช้พลังงานพบว่าเครื่องรีดแผ่นยางแบบ 4 ลูกรีด ที่มีการตั้งค่าทั้ง 3 ระดับโดยเรียงตามการตั้งค่าขอนรีดระยะห่าง 1.0 มิลลิเมตร มีค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้เฉลี่ยต่อแผ่น 0.0184 บาทต่อแผ่น หากตั้งค่าขอนรีดระยะห่าง 0.5 มิลลิเมตร มีค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้เฉลี่ยต่อแผ่น 0.02175 บาทต่อแผ่น และหากตั้งค่าขอนรีดระยะห่าง 0.1 มิลลิเมตร มีค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้เฉลี่ยต่อแผ่น 0.0304 บาทต่อแผ่น และแบบดั้งเดิมมีค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้เฉลี่ยต่อแผ่น

0.0726 บาทต่อแผ่นนั้น เครื่องรีดแผ่นยางแบบ 4 ลูกรีด มีเวลาเฉลี่ยในการรีดต่อแผ่น (วินาที) ต่ำกว่า เครื่องรีดแบบดั้งเดิมเมื่อคิดเป็นร้อยละของการประหยัดพลังงาน พบว่ามีการประหยัดพลังงานลดลงร้อยละ 58.126 โดยทั้งนี้ทั้งเครื่องรีดแผ่นยางแบบ 4 ลูกรีด และเครื่องรีดแบบดั้งเดิมมีการตั้งขนนรีดดอกที่ 2 ตั้งระยะห่าง 1.0 มิลลิเมตรเท่ากัน ด้านกระบวนการพบว่าการรีดแบบดั้งเดิมมีกระบวนการรีดเส้น 4 ครั้ง และรีดดอก 1 ครั้ง แต่หากรีดยางโดยเครื่องรีดแผ่นยางแบบ 4 ลูกรีด จะเหลือขั้นตอนการรีดเพียง 1 ครั้ง ดังนั้น ขั้นตอนการรีดแผ่นยางตลอดกระบวนการจนถึงขั้นสุดท้ายลดลงร้อยละ 80

2. ผลของระยะห่างขนนรีดดอกที่ 2 ต่อประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องรีดยาง



รูปที่ 6 ประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องรีดแผ่นยาง

จากรูปที่ 6 เมื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพการทำงานของทั้ง 2 แบบ โดยเทียบจากอัตราการลดลงของความหนาของแผ่นยางก่อนและหลังกระบวนการรีดผ่านเครื่องรีดแผ่นยางแบบ 4 ลูกรีด และเครื่องรีดแบบดั้งเดิม พบว่าประสิทธิภาพของเครื่องรีดแผ่นยางแบบ 4 ลูกรีด ขนาดความหนาเฉลี่ยของแผ่นยางหลังรีดเมื่อมีเงื่อนไขการปรับระยะห่างของขนนเป็น 3 ระดับ ได้แก่ 1.0 0.5 และ 0.1 มิลลิเมตร ที่ชุดขนนรีดดอกที่ 2 ปรับระยะห่าง 1.0 มิลลิเมตร มีขนาดความหนาเฉลี่ยมากที่สุดเท่ากับ 3.23 มิลลิเมตร (จัดอยู่ในมาตรฐานคุณภาพของยางแผ่นดิบ ยางแผ่นดิบคุณภาพ 2 มีความหนาของแผ่นไม่เกิน 4 มิลลิเมตร) ประสิทธิภาพการรีดน้อยสุดที่ 82.25 % ขนาดความหนาเฉลี่ยรองลงมา ได้แก่ ขนาดความหนาเฉลี่ยของแผ่นยางที่รีดด้วยเครื่องรีดแบบดั้งเดิม ที่การปรับลูกรีดดอกระยะห่าง 0.1 มิลลิเมตร มีค่าเท่ากับ 3.06 (จัดอยู่ในมาตรฐานคุณภาพของยางแผ่นดิบ ยางแผ่นดิบคุณภาพ 2 มีความหนาของแผ่นไม่เกิน 4 มิลลิเมตร) ประสิทธิภาพการรีด 83 % และขนาดความหนาเฉลี่ยของระยะห่าง 0.5 มิลลิเมตร มีค่าเท่ากับ 2.72 มิลลิเมตร (จัดอยู่ในมาตรฐานคุณภาพของยางแผ่นดิบ ยางแผ่นดิบคุณภาพ 1 มีความหนาของแผ่นไม่เกิน 3 มิลลิเมตร) ประสิทธิภาพการรีด 85.05 % และที่ปรับระยะห่าง 0.1 มิลลิเมตร มีขนาดความหนาเฉลี่ยหลังรีดน้อยที่สุดเท่ากับ 2.14 มิลลิเมตร (จัดอยู่ในมาตรฐานคุณภาพของยางแผ่นดิบ ยางแผ่นดิบคุณภาพ 1 มีความหนาของแผ่นไม่เกิน 3 มิลลิเมตร) และได้ประสิทธิภาพการรีดดีที่สุดที่ 88.24 % จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า แม้ขนาดความหนาของแผ่นยางทุกเงื่อนไขการทดลองจะอยู่ในมาตรฐานคุณภาพของยางแผ่นดิบ แต่ขนาดความหนาที่ดีและเกษตรกรต้องการควรเป็นยางแผ่นที่รีดด้วยเครื่องรีดแผ่นยางแบบ 4 ลูกรีด ที่ชุดขนนรีดดอกที่ 2 ปรับระยะห่าง 0.1 มิลลิเมตร เนื่องจากเป็นความต้องการของเกษตรกรที่ต้องการให้ยางแผ่นดิบคุณภาพ 1 ถ้าขนาดความหนายิ่งบางจะยิ่งเพิ่มพื้นที่คายน้ำให้ระเหยได้เร็วขึ้นช่วยลดระยะเวลาของการตาก สามารถจำหน่ายได้ราคาที่สูงขึ้น

สรุปผล

1. จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าเมื่อพิจารณาผลของระยะห่างขอนรีดดอกที่ 2 ต่อระยะเวลาในการรีดยางพาราแผ่น อัตราการผลิตได้ต่อชั่วโมงและการใช้พลังงานนั้นเหมาะสมที่สุดขอนรีดดอกที่ 2 ปรับระยะห่าง 1.0 มิลลิเมตร ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการรีดแผ่นยางพารา พบว่าเครื่องรีดแผ่นยางแบบ 4 ลูกรีดสามารถลดระยะเวลาในกระบวนการรีดแผ่นยางจนถึงขั้นสุดท้ายลดเวลาในการรีดลงร้อยละ 82.40 การเปรียบเทียบกำลังการผลิตเทียบต่อชั่วโมงพบว่าเครื่องรีดแผ่นยางแบบ 4 ลูกรีด มีอัตราการรีดยางสูงกว่าเครื่องรีดแบบดั้งเดิม โดยสามารถเพิ่มอัตราการรีดเฉลี่ย 361.08 แผ่นต่อชั่วโมง มีการประหยัดพลังงานลดลงร้อยละ 58.126 สามารถรีดเส้นและรีดดอกในขั้นตอนเดียว จึงทำให้ประหยัดเวลาและใช้พลังงานน้อยกว่า

2. ทั้งนี้ผลของระยะห่างขอนรีดดอกที่ 2 ต่อประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องรีดยาง ประสิทธิภาพการทำงานของแผ่นยางที่ผ่านกระบวนการรีดผ่านเครื่องรีดแผ่นยางแบบ 4 ลูกรีด และเครื่องรีดแบบดั้งเดิมพบว่าประสิทธิภาพของเครื่องรีดแผ่นยางแบบ 4 ลูกรีด ที่ปรับระยะห่าง 0.1 มิลลิเมตร มีขนาดความหนาเฉลี่ยหลังรีดน้อยที่สุดเท่ากับ 2.14 มิลลิเมตร และได้ประสิทธิภาพการรีดดีที่สุดที่ 88.24 % ตามมาตรฐาน [10] ยางแผ่นที่เกษตรกรผลิตขึ้นที่ยังไม่ผ่านการรมควัน หรือกระบวนการอื่นใด สำหรับการทำยางแผ่นดิบคุณภาพดีคือ ยางแผ่นที่สะอาด ขนาดแผ่นได้มาตรฐานมีความหนาบางพอสมควรมีความยืดหยุ่นดี จะทำยางแผ่นดิบคุณภาพดีและช่วยเพิ่มพื้นที่คายน้ำให้ระเหยได้เร็วขึ้นช่วยลดระยะเวลาของการตาก สามารถจำหน่ายได้ราคาที่สูงขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ กลุ่มวิสาหกิจชุมชนกลุ่มวิสาหกิจชุมชนผลิตยางแผ่นชั้นดีหนองป่าอ้อย ณ บ้านหนองป่าอ้อย หมู่ที่ 1 ตำบลลำทวยทลัว อำเภอส้มเค็จ จังหวัดกาฬสินธุ์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลพื้นฐาน รวมทั้งสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและเมคคาทรอนิกส์ สถาบันวิจัยและพัฒนา คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ ที่อำนวยความสะดวกด้านสถานที่ สนับสนุนและช่วยเหลือในการทำวิจัยครั้งนี้ และขอขอบพระคุณสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.)

References

- [1] Jongrungrot, V. (2015). Social Security of Rubber-based Agroforestry System Towards Strengthening Rural Communities in Southern Thailand. **Journal of Community Development Research (Humanities and Social Sciences)**. Vol. 8, No. 2, pp. 8-15 (in Thai)
- [2] Siha, W. and Wongkaew, P. (2015). Feasibility Study for Investment in Machinery and Drying Plant for Processing Dried Rubber Sheet at Watcharapong Para-Rubber Plantation, Muang District, Loei Province. **Research and Development Journal Loei Rajabhat University**. Vol. 10, No. 33, pp. 18-26 (in Thai)
- [3] Bhowmick, A. K., Hall, M. M., and Benarey, H. A. (1994). **Rubber Products Manufacturing Technology Book**. ISBN 0-8247-9112-6.
- [4] Choosit, P. and Nilas, N. (2017). **Development and Improvement of Rubber Press Machine with Wrought Pattern**. Faculty of Industrial Education, Rajamangala University of Technology
- [5] Vijayaram, T. R. (2009). A Technical Review on Rubber. **International Journal on Design and Manufacturing Technologies**. Vol. 3, No. 1, DOI: 10.18000/ijodam.70043



- [6] Singmahachai, S., Thinaphim, A., and Botmatra, C. (2017). Rolling Rubber Machine. **Vocational Education Innovation and Research Journal**. Vol. 1, No. 1, pp. 9-18 (in Thai)
- [7] Panpan, C., Division, A., and Battalion, A. (2017). A Novel Design Approach of Fuzzy Logic Controller for Automatic Para Rubber Rolling Machine. **SWU Engineering Journal**. Vol. 12, No. 1, pp. 61-71 (in Thai)
- [8] Wongsangnoi, P. and Porchompoo, W. (2018). **Design and Development Rubber Sheet Roll Machine**. Faculty of Industrial Technology, Sakon Nakhon Rajabhat University
- [9] Research Institute Standards. (2015). **Rubber Standards**. Access (13 June 2024). Available (<https://km.raot.co.th>)
- [10] Recommendations for latex harvesting (2011). **Rubber Authority of Thailand**. Access (13 June 2024). Available (<https://rubber.oie.go.th>)

การศึกษาหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการตัดวัสดุเหล็กเหนียวด้วยเครื่องตัดพลาสมา

A Study of Suitable Parameters for Cutting Mild Steel by Using Plasma Machine

จutasinee Pornputthasri^{1*} และ Arnon Isaramongkolrak¹

Jutasinee Pornputthasri¹ and Arnon Isaramongkolrak¹

Received: June 12, 2024; Revised: August 20, 2024; Accepted: August 20, 2024

บทคัดย่อ

บทความนี้กล่าวเกี่ยวกับกระบวนการตัดเหล็กแผ่นเกรด SS400 ซึ่งเป็นเหล็กโครงสร้างที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย ยกตัวอย่างเช่น งานก่อสร้าง งานสะพาน งานอุตสาหกรรมยานยนต์ เป็นต้น ผู้วิจัยจึงได้ศึกษาการตัดเหล็กเกรด SS400 ด้วยเครื่องตัด Thermatech รุ่น TM1634 โดยตัวแปรที่พิจารณามีดังนี้ 1) แรงดันลม 2) ระยะห่างระหว่างหัวตัดชิ้นงาน และ 3) อัตราเร็วในการตัดถูกกำหนดเป็นตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาชิ้นงานขนาดความกว้าง ความยาว และความหนาเป็น 50 50 และ 5 mm ตามลำดับ โดยทำการบันทึกค่ากระแสไฟฟ้า และค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) ออกแบบการทดลองโดยใช้ Orthogonal Array ด้วยวิธีทากูชิ จากการทำนายค่าที่เหมาะสมที่สุด กรณีค่าน้อยยิ่งดี (Smaller-the-Better) สรุปได้ว่า ในการตัดเหล็ก SS400 ด้วยเครื่องตัดพลาสมา ยี่ห้อ Thermatech รุ่น TM1634 โดยใช้ค่าแรงดัน 5 bar ค่าระยะห่างของหัวตัด 35 mm ความเร็วในการตัด 150 mm/s จะใช้กระแสไฟฟ้าเท่ากับ 20.98 A ในส่วนของค่าความหยาบผิวที่เหมาะสมที่สุดมีค่าเท่ากับ 9.76 μm โดยใช้ค่าแรงดันลม 5 bar ค่าระยะห่างของหัวตัด 40 mm ความเร็วในการตัด 250 mm/s

คำสำคัญ : เครื่องตัดพลาสมา; ความหยาบผิว; ทากูชิ; เหล็ก SS400

¹ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม

¹ Faculty of Science and Technology, Nakhon Pathom Rajabhat University

* Corresponding Author, Tel. 09 0979 9478, E - mail: Jutasinee@webmail.npru.ac.th

Abstract

This article described the cutting process for SS400 steel which is a majority structural steel for using in construction work such as building construction bridge construction and automotive industry. This paper focuses on the cutting steel of SS400 using Thermatech model TM1634 and the variable considering in this paper consisted of 1) Air pressure 2) the gap distance between the couple of cutting head and 3) cutting speed. The dimension of the test object is 50 x 50 x 50 mm in term of width length and thickness respectively. In addition, the current and average of roughness of surface (Ra) are determined. For the experimental method, this paper using Orthogonal Array algorithm based on Taguchi method. The experimental results, the deserving values forecasting in term of smaller-the-better can be shown that the cutting steel of SS400 by using Thermatech plasma cutting machine model TM1634 with 5 bar pressure and 35 mm gap distance and 150 mm/s cutting speed is delivered the current is 20.98 A. Moreover, the average of roughness of surface (Ra) is 9.76 with 5 bar air pressure and 40 mm gap distance and 250 mm/s cutting speed.

Keywords: Plasma Cutting Machine; Surface Roughness; Taguchi; SS400 Steel

บทนำ

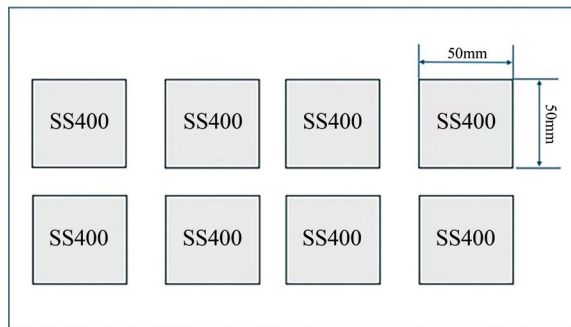
เหล็กเหนียว (Mild Steel) หรือเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ถูกผลิตขึ้นเพื่อใช้ในทางการค้ามากกว่าโลหะผสมชนิดอื่น ๆ เพราะมีราคาถูก สามารถนำไปใช้งานได้ดีในทุก ๆ งาน สามารถดึงออกเป็นเส้น ตีเยื่อออกเป็นแผ่นได้ดี นิยมมาใช้ในการก่อสร้าง ตึกสะพาน อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมเรือ งานประกอบแม่พิมพ์ ชิ้นส่วนเครื่องจักร และงานทั่ว ๆ ไป ซึ่งในกระบวนการตัดโลหะแผ่น ถือว่าเป็นกระบวนการที่สำคัญในการเพิ่มผลผลิต ทั้งด้านปริมาณ และคุณภาพของชิ้นงาน การตัดด้วยเครื่องตัดพลาสมา (Plasma Arc Cutting) เป็นวิธีที่นิยมนำมาใช้ตัดโลหะแผ่น เพราะสามารถตัดได้อย่างรวดเร็ว มีความแม่นยำสูง มีค่าใช้จ่ายต่ำ เมื่อเทียบกับการตัดด้วยวิธีการอื่น จากผลงานวิจัยที่ผ่านมา [1] ได้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของหัวตัดพลาสมาในการตัดชิ้นส่วนเหล็กคาร์บอนต่ำ โดยปัจจัยที่สนใจคือ กระแสไฟ ความดันแก๊ส และความเร็วในการตัด พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการสึกของหัวตัดพลาสมาอย่างมีนัยสำคัญ คือ ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการตัดชิ้นงาน ดังนั้นการสึกของหัวตัดพลาสมาจะแปรผันตามปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการตัดชิ้นงานในช่วงปริมาณกระแสไฟ 40 - 50 ampere และ [2] ได้ศึกษาค่าความหยาบผิวของการตัดเหล็กกล้าแม่พิมพ์ชนิด SKD 11 ด้วยลวดไฟฟ้า โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบทาคูชิเพื่อวิเคราะห์ค่าตัวแปรที่มีผลต่อค่าความหยาบผิว ทำการทดลองตัดชิ้นงานด้วยเส้นลวดอิเล็กทรอนิกส์ทองเหลืองขนาด 0.25 mm ทำการศึกษา 3 ปัจจัย คือ แรงดันไฟฟ้า ค่ากระแสไฟฟ้า และความเร็วในการป้อนลวดพบว่า ค่ากระแสไฟฟ้า มีผลต่อค่าความหยาบผิวอย่างมีนัยสำคัญ สำหรับแรงดันไฟฟ้าและความเร็วในการป้อนลวด ไม่ส่งผลต่อค่าความหยาบผิว นอกจากนี้ [3] ยังได้ทำการสร้างเครื่องซีเอ็นซีตัดโลหะด้วยระบบพลาสมา เพื่อวิเคราะห์ค่าปัจจัยที่เหมาะสมของค่าความหนาและความตั้งฉากด้วยวิธีการออกแบบการทดลองแบบทาคูชิ โดยทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความคลาดเคลื่อนคือ ความเร็วการตัด กระแสไฟ ความดันและความหนา ทดลองตัดแผ่นโลหะมีความหนาแตกต่างกันคือ 2 4 และ 6 mm ผลจากการทดลองพบว่า ปัจจัยตอบสนองที่ส่งผลต่อค่าความหนามากที่สุดคือ ความเร็วที่ 300 mm/min ความดันที่ 80 psi กระแสไฟฟ้าที่ 40 A และความหนาที่ 6 mm เนื่องจากมีค่าความผิดพลาดของความหนาน้อยสุดที่ 0.50 mm และปัจจัยตอบสนองที่ส่งผลต่อค่าความตั้งฉากมากที่สุดคือ ปัจจัยความเร็วที่ 400 mm/min ความดันที่ 70 psi กระแสไฟที่ 35 A และความหนาที่ 2 mm เนื่องจากมีค่าความผิดพลาดความตั้งฉากมากที่สุดที่ 0.24 mm

จากการรวบรวมข้อมูลผลงานวิจัยของ [4] - [8] ที่ผ่านมาผู้วิจัยจึงเล็งเห็นถึงการศึกษาค่ากระแสไฟฟ้าและค่าความหนาพิวที่เหมาะสมในการตัด ด้วยเครื่องตัดพลาสมา ยี่ห้อ Thermatech รุ่น TM1634 โดยทำการศึกษาปัจจัยทั้งหมด 3 ตัวแปร คือ ค่าแรงดัน ค่าระยะห่างของหัวตัดกับชิ้นงาน และค่าความเร็วตัด เพื่อการออกแบบและปรับปรุงกระบวนการตัดโลหะแผ่นในวงการอุตสาหกรรมให้สูงขึ้นไปในอนาคต

วิธีการดำเนินการวิจัย

1. วัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

ทำการออกแบบการตัดโลหะแผ่นเกรด SS400 ขนาด 120 x 240 cm หนา 5 mm ให้ได้ขนาด 50 x 50 mm ดังรูปที่ 1 ด้วยเครื่องตัดพลาสมา ยี่ห้อ Thermatech รุ่น TM1634 ซึ่งเป็นเครื่องตัดที่รองรับการตัดด้วยระบบแก๊สและพลาสมา ตัวเครื่องมีขนาด 220 x 160 cm มีความสามารถในการตัดชิ้นงานได้ขนาดพื้นที่ 160 x 340 cm กำลังไฟขาเข้า 220V, Single Phase, 50 Hz สามารถตัดโลหะแผ่นด้วยระบบตัดพลาสมาได้ที่มีความหนา 3 - 16 mm



รูปที่ 1 การออกแบบการตัดโลหะแผ่น เกรด SS400

2. ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

ในการวิจัยนี้จะทำการศึกษาโดยกำหนดตัวแปรดังนี้ 1) ค่าแรงดันลม 3 ระดับ คือ 4.5 5 และ 6 bar 2) ค่าระยะห่างของหัวตัด 3 ระดับ คือ 30 35 และ 40 mm และ 3) ความเร็วในการตัด 3 ระดับ คือ 150 200 และ 250 mm/s ทำการศึกษาโดยการควบคุมตัวแปรหลักในกระบวนการ และหาสภาวะที่เหมาะสมของการทดลอง เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดด้วยวิธีทากูชิ เนื่องด้วยวิธีการออกแบบการทดลองแบบทากูชิ เป็นเทคนิคที่สามารถหาค่าอิทธิพลที่มีผลกระทบในแต่ละระดับปัจจัยของตัวแปรหลักได้ ซึ่งจะช่วยลดค่าใช้จ่ายและระยะเวลาในการทำการทดลองได้ ผู้วิจัยเลือกการจัดวางแบบ Orthogonal Array (OA) จะทำให้สามารถหาอิทธิพลของตัวแปรที่มีหลายปัจจัยได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าตัวแปรและระดับปัจจัยในการทดลอง

ตัวแปรหลัก	ระดับของปัจจัย		
	1	2	3
ค่าแรงดันลม (A)	4.5	5.0	6.0
ค่าระยะห่างของหัวตัด (B)	30	35	40
ความเร็วในการตัด (C)	150	200	250

3. การออกแบบการทดลองแบบทากูชิ

การออกแบบการทดลองแบบทากูชิ (Taguchi DOE) เป็นเทคนิคที่ใช้ออกแบบการทดลองเพื่อปรับปรุงคุณภาพของกระบวนการและผลิตภัณฑ์ในงานทางด้านวิศวกรรมควบคุม ซึ่งเทคนิคที่ใช้ควบคุมคุณภาพของระบบวิศวกรรมคุณภาพมี 2 แบบ คือ การควบคุมคุณภาพเฉพาะการออกแบบการทดลอง (Offline Quality Control) เป็นการควบคุมคุณภาพของกิจกรรมทั้งหมดที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการวางแผน การออกแบบ และการพัฒนาผลิตภัณฑ์ โดยรวมถึงขั้นตอนการออกแบบระบบ (System Design) การออกแบบพารามิเตอร์ (Parameter Design) และการออกแบบช่วงที่กระบวนการยอมรับได้ (Tolerance Design) ซึ่งเป็นรูปแบบของเทคนิคทากูชิ ในทางกลับกันการควบคุมคุณภาพที่ขึ้นกับขั้นตอนการออกแบบ (Online Quality Control) เป็นการควบคุมคุณภาพของกิจกรรมทั้งหมดที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการผลิตรวมถึงกระบวนการวัดเพื่อตรวจสอบคุณภาพผลิตภัณฑ์ การนำไปปรับค่าเพื่อแก้ไขใหม่ การพยากรณ์ความต้องการของลูกค้าและนำไปแก้ไขให้ถูกต้อง

เครื่องมือที่ใช้สำหรับวิธีการทากูชิคือ OA เป็นระบบเมทริกซ์ของจำนวนข้อกำหนดในระดับแถวและคอลัมน์ วิธีการทากูชิคือ การใช้อัตราส่วนแบบ Signal-to-Noise (SN) จะหาจำนวนของตัวแปรที่มีอยู่ คือ ค่าเฉลี่ยที่ใช้ในการวัดของผลกระทบของปัจจัย Noise ตามลักษณะของสมรรถนะของตัวแปร และจะทำการวัดค่าทั้งสองคือ SN ของจำนวนตัวแปรในข้อมูลของผลตอบสนองและเพื่อให้เข้าใกล้ค่าเฉลี่ยผลตอบสนองของเป้าหมายที่ต้องการที่สุด

เป้าหมายของการออกแบบการทดลองแบบทากูชิ ในกระบวนการผลิต คือ

3.1 เพื่อให้ได้ค่า SN ที่ดีที่สุด แบ่งเป็น

1) ปัญหาชนิด Larger the Better เป็นการสมมุติ อัตราส่วน SN เป้าหมายคือ ค่าสูงสุดของผลตอบและเป็นค่าที่เหมาะสมเมื่อแสดงรายละเอียดเฉพาะพิภัก ความเพื่อจำกัดด้านล่าง ทาได้จากสมการที่ (1)

$$SN_L = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (1)$$

2) ปัญหาชนิด Smaller the Better เป็นการสมมุติ อัตราส่วน SN ของค่าเป้าหมายนั้น ๆ สำหรับผลตอบที่เป็นศูนย์และเป็นค่าที่เหมาะสมเมื่อแสดงรายละเอียดเฉพาะพิภักความเพื่อจำกัดด้านบน ทาได้จากสมการที่ (2)

$$SN_s = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (2)$$

3) ปัญหาชนิด Target the Best เป็นการสมมุติ อัตราส่วน SN ให้ค่าเป้าหมาย คือค่าที่ดีที่สุดและเป็นค่าที่เหมาะสมเมื่อค่านั้นเป็นค่าเป้าหมายกับค่าพิภักความเพื่อจำกัดด้านบนและด้านล่างทาได้จากสมการที่ (3)

$$SN_N = 10 \log \left(\frac{\bar{y}^2}{s^2} \right) \quad (3)$$

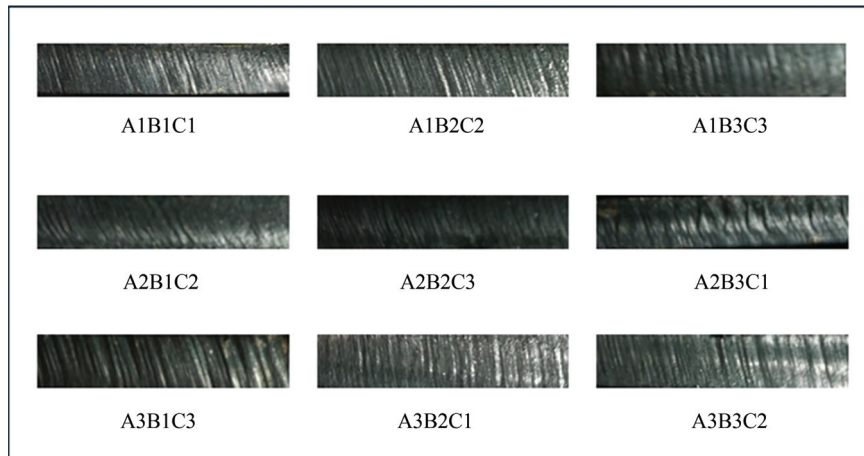
3.2 เพื่อทำนายค่าที่เหมาะสมที่สุดในทฤษฎี ทากูชิ ทาได้จากสมการที่ (4)

$$Y_{optimal} = m + \sum_{j=1}^n [(m_{i,j})_{\min} - m] \quad (4)$$

[9] มีการประยุกต์ใช้วิธีทากูชิในกระบวนการกัดขีดผิวเรียบอะลูมิเนียมผสม 5052 โดยศึกษาค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดของเครื่องจักรพบว่าการใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบทากูชิเป็นที่ยอมรับได้ อีกทั้ง [10] ยังพบว่าวิธีของทากูชิ ได้รับการยอมรับและถูกใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมญี่ปุ่น

ผลการทดลอง

จากการออกแบบการทดลองโดยใช้การออกแบบ OA จะได้จำนวนการทดลองที่น้อยที่สุด คือ 8 การทดลอง เมื่อพิจารณาร่วมกับตาราง Standard Orthogonal Array พบว่า L8 สามารถกำหนดปัจจัยได้เพียง 2 ระดับปัจจัย ผู้วิจัยจึงเลือกใช้การออกแบบ L9 เนื่องด้วยการทดลองมี 3 ตัวแปรหลัก และ 3 ระดับปัจจัย ซึ่งมีจำนวนการทดลองทั้งหมด 9 การทดลองมากกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณ ทำการเก็บข้อมูลค่ากระแสไฟฟ้า และวัดค่าความหนาผิว โดยทำการทดลอง 3 ครั้ง โดยใช้ค่าตัวแปรและระดับปัจจัยในการทดลองตาม ดังตารางที่ 1 และทำการตัดชิ้นงานได้รอยตัดชิ้นงานดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 รอยตัดชิ้นงาน

ตารางที่ 2 อัตราส่วน SN ของค่ากระแสไฟฟ้าจากการทดลองชนิด Smaller the Better

ลำดับ	A	B	C	Trial1	Trial2	Trial3	Mean	SN
1	1	1	1	17.20	17.44	17.34	17.33	-24.77
2	1	2	2	20.39	20.37	20.35	20.37	-26.18
3	1	3	3	26.39	24.04	25.04	25.16	-28.02
4	2	1	2	17.62	16.48	16.52	16.87	-24.55
5	2	2	3	21.49	19.84	20.84	20.72	-26.33
6	2	3	1	27.57	24.21	25.21	25.66	-28.20
7	3	1	3	18.05	17.02	17.52	17.53	-24.88
8	3	2	1	21.06	20.46	20.66	20.73	-26.33
9	3	3	2	25.33	24.47	24.85	24.88	-27.92

เมื่อทำการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ย ANOM (The Analysis of Mean) ของค่ากระแสไฟฟ้า โดยหาค่า SN แต่ละการทดลองชนิด Smaller-the-Better ดังตารางที่ 2 พบว่า ค่าแรงดันลมที่ 5 bar หัวตัดห่างจากชิ้นงาน 30 mm ใช้ความเร็วตัดที่ 200 mm/s มีค่า SN น้อยที่สุด

ตารางที่ 3 อัตราส่วน SN ของค่าความหยาบผิวจากการทดลองชนิด Smaller the Better

ลำดับ	A	B	C	Trial1	Trial2	Trial3	Mean	SN
1	1	1	1	6.80	6.82	6.79	6.80	-16.65
2	1	2	2	7.81	8.20	8.00	8.00	-18.07
3	1	3	3	5.20	5.10	5.36	5.22	-14.36
4	2	1	2	7.53	7.50	7.52	7.52	-17.52
5	2	2	3	7.92	7.94	7.95	7.94	-17.99
6	2	3	1	13.25	13.36	13.34	13.32	-22.49
7	3	1	3	14.41	14.28	14.49	14.39	-23.16
8	3	2	1	9.92	9.91	9.76	9.86	-19.88
9	3	3	2	8.73	8.90	8.70	8.78	-18.87

เมื่อทำการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ย ANOM ของค่ากระแสไฟฟ้า โดยหาค่า SN แต่ละการทดลองชนิด Smaller-the-Better ดังตารางที่ 3 พบว่า ค่าแรงดันลมที่ 4.5 bar หัวตัดห่างจากชิ้นงาน 40 mm ใช้ความเร็วตัดที่ 250 mm/s มีค่า SN น้อยที่สุด

ตารางที่ 4 อิทธิพลของแต่ละระดับปัจจัยจากค่า SN ของค่ากระแสไฟฟ้าชนิด Smaller the Better

Level	A	B	C
1	-26.32	-24.73	-26.43
2	-26.36	-26.28	-26.22
3	-26.38	-28.05	-26.41
Δ	0.05	3.31	0.22
Rank	3	1	2

จากการจัดลำดับอิทธิพลระดับปัจจัยจากค่า SN ของค่ากระแสไฟฟ้า ดังตารางที่ 4 พบว่า ค่าตัวแปร B คือ ค่าระยะห่างของหัวตัดมีค่ามากที่สุด จึงสรุปได้ว่า ค่าระยะห่างของหัวตัดมีอิทธิพลมากที่สุดต่อค่ากระแสไฟฟ้าที่สุด

ตารางที่ 5 อิทธิพลของแต่ละระดับปัจจัยจากค่า SN ของค่าความหยาบผิวชนิด Smaller the Better

Level	A	B	C
1	-16.36	-19.11	-19.67
2	-19.33	-18.65	-18.15
3	-20.64	-18.57	-18.50
Δ	4.28	0.54	1.52
Rank	1	2	3

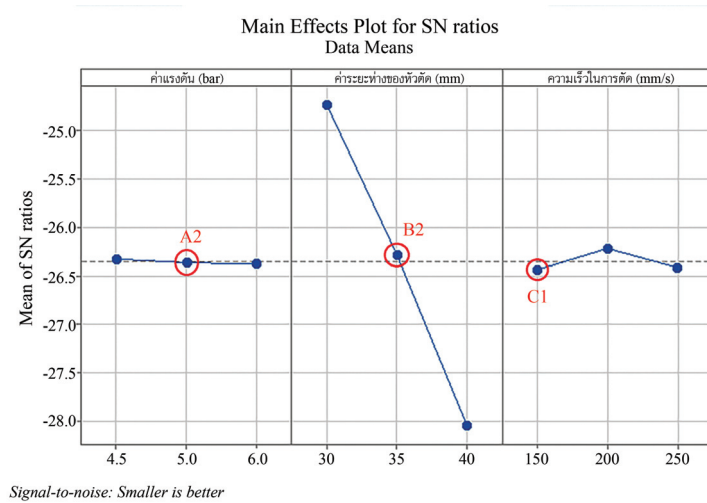
จากการจัดลำดับอิทธิพลระดับปัจจัยจากค่า SN ของค่าความหยาบผิว ดังตารางที่ 5 พบว่า ค่าตัวแปร A คือ ค่าแรงดันลมมีค่ามากที่สุด จึงสรุปได้ว่า ค่าแรงดันไฟฟ้ามีอิทธิพลมากที่สุดต่อค่าความหยาบผิวที่สุด

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 3 และ 4 ทำการเลือกระดับปัจจัยที่เป็นกรณีค่าน้อยยิ่งดี (Smaller-the-Better) จะได้ A2 B2 C1

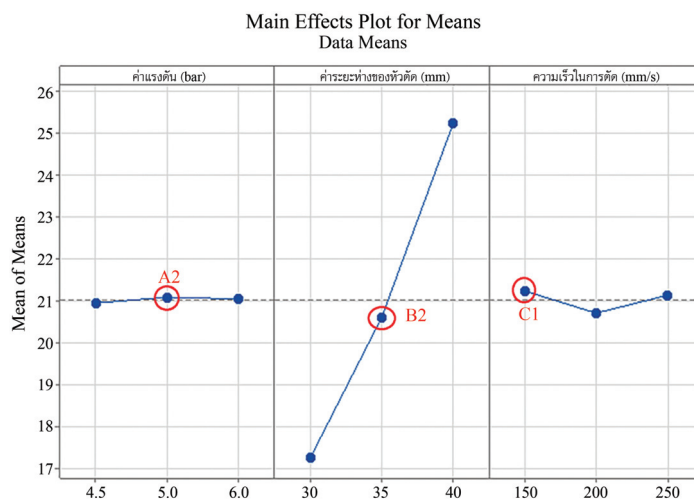
เหตุผลที่เลือก A2 เพราะค่าเฉลี่ย SN และค่าเฉลี่ยของผลลัพธ์ตอบสนองของ A2 มีค่าใกล้เคียงค่า Mean มากที่สุด

เหตุผลที่เลือก B2 เพราะค่าเฉลี่ย SN และค่าเฉลี่ยของผลลัพธ์ตอบสนองของ B2 มีค่าใกล้เคียงค่า Mean มากที่สุด

เหตุผลที่เลือก C1 เพราะค่าเฉลี่ย SN มีค่าใกล้เคียงค่า Mean ที่สุด และค่าเฉลี่ยของผลลัพธ์ตอบสนองของ C1 มีค่ามากที่สุด



รูปที่ 3 อิทธิพลของแต่ละระดับของแต่ละปัจจัย จากค่า SN ของค่ากระแส



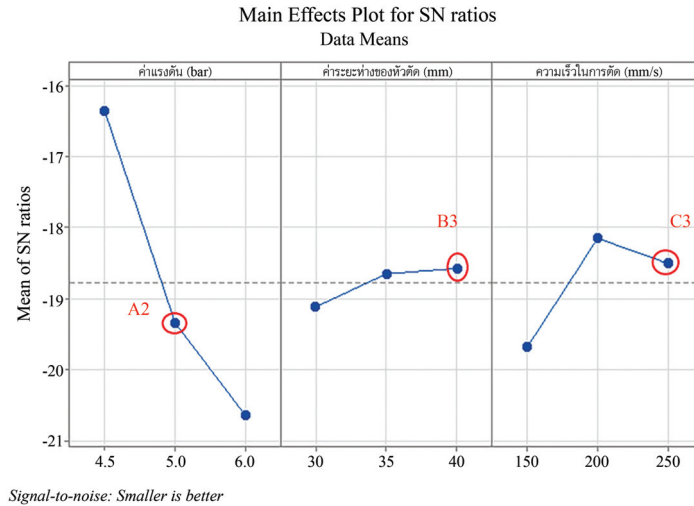
รูปที่ 4 อิทธิพลของแต่ละระดับของแต่ละปัจจัย จากค่าเฉลี่ยตอบสนอง (Y) ของค่ากระแส

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 5 และ 6 ทำการเลือกระดับปัจจัยที่เป็นกรณีค่าน้อยยิ่งดี (Smaller-the-Better) จะได้ A2 B3 C3

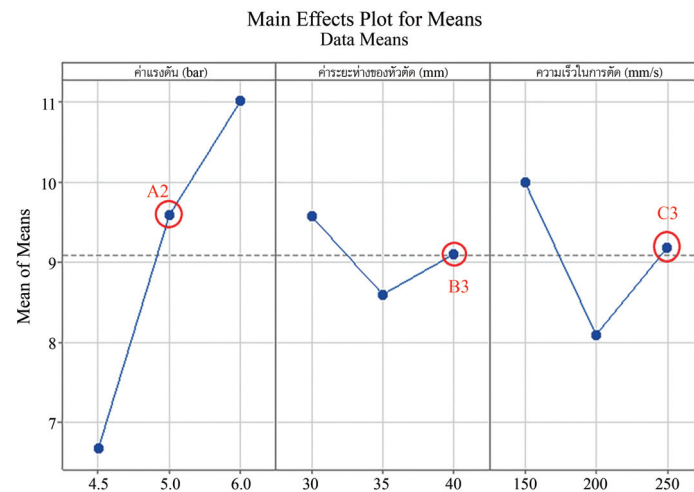
เหตุผลที่เลือก A2 เพราะค่าเฉลี่ย SN และค่าเฉลี่ยของผลลัพธ์ตอบสนองของ A2 มีค่าใกล้เคียงค่า Mean มากที่สุด

เหตุผลที่เลือก B3 เพราะค่าเฉลี่ย SN ของ B2 และ B3 มีค่าใกล้เคียงกัน แต่ค่าเฉลี่ยของผลลัพธ์ตอบสนองของ B3 มีค่ามาก จึงเลือก B3

เหตุผลที่เลือก C3 เพราะค่าเฉลี่ย SN และค่าเฉลี่ยของผลลัพธ์ตอบสนองของ C3 มีค่าใกล้เคียงค่า Mean มากที่สุด



รูปที่ 5 อิทธิพลของแต่ละระดับของแต่ละปัจจัย จากค่า SN ของค่าความหยาบผิว



รูปที่ 6 อิทธิพลของแต่ละระดับของแต่ละปัจจัย จากค่าเฉลี่ยตอบสนอง (Y) ของค่าความหยาบผิว

ตารางที่ 6 ค่าที่เหมาะสมที่สุดจากการทำนายของค่ากระแสไฟฟ้า ระดับปัจจัยที่เป็นกรณีมีค่าน้อยยิ่งดี (Smaller-the-Better) ของค่ากระแสไฟฟ้าจะได้ A2 B2 C1 นำไปทำนายค่าที่เหมาะสมที่สุดได้ดังสมการที่ (5) และสมการที่ (6)

$$m = \frac{21.09 + 20.61 + 21.24}{3} = 20.98 \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n [(m_{i,j})_{\min} - m] &= (A2 - m) + (B2 - m) + (C1 - m) \\ &= 0.11 + (-0.37) + 0.26 \\ &= 0 \end{aligned} \quad (6)$$

ดังนั้น $Y_{optimal} = 20.98 + 0 = 20.98$

ตารางที่ 6 ค่าที่เหมาะสมที่สุดจากการทำนายของค่ากระแสไฟฟ้า

Level	A	B	C
1	20.95	17.24	<u>21.24</u>
2	<u>21.09</u>	<u>20.61</u>	20.71
3	21.05	25.23	21.14
$(m_{i,j})_{\min} - m$	0.11	-0.37	0.26

จากตารางที่ 7 ค่าที่เหมาะสมที่สุดจากการทำนายของค่าความหยาบผิว ระดับปัจจัยที่เป็นกรณีมีค่าน้อยยิ่งดี (Smaller-the-Better) ของค่าความหยาบผิวจะได้ A2 B3 C3 นำไปทำนายค่าที่เหมาะสมที่สุด ได้ดังสมการที่ (7) และสมการที่ (8)

$$m = \frac{9.59 + 9.10 + 9.18}{3} = 9.29 \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n [(m_{i,j})_{\min} - m] &= (A2 - m) + (B3 - m) + (C3 - m) \\ &= 0.3 + 0.28 + (-0.11) \\ &= 0.47 \end{aligned} \quad (8)$$

$$\text{ดังนั้น } Y_{\text{optimal}} = 9.29 + 0.47 = 9.76$$

ตารางที่ 7 ค่าที่เหมาะสมที่สุดจากการทำนายของค่าความหยาบผิว

Level	A	B	C
1	6.68	9.57	9.99
2	<u>9.59</u>	8.60	8.10
3	11.01	<u>9.10</u>	<u>9.18</u>
$(m_{i,j})_{\min} - m$	0.3	0.28	-0.11

สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการตัดเหล็กเหนียวเกรด SS400 ด้วยเครื่องตัดพลาสมา ยี่ห้อ Thermatech รุ่น TM1634 ด้วยวิธีทางสถิติในการออกแบบการทดลองโดยใช้การออกแบบ Orthogonal Array ภายใต้ตัวแปรหลัก 3 ตัวแปร ซึ่งประกอบไปด้วย ค่าแรงดันลม ค่าระยะห่างของหัวตัดชิ้นงาน และค่าความเร็วในการตัดชิ้นงาน โดยทำการตัดชิ้นงานที่มีความหนา 5 mm ให้ได้ขนาด 50 x 50 mm พบว่า ตัวแปรที่ทำให้ค่าการใช้กระแสไฟฟ้าต่ำที่สุดคือ ค่าแรงดันที่ 5 bar หัวตัดห่างจากชิ้นงาน 30 mm ใช้ความเร็วตัดที่ 200 mm/s ใช้กระแสไฟฟ้าในการตัด 16.87 A ตัวแปรที่ทำให้ค่าความหยาบผิวต่ำที่สุดคือ ค่าแรงดันที่ 4.5 bar หัวตัดห่างจากชิ้นงาน 40 mm ใช้ความเร็วตัดที่ 250 mm/s มีค่าความหยาบผิวที่ 5.22 μm

ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ย ANOM โดยเลือกใช้กรณีมีค่าน้อยยิ่งดี (Smaller-the-Better) ของค่ากระแสไฟฟ้า โดยหาค่า SN ที่ค่าแรงดันลมที่ 5 bar หัวตัดห่างจากชิ้นงาน 30 mm ใช้ความเร็วตัดที่ 200 mm/s มีค่าน้อยที่สุด และค่า SN ของค่าความหยาบผิว พบว่าค่าแรงดันที่ 4.5 bar หัวตัดห่างจากชิ้นงาน 40 mm ใช้ความเร็วตัดที่ 250 mm/s มีค่าน้อยที่สุด เมื่อนำผลของอิทธิพลของแต่ละตัวแปรมาจัดลำดับพบว่า ค่าระยะห่างของหัวตัดมีอิทธิพลมากที่สุดต่อค่ากระแสไฟฟ้า และค่าแรงดันลมมีอิทธิพลมากที่สุดต่อค่าความหยาบผิว

จากการทำนายค่าที่เหมาะสมที่สุดกรณีค่าน้อยยิ่งดี (Smaller-the-Better) สรุปได้ว่า ในการตัดเหล็ก SS400 ด้วยเครื่องตัดพลาสมา ยี่ห้อ Thermatech รุ่น TM1634 โดยใช้ค่าแรงดันลม 5 bar ค่าระยะห่างของหัวตัด 35 mm ความเร็วในการตัด 150 mm/s จะใช้กระแสไฟฟ้าเท่ากับ 20.98 A ในส่วนของค่าความหยาบผิวที่เหมาะสมที่สุดมีค่าเท่ากับ 9.76 μm โดยใช้ค่าแรงดัน 5 bar ค่าระยะห่างของหัวตัด 40 mm ความเร็วในการตัด 250 mm/s

ในการศึกษาครั้งนี้จึงสรุปได้ว่าการตัดเหล็กเหนียวเกรด SS400 ด้วยเครื่องตัดพลาสมา ยี่ห้อ Thermatech รุ่น TM1634 ระยะห่างของหัวตัดชิ้นงานมีผลต่อค่ากระแสไฟฟ้า และค่าแรงดันลมมีผลต่อค่าความหยาบผิว จึงสามารถนำไปเป็นแนวทางในการออกแบบและปรับปรุงกระบวนการตัดโลหะแผ่นในโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งจะช่วยลดค่าใช้จ่ายในด้านพลังงานไฟฟ้า และควบคุมค่าความหยาบผิวได้

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ โครงการพัฒนาศักยภาพอาจารย์ด้านวิชาการและการวิจัยเพื่อเข้าสู่ตำแหน่งทางวิชาการ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม ที่สนับสนุนทุนวิจัย และขอขอบคุณ สาขาวิชาอุตสาหกรรมศิลป์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือและสถานที่ในการทำวิจัยในครั้งนี้

References

- [1] Sato, M. (2017). **A Study of Parameters that Effect to Wear of Plasma Nozzle Made from Cutting Low Carbon Steel IRSM-41**. Master of Engineering Thesis, Department of Industrial Systems and Environmental Engineering, Suranaree University of Technology (in Thai)
- [2] Chatmuangpak, A., Wongwian, C., and Kangsantia, S. (2003). Experimental Design Using the Taguchi Method for Determining the Optimal Parameters of the Cutting Process by Wire Cutting Machine. **Thai Industrial Engineering Network Journal**. Vol. 9, No. 2, pp. 66-74 (in Thai)
- [3] Bangphan, S., Bangphan, P., Nangmor, N., and Chantathi, P. (2016). Application of Taguchi Method for Optimizing Shaft Work Piece Assembly Turning Process by the Effects of Machining Parameters. **UBU Engineering Journal**. Vol. 9, No. 1, pp. 1-10 (in Thai)
- [4] Ruksorn, P. and Deepradit, S. (2019). The Prediction of Surface Roughness in the S45C Medium Carbon Steel Turning Process by Using Response Surface Methodology. **Thai Journal of Operations Research**. Vol. 7, No. 2, pp. 13-19 (in Thai)
- [5] Charoenrat, S., Pookamnerd, Y., and Prasomthong, S. (2022). Optimization of Medium Carbon Steel Welding Joint by Hot-Wire Gas Tungsten Arc Welding Using the Taguchi Method. **Journal of Industrial Technology Ubon Ratchathani Rajabhat University**. Vol. 12, No. 2, pp. 43-55 (in Thai)
- [6] Krishankant, Taneja, J., Bector, M., and Kumar, R. (2012). Application of Taguchi Method for Optimizing Turning Process by the Effects of Machining Parameters. **International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)**. Vol. 2, Issue 1, pp. 263-274
- [7] Timata, M. (2021). Optimization on P20-steel Taper Cutting with Wire Electrical Discharged Machine. **SAU Journal of Science & Technology**. Vol. 7, No. 1, pp. 15-21 (in Thai)
- [8] Hantang, S., Khanthirat, W., Lawong, A., Warorot, W., and Sudsuansee, T. (2023). Optimizing the Surface Roughness of ST37 Steel using CNC Turning Machinery through the Taguchi Technique. **Journal of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University**. Vol. 1, No. 5, pp. 27-39 (in Thai)

- [9] Namkaew, S. and Prasomthong, S. (2021). Application of Taguchi Method for Burnishing Process of AA5052 Aluminum Alloy by Studying the Optimization of Production Machining Parameters. **The Journal of Industrial Technology**. Vol. 17, No. 1, pp. 82-94 (in Thai)
- [10] Eiamsa-ard, K., Chaipukdee, N., Boonlerdcharoensak, N., Liou, F., Raksiri, C., and Rodkwan, S. (2007). Taguchi Method for Material Deposition Process using LASER. In **Proceedings of the 21th Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand (ME-NETT 21)**. Chonburi, 17-19 October 2007

ผลของวัสดุปลูกต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของคะน้าใบหยิก

Effects of Substrate Media on Growth and Yield of Curl Leaf Kale

ประภัสสร สมบัติศรี*

Prapatsorn Sombatsri*

Received: June 4, 2024; Revised: August 23, 2024; Accepted: August 23, 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของวัสดุปลูกต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของต้นคะน้าใบหยิก วางแผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD) จำนวน 9 สิ่งทดลอง จำนวน 4 ซ้ำ ดังนี้ 1) ดินร่วนปนทราย:มูลโค อัตราส่วน 1:2 2) ดินร่วนปนทราย:ขุยมะพร้าว:มูลโค อัตราส่วน 1:1:2 3) ดินร่วนปนทราย:แกลบดิบ:มูลโค อัตราส่วน 1:1:2 4) ดินร่วนปนทราย:แกลบดิบ:ขุยมะพร้าว:มูลโค อัตราส่วน 1:1:1:2 5) ดินร่วนปนทราย:มูลสุกร อัตราส่วน 1:1 6) ดินร่วนปนทราย:ขุยมะพร้าว:มูลสุกร อัตราส่วน 1:1:1 7) ดินร่วนปนทราย:แกลบดิบ:มูลสุกร อัตราส่วน 1:1:1 8) ดินร่วนปนทราย:แกลบดิบ:ขุยมะพร้าว:มูลสุกร อัตราส่วน 1:1:1:1 9) ดินร่วนปนทราย:ขุยมะพร้าว:ปุ๋ยมูลโค:แกลบดิบ:ปุ๋ยสูตร 16-16-16 อัตราส่วน 1:2:1:1:0.25 จากผลการศึกษาพบว่า สิ่งทดลองที่ 2 มีการเจริญเติบโตของคะน้าใบหยิก ด้านความสูง ความกว้างทรงพุ่ม จำนวนใบ ความกว้างและความยาวของใบ มากที่สุดคือ 10.13 เซนติเมตร 21.17 เซนติเมตร 6.67 เซนติเมตร 14.00 ใบ และ 8.83 เซนติเมตร ตามลำดับ และให้ผลผลิตด้านน้ำหนักสดต้นรวมราก 33.84 กรัม และน้ำหนักราก 31.85 กรัม มากที่สุด ดังนั้น วัสดุปลูกที่มีส่วนผสมของดินร่วนปนทราย:ขุยมะพร้าว:มูลโค ในอัตราส่วน 1:1:2 มีความเหมาะสมกับการปลูกคะน้าใบหยิกมากที่สุด

คำสำคัญ : วัสดุปลูก; คะน้าใบหยิก; ขุยมะพร้าว; มูลโค

คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี

Faculty of Agriculture, Ubon Ratchathani Rajabhat University

* Corresponding Author, Tel. 08 1266 1798, E - mail: prapatsorn.n@ubru.ac.th

Abstract

The objective of this research was to study the effects of growing media on the growth and yield of curly kale. The experiment was designed using a Completely Randomized Design (CRD) with 9 treatments and 4 replications as follows: 1) Sandy loam soil: cow manure at a ratio of 1:2, 2) Sandy loam soil: coconut coir: cow manure at a ratio of 1:1:2, 3) Sandy loam soil: raw rice husk: cow manure at a ratio of 1:1:2, 4) Sandy loam soil: raw rice husk: coconut coir: cow manure at a ratio of 1:1:1:2, 5) Sandy loam soil: pig manure at a ratio of 1:1, 6) Sandy loam soil: coconut coir: pig manure at a ratio of 1:1:1, 7) Sandy loam soil: raw rice husk: pig manure at a ratio of 1:1:1, 8) Sandy loam soil: raw rice husk: coconut coir: pig manure at a ratio of 1:1:1:1, 9) Sandy loam soil: coconut coir: cow manure: raw rice husk: 16-16-16 fertilizer at a ratio of 1:2:1:1:0.25. The results demonstrated that Treatment 2 yielded the highest growth of curly kale, as indicated by plant height, canopy width, number of leaves, and leaf width and length, measuring 10.13 cm, 21.17 cm, 6.67 leaves, 14.00 cm, and 8.83 cm, respectively. Additionally, it produced the highest fresh weight of the entire plant with roots at 33.84 grams, along with a root weight of 31.85 grams. Therefore, the growing media comprising a mixture of sandy loam soil, coconut coir, and cow manure in a ratio of 1:1:2 was determined to be the most suitable for cultivating curly kale.

Keywords: Substrate Media; Curl Leaf Kale; Coconut Coir; Cow Manure

บทนำ

ผักเคล (Kale) หรือผักคะน้าใบหยิก เป็นพืชตระกูลเดียวกับผักจำพวกบรอกโคลี และดอกกะหล่ำ คนไทยเริ่มรู้จักในชื่อ คะน้าใบหยิก มีลักษณะสีเขียวเข้ม ลักษณะขอบใบจะหยิกฟอย ต่างจากคะน้าทั่วไปอย่างเห็นได้ชัด นิยมนำมาทำอาหารประเภทผัด หรือต้มจับฉ่าย ให้คุณค่าวิตามินบี2 และแร่ธาตุหลายชนิดที่เป็นประโยชน์ต่อการควบคุมสมดุลกรดเบส ในกระแสเลือด เสริมสร้างกระดูกและฟัน ซึ่งเป็นที่นิยมอย่างมากในต่างประเทศ และถูกขนานนามว่าเป็นราชินีแห่งผักสีเขียวทั้งหมด (Queen of Greens) ได้รับการยอมรับว่าเป็น Super Food หรืออาหารที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูงและหลากหลาย เมื่อเทียบกับผักประเภทอื่น ๆ ในปริมาณที่เท่ากัน [1] คะน้าใบหยิกจะปลูกได้ตลอดทั้งปี หากมีน้ำอย่างเพียงพอและมีดินที่อุดมสมบูรณ์ คะน้าใบหยิกสามารถปลูกได้ทั้งในแปลงปลูกและในกระถาง การเจริญเติบโตและผลผลิตของคะน้าใบหยิกขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ รวมถึงสภาพแวดล้อมในการปลูกด้วยการเลือกใช้วัสดุปลูกมีผลอย่างมากต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของคะน้าใบหยิกที่การปลูกในกระถาง การปลูกพืชในกระถาง รากพืชถูกจำกัดขอบเขตอยู่เฉพาะภายในกระถางเท่านั้น วัสดุปลูกที่นำมาใช้ต้องมีความอุดมสมบูรณ์ มีธาตุอาหาร ครบถ้วนและเพียงพอ มีความร่วนซุย และอุ้มน้ำได้ดี [2] ดังนั้นวัสดุปลูกที่นำมาใช้จึงควรมีสสมบัติในการรักษาความชื้น อากาศถ่ายเทได้ดี [3] และมีธาตุอาหารให้แก่พืชตลอดช่วงการเจริญเติบโต โดยวัสดุปลูกที่มีคุณภาพดีและเหมาะสม คือ มีความหนาแน่นรวม (Bulk Density) เพียงพอให้ต้นไม้ทรงตัวอยู่ได้ ควรมีค่าความหนาแน่นรวมประมาณ 1.5 - 1.6 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีลักษณะร่วนซุย ช่วยระบายน้ำ ถ่ายเทอากาศ และเก็บความชื้นได้ดี มีความเป็นกรดเล็กน้อย ประมาณ pH 6.5 - 7.0 มีปริมาณเกลือต่ำ ปราศจากสารพิษ โรคแมลง และเมล็ดวัชพืช เป็นวัสดุที่ทำได้ง่ายในท้องถิ่น และราคาถูก มีน้ำหนักเบา เคลื่อนย้ายสะดวก มีความคงทนอายุการใช้งานอย่างน้อยประมาณ 4 เดือน มีความสม่ำเสมอและได้มาตรฐาน [2], [4]

การวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาผลของวัสดุปลูกต่อการเจริญเติบโตของคะน้าใบหยิก เพื่อหาวัสดุปลูกที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพสำหรับการปลูกในกระถางหรือในพื้นที่จำกัด

วิธีการดำเนินการวิจัย

1. การวางแผนการทดลอง วางแผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD) จำนวน 9 สิ่งทดลอง ๆ ละ 4 ซ้ำ ซ้ำละ 5 ถูง ได้แก่ 1) ดินร่วนปนทราย:มูลโค อัตราส่วน 1:2 โดยปริมาตร 2) ดินร่วนปนทราย:ขุยมะพร้าว:มูลโค อัตราส่วน 1:1:2 โดยปริมาตร 3) ดินร่วนปนทราย:แกลบดิบ:มูลโค อัตราส่วน 1:1:2 โดยปริมาตร 4) ดินร่วนปนทราย:แกลบดิบ:ขุยมะพร้าว:มูลโค อัตราส่วน 1:1:1:2 โดยปริมาตร 5) ดินร่วนปนทราย:มูลสุกร อัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร 6) ดินร่วนปนทราย:ขุยมะพร้าว:มูลสุกร อัตราส่วน 1:1:1 โดยปริมาตร 7) ดินร่วนปนทราย:แกลบดิบ:มูลสุกร อัตราส่วน 1:1:1 โดยปริมาตร 8) ดินร่วนปนทราย:แกลบดิบ:ขุยมะพร้าว:มูลสุกร อัตราส่วน 1:1:1:1 โดยปริมาตร 9) ดินร่วนปนทราย:ขุยมะพร้าว:ปุ๋ยมูลโค:แกลบดิบ:ปุ๋ยสูตร 16-16-16 อัตราส่วน 1:2:1:1:0.25 โดยปริมาตร

2. การปลูกและการดูแลรักษา

1. การเพาะกล้า นำวัสดุเพาะมาผสมคลุกเคล้าให้เข้ากันและนำไปใส่กระบะเพาะ ใช้ไม้จิ้มกลางหลุมของวัสดุเพาะและนำเมล็ดคะน้าใบหยิก (Curly Kale) ลงในหลุมกระบะเพาะหลุมละ 1 เมล็ดแล้วกลบด้วยวัสดุเพาะบาง ๆ นำกระบะเพาะวางในที่ร่ม รดน้ำให้ชุ่ม วันละ 2 ครั้ง เช้า - เย็น เมล็ดคะน้าใบหยิกจะงอกหลังจากหยอดเมล็ด 3 - 5 วัน เมื่อมีอายุ 15 วัน จึงทำการย้ายปลูกลงในกระถาง

2. ขั้นตอนการย้ายปลูก ผสมคลุกเคล้าวัสดุปลูกที่เตรียมไว้ตามแผนการทดลอง พับปากถุงเพาะชำ 1 นิ้ว แล้วรอกวัสดุปลูกให้เต็มถุง รดน้ำให้ชุ่ม ใช้ไม้เจาะรูตรงกลางถุงเพาะขนาดเท่ากับหลุมของถาดเพาะกล้า ย้ายปลูกเมื่อต้นกล้าที่มีอายุครบ 15 วัน กัดบริเวณโคนให้แน่นพอประมาณ นำถุงที่ย้ายปลูกแล้วไปวางกลางแจ้ง ระยะห่าง 40 X 40 เซนติเมตร ให้น้ำวันละ 2 ครั้ง เช้า - เย็น

3. การบันทึกข้อมูล

1. บันทึกข้อมูลการเจริญเติบโต ความสูงเฉลี่ยของต้น (เซนติเมตร) ความกว้างทรงพุ่ม (เซนติเมตร) จำนวนใบต่อต้น (ใบต่อต้น) ความกว้างและความยาวเฉลี่ยของใบ (เซนติเมตร)

2. บันทึกข้อมูล น้ำหนักสดต้นรวมราก (กรัมต่อต้น) น้ำหนักสดต่อต้น (กรัมต่อต้น) ในวันเก็บเกี่ยวผลผลิต

4. การวิเคราะห์ข้อมูล

นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์หาความแปรปรวนทางสถิติ Analysis of Variance (ANOVA) ตามแผนการทดลองและเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยแต่ละสิ่งทดลองโดยใช้วิธี Least Significant Difference (LSD) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

1. ด้านการเจริญเติบโต ความสูงของคะน้าใบหยิกในช่วงอายุ 7 - 28 วัน หลังย้ายปลูก มีความสูงเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 6.58 - 10.13 เซนติเมตร (ตารางที่ 1) โดยสิ่งทดลองที่ 2 ดินร่วนปนทราย:ขุยมะพร้าว:มูลโค คะน้าใบหยิกมีความสูงเฉลี่ยมากที่สุด คือ 10.13 เซนติเมตร ไม่แตกต่างกับสิ่งทดลองที่ 3 4 5 และ 9 แต่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$) กับสิ่งทดลองที่ 7 8 6 และ 1 ซึ่งมีค่าความสูงเฉลี่ยเป็น 9.75 9.54 8.33 และ 6.58 เซนติเมตร ตามลำดับ

ความกว้างทรงพุ่มของคะน้าใบหยิก ในช่วงอายุ 7 - 28 วันหลังย้ายปลูก มีความกว้างทรงพุ่มเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 10.25 - 21.17 เซนติเมตร (ตารางที่ 2) โดยสิ่งทดลองที่ 2 ดินร่วนปนทราย:ขุยมะพร้าว:มูลโค คะน้าใบหยิกมีความกว้างทรงพุ่มเฉลี่ยมากที่สุด คือ 21.17 เซนติเมตร ไม่แตกต่างกับสิ่งทดลองที่ 3 4 5 6 และ 7 แต่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$) กับสิ่งทดลองที่ 9 8 และ 1 ซึ่งมีค่าความสูงเฉลี่ยเป็น 12.00 10.75 และ 10.25 เซนติเมตร ตามลำดับ

จำนวนใบของคะน้าใบหยิก ในช่วงอายุ 7 - 28 วันหลังย้ายปลูก ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($p>0.05$) มีจำนวนใบเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 10.25 - 14.00 ใบ (ตารางที่ 3)

ตารางที่ 1 ความสูงของต้นคะน้าใบหยิกที่ปลูกในวัสดุปลูกที่แตกต่างกัน

กลุ่มทดลอง	อายุ (วัน)			
	7	14	21	28
ดินร่วนปนทราย:มูลโค	3.88 ^b	4.21 ^c	5.5 ^c	6.58 ^c
ดินร่วนปนทราย:ขุยมะพร้าว:มูลโค	5.13 ^b	7.09 ^{ab}	8.54 ^{ab}	10.13 ^a
ดินร่วนปนทราย:แกลบดิบ:มูลโค	4.96 ^b	5.42 ^{cd}	7.08 ^{cd}	8.75 ^{ab}
ดินร่วนปนทราย:แกลบดิบ:ขุยมะพร้าว:มูลโค	4.46 ^b	5.29 ^{bc}	7.04 ^{bc}	8.75 ^{ab}
ดินร่วนปนทราย:มูลสุกร	6.47 ^{ab}	7.25 ^a	7.75 ^a	8.67 ^{abc}
ดินร่วนปนทราย:ขุยมะพร้าว:มูลสุกร	5.79 ^b	6.31 ^{cd}	8.25 ^{cd}	8.83 ^c
ดินร่วนปนทราย:แกลบดิบ:มูลสุกร	4.96 ^b	5.67 ^{de}	6.75 ^{de}	9.75 ^c
ดินร่วนปนทราย:แกลบดิบ:ขุยมะพร้าว:มูลสุกร	4.17 ^a	5.33 ^c	6.76 ^d	9.54 ^c
ดินร่วนปนทราย:ขุยมะพร้าว:มูลโค:แกลบดิบ:ปุ๋ยเคมี	3.92 ^b	4.21 ^{bc}	6.54 ^{bc}	7.75 ^{ab}
F-test	**	**	**	**
CV (%)	31.99	8.91	5.82	5.79

หมายเหตุ: ns ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ($p>0.05$)

** มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 % ($p<0.01$)

ค่าเฉลี่ยที่กำกับด้วยตัวอักษรเหมือนกันในแนวตั้งไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี LSD ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

ตารางที่ 2 ความกว้างทรงพุ่มคะน้าใบหยิกที่ปลูกในวัสดุปลูกที่แตกต่างกัน

กลุ่มทดลอง	อายุ (วัน)			
	7	14	21	28
ดินร่วนปนทราย:มูลโค	5.92 ^{ab}	7.67 ^{ab}	9.90 ^b	10.25 ^c
ดินร่วนปนทราย:ขุยมะพร้าว:มูลโค	8.15 ^{ab}	12.00 ^{ab}	19.75 ^a	21.17 ^a
ดินร่วนปนทราย:แกลบดิบ:มูลโค	6.67 ^{ab}	8.92 ^{ab}	14.59 ^{ab}	16.17 ^{abc}
ดินร่วนปนทราย:แกลบดิบ:ขุยมะพร้าว:มูลโค	8.25 ^{ab}	10.17 ^{ab}	12.50 ^{ab}	13.84 ^{abc}
ดินร่วนปนทราย:มูลสุกร	9.50 ^{ab}	12.42 ^{ab}	15.17 ^{ab}	16.42 ^{abc}
ดินร่วนปนทราย:ขุยมะพร้าว:มูลสุกร	10.50 ^a	14.34 ^a	16.76 ^{ab}	19.42 ^{ab}
ดินร่วนปนทราย:แกลบดิบ:มูลสุกร	6.90 ^{ab}	8.92 ^{ab}	12.50 ^{ab}	13.58 ^{abc}
ดินร่วนปนทราย:แกลบดิบ:ขุยมะพร้าว:มูลสุกร	5.00 ^b	6.67 ^b	9.58 ^b	10.75 ^c
ดินร่วนปนทราย:ขุยมะพร้าว:มูลโค:แกลบดิบ:ปุ๋ยเคมี	6.09 ^{ab}	8.25 ^{ab}	10.75 ^b	12.00 ^{bc}
F-test	**	**	**	**
CV (%)	28.91	28.24	23.81	22.21

หมายเหตุ: ns ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ($p>0.05$)

** มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 % ($p<0.01$)

ค่าเฉลี่ยที่กำกับด้วยตัวอักษรเหมือนกันในแนวตั้งไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี LSD ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

ตารางที่ 3 จำนวนใบของต้นคะน้าใบหยิกที่ปลูกในวัสดุปลูกที่แตกต่างกัน

กลุ่มทดลอง	อายุ (วัน)			
	7	14	21	28
ดินร่วนปนทราย:มูลโค	4.83	6.25	9.40	10.50
ดินร่วนปนทราย:ขุยมะพร้าว:มูลโค	7.59	8.50	13.08	14.00
ดินร่วนปนทราย:แกลบดิบ:มูลโค	6.17	7.75	10.92	12.33
ดินร่วนปนทราย:แกลบดิบ:ขุยมะพร้าว:มูลโค	6.25	6.92	8.00	10.25
ดินร่วนปนทราย:มูลสุกร	6.92	8.83	10.58	12.33
ดินร่วนปนทราย:ขุยมะพร้าว:มูลสุกร	7.50	7.75	9.25	10.92
ดินร่วนปนทราย:แกลบดิบ:มูลสุกร	6.33	7.08	8.92	10.84
ดินร่วนปนทราย:แกลบดิบ:ขุยมะพร้าว:มูลสุกร	5.92	6.17	11.34	11.75
ดินร่วนปนทราย:ขุยมะพร้าว:มูลโค:แกลบดิบ:ปุ๋ยเคมี	6.50	8.00	12.08	13.67
F-test	ns	ns	ns	ns
CV (%)	26.81	28.14	27.44	26.29

หมายเหตุ: ns ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ($p>0.05$)

ความกว้างใบคะน้าใบหยิกในช่วงอายุ 7 - 21 วันหลังย้ายปลูก ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p>0.05$) แต่เมื่อคะน้าใบหยิกอายุ 28 วันหลังย้ายปลูกพบว่า มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.01$) โดยสิ่งทดลองที่ 2 ดินร่วนปนทราย:ขุยมะพร้าว:มูลโค ให้ความกว้างใบเฉลี่ยมากที่สุด คือ 6.67 เซนติเมตร ในขณะที่สิ่งทดลองที่ 8 ดินร่วนปนทราย:แกลบดิบ:ขุยมะพร้าว:มูลสุกร ให้ความกว้างใบเฉลี่ยน้อยที่สุดคือ 3.50 เซนติเมตร (ตารางที่ 4)

ตารางที่ 4 ความกว้างใบคะน้าใบหยิกที่ปลูกในวัสดุปลูกที่แตกต่างกัน

กลุ่มทดลอง	อายุ (วัน)			
	7	14	21	28
ดินร่วนปนทราย:มูลโค	2.17	2.54	2.96	3.75 ^b
ดินร่วนปนทราย:ขุยมะพร้าว:มูลโค	2.42	4.38	4.92	6.67 ^a
ดินร่วนปนทราย:แกลบดิบ:มูลโค	2.50	3.36	4.63	5.17 ^{ab}
ดินร่วนปนทราย:แกลบดิบ:ขุยมะพร้าว:มูลโค	2.74	3.88	4.20	5.09 ^{ab}
ดินร่วนปนทราย:มูลสุกร	3.00	4.50	4.09	5.09 ^{ab}
ดินร่วนปนทราย:ขุยมะพร้าว:มูลสุกร	3.08	5.17	4.88	5.75 ^{ab}
ดินร่วนปนทราย:แกลบดิบ:มูลสุกร	2.17	3.08	3.75	4.75 ^{ab}
ดินร่วนปนทราย:แกลบดิบ:ขุยมะพร้าว:มูลสุกร	2.17	2.54	3.29	3.50 ^b
ดินร่วนปนทราย:ขุยมะพร้าว:มูลโค:แกลบดิบ:ปุ๋ยเคมี	2.00	2.63	2.88	3.75 ^b
F-test	ns	ns	ns	**
CV (%)	19.01	32.39	26.21	21.40

หมายเหตุ: ns ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ($p>0.05$)

** มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 % ($p<0.01$)

ค่าเฉลี่ยที่กำกับด้วยตัวอักษรเหมือนกันในแนวตั้งไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี LSD ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

ความยาวใบคะน้ำใบหยิกในช่วงอายุ 7 - 28 วันหลังย้ายปลูก มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$) โดยเมื่อคะน้ำใบหยิกอายุ 28 วันหลังย้ายปลูก พบว่าสิ่งทดลองที่ 2 ดินร่วนปนทราย: ชุยมะพร้าว: มูลโค ให้ความยาวใบเฉลี่ยมากที่สุด คือ 8.83 เซนติเมตร ในขณะที่สิ่งทดลองที่ 8 ดินร่วนปนทราย: แกลบดิบ: ชุยมะพร้าว: มูลสุกร ให้ความยาวใบเฉลี่ยน้อยที่สุดคือ 4.29 เซนติเมตร (ตารางที่ 5)

ตารางที่ 5 ความยาวใบคะน้ำใบหยิกที่ปลูกในวัสดุปลูกที่แตกต่างกัน

กลุ่มทดลอง	อายุ (วัน)			
	7	14	21	28
ดินร่วนปนทราย:มูลโค	1.90	2.46 ^b	3.96 ^b	5.00 ^{bc}
ดินร่วนปนทราย:ชุยมะพร้าว:มูลโค	2.13	3.67 ^{ab}	7.76 ^a	8.83 ^a
ดินร่วนปนทราย:แกลบดิบ:มูลโค	2.08	3.21 ^{ab}	4.84 ^{ab}	6.34 ^{abc}
ดินร่วนปนทราย:แกลบดิบ:ชุยมะพร้าว:มูลโค	2.59	3.96 ^{ab}	5.29 ^{ab}	6.25 ^{abc}
ดินร่วนปนทราย:มูลสุกร	2.92	4.38 ^{ab}	5.58 ^{ab}	6.59 ^{abc}
ดินร่วนปนทราย:ชุยมะพร้าว:มูลสุกร	2.92	5.33 ^a	7.00 ^{ab}	8.00 ^{ab}
ดินร่วนปนทราย:แกลบดิบ:มูลสุกร	1.92	3.17 ^{ab}	4.71 ^{ab}	5.92 ^{abc}
ดินร่วนปนทราย:แกลบดิบ:ชุยมะพร้าว:มูลสุกร	1.75	2.63 ^b	4.34 ^b	4.29 ^c
ดินร่วนปนทราย:ชุยมะพร้าว:มูลโค:แกลบดิบ:ปุ๋ยเคมี	1.92	2.88 ^{ab}	3.71 ^b	4.42 ^c
F-test	ns	**	**	**
CV (%)	25.78	30.32	26.75	21.88

หมายเหตุ: ns ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ($p > 0.05$)

** มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 % ($p < 0.01$)

ค่าเฉลี่ยที่กำกับด้วยตัวอักษรเหมือนกันในแนวตั้งไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี LSD ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

จากผลการทดลองทางการเจริญเติบโตของคะน้ำใบหยิก พบว่ามีการเจริญเติบโตแตกต่างกัน (ตารางที่ 1 2 4 และ 5) โดยพบว่า สิ่งทดลองที่ 2 วัสดุปลูกดินร่วนปนทราย: ชุยมะพร้าว: มูลโค ส่งผลให้คะน้ำใบหยิกมีการเจริญเติบโตดีที่สุด เนื่องจากคะน้ำใบหยิกได้รับสารอาหารที่เพียงพอจากมูลโค ซึ่งเป็นปุ๋ยคอกที่ได้จากสัตว์ที่บริโภคพืชเป็นอาหารหลักซึ่งมีอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C:N ratio) กว้าง ดังนั้นมูลโคจึงมีการย่อยสลายตัวช้าและค่อย ๆ ปลดปล่อยธาตุอาหารให้พืชนำไปใช้ประโยชน์ได้ตลอดระยะเวลาการเจริญเติบโต ทำให้พืชมีการดูดซึมสารอาหารได้อย่างมีประสิทธิภาพ รวมทั้งมีชุยมะพร้าวที่มีการระบายน้ำและอากาศดี [2], [5] อีกทั้งปุ๋ยคอกช่วยให้ดินเกาะตัวเป็นก้อน ร่วนซุย ซึ่งทำให้การระเหยของน้ำจากดินลดน้อยลง ดินสามารถดูดซับน้ำและธาตุอาหารได้มากขึ้น เพิ่มความสามารถในการอุ้มน้ำของดิน ทำให้น้ำที่เป็นประโยชน์ต่อพืชเพิ่มมากขึ้น และการเพิ่มอินทรีย์วัตถุลงในดินยังทำให้มีช่องว่างในดิน ระบบการหมุนเวียนอากาศในดินจึงดีขึ้น และทำให้ระบบรากของพืชสามารถแผ่กระจายในดินได้อย่างกว้างขวาง [6] ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ [7] พบว่าการปลูกคะน้ำในวัสดุปลูกที่มีส่วนผสมของใบไม้หมัก กาบมะพร้าวสับ แกลบเผา และปุ๋ยคอกทำให้คะน้ำมีการเจริญเติบโตและให้ผลผลิตมากที่สุด เช่นเดียวกับผลการทดลองของ [8] ที่ศึกษาผลของวัสดุปลูกที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตและศักยภาพการผลิตผักลิ้นท้านในพื้นที่จังหวัดภูเก็ตพบว่า วัสดุปลูก ทรายทะเล: ชุยมะพร้าว: มูลวัว อัตราส่วน 1:1:1 ผักลิ้นท้านมีการเจริญเติบโตด้านความสูงลำต้น จำนวนไหล ความยาวไหล จำนวนต้นต่อไหล จำนวนต้นต่อกอ และมีจำนวนใบสูงที่สุด

2. ด้านผลผลิต ทำการเก็บเกี่ยวผักคะน้ำใบหยิก (เมื่ออายุ 28 วันหลังย้ายปลูก) ซึ่งน้ำหนักสดต้นรวมราก พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$) (ตารางที่ 6) โดยสิ่งทดลองที่ 2 ดินร่วนปนทราย:

ขุยมะพร้าว:มูลโค มีน้ำหนักสดตันรวมรากเฉลี่ยสูงสุด คือ 33.83 กรัม ในขณะที่สิ่งทดลองที่ 8 ดินร่วนปนทราย: แกลบดิบ:ขุยมะพร้าว:มูลสุกร มีน้ำหนักสดตันรวมรากเฉลี่ยน้อยที่สุด คือ 6.19 กรัม ส่วนน้ำหนักต้นพบว่าสิ่งทดลองที่ 2 ดินร่วนปนทราย:ขุยมะพร้าว:มูลโค มีน้ำหนักสดต่อตันเฉลี่ยสูงสุด คือ 31.58 กรัม ในขณะที่สิ่งทดลองที่ 8 ดินร่วนปนทราย:แกลบดิบ:ขุยมะพร้าว:มูลสุกร มีน้ำหนักสดต่อตันเฉลี่ยน้อยที่สุด คือ 5.15 กรัม เนื่องจากการใส่ปุ๋ยอินทรีย์ที่ใส่ลงไปดินสามารถช่วยปรับปรุงโครงสร้างของดินให้ดีขึ้น ช่วยเพิ่มความสามารถในการอุ้มน้ำของดิน อินทรีย์วัตถุในดินและปริมาณธาตุอาหารในดิน เมื่อปุ๋ยอินทรีย์ถูกย่อยสลาย ธาตุอาหารพืชเหล่านั้นก็จะถูกปลดปล่อยออกมาอย่างช้า ๆ เพื่อเป็นประโยชน์ต่อพืช ทำให้ลดการสูญเสียธาตุอาหารอันเกิดจากการชะล้าง นอกจากนี้ปุ๋ยอินทรีย์คงอยู่ในดินได้นานทำให้พืชสามารถดูดใช้ธาตุอาหารได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น [9] สอดคล้องกับงานวิจัยของ [10] ที่รายงานถึงชนิดและอัตราของปุ๋ยอินทรีย์ต่อการเจริญเติบโต ผลผลิต และผลตอบแทนทางเศรษฐกิจสุทธิในการผลิตค่น้ำพบว่า การใส่มูลโคและปุ๋ยหมักเปลือกทุเรียนที่อัตรา 4.5 ตัน/ไร่ มีแนวโน้มให้ผลผลิตน้ำหนักสดของค่น้ำสูงที่สุด นอกจากนี้ยังให้ผลตอบแทนทางเศรษฐกิจสุทธิในการผลิตค่น้ำสูงที่สุด สอดคล้องกับงานวิจัยของ [7] ได้รายงานการเจริญเติบโตของผักค่น้ำที่ปลูกในวัสดุปลูกที่มีส่วนผสมของใบไม้หมักกาบมะพร้าวสับ แกลบเผาและปุ๋ยคอก ที่มีผลต่อการเจริญเติบโตและผลผลิต ได้แก่ ความสูง จำนวนใบ ความกว้างใบน้ำหนักสดต้นและน้ำหนักต้นแห้งของผักค่น้ำสูงกว่าการปลูกในวัสดุปลูกชนิดอื่น นอกจากนี้ยังมีรายงานของ [11] ที่รายงานการใช้ขุยมะพร้าวผสมกาบมะพร้าว อัตราส่วน 1:1 เป็นวัสดุปลูก มีผลต่อการเจริญเติบโตของพรมญี่ปุ่นมากที่สุด โดยทำให้ความสูงทรงพุ่ม จำนวนไหลต่อต้น ความยาวราก เส้นผ่านศูนย์กลางดอก และจำนวนข้อที่เกิดไหลสูงที่สุด เนื่องจากวัสดุปลูกและปุ๋ยคอกช่วยให้ดินร่วนซุย ซึ่งทำให้การระเหยของน้ำจากดินลดน้อยลง ดินสามารถดูดซับน้ำและธาตุอาหารได้มากขึ้น เพิ่มความสามารถในการอุ้มน้ำของดิน ทำให้น้ำที่เป็นประโยชน์ต่อพืชเพิ่มมากขึ้นและการเพิ่มอินทรีย์วัตถุ ลงในดินยังทำให้มีช่องว่างในดิน ระบบการหมุนเวียนอากาศในดินจึงดีขึ้นและทำให้ระบบรากของพืช สามารถแผ่กระจายในดินได้ [6] พืชจึงมีการเจริญเติบโตได้ดียิ่งขึ้น

ตารางที่ 6 น้ำหนักต้นรวมราก น้ำหนักต้นของค่น้ำใบหยิกที่ปลูกในวัสดุปลูกที่แตกต่างกัน

กลุ่มทดลอง	น้ำหนักสดตันรวมราก	น้ำหนักสดต้น
	(กรัม)	(กรัม)
ดินร่วนปนทราย:มูลโค	10.39 ^b	9.28 ^b
ดินร่วนปนทราย:ขุยมะพร้าว:มูลโค	33.84 ^a	31.58 ^a
ดินร่วนปนทราย:แกลบดิบ:มูลโค	18.64 ^b	16.87 ^b
ดินร่วนปนทราย:แกลบดิบ:ขุยมะพร้าว:มูลโค	12.13 ^b	10.63 ^b
ดินร่วนปนทราย:มูลสุกร	10.40 ^b	8.64 ^b
ดินร่วนปนทราย:ขุยมะพร้าว:มูลสุกร	13.71 ^b	12.23 ^b
ดินร่วนปนทราย:แกลบดิบ:มูลสุกร	8.12 ^b	12.97 ^b
ดินร่วนปนทราย:แกลบดิบ:ขุยมะพร้าว:มูลสุกร	6.19 ^b	5.15 ^b
ดินร่วนปนทราย:ขุยมะพร้าว:มูลโค:แกลบดิบ:ปุ๋ยเคมี	8.15 ^b	6.33 ^b
F-test	**	**
CV (%)	40.80	47.71

หมายเหตุ: ns ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ($p>0.05$)

** มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 % ($p<0.01$)

ค่าเฉลี่ยที่กำกับด้วยตัวอักษรเหมือนกันในแนวตั้งไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี LSD ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

บทสรุป

ผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่า วัสดุปลูกที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของต้นคะน้าใบหยิกมากที่สุด คือ ดินร่วนปนทราย:ขุยมะพร้าว:มูลโค อัตราส่วน 1:1:2 เนื่องจากมีความสูง ความกว้างทรงพุ่ม จำนวนใบ ความกว้างใบ ความยาวใบ น้ำหนักสดต้นรวมราก น้ำหนักสดต่อต้น มากที่สุด

References

- [1] Chantharawan, W. (2022). **The Queen of Green**. Access (17 January 2023). Available (<https://kb.mju.ac.th/article.aspx>)
- [2] Suksawat, M. (2004). **Handbook of Flower Agriculture and Media for Ornamental Plants**. Bangkok: House and Garden
- [3] Gruda, N. (2009). Do Soilless Culture Systems Have an Influence on Product Quality of Vegetables? **Journal of Applied Botany and Food Quality**. Vol. 82, No. 2, pp. 141-147 (in Thai)
- [4] Kasemsap, S. (1983). **Potted Flowering Plants**. (2nd ed.). Bangkok: Kasetsart University
- [5] Wattanaphayapkul, V. (2015). Effects of Wood Vinegar and Manure on Growth, Yield and Seed Quality of Hom Mali Rice. **Journal of Agriculture**. Vol. 31, No. 3, pp. 269-279 (in Thai)
- [6] Wongkrachang, S. (2014). Effects of Organic and Inorganic Fertilizer for Maize Growth on Ban Thon Soil Series. **Khon Kaen Agriculture Journal**. Vol. 42, pp. 359-362 (in Thai)
- [7] Tuwaihan, S., Phairawan, K., Jantasri, R., and Pimrach, S. (2013). Study on Suitable Soil Mix for Chinese Kale Cultivation. **Prawarun Agricultural Journal**. Vol. 10, No. 2, pp. 117-124 (in Thai)
- [8] Suksamran, C. (2020). Effect of Growing Media on Growth and Potential of Linharn (*Launaea sarmentosa*) Production in Phuket Province. **Khon Kaen Agriculture Journal**. Vol. 48, No. 3, pp. 509-514 (in Thai)
- [9] Suksawat, M. (2017). **Organic Fertilizer: Revised Edition**. SE-ED Publishing, Bangkok
- [10] Kunlanit, B., Pidtaraso, S., and Siritrakulsak, T. (2021). Effects of Type and Rate of Organic Fertilizers on Growth, Yield and Net Economic Return of Chinese Kale Production. **Khon Kaen Agriculture Journal**. Vol. 49, No. 3, pp. 538-550. DOI: 10.14456/kaj.2021.xx
- [11] Anuwong, C., Kosinwattana, S., and Marongchai, S. (2020). Effect of the Growing Media and Manure Types on Growth and Development of *Episcia cupreata* (Hook.) Hanst. **King Mongkut's Agricultural Journal**. Vol. 38, No. 3, pp. 304-314 (in Thai)

สมบัติเชิงกลและโครงสร้างจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จาก เถ้าลอยแคลเซียมสูงผสมผงเส้นใยบะซอลต์จากฉนวนกันความร้อนทิ้ง **Mechanical and Microstructural Properties of Geopolymer Paste from High Calcium Fly Ash Containing Basalt Fiber Powder from Waste Insulation**

อาดัม ศัพทมงคล¹ ไพฑูรย์ นาแซง² อัมพล วงศ์ษา¹ วันโชค เครือหงษ์³ วันชัย สะตะ^{1*} และ
ปริญญญา จินดาประเสริฐ^{1,4}

Adam Saptamongkol¹ Phaithun Nasaeng² Ampol Wongsas¹ Wunchock Kroehong³
Vanchai Sata^{1*} and Prinya Chindaprasirt^{1,4}

Received: July 9, 2024; Revised: August 27, 2024; Accepted: August 27, 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาสมบัติของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอยแคลเซียมสูงที่แทนที่ด้วยผงเส้นใยบะซอลต์จากเศษฉนวนกันความร้อนในอัตราร้อยละ 0 10 20 30 และ 40 โดยน้ำหนัก สารกระตุ้นปฏิกิริยาใช้อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 โมลาร์ (Sodium Silicate/ Sodium Hydroxide, NS/NH) เท่ากับ 1.0 และอัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุผง (Liquid, Binder, L/B) เท่ากับ 0.6 บ่มตัวอย่างเพสต์ที่อุณหภูมิปกติ ศึกษาผลกระทบของเวลาในการแข็งตัว กำลังอัด กำลังคด และโครงสร้างทางจุลภาค ผลการทดสอบพบว่า ส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์ทั้งหมดมีอัตราส่วนโดยโมลของ $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ อยู่ระหว่าง 3.79 - 4.49 ระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์นานขึ้นตามการเพิ่มปริมาณการใช้ผงเส้นใยบะซอลต์ ทั้งนี้เนื่องจากการลดลงของ Calcium Silicate Hydrate (C-S-H) และ Calcium (Alumino) Silicate Hydrate (C-(A)-S-H) ในส่วนผสมกำลังอัดของส่วนผสมที่ใช้ผงเส้นใยบะซอลต์ร้อยละ 20 (BP20) ให้กำลังอัดสูงสุดโดยมีกำลังอัดเป็น 32.0 53.6 และ 68.0 เมกะปาสคาลที่อายุการทดสอบ 7 28 และ 90 วัน ตามลำดับ ส่วนค่ากำลังคดมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญตามปริมาณการเพิ่มผงเส้นใยบะซอลต์ นอกจากนั้นการแทนที่เถ้าลอยด้วยผงเส้นใยบะซอลต์ในอัตราส่วนไม่เกินร้อยละ 20 ช่วยทำให้เนื้อเจลของจีโอโพลิเมอร์เพสต์มีการสร้างผลึกใหม่มากขึ้น ส่งผลให้มีโครงสร้างที่หนาแน่นขึ้นซึ่งช่วยเพิ่มความแข็งแรงของเพสต์

คำสำคัญ : เส้นใยบะซอลต์; กำลังอัด; กำลังคด; โครงสร้างจุลภาค; ฉนวนกันความร้อน

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

² คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

³ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตอุเทนถวาย

⁴ ภาควิชาคานาธิปไตย สานามเสือบ้า เขตดุสิต กรุงเทพมหานคร

¹ Faculty of Engineering, Khon Kaen University

² Faculty of Engineering, North Eastern University

³ Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Tawan-ok, Uthenthawai Campus

⁴ Academy of Science, Royal Society of Thailand, Bangkok

* Corresponding Author, Tel. 08 1592 8191, E - mail: vanca@kku.ac.th

Abstract

In this study, the properties of geopolymer paste from high calcium fly ash replaced by basalt fiber powder from insulation waste at the rates of 0, 10, 20, 30, and 40 wt% were evaluated. The activator with sodium silicate to sodium hydroxide (10 Molar) ratio (NS/NH) at 1.0 and the liquid to binder (L/B) ratio at 0.6 were used. The curing of the paste sample was conducted at room temperature. The setting time, compressive strength, flexural strength, and microstructure were tested. The results showed that all the geopolymer paste mixtures had $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ molar ratios between 3.79 and 4.49. The setting time of the paste was prolonged with increasing basalt fiber powder content. This is due to the reduction of calcium silicate hydrate (C-S-H) and calcium (alumino) silicate hydrate (C-(A)-S-H) in the mixture. The compressive strength of 20 % basalt fiber powder paste (BP20) gave the highest compressive strength with the compressive strength of 32.0, 53.6, and 68.0 MPa at the test ages of 7, 28, and 90 days, respectively. The flexural strength increased significantly with the increase in the amount of basalt fiber powder. In addition, replacing fly ash with basalt fiber powder at a ratio not exceeding 20 % helps the gel of geopolymer paste to form more new crystals, resulting in a denser structure that increases the paste's strength.

Keywords: Basalt Fiber; Compressive Strength; Flexural Strength; Microstructure; Insulation

บทนำ

จีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุประสานที่ได้จากวัสดุอะลูมิเนียมซิลิเกตที่ไม่เป็นผลึกสภาพของแข็งถูกชะละลายในสารละลายด่างอัลคาไล ซึ่งส่งผลให้พันธะ Silicon-Oxygen (Si-O) และ Aluminum-Oxygen (Al-O) ของสารประกอบ SiO_2 และ Al_2O_3 แตกตัวเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นสารละลายซิลิเกตและอะลูมิเนต เมื่อเข้าสู่สภาวะสมดุลจำเพาะจะเกิดสารประกอบซิลิเกตและอะลูมิเนตโมโนเมอร์ที่ซับซ้อน หลังจากนั้นส่วนออสซิลฐานจะกลายเป็นเจลที่มีความอึดตัวสูง โครงสร้างของโครงข่ายเชิงพื้นที่ที่ออสซิลฐานหรือกิ่งผลึกระหว่าง SiO_4 และ AlO_4 เชื่อมต่อกันเพื่อสร้างโครงสร้างทรงสี่หน้าเมื่อแข็งตัวได้เป็นจีโอโพลิเมอร์ที่มีสมบัติในการเชื่อมประสาน [1] ภายใต้กระบวนการสังเคราะห์วัสดุจีโอโพลิเมอร์ใช้พลังงานความร้อนต่ำและปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์น้อยกว่ากระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ ทำให้จีโอโพลิเมอร์ได้รับการยอมรับว่าเป็นวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยทั่วไปแล้วการก่อตัวและสมบัติเชิงกลของจีโอโพลิเมอร์ขึ้นอยู่กับ การก่อตัวของสารโซเดียมอะลูมิเนียมซิลิเกตไฮเดรต (Sodium Aluminosilicate, N-A-S-H) ดังนั้นในช่วงแรกการผลิตจีโอโพลิเมอร์จำเป็นต้องทำการบ่มที่อุณหภูมิไม่สูงมากนักเพื่อกระตุ้นปฏิกิริยาและเร่งการก่อตัว เนื่องจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นทำให้ระบบจีโอโพลิเมอร์เกิดพลังงานจลน์แล้วโมเลกุลของธาตุต่าง ๆ ที่ถูกชะละลายออกมาเกิดปฏิกิริยาได้ดีทำให้เกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันที่สมบูรณ์

เถ้าลอยแคลเซียมสูงเป็นวัสดุอะลูมิโนซิลิเกตชนิดหนึ่งที่มีองค์ประกอบเคมีหลักเป็น SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 และมีปริมาณ CaO ค่อนข้างสูง สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุตั้งต้นในการผลิตจีโอโพลิเมอร์ที่ก่อตัวได้เร็วกว่าซีเมนต์เพสต์ทั่วไปโดยมีระยะเวลาก่อตัวประมาณ 60 ถึง 100 นาที การก่อตัวที่รวดเร็วเป็นผลเนื่องจากไอออนแคลเซียมที่ถูกชะละลายออกมาจะทำให้เกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ผลิตภัณฑ์ไฮเดรชันที่เกิดขึ้นนี้เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์ และมีสมบัติเชิงกลที่ดี [2] แต่อย่างไรก็ตามวัสดุประสานจากจีโอโพลิเมอร์ก็มีความเปราะเพราะมีกำลังดึงน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับกำลังอัดคล้ายกับวัสดุประสานจากปูนซีเมนต์ทั่วไป ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาเพื่อปรับปรุงส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยให้ดีขึ้นโดยการเพิ่มวัสดุอื่น ๆ เข้าไปในส่วนผสม

เส้นใยบะซอลต์ (Basalt Fiber) เป็นเส้นใยขนาดเล็กที่ได้จากการหลอมหินบะซอลต์แล้วขึ้นรูปเป็นเส้นใยที่มีองค์ประกอบทางเคมีหลักคือ SiO_2 , Al_2O_3 และ CaO เป็นวัสดุที่ผลิตขึ้นมาที่สามารถใช้แทนการใช้แร่ใยหิน (Asbestos) ได้ ดังนั้นจึงมีความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ปลอดภัยไม่เป็นสารก่อมะเร็ง และไม่เป็นอันตรายต่อธรรมชาติ มีสมบัติทางกลที่ดี มีความต้านทานการกัดกร่อน มีความเป็นฉนวน จึงมีการนำมาใช้ทำเป็นฉนวนกันความร้อนหรือวัสดุกันเสียง นอกจากนี้ยังมีการนำมาใช้เพื่อปรับปรุงสมบัติในส่วนผสมคอนกรีตหรือจีโอโพลิเมอร์ได้อีกด้วย [3] ในขณะเดียวกันงานอาคารเองก็ยังมีเศษฉนวนกันความร้อนจากเส้นใยบะซอลต์เป็นขยะเหลือทิ้งจากการก่อสร้างหรือการรื้อถอน ซึ่งเศษเส้นใยเหล่านี้มีสมบัติทางกลที่ดีและมีองค์ประกอบเคมีที่เหมาะสมน่าจะนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ช่วยปรับปรุงสมบัติจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยได้ อย่างไรก็ตามก่อนนำมาใช้ต้องมีการปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของเส้นใยบะซอลต์จากเศษฉนวนกันความร้อนก่อน โดยทำให้มีขนาดอนุภาคใกล้เคียงกับเถ้าลอยแล้วผสมรวมกันทำเป็นจีโอโพลิเมอร์เพสต์เพื่อทดสอบสมบัติเชิงกลและโครงสร้างจุลภาค ผลการศึกษาที่ได้จะเป็นฐานข้อมูลสำหรับพัฒนาวัสดุประสานชนิดใหม่และลดเศษวัสดุจากงานก่อสร้างในอนาคตต่อไป

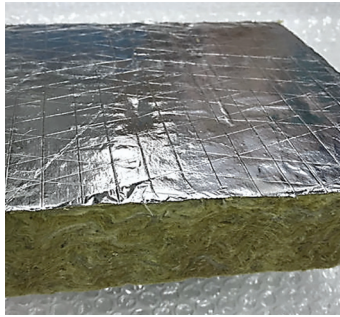
วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อศึกษาผลกระทบของปริมาณการแทนที่เถ้าลอยแคลเซียมสูงด้วยผงเส้นใยบะซอลต์จากเศษฉนวนกันความร้อนต่อระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์เพสต์
2. เพื่อหาปริมาณการแทนที่เถ้าลอยด้วยผงเส้นใยบะซอลต์จากเศษฉนวนกันความร้อนที่มีความเหมาะสมสำหรับการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่บ่มภายใต้อุณหภูมิปกติ
3. เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ใช้ผงเส้นใยบะซอลต์จากเศษฉนวนกันความร้อนที่แทนที่เถ้าลอยบางส่วน

วิธีการวิจัย

1. วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

เถ้าลอย (Fly Ash, FA) ที่ใช้เป็นวัสดุตั้งต้นหลักนำมาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ อำเภอมะแมะ จังหวัดลำปาง ส่วนผงเส้นใยบะซอลต์ (Basalt Fiber Powder, BP) ได้จากเศษฉนวนกันความร้อนซึ่งเป็นขยะเหลือทิ้งจากการก่อสร้างและรื้อถอนในประเทศไทย โดยใช้ส่วนที่เป็นเส้นใยสังเคราะห์ภายในภายหลังจากลอกชั้นอะลูมิเนียมฟอยด์ออกเรียบร้อยแล้ว ดังรูปที่ 1(ก) จากนั้นทำการปรับรูปร่างอนุภาคให้เล็กลงโดยการบดให้ละเอียดดังรูปที่ 1(ข) สมบัติทางกายภาพและการกระจายขนาดอนุภาคของเถ้าลอยและผงเส้นใยบะซอลต์ ดังตารางที่ 1 และรูปที่ 2



(ก) ก่อนทำการบด



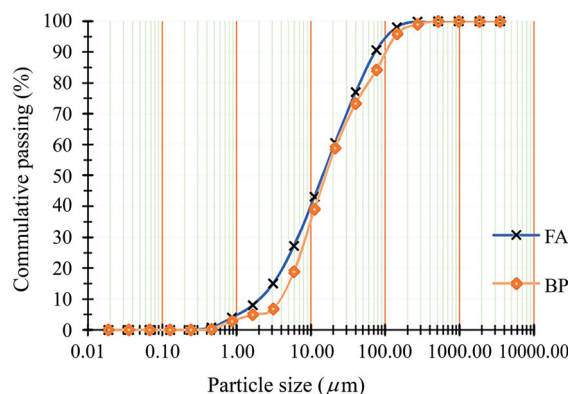
(ข) หลังทำการบด

รูปที่ 1 เส้นใยหินบะซอลต์จากถ่านกัมมันต์

สารกระตุ้นอัลคาไลสำหรับระบบปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันกำหนดใช้สารละลายสองชนิดร่วมกัน ชนิดแรกใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ชนิดเกิดจากความเข้มข้นร้อยละ 98 ถึง 99 เจือจากความเข้มข้นโดยละลายด้วยการแทนที่น้ำกลั่นเพื่อปรับระดับความเข้มข้นเท่ากับ 10 โมลาร์และทิ้งไว้ในอุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมงก่อนใช้งาน สุดท้ายสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na₂SiO₃) ใช้ตามมาตรฐานอุตสาหกรรมโดยมีสารประกอบโซเดียมออกไซด์ (Na₂O) ร้อยละ 28.66 ซิลิกาออกไซด์ (SiO₂) ร้อยละ 11.67 และน้ำร้อยละ 59.67 โดยปริมาตร ตามลำดับ

ตารางที่ 1 สมบัติทางกายภาพของวัสดุผงตั้งต้น

Material	Particle Size Distribution			Specific Gravity	Physical Properties	
	D10 (μm)	D50 (μm)	D90 (μm)		Surface Area (cm ² /g)	Retained on Sieve 325# (%)
FA	2.34	16.40	83.20	2.63	4,145	24.06
BP	4.56	18.83	122.67	2.72	4,340	39.83



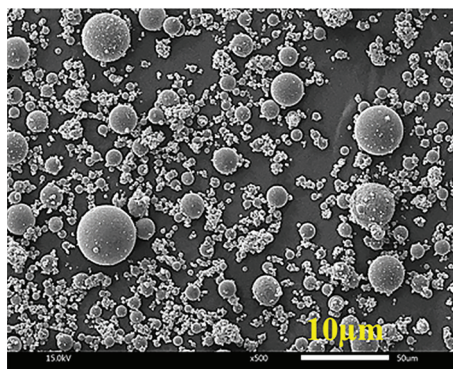
รูปที่ 2 การกระจายขนาดอนุภาคของเถ้าลอยแคลเซียมสูงและผงเส้นใยบะซอลต์

ผลทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยและผงเส้นใยบะซอลต์ ดังตารางที่ 2 พบว่าเถ้าลอยประกอบด้วย ซิลิกาออกไซด์ (SiO₂) อะลูมินาออกไซด์ (Al₂O₃) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นหลัก เมื่อพิจารณาตามมาตรฐาน ASTM C618 [4] สามารถจัดเป็นสารปอซโซลานชั้นคุณภาพ C หรือเถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมสูง เนื่องจากมีผลรวมออกไซด์ของ SiO₂, Al₂O₃ และ Fe₂O₃ เท่ากับร้อยละ 57.40 และมีออกไซด์ของ CaO มากกว่าร้อยละ 18 โดยน้ำหนัก สำหรับผงเส้นใยบะซอลต์มีองค์ประกอบทางเคมีคล้ายกับ

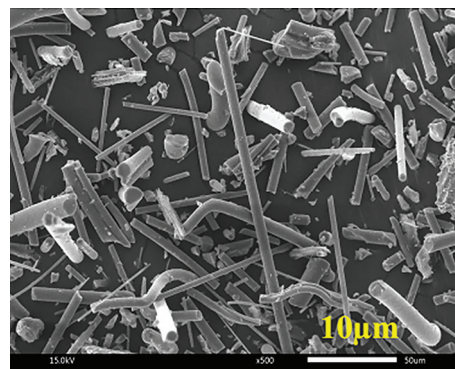
เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะมีปริมาณซิลิกาออกไซด์และแคลเซียมออกไซด์ที่จำเป็นต่อการทำปฏิกิริยามากกว่าเถ้าลอยที่ใช้เป็นวัสดุผงตั้งต้นหลัก ซึ่งคล้ายกับเส้นใยบะซอลต์ที่ได้จากโรงงานผลิตโดยตรง [3] ดังรูปที่ 3 แสดงถึงลักษณะทางกายภาพของเถ้าลอยเปรียบเทียบกับผงเส้นใยบะซอลต์พบว่า เถ้าลอยมีลักษณะเป็นทรงกลมผิวเรียบ ในขณะที่ผงเส้นใยบะซอลต์มีรูปทรงคล้ายแท่งกระบอกตันแต่มีพื้นผิวเรียบ เมื่อพิจารณารูปแบบ X-Ray diffraction (XRD) พบว่า อนุภาคของเถ้าลอยตรวจพบพีคแหลมของเฟสผลึก Anhydrite (Calcium Sulphate, CaSO_4), Quartz (Silicon Dioxide, SiO_2), Portlandite (Calcium Hydroxide, $\text{Ca}(\text{OH})_2$) และ Lime (Calcite, CaCO_3) ดังรูปที่ 4 แสดงให้เห็นว่าซิลิกาออกไซด์ในอนุภาคของเถ้าลอยส่วนใหญ่อยู่ในรูปแบบของผลึก Quartz มากกว่าที่จะเป็นอสัณฐาน (Amorphous) ซึ่งผลวิเคราะห์จากเครื่องทดสอบ XRD พบว่า เถ้าลอยมีส่วนที่เป็นอสัณฐานร้อยละ 79.97 ในขณะที่รูปแบบ XRD ของผงเส้นใยบะซอลต์ไม่พบพีคแหลมแต่ตรวจพบส่วนฐานกว้างในช่วง 14 ถึง 40° 2Theta แสดงถึงองค์ประกอบทางแร่มีรูปแบบอสัณฐานซึ่งมีความเหมาะสมในการใช้เป็นวัสดุตั้งต้นในการผลิตจีโอโพลิเมอร์ [5]

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

Oxides	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	SO_3	MgO	Na_2O	K_2O	TiO_2	LOI
FA	29.30	14.70	13.40	28.20	6.09	2.69	2.33	2.02	0.37	1.55
BP	38.30	12.30	5.47	24.90	0.22	11.30	2.75	1.68	2.02	3.01

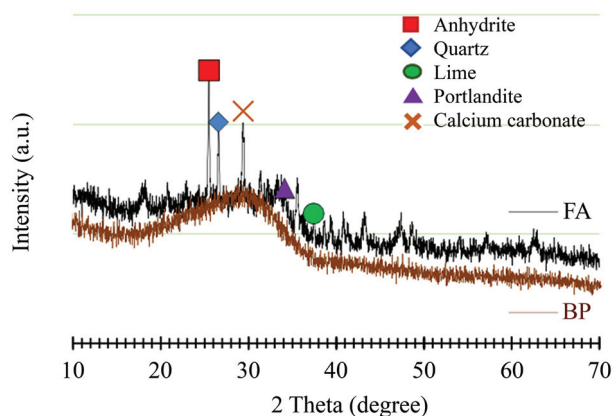


(ก) เถ้าลอย



(ข) ผงเส้นใยบะซอลต์

รูปที่ 3 ลักษณะทางกายภาพขยายกำลัง 500 เท่า



รูปที่ 4 รูปแบบ XRD ของเถ้าลอย (FA) และผงเส้นใยบะซอลต์ (BP)

2. การออกแบบส่วนผสมและการจัดเตรียมตัวอย่าง

การศึกษาครั้งนี้ได้ออกแบบส่วนผสมทั้งหมด 5 อัตราส่วนผสม ดังตารางที่ 3 โดยใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุตั้งต้นหลักและใช้ผงเส้นใยบะซอลต์แทนที่เถ้าลอยในอัตราส่วนร้อยละ 0 10 20 30 และ 40 โดยน้ำหนัก ตามแนวทางการศึกษาที่ผ่านมา [5] กำหนดสัญลักษณ์ที่ใช้ในการศึกษา คือ ตัวเลขหน้าหลังอักษรย่อแสดงถึงร้อยละการแทนที่เถ้าลอยบางส่วนด้วยผงเส้นใยบะซอลต์ ตัวอย่างเช่น BP00 หมายถึง จีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ผลิตจากเถ้าลอยเพียงชนิดเดียวหรือตัวอย่างควบคุม และ BP20 หมายถึง จีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ใช้ผงเส้นใยบะซอลต์เป็นวัสดุแทนที่เถ้าลอยในอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก เป็นต้น จากการทดลองผสมเพื่อให้ได้เพสต์ทุกส่วนผสมสามารถทำงานได้ง่ายและไม่ขึ้นหรือเหลวจนเกินไป จึงเลือกอัตราส่วนสารละลายอัลคาไลต่อวัสดุตั้งต้นและอัตราส่วนสารละลาย Na_2SiO_3 ต่อ NaOH เท่ากับ 0.60 และ 1.0 โดยน้ำหนัก การผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์วัสดุตั้งต้นทั้งสองชนิดจะถูกผสมรวมกันในอัตราส่วนที่กำหนด โดยใช้เครื่องผสมมาตรฐานที่ความเร็วต่ำเป็นเวลา 2 นาที จากนั้นเติมสารละลาย NaOH ทำการผสมเป็นเวลา 5 นาที ด้วยความเร็วรอบต่ำเมื่อครบระยะเวลาที่กำหนดเติมสารละลาย Na_2SiO_3 และทำการผสมต่อไปอีก 3 นาที จึงเพิ่มความเร็วการหมุนและผสมต่อไปอีก 2 นาที หลังจากนั้นเทส่วนผสมที่ผสมเสร็จลงในแบบหล่อขนาด $5 \times 5 \times 5$ เซนติเมตร เมื่อจีโอโพลิเมอร์เพสต์แข็งตัวจึงห่อด้วยฟิล์มพลาสติกและปล่อยให้แห้งในอุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมงก่อนทำการถอดแบบหล่อและห่อตัวอย่างด้วยฟิล์มพลาสติกและนำไปเก็บรักษาในอุณหภูมิห้องจนถึงอายุทดสอบ

ตารางที่ 3 สัดส่วนผสม

No	Specimens	FA (g)	BP (g)	Na_2SiO_3 (g)	NaOH (10M.) (g)	$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ (Mol.)
1	BP00	100	0	30	30	3.79
2	BP10	90	10	30	30	3.95
3	BP20	80	20	30	30	4.13
4	BP30	70	30	30	30	4.31
5	BP40	60	40	30	30	4.49

3 วิธีการทดสอบ

3.1 ทดสอบระยะเวลาการก่อตัวโดยใช้เครื่องมือทดสอบไวแคต (Vicat Consistency Apparatus) ตามมาตรฐาน ASTM C191 [6]

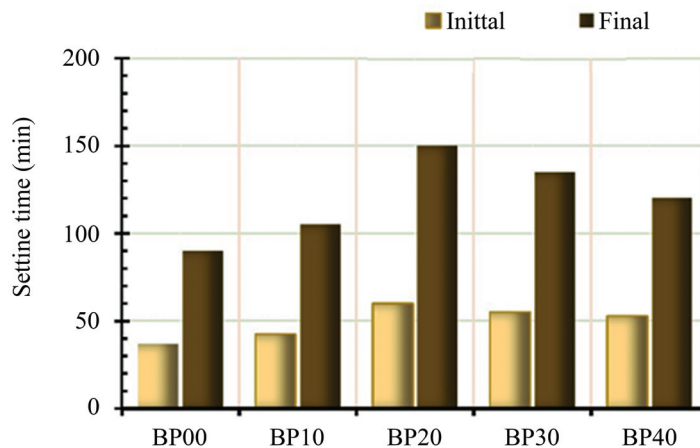
3.2 การทดสอบจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่แข็งตัวแล้ว ได้แก่ การทดสอบกำลังอัดที่อายุ 7 28 และ 90 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C109 [7] ทำการทดสอบความต้านทานแรงคัดของตัวอย่างปริซึมที่มีขนาด $4 \times 4 \times 16$ เซนติเมตร เมื่อตัวอย่างมีอายุครบ 28 วัน มาตรฐาน ASTM C348 [8] โดยทำการทดสอบ 3 ตัวอย่างเพื่อหาค่าเฉลี่ย

3.3 วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ใช้ผงเส้นใยบะซอลต์แทนที่เถ้าลอยบางส่วน โดยใช้แกนกลางของชิ้นส่วนที่เหลือจากการทดสอบกำลังอัดที่อายุ 28 วัน นำไปแช่ในสารละลายอะซิโตนเพื่อหยุดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นทำให้แห้งในเตาอบที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จึงนำไปทำการทดสอบวิเคราะห์และระบุชนิดสารประกอบหรือโครงสร้างผลึก (XRD) วิเคราะห์พันธะเคมีหรือหมู่ฟังก์ชันในโมเลกุล (FTIR) และตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบทางเคมี (SEM/EDS)

ผลการวิจัย

1. ระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์เฟสค์

รูปที่ 5 แสดงผลกระทบของปริมาณการแทนที่เถ้าลอยด้วยผงเส้นใยบะชอลด์ต่อระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์เฟสค์พบว่า ระยะเวลาการก่อตัวต้นและก่อตัวปลายของตัวอย่างควบคุม (BP00) มีค่าเท่ากับ 36.8 และ 90 นาที การแทนที่เถ้าลอยด้วยผงเส้นใยบะชอลด์ทำให้ค่าระยะเวลาการก่อตัวต้นและก่อตัวปลายมีค่าเพิ่มขึ้น โดยการแทนที่เถ้าลอยด้วยผงเส้นใยบะชอลด์ในอัตราส่วนร้อยละ 10 20 30 และ 40 โดยน้ำหนัก ให้ค่าระยะเวลาการก่อตัวต้นเพิ่มขึ้นร้อยละ 16 63 50 และ 44 ตามลำดับ ส่งผลต่อระยะเวลาการก่อตัวปลายเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 17 67 50 และ 33 ตามลำดับ การก่อตัวที่ช้าลงของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์เฟสค์ที่แทนที่เถ้าลอยบางส่วนด้วยผงเส้นใยบะชอลด์อาจมีสาเหตุจากการลดลงของปริมาณแคลเซียมออกไซด์ในวัสดุผงตั้งต้นแบบสองชนิดผสมกัน จากงานวิจัยของ Chindaprasirt, P. และคณะ [9] อธิบายไว้ว่าการก่อตัวที่รวดเร็วของจีโอโพลิเมอร์เฟสค์ที่ผลิตจากเถ้าลอยแคลเซียมสูงจะขึ้นอยู่กับปริมาณแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) ที่ถูกชะละลายออกมาจากวัสดุผงตั้งต้นและทำปฏิกิริยาเกิดเป็นสารผลิตภัณฑ์ไฮเดรชัน ดังนั้นการแทนที่เถ้าลอยด้วยผงเส้นใยบะชอลด์จะทำให้ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ในระบบจีโอโพลิเมอร์ลดลงเมื่อการตกตะกอนของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอะลูมิเนตซิลิเกตไฮเดรต C-(A)-S-H ส่งผลต่อระยะเวลาในการก่อตัวเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อแทนที่เถ้าลอยด้วยผงเส้นใยบะชอลด์ในอัตราส่วนมากกว่าร้อยละ 20 พบว่าค่าระยะเวลาการก่อตัวต้นและก่อตัวปลายมีแนวโน้มลดลง อาจเป็นไปได้ว่าเมื่อส่วนผสมของตัวอย่าง BP30 และ BP40 มีผงเส้นใยบะชอลด์เพิ่มขึ้นจะทำให้มีปริมาณซิลิกาออกไซด์มากขึ้นด้วย เมื่อพิจารณาจากค่าอัตราส่วนโดยโมลของ SiO_2/Al_2O_3 ที่คำนวณได้จากการเตรียมส่วนผสมทั้งหมดในตารางที่ 3 จึงพบว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณซิลิกาในส่วนผสมสามารถเร่งการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์เฟสค์จากเถ้าลอยได้ [9]

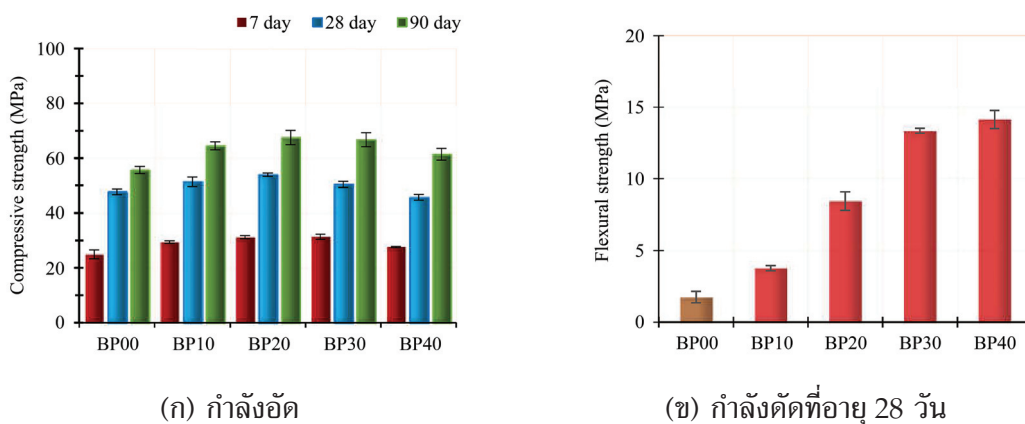


รูปที่ 5 ระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์เฟสค์จากเถ้าลอยผสมผงเส้นใยบะชอลด์

2. กำลังอัดและกำลังคัดของจีโอโพลิเมอร์เฟสค์

รูปที่ 6 แสดงผลกระทบของปริมาณการแทนที่เถ้าลอยด้วยผงเส้นใยบะชอลด์ต่อสมบัติเชิงกลของจีโอโพลิเมอร์เฟสค์ รูปที่ 6(ก) แสดงผลทดสอบกำลังอัดที่อายุ 7 28 และ 90 วัน พบว่าตัวอย่าง BP00 (ควบคุม) มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 26.3 44.2 และ 55.2 เมกะปาสคาล ตามลำดับ การแทนที่เถ้าลอยด้วยเส้นใยบะชอลด์ในอัตราส่วนร้อยละ 10 20 30 และ 40 โดยน้ำหนักช่วยปรับปรุงกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เฟสค์ได้เป็นอย่างดี โดยค่ากำลังอัดทุกอายุการทดสอบมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงปริมาณการแทนที่ที่เหมาะสม จากนั้นค่ากำลังอัดจะมีแนวโน้มลดลง จากผลการทดสอบครั้งนี้พบว่า เมื่อใช้ผงเส้นใยบะชอลด์เป็นวัสดุทดแทนเถ้าลอยในอัตราส่วน

ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก จีโอโพลิเมอร์เพสต์มีค่ากำลังอัดที่อายุ 7 28 และ 90 วันสูงสุดเท่ากับ 32.0 53.6 และ 68.0 เมกะปาสคาล ตามลำดับ จากงานวิจัยของ [9] อธิบายไว้ว่า การพัฒนา กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ จากเถ้าลอยมีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนโดยโมลของ $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่ได้จากการเตรียมส่วนผสม เมื่อส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์เพสต์มีอัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ เพิ่มขึ้นจนถึงค่าที่เหมาะสม กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นขณะที่ค่ากำลังอัดจะลดลงเมื่ออัตราส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ เพิ่มสูงขึ้น สำหรับการศึกษาคั้งนี้ การเตรียมส่วนผสมที่มีอัตราส่วนโดยโมลของ $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ อยู่ในช่วง 3.79 ถึง 4.49 ผลการทดสอบจึงพบว่า พงเส้นใยบะซอลต์ช่วยปรับกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอยมีความสัมพันธ์กับกำลังอัดที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นจากรูปที่ 6(ข) จึงได้แสดงผลทดสอบกำลังอัดที่อายุ 28 วันของตัวอย่าง BP00 (ควบคุม) มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 1.75 เมกะปาสคาล เปรียบเทียบการแทนที่เถ้าลอยด้วยพวงเส้นใยบะซอลต์ในอัตราส่วนร้อยละ 10 20 30 และ 40 โดยน้ำหนักพบว่า พวงเส้นใยบะซอลต์ช่วยเพิ่มกำลังอัดคิดเป็น 2.2 4.8 7.7 และ 8.1 เท่าเมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุม พิจารณาได้ว่าการปรับปรุงกำลังอัดของพวงเส้นใยบะซอลต์เกิดจากความสามารถในการต้านทานแรงดึงของพวงเส้นใยบะซอลต์ที่มีลักษณะที่เป็นแท่งยาวสังเกตุจากรูปที่ 3(ข) นั้นช่วยลดการแตกหักในชิ้นงานทดสอบขณะเพิ่มแรงกดด้วยการถ่ายโอนแรงกดและชะลอการเกิดรอยแตกและสามารถกระจายความเครียดที่เกิดขึ้นได้จึงทำให้พวงเส้นใยบะซอลต์มีผลกระทบอย่างมากต่อความต้านทานแรงอัด [10] อย่างมีนัยสำคัญ

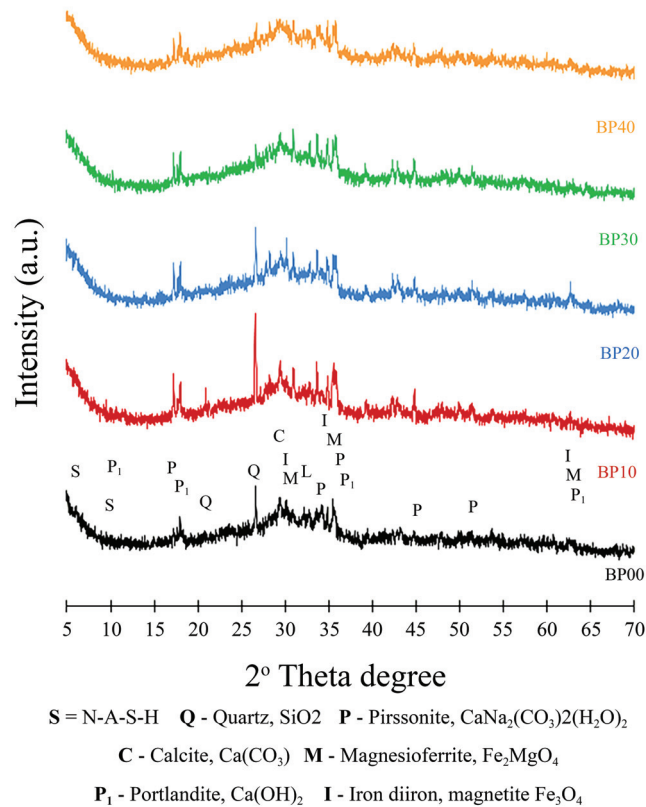


รูปที่ 6 สมบัติเชิงกลของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอยผสมพวงเส้นใยบะซอลต์

3. โครงสร้างจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอยผสมพวงเส้นใยบะซอลต์

3.1 ลักษณะสัณฐานวิทยาของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอยผสมพวงเส้นใยบะซอลต์ในปริมาณที่แตกต่างกัน จากรูปที่ 7 พบว่ารูปแบบ XRD ของตัวอย่างควบคุม (BP00) ปรากฏพื้นฐานกว้างแสดงถึงความเป็นอสัณฐานที่ตำแหน่งประมาณ 20° ถึง 28° 2Theta นั้นยังปรากฏเฟสผลึกโซเดียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮดรต (N-A-S-H) ควอตซ์ (Quartz) แมกนีซิโอเฟอร์ไรต์ (Magnesioferrite) แมกนีไทต์ (Magnetite) ปอร์ตแลนด์ไคต์ (Portlandite) แคลไซต์ (Calcite) ลาร์ไนต์ (Larnite) และเพียร์โซไนต์ (Pirssonite) นอกจากนี้ยังตรวจพบเฟสผลึกแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (C-S-H) ที่ตำแหน่ง 29.5° และ 32.05° 2Theta [9] เมื่อพิจารณาผลของการแทนที่เถ้าลอยด้วยพวงเส้นใยบะซอลต์ พบว่าการแทนที่เถ้าลอยด้วยพวงเส้นใยบะซอลต์ในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก ปรากฏพีคสูงของควอตซ์ที่ตำแหน่ง 26.6° 2Theta และพีคสูงของแคลไซต์ที่ตำแหน่ง 29.5° 2Theta ที่มีความเข้มข้นมากกว่าตัวอย่างควบคุม (BP00) เมื่อพิจารณารูปแบบ XRD ของพวงเส้นใยบะซอลต์ดังรูปที่ 4 ไม่ปรากฏพีคสูงที่ตำแหน่งเดียวกัน ดังนั้นความเข้มของพีคที่เพิ่มขึ้นที่ตำแหน่งนี้อาจบ่งบอกถึงการก่อตัวของแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (C-S-H) ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการพัฒนาความแข็งแรงของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ [11] นอกจากนี้ในโครงสร้างของ พวงเส้นใยบะซอลต์ การเพิ่มขึ้นของเฟสผลึกทำให้โครงสร้างมีความหนาแน่นและมีความเป็นระเบียบมากขึ้นผลที่ได้คือ

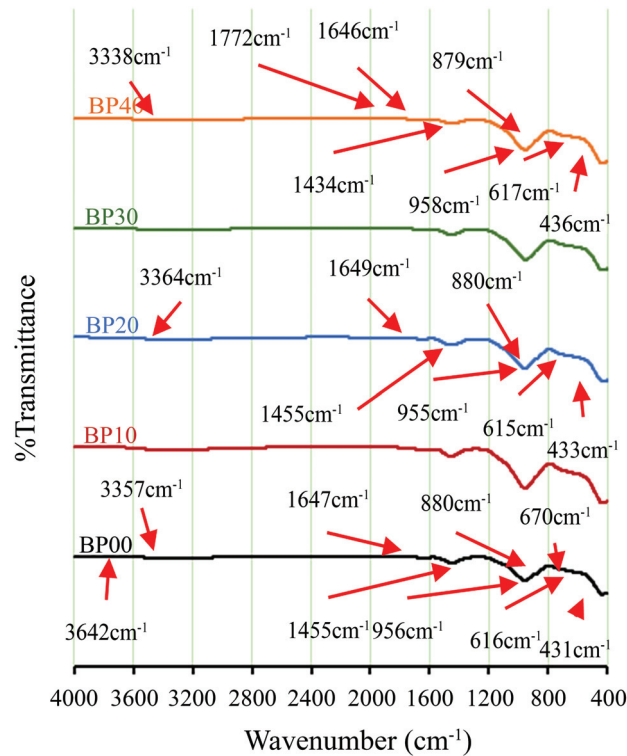
จีโอโพลิเมอร์เฟสมีความแข็งแรงมากขึ้นเช่นเดียวกัน ผลการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของจีโอโพลิเมอร์เฟสนี้ จึงสอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังอัดของตัวอย่าง BP10 และ BP20 ที่มีค่าสูงกว่าตัวอย่างควบคุม อย่างไรก็ตาม การแทนที่เถ้าลอยด้วยผงเส้นใยบะซอลต์ในอัตราส่วนร้อยละ 30 และ 40 โดยน้ำหนักพบว่า ความเข้มของพีคที่แสดงถึงเฟสผลึกต่าง ๆ ลดลงใกล้เคียงกับตัวอย่างควบคุม ดังนั้นการลดลงของเฟสผลึก อาจเป็นสาเหตุที่ทำให้ความแข็งแรงของตัวอย่างมีแนวโน้มลดลงด้วย



รูปที่ 7 รูปแบบ XRD ของจีโอโพลิเมอร์เฟสได้จากเถ้าลอยผสมผงเส้นใยบะซอลต์ที่อายุ 28 วัน

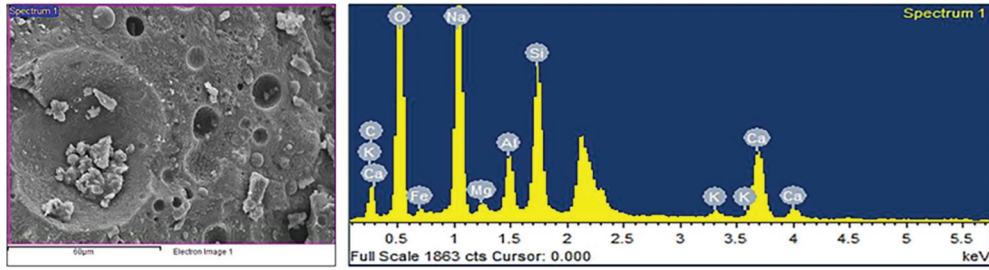
3.2 การพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FTIR สเปกตรัมอินฟราเรดจากเครื่องวิเคราะห์ FTIR ของจีโอโพลิเมอร์เฟสจากเถ้าลอยผสมผงเส้นใยบะซอลต์ดังรูปที่ 8 พบว่าในตัวอย่างที่ทำการทดสอบตรวจพบ โมเลกุลของน้ำอิสระทำให้เกิดการสั่นแบบยืดของพันธะ X-OH (เมื่อ X คือ Si หรือ H) ที่ตำแหน่งเลขคลื่น ในช่วง 3,600 ถึง 2,200 cm^{-1} และยังทำให้เกิดการสั่นแบบงอของพันธะ O-H ที่ตำแหน่งเลขคลื่นในช่วง 1,700 ถึง 1,600 cm^{-1} [12] การก่อตัวของโซเดียมไบคาร์บอเนต (Na_2CO_3) จากปฏิกิริยาระหว่างสารละลาย NaOH กับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ในบรรยากาศทำให้ตรวจพบการสั่นแบบงอของพันธะ O-C-O ที่ตำแหน่งเลขคลื่นใกล้ 1,400 cm^{-1} [13] การสั่นแบบยืดไม่สมมาตรของพันธะ Si-O-Si หรือ Al-O-Si ที่สามารถบ่งบอกระดับการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันในตัวอย่าง BP00 BP10 BP20 BP30 และ BP40 เกิดที่ตำแหน่งเลขคลื่น 956 956 955 952 และ 958 cm^{-1} ตามลำดับ การลดลงของเลขคลื่นแสดงถึงระดับการเกิดปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน [14] โดยการแทนที่เถ้าลอยด้วยผงเส้นใยบะซอลต์ในอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนักอาจเป็นอัตราส่วนการทดแทนที่เอื้อต่อการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันเพิ่มเติมและมีการเชื่อมโยงของสารประกอบแคลเซียมในระดับสูงซึ่งส่งผลให้ตัวอย่าง BP20 มีความสามารถในการอัดสูง การสั่นเนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตหรือแคลไซต์ในลักษณะของพันธะ C-O เกิดขึ้นที่ตำแหน่งเลขคลื่น 880 cm^{-1} [15] ตรวจพบในทุกตัวอย่างที่ทำการทดสอบซึ่งผลวิเคราะห์นี้สอดคล้องกับรูปแบบ XRD ที่ปรากฏ พีคเฟสผลึกของแคลไซต์แสดงให้เห็นว่าการแทนที่เถ้าลอยด้วยผงเส้นใยบะซอลต์ที่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์

น้อยกว่าไม่ส่งผลทำให้การเชื่อมโยงระหว่างแคลเซียมหายไป แต่ในทางกลับกันการสั่นที่ตำแหน่งนี้เด่นชัดกว่าเมื่อมีปริมาณผงเส้นใยบะซอลต์เพิ่มขึ้นอาจเป็นเพราะผงเส้นใยบะซอลต์มีความเป็นอสัณฐานสูงมากจึงสามารถทำปฏิกิริยาในระดับที่สูงกว่าได้

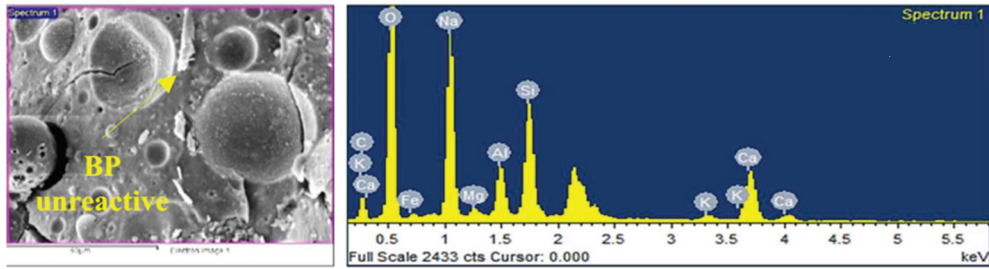


รูปที่ 8 สเปกตรัม FTIR ของอีพ็อกซีโพลีเมอร์พอสต์จากเถ้าลอยผสมผงเส้นใยบะซอลต์ที่อายุ 28 วัน

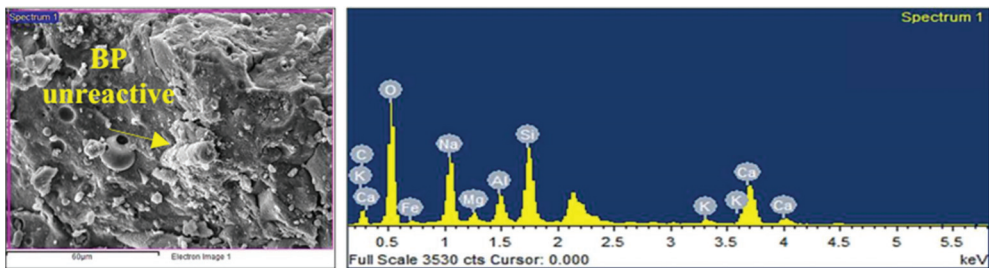
3.3 การวิเคราะห์ด้วยภาพถ่ายขยายกำลังสูงและปริมาณธาตุ ภาพถ่ายขยายกำลังสูงแสดงให้เห็นโครงสร้างพื้นผิวของอีพ็อกซีโพลีเมอร์พอสต์จากเถ้าลอยผสมผงเส้นใยบะซอลต์ที่อายุ 28 วัน ดังรูปที่ 9 พบว่าพื้นผิวของตัวอย่างที่ทำการทดสอบมีลักษณะขรุขระและไม่สม่ำเสมอ สามารถเห็นรูพรุนที่มีขนาดและรูปร่างแตกต่างกันไป รูพรุนเหล่านี้เกิดจากการเกิดปฏิกิริยาอีพ็อกซีโพลีเมอร์และการระเหยของน้ำในกระบวนการผลิต [16] เมื่อพิจารณาการก่อตัวของเจลหรือเฟสที่มีการจัดเรียงตัวในลักษณะพิเศษ ซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยาระหว่างสารละลายอัลคาไลน์กับวัสดุผงตั้งต้น พิจารณาได้ว่าตัวอย่างอีพ็อกซีโพลีเมอร์พอสต์ที่ผลิตจากเถ้าลอยล้วน (BP00) มีการก่อตัวของอีพ็อกซีโพลีเมอร์เจลที่หนาแน่นและต่อเนื่อง การแทนที่เถ้าลอยด้วยผงเส้นใยบะซอลต์ในอัตราส่วนร้อยละ 10 20 30 และ 40 โดยน้ำหนัก พบกลุ่มอีพ็อกซีโพลีเมอร์เจลที่หนาแน่นและต่อเนื่องในลักษณะเช่นเดียวกับตัวอย่างควบคุม (BP00) แต่จะมีลักษณะที่แตกต่างกันคือ อนุภาคขนาดเล็กที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาหรือไม่ได้รวมตัวเข้ากับโครงสร้างอีพ็อกซีโพลีเมอร์เจล ดังรูปที่ 9(ก) ขณะที่พื้นผิวของตัวอย่าง BP00 ปรากฏส่วนที่เป็นแก้วหรือผลึกที่ยังคงอยู่จากเถ้าลอยเดิมเมื่อแทนที่เถ้าลอยด้วยผงเส้นใยบะซอลต์จะปรากฏเส้นใยที่ทำปฏิกิริยาบางส่วนหรือที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยาให้แนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่เถ้าลอย ดังรูปที่ 9(ข) - (จ) แนวโน้มที่เกิดขึ้นนี้สอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังคัตที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณผงเส้นใยบะซอลต์เช่นเดียวกัน อาจเป็นไปได้ว่าผงเส้นใยบะซอลต์ที่อยู่ร่วมกับอีพ็อกซีโพลีเมอร์เจลช่วยเพิ่มความสามารถในการต้านทานแรงดึงของตัวอย่างที่ทำการทดสอบ อย่างไรก็ตาม อนุภาคที่ไม่ทำปฏิกิริยาเหล่านี้อาจเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ผลการทดสอบความสามารถรับแรงอัดของอีพ็อกซีโพลีเมอร์พอสต์ที่ใช้ผงเส้นใยบะซอลต์แทนที่เถ้าลอยในอัตราส่วนร้อยละ 30 และ 40 โดยน้ำหนัก ดังรูปที่ 6(ก) มีแนวโน้มลดลงทุกอายุการทดสอบ



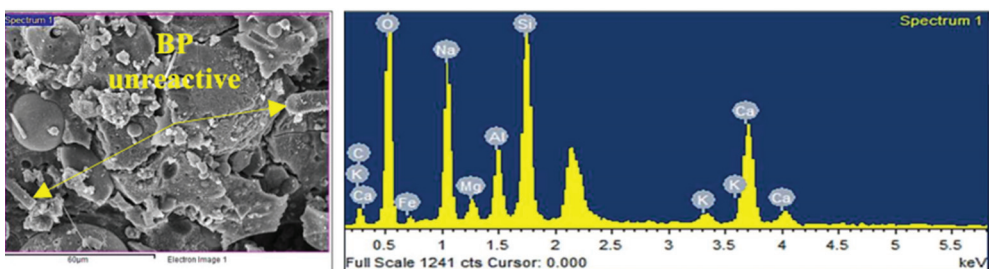
(ก) BP00



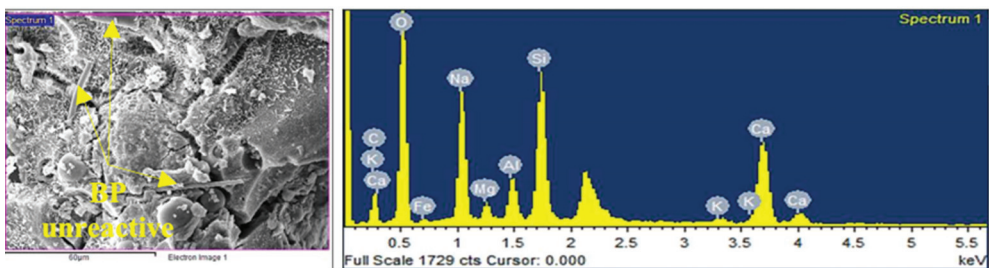
(ข) BP10



(ค) BP20



(ง) BP30



(จ) BP40

รูปที่ 9 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอยผสมผงเส้นใยบะซอลต์ที่อายุ 28 วัน

การวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วย Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) ของจีโอโพลิเมอร์พอสต์จากเถ้าลอยผสมผงเส้นใยหินบะซอลต์ที่อายุ 28 วัน ดังตารางที่ 4 อธิบายได้ว่า องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์พอสต์ที่ทำการทดสอบประกอบด้วย Carbon (C), Oxygen (O), Sodium (Na), Magnesium (Mg), Aluminum (Al), Silicon (Si) Calcium (Ca) และ Iron (Fe) ซึ่งบ่งชี้ถึงการก่อตัวของสารประกอบ C-S-H หรือ C-(A)-S-H และโซเดียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮดรอกไซด์ (N-A-S-H) [17] เมื่อพิจารณาอัตราส่วน Si/Al พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่เถ้าลอยด้วยผงเส้นใยบะซอลต์ ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วน Si/Al จึงทำให้กำลังอัดเพิ่มขึ้นเนื่องจากสารประกอบที่มีซิลิกาเป็นส่วนประกอบหลักจึงส่งเสริมการพัฒนาของเจลทำให้รูพรุนลดลง ส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาคเป็นเนื้อเดียวกันและหนาแน่นมากขึ้น [11] ผลวิเคราะห์นี้สนับสนุนผลการทดสอบกำลังอัดที่อายุ 28 วัน ของจีโอโพลิเมอร์พอสต์ที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่เถ้าลอยด้วยผงเส้นใยบะซอลต์ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาปริมาณแคลเซียมพบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณผงเส้นใยบะซอลต์เพิ่มขึ้นจึงสนับสนุนข้อสมมุติฐานที่อธิบายก่อนหน้านี้ว่า ผงเส้นใยบะซอลต์มีความเป็นอัลลูมิเนียมสูง ทำให้สามารถชะละลายแคลเซียมออกไซด์ออกมาทำปฏิกิริยาได้สูง การวิเคราะห์จึงตรวจพบการเชื่อมโยงของแคลเซียมที่เด่นชัดกว่าตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์พอสต์ที่ผลิตจากเถ้าลอยเพียงชนิดเดียว

ตารางที่ 4 องค์ประกอบทางเคมีของจีโอโพลิเมอร์พอสต์แข็งที่อายุ 28 วัน วิเคราะห์โดย EDS

Atomic%		Mixture				
Element	Ratio	BP00	BP10	BP20	BP30	BP40
Na		12.45	10.64	8.81	9.88	10.04
Mg		0.75	0.65	0.91	0.92	1.36
Al		2.69	2.40	2.51	2.60	2.67
Si		6.27	6.01	6.95	8.25	9.28
Ca		5.31	4.72	5.38	5.75	6.19
Fe		1.45	1.15	1.51	1.79	2.39
	Na/Al	4.63	4.43	3.51	3.80	3.76
	Si/Al	2.33	2.50	2.77	3.17	3.48
	Ca/Si	0.85	0.79	0.77	0.70	0.67
	Fe/Mg	1.93	1.77	1.66	1.95	1.76

สรุปและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของปริมาณการแทนที่เถ้าลอยแคลเซียมสูงด้วยผงเส้นใยบะซอลต์จากเศษฉนวนกันความร้อนต่อระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์พอสต์ ทาปริมาณการแทนที่เถ้าลอยด้วยผงเส้นใยบะซอลต์ที่เหมาะสมเพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลของจีโอโพลิเมอร์พอสต์และตรวจสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์พอสต์ สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. จีโอโพลิเมอร์พอสต์มีระยะเวลาก่อตัวต้นและก่อตัวปลายเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณการแทนที่เถ้าลอยด้วยผงเส้นใยบะซอลต์เพิ่มขึ้น เนื่องจากผงเส้นใยบะซอลต์มีปริมาณแคลเซียมน้อยกว่าทำให้ปริมาณแคลเซียมอิสระในกระบวนช่วงเริ่มต้นลดลงส่งผลให้การตกตะกอนของแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์และแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮดรอกไซด์ลดลง ทำให้จีโอโพลิเมอร์พอสต์ใช้เวลาในการก่อตัวเพิ่มมากขึ้น

2. กำลังอัดในทุกอายุการทดสอบของจีโอโพลิเมอร์พอสต์มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่เถ้าลอยด้วยผงเส้นใยบะซอลต์จนถึงอัตราส่วนการแทนที่ที่เหมาะสมจากนั้นกำลังอัดมีแนวโน้มลดลง การแทนที่เถ้าลอยด้วยผงเส้นใยบะซอลต์ในอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ให้ค่ากำลังอัดสูงสุดโดยที่อายุ 7 28 และ 90 วัน

มีค่าเป็น 32.0 53.6 และ 68.0 เมกะปาสคาล ตามลำดับ อย่างไรก็ตามการแทนที่เถ้าลอยด้วยผงเส้นใยบะซอลต์ช่วยเพิ่มกำลังดัดของจีโอโพลิเมอร์เฟสค์อย่างมีนัยสำคัญ โดยกำลังดัดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณการใช้ผงเส้นใยบะซอลต์มากขึ้น ด้วยสมบัติและลักษณะเฉพาะที่เป็นแท่งยาวจึงสามารถถ่ายโอนแรงดัดชะลอการเกิดรอยแตกและสามารถกระจายความเครียดที่เกิดขึ้นได้

3. ผลวิเคราะห์ที่โครงสร้างจุลภาคสามารถสนับสนุนการปรับปรุงสมบัติของจีโอโพลิเมอร์เฟสค์จากเถ้าลอยผสมผงเส้นใยบะซอลต์ได้จากตัวอย่างที่อายุ 28 วัน พบว่าการแทนที่เถ้าลอยด้วยผงเส้นใยบะซอลต์ในอัตราส่วนไม่เกินร้อยละ 20 โดยน้ำหนักช่วยทำให้เนื้อเจลของจีโอโพลิเมอร์เฟสค์มีการสร้างผลึกใหม่เพิ่มมากขึ้น โครงสร้างจึงมีความแน่นส่งผลต่อความสามารถในการรับแรงอัด เพราะผงเส้นใยบะซอลต์มีรูปแบบโครงสร้างเป็นอสัณฐานสูง การชะละลายและทำปฏิกิริยากับสารละลายต่างอัลคาไลทำให้เกิดการตกตะกอนของ C-S-H หรือ C-(A)-S-H อยู่ร่วมกับ N-A-S-H เมื่อแข็งตัวเกิดการพัฒนาคความแข็งแรงสูงกว่าจีโอโพลิเมอร์เฟสค์ที่ผลิตจากเถ้าลอยเพียงชนิดเดียว อย่างไรก็ตามการแทนที่เถ้าลอยด้วยผงเส้นใยบะซอลต์ในอัตราส่วนที่มากกว่าร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก มีแนวโน้มทำให้เกิดเส้นใยที่ไม่ทำปฏิกิริยาหรือเกิดปฏิกิริยาเพียงบางส่วนจากการใช้น้ำในระบบ อนุภาคเหล่านี้อาจมีส่วนทำให้จีโอโพลิเมอร์เฟสค์สูญเสียความแข็งแรง

4. จากผลการศึกษาที่ได้พบว่าสมบัติของจีโอโพลิเมอร์เฟสค์จากเถ้าลอยผสมผงเส้นใยบะซอลต์มีกำลังอัดและกำลังดัดมีแนวโน้มที่ดี ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุซ่อมแซม เช่น เฟสค์สำหรับงานเกร้าท์หรือเฟสค์สำหรับเทอรองรับแผ่นเหล็กหัวเสาและฐานเครื่องจักร เป็นต้น นอกจากนั้นยังเป็นฐานข้อมูลสำหรับพัฒนาต่อเป็นจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์หรือจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายมากขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากฝ่ายวิจัยและบัณฑิตศึกษา มหาวิทยาลัยขอนแก่น ขอขอบคุณศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน มหาวิทยาลัยขอนแก่น และห้องปฏิบัติการและเครื่องมือทดสอบ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตอุเทนถวาย ที่อำนวยความสะดวกสำหรับสถานที่และอุปกรณ์ในการทดสอบ

References

- [1] Davidovits, J. (1991). Geopolymers. **Journal of Thermal Analysis**. Vol. 37, No. 8, pp. 1633-1656. DOI: 10.1007/BF01912193
- [2] Chindaprasirt, P., Jaturapitakkul, C., Chalee, W., and Rattanasak, U. (2009). Comparative Study on the Characteristics of Fly Ash and Bottom Ash Geopolymers. **Waste Management**. Vol. 29, Issue 2, pp. 539-543. DOI: 10.1016/j.wasman.2008.06.023
- [3] Punurai, W., Kroehong, W., Saptamongkol, A., and Chindaprasirt, P. (2018). Mechanical Properties, Microstructure and Drying Shrinkage of Hybrid Fly Ash-basalt Fiber Geopolymer Paste. **Construction and Building Materials**. Vol. 186, pp. 62-70. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.07.115
- [4] American Society for Testing and Materials. (2019). **Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete**. ASTM C618-19. Annual Book of ASTM Standards.
- [5] Saptamongkol, A., Sata, V., Wongsas, A., Kroehong, W., Ekprasert, J., and Chindaprasirt, P. (2023). Hybrid Geopolymer Paste from High Calcium Fly Ash and Glass Wool: Mechanical, Microstructure, and Sulfuric Acid and Magnesium Sulfate Resistance Characteristics. **Journal of Building Engineering**. Vol. 76, 107245. DOI: 10.1016/j.jobbe.2023.107245

- [6] American Society for Testing and Materials. (2019). **Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle**. ASTM C191-19. Annual Book of ASTM Standards.
- [7] American Society for Testing and Materials. (2020). **Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (using 2-in. or [50 mm] cube specimens)**. ASTM C109/C109M-20b. Annual Book of ASTM Standards.
- [8] American Society for Testing and Materials. (2021). **Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars**. ASTM International. ASTM C348-21. Annual Book of ASTM Standards.
- [9] Chindaprasirt, P., De Silva, P., Sagoe-Crentsil, K., and Hanjitsuwan, S. (2012). Effect of SiO₂ and Al₂O₃ on the Setting and Hardening of High Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Systems. **Journal of Materials Science**. Vol. 47, No. 12, pp. 4876-4883. DOI: 10.1007/s10853-012-6353-y
- [10] Ziada, M., Erdem, S., Tammam, Y., Kara, S., and Lezcano, R. A. G. (2021). The Effect of Basalt Fiber on Mechanical, Microstructural, and High-Temperature Properties of Fly Ash-Based and Basalt Powder Waste-Filled Sustainable Geopolymer Mortar. **Sustainability**. Vol. 13, Issue 22, DOI: 10.3390/su132212610
- [11] Parveen, S. and Pham, T. M. (2020). Enhanced Properties of High-Silica Rice Husk Ash-Based Geopolymer Paste by Incorporating Basalt Fibers. **Construction and Building Materials**. Vol. 245, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118422
- [12] Lee, W. K. W. and Van Deventer, J. S. J. (2002). The Effects of Inorganic Salt Contamination on the Strength and Durability of Geopolymers. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**. Vol. 211, Issue 2-3, pp. 115-126. DOI: 10.1016/S0927-7757(02)00239-X
- [13] Yaseri, S., Hajiaghahi, G., Mohammadi, F., Mahdikhani, M., and Farokhzad, R. (2017). The Role of Synthesis Parameters on the Workability, Setting and Strength Properties of Binary Binder Based Geopolymer Paste. **Construction and Building Materials**. Vol. 157, pp. 534-545. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.09.102
- [14] Luo, Y., Li, S. H., Klima, K. M., Brouwers, H. J. H., and Yu, Q. (2022). Degradation Mechanism of Hybrid Fly Ash/slag Based Geopolymers Exposed to Elevated Temperatures. **Cement and Concrete Research**. Vol. 151, 106649. DOI: 10.1016/j.cemconres.2021.106649
- [15] Veerasingam, S. and Venkatachalapathy, R. (2014). Estimation of Carbonate Concentration and Characterization of Marine Sediments by Fourier Transform Infrared Spectroscopy. **Infrared Physics & Technology**. Vol. 66, pp. 136-140. DOI: 10.1016/j.infrared.2014.06.005
- [16] Yang, Y., Wang, B., Yuan, Q., Huang, D., and Peng, H. (2023). Characterization, Factors, and Fractal Dimension of Pore Structure of Fly Ash-Based Geopolymers. **Journal of Materials Research and Technology**. Vol. 26, pp. 3395-3407. DOI: 10.1016/j.jmrt.2023.08.157
- [17] Somna, K., Jaturapitakkul, C., Kajitvichyanukul, P., and Chindaprasirt, P. (2011). NaOH-activated Ground Fly Ash Geopolymer Cured at Ambient Temperature. **Fuel**. Vol. 90, Issue 6, pp. 2118-2124. DOI: 10.1016/j.fuel.2011.01.018

การศึกษาผลกระทบของโมเดลการจัดสรรเวลา 8+8+8 ต่อประสิทธิภาพการทำงานและคุณภาพชีวิต: กรณีศึกษาเปรียบเทียบระหว่างประเทศ

The Impact of the 8+8+8 Time Allocation Model on Work Productivity and Quality of Life: A Comparative International Case Study

ชลธิศ เสือนุ่ม*

Cholatis Suanoom*

Received: July 27, 2024; Revised: September 4, 2024; Accepted: September 4, 2024

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มุ่งวิเคราะห์ผลกระทบของโมเดลการจัดสรรเวลา 8+8+8 (8 ชั่วโมงสำหรับการทำงาน การนอน และการใช้ชีวิต) ต่อประสิทธิภาพการทำงานและคุณภาพชีวิต โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างประเทศ งานวิจัยนี้ใช้วิธีการวิเคราะห์เชิงปริมาณและคุณภาพ ผ่านการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และมีการพิสูจน์ด้วยกระบวนการทางคณิตศาสตร์ ผลการศึกษาพบว่า การจัดสรรเวลาตามโมเดล 8+8+8 มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับประสิทธิภาพการทำงานและคุณภาพชีวิตในหลายประเทศ อย่างไรก็ตาม ความแตกต่างทางวัฒนธรรมและเศรษฐกิจมีผลต่อการนำโมเดลไปปรับใช้ การศึกษานี้แนะนำให้เสนอแนะสำหรับการปรับใช้โมเดลให้เหมาะสมกับบริบทของแต่ละประเทศ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานและยกระดับคุณภาพชีวิตของประชากร

คำสำคัญ : โมเดลการจัดสรรเวลา 8+8+8; ประสิทธิภาพการทำงาน; คุณภาพชีวิต; การศึกษาเปรียบเทียบระหว่างประเทศ

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร
Faculty Science and Technology, Kamphaeng Phet Rajabhat University

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

Abstract

This study aims to analyze the impact of the 8+8+8 time allocation model (8 hours each for work, sleep, and life) on work efficiency and quality of life through a cross-country comparative study. The research employs both quantitative and qualitative methods, including mathematical modeling and it is proven through mathematical processes. The findings indicate that the 8+8+8 time allocation model positively correlates with work efficiency and quality of life in many countries. However, cultural and economic differences affect the model's implementation. This study presents recommendations for adapting the model to suit each country's context, aiming to enhance work efficiency and improve the population's quality of life.

Keywords: 8+8+8 Time Allocation Model; Work Efficiency; Quality of Life; Cross-Country Comparative Study

บทนำและความรู้พื้นฐาน

การจัดแบ่งเวลาทำงาน การนอนหลับ และเวลาส่วนตัวในแต่ละวันอย่างสมดุล เป็นแนวคิดที่เชื่อมโยงกับ Robert Owen นักสังคมนิยมและนักการเมืองจากศตวรรษที่ 19 ผู้ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการปรับปรุงสภาพการทำงานของคนงานในช่วงการปฏิวัติอุตสาหกรรม Owen, R. [1] (รูปที่ 1) ได้เสนอแนวคิดกฎ "8-8-8" ซึ่งแบ่งเวลาในแต่ละวันออกเป็น 8 ชั่วโมงสำหรับการทำงาน 8 ชั่วโมงสำหรับการนอนหลับ และ 8 ชั่วโมงสำหรับการใช้ชีวิตส่วนตัว แนวคิดนี้ถูกเผยแพร่ในหนังสือ A New View of Society ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1812 (BBC News) [2] ภาพในลิงก์ [3] แสดงกฎ "8+8+8" ซึ่งสะท้อนถึงการแบ่งเวลาที่สมดุลสำหรับการใช้ชีวิตประจำวันอย่างเท่าเทียม



รูปที่ 1 Robert Owen Started Writing A New View of Society in 1812 [2]

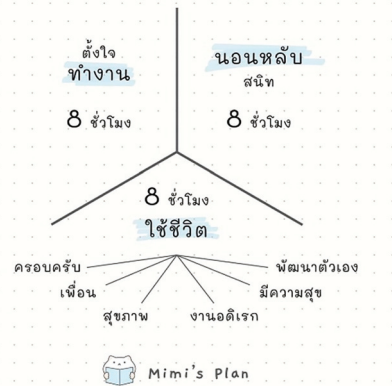
จากรูปที่ 2 แสดงกฎ "8+8+8" ซึ่งเป็นแนวคิดในการจัดสรรเวลา 24 ชั่วโมงในแต่ละวันอย่างสมดุล โดยแบ่งเป็น

8 ชั่วโมงสำหรับการทำงาน (ตั้งใจทำงาน)

8 ชั่วโมงสำหรับการนอนหลับ (สนิท)

8 ชั่วโมงสำหรับการใช้ชีวิต ซึ่งแบ่งย่อยเป็น: ครอบครัวเพื่อนสุขภาพงานอดิเรกมีความสุขพัฒนาตัวเอง

The 8+8+8 Rule



รูปที่ 2 The 8+8+8 Rule [3]

“Owen, R. [1] ได้นำเสนอแนวคิดนี้”

แนวคิดนี้เสนอวิธีการจัดสรรเวลาที่สมดุลระหว่างการทำงาน การพักผ่อน และการใช้ชีวิตส่วนตัว เพื่อส่งเสริมคุณภาพชีวิตที่ดีและได้รับการนำไปใช้ในหลายประเทศทั่วโลก เช่น สหราชอาณาจักร สหรัฐอเมริกา และออสเตรเลีย เพื่อสร้างสมดุลในการทำงานและชีวิตส่วนตัว การศึกษาเกี่ยวกับวิธีการจัดสรรเวลาที่สมดุลระหว่างการทำงาน การพักผ่อน และการใช้ชีวิตส่วนตัว การนำแนวคิด 8+8+8 ไปเทียบกับเหตุการณ์จริงสามารถพิจารณาได้จากหลายประเทศที่มีนโยบายหรือวัฒนธรรมการทำงานที่สอดคล้องกับแนวคิดนี้ นอกจากนี้ยังมีตัวอย่างการวางแผนเวลารูปแบบอื่น ๆ ที่น่าสนใจ เช่น เทคนิค Pomodoro, กฎ 52/17, สัปดาห์ทำงาน 4 วัน, ตารางเวลาแบบยืดหยุ่น (Flextime), และการทำงานระยะไกล (Remote Work) แต่ละวิธีมีข้อดีและข้อจำกัดต่างกัน การเลือกใช้ขึ้นอยู่กับลักษณะงาน วัฒนธรรมองค์กร และความต้องการส่วนบุคคล เช่น [4] - [11]

1. สวีเดน [4]
 - มีการทดลองใช้วันทำงาน 6 ชั่วโมงในบางองค์กร
 - เน้นสมดุลชีวิตการทำงาน (Work-Life Balance) อย่างมาก
2. ฝรั่งเศส [5]
 - มีกฎหมายกำหนดชั่วโมงทำงานไม่เกิน 35 ชั่วโมงต่อสัปดาห์
 - ส่งเสริมการใช้เวลากับครอบครัวและการพักผ่อน
3. เยอรมนี [6]
 - มีค่าเฉลี่ยชั่วโมงทำงานต่ำกว่าหลายประเทศในยุโรป
 - เน้นประสิทธิภาพในการทำงานมากกว่าจำนวนชั่วโมง
4. ญี่ปุ่น [7]
 - แม้จะมีชื่อเสียงเรื่องการทำงานหนัก แต่ปัจจุบันมีความพยายามในการปรับสมดุลชีวิต
 - มีแคมเปญ "Premium Friday" ให้พนักงานเลิกงานเร็วในวันศุกร์สุดท้ายของเดือน
5. นิวซีแลนด์ [8]
 - ทดลองใช้สัปดาห์ทำงาน 4 วันในบางบริษัท
 - เน้นคุณภาพชีวิตและความสุขของประชาชน
6. เนเธอร์แลนด์ [9]
 - มีสัดส่วนการทำงานพาร์ทไทม์สูง
 - ส่งเสริมความยืดหยุ่นในการทำงาน

7. เคนมาร์ก [10]

- มีชั่วโมงทำงานเฉลี่ยต่ำ แต่ผลิตภาพสูง
- เน้นความสุขและคุณภาพชีวิตของประชาชน

8. สหราชอาณาจักร สหรัฐอเมริกา และออสเตรเลีย [11]

- สร้างสมดุลในการทำงานและชีวิตส่วนตัว

ประเทศเหล่านี้แสดงให้เห็นว่าแนวคิด 8+8+8 สามารถนำไปปรับใช้ได้จริง แม้อาจไม่ได้เป็นสัดส่วนที่ตายตัว 8 ชั่วโมงพอดี แต่หลักการของการสร้างสมดุลระหว่างการทำงาน การพักผ่อน และการใช้ชีวิตส่วนตัวนั้นสอดคล้องกับนโยบายและวัฒนธรรมของหลายประเทศที่มีคุณภาพชีวิตสูง อย่างไรก็ตาม การนำไปใช้จริงต้องคำนึงถึงบริบททางสังคม เศรษฐกิจ และวัฒนธรรมของแต่ละประเทศด้วยซึ่งยังมีตัวอย่างการวางแผนเวลา รูปแบบโมเดลอื่น ๆ ที่น่าสนใจ แต่ละวิธีมีข้อดีและข้อจำกัดต่างกัน การเลือกใช้ขึ้นอยู่กับลักษณะงาน วัฒนธรรมองค์กร และความต้องการส่วนบุคคล เช่น [12] - [20]

1. เทคนิค Pomodoro [12] - [13]

- ทำงาน 25 นาที, พัก 5 นาที
- ทำซ้ำ 4 รอบ แล้วพักยาว 15 - 30 นาที

- เทคนิค Pomodoro ได้รับความนิยมและนำไปใช้ในหลายประเทศทั่วโลก โดยเฉพาะในประเทศที่มีการทำงานหนักและต้องการการเพิ่มประสิทธิภาพ เช่น สหรัฐอเมริกา ญี่ปุ่น และเยอรมนี

2. กฎ 52/17 [14] - [15]

- ทำงาน 52 นาที, พัก 17 นาที

- กฎ 52/17 ได้รับการนำไปใช้ในหลายองค์กรในสหรัฐอเมริกาและยุโรป โดยเฉพาะในบริษัทเทคโนโลยีและสตาร์ทอัพที่เน้นการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงาน

3. สัปดาห์ทำงาน 4 วัน [16]

- ทำงาน 4 วัน/สัปดาห์, หยุด 3 วัน

- ประเทศไอซ์แลนด์ได้ทดลองใช้สัปดาห์ทำงาน 4 วัน และพบว่าไม่มีผลดีต่อความสุขและประสิทธิภาพการทำงานของพนักงาน

- นอกจากนี้ยังมีบริษัทในนิวซีแลนด์และญี่ปุ่นที่นำแนวคิดนี้ไปใช้และรายงานผลดีเช่นกัน

4. ตารางเวลาแบบยืดหยุ่น (Flextime) [17]

- กำหนดช่วงเวลาหลักที่ต้องทำงาน
- ให้อิสระในการเลือกเวลาเริ่มและเลิกงาน

- ประเทศเยอรมนีและสวีเดนเป็นตัวอย่างที่ดีของการนำตารางเวลาแบบยืดหยุ่นมาใช้ โดยพบว่าช่วยเพิ่มความพึงพอใจในงานและความสมดุลระหว่างงานและชีวิตส่วนตัว

5. การทำงานระยะไกล (Remote Work) [18] - [19]

- ทำงานจากที่ไหนก็ได้, เน้นที่ผลลัพธ์มากกว่าเวลา

- การทำงานระยะไกลได้รับการนำไปใช้อย่างแพร่หลายในช่วงการแพร่ระบาดของ COVID-19 ทั่วโลก โดยเฉพาะในสหรัฐอเมริกา แคนาดา และสหราชอาณาจักร

6. กฎ "8+8+8" ซึ่งเป็นแนวคิดในการจัดสรรเวลา 24 ชั่วโมงในแต่ละวันอย่างสมดุล [1], [20]

- การทำงาน การพักผ่อน และการใช้ชีวิตส่วนตัว

- กฎ "8+8+8" มีต้นกำเนิดมาจากการเคลื่อนไหวของแรงงานในศตวรรษที่ 19 และได้รับการนำไปใช้ในหลายประเทศทั่วโลก เช่น สหราชอาณาจักร สหรัฐอเมริกา และออสเตรเลีย เพื่อสร้างสมดุลในการทำงานและชีวิตส่วนตัวและมีผู้เขียนที่สนใจศึกษา กฎ "8+8+8" หลายท่าน เช่น [21] - [28]

การศึกษานี้มุ่งวิเคราะห์ผลกระทบของโมเดลการจัดสรรเวลา 8+8+8 (8 ชั่วโมงสำหรับการทำงาน การนอน และการใช้ชีวิต) ต่อประสิทธิภาพการทำงานและคุณภาพชีวิต โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างประเทศ

งานวิจัยนี้ใช้วิธีการวิเคราะห์เชิงปริมาณและคุณภาพ ผ่านการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และมีการพิสูจน์ด้วยกระบวนการทางคณิตศาสตร์ ผลการศึกษาพบว่า การจัดสรรเวลาตามโมเดล 8+8+8 มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับประสิทธิภาพการทำงานและคุณภาพชีวิตในหลายประเทศ อย่างไรก็ตาม ความแตกต่างทางวัฒนธรรมและเศรษฐกิจมีผลต่อการนำโมเดลไปปรับใช้ การศึกษานี้แนะนำเสนอข้อเสนอแนะสำหรับการปรับใช้โมเดลให้เหมาะสมกับบริบทของแต่ละประเทศ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานและยกระดับคุณภาพชีวิตของประชากร

ทฤษฎีบทพื้นฐาน

ทฤษฎีความน่าจะเป็นรวม (Law of Total Probability) เป็นหลักการในทฤษฎีความน่าจะเป็นที่ใช้ในการคำนวณความน่าจะเป็นของเหตุการณ์ใด ๆ โดยอาศัยการแยกความน่าจะเป็นออกเป็นกรณีย่อย ๆ ที่ไม่ทับซ้อนกันและครอบคลุมพื้นที่ตัวอย่างทั้งหมด

ทฤษฎีบท 1.1 [29] ถ้า B_1, B_2, \dots, B_n เป็นเหตุการณ์ที่แบ่งพื้นที่ตัวอย่าง S และ A เป็นเหตุการณ์ใด ๆ ที่เกี่ยวข้องกับ S ความน่าจะเป็นของเหตุการณ์ A สามารถคำนวณได้โดยใช้สูตร

$$P(A) = \sum_{i=1}^n P(A \cap B_i) = \sum_{i=1}^n P(A|B_i)P(B_i)$$

ซึ่งในที่นี้

$P(A)$ คือ ความน่าจะเป็นของเหตุการณ์ A

$P(A \cap B_i)$ คือ ความน่าจะเป็นที่ทั้งเหตุการณ์ A และ B_i จะเกิดขึ้นพร้อมกัน

$P(A|B_i)$ คือ ความน่าจะเป็นที่เหตุการณ์ A จะเกิดขึ้นภายใต้เงื่อนไขที่ B_i เกิดขึ้นแล้ว

$P(B_i)$ คือ ความน่าจะเป็นที่เหตุการณ์ B_i ที่เกิดขึ้น

ผลการศึกษา

ในบทนี้เราสร้างโมเดลการจัดสรรเวลา 8+8+8 ต่อประสิทธิภาพการทำงานและคุณภาพชีวิตเพื่ออธิบายกฎ 8+8+8 ในรูปแบบคณิตศาสตร์และได้ให้บทพิสูจน์ไว้แล้วดังทฤษฎีบทต่อไปนี้

ทฤษฎีบท 2.1 (แบบจำลองทางคณิตศาสตร์) มีขั้นตอน 5 ขั้นตอน

ขั้นที่ i กำหนดให้

T = เวลาทั้งหมดในหนึ่งวัน (24 ชั่วโมง)

W = เวลาทำงาน

S = เวลานอนหลับ

L = เวลาใช้ชีวิต

ขั้นที่ ii สมการหลัก $T = W + S + L$ นั่นคือ $24 = 8 + 8 + 8$

ขั้นที่ iii เงื่อนไข $W = S = L = 8$

ขั้นที่ iv สำหรับเวลาใช้ชีวิต (L) เราสามารถแบ่งย่อยได้เป็น $L = F + Fr + H + Ho + Ha + P$

โดยที่

F = เวลาสำหรับครอบครัว

Fr = เวลาสำหรับเพื่อน

H = เวลาสำหรับสุขภาพ

Ho = เวลาสำหรับงานอดิเรก

Ha = เวลาสำหรับความสุข

P = เวลาสำหรับพัฒนาตัวเอง

ขั้นที่ v ดังนั้น สมการสมบูรณ์จะเป็น $24 = 8 + 8 + (F + Fr + H + Ho + Ha + P)$

บทพิสูจน์

การพิสูจน์ตัวแบบนี้ผ่านกระบวนการทางคณิตศาสตร์สามารถทำได้โดยใช้หลักการพื้นฐานของพีชคณิตและทฤษฎีเซต ทั้งหมด 10 ขั้นตอน ดังนี้

1. กำหนดเซตของเวลาในหนึ่งวัน $T = \{t \mid 0 \leq t \leq 24\}$, โดย t คือ จำนวนชั่วโมง
2. แบ่งเซต T เป็นเซตย่อย 3 เซต W (Work), S (Sleep), L (Life) โดยที่ $W \cup S \cup L = T$
3. พิสูจน์ว่า $W \cap S = W \cap L = S \cap L = \phi$ (เซตว่าง) เพื่อแสดงว่าไม่มีเวลาที่ซ้ำซ้อนกัน
4. พิสูจน์ว่า $|W| = |S| = |L| = 8$ โดยใช้หลักการของฟังก์ชันหนึ่งต่อหนึ่งและทั่วถึง (Bijection) ระหว่างแต่ละเซตกับเซตของจำนวนเต็ม $\{1, 2, \dots, 8\}$
5. ใช้หลักการบวกของเซต $|T| = 24 = 8 + 8 + 8 = |W| + |S| + |L|$
6. สำหรับเซต L สามารถแบ่งย่อยเป็น $L = F \cup Fr \cup H \cup Ho \cup Ha \cup P \neq \phi$ โดยที่ F, Fr, H, Ho, Ha, P เป็นเซตย่อยที่ไม่จำเป็นต้องแยกจากกันโดยสิ้นเชิง (อาจมีส่วนที่ซ้อนทับกันได้)
7. พิสูจน์ความสมมูล: ใช้หลักการของความเท่ากัน (Equality) เพื่อแสดงว่า $|W| = |S| = |L| = (1/3) |T|$
8. ใช้ทฤษฎีความน่าจะเป็นเพื่อวิเคราะห์การกระจายของเวลาในเซต L
9. สร้างฟังก์ชันเชิงเส้น $f(t)$ เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในแต่ละกิจกรรมและผลลัพธ์ที่ได้ (เช่น ประสิทธิภาพ ความสุข)
10. ใช้แคลคูลัสเพื่อหาจุดที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) ของฟังก์ชัน $f(t)$ ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด

ตั้งสมมติฐาน 1. เรากำหนดเซตของเวลาในหนึ่งวัน $T = \{t \mid 0 \leq t \leq 24\}$, โดย t คือจำนวนชั่วโมง

ตั้งสมมติฐาน 2. แบ่งเซต T เป็นเซตย่อย 3 เซต W (Work), S (Sleep), L (Life) โดยที่ $W \cup S \cup L = T$

บทพิสูจน์ข้อ 3. เราจะแสดงว่า $W \cap S = W \cap L = S \cap L = \phi$ (เซตว่าง) เพื่อแสดงว่าไม่มีเวลาที่ซ้ำซ้อนกัน

กำหนดให้ W, S และ L เป็นเซตย่อยของ T ซึ่งแทนเวลาทำงาน เวลานอน และเวลาใช้ชีวิตตามลำดับ เราจะใช้วิธีการพิสูจน์แบบอ้างอิงข้อขัดแย้ง (Proof by Contradiction) สำหรับแต่ละกรณี

กรณีที่ 1: พิสูจน์ว่า $W \cap S = \phi$ สมมติว่า $W \cap S \neq \phi$

นั่นหมายความว่า มีอย่างน้อยหนึ่งสมาชิก x ที่อยู่ใน W และ S ดังนั้น $x \in W$ และ $x \in S$ แต่เป็นไปได้ เพราะ x จะต้องเป็นทั้งเวลาทำงานและเวลานอนในเวลาเดียวกันซึ่งขัดแย้งกับนิยามของ W และ S ที่ไม่มีสมาชิกร่วมกัน ดังนั้น ข้อสมมติเป็นไปได้ และ $W \cap S = \phi$

กรณีที่ 2: พิสูจน์ว่า $W \cap L = \phi$ สมมติว่า $W \cap L \neq \phi$

นั่นหมายความว่า มีอย่างน้อยหนึ่งสมาชิก y ที่อยู่ใน W และ L ดังนั้น $y \in W$ และ $y \in L$ แต่เป็นไปได้ เพราะ y จะต้องเป็นทั้งเวลาทำงานและเวลาใช้ชีวิตในเวลาเดียวกัน ซึ่งขัดแย้งกับนิยามของ W และ L ที่แยกจากกัน ดังนั้น ข้อสมมติเป็นไปได้ และ $W \cap L = \phi$

กรณีที่ 3: พิสูจน์ว่า $S \cap L = \phi$ สมมติว่า $S \cap L \neq \phi$

นั่นหมายความว่า มีอย่างน้อยหนึ่งสมาชิก z ที่อยู่ใน S และ L ดังนั้น $z \in S$ และ $z \in L$ แต่เป็นไปได้ เพราะ z จะต้องเป็นทั้งเวลานอนและเวลาใช้ชีวิตในเวลาเดียวกัน ซึ่งขัดแย้งกับนิยามของ S และ L ที่แยกจากกัน ดังนั้น ข้อสมมติเป็นไปได้ และ $S \cap L = \phi$

ดังนั้นสรุปได้ว่า เราได้พิสูจน์แล้วว่า $W \cap S = W \cap L = S \cap L = \phi$ ซึ่งแสดงว่าไม่มีเวลาที่ซ้ำซ้อนกันระหว่างเวลาทำงาน เวลานอน และเวลาใช้ชีวิต

หมายเหตุ* การพิสูจน์นี้อยู่บนพื้นฐานของแบบจำลองที่กำหนดให้ W, S และ L เป็นเซตที่แยกจากกันอย่างชัดเจน ในความเป็นจริง อาจมีกรณีที่กิจกรรมซ้อนทับกันได้ เช่น การทำงานที่บ้านอาจถือเป็นทั้งเวลาทำงานและเวลาใช้ชีวิตได้

บทพิสูจน์ข้อ 4. จะพิสูจน์ว่า $|W| = |S| = |L| = 8$ โดยใช้หลักการของฟังก์ชันหนึ่งต่อหนึ่งและทั่วถึง (Bijection) ระหว่างแต่ละเซตกับเซตของจำนวนเต็ม $\{1, 2, \dots, 8\}$

กำหนดให้เซต $A = \{1, 2, \dots, 8\}$ เราจะสร้างฟังก์ชันหนึ่งต่อหนึ่งและทั่วถึงจาก A ไปยัง W, S และ L แยกกันสำหรับเซต W (เวลาทำงาน)

กำหนดฟังก์ชัน $f: A \rightarrow W$ โดย

$$f(1) = \text{เวลาทำงานชั่วโมงที่ 1}$$

$$f(2) = \text{เวลาทำงานชั่วโมงที่ 2}$$

\vdots

$$f(8) = \text{เวลาทำงานชั่วโมงที่ 8}$$

ต่อไปพิสูจน์ว่า f เป็นฟังก์ชันหนึ่งต่อหนึ่งและทั่วถึง

f เป็น Injective (one-to-one): ถ้า $x \neq y$ แล้ว $f(x) \neq f(y)$ เพราะแต่ละชั่วโมงทำงานไม่ซ้ำกัน

f เป็น Surjective (onto): ทุก $w \in W$ มี $a \in A$ ที่ทำให้ $f(a) = w$

ดังนั้น f เป็น Bijection เนื่องจาก f เป็น Bijection จาก A ไป W จึงได้ว่า $|W| = |A| = 8$

สำหรับเซต S (เวลานอน) เราจะกำหนดฟังก์ชัน $g: A \rightarrow S$ โดย

$$g(1) = \text{เวลานอนชั่วโมงที่ 1}$$

$$g(2) = \text{เวลานอนชั่วโมงที่ 2}$$

\vdots

$$g(8) = \text{เวลานอนชั่วโมงที่ 8}$$

ต่อไปจะพิสูจน์ว่า g เป็นฟังก์ชันหนึ่งต่อหนึ่งและทั่วถึงได้ในทำนองเดียวกับ f ดังนั้น $|S| = |A| = 8$

สำหรับเซต L (เวลาใช้ชีวิต) กำหนดฟังก์ชัน $h: A \rightarrow L$ โดย

$$h(1) = \text{เวลาใช้ชีวิตชั่วโมงที่ 1}$$

$$h(2) = \text{เวลาใช้ชีวิตชั่วโมงที่ 2}$$

\vdots

$$h(8) = \text{เวลาใช้ชีวิตชั่วโมงที่ 8}$$

พิสูจน์ว่า h เป็นฟังก์ชันหนึ่งต่อหนึ่งและทั่วถึงได้ในทำนองเดียวกับ f และ g ดังนั้น $|L| = |A| = 8$

สรุปเราได้พิสูจน์แล้วว่า $|W| = |S| = |L| = |A| = 8$ โดยการสร้างฟังก์ชันหนึ่งต่อหนึ่งและทั่วถึงระหว่างแต่ละเซตกับเซต $A = \{1, 2, \dots, 8\}$

หมายเหตุ* การพิสูจน์นี้อยู่บนสมมติฐานว่าแต่ละกิจกรรม (ทำงาน นอน ใช้ชีวิต) ใช้เวลาพอดี 8 ชั่วโมง ในความเป็นจริง อาจมีความยืดหยุ่นมากกว่านี้

บทพิสูจน์ข้อ 5. ใช้หลักการบวกของเซตเพื่อแสดงว่า $|T| = 24 = 8 + 8 + 8 = |W| + |S| + |L|$ เรารู้จากข้อก่อนหน้าว่า $|W| = |S| = |L| = 8$ จากทฤษฎีเซต เรารู้ว่าถ้าเซต A, B และ C เป็นเซตที่แยกจากกัน (Disjoint Sets) แล้วจะได้สูตรว่า $|A \cup B \cup C| = |A| + |B| + |C|$ ในกรณีนี้ $T = W \cup S \cup L$ และเราได้พิสูจน์แล้วว่า W, S และ L เป็นเซตที่แยกจากกัน ดังนั้น $24 = |T| = |W \cup S \cup L| = |W| + |S| + |L| = 8 + 8 + 8$ ซึ่งสอดคล้องกับนิยามเริ่มต้นที่ว่า T คือเวลาทั้งหมดในหนึ่งวัน (24 ชั่วโมง)

บทพิสูจน์ข้อ 6. สำหรับเซต L สามารถแบ่งย่อยเป็น $L = F \cup Fr \cup H \cup Ho \cup Ha \cup P \neq \emptyset$ โดยที่ F, Fr, H, Ho, Ha, P เป็นเซตย่อยที่ไม่จำเป็นต้องแยกจากกันโดยสิ้นเชิง (อาจมีส่วนที่ซ้อนทับกันได้) กำหนดให้ L เป็นเซตของเวลาใช้ชีวิต และ F, Fr, H, Ho, Ha, P เป็นเซตย่อยที่แทนเวลาสำหรับครอบครัว เพื่อน สุขภาพ

งานอดิเรก ความสุข และการพัฒนาตัวเองตามลำดับเราต้องพิสูจน์ว่า $L \subseteq (F \cup Fr \cup H \cup Ho \cup Ha \cup P)$ และ $(F \cup Fr \cup H \cup Ho \cup Ha \cup P) \subseteq L$

(\subseteq) ให้ $x \in L$ ตามนิยาม x ต้องอยู่ในอย่างน้อยหนึ่งเซตย่อย ดังนั้น $x \in (F \cup Fr \cup H \cup Ho \cup Ha \cup P)$

(\supseteq) ให้ $y \in (F \cup Fr \cup H \cup Ho \cup Ha \cup P)$ นั้นหมายความว่า y อยู่ในอย่างน้อยหนึ่งเซตย่อยตามนิยาม ทุกเซตย่อยเป็นส่วนหนึ่งของ L ดังนั้น $y \in L$

เราสรุปได้ว่า $L = F \cup Fr \cup H \cup Ho \cup Ha \cup P$

การวิเคราะห์การซ้อนทับให้ $I = \{F, Fr, H, Ho, Ha, P\}$ และ

$$|L| = \left| \bigcup_{\{X \in I\}} X \right| = \sum_{\{X \subseteq I, X \neq \emptyset\}} (-1)^{(|X|-1)} |\bigcap X|$$

เพิ่มเติม

1. $|L|$ คือ จำนวนสมาชิกทั้งหมดในเซต L
2. $\bigcup_{\{X \in I\}} X$ คือ การรวมสมาชิกทั้งหมดจากเซต I
3. $\sum_{\{X \subseteq I, X \neq \emptyset\}}$ คือ การรวมผลรวมจากเซตย่อยทั้งหมดของ I ที่ไม่ใช่เซตว่าง
4. $(-1)^{(|X|-1)}$ คือ สัญลักษณ์นี้ใช้เพื่อปรับสัญญาณบวกหรือลบในการคำนวณตามจำนวนเซตย่อยที่ใช้ในการซ้อนทับ
5. $|\bigcap X|$ คือ จำนวนสมาชิกที่เป็นการร่วมกันของเซตย่อยทั้งหมดใน X

สมการนี้แสดงว่าขนาดของ L เท่ากับผลรวมของขนาดของทุกการตัดกันที่เป็นไปได้ของเซตย่อย โดยคูณด้วย 1 หรือ -1 ตามจำนวนเซตที่ตัดกัน

เนื่องจากเซตย่อยอาจซ้อนทับกัน เราไม่สามารถกำหนดค่าแน่นอนให้กับแต่ละเซตย่อยได้ แต่เราสามารถสรุปได้ว่า $|L| \leq |F| + |Fr| + |H| + |Ho| + |Ha| + |P|$ การพิสูจน์นี้แสดงให้เห็นว่าโมเดลนี้มีความยืดหยุ่นและสามารถอธิบายความซับซ้อนของการใช้เวลาในชีวิตจริงได้ดี โดยยอมให้มีการซ้อนทับของกิจกรรมต่างๆ

บทพิสูจน์ข้อ 7. จะพิสูจน์ความสมมูลดังนี้ $|W| = |S| = |L| = 1/3 |T|$ การวิเคราะห์เราทราบว่า $T = W \cup S \cup L$ และ W, S, L เป็นเซตที่แยกจากกันจากหลักการบวกของเซต $|T| = |W| + |S| + |L|$ เราได้จากข้อ 5. ก่อนหน้านี้ว่า $|W| = |S| = |L| = 8$ แทนค่าในสมการ $|T| = 8 + 8 + 8 = 24$ ดังนั้น $|W| = |S| = |L| = 8 = 24/3 = |T|/3 = 1/3 |T|$

บทพิสูจน์ข้อ 8. ใช้ทฤษฎีความน่าจะเป็นเพื่อวิเคราะห์การกระจายของเวลาในเซต L กำหนดให้ $L = \{F, Fr, H, Ho, Ha, P\}$ ให้ $P(X)$ เป็นความน่าจะเป็นที่เวลาหนึ่งหน่วยจะถูกใช้ในกิจกรรม X เนื่องจากกิจกรรมอาจซ้อนทับกัน เราใช้กฎของความน่าจะเป็นรวมตามทฤษฎีบท 1.1

$$P(L) = P(F \cup Fr \cup H \cup Ho \cup Ha \cup P) = \sum P(X) - \sum P(X \cap Y) + \sum P(X \cap Y \cap Z) - \dots + (-1)^{(n-1)} P(F \cap Fr \cap H \cap Ho \cap Ha \cap P)$$

โดยที่ X, Y, Z เป็นสมาชิกของ L และ $n = |L| = 6$ สำหรับแต่ละกิจกรรม X ใน L : $P(X) = |X| / |L|$ ความน่าจะเป็นของการซ้อนทับ $P(X \cap Y) = |X \cap Y| / |L|$

บทพิสูจน์ข้อ 9. กำหนดฟังก์ชัน $f(t) = a_1 t_1 + a_2 t_2 + a_3 t_3 + a_4 t_4 + a_5 t_5 + a_6 t_6$

โดยที่ $t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6$ แทนเวลาที่ใช้ใน F, Fr, H, Ho, Ha, P ตามลำดับ

$a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$ เป็นค่าสัมประสิทธิ์ที่แสดงถึงน้ำหนักหรือความสำคัญของแต่ละกิจกรรม

เงื่อนไข

$$9.1) \sum t_i = |L| = 8 \text{ (รวมเวลาทั้งหมดต้องเท่ากับ 8 ชั่วโมง)}$$

$$9.2) t_i \geq 0 \text{ สำหรับทุก } i \text{ (เวลาต้องไม่ติดลบ)}$$

การทฤษฎีข้อ 10. ใช้แคลคูลัสเพื่อหาจุดที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) ของฟังก์ชัน $f(t)$
การหาจุดที่เหมาะสมที่สุด

10.1) ใช้วิธี Lagrange Multipliers

$$L(t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6, \lambda) = f(t) - \lambda(t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6 - 8)$$

10.2) ทาอนุพันธ์ย่อยและตั้งให้เท่ากับ 0

$$\partial L / \partial t_i = a_i - \lambda = 0 \text{ สำหรับทุก } i$$

$$\partial L / \partial \lambda = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6 - 8 = 0$$

10.3) จากสมการ $a_i - \lambda = 0$ เราได้ $a_i = \lambda$ สำหรับทุก i

10.4) นี่หมายความว่า ณ จุดที่เหมาะสมที่สุด ผลประโยชน์ส่วนเพิ่ม (Marginal Benefit) ของทุกกิจกรรมควรเท่ากัน

10.5) แก่ระบบสมการเพื่อหาค่า t_i ที่เหมาะสมที่สุด

หมายเหตุ* ในความเป็นจริง อาจมีข้อจำกัดเพิ่มเติม เช่น เวลาขั้นต่ำสำหรับแต่ละกิจกรรม ซึ่งจะทำให้ปัญหาซับซ้อนขึ้นและอาจต้องใช้วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบอื่น เช่น Linear Programming

กรณีศึกษาเปรียบเทียบระหว่างประเทศ

การนำไปใช้และผลลัพธ์ในประเทศต่าง ๆ ดังนี้

1. สวีเดน
 - สวีเดนมีการทดลองใช้วันทำงาน 6 ชั่วโมงในบางองค์กร โดยพบว่าช่วยเพิ่มสมดุลชีวิตการทำงาน (Work-Life Balance) และประสิทธิภาพการทำงาน
2. ฝรั่งเศส
 - ฝรั่งเศสมีกฎหมายกำหนดชั่วโมงทำงานไม่เกิน 35 ชั่วโมงต่อสัปดาห์ เพื่อส่งเสริมการใช้เวลากับครอบครัวและการพักผ่อน
3. เยอรมนี
 - เยอรมนีมีค่าเฉลี่ยชั่วโมงทำงานต่ำกว่าหลายประเทศในยุโรป เน้นประสิทธิภาพในการทำงานมากกว่าจำนวนชั่วโมง
4. ญี่ปุ่น
 - ญี่ปุ่นแม้จะมีชื่อเสียงเรื่องการทำงานหนัก แต่ปัจจุบันมีความพยายามในการปรับสมดุลชีวิต เช่น แคมเปญ "Premium Friday" ที่ให้พนักงานเลิกงานเร็วในวันศุกร์สุดท้ายของเดือน
5. นิวซีแลนด์
 - นิวซีแลนด์ทดลองใช้สัปดาห์ทำงาน 4 วันในบางบริษัท เน้นคุณภาพชีวิตและความสุขของประชาชน
6. เนเธอร์แลนด์
 - เนเธอร์แลนด์มีสัดส่วนการทำงานพาร์ทไทม์สูง และส่งเสริมความยืดหยุ่นในการทำงาน
7. เดนมาร์ก
 - เดนมาร์กมีชั่วโมงทำงานเฉลี่ยต่ำ แต่ผลิตภาพสูง เน้นความสุขและคุณภาพชีวิตของประชาชน
8. สหราชอาณาจักร สหรัฐอเมริกา และออสเตรเลีย
 - ทั้งสามประเทศมีการสร้างสมดุลในการทำงานและชีวิตส่วนตัวอย่างมากมาย โดยใช้แนวคิดและกลยุทธ์ต่าง ๆ เพื่อลดความเครียดและเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงาน

เพื่อเป็นการเปรียบเทียบในด้านสำคัญของโมเดลการทำงาน เช่น ลักษณะการใช้จุดเด่นข้อแนะนำ ผลลัพธ์ที่ผ่านมาประเทศที่ใช้ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบในด้านสำคัญของโมเดลการทำงาน

โมเดลการทำงาน	ลักษณะการใช้	จุดเด่น	ข้อแนะนำ	ผลลัพธ์ที่ผ่านมา	ประเทศที่ใช้
เทคนิค Pomodoro	ทำงาน 25 นาที, พัก 5 นาที ทำซ้ำ 4 รอบ แล้วพักยาว 15 - 30 นาที	- ช่วยเพิ่มความจดจ่อ - ป้องกันการเหนื่อยล้า	- ไม่เหมาะกับงานที่ต้องใช้เวลาต่อเนื่อง - การหยุดบ่อยอาจทำให้งานสะดุด	- เพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานและลดความเหนื่อยล้า	สหรัฐอเมริกา, ญี่ปุ่น, เยอรมนี
กฎ 52/17	ทำงาน 52 นาที, พัก 17 นาที	- ทำงานในช่วงเวลาสั้น - ให้ความยาวพักเพียงพอ	- ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำงาน - อาจไม่เหมาะกับงานที่ต้องใช้เวลาต่อเนื่องนาน	- เพิ่มความพึงพอใจในการทำงานและลดความเหนื่อยล้า	สหรัฐอเมริกา, ยุโรป
สัปดาห์ทำงาน 4 วัน	ทำงาน 4 วัน/สัปดาห์, หยุด 3 วัน	- ให้ความยาวพักผ่อนยาวนาน - เพิ่มประสิทธิภาพการทำงานในวันทำงาน	- อาจทำให้ความกดดันในการทำงานเพิ่มขึ้นในวันทำงาน - ต้องการการจัดการเวลาที่ดี	- เพิ่มความสุขและประสิทธิภาพการทำงาน	ไอร์แลนด์, นิวซีแลนด์, ญี่ปุ่น
ตารางเวลาแบบยืดหยุ่น (Flextime)	กำหนดช่วงเวลาหลักที่ต้องทำงานให้อิสระในการเลือกเวลาเริ่มและเลิกงาน	- ช่วยให้พนักงานมีความยืดหยุ่น - ลดความเครียดจากการเดินทาง	- อาจทำให้การประสานงานยากขึ้น - ต้องการวินัยสูง	- เพิ่มความพึงพอใจในงานและความสมดุลระหว่างงานและชีวิตส่วนตัว	เยอรมนี, สวีเดน
การทำงานระยะไกล (Remote Work)	ทำงานจากที่ไหนก็ได้, เน้นที่ผลลัพธ์มากกว่าเวลา	- ลดเวลาและค่าใช้จ่ายในการเดินทาง - เพิ่มความยืดหยุ่นในการทำงาน	- อาจทำให้การสื่อสารและการประสานงานลดลง - ต้องการการจัดการตัวเองที่ดี	- ลดความเครียดและเพิ่มความพึงพอใจในการทำงาน	สหรัฐอเมริกา, แคนาดา, สหราชอาณาจักร
กฎ "8+8+8"	การทำงาน การพักผ่อน และการใช้ชีวิตส่วนตัวในแต่ละวันให้สมดุล	- ช่วยสร้างสมดุลในชีวิต - ลดความเครียดและเพิ่มประสิทธิภาพการทำงาน	- อาจยากในการจัดการเวลาในบางอาชีพที่ต้องการเวลามากขึ้น	- เพิ่มสมดุลในการทำงานและชีวิตส่วนตัว	สหราชอาณาจักร, สหรัฐอเมริกา, ออสเตรเลีย

ผลลัพธ์ในประเทศต่าง ๆ เกิดขึ้นอย่างชัดเจนดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ในประเทศต่าง ๆ

ประเทศ	รูปแบบการทำงานที่นำไปใช้	ผลลัพธ์
สวีเดน	วันทำงาน 6 ชั่วโมง	ช่วยเพิ่มสมดุลชีวิตการทำงานและประสิทธิภาพการทำงาน
ฝรั่งเศส	ชั่วโมงทำงานไม่เกิน 35 ชั่วโมงต่อสัปดาห์	ส่งเสริมการใช้เวลากับครอบครัวและการพักผ่อน
เยอรมนี	ชั่วโมงทำงานต่ำ, Flextime	เน้นประสิทธิภาพในการทำงานมากกว่าจำนวนชั่วโมง
ญี่ปุ่น	Premium Friday, สัปดาห์ทำงาน 4 วัน	มีความพยายามในการปรับสมดุลชีวิต
นิวซีแลนด์	สัปดาห์ทำงาน 4 วัน	เน้นคุณภาพชีวิตและความสุขของประชาชน
เนเธอร์แลนด์	ทำงานพาร์ทไทม์, Flextime	ส่งเสริมความยืดหยุ่นในการทำงาน
เดนมาร์ก	Flextime, ชั่วโมงทำงานต่ำ	เน้นความสุขและคุณภาพชีวิตของประชาชน
สหราชอาณาจักร, สหรัฐอเมริกา, ออสเตรเลีย	8+8+8, Remote Work	สร้างสมดุลในการทำงานและชีวิตส่วนตัว

สรุปผลและการอภิปรายผล

สรุปผลกฎ "8+8+8" ซึ่งเป็นแนวคิดในการจัดสรรเวลา 24 ชั่วโมงในแต่ละวันให้สมดุลระหว่างการทำงาน การพักผ่อน และการใช้ชีวิตส่วนตัว เป็นโมเดลที่ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางในการสร้างสมดุลระหว่างงานและชีวิตส่วนตัว ผลลัพธ์จากตารางเปรียบเทียบวิธีการทำงานอื่น ๆ แสดงให้เห็นว่าโมเดลนี้มีผลดีในหลาย ๆ ด้าน ดังนี้

1. ประสิทธิภาพการทำงาน: กฎ "8+8+8" ช่วยให้พนักงานมีเวลาพักผ่อนเพียงพอ ทำให้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพในช่วงเวลาที่กำหนด
2. ความพึงพอใจในงานและชีวิตส่วนตัว: โมเดลนี้ช่วยสร้างสมดุลระหว่างชีวิตการทำงานและชีวิตส่วนตัว ซึ่งช่วยลดความเครียดและเพิ่มความสุขในชีวิต
3. ความยืดหยุ่น: กฎ "8+8+8" สามารถปรับใช้ร่วมกับวิธีการทำงานอื่น ๆ เช่น การทำงานระยะไกล (Remote Work) และตารางเวลาแบบยืดหยุ่น (Flextime) เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นในการทำงาน
4. การลดความเหนื่อยล้า: การมีเวลาพักผ่อนและการใช้ชีวิตส่วนตัวเพียงพอ ช่วยลดความเหนื่อยล้าและทำให้พนักงานมีความพร้อมในการทำงาน

โมเดลคณิตศาสตร์นี้แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการจัดสรรเวลาอย่างสมดุลตามกฎ 8+8+8 และยังชี้ให้เห็นถึงความซับซ้อนในการจัดสรรเวลาใช้ชีวิตให้เกิดประโยชน์สูงสุด การวิเคราะห์นี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวางแผนชีวิตและการทำงานเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและคุณภาพชีวิตได้อย่างเป็นระบบซึ่งมีบทพิสูจน์เหล่านี้จะช่วยยืนยันความถูกต้องทางคณิตศาสตร์ของตัวแบบ 8+8+8 และแสดงให้เห็นถึงความสมดุลที่เกิดขึ้น อย่างไรก็ตาม ควรคำนึงว่าในชีวิตจริง อาจมีปัจจัยอื่น ๆ ที่ไม่สามารถคำนวณได้อย่างแม่นยำ ซึ่งอาจส่งผลต่อการนำไปใช้จริง แบบจำลองนี้แสดงให้เห็นว่าเวลา 24 ชั่วโมงถูกแบ่งเท่า ๆ กันระหว่างการทำงาน การนอน และการใช้ชีวิต โดยเวลาใช้ชีวิตถูกแบ่งย่อยออกไปอีกเพื่อให้ครอบคลุมกิจกรรมต่าง ๆ ที่สำคัญ การใช้แบบจำลองนี้ช่วยให้เราสามารถปรับเปลี่ยนตัวแปรต่าง ๆ เพื่อดูว่าจะส่งผลต่อสมดุลชีวิตอย่างไร เช่น หากเพิ่มเวลาทำงานเป็น 10 ชั่วโมง จะต้องลดเวลาในส่วนอื่นลง ซึ่งอาจส่งผลต่อคุณภาพชีวิตโดยรวม

อภิปรายผลจากการศึกษาวิธีการทำงานที่แตกต่างกัน เช่น เทคนิค Pomodoro, กฎ 52/17, สัปดาห์ทำงาน 4 วัน, ตารางเวลาแบบยืดหยุ่น (Flextime), และการทำงานระยะไกล (Remote Work) พบว่าทุกวิธีการมีจุดเด่นและข้อดีเฉพาะตัว แต่การใช้กฎ "8+8+8" เป็นหลักในการจัดการเวลาแสดงให้เห็นผลลัพธ์ที่ดีในการสร้างสมดุลระหว่างงานและชีวิตส่วนตัวในหลายประเทศ อาทิ สหราชอาณาจักร, สหรัฐอเมริกา, และออสเตรเลีย

- เทคนิค Pomodoro และกฎ 52/17 ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานในระยะสั้นและลดความเหนื่อยล้า แต่ยังคงต้องการการพักฟื้นที่เพียงพอในช่วงเวลาที่เหลือ

- สัปดาห์ทำงาน 4 วัน และตารางเวลาแบบยืดหยุ่น (Flextime) ช่วยเพิ่มเวลาพักผ่อนและความยืดหยุ่นในการทำงาน ซึ่งเป็นการสนับสนุนการใช้กฎ "8+8+8" ได้ดี

- การทำงานระยะไกล (Remote Work) ช่วยลดความเครียดจากการเดินทางและเพิ่มความยืดหยุ่น แต่ยังคงต้องการการจัดสรรเวลาที่ดีตามกฎ "8+8+8" เพื่อให้เกิดสมดุลในชีวิต

ข้อเสนอแนะการใช้กฎ "8+8+8" เป็นหลักในการจัดการเวลาควรได้รับการสนับสนุนจากองค์กรและนโยบายของรัฐบาล เพื่อให้พนักงานสามารถจัดการเวลาของตนเองได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยอาจนำเทคนิคและวิธีการทำงานที่แตกต่างกันมาประยุกต์ใช้ร่วมกัน เช่น การทำงานระยะไกลและตารางเวลาแบบยืดหยุ่น เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นและความพึงพอใจในการทำงาน

ผลลัพธ์ที่ผ่านมามีการใช้กฎ "8+8+8" ได้รับการยอมรับและนำไปใช้ในหลายประเทศ โดยเฉพาะในสหราชอาณาจักร, สหรัฐอเมริกา, และออสเตรเลีย ซึ่งพบว่าช่วยสร้างสมดุลระหว่างงานและชีวิตส่วนตัว ลดความเครียด และเพิ่มประสิทธิภาพการทำงาน นอกจากนี้ยังช่วยให้พนักงานมีความสุขและพึงพอใจในชีวิตมากขึ้น

โดยสรุปกฎ "8+8+8" เป็นแนวคิดที่มีความสำคัญและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ร่วมกับวิธีการทำงานอื่น ๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานและสร้างสมดุลในชีวิตส่วนตัวได้อย่างดี

คำแนะนำในการนำไปใช้เชิงนโยบายและองค์กร

1. การนำไปใช้เชิงนโยบาย

1.1 การสนับสนุนจากรัฐบาล

- กำหนดนโยบายส่งเสริมสมดุลชีวิตการทำงาน: รัฐบาลควรกำหนดนโยบายที่สนับสนุนการใช้กฎ "8+8+8" เช่น การกำหนดเวลาในการทำงานที่ยืดหยุ่น และการส่งเสริมวันหยุดที่เพียงพอ

- สนับสนุนการวิจัยและการทดลอง: สนับสนุนการวิจัยและทดลองใช้แนวทางการจัดการเวลาต่าง ๆ เช่น สัปดาห์ทำงาน 4 วัน หรือการทำงานระยะไกล เพื่อเก็บข้อมูลและประเมินผล

1.2 การสร้างกฎหมายและระเบียบ

- พัฒนาและปรับปรุงกฎหมายแรงงาน: ออกกฎหมายที่สนับสนุนการใช้แนวทางสมดุลการทำงาน เช่น ข้อกำหนดเกี่ยวกับชั่วโมงการทำงานและเวลาพักผ่อน

- สนับสนุนการทำงานจากที่บ้าน: กำหนดกรอบการทำงานระยะไกลที่ชัดเจน เช่น การจัดเตรียมอุปกรณ์และเทคโนโลยีที่จำเป็น

1.3 การจัดตั้งโครงการสนับสนุน

- โครงการสนับสนุนความสมดุลชีวิตการทำงาน: จัดโครงการให้คำปรึกษาและสนับสนุนสำหรับองค์กรที่ต้องการนำแนวทาง 8+8+8 ไปใช้

- การสนับสนุนการพัฒนาทักษะการจัดการเวลา: จัดอบรมและการศึกษาเพื่อช่วยให้บุคลากรและองค์กรสามารถนำแนวทาง 8+8+8 ไปใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2. การนำไปใช้ในองค์กรขนาดเล็ก กลาง และใหญ่

2.1 องค์กรขนาดเล็ก

- การสร้างความยืดหยุ่นในตารางการทำงาน: อนุญาตให้พนักงานเลือกเวลาทำงานและเวลาพักผ่อนตามความสะดวก เพื่อสนับสนุนการใช้กฎ "8+8+8"

- การสร้างสภาพแวดล้อมการทำงานที่ดี: จัดทำบรรยากาศการทำงานที่ช่วยให้พนักงานรู้สึกผ่อนคลายและมีสุขภาพดี เช่น การจัดพื้นที่พักผ่อนหรือการสนับสนุนกิจกรรมเพื่อสุขภาพ

2.2 องค์กรขนาดกลาง

- การออกแบบตารางการทำงานที่ยืดหยุ่น: ใช้กฎ "8+8+8" เป็นกรอบในการจัดการตารางการทำงาน เช่น การกำหนดช่วงเวลาทำงานหลักและช่วงเวลาพักผ่อน

- การสร้างโปรแกรมส่งเสริมสุขภาพและความเป็นอยู่ที่ดี: ออกแบบโปรแกรมที่ช่วยให้พนักงานสามารถรักษาสมดุลระหว่างงานและชีวิต เช่น การจัดกิจกรรมออกกำลังกายและเวิร์คช็อปการจัดการความเครียด

2.3 องค์กรขนาดใหญ่

- การนำแนวทางการจัดการเวลาที่หลากหลาย: นำกฎ "8+8+8" มาปรับใช้ร่วมกับเทคนิคและนโยบายอื่น ๆ เช่น การทำงานระยะไกลและตารางเวลาแบบยืดหยุ่น เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นและความพึงพอใจในการทำงาน

- การสร้างนโยบายองค์กรที่สนับสนุนความสมดุล: ออกกนโยบายที่ส่งเสริมการสร้างสมดุลระหว่างงานและชีวิต เช่น การกำหนดวันหยุดพิเศษและการสนับสนุนการทำงานจากที่บ้าน

- การติดตามและประเมินผล: ใช้ข้อมูลและผลลัพธ์จากการทดลองใช้กฎ "8+8+8" เพื่อตรวจสอบความมีประสิทธิภาพและปรับปรุงนโยบายตามผลลัพธ์ที่ได้รับ

สรุปการนำกฎ "8+8+8" ไปใช้ทั้งในเชิงนโยบายและในองค์กรขนาดต่าง ๆ มีข้อดีอย่างมากในการสร้างสมดุลระหว่างงานและชีวิตส่วนตัว การสนับสนุนจากรัฐบาลและการนำแนวทางนี้ไปใช้ในองค์กรสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำงาน ลดความเครียด และส่งเสริมความสุขของพนักงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การเปรียบเทียบกับประเทศไทย

รูปแบบการทำงานในประเทศไทย [28] - [30]

- โดยทั่วไป ชั่วโมงทำงานในประเทศไทยยังคงเป็น 40 ชั่วโมงต่อสัปดาห์ ซึ่งถือว่าเป็นมาตรฐานทั่วโลก
 - การทำงานล่วงเวลา (OT) ยังเป็นเรื่องปกติในหลายองค์กร
 - การทำงานแบบ Remote Work เริ่มได้รับความนิยมมากขึ้นในช่วงหลังสถานการณ์โควิด-19
- ผลลัพธ์และความท้าทาย
- สมดุลชีวิตการทำงาน: คนไทยหลายคนยังคงพบปัญหาในการรักษาสมดุลระหว่างชีวิตการทำงานและชีวิตส่วนตัว เนื่องจากชั่วโมงทำงานที่ยาวนานและการทำงานล่วงเวลา
 - ประสิทธิภาพในการทำงาน: การทำงานเป็นเวลานานไม่จำเป็นต้องเท่ากับประสิทธิภาพที่ดี ทำให้ประเทศไทยยังมีพื้นที่สำหรับการปรับปรุงในด้านนี้
 - สุขและคุณภาพชีวิต: หลายคนรู้สึกเครียดจากการทำงานและมีเวลาน้อยในการใช้ชีวิตส่วนตัว
- แนวทางการปรับปรุง
1. ลดชั่วโมงการทำงาน เริ่มทดลองลดชั่วโมงการทำงาน เช่น นำแนวคิดสัปดาห์ทำงาน 4 วันหรือวันทำงาน 6 ชั่วโมงมาใช้ในบางองค์กรเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความสุขในการทำงาน
 2. เพิ่มความยืดหยุ่นส่งเสริมการทำงานแบบ Flextime และ Remote Work เพื่อให้พนักงานมีอิสระในการจัดการเวลาและสถานที่ทำงาน
 3. ส่งเสริมการพักผ่อนและเวลาครอบครัวนำแนวคิดการทำงานที่ส่งเสริมการใช้เวลากับครอบครัวและการพักผ่อน เช่นเดียวกับฝรั่งเศสมาใช้ในองค์กร

การปรับปรุงรูปแบบการทำงานในประเทศไทยให้เหมาะสมกับบริบทและวัฒนธรรมท้องถิ่นจะช่วยให้พนักงานมีความสุขมากขึ้นและเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานได้ในระยะยาว

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณอย่างยิ่งต่อครอบครัว ภรรยาบุตร และบิดามารดา สำหรับการสนับสนุนและกำลังใจอย่างต่อเนื่อง ในระหว่างการศึกษาและการทำงาน ขอขอบคุณสำหรับความรัก ความเข้าใจ และการสนับสนุนที่สำคัญในการก้าวข้าม อุปสรรคและบรรลุเป้าหมายที่ตั้งไว้ ด้วยความรักและห่วงใย นอกจากนี้ ขอขอบคุณอาจารย์ที่ได้อบรมการศึกษา ของข้าพเจ้าตั้งแต่ ระดับประถมศึกษา มัธยมศึกษา ปริญญาตรี-โท-เอก ทุกท่านที่ให้คำแนะนำ ความรู้ และการสนับสนุนอย่างจริงจังในการดำเนินการวิจัยและการศึกษา ขอขอบคุณสำหรับความเอื้ออาทรและความชำนาญ ที่เป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาความรู้และทักษะของผู้เขียนอย่างยิ่ง ด้วยความเคารพและนับถือ

References

- [1] Owen, R. (1817). **A New View of Society**. In *The Life of Robert Owen*. Effingham Wilson
- [2] BBC News. (2012). **Call-centre Workers in Wrexham Try Out Six-Hour Day**. Access (11 May 2012). Available (<https://www.bbc.com/news/uk-wales-mid-wales-18041257>)
- [3] Mimi's Plan. (2023). **Good Things are Coming** [Facebook]. Access (27 July 2024). Available (<https://www.facebook.com/photo/?fbid=772497441748385&set=a.470410441957088>)
- [4] Bloomberg News. (2016). **The Six-Hour Workday Works in Sweden. But what about in workaholic North America?**. Access (11 May 2012). Available (<https://financialpost.com/executive/careers/the-six-hour-workday-works-in-sweden-but-what-about-in-workaholic-north-america>)
- [5] Fagnani, J. and Letablier, M. -T. (2004). Work and Family Life Balance: The Impact of the 35-Hour Laws in France. **Work, Employment and Society**. Vol. 18, Issue 3, pp. 551-572. DOI: 10.1177/0950017004045550
- [6] Bosch, G. and Lehdorff, S. (2001). Working-Time Reduction and Employment: Experiences in Europe and Economic Policy Recommendations. **Cambridge Journal of Economics**. Vol. 25, Issue 2, pp. 209-243. DOI: 10.1093/cje/25.2.209
- [7] Lin, R., Lin, Y., Hsia, Y., and Kuo, C. (2021). Long Working Hours and Burnout in Health Care Workers: Non-Linear Dose-Response Relationship and the Effect Mediated by Sleeping Hours—A Cross-Sectional Study. **Journal of Occupational Health**. Vol. 63, Issue 1, e12228. DOI: 10.1002/1348-9585.12228
- [8] Campbell, T. T. (2024). The Four-Day Work Week: a Chronological, Systematic Review of the Academic Literature. **Management Review Quarterly**. Vol. 74, pp. 1791-1807. DOI: 10.1007/s11301-023-00347-3
- [9] Visser, J. (2002). The First Part-Time Economy in the World: A Model to be Followed?. **Journal of European Social Policy**. Vol. 12, Issue 1, pp. 23-42. DOI: 10.1177/0952872002012001561
- [10] Vainio, H. (2000). Modification of Lung Cancer Prevention by Gene-Nutrient Interaction. **Scandinavian Journal of Work, Environment & Health**. Vol. 26, Issue 6, pp. 459-460. DOI: 10.5271/sjweh.568
- [11] Greenhaus, J. H. and Allen, T. D. (2011). **Work-Family Balance: A Review and Extension of the Literature**. In Quick, J. C. and Tetrick, L. E. (Eds.), *Handbook of Occupational Health Psychology*, American Psychological Association. pp. 165-183

- [12] Cirillo, F. (2018). **The Pomodoro Technique: The Acclaimed Time-Management System That Has Transformed How We Work**. United States by Currency, Penguin Random House LLC, New York
- [13] Gill, P. (2011). **The Pomodoro Technique: Is It Right for You?**. Access (11 May 2012). Available (<https://www.pomodoratechnique.com/>)
- [14] Impact Lab LLC. (2020). **Why taking breaks can make you happier, more focused, and more productive**. Access (11 May 2012). Available (<https://www.impactlab.com/2014/09/08/why-taking-breaks-can-make-you-happier-more-focused-and-more-productive/>)
- [15] BBC. (2021). **Four-day week 'an overwhelming success' in Iceland**. Access (11 May 2012). Available (<https://www.bbc.com/news/business-57724779>)
- [16] Perlow, L. A. and Porter, J. L. (2009). **Making Time Off Predictable—and Required**. Magazine Article. Harvard Business Review
- [17] Hill, E. J., Hawkins, A. J., Ferris, M., and Weitzman, M. (2001). Finding an Extra Day a Week: The Positive Influence of Perceived Job Flexibility on Work and Family Life Balance. **Family Relations**. Vol. 50, Issue 1, pp. 49-58. DOI: 10.1111/j.1741-3729.2001.00049.x
- [18] Drucker, P. (1999). **Management Challenges for the 21st Century**. New York: Harper Collins
- [19] Felstead, A. and Henseke, G. (2017). Assessing the Growth of Remote Working and Its Consequences for Effort, Well-Being and Work-Life Balance. **New Technology, Work and Employment**. Vol. 32, Issue 3, pp. 195-212. DOI: 10.1111/ntwe.12097
- [20] Bryson, A. and MacKerron, G. (2016). Are you happy while you work?. **The Economic Journal**. Vol. 127, Issue 599, pp. 106-125. DOI: 10.1111/ecoj.12269
- [21] Haar, J. M., Russo, M., Suñe, A., and Ollier-Malaterre, A. (2014). Outcomes of Work-Life Balance on Job Satisfaction, Life Satisfaction and Mental Health: A Study Across Seven Cultures. **Journal of Vocational Behavior**. Vol. 85, Issue 3, pp. 361-373. DOI: 10.1016/j.jvb.2014.08.010
- [22] Perpetual Guardian. (2019). **White Paper - The Four-Day Week**. Access (11 May 2012). Available (<https://www.4dayweek.com/>)
- [23] Perpetual Guardian. (2024). **The Four-Day Week is Here**. Access (11 May 2012). Available (<https://www.perpetualguardian.co.nz/the-four-day-week-is-here/>)
- [24] Baltes, B. B., Briggs, T. E., Huff, J. W., Wright, J. A., and Neuman, G. A. (1999). Flexible and Compressed Workweek Schedules: A Meta-Analysis of Their Effects on Work-Related Criteria. **Journal of Applied Psychology**. Vol. 84, Issue 4, pp. 496-513. DOI: 10.1037/0021-9010.84.4.496
- [25] Bloom, N., Liang, J., Roberts, J., and Ying, Z. J. (2015). Does working from home work? Evidence from a Chinese experiment. **The Quarterly Journal of Economics**. Vol. 130, Issue 1, pp. 165-218. DOI: 10.1093/qje/qju032
- [26] Open AI. (2024). **Model Effects 8+8+8**. Access (16 October 2024). Available (<https://chatgpt.com/share/670f52e3-d530-800d-ae09-c022e9f2b863>)
- [27] Anthropic. (2024). **AI Research and Products that Put Safety at the Frontier**. Access (11 May 2012). Available (<https://www.anthropic.com/>)
- [28] Ministry of Labour. (2019). **Report on the Survey of Working Conditions of the Population 2019**. Access (11 May 2012). Available (<https://www.mol.go.th/>)



- [29] Athirah Saidi, N. S., Michael, F. L., Sumilan, H., Omar Lim, S. L., Jonathan, V., Hamidi, H., and Abg Ahmad, A. I. (2018). The Relationship Between Working Environment and Employee Performance. **Journal of Cognitive Sciences and Human Development**. Vol. 5, No. 2, pp. 14-22. DOI: 10.33736/jcshd.1916.2019
- [30] Grimmett, G. and Stirzaker, D. (2020). **Probability and Random Processes (4th ed.)**. Oxford University Press

Development of Date Fruit (*Phoenix dactylifera* L.) Wine

Kanokwan Tandee^{1*} Junjira Wanchana¹ Nunnapat Rahong¹ Rungarun Choocherd¹
Wannapa Chouypradit¹ Chaiyot Sumritsakun¹ Sila Kittiwachana² and Sugunya Mahatheeranon²

Received: August 3, 2024; Revised: September 4, 2024; Accepted: September 6, 2024

Abstract

Date fruit (*Phoenix dactylifera* L.), known for its sweetness and nutrition, has been used to develop a low-alcohol wine suitable for health-conscious individuals who enjoy socializing. Current study aimed to select an appropriate yeast strain and to determine optimal conditions such as initial total soluble solids and pH for producing a healthy and appealing date fruit wine. Among seven strains of *Saccharomyces cerevisiae* examined (71B, BM4x4, ICV-D47, EC-1118, K1-V1116, QA23, RC212), strain K1-V1116 was found to produce a wine with lower pH and alcohol content, higher acidity, total phenolic content, and ferric reducing ability power. Date fruit wine made with strain K1-V1116 also received the highest scores for flavor and overall liking. Further experiments were conducted using date fruit juice with three levels of different initial total soluble solids (5 %, 10 %, and 15 %). The results indicated that 15 % initial total soluble solids produced wine with superior characteristics in terms of total soluble solids, pH, acidity, alcohol content, reducing sugar content, total phenolic content, ABTS radical cation decolorization, ferric reducing ability power compared to lower concentrations. Date fruit wine produced with 15 % initial total soluble solids also received the highest scores for color and overall liking. Additionally, the date fruit juice with 15 % initial total soluble solids was used to produce wine at three levels of pH value (4.0, 4.5, 5.0) and wines produced at pH 4.5 were rated the highest for flavor and overall liking. In conclusion, using *S. cerevisiae* K1-V1116 to ferment date fruit juice with 15 % initial total solids at pH 4.5 can yield a well-liked, low-alcohol wine.

Keywords: Date Fruit; Wine; Antioxidant

¹ Maejo University, Chiang Mai

² Chiang Mai University, Chiang Mai

* Corresponding Author, Tel. 08 1873 3325, E - mail: kanokwan_t@mju.ac.th

Introduction

The date fruit (*Phoenix dactylifera* L.) originates from Central Asia and thrives in hot and arid climates. The date fruit comprises sugars, predominantly glucose and fructose, as well as proteins, fats, vitamins, and minerals. Dietary fibers and beta-carotene additionally contribute to the nutritional value of date fruits [1]. However, the lower value of individual fruits, ranging from 100 to 300 Baht per kg, often leads to the transformation into processed foods. Wine can be a rational choice for processing to increase its economic value due to a high sugar content of date fruit, which is conducive to the growth and alcoholic fermentation of wine yeast. In addition, bioactive compounds from date fruit could be integrated into wine products, reflecting the growing trend of functional beverages.

Previous study investigating bioethanol production from date palm fruit wastes indicated that the most favorable fermentation conditions involved the hydrolyzed date fruit with initial levels of reducing sugar ranging from 94 to 124 g/L. This process, utilizing 30 % inoculum of *Pichia kudriavzevii*, demonstrated optimal results at a temperature of 30 °C and pH levels between 5 and 6, resulting in ethanol yields of 4 - 6 % after a 96-hour period [2]. Another research outlined the conditions for converting date syrup into ethanol. They utilized flocculent *Saccharomyces uvarum*, fermenting 55 g/L sugar at a temperature of 29 °C [3]. Additionally, *Saccharomyces cerevisiae* was employed as 25 % inoculum to generate bioethanol from a solution derived from date palm waste. This solution contained 38 % glucose, fructose, and sucrose, and fermentation was carried out at pH 4 and 30 °C for 72 hours, resulting in a 15 % ethanol yield [4]. In another experiment, submerged ethanol fermentation was conducted using 4 % inoculum of *S. cerevisiae* with date waste syrup containing 180 g/L sugar. The syrup consisted of 13 % glucose, 10 % fructose, 32 % sucrose, and 1 g/L ammonium phosphate. After a 72-hour production period at 30 °C, this process yielded 136 g/L ethanol [5].

Low-alcohol wine is more appealing for health-conscious individuals who maintain an active social lifestyle. The composition of dates includes a notable concentration of phenolic compounds, known for their antimicrobial, antioxidant, anticancer, and antidiabetic properties [6] - [10]. However, there have been few studies on wine making from date fruit. Hence, the objective of this research was to select the suitable yeast strain, along with determining the optimal level of initial total soluble solids and pH value in date fruit juice to attain desirable wine characteristics. All the parameters studied had a significant impact on the organoleptic quality of wine. For instance, different commercial yeast strains produce varying levels of glycerol, acetaldehyde, sulfur dioxide, and volatile acids [11]. Additionally, the initial total soluble solids influence the alcohol content while the acidic pH enhances yeast growth and metabolism. Furthermore, the alcohol produced during fermentation may potentially facilitate the extraction of bioactive substances from date fruits, thereby enhancing the nutritional value of the wine product.

Materials and Methods

Raw Materials, Chemical Reagents, and Microorganisms

Dried date fruit cultivar Saidi was received from Thanarak Interfoods (Thailand). Citric acid, diammonium phosphate, potassium metabisulfite, sodium hydroxide, 3,5-dinitrosalicylic acid (DNS), potassium sodium tartrate, glucose, Folin-Ciocalteu solution, sodium bicarbonate, gallic acid,

2,2'-azinobis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) (ABTS), potassium persulfate, 95 % ethanol, 6-hydroxy-2,5,7,8-tetramethylchroman-2-carboxylic acid (trolox), sodium acetate, acetic acid, hydrochloric acid, 2,4,6-tripyridyl-s-triazine (TPTZ), ferric chloride, ferrous sulfate, were received from Kemaus (Australia). Seven strains of *Saccharomyces cerevisiae*, including 71B, BM4x4, ICV-D47, EC-1118, K1-V1116, QA23, and RC212, were obtained from Lallemand Inc. (Canada).

Selection of Suitable Yeast Strain

Date fruit must was prepared by blending 750 g of dried date fruit in 1 L of RO drinking water to constitute 15 % total soluble solids (TSS). The must was boiled for 5 min before filtered through muslin cloth. Then, pH value was adjusted to 4.5 using citric acid. Citric acid content was determined by titration. Next, 0.2 g of diammonium phosphate and potassium metabisulfite were added. After 24 h of incubation at 25 °C, 0.2 g of lyophilized yeast was incorporated to date fruit must and fermentation was controlled at 25 °C. Samples were removed twice a week for analysis of total soluble solids, pH value, and citric acid content. When total soluble solids were stable, date fruit wine was separated from sediments by centrifugation at 3000 xg for 5 min and 0.2 g of potassium metabisulfite was added. After that, clarified wine was aged at 4 °C for a week. Then, alcohol content, reducing sugar content, total phenolic content, ABTS radical cation scavenging activity, and ferric reducing ability power were determined. Suitable yeast strain would produce date fruit wine with moderate levels of acid, alcohol, and reducing sugar, while also exhibiting high antioxidant activities and sensory scores.

Determination of Appropriate Initial Total Soluble Solids

Briefly, date fruit must was prepared by blending 250, 500, or 750 g of dried date fruit in 1 L of RO water to constitute 5 %, 10 %, or 15 % total soluble solids and the suitable yeast strain was incorporated to date fruit must. Appropriate initial total soluble solids would result in date fruit wine with moderate levels of acid, alcohol, and reducing sugar, while also showing high antioxidant activities and sensory scores.

Selection of Optimal pH Value

Briefly, date fruit must was prepared by blending appropriate amount of dried date fruit in 1 L of RO water. Then, pH value was adjusted to 4.0, 4.5, or 5.0 using citric acid and the suitable yeast strain was incorporated to date fruit must. Optimal pH value would produce date fruit wine with moderate levels of acid, alcohol, and reducing sugar, while also exhibiting high antioxidant activities and sensory scores.

Analysis of Physical Quality

Total Soluble Solids

Total soluble solids of date fruit wine were determined by hand refractometer (N-1E, Atago, Japan) and reported as percentage.

pH value

pH value of date fruit wine was determined by pH meter (FEP20, Mettler-Toledo, Switzerland).

Citric Acid Content

5 mL of date fruit wine was diluted in 95 mL of distilled water before titrated with 0.1 M NaOH until an end point at pH 8.2. After that, citric acid content was calculated by multiplying 0.12 with a volume of 0.1 M NaOH used and reported as percentage [12].

Alcohol Content

Alcohol content of date fruit wine was determined by Ebulliometer (Dujardin-Salleron, France) and reported as percentage.

Analysis of Chemical Quality

Reducing Sugar Content

0.5 mL of diluted sample was mixed with 0.5 mL of 0.1 % DNS and boiled for 10 min before dipped into ice water. Then, 5 mL of distilled water was added before OD measurement at 520 nm using distilled water as a blank [13]. Reducing sugar content was determined from a standard curve of glucose and reported as g/L.

Total Phenolic Content

0.25 mL of date fruit wine was mixed with 4.75 mL of 5 % Folin-Ciocalteu solution and left for 5 min. Then, 0.25 mL of 10 % sodium bicarbonate was added and left for 10 min. After that, OD was measured at 730 nm using distilled water as a blank [14]. Total phenolic content was determined from a standard curve of gallic acid and reported as gallic acid equivalent (GE; mM).

ABTS Radical Cation Scavenging Activity

ABTS radical cation scavenging activity was used to evaluate the hydrogen donating potential of date fruit wine. Briefly, ABTS radical cation was prepared by mixing 7 mM ABTS with 4.9 mM potassium persulfate at a ratio of 1:1 before stored in the dark for 16 h. Next, ABTS radical cation was diluted with 95 % ethanol at a ratio of 1:55 and OD was measured at 734 nm (OD1) using 95 % ethanol as a blank. Then, 0.02 mL of diluted sample was mixed with 2 mL of diluted ABTS radical cation and left at room temperature for 1 min before OD measurement at 734 nm (OD2). After that, % inhibition was calculated by $(OD1 - OD2) / OD1 \times 100$ [15]. ABTS radical cation scavenging activity was determined from a standard curve of trolox and reported as trolox equivalent (TE; mM).

Ferric Reducing Antioxidant Power

Ferric reducing antioxidant power was used to evaluate the electron donating potential of date fruit wine. Briefly, FRAP solution was prepared by mixing 300 mM acetate buffer pH 3.6 with 10 mM TPTZ and 20 mM ferric chloride at a ratio of 10:1:1. Then, 0.1 mL of diluted sample was mixed with 3 mL of FRAP solution and 0.3 mL of distilled water before left at room temperature for 4 min. After that, OD was measured at 593 nm using FRAP solution as a blank [16]. Ferric reducing antioxidant power was determined from a standard curve of ferrous sulfate and reported as ferrous sulfate equivalent (FE; mM).

Analysis of Sensory Quality

Sensory properties, which were color, odor, flavor, and overall liking, of date fruit wine were evaluated by 50 untrained panelists, aged 20 - 50 years, using nine-point hedonic scale.

Statistical Analysis

All experiments were conducted using a randomized complete block design (RCBD) with three replications, and the results were presented as means \pm standard error (SE). Alcohol content, reducing sugar content, total phenolic content, ABTS radical cation scavenging activity and ferric reducing antioxidant power were tested for statistical difference at 95 % confidence by Analysis of Variance in General Linear Model (GLM) followed by Duncan multiple range test (SPSS Statistics 17.0).

Results

Suitable Yeast Strain for Production of Date Fruit Wine

During the fermentation of date fruit juice, seven yeast strains were observed to reduce the total soluble solids (Figure 1(a)). Specifically, strains 71B and BM4x4 took nine days to stabilize the total

soluble solids, while strains ICV-D47 and QA23 required 10 days. The fermentation process for strains EC-1118, K1-V1116, and RC212 was completed after 11 days.

Similarly, pH values decreased during the first seven days of fermentation (Figure 1(b)), corresponding to the rise in acid content (Figure 1(c)). Afterward, pH values remained stable while acid contents declined and then rebounded after eight days. Ultimately, date fruit wine fermented by seven strains exhibited pH values between 3.8 and 4.0 and acid contents between 0.2 % and 0.4 %. Furthermore, strain 71B produced a statistically higher alcohol content compared to the other six strains, resulting in date fruit wine with approximately 7 % alcohol content (Figure 1(d)).

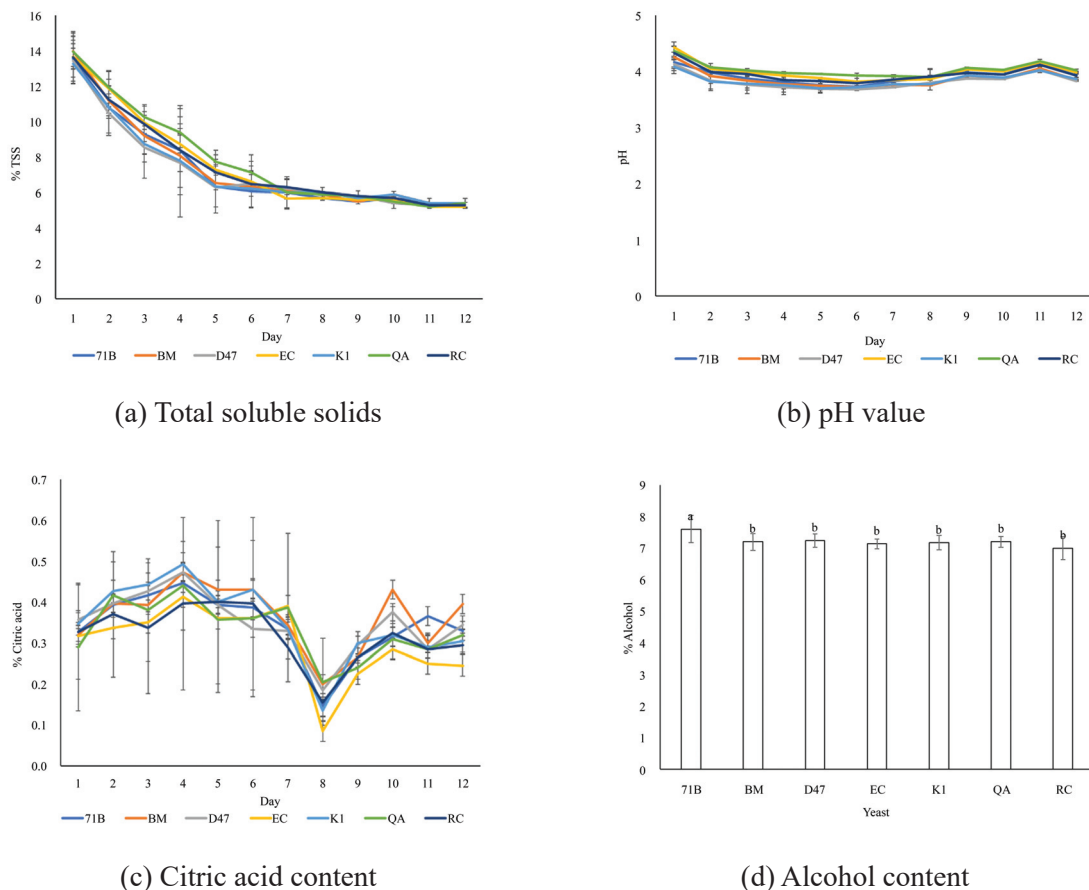


Figure 1 Physical properties of date fruit wine produced by different yeast strains.

Strains BM4x4 and QA23 exhibited higher reducing sugar content compared to the other five strains, resulting in the development of date fruit wine with approximately 2.5 g/L reducing sugar content (Figure 2(a)). Additionally, strain BM4x4 produced date fruit wine with the highest total phenolic content, whereas the other six strains displayed a total phenolic content of 2.7 mM GE (Figure 2(b)).

However, no statistical difference was found in the date fruit wine in terms of ABTS radical cation scavenging activity, which was approximately 1.7 mM TE (Figure 2(c)). In contrast, strains QA23 and 71B exhibited the highest and lowest ferric reducing antioxidant power, respectively (Figure 2(d)). The other five strains produced date fruit wine with a ferric reducing antioxidant power of 3.0 mM FE.

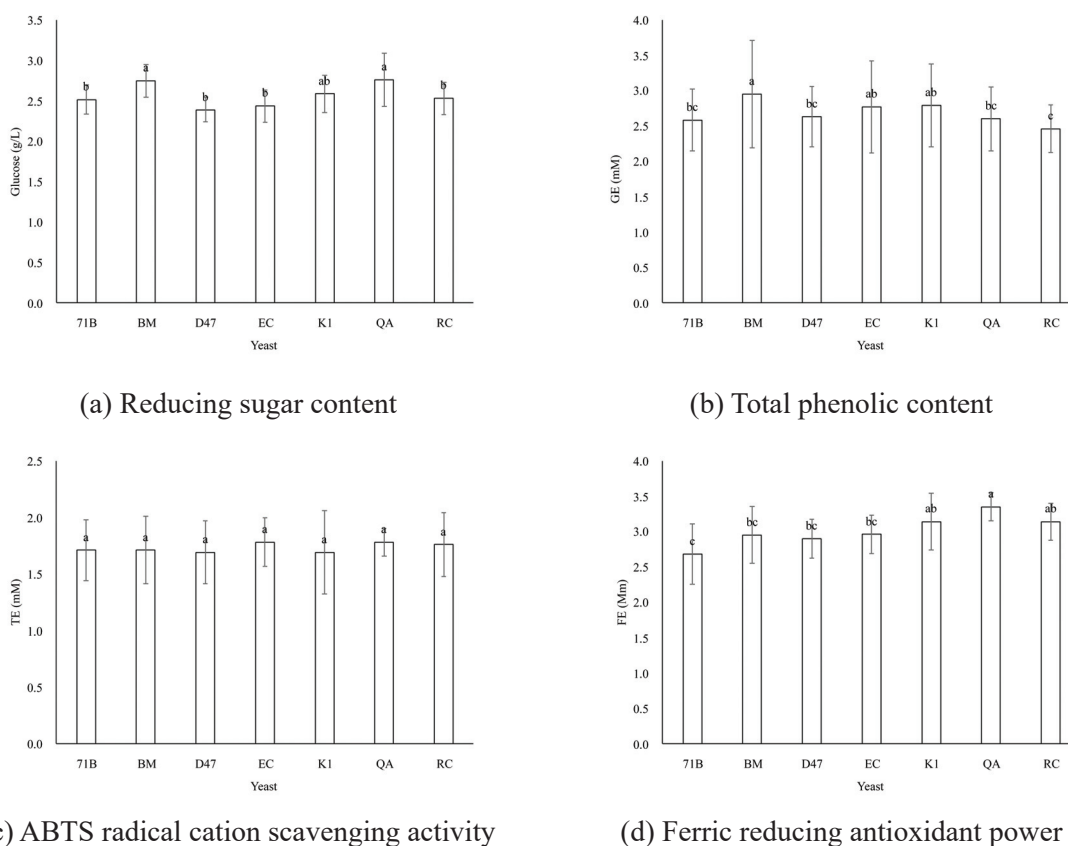


Figure 2 Chemical properties of date fruit wine produced by different yeast strains.

All seven yeast strains produced date fruit wine with non-significant variation in color, odor, and overall liking scores, all averaging approximately 3.3 out of 5.0 (Table 1). However, strain EC-1118 resulted in the lowest flavor liking score.

Table 1 Sensory properties of date fruit wine produced by different yeast strains.

Yeast strain	Color*	Odor*	Flavor**	Overall*
71B	3.22±0.98	3.30±1.11	3.25±0.93 ^a	3.22±0.87
BM	3.38±1.01	3.50±1.10	3.33±0.90 ^a	3.37±0.84
D47	3.23±0.93	3.28±0.99	3.30±1.03 ^a	3.27±1.02
EC	3.22±0.99	3.28±0.94	2.88±0.98 ^b	3.27±0.90
K1	3.22±1.15	3.37±1.07	3.42±0.98 ^a	3.53±1.08
QA	3.17±1.01	3.35±1.04	3.23±0.83 ^a	3.37±0.90
RC	3.20±1.10	3.15±1.02	3.15±0.99 ^{ab}	3.38±0.98

* There was no statistical difference.

** Different letters indicated statistical differences within the same column.

Strain K1-V1116 produced date fruit wine with a low pH value of 3.8 and a relatively modest alcohol content of 7 %. Additionally, it exhibited relatively high levels of acid, reducing sugar, total phenolic, and ferric reducing ability power, at 0.3 %, 2.6 g/L, 2.8 mM GE, and 3.1 mM FE, respectively. Therefore, this strain was selected for further studies in the fermentation of date fruit wine.

Appropriate Initial Total Soluble Solids for Production of Date Fruit Wine

Similar to the first study, the total soluble solids of the date fruit wine continuously decreased. Date fruit must with initial total soluble solids of 15 % required longer fermentation time (Figure 3(a)). The final products prepared from 5 %, 10 %, and 15 % initial total soluble solids demonstrated total soluble solids of 2.0 %, 3.8 %, and 5.4 %, respectively. During the fermentation of date fruit must, there was a gradual decrease in pH values, corresponding to the initial total soluble solids (Figure 3(b)). Meanwhile, the acid contents remained relatively stable throughout the study period (Figure 3(c)). For date fruit wine made from initial total soluble solids of 5 %, 10 %, and 15 %, the pH values measured were 3.6, 3.8, and 3.9, respectively. In parallel, the acid contents were recorded as 0.2 %, 0.3 %, and 0.4 %, respectively.

Conversely, alcohol contents showed a significant increase corresponding to the initial total soluble solids (Figure 3(d)). Date fruit wine produced from initial total soluble solids of 5 %, 10 %, and 15 % exhibited alcohol contents of 2.2 %, 4.5 %, and 7.0 %, respectively.

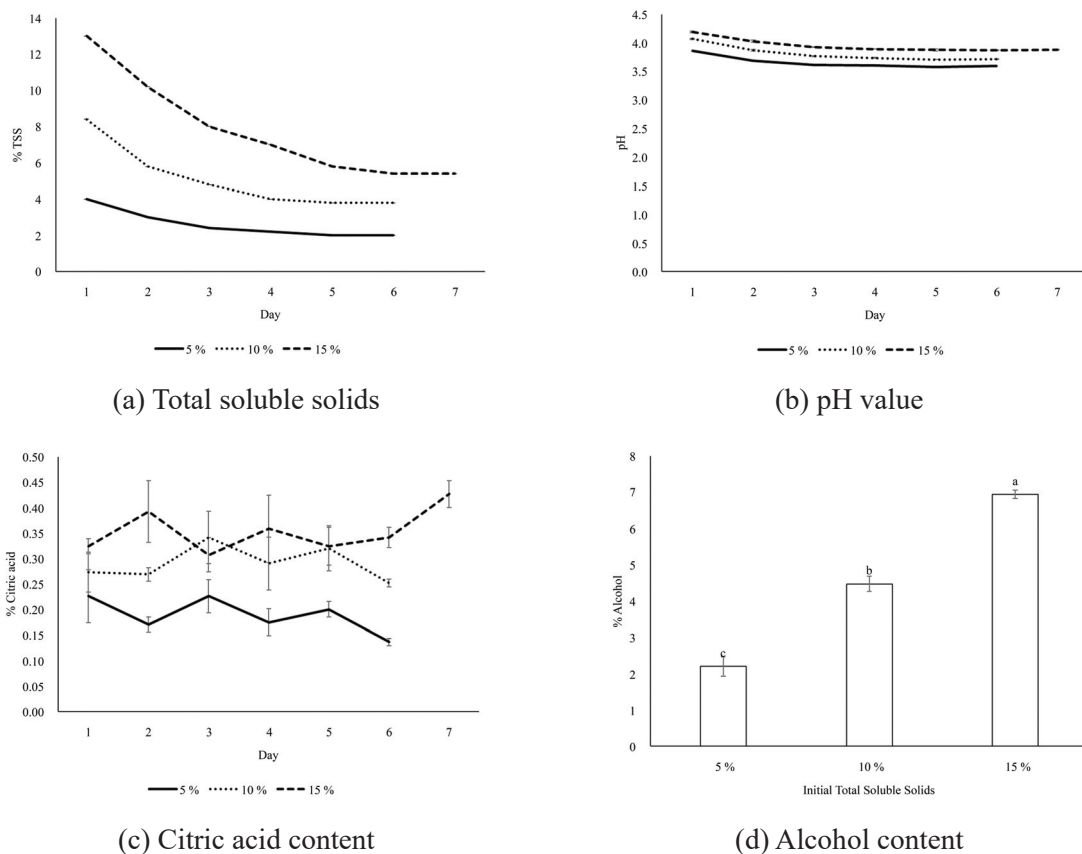
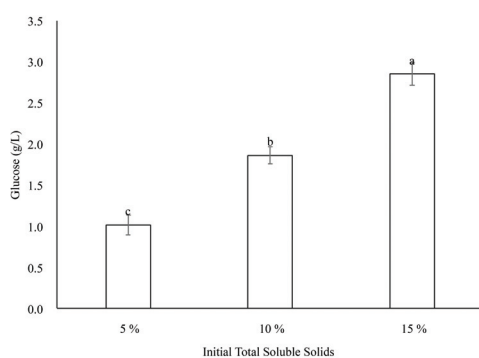


Figure 3 Physical properties of date fruit wine produced from different initial total soluble solids.

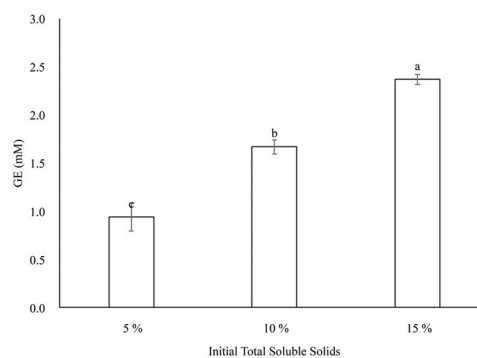
The levels of reducing sugar, total phenolic, ABTS radical cation scavenging activity, and ferric reducing ability power in date fruit wine exhibited a significant increase corresponding to the initial total soluble solids. Final products derived from initial total soluble solids of 5 %, 10 %, and 15 % contained reducing sugar levels of 1.0, 1.9, and 2.9 g/L, respectively (Figure 4(a)), along with total phenolic contents of 0.9, 1.7, and 2.4 mM GE, respectively (Figure 4(b)).

In terms of antioxidant properties, date fruit wine crafted from initial total soluble solids of 5 %, 10 %, and 15 % demonstrated ABTS radical cation scavenging activities of 0.3, 0.5, and 0.8 mM TE,

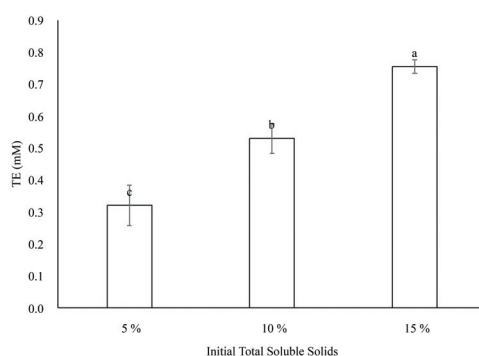
respectively (Figure 4(c)). Additionally, the ferric reducing ability power was measured at 1.1, 2.1, and 3.1 mM FE, respectively, for the corresponding wine samples (Figure 4(d)).



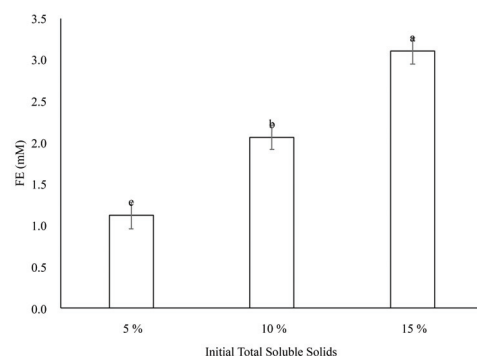
(a) Reducing sugar content



(b) Total phenolic content



(c) ABTS radical cation scavenging activity



(d) Ferric reducing antioxidant power

Figure 4 Chemical properties of date fruit wine produced from different initial total soluble solids.

Date fruit wine produced from initial total soluble solids of 5 %, 10 %, and 15 % exhibited a notable variance in color liking scores, aligning with the corresponding initial total soluble solids (Table 2). However, there was no statistical difference observed in terms of odor, flavor, and overall liking scores, which ranged between 2.7 and 3.2 out of 5.0 (Table 2).

Table 2 Sensory properties of date fruit wine produced from different initial total soluble solids.

Initial TSS	Color*	Odor*	Flavor*	Overall*
5 %	2.55±1.14	2.73±1.13	2.95±0.93	3.17±0.99
10 %	3.27±0.76	2.83±0.99	3.00±0.88	2.95±0.95
15 %	3.75±0.95	2.98±1.21	3.08±1.28	3.12±1.37

* There was no statistical difference.

Given that the date fruit must prepared from 15 % initial total soluble solids depicted the highest levels across various parameters including total soluble solids, pH value, acid content, reducing sugar, total phenolic compounds, ABTS radical cation scavenging activity, ferric reducing ability power, and color liking score, the subsequent study will focus on this concentration of 15 % initial total soluble solids.

Optimal pH value for Production of Date Fruit Wine

Consistent with previous studies, the total soluble solids and pH values of date fruit wine fermented at different pH levels showed a continuous decrease over time. In the final products, there was no significant variation with 5.0 % total soluble solids observed at all three conditions (Figure 5(a)). However, it's noteworthy that date fruit wine produced at pH 4.0 demonstrated a statistically lower pH value compared to the other two conditions (Figure 5(b)).

The acid contents in date fruit wine developed at different pH values remained relatively stable throughout the fermentation process, although the product at pH 5.0 displayed a statistically lower acid content (Figure 5(c)). Upon examination of alcohol contents in date fruit wine fermented at different pH values, there was a statistical decrease observed in alcohol contents corresponding to pH values, with pH 5.0 demonstrating the lowest alcohol content (Figure 5(d)).

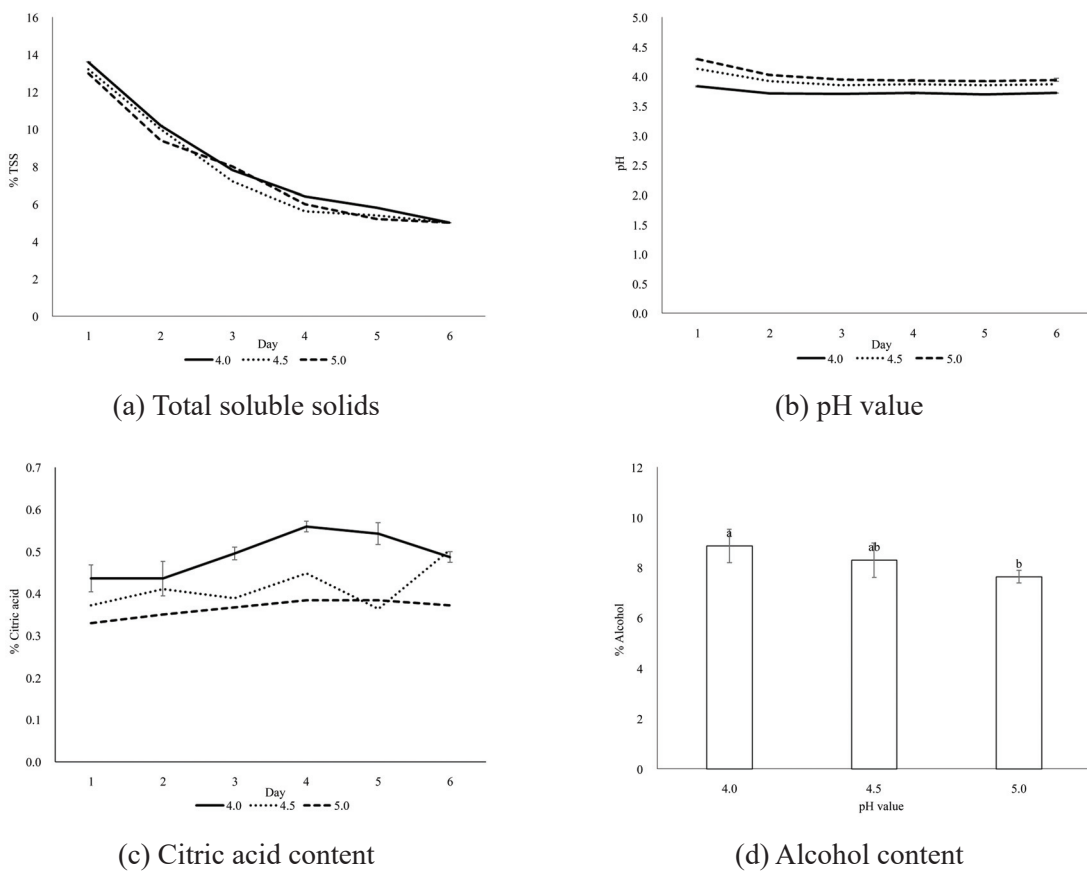


Figure 5 Physical properties of date fruit wine produced at different pH values.

When date fruit wine was fermented at different pH values, the levels of reducing sugar, total phenolic, and ABTS radical cation scavenging activity did not exhibit statistical significance, measuring at 3.4 g/L, 2.6 mM GE, and 0.9 mM TE, respectively (Figure 6(a) - (c)). However, it's worth noting that date fruit wine prepared at pH 5.0 displayed the statistically highest ferric reducing ability power, measuring at 4.1 mM FE (Figure 6(d)).

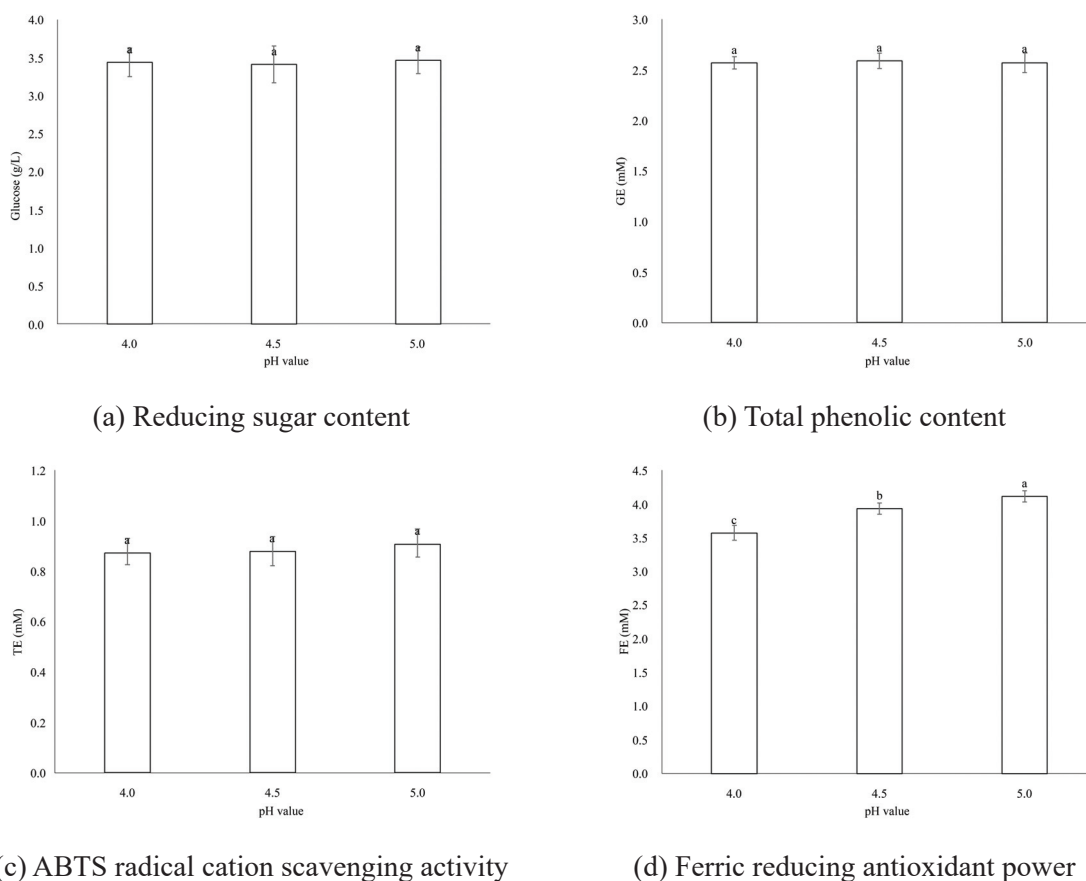


Figure 6 Chemical properties of date fruit wine produced at different pH values.

The sensory evaluation of date fruit wine fermented at different pH values revealed non-statistically different scores across various parameters. Scores for color, odor, flavor, and overall liking ranged between 3.1 and 3.5 out of 5.0 (Table 3).

Table 3 Sensory properties of date fruit wine produced at different pH values.

pH value	Color*	Odor*	Flavor*	Overall*
4.0	3.35±0.84	3.33±1.04	3.37±1.10	3.18±1.19
4.5	3.27±0.97	3.28±1.08	3.35±1.02	3.23±1.17
5.0	3.47±0.87	3.32±1.27	3.13±1.07	3.15±1.12

* There was no statistical difference.

Discussion

The decrease in total soluble solids observed during the fermentation process of date fruit wine could be attributed to the metabolic activities of yeast. Yeast metabolized sugars to produce energy, alcohols, and various other compounds such as organic acids and volatile compounds, while also generating heat and carbon dioxide [17] - [18]. As fermentation progressed, the pH value typically decreased due to the accumulation of organic acids. Date fruit wine originating from higher initial total soluble solids tended to exhibit elevated levels of acidity and alcohol compared to those from lower initial

concentrations. The initial sharp decline in pH values at the onset of fermentation was thought to be a result of carbon dioxide release, which formed carbonic acid upon dissolution [19]. Additionally, organic acids like citric acid, glutamic acid, succinic acid, fumaric acid, malic acid, and oxaloacetic acid, generated during yeast aerobic respiration, contributed to this pH reduction [20]. The yeast strain ICV-D47, known for its high beta-glucosidase activity, facilitated the hydrolysis of polysaccharides into sugars. These sugars were then converted into organic acids, ultimately resulting in date fruit wine with a lower pH value [11].

Definition of low-alcohol wines varies by country. For example, the United States considers wines with less than 8.5 % alcohol by volume to be low-alcohol, while the United Kingdom defines low-alcohol wines as those with less than 1.2 % alcohol by volume. [21]. Therefore, the date fruit wines produced in this study are not classified as low-alcohol products in some regions of the world. Moreover, red wines contained 1.0 - 4.2 g/L reducing sugars and 0.28 - 0.56 % total acids, resulting in a pH range of 3.0 - 4.1 [22]. In contrast, white wine had 0.1 - 0.4 g/L reducing sugars and 0.40 - 0.73 % total acids, leading to a pH range of 3.0 - 3.5 [23]. Although reducing sugars contribute to the sweetness of wine, they also promote the growth of undesirable microorganisms. In contrast, organic acids inhibit the microbial growth but result in the sourness of wine. Therefore, moderate levels of reducing sugars and total acids were preferred in this study.

Heat treatment at 100 °C during the preparation of date fruit must potentially led to a lower content of phenolic compounds compared to fresh date fruit juice, which typically ranged from 442 to 653 mM GE [24]. This suggested that phenolic compounds in date fruit were sensitive to heat or might become bound to other substances during wine fermentation [25]. However, it's noteworthy that date fruit wine contained phenolic compounds at levels comparable to herbal mead, even after undergoing heat treatment at 100 °C for 90 minutes [26]. Furthermore, different yeast strains exhibited varying abilities to form polyphenol-binding polysaccharides. For instance, strain BM4x4 stabilized phenolic compounds during growth but released them significantly after cell death, whereas strain RC212 showed a lower release of phenolic compounds post-death [11].

Ferric reducing ability power assessed the electron transfer capability of antioxidants like vitamin C, flavonoids, carotenoids, and phenolic acids to a ferric complex, which was then converted into a ferrous complex, resulting in a blue color [27]. Date fruit wine typically exhibited a lower level of ferric reducing ability power compared to fresh date fruit juice, which typically ranged from 77 to 83 mM FE [24], indicating the sensitivity of bioactive compounds in date fruit to heat. Variations in yeast metabolism also contributed to differences in levels of ferric reducing ability power. For instance, ability of strain 71B to oxidize isoamyl alcohol and acetic acid into isoamyl acetate could lead to decreased levels of reducing agents and consequently, lower FRAP levels in date fruit wine. Yeast-mediated melatonin synthesis also enhanced ferric reducing ability power, as melatonin served as a potent reducing agent compared to other compounds like vitamin C, vitamin E, glutathione, NADH, and NADPH [28]. Consequently, the antioxidant activity measured by DPPH and ABTS radical scavenging assays correlated with the melatonin content [29]. Additionally, yeast cells contained various antioxidants such as proteins, vitamin E, and carotenoids [30].

The date fruit wine fermented by strain K1-V1116, which received the highest flavor and overall liking scores, likely benefited from the formation of floral esters such as isoamyl acetate, hexyl acetate, and phenylethyl acetate [11]. Wines produced from a substantial amount of date fruit pulp, resulting in

high initial total soluble solids, exhibited elevated levels of reducing sugar, total phenolics, ABTS radical cation scavenging activity, and ferric reducing ability power. Date fruit pulp contained various bioactive compounds including polyphenols (ferulic acid, p-coumaric acid, gallic acid, proanthocyanidin), flavonoids (quercetin, rutin, apigenin), carotenoids (isoflavone, beta-carotene, lycopene, lignan), sterols, and tannins [9], [31]. The significant presence of date fruit pulp likely contributed to the dark color of wine, which was associated with consumer perceptions of a highly concentrated product, consequently leading to an excellent color liking score.

Fermentation at a low pH value yielded date fruit wine with reduced pH levels and ferric reducing ability power. This might be attributed to a higher concentration of protons in the wine, which could potentially bind to electrons from a ferrous complex. Conversely, fermenting wine at a low pH value encouraged yeast growth, leading to elevated levels of acidity and alcohol [32]. Although this research did not assess the microbiological quality of the wine product, no microbial growth was observed during storage at room temperature for a year (data not shown).

Conclusion

The optimal conditions for producing low-alcohol date fruit wine were determined to be the utilization of *S. cerevisiae* strain K1-V1116 to ferment the date fruit must prepared with 15 % initial total soluble solids at pH 4.5. The final product demonstrated moderate levels of pH, acid, and alcohol content, while also receiving the highest scores for flavor and overall liking.

Acknowledgements

Fundamental fund was provided by Thailand Science Research and Innovation (TSRI). Facilities and equipment were supported by Faculty of Engineering and Agro-Industry, Maejo University, Chiang Mai, Thailand.

References

- [1] Ghnimi, S., Umer, S., Karim, A., and Kamal-Eldin, A. (2017). Date Fruit (*Phoenix dactylifera* L.): An Underutilized Food Seeking Industrial Valorization. **NFS Journal**. Vol. 6, pp. 1-10. DOI: 10.1016/j.nfs.2016.12.001
- [2] Afolabi, F. T. and Ola, I. E. (2022). Utilization of Date Palm (*Phoenix dactylifera* L.) Wastes for Bioethanol Production Using *Pichia kudriavzevii* Strains. **Novel Research in Microbiology Journal**. Vol. 6, Issue 1, pp. 1494-1514. DOI: 10.21608/nrmj.2022.217437
- [3] Ali, H. K. Q. and Zulkali, M. M. D. (2013). Ethanol Production from Date Syrup with Flocculent Yeast: Optimization Study. **Environmental Progress and Sustainable Energy**. Vol. 32, Issue 3, pp. 818-823. DOI: 10.1002/ep.11641
- [4] Ahmad, A., Naqvi, S. A., Jaskani, M. J., Waseem, M., Ali, E., Khan, I. A., Manzoor, M. F., Siddeeg, A., and Aadil, R. M. (2021). Efficient Utilization of Date Palm Waste for the Bioethanol Pproduction Through *Saccharomyces cerevisiae* Strain. **Food Science & Nutrition**. Vol. 9, Issue 4, pp. 2066-2074. DOI: 10.1002/fsn3.2175

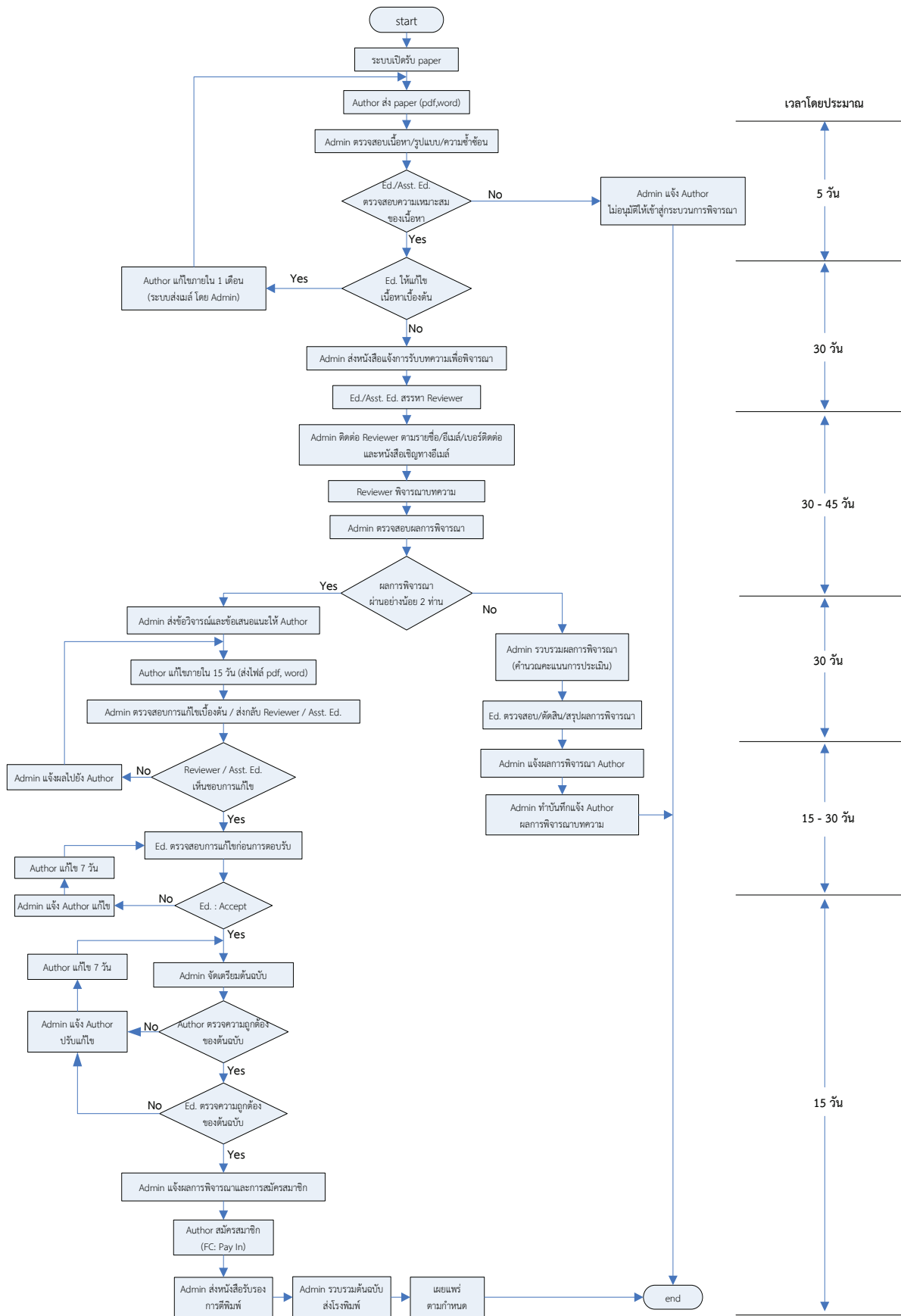
- [5] Acourene, S. And Ammouche, A. (2012). Optimization of Ethanol, Citric Acid, and α -Amylase Production from Date Wastes by Strains of *Saccharomyces cerevisiae*, *Aspergillus niger*, and *Candida guilliermondii*. **Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology**. Vol. 39, Issue 5, pp. 759-766. DOI: 10.1007/s10295-011-1070-0
- [6] El Sohaimy, S. A., Abdelwahab, A. E., Brennan, C., and Aboul-enein, A. M. (2015). Phenolic Content, Antioxidant and Antimicrobial Activities of Egyptian Date Palm (*Phoenix dactylifera* L.) Fruits. **Australian Journal of Basic and Applied Science**. Vol. 9, No. 1, pp. 141-147
- [7] Kchaou, W., Abbès, F., Mansour, R. B., Blecker, C., Attia, H., and Besbes, S. (2016). Phenolic Profile, Antibacterial and Cytotoxic Properties of Second Grade Date Extract from Tunisian Cultivars (*Phoenix dactylifera* L.). **Food Chemistry**. Vol. 194, pp. 1048-1055. DOI: 10.1016/j.foodchem.2015.08.120
- [8] Samad, M. A., Hashim, S. H., Simarani, K., and Yaacob, J. S. (2016). Antibacterial Properties and Effects of Fruit Chilling and Extract Storage on Antioxidant Activity, Total Phenolic and Anthocyanin Content of Four Date Palm (*Phoenix dactylifera*) Cultivars. **Molecules**. Vol. 21, Issue 4, p. 419. DOI: 10.3390/molecules21040419
- [9] Maqsood, S., Adiamo, O., Ahmad, M., and Mudgil, P. (2020). Bioactive Compounds from Date Fruit and Seed as Potential Nutraceutical and Functional Food Ingredients. **Food Chemistry**. Vol. 308, DOI: 10.1016/j.foodchem.2019.125522
- [10] El-Beltagi, H. S., Shah, S. T., Mohamed, H. I., Alam, N., Sajid, M., Khan, A., and Basit, A. (2023). Physiological Response, Phytochemicals, Antioxidant, and Enzymatic Activity of Date Palm (*Phoenix dactylifera* L.) Cultivated Under Different Storage Time, Harvesting Stages, and Temperatures. **Saudi Journal of Biological Sciences**. Vol. 30, Issue 11, DOI: 10.1016/j.sjbs.2023.103818
- [11] Lallemand. (2024). **Wine Yeasts**. Access (17 May 2024). Available (<https://www.lallemandwine.com/en/eastern-countries/products/catalogue/>)
- [12] Hach Company. (2013). **TitraLab pH & Acid Content Analyzer**. Access (3 September 2024). Available (<https://www.hach.com › asset-get.download.jsa>)
- [13] Miller, G. L. (1959). Use of Dinitrosalicylic Acid Reagent for Determination of Reducing Sugar. **Analytical Chemistry**. Vol. 31, Issue 3, pp. 426-428. DOI: 10.1021/ac60147a030
- [14] Pinsirodom, P. and Changnoi, W. (2002). Comparison of Total Polyphenol Content and Antioxidant Potential of Extracts Obtained from Seeds of Different Citrus Fruits Cultivated in Thailand. **Food**. Vol. 32, No. 4, pp. 300-307 (in Thai)
- [15] Re, R., Pellegrini, N., Proteggente, A., Pannala, A., Yang, M., and Rice-Evans, C. (1999). Antioxidation Activity Applying an Improved ABTS Radical Cation Decolorization Assay. **Free Radical Biology and Medicine**. Vol. 26, Issue 9-10, pp. 1231-1237. DOI: 10.1016/S0891-5849(98)00315-3
- [16] Benzie, I. F. F. and Strain, J. J. (1996). The Ferric Reducing Ability of Plasma (FRAP) as a Measure of "Antioxidant Power": the FRAP Assay. **Analytical Biochemistry**. Vol. 239, Issue 1, pp. 70-76. DOI: 10.1006/abio.1996.0292
- [17] Garciae, V., Vasquez, H., Fonseca, F., Manzanares, P., Viana, F., Martinez, C., and Ganga, M. A. (2010). Effects of Using Mixed Wine Yeast Cultures in the Production of Chardonnay Wines. **Revista Argentina de Microbiología**. Vol. 42, No. 3, pp. 226-229
- [18] Akalin, H., Bayram, M., and Anlı, R. E. (2017). Determination of Some Individual Phenolic Compounds and Antioxidant Capacity of Mead Produced from Different Types of Honey. **Journal of the Institute of Brewing**. Vol. 123, Issue 1, pp. 167-174. DOI: 10.1002/jib.396

- [19] Kunkee, R. E. and Amerine, M. A. (1970). **Yeasts in Wine Making**. New York, N. Y.: Academic Press
- [20] Amerine, M. A. and Singleton, V. L. (1972). **Wine: An Introduction for Americans**. Berkeley, C. A.: University of California Press
- [21] Wine Australia. (2021). **Low Alcohol Wine Guide**. Access (3 September 2024). Available (<https://www.wineaustralia.com/getmedia/9d46bb4c-cab2-4b0a-a1d5-eba4bbe3dcdb/Low-alcohol-wine-guide.pdf>)
- [22] Ribereau-Gayon, P., Dubourdieu, D., Doneche, B., and Lonvaud, A. (2006). **Handbook of Enology Volume 1 The Microbiology of Wine and Vinifications**. West Sussex: John Wiley & Sons
- [23] Ribereau-Gayon, P., Glories, Y., Maujean, A., and Dubourdieu, D. (2006). **Handbook of Enology Volume 2 The Chemistry of Wine Stabilization and Treatments**. West Sussex: John Wiley & Sons
- [24] Chunthanom, P., Boontawee, H., Ajwatee, N., Roungkan, S., and Sriwicha, W. (2014). Quality of Fresh Date Palm (*Phoenix dactylifera*) Juices in Sakonnakhon Province. *Khon Kaen Agriculture Journal*. Vol. 42, Supp. 1, pp. 620-626 (in Thai)
- [25] Paralee, P., Praychoen, P., and Phongtongpasuk, S. (2013). Effect of Thermal Treatment on Phytochemical Content and Antioxidant Activity of Gac Juice. *Burapha Science Journal*. Vol. 18, No. 2, pp. 90-96 (in Thai)
- [26] Kawa-Rygielska, J., Adamenko, K., Kucharska, A. Z., and Szatkowska, K. (2019). Fruit and Herbal Meads - Chemical Composition and Antioxidant Properties. *Food Chemistry*. Vol. 283, pp. 19-27. DOI: 10.1016/j.foodchem.2019.01.040
- [27] Sakunphueak, A. (2016). **Free Radicals and Antioxidants**. Access (17 May 2024). Available (https://ccpe.pharmacycouncil.org/index.php?option=article_detail&subpage=article_detail&id=204)
- [28] Boonnar, S., Wilailerdmongkhol, A., and Usansa, U. (2015). Factors Influenced Melatonin Production by *Saccharomyces cerevisiae*. In **Proceedings of the 53rd Kasetsart University Annual Conference**. Bangkok: Kasetsart University (in Thai)
- [29] Kasikorn, T., Panyatip, P., Yongram, C., Dokkiang, O., Sungthong, B., and Puthongking, P. (2019). The Antioxidant Activities, Total Phenolic, Flavonoid and Melatonin Contents of Five Cultivars of Mulberry Leaves. *Journal of Thai Traditional & Alternative Medicine*. Vol. 17, No. 3, pp. 428-436 (in Thai)
- [30] Rujanant, S. and Kongruang, S. (2018). Extraction and Application of Yeast Beta Glucan. *Journal of Food Technology, Siam University*. Vol. 13, No. 1, pp. 19-31 (in Thai)
- [31] Martín-Sánchez, A. M., Cherif, S., Ben-Abda, J., Barber-Vallés, X., Pérez-Álvarez, J. Á., and Sayas-Barberá, E. (2014). Phytochemicals in Date Co-Products and Their Antioxidant Activity. *Food Chemistry*. Vol. 158, pp. 513-520. DOI: 10.1016/j.foodchem.2014.02.172
- [32] Yalcin, S. K. and Ozbas, Z. Y. (2008). Effects of pH and Temperature on Growth and Glycerol Production Kinetics of Two Indigenous Wine Strains of *Saccharomyces cerevisiae* from Turkey. *Brazilian Journal of Microbiology*. Vol. 39, No. 2, pp. 325-332. DOI: 10.1590/S1517-838220080002000024



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 รวมไปถึงเทคนิคการวิเคราะห์ที่ใหม่ 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 ข้อความ “ตารางที่ x” ใช้ขนาดตัวอักษร 16 ตัวหนา วางด้านบน ซิดซ้ายหน้ากระดาษ ตามด้วยชื่อตารางที่เป็นตัวอักษรขนาด 16 ไม่หนา

กรณีบทความภาษาอังกฤษ ข้อความ “Table x” ใช้ขนาดตัวอักษร 12 ตัวหนา วางด้านบน ซิดซ้ายหน้ากระดาษ ตามด้วยชื่อตารางที่เป็นตัวอักษรขนาด 12 ไม่หนา

- **ชื่อรูปภาพ**

กรณีบทความภาษาไทย ข้อความ “รูปที่ x” ใช้ขนาดตัวอักษร 16 ตัวหนา วางด้านล่าง จัดชิดซ้ายหน้ากระดาษ ตามด้วยคำชื่อรูปที่เป็นตัวอักษรขนาด 16 ไม่หนา

กรณีบทความภาษาอังกฤษ ข้อความ “Figure x” ใช้ขนาดตัวอักษร 12 ตัวหนา วางด้านล่าง จัดชิดซ้ายหน้ากระดาษ 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 และให้ใส่เครื่องหมายดอกจันด้วยกำกับไว้ต่อท้ายนามสกุล และตัวเลขยก ให้เขียนไว้ต่อท้ายนามสกุล เพื่อระบุที่อยู่ของผู้เขียน

3. **บทคัดย่อ (Abstract)** ควรสั้น ตรงประเด็น ครอบคลุมสาระสำคัญของการศึกษา ประกอบไปด้วย 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)** เป็นการกำหนดคำสำคัญที่สามารถไปใช้เป็นคำสืบค้นในระบบฐานข้อมูล หากเป็นบทความภาษาไทยต้องมีคำสำคัญ 2 ภาษา คือภาษาไทยและภาษาอังกฤษที่มีความหมายตรงกัน ส่วนกรณีของบทความภาษาอังกฤษให้มีเพียงคำสำคัญในรูปแบบภาษาอังกฤษเท่านั้น จำนวนคำสำคัญที่กำหนดให้มีความสำคัญได้อย่างน้อย 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 จำนวนเอกสารที่นำมาอ้างอิงตอนท้ายต้องมีจำนวนตรงกับที่ถูกอ้างอิงไว้ในส่วนของเนื้อเรื่อง ที่ปรากฏในบทความเท่านั้น 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) รูปภาพที่แสดงต้องมีคำอธิบายอยู่ในเนื้อหาบทความที่มีการระบุถึงรูปภาพนั้น 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 เพื่อให้สามารถเข้าใจได้ เมื่อมีการจัดพิมพ์แบบขาว - 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/rmutjo/index>
- 2) บทความที่ถูกลงเข้ามายังระบบ กองบรรณาธิการจะพิจารณาบทความเบื้องต้นเกี่ยวกับความถูกต้องของรูปแบบทั่วไป บทความที่ไม่ดำเนินการตามรูปแบบที่กำหนดจะไม่รับเข้าสู่กระบวนการพิจารณาโดยผู้ทรงคุณวุฒิ และจะส่งกลับเพื่อทำการแก้ไข ดังนั้น เพื่อให้เกิดความรวดเร็วในเข้าสู่กระบวนการพิจารณาผล ผู้เขียนควรดำเนินการจัดทำวารสารให้ถูกต้องตามรูปแบบที่กำหนดอย่างเคร่งครัด
- 3) เมื่อบทความผ่านการพิจารณาให้ตีพิมพ์ลงในวารสาร และผู้เขียนได้ดำเนินการจัดเตรียมเอกสารต่าง ๆ อย่างถูกต้อง ครบถ้วนตามข้อกำหนดของวารสารเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ผู้เขียนจะได้รับหนังสือรับรองการตีพิมพ์บทความเพื่อเป็นการยืนยัน
- 4) หากทางวารสารตรวจพบว่าบทความที่ถูกลงเข้ามามีการคัดลอก 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 ยินยอมให้มีสิทธิ์ในการเลือกสรรหาผู้กลั่นกรองโดยอิสระเพื่อพิจารณาดันฉบับที่ข้าพเจ้า (และผู้แต่งร่วม) ส่งมา ยินยอมให้กองบรรณาธิการสามารถตรวจแก้ไขต้นฉบับดังกล่าวได้ตามที่เห็นสมควร และข้าพเจ้า “ขอรับรองว่า บทความนี้ไม่เคยลงตีพิมพ์ในวารสารใดมาก่อน ไม่อยู่ระหว่างการพิจารณาจากวารสารอื่น และยินยอมว่าบทความที่ตีพิมพ์ลงในวารสารวิชาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ถือเป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี”

หากข้าพเจ้ามีความประสงค์ในการขอยกเลิกการพิจารณาบทความหลังจากวันที่ได้รับหนังสือยืนยันการรับบทความ ข้าพเจ้ายินดีดำเนินการตามกระบวนการของกองบรรณาธิการวารสาร RMUTI Journal

ลงชื่อ.....

(.....)



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

ขอรับรองว่าบทความ.....

เรื่อง

โดย

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

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

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



(.....)

บรรณาธิการวารสาร RMUTI Journal
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน



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

ข้าพเจ้า (นาย/นาง/นางสาว).....

สังกัดหน่วยงาน

มีความประสงค์ขอลงการพิจารณาบทความ รหัสบทความเรื่อง

.....

.....

ที่ได้ส่งเข้ามายังวารสารระบบการจัดการวารสารออนไลน์ RMUTI Journal เมื่อวันที่

เนื่องจาก (ระบุเหตุผลในการถอนบทความ).....

.....

.....

ลงชื่อ.....ผู้ถอนบทความ

(.....)



RMUTI Journal

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

Vol. 17 No. 3 September–December 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

INSTITUTE OF RESEARCH AND DEVELOPMENT
RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY (ISAN)