



ที่ อว 0657.1200/0151

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก

เลขที่ 1445

วันที่ 09/พ.ค. 2565 เวลา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

744 ถนนสุนทรารายณ์ ตำบลในเมือง

อำเภอเมืองนครราชสีมา

จังหวัดนครราชสีมา 30000

27 เมษายน 2565

เรื่อง ขอแจ้งการเผยแพร่วารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ปีที่ 15 ฉบับที่ 1

เรียน อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก

ตามที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ได้จัดทำวารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ซึ่งเป็นวารสารราย 4 เดือน มีวัตถุประสงค์เพื่อตีพิมพ์และเผยแพร่ผลงานวิจัยของนักวิจัย ทั้งภายในและภายนอกมหาวิทยาลัยฯ เพื่อให้บุคคลทั่วไปได้ทราบและนำไปใช้ประโยชน์นั้น

ในการนี้กองบรรณาธิการวารสาร มทร.อีสาน ขอแจ้งการเผยแพร่วารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ปีที่ 15 ฉบับที่ 1 (มกราคม - เมษายน 2565) ISSN 2672-9369 (Online) ทางเว็บไซต์ <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/rmutijo/index>

จึงเรียนมาเพื่อโปรดพิจารณา

ขอแสดงความนับถือ

(รองศาสตราจารย์ธนากร ภูเงินขำ)

บรรณาธิการ วารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

สถาบันวิจัยและพัฒนา

โทร. 06 1695 8691 วลีรักษ์ (ผู้ประสานงานวารสาร มทร.อีสาน)

อีเมล rmuti.journal@gmail.com

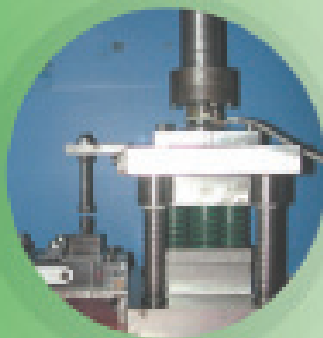
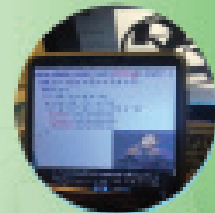


วารสาร มทร.อีสาน

ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ISSN 2672-9369 (Online)

ปีที่ 15 ฉบับที่ 1 มกราคม - เมษายน 2565



วารสาร มทร.อีสาน ได้รับการประเมินคุณภาพอยู่ในฐานข้อมูลของ
ศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (TCI) กลุ่มที่ 2

RMUTI

วารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี RMUTI JOURNAL Science and Technology

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

Rajamangala University of Technology Isan (RMUTI)

วัตถุประสงค์

1. เพื่อเป็นสื่อกลางในการเผยแพร่ผลงานวิจัยด้านวิทยาศาสตร์ วิศวกรรมวิจัย และสิ่งประดิษฐ์ระหว่างนักวิชาการ และมีไว้ให้แก่มหาวิทยาลัยทั่วไป

2. เพื่อเผยแพร่ผลงานทางวิทยาศาสตร์ วิศวกรรมวิจัย และสิ่งประดิษฐ์ของนักวิชาการและมีให้แก่มหาวิทยาลัยที่มีบทบาทต่อการพัฒนา

ทางด้าน วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี เป็นสาขาทางด้าน Physical Sciences ในสาขาวิชา Chemistry, Engineering, Materials Science, Environmental Science และ Mathematics นอกจากนี้ยังครอบคลุมงานวิจัยด้านบริหารโดยผู้ทรงคุณวุฒิที่มีชื่อ ซึ่งครอบคลุมถึง 3 ด้าน แบบผู้ทรงคุณวุฒิและผู้ประเมินบทความที่บอดับเบิล (double-blind review)

ที่ตั้ง

สถาบันวิจัยและพัฒนานา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

744 ต.สุรนารายณ์ อ.โนนสูง อ.เมือง อ.นครราชสีมา 30000

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

E-mail : rmuti.journal@rmuti.com

ปีละหนึ่งฉบับปีละ 3 ฉบับ

ฉบับที่ 1 ปีละจำนวนบทความ - เคมีอนินทรีย์

ฉบับที่ 2 ปีละจำนวนบทความ - เคมีอินทรีย์

ฉบับที่ 3 ปีละจำนวนบทความ - เคมีชีวภาพ

เล่มที่ 1 ฉบับที่ 1 ปีละจำนวนบทความ - เคมีอนินทรีย์ 2558 เล่มที่ 1

ฉบับที่ 1 ฉบับที่ 1 ปีละจำนวนบทความ - เคมีอินทรีย์ 2562 เล่มที่ 1

วิศวกรรมโลหการ

ลิขสิทธิ์

ลิขสิทธิ์ที่ได้จากการตีพิมพ์ ถือเป็นลิขสิทธิ์ของ วารสาร มทร.อีสาน และบทความในวารสารเป็นทรัพย์สินของผู้พิมพ์ มีให้เป็นการยืมใช้เฉพาะคราวแก่การตีพิมพ์วารสาร และมีให้เป็นการยืมใช้ของห้องสมุดมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

วารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
RMUTI JOURNAL Science and Technology

ที่ปรึกษากองบรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.โมษิต ศรีภูธร

อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

ดร.อนันวรรต ทาสูช

ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

รองศาสตราจารย์ ดร.วีรชัย พุทธวงศ์

ประธานหลักสูตรนิติวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กองบรรณาธิการ

ศาสตราจารย์กิตติคุณอำนวยการ	เปรมปรีดี	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์เกียรติคุณ ดร.พีระศักดิ์	ศรีนิเวศน์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ฤทธิ์	สมบัติสมภาพ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.ตะวัน	สุขน้อย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง
ศาสตราจารย์ ดร.ทวนทอง	จุฑาเกตุ	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ศาสตราจารย์ ดร.ปารเมศ	ชุตินา	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.เปี่ยมศักดิ์	เมนะเสวต	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.พิเชษฐ	ลิมสุวรรณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล	เหล่าสุวรรณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.เมธา	วรรณพัฒน์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ศาสตราจารย์ ดร.รัตติกง	ยัมนิรัญ	สถาบันวิทยสิริเมธี
ศาสตราจารย์ ดร.วินัย	ประลมพ์กาญจน์	มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์
ศาสตราจารย์ ดร.ศุภชัย	ปทุมนากุล	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ศาสตราจารย์ ดร.ลำเรียง	จักรใจ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.สุชาติ	ลิมกัตถุญ	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ศาสตราจารย์ ดร.สมชาติ	โสภณรณฤทธิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.สุทธวัฒน์	เบญจกุล	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ศาสตราจารย์ ดร.อรอนงค์	นัยวิกุล	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.กนกอร	อินทราพิเชฐ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รองศาสตราจารย์ ดร.กนต์ธร	ชำนาญประศาสน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รองศาสตราจารย์ ดร.คงศักดิ์	ธาดาทอง	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.เจษฎา	ธาริบุญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร.เชิดศักดิ์	สุขศิริพัฒน์พงษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
รองศาสตราจารย์ ดร.นิรัช	สุดสังข์	มหาวิทยาลัยนเรศวร
รองศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต	กฤตาคม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
รองศาสตราจารย์ ดร.ปราโมทย์	แพ่งคำ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รองศาสตราจารย์ ดร.ปรีชา	กอบเจริญ	วิทยาลัยเทคโนโลยีจิตรลดา

กองบรรณาธิการ (ต่อ)

รองศาสตราจารย์ ดร.มนัส	ชัยจันทร์	มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์
รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภชัย	สิงห์ยะบุศย์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รองศาสตราจารย์ ดร.สรายุธ	เดชะปัญญา	มหาวิทยาลัยบูรพา
รองศาสตราจารย์ ดร.สมพงษ์	คุณย์จินดาชบาพร	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.สมพร	ไชยะ	จังหวัดฉะเชิงเทรา
รองศาสตราจารย์ ดร.สิทธิชัย	แสงอาทิตย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รองศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์	อัศวสุชี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
รองศาสตราจารย์ กาญจนา	ต้นสุวรรณรัตน์	จังหวัดนครราชสีมา
รองศาสตราจารย์ อุดมศักดิ์	สาริบุตร	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไกรสิทธิ์	วสุเพ็ญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักษดา	อัครวุฒิ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ศักดิ์	โยธา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัฐพล	สมนา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศศิพันธ์	วงศ์สุทธาวาส	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุจิตรา	อุ้นเรือน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ดร.จารุพงษ์	บรรเทา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ดร.ชาคริต	นวลฉิมพลี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ดร.เขาวพา	ความหมั่น	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ดร.สุกัญญา	คำห้ำ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ดร.เดือนเพ็ญ	วงศ์สอน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

บรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.ธนากร	ภูเงินขำ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
-------------------------	----------	----------------------------------

ฝ่ายจัดการและธุรการ

นางสาววลัยลักษณ์	ศรีศิลป์ไชย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
------------------	-------------	----------------------------------

สารบัญ

บทความวิจัย

อิทธิพลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์และอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานที่มีต่อไฮบริดซีเมนต์มอร์ตาร์สำหรับวัสดุซ่อมอุดในคานคอนกรีต	1
<i>สกลวรรณ ท่านจิตสุวรรณ, ธวัชชัย โทอินทร์ และธนากร ภูเงินขำ</i>	
การออกแบบและพัฒนาประตูอัจฉริยะเพื่อคัดกรองบุคคลด้วยระบบอัตโนมัติ	11
<i>กัญญา โกสุมภ์, จรรย์ แก้วสา และอภิสิทธิ์ ชูกระรัมย์</i>	
การศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อลักษณะและคุณภาพขอบตัดเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304	24
<i>ณัฐศักดิ์ พรพุดศิริ และพงศกร ทวีตระกูล</i>	
การศึกษาความเสียหายที่เกิดขึ้นจากอนุภาคโปรตอน และแอลฟา บริเวณผิวของโลหะผสมที่ใช้เป็นโครงสร้างในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์	38
<i>สุนันทศักดิ์ ระวังวงศ์, พันธุ์ศักดิ์ กล้ากล่อมจิตร, ภัทรนันท์ โพธิประเสริฐ, ทศพิชา แก้วเกิด, ธนพร เทียนธนากร, จุมพล ขอบขำ และกิตติศักดิ์ ศรีวงศ์ษา</i>	
การเปรียบเทียบประสิทธิภาพกังหันเกลียวเฮดต่ำในแนวนอนเพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้า	48
<i>วิรุณ โมณะตระกูล, รัชพล สันติวารกร, จาริณี จงปลื้มปิติ และพลเทพ เวงสูงเนิน</i>	
ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระและปริมาณสารฟีนอลิกของน้ำลูกหม่อนพาสเจอร์ไรซ์ระหว่างการเก็บรักษา	59
<i>วิภาวดี พันธุ์หนองหัว</i>	
โปรแกรมเชิงปฏิสัมพันธ์ด้วยเทคโนโลยีเสมือนจริงจากโจทย์ปัญหาทางการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ภาษาจาวา สำหรับผู้ที่มีความบกพร่องทางการได้ยิน	71
<i>นพรัตน์ โพธิ์สิงห์ และเอกราวิ คำแปล</i>	
การยับยั้งแบคทีเรียของผ้าฝ้ายเคลือบด้วยคอมพอลสิตไคโตซานและมอนต์-มอริลโลไนต์	86
<i>สิรินันท์ วิริยะสุนทร และปาณิสรา ทองลิ้ม</i>	
การพัฒนาโฟมชีวภาพจากเส้นใยกาบกล้วยและแป้งมันสำปะหลัง (พันธุ์ 81) ที่เคลือบด้วยไฮดรอกซิดาติ	96
สำหรับเป็นบรรจุภัณฑ์อาหาร	
<i>ภาวิณี เทียมดี, สุพัตรา ชมจันทร์ และพรไพลิน พันธุ์สุมา</i>	

Table of Contents

Research Articles

Influence of NaOH Concentration and Sand to Binder Ratio on Hybrid Cement Mortar for Filled Materials in Notched Concrete Beam	1
<i>Sakonwan Hanjitsuwan, Tawatchai Tho-in, and Tanakorn Phoo-ngernkham</i>	
Design and Development of Smart Doors for Automatic Person Screening	11
<i>Kanya Kosum, Jarun Kaewsa, and Apisit Chookaram</i>	
Study of Shearing Temperature on Characterization and Quality of Sheared Edge of SUS304 Austenitic Steel	24
<i>Natthasak Pornputsiri and Pongsakorn Leetrakul</i>	
The Study of Damage Caused by Proton and Alpha Particles on the Surface of Alloys Used as Structures in Nuclear Reactors	38
<i>Sunantasak Ravangvong, Punsak Glumglomchit, Pattaranan Proprsserd, Tatpicha Keawkrid, Thanapon Thiantanakorn, Chumphon Khobkham, and Kittisak Sriwongsa</i>	
Efficiency Comparison of Horizontal Low Head Spiral Turbine for Electrical Energy Production	48
<i>Wiroon Monatrakul, Ratchaphon Suntivarakorn, Jarinee Jongpluempiti, and Pontheep Vengsungnle</i>	
Antioxidant Activities and Phenolic Acids Profile of Pasteurized Mulberry Juice During Storage	59
<i>Wipavadee Punnongwa</i>	
Interactive Program using Augmented Reality Technology from Problems in Java Computer Programming for People with Hearing Impairments	71
<i>Nopparat Posing and Eakrawee Kamplar</i>	
Antibacterial Activity of Coated Cotton Fabrics with Chitosan-Montmorillonite Composites	86
<i>Sirinun Wiriyasoontorn and Panisara Thongluem</i>	
Development of Bio-foam from Banana Sheath and Cassava Starch (81 cultivar) with Natural Wax as Coating Agent for Food Packaging	96
<i>Pawinee Theamdee, Supattra Chomjan, and Pornprilin Pansuma</i>	

อิทธิพลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์และอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานที่มีต่อไฮบริดซีเมนต์มอร์ตาร์สำหรับวัสดุซ่อมอุดในคานคองกรีต

Influence of NaOH Concentration and Sand to Binder Ratio on Hybrid Cement Mortar for Filled Materials in Notched Concrete Beam

สกนวรรณ ท่านจิตสุวรรณ¹ ธวัชชัย โทอินทร์^{2*} และธนากร ภูเงินขำ³

Sakonwan Hanjitsuwan¹ Tawatchai Tho-in^{2*} and Tanakorn Phoo-ngernkham³

Received: August 29, 2021; Revised: September 27, 2021; Accepted: September 27, 2021

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการศึกษาปัจจัยของอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานและความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังรับแรงดัดของคานคองกรีตที่มีการใช้เถ้าลอย-ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เป็นวัสดุซ่อมอุด ผลการศึกษาพบว่ากำลังดัดของคานคองกรีตที่มีรอยบากและใช้วัสดุจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เป็นวัสดุซ่อมแซมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามสมมติฐานที่ตั้งไว้ โดยที่ปัจจัยความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์และอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานที่ใช้ในการผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ส่งผลต่อกำลังดัดของคานคองกรีตที่มีรอยบากอย่างเห็นได้ชัด เมื่อจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ผลิตจากความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 6 โมลาร์ พบว่ากำลังดัดของคานคองกรีตที่มีรอยบากมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานที่เพิ่มขึ้นจนถึงอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.25 หลังจากนั้นกำลังดัดของคานคองกรีตที่มีรอยบากมีแนวโน้มลดลง ขณะที่จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ผลิตจากความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 10 และ 14 โมลาร์ พบว่ากำลังดัดของคานคองกรีตที่มีรอยบากมีแนวโน้มลดลงตามอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานที่เพิ่มขึ้น โดยอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.00 เป็นอัตราส่วนที่มีความเหมาะสมต่อการใช้เป็นวัสดุซ่อมอุดเนื่องด้วยที่อัตราส่วนนี้มีความเป็นเนื้อเดียวกันสูงเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.25 และ 1.50

คำสำคัญ : ไฮบริดซีเมนต์; อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสาน; ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์; กำลังดัดของคานคองกรีตที่มีรอยบาก; วัสดุซ่อมแซม

¹ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง

² คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

³ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

¹ Faculty of Industrial Technology, Lampang Rajabhat University

² Faculty of Technical Education, Rajamangala University of Technology Isan, Khonkaen Campus

³ Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Isan

* Corresponding Author, Tel. 09 0979 5296, E - mail: tawatchai.to@rmuti.ac.th

Abstract

This research investigated the effect of factors of sand to binder (S/B) ratio and sodium hydroxide (NH) concentration on flexural strength of notched beam with filled FA-PC geopolymer mortar. The tested results revealed that flexural strength of notched concrete beam with filled geopolymer mortar as repair material tended to increase as expected. The factors of NH concentration and S/B ratio for manufacturing geopolymer mortar flexural strength of notched concrete beam. The geopolymer mortar made from 6M NH concentration showed that flexural strength of notched concrete beam tended to increase with an increase in S/B ratio up to 1.25 after which the strength tended to decrease. The geopolymer mortar made from 10M and 14M NH concentration showed that flexural strength of notched concrete beam tended to decrease with an increase in S/B ratio. The S/B ratio of 1.00 was the most suitable for use as repair material due to its S/B ratio having higher homogeneity compared with the S/B ratios of 1.25 and 1.50.

Keywords: Hybrid Cement; Sand to Binder Ratio; NaOH Concentration; Flexural Strength of Notched Concrete Beam; Repair Material

บทนำ

จีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสานที่ได้รับความสนใจและมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อเป็นทางเลือกใหม่ในงานวัสดุก่อสร้าง นอกจากนี้ยังเป็นวัสดุเชื่อมประสานที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเนื่องจากสามารถนำวัสดุพลอยได้จากอุตสาหกรรมหรือเกษตรกรรมมาใช้เป็นวัสดุตั้งต้นในการผลิต ซึ่งถือเป็นการจัดการสิ่งแวดล้อมที่ดี อีกทั้งยังใช้อุณหภูมิในการผลิตต่ำ (ต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส) [1] ในประเทศไทยวัสดุตั้งต้นที่นิยมใช้ในระบบการผลิตจีโอโพลิเมอร์ คือ เถ้าลอยที่เป็นวัสดุพลอยได้จากการใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง เถ้าลอยมีองค์ประกอบของซิลิกา อะลูมินา และแคลเซียมออกไซด์เป็นหลัก มีส่วนของอสัณฐานในองค์ประกอบทางแร่ซึ่งมีความเหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาเพื่อเป็นวัสดุจีโอโพลิเมอร์ การผลิตวัสดุจีโอโพลิเมอร์อาศัยหลักการทำปฏิกิริยาของซิลิกาและอะลูมินากับสารละลายด่างและใช้ความร้อนในการเร่งการเกิดปฏิกิริยา โดยปกติเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์มีความสามารถในการรับกำลังได้ต่ำที่อุณหภูมิปกติ (25 องศาเซลเซียส) จึงจำเป็นต้องใช้ความร้อนประมาณ 40 - 90 องศาเซลเซียส ในการเร่งปฏิกิริยาทำให้เป็นข้อจำกัดในการนำไปใช้ในงานทางด้านก่อสร้างจริง [1] - [4] มีนักวิจัยที่ได้ศึกษาหาแนวทางลดข้อจำกัดดังกล่าว ซึ่งพบว่าการเพิ่มปริมาณแคลเซียมออกไซด์ส่งผลเชิงบวกต่อสมบัติทางกลของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ เนื่องจากสามารถก่อให้เกิดผลผลิตไฮดรอกซิลกับจีโอโพลิเมอร์ทำให้มีสมบัติทางกลที่ดีขึ้น [5] - [8] สารละลายด่างที่นิยมใช้ในการผลิตวัสดุจีโอโพลิเมอร์ ได้แก่ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NH) และสารละลายโซเดียมซิลิเกต (NS) ซึ่งสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ทำหน้าที่ในการชะละลายไอออนจากวัสดุตั้งต้น สารละลายโซเดียมซิลิเกตทำหน้าที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาควบแน่นในกลไกการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ [9] - [10]

ทรายเป็นมวลรวมละเอียดที่ใช้ในงานก่อสร้าง มวลรวมสามารถช่วยต้านทานการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและการวิบัติของวัสดุก่อสร้างโดยใช้แรงเสียดทานภายในและแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคในวัสดุ [11] ตามมาตรฐาน ASTM C109 [12] แนะนำให้ใช้อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 2.75 สำหรับงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการศึกษาวัสดุชนิดใหม่เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการประยุกต์ใช้เป็นวัสดุซ่อมแซม ซึ่งจำเป็นต้องมีสมบัติทางด้านเนื้อแน่นสม่ำเสมอ คุณภาพดี และจากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเป็นอีกหนึ่งปัจจัย

ที่มีความสำคัญต่อสมบัติของจีโอโพลิเมอร์ [13] นอกจากนี้การเข้าใจถึงพฤติกรรมของวัสดุที่ใช้ในงานก่อสร้างก็จะทำให้สามารถพัฒนาวัสดุชนิดใหม่ให้มีศักยภาพสามารถใช้งานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพไม่ว่าจะเป็นโครงสร้างหลักหรือการพัฒนาเป็นวัสดุสำหรับงานซ่อมอุดรอยแตกร้าวของโครงสร้างหลักได้ [14] - [18] ดังนั้นผลการทดสอบที่ได้รับจากงานวิจัยนี้จะช่วยให้เข้าใจถึงบทบาทและอิทธิพลของอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานและความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อสมบัติของแก้วลอย-ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ และเป็นข้อมูลพื้นฐานที่น่าสนใจในการพัฒนาจีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุซ่อมแซม

วิธีดำเนินการวิจัย

1. จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

วัสดุตั้งต้นที่ใช้ในการผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ประกอบด้วย แก้วลอยแคลเซียมสูง (FA) จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) องค์กรประกอบทางเคมีและสมบัติทางกายภาพของวัสดุตั้งต้น แสดงในตารางที่ 1 และทรายแม่น้ำ (S) โมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 1.80 ความถ่วงจำเพาะและค่าการดูดซึมน้ำเท่ากับ 2.56 และ 0.98

สารละลายต่างคือสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NH) ความเข้มข้น 6 10 และ 14 โมลาร์ และสารละลายโซเดียมซิลิเกต (NS) ที่มีองค์ประกอบของ Na_2O SiO_2 และ H_2O ร้อยละ 13.89 32.15 และ 46.04 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของแก้วลอยและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

Chemical Ccompositions	FA (%)	OPC (%)
SiO_2	29.32	20.80
Al_2O_3	12.96	4.70
Fe_2O_3	15.64	3.40
CaO	25.79	65.30
MgO	2.94	1.50
Na_2O	2.94	0.40
K_2O	2.93	0.10
SO_3	7.29	2.70
LOI	0.30	10.30
Physical Properties		
Blaine Fineness (cm^2/g)	4300	3600
Mean Particle Size (μm)	8.5	14.6
Specific Gravity	2.23	3.15

2. อัตราส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

อัตราส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 2 แก้วลอยแคลเซียมสูงถูกแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนักวัสดุประสานเพื่อปรับปรุงสมบัติของจีโอโพลิเมอร์ [7] ในการผสมจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ใช้อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.0 และคงที่อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 0.67 ทำการแปรผันอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสาน (S/B) เท่ากับ 1.00 1.25 และ 1.50 และความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 6 10 และ 14 โมลาร์

ขั้นตอนการผสมจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เริ่มต้นด้วยผสมเถ้าลอย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และทรายให้เข้ากันเป็นเวลา 1 นาที จากนั้นเติมสารละลายแล้วผสมเป็นเวลาประมาณ 3 นาที โดยก่อนนำสารละลายต่างไปใช้เป็นของเหลวในส่วนผสมต้องทำการผสมสารละลายโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้เป็นเนื้อเดียวกันก่อนประมาณ 5 นาที

ตารางที่ 2 อัตราส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ (125 ลูกบาศก์เซนติเมตร)

Samples	FA (g)	OPC (g)	NH (Molar)			NS (g)	Sand (g)
			6M NH (g)	10M NH (g)	14M NH (g)		
6M1.00S	90	10	60	-	-	40	100
6M1.25S	90	10	60	-	-	40	125
6M1.50S	90	10	60	-	-	40	150
10M1.00S	90	10	-	60	-	40	100
10M1.25S	90	10	-	60	-	40	125
10M1.50S	90	10	-	60	-	40	150
14M1.00S	90	10	-	-	60	40	100
14M1.25S	90	10	-	-	60	40	125
14M1.50S	90	10	-	-	60	40	150

3. การทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

การเตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบกำลังอัดสามารถทำได้โดยเทจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์สด ลงแบบขนาด 50 x 50 x 50 ลูกบาศก์มิลลิเมตร เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C109 [12] ตัวอย่างที่ได้ทำการเก็บที่อุณหภูมิ 25 - 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้ตัวอย่างเกิดการก่อตัว จากนั้นทำการถอดแบบและห่อด้วยฟิล์มพลาสติกและเก็บไว้ที่ห้องควบคุมอุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับร้อยละ 50 จนครบอายุ 28 วัน โดยผลการทดสอบใช้ค่าเฉลี่ยจากการทดสอบจำนวน 3 ตัวอย่าง

4. คอนกรีต

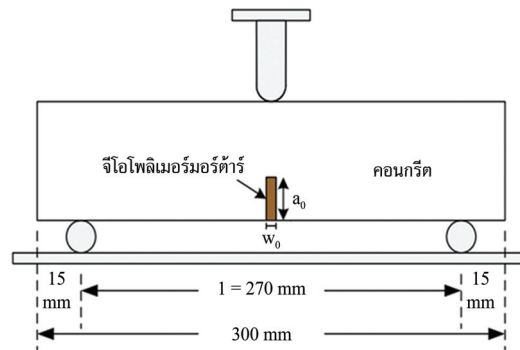
คอนกรีตที่ใช้สำหรับการทดสอบความสามารถในการประสานของวัสดุจีโอโพลิเมอร์ได้ถูกออกแบบตามมาตรฐาน ACI 211.1-91 [19] วัสดุที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างคอนกรีตประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มวลรวมละเอียด และมวลรวมหยาบขนาด 3/8 นิ้ว ซึ่งคอนกรีตที่ออกแบบมีค่ากำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดึงแยกที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 36.0 และ 8.5 เมกะปาสคาล

5. การเตรียมตัวอย่างกำลังรับแรงดัดเมื่อใช้จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เป็นวัสดุซ่อมมอด

การทดสอบกำลังรับแรงดัดของคานคอนกรีตที่มีการใช้จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เป็นวัสดุซ่อมมอด การทดสอบและการวิเคราะห์ผลทดสอบประยุกต์ตามมาตรฐาน ASTM C293-02 [20] การเตรียมตัวอย่างเริ่มต้นด้วยคอนกรีตถูกเทลงในแบบหล่อรูปทรงปริซึมขนาดหน้าตัด 75 x 75 ตารางมิลลิเมตร ยาว 300 มิลลิเมตร แล้ววางไว้ที่อุณหภูมิ 25 - 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบระยะเวลาจึงทำการถอดแบบและบ่มคอนกรีตในน้ำเป็นเวลา 28 วัน หลังจากครบอายุบ่มในน้ำตัวอย่างคอนกรีตถูกห่อด้วยแผ่นพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นเป็นเวลา 60 วัน หลังจากนั้นตัวอย่างคอนกรีตจะถูกตัดให้มีอัตราส่วนความสูงของรอยบาก (a_0) ต่อความลึกของตัวอย่างเท่ากับ 0.4 และอัตราส่วนความกว้างของรอยบาก (w_0) ต่อความสูงของรอยบากเท่ากับ 0.4 [7] ดังแสดงในรูปที่ 1

ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างของการทดสอบกำลังรับแรงดัดของคานคอนกรีตที่มีการใช้จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เป็นวัสดุซ่อมมอดนั้นจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ถูกเทลงในรอยบากของคอนกรีต โดยที่จีโอโพลิเมอร์

จะถูกเทเป็น 2 ชั้น เท่า ๆ กัน แต่ละชั้นกระทุ้ง 25 ครั้ง หลังจากนั้นทิ้งตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิ 25 - 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วจึงทำการหล่อแบบด้วยฟิล์มพลาสติก หลังจากครบระยะเวลา 24 ชั่วโมง ทำการถอดแบบหล่อ และเก็บตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ไว้ที่ห้องบ่มอุณหภูมิ 25 - 30 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ ร้อยละ 50 จนอายุการบ่มครบ 28 วัน ทำการทดสอบกำลังรับแรงคดของคานคอนกรีตที่มีการใช้จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เป็นวัสดุซ่อมอุด โดยค่าที่ได้เป็นการเฉลี่ยจากการทดสอบกับตัวอย่างจำนวน 3 ตัวอย่าง



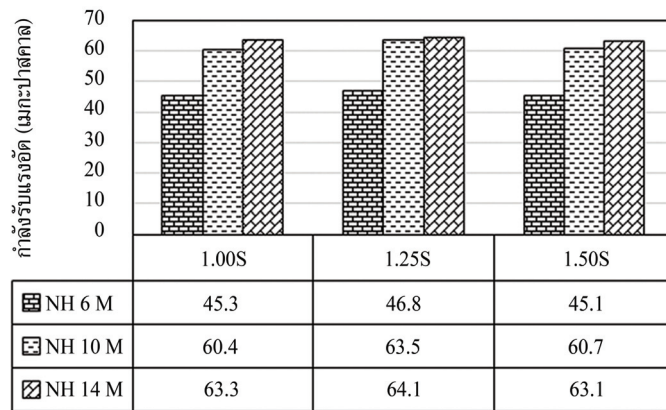
รูปที่ 1 ลักษณะการติดตั้งตัวอย่างในการทดสอบกำลังรับแรงคดของคานคอนกรีตเมื่อใช้จีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุซ่อมอุด [7]

ผลการทดลองและวิจารณ์

1. กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

ปัจจัยของอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานและความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังรับแรงอัดของเกล็ดลอย-ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ดังแสดงในรูปที่ 2 พบว่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ทุกอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานมีแนวโน้มให้ค่ากำลังรับแรงอัดใกล้เคียงกัน แต่อย่างไรก็ตามกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.25 มีแนวโน้มให้กำลังรับแรงอัดสูงสุดทุกความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ อาจเนื่องมาจากอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.25 เป็นปริมาณของทรายที่เหมาะสมส่งผลต่อความเป็นเนื้อเดียวกันภายในระบบของจีโอโพลิเมอร์สำหรับจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.00 มีระยะเวลาการก่อตัวที่รวดเร็วกว่าอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.25 และ 1.50 การมีระยะเวลาการก่อตัวที่รวดเร็วมีความเป็นไปได้ที่จะส่งผลต่อความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ในขั้นตอนการผสมตัวอย่าง [21] สำหรับจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ใช้อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.50 เป็นส่วนผสมที่มีปริมาณทรายเพิ่มขึ้นส่งผลให้กำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มลดลงสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [13] หรืออาจเนื่องจากความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคในวัสดุเปลี่ยนแปลงตามปริมาณทรายที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้จากค่ากำลังรับแรงมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการเพิ่มปริมาณทรายในส่วนผสม คือ เหตุผลที่หนึ่งเกิดจากเมื่อเพิ่มปริมาณทรายทำให้การยึดเกาะกันในส่วนผสมลดลงส่งผลทำให้ความสามารถในการทำงานได้ลดลง และเหตุผลที่สองปริมาณการเกิดเจลสารประกอบใหม่ในกระบวนการจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันมีไม่เพียงพอที่จะยึดอนุภาคทรายทั้งหมดทำให้โครงสร้างเกาะกันอย่างหลวม [22]

เมื่อพิจารณาปัจจัยของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์พบว่า กำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้สามารถชะละลายซิลิกอนและอะลูมิเนียมจากวัสดุตั้งต้นได้มากขึ้นและเกิดเป็นจีโอโพลิเมอร์เจล (NASH) มากขึ้น ทำให้มีความสามารถในการรับกำลังอัดที่เพิ่มขึ้น [3]



รูปที่ 2 กำลังรับแรงอัดของคานคอนกรีตเมื่อใช้จีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์เป็นวัสดุซ่อมมอดที่อายุ 28 วัน

2. กำลังรับแรงคดของคานคอนกรีตเมื่อใช้จีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์เป็นวัสดุซ่อมมอด

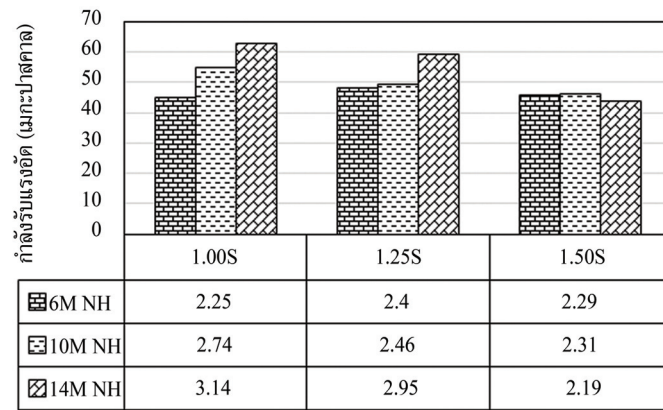
ปัจจัยของอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานและความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังรับแรงคดของคานคอนกรีตเมื่อใช้จีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์เป็นวัสดุซ่อมมอดดังแสดงในรูปที่ 3 พบว่าเมื่อทำการซ่อมแซมด้วยจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ ค่ากำลังรับแรงคดของคอนกรีตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่ง 1.00S และ 1.25S ที่มีค่ากำลังรับแรงคดเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของ NH ที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ 1.50S กำลังรับแรงคดลดลงเมื่อความเข้มข้นของ NH มากกว่า 10 โมลาร์ เหตุผลหนึ่งอาจเนื่องจากปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากพื้นผิวลัมผัสของคอนกรีตสามารถทำปฏิกิริยากับซิลิกาและอะลูมินาจากเถ้าลอยตั้งต้นส่งผลให้มีความแข็งแรงมากขึ้น [23] - [24] เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับคานคอนกรีตที่ยังไม่ได้ทำการซ่อมมอด (1.70 เมกะปาสคาล) ซึ่งกำลังรับแรงคดของคานคอนกรีตที่ความเข้มข้นของ NH 6 โมลาร์ อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสาน 1.25 ให้กำลังรับแรงคดสูงสุด แต่เมื่อจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์มีการใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 10 และ 14 โมลาร์ พบว่ากำลังรับแรงคดของคานคอนกรีตที่ใช้จีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ผลิตจากอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.00 มีค่าสูงกว่าอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.25 และ 1.50 อาจเนื่องจากจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ที่ใช้อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.00 เป็นปริมาณของทรายที่มีความเหมาะสมที่ทำให้วัสดุผสมมีความเป็นเนื้อเดียวกันมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมที่ใช้อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.25 และ 1.50

เมื่อพิจารณาปัจจัยของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์พบว่ากำลังรับแรงคดของคานคอนกรีตเมื่อใช้จีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์เป็นวัสดุซ่อมมอดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้สามารถชะละลายซิลิกอนและอะลูมิเนียมจากวัสดุตั้งต้นได้มากขึ้น ซึ่งซิลิกอนและอะลูมิเนียมที่ถูกออกมาสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากพื้นผิวลัมผัสของคอนกรีตส่งผลให้วัสดุมีความแข็งแรงมากขึ้น [24]

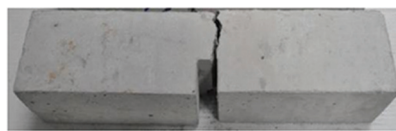
3. ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างคอนกรีต

รูปที่ 4(ก) - (ง) แสดงลักษณะการวิบัติของตัวอย่างคอนกรีตก่อนทำการซ่อมแซมด้วยจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ที่อายุ 28 วัน พบว่าลักษณะการวิบัติของกำลังรับแรงเฉือนคดระหว่างคอนกรีตกับจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์สามารถแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ 1) การวิบัติเกิดขึ้นบริเวณผิวรอยต่อระหว่างจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์และคอนกรีต เนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวคอนกรีตและจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ไม่ดี ได้แก่ 6M1.00S 6M1.25S 10M1.25S 10M1.50S 14M1.25S และ 14M1.50S และ 2) การวิบัติเกิดผ่านเนื้อของคอนกรีตและจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ รอยแตกเกิดขึ้นที่ตำแหน่งแรงดึงสูงสุดของตัวอย่างและเป็นการวิบัติที่สอดคล้องกับการเป็นคอนกรีตที่ตีมีความเป็นเนื้อเดียวกัน ได้แก่ 6M1.50S 10M1.00S และ 14M1.00S ซึ่งสอดคล้อง

กับรายงานวิจัย [25] ที่ได้มีการรายงานไว้ว่าลักษณะการแตกระหว่างคอนกรีตเดิมกับจีโอโพลีเมอร์แบบเสกแสดงถึงการยึดเหนี่ยวที่สูงระหว่างคอนกรีตกับจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ อีกทั้งจากงานวิจัยดังกล่าวยังได้สรุปเพิ่มเติมไว้ว่าการยึดเกาะที่ดีของจีโอโพลีเมอร์กับคอนกรีตเดิมเป็นการเพิ่มทางเลือกที่น่าสนใจการเลือกใช้เป็นวัสดุซ่อมแซมเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุซ่อมแซมทางการค้า



รูปที่ 3 กำลังรับแรงคัตของคานคอนกรีตเมื่อใช้จีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์เป็นวัสดุซ่อมอุดที่อายุ 28 วัน



(ก) คอนกรีตก่อนทำการซ่อมแซม



(ข) 6M1.00S



(ค) 10M1.00S



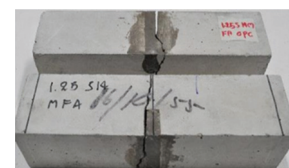
(ง) 14M1.00S



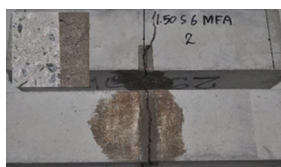
(จ) 6M1.25S



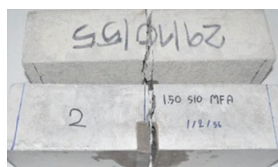
(ฉ) 10M1.25S



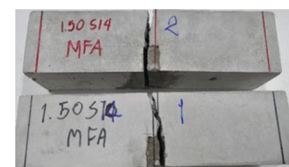
(ช) 14M1.25S



(ซ) 6M1.50S



(ฌ) 10M1.50S



(ฎ) 14M1.50S

รูปที่ 4 ลักษณะการวิบัติหลังการทดสอบที่อายุ 28 วัน

สรุปและอภิปรายผล

จากผลการศึกษานี้สามารถสรุปได้ว่าอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.25 และความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 14 โมลาร์ เป็นอัตราส่วนที่สามารถให้กำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัดสูงสุด (64.1 และ 2.95 เมกะปาสคาล) และเมื่อประยุกต์ใช้งานจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เป็นวัสดุซ่อมมอดูในคานคอนกรีตที่มีรอยบากพบว่าอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.00 และ 1.25 ทำให้ความสามารถในการยึดเกาะกันระหว่างเนื้อจีโอโพลิ-เมอร์มอร์ตาร์กับผิวคอนกรีตดีขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีแนวโน้มของกำลังรับแรงดัดของคานคอนกรีตเพิ่มขึ้นได้

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี ศูนย์กลางมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ที่อนุเคราะห์วัสดุและเครื่องมือในการดำเนินงานวิจัย

References

- [1] Bakharev, T. (2006). Thermal Behaviour of Geopolymers Prepared Using Class F Fly Ash and Elevated Temperature Curing. **Cement and Concrete Research**. Vol. 36, Issue 6, pp. 1134-47. DOI: 10.1016/j.cemconres.2006.03.022
- [2] Chindapasirt, P., Chareerat, T., and Sirivivatnanon, V. (2007). Workability and Strength of Coarse High Calcium Fly Ash Geopolymer. **Cement and Concrete Composites**. Vol. 29, Issue 3, pp. 224-229. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2006.11.002
- [3] Rattanasak, U. and Chindapasirt, P. (2009). Influence of NaOH Solution on the Synthesis of Fly Ash Geopolymer. **Minerals Engineering**. Vol. 22, Issue 12, pp. 1073-1078. DOI: 10.1016/j.mineng.2009.03.022
- [4] Phoo-ngernkham, T., Chindapasirt, P., Sata, V., Hanjitsuwan, S., and Hatanaka, S. (2014). The Effect of Adding Nano-SiO₂ and Nano-Al₂O₃ on Properties of High Calcium Fly Ash Geopolymer Cured at Ambient Temperature. **Materials & Design**. Vol. 55, pp. 58-65. DOI: 10.1016/j.matdes.2013.09.049
- [5] Pangdaeng, S., Phoo-ngernkham, T., Sata, V., and Chindapasirt, P. (2014). Influence of Curing Conditions on Properties of High Calcium Fly Ash Geopolymer Containing Portland Cement as Additive. **Materials & Design**. Vol. 53, pp. 269-274. DOI: 10.1016/j.matdes.2013.07
- [6] Phoo-ngernkham, T., Maegawa, A., Mishima, N., Hatanaka, S., and Chindapasirt, P. (2015). Effects of Sodium Hydroxide and Sodium Silicate Solutions on Compressive and Shear Bond Strengths of FA-GBFS Geopolymer. **Construction and Building Materials**. Vol. 91, pp. 1-8. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.05.001
- [7] Phoo-ngernkham, T., Sata, V., Hanjitsuwan, S., Ridthirud, C., Hatanaka, S., Chindapasirt, P. (2018). High Calcium Fly Ash Geopolymer Mortar Containing Portland Cement for use as Repair Material. **Construction and Building Materials**. Vol. 98, pp. 482-488. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.08.139

- [8] Garcia-Lodeiro, I., Palomo, A., Fernandez-Jimenez, A., and MacPhee, D. E. (2011). Compatibility Studies Between N-A-S-H and C-A-S-H Gels. Study in the Ternary Diagram $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$. **Cement and Concrete Research**. Vol. 41, Issue 9, pp. 923-931. DOI: 10.1016/j.cemconres.2011.05.006
- [9] Davidovits, J. (1999). Chemistry of Geopolymeric Systems, Terminology. In: Davidovits, J. D. R., James, C., Editor. In **Proceedings of Geopolymer Second International Conference**. Saint-Quentin. pp. 9-39
- [10] Phoo-ngernkham, T., Hanjitsuwan, S., Damrongwiriyanupap, N., and Chindaprasirt, P. (2017). Effect of Sodium Hydroxide and Sodium Silicate Solutions on Strengths of Alkali Activated High Calcium Fly Ash Containing Portland Cement. **KSCE Journal of Civil Engineering**. Vol. 21, Issue 6, pp. 2202-2210. DOI: 10.1007/s12205-016-0327-6
- [11] Phoo-ngernkham, T. and Sinsiri, T. (2011). A Study on Properties of Geopolymer Mortar Made from Fly Ash Incorporated Neutral Zeolite. **KMUTT Research and Development Journal**. Vol. 34, No. 1, pp. 31-44 (In Thai)
- [12] ASTM C109. (2002). **Standard Test Method of Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50 mm] Cube Specimens)**. Annual Book of ASTM Standard. Vol.04.01.
- [13] Thakur, R. N. and Ghosh, S. (2009). Effect of Mix Proportion on Compressive Strength and Microstructure of Fly Ash Based Geopolymer Composites. **ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences**. Vol. 4, No. 4, pp. 68-74
- [14] Keyu, C., Dazhi, W., Ming, Y., Qimao, C., and Zhenying, Z. (2021). Mechanical and Durability Properties of Metakaolin Blended with Slag Geopolymer Mortars used for Pavement Repair. **Construction and Building Materials**. Vol. 281, p. 122566. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122566
- [15] Albidah, A., Abadel, A., Alrshoudi, F., Altheeb, A., Abbas, H., and Al-Salloum, Y. (2020). Bond Strength Between Concrete Substrate and Metakaolin Geopolymer Repair Mortars at Ambient and Elevated Temperatures. **Journal of Materials Research and Technology**. Vol. 9, Issue 5, pp. 10732-10745. DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.07.092
- [16] Yan-Shuai, W., Kai-Di, P., Yazan, A., and Jian-Guo, D. (2021). The Bond Between Geopolymer Repair Mortars and OPC Concrete Substrate: Strength and Microscopic Interactions. **Cement and Concrete Composites**. Vol. 119, p.103991. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2021.103991
- [17] Zanotti, C., Borges, P. H. R., Bhutta, A., and Banthia, N. (2017). Bond Strength Between Concrete Substrate and Metakaolin Geopolymer Repair Mortar: Effect of Curing Regime and PVA Fiber Reinforcement. **Cement and Concrete Composites**. Vol. 80, pp. 307-316. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2016.12
- [18] Thumrongvut, J., Seangatith, S., and Kumlue, K. (2013). Tests on Structural Behaviors of Precast Partially-Prestressed Concrete Beam's Joints. **RMUTI Journal**. Vol. 6, No. 2, pp. 15-30 (In Thai)
- [19] ACI 211.1-91. (1991). **Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, HeavyWeight, and Mass Concrete**. American Concrete Institute

- [20] ASTM C293-02. (2002). **Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Center-Point Loading)**. Annual Book of ASTM Standard. Vol.04.02.
- [21] Phoo-ngernkham, T., Hanjitsuwan, S., and Chindaprasirt, P. (2016). Influence of Sand to Binder Ratio on Properties of Geopolymer Mortar Containing Portland Cement. **KMUTT Research and Development Journal**. Vol. 39, No. 2, pp. 127-137 (In Thai)
- [22] Guades, E. J. (2016). Experimental Investigation of the Compressive and Tensile Strengths of Geopolymer Mortar: The Effect of Sand/Fly Ash (S/FA) Ratio. **Construction and Building Materials**. Vol. 127, pp. 484-493. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.10.030
- [23] Hu, S., Wang, H., Zhang, G., and Ding, Q. (2008). Bonding and Abrasion Resistance of Geopolymeric Repair Material Made with Steel Slag. **Cement and Concrete Composites**. Vol. 30, Issue 3, pp. 239-244. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2007.04.004
- [24] Pacheco-Torgal, F., Castro-Gomes, J. P., and Jalali, S. (2008). Adhesion Characterization of Tungsten Mine Waste Geopolymeric Binder. Influence of OPC Concrete Substrate Surface Treatment. **Construction and Building Materials**. Vol. 22, Issue 3, pp. 154-161. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2006.10.005
- [25] Phoo-ngernkham, T., Hanjitsuwan, S., Suksiripattanapong, C., Thumrongvut, J., Suebsuk, J., and Sookasem, S. (2016). Flexural Strength of Notched Concrete Beam Filled with Alkali-Activated Binders Under Different Types of Alkali Solutions. **Construction and Building Materials**. Vol. 127, pp. 673-678. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.10.053

การออกแบบและพัฒนาประตูอัจฉริยะเพื่อคัดกรองบุคคลด้วยระบบ
อัตโนมัติ

Design and Development of Smart Doors for Automatic Person Screening

กัญญา โกสุมภ์^{1*} จรรย์ แก้วสา¹ และอภิสิทธิ์ ชูकरรัมย์¹

Kanya Kosum^{1*} Jarun Kaewsas¹ and Apisit Chookaram¹

Received: October 21, 2021; Revised: January 24, 2022; Accepted: January 24, 2022

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการออกแบบและพัฒนาประตูอัจฉริยะเพื่อคัดกรองบุคคลด้วยระบบอัตโนมัติ การศึกษาครั้งนี้คณะผู้จัดทำทำการออกแบบระบบให้ทำงานตามเงื่อนไข 3 ขั้นตอน คือ 1) ตรวจจับการใส่ หน้ากากอนามัย 2) ตรวจวัดอุณหภูมิของร่างกาย และ 3) ฟันสเปรย์แอลกอฮอล์เพื่อทำความสะอาดมือ เมื่อผู้ใช้บริการผ่านการตรวจสอบทั้ง 3 ขั้นตอน ประตูจะเปิดเพื่อให้ผู้ใช้บริการผ่านได้ ซึ่งประตูอัจฉริยะนี้ ควบคุมการทำงานด้วยบอร์ด Corgidude และบอร์ด Arduino ร่วมกับเซ็นเซอร์ตรวจจับหน้ากากอนามัย ตรวจวัดอุณหภูมิ และจ่ายสเปรย์ฟองแอลกอฮอล์ ผลจากการทดสอบพบว่า ประตูอัจฉริยะเพื่อคัดกรองบุคคล ด้วยระบบอัตโนมัติ สามารถทำการคัดกรองบุคคลได้ 3 ขั้นตอนตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ ใช้เวลาในการทำงาน โดยเฉลี่ย 7.66 วินาทีต่อคน หรือสามารถคัดกรองบุคคลได้สูงสุด 470 คนต่อชั่วโมง เมื่อมีการทำงานต่อเนื่อง และมีการใช้พลังงานไฟฟ้า 7.476×10^{-3} กิโลวัตต์-ชั่วโมง หรือเท่ากับ 0.0243 บาทต่อชั่วโมง

คำสำคัญ: ประตูอัตโนมัติ; การคัดกรอง; ไมโครคอนโทรลเลอร์

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

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

* Corresponding Author, Tel. 09 7343 1107, E - mail: kk_changnoi@yahoo.com

Abstract

The objective of this research is to design and develop smart doors to automatically screen people. In this study, the organizers designed the system to operate according to three conditions: 1) detecting wearing a mask, 2) measuring body temperature, and 3) spraying alcohol to sanitize the hands. When the consumer passes the 3-step verification, the door will open for the consumer to pass. This smart door is operated by the corgi dude board and the arduino is equipped with a temperature sensor, a sensor to detect a mask and an alcohol spray. From the test, it was found out that smart doors can automatically screen people in 3 steps according to the conditions that have been set. It took an average of 7.66 seconds per person to complete the three steps of screening. It can screen up to 470 people per hour when working continuously. The electricity consumption is 7.476×10^{-3} kilowatt-hours or equal to 0.0243 baht per hour.

Keywords: Automatic Door; Screening; Microcontroller

ที่มาและความสำคัญ

จากสถานการณ์การแพร่ระบาดของไวรัสโคโรนา (Coronavirus) หรือโควิด-19 (Covid-19) ในปัจจุบัน โดยที่เชื่อกันว่าสามารถแพร่จากคนสู่คนผ่านทางละอองน้ำมูก น้ำลาย จากจมูก หรือปาก และเนื่องจากเชื่อกันว่าก่อนข้างหน้าจึงทำให้บุคคลที่อยู่ใกล้สามารถรับเชื้อโรคโควิด-19 ได้จากการหายใจเอาละอองเข้าไปจากผู้ป่วย แม้ว่าอาการโดยทั่วไปจะดูเหมือนเป็นไข้หวัดธรรมดา [1] ด้วยเชื้อไวรัสนี้เป็นสายพันธุ์ใหม่ที่ยังไม่มียาปฏิชีวนะตัวไหนที่สามารถรักษาให้หายได้โดยตรง จึงทำได้เพียงการรักษาที่เป็นไปแบบประคับประคองตามอาการเท่านั้น แต่อันตรายที่ทำให้เสี่ยงถึงชีวิตเมื่อติดเชื้อไวรัสชนิดนี้จะเกิดขึ้นเมื่อระบบภูมิคุ้มกันของร่างกายไม่แข็งแรง หรือเชื้อไวรัสเข้าไปทำลายการทำงานของปอดได้จนทำให้เชื้อไวรัสแพร่กระจายลุกลามมากขึ้นสำหรับวิธีการป้องกันเพื่อไม่ให้เกิดการติดเชื้อไวรัสดังกล่าวนั้นเป็นสิ่งสำคัญที่ควรทำตลอดเวลา และเป็นวิธีที่จะป้องกันตัวเองจากการติดเชื้อโควิด-19 คือ การรักษาสุขอนามัยของมือ การเว้นระยะห่างอย่างน้อย 1 เมตรจากผู้อื่น การหลีกเลี่ยงสถานที่แออัดไปด้วยผู้คน หรือสถานที่ที่อากาศไม่ถ่ายเท การรักษาอนามัยในการไอ/จาม และการสวมหน้ากากอนามัยหากไม่สามารถเว้นระยะห่างทางกายได้ [1] แต่ด้วยความจำเป็นในการดำเนินชีวิตประจำวันของมนุษย์ ที่ยังต้องมีการเดินทาง การพบปะผู้คนในสถานที่ต่าง ๆ โดยการเดินทางเข้าไปในอาคาร หรือสถานที่ต่าง ๆ นั้น สำหรับอาคารที่มีประตูอัตโนมัติ ทำให้ผู้คนสามารถเดินทางเข้าออกอาคารได้สะดวก หรือในอาคารเป็นประตูที่ต้องใช้มือสัมผัสกับลูกบิดประตู ด้วยวิถีชีวิตใหม่จะต้องมีพนักงานมาทำหน้าที่ในการตรวจวัดอุณหภูมิ และฉีดสเปรย์แอลกอฮอล์ให้กับบุคคลก่อนเข้าไปภายในอาคาร ซึ่งทำให้มีความเสี่ยงสูงในการสัมผัสกับเชื้อไวรัสโดยตรงของพนักงาน และบุคคลที่ต้องใกล้ชิดกัน จากรายงานการจัดทำชุดประตูคัดกรองเพื่อเป็นการป้องกันการแพร่ระบาดของโรคโควิด-19 โดยเป็นการทำงานของระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ทำงานร่วมกับระบบประมวลผลที่มีการวิเคราะห์เชิงลึกคล้ายความฉลาดของมนุษย์ และสามารถก่อให้เกิดผลลัพธ์ที่เป็นการกระทำได้ ซึ่งสามารถนำไปใช้งานได้จริง [2] การสร้างโปรแกรมทดสอบระบบบันทึกการปฏิบัติงานออนไลน์ด้วยใบหน้า ที่สามารถทำการแยกแยะพนักงานหรือบุคคลที่ทำการบันทึกข้อมูลใบหน้าไว้ในฐานข้อมูล โดยวิธีการนำไฟล์ข้อมูลที่ได้จากการบันทึกจากกล้องเว็บแคมมาทำการประมวลผลโดยแสดงผลผ่านทาง Webpage โปรแกรมที่สามารถทำการแยกแยะพนักงานหรือบุคคลที่ทำการบันทึกข้อมูลใบหน้าไว้ในฐานข้อมูลโดยวิธีการนำไฟล์ข้อมูลที่ได้มาทำการประมวลผลภาพ และเป็นการบันทึกหรือแสดงผล

เกี่ยวกับการรู้จำใบหน้าที่ได้เห็นถึงสถานะภาพของการเข้าปฏิบัติงานของพนักงาน [3] และการออกแบบวงจรเพื่อใช้ควบคุมแขนกลโดยใช้ Arduino เป็นตัวคอนโทรลเลอร์ในการสั่งงานเซอร์โวมอเตอร์เพื่อควบคุมแขนกลและออกแบบโปรแกรมควบคุมแขนกลสำหรับติดต่อกับผู้ใช้งานด้วยโปรแกรม Labview พบว่า สามารถควบคุมให้แขนกลย้ายวัตถุจากตำแหน่งหนึ่งไปวางยังอีกตำแหน่งหนึ่งได้ [4] และมีผู้วิจัยหลายท่านที่ได้ทำการออกแบบและสร้างประตูอัตโนมัติ เพื่อช่วยในการทำหน้าที่ดังกล่าวแทนพนักงาน และเพื่อช่วยคัดกรองบุคคลก่อนเข้าไปภายในอาคาร โดยมีฟังก์ชันและความสามารถการทำงานที่หลากหลายขึ้นอยู่กับราคา จึงอาจทำให้ในบางอาคารยังไม่สามารถที่จะจัดหามาใช้งานได้

จากที่กล่าวมาในข้างต้น คณะผู้จัดทำได้เห็นถึงความสำคัญของประตู และการคัดกรองบุคคลผู้เข้ามาใช้บริการก่อนการเข้าภายในพื้นที่หรืออาคาร ดังนั้น คณะผู้จัดทำจึงทำการออกแบบและพัฒนาประตูทางเข้าอาคารให้สามารถคัดกรองบุคคลด้วยการตรวจสอบการสวมใส่หน้ากากอนามัย ตรวจวัดอุณหภูมิของร่างกาย และการล้างมือด้วยสเปรย์แอลกอฮอล์ของบุคคลผู้เข้าใช้บริการก่อนการเข้าไปภายในอาคารซึ่งควบคุมการทำงานด้วยระบบอัตโนมัติ โดยกำหนดให้ประตูทำงานภายใต้เงื่อนไข 4 ข้อ คือ ตรวจจับการใส่หน้ากากอนามัย ตรวจวัดอุณหภูมิร่างกาย ฉีดพ่นสเปรย์แอลกอฮอล์ล้างมือ และสามารถผ่านเข้าประตูครั้งละ 1 คน เพื่อลดความเสี่ยงในการทำงานของพนักงาน เพื่อเพิ่มความปลอดภัยและสร้างความมั่นใจให้กับบุคคลภายในอาคารว่าบุคคลผู้เข้ามาใช้บริการภายในพื้นที่ หรืออาคารได้ผ่านขั้นตอนการตรวจคัดกรองเบื้องต้นแล้ว

วิธีการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินการวิจัยในครั้งนี้ คณะผู้จัดทำได้แบ่งออกเป็น 5 ส่วน คือ 1) การศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับอุปกรณ์ที่จำเป็นต้องใช้ 2) การออกแบบระบบควบคุมการทำงานของประตูกันทางเข้า-ออก 3) การออกแบบประตูกันทางเข้า-ออก 4) การดำเนินการสร้าง และ 5) ขั้นตอนการทดสอบ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1. การศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับอุปกรณ์ที่จำเป็นต้องใช้

1.1 บอร์ด **Corgitude** [5]

เพื่อประมวผลผลการตรวจจับหน้ากากอนามัยพบว่า เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ประสิทธิภาพสูงที่มีความสามารถในการนำโมเดลทางคณิตศาสตร์วิทยาการคำนวณ หรือแม้กระทั่งโมเดล AI อย่างการจำแนกภาพค้นหาวัตถุ ค้นหาใบหน้ามาทำการประมวผลที่บอร์ดได้อย่างรวดเร็ว สามารถเชื่อมต่อกล้องจอภาพแสดงผลหรือเซ็นเซอร์อื่นมาต่อและเขียนโปรแกรมเพื่อควบคุมและสั่งการได้อย่างมีประสิทธิภาพ สามารถเขียนโปรแกรมหลักด้วยภาษา Python หรือเลือกพัฒนาด้วยภาษา C/C++ เพื่อเข้าถึงประสิทธิภาพสูงสุด โดยสามารถเลือกพัฒนาได้ผลงานได้อย่างหลากหลาย เช่น โมเดลจำแนกรูปภาพรูปภาพสิ่งของต่าง ๆ ได้ถึง 1,000 ชนิด

1.2 จอแสดงผล **LCD** [6] - [7]

เพื่อให้แสดงตัวเลขอุณหภูมิที่วัดได้ที่หน้าจอพบว่า มีลักษณะเป็นของเหลวใสเหมือนแก้วเจียรนัยอัดอยู่ระหว่างเนื้อแก้วสองชั้น เมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงจากภายนอกจะสะท้อนแสงออกมาเป็นมุมต่าง ๆ ใช้เป็นตัวแสดงอักขระ จอภาพนี้ใช้กำลังไฟฟ้าน้อยมาก แต่จะชัดเจนดี นิยมใช้กับเครื่องคำนวณที่มีขนาดเล็ก

1.3 บอร์ด **Arduino** [8]

เพื่อประมวผลและควบคุมอุปกรณ์ต่าง ๆ พบว่า เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR ที่มีการพัฒนาแบบ Open Source ข้อมูลทั้งด้าน Hardware และ Software ตัวบอร์ด Arduino ต่อวงจรอิเล็กทรอนิกส์จากภายนอกแล้วเชื่อมต่อเข้ามาที่ขา I/O ของบอร์ดหรือเพื่อความสะดวกสามารถเลือกต่อกับบอร์ดเสริม (Arduino Shield) ประเภทต่าง ๆ มาเสียบกับบอร์ดบนบอร์ด Arduino แล้วเขียนโปรแกรมฟังก์ชัน

1.4 เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิอินฟราเรด [9]

เพื่อตรวจวัดอุณหภูมิร่างกายพบว่า ใช้สำหรับการวัดอุณหภูมิที่ผิวของวัตถุ ซึ่งเป็นการวัดแบบไม่สัมผัสและไม่ทำลายวัตถุ อาศัยหลักการแผ่รังสีอินฟราเรดออกจากวัตถุ มีหลักการทำงานคือ ตัวตรวจจับรังสีอินฟราเรดทำหน้าที่รับรังสีอินฟราเรด (Infrared) ที่แผ่ออกจากวัตถุเป้าหมาย (Target) ผ่านเลนส์ของเครื่องมือวัดแล้วแปลงรังสีอินฟราเรดให้อยู่ในรูปของสัญญาณทางไฟฟ้า โดยรังสีอินฟราเรดที่ตัวตรวจจับรับไปนั้น ประกอบด้วยรังสีที่วัตถุเป้าหมายแผ่ออกมารวมกับรังสีที่แผ่จากวัตถุอื่น หรือจากสิ่งแวดล้อมสะท้อนออกจากผิวของวัตถุเป้าหมาย จากนั้นวงจรอิเล็กทรอนิกส์จะทำหน้าที่แปลงข้อมูลที่ได้รับมาจากตัวตรวจจับและนำไปแสดงที่ตัวแสดงผล โดยเทอร์โมมิเตอร์ชนิดอินฟราเรดแสดงผลออกมาในรูปของตัวเลข ซึ่งการแปลงรังสีอินฟราเรดที่เซ็นเซอร์ตรวจจับได้ให้อยู่ในหน่วยของอุณหภูมิอาศัยกฎของ Planck (Planck's Law) และกฎของ Stefan-Boltzmann (Stefan-Boltzmann's Law)

1.5 คาปาซิทีฟ พร็อกซิมีตี้เซ็นเซอร์ [10]

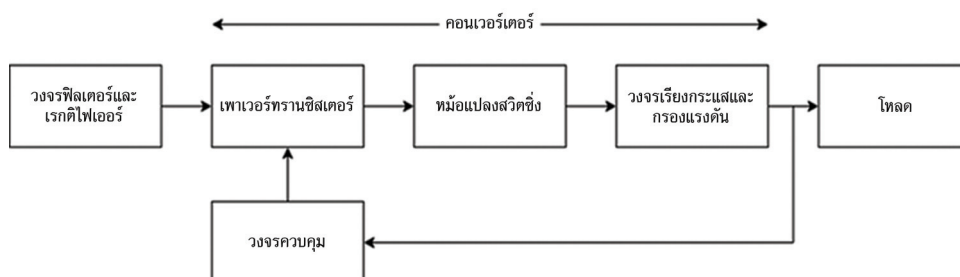
เป็นเซ็นเซอร์ที่ใช้หลักการเปลี่ยนแปลงค่าคาปาซิแตนซ์ โดยการสร้างสนามไฟฟ้าสถิตทำให้สามารถตรวจจับวัตถุได้เกือบทุกประเภททั้งโลหะ และโลหะ สามารถทำการตรวจจับได้โดยตัวเซ็นเซอร์ไม่ต้องสัมผัสกับตัววัตถุ ทำให้เซ็นเซอร์ชนิดนี้มีอายุการใช้งานยืนยาว โดยความสามารถของการตรวจจับของเซ็นเซอร์นั้นจะขึ้นอยู่กับค่าคงที่ของค่าไดอิเล็กตริก (Dielectric Constant) หรือค่า k ของวัตถุ

1.6 ลำโพงบัสเซอร์

เพื่อนำมาใช้ในการส่งสัญญาณเสียงสถานะต่าง ๆ พบว่า เป็นอุปกรณ์ให้กำเนิดเสียงซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าให้อยู่ในรูปสัญญาณเสียง ลำโพงบัสเซอร์แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือแบบแอคทีฟ (Active Buzzer) เป็นวงจรกำเนิดความถี่อยู่ภายใน สามารถสร้างสัญญาณเสียงเตือนได้ทันทีเพียงแค่จ่ายแรงดันไฟฟ้าเข้าไป และแบบพาสซีฟ (Passive Buzzer) ทำงานเหมือนลำโพงขนาดเล็กคือต้องทำการป้อนสัญญาณความถี่เข้าไป ลำโพงชนิดนี้สามารถกำเนิดเสียงที่มีความแตกต่างกันตามความถี่ที่ป้อนเข้ามา การใช้งาน Arduino กับลำโพงบัสเซอร์แบบพาสซีฟนั้นต้องทำการเขียนโปรแกรมเพื่อส่งความถี่จาก Arduino เข้าไปยังลำโพงบัสเซอร์

1.7 สวิตช์ซิ่งเพาเวอร์ซัพพลาย [11]

เพื่อเป็นแหล่งจ่ายไฟตรงคงค่าแรงดันแบบหนึ่ง และสามารถเปลี่ยนแรงดันไฟจากไฟสลับโวลต์สูงให้เป็นแรงดันไฟตรงค่าต่ำ เพื่อใช้ในงานอิเล็กทรอนิกส์ได้เช่นเดียวกันแหล่งจ่ายไฟเชิงเส้น (Linear Power Supply) โดยหัวใจสำคัญของสวิตช์ซิ่งเพาเวอร์ซัพพลายจะอยู่ที่คอนเวอร์เตอร์ เนื่องจากทำหน้าที่ทั้งลดทอนแรงดัน และคงค่าแรงดันเอาต์พุตด้วยองค์ประกอบต่าง ๆ ทำงานตามลำดับดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 องค์ประกอบพื้นฐานของสวิตช์ซิ่งเพาเวอร์ซัพพลาย [11]

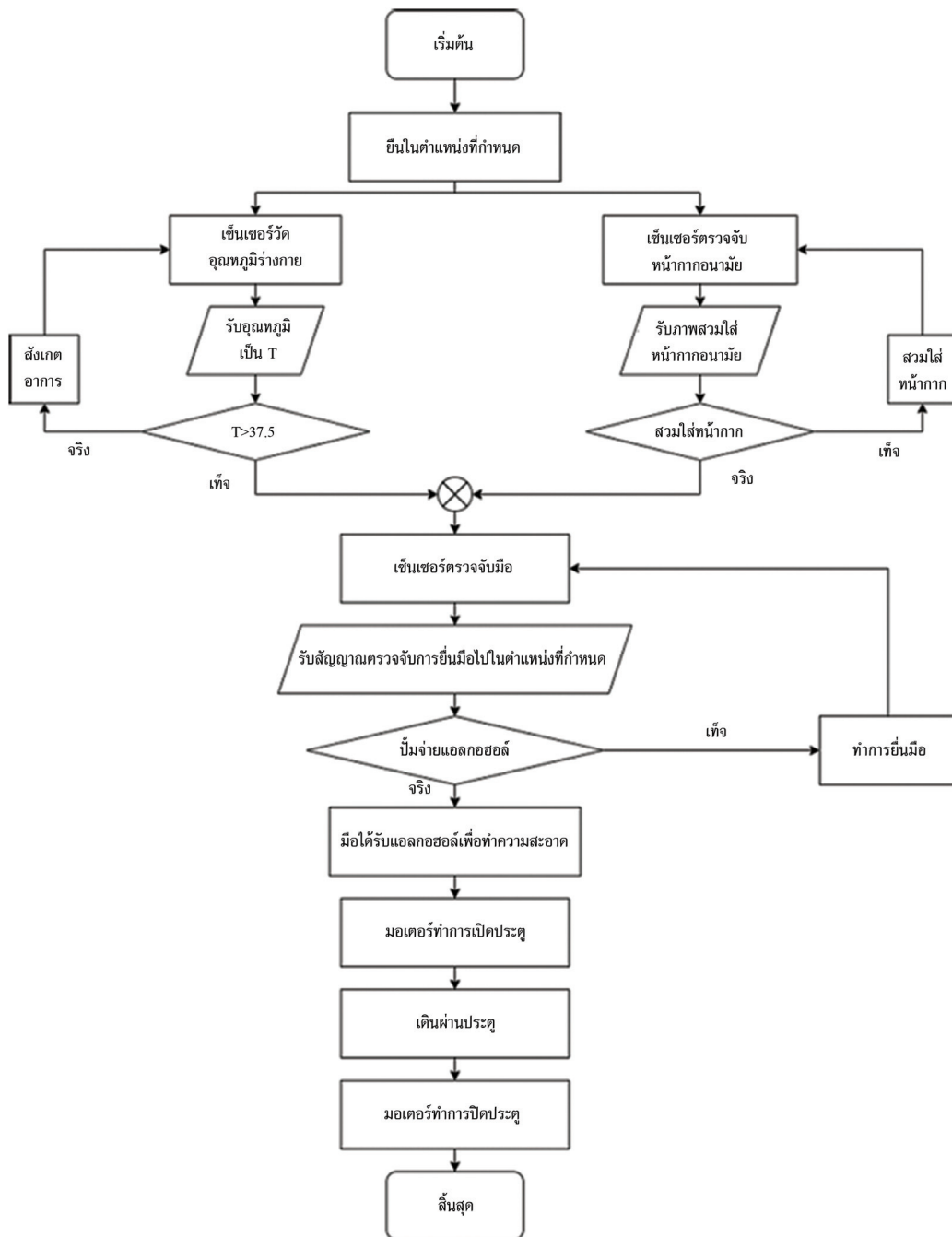
1.8 เซ็นเซอร์ชนิดอัลตราโซนิค [12]

เพื่อทำหน้าที่รับสัญญาณเพื่อทำการเปิดปั้มน้ำเป็นเซ็นเซอร์ที่ทำงานในคลื่นเสียงที่มีความถี่สูงกว่า 20 กิโลเฮิร์ต (kHz) ซึ่งเป็นคลื่นในย่านที่มนุษย์ไม่สามารถได้ยินเสียง ทำงานโดยอาศัยการกระจาย

หรือการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียงไปกระทบกับพื้นผิวของตัวกลาง ซึ่งอาจเป็นของแข็งหรือของเหลว บางส่วนของคลื่นเสียงจะแทรกผ่านเข้าไปในตัวกลางนั้น และส่วนใหญ่ของคลื่นความถี่สูงนี้จะสะท้อนกลับเรียกว่า Echo โดยช่วงเวลาของการสะท้อนกลับของคลื่นเสียงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับระยะห่างระหว่างวัตถุกับเซ็นเซอร์

1.9 มอเตอร์ปิดน้ำฝน [13]

เพื่อใช้ในการควบคุมการเปิด-ปิดของบานประตูพบว่า เป็นมอเตอร์ซึ่งใช้แม่เหล็กถาวรสร้างสนามแม่เหล็กและตัวมอเตอร์ปิดน้ำฝนจะทำงานได้โดยได้รับกระแสไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ไหลผ่านปรองถ่านทำให้เกิดการผลักดันให้มอเตอร์หมุนทำงานภายในจะประกอบด้วย ตัวมอเตอร์ และชุดเฟืองขับ ซึ่งทำหน้าที่ลดความเร็วของมอเตอร์ให้ช้าลง และจะมีปรองถ่านจำนวน 3 ตัว คือ ปรองถ่านความเร็วต่ำ ปรองถ่านความเร็วสูง และปรองถ่านที่ต่อลงกราวด์



รูปที่ 2 Flow Chart การทำงานของระบบประตูอัจฉริยะเพื่อคัดกรองบุคคลด้วยระบบอัตโนมัติ

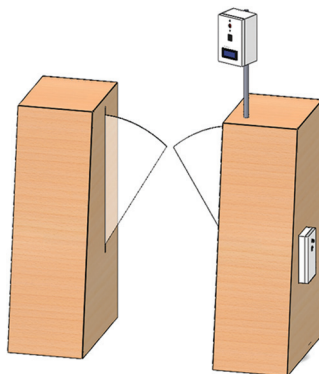
2. การออกแบบระบบควบคุมการทำงานของประตูกันทางเข้า-ออก

สำหรับระบบควบคุมการทำงานของประตูกันทางเข้า-ออก สามารถสรุปได้ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยขั้นตอนการทำงานของประตูอัจฉริยะเพื่อคัดกรองบุคคลด้วยระบบอัตโนมัติสามารถอธิบายได้ดังนี้คือ เมื่อเริ่มการทำงานเซ็นเซอร์ตรวจจับอุณหภูมิร่างกาย และเซ็นเซอร์ตรวจการสวมใส่หน้ากากอนามัย ทำการวัดผลและส่งผลการประมวลผลไปที่บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ เมื่ออุณหภูมิร่างกายต่ำกว่าค่าที่ตั้งไว้ และสวมใส่หน้ากากอนามัย จากนั้นทำการยื่นมือเข้าไปในจุดที่กำหนดเพื่อให้ปัมทำการจ่ายแอลกอฮอล์ล้างมือ เมื่อระบบตรวจพบการล้างมือ ไมโครคอนโทรลเลอร์จะส่งสัญญาณไปยังมอเตอร์เพื่อทำการเปิดประตูให้ผ่านประตูได้ครั้งละ 1 คน จากนั้นไมโครคอนโทรลเลอร์จะส่งสัญญาณไปยังมอเตอร์เพื่อทำการปิดประตู

ในกรณีอุณหภูมิร่างกายสูงกว่าค่าที่ตั้งไว้ ไมโครคอนโทรลเลอร์จะส่งสัญญาณแจ้งเตือนด้วยเสียงหรือในกรณีไม่ได้สวมใส่หน้ากากอนามัย ไมโครคอนโทรลเลอร์จะส่งสัญญาณแจ้งเตือนด้วยเสียง และในกรณีไม่ได้ทำการล้างมือ ไมโครคอนโทรลเลอร์จะส่งสัญญาณแจ้งเตือนด้วยเสียง

3. การออกแบบประตูกันทางเข้า-ออก

ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบประตูกันทางเข้า-ออก ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยเลือกบานประตูแบบปีกผีเสื้อ (Flap Gate) เนื่องจากบานประตูจะเลื่อนเข้าเก็บที่โครงประตูทั้งสองข้างเมื่อมีผู้มาใช้บริการที่ผ่านขั้นตอนการตรวจจับหน้ากากอนามัยและตรวจวัดอุณหภูมิทำให้สามารถลดการสัมผัสระหว่างของบานประตูกับผู้ใช้บริการ โดยตัวของปีกผีเสื้อเป็นแผ่นอะคริลิกใสหนา 5 มิลลิเมตร อยู่สูงจากพื้น 0.4 เมตร ตัวประตูมีขนาดกว้าง 1.4 เมตร ยาว 0.7 เมตร ความสูง 1.5 เมตร ช่องทางเข้า-ออก ของประตูกว้าง 0.7 เมตร โครงสร้างภายในของประตูทำจากเหล็กกล่องขนาด 1 × 1 นิ้ว คลุมด้วยไม้อัดหนา 2.0 มิลลิเมตร



รูปที่ 3 โครงร่างประตู

3.1 การออกแบบโครงสร้างภายในของประตู [14] - [15]

แนวคิดในการกำหนดขนาดของประตูนั้นมาจาก 1) เหมาะสำหรับการติดตั้งในพื้นที่ที่จำกัด 2) สามารถเคลื่อนย้ายได้สะดวกในกรณีมีเหตุฉุกเฉิน จึงใช้เหล็กกล่องเป็นโครงสร้าง โดยขนาดของเหล็กที่นำมาใช้นั้นคำนวณได้จากสมการที่ (1) ใช้วิธีการเชื่อมเพื่อจับยึดชิ้นส่วนของโครงสร้าง โดยมีการคำนวณหาขนาดของรอยเชื่อมจากสมการที่ (2) และ 3) ต้นทุนในการผลิตไม่สูง จึงเลือกใช้ไม้อัดเป็นวัสดุคลุมโครงสร้าง เพราะน้ำหนักเบาและมีราคาถูก

$$F = \frac{\pi^2 EA}{N(Le/k)^2} \quad (1)$$

เมื่อ

F คือ แรงที่กระทำกับเหล็กโครงสร้าง

- E คือ โมดูลัสความยืดหยุ่นของเหล็กโครงสร้าง
 A คือ พื้นที่หน้าตัดของเหล็กโครงสร้าง
 N คือ ค่าความปลอดภัย
 L_e คือ ความยาวสมมูล
 k คือ รัศมีจายเรชั่น

$$F = (\tau_y \cdot 2tL) / N \quad (2)$$

เมื่อ

- F คือ แรงที่รอยเชื่อมจะรับได้
 τ_y คือ ความต้านแรงเฉือนคราก
 t คือ คอของรอยเชื่อม
 L คือ ความยาวของรอยเชื่อม
 N คือ ค่าความปลอดภัย

3.2 การออกแบบกลไกการเลื่อนเปิดปิดของบานประตู [16]

หลังจากการออกแบบโครงสร้างของประตู ทำให้มีเงื่อนไขของการออกแบบการเคลื่อนที่ของบานประตูทั้งสองด้านเพิ่มเติมจากให้ทำงานพร้อมกันทั้งการเปิดและปิดแล้ว คือต้องทำการสังเคราะห์กลไกเพื่อหาความยาว และระยะขจัดของชิ้นส่วนของกลไกบานประตูให้เหมาะสมกับโครงสร้างของประตูและเพื่อไม่ให้เกิดการลือคตัวเองของกลไก จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์ความเร็ว และความเร่งของชิ้นส่วนที่ทำหน้าที่ในการส่งถ่ายกำลังจากมอเตอร์ให้กับบานประตู ที่ต้องมีการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาเพื่อเปิดและปิดบานประตูด้วยวิธี Graphics

3.3 การออกแบบระบบปั๊มจ่ายแอลกอฮอล์ [17]

ในงานวิจัยนี้คณะผู้จัดทำได้ติดตั้งถังสำหรับบรรจุแอลกอฮอล์ไว้ที่ด้านบนภายในโครงประตูและทำที่เปิดเพื่อเติมแอลกอฮอล์ดังแสดงในรูปที่ 5 ทั้งนี้เพื่อความสะดวกในการเติมแอลกอฮอล์ และเพื่อลดความดันด้านดูดหรือ Suction Lift ของปั๊มให้น้อยลง เนื่องจากในการกำหนดขนาดปั๊มจ่ายแอลกอฮอล์นอกจากต้องรู้ขนาดและความยาวของท่อส่งแอลกอฮอล์ อุปกรณ์ประกอบ และวาล์วในระบบเพื่อคำนวณหาอัตราการไหลและ Total Head เพื่อคำนวณหาขนาดแรงม้าของปั๊มสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3)

$$hp = QH / 3960\eta \quad (3)$$

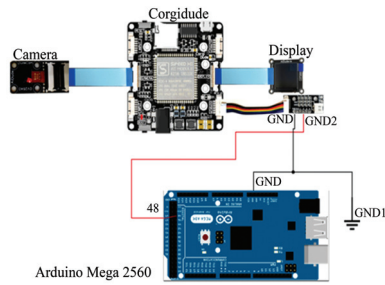
เมื่อ

- hp คือ แรงม้าของปั๊ม
 Q คือ อัตราการไหล (gpm)
 H คือ แรงดันสุทธิ (ft)
 η คือ ประสิทธิภาพของเครื่องสูบน้ำ

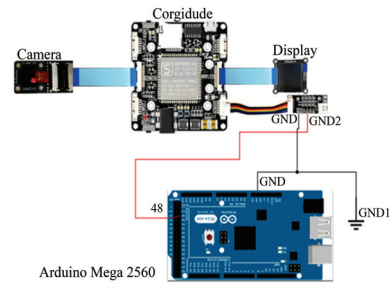
4. การดำเนินการสร้าง

จากการออกแบบการทำงานของประตูอัจฉริยะเพื่อคัดกรองบุคคลด้วยระบบอัตโนมัติ โดยแบ่งออกเป็นวงจรย่อยทั้งหมด 4 วงจร ดังแสดงในรูปที่ 4 โดยรูปที่ 4(ก) คือวงจรสำหรับตรวจจับหน้ากากอนามัยที่การ

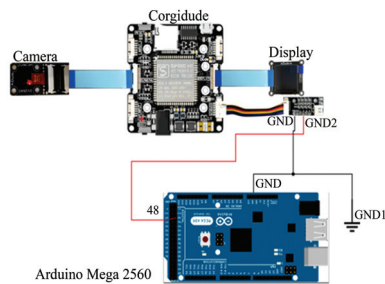
ประมวลผลด้วยบอร์ด Corgitude ซึ่งมีการต่อวงจรให้ทำงานร่วมกับกล้อง หน้าจอ และบอร์ด Arduino รูปที่ 4(ข) คือวงจรสำหรับการตรวจวัดอุณหภูมิร่างกาย โดยใช้เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ Gy-906-dci ต่อวงจรให้ทำงานร่วมกับเซ็นเซอร์วัดระยะ Infrared Photoelectric และแสดงผลตัวเลขของอุณหภูมิไปที่หน้าจอ LCD โดยมีบอร์ด Arduino ทำหน้าที่ในการประมวลผล รูปที่ 4(ค) คือวงจรสำหรับจ่ายแอลกอฮอล์เพื่อทำการล้างมือ โดยใช้เซ็นเซอร์วัดระยะ Ultrasonic Sensor ทำหน้าที่ตรวจจับมือ เพื่อสั่งให้ปั๊มจ่ายแอลกอฮอล์ผ่านรีเลย์ และประมวลผลด้วยบอร์ด Arduino และรูปที่ 4(ง) คือวงจรควบคุมมอเตอร์สำหรับการเปิด-ปิด ประตู ซึ่งควบคุมความเร็วในการทำงานด้วยบอร์ดควบคุมความเร็วของมอเตอร์



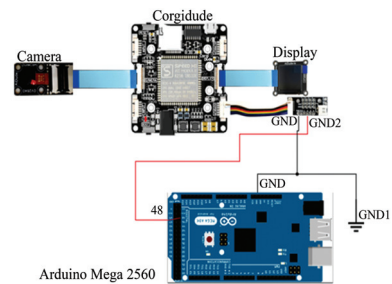
(ก) วงจรสำหรับตรวจจับหน้ากากอนามาย



(ข) วงจรสำหรับการตรวจวัดอุณหภูมิ



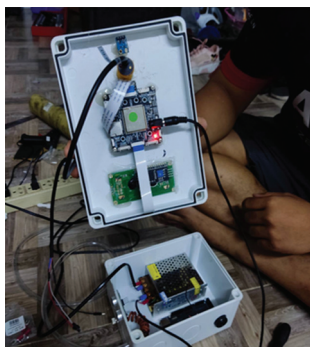
(ค) วงจรสำหรับจ่ายแอลกอฮอล์เพื่อทำการล้างมือ



(ง) วงจรควบคุมมอเตอร์สำหรับการเปิด-ปิด ประตู

รูปที่ 4 วงจรการทำงานของประตูอัจฉริยะเพื่อคัดกรองบุคคลด้วยระบบอัตโนมัติ

หลังจากการออกแบบประตูและวงจรควบคุมการทำงาน คณะผู้จัดทำได้ทำการสร้างและต่อตั้งวงจร ดังแสดงในรูปที่ 5



(ก) ภายในของกล่องควบคุม



(ข) ด้านหน้าของประตู



(ค) ด้านข้างของประตูประตู

รูปที่ 5 ประตูอัจฉริยะเพื่อคัดกรองบุคคลด้วยระบบอัตโนมัติ



(ก) ด้านบนของประตู (ข) ด้านหลังของประตู (ค) ตัวอย่างการใช้งาน
รูปที่ 5 ประตูอัจฉริยะเพื่อคัดกรองบุคคลด้วยระบบอัตโนมัติ (ต่อ)

5. ขั้นตอนการทดสอบ

5.1 การทดสอบการทำงานของเซ็นเซอร์ตรวจจับหน้ากากอนามัย

โดยการทดสอบนี้มีผู้ร่วมการทดสอบ 4 คน ทำการทดสอบคนละ 15 ครั้ง ซึ่งผู้ทดสอบ จะทำการสวมหน้ากากอนามัย 8 ครั้ง ไม่สวมหน้ากากอนามัย 7 ครั้ง จากนั้นจะเริ่มดำเนินการทดสอบโดยการเดินมาที่ประตูเพื่อให้เซ็นเซอร์ทำการตรวจจับการสวมใส่หน้ากากอนามัย เพื่อบันทึกผล

5.2 การทดสอบระยะเพื่อยืนยันวัตถุอุณหภูมิ

โดยการทดสอบนี้มีผู้ร่วมการทดสอบ 4 คน ทำการทดสอบคนละ 15 ครั้ง จากนั้นจะเริ่มดำเนินการทดสอบโดยการเดินมาที่ประตูที่ระยะที่กำหนดไว้ คือ 20 15 และ 10 เซนติเมตร เพื่อให้เซ็นเซอร์ทำการตรวจวัดอุณหภูมิของร่างกาย เพื่อบันทึกผล และนำค่าอุณหภูมิที่ได้ไปเปรียบเทียบกับค่าของอุณหภูมิที่วัดด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิอินฟราเรดแบบไม่สัมผัส เพื่อหาค่าตำแหน่งที่มีความคลาดเคลื่อนในการวัดอุณหภูมิต่ำที่สุด

5.3 การทดสอบการทำงานของระบบจ่ายแอลกอฮอล์

โดยการทดสอบนี้มีผู้ร่วมการทดสอบ 4 คน ทำการทดสอบคนละ 15 ครั้ง ให้ผู้ทดสอบยื่นมือไปที่ตำแหน่งจ่ายแอลกอฮอล์ของเครื่อง เพื่อบันทึกผล

5.4 การทดสอบการทำงานของประตูอัจฉริยะสำหรับคัดกรองบุคคลด้วยระบบอัตโนมัติ

โดยการทดสอบนี้มีผู้ร่วมการทดสอบ 4 คน ทำการทดสอบคนละ 15 ครั้ง ให้ผู้ทำการทดสอบเดินมาที่ตำแหน่งที่มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดที่ได้จากการทดสอบระยะเพื่อยืนยันวัตถุอุณหภูมิในหัวข้อ 5.2 โดยเปิดให้ประตูทำงานตามขั้นตอนที่กำหนดไว้ เพื่อบันทึกผล

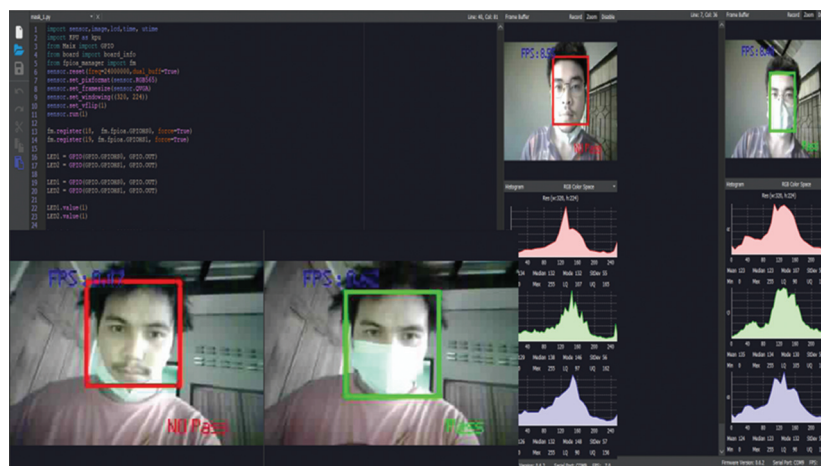
ผลการทดสอบและการอภิปรายผล

จากการดำเนินการทดสอบการทำงานของเซ็นเซอร์ตรวจจับหน้ากากอนามัย ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 1 พบว่า เซ็นเซอร์ตรวจจับหน้ากากอนามัยสามารถทำการตรวจจับการสวมใส่หน้ากากอนามัยได้ถูกต้องทุกครั้ง โดยมี การแสดงผลที่หน้าจอ LCD คือ หากผู้มาใช้บริการมีการสวมใส่หน้ากากอนามัย จอแสดงผลจะขึ้นกรอบสีเขียว ที่บริเวณใบหน้า หากผู้มาใช้บริการไม่สวมใส่หน้ากากอนามัย จอแสดงผลจะขึ้นกรอบสีแดงที่บริเวณใบหน้า ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 6

ในกรณีที่ผู้มาใช้บริการไม่ได้สวมใส่หน้ากากอนามัย จะไม่สามารถผ่านเข้าไปด้านในได้ เพราะระบบตรวจวัดอุณหภูมิ และการล้างมือด้วยแอลกอฮอล์จะไม่ทำงาน จึงทำให้บานประตูไม่เปิดให้ผู้ใช้บริการผ่านเข้าไปด้านในได้

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบการทำงานของเซ็นเซอร์ตรวจจับหน้าากอนามัย

คนที่	ใส่หน้ากากอนามัย (ครั้ง)	ไม่ใส่หน้ากากอนามัย (ครั้ง)
1	8	7
2	8	7
3	8	7
4	8	7
เฉลี่ย	8	7



รูปที่ 6 ตัวอย่างการแสดงผลบนหน้าจอ LCD ของชุดเซ็นเซอร์ตรวจจับหน้าากอนามัย

จากการดำเนินการทดสอบเพื่อหาค่าแทนที่ที่เหมาะสมสำหรับการวัดอุณหภูมิของเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิได้ผลดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่า ผลของค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบเพื่อหาระยะห่างของตำแหน่งการวัดค่าอุณหภูมิที่มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดของเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิของประตูอัจฉริยะเพื่อคัดกรองบุคคลด้วยระบบอัตโนมัติที่ระยะห่าง 20 15 และ 10 เซนติเมตร เปรียบเทียบกับเครื่องวัดอุณหภูมิอินฟราเรดแบบไม่สัมผัสยี่ห้อ Bo Hui รุ่น T-168 พบว่าที่ระยะ 10 เซนติเมตร มีความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิ 0.4 องศาเซลเซียส (ร้อยละ 1.09) ที่ระยะ 15 เซนติเมตร มีความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิ 0.15 องศาเซลเซียส (ร้อยละ 0.41) ที่ระยะ 20 เซนติเมตร มีความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิ 0.02 องศาเซลเซียส (ร้อยละ 0.05) ดังนั้นระยะห่างที่เหมาะสมระหว่างเซ็นเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิประตูอัจฉริยะเพื่อคัดกรองบุคคลด้วยระบบอัตโนมัติกับบุคคลที่เข้าคัดกรองคือ 20 เซนติเมตร เพราะเป็นตำแหน่งที่มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด (ร้อยละ 0.05) เมื่อเทียบกับระยะ 10 และ 15 เซนติเมตร

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบเพื่อหาระยะห่างที่เหมาะสมสำหรับยื่นตรวจวัดอุณหภูมิ

ค่าเฉลี่ย ของการทดสอบ	ระยะห่างจากเซ็นเซอร์ (เซนติเมตร)			อุณหภูมิที่ได้ จากวัดหน้าาก (°C)
	20	15	10	
คนที่ 1	36.84	36.68	36.39	36.6
คนที่ 2	36.59	35.88	35.93	36.7
คนที่ 3	36.36	36.86	36.14	36.7
คนที่ 4	36.72	36.6	36.56	36.6
เฉลี่ย	36.63	36.5	36.25	36.65

ในกรณีที่ผู้มาใช้บริการไม่ผ่านขั้นตอนของการตรวจวัดอุณหภูมิ คือ มีอุณหภูมิร่างกายสูงเกิน 37.5 องศาเซลเซียส จะไม่สามารถผ่านเข้าไปด้านในได้ เพราะระบบควบคุมการล้างมือด้วยแอลกอฮอล์จะไม่ทำงาน จึงทำให้บานประตูไม่เปิดให้ผู้ใช้บริการผ่านเข้าไปด้านในได้

จากการดำเนินการทดสอบการทำงานของเซ็นเซอร์จ่ายแอลกอฮอล์ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 3 พบว่า เมื่อมีผู้มาใช้บริการที่ผ่านขั้นตอนการตรวจจับหน้ากากอนามัย และการตรวจวัดอุณหภูมิร่างกายแล้ว เมื่อยื่นมือไปที่ตำแหน่งจ่ายแอลกอฮอล์ เซ็นเซอร์สามารถทำการตรวจพบและสามารถส่งสัญญาณเพื่อสั่งให้ปั๊มจ่ายแอลกอฮอล์ได้ในทุกครั้งที่มีผู้ใช้บริการ

ในกรณีที่ผู้มาใช้บริการไม่ผ่านขั้นตอนของการล้างมือด้วยแอลกอฮอล์ จะไม่สามารถผ่านเข้าไปด้านในได้ เพราะระบบควบคุมการเปิด-ปิดบานประตูจะไม่ทำงาน จึงทำให้บานประตูไม่เปิดให้ผู้ใช้บริการผ่านเข้าไปด้านในได้

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบการทำงานของเซ็นเซอร์จ่ายแอลกอฮอล์

คนที่	จ่ายแอลกอฮอล์ (ครั้ง)	ไม่จ่ายแอลกอฮอล์ (ครั้ง)
1	15	0
2	15	0
3	15	0
4	15	0
เฉลี่ย	15	0

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบการทำงานของประตูอัจฉริยะเพื่อคัดกรองบุคคลด้วยระบบอัตโนมัติ

คนที่	การใส่ หน้ากาก อนามัย	การวัด อุณหภูมิ ร่างกาย	การล้างมือ ด้วย แอลกอฮอล์	บานประตู เปิด	บานประตู ปิด	เวลาใน การทำงาน (วินาที)	กำลัง ไฟฟ้า (วัตต์)
1	X	X	X	X	X	7.42	53.53
2	X	X	X	X	X	8.22	60.13
3	X	X	X	X	X	7.47	58.81
4	X	X	X	X	X	7.51	56.61
เฉลี่ย	X	X	X	X	X	7.66	57.27

หมายเหตุ: X คือ สถานการณ์ทำงานปกติ

เมื่อดำเนินการทดสอบระบบควบคุมทั้งหมดของประตูอัจฉริยะเพื่อคัดกรองบุคคลด้วยระบบอัตโนมัติ พบว่า มีการทำงานได้ตามที่คณะผู้จัดทำออกแบบไว้ ดังนั้นจึงได้ดำเนินการทดสอบการทำงานของประตูอัจฉริยะเพื่อคัดกรองบุคคลด้วยระบบอัตโนมัติ ซึ่งได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4 ที่พบว่า การทำงานของระบบภายในของประตูอัจฉริยะเพื่อคัดกรองบุคคลด้วยระบบอัตโนมัติที่ประกอบด้วย การตรวจจับหน้ากากอนามัย การวัดอุณหภูมิร่างกาย และการล้างมือด้วยแอลกอฮอล์นั้น ระบบมีการทำงานปกติคือ สามารถคัดกรองผู้ให้บริการให้ผ่านเข้าไปในอาคารได้ร้อยละ 100 โดยต้องสวมใส่หน้ากากอนามัย ต้องมีอุณหภูมิร่างกายไม่เกิน 37.50 องศาเซลเซียส และต้องทำการล้างมือด้วยแอลกอฮอล์ บานประตูจึงจะเปิดให้ผู้ให้บริการผ่านเข้าไปด้านใน และเมื่อเดินผ่านบานประตูเข้าไปถึงเซ็นเซอร์ตรวจจับบุคคล บานประตูจึงจะปิด โดยระยะเวลาในการทำงานจากขั้นตอนแรกถึงขั้นตอนสุดท้ายมีค่าเฉลี่ย 07.66 วินาทีต่อคน และมีค่าการใช้กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 57.27 วัตต์ต่อรอบการทำงาน

โดยประจักษ์จริยะเพื่อคัดกรองบุคคลด้วยระบบอัตโนมัติที่มีความสามารถในการคัดกรองบุคคลผู้มาใช้บริการได้อย่างต่อเนื่อง 470 คน ภายใน 1 ชั่วโมง มีปริมาณการจ่ายแอลกอฮอล์เพื่อใช้สำหรับล้างมือ 0.4681 มิลลิเมตรต่อครั้งต่อรอบการทำงาน โดยมีค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทำงาน 7.476×10^{-3} กิโลวัตต์-ชั่วโมง และหากประจักษ์จริยะเพื่อคัดกรองบุคคลด้วยระบบอัตโนมัติทำงานต่อเนื่อง 10 ชั่วโมงต่อวัน จะใช้พลังงานไฟฟ้า 74.76×10^{-3} กิโลวัตต์-ชั่วโมง และเมื่อคำนวณค่าไฟฟ้าฐาน 3.2484 บาทต่อหน่วย จะทำให้มีการสูญเสียค่าใช้จ่ายจากค่าพลังงาน 0.24 บาทต่อวัน หรือ 97.45 บาทต่อเดือน

สรุปผล

ประจักษ์จริยะเพื่อคัดกรองบุคคลด้วยระบบอัตโนมัติ เป็นประจักษ์อัตโนมัติที่สามารถคัดกรองบุคคลด้วยการตรวจจับการสวมใส่หน้ากากอนามัย การวัดอุณหภูมิร่างกาย และการจ่ายแอลกอฮอล์ โดยมีการนำไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ภาษา Python และภาษา C มาใช้ในการควบคุมการทำงานของเซ็นเซอร์และอุปกรณ์ภายในต่าง ๆ โดยพบว่าส่วนของการตรวจจับการสวมใส่หน้ากากอนามัย มีความสามารถคัดกรองในการตรวจจับหน้ากากอนามัยได้ร้อยละ 100 ส่วนของการตรวจวัดอุณหภูมิด้วยเซ็นเซอร์ Gy-906 สามารถตรวจวัดอุณหภูมิที่ระยะ 20 เซนติเมตร โดยมีความเคลื่อนของอุณหภูมิ 0.02 องศาเซลเซียส (ร้อยละ 0.05) และส่วนของการจ่ายแอลกอฮอล์เพื่อทำการล้างมือสามารถทำการจ่ายได้เป็นปกติ เมื่อผู้มาใช้บริการทำการคัดกรองครบและผ่านทั้ง 3 ขั้นตอนที่กำลังมา บานประตูจะเปิดให้ผู้ให้บริการผ่านเข้าไปด้านใน และบานประตูจะปิดเมื่อผู้ให้บริการเดินผ่านเข้าไปถึงเซ็นเซอร์ตรวจจับบุคคล ซึ่งรวมเวลาในการทำงาน 07.66 วินาทีต่อคน มีปริมาณการจ่ายแอลกอฮอล์ 0.4681 มิลลิเมตรต่อครั้งต่อรอบการทำงาน และใช้พลังงานไฟฟ้า 7.476×10^{-3} กิโลวัตต์-ชั่วโมง

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณคณาจารย์ บุคลากร และนักศึกษาสาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ที่ให้การสนับสนุนการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้

References

- [1] Department of Disease Control. (2019). **Guidelines for the Prevention and Control of Coronavirus Disease 2019 in Schools and Educational Institutions**. Access (5 May 2021). Available (<https://ddc.moph.go.th>)
- [2] Kruawan, N., Krakhunthod, N., Talatkwan, N., and Kongsang, J. (2018). **The Operation of a Microcontroller System Works with an In-Depth Analytical Processing System**. Vocational Project Satuk Vocational College
- [3] Kaenphet, T. (2012). **Face-to-Face Online Performance Recording System**. M. Eng. Computer Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
- [4] Loylom, C. (2017). **Industrial Mechanical Arm Simulation Set**. M. Eng. Electrical Engineering Burapha University
- [5] Maker Asia. (2562). **Corgitude Board**. Access (15 May 2021). Available (<https://corgitude.makerasia.com>)
- [6] Phurak, T. (2015). **Display with LCD Display**. Documents for Teaching Basic Arduino Courses, Saraburi: Saraburi Technical College

- [7] Wisetkaew, W. (2018). **Display with LCD Display**. Teaching Documents for Microcontroller Course. Yasothon Technical College
- [8] Maneetham, D. (2015). **Arduino Board**. Bangkok: SE-Education Public Company Limited
- [9] Analog Read. (2562). **Infrared Temperature Sensor MLX90614ESF**. Access (20 May 2021). Available (<https://www.analogread.com>)
- [10] Supremelines. (2562). **Capacitive Proximity Sensor**. Access (15 May 2021). Available (<https://www.supremelines.co.th>)
- [11] Kamchomphu, S. (1999). Elements of Switching Power Supply. **Journal of Electronic Semiconductors**. Vol. 202, pp. 137-146
- [12] Cybertice. (2559). **Ultrasonic Module hc-sr04**. Access (15 May 2021). Available (<https://www.cybertice.com>)
- [13] Including Car, Motorcycles, Other Vehicles. (2013). **Wiper System**. Access (15 May 2021). Available (<https://www.auto2drive.com>)
- [14] Ung Phakorn, W. and Thanadngan, C. (1998). **Machine Design I**. Bangkok: SE-Education Public Company Limited
- [15] Ung Phakorn, W. and Thanadngan, C. (2013). **Machine Design II**. Bangkok: SE-Education Public Company Limited
- [16] Norton, R. L. (2009). **Kinematics and Dynamics of Machinery**. 1st Edition (SI unit). McGraw-Hill
- [17] Mekhphuksawong, P. and Pheimchat, W. (2000). **Pumps in Engineering**. 1st Edition. Bangkok: King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

การศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อลักษณะและคุณภาพขอบตัด เหล็กกล้าไร้สนิม SUS304

Study of Shearing Temperature on Characterization and Quality of Sheared Edge of SUS304 Austenitic Steel

ณัฐศักดิ์ พรพุดศิริ^{1*} และพงศกร หลีตระกูล¹

Natthasak Pornputsiri^{1*} and Pongsakorn Leetrakul¹

Received: November 17, 2021; Revised: February 25, 2022; Accepted: March 3, 2022

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบลักษณะและคุณภาพของขอบตัดแผ่นเปล่าโลหะแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS304 ขนาดความหนา 1 มิลลิเมตร ที่ได้จากการตัดเฉือนที่อุณหภูมิแบบอุ่นโดยกระบวนการทดสอบการตัดเฉือน จะดำเนินการด้วยชุดแม่พิมพ์ตัดแผ่นเปล่าลักษณะเป็นวงกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร และกำหนด ระยะช่องว่างคมตัดของแม่พิมพ์ที่ร้อยละ 8 ของความหนาโลหะแผ่น โดยก่อนการป้อนตัดจะอบให้ความร้อนแผ่นชิ้นงาน ภายในเตาอบไฟฟ้าที่ 4 ระดับอุณหภูมิคือ อุณหภูมิห้อง 200 400 และ 600 °C การตรวจสอบลักษณะและคุณภาพ ขอบตัดของชิ้นงานสำเร็จจะพิจารณาจากค่าความสูงส่วนต่าง ๆ บนขอบตัดโดยใช้กล้องจุลทรรศน์กำลังขยายต่ำ และกล้องจุลทรรศน์แบบแสง ส่วนเครื่องทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์จะถูกนำมาใช้เพื่อตรวจสอบค่าความแข็ง ระดับจุลภาคบริเวณขอบตัดของชิ้นทดสอบเพื่อประเมินผลด้านความเครียดแข็งหลังการตัดเฉือน จากผลการทดลอง พบว่าการตัดเฉือนโลหะแผ่นที่อุณหภูมิห้องจะส่งผลให้ขอบตัดมีส่วนรอยแตกเกิดขึ้นสูงและส่วนรอยแตกจะมีแนวโน้ม ลดลงเมื่อโลหะแผ่นมีอุณหภูมิการตัดเฉือนเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่เดียวกันส่วนโค้งมน ส่วนเรียบตรง และส่วนของการเกิดครีบจะมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิการตัดเฉือนเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งมีความสัมพันธ์กับผลการทดสอบ ความแข็งที่บริเวณขอบตัดเนื่องจากวัสดุมีค่าดัชนีความเครียดแข็งลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น จากผลการวิจัยนี้ จึงสามารถนำข้อมูลผลการทดลองไปประยุกต์ใช้เพื่อกำหนดเงื่อนไขเกี่ยวกับอุณหภูมิการตัดเฉือนที่เหมาะสม ในการป้อนตัดโลหะแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม โดยพิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของโลหะแผ่นขณะตัดเฉือน ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพขอบตัดชิ้นงานสำเร็จ

คำสำคัญ : แม่พิมพ์ตัด; อุณหภูมิการตัดเฉือน; โลหะแผ่น; คุณภาพขอบตัด; เหล็กกล้าไร้สนิม

¹ คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

¹ Faculty of Industry and Technology, Rajamangala University of Technology Rattanakosin

* Corresponding Author, Tel. 08 6667 6802, E - mail: natthasak.por@rmutr.ac.th

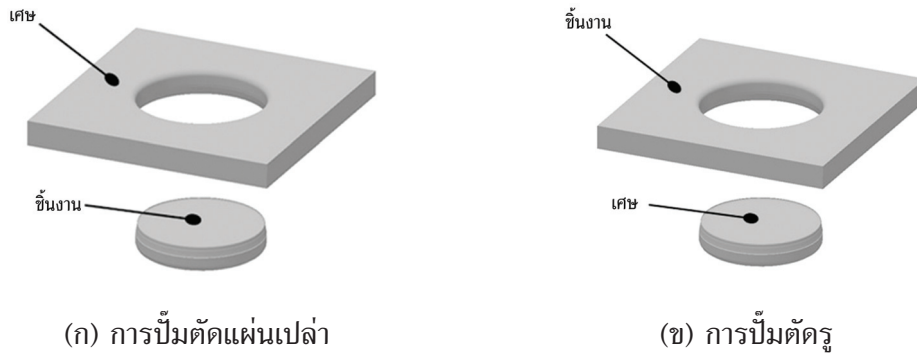
Abstract

This research aims to investigate the characteristics and quality of the cutting edge of SUS304 stainless steel sheet with 1 mm thickness by hot shearing process. The shearing test was carried out with a circular blanking die with a diameter of 20 mm and the cutting clearance set at 8 percent of the sheet metal thickness. On the pre-blanking, the sheet metal was heated in an electric furnace at 4 temperature levels, consisting of room temperature, 200, 400, and 600 °C. The verification of the characteristics and cutting edge quality of finished blank was determined by region height values on the cutting edge using an optical microscope, optical microscope and scanning electron microscope. A Vickers hardness tester was used to investigate the micro-hardness of the specimen cutting edge to assess the strain hardening after shearing. The results showed that sheet metal sheared at room temperature had the highest fracture region on the cutting edge and a tendency to deteriorate when the sheet metal temperature increased. At the same time, roll over regions, shear surface regions and burrs tended to increase with an increase in the shearing temperature which was in relation to the hardness test results at the cutting edge. This is because the strain hardening index decreases with increasing temperature. Based on the findings, this experimental data can be applied to determine the optimum shearing temperature conditions for stainless steel sheet metal blanking which is determined by the relationship between the sheet metal temperature which directly affects the finished cutting edge quality.

Keywords: Blanking Die; Shearing Temperature; Sheet Metal; Cutting Edge Quality; Stainless Steel

บทนำ

แม่พิมพ์ตัด (Blanking Die) คือเครื่องมือพื้นฐานของงานอุตสาหกรรมโลหะแผ่น เป็นกระบวนการตัดแบบพิเศษจากคมตัดของแท่งพUNCH และคายน (Die) โดยจะนำแผ่นเปล่า (Blank) ที่ได้จากการตัดไปใช้งานหรือในกระบวนการผลิตลำดับต่อไป [1] - [2] กระบวนการตัดที่ดีจะได้แผ่นเปล่าที่มีคุณภาพหรือมีขนาดที่เที่ยงตรงเพื่อส่งผลให้มีความสะดวกและง่ายต่อการผลิต โดยส่วนใหญ่แม่พิมพ์ตัดจะใช้ในการผลิตชิ้นส่วนของผลิตภัณฑ์ที่มีจำนวนมาก ๆ เพื่อประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายในการผลิต จึงจำเป็นต้องออกแบบแม่พิมพ์ตัดที่มีคุณภาพเพื่อให้มีอายุการใช้งานที่ยาวนานที่สุด ทั้งนี้การตัดเฉือนโลหะแผ่นบนแม่พิมพ์ตัดซึ่งเกิดจากการตัดเฉือนของคมตัดพUNCH และคายนจะแบ่งงานออกเป็น 2 ลักษณะคือ การตัดแผ่นเปล่า (Blanking) และการตัดเจาะ (Piercing) ซึ่งจะมีความแตกต่างกันคือ การตัดแผ่นเปล่าจะเอาแผ่นโลหะที่หลุดออกไปใช้งานดังรูปที่ 1(ก) ซึ่งในการออกแบบแม่พิมพ์จะกำหนดให้ขนาดความโตของพUNCH มีขนาดเท่ากับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางแผ่นชิ้นงาน ส่วนการตัดเจาะจะเอารูเจาะที่เกิดจากการปัดตัดไปใช้งานดังรูปที่ 1(ข) ในการออกแบบแม่พิมพ์จะกำหนดให้ขนาดความโตของรูคายน มีขนาดเท่ากับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูเจาะที่ต้องการ โดยในบทความวิจัยนี้จะเน้นที่กระบวนการตัดแผ่นเปล่าและปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณภาพโลหะแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม ด้วยปัจจุบันเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS304 ได้ถูกนำมาใช้ในวงการอุตสาหกรรมต่าง ๆ เพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง เช่น อุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ อุตสาหกรรมการผลิตเครื่องใช้ไฟฟ้า และอุตสาหกรรมการผลิตภาชนะเครื่องครัว เป็นต้น เนื่องจากเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นวัสดุที่มีพื้นผิวสวยงาม ทนทานต่อการกัดกร่อนและไม่เป็นสนิม ทำให้มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน [3] - [4]



รูปที่ 1 การป้อนตัดโลหะแผ่น

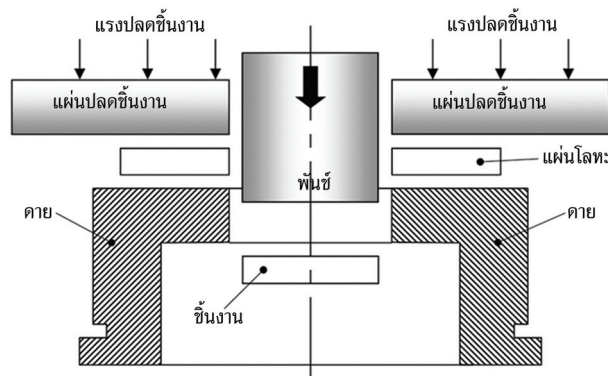
การป้อนตัดเป็นกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นที่มีลักษณะที่โดดเด่นคือ สามารถผลิตชิ้นงานในลักษณะของการตัดแผ่นเปล่าหรืองานตัดเจาะรู ในปริมาณการผลิตปานกลางถึงสูงด้วยต้นทุนที่ต่ำและประหยัดเวลาในการผลิต [5] การประเมินคุณภาพของชิ้นงานที่ได้จากการป้อนตัด โดยทั่วไปจะพิจารณาจากขนาดความบิดขนาดการโก่งตัว และลักษณะขอบตัดของแผ่นชิ้นงาน ในการผลิตแผ่นเปล่าโลหะแผ่นเพื่อนำไปใช้งานหรือเพื่อการขึ้นรูปในขั้นตอนต่อไปจึงจำเป็นต้องมีการควบคุมให้ได้ชิ้นงานที่มีขนาดที่ถูกต้องเที่ยงตรงและมีลักษณะของขอบตัดที่มีส่วนเรียบตรงสูง ซึ่งสามารถควบคุมได้ด้วยการกำหนดค่าระยะห่างช่องว่างคมตัด (Clearance) การเลือกใช้วัสดุในการทำแม่พิมพ์ การออกแบบลักษณะคมตัด การควบคุมอัตราการสึกหรอของพันธ์และคายที่เหมาะสมรวมถึงการเลือกใช้วัสดุชิ้นงาน [6] ซึ่งคุณสมบัติทางกลของโลหะแผ่นที่ต้องการนำมาป้อนตัดขึ้นรูป เช่น คุณสมบัติด้านความแข็ง ความสามารถในการยืดตัว (ความเหนียว) รวมไปถึงค่าความแข็งของวัสดุ จะถูกนำมาเป็นข้อมูลพื้นฐานในการออกแบบแม่พิมพ์เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพตามต้องการและควบคุมอัตราการสึกหรอของแม่พิมพ์ให้สอดคล้องกับปริมาณการผลิต

โดยทั่วไปในการขึ้นรูปโลหะแผ่นและการทดสอบคุณสมบัติทางกลจะดำเนินการที่อุณหภูมิปกติหรืออุณหภูมิห้อง ซึ่งมักจะประสบปัญหาเกี่ยวกับคุณภาพชิ้นงานและการสึกหรอของแม่พิมพ์ เนื่องจากการขึ้นรูปหรือการตัดแผ่นเปล่าเหล็กกล้าที่อุณหภูมิปกติมักจะส่งผลให้มีสัดส่วนของรอยแตกร้าวบริเวณขอบตัดและแม่พิมพ์มีอัตราการสึกหรอสูง ซึ่งเป็นปัญหาและข้อจำกัดต่อการขึ้นรูปในกระบวนการถัดไป โดยเฉพาะการผลิตชิ้นงานที่ต้องการคุณภาพขอบตัดสูง ซึ่งแนวทางโดยทั่วไปจะใช้วิธีการออกแบบแม่พิมพ์ให้มีระยะคมตัดแคบลงแต่วิธีดังกล่าวจะส่งผลให้ต้องใช้แรงเพื่อการป้อนตัดสูงและอัตราการสึกหรอของพันธ์และคายเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งจะทำให้อายุการใช้งานของแม่พิมพ์สั้นลงและส่งผลต่อต้นทุนการผลิตของผลิตภัณฑ์ ดังนั้นการป้อนตัดที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้องจึงเป็นแนวทางในการลดปัญหาดังกล่าว ทั้งนี้โดยทั่วไปเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้คุณสมบัติทางกลของโลหะแผ่นเปลี่ยนแปลงไป [7] โดยจะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ ลักษณะโครงสร้างจุลภาค และองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุเป็นสำคัญ อย่างไรก็ตามในช่วงอุณหภูมิห้อง (25 °C) - 600 °C เป็นช่วงอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิการเกิดผลึกใหม่ของวัสดุในกลุ่มเหล็กกล้า การขึ้นรูปในช่วงอุณหภูมิดังกล่าวจึงไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อคุณสมบัติทางกลของชิ้นงานสำเร็จหลังการขึ้นรูป [8]

ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของอุณหภูมิของโลหะแผ่นที่จะส่งผลต่อคุณภาพขอบตัดชิ้นงานโลหะแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม เพื่อใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงคุณภาพของขอบตัดชิ้นงานและให้ข้อเสนอแนะที่เหมาะสมเกี่ยวกับข้อกำหนดในการออกแบบแม่พิมพ์และเงื่อนไขของกระบวนการตัดแผ่นเปล่าโลหะแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม ในการทดสอบจะดำเนินการป้อนตัดโลหะแผ่นโดยใช้แม่พิมพ์ตัดแผ่นเปล่าและตรวจสอบผลกระทบของอุณหภูมิขึ้นทดสอบขณะตัดเฉือนที่ส่งผลต่อ ขนาดแรงตัด คุณภาพขอบตัดชิ้นงานสำเร็จ และดัชนีค่าความเครียดแข็งของขอบตัดชิ้นงาน เพื่อวิเคราะห์ผลเชิงลึกเกี่ยวกับผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อคุณภาพของขอบตัดชิ้นงานสำเร็จเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304

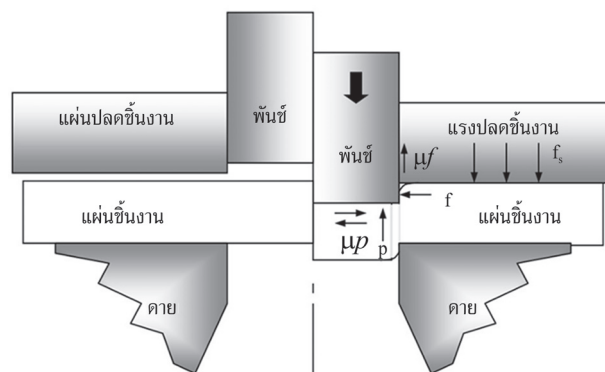
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

กลไกในการตัด (**Blanking Mechanism**) [9] คือกระบวนการตัดเฉือนซึ่งมีการเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่น การเปลี่ยนรูปถาวรและการฉีกขาดของวัสดุชิ้นงานอยู่ภายในกระบวนการ ในการตัดโลหะออกจากกัน จะดำเนินการโดยใช้คมตัดของ 펀ช์และคายกดลงบนเนื้อโลหะจนเลยจุดความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate Strength) ซึ่งจะทำให้โลหะฉีกขาดออกจากกันดังรูปที่ 2 โดยขั้นตอนในการป้อนตัด (Blanking Process) จะประกอบด้วย ขั้นตอนแรก 펀ช์เลื่อนลงมาสัมผัสกับเนื้อวัสดุชิ้นงานโดยจะมีแรงกดจากแผ่นปลดชิ้นงาน กดแผ่นงานที่ระดับหนึ่ง ในช่วงนี้วัสดุชิ้นงานเกิดการเปลี่ยนรูปในช่วงยืดหยุ่น (Elastic Deformation) มีการตัดตัวและพาเนื้อโลหะเข้าไปในช่องว่างของคายและเกิดการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร (Plastic Deformation) เมื่อแรงกดเพิ่มขึ้น จากนั้นวัสดุชิ้นงานถูกตัดเฉือนและเกิดการแตก เมื่อสิ้นสุดขั้นตอนนี้ผิวหน้าของ 펀ช์จะจมลงไปในรูคายอยู่เล็กน้อย เมื่อ 펀ช์เคลื่อนที่ลงอย่างต่อเนื่องจะดันให้ชิ้นงานทะลุลงไปในช่องว่างของคาย หลังจากสิ้นสุดการตัดแล้ววัสดุบริเวณรูจะเกิดการตีตัวกลับมายังพื้นผิว เช่นเดียวกับด้านนอกของแผ่นเปล่าจะมีการตีตัวกลับมายังผิวภายในของคาย เนื่องจากความเค้นแบบยืดหยุ่นในแนวเส้นสัมผัสและแนวรัศมีที่เหลือค้างในเนื้อวัสดุทำให้เกิดความเสียหายระหว่างพื้นผิวกับผนังรูเจาะเพิ่มมากขึ้นในขณะที่พื้นผิวถอยกลับ



รูปที่ 2 การป้อนตัดแผ่นเปล่าชิ้นงานโลหะแผ่นด้วย 펀ช์และคาย [9]

แรงที่กระทำต่อ 펀ช์และคาย [10] เมื่อ 펀ช์และคายของแม่พิมพ์ตัดกินเข้าไปในเนื้อชิ้นงานจะเกิดแรงกระทำต่อ 펀ช์และคายขึ้น ถ้าพิจารณาแรงที่กระทำต่อ 펀ช์จะประกอบด้วยแรงที่ชิ้นงานกระทำต่อด้านล่างของ 펀ช์ (p) แรงเสียดทานระหว่างชิ้นงานกับพื้นผิวที่กระทำต่อด้านหน้าของ 펀ช์ (μp) โดยมีทิศทางเข้าหรือออกจากศูนย์กลางของ 펀ช์ ขึ้นอยู่กับการไหลตัวของเนื้อวัสดุ แรงที่ชิ้นงานกระทำต่อด้านข้างของ 펀ช์ (f) แรงเสียดทานระหว่างชิ้นงานกับพื้นผิวที่กระทำต่อด้านข้างของ 펀ช์ (μf) และแรงปลดชิ้นงาน (f_s) สามารถเขียนแสดงได้ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ลักษณะแรงกระทำต่อ 펀ช์และคาย [10]

เมื่อรวมแรงทั้งหมดที่กระทำต่อด้านล่างของฟันซี่เข้าด้วยกัน หมายถึงแรงเพื่อการตัดชิ้นงาน (Blanking Force, FB) ซึ่งจะแสดงดังสมการที่ (1) คือ

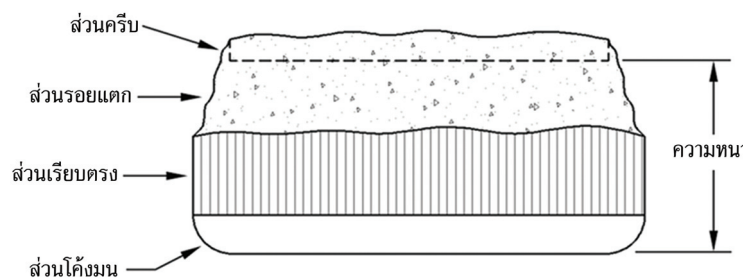
$$F_B = p + \mu f \quad (1)$$

ในทำนองเดียวกันถ้ารวมแรงทั้งหมดที่กระทำต่อด้านข้างของฟันซี่ (Side Force, F) ซึ่งแสดงดังสมการที่ (2) คือ

$$F = f + \mu p \quad (2)$$

ส่วนแรงที่กระทำต่อคานก็สามารถวิเคราะห์ได้ในทำนองเดียวกันนั่นคือ จะประกอบไปด้วยแรงสองชนิดใหญ่ ๆ คือ แรงตัดและแรงที่กระทำต่อด้านข้างของคาน

ลักษณะรอยขอบตัด (Cutting Edge Characteristic) [11] โดยทั่วไปลักษณะของขอบตัดของโลหะแผ่นที่เกิดจากการป้อนตัดจะประกอบไปด้วย 4 ส่วนคือ ส่วนโค้งมน (Rollover) ส่วนเรียบตรง (Burnish) ส่วนรอยแตกหรือการฉีกขาด (Fracture) และส่วนการเกิดเสี้ยนหรือครีบโลหะ (Burr) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ลักษณะส่วนประกอบของขอบตัดแผ่นเปล่า (Blank) ชิ้นงานโลหะแผ่น [11]

ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อค่าความสูงของส่วนต่าง ๆ บนขอบตัดคือ การกำหนดระยะช่องว่างคมตัดของฟันซี่และคาน ซึ่งหากมีการกำหนดระยะช่องว่างที่เหมาะสม จะทำให้ได้ขอบของชิ้นงานที่ผ่านการตัด มีคุณภาพ และได้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของชิ้นงานตามต้องการ รอยร้าวที่เริ่มต้นจากฟันซี่และคานจะพบกันพอดี ดังนั้นจึงไม่เกิดรอยตัดที่สอง ช่องว่างแม่พิมพ์มีผลต่อขนาดความถูกต้องของชิ้นงานและอายุการใช้งานของแม่พิมพ์ ช่องว่างแม่พิมพ์ที่เหมาะสมทำให้ได้แรงตัดที่ต่ำ ซึ่งหากว่าช่องว่างแม่พิมพ์มีค่าน้อยทำให้ได้แรงตัดที่สูง ส่งผลให้อายุของแม่พิมพ์ลดลงและยากต่อการสร้างแม่พิมพ์นอกจากนี้ยังมีองค์ประกอบอื่น ๆ ที่ต้องพิจารณาเพื่อการกำหนดระยะช่องว่างคมตัดของแม่พิมพ์ให้เหมาะสมด้วย เช่น ชนิดของวัสดุงาน (ความแข็ง) และขนาดความหนาของชิ้นงานอีกด้วย ซึ่งในกรณีการกำหนดระยะช่องว่างคมตัดได้พอดีหรือเหมาะสม (Optimum Cutting Clearance) จะได้ชิ้นงานที่มีความสูงส่วนเรียบตรงประมาณ 1/3 เท่าของความหนาของวัสดุ หากกำหนดระยะช่องว่างคมตัดไว้มากเกินไป (Excessive Cutting Clearance) จะส่งผลให้ส่วนโค้งมนมีขนาดใหญ่ ส่วนเรียบตรงจะแคบและไม่ราบเรียบสม่ำเสมอและส่วนรอยแตกหรือรอยฉีกขาดจะกว้างขึ้น เนื่องจากรอยแตกร้าวอาจแผ่ขยายมาถึงส่วนเรียบตรง และยังส่งผลทำให้ค่าความสูงของการเกิดเสี้ยนหรือครีบโลหะ (Burr) เพิ่มมากขึ้น กรณีที่กำหนดระยะช่องว่างคมตัดไว้น้อยเกินไป (Insufficient Cutting Clearance) จะส่งผลให้ลักษณะของส่วนเรียบตรง (Burnish) มีความสูงมากขึ้นเนื่องจากรอยแตกจะเกิดขึ้นช้าลง ทั้งนี้ส่วนเรียบตรงอาจจะมีค่าความสูงที่ไม่สม่ำเสมอหรือเกิดขึ้นมากกว่า 2 แห่ง ส่วนค่าความสูงของส่วนโค้งมนและครีบจะมีขนาดน้อยลง และ

ในกรณีที่ตำแหน่งพันทันและคายเยื้องศูนย์กลาง (Eccentric Cutting Clearance) อาจเกิดได้จากหลายสาเหตุ ทั้งจากเครื่องจักร การประกอบแม่พิมพ์ การจัดสร้างแม่พิมพ์ รวมไปถึงการติดตั้งแม่พิมพ์กับเครื่องปั๊ม ซึ่งจะส่งผลทำให้พันทันและคายได้รับแรงกระทำไม่เท่ากันทุกจุด จึงมักส่งผลทำให้อายุการใช้งานของพันทันและคายสั้นลง

วัสดุอุปกรณ์และวิธีการทดลอง

1. วัสดุการทดลอง

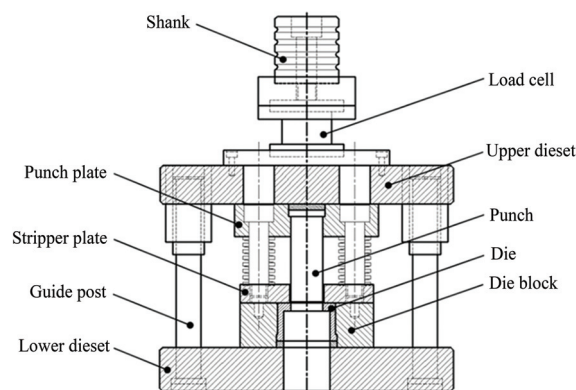
ทำการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อคุณภาพขอบตัดแผ่นเปล่าชิ้นงานโลหะแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS304 (20Cr-10Ni) ขนาดความหนา 1.0 มิลลิเมตร ซึ่งรายละเอียดคุณสมบัติทางกลของวัสดุจากการทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน DIN EN 10002-1 ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงเอนกประสงค์รุ่น Zwick /2020 แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกลของโลหะแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304

	YS(MPa)	UTS (MPa)	E (GPa)	TE (%)
SUS304	210.79	520.87	173.47	24

2. แม่พิมพ์ปั๊มตัดแผ่นเปล่าและข้อกำหนดการทดลอง

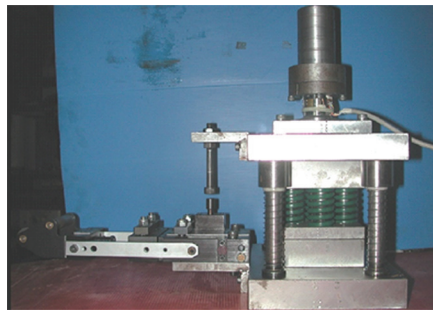
สำหรับการทดลองในงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบแม่พิมพ์ตัดแผ่นเปล่า (Blanking Die) เพื่อการปั๊มตัดชิ้นงานสำเร็จรูปวงกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร โดยจะติดตั้งแม่พิมพ์ตัดบนเครื่องปั๊มโลหะชนิดเพลาข้อเหวี่ยง (Crank Press) ขนาด 50 kN ซึ่งรายละเอียดและส่วนประกอบของแม่พิมพ์ตัดแผ่นเปล่าที่ใช้ในการทดลองจะแสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ส่วนประกอบของแม่พิมพ์ตัดแผ่นเปล่า (Blanking Die)

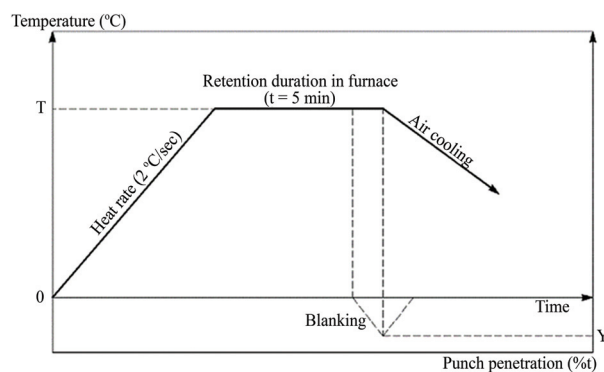
กำหนดให้พันทันและคายจะทำจากวัสดุเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น SKD 11 และทำการชุบแข็งที่ความแข็ง 65 ± 2 HRC ส่วนแผ่นกดชิ้นงาน (Blank Holder) จะถูกกดยึดด้วยสปริง SWG20-40 กำหนดระยะช่องว่างคมตัดของแม่พิมพ์ (Clearance) ที่ร้อยละ 8 ของความหนาโลหะแผ่น (8%t) โดยจะออกแบบให้คายมีขนาดความโตคงที่และพันทันมีขนาดเล็กกว่าเพื่อให้ได้ระยะช่องว่างคมตัดตามที่กำหนด ซึ่งแม่พิมพ์ปั๊มตัดแผ่นเปล่าที่ใช้ในการทดลองจะแสดงดังรูปที่ 6 ในการทดสอบการปั๊มตัดจะทำการยึดชุดคายเข็ท้านบนและด้านล่างกับแผ่นยึดแม่พิมพ์ของเครื่องปั๊มโลหะ ดังนั้นเมื่อแรม (Ram) ของเครื่องปั๊มโลหะเคลื่อนที่ลงจะเกิด

แรงกระทำที่แม่พิมพ์ซึ่งแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ แรงที่ส่งถ่ายไปยังพื้นที่เพื่อการบีบอัดชิ้นงานและแรงที่ส่งถ่ายไปยังสปริงเพื่อกดและปลดแผ่นโลหะขึ้นทดสอบที่ผ่านการอบให้ความร้อนภายในเตาอบไฟฟ้าซึ่งจะติดตั้งไว้ในพื้นที่เดียวกับเครื่องบีบโลหะ โดยจะทำการควบคุมอุณหภูมิให้เที่ยงตรงและคงที่ตลอดการทดลองด้วยระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (Proportional Integral Derivative Control; PID) โดยจะกำหนดอุณหภูมิการอบให้ความร้อนแผ่นชิ้นงานที่สูงกว่าอุณหภูมิห้องแต่ต่ำกว่าอุณหภูมิการเกิดผลึกใหม่ของโลหะแผ่นเนื่องจากระดับอุณหภูมิดังกล่าวจะไม่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงหลังการเย็นตัวของโลหะแผ่น โดยกำหนดช่วงอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกันประมาณ 200 °C เพื่อเปรียบเทียบกับผลการตัดเฉือนที่อุณหภูมิห้อง (25 °C) โดยชิ้นงานจะถูกอบให้ความร้อนภายในเตาอบไฟฟ้าตามอุณหภูมิเป้าหมายด้วยอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ 2 °C/วินาที และค้างชิ้นงานไว้ภายในเตาเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นจะนำออกจากเตาอบเพื่อทำการบีบอัดชิ้นงานและปล่อยให้เย็นตัวในอากาศตามรายละเอียดผังรูปที่ 7 ทั้งนี้ในงานวิจัยนี้จะออกแบบให้แม่พิมพ์มีระยะช่องว่างคมตัดคงที่เพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิแผ่นชิ้นงานเป็นหลักซึ่งรายละเอียดในการออกแบบการทดลองและเงื่อนไขต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องจะแสดงดังตารางที่ 2



รูปที่ 6 ลักษณะของแม่พิมพ์ตัดแผ่นเปล่า (Blanking Die) ที่ใช้ในการทดลอง

ขณะบีบอัดชิ้นงานและภายหลังการบีบอัดจะทำการตรวจสอบและบันทึกผลเพื่อการวิเคราะห์ผลการทดลองจากขนาดแรงตัด ค่าความสูงส่วนต่าง ๆ ของขอบตัด และค่าความแข็งแรงของขอบตัดชิ้นงานสำเร็จโดยใช้อุปกรณ์ต่าง ๆ ซึ่งประกอบไปด้วย ชุดวัดแรง (Load Cell) กล้องจุลทรรศน์กำลังขยายต่ำ (OM) กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (LOM) และเครื่องทดสอบความแข็งแรงแบบจุลภาค (Micro-Hardness Testing) โดยจะทำการบีบอัดชิ้นงานจำนวน 30 ชิ้นต่อข้อกำหนดหรือเงื่อนไขการทดลอง โดยสมมติฐานการทดสอบได้กำหนดค่าความเชื่อมั่นของข้อมูลที่ 95 % และมีความคลาดเคลื่อนของข้อมูลไม่เกิน 5 % ด้วยการสุ่มตัวอย่างเพื่อทดสอบสมมติฐานงานวิจัยโดยการทดสอบทางสถิติ (T-Test) ซึ่งจากการกำหนดจำนวนครั้งการทดสอบที่จำนวน 30 ตัวอย่างต่อเงื่อนไขการทดลองพบว่าได้ค่า P-Value มีค่าน้อยกว่า α (0.05) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าขนาดความสูงส่วนต่าง ๆ ของขอบตัดในแต่ละระดับอุณหภูมิมีค่าความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %



รูปที่ 7 เงื่อนไขการอบให้ความร้อนแผ่นชิ้นงานก่อนการตัดเฉือน

ตารางที่ 2 ข้อกำหนดของเครื่องมือและเงื่อนไขการทดลอง

	รายการข้อกำหนด	ค่ากำหนด
การออกแบบแม่พิมพ์	วัสดุ พันธ์ - คาย	SKD 11
	ค่าความแข็งของพันธ์ - คาย	65±2 HRC
	มุมเลื่อนพันธ์	0°
	ขนาดสปริง	SWG20-40
	ขนาดความโตพันธ์	Ø 20 มิลลิเมตร
	รัศมีคมตัดพันธ์-คาย	0.01 มิลลิเมตร
เงื่อนไขการทดลอง	ขนาดความหนาโลหะแผ่น	1 มิลลิเมตร
	ระยะช่องว่างคมตัดพันธ์-คาย	8 % ของความหนาโลหะแผ่น
	ระยะช่องว่างคมตัดพันธ์-แผ่นปลด	1.5 มิลลิเมตร
	ความเร็วกัดตัดของพันธ์	2 มิลลิเมตร/วินาที
	อุณหภูมิการตัดเฉือน	25 200 400 600 (°C)

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

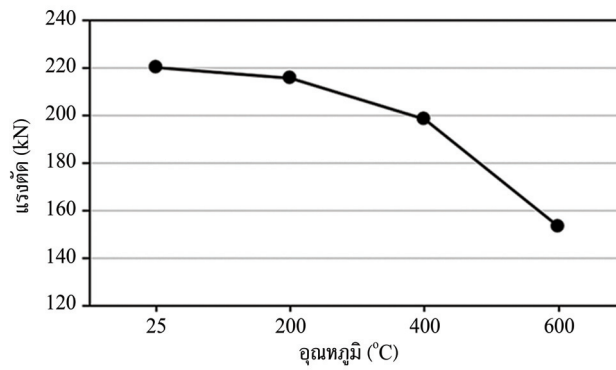
ผลการทดลองตามข้อกำหนดและขอบเขตงานวิจัยของกระบวนการบีบตัดแผ่นเปล่าเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS304 โดยไม่ใช้สารหล่อลื่นที่อุณหภูมิแบบอุณหภูมิห้อง (25 °C) ถึงอุณหภูมิ 600 °C เพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิการอบให้ความร้อนโลหะแผ่นที่ส่งผลต่อแรงตัดและคุณภาพขอบตัดชิ้นงานสำเร็จ และเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบกระบวนการบีบตัดแผ่นเปล่าเหล็กกล้าไร้สนิมที่เหมาะสม โดยมีรายละเอียดของผลการทดลองดังนี้

1. อิทธิพลของอุณหภูมิโลหะแผ่นที่ส่งผลต่อแรงในการบีบตัด

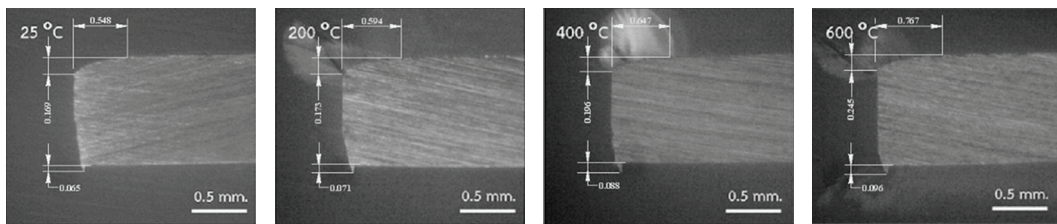
ผลการวัดและเปรียบเทียบค่าแรงในการบีบตัดโลหะแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่อุณหภูมิแตกต่างกัน ซึ่งแสดงดังรูปที่ 8 พบว่าขนาดแรงตัดชิ้นรูปจะแปรผกผันกับอุณหภูมิของโลหะแผ่น กล่าวคือแรงบีบตัดชิ้นรูปจะมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิของโลหะแผ่นเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้ความเค้นครากและความแข็งแรงของวัสดุมีแนวโน้มลดลง โดยผลการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิห้องใช้แรงในการบีบตัดชิ้นรูปสูงสุดที่ 221.25 kN โดยขนาดแรงในการบีบตัดดังกล่าวมีความสอดคล้องกับผลการคำนวณโดยใช้สมการที่ (1) ทั้งนี้เมื่อทำการตัดชิ้นรูปโลหะแผ่นที่อุณหภูมิ 200 °C จะใช้แรงในการบีบตัดที่ 215.58 kN ซึ่งลดลง 2.56 % การบีบตัดที่อุณหภูมิ 400 °C ใช้แรงตัดที่ 198.37 kN ซึ่งลดลง 10.34 % และการบีบตัดโลหะแผ่นที่อุณหภูมิ 600 °C ใช้แรงตัดที่ 153.28 kN ซึ่งลดลง 30.72 % เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการบีบตัดที่อุณหภูมิห้อง โดยจากขนาดแรงในการบีบตัดซึ่งมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นมีความสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [12] และสอดคล้องกับผลการทดสอบคุณสมบัติทางกลโดยการดึงชิ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมที่อุณหภูมิแตกต่างกัน [13] ที่พบว่าค่าความเค้นครากและค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดของวัสดุจะมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิของโลหะแผ่นเพิ่มสูงขึ้น

2. อิทธิพลของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อลักษณะและรูปร่างของขอบตัด

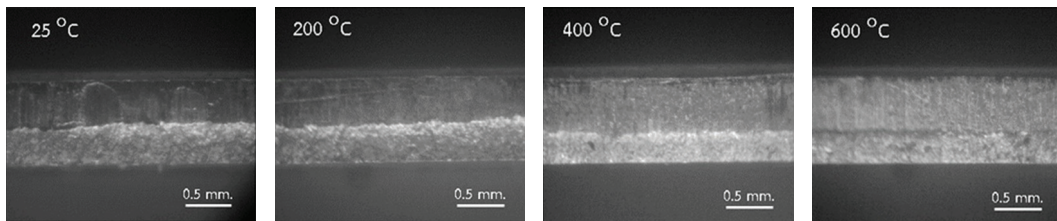
ลักษณะขอบตัดแผ่นเปล่าขึ้นทดสอบเหล็กกล้าไร้สนิมที่ได้จากการบีบตัดที่อุณหภูมิแตกต่างกัน โดยการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยายต่ำ (Optical Macro-Scope; OM) และกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Light Optical Microscope; LOM) แสดงให้เห็นถึงส่วนต่าง ๆ บนขอบตัดเฉือน ซึ่งประกอบไปด้วย



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและแรงในการป้อนตัดโลหะแผ่น



รูปที่ 9 ลักษณะภาคตัดขวางชิ้นทดสอบที่ได้จากการตัดเฉือนด้วยอุณหภูมิที่แตกต่างกัน



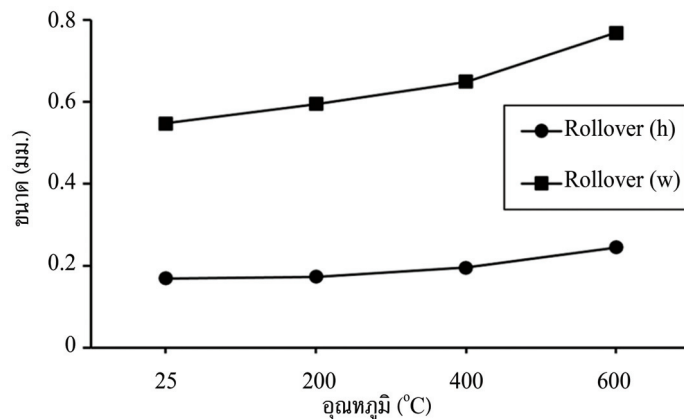
รูปที่ 10 ด้านข้างของขอบตัดชิ้นทดสอบเพื่อการวัดค่าความสูงส่วนเรียบตรงและส่วนการเกิดรอยแตก

1. ความกว้างและความสูงของส่วนโค้งมนและความสูงสกริป ที่ได้จากการป้อนตัดที่อุณหภูมิตัดเฉือนที่แตกต่างกัน สามารถตรวจสอบและวัดขนาดได้ชัดเจนจากมุมมองภาคตัดขวางของชิ้นทดสอบดังรูปที่ 9

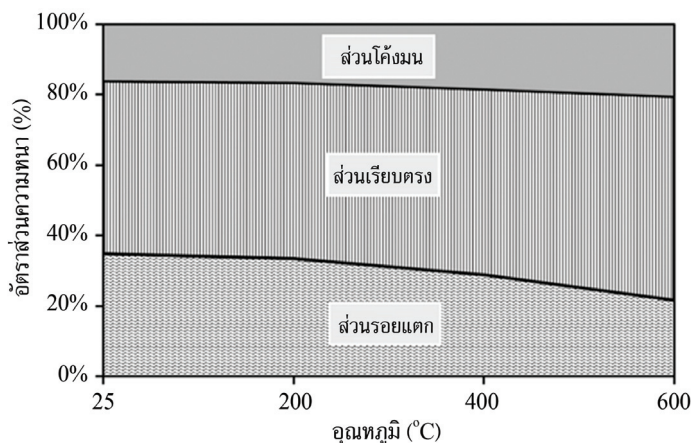
2. ค่าความสูงของส่วนเรียบตรงและส่วนรอยแตก สามารถตรวจสอบได้ชัดเจนจากภาพด้านข้างของขอบตัดดังรูปที่ 10 ซึ่งแสดงด้านข้างของขอบตัดที่ได้จากการป้อนตัดที่อุณหภูมิแตกต่างกัน โดยความสูงของส่วนเรียบตรงจะได้จากการวัดค่าความสูงโดยรวมของส่วนโค้งมนและส่วนเรียบตรงจากภาพด้านข้างและนำมาลบด้วยค่าความสูงของส่วนโค้งมน ที่ได้จากการวัดบนภาพภาคตัดขวาง ส่วนค่าความสูงของส่วนรอยแตกจะใช้วิธีการนำเอาค่าความหนาของชิ้นทดสอบ (1 มิลลิเมตร) ลบด้วยค่าความสูงของส่วนโค้งมนและส่วนเรียบตรง

จากรายละเอียดผลการทดลองรูปที่ 11 พบว่าค่าความสูงของส่วนโค้งมนจะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิชิ้นทดสอบเพิ่มมากขึ้น ซึ่งชิ้นทดสอบที่ได้จากการตัดเฉือนที่อุณหภูมิห้อง (25 °C) ขนาดความสูงส่วนโค้งมนจะอยู่ที่ 0.169 มิลลิเมตร การตัดเฉือนที่อุณหภูมิ 200 °C ความสูงส่วนโค้งมนจะเพิ่มขึ้นเป็น 0.173 มิลลิเมตร หรือคิดเป็น 2.36 % ส่วนการตัดเฉือนที่อุณหภูมิ 400 °C ความสูงส่วนโค้งมนจะเพิ่มขึ้นเป็น 0.196 มิลลิเมตร หรือคิดเป็น 15.62 % และการตัดเฉือนที่อุณหภูมิ 600 °C ความสูงส่วนโค้งมนจะเพิ่มขึ้นเป็น 0.245 มิลลิเมตร หรือคิดเป็น 44.97 % เมื่อเปรียบเทียบกับการตัดเฉือนที่อุณหภูมิห้อง ส่วนผลการตรวจสอบขนาดความกว้างของส่วนโค้งมนจะพบว่ามีความกว้างมากกว่าขนาดความสูงของส่วนโค้งมน โดยผลการตัดเฉือนที่อุณหภูมิห้อง (25 °C) มีความกว้างส่วนโค้งมน 0.548 มิลลิเมตร การตัดเฉือนที่อุณหภูมิ 200 °C ค่าความกว้าง

ของส่วนโค้งมนจะเพิ่มขึ้นเป็น 0.594 มิลลิเมตรหรือคิดเป็น 8.74 % ส่วนการตัดเฉือนที่อุณหภูมิ 400 °C ค่าความกว้างของส่วนโค้งมนจะเพิ่มขึ้นเป็น 0.647 มิลลิเมตรหรือคิดเป็น 18.42 % และการตัดเฉือนที่อุณหภูมิ 600 °C ค่าความกว้างของส่วนโค้งมนจะเพิ่มขึ้นเป็น 0.767 มิลลิเมตรหรือคิดเป็น 40.38 % เมื่อเปรียบเทียบกับ การตัดเฉือนที่อุณหภูมิต้องตามลำดับ ดังนั้นจึงเห็นได้ชัดว่าค่าความสูงและความกว้างของส่วนโค้งมนจะแปรผันตามอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลทำให้วัสดุมีความสามารถในการยึดตัวหรือมีคุณสมบัติด้านความเหนียวเพิ่มมากขึ้นซึ่งส่งผลทำให้การตัดเฉือนเกิดขึ้นช้าลง ซึ่งผลการทดลองดังกล่าว มีความสอดคล้องกับผลการวิจัยที่ผ่านมา [6] ซึ่งได้แสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติด้านความความเหนียวของโลหะแผ่นจะเพิ่มสูงขึ้นตามระดับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเมื่อนำมาทำการตัดเฉือนจะส่งผลทำให้เกิดส่วนเรียบตรง ซึ่งมีพื้นผิวเป็นมันวาวขนาดใหญ่ขึ้น โดยสรุปได้ว่ากระบวนการบ่มตัดที่อุณหภูมิสูงจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการตัดเฉือนซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการเพิ่มคุณภาพของขอบตัดของโลหะแผ่น ทั้งนี้ส่วนเรียบตรงบนขอบตัดเกิดขึ้นจากแรงอัดระหว่างฟันชั้กับแผ่นชิ้นงาน ซึ่งพบว่าค่าความสูงของส่วนเรียบตรงจะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิขึ้นทดสอบเพิ่มมากขึ้น ขณะที่ความสูงของส่วนรอยแตกจะมีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจนเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งกลไกการเกิดรอยแตกบนขอบตัดที่ได้จากการบ่มตัดที่อุณหภูมิต้องจะพบว่า รอยแตกจะเริ่มก่อตัวเป็นรอยแตกขนาดเล็กเนื่องจากการเกิดส่วนเรียบตรง ซึ่งมีทิศทางขนานไปกับระนาบการเฉือนของโลหะแผ่น เมื่อระยะการกัดตัดเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้รอยแตกดังกล่าวขยายตัวผ่านชั้นความหนาของวัสดุเกิดเป็นรอยฉีกขาดขนาดใหญ่ ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของส่วนต่าง ๆ บนขอบตัดเมื่อเปรียบเทียบกับความสูงโดยรวมของขอบตัดที่ได้จากการบ่มตัดด้วยแม่พิมพ์ที่มีระยะช่องว่างคมตัด 8 % แสดงดังรูปที่ 12

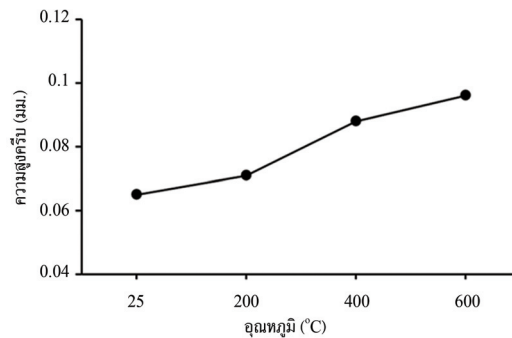


รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ของความสูง (h) และความกว้าง (w) ส่วนโค้งมนกับอุณหภูมิการตัดเฉือนโลหะแผ่น



รูปที่ 12 อัตราความสูงส่วนต่าง ๆ บนขอบตัดของชิ้นทดสอบที่ได้จากการตัดด้วยแม่พิมพ์ที่มีระยะช่องว่างคมตัด 8%

จากผลของแผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของส่วนต่าง ๆ บนขอบตัด แสดงให้เห็นว่าการตัดเฉือนที่อุณหภูมิห้อง ลักษณะขอบตัดจะมีค่าความสูงของส่วนโค้งมนและส่วนเรียบตรงน้อยที่สุดและค่าความสูงของทั้งสองส่วนจะมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิการตัดเฉือนเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่ส่วนรอยแตกจะมีความสูงมากที่สุดที่อุณหภูมิห้องและจะมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิการตัดเฉือนเพิ่มสูงขึ้น



รูปที่ 13 อัตราส่วนความสูงของครีบบนขอบตัดที่ได้จากการตัดที่อุณหภูมิแตกต่างกัน

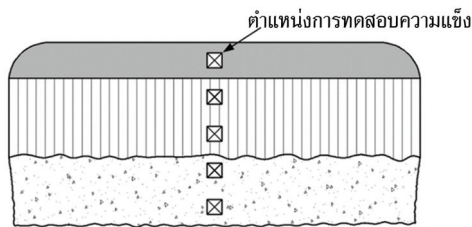
นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นยังส่งผลทำให้ชิ้นทดสอบมีค่าความสูงครีบเพิ่มมากขึ้นอีกด้วย ดังผลการตรวจสอบค่าความสูงของครีบด้วยวิธีการวัดค่าความสูงโดยรวมจากภาพด้านข้างของชิ้นทดสอบโดยการกำหนดจุดเริ่มต้นที่ระนาบผิวด้านบนของโลหะแผ่นจนถึงปลายสุดของครีบและลบด้วยค่าความหนาของแผ่นชิ้นทดสอบ (1 มิลลิเมตร) ซึ่งผลการตรวจสอบค่าความสูงครีบแสดงดังรูปที่ 13 ซึ่งพบว่าค่าความสูงของครีบจะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มมากขึ้น เช่น ชิ้นทดสอบที่ได้จากการตัดเฉือนที่อุณหภูมิห้อง (25 °C) มีค่าความสูงครีบที่ 0.065 มิลลิเมตร เมื่อทำการตัดเฉือนที่อุณหภูมิ 200 °C ค่าความสูงครีบจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยที่ 0.071 มิลลิเมตร หรือความสูงครีบเพิ่มขึ้น 9.23 % ส่วนการตัดเฉือนที่อุณหภูมิ 400 °C ค่าความสูงครีบจะเพิ่มขึ้นเป็น 0.088 มิลลิเมตร หรือเพิ่มขึ้น 35.38 % และการตัดเฉือนที่อุณหภูมิ 600 °C มีความสูงครีบที่ 0.096 มิลลิเมตร หรือเพิ่มขึ้น 47.69 % เมื่อเปรียบเทียบกับการตัดเฉือนที่อุณหภูมิห้อง ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้วัสดุมีความเหนียวเพิ่มขึ้นหรือมีค่าความสามารถในการยึดตัวได้มากขึ้น ซึ่งส่งผลทำให้ในกระบวนการตัดเฉือนเนื้อวัสดุบริเวณคมตัดจะเกิดการยึดตัวในลักษณะของครีบมากขึ้น

3. อิทธิพลของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อค่าความแข็งระดับจุลภาคของขอบตัด

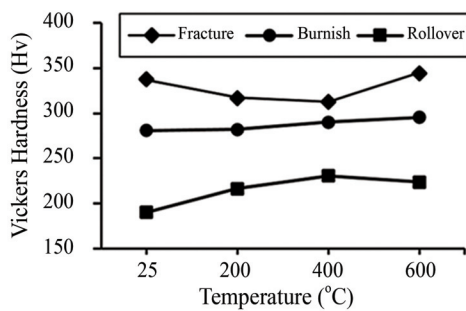
เพื่อการศึกษาพฤติกรรมด้านความเครียดแข็ง (Strain Hardening) ของชิ้นทดสอบ จะดำเนินการด้วยวิธีการทดสอบค่าความแข็งบริเวณขอบตัดด้านข้างของชิ้นงานโดยใช้เครื่องทดสอบความแข็งแบบจุลภาค (Micro-Hardness Testing) เพื่อการวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบถึงพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งของชิ้นทดสอบที่ได้จากการป้อนตัดที่อุณหภูมิแตกต่างกัน โดยจะกำหนดตำแหน่งการทดสอบค่าความแข็งบนขอบตัดแผ่นเปล่าที่ 5 ตำแหน่ง โดยแต่ละตำแหน่งจะมีระยะห่างกัน 0.2 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 14 ในการบันทึกผลการทดลองจะแสดงผลค่าความแข็งของส่วนต่าง ๆ บนขอบตัดและค่าความแข็งเฉลี่ย ซึ่งผลการทดลองจะแสดงดังรูปที่ 15

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิการตัดเฉือนจะส่งผลอย่างชัดเจนต่อค่าความแข็งของชิ้นทดสอบดังผลการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ซึ่งได้ทำการทดสอบบนส่วนต่าง ๆ ของขอบตัดด้วยระยะห่างที่แตกต่างกันใน 5 ตำแหน่ง โดยค่าความแข็งบนส่วนต่าง ๆ ของขอบตัดจะแสดงรายละเอียดดังรูปที่ 15(ก) ซึ่งพบว่าส่วนโค้งมน (Rollover) เป็นส่วนที่มีค่าความแข็งต่ำกว่าส่วนอื่น ๆ เนื่องจากเป็นส่วนเริ่มต้นของการเปลี่ยนรูปและเกิดการเปลี่ยนรูปถาวรเพียงบางส่วน โดยค่าความแข็งของส่วนโค้งมนจะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อยเมื่ออุณหภูมิการตัดเฉือนเพิ่มสูงขึ้น ส่วนค่าความแข็งบริเวณส่วนเรียบตรงจะมีค่าความแข็งสูงกว่าส่วนโค้งมน เนื่องจากเป็นส่วนที่เกิดการเปลี่ยนรูปถาวรอย่างสมบูรณ์ซึ่งได้รับผลกระทบจากค่าความเครียดแข็งสูงกว่า โดยค่าความแข็งของส่วนเรียบตรงจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่ออุณหภูมิการตัดเฉือนเพิ่มสูงขึ้น

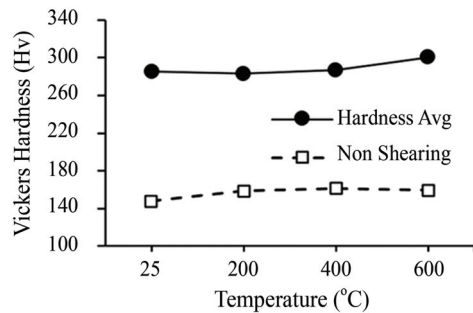
ส่วนค่าความแข็งของส่วนรอยแตกจะมีค่าความแข็งสูงที่สุด เนื่องจากรอยแตกจะเกิดจากผลต่อเนื่องของการเกิดรอยตัดเฉือนและได้รับผลจากความเครียดเชิงสูงที่สูงกว่าส่วนอื่น ๆ โดยส่วนรอยแตกจะมีค่าความแข็งลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 200 - 400 °C และจะเพิ่มขึ้นสูงสุดที่อุณหภูมิ 600 °C เนื่องจากผลของการสลายตัวของธาตุโครเมียม (Cr) ในออสเทนไนต์ระหว่างการตกตะกอนของซิกม่าเฟส (σ phase) ซึ่งส่งผลให้อุณหภูมิซิกม่าเฟสถูกล้อมรอบด้วยเซลล์เฟอร์ไรต์ (δ -Ferrite) [14] เมื่อนำค่าความแข็งทั้งหมดที่ได้จากการทดสอบในตำแหน่งต่าง ๆ บนขอบตัดมาคำนวณเป็นค่าความแข็งเฉลี่ยและเปรียบเทียบกับค่าความแข็งของชิ้นทดสอบก่อนการตัดเฉือนที่ผ่านการอบให้ความร้อนด้วยระดับอุณหภูมิต่าง ๆ ซึ่งผลการทดลองจะแสดงดังรูปที่ 15(ข) จะพบว่าค่าความแข็งเฉลี่ยบริเวณขอบตัดจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความแข็งของชิ้นทดสอบที่ไม่ผ่านการตัดเฉือน โดยการตัดเฉือนที่อุณหภูมิห้องจะมีความแตกต่างของค่าความแข็งมากที่สุดและจะลดลงเล็กน้อยเมื่ออุณหภูมิการตัดเฉือนเพิ่มสูงขึ้น ในช่วงอุณหภูมิ 200 - 400 °C เนื่องจากการตัดเฉือนที่อุณหภูมิต่ำสุดจะได้รับผลกระทบจากค่าความเครียดเชิงสูงที่สุด ซึ่งส่งผลต่อกลไกการตัดเฉือนอย่างชัดเจนและผลกระทบดังกล่าวจะเกิดขึ้นน้อยลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้ความแตกต่างของค่าความแข็งจะเพิ่มสูงขึ้นอีกครั้งเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิ 600 °C ซึ่งค่าความแข็งเฉลี่ยที่เพิ่มสูงขึ้นในช่วงอุณหภูมินี้จะเกิดขึ้นจากผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคเป็นหลัก



รูปที่ 14 ตำแหน่งการทดสอบความแข็งบนขอบตัดแผ่นเปล่า



(ก) ตำแหน่งบนขอบตัด



(ข) ค่าความแข็งเฉลี่ย

รูปที่ 15 ค่าความแข็งระดับจุลภาค

สรุปผลงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อลักษณะขอบตัดเพื่อการปรับปรุงคุณภาพขอบตัดชิ้นงานสำเร็จโลหะแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม จากผลการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยายต่ำ (OM) กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (LOM) และผลการทดสอบค่าความแข็งด้วยเครื่องทดสอบความแข็งระดับจุลภาค (Micro-Hardness) พบว่าอุณหภูมิการตัดเฉือนจะส่งผลโดยตรงต่อลักษณะขอบตัดของชิ้นทดสอบที่ประกอบไปด้วยส่วนโค้งมน ส่วนเรียบตรง ส่วนรอยแตก ส่วนของครีป และค่าความแข็งหลังการตัดเฉือนของโลหะแผ่น โดยสามารถสรุปได้ดังนี้

เมื่ออุณหภูมิของโลหะแผ่นเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลทำให้ขนาดความกว้างและความสูงของส่วนโค้งมน ความสูงของส่วนเรียบตรง และความสูงครีบกจะมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิการตัดเฉือนเพิ่มสูงขึ้น ส่วนขนาดความสูงของส่วนรอยแตกจะมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลทำให้โลหะแผ่น จะมีคุณสมบัติด้านความแข็งแรงสูงสุดและค่าความเค้นครากลดลง ขณะที่คุณสมบัติด้านความเหนียวหรือ ความสามารถในการยืดตัวจะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามระดับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นเมื่อนำมาทำการตัดเฉือน จะส่งผลทำให้ได้ส่วนเรียบตรงซึ่งเป็นส่วนที่ต้องการสำหรับงานปั๊มตัดโลหะแผ่นและส่งผลโดยตรงต่อการเพิ่ม คุณภาพของขอบตัดชิ้นงานสำเร็จ โดยคุณสมบัติด้านความแข็งแรงที่เปลี่ยนแปลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น จะสอดคล้องกับค่าความแข็งแรงเฉลี่ยของขอบตัด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าความแข็งแรงเฉลี่ยจะลดลงเล็กน้อย เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นในช่วงแรกเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติทางกลและค่าความแข็งแรงเฉลี่ย หลังการตัดเฉือนจะเพิ่มสูงขึ้นอีกครั้งที่อุณหภูมิ 600 °C เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาค

ข้อเสนอแนะ

ในการวิจัยในขั้นต่อไปควรมีการทดลองกับวัสดุที่มีความไวต่อการแตกหักหรือมักพบปัญหาเกี่ยวกับคุณภาพ ขอบตัด เช่น วัสดุในกลุ่มเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง หรือทำการทดลองหาความสัมพันธ์ที่เหมาะสมระหว่าง อุณหภูมิและขนาดช่องว่างคมตัดของแม่พิมพ์ เพื่อการปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์สำเร็จในอุตสาหกรรม การขึ้นรูปโลหะแผ่นต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณอาจารย์และเจ้าหน้าที่สาขาวิศวกรรมอุตสาหการและการผลิต คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี ที่อนุเคราะห์เครื่องมือ เครื่องจักร และอุปกรณ์ในการดำเนินการวิจัย รวมทั้งขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยี ราชมงคลรัตนโกสินทร์ที่ให้การสนับสนุนงบประมาณในการดำเนินการวิจัย งานวิจัยฉบับนี้ดำเนินการสำเร็จ ลุล่วงไปได้ด้วยดี

References

- [1] Kumar, S. Singh, R., and Sekhon, G. S. (2008). An Expert System for Design of Blanking Dies for Sheet Metal Operations. In **Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2008**. WCECS 2008, October 22 - 24, 2008, San Francisco, USA
- [2] Brun, M., Ghiotti, A., Bruschi, S., and Filippi, S. (2021). Active Control of Blank Holder in Sheet Metal Stamping. **Procedia CIRP**. Vol. 100, pp. 151-156. DOI: 10.1016/j.procir.2021.05.079
- [3] Pickering, F. B. (1984). Physical Metallurgical Developments of Stainless Steels. **Stainless Steels**. Vol. 84, pp. 2-28
- [4] Lo, K. H., Shek, C. H., and Lai, J. K. L. (2017). Recent Developments in Stainless Steels. **Materials Science and Engineering**. Vol. 65, pp. 39-104. DOI: 10.1016/j.mser.2009.03.001
- [5] Juthamas, C., Monsiri, O., and Phrompong, S. (2015). Improving the Productivity of Sheet Metal Stamping Subassembly Area Using the Application of Lean Manufacturing Principles. **Procedia Manufacturing**. Vol. 2, pp. 102-107. DOI: 10.1016/j.promfg.2015.07.090

- [6] Mori, K., Abe, Y., Kidoma, Y., and Kadarno, P. (2013). Slight Clearance Punching of Ultra-High Strength Steel Sheets Using Punch Having Small Round Edge. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**. Vol. 65, pp. 41-46. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2012.09.005
- [7] Wang, W. Y., Liu, B., and Kodur, V. (2020). Effect of Temperature on Strength and Elastic Modulus of High-Strength Steel. **Journal of Materials in Civil Engineering**. Vol. 25, pp. 174-182. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000600
- [8] Tang, Z., Huang, J., Ding, H., Cai, Z., Zhang, D., and Misra, D. (2018). Effect of Deformation Temperature on Mechanical Properties and Deformation Mechanisms of Cold-Rolled Low C High Mn TRIP/TWIP Steel. **Metals - Open Access Metallurgy Journal**. Vol. 8, p. 476. DOI: 10.3390/met8070476
- [9] Schuler, G. (1998). **Metal Forming Handbook**. Schuler GmbH, Springer, Berlin, Heidelberg. p. 568
- [10] Keawtatip, P., Masahiko, J., and Murakawa, M. (2012). Side Load on Punch and Die of Blanking Die by FEM. In **The 14th Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand (ME-NETT2012)**. Phuket. Thailand, pp. 250-256
- [11] Totre, A., Nishad, R., and Bodke, S. (2008). An Overview of Factors Affecting in Blanking Processes. **International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering**. Vol. 3, Issue 3, pp. 390-395
- [12] Fazily, P., Yu, J., and Lee, C. W. (2019). Characterization of Sheared Edges in Warm Blanking of Magnesium Alloy AZ31B. **Materials**. Vol. 12, p. 1023. DOI: 10.3390/ma12071023
- [13] Nikulin, I., Kaibyshev, R., and Skorobogatykh, V. (2010). High Temperature Properties of an Austenitic Stainless Steel. **Journal of Physics: Conference Series**. Vol. 240, pp. 01-04
- [14] Horak, J. A. and Sikka, V. K. (1983). Review of Mechanical Properties and Microstructures of Types 304 and 316 Stainless Steel After Long-Term Aging. **Scientific & Technical Information Technical Reports**. pp. 179-213

การศึกษาความเสียหายที่เกิดขึ้นจากอนุภาคโปรตอน และแอลฟา บริเวณผิวของโลหะผสมที่ใช้เป็นโครงสร้างในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์

The Study of Damage Caused by Proton and Alpha Particles on the Surface of Alloys Used as Structures in Nuclear Reactors

สุนันทศักดิ์ ระวังวงศ์¹ พันธุ์ศักดิ์ กล่ากล่อมจิตร² ภัทรนันท์ โปธิประเสริฐ² ทัดพิชา แก้วเกิด² ธนพร เทียนธนากร² จุมพล ขอบขำ³ และกิตติศักดิ์ ศรีวงศ์ษา^{4*}

Sunantasak Ravangvong¹ Punsak Glumglomchit² Pattaranan Proprsserd² Tatpicha Keawkrid² Thanapon Thiantanakorn² Chumphon Khobkham³ and Kittisak Sriwongsa^{4*}

Received: November 4, 2021; Revised: February 11, 2022; Accepted: March 8, 2022

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาความเสียหายที่เกิดขึ้นจากอันตรกิริยาของอนุภาคโปรตอน (H^+) และแอลฟา (He^{2+}) กับโลหะผสม TiVNbTa, TiVZrTa และ TiVCrTa ด้วยโปรแกรม Stopping of Ion Ranges in Matter (SRIM) เวอร์ชัน 2013 ซึ่งโปรแกรมนี้ใช้เทคนิคการประมาณค่าการชนแบบโมนารี โดยการศึกษาที่ได้วิเคราะห์ค่าการกระจายไอออน (Ion Distribution) และช่วงไอออน (Ion Ranges) ที่พลังงาน 1 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ในขณะที่พารามิเตอร์ ได้แก่ อำนาจศักย์หยุดยั้งมวล (Mass Stopping Power) ดำเนินการในช่วงพลังงาน 1 - 1,000 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ผลการวิจัยค่าการกระจายไอออนของอนุภาคโปรตอน และแอลฟากับโลหะผสมทั้งสามที่ระดับพลังงาน 1 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ที่ความลึก 12 ไมโครเมตร พบว่าอนุภาคโปรตอนมีอำนาจทะลุทะลวงและสร้างความเสียหายในบริเวณผิวของโลหะผสมทั้งสามได้มากกว่าอนุภาคแอลฟา และค่าช่วงไอออนก็สอดคล้องกับค่าการกระจายไอออน ในขณะที่ค่าอำนาจศักย์หยุดยั้งมวลของโลหะผสม TiVZrTa มีค่าค่าที่สูงสุด แสดงให้เห็นว่าโลหะผสมตัวอย่างนี้มีความสามารถในการกำบังอนุภาคโปรตอน (H^+) และแอลฟา (He^{2+}) ดีที่สุด

คำสำคัญ : การกระจายไอออน; ช่วงไอออน; อำนาจศักย์หยุดยั้งมวล; โลหะผสม

¹ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี

² โรงเรียนหัวหินวิทยาลัย ประจวบคีรีขันธ์

³ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธนบุรี

⁴ คณะศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร

¹ Faculty of Science and Technology, Phetchaburi Rajabhat University

² Huahinvitthayalai School, Prachuapkhirikhan

³ Faculty of Engineering, Thonburi University

⁴ Faculty of Education, Silpakorn University

* Corresponding Author, Tel. 08 6742 1969, E - mail: sriwongsa_k@silpakorn.edu

Abstract

The aim of this work is to study the damage from proton (H^+) and alpha (He^{2+}) particles interaction with TiVNbTa, TiVZrTa and TiVCrTa alloys using stopping of ion ranges in matter (SRIM) program version 2013. This program is based on the binary collision approximation technique. The Ion distribution and Ion values ranging at 1 MeV while Mass stopping power parameters at energy ranging 1 - 1,000 MeV were analyzed. The results of ion distribution for H^+ and He^{2+} particles with all alloys at 1 MeV of energy and penetration depth of 12 μm showed that H^+ particles had more penetrating and damaging effect on the surface regions of the three alloys than He^{2+} particles and the ion ranges values corresponding to the ion distribution values. The mass stopping power for TiVZrTa alloy had the lowest value. These results indicated that TiVZrTa alloy was excellent H^+ and He^{2+} shielding.

Keywords: Ion Distribution; Ion Ranges; Mass Stopping Power; Alloy

บทนำ

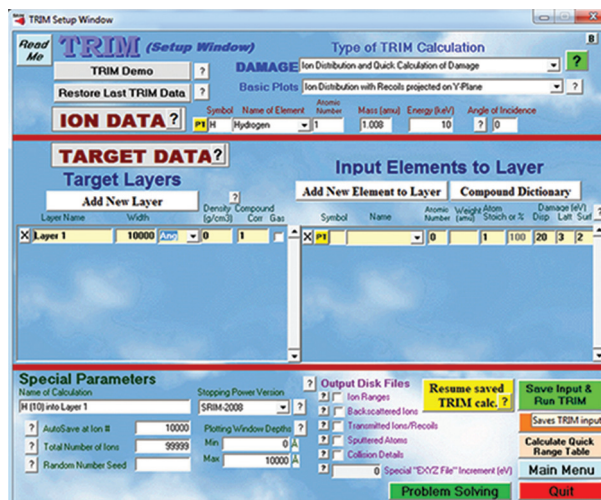
โลหะผสมที่มีเอนโทรปีสูง หมายถึงโลหะผสมที่ประกอบด้วยธาตุหลักมากกว่าห้าชนิดผสมกันในเศษส่วนที่เท่ากัน หรือใกล้เคียงกัน [1] - [14] โลหะผสมเอนโทรปีสูงจำนวนมากมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีเยี่ยม เช่น ทนต่ออุณหภูมิที่สูง มีความแข็งแรง และความเหนียวที่มากกว่าโลหะและโลหะผสม มีความยืดหยุ่นที่ดี [1], [3] และยังมีคุณสมบัติทางกายภาพที่ดี เช่น ความเป็นตัวนำและแม่เหล็กยิ่งยวด และทนต่อการกัดกร่อนอย่างมีนัยสำคัญ [5] ซึ่งคุณสมบัติที่กล่าวถึงนี้สามารถดำเนินการได้โดยการแทนที่องค์ประกอบหนึ่งหรือหลายองค์ประกอบในองค์ประกอบของโลหะผสมเอนโทรปีสูง แต่ทั้งนี้เป็นไปได้ยากที่จะใช้ประโยชน์จากโลหะผสมที่มีเอนโทรปีสูง (High Entropy Alloys; HEAs) ในเชิงพาณิชย์ เช่น การใช้งานด้านโครงสร้างทางวิศวกรรมนั้นส่วนใหญ่จะใช้เหล็กกล้า โลหะผสมอะลูมิเนียม หรือโลหะผสมแมกนีเซียม ซึ่งถือว่าเป็นโครงสร้างหลักที่นิยมนำมาใช้งาน เนื่องจากโลหะผสมที่มีเอนโทรปีสูงไม่สามารถแข่งขันในด้านราคา หรือคุณสมบัติเฉพาะได้ แต่อย่างไรก็ตาม โลหะผสมที่มีเอนโทรปีสูงเป็นโลหะผสมที่นำมาประยุกต์ใช้งานในโครงสร้างทางวิศวกรรมสำหรับโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ฟิวชันและโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ฟิชชัน Gen-IV ใช้สำหรับการหุ้มฉนวนเชื้อเพลิงที่ทนต่ออุบัติเหตุ (Accident-Tolerant Fuel; ATF) สำหรับโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ฟิชชัน Gen-III และ Gen-IV งานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับโลหะผสมเอนโทรปีสูงสำหรับการใช้งานด้านนิวเคลียร์ยังคงมีจำนวนงานวิจัยค่อนข้างจำกัดเมื่อเปรียบเทียบกับจำนวนของโลหะผสมเอนโทรปีสูงที่ถูกผลิตขึ้น ในเดือนมิถุนายน ค.ศ. 2020 พบว่ามีบทความไม่เกิน 100 ฉบับที่พิจารณาโลหะผสมเอนโทรปีสูงสำหรับการประยุกต์ใช้งานด้านนิวเคลียร์ บทความโดยส่วนมากจะเน้นที่การออกแบบโลหะผสม และการตอบสนองต่อความเสียหายจากการฉายรังสี เมื่อเทียบกับเอกสารประมาณ 4,000 ฉบับที่ตีพิมพ์ในขอบเขตงานด้านโลหะผสมเอนโทรปีสูง [15] คุณสมบัติพื้นฐานของโลหะผสมเอนโทรปีสูงที่จะนำมาใช้ร่วมกับโรงไฟฟ้านิวเคลียร์แบบฟิชชันและฟิวชันรุ่นต่อไปมีแนวโน้มว่าจะแตกต่างกันไปตามการออกแบบของเครื่องปฏิกรณ์และส่วนประกอบเฉพาะที่ ซึ่งอาจจะเกี่ยวข้องกับอุณหภูมิที่สูง การกัดกร่อน ความเค้น และฟลักซ์ความร้อน อย่างไรก็ตาม ยังมีพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับวิศวกรที่ต้องออกแบบเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ นั่นคือความเสียหายที่เกิดจากการฉายรังสี ความเสียหายจากการฉายรังสีที่เกิดขึ้นในโลหะผสมไม่เพียงแต่ขึ้นอยู่กับลักษณะเฉพาะของอนุภาคที่ตกกระทบ (เช่น อิเล็กตรอน นิวตรอน โปรตอนหรือไอออนหนัก) และพลังงานของอนุภาคที่ตกกระทบเท่านั้น แต่ยังรวมถึงลักษณะของวัสดุที่ถูกฉายรังสีด้วย (เช่น น้ำหนักอะตอม ความแข็งแรง

ของพันธะ โครงสร้างผลึก องค์ประกอบและโครงสร้างจุลภาค) ตลอดจนอุณหภูมิของการฉายรังสี ความเสียหายของโลหะผสมจากการฉายรังสีเป็นเรื่องที่มีความซับซ้อนอย่างมาก [16] - [17] เมื่อพิจารณากรณีที่นิวตรอนมีพลังงาน (เช่น ที่มีพลังงาน 1 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ หรือมากกว่า) ผ่านเข้าไปทำอันตรกิริยากับอะตอมในโลหะผสม การชนกันระหว่างนิวตรอนกับอะตอมอาจส่งผลให้อะตอมเคลื่อนตัวออกจากตำแหน่งแลตทิซด้วยพลังงานจลน์ ผลที่ได้ส่งผลให้บริเวณผิวของโลหะผสมเอนโทรปีสูงเกิดความเสียหายขึ้น

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเสียหายที่จะเกิดขึ้นจากอนุภาคโปรตอน และแอลฟา ที่ผ่านเข้าไปทำอันตรกิริยากับอะตอมในแลตทิซที่อยู่บริเวณผิวของตัวอย่างโลหะผสมเอนโทรปีสูงที่ถูกนำมาใช้ในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ ซึ่งโลหะผสมเอนโทรปีสูง ได้แก่ TiVNbTa, TiVZrTa, TiVCrTa [18] การดำเนินการทำโดยใช้โปรแกรมซอฟต์แวร์ SRIM ซึ่งโปรแกรมซอฟต์แวร์ดังกล่าวจะถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์และจำลองถึงเหตุการณ์ที่อนุภาคทั้งสองผ่านเข้าไปทำอันตรกิริยาในโลหะผสมเอนโทรปีสูงทั้งสาม ซึ่งพารามิเตอร์หลักที่ใช้ในการอธิบายความเสียหายที่เกิดจากอนุภาคทั้งสอง ได้แก่ การกระจายไอออน (Ion Distribution) ใน 2 มิติ ช่วงไอออน (Ion Ranges) ดำเนินการที่พลังงาน 1 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ และค่าอำนาจค้ำยัหยุดยั้งมวล (Mass Stopping Power) ที่ช่วงพลังงาน 1 - 1,000 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์

วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

โลหะผสม TiVNbTa: 0.22Ti-0.22V-0.25Nb-0.31Ta (%wt), TiVZrTa: 0.24Ti-0.24V-0.15Zr-0.37Ta (%wt), TiVCrTa: 0.23Ti-0.29V-0.25Cr-0.24Ta (%wt) ที่ศึกษาในครั้งนี้จะถูกนำมาวิเคราะห์สมบัติการกำบังรังสีไอออนในชนิดที่มีประจุไฟฟ้า ได้แก่ อนุภาคโปรตอน และอนุภาคแอลฟา ซึ่งพารามิเตอร์ที่จะถูกวิเคราะห์คือ การกระจายไอออน (Ion Distribution) ใน 2 มิติ ช่วงไอออน (Ion Ranges) ที่พลังงาน 1 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ และอำนาจค้ำยัหยุดยั้งมวล (Mass Stopping Power) ที่ช่วงพลังงาน 1 - 1,000 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ด้วยโปรแกรม Stopping and Range of Ions in Matter (SRIM) Version 2013 (รูปที่ 1) ที่ได้รับการประมวลโดยใช้รหัสตามวิธีการของมอนติคาร์โล [19] โดยโปรแกรมนี้เป็นโปรแกรมที่ใช้คำนวณการหยุดของไอออนและช่วงของไอออนในวัสดุโดยใช้คุณสมบัติทางกลศาสตร์ควอนตัมของการชนกันของไอออนกับอะตอมและยังใช้ในการอธิบายความเสียหายจากรังสีที่เกิดจากไอออนกับวัสดุ [20]



รูปที่ 1 โปรแกรม Stopping and Range of Ions in Matter (SRIM) Version 2013

การกำบังรังสีไอออนในซ์ประเภทที่มีประจุไฟฟ้า (อนุภาคโปรตอน และแอลฟา)

อัตราการสูญเสียพลังงานของไอออนในตัวอย่างโลหะผสมแบ่งออกเป็นสองกลไกที่แตกต่างกันของการสูญเสียพลังงาน ได้แก่ พลังงานที่ถ่ายโอนโดยไอออนไปยังนิวเคลียสของตัวอย่างโลหะผสม (เรียกว่า การหยุดนิวเคลียร์) และพลังงานที่ถ่ายโอนโดยไอออนไปยังอิเล็กตรอนของตัวอย่างโลหะผสม (เรียกว่า การหยุดแบบอิเล็กตรอนิก) ความสำคัญสัมพัทธ์ของกระบวนการของอันตรกิริยาต่าง ๆ ระหว่างไอออนกับตัวกลางของตัวอย่างโลหะผสมจะขึ้นอยู่กับความเร็วของไอออนเป็นส่วนใหญ่ รวมถึงจะขึ้นอยู่กับประจุของไอออน และเลขอะตอมยังผลของตัวอย่างโลหะผสม

อำนาจค์หยุดยั้งมวล คือ ค่าที่ใช้ในการบอกอัตราการสูญเสียพลังงาน รังสีก่อไอออน ึ่งประเภทที่มีประจุไฟฟ้าเป็นค่าที่ใช้ในการพิจารณาเกี่ยวกับวัสดุที่ใช้ในการกำบังรังสีประเภทนี้ ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ (1) ของ Bethe-Bloch

$$-\frac{dE}{dx}\bigg|_e = \frac{2\pi k_0^2 Z^2 e^4 n}{mc^2 \beta^2} \left[\ln \frac{2mc^2 \beta^2}{I(1-\beta^2)} - \beta^2 \right] \quad (1)$$

เมื่อ

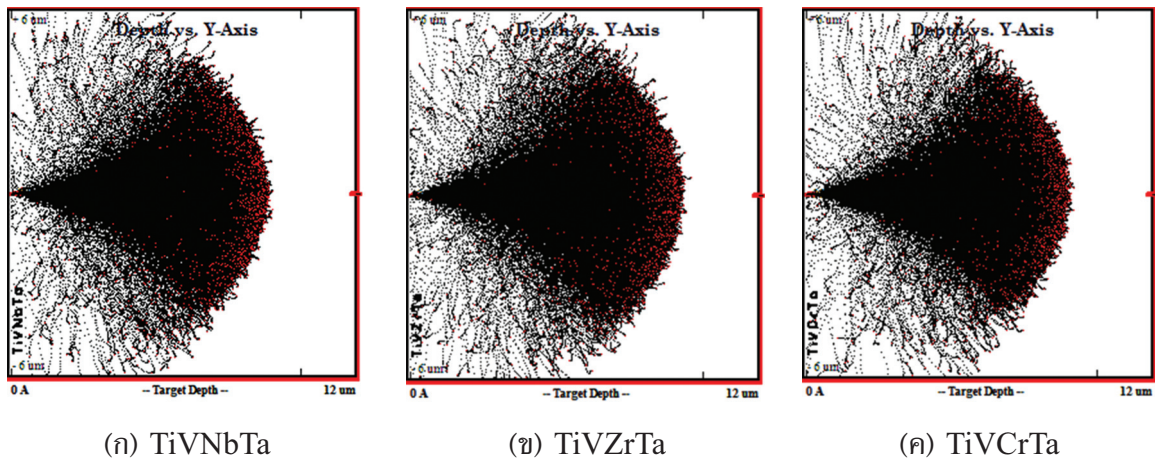
$-\frac{dE}{dx}\bigg _e$	คือ	อัตราการสูญเสียพลังงาน
Z	คือ	เลขอะตอม
e	คือ	ค่าประจุไฟฟ้า
m	คือ	มวล
c	คือ	ค่าความเร็วแสง
β	คือ	ความเร็วของไอออน
I	คือ	พลังงานไอออนเฉลี่ย [20] - [21]

ผลการทดลองและอภิปรายผล

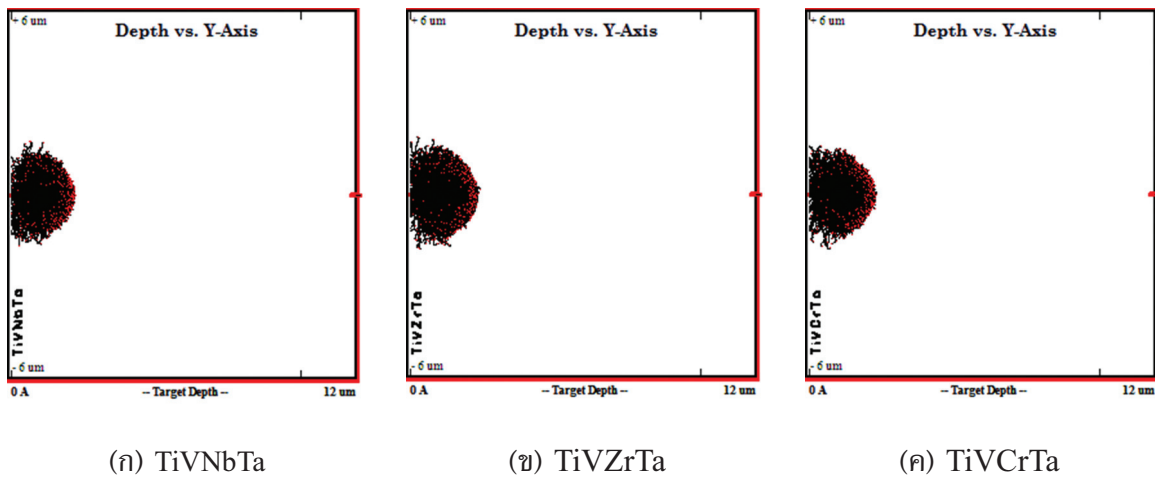
ความเสียหายจากการกระจายของอนุภาคโปรตอน และแอลฟา

ในการศึกษาความเสียหายที่เกิดขึ้นจากอนุภาคโปรตอน และแอลฟา ที่ผ่านเข้าไปทำอันตรกิริยากับอะตอมในแลตทิซที่อยู่บริเวณผิวของตัวอย่างโลหะผสมเอนโทรปีสูงที่ถูกนำมาใช้ในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ ซึ่งโลหะผสมที่ศึกษาในครั้งนี้ ได้แก่ TiVNbTa, TiVZrTa, TiVCrTa โดยรูปที่ 2 และ 3 แสดงแบบจำลองสถานการณ์ที่เกิดขึ้นโดยการเกิดอันตรกิริยาระหว่างโปรเจกไทล์ไอออน (โปรตอน และแอลฟา) จำนวน 99999 ไอออนกับโลหะผสมทั้งสามที่ระดับพลังงาน 1 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ และที่ความลึก 12 ไมโครเมตร โดยเป็นเหตุการณ์ที่โปรเจกไทล์ไอออนผ่านเข้าไปตกกระทบแบบตรง (ทำมุม 0 องศา) ผลจากการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้โปรแกรมซอฟต์แวร์ SRIM พบว่า อนุภาคโปรตอนสามารถผ่านเข้าไปในโลหะผสมทั้งสามลึกกว่าอนุภาคแอลฟา โดยจุดสีแดงแสดงถึงการชนกันระหว่างโปรเจกไทล์ไอออนกับอะตอมในโลหะผสมทั้งสาม และจุดสีดำแสดงถึงช่องว่างหรือช่วงการยุบตัวของอะตอมในโลหะผสมทั้งสาม ช่องว่างนี้เกิดจากการที่อะตอมในโลหะผสมทั้งสามหลุดออกไปเนื่องจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างโปรเจกไทล์ไอออนกับอะตอมในแลตทิซภายในบริเวณผิวของโลหะผสมทั้งสาม ซึ่งกระบวนการนี้เรียกว่า การยุบตัวแบบซันบันได (Recoil Cascade) [22] และเหตุผลที่อนุภาคโปรตอนสามารถผ่านเข้าไปได้ลึกกว่าอนุภาคแอลฟา เพราะอนุภาคโปรตอนมีมวลน้อยกว่าอนุภาคแอลฟา ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าอนุภาคโปรตอนสามารถสร้างความเสียหายที่บริเวณผิวของโลหะผสมทั้ง

สามมากกว่าอนุภาคแอลฟา ยิ่งไปกว่านั้นจากการวิเคราะห์พบว่า โลหะผสม TiVNbTa มีไอออนสะท้อนกลับเท่ากับ 50 และ 62 ไอออน สำหรับอนุภาคโปรตอนและอนุภาคแอลฟา โลหะผสม TiVZrTa มีไอออนสะท้อนกลับเท่ากับ 65 และ 83 ไอออน สำหรับอนุภาคโปรตอนและอนุภาคแอลฟา และโลหะผสม TiVCrTa มีไอออนสะท้อนกลับเท่ากับ 38 และ 56 ไอออน สำหรับอนุภาคโปรตอนและอนุภาคแอลฟา ซึ่งเป็นอีกหนึ่งเหตุผลที่สะท้อนให้เห็นว่าอนุภาคโปรตอนมีอำนาจทะลุทะลวงและสร้างความเสียหายในบริเวณผิวของโลหะผสมทั้งสามได้มากกว่าอนุภาคแอลฟา



รูปที่ 2 การกระจายของอนุภาคโปรตอนที่พลังงาน 1 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์

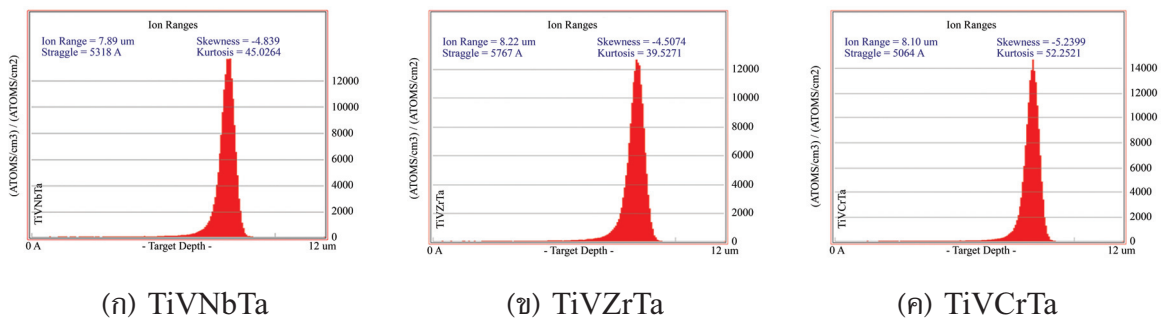


รูปที่ 3 การกระจายของอนุภาคแอลฟาที่พลังงาน 1 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์

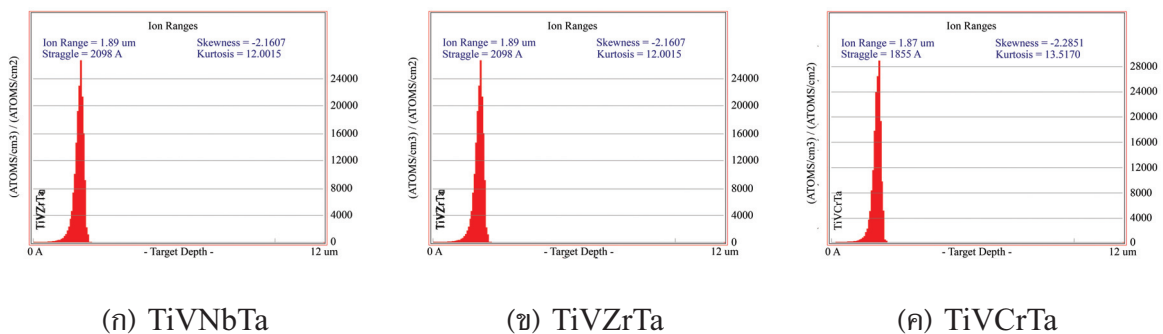
โอกาสในการเกิดอันตรกิริยาระหว่างโปรเจกไทล์ไอออนกับอะตอมในบริเวณผิวของโลหะผสมจากอนุภาคโปรตอน และแอลฟา

รูปที่ 4 และ 5 แสดงให้เห็นถึงช่วงของไอออนที่ระดับพลังงาน 1 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งเป็นผลจากการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้โปรแกรมซอฟต์แวร์ SRIM โดยช่วงของไอออนเป็นหนึ่งในพารามิเตอร์ที่สำคัญที่สุดที่บ่งบอกถึงโอกาสในการเกิดอันตรกิริยาระหว่างโปรเจกไทล์ไอออนกับอะตอมในบริเวณผิวของโลหะผสมทั้งสาม เมื่อโปรเจกไทล์ไอออนที่มีพลังงานจลน์ทะลุผ่านเข้าไปในโลหะผสมทั้งสาม โปรเจกไทล์ไอออนที่ผ่านเข้าไปจะผ่านการหยุดแบบอิเล็กตรอนิกส์ (อันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับโปรเจกไทล์ไอออน) และการหยุดแบบนิวเคลียร์ (อันตรกิริยาระหว่างนิวเคลียสกับโปรเจกไทล์ไอออน) โปรเจกไทล์ไอออนที่ผ่านเข้าไปจะมีความเร็วลดลงในช่วงที่มีพลังงานสูง เนื่องจากเกิดการหยุดแบบอิเล็กตรอนิกส์ซึ่งเป็นการชนกันแบบไม่ยืดหยุ่นทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานจลน์ขึ้น เมื่อพลังงานโปรเจกไทล์ไอออนลดลงโอกาสในการเกิดการชนกันแบบนิวเคลียร์จะเพิ่มมากขึ้น

ซึ่งเป็นการชนหลักที่ทำให้โปรเจกไทล์ไอออนชะลอตัวลงในระหว่างการชนกับอะตอมในแลตทิซภายในบริเวณผิวของโลหะผสมทั้งสาม ทำให้บริเวณผิวของโลหะผสมเกิดความเสียหาย หรือยุบตัวลง เหตุการณ์นี้ทำให้อะตอมโดยรอบเกิดการชนกันเพิ่มขึ้นภายในอะตอมของโลหะผสมทั้งสาม ส่งผลทำให้บริเวณผิวของโลหะผสมทั้งสามเกิดความเสียหาย [22] - [23] จากผลการวิเคราะห์พบว่า โลหะผสม TiVNbTa มีช่วงของไอออนของอนุภาคโปรตอนเท่ากับ 7.89 ไมโครเมตร อนุภาคแอลฟาเท่ากับ 1.89 ไมโครเมตร โลหะผสม TiVZrTa มีช่วงไอออนของอนุภาคโปรตอนเท่ากับ 8.22 ไมโครเมตร อนุภาคแอลฟาเท่ากับ 1.89 ไมโครเมตร และโลหะผสม TiVCrTa มีช่วงไอออนของอนุภาคโปรตอนเท่ากับ 8.10 ไมโครเมตร อนุภาคแอลฟาเท่ากับ 1.87 ไมโครเมตร ผลที่ได้นี้สอดคล้องกับรูปที่ 2 และ 3



รูปที่ 4 ช่วงไอออนของอนุภาคโปรตอนที่พลังงาน 1 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์

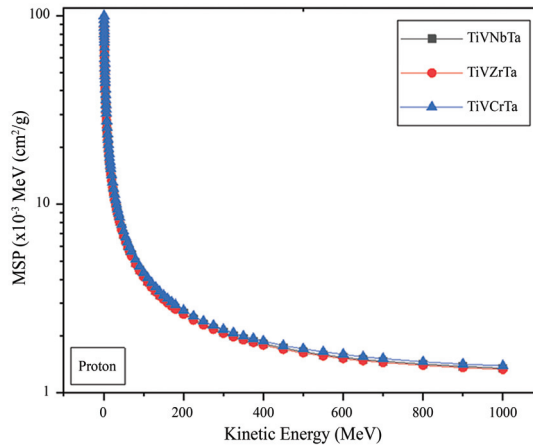


รูปที่ 5 ช่วงไอออนของอนุภาคแอลฟาที่พลังงาน 1 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์

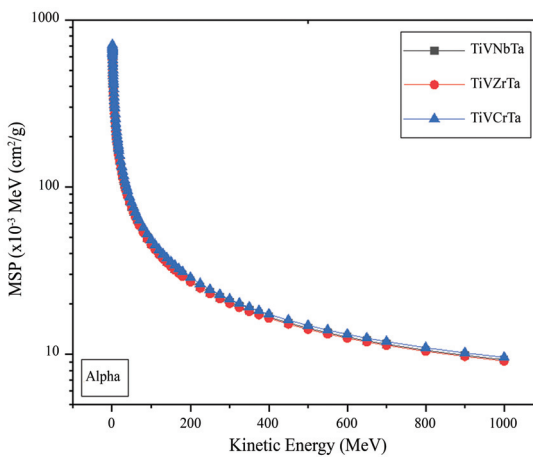
อำนาจค์ยัทยุดยั้งมวลของอนุภาคโปรตอน และอนุภาคแอลฟา

อำนาจค์ยัทยุดยั้งมวล (Mass Stopping Power) ของอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้า คือ ค่าเฉลี่ยการสูญเสียพลังงานเชิงเส้นของอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าใด ๆ (อนุภาคโปรตอน และอนุภาคแอลฟา) ที่เคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในเนื้อวัสดุต่อความหนาของมวลสำหรับอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้า อำนาจค์ยัทยุดยั้งมวลเกิดจากการชนกันของอิเล็กตรอนและการชนกันของนิวเคลียสภายในเนื้อวัสดุ ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานจนเพิ่มขึ้น จนในที่สุดอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าก็จะสูญเสียพลังงานจนทั้งหมดในระดับความลึกที่แน่นอนในเนื้อวัสดุที่อนุภาคเคลื่อนที่ผ่านการคำนวณค่าของอำนาจค์ยัทยุดยั้งมวลของอนุภาคโปรตอน และอนุภาคแอลฟา ของโลหะผสมทั้งสามที่ช่วงพลังงานจลน์ของอนุภาค 1 - 1,000 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ดังรูปที่ 6 และ 7 ผลจากการศึกษาพบว่าอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าทั้งสองมีแนวโน้มของอำนาจค์ยัทยุดยั้งมวลของโลหะผสมทั้งหมดคล้ายกัน กล่าวคืออำนาจค์ยัทยุดยั้งมวลจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วจนถึงพลังงานจลน์ของอนุภาคค่าหนึ่ง จากนั้นจะค่อย ๆ ลดค่าลงตามพลังงานที่เพิ่มขึ้น โดยโลหะผสม TiVCrTa มีค่าอำนาจค์ยัทยุดยั้งมวลมากที่สุด และวัสดุโลหะผสม TiVZrTa มีค่าอำนาจค์ยัทยุดยั้งมวลน้อยที่สุด และค่าอำนาจค์ยัทยุดยั้งมวลของอนุภาคแอลฟาสูงกว่าอนุภาคโปรตอน ผลที่เกิดขึ้นนี้เพราะอนุภาคแอลฟามีประจุไฟฟ้าที่มากกว่าและมีความเร็วที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับอนุภาคโปรตอน อำนาจค์ยัทยุดยั้งมวลจะแปรผันตามจำนวนประจุไอออนและแปรผกผันกับกำลังสอง

ของความเร็วที่พลังงานจลน์เท่ากันอนุภาคแอลฟามีความเร็วช้ากว่าโปรตอนควบคู่ไปกับประจุที่เพิ่มมากขึ้น จึงทำให้อนุภาคแอลฟามีอำนาจค์ยั้หยุดยั้งมวลมากกว่าของอนุภาคโปรตอน ดังนั้นสำหรับพลังงานจลน์ของอนุภาคทั้งสองค่าอำนาจค์ยั้หยุดยั้งมวลจึงมีแนวโน้มตามลำดับ $TiVCrTa > TiVNbTa > TiVZrTa$ [24]



รูปที่ 6 ค่าอำนาจค์ยั้หยุดยั้งมวลของอนุภาคโปรตอนที่พลังงาน 1 - 1,000 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ของ TiVNbTa, TiVZrTa, TiVCrTa



รูปที่ 7 ค่าอำนาจค์ยั้หยุดยั้งมวลของอนุภาคแอลฟาที่พลังงาน 1 - 1,000 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ของ TiVNbTa, TiVZrTa, TiVCrTa

สรุปผล

จากการศึกษาความเสียหายที่เกิดขึ้นจากอันตรกิริยาของอนุภาคโปรตอน (H^+) และแอลฟา (He^{2+}) ที่ผ่านเข้าไปทำอันตรกิริยากับอะตอมในแลคทีซที่อยู่บริเวณผิวของตัวอย่างโลหะผสมเอนโทรปีสูง ได้แก่ โลหะผสม TiVNbTa, TiVZrTa และ TiVCrTa ด้วยโปรแกรม Stopping of Ion Ranges in Matter (SRIM) Version 2013 ซึ่งพารามิเตอร์หลักที่ใช้ในการอธิบายความเสียหายที่เกิดจากอนุภาคทั้งสอง ได้แก่ การกระจายไอออน (Ion Distribution) ใน 2 มิติ ช่วงไอออน (Ion Ranges) ดำเนินการที่พลังงาน 1 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ และค่าอำนาจค์ยั้หยุดยั้งมวล (Mass Stopping Power) ที่ช่วงพลังงาน 1 - 1,000 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ โดยการศึกษาพบว่าค่าการกระจายไอออน (Ion Distribution) ที่ความลึก 12 ไมโครเมตร และช่วงไอออน (Ion Ranges) ที่พลังงาน 1 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ มีความสอดคล้องกัน คือ อนุภาคโปรตอนมีอำนาจทะลุทะลวงและสร้างความเสียหายในบริเวณผิวของโลหะผสมทั้งสามได้มากกว่าอนุภาคแอลฟา โดยค่าอำนาจค์ยั้

หยุดยั้งมวล (Mass Stopping Power) ในช่วงพลังงาน 1 - 1,000 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ พบว่าค่าอำนาจจลน์หยุดยั้งมวลรวมของโลหะผสม TiVZrTa มีค่าต่ำที่สุด และ TiVCrTa มีค่าสูงที่สุด ซึ่งนั่นแสดงให้เห็นว่าโลหะผสม TiVZrTa นั้นมีความสามารถในการกำบังอนุภาคโปรตอน (H^+) และแอลฟา (He^{2+}) ดีที่สุด

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณศูนย์วิจัยแห่งความเป็นเลิศทางเทคโนโลยีแก้วและวัสดุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม ที่ให้ความอนุเคราะห์และอำนวยความสะดวกในการทำวิจัยเป็นอย่างดี

References

- [1] Yeh, J. W., Chen, S. K., Lin, S. J., Gan, J. Y., Chin, T. S., Shun, T. T., and Chang, S. Y. (2004). Nanostructured High Entropy Alloys with Multiple Component Elements: Novel Alloy Design Concepts and Outcomes. **Advanced Engineering Materials**. Vol. 6, Issue 5, pp. 299-303. DOI: 10.1002/adem.200300567
- [2] Zhang, Y., Zuo, T. T., Tang, Z., Gao, M. C., Dahmen, K. A., Liaw, P. K., and Lu, Z. P. (2014). Microstructures and Properties of High-Entropy Alloys. **Progress in Materials Science**. Vol. 61, pp. 1-93. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2013.10.001
- [3] Tsai, M. H. and Yeh, J. W. (2014). High-Entropy Alloys: A critical Review. **Materials Research Letters**. Vol. 2, Issue 3, pp. 107-123. DOI: 10.1080/21663831.2014.912690
- [4] Miracle, D. B., Miller, J. D., Senkov, O. N., Woodward, C., Uchic, M. D., and Tiley, J. (2014). Exploration and Development of High Entropy Alloys for Structural Applications. **Entropy**. Vol. 16, Issue 1, pp. 494-525. DOI: 10.3390/e16010494
- [5] Tang, Z., Huang, L., He, W., and Liaw, P.K. (2014). Alloying and Processing Effects on the Aqueous Corrosion Behavior of High Entropy Alloys. **Entropy**. Vol. 16, Issue 2, pp. 895-911. DOI: 10.3390/e16020895
- [6] Geantă, V., Voiculescu, I., Miloşan, I., Istrate, B., and Mateş, I. M. (2018). Chemical Composition Influence on Microhardness, Microstructure and Phase Morphology of $Al_xCrFeCoNi$ High Entropy Alloys. **Revista de Chimie**. Vol. 69, Issue 4, pp. 798-801. DOI: 10.37358/RC.18.4.6203
- [7] Geantă, V., Voiculescu, I., Stefănoiu, R., Chereches, T., Zecheru, T., Matache, L., and Rotariu, A. (2018). Dynamic Impact Behaviour of High Entropy Alloys Used in the Military Domain. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. Vol. 374, p. 012041. DOI: 10.1088/1757-899X/374/1/012041
- [8] Geantă, V., Voiculescu, I., Istrate, B., Vrânceanu, D. M., Ciocoiu, R., and Cotruţ, C. M. (2018). The Influence of Chromium Content on the Structural and Mechanical Properties of $AlCr_xFeCoNi$ High Entropy Alloys. **International Journal of Engineering Research in Africa**. Vol. 37, pp. 23-28. DOI: 10.4028/www.scientific.net/jera.37.23
- [9] Voiculescu, I., Geanta, V., Vasile, I. M., Ştefănoiu, R., and Tonoiu, M. (2013). Characterisation of Weld Deposits Using as Filler Metal a High Entropy Alloy. **Journal of Optoelectronics and Advanced Materials**. Vol. 15, No. 7-8, pp. 650-654

- [10] Voiculescu, I., Geantă, V., Ștefănoiu, R., Patroi, D., and Binchiciu, H. (2013). Influence of the Chemical Composition on the Microstructure and Microhardness of AlCrFeCoNi High Entropy Alloy. **Revista de Chimie**. Vol. 64, Issue 12, pp. 1441-1444
- [11] Geantă, V., Cherecheș, T., Lixandru, P., Voiculescu, I., Ștefănoiu, R., Dragnea, D., Zecheru, T., and Matache, T. (2017). Virtual Testing of Composite Structures Made of High Entropy Alloys and Steel. **Metals**. Vol. 7, Issue 11, p. 496. DOI: 10.3390/met7110496
- [12] Csaki, I., Ștefănoiu, R., Geanta, V., Voiculescu, I., Sohaciu, M. G., Popescu, G., and Serghiuta, S. (2016). Researches Regarding the Processing Technique Impact on the Chemical Composition, Microstructure and Hardness of AlCrFeCoNi High Entropy Alloy. **Revista de Chimie**. Vol. 67, No. 7, pp. 1373-1377
- [13] Fazakas, E., Varga, B., Geantă, V., Berecz, T., Jenei, P., Voiculescu, I., Coșniță, M., and Ștefănoiu, R. (2019). Microstructure, Thermal, and Corrosion Behavior of the AlAgCuNiSnTi Equiatomic Multicomponent Alloy. **Materials**. Vol. 12, Issue 6, p. 926. DOI: 10.3390/ma12060926
- [14] Popescu, G., Ghiban, B., Popescu, C. A., Rosu, L., Truscă, R., Carcea, I., Soare, V., Dumitrescu, D., Constantin, I., Olaru, M. T., and Carlan, B. A. (2018). New TiZrNbTaFe High Entropy Alloy Used for Medical Applications. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. Vol. 400, Issue 2, p. 022049
- [15] Pickering, E. J., Carruthers, A. W., Barron, P. J., Middleburgh, S. C., Armstrong, D. E. J., and Gandy, A. S. (2012). High-Entropy Alloy for Advanced Nuclear Applications. **Entropy**. Vol. 23, Issue 1, p. 98. DOI: 10.3390/e23010098
- [16] Was, G. S. (2007). **Fundamentals of Radiation Materials Science**. 1st ed.; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany
- [17] Zinkle, S. J. (2012). **Radiation-Induced Effects on Microstructure**. In *Comprehensive Nuclear Materials*. Vol. 1, pp. 65-98
- [18] Kareer, A., Waite, J. C., Li, B., Couet, A., Armstrong, D. E. J., and Wilkinson, A. J. (2019). Short Communication: ‘Low Activation, Refractory, High Entropy Alloys for Nuclear Applications’. **Journal of Nuclear Materials**. Vol. 526, p. 151744. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2019.151744
- [19] Ziegler, J. F., Ziegler, M. D., and Biersack, J. P. (2010). SRIM - The Stopping and Range of Ions in Matter. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms**. Vol. 268, Issue 11-12, pp. 1818-1823. DOI: 10.1016/j.nimb.2010.02.091
- [20] Kamislioglu, M. (2021a). Research on the Effects of Bismuth Borate Glass System on Nuclear Radiation Shielding Parameters. **Results in Physics**. Vol. 22, p. 103844. DOI: 10.1016/j.rinp.2021.103844
- [21] Kamislioglu, M. (2021b). An Investigation Into Gamma Radiation Shielding Parameters of the (Al:Si) and (Al+Na):Si-doped International Simple Glasses (ISG) Used in Nuclear Waste Management, Deploying Phy-X/PSD and SRIM Software. **Journal of Materials Science: Materials in Electronics**. Vol. 32, pp. 12690-12704. DOI: 10.1007/s10854-021-05904-8

- [22] Dhal, S., Patro, A., Rath, P. K., Supraja, K., and Swain, M. (2020). Simulation of Very-low Energy Alkali Ion (≤ 10 KeV) Induced Effects on Al_2O_3 Micro Flakes. **Indian Journal of Science and Technology**. Vol. 13, Issue 21, pp. 2111-2118. DOI: 10.17485/IJST/v13i21.97
- [23] Nath, D. and Das, R. (2021). Surface and Displacement Damage Engineering on CdSe Nanocrystalline Thin Film by Swift Heavy Ag Ions: A Theoretical Investigation by SRIM/TRIM Package. **Vacuum**. Vol. 190, p. 110293. DOI: 10.1016/j.vacuum.2021.110293
- [24] Sriwongsa, K., Glumglomchit, P., Sualuang, B., Arunoros, P., Pansuay, M., Ravangvong, S., and Khobkham, C. (2022). Shielding of Uncharged and Charged Radiation of $\text{PbO-B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-Na}_2\text{O}$ Glass System. **Naresuan University Journal: Science and Technology**. Vol. 30, No. 1, pp. 109-119. DOI: 10.14456/nujst.2022.9

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพกังหันเกลียวเฮดต่ำในแนวนอนเพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้า

Efficiency Comparison of Horizontal Low Head Spiral Turbine for Electrical Energy Production

วิรุณ โมณะตระกูล^{1*} รัชพล สันติวารากร¹ จาริณี จงปลื้มปิติ² และพลเทพ เวงสูงเนิน²

Wiroon Monatrakul^{1*} Ratchaphon Suntivarakorn¹ Jarinee Jongpluempiti² and Ponthep Vengsungne²

Received: March 27, 2021; Revised: March 3, 2022; Accepted: March 11, 2022

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบพัฒนาระบบผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กด้วยกังหันน้ำแบบเกลียววนที่เหมาะสมที่ใช้กับกระแสน้ำความเร็วต่ำที่มีการไหลหรือไม่มี ความต่างศักย์ของแหล่งน้ำโดยรูปร่างเกลียวของกังหันถูกสร้างขึ้นโดยฟังก์ชัน Arc-length หรือสมการบิดเกลียว (Helix Equation) โดยทำการทดสอบกังหันขนาดเล็กแบบกังหันเกลียว 3 ใบ และให้น้ำในท่อไหลผ่านกังหันน้ำที่มีมุมกาง 15 18 21 และ 30 degrees ตามลำดับ และกังหันแบบ 3 ใบพัด ที่ความเร็วน้ำทดสอบ 1.00 1.25 1.50 1.75 และ 2.00 m/s ตามลำดับ และผลการศึกษ แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองกังหันมุมกาง 21 degrees มีความเร็วรอบสูงที่สุด มีแรงบิดและประสิทธิภาพกังหันดีที่สุด จากกังหันน้ำทดสอบทั้งหมด โดยมีความเร็วรอบสูงที่สุดที่ 457.09 RPM และแรงบิดที่ 2.12 N.m และประสิทธิภาพกังหันที่ 38.10 % ณ ความเร็วน้ำที่ 2 m/s โดยมีกำลังงานเท่ากับ 24.2 W แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการพัฒนากังหันน้ำแบบเกลียวเพื่อให้ได้ระบบผลิตไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้นต่อไปในอนาคต

คำสำคัญ : กังหันเกลียววนในแนวนอน; การผลิตกระแสไฟฟ้า; ประสิทธิภาพกังหัน

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

² คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา

¹ Faculty of Engineering, Khon Kaen University

² Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Isan, Nakhon Ratchasima

* Corresponding Author, Tel. 08 6653 9179, E - mail: wiroonnnn@gmail.com

Abstract

This research aims to design and develop a compact generator system using horizontal spiral water turbines which can effectively gather waste energy from low flow rate water current without potential differences. The basic spiral turbine design was carried out through Arc-length Function (helix equation) to obtain spiral turbine prototypes for Laboratory testing. They had three spiral blades with tilt angles of 15, 18, 21, and 30 degrees. There were tested in-line flow tests with flow rates variations of 1.0, 1.25, 1.50, 1.75, and 2.00 m/s. The results revealed that the three spiral water turbines with 21 degrees blade tilt had the most RPM, torque and efficiency. This model could produce 457.09 RPM, 2.12 N.m of torque, and with 38.10 % efficiency at 2 m/s water flow rate generating 24.2 W of electricity. The study results showed potential development of the system and its enhancements to achieve better quality in the future.

Keywords: Horizontal Spiral Turbine; Electric Energy Production; Turbine Efficiency

บทนำ

พลังงานหมุนเวียนของโลกจากข้อมูลของ International Hydropower Association (IHA) แสดงให้เห็นว่ามีการนำเอาพลังงานหมุนเวียนกับมาใช้ใหม่ทั้งสิ้น 25.6 % โดยคิดจากพลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลมและพลังงานน้ำ โดยพลังงานน้ำคิดเป็น 15.9 % ส่วนที่เหลือคิดเป็น 6.7 % [1] จากข้อมูลดังกล่าวจะเห็นได้ว่าการนำเอาพลังงานน้ำมาใช้ถือเป็นส่วนใหญ่จากพลังงานที่กล่าวมา ซึ่งแสดงให้เห็นถึงศักยภาพที่น่าจะมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องในอนาคต ปัจจุบันหากกล่าวถึงประเทศไทยแล้วมีกำลังการผลิตไฟฟ้าพลังงานน้ำรวม 3,444.18 MW คิดเป็นร้อยละ 22.25 ของกำลังผลิตรวมของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย [2] และการพัฒนาโรงไฟฟ้าขนาดใหญ่ของประเทศไทยไม่สามารถเกิดขึ้นได้อีกเนื่องจากมีข้อจำกัดหลายประการ จากสถานการณ์ดังกล่าวการศึกษาออกแบบชุดกังหันน้ำที่ติดตั้งง่ายในคลองส่งน้ำ เพื่อเป็นระบบผลิตกระแสไฟฟ้าแบบเล็ก และสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าที่ความเร็วต่ำจะเป็นตัวช่วยเสริมในการผลิตกระแสไฟฟ้าให้กับประเทศไทยในอนาคต เนื่องจากคลองส่งน้ำในประเทศไทยมีเป็นจำนวนมาก แต่กระแสน้ำในคลองส่งน้ำส่วนใหญ่มีความเร็วต่ำ และลำคลองมีความชันน้อยมาก การที่จะนำพลังงานจากคลองน้ำมาใช้ได้จำเป็นต้องออกแบบกังหันที่เหมาะสมที่เข้ากับกระแสน้ำความเร็วต่ำ คือ น้อยกว่า 0.3 m ได้ ดังนั้นการออกแบบกังหันน้ำเพื่อประยุกต์ใช้ในคลองส่งน้ำจะมีความเหมาะสมกว่า [3] ปัจจุบันมีการวิจัยเจาะจงไปยังการออกแบบและพัฒนากังหันในรูปแบบต่าง ๆ เพื่อทำการดึงเอาพลังงานจากกระแสน้ำเพื่อทำการผลิตกระแสไฟฟ้าให้มากที่สุด ซึ่งเป็นพลังงานที่สะอาดและเหมาะสมผลที่สุด โดยเฉพาะอย่างยิ่งในพื้นที่ที่ห่างไกลที่ไม่มีไฟฟ้าแต่มีการไหลผ่านของกระแสน้ำทำให้ไม่จำเป็นต้องมีการสร้างโครงข่ายไฟฟ้าขนาดใหญ่และต้นทุนการขนส่งระยะไกล [4] งานวิจัยในประเทศไทยมีการศึกษาการผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กจากคลื่นชายฝั่งทะเลซึ่งสามารถชาร์จแบตเตอรี่ขนาด 12 V 5 Ah ได้ภายในเวลา 1 ชั่วโมง 45 นาที [5] โดยกังหันในปัจจุบันได้มีการพัฒนาก้าวหน้าไปอย่างมากในการสร้างแรงบิด (Torque) และประสิทธิภาพสามารถนำมาใช้สำหรับความเร็วต่ำและสามารถใช้แรงบิดที่สูงและประสิทธิภาพในการหมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและเพิ่มพลังงาน Output ด้วยแรงที่น้อยที่สุด [6] เพื่อการผลิตกำลังไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนได้อย่างมีประสิทธิภาพ พบว่ากังหันแบบหมุนวนในแนวนอนด้วยรูปทรงของใบกังหันที่มีขนาดรัศมีเล็ก จึงเกิดแรงจลน์น้อยแต่สามารถเก็บกักพลังงานจลน์ของของไหลได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งยังไม่เป็นอันตรายต่อสัตว์น้ำ ทำให้สามารถผนวกกับระบบนิเวศดั้งเดิมได้ อีกทั้งด้วยพื้นที่รับน้ำที่มากและมีการเชื่อมต่อกันเป็นใบที่ต่อเนื่องทำให้กังหัน

มีความแข็งแรงกว่ากังหันแบบทั่วไป และเหมาะกับกระแสน้ำความเร็วต่ำมากกว่ากังหันแบบทั่วไปที่มีพื้นที่ผิวรับน้ำน้อยกว่า พื้นที่รับกระแสของไหลของกังหันแบบทั่วไปคือ พื้นที่ที่ใบของกังหันกวาดไปลบด้วยพื้นที่ตรงกลาง ซึ่งเป็นที่ติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แต่สำหรับกังหันแบบเกลียวในแนวนอนมีพื้นที่ตรงกลางไม่ได้หายไป ซึ่งจะช่วยให้มีพื้นที่รับของไหลที่มากกว่าและทำให้มีประสิทธิภาพในการดึงพลังงานได้สูงกว่า [7] ในงานวิจัยเกี่ยวกับการออกแบบกังหันน้ำเพื่อผลิตพลังงานของประเทศไทยแสดงให้เห็นว่ากังหันน้ำที่มีการออกแบบมาให้ใช้งานกับระดับน้ำที่มีเสถียรนั้นมีประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับ 53 % [8] ส่วนในต่างประเทศมีการออกแบบกังหันที่มีประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับ 87.9 % ที่เสถียรเท่ากับ 2.87 m [9] ซึ่งเป็นข้อมูลที่น่าจะนำมาใช้ในการพัฒนากังหันน้ำต่อไปในอนาคตนั่นเอง

วิธีดำเนินการวิจัย

1. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในงานวิจัยนี้เป็นการออกแบบและพัฒนากังหันเกลียวในแนวนอนเพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้า ดังนั้นการประเมินหาแรงบิดเบื้องต้น หรือคำนวณหากำลังที่ได้จากแรงบิดจะสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1) [10] - [12]

$$P_t = 2\pi\tau N / 60 \quad (1)$$

ในการประเมินประสิทธิภาพของกังหันก็เป็นหนึ่งในตัวชี้วัดที่สำคัญสำหรับการประเมินงานวิจัยนี้ โดยที่กำลังของกังหันและประสิทธิภาพขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำที่สามารถใช้ได้หรืออัตราการไหลของน้ำ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2) และกำลังงานสูงสุดที่ใบของกังหันน้ำจะเก็บได้สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3) [13] ซึ่งเป็นไปตามกฎของ Betz Limit [14]

$$\eta = P_t / \rho g Q H_n \quad (2)$$

$$P_t = \left(\frac{16}{27}\right) \left(\frac{1}{2}\right) \rho A V^3 \quad (3)$$

เมื่อ

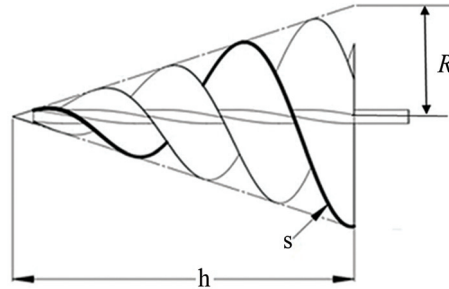
- P_t คือ Turbine Output, kW
- τ คือ แรงบิดกังหันน้ำ N.m
- Q คือ อัตราไหลของน้ำ Turbine Discharge, m³/s
- H_n คือ เหน้ Turbine Net Head, m
- η คือ Turbine Efficiency
- A คือ พื้นที่หน้าตัดกังหัน
- ρ คือ ความหนาแน่นของน้ำ
- V คือ ความเร็วของน้ำ

โดยที่ 16/27 คือค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุด (CPmax) หรือเรียกว่า Betz Coefficient [15]

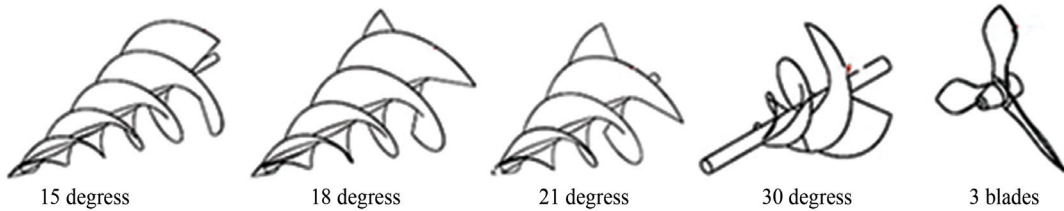
2. กังหันเกลียว

กังหันเกลียวถูกสร้างขึ้นและบิดเป็นเกลียวด้วยสมการฟังก์ชันของความยาวส่วนโค้ง หรือที่เรียกกันว่า Arc-Length Function [16] - [18] โดยการออกแบบกังหันเกลียวถูกสร้างขึ้นและบิดเป็นเกลียวด้วยการพันใบให้ครบ 1 รอบแกนเพลลา หรือ 360 degrees คือความยาว (L) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) ดังรูปที่ 1

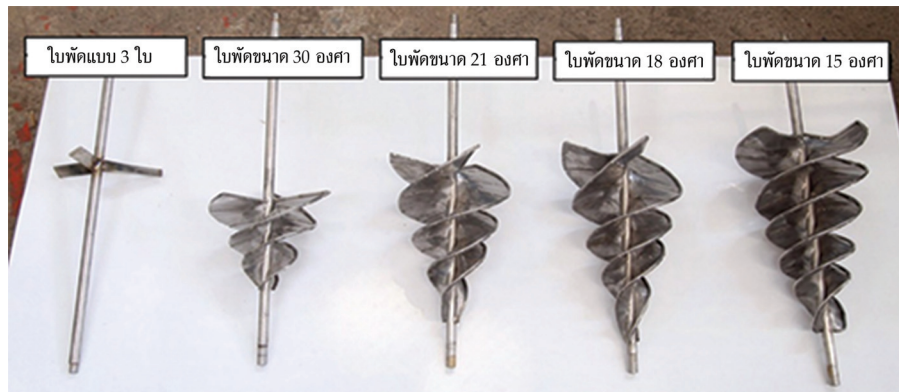
ของกังหัน ซึ่งที่ความยาวค่าหนึ่งจำนวนใบ (n) จะเป็นตัวกำหนดระยะพิทช์ที่ความยาวเท่ากัน ยิ่งจำนวนใบกังหันมาก ระยะพิทช์จะสั้น แต่ถ้าจำนวนใบกังหันน้อยระยะพิทช์จะยาว ดังนั้นที่ความยาวของกังหันเท่ากัน จำนวนใบที่เหมาะสมเท่านั้นจะให้กำลังการผลิตพลังงานไฟฟ้าที่ดีที่สุด โดยรูปที่ 1 แสดงถึงตัวแปรในการคำนวณและสร้างรูปร่างของกังหัน รูปที่ 2 รูปร่างของกังหันน้ำเกลียวแบบ 3 ใบพิทช์ที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดให้แตกต่างกัน และใบพิทช์จากงานวิจัยอื่นที่นำมาเปรียบเทียบ ส่วนรูปที่ 3 แสดงถึงแบบจำลองที่พร้อมใช้ทดสอบในห้องปฏิบัติการ



รูปที่ 1 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบกังหันเกลียวด้วย Arc-Length Function



รูปที่ 2 รูปร่างของกังหันน้ำเกลียวแบบ 3 ใบพิทช์ที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดให้แตกต่างกันและใบพิทช์จากงานวิจัยอื่นที่นำมาเปรียบเทียบ



รูปที่ 3 โมเดลกังหันที่นำมาทดสอบ

โดยตารางที่ 1 แสดงถึงข้อมูลกายภาพของกังหันที่นำมาทดสอบ

ตารางที่ 1 ลักษณะกายภาพของ Model กังหันน้ำ

Turbine Model	Blade Area (mm ²)	Pitch (mm)	Length (mm)	Width (mm)
15 degree	38,797.86	49	265	150
18 degree	37,976.16	49	233	150
21 degree	31,763.73	49	197	150

ตารางที่ 1 ลักษณะกายภาพของ Model กังหันน้ำ (ต่อ)

Turbine Model	Blade Area (mm ²)	Pitch (mm)	Length (mm)	Width (mm)
30 degree	20,196.81	49	113	150
3-blades	2.264.88			10

เนื่องจากการสร้างกังหันแนวอนันต์ในการสร้างใบเกลียวจำเป็นต้องมีการคำนวณหาระยะของเกลียวก่อนการสร้าง เพื่อให้ลักษณะของกังหันเกลียวที่ได้จากการสร้างจริงมีขนาดตามที่ได้ออกแบบไว้ โดยในการคำนวณหาระยะความยาวเส้นโค้งกังหันเกลียวสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4) และสามารถคำนวณหาพื้นที่ความยาวเส้นโค้งใบกังหันเกลียวได้จากสมการที่ (5)

$$s = \sqrt{4\pi^2 N^2 R^2 + h^2} \quad (4)$$

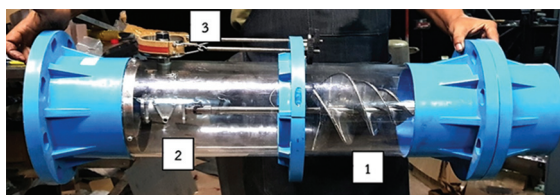
$$A = \pi r = \pi \int_0^s \int_0^b \|r'(t)\| \frac{dr}{dt} \frac{dr}{dt} \quad (5)$$

เมื่อ

h แทนค่าความสูง (ระยะระหว่างช่วงการหมุนตามกันมา) และเมื่อเกลียวมีการหมุนครบรอบ N รอบ
 R คือ รัศมีของเกลียว

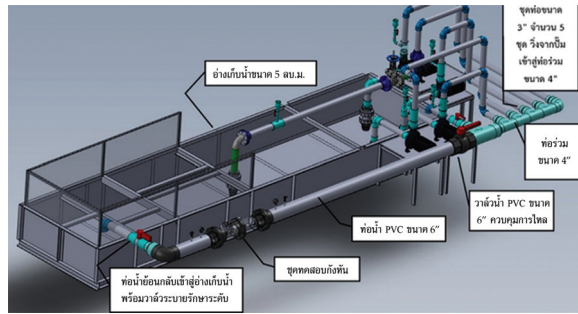
3. ระบบทดสอบจากพลังงานน้ำไหลผ่านกังหันน้ำเกลียววนในท่อ

ชุดทดสอบกังหันน้ำเกลียว โดยได้ทำการออกแบบให้สามารถถอดเปลี่ยนใบกังหันทดสอบได้ โดยมีตัวช่วยถอดยึดเป็นลักษณะท่ออะคริลิกใสขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.15 m ยาว 0.6 m เพื่อที่จะได้มองเห็นการไหลและการหมุนของกังหัน ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ชุดทดสอบกังหันน้ำเกลียว; หมายเลข 1: ใบกังหันทดสอบสามารถถอดเปลี่ยนใบเพื่อการทดสอบได้, หมายเลข 2: ชุดเกียร์เปลี่ยนทิศทาง 90 degrees อัตราทด 1:1, หมายเลข 3: ชุดพูล์คัลล์กับโพนีเบรก โดยจะติดตั้งไหลดเซลล์ไว้เพื่อรับไหลดจากการหมุนตึงผ้าเบรกด้วยสกรูปรับความตึง

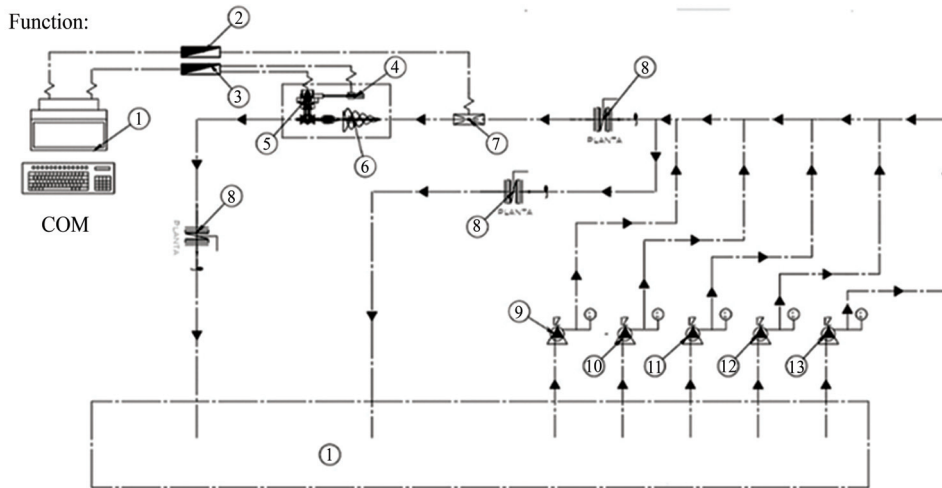
ระบบท่อน้ำไหลทำจาก PVC ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.150 m ความยาว 6.80 m มีวาล์วเปิด-ปิดน้ำระยะห่างจากชุดทดสอบ 3.05 m โดยมีระบบส่งน้ำด้วยปั๊มจำนวน 5 ตัว เข้าสู่ท่อร่วมขนาด 0.10 m และผ่านวาล์วเปิด-ปิดขนาด 0.150 m ผ่านช่วงต่อขยาย และมีวาล์วขนาด 0.075 m ก่อนถึงวาล์วส่งน้ำ เพื่อบายพาสปริมาณน้ำกลับสู่อ่างน้ำ เพื่อใช้ในการปรับอัตราการไหล ส่วนรูปที่ 5 และ 6 แสดงแบบจำลองระบบทดสอบการไหลในท่อและชุดทดสอบจริง ณ ห้องปฏิบัติการ โดยรูปที่ 7 จะแสดงถึงไดอะแกรมภาพรวมของระบบทดสอบทั้งหมด ไม่ว่าจะเป็นระบบเก็บข้อมูล ชุดกลไกในการทดสอบ โมดูลกังหันน้ำ เซ็นเซอร์ ฯลฯ



รูปที่ 5 แบบจำลองระบบทดสอบการไหลในท่อ



รูปที่ 6 ระบบทดสอบการไหลในท่อ ณ ห้องปฏิบัติการ



รูปที่ 7 ไดอะแกรมระบบทดสอบการไหลในท่อ

โดยที่

- | | |
|-----------|---|
| หมายเลข 1 | อุปกรณ์เก็บข้อมูล |
| หมายเลข 2 | อุปกรณ์เก็บข้อมูลอัตราการไหล |
| หมายเลข 3 | อุปกรณ์เก็บข้อมูลความเร็วรอบ |
| หมายเลข 4 | พรอนีเบรก (Prony Brake) พร้อมโหลดเซลล์ |
| หมายเลข 5 | ชุดพู่เล่รับแรงบิด และเซ็นเซอร์วัดความเร็วรอบ |
| หมายเลข 6 | โมเดลกังหันทดสอบ |

- หมายเลข 7 เซ็นเซอร์วัดอัตราการไหล (Ultrasonic Flow Meter)
 หมายเลข 8 วาล์วน้ำ
 หมายเลข 9 - 13 ปัมป์สูบน้ำที่อัตราการไหล 1,000 LPM
 หมายเลข 14 อ่างน้ำขนาด 5 m³

4. ขั้นตอนการศึกษา

ในขั้นตอนการศึกษาจะเริ่มจากการป้อนน้ำเข้าไปยังแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าในอัตราการไหลของน้ำ โดยกำหนดที่ช่วง 1.00 m/s ทำการวัดความเร็วรอบของเพลากังหันน้ำในกรณีที่ไม่มีแรงกระทำจากโพรเนเบอร์ก เพื่อวัดค่าความเร็วรอบของกังหันเมื่อไม่มีแรงเสียดทาน เพิ่มแรงกระทำจากโพรเนเบอร์กที่มีต่อเพลากังหันน้ำ โดยการปรับสกรูโพรเนเบอร์กให้เพลากังหันน้ำมีความเร็วรอบลดลงที่ละ 10 RPM แล้ววัดค่าและเก็บข้อมูลแรงดึงที่โพรเนเบอร์ก จนกระทั่งเพลากังหันน้ำหยุดหมุน และเก็บข้อมูลต่าง ๆ ลงในโปรแกรม LAB VIEW จากนั้นทำการเริ่มต้นทดลองใหม่ตั้งแต่เริ่มต้น โดยลดอัตราการไหลของน้ำที่ป้อนเข้าสู่ระบบทดสอบที่ละช่วง 1.25 1.50 1.75 และ 2.00 m/s ตามลำดับ นำข้อมูลที่ทำการเก็บค่าเสร็จแล้วทำการคำนวณหาค่าแรงบิด กำลังของไหล กำลังที่เพล่า และประสิทธิภาพทางกล เพื่อวิเคราะห์แนวโน้มที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงปัจจัยในการศึกษา

ผลการศึกษา

1. ผลการทดสอบความเร็วรอบของกังหันน้ำ

ผลการทดลองความเร็วของกังหันน้ำ โดยวิธีการการวัดความเร็วรอบด้วยเครื่อง Tachometer แบบเซ็นเซอร์แสงเพื่อเปรียบเทียบความเร็วรอบการหมุนของกังหันน้ำทั้ง 5 แบบ ดังตารางที่ 2 ซึ่งจากผลศึกษาแสดงให้เห็นว่าความเร็วขาเข้าของน้ำที่กระทบกับใบกังหันน้ำส่งผลต่อความเร็วรอบของกังหันสูงสุดในเชิงเส้น และเมื่อพิจารณาถึงลักษณะของกังหันเกลียวในแต่ละมุมแล้วจะแสดงให้เห็นว่าเกลียวในแต่ละมุมส่งผลต่อความเร็วรอบของกังหันเป็นกราฟแบบพาราโบลา โดยแต่ละมุมจะมีแนวโน้มเช่นเดียวกันในทุกๆ ความเร็วน้ำที่เข้าปะทะกับกังหันคือจะมีค่าสูงสุดที่กังหันเกลียวมุม 21 degrees

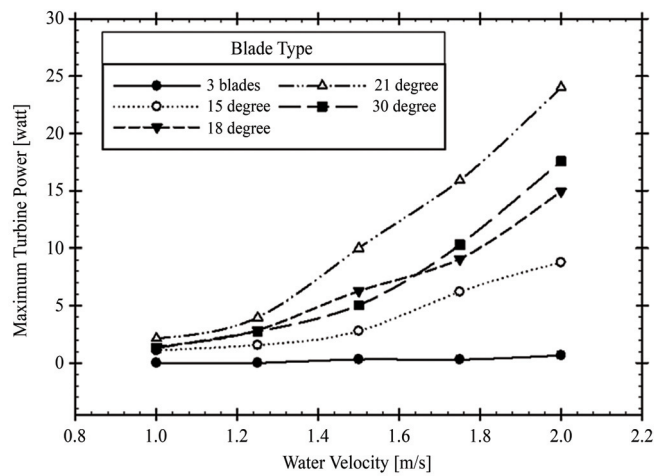
ตารางที่ 2 ความเร็วรอบกับอัตราการไหลของกังหันน้ำทั้ง 5 แบบจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

Water Velocity (m/s)	Turbine Angular Velocity (RPM)				
	15 degrees	18 degrees	21 degrees	30 degrees	3-blades
1.00	180.5	187.78	232.22	126.87	0.00
1.25	237.20	265.76	279.32	173.37	0.00
1.50	270.37	355.90	366.51	213.64	153.55
1.75	326.62	386.45	415.41	258.69	144.61
2.00	391.49	457.09	469.00	301.40	193.05

2. กำลังที่ได้ของกังหันน้ำ

ผลการเปรียบเทียบกำลังที่ได้ของกังหันน้ำทั้ง 5 แบบที่อัตราการไหล 1,100 1,300 1,630 1,850 และ 2100 LPM ตามลำดับ กำลังที่ได้จะเพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบที่เพิ่มขึ้นจนถึงค่าสูงสุดแล้วจะลดลงจนมีค่าเป็นศูนย์ที่ความเร็วรอบการหมุนของกังหันน้ำมีค่าสูงสุด จะเห็นว่า กังหันน้ำเกลียวขนาดมุมกลาง 21 degrees มีกำลังสูงสุดทุกย่านความเร็วรอบที่ทำการเก็บข้อมูลการทดลอง และกังหันเกลียวขนาดมุมกลาง 18 15 30 degrees มีกำลังลดทอนตามลงมาเป็นลำดับ ส่วนของกังหันแบบ 3 ใบพัด จะเริ่มสามารถเก็บข้อมูลได้

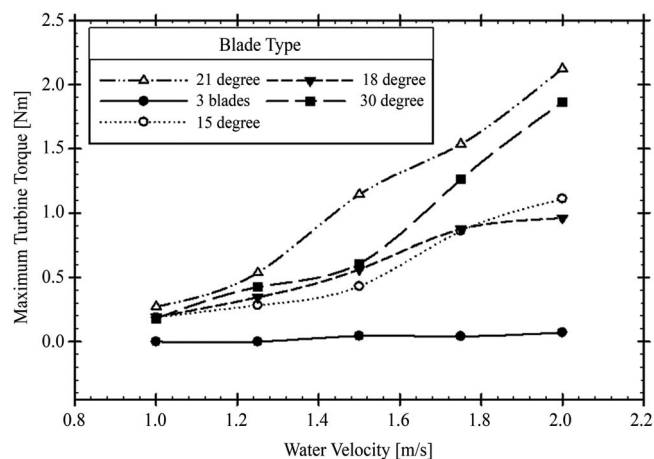
ที่อัตราการไหลของน้ำ 1,630 1,850 2,100 LPM ตามลำดับ และกำลังจะมีค่าน้อยที่สุดในกังหันจำลองทดสอบ โดยรูปที่ 8 เป็นกราฟเปรียบเทียบกำลังของกังหันน้ำ ณ ความเร็วน้ำต่าง ๆ



รูปที่ 8 กราฟเปรียบเทียบกำลังสูงสุดของกังหันน้ำแบบเกลียววนและ 3 ใบพัด ที่อัตราการไหล 1,100 1,300 1,630 1,850 และ 2,100 LPM หรือ 1.25 1.50 1.75 และ 2.00 m/s ตามลำดับ

3. แรงบิดที่ได้ของกังหันน้ำ

เมื่อพิจารณาถึงแรงบิดที่ได้จากกังหันน้ำในผลการทดลองที่อัตราการไหลของน้ำ 1,100 1,300 1,630 1,850 และ 2,100 LPM ตามลำดับ พบว่ากังหันน้ำเกลียววนขนาดมุมองศา 21 degrees มีแรงบิดสูงสุด โดยค่าแรงบิดสูงสุดทุกย่านความเร็วรอบที่ทำการเก็บข้อมูลการทดลอง และกังหันเกลียววนมุมองศา 18 15 และ 30 degrees มีค่าแรงบิดลดลงตามลงมาเป็นลำดับ ส่วนของกังหันแบบ 3 ใบพัด จะเริ่มสามารถเก็บข้อมูลได้ที่อัตราการไหลของน้ำ 1,630 1,850 และ 2,100 LPM ตามลำดับ และแรงบิดจะมีค่าน้อยที่สุดในกังหันจำลองทดสอบ โดยรูปที่ 9 เป็นกราฟเปรียบเทียบแรงบิดของกังหันน้ำ ณ ความเร็วน้ำต่าง ๆ

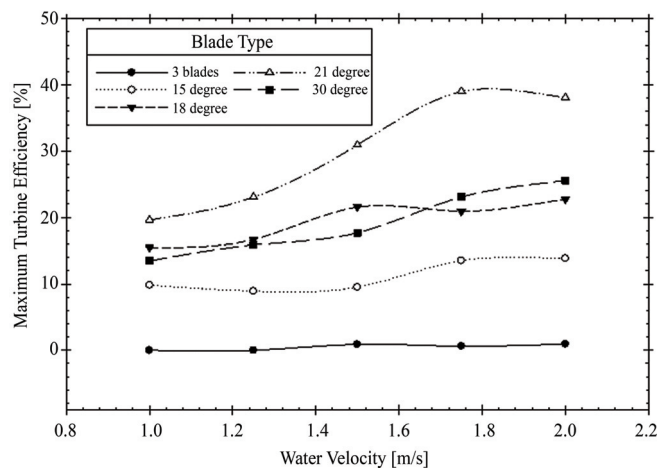


รูปที่ 9 กราฟเปรียบเทียบแรงบิดสูงสุดของกังหันน้ำแบบเกลียววนและ 3 ใบพัดที่อัตราการไหล 1,100 1,300 1,630 1,850 และ 2,100 LPM หรือ 1.25 1.50 1.75 และ 2.00 m/s ตามลำดับ

4. ประสิทธิภาพของกังหันน้ำ

ในการพิจารณาประสิทธิภาพของกังหันน้ำนั้น เมื่อนำเอาผลการศึกษามาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของกังหันน้ำในแต่ละช่วงอัตราการไหลจะเห็นว่า กังหันน้ำเกลียววนขนาดมุมองศา 21 degrees มีประสิทธิภาพสูงสุด

โดยประสิทธิภาพสูงสุดทุกย่านความเร็วรอบที่ทำการเก็บข้อมูลการทดลอง และกักกันเกลียววนมุมกาง 18 15 และ 30 degrees มีประสิทธิภาพพลดทล้นตามลงมาเป็นลำดับ ส่วนของกักกันแบบ 3 จะเริ่มสามารถเก็บข้อมูลได้ที่อัตราไหลของน้ำ 1,630 1,850 และ 2,100 LPM ตามลำดับ และประสิทธิภาพจะมีค่าน้อยที่สุดในกักกันจำลองทดสอบ โดยกักกันน้ำแบบเกลียววนขนาดมุมกาง 21 degrees มีประสิทธิภาพสูงกว่ากักกันอื่น ๆ ที่ทุกค่าอัตราการไหล และมีประสิทธิภาพสูงสุด 38.10 % ณ ความเร็วรอบ 120.00 RPM ที่อัตราการไหล 1,100 LPM 39.05 % ณ ความเร็วรอบ 156.63 RPM ที่อัตราการไหล 1,300 LPM 30.96 % ณ ความเร็วรอบ 179.72 RPM ที่อัตราการไหล 1,630 LPM 38.07 % ณ ความเร็วรอบ 195.79 RPM ที่อัตราการไหล 1,850 LPM และ 38.10 % ณ ความเร็วรอบ 230.31 RPM ที่อัตราการไหล 2,100 LPM ตามลำดับ โดยรูปที่ 10 เป็นกราฟเส้นเปรียบเทียบประสิทธิภาพของกักกันน้ำทั้ง 5 ชนิด



รูปที่ 10 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพสูงสุดของกักกันน้ำแบบเกลียววนและ 3 ใบพัดที่อัตราการไหล 1,100 1,300 1,630 1 850 และ 2,100 LPM หรือ 1 1.25 1.50 1.75 m/s และ 2.00 m/s ตามลำดับ

สรุปผลการทดลอง

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพกักกันเกลียวเฮดค้ำในแนวนอนเพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้า โดยใช้เทคนิคการขยายมุมกางใบพัดจากสมการ Arc-Length Function ทำให้ได้ต้นแบบกักกันเกลียวเพื่อจะนำมาทดสอบแบบการไหลในท่อ (In-Line Flow) โดยทำการสร้างโมเดลที่จะทดสอบในระดับห้องปฏิบัติการทำจากสแตนเลสมีขนาดกว้าง 150 mm ใบพัดมีลักษณะหมุนบิดเกลียวมีระยะพิชต์ต่อรอบการหมุน 50 mm และมีมุมกางตามลำดับที่ 15 18 21 และ 30 degrees ตามลำดับ และมีกักกันตามแนวแกนแบบ 3 ใบพัด ทำการทดสอบที่อัตราการไหล 1.00 1.25 1.50 1.75 และ 2.00 m/s เพื่อหาการหมุน (RPM) แรงบิด (Torque) และประสิทธิภาพของกักกัน ผลการทดลองพบว่า แบบจำลองกักกันมุมกาง 21 degrees มีความเร็วรอบสูงที่สุด มีแรงบิด และประสิทธิภาพกักกันดีที่สุด จากกักกันน้ำทดสอบทั้งหมด โดยมีความเร็วรอบสูงสุดที่ 457.09 RPM และแรงบิดที่ 2.12 N.m และประสิทธิภาพกักกันที่ 38.10 % ณ ความเร็วน้ำที่ 2 m/s โดยมีกำลังงานเท่ากับ 24.2 W ซึ่งหากเปรียบเทียบประสิทธิภาพ [9] ที่มีประสิทธิภาพสูงถึง 87.9 % หรือเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัย [8] จะพบว่าประสิทธิภาพสูงถึง 53 % ซึ่งจะต้องมีการปรับปรุงแก้ไขเพื่อให้ประสิทธิภาพของกักกันน้ำมีมากยิ่งขึ้น โดยมีการควบคุมปัจจัยรบกวนต่าง ๆ เช่น ผลกระทบเสไฟฟ้าของกักกันน้ำแบบเกลียววน และลักษณะที่เหมาะสมซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการเลือกใช้กักกันน้ำที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดในแหล่งน้ำที่มีระดับความสูงของน้ำต่ำ และมีความเหมาะสมกับปัจจัยแวดล้อมอื่น ๆ ในการศึกษาวิจัยเพิ่มเติม การวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลของน้ำผ่านกักกันโดยวิเคราะห์ผ่านการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และการทดสอบผลกระทบเสไฟฟ้าจริงอื่น ๆ เพิ่มมากขึ้น

และมีการควบคุมปัจจัยรบกวนต่าง ๆ เช่น ขนาดของกังหันน้ำ ซึ่งจะส่งผลต่อแรงบิดและกำลังที่ได้ เพื่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการทำงานวิจัยให้น้อยที่สุด

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณอุดหนุนการวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา ด้านการบริหารจัดการพลังงานและพัฒนาพลังงานทดแทน สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ สนับสนุนทุนโครงการวิจัยในครั้งนี้ กลุ่มวิจัยวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีควบคุมอัตโนมัติ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ให้คำปรึกษาในการวิจัย และสถานที่ในการทดลอง

References

- [1] Xu, B., Zhang, J., Egusquiza, M., Chen, D., Li, F., Behrens, P., and Egusquiza, E. (2021). A Review of Dynamic Models and Stability Analysis for a Hydro-Turbine Governing System. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. Vol. 144, p. 110880. DOI: 10.1016/J.RSER.2021.110880
- [2] Thailand Power Development. (2015). **Thailand Power Development Plan 2015-2036 (PDP2015)**. Energy Policy and Planning Office, thailand
- [3] Wanchat, S. (2014). **Design and Development of Water Free Vortex Hydro Power Plant**. Khon Kaen University
- [4] Hoghooghi, H., Durali, M., and Kashef, A. (2018). A New Low-Cost Swirler for Axial Micro Hydro Turbines of Low Head Potential. **Renewable Energy**. Vol. 128, Part A, pp. 375-390. DOI: 10.1016/J.RENENE.2018.05.086
- [5] Chaichan, W. and Kanchana, S. (2016). The Small Electric Power Generation from Coast Waves. **RMUTI JOURNAL Science and Technology**. Vol. 9, No. 2, pp. 108-117 (in Thai)
- [6] Sørnes, K. (2010). **Small-scale Water Current Turbines for River Applications**. ZERO - Zero Emission Resource Organisation
- [7] Suntivarakorn, R., Wanchat, S., and Monatrakul, W. (2016). An Experimental Study of Electricity Generation Using a Horizontal Spiral Turbine. **Energy Procedia**. Vol. 100, pp. 532-536. DOI: 10.1016/J.EGYPRO.2016.10.215
- [8] Nuantong, W. and Taechajedcadarungsri, S. (2016). Comparison of Flow Simulation of Very Low Head (VLH) Turbine Using RANS and LES. **RMUTI JOURNAL Science and Technology**. Vol. 9, No. 3, pp. 82-98 (in Thai)
- [9] Zhou, D., Gui, J., Deng, Z. D., Chen, H., Yu, Y., Yu, A., and Yang, C. (2019). Development of An Ultra-Low Head Siphon Hydro Turbine Using Computational Fluid Dynamics. **Energy**. Vol. 181, pp. 43-50. DOI: 10.1016/J.ENERGY.2019.05.060
- [10] Batchelor, C. K. and Batchelor, G. K. (1967). **An Introduction to Fluid Dynamics**. Cambridge University Press
- [11] Versteeg, H. K. and Malalasekera, W. (2007). **An Introduction to Computational Fluid Dynamics**. Pearson Education Limited

- [12] Sritram, P. and Suntivarakorn, R. (2017). Comparative Study of Small Hydropower Turbine Efficiency at Low Head Water. **Energy Procedia**. Vol. 138, pp. 646-650. DOI: 10.1016/J.EGYPRO.2017.10.181
- [13] Abolvafaei, M. and Ganjefar, S. (2020). Maximum Power Extraction from Fractional Order Doubly Fed Induction Generator Based wind Turbines Using Homotopy Singular Perturbation Method. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**. Vol. 119, p. 105889. DOI: 10.1016/J.IJEPES.2020.105889
- [14] Vennell, R. (2013). Exceeding the Betz Limit with Tidal Turbines. **Renewable Energy**. Vol. 55, pp. 277-285. DOI: 10.1016/J.RENENE.2012.12.016
- [15] Schubel, P. J. and Crossley, R. J. (2012). Wind Turbine Blade Design. **Energies**. Vol. 5, pp. 3425-3449. DOI: 10.3390/EN5093425
- [16] Herman, E. J. and Strang, G. (2016). **Calculus**. Rice University
- [17] Larson, Ron. (2015). **Calculus: Early Transcendental Functions**. 7th Edition. Bruce H. Edwards
- [18] Thomas, Jr., George B. Weir, Maurice D., and Hass, Joel, Heil, C. (2014). **Thomas' Calculus Thirteenth Edition (13th ed.)**. Pearson Education Limited

ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระและปริมาณสารฟีนอลิกของน้ำลูกหม่อน พาสเจอร์ไรซ์ระหว่างการเก็บรักษา

Antioxidant Activities and Phenolic Acids Profile of Pasteurized Mulberry Juice During Storage

วิภาวดี พันธุ์หนองหว้า^{1*}

Wipavadee Punnongwa^{1*}

Received: October 1, 2021; Revised: March 12, 2022; Accepted: March 16, 2022

บทคัดย่อ

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่สำคัญในน้ำลูกหม่อนพาสเจอร์ไรซ์ในระหว่างการเก็บรักษาเป็นระยะเวลา 3 เดือน ที่อุณหภูมิ 4 ± 2 °C ผลการทดสอบด้านประสาทสัมผัสด้วยวิธี 9-Point Hedonic Scale พบว่าน้ำลูกหม่อนสายพันธุ์ริรมย์ 60 ความเข้มข้นร้อยละ 40 และร้อยละ 50 มีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ 13 °Brix ได้รับคะแนนความชอบสูงสุดด้านสี รสชาติ กลิ่น และความชอบรวมสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq 0.05$) ผลของการเก็บรักษาน้ำลูกหม่อนปริมาณสารแอนโทไซยานินลดลง สารฟีนอลิกและสารฟลาโวนอยด์เมื่อทำการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 ± 2 °C เป็นระยะเวลา 3 เดือน พบว่าปริมาณสารฟีนอลิก ฟลาโวนอยด์และแอนโทไซยานินมีปริมาณลดลงร้อยละ 55.57 55.16 และ 65.64 ตามลำดับ การสูญเสียฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระที่ทำการทดสอบด้วยวิธี FRAP และวิธี ABTS Radical Scavenging Activity มีปริมาณลดลงร้อยละ 34.18 และ 65.91 ($p\leq 0.05$) เมื่อทำการทดสอบชนิดและปริมาณสารฟีนอลิกด้วยเทคนิค Ultra-Performance Liquid Chromatography (UPLC) เครื่องตรวจวัดสัญญาณแบบ Photo Diode Array พบว่าน้ำลูกหม่อนมีปริมาณกรดแกลลิก กรดไฮดรอกซีเบนโซอิก กรดควาลิสิก กรดทรานส์เฟอรูลิก รูทีน และกรดซิเนปิก ลดลงร้อยละ 97.67 94.61 78.33 96.99 53 และ 29.13 ตามลำดับ ($p\leq 0.05$) จากการศึกษาช่วยเป็นแนวทางปรับปรุงกระบวนการแปรรูปและการเก็บรักษาของน้ำลูกหม่อนพาสเจอร์ไรซ์เพื่อคงคุณค่าสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพและฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระสำหรับอุตสาหกรรมการแปรรูปน้ำลูกหม่อนต่อไป

คำสำคัญ : น้ำลูกหม่อน; สารฟีนอลิก; ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ

¹ คณะเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสุรินทร์

¹ Faculty of Agricultural and Technology, University of Rajamangkala University of Technology Isan, Surin Campus

* Corresponding Author, Tel. 09 1471 0050, E - mail: punnongwa05@gmail.com

Abstract

This study aimed to investigate changes in the bioactive compounds of mulberry juice by pasteurization treatments during 3 months of storage at 4 ± 2 °C. The results of sensory evaluation, using a 9-point hedonic scale, showed that the highest color score, taste, odor, and overall appearance of mulberry juice (Buriram 60 containing 40 and 50 %, 13 °Brix) was statistically significant ($p\leq 0.05$). The effect of 3 months storage at temperatures of 4 ± 2 °C on degradation of anthocyanin content, phenolic compounds and flavonoids in mulberry juice was determined. The total phenolic, flavonoids, anthocyanin content decreased by 55.57, 55.16, and 65.64 %, respectively. The losses of antioxidant activity in mulberry juice during storage determined by FRAP and ABTS were 34.18 and 65.91 %, respectively. The mulberry juice samples were analyzed by Ultra-performance liquid chromatography (UPLC) with a diode-array detector to identify the polyphenols. The UPLC detected a decrease in gallic acid, hydroxy-benzoic acid, vanillic acid, trans-ferulic acid, rutin, and sinapic acid (97.67, 94.61, 78.33, 96.99, 53, and 29.13 %, respectively) ($p\leq 0.05$). This study could be applied as a guide to improving the bioactive compound stability and antioxidant activity of mulberry juice, thereby improving and promoting the development of the mulberry juice processing industry.

Keywords: Mulberry Juice; Phenolic Acids; Antioxidant Activity

บทนำ

หม่อนเป็นผลไม้กินได้ อยู่ในตระกูล Moraceae พบปลูกโดยทั่วไปในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ตอนเหนือทวีปแอฟริกาตอนใต้ของทวีปยุโรป และทวีปอเมริกา และในประเทศไทย หม่อนมีหลายสายพันธุ์ได้แก่ หม่อนสีขาว (*Morus alba*) หม่อนสีดำ (*Morus nigra*) และหม่อนสีแดง (*Morus rubra*) [1] ในอุตสาหกรรมอาหารมีการแปรรูปผลิตภัณฑ์อาหารจากลูกหม่อนมากมาย อาทิเช่น ลูกหม่อนอบแห้ง ไวน์ลูกหม่อน น้ำลูกหม่อน แยมลูกหม่อน และเยลลี่ลูกหม่อน [2] ลูกหม่อนยังมีสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่สำคัญเช่น สารประกอบฟีนอลิก สารฟลาโวนอยด์ สารแอนโทไซยานิน ป้องกันโรคหัวใจและหลอดเลือด สภาวะไขมันในเส้นเลือดสูง ลดการเกิดแอลดีแอลออกซิเดชัน (LDL Oxidation) ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระโดยวิธี DPPH Radical Scavenging Activity และวิธี Total Antioxidant Capacity ยับยั้งอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxyl Radical, OH[•]) ปฏิกริยาออกซิเดชัน (Lipid Oxidation, LOO[•], LO[•], L[•]) ไนตริกออกไซด์ (Nitric Oxide, NO[•]) และซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัล (Superoxide Radical, O₂[•]) งานวิจัยของ [3] ได้ทดลองหาอนุพันธ์ของแอนโทไซยานินชนิดต่าง ๆ ในลูกหม่อนที่มีสีม่วงแดง สารฟีนอลิกและสารแอนโทไซยานิน เช่น สารไซยานิดินทรินไกลโคไซด์ และไซยานิดินเฮเวนกลูโคไพราโนไซด์ (cyanidine 3-O - glucopyranoside และ cyanidine 7-O-d-glucopyranoside) วิตามินซี พบกรดไขมันชนิดต่าง ๆ เช่น กรดไขมันลิโนเลอิก และกรดไขมันพาล์มิติก และกรดอินทรีย์บางชนิด เช่นกรดมาลิก กรดซิตริก มีฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ มีสารโทอะมิน (วิตามินบี 1) และไนอะซิน กรดแพนโทเทนิก (วิตามินบี 5) และไฟริดอกซิน (วิตามินบี 6) วิตามินอี (α - tocopherol) สารประกอบฟีนอลิก [4] - [5] ทั้งยังมีผลต่อสุขภาพ เช่น ลดการอักเสบของเซลล์ ลดการเกิดโรคมะเร็ง กระตุ้นระบบภูมิคุ้มกันโรค ป้องกันโรคเบาหวาน พบกรดไขมัน กรดอะมิโน แร่ธาตุอื่น ๆ [6] ด้านการเจริญของจุลินทรีย์ ด้านการอักเสบ ลดการเกิดปฏิกริยาออกซิเดชัน ลดการอักเสบของตับ ลดการแพ้

ป้องกันโรคความดันโลหิต ป้องกันโรคหัวใจ ตลอดจนป้องกันการเกิดโรคมะเร็ง เป็นต้น [7] นอกจากนี้ ยังพบสารฟีนอลิกบางชนิด ได้แก่ สารโฟโตคัทชอิกแอซิด (Photo-Catechuic Acid) สารพาราไฮดรอกซิลเบนโซอิกแอซิด (P-Hydroxybenzoic Acid) สารวานิลลิกแอซิด (Vanillic Acid) สารพาราคูมาริกแอซิด (P-Coumaric Acid) สารเฟอร์รูริกแอซิด (Ferulic Acid) [8] สารคลอโรเจนิคแอซิด (Chlorogenic Acid) และสารคาเฟอิกแอซิด (Caffeic Acid) พบกรดแกลลิกแอซิด (Gallic Acid) สารคัทเทชิน (Catechin) สารรูทีน (Rutin) กรดเฟอร์รูริก (Ferulic Acid) สารเคอซีทิน (Quercetin) สารนารินเจนนิน (Naringenin) [9] เป็นต้น

น้ำผลไม้เป็นผลิตภัณฑ์ที่นิยมรับประทานมากในประชากรทั่วโลกทั้งรูปแบบการบริโภคแบบคั้นน้ำสด เช่น น้ำส้มคั้น น้ำแอปเปิ้ล น้ำกลุ่มตระกูลเบอร์รี่ น้ำสตรอว์เบอร์รี่ น้ำลูกหม่อน น้ำราสป์เบอร์รี่ น้ำลูเบอร์รี่ น้ำสับปะรด เป็นต้น โดยน้ำผลไม้มีประโยชน์กับสุขภาพมีสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่สำคัญหลายชนิด ได้แก่ สารแคโรทีนอยด์ สารแอนโทไซยานิน สารฟลาโวนอยด์ สารฟีนอลิก วิตามินชนิดต่าง ๆ เช่น วิตามินเอ วิตามินอี วิตามินบี ที่มีส่วนสำคัญในกระบวนการเมตาบอลิซึมของเซลล์ และป้องกันโรค ในอุตสาหกรรมอาหารมีกระบวนการแปรรูปน้ำผลไม้หลายชนิด ในฤดูกาลที่ผลไม้มากล้นตลาด การส่งออกไปยังต่างประเทศ เช่น การทำน้ำผลไม้พาสเจอร์ไรซ์ น้ำผลไม้ยูเอชที น้ำผลไม้กระป๋อง เป็นต้น [10] การผลิตน้ำผลไม้ด้วยการพาสเจอร์ไรซ์เป็นกระบวนการที่เหมาะสมช่วยในการยืดอายุการเก็บรักษาทั้งยังช่วยถนอมคุณค่าทางสารอาหาร ถนอมรสชาติ สี กลิ่น ให้มีกลิ่นรสที่ดี [11] ในอุตสาหกรรมอาหารได้มีการนำผลหม่อนมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เช่น การทำน้ำผลไม้ การทำน้ำผลไม้เข้มข้น ในระหว่างการเก็บรักษาสีของน้ำลูกหม่อน จะเกิดการเสื่อมสลายเกิดความขุ่นเนื่องจากมีตะกอนและการเน่าเสีย เนื่องจากจุลินทรีย์เกิดการสลายตัวของ สารฟีนอลิกและสารแอนโทไซยานิน ในอุตสาหกรรมอาหารยังมีกระบวนการแปรรูป ด้วยการใช้ความดันสูง (High Pressure Processing) การใช้กระแสไฟฟ้า (Pulsed Electric Field) การใช้คลื่นความถี่แบบอัลตราซาวด์ การใช้คลื่นไมโครเวฟ การกรองด้วยเยื่อกรองแบบไมโครฟิวเตชัน การกรองแบบอัลตราฟิวเตชันเพื่อกรอง จุลินทรีย์ออกจากน้ำผลไม้โดยไม่ใช้ความร้อน ช่วยถนอมวิตามิน สี กลิ่น รสชาติของน้ำผลไม้ได้ดี [12] กระบวนการใช้ความร้อนต่ำด้วยกระบวนการพาสเจอร์ไรซ์เพื่อการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์และยับยั้ง จุลินทรีย์ที่เกิดโรคในอาหารแต่ไม่ได้ทำลายเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดในอาหาร สามารถช่วยถนอมคุณค่าสารอาหาร เช่น สารประกอบฟีนอลิก สารฟลาโวนอยด์ สารแอนโทไซยานิน วิตามินชนิดต่าง ๆ ในน้ำผลไม้ได้ดี และทำการเก็บรักษาด้วยวิธีการแช่เย็นที่อุณหภูมิ 4 ± 2 °C [13]

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการศึกษาอายุการเก็บรักษาเป็นงานวิจัยต่อเนื่องจากงานวิจัยเรื่อง องค์ประกอบด้านเคมีและฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระของน้ำลูกหม่อน ดังนั้นแล้วจึงได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลง ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ ปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่สำคัญ เช่น สารแอนโทไซยานิน สารฟีนอลิก สารฟลาโวนอยด์ รวมถึงชนิดและปริมาณของสารฟีนอลิกที่ลดลงในระหว่างกระบวนการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 ± 2 °C เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับอุตสาหกรรมน้ำลูกหม่อนต่อไป

วิธีการดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมตัวอย่างน้ำลูกหม่อนพาสเจอร์ไรซ์

หม่อนสายพันธุ์บุรีรัมย์ 60 แปลงศูนย์วิจัยหม่อนไหม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสุรินทร์ อายุการเก็บเกี่ยว 60 วันหลังการตัดกิ่ง ความเข้มข้นร้อยละ 30 40 และ 50 ทำการพาสเจอร์ไรซ์ ตามวิธีของ [12] ที่อุณหภูมิ 72 °C เวลา 30 วินาที ก่อนการบรรจุลงในขวดแก้วฝาจับชนิดใสแล้วให้ความร้อนอีกครั้งที่อุณหภูมิ 72 °C เวลา 30 วินาที

2. การวิเคราะห์ด้านประสาทสัมผัส

ผลิตภัณฑ์น้ำลูกหม่อนมาประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส ตามวิธีทดลองของ [14] ทางด้านสี

กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม โดยวิธี 9-Hedonic Scaling Test วางแผนการทดลองแบบ สุ่มในบล็อกผสมบรูณ์ ทำการประเมินโดยผู้ชิมไม่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 30 คน

3. การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของน้ำลูกหม่อน

3.1 ปริมาณสารฟลาโวนอยด์ทั้งหมด การศึกษาปริมาณสารฟลาโวนอยด์ทั้งหมดด้วยวิธีการทำให้เกิดสี คัดแปลงจากวิธี [15] นำน้ำลูกหม่อนพาสเจอร์ไรซ์ 0.5 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น 2.25 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดลอง จากนั้นเติมสารละลายโซเดียมไนเตรทความเข้มข้นร้อยละ 5 (NaNO_2) จำนวน 0.15 มิลลิลิตร เขย่าทิ้งให้เกิดปฏิกิริยา 6 นาที เติมสารละลายอะลูมิเนียมคลอไรด์ ($\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) ความเข้มข้นร้อยละ 10 จำนวน 0.3 มิลลิลิตร เขย่าและทิ้งให้เกิดปฏิกิริยาเป็นเวลา 5 นาที เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 โมล จำนวน 1 มิลลิลิตร วัดด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ 510 นาโนเมตร (UV 1800 Shimadzu Spectrophotometer, Shimadzu, Japan) โดยทำการใช้สาร Quercetin เป็นสารมาตรฐาน (mg/g)

3.2 ปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมด การวิเคราะห์สารฟีนอลิกทั้งหมดในอาหารโดยวิธีการเกิดสีกับสาร Folin-Ciocalteu Method คัดแปลงจากวิธีของ [16] นำน้ำลูกหม่อนจำนวน 0.2 มิลลิลิตร เติมลงไป ในหลอดทดลอง จากนั้นเติมสารละลาย Folin-Ciocalteu: น้ำ (1:10 v/v) จำนวน 2.5 มิลลิลิตร ทิ้งไว้ให้เกิดปฏิกิริยา 30 นาที จากนั้นเติมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้นร้อยละ 0.75 (w/v) เขย่าและตั้งทิ้งไว้ให้เกิดปฏิกิริยา 120 นาทีในที่มืด วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 765 นาโนเมตร ใช้กรดแกลลิกความเข้มข้น 0 - 1.0 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร เป็นสารมาตรฐาน

3.3 แอนโทไซยานินทั้งหมด การวัดปริมาณแอนโทไซยานินตามวิธีของ [17] ทำการสกัดสาร ตัวอย่างโดยการนำเอาตัวอย่างน้ำลูกหม่อน 1 มิลลิลิตร จากนั้นเตรียมสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ 1.86 กรัม ผสมในน้ำกลั่น 980 มิลลิเมตร ปรับ pH 1.0 ด้วยไฮโดรคลอริก และปรับให้เป็น pH 4.5 ด้วยโซเดียมอะซิเตดเข้มข้น 0.4 โมลาร์ ปิเปตตัวอย่างน้ำลูกหม่อน 1.0 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรกับ $\text{NaH}_2\text{P}_2\text{O}_4$ (Sodium Phosphate) pH 1.0 และปรับด้วย KCl (Potassium Chloride) pH 4.5 ปรับปริมาตรให้ได้ 25 มิลลิลิตร นำไปหาค่าดูดกลืนแสงด้วยเครื่องวัดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ 520 และ 700 นาโนเมตร คำนวณปริมาณแอนโทไซยานินจากสมการที่ (1)

$$\text{Total Anthocyanin} = \frac{\text{Acorrection} \times \text{MW} \times \text{DF} \times 1000}{\epsilon \times L} \quad (1)$$

เมื่อ

Acorrection คือ ค่าการดูดกลืนแสง = $(A_{520} - A_{700})_{\text{pH 1.0}} - (A_{520} - A_{700})_{\text{pH 4.5}}$

A_{520} และ A_{700} = ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 520 นาโนเมตร และที่ 700 นาโนเมตร

MW = น้ำหนักโมเลกุลของแอนโทไซยานิน (เทียบกับ Cyaninin -3-glucoside 449.2 กรัมต่อโมล)

DF = สัดส่วนที่ทำการเจือจาง

L = ความกว้างของ Cuvette (1 cm)

ϵ = โมลาร์แอบซอร์บติวิตี (Molar Absorptivity) มีค่า 26,900 ($\text{M}^{-1} \text{cm}^{-1}$)

4. การศึกษาฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ

4.1 การวิเคราะห์ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี Ferric Reducing Antioxidant Power (FRAP) การวิเคราะห์ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี Ferric Reducing Antioxidant Power (FRAP) เป็นการวัดความสามารถในการรีดิวซ์เหล็กของ Fe^{3+} เป็น Fe^{2+} ในรูปแบบสารประกอบเชิงซ้อนสีฟ้า Fe^{2+} - TPTZ Complex (Fe^{2+} Tripyridyltriazine) ที่เพิ่มขึ้นตามวิธีของ [18] สารละลายโซเดียมอะซิเตดบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 300 มิลลิโมล pH 3.6 (ปรับโดยใช้สารละลายไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 โมล)

สาร TPTZ (2,4,6-tripyridyl-s-triazine) ความเข้มข้น 10 มิลลิโมล ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 40 มิลลิโมล และสารละลายเฟอริกคลอไรด์ ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) เตรียมการผสมสารใหม่ ก่อนการทดลองทุกครั้งโดยที่ผสมโซเดียมอะซิเตตบัฟเฟอร์ 25 มิลลิลิตร สารละลาย TPTZ จำนวน 2.5 มิลลิลิตร และสารละลายเฟอริกคลอไรด์ 2.5 มิลลิลิตร เติมสารสกัดตัวอย่างจำนวน 0.25 มิลลิลิตร และเติมสารผสม จำนวน 4.75 มิลลิลิตร เขย่าและบ่มในที่มืดเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำไปอ่านค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 593 นาโนเมตร ด้วยสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ยี่ห้อ Shimazu 1800 UV Detector (Shimazu, Japan) ทำการ ทดลอง 3 ซ้ำ การคำนวณ % การยับยั้งเทียบสารควบคุมเชิงบวกคือ สารละลายมาตรฐาน Trolox

4.2 การวิเคราะห์ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี **ABTS⁺ Scavenging Activity** การวิเคราะห์ ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี ABTS⁺ Scavenging Activity ตามวิธีของ [18] สาร ABTS⁺ หรือ The 2,2'-azino-bis-3-ethylbenzthiazoline-6-sulphonic acid เป็นสารที่สามารถให้อนุมูลอิสระที่สามารถ ใช้ทดสอบได้ดีในระบบที่ทำละลายจากน้ำ การทำสาร Stock Solutions ของสารละลาย 2 mM of ABTS⁺ Solution ในสารละลาย 70 mM Potassium Persulfate นำสารละลาย Stock Solutions บ่มที่ 24 - 48 ชั่วโมง (ควรใช้ที่ 48 ชั่วโมงเพราะมีความเสถียรมากกว่า) ที่อุณหภูมิห้องและบัฟเฟอร์ $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ (0.1 M) + NaCl (0.818 %) + KCl (0.0015 %) ผสมสารละลาย ABTS⁺ และบัฟเฟอร์ใหม่ทุกครั้งก่อนทำการทดลอง โปแทสเซียมฟอสเฟตบัฟเฟอร์ KH_2PO_4 0.1 M ปรับ pH 7.4 จากนั้นทำการเจือจางสารละลาย ABTS (1:6 v/v) ทำการปิเปตตัวอย่างจำนวน 0.1 มิลลิลิตร แล้วเติมสารละลาย ABTS⁺ ปริมาตร 3 มิลลิลิตร แล้วเก็บในที่มืด 6 นาที วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 734 nm ด้วยสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ยี่ห้อ Shimazu 1800 UV Detector (Shimazu, Japan) ควรผสมสารละลาย ABTS⁺ และบัฟเฟอร์ที่เตรียมใหม่ทุกครั้งก่อนทำการ ทดลองเสมอทำการทดลอง 3 ซ้ำ การคำนวณ % inhibition ดังสมการที่ (2) เทียบสารควบคุมเชิงบวกคือ สารละลายมาตรฐาน Trolox

$$(\% \text{ inhibition}) = \frac{(\text{Abs}_{\text{control}} - \text{Abs}_{\text{sample}}) \times 100 \%}{\text{Abs}_{\text{control}}} \quad (2)$$

$\text{Abs}_{\text{control}}$ = ค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างควบคุม

$\text{Abs}_{\text{sample}}$ = ค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่าง

5. การวิเคราะห์ชนิดและปริมาณสารฟีนอลิกในน้ำลูกหม่อนพาสเจอร์ไรซ์ด้วยเครื่อง **Ultraperformance Liquid Chromatography (UPLC)**

การวิเคราะห์ชนิดและปริมาณสารฟีนอลิกด้วยวิธียูพีแอลซี (Ultraperformance Liquid Chromatography; UPLC) รุ่น AcquityTM Ultra Performance Liquid Chromatography ใช้ที่ตรวจวัด สัญญาณแบบโฟโตไดโอดอาร์เรย์ Photodiode Array (Water Corporation, USA) ทำตามวิธีวิเคราะห์ ที่ดัดแปลงจากวิธีของ [19] นำน้ำลูกหม่อนมาทำการเซนติฟิวส์ที่ 10,000 g เป็นเวลา 10 นาที ที่อุณหภูมิ 4 °C เพื่อให้สารละลายใส จากนั้นนำมาทำให้เข้มข้นด้วยเครื่องทำระเหยแบบหมุนได้ Rotary Evaporator (Buchi R124, B480, Japan) ที่อุณหภูมิ 50 °C ทำการละลายกลับด้วยสารน้ำแข็งไดออกไซด์จำนวน 5 มิลลิลิตร เก็บไว้ -20 °C ก่อนการทดสอบทำการวิเคราะห์สารตัวอย่างด้วยการใช้การ์ดคอลัมน์ (Gard Column) ชนิด C18 ขนาด (Waters, Symmetry ชนิด C18 ขนาดรูพรุน 5 ไมโครเมตร ขนาดความยาว 3.9 × 20 มิลลิเมตร) ด้วยคอลัมน์สำหรับวิเคราะห์ชนิด C18 ยี่ห้อ Water ขนาดความยาว 150 × 4.6 มิลลิเมตร ที่มีขนาดรูพรุน 5 ไมโครเมตร ก่อนทำการวิเคราะห์กรองด้วยเยื่อกรองขนาดรูพรุน 0.2 ไมโครเมตร ฉีดตัวอย่างที่ 10 ไมโครลิตร ด้วยระบบฉีดตัวอย่างแบบอัตโนมัติให้เฟสเคลื่อนที่เป็นสาร A คือ กรดอะซิติกความเข้มข้นร้อยละ 0.1 สาร B

สารอะซิโตนในไตรทอมิ้อตราการไหลเป็น 0.8 มล/นาที่ เริ่มต้นให้สาร B ที่ความเข้มข้นร้อยละ 7 จากนั้นเพิ่มความเข้มข้นของสาร B เป็นร้อยละ 15 (ที่เวลา 0 - 10 นาที) เพิ่มความเข้มข้นของสาร B เป็นร้อยละ 35 (ที่เวลา 10 - 15 นาที) และเพิ่มความเข้มข้นของสาร B เป็นร้อยละ 55 (ที่เวลา 15 - 20 นาที) หลังจากนั้นเพิ่มความเข้มข้นของสาร B เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 100 (ที่เวลา 20 - 25 นาที) ปล่อยให้ทิ้งไว้ 15 นาที เพื่อทำการล้างคอลัมน์ตรวจวัดที่มีความยาวคลื่น 280 นาโนเมตร ใช้การทดสอบชนิดของสารฟีนอลิกด้วยสารมาตรฐาน ทดสอบแบบใช้สารมาตรฐานภายนอก (External Standard) และตรวจยืนยันชนิดของกรดฟีนอลิกด้วยการเติมสารมาตรฐานลงไปในตัวอย่าง (Spike Test)

6. สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล

สถิติที่ใช้ในการทดสอบด้านประสาทสัมผัส ได้แก่ F-Test โดยใช้แผนการทดลองแบบ Factorials in RCBD และการทดสอบด้านเคมีด้วยการวางแผนการทดลองแบบ CBD วิเคราะห์แบบแปรปรวนทางเดียว (One - Way ANOVA) การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยเป็นรายคู่ตามวิธีของ Duncan s' Test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ทำการทดลอง 2 ซ้ำการทดลอง

ผลการทดลองและวิจารณ์

1. สูตรการผลิตน้ำลูกหม่อนพาสเจอร์ไรซ์

การผลิตน้ำลูกหม่อนพาสเจอร์ไรซ์ที่เหมาะสม ทดสอบชิมโดยวิธี 9-Hedonic Scale โดยใช้ผู้ทดสอบโดยไม่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 30 คน ดังแสดงในตารางที่ 1 พบว่าน้ำลูกหม่อนพันธุ์บุรีรัมย์ 60 ความเข้มข้นร้อยละ 40 และร้อยละ 50 ผู้ทดสอบชิมให้การยอมรับในด้านความชอบกลิ่น สี รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมสูงสุด ($p \leq 0.05$) เนื่องจากการใช้น้ำลูกหม่อนที่มีความเข้มข้นร้อยละ 40 มีความประหยัดในด้านจุดคุ่มทูนที่ตึกกว่า เพราะใช้น้ำลูกหม่อนในปริมาณน้อยในการผลิตกว่าน้ำลูกหม่อนความเข้มข้นร้อยละ 50 ดังนั้นทางผู้ทดลองจึงได้มีการนำน้ำลูกหม่อนพาสเจอร์ไรซ์ความเข้มข้นร้อยละ 40 นำมาทดสอบขั้นต่อไป พบว่าน้ำลูกหม่อนพาสเจอร์ไรซ์เมื่อเก็บที่อุณหภูมิ 4 ± 2 องศาเซลเซียส ด้วยขวดแก้วปิดฝาจับเป็นเวลานาน 3 เดือน มีจุลินทรีย์ทั้งหมดในอาหาร (Total Plate Count Agar; PCA) และปริมาณยีสต์ราทั้งหมด (Potato Dextrose Agar; PDA) ไม่เกิน 30 CFU/ml และไม่พบแบคทีเรียโคลิฟอร์ม (ไม่ได้แสดงข้อมูล)

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบด้านประสาทสัมผัสของน้ำลูกหม่อนพาสเจอร์ไรซ์ด้วยวิธี 9-Point Hedonic Scale

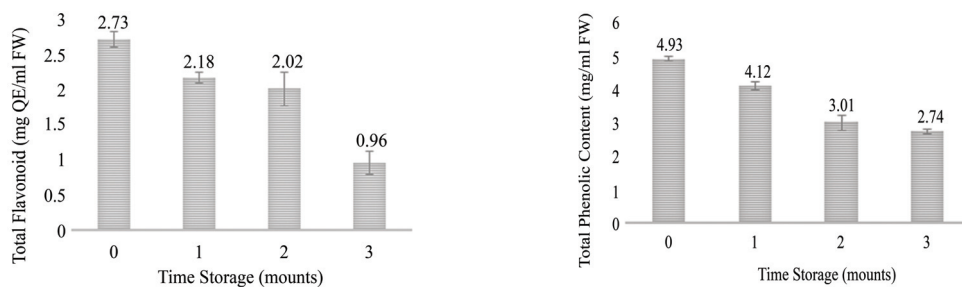
สิ่งทดลอง	สี	กลิ่น	รสชาติ	เนื้อสัมผัส	ความชอบโดยรวม
น้ำหม่อนร้อยละ 30	6.53 \pm 0.68 ^b	6.53 \pm 0.63 ^b	6.57 \pm 0.63 ^b	6.57 \pm 0.57 ^a	6.57 \pm 0.57 ^b
น้ำหม่อนร้อยละ 40	7.00 \pm 0.79 ^a	6.97 \pm 0.81 ^a	7.10 \pm 0.84 ^a	7.10 \pm 0.84 ^a	6.93 \pm 0.78 ^{ab}
น้ำหม่อนร้อยละ 50	7.17 \pm 0.87 ^a	7.00 \pm 0.79 ^a	7.27 \pm 0.58 ^a	7.27 \pm 0.58 ^a	7.07 \pm 0.83 ^a

หมายเหตุ: a, b, c ตัวอักษรที่ไม่เหมือนกันในแนวดิ่งมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี DMRT ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ ($p < 0.05$)

2. องค์ประกอบทางเคมีของน้ำลูกหม่อน

ปริมาณสารฟลาโวนอยด์ในตัวอย่างเป็นน้ำลูกหม่อนพาสเจอร์ไรซ์ที่ 0 เดือนมีค่าเท่ากับ 2.73 ± 0.11 mg QE/ml FW (Fresh Weigh) เมื่อทำการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 เดือน พบว่าน้ำลูกหม่อนมีปริมาณสารฟลาโวนอยด์ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เหลือ 0.96 ± 0.16 mg QE /ml FW (ลดลงร้อยละ 35.16) ดังรูปที่ 1(ก) ปริมาณฟีนอลิกที่ 0 เดือนมีปริมาณ 4.93 ± 0.07 mg GAE/ ml FW

เมื่อทำการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4±2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 เดือน พบว่าน้ำลูกหม่อนมีปริมาณสารฟีนอลิกลดลง ($p < 0.05$) 2.74 ± 0.06 mg GAE/ ml FW (ลดลงร้อยละ 55.57) ดังรูปที่ 1(ข) สอดคล้องกับผลการทดลองของ [4] พบว่าปริมาณสารฟีนอลิก ปริมาณสารฟลาโวนอยด์ ปริมาณแอนโทไซยานินในผลสดน้ำลูกหม่อนเมื่อผ่านการพาสเจอร์ไรซ์มีปริมาณลดลงเนื่องจากความร้อน และเก็บรักษาไว้เป็นเวลานาน ความร้อน แสง ออกซิเจนทำให้อนุพันธ์ของสารฟลาโวนอยด์เกิดการแตกออกของพันธะระหว่างไฮโดรเจนอะตอมและวงแหวนเบนซินริง ทำให้สารกลุ่มฟลาโวนอยด์ และสารฟีนอลิกเกิดการสลายตัวเนื่องจากแสง ความร้อน โลหะ ในช่วงเดือนแรกอัตราการสลายตัวค่อนข้างต่ำ ในขณะที่ช่วงเดือนที่ 3 ลดปริมาณในอัตราที่สูง สารฟลาโวนอยด์ที่พบในลูกหม่อน เช่น สารรูทีน (Rutin) สารเคอซิทินทรูไกลโคไซด์ (Quercetin-3-glucoside) สารเคอซิทินมาโลนิลไกลโคไซด์ (Quercetin-Malonyl-Glucoside) และสารคาเฟอิลควินิก แอซิด Caffeoylquinic Acids ในปริมาณสูง

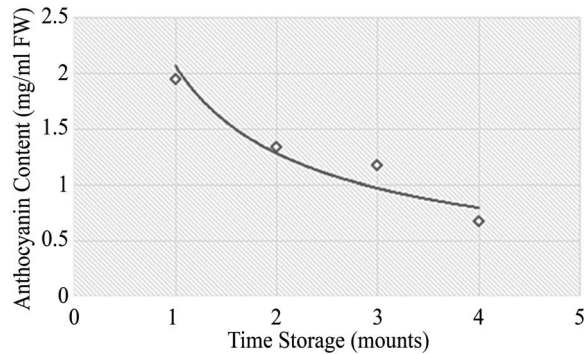


(ก) ฟลาโวนอยด์ทั้งหมด (Total Flavonoids) (ข) ฟีนอลิกทั้งหมด (Total Phenolic Content)
รูปที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของน้ำลูกหม่อนระหว่างการเก็บรักษา

3. การเปลี่ยนแปลงแอนโทไซยานิน

น้ำลูกหม่อนพาสเจอร์ไรซ์ เมื่อทำการเก็บรักษาไว้ในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4±2 องศาเซลเซียส ทดลองในสภาวะเดียวในข้อ 2 ในเดือนที่ 0 น้ำลูกหม่อนมีปริมาณสารแอนโทไซยานิน 1.95 ± 0.35 mg/ml FW เดือนที่ 1 ปริมาณแอนโทไซยานินคงเหลือ 1.34 ± 0.44 mg/ml FW เดือนที่ 2 ปริมาณแอนโทไซยานิน 1.17 ± 0.33 mg/ml FW และในเดือนสุดท้าย 0.67 ± 0.58 mg/ml FW ลดลงร้อยละ 65.64 ดังรูปที่ 2 ทำให้ปริมาณแอนโทไซยานินมีปริมาณลดลง สอดคล้องกับผลการทดลองของ [8] ได้ทำการทดสอบการเสื่อมสลายของสารแอนโทไซยานินระหว่างกระบวนการแปรรูปและกระบวนการเก็บรักษา พบว่าการสลายตัวของสารแอนโทไซยานินในน้ำลูกหม่อนพันธุ์สีดำที่เก็บรักษาเป็นระยะเวลา 8 เดือน ที่อุณหภูมิ 5 °C พบว่าอัตราการสลายตัวของแอนโทไซยานินของน้ำลูกหม่อนเข้มข้น 56.48 และ 49.75 kJ mol⁻¹ นอกจากนั้นยังสูญเสียฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระในระหว่างกระบวนการเก็บรักษาร้อยละ 4.87 - 16.01 และ 4.47 - 33.57 งานวิจัยของ [8] ได้ทำการทดสอบการสูญเสียฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระของน้ำลูกหม่อนและน้ำลูกหม่อนเข้มข้นที่อุณหภูมิต่าง ๆ พบว่าเกิดการสูญเสียฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระระหว่างกระบวนการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 20 30 และ 40 °C เป็นระยะเวลา 8 เดือน พบว่าเกิดการสลายตัวของปริมาณแอนโทไซยานินสลายระหว่างการเก็บรักษา โดยมีปริมาณลดลงร้อยละ 1.96 - 74.55 และลดลงร้อยละ 1.26 - 98.12 นอกจากนั้นมิงงานวิจัยของ [20] การสลายตัวของสารแอนโทไซยานิน ของลูกหม่อนระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 70 °C การสลายตัวของสารแอนโทไซยานินในระหว่างกระบวนการเก็บรักษา เนื่องจากกระบวนการแปรรูปด้วยความร้อนคือ การพาสเจอร์ไรซ์ และการเก็บรักษา เกิดการสลายตัวจากแสง ออกซิเจน และความร้อน การแตกออกของพันธะในโมเลกุลสารแอนโทไซยานินส่งผลให้ปริมาณสารแอนโทไซยานินมีปริมาณลดลง สารแอนโทไซยานินที่พบในน้ำหม่อน ได้แก่ สารไซยานิดินทรูเรมโนไพราโนไซด์เบต้ากลูโคไซด์ (cyanidin 3-O-C(6''-O-a-rhamnopyranosyl)-β-d-glucopyranoside) สารไซยานิดินทรูเบต้ากลูโคไซด์ (cyanidin 3-O-β-d-glucopyranoside)

[4] นอกจากนั้นยังพบสารไซยานิดินทรินไกลโคไซด์ (cyanidin - 3 - o glucoside) สารไซยานิดินทรินรูทีนโนไซด์ (cyanidin - 3 - o rutinoside) สารเพรโลนิคินทรินไกลโคไซด์ (pelargonidin - 3 - o - glucoside) สารเพรโลนิคินทรินรูทีนโนไซด์ (pelargonidin - 3 - o - rutinoside) [21]



รูปที่ 2 การลดลงของสารแอนโทไซยานินระหว่างการเก็บรักษาน้ำลูกหม่อนพาสเจอร์ไรซ์

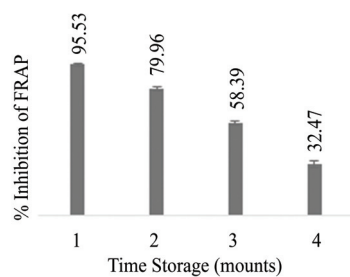
4. ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระของน้ำลูกหม่อน

ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระของน้ำลูกหม่อนพาสเจอร์ไรซ์ในระหว่างการเก็บรักษาที่ทำการศึกษด้วยวิธี FRAP ที่ทำการเก็บรักษาในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4 ± 2 °C ในเดือนที่ 0 น้ำลูกหม่อนพาสเจอร์ไรซ์มีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี FRAP ร้อยละ 95.53 ± 0.93 ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระมีการเปลี่ยนแปลงโดยมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระลดลงในเดือนที่ 1 ร้อยละ 79.96 ± 1.59 จากนั้นฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระลดลงเดือนที่ 2 ร้อยละ 58.39 ± 1.34 เดือนที่ 3 ลดลงร้อยละ 32.47 ± 0.05 (ลดลงจากเดือนแรกร้อยละ 34.18) ดังรูปที่ 3(ก) ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระของน้ำลูกหม่อนพาสเจอร์ไรซ์ด้วยวิธี ABTS Radical Scavenging Activity ในเดือนที่ 0 มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี ABTS ร้อยละ 79.01 ± 1.08 ฤทธิ์ยับยั้งอนุมูลอิสระลดลงในเดือนที่ 1 ร้อยละ 70.46 ± 0.85 เดือนที่ 2 ร้อยละ 61.72 ± 1.3 และเดือนที่ 3 ร้อยละ 52.07 ± 1.35 ตามลำดับ (ลดลงจากเดือนแรก ร้อยละ 65.91) ($p < 0.05$) ดังรูปที่ 3(ข) สอดคล้องกับผลการทดลองของ [7] ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระของน้ำลูกหม่อนเข้มข้นมีปริมาณลดลงเมื่อทำการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 และ 35 °C ค่าความเข้มข้นครั้งหนึ่งที่ใช้อยู่ยังปฏิกิริยาด้วยวิธี DPPH Radical Scavenging Activity หรือค่า IC₅₀ เมื่อเก็บรักษาเป็นเวลา 90 วัน มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย [21] พบว่าฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระของน้ำลูกหม่อนด้วย ABTS Radical Scavenging Activity มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ 3.84 - 20.73 mg Trolox g และวิธี DPPH Radical Scavenging Activity มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ 3.62 - 12.91 mg Trolox [22] น้ำลูกหม่อนที่แปรรูปด้วยกระบวนการพาสเจอร์ไรซ์ เนื่องจากระหว่างกระบวนการเก็บรักษา มีการสลายตัวของสารต้านอนุมูลอิสระ เช่น วิตามินซี สารฟีนอลิก สารแอนโทไซยานิน สารฟลาโวนอยด์ เมื่อเจอแสง ความร้อน และออกซิเจน เป็นต้น กลไกการต้านอนุมูลอิสระของสารฟีนอลิก สารแอนโทไซยานิน เนื่องจากสารพฤษเคมีดังกล่าวสามารถให้ไฮโดรเจนอะตอมต่อสารที่เป็นอนุมูลอิสระและถ่ายโอนอิเล็กตรอน สามารถยับยั้งอนุมูลของสารอนุมูลอิสระในระบบ ABTS และวิธี FRAP นอกจากนั้นแล้วสารกลุ่มฟีนอลิกยังสามารถเกิดเรโซแนนซ์ของสารฟีนอกซิลทำให้เกิดการเสถียรไม่ให้อันตรายต่อสารอื่น [23]

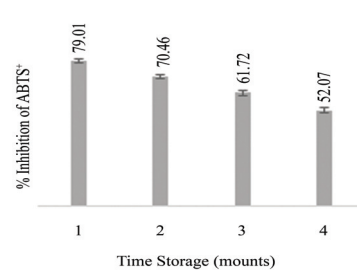
5. การเปลี่ยนแปลงชนิดและปริมาณสารฟีนอลิก

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงชนิดและปริมาณของสารฟีนอลิกในน้ำลูกหม่อนพาสเจอร์ไรซ์ในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 ± 2 °C เป็นระยะเวลา 3 เดือน ดังตารางที่ 2 พบว่าสาร Gallic Acid ปริมาณเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 35.16 ± 0.18 µg/ml FW เมื่อทำการเก็บรักษาน้ำลูกหม่อนพบว่าปริมาณ Gallic Acid ลดลงเหลือ 0.82 ± 0.02 µg/ml FW ($p < 0.05$) (ลดลงร้อยละ 97.67) สาร Hydroxy-Benzoic Acid มีปริมาณ

39.14±0.26 µg/ml FW เมื่อทำการเก็บรักษาเป็นระยะเวลา 3 เดือน มีปริมาณลดลงเหลือ 2.11±0.08 µg/ml FW (ลดลงร้อยละ 94.67) ปริมาณสาร Vanillic Acid มีปริมาณเริ่มต้น 9.43±0.07 µg/ml FW ในเดือนที่ 3 มีปริมาณลดลง 8.48±0.09 µg/ml (ลดลงร้อยละ 78.33) ปริมาณสาร Trans-Ferulic Acid ปริมาณเริ่มต้น 3.29±0.58 µg/ml FW ในเดือนที่ 3 มีปริมาณลดลง 0.99±0.05 µg/ml FW (ลดลงร้อยละ 96.99) ปริมาณสาร Rutin 7.34±0.07 µg/ml FW ในเดือนที่ 3 มีปริมาณลดลง 3.45±0.12 µg/ml FW (ลดลงร้อยละ 53) และสาร Sinapic Acid มีปริมาณเริ่มต้นเท่ากับปริมาณ 38.21±0.73 ในเดือนที่ 3 มีปริมาณลดลง 27.08±0.29 µg/ml FW (ลดลงร้อยละ 29.13) สอดคล้องกับผลการทดลองของ [21] พบว่าปริมาณสารฟีนอลิกที่มีในน้ำลูกหม่อน ได้แก่ สาร P-Catechuic Acid ในน้ำลูกหม่อนจากผลหม่อนพันธุ์สีขาว พบว่าปริมาณลดลงร้อยละ 66.18 ในน้ำลูกหม่อนจากผลหม่อนพันธุ์สีดำ พบว่าสาร P-Catechuic Acid ลดลงร้อยละ 75.88 ในเดือนที่ 3 ด้านสาร P-Hydroxybenzoic Acid ในน้ำลูกหม่อนสีขาวและน้ำลูกหม่อนดำลดลงร้อยละ 61.11 ด้านสาร Vanillic Acid ในน้ำลูกหม่อนขาวลดลงจาก 61.11 ในน้ำลูกหม่อนดำลดลงร้อยละ 57.14 สาร P-Coumaric Acid ในขณะที่สาร Ferulic Acid นอกจากนั้นยังพบสาร Chlorogenic Acid และสาร Caffeic Acid เพียงเล็กน้อย [4] พบกรดฟีนอลิก 2 ชนิด (3- และกรดคาเฟออยล์ควินิก) และฟลาโวนอยด์ ได้แก่ สาร Rutin สาร Glucoside สาร Quercetin-Malonyl-Glucoside และสาร Caffeoylquinic Acids ในปริมาณสูง งานวิจัยของ [21] พบชนิดของสารฟีนอลิกในผลหม่อน ได้แก่ สาร Chlorogenic Acid สาร Ferulic Acid สาร P-Coumaric Acid สาร Sinamic Acid และสาร Caffeic Acid นอกจากนั้นยังพบสาร Hydroxy-Benzoic Acid สาร Gallic Acid สาร Vanillic Acid และ [3], [24] พบว่าชนิดและปริมาณกรดฟีนอลิกในลูกหม่อน พบสาร Gallic Acid สาร P-Catechuic Acid สาร Catechin สาร Epigallocatechin Gallate สาร Caffeic Acid สาร Epicatechin สาร P-Coumaric Acid สาร Rutin สาร Ferulic Acid สาร Quercetin สาร Naringenin ตามลำดับ จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าสารฟีนอลิกหลายชนิดมีปริมาณลดน้อยลง เนื่องจากสารฟีนอลิกเมื่อเจอแสง ความร้อน โลหะ ออกซิเจน สามารถเกิดการแตกออกของโมเลกุล ทำให้มีปริมาณลดลง [25]



(ก) ร้อยละของการยับยั้งอนุมูลอิสระ
ด้วยวิธี FRAP



(ข) ร้อยละของการยับยั้งอนุมูลอิสระ
ด้วยวิธี ABTS⁺

รูปที่ 3 ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระของน้ำลูกหม่อน

ตารางที่ 2 การเปลี่ยนแปลงปริมาณสารฟีนอลิกของน้ำลูกหม่อนพาสเจอร์ไรซ์ระหว่างการเก็บรักษา

ชนิดของสารฟีนอลิก	0 เดือน (µg/ml FW)	1 เดือน (µg/ml FW)	2 เดือน (µg/ml FW)	3 เดือน (µg/ml FW)
Gallic Acid	35.16±0.18 ^a	24.40±0.22 ^b	6.20±0.10 ^c	0.82±0.02 ^d
Proto-Catechuic Acid,	nd	nd	nd	nd
Hydroxy-Benzoic Acid	39.14±0.26 ^a	36.13±0.14 ^b	14.27±0.79 ^c	2.11±0.08 ^d

ตารางที่ 2 การเปลี่ยนแปลงปริมาณสารฟีนอลิกของน้ำลูกหม่อนพาสเจอร์ไรซ์ระหว่างการเก็บรักษา (ต่อ)

ชนิดของสารฟีนอลิก	0 เดือน ($\mu\text{g/ml FW}$)	1 เดือน ($\mu\text{g/ml FW}$)	2 เดือน ($\mu\text{g/ml FW}$)	3 เดือน ($\mu\text{g/ml FW}$)
Vanillic Acid	9.43 \pm 0.07 ^a	9.27 \pm 0.08 ^b	8.61 \pm 0.03 ^c	8.48 \pm 0.09 ^c
Syringic Acid	nd	nd	nd	nd
Trans-Ferulic Acid	3.29 \pm 0.58 ^a	1.98 \pm 0.07 ^b	1.10 \pm 0.05 ^c	0.99 \pm 0.05 ^c
Rutin	7.34 \pm 0.07 ^a	5.92 \pm 0.06 ^b	3.94 \pm 0.19 ^c	3.45 \pm 0.12 ^d
P-Coumaric Acid,	nd	nd	nd	nd
Naringin,	nd	nd	nd	nd
Sinapic Acid	38.21 \pm 0.73 ^a	35.76 \pm 0.67 ^b	29.59 \pm 1.61 ^c	27.08 \pm 0.29 ^d

หมายเหตุ: a, b, c ตัวอักษรที่ไม่เหมือนกันในแนวนอนมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี DMRT ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ ($p < 0.05$)

สรุปผลและอภิปรายผล

การเก็บรักษาน้ำลูกหม่อนพาสเจอร์ไรซ์ที่อุณหภูมิ 4 ± 2 °C ในขวดแก้วฝาจีบแบบปิโส ทำให้สามารถเก็บรักษาน้ำลูกหม่อนได้เป็นระยะเวลา 3 เดือนโดยไม่เน่าเสีย มีผลให้ปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพลดน้อยลง เช่น สารฟีนอลิก สารแอนโทไซยานิน สารฟลาโวนอยด์ นอกจากนั้นแล้วฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระลดลงด้วยการศึกษาชนิดและปริมาณสารฟีนอลิกด้วยเทคนิค UPLC พบว่าสาร Gallic Acid สาร Hydroxyl- Benzoic Acid สาร Vanillic Acid สาร Trans-Ferulic Acid สาร Rutin และสาร Sinapic Acid ลดลงในปริมาณสูงเพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับอุตสาหกรรมน้ำลูกหม่อนต่อไป ดังนั้นในอุตสาหกรรมการแปรรูปน้ำลูกหม่อนควรมีการใช้บรรจุภัณฑ์เพื่อป้องกันแสง ออกซิเจนและความร้อน เพื่อหลีกเลี่ยงการลดลงของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพและสารต้านอนุมูลอิสระ ลดการสูญเสียสารฟีนอลิกในน้ำลูกหม่อนในระหว่างการเก็บรักษา

References

- [1] Yuan, Q. and Zhao, L. (2017). The Mulberry (*Morus alba* L.). Fruit-A Review of Characteristic Components and Health Benefits. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. Vol. 65, No. 48, pp. 10383-10394. DOI: 10.1021/acs.jafc.7b03614
- [2] Ramesh, L., Sivaram, V., and Yogananda Murthy, V. N. (2014). Antioxidant and Medicinal Properties of Mulberry (*Morus* sp.): A Review. **World Journal of Pharmaceutical Research**. Vol. 3, Issue 6, pp. 320-343
- [3] Sanchez-Salcedo, E. M., Mena, P., García-Viguera, C., Martínez, J. J., and Hernández, F. (2015). Phytochemical Evaluation of White (*Morus alba* L.) and Black (*Morus nigra* L.) Mulberry Fruits, a Starting Point for the Assessment of Their Beneficial Properties. **Journal of Functional Foods**. Vol. 12, pp. 399-408. DOI: 10.1016/j.jff.2014.12.010
- [4] Du, Q., Zheng, J., and Xu, Y. (2008). Composition of Anthocyanins in Mulberry and Their Antioxidant Activity. **Journal of Food Composition and Analysis**. Vol. 21, Issue 5, pp. 390-395. DOI: 10.1016/j.jfca.2008.02.007

- [5] Punnongwa, W., Jumpamee, N., Sakunnamrat, K., Toomtong, P., Deungsri, K., and Moongnargm, A. (2013). Comparison of Important Chemical Compositions and Antioxidant Activities of Mulberry Fruits Provided from Tree Varieties. **RMUTI Journal Science and Technology**. Vol. 6, No. 2, pp. 69-81 (in Thai)
- [6] Song, W., Wang, H., Bucheli, P., Zhang, P. F., Wei, D. Z., and Lu, Y. H. (2009). Phytochemical Profiles of Different Mulberry (*Morus* sp.) Species from China. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. Vol. 57, pp. 9133-9140. DOI: 10.1021/jf9022228
- [7] Dincer, C., Tontulb, I., and Topuz, A. (2016). A Comparative Study of Black Mulberry Juice Concentrates by Thermal Evaporation and Osmotic Distillation as Influenced by Storage. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**. Vol. 38, Part A, pp. 57-64. DOI: 10.1016/j.ifset.2016.09.012
- [8] Boranbayeva, T., Karadeniz, F., and Ylmaz, E. (2014). Effect of Storage on Anthocyanin Degradation in Black Mulberry Juice and Concentrates. **Food and Bioprocess Technology**. Vol. 7, No. 7, pp. 1894-1902. DOI: 10.1007/s11947-014-1296-8
- [9] Huang, H., Ting-Tsz Ou, and Wang, C.J. (2013). Mulberry (桑葚子 Sang Shèn Zi) and its Bioactive Compounds, the Chemoprevention Effects and Molecular Mechanisms *In Vitro* and *In Vivo*. **Journal of Traditional and Complementary Medicine**. Vol. 3, Issue 1, pp. 7-15. DOI: 10.4103/2225-4110.106535
- [10] Sinha, N. K., Sidhu, J. S., Barta, J. Wu, J. S. B., and Cano, M. P. (2012). **Handbook of Fruits and Fruit Processing**. (2th). New York: Wiley-Blackwell A John Wiley & Sons, Ltd, Publication
- [11] Zou, H., Lin, T., Bi, X., Zhao, L., Wang, Y., and Liao, X. (2016). Comparison of High Hydrostatic Pressure, High-Pressure Carbon Dioxide and High-Temperature Short-Time Processing on Quality of Mulberry Juice. **Food Bioprocess Technology**. Vol. 9, No. 2, pp. 217-231. DOI: 10.1007/s11947-015-1606-9
- [12] You, Y., Han, N. X., Guo, J. L., Zhao, Y., Liu, G., Huang, W., and Zhan, J. (2018). Influence of Different Sterilization Treatments on the Color and Anthocyanin Contents of Mulberry Juice During Refrigerated Storage. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**. Vol. 48, pp. 1-10. DOI: 10.1016/j.ifset.2018.05.007
- [13] Fellow, P. J. (2009). **Food Processing**. (3th). New York: CRC Press Taylor & Francis Group
- [14] Anprung, P. (2004). **Principle of Sensory Evaluation**. Chulalongkorn University (in Thai)
- [15] Wanyo, P., Meeso, N., and Siriamornpun, S. (2014). Effects of Different Treatments on the Antioxidant Properties and Phenolic Compounds of Rice Bran and Rice Husk. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. Vol. 157, pp. 457-463. DOI: 10.1016/j.foodchem.2014.02.061
- [16] Yodmanee, S., Karrila, T. T., and Pakdeechanuan, P. (2011). Physical, Chemical and Antioxidant Properties of Pigmented Rice Grown in Southern Thailand. **International Food Research Journal**. Vol. 18, No. 3, pp. 901-906
- [17] AOAC. (2005). **Official Methods of Analysis**. (14th ed). Washington, D.C: Association of official Analytical Analytical Chemist

- [18] Thaipong, K., Boonprakob, U., Crosby, K., Cisneros-Zevallos, L., and Hawkins, D. (2006). Comparison of ABTS, DPPH, FRAP, and ORAC Assays for Estimating Antioxidant Activity from Guava Fruit Extracts. **Journal of Food Composition and Analysis**. Vol. 19, Issue 6-7, pp. 669-675. DOI: 10.1016/j.jfca.2006.01.003
- [19] Vichapong, J., Sookserm, M., Srijsdaruk, V., Swatsitang, P., and Srijaranai, S. (2010). High Performance Liquid Chromatographic Analysis of Phenolic Compounds and Their Antioxidant Activities in Rice Varieties. **LWT - Food Science and Technology**. Vol. 43, Issue 9, pp. 1325-1330. DOI: 10.1016/j.lwt.2010.05.007
- [20] Tomas, M., Toydemir, G., Boyacioglu, D., Hall, R., Beekwilder, J., and Capanoglu, E. (2015). The Effects of Juice Processing on Black Mulberry Antioxidants. **Food Chemistry**. Vol. 186, pp. 277-284. DOI: 10.1016/j.foodchem.2014.11.151
- [21] Aramwit, P., Bang, N., and Srichana, T. (2010). The Properties and Stability of Anthocyanins in Mulberry Fruits. **Food Research International**. Vol. 43, Issue 4, pp. 1093-1097. DOI: 10.1016/j.foodres.2010.01.022
- [22] Wang, Z., Lin, Y., Li, T., Dai, F., Luo, G., Xiao, G., and Tang, C. (2019). Phenolic Profiles and Antioxidant Capacities of Mulberry (*Morus atropurpurea* Roxb.) Juices from Different Cultivars. **International Journal of Food Properties**. Vol. 22, Issue 1, pp. 1340-1352. DOI: 10.1080/10942912.2019.1646272
- [23] Shahidi, F. and Ambigaipalan, P. (2015). Phenolics and Polyphenolics in Foods, Beverages and Spices: Antioxidant Activity and Health Effects: A Review. **Journal of Functional Foods**. Vol. 18, Part B, pp. 820-897. DOI: 10.1016/j.jff.2015.06.018
- [24] Nguyen, C. L. and Nguyen, H. V. H. (2018). Ultrasonic Effects on the Quality of Mulberry Juice. **Beverages**. Vol. 4, Issue 3, pp. 1-12. DOI: 10.3390/beverages4030056
- [25] Kamiloglu, S., Serali, O., Unal, N., and Capanoglu, E. (2013). Antioxidant Activity and Polyphenol Composition of Black Mulberry (*Morus nigra* L.) Products. **Journal of Berry Research**. Vol. 3, No. 1, pp. 41-51. DOI: 10.3233/JBR-130045

โปรแกรมเชิงปฏิสัมพันธ์ด้วยเทคโนโลยีเสมือนจริงจากโจทย์ปัญหาทางการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ภาษาจาวา สำหรับผู้ที่มีความบกพร่องทางการได้ยิน

Interactive Program using Augmented Reality Technology from Problems in Java Computer Programming for People with Hearing Impairments

นพรัตน์ โพธิ์สิงห์* และเอกราวิ คำแปล¹

Nopparat Posing^{1*} and Eakrawee Kamplar¹

Received: October 3, 2021; Revised: February 5, 2022; Accepted: February 14, 2022

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์ 1) เพื่อพัฒนาโปรแกรมเชิงปฏิสัมพันธ์ด้วยเทคโนโลยีเสมือนจริงจากโจทย์ปัญหาทางการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ภาษาจาวา สำหรับผู้ที่มีความบกพร่องทางการได้ยิน 2) เพื่อประเมินคุณภาพจากผู้เชี่ยวชาญที่มีต่อโปรแกรม และ 3) เพื่อประเมินความพึงพอใจจากนักศึกษาที่มีความบกพร่องทางการได้ยินที่มีต่อโปรแกรม กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัย ได้แก่ นักศึกษาที่มีความบกพร่องทางการได้ยิน สาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์ จำนวน 10 คน ได้มาโดยเลือกกลุ่มตัวอย่างแบบเจาะจง เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย ได้แก่ 1) โปรแกรมเชิงปฏิสัมพันธ์ด้วยเทคโนโลยีเสมือนจริงจากโจทย์ปัญหาทางการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ภาษาจาวา สำหรับผู้ที่มีความบกพร่องทางการได้ยิน 2) แบบประเมินคุณภาพจากผู้เชี่ยวชาญสำหรับประเมินคุณภาพที่มีต่อโปรแกรม และ 3) แบบประเมินความพึงพอใจจากนักศึกษาที่มีความบกพร่องทางการได้ยินที่มีต่อโปรแกรม การวิเคราะห์ข้อมูลใช้สถิติค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ผลการวิจัยพบว่า 1) ผลการประเมินคุณภาพจากผู้เชี่ยวชาญในภาพรวมพบว่า มีคุณภาพอยู่ในระดับมากที่สุด ($\bar{X} = 4.51$, S.D. = 0.57) 2) ผลการประเมินความพึงพอใจจากนักศึกษาที่มีความบกพร่องทางการได้ยินในภาพรวมพบว่า มีความพึงพอใจอยู่ในระดับมาก ($\bar{X} = 3.97$, S.D. = 0.97)

คำสำคัญ : โปรแกรมเชิงปฏิสัมพันธ์; เทคโนโลยีเสมือนจริง; ผู้ที่มีความบกพร่องทางการได้ยิน

¹ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์

¹ Faculty of Science and Technology, Surindra Rajabhat University

* Corresponding Author, Tel. 08 9707 9577, E - mail: nopparatposing@gmail.com

Abstract

The objectives of this research are: 1) to develop an interactive program using augmented reality technology from problems in Java computer programming for people with hearing impairments, 2) to assess the quality of the program with experts and 3) to assess the satisfaction of the hearing-impaired students toward the program. The sample group used in this research was 10 students with hearing impairment from Computer Science Program, Surindra Rajabhat University, obtained by using purposive sampling technique. The research instruments were: 1) the interactive program using augmented reality technology from problems in Java computer programming for people with hearing impairments, 2) professional quality assessment form for assessing the quality of the program and 3) satisfaction assessment form for assessing the satisfaction of students with hearing impairments toward the program. The data was analyzed by using mean statistics and standard deviation. The research results showed that: 1) the quality assessment results from the experts as a whole were at a high level ($\bar{X} = 4.51$, S.D. = 0.57) 2) and the satisfaction assessment results of students with hearing impairment as a whole was at a high level ($\bar{X} = 3.97$, S.D. = 0.97).

Keywords: Interactive Program; Augmented Reality Technology; People with Hearing Impairments

บทนำ

ในศตวรรษที่ 21 กระบวนการเรียนรู้แบบ Active Learning เป็นสิ่งสำคัญที่ส่งเสริมกระบวนการจัดการเรียนรู้ที่เน้นให้ผู้เรียนได้ลงมือปฏิบัติ และได้ใช้กระบวนการคิดเกี่ยวกับสิ่งที่เขาได้กระทำลงไป โดยมีอาจารย์เป็นผู้ให้คำแนะนำมากกว่าจะถ่ายทอดความรู้ด้วยตัวเอง การเปิดพื้นที่แห่งการเรียนรู้ให้กับคนทุกกลุ่มในสังคมได้เข้าถึงที่เท่าเทียมกันเป็นสิ่งที่ช่วยเติมเต็มสังคมในการอยู่ร่วมกันให้สมบูรณ์ขึ้น สถาบันการศึกษาต่าง ๆ ได้เปิดโอกาสทางการศึกษาที่เปิดกว้างมากขึ้นในการจัดให้ผู้พิการได้เข้าเรียนร่วมชั้นเรียนกับผู้เรียนที่มีความปกติโดยคำนึงถึงว่าเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องมีรูปแบบการจัดการเรียนรู้ที่หลากหลายและเหมาะสมที่ช่วยส่งเสริมพัฒนาการการเรียนรู้ได้ตามประเภทของผู้เรียนทุกกลุ่ม ผู้พิการที่มีความบกพร่องทางการได้ยินเป็นคนส่วนหนึ่งในสังคมที่ไม่สามารถรับฟังเสียงเพื่อการสื่อสารให้เข้าใจได้เหมือนคนปกติทั่วไป คนกลุ่มนี้แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ 1) ประเภทหูตึง เป็นผู้ที่สูญเสียการได้ยินตั้งแต่ 26 - 90 เดซิเบล สามารถที่จะได้ยินเสียงได้บ้างแม้ว่าจะใช้เครื่องช่วยฟังหรือไม่ก็ตาม และ 2) ประเภทหูหนวก เป็นผู้ที่สูญเสียการได้ยินตั้งแต่ 91 เดซิเบลขึ้นไป ไม่สามารถได้ยินเสียงพูดและไม่สามารถเข้าใจหรือใช้ภาษาพูดได้ แต่อาจรับรู้เสียงได้จากการสั่นสะเทือน [1] โดยอุปสรรคที่สำคัญในการรับรู้ของผู้ที่มีความบกพร่องทางการได้ยินเกิดจากความพิการของประสาทหู จึงต้องอาศัยการรับรู้ทางสายตาแทน ทำให้มีปัญหาด้านการสื่อสารกับคนปกติทั่วไป โดยเฉพาะผู้ที่หูตึงระดับมากหรือหูหนวกจะใช้ภาษามือและภาษาเขียนในการติดต่อสื่อสาร การใช้สื่อเทคโนโลยีในการจัดการเรียนการสอนสำหรับผู้ที่มีความบกพร่องทางการได้ยินมีความจำเป็นอย่างยิ่ง ที่จะช่วยส่งเสริมพัฒนาการการเรียนรู้ การสื่อความหมาย และสร้างความเข้าใจที่ตรงกันระหว่างผู้ส่งสารและผู้รับสารได้ โดยสื่อที่ช่วยให้การรับรู้ได้ดีคือ สื่อที่เป็นภาพ ซึ่งในปัจจุบันสื่อเทคโนโลยีสำหรับคนกลุ่มนี้ยังคงมีในปริมาณที่น้อยมาก ด้วยข้อจำกัดด้านการสื่อสารที่ต้องมีล่ามแปลความหมายเป็นภาษามือให้เข้าใจจึงเป็นอุปสรรคในการเรียนรู้ ทำให้พัฒนาการทางการเรียนรู้ช้ากว่าคนปกติ โดยเฉพาะทางการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ต้องใช้ทักษะในการฝึกปฏิบัติหากการรับรู้ช้าไม่เท่าทันกันจะทำให้เกิดการเรียนรู้ช้าตามไปด้วย

เทคโนโลยีเสมือนจริง (Augmented Reality หรือ AR) เป็นเทคโนโลยีที่ผสานเอาโลกแห่งความเป็นจริง (Real) เข้ากับโลกเสมือน (Virtual) โดยผ่านทางอุปกรณ์ เว็บแคม กล้องมือถือ คอมพิวเตอร์ รวมกับการใช้ซอฟต์แวร์ต่าง ๆ การใช้เทคโนโลยีเสมือนจริงสามารถใช้กับงานได้หลากหลายขึ้นอยู่กับเนื้อหา ซึ่งจะช่วยกระตุ้นความสนใจทำให้ตื่นตาเร้าใจของกลุ่มเป้าหมายได้ โดยจะแสดงผลในจอภาพเป็นวัตถุ 3 มิติ ตัวอักษร รูปภาพ และวิดีโอ [2]

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่ามีนักวิจัยได้ประยุกต์สื่อเทคโนโลยีและสื่อเทคโนโลยีเสมือนจริงใช้กับผู้ที่มีความบกพร่องทางการได้ยิน ดังนี้ งานวิจัยที่ [3] ได้ผลิตสื่อเทคโนโลยีความเป็นจริงเสริมการสอนสำนวนไทยสำหรับผู้บกพร่องทางการได้ยิน โดยแบ่งออกเป็น 3 หมวด ได้แก่ สำนวน สุภาษิต และคำพังเพย ในแต่ละหน้าจะแสดงเนื้อหา พร้อมทั้งวิดีโอทัศนภาษาประกอบ งานวิจัยที่ [4] ได้พัฒนาแอปพลิเคชันระบบการแปลภาษาให้กับผู้พิการทางการได้ยิน เพื่อเชื่อมโยงช่องว่างของการสื่อสารระหว่างผู้พิการทางการได้ยินกับคนปกติ โดยสามารถแปลการรับค่าจากเสียงพูดภาษาไทยเป็นภาพเคลื่อนไหวสามมิติท่าทางภาษามือไทย งานวิจัยที่ [5] ได้พัฒนาหนังสืออัจฉริยะเพื่อสนับสนุนการสื่อสารสำหรับเด็กที่มีความบกพร่องทางการได้ยิน โดยได้ออกแบบรูปแบบสื่อมัลติมีเดียที่มีตัวหนังสือ รูปภาพ และภาษามือ งานวิจัยที่ [6] ได้พัฒนาสื่อการเรียนรู้ด้วยเทคโนโลยีเสมือนจริง เรื่องคำศัพท์ภาษาอังกฤษสัตว์โลกน่ารู้ งานวิจัยที่ [7] ได้ศึกษารูปแบบสื่อมัลติมีเดียเพื่อการเรียนรู้ในงานคอมพิวเตอร์กราฟิกในผู้บกพร่องทางการได้ยิน โดยองค์ประกอบของสื่อสำหรับผู้บกพร่องทางการได้ยินในรายวิชากราฟิกประกอบด้วย ภาพเคลื่อนไหว การใช้ลำเสียง สำหรับช่วยเหลือผู้หัดฟัง โดยเครื่องช่วยฟังเน้นภาพการแสดงสาธิตและภาพเครื่องมือที่มีการขยายสัญลักษณ์เครื่องมือในงานกราฟิกเพื่อให้เห็นได้ชัดเจน และสื่อควรมีลักษณะเฉพาะตัวและแบ่งบทบาทตามขั้นการเรียนรู้โดยอธิบายระยะต่าง ๆ เพื่อให้เห็นภาพรวม งานวิจัยที่ [8] ได้พัฒนาสื่อเทคโนโลยีเสมือนจริงประกอบภาษามือ สำหรับนักศึกษาที่มีความบกพร่องทางการได้ยิน เพื่อนำมาใช้ในการเข้าใช้บริการภายในสำนักวิทยบริการและเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา งานวิจัยที่ [9] ได้พัฒนาบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน เรื่องการใช้ไวยากรณ์สำหรับนักศึกษาที่มีความบกพร่องทางการได้ยิน วิทยาลัยราชสุดา มหาวิทยาลัยมหิดล และงานวิจัยที่ [10] ได้พัฒนาสื่อการสอนแบบปฏิสัมพันธ์ด้วยเทคโนโลยีเสมือนจริงในสภาพแวดล้อมทางการเรียนแบบยูบิควิตัลเพื่อลดภาระทางปัญญาของผู้เรียน

จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้น ผู้ที่มีความบกพร่องทางการได้ยินซึ่งต้องใช้การรับรู้ทางสายตาเป็นหลัก สื่อเทคโนโลยีจึงมีบทบาทสำคัญที่ช่วยส่งเสริมพัฒนาการเรียนรู้ให้ดีขึ้นได้ การนำสื่อเทคโนโลยีเข้ามาช่วยในการจัดการเรียนการสอนจึงมีความจำเป็น โดยหากมีสื่อที่สามารถสื่อสารได้ดีสื่อความหมายเข้าใจตรงกันจะช่วยให้การเข้าถึงกลุ่มเป้าหมายได้ง่ายและรวดเร็วขึ้น ช่วยกระตุ้นความสนใจได้ดีขึ้น สามารถเรียนรู้ซ้ำ ๆ ได้ ทบทวนได้ และช่วยตอบสนองต่อการเรียนรู้ของแต่ละบุคคลที่ไม่เท่ากันได้ ทำให้เพิ่มประสิทธิภาพและคุณภาพของการเรียนรู้ให้มากขึ้นได้ ผู้วิจัยจึงได้พัฒนาโปรแกรมเชิงปฏิสัมพันธ์ด้วยเทคโนโลยีเสมือนจริงจากโจทย์ปัญหาทางการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ภาษาจาวา สำหรับผู้ที่มีความบกพร่องทางการได้ยิน เป็นเครื่องมือที่มีชุดการจำลองโจทย์ปัญหาจากสถานการณ์ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ภาษาจาวา โดยจะแสดงให้เห็นทั้งตัวอักษร ภาพ และภาษามือ ที่เอื้อต่อพัฒนาการเรียนรู้ได้ดียิ่งขึ้น ส่งเสริมการรับรู้การสื่อความหมายที่เข้าใจตรงกัน และช่วยพัฒนาการด้านทักษะทางการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ดีขึ้น ส่งผลให้เกิดพัฒนาการได้ทัดเทียมกับคนปกติ

วิธีดำเนินการวิจัย

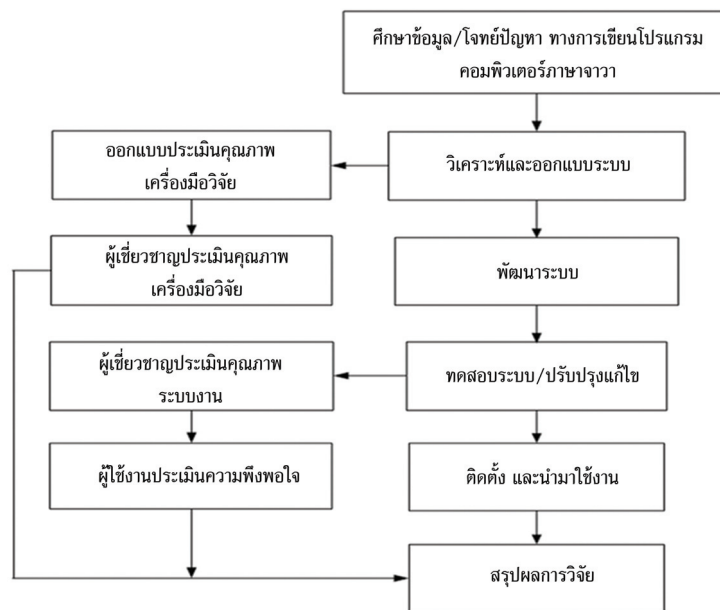
จากรูปที่ 1 แสดงขั้นตอนการดำเนินการวิจัย ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้

1. ศึกษาข้อมูลและโจทย์ปัญหาทางการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ภาษาจาวา โดยศึกษาจากผู้ที่เกี่ยวข้องกับระบบรวมทั้งศึกษาเอกสารต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง โดยมีกรอบแนวคิดในการวิจัย ดังรูปที่ 2

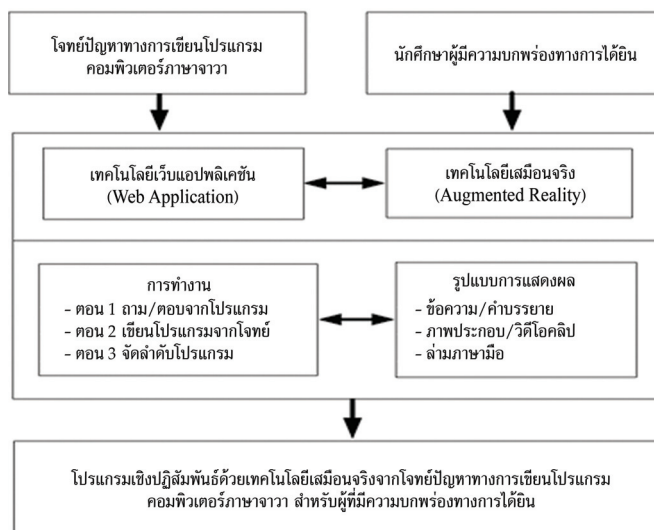
2. วิเคราะห์และออกแบบระบบ โดยกำหนดรายการโจทย์ปัญหาต่าง ๆ ทาง การเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ภาษาจาวา ออกแบบส่วนประกอบของโปรแกรม ออกแบบฐานข้อมูล รวมถึงส่วนเชื่อมโยงกันของระบบ และ ออกแบบประเมินคุณภาพเครื่องมือวิจัย โดยการทำงานของระบบงานใหม่มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 ส่วนที่เกี่ยวข้องกับระบบ

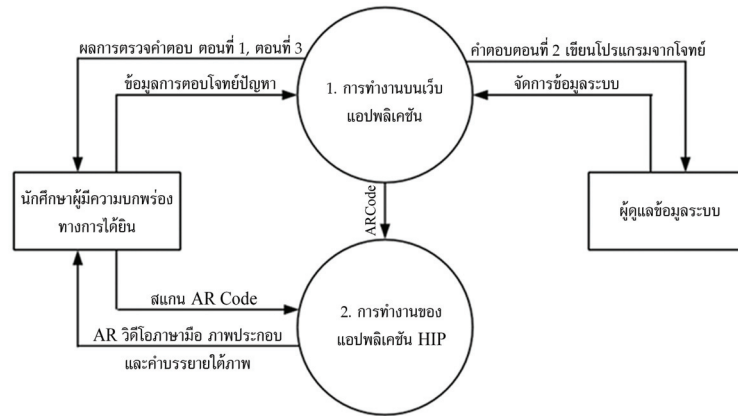
ผู้วิจัยได้ศึกษาข้อมูล ปัญหา และความต้องการของระบบ พบว่ามีผู้ที่เกี่ยวข้องกับระบบ คือนักศึกษาที่มีความบกพร่องทางการได้ยิน และผู้ดูแลระบบ โดยระบบมีกระบวนการทำงานหลัก 2 ส่วน ได้แก่ 1) การทำงานบนเว็บแอปพลิเคชัน เป็นส่วนที่ใช้สำหรับรองรับการทำงานผ่านเว็บ เพื่อให้ นักศึกษาทำรายการ โจทย์ปัญหา 3 ตอน และผู้ดูแลระบบจัดการข้อมูลของระบบ และ 2) การทำงานของแอปพลิเคชัน HIP เพื่อรองรับการทำงานบนอุปกรณ์พกพาหรือสมาร์ทโฟน โดยจะผสมผสานการทำงานร่วมกันกับส่วนแรกผ่านทาง AR Code ดังรูปที่ 3



รูปที่ 1 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย



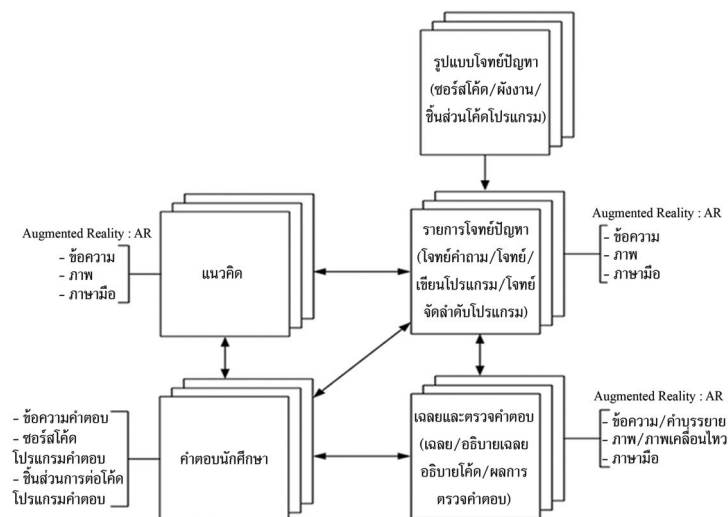
รูปที่ 2 กรอบแนวคิดในการวิจัย



รูปที่ 3 แผนภาพกระแสข้อมูล Diagram 0 ของระบบ

2.2 แบบจำลองของระบบงาน

แบบจำลองของระบบงาน เป็นแบบจำลองที่แสดงส่วนประกอบต่าง ๆ ของโปรแกรม ประกอบด้วย 5 โมดูล ได้แก่ 1) รายการโจทย์ปัญหา เป็นส่วนที่กำหนดโจทย์ปัญหาทางการเขียนโปรแกรม คือ โจทย์คำถาม โจทย์เขียนโปรแกรม และโจทย์จัดลำดับโปรแกรม 2) รูปแบบโจทย์ปัญหา เป็นส่วนของรูปแบบที่ใช้สนับสนุนการกำหนดรายการโจทย์ปัญหาในรูปแบบต่าง ๆ คือ ซอร์สโค้ด ฟังงาน และชิ้นส่วนโค้ดโปรแกรม 3) แนวคิด เป็นส่วนที่อธิบายหลักการหรือแนวความคิดทางปฏิบัติที่ทำให้บรรลุผลตามโจทย์ปัญหา 4) คำตอบนักศึกษา เป็นส่วนของคำตอบที่นักศึกษาตอบคำถามนำเข้าสู่ระบบ คือ ข้อความ ซอร์สโค้ดโปรแกรมคำตอบ และชิ้นส่วนผลการต่อโค้ดโปรแกรม และ 5) เฉลยและตรวจคำตอบ เป็นส่วนที่เฉลยคำตอบ อธิบายเฉลย/อธิบายโค้ดโปรแกรม และผลการตรวจคำตอบ ซึ่งแต่ละโมดูลจะมีความเกี่ยวข้องและสัมพันธ์เชื่อมโยงทำงานร่วมกันตามลักษณะของงาน โดยการทำงานโมดูล 1) 3) และ 5) ใช้เทคโนโลยีเสมือนจริง (Augmented Reality) แสดงผลเป็นข้อความ/คำบรรยายประกอบ ภาพ/ภาพเคลื่อนไหว และภาษามือ ดังรูปที่ 4

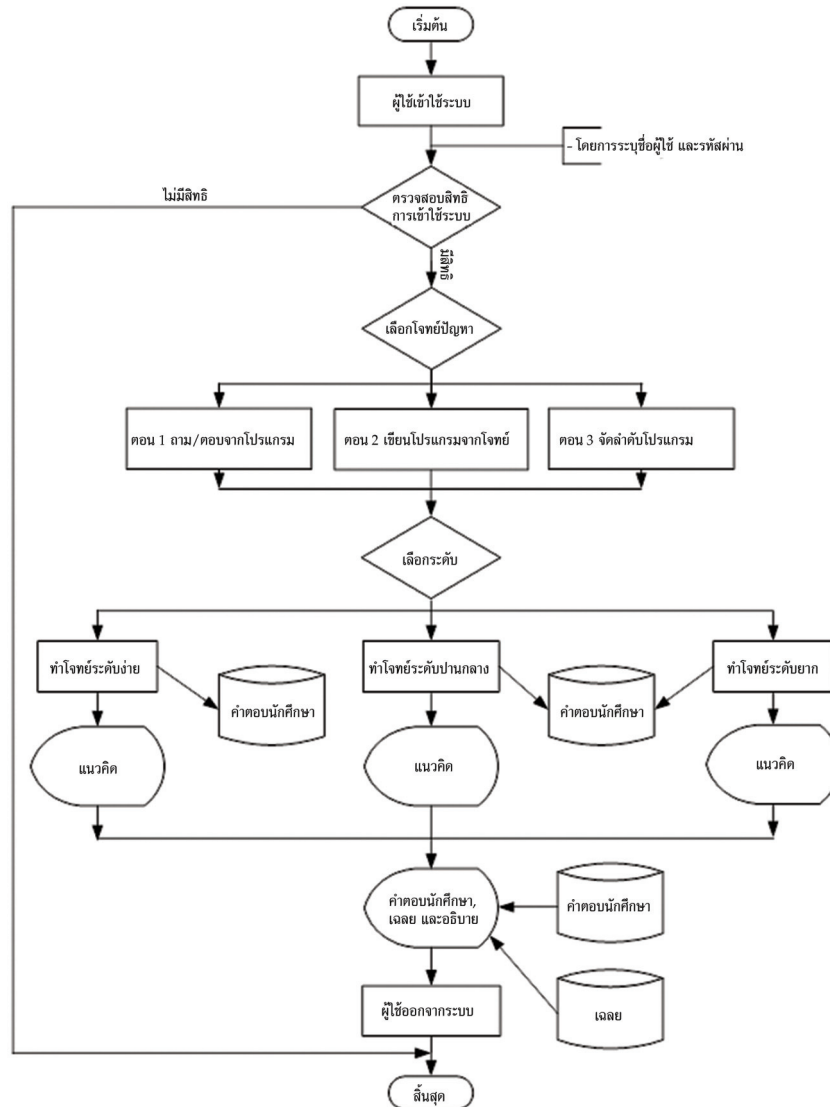


รูปที่ 4 แบบจำลองของระบบงาน

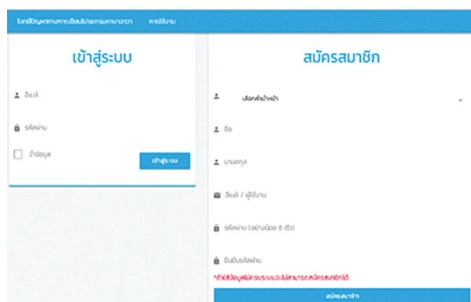
2.3 การเข้าใช้ระบบงานโดยนักศึกษา

ผู้วิจัยได้ออกแบบขั้นตอนการเข้าใช้ระบบงานของนักศึกษาที่มีความบกพร่องทางการได้ยินด้วยผังงานดังรูปที่ 5 นักศึกษาที่จะใช้ระบบงานต้องเป็นสมาชิกก่อน ซึ่งการเป็นสมาชิกทำได้ 2 วิธี คือ ผู้ดูแลระบบ

เพิ่มข้อมูลสมาชิกและกำหนดสิทธิ์การใช้งาน หรือนักศึกษาลงทะเบียนสมัครสมาชิกเอง นักศึกษาสามารถใช้งาน โดยเลือกทำโจทย์ปัญหาและระดับของโจทย์ ระบบจะแสดงผลการตรวจคำตอบและเฉลยพร้อมคำอธิบาย ดังรูปที่ 6(ก) - (ข)



รูปที่ 5 ฟังก์ชันการเข้าใช้ระบบงานโดยนักศึกษา



(ก) การเข้าใช้งาน



(ข) หน้าจอหลัก

รูปที่ 6 หน้าจอการใช้งาน



(ค) นักศึกษาทำโจทย์ปัญหา



(ง) นักศึกษาใช้แอปพลิเคชัน HIP
ดูเฉลยพร้อมคำอธิบายการทำงานซอร์สโค้ด

รูปที่ 6 หน้าจอการใช้งาน (ต่อ)

3. พัฒนาระบบ โดยมีการทำงาน 2 ส่วน ได้แก่ 1) การทำงานบนเว็บแอปพลิเคชัน พัฒนาระบบด้วยโปรแกรมภาษา PHP, JavaScript, HTML ฐานข้อมูลใช้โปรแกรม MySQL และ 2) การทำงานของแอปพลิเคชัน HIP เป็นส่วนที่ใช้เทคโนโลยีเสมือนจริง (Augmented Reality) พัฒนาระบบด้วยโปรแกรม Unity, Adobe Premiere, Adobe Photoshop ซึ่งการทำงานทั้งสองส่วนจะผสานการทำงานร่วมกันได้

4. ทดสอบและปรับปรุงแก้ไข โดยทำการทดสอบและแก้ไขส่วนต่าง ๆ ของระบบให้ถูกต้อง ผู้เชี่ยวชาญประเมินคุณภาพระบบงาน และผู้ใช้งานประเมินความพึงพอใจของระบบงานในด้านต่าง ๆ

5. ติดตั้งและนำมาใช้งาน โดยนำมาใช้งานจริงและจัดทำเอกสารการใช้งานในลักษณะเอกสารอิเล็กทรอนิกส์

6. สรุปผลการวิจัย โดยสรุปผลและรายงานผลการวิจัยเพื่อเผยแพร่

สถิติที่ใช้ในการวิจัย

สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล ได้แก่ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดยกำหนดเกณฑ์การแปลความหมาย [11] ดังนี้

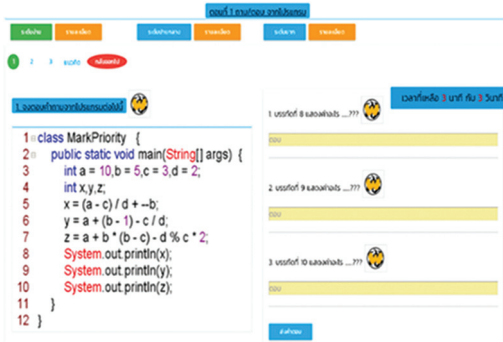
ค่าเฉลี่ย 4.50 - 5.00	หมายถึง	มีคุณภาพ/ความพึงพอใจระดับมากที่สุด
ค่าเฉลี่ย 3.50 - 4.49	หมายถึง	มีคุณภาพ/ความพึงพอใจระดับมาก
ค่าเฉลี่ย 2.50 - 3.49	หมายถึง	มีคุณภาพ/ความพึงพอใจระดับปานกลาง
ค่าเฉลี่ย 1.50 - 2.49	หมายถึง	มีคุณภาพ/ความพึงพอใจระดับน้อย
ค่าเฉลี่ย 1.00 - 1.49	หมายถึง	มีคุณภาพ/ความพึงพอใจระดับน้อยที่สุด

ผลการวิจัย

1. ผลการพัฒนาโปรแกรมเชิงปฏิสัมพันธ์ด้วยเทคโนโลยีเสมือนจริงจากโจทย์ปัญหาทางการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ภาษาจาวา สำหรับผู้ที่มีความบกพร่องทางการได้ยิน

ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์รายการโจทย์ปัญหาทางด้านการเขียนโปรแกรมภาษาจาวาจำนวน 30 ข้อหลักภายใต้การทำงาน 3 ตอน ได้แก่ 1) ถาม/ตอบจากโปรแกรม 2) เขียนโปรแกรมจากโจทย์ และ 3) จัดลำดับโปรแกรม โดยแต่ละตอนได้จัดลำดับเนื้อหาออกเป็น 3 ระดับ ได้แก่ ระดับง่าย ปานกลาง และยาก มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1.1 การทำงานบนเว็บแอปพลิเคชันการใช้งานต้อง Login เข้าระบบ โดยสามารถเลือกทำงานได้ ดังนี้
ตอนที่ 1 ถาม/ตอบจากโปรแกรม คือ ส่วนที่ผู้ใช้เข้าใช้งานเพื่อทำโจทย์ถามตอบ ส่วนนี้จะมีซอร์สโค้ดโจทย์ปัญหามาให้ และมีโจทย์คำถามเป็นข้อ ๆ มาให้ตอบตามระยะเวลาที่กำหนด สามารถเลือกทำโจทย์ข้อที่ต้องการได้ สามารถดูแนวความคิดการทำโจทย์ในระหว่างทำโจทย์ได้ เมื่อทำเสร็จและส่งคำตอบแล้วหรือหมดเวลา ระบบจะมีการแสดงผลการตรวจคำตอบว่าถูกหรือผิด และสามารถดูเฉลยพร้อมคำอธิบายเฉลยได้ ดังรูปที่ 7(ก) - (ง)



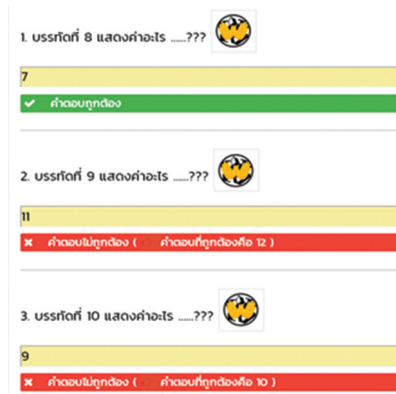
(ก) การทำโจทย์ถาม/ตอบจากโปรแกรม

แนวคิด

ศึกษาลำดับความสำคัญของตัวดำเนินการ (จากตารางแสดงความสำคัญจากมากไปหาน้อย)

ตัวดำเนินการ	ลำดับการทำงานในกลุ่มเดียวกัน
()	ทำงานวงเล็บก่อน
++, --, !	ขวาไปซ้าย
*, /, %	ซ้ายไปขวา
+, -	ซ้ายไปขวา
<, <=, >, >=	ซ้ายไปขวา
==, !=	ซ้ายไปขวา
&&	ซ้ายไปขวา
	ซ้ายไปขวา
~, **, ~~, *, /, %, /=, %=	ขวาไปซ้าย

(ข) แนวคิดการทำโจทย์ถาม/ตอบ



(ค) ผลการตรวจคำตอบโจทย์ถาม/ตอบ



(ง) เฉลยพร้อมคำอธิบายโจทย์ถาม/ตอบ

รูปที่ 7 หน้าจอการทำงานถาม/ตอบจากโปรแกรม

ตอนที่ 2 เขียนโปรแกรมจากโจทย์ คือ ส่วนที่ผู้ใช้เข้าใช้งานเพื่อทำโจทย์เขียนโปรแกรม ส่วนนี้จะมีโจทย์ฝังงานหรือโจทย์ให้เขียนโปรแกรมมาให้ และให้เขียนโปรแกรมทำตามระยะเวลาที่กำหนด สามารถเลือกทำโจทย์ข้อที่ต้องการได้ ในบางข้อจะมีโจทย์เพิ่มต่อยอดจากโจทย์เดิมให้ทำต่อไปได้อีกเมื่อทำโจทย์ข้อหลักเสร็จแล้ว สามารถดูแนวคิดการทำโจทย์ในระหว่างทำโจทย์ได้ เมื่อทำเสร็จและส่งคำตอบแล้วหรือหมดเวลา สามารถดูเฉลยพร้อมคำอธิบายการทำงานของซอร์สโค้ดได้ โดยเมื่อทำโจทย์เขียนโปรแกรมและส่งคำตอบครบทุกข้อแล้วต้องยืนยันคำตอบเพื่อส่งซอร์สโค้ดคำตอบเข้าในระบบซึ่งผู้ดูแลระบบสามารถเรียกดูเพื่อตรวจคำตอบได้ ดังรูปที่ 8(ก) - (ง)



(ก) การทำโจทย์เขียนซอร์สโค้ดโปรแกรม

- แนวคิด
- 91 จาก Flowchart ต่อไปนี้จงเขียนโปรแกรมจำนวนเฉพาะ
- จำนวนเฉพาะ (prime number) คือ จำนวนเป็นบวกที่มีตัวหารที่เป็นบวกอยู่ 2 ตัว คือ 1 กับตัวมันเอง
 - การทำงานนำค่าที่ติดอยู่มา loop วนซ้ำ อาจเป็น forwhile หรือ do..while วนซ้ำจนเพื่อประมวลการทำงาน อาจเป็นแบบ nested loop
 - มีคำสั่งเงื่อนไข (if/switch) ในการตรวจสอบเงื่อนไขการทำงาน
 - มีหลักการหารแบบ //(หารจำนวนเต็ม) และ %(หารเศษ) วนซ้ำประมวลผลจนเงื่อนไขการทำงาน
 - กำหนดตัวแปร 1 ตัว เพื่อใช้สถานะการทำงาน และการแสดงผล

(ข) แนวคิดการทำโจทย์เขียนซอร์สโค้ด

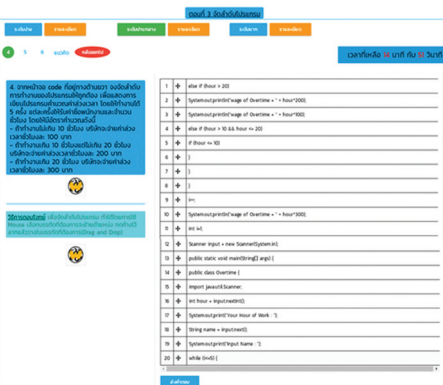
รูปที่ 8 หน้าจอการทำงานเขียนโปรแกรมจากโจทย์



(ค) หน้าจอการตรวจคำตอบเขียนซอร์สโค้ดโปรแกรม รูปที่ 8 หน้าจอการทำงานเขียนโปรแกรมจากโจทย์ (ต่อ)

(ง) เฉลยพร้อมคำอธิบายเขียนซอร์สโค้ด

ตอนที่ 3 จัดลำดับโปรแกรม คือ ส่วนที่ผู้ใช้เข้าใช้งานเพื่อทำโจทย์จัดลำดับการทำงาน โปรแกรมให้ถูกต้อง ส่วนนี้จะมีซอร์สโค้ดโปรแกรมแบบลุ่มมาให้ และให้จัดลำดับการทำงานเป็นโปรแกรมที่สมบูรณ์ตามระยะเวลาที่กำหนด สามารถเลือกทำโจทย์ข้อที่ต้องการได้ สามารถดูแนวคิดการทำโจทย์ในระหว่างทำโจทย์ได้ เมื่อทำเสร็จและส่งคำตอบแล้วหรือหมดเวลาระบบจะแสดงผลการตรวจคำตอบแต่ละบรรทัดถูกหรือผิดและคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ให้ และสามารถดูเฉลยพร้อมคำอธิบายการทำงานของซอร์สโค้ดได้ ดังรูปที่ 9 (ก) - (ง)




(ก) การทำโจทย์จัดลำดับการทำงานโปรแกรม

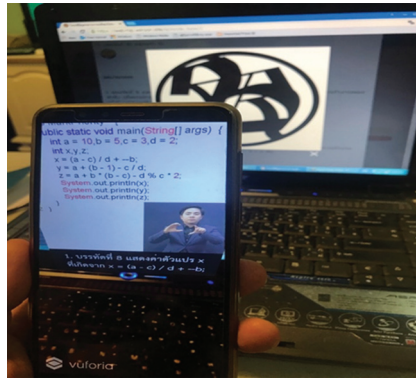
(ข) แนวคิดการทำโจทย์จัดลำดับโปรแกรม



(ค) ผลการตรวจคำตอบจัดลำดับโปรแกรม รูปที่ 9 หน้าจอการทำงานจัดลำดับโปรแกรม

(ง) เฉลยพร้อมคำอธิบายจัดลำดับโปรแกรม

1.2 การทำงานของแอปพลิเคชัน HIP เพื่อรองรับการทำงานบนอุปกรณ์พกพาหรือสมาร์ทโฟน ส่วนนี้จะผสานการทำงานร่วมกันกับส่วนการทำงานบนเว็บแอปพลิเคชัน โดยผู้ใช้ต้องติดตั้งแอปพลิเคชัน HIP บนอุปกรณ์ให้เรียบร้อยก่อนแล้วเปิดการใช้งาน บนจอภาพจะมีรูปสัญลักษณ์  ปรากฏอยู่ การใช้งานผู้ใช้ทำการคลิกที่รูปนั้นจะปรากฏภาพ AR Code แสดงขึ้นมา เมื่อผู้ใช้เปิดใช้กล้องของอุปกรณ์ส่องที่ภาพนั้น ระบบจะทำการแสดงผลภาษามือ ภาพ และคำบรรยายประกอบ บนหน้าจอของอุปกรณ์นั้น ดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 หน้าจอการทำงานของแอปพลิเคชัน HIP

2. ผลการประเมินคุณภาพและการประเมินความพึงพอใจที่มีต่อโปรแกรม

2.1 ผลการประเมินด้านคุณภาพจากผู้เชี่ยวชาญ

ผู้วิจัยได้ให้ผู้เชี่ยวชาญที่เป็นอาจารย์ผู้สอนด้านการพัฒนาระบบงานคอมพิวเตอร์ และผู้เชี่ยวชาญด้านล่ามแปลภาษามือ จำนวน 5 ท่าน ทำการประเมินด้านคุณภาพที่มีต่อโปรแกรม มีผลการประเมิน ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการประเมินด้านคุณภาพจากผู้เชี่ยวชาญ

รายการประเมิน	\bar{X}	S.D.	ความหมาย
1. ด้านการออกแบบโปรแกรม			
1.1 การออกแบบโครงสร้างโปรแกรมให้ทำงานได้ชัดเจน	4.80	0.45	มากที่สุด
1.2 การออกแบบโปรแกรมทำงานได้ครอบคลุมเนื้อหา	4.60	0.55	มากที่สุด
1.3 การออกแบบหน้าจอดีความเหมาะสม และไม่ซับซ้อน	4.60	0.55	มากที่สุด
1.4 การออกแบบโปรแกรมมีความเหมาะสมกับกลุ่มเป้าหมาย	4.80	0.45	มากที่สุด
รวมเฉลี่ย	4.70	0.50	มากที่สุด
2. ด้านเนื้อหา			
2.1 เนื้อหาสอดคล้องกับวัตถุประสงค์	5.00	0.00	มากที่สุด
2.2 การจัดเรียงลำดับของเนื้อหาเป็นไปตามลำดับความยากง่ายและเข้าใจง่าย	4.20	0.84	มาก
2.3 การแบ่งหมวดหมู่ของเนื้อหาเข้าใจง่าย	4.40	0.89	มาก
2.4 เนื้อหาที่มีความถูกต้อง และสมบูรณ์	4.80	0.45	มากที่สุด
2.5 เนื้อหาที่มีความเหมาะสมกับกลุ่มเป้าหมาย	4.80	0.45	มากที่สุด
2.6 เนื้อหาที่มีความทันสมัย	4.60	0.55	มากที่สุด
2.7 เนื้อหาที่มีปริมาณที่เหมาะสม	4.40	0.55	มาก
2.8 ภาษาที่ใช้มีความเหมาะสมกับเนื้อหา	4.80	0.45	มากที่สุด
2.9 ความเหมาะสมของการตั้งคำถามจากโจทย์ปัญหา	4.40	0.55	มาก

ตารางที่ 1 ผลการประเมินด้านคุณภาพจากผู้เชี่ยวชาญ (ต่อ)

รายการประเมิน	\bar{X}	S.D.	ความหมาย
2.10 โจทย์ปัญหาที่ดั่งขึ้นทำให้เกิดความรู้ ความเข้าใจ และทักษะในการเขียนโปรแกรมมากขึ้น	4.40	0.55	มาก
2.11 การอธิบายเนื้อหาที่มีความชัดเจน	4.40	0.55	มาก
2.12 การอธิบายและแนะนำการใช้งานมีความชัดเจน	4.40	0.55	มาก
2.13 หลังจากทำโจทย์ปัญหาแล้วสามารถนำผลไปใช้งานได้	4.40	0.55	มาก
รวมเฉลี่ย	4.54	0.53	มากที่สุด
3. ด้านสื่อที่ใช้			
3.1 ความเหมาะสมการออกแบบของค้ประกอบต่าง ๆ ในหน้าจอ	4.20	0.84	มาก
3.2 ความเหมาะสมของการใช้สีพื้นหลัง	4.20	0.45	มาก
3.3 ความเหมาะสมของสีตัวอักษร	4.20	0.45	มาก
3.4 ความเหมาะสมของขนาด และรูปแบบตัวอักษร	4.40	0.55	มาก
3.5 ออกแบบปุ่มการใช้งานได้สื่อความหมาย และใช้งานได้ง่าย	4.40	0.55	มาก
3.6 ความสะดวก และเหมาะสมในการเชื่อมโยงกันของงานส่วนต่าง ๆ	4.40	0.55	มาก
3.7 ภาพ/ภาพเคลื่อนไหวประกอบมีความเหมาะสม ถูกต้อง และสื่อความหมายได้ตรงกับเนื้อหา	4.20	0.45	มาก
3.8 คำบรรยายประกอบมีความเหมาะสม ถูกต้อง และสื่อความหมายได้ตรงกับเนื้อหา	4.20	0.84	มาก
3.9 การใช้ภาษามือสื่อสารได้ถูกต้องชัดเจน มีความเหมาะสม และสื่อความหมายได้ตรงกับเนื้อหา	4.20	0.84	มาก
3.10 ภาพ/ภาพเคลื่อนไหวประกอบสามารถแสดงผลได้อย่างถูกต้องชัดเจน และรวดเร็ว	4.60	0.55	มากที่สุด
3.11 คำบรรยายประกอบสามารถแสดงผลได้อย่างถูกต้องชัดเจน และรวดเร็ว	4.60	0.55	มากที่สุด
3.12 การใช้ภาษามือสามารถแสดงผลได้อย่างถูกต้องชัดเจน และรวดเร็ว	4.20	0.45	มาก
3.13 การกำหนดตำแหน่ง Marker มีความเหมาะสม	4.40	0.55	มาก
3.14 การกำหนดขนาด และรูปแบบ Marker มีความเหมาะสม	4.60	0.55	มากที่สุด
รวมเฉลี่ย	4.34	0.58	มาก
4. ด้านการใช้งาน			
4.1 ความถูกต้องของระบบตรวจสอบสิทธิการเข้าใช้งาน	4.80	0.45	มากที่สุด
4.2 ความถูกต้องในการจัดการข้อผิดพลาด	4.80	0.45	มากที่สุด
4.3 ความสะดวกในการใช้งานโปรแกรม	4.60	0.55	มากที่สุด
4.4 รูปแบบของโปรแกรมมีความเหมาะสมต่อการใช้งาน	4.60	0.55	มากที่สุด
4.5 การอำนวยความสะดวกในการเข้าถึงข้อมูลเนื้อหา	4.60	0.55	มากที่สุด
4.6 ความถูกต้องแม่นยำของระบบในการทำงานติดต่อกับ Marker	4.60	0.55	มากที่สุด
4.7 ความถูกต้อง และรวดเร็วในการตอบสนองต่อการใช้งาน	4.40	0.89	มาก
4.8 ความถูกต้อง และรวดเร็วในการแสดงผลข้อมูล	4.60	0.89	มากที่สุด
4.9 ความเหมาะสมในการกำหนดระยะเวลาทำโจทย์ปัญหาในแต่ละข้อ	4.60	0.55	มากที่สุด
4.10 ความถูกต้อง และรวดเร็วในการตรวจคำตอบจากโจทย์ปัญหา	4.80	0.45	มากที่สุด

ตารางที่ 1 ผลการประเมินด้านคุณภาพจากผู้เชี่ยวชาญ (ต่อ)

รายการประเมิน	\bar{X}	S.D.	ความหมาย
4.11 ความถูกต้อง และรวดเร็วในการสรุปผลคะแนน	4.80	0.45	มากที่สุด
4.12 โปรแกรมมีความน่าสนใจ และดึงดูดต่อการเรียนรู้	4.40	0.89	มาก
4.13 ความสามารถในการทำงานของระบบในภาพรวม	4.20	0.84	มาก
4.14 โปรแกรมนี้มีความเหมาะสมในการนำไปเผยแพร่ได้	4.40	0.55	มาก
รวมเฉลี่ย	4.59	0.61	มากที่สุด
ค่าเฉลี่ยโดยรวม	4.51	0.57	มากที่สุด

จากตารางที่ 1 ผลการประเมินด้านคุณภาพจากผู้เชี่ยวชาญที่มีต่อโปรแกรม เมื่อพิจารณาในภาพรวมพบว่า มีคุณภาพอยู่ในระดับมากที่สุด ($\bar{X} = 4.51$, S.D. = 0.57) เมื่อพิจารณาเป็นรายด้านพบว่า ด้านการออกแบบโปรแกรมมีค่าเฉลี่ยสูงที่สุด ($\bar{X} = 4.70$, S.D. = 0.50) รองลงมาคือ ด้านการใช้งาน ($\bar{X} = 4.59$, S.D. = 0.61) และเมื่อพิจารณาเป็นรายข้อพบว่า เนื้อหาสอดคล้องกับวัตถุประสงค์มีค่าเฉลี่ยสูงที่สุด ($\bar{X} = 5.00$, S.D. = 0.00) รองลงมาคือ การออกแบบโครงสร้างโปรแกรมให้ทำงานได้ชัดเจน การออกแบบโปรแกรมมีความเหมาะสมกับกลุ่มเป้าหมาย เนื้อหามีความถูกต้องและสมบูรณ์ เนื้อหาเหมาะสมกับกลุ่มเป้าหมาย ภาษาที่ใช้มีความเหมาะสมกับเนื้อหา ความถูกต้องของระบบตรวจสอบสิทธิการเข้าใช้งาน ความถูกต้องในการจัดการข้อผิดพลาด ความถูกต้องและรวดเร็วในการตรวจคำตอบจากโจทย์ปัญหา และ ความถูกต้องและรวดเร็วในการสรุปผลคะแนน ($\bar{X} = 4.80$, S.D. = 0.45)

2.2 ผลการประเมินความพึงพอใจจากนักศึกษาที่มีความบกพร่องทางการได้ยิน

ผู้วิจัยได้คัดเลือกกลุ่มตัวอย่างแบบเจาะจง โดยใช้กลุ่มตัวอย่างที่เป็นนักศึกษาที่มีความบกพร่องทางการได้ยิน สาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์ จำนวน 10 คน ทำการประเมินความพึงพอใจที่มีต่อโปรแกรม มีผลการประเมินดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการประเมินความพึงพอใจของนักศึกษาที่มีความบกพร่องทางการได้ยิน

รายการประเมิน	\bar{X}	S.D.	ความหมาย
1. ด้านองค์ประกอบทั่วไป			
1.1 ความเหมาะสมของขนาด และรูปแบบตัวอักษร	4.30	0.68	มาก
1.2 ความเหมาะสมของสีตัวอักษร และสีพื้นหลัง	4.00	1.41	มาก
1.3 ความเหมาะสมของภาพ/ภาพเคลื่อนไหว	3.80	1.23	มาก
1.4 ความเหมาะสมของการจัดวางตำแหน่งส่วนต่าง ๆ บนจอภาพ	4.10	0.57	มาก
1.5 ความเหมาะสมในการเชื่อมโยงกันของงานส่วนต่าง ๆ	4.00	0.82	มาก
1.6 ความเหมาะสมของเนื้อหาในโจทย์ปัญหาแต่ละตอน	3.30	0.95	ปานกลาง
1.7 ความเหมาะสมของเวลาที่ใช้ในการทำโจทย์ปัญหาแต่ละข้อ	3.90	0.74	มาก
1.8 ความเหมาะสมของระยะเวลาในการตอบสนอง	4.10	0.88	มาก
1.9 ความเหมาะสมของเนื้อหาส่วนที่ใช้เทคโนโลยีเสมือนจริงแสดงผล	4.00	0.82	มาก
1.10 ความน่าสนใจ และความดึงดูดใจในการนำเทคโนโลยีเสมือนจริงมาใช้	3.50	1.27	มาก
1.11 ความเหมาะสมในการกำหนดตำแหน่ง ขนาด และรูปแบบ Marker	4.40	0.70	มาก
1.12 ความเหมาะสมของอุปกรณ์ที่นำมาใช้กับเทคโนโลยีเสมือนจริง	4.20	1.32	มาก
รวมเฉลี่ย	3.97	0.95	มาก

ตารางที่ 2 ผลการประเมินความพึงพอใจของนักศึกษาที่มีความบกพร่องทางการได้ยิน (ต่อ)

รายการประเมิน	\bar{X}	S.D.	ความหมาย
2. ด้านประสิทธิภาพระบบ			
2.1 ความถูกต้องในการตรวจสอบสิทธิการเข้าใช้งาน และออกจากระบบงาน	4.40	0.70	มาก
2.2 ความถูกต้องครบถ้วนในการตรวจสอบข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้น และการแสดงข้อความสถานะข้อผิดพลาดนั้น	3.40	0.84	ปานกลาง
2.3 ความสะดวกในการใช้งานโปรแกรม	4.30	0.82	มาก
2.4 ความถูกต้องแม่นยำในการตรวจคำตอบจากโจทย์ปัญหาแต่ละข้อ	4.10	1.10	มาก
2.5 ความถูกต้อง และรวดเร็วในการบันทึก และการเรียกใช้ข้อมูล	4.00	0.94	มาก
2.6 ความถูกต้อง และรวดเร็วในการค้นหาข้อมูล	4.40	0.52	มาก
2.7 ความถูกต้อง และรวดเร็วในการแสดงผลข้อมูล	4.20	1.03	มาก
2.8 ภาพ/ภาพเคลื่อนไหวประกอบถูกต้อง สื่อความหมายได้ตรงกับเนื้อหา และเข้าใจได้ง่าย	3.40	1.43	ปานกลาง
2.9 คำบรรยายประกอบถูกต้อง สื่อความหมายได้ตรงกับเนื้อหา และเข้าใจได้ง่าย	3.10	1.37	ปานกลาง
2.10 ความถูกต้องชัดเจนของท่าภาษามือในการอธิบายเนื้อหา	4.20	0.63	มาก
2.11 การสื่อความหมายภาษามือเข้าใจได้ง่าย	4.30	0.82	มาก
2.12 การแนะนำ และอธิบายขั้นตอนการใช้งานทำให้เข้าใจง่ายขึ้น	4.10	1.10	มาก
2.13 การใช้งานส่วนเว็บแอปพลิเคชันมีความถูกต้อง และแม่นยำ	3.70	1.06	มาก
2.14 การใช้งานส่วนเทคโนโลยีเสมือนจริงมีความถูกต้อง และแม่นยำ	3.80	1.40	มาก
2.15 โปรแกรมช่วยส่งเสริมสนับสนุนให้เกิดการเรียนรู้ และมีทักษะทางการเขียนโปรแกรมได้ดียิ่งขึ้น	4.10	1.10	มาก
รวมเฉลี่ย	3.97	0.99	มาก
ค่าเฉลี่ยโดยรวม	3.97	0.97	มาก

จากตารางที่ 2 ผลการประเมินความพึงพอใจจากนักศึกษาที่มีความบกพร่องทางการได้ยินที่มีต่อโปรแกรม เมื่อพิจารณาในภาพรวมพบว่า มีความพึงพอใจอยู่ในระดับมาก ($\bar{X} = 3.97$, S.D. = 0.97) เมื่อพิจารณาเป็นรายด้านพบว่า ทั้ง 2 ด้าน มีค่าเฉลี่ยเท่ากันคือ ด้านองค์ประกอบทั่วไป ($\bar{X} = 3.97$, S.D. = 0.95) และด้านประสิทธิภาพระบบ ($\bar{X} = 3.97$, S.D. = 0.99) และเมื่อพิจารณาเป็นรายข้อพบว่า ความถูกต้องและรวดเร็วในการค้นหาข้อมูล มีความพึงพอใจสูงที่สุดเป็นลำดับแรก โดยมีความพึงพอใจอยู่ในระดับมาก ($\bar{X} = 4.40$, S.D. = 0.52) รองลงมาคือ ความเหมาะสมในการกำหนดตำแหน่ง ขนาด และรูปแบบ Marker และความถูกต้องในตรวจสอบสิทธิการเข้าใช้งานและออกจากระบบงาน มีความพึงพอใจอยู่ในระดับมาก ($\bar{X} = 4.40$, S.D. = 0.70)

การอภิปรายผล

1. ผลการประเมินคุณภาพจากผู้เชี่ยวชาญ ในภาพรวมมีคุณภาพอยู่ในระดับมากที่สุด ($\bar{X} = 4.51$, S.D. = 0.57) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย [3] ได้ทำการวิจัยเรื่อง เทคโนโลยีความเป็นจริงเสริมการสอนสำนวนไทย สำหรับผู้บกพร่องทางการได้ยิน ภาพรวมของการประเมินมีคุณภาพอยู่ในระดับมากที่สุด ($\bar{X} = 4.58$, S.D. = 0.56) สอดคล้องกับงานวิจัย [5] ได้ทำการวิจัยเรื่อง การพัฒนาหนังสืออัจฉริยะเพื่อสนับสนุนการสื่อสารสำหรับเด็กที่มีความบกพร่องทางการได้ยิน ภาพรวมของการประเมินมีคุณภาพอยู่ในระดับมากที่สุด ($\bar{X} = 4.76$, S.D. = 0.44)

และสอดคล้องกับงานวิจัย [8] ได้ทำการวิจัยเรื่อง การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเสมือนจริงประกอบภาษามือ สำหรับนักศึกษาที่มีความบกพร่องทางการได้ยิน มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา ภาพรวมของการประเมิน มีคุณภาพอยู่ในระดับเหมาะสมมาก ($\bar{X} = 4.05$, S.D. = 0.65) การพัฒนาสื่อเทคโนโลยีสำหรับการเรียนรู้ ก่อนนำไปใช้งานให้เกิดประโยชน์ได้จริงและมีประสิทธิภาพจำเป็นต้องได้รับการประเมินจากผู้เชี่ยวชาญ ทั้งด้านเทคนิค สื่อ และเนื้อหา โดยผู้ที่มีความบกพร่องทางการได้ยินจะรับรู้ทางสายตาเป็นหลัก สื่อที่พัฒนา ต้องสร้างความน่าสนใจ และการตอบสนองต่อการรับรู้ได้ดีควรเป็นสื่อที่เป็นภาพ คำบรรยายประกอบ และ ภาษามือ ซึ่งจะช่วยให้การสื่อความหมายเข้าใจง่ายขึ้น และดึงดูดความสนใจต่อการเรียนรู้มากขึ้น

2. ผลการประเมินความพึงพอใจจากนักศึกษาที่มีความบกพร่องทางการได้ยิน ในภาพรวมมีความพึงพอใจ อยู่ในระดับมาก ($\bar{X} = 3.97$, S.D. = 0.97) นักศึกษามีการตอบรับที่ดีในการใช้งานโปรแกรม การนำเทคโนโลยีเสมือนจริงมาใช้งานทำให้เกิดความสนใจและเข้าใจง่ายขึ้น แต่เนื่องจากนักศึกษามีทักษะพื้นฐานหรือการเรียนรู้ ทางการเขียนโปรแกรมที่แตกต่างกัน รวมถึงอุปกรณ์ที่ใช้มีคุณลักษณะที่แตกต่างกันด้วย ทำให้ผลลัพธ์การใช้งาน ของแต่ละคนแตกต่างกันไปบ้าง ทั้งส่วนการทำงานบนเว็บแอปพลิเคชัน และส่วนการทำงานของแอปพลิเคชัน HIP

สรุปผล

จากผลการวิจัยทั้งในส่วนการทำงานบนเว็บแอปพลิเคชันที่ใช้สำหรับรองรับการทำงานผ่านเว็บ และส่วนการทำงาน ของแอปพลิเคชัน HIP ที่รองรับการทำงานบนอุปกรณ์พกพาหรือสมาร์ทโฟน สามารถผสานการทำงานร่วมกัน ได้เป็นอย่างดี เป็นเครื่องมือที่จำลองโจทย์ปัญหาจากสถานการณ์ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ภาษาจาวา สามารถสื่อสารและช่วยกระตุ้นความสนใจทำให้ผู้ที่มีความบกพร่องทางการได้ยินได้ฝึกปฏิบัติจริง ช่วยตอบสนองต่อความแตกต่างในการเรียนรู้ของแต่ละบุคคลได้ ทำให้เกิดทักษะและพัฒนาการทางการเขียน โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่มากขึ้น โดยมีผลการประเมินด้านคุณภาพจากผู้เชี่ยวชาญมีคุณภาพอยู่ในระดับมากที่สุด และผลการประเมินความพึงพอใจจากนักศึกษาที่มีความบกพร่องทางการได้ยินมีความพึงพอใจอยู่ในระดับมาก

ข้อเสนอแนะ

1. ข้อเสนอแนะในการนำไปใช้งาน

1.1 เนื่องจากงานวิจัยนี้ไม่ใช่สื่อช่วยสอนการเรียนรู้โปรแกรมภาษาจาวา แต่เป็นโจทย์ปัญหาในการเขียนโปรแกรมภาษาจาวาให้ฝึกทำในรูปแบบต่าง ๆ เพื่อให้เกิดผลลัพธ์ที่ดีต่อผู้ใช้งานที่เป็นผู้มีความบกพร่องทางการได้ยิน ก่อนใช้งานควรมีทักษะพื้นฐานทางการเขียนโปรแกรมภาษาจาวา หรือเคยเรียนรู้การเขียนโปรแกรม ภาษาจาวามาก่อนแล้ว

1.2 ผู้ที่มีความบกพร่องทางการได้ยินควรทำความเข้าใจโจทย์และให้เวลาในการทำโจทย์อย่างเพียงพอ

1.3 เพื่อให้การทำงานเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ในส่วนการทำงานของแอปพลิเคชัน HIP คุณลักษณะของอุปกรณ์พกพาหรือสมาร์ทโฟนไม่ควรล้าสมัยเกินไป และควรมีขนาดของหน่วยความจำที่เพียงพอ ซึ่งจะช่วยให้เวลาในการตอบสนองได้ดีและทันท่วงทีมากยิ่งขึ้น

2. ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยครั้งต่อไป

2.1 ควรเพิ่มตัวอย่างในการทำโจทย์ให้เห็นเป็นภาพประกอบ เพื่อช่วยเพิ่มความเข้าใจของนักศึกษา ในการตอบโจทย์คำถามได้เข้าใจและชัดเจนมากยิ่งขึ้น

2.2 เนื่องจากเป็นโจทย์ปัญหาที่เน้นทักษะทางด้านปฏิบัติการเขียนโปรแกรมภาษาจาวา ควรเพิ่มเติม ภาพเคลื่อนไหวประกอบแบบสามมิติเพื่อดึงดูดความสนใจและเข้าใจมากยิ่งขึ้น

2.3 ส่วนการทำงานของแอปพลิเคชัน HIP บนอุปกรณ์พกพาหรือสมาร์ทโฟน สามารถรองรับ

การทำงานได้เฉพาะระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ (Android) เท่านั้น เพื่อเข้าถึงการใช้งานที่หลากหลายมากขึ้น ควรเพิ่มให้รองรับการทำงานบนระบบปฏิบัติการแบบอื่น ๆ ได้ด้วย

2.4 การทำงานของโปรแกรมในตอนต้น 3 จัดลำดับโปรแกรม สามารถรองรับการใช้งานได้โดยใช้เมาส์ (Mouse) เท่านั้น เพื่อเข้าถึงการใช้งานที่มากขึ้นควรเพิ่มให้รองรับการทำงานแบบหน้าจอสัมผัส (Touch Screen) ได้ด้วย

References

- [1] Secretariat of the Prime Minister. (2004). **Thailand's Honor for Disabilities Operations, Volume 3, People with Disabilities: Determined Life**. Bangkok: Amarin Printing and Publishing
- [2] Educational Technology Center Loei Rajabhat University. (2018). **AR Learning Materials**. Access (25 October 2019). Available (<http://www.techno.lru.ac.th/techno/สื่อการเรียนรู้-ar/>)
- [3] Bureerat, N., Bunpabuth, P., and Duangpamorn, O. (2020). Augmented Reality for Teaching Thai's Idioms of the Hearing Impaired. **Journal for Research and Innovation, Institute of Vocational Education Bangkok**. Vol. 3, No. 1, pp. 101-110
- [4] Chumchim, P. and Maneerat, P. (2020). Application Development of Sign Language Translation Systems for the Hearing-Impaired People. **PKRU SciTech Journal**. Vol. 4, No. 1, pp. 22-32
- [5] Mingsiritham, K. and Chanyawudhiwan, G. (2018). **A Development of Smart Book to Assisted Communication for Hearing Impaired Students**. Research Report. Nonthaburi: Sukhothai Thammathirat Open University
- [6] Phatai, G., Chanpuem, P., and Wattanasura, A. (2018). Animal Planet Vocabulary Book with Augmented Reality Technology. **Journal of Project in Computer Science and Information Technology**. Vol. 4, No. 1, pp. 23-28
- [7] Sookpadhee, T. (2017). Multimedia Format for Learning at Computer Graphics in Hearing Impaired People. **APHEIT JOURNAL**. Vol. 23, No. 2, pp. 21-33
- [8] Chaiyasit, S. and Kobsiripat, W. (2016). An Application of Augmented Reality Technology with Sign Language for the Students with Hearing Impairment of Nakhon Ratchasima. **University of the Thai Chamber of Commerce Journal Science and Technology**. Vol. 3, No. 1, pp. 10-29
- [9] Kewnara, P. (2013). The Development of Computer Assisted Instruction On the Use of Visual Aids For Students with Hearing Impairment of Ratchasuda College, Mahidol University, Independent. **Veridian E-Journal, SU**. Vol. 6, No. 1, pp. 267-275
- [10] Yoosomboon, S. and Wanapiroon, P. (2013). Design of Interactive Instructional Media Applying an Augmented Reality in a Ubiquitous Learning Environment to Reduce Student Cognitive Loads. **National e-Learning Conference NEC 2013**. pp. 120-125. Bangkok: Parbpim Limited Partnership
- [11] Wongratana, C. (2017). *Techniques for Using Statistics for Research*. 13th ed. Bangkok: Amorn Printing

การยับยั้งแบคทีเรียของผ้าฝ้ายเคลือบด้วยคอมพอลสิตไคโตซานและ
มอนต์-มอริลโลไนต์

Antibacterial Activity of Coated Cotton Fabrics with Chitosan-Montmorillonite Composites

สิรินันท์ วิริยะสุนทร^{1*} และปานิสรา ทองลิ้ม¹

Sirinun Wiriyasontorn^{1*} and Panisara Thongluem¹

Received: September 3, 2021; Revised: February 21, 2022; Accepted: March 1, 2022

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายในการเตรียมผ้าฝ้ายเคลือบด้วยคอมพอลสิตระหว่างไคโตซาน (CS) และมอนต์มอริลโลไนต์ (MMT) เพื่อให้ผ้าฝ้ายมีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย เตรียมคอมพอลสิตจากไคโตซานและมอนต์มอริลโลไนต์ ด้วยกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน จากนั้นนำผ้าฝ้ายมาเคลือบด้วยคอมพอลสิต โดยวิธีการจุ่มเคลือบด้วยจำนวนรอบในการเคลือบ 1 5 และ 10 รอบ วิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างทางเคมีของผ้าฝ้ายเคลือบคอมพอลสิตด้วยเทคนิค FT-IR และวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของผ้าฝ้ายเคลือบคอมพอลสิตด้วยเทคนิค SEM พบว่าคอมพอลสิตสามารถยึดเกาะบนผ้าฝ้ายได้ดี การทดสอบประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียด้วยมาตรฐาน AATCC 100-2004 พบว่าผ้าฝ้ายที่เคลือบคอมพอลสิตจำนวน 5 และ 10 รอบ มีประสิทธิภาพในการต้านเชื้อแบคทีเรีย *Escherichia coli* และ *Staphylococcus aureus* โดยให้ค่าการลดลงของเชื้อแบคทีเรียร้อยละ 95 - 99.9 และเมื่อทดสอบความคงทนต่อการซัก 5 รอบ พบว่าผ้าฝ้ายเคลือบด้วยคอมพอลสิตสามารถยับยั้ง *Escherichia coli* ได้ร้อยละ 28 และ *Staphylococcus aureus* ได้ร้อยละ 35

คำสำคัญ : ผ้าฝ้าย; ไคโตซาน; มอนต์มอริลโลไนต์; คอมพอลสิต; สารต้านเชื้อแบคทีเรีย

¹ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี

¹ Faculty of Science, Ubonratchathani Rajabhat University

* Corresponding Author, Tel. 08 9175 9938, E - mail: ing_sirinun25@hotmail.com

Abstract

The objective of the study was to prepare coated cotton fabrics with chitosan (CS) and montmorillonite (MMT) composites to improve the antibacterial activity. CS-MMT composites were prepared by ion exchange technique. Cotton fabrics were coated with CS-MMT composites by dipping and drying in hot air oven. Different numbers of coatings (1, 5 and 10) were then examined. The chemical composition of coated cotton fabric with CS-MMT composite was analyzed by FTIR and the morphology was observed by SEM. The results indicated that CS-MMT composite could be attached to cotton fabrics. The antibacterial activity was quantitatively assessed by using the AATCC 100: 2004 test method. The result revealed that the cotton coated with composites 5 and 10 cycles showed 95 - 99 % microbial reduction against. After 5 washing cycles, the CS-MMT composite retained on cotton fabric had an antibacterial activity up to 28 % for *Escherichia coli* and 35 % for *Staphylococcus aureus*.

Keywords: Cotton; Chitosan; Montmorillonite; Composites; Antibacterial

บทนำ

ผ้าฝ้ายเป็นผ้าที่นิยมใช้กันมากในประเภทเส้นใยจากธรรมชาติ เนื่องจากมีคุณสมบัติที่ดีสามารถดูดซับน้ำ เหงื่อ ของเหลวได้รวดเร็ว ระบายอากาศได้ดีและสวมใส่สบาย แต่อย่างไรก็ตามผ้าฝ้ายที่เป็นเส้นใยจากธรรมชาติ ที่ประกอบด้วยเซลลูโลสนั้นมีข้อเสีย เนื่องจากผ้าฝ้ายมีประสิทธิภาพในการดูดซับของเหลวที่ดี เมื่อเกิดความร้อน และชื้น จึงเป็นสภาวะที่เหมาะสม สำหรับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ การใส่เสื้อผ้าที่มีการระบายอากาศได้ดี และควรใส่เสื้อผ้าที่มีคุณสมบัติในการต้านแบคทีเรียและเชื้อรา เป็นต้น นอกจากความจำเป็นต่อสุขภาพแล้ว ผ้าที่ตกแต่งสำเร็จด้านเชื้อแบคทีเรียยังมีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้นกว่าผ้าทั่วไปด้วย เนื่องจากผ้าดังกล่าว จะไม่ถูกทำลายด้วยจุลินทรีย์ มีรายงานการใช้สารเคมีหลายชนิดเพื่อให้ฤทธิ์ต้านเชื้อจุลินทรีย์ในวัสดุสิ่งทอ เช่น เกลืออนินทรีย์ ฟีนอล ยาปฏิชีวนะ สารลดแรงตึงผิวฟอรั่มัลดีไฮด์ และสารประกอบไนโตร เป็นต้น แต่สารเคมี เหล่านี้มีความเป็นพิษต่อมนุษย์ และไม่เสื่อมสลายไปในสภาพแวดล้อม ในงานอุตสาหกรรมสิ่งทอ ยังต้องการ ที่จะมองหากระบวนการที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ที่จะมาทดแทนการใช้สารเคมีที่เป็นพิษ โคไคซานจึงเป็น อีกตัวเลือกที่ดี สำหรับอุตสาหกรรมสิ่งทอ เนื่องจากเป็นมิตรกับมนุษย์และสิ่งแวดล้อม [1] - [5]

โคไคซานเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพกลุ่มเดียวกับคาร์โบไฮเดรตพอลิเมอร์ เป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่ได้จาก เปลือกกุ้ง ปู แกนปลาหมึกหรือได้จากผนังเซลล์ของเชื้อรา และแมลง โคไคซานมีมากเป็นอันดับสองของโลก รองจากเซลลูโลส (Cellulose) แต่มีสมบัติทางกายภาพและทางเคมีคล้ายและแตกต่างกันกับเซลลูโลส [3] โคไคซานได้จากกระบวนการ Deacetylation โดยการกำจัดหมู่อะซิล (Acetyl) ของ N-acetyl-D-glucosamine ในโครงสร้างของโคไคตินให้เปลี่ยนเป็น Glucosamine โดยโคไคซานเป็นพอลิเมอร์เส้นตรงต่อกันด้วยพันธะ 1,4- β -glycosidic กับ 2-amino-2-deoxy-D-glucose และ C ตำแหน่งที่ 2 จะอยู่ในรูปหมู่อะมิโน (NH_2) [2] และฤทธิ์ยับยั้งจุลินทรีย์ของโคไคซานนั้นสามารถเกิดได้หลายกลไก โดยที่หมู่อะมิโนของ C ตำแหน่งที่ 2 ของวงแหวน Pyranose ของโคไคซานจะเกิดโปรโตเนชัน (Protonation; $\text{NH}_2 \rightarrow \text{NH}_3^+$) เมื่อโคไคซาน เกิดโปรโตเนชันจะเกิดไฟฟ้าระหว่าง Polycationic Chitosan กับผนังเซลล์จุลินทรีย์ จึงมีฤทธิ์ต้าน การเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ได้ เนื่องมาจากประจุบวกของโคไคซานหลังผ่านกระบวนการโปรโตเนชันจะเกิด อันตรกิริยากับผนังเซลล์จุลินทรีย์ที่มีสภาพเป็นประจุลบ [3] และทำให้ผนังเซลล์เสียหาย ทำให้เกิดการรั่วไหล

ของสารอิเล็กโทรไลต์ภายในเซลล์ ไม่ว่าจะเป็นโปรตีนรวมถึงองค์ประกอบอื่น ๆ นอกจากนั้นโมเลกุลของโคโคซานสามารถเกิดคีเลตกับไอออนของโลหะได้ สารคีเลตของโคโคซานกับไอออนของโลหะยังสามารถยึดเกาะกับผนังเซลล์ของแบคทีเรีย ทำให้ไปรบกวนกระบวนการเมแทบอลิซึมของแบคทีเรีย โดยโคโคซานจะไปจับกับ DNA ภายในเซลล์ของแบคทีเรียส่งผลทำให้การสังเคราะห์ mRNA ถูกยับยั้ง และในที่สุดแบคทีเรียจะไม่สามารถสร้างโปรตีนได้จนทำให้เซลล์ตายในที่สุด จึงมีฤทธิ์ยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียได้ ดังนั้นด้วยคุณสมบัติเหล่านี้ของโคโคซานจึงมีความน่าสนใจที่จะนำมาทำเป็นสารเคลือบด้านเชื้อแบคทีเรีย โดยค่าร้อยละของการเปลี่ยนแปลงจากหมู่อะซิติกในโครงสร้างของโคโคซานเป็นหมู่เอมีนของโคโคซานว่า Degree of Deacetylation หรือ % DD ซึ่งหากโคโคซานมี % DD สูง จะเป็นการเพิ่มหมู่เอมีนซึ่งมีสภาพประจุบวกในโครงสร้างของพอลิเมอร์โคโคซานเป็นพอลิอิเล็กโทรไลต์ประจุบวกธรรมชาติ (Cationic Polyelectrolyte) เนื่องจากหมู่เอมีนในสารละลายกรด มีการจับโปรตอนอยู่ในรูปแอมโมเนียมไอออน ($-NH_3^+$) ทำให้โคโคซานมีสมบัติในการต่อต้านจุลินทรีย์และเชื้อราบางชนิด โดยการจับเซลล์เมมเบรนของจุลินทรีย์ที่มีประจุลบได้ ทำให้เกิดการรั่วไหลของโปรตีนและสารอื่นของเซลล์ จึงทำให้เซลล์ถูกยับยั้งและไม่สามารถเจริญได้ [2] - [8]

มอนต์มอริลโลไนต์เป็นแร่ดินธรรมชาติกลุ่มสมแมกไทต์ (Smectite) ที่มีลูมินา-ซิลิกา เป็นส่วนประกอบในลักษณะโครงสร้างซ้อนกันเป็นชั้น ๆ ประกอบด้วย แผ่นซิลิกาสองแผ่น และอลูมินาหนึ่งแผ่นสอดคอยู่ระหว่างแผ่นซิลิกาและเกาะยึดออกซิเจนร่วมกัน ผลึกจะเชื่อมต่อกันแนวระดับเป็นชั้น ๆ และมีไอออนของโซเดียม แคลเซียม อยู่ด้วยในระหว่างชั้นโครงสร้าง คุณลักษณะคือ สามารถขยายตัวได้เนื่องจากไม่มีพันธะไฮโดรเจน ทำให้ประจุบวกต่าง ๆ สามารถเข้าแทรกในระหว่างชั้นโครงสร้างได้ง่าย เมื่อตัดแปรมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยโคโคซานที่มีประจุบวก จะทำให้สมบัติของมอนต์มอริลโลไนต์ดีขึ้น [9] - [10] ซึ่งจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเคลือบโคโคซานให้ติดกับผ้าฝ้ายได้ดีขึ้น ในงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาสารที่สามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรียในอุตสาหกรรมสิ่งทอ โดยเตรียมคอมพอสิตโคโคซานและมอนต์มอริลโลไนต์ โดยนำไปเคลือบบนผ้าฝ้าย ทำให้ได้ข้อมูลที่สำคัญที่สามารถใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอต่อไป

วิธีการวิจัย

1. วัสดุและสารเคมีในงานวิจัย

โคโคซาน จากบริษัทอีเบส (ประเทศไทย) เป็นเกรดทางการค้า มีลักษณะเป็นเกล็ดสีขาวขุ่น น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยเท่ากับ 50,000 ร้อยละการกำจัดหมู่อะซิติก (%DD) เท่ากับ 85 โซเดียมมอนต์มอริลโลไนต์ (Na-MMT) ชื่อทางการค้า คือ Mac-Gel จากบริษัทไทยนิปปอนเคมีภัณฑ์อุตสาหกรรม (จังหวัดสมุทรสาคร ประเทศไทย) ผ้าฝ้ายทอละลายที่ผ่านการฟอกขาวแล้ว (กรุงเทพมหานคร) สารเคมีอื่น ๆ ที่ใช้ทั้งหมดเป็นเกรดวิเคราะห์

2. การเตรียมตัวอย่าง

2.1 การเตรียมสารละลายโคโคซาน เตรียมสารละลายโคโคซานความเข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ละลายด้วยกรดอะซิติกความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยปริมาตร จากนั้นปั่นกวนด้วยเครื่องกวนสารละลายจนกระทั่งโคโคซานละลายหมด [11]

2.2 การเตรียมสารแขวนลอยมอนต์มอริลโลไนต์ เตรียมมอนต์มอริลโลไนต์ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนักในน้ำกลั่น จากนั้นปั่นกวนด้วยเครื่องกวนสารละลายเป็นเวลา 20 นาที แล้วนำไปอัลตราโซนิกเป็นเวลา 1 ชั่วโมง [10]

2.3 การเตรียมคอมพอสิตโคโคซานและมอนต์มอริลโลไนต์ (CS-MMT) เตรียมคอมพอสิตโคโคซาน-มอนต์มอริลโลไนต์ อัตราส่วน 2:1 โดยน้ำหนัก [11] โดยนำสารแขวนลอยมอนต์มอริลโลไนต์ที่เตรียมจากข้อ 2.2 ได้มาปั่นกวน 15 นาที ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ค่อย ๆ หยดสารละลายโคโคซานที่เตรียมได้จากข้อ 2.1 ลงในสารแขวนลอยมอนต์มอริลโลไนต์ ควบคุมอัตราการหยดประมาณ 50 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง

ควบคุมอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ปั่นกวนอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 4 ชั่วโมง [10] จากนั้นนำไปใช้ในขั้นตอนการเคลือบผ้าต่อไป

2.4 การเคลือบผ้าฝ้ายด้วยคอมพอลิติกไโตซานและมอนต์มอริลโลไนต์ โดยวิธีการแบบจุ่มเคลือบตัดผ้าขนาด 30 x 30 เซนติเมตร นำไปซักด้วยสารซักล้างชนิด Non-Ionic Surfactant ทำให้ผ้าแห้งโดยการผึ่งให้แห้ง ซึ่งน้ำหนักของผ้า แล้วนำผ้าฝ้ายจุ่มลงในสารแขวนลอยคอมพอลิติกไโตซานและมอนต์มอริลโลไนต์ที่ได้จากข้อ 2.1 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำผ้าไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ทำการเคลือบผ้าด้วยคอมพอลิติกไโตซานและมอนต์มอริลโลไนต์ โดยจำนวนรอบในการเคลือบ ได้แก่ 1 5 และ 10 รอบ [5], [12] จากนั้นชั่งน้ำหนักของผ้าที่เคลือบ นำผ้าที่เคลือบไปทำการทดสอบในขั้นตอนต่อไป

3. การทดสอบผ้าฝ้ายที่เคลือบด้วยคอมพอลิติกไโตซานและมอนต์มอริลโลไนต์

3.1 วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของผ้าฝ้ายเคลือบคอมพอลิติกไโตซานด้วยเทคนิค **Fourier-Transform Infrared Spectrometer (FT-IR)** ศึกษาโครงสร้างทางเคมีของผ้าฝ้ายเคลือบด้วยคอมพอลิติกไโตซานและมอนต์มอริลโลไนต์ ด้วยเครื่อง FT-IR ยี่ห้อ Bruker Tensor II

3.2 วิเคราะห์สัณฐานวิทยาของผ้าฝ้ายเคลือบด้วยคอมพอลิติกไโตซานด้วย **Scanning Electron Microscope (SEM)** วิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของผ้าฝ้ายที่เคลือบด้วยคอมพอลิติกไโตซานเทียบกับผ้าที่ไม่ผ่านการเคลือบ โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-6335F

3.3 การหาปริมาณคอมพอลิติกไโตซานที่เคลือบอยู่บนผ้าฝ้าย (% **add-on**) การหาปริมาณของคอมพอลิติกไโตซานที่เคลือบบนผ้าฝ้าย หลังจากการเคลือบด้วยจำนวนรอบที่แตกต่างกัน โดยการชั่งน้ำหนักของผ้าทั้งก่อนและหลังตกแต่งสำเร็จ แล้วนำไปคำนวณหาร้อยละของน้ำหนักคอมพอลิติกไโตซานที่เคลือบอยู่บนผ้าฝ้าย (% **add-on**) ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (1) [13]

$$\% \text{ add-on} = (W_1 - W) / W \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ

W หมายถึง น้ำหนักของผ้าที่ยังไม่ผ่านการเคลือบ (กรัม)

W_1 หมายถึง น้ำหนักของผ้าที่เคลือบผ้าด้วยคอมพอลิติกไโตซานและมอนต์มอริลโลไนต์ตามจำนวนรอบ (กรัม)

4. การทดสอบการต้านแบคทีเรียของผ้า (**Antibacterial Activity**)

การทดสอบการต้านแบคทีเรียของผ้า ทดสอบตามมาตรฐาน AATCC 100: 2004 (Antibacterial Finishing on Textile Materials) โดยทดสอบกับเชื้อแบคทีเรีย *Staphylococcus aureus* และ *Escherichia coli* [2], [14] ด้วยวิธี Spread Plate Technique แล้วนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 37±2 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง นับจำนวนโคโลนีของเชื้อแบคทีเรียบนจานอาหารวันเพาะเชื้อที่เวลาสัมผัสเท่ากับศูนย์คำนวณค่าร้อยละการลดลงของแบคทีเรีย (% **reduction**) ตามสมการที่ (2)

$$\% \text{ reduction} = (C - A) / C \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ

% reduction หมายถึง ร้อยละการลดลงของแบคทีเรีย

C หมายถึง จำนวนโคโลนีของแบคทีเรียที่นับได้จากขั้นทดสอบที่ไม่ผ่านการเคลือบด้วยคอมพอลิติกไโตซานซึ่งมีเวลาสัมผัสเชื้อเท่ากับศูนย์

A หมายถึง จำนวนโคโลนีของแบคทีเรียที่นับได้จากขั้นทดสอบที่ผ่านการเคลือบด้วยคอมพอลิติกไโตซานซึ่งบ่มเพาะเชื้อเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

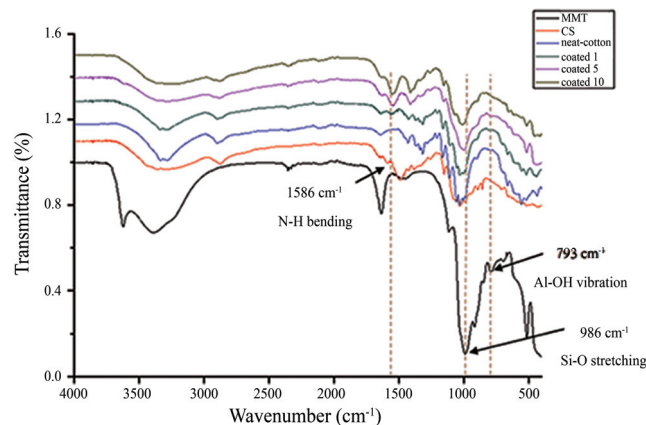
5. ทดสอบความคงทนของคอมพอลิเมอร์บนผ้าฝ้ายต่อการซัก

ทดสอบความคงทนของคอมพอลิเมอร์ที่ยึดติดบนผิวผ้าฝ้ายต่อการซัก ทดสอบตามมาตรฐาน ISO 105-C06:2010 (E) METHOD B1M ใส่ผ้าชิ้นทดสอบและลูกเหล็กจำนวน 50 ลูก ทำการซักที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที ล้างน้ำสะอาดเพื่อขจัดสารส่วนเกินออก นำไปตากแห้งที่อุณหภูมิห้อง จำนวนรอบในการซักที่ศึกษา ได้แก่ 5 10 และ 20 ครั้ง ตามลำดับ แล้วนำผ้าที่ผ่านการซักไปทดสอบการต้านแบคทีเรียของผ้า

ผลการวิจัย

1. การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FTIR)

จากรูปที่ 1 เมื่อนำโคโคซาน มอนต์มอริลโลไนต์ ผ้าฝ้าย และผ้าฝ้ายที่ผ่านการเคลือบด้วยคอมพอลิเมอร์ 1 5 10 รอบ ทำการวิเคราะห์ด้วย FTIR พบว่าสเปกตรัมของโคโคซานปรากฏพีคที่ตำแหน่ง 1,586 1,556 1,575 และ 1,629 cm^{-1} เป็นช่วงการสั่นของ N-H Bending ของหมู่อะมิโน และเอมีน ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันหลักของโคโคซาน สเปกตรัมของมอนต์มอริลโลไนต์ปรากฏพีคที่ตำแหน่ง 986 1,028 997 และ 1,016 cm^{-1} เป็นช่วงการสั่นของ Si-O Stretching และที่ตำแหน่ง 793 796 791 และ 794 cm^{-1} เป็นช่วงการสั่นของ Al-OH Vibration ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันหลักของมอนต์มอริลโลไนต์ และสเปกตรัมของผ้าฝ้ายที่ไม่ผ่านการเคลือบปรากฏพีคที่ตำแหน่ง 3,333 cm^{-1} เป็นช่วงการสั่นของ O-H Stretching ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันหลักของผ้าฝ้าย จากผลการวิเคราะห์ดังกล่าวสามารถยืนยันได้ว่า องค์ประกอบทางเคมีของคอมพอลิเมอร์บนเส้นใยผ้าฝ้ายเคลือบมีหมู่อะมิโนเป็นส่วนประกอบ ซึ่งเป็นคุณสมบัติของโคโคซาน และมีหมู่ Al-OH และ Si-O ซึ่งเป็นส่วนที่มาจากมอนต์มอริลโลไนต์ [3], [9], [11], [15]

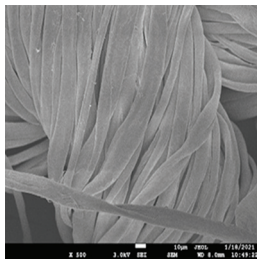


รูปที่ 1 FT-IR Spectra ของมอนต์มอริลโลไนต์ (MMT) โคโคซาน (CS) ผ้าฝ้ายที่ไม่ผ่านการเคลือบ (Neat-Cotton) และผ้าฝ้ายที่ผ่านการเคลือบด้วยคอมพอลิเมอร์ 1 รอบ (Coated 1) 5 รอบ (Coated 5) และ 10 รอบ (Coated 10)

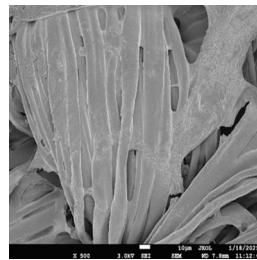
2. สันฐานวิทยาของผ้าฝ้ายเคลือบคอมพอลิเมอร์โคโคซานและมอนต์มอริลโลไนต์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Scanning Electron Microscope, SEM

รูปที่ 2(ก) แสดงให้เห็นถึงลักษณะของผ้าฝ้ายที่ไม่ผ่านการเคลือบ โดยมีลักษณะพื้นผิวที่เรียบเส้นใยบิดตามธรรมชาติ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผ้าฝ้ายที่ผ่านการเคลือบก่อนซัก รูปที่ 2(ข) และ (ค) จะปรากฏลักษณะของการติดของคอมพอลิเมอร์บนผ้าได้อย่างชัดเจนอยู่บริเวณผิวเส้นใยค่อนข้างหนา มีความขรุขระบนพื้นผิว อันเกิดจากคอมพอลิเมอร์เคลือบอยู่บนผิวเส้นใย และปริมาณความขรุขระจะเพิ่มขึ้น จากรูปที่ 2(ข) และ (ค) แสดงให้เห็นถึงลักษณะของผ้าฝ้ายที่ผ่านการเคลือบ 5 และ 10 รอบก่อนซัก จะปรากฏลักษณะของการติดของคอมพอลิเมอร์

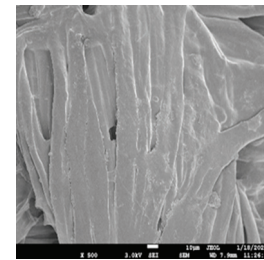
บนผ้าได้อย่างชัดเจนอยู่บริเวณผิวเส้นใยค่อนข้างหนา มีความขรุขระบนพื้นผิว และมีความหนาเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนรอบในการเคลือบเท่ากับ 10 รอบ ซึ่งสอดคล้องกับการคำนวณร้อยละของคอมพอลิเมอร์ที่เคลือบบนผ้าฝ้าย (% add-on) ที่มีค่าเพิ่มขึ้นตามจำนวนรอบในการเคลือบเพิ่มขึ้น เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผ้าฝ้ายที่ผ่านการเคลือบหลังซัก 5 10 และ 20 ครั้ง ดังรูปที่ 2(ง) - (ฉ) ตามลำดับ แสดงให้เห็นถึงการหลุดของสารเคลือบคอมพอลิเมอร์และการฉีกขาดของเส้นใย เนื่องมาจากการขัดถูระหว่างการซัก อย่างไรก็ตามยังคงมีปริมาณของคอมพอลิเมอร์เกาะติดอยู่บนผิวเส้นใย มีความขรุขระบนพื้นผิวแต่น้อยกว่าผ้าฝ้ายที่ผ่านการเคลือบก่อนซัก



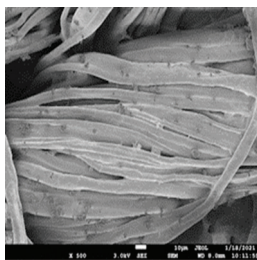
(ก) ผ้าฝ้ายที่ไม่ผ่านการเคลือบ



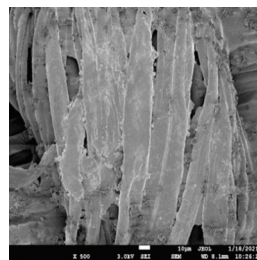
(ข) ผ้าฝ้ายที่ผ่านการเคลือบด้วยคอมพอลิเมอร์ 5 รอบ ก่อนซัก



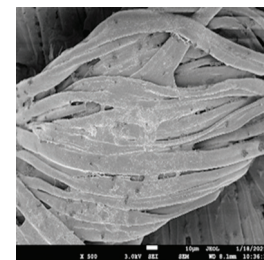
(ค) ผ้าฝ้ายที่ผ่านการเคลือบด้วยคอมพอลิเมอร์ 10 รอบ ก่อนซัก



(ง) ผ้าฝ้ายที่ผ่านการเคลือบด้วยคอมพอลิเมอร์ 5 รอบ หลังซัก 5 ครั้ง



(จ) ผ้าฝ้ายที่ผ่านการเคลือบด้วยคอมพอลิเมอร์ 5 รอบ หลังซัก 10 ครั้ง



(ฉ) ผ้าฝ้ายที่ผ่านการเคลือบด้วยคอมพอลิเมอร์ 5 รอบ หลังซัก 20 ครั้ง

รูปที่ 2 รูปถ่าย SEM (500x) ของผ้าฝ้ายที่ผ่านการเคลือบและไม่ผ่านการเคลือบ

3. การหาร้อยละของคอมพอลิเมอร์ที่เคลือบบนผ้าฝ้าย (% add-on)

ตารางที่ 1 ร้อยละของคอมพอลิเมอร์ที่เคลือบบนผ้าฝ้าย

ผ้าฝ้ายเคลือบคอมพอลิเมอร์	% add-on
เคลือบด้วยคอมพอลิเมอร์จำนวน 1 รอบ	17.50
เคลือบด้วยคอมพอลิเมอร์จำนวน 5 รอบ	43.87
เคลือบด้วยคอมพอลิเมอร์จำนวน 10 รอบ	79.02

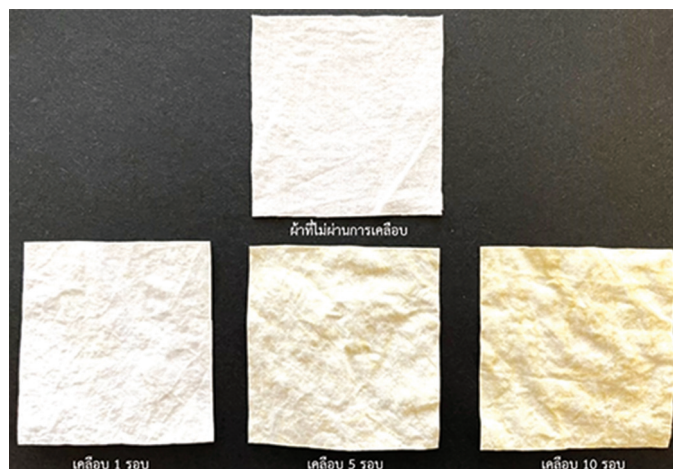
การคำนวณร้อยละของคอมพอลิเมอร์ที่เคลือบบนผ้าฝ้ายแสดงดังตารางที่ 1 พบว่ามีค่าร้อยละของน้ำหนักคอมพอลิเมอร์ (% add-on) เพิ่มขึ้นตามจำนวนรอบในการเคลือบที่แตกต่างกัน โดยการเคลือบด้วยคอมพอลิเมอร์จำนวน 1 รอบ มี % add-on เท่ากับ 17.50 การเคลือบด้วยคอมพอลิเมอร์จำนวน 5 รอบ มี % add-on เท่ากับ 43.87 และการเคลือบด้วยคอมพอลิเมอร์จำนวน 10 รอบ มี % add-on เท่ากับ 79.02

4. ผลการวัดสีผ้าฝ้ายเคลือบด้วยคอมพอลสิต โดยใช้ Colorimeter ระบบ CIE Lab Scale (L^* - a^* - b^*)

ตารางที่ 2 ค่าความเข้มสีของผ้าฝ้ายที่เคลือบด้วยคอมพอลสิต

ตัวอย่าง	L^*	a^*	b^*
ผ้าฝ้ายที่ไม่ผ่านเคลือบ	77.73	0.42	-1.18
ผ้าฝ้ายเคลือบด้วยคอมพอลสิตจำนวน 1 รอบ	76.20	-0.28	0.98
ผ้าฝ้ายเคลือบด้วยคอมพอลสิตจำนวน 5 รอบ	73.66	-1.74	10.76
ผ้าฝ้ายเคลือบด้วยคอมพอลสิตจำนวน 10 รอบ	70.41	-0.95	16.63

ผลการทดสอบความขาวของผ้าฝ้ายเคลือบคอมพอลสิต ดังตารางที่ 2 และรูปที่ 3 พบว่าผ้าฝ้ายที่ไม่ผ่านการเคลือบมีค่า L^* สูงสุด จึงมีค่าความขาวสูงที่สุด เมื่อเทียบกับผ้าฝ้ายที่ผ่านการเคลือบคอมพอลสิตจำนวน 1 5 และ 10 รอบ จะเห็นได้ชัดเจนว่าค่า L^* ลดลงตามจำนวนรอบในการเคลือบที่เพิ่มขึ้น ซึ่งหมายถึงผ้ามีความขาวลดลง นอกจากนั้นค่า a^* ของผ้าฝ้ายที่ผ่านการเคลือบคอมพอลสิตมีค่าติดลบ ซึ่งหมายถึงผ้ามีเจดสีออกไปทางโทนสีเขียวมากขึ้น และค่า b^* มีค่าบวก หมายถึงผ้ามีเจดสีออกไปทางโทนสีเหลืองมากขึ้น ดังนั้นผ้าฝ้ายที่ผ่านการเคลือบคอมพอลสิตจำนวนรอบเพิ่มขึ้น จะมีความขาวลดลงและมีความเหลืองมากขึ้น ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากปริมาณคอมพอลสิต เนื่องจากเมื่อโคโคซานถูกละลายด้วยกรด จะเป็นสารละลายที่มีสีเหลือง และเมื่อเคลือบบนผ้าฝ้ายด้วยจำนวนรอบที่เพิ่มขึ้น จึงทำให้ผ้าฝ้ายมีความเหลืองเพิ่มขึ้น [3], [5]



รูปที่ 3 รูปถ่ายของผ้าฝ้ายก่อนและหลังเคลือบด้วยคอมพอลสิตด้วยจำนวนรอบต่าง ๆ

5. การทดสอบประสิทธิภาพการต้านเชื้อแบคทีเรียของผ้าฝ้ายเคลือบคอมพอลสิต ก่อนซัก

ผลการทดสอบเพื่อประเมินประสิทธิภาพการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียบนผ้าฝ้ายที่ผ่านการเคลือบด้วยคอมพอลสิตก่อนซัก ด้วยวิธีวัดผลร้อยละการลดลงของจำนวนโคโลนีของเชื้อแบคทีเรียตามมาตรฐาน AATCC 100: 2004 โดยทดสอบกับเชื้อแบคทีเรียแกรมบวกคือ *S. aureus* และเชื้อแบคทีเรียแกรมลบคือ *E. coli* แสดงดังตารางที่ 3 จากผลการทดสอบพบว่า ผ้าฝ้ายที่เคลือบคอมพอลสิตจำนวน 5 และ 10 รอบ มีสมบัติในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียทั้งสองชนิด ประสิทธิภาพการต้านเชื้อแบคทีเรียของผ้าฝ้ายเคลือบคอมพอลสิตก่อนซัก พบว่าการเคลือบคอมพอลสิตจำนวน 5 และ 10 รอบ ให้ประสิทธิภาพการลดลงของแบคทีเรีย *E. coli* สูงถึงร้อยละ 95.5 และ 99.7 และสามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *S. aureus* ได้สูงถึงร้อยละ 99.7 และ 99.9 ที่เวลา 24 ชั่วโมง

ตารางที่ 3 ปริมาณของจุลินทรีย์ที่นับได้หลังจากสัมผัสกับผ้าที่เคลือบสารต้านจุลินทรีย์ที่เวลาเริ่มต้น (0 นาที) และเวลาสุดท้าย (24 ชั่วโมง)

ตัวอย่าง	ร้อยละการลดลงของแบคทีเรีย (% reduction)	
	<i>E.coli</i>	<i>S.aureus</i>
ผ้าฝ้ายที่ไม่ผ่านเคลือบ	0	0
ผ้าฝ้ายเคลือบด้วยคอมพอลิเมอร์จำนวน 1 รอบ	0	50
ผ้าฝ้ายเคลือบด้วยคอมพอลิเมอร์จำนวน 5 รอบ	95.5	99.7
ผ้าฝ้ายเคลือบด้วยคอมพอลิเมอร์จำนวน 10 รอบ	98.1	99.9

จากผลการทดลองการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียดังกล่าว ผ้าฝ้ายเคลือบคอมพอลิเมอร์ สามารถยับยั้งเชื้อ *E.Coli* ได้มีประสิทธิภาพดีกว่าเนื่องจาก *E.Coli* เป็นกลุ่มแบคทีเรียแกรมลบ จะมีผนังเซลล์ที่บางกว่ากลุ่มแบคทีเรียแกรมบวก ได้แก่ กลุ่มของแบคทีเรีย *S.aureus* ทำให้ผนังเซลล์ของ *E.Coli* จึงถูกทำลายได้ง่ายกว่าผนังเซลล์ถูกทำลายเกิดจากไคโตซานเกิดแรงไฟฟ้าระหว่างหมู่อะมิโนของไคโตซานที่เกิดโปรโตเนชันกลายเป็น $(-NH_3^+)$ ทำให้เกิดสภาพประจุบวกบนสายโซ่ จึงสามารถเกิดอันตรกิริยากับผนังเซลล์แบคทีเรียซึ่งประกอบด้วยไลพอพอลิแซคไครด์ และโปรตีนซึ่งมีขั้วลบ โดยทำให้เกิดความเสียหายต่อผนังเซลล์แบคทีเรีย ส่งผลให้เซลล์แบคทีเรียถูกยับยั้งและไม่สามารถเจริญได้ [5], [8], [14] โดยประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของผ้าฝ้ายเคลือบคอมพอลิเมอร์ 5 และ 10 รอบ มีประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียทั้ง 2 ชนิดใกล้เคียงกัน ดังนั้นในการทดสอบประสิทธิภาพการต้านเชื้อแบคทีเรียของผ้าฝ้ายเคลือบคอมพอลิเมอร์หลังจาก จึงนำผ้าเคลือบคอมพอลิเมอร์จำนวน 5 รอบไปศึกษาในขั้นตอนถัดไป

6. การทดสอบประสิทธิภาพการต้านเชื้อแบคทีเรียของผ้าฝ้ายเคลือบคอมพอลิเมอร์หลังจากซัก

ผลการทดสอบเพื่อประเมินประสิทธิภาพการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียบนผ้าฝ้ายที่เคลือบด้วยคอมพอลิเมอร์จำนวน 5 รอบ แล้วนำไปซักตามมาตรฐาน ISO 105-C06:2010 (E) METHOD B1M ด้วยจำนวนครั้งในการซัก ได้แก่ 5 10 และ 20 ครั้ง ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ปริมาณของจุลินทรีย์ที่นับได้หลังจากสัมผัสกับผ้าที่เคลือบสารต้านจุลินทรีย์ที่เวลาเริ่มต้น (0 นาที) และเวลาสุดท้าย (24 ชั่วโมง)

ตัวอย่าง	ร้อยละการลดลงของแบคทีเรีย (% reduction)	
	<i>E.coli</i>	<i>S.aureus</i>
ผ้าฝ้ายที่ไม่ผ่านเคลือบ	0	0
ซัก 5 ครั้ง	28	35
ซัก 10 ครั้ง	0	13
ซัก 20 ครั้ง	0	2

จากการทดสอบประสิทธิภาพการต้านเชื้อแบคทีเรียของผ้าฝ้ายเคลือบคอมพอลิเมอร์หลังจากซัก พบว่าผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยคอมพอลิเมอร์หลังจาก ประสิทธิภาพในการต้านเชื้อแบคทีเรียมีค่าลดลง เนื่องจากผ้าฝ้ายที่ตกแต่งด้วยคอมพอลิเมอร์ไคโตซานและมอนต์มอริลโลไนต์ เมื่อนำไปผ่านกระบวนการซักจะมีผลทำให้สารเคลือบหลุดออกจากผ้าฝ้าย โดยฤทธิ์และกลไกการยับยั้งจุลินทรีย์ของไคโตซานตลอดจนอนุพันธ์และคอมพอลิเมอร์ของไคโตซาน พบว่า pH ที่เหมาะสมสำหรับการใช้ประโยชน์ของไคโตซานควรต่ำกว่าค่า pKa ของไคโตซาน (pH < 5.5) และกระบวนการซักจะมีการเติมสารซักล้างที่เป็นด่าง ซึ่งเป็นการปรับเปลี่ยนจากไคโตซานประจุบวก

(NH₃⁺) เป็นโคโตซานอิสระไม่มีประจุ (NH₂) ดังนั้นประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของโคโตซานจึงแปรผันตามการเกิดโปรโตเนชันของหมู่อะมิโน จึงทำให้โคโตซานไม่แสดงฤทธิ์ของสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย ประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของผ้าฝ้ายที่เคลือบคอมพอลิติกจึงมีค่าลดลง [2],[8]

บทสรุป

การเตรียมผ้าฝ้ายที่มีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย โดยวิธีการเคลือบวัสดุคอมพอลิติกโคโตซานและมอนต์-มอริลโลไนต์ โดยใช้อัตราส่วนโคโตซาน:มอนต์-มอริลโลไนต์ คือ 2:1 (โดยน้ำหนัก) วิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างทางเคมีของผ้าฝ้ายเคลือบคอมพอลิติก และสัณฐานวิทยาของผ้าฝ้ายเคลือบคอมพอลิติก แสดงให้เห็นว่าคอมพอลิติกสามารถยึดเกาะบนผ้าฝ้ายได้ดี และมีสมบัติยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผ้าฝ้ายเคลือบด้วยคอมพอลิติกจำนวน 5 และ 10 รอบ มีประสิทธิภาพการต้านการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียชนิด *E.coli* และ *S.aureus* ได้สูงถึงร้อยละ 95.5 - 99.7 เนื่องจากหมู่อะมิโนในโคโตซานที่สามารถทำลายผนังเซลล์แบคทีเรียได้ ผ้าฝ้ายที่เคลือบด้วยคอมพอลิติก จะมีความขาลดลง และมีความเหลืองเพิ่มขึ้นตามจำนวนรอบในการเคลือบเพิ่มขึ้น การศึกษาประสิทธิภาพการต้านเชื้อแบคทีเรียของผ้าฝ้ายเคลือบด้วยคอมพอลิติกจำนวน 5 รอบ หลังการซักพบว่าความสามารถในการต้านเชื้อแบคทีเรียมีค่าลดต่ำลง เมื่อจำนวนรอบการซักเพิ่มขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนสนับสนุนงานวิจัยจากมหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี งบประมาณรายได้ ประจำปี 2563

References

- [1] Fang, F., Chen, X., Zhang, X., Cheng, C., Xiao, D., Meng, Y., Ding, X., Zhang, H., and Tian, X. (2016). Environmentally Friendly Assembly Multilayer Coating for Flame Retardant and Antimicrobial Cotton Fabric. **Progress in Organic Coatings**. Vol. 90, pp. 258-266. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2015.09.025
- [2] Rajendran, R., Radhai, R., Balakumar, C., Hasabo A. M. A., Vigneswaran, C., and Vaideki, K. (2012). Synthesis and Characterization of Neem Chitosan Nanocomposites for Development of Antimicrobial Cotton Textiles. **Journal of Engineered Fibers and Fabrics**. Vol. 7, No. 1, pp. 136-141. DOI: 10.1177/155892501200700116
- [3] Bhuiyan, M. A. R., Islam, A., Islam, S., Hossain, A., and Nahar, K. (2017) Improving Dyeability and Antibacterial Activity of *Lawsonia inermis* L on Jute Fabrics by Chitosan Pretreatment. **Textiles and Clothing Sustainability**. Vol. 3, pp. 1-10. DOI: 10.1186/s40689-016-0023-4
- [4] Rehan, M., El-Naggara, M. E., Mashalyb, H. M., and Wilkenc, R. (2018). Nanocomposites Based on Chitosan/Silver/Clay for Durable Multi-Functional Properties of Cotton Fabrics. **Carbohydrate Polymers**. Vol. 182, pp. 29-41. DOI: 10.1016/j.carbpol.2017.11.007
- [5] Shirvan, A. R., Nejad, N. H., and Bashari, A. (2014). Antibacterial Finishing of Cotton Fabric Via the Chitosan/TPP Self-Assembled Nano Layers. **Fibers and Polymers**. Vol. 15, No. 9, pp. 1908-1914. DOI: 10.1007/s12221-014-1908-y

- [6] Lin, K. F., Hsu, C. Y., Huang, T. S., Chiu, W. Y., Lee, Y. H., and Young, T. H. (2005). A Novel Method to Prepare Chitosan/Montmorillonite Nanocomposites. **Journal of Applied Polymer Science**. Vol. 98, pp. 2042-2047
- [7] Rhim, J. W., Hong, S. I., Park, H. M., and Ng, P. K. W. (2006). Preparation and Characterization of Chitosan-Based Nanocomposite Films with Antimicrobial Activity. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. Vol. 54, pp. 5814-5822. DOI: 10.1021/jf060658h
- [8] Chaisrihwun, B., Rakkapao, N., Phatthiya, A., Pechwang, J., and Werapun, U. (2017). Anti-Microbial Activity and Mechanisms of Chitosan along with Chitosan Based Derivatives and Composites. **Srinakharinwirot Science Journal**. Vol. 33, No. 1, pp. 297-315 (in Thai)
- [9] Haerudin, H., Pramono, A. W., Kusuma, D. S., Jenie, A., Voelcker, N. H., and Gibson, C. (2010). Preparation and Characterization of Chitosan/Montmorillonite (MMT) Nanocomposite Systems. **International Journal of Technology**. Vol. 1, No. 1, pp. 65-73. DOI: 10.14716/ijtech.v1i1.33
- [10] Wiriya-soontorn, S. and Sriपालang, S. (2015). Preparation of Cassava Starch/Poly (vinyl alcohol)/ Montmorillonite Nanocomposites for Coating Controlled-Release Fertilizer. **KKU Science Journal**. Vol. 43, pp. 503-514 (in Thai)
- [11] Wang, S. F., Shen, L., Tong, Y. J., Chen, L., Phang, I. Y., Lim, P. Q., and Liu, T. X. (2005). Biopolymer Chitosan/Montmorillonite Nanocomposites: Preparation and Characterization. **Polymer Degradation and Stability**. Vol. 90, Issue 1, pp. 123-131. DOI: 10.1016/j.polymerdegradstab.2005.03.001
- [12] Kabiri, K., Mirzadeh, H., and Zohuriaan-Mehr, M. J. (2010). Chitosan Modified MMT-Poly(AMPS) Nanocomposite Hydrogel: Heating Effect on Swelling and Rheological Behavior. **Journal of Applied Polymer Science**. Vol. 116, Issue 5, pp. 2548-2556. DOI: 10.1002/app.31727
- [13] Kundu, C. K., Wang, W., Zhou, S., Wang, X., Sheng, H., Pan, Y., Song, L., and Hu, Y. (2017). A Green Approach to Constructing Multilayered Nanocoating for Flame Retardant Treatment of Polyamide 66 Fabric from Chitosan and Sodium Alginate. **Carbohydrate Polymers**. Vol. 166, pp. 131-138. DOI: 10.1016/j.carbpol.2017.02.084
- [14] Masae, M., Pitsuwan, P., Sriwang, T., Sukwisut, S., and Choopool, P. (2018). Hydrophobicity and Antibacterial Activity of Coated Cotton Fabrics With Chitosan, TiO₂ and SiO₂. **Srinakharinwirot University, Journal of Science and Technology**. Vol. 11, No. 21, pp. 165-178
- [15] Paluszkiwicz, C., Stodolak, E., Hasika, M., and Blazewicz, M. (2011) FT-IR Study of Montmorillonite-Chitosan Nanocomposite Materials. **Spectrochimica Acta Part A** **79**. pp. 784-788

การพัฒนาโฟมชีวภาพจากเส้นใยกาบกล้วยและแป้งมันสำปะหลัง (พันธุ์ 81) ที่เคลือบด้วยไฮดรอกซีเซลลูโลส สำหรับเป็นบรรจุภัณฑ์อาหาร

Development of Bio-foam from Banana Sheath and Cassava Starch (81 cultivar) with Natural Wax as Coating Agent for Food Packaging

ภาวิณี เทียมดี^{1*} สุพัตรา ชมจันทร์¹ และพรไพลิน พันธุ์สุมา¹
Pawinee Theamdee^{1*} Supattra Chomjan¹ and Pornprilin Pansuma¹

Received: December 8, 2021; Revised: March 17, 2022; Accepted: March 30, 2022

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพัฒนาโฟมชีวภาพจากเส้นใยกาบกล้วยและแป้งมันสำปะหลัง (พันธุ์ 81) ที่เคลือบด้วยไฮดรอกซีเซลลูโลส สำหรับเป็นบรรจุภัณฑ์อาหาร งานวิจัยนี้ได้ผลิตโฟมชีวภาพจากวัสดุธรรมชาติ ซึ่งได้เลือกใช้กาบกล้วยเป็นส่วนผสมหลักและใช้แป้งมันสำปะหลัง (พันธุ์ 81) เป็นตัวประสาน โดยเตรียมโฟมชีวภาพด้วยการละลายแป้งมันสำปะหลัง (พันธุ์ 81) ในน้ำให้มีความเข้มข้น 10% (w/v) ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 95 °C เป็นเวลา 20 นาที และผสมเส้นใยกาบกล้วย 350 กรัม โฟมชีวภาพถูกขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดขึ้นรูปร้อนที่อุณหภูมิ 100 °C และใช้เวลาในการอัด 30 วินาที นำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์นำโฟมชีวภาพที่ผ่านการขึ้นรูปแล้วทำการศึกษาการเคลือบด้วยไฮดรอกซีเซลลูโลส 3 ชนิด ได้แก่ ไซฟิ่ง ไซถั่วเหลือง และไซน้ำมันมะพร้าว (5 10 และ 15 กรัม) จากนั้นนำไปศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางกล ได้แก่ การดูดซึมน้ำ การดูดซับความชื้น การต้านทานน้ำมัน การทนความร้อน การต้านทานแรงกด การต้านทานแรงเฉาะ ศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาและการย่อยสลายของโฟมชีวภาพจากการศึกษา พบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมในการทำโฟมชีวภาพ คือ โฟมชีวภาพจากเส้นใยกาบกล้วยและแป้งมันสำปะหลัง (พันธุ์ 81) ที่เคลือบด้วยไซฟิ่ง 15 กรัม มีค่าร้อยละการดูดซับความชื้นและการดูดซึมน้ำต่ำมีค่าการต้านทานน้ำมัน แรงกด และแรงเฉาะสูง สำหรับการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา พบว่าโฟมชีวภาพมีผิวหน้าเรียบมากกว่าโฟมชีวภาพที่ไม่ได้เคลือบด้วยไฮดรอกซีเซลลูโลส ผลการทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังในดิน พบว่าโฟมชีวภาพสามารถย่อยสลายได้ร้อยละ 20 - 52 ในระยะเวลา 3 เดือน โฟมชีวภาพจากเส้นใยกาบกล้วยและแป้งมันสำปะหลัง (พันธุ์ 81) ที่เคลือบด้วยไฮดรอกซีเซลลูโลสสามารถย่อยสลายได้ ซึ่งช่วยลดปริมาณขยะได้อีกทางหนึ่ง อีกทั้งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการทดแทนวัสดุที่ย่อยสลายได้ยาก เช่น ถาดโฟมบรรจุอาหาร แผ่นโฟมรองของที่ระลึก และแผ่นโฟมรองแก้ว เป็นต้น

คำสำคัญ : โฟมชีวภาพ; กาบกล้วย; แป้งมันสำปะหลัง; ไฮดรอกซีเซลลูโลส; บรรจุภัณฑ์อาหาร

¹ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี

¹ Faculty of Science and Technology, Thepsatri Rajabhat University, Lopburi

* Corresponding Author, Tel. 08 6213 6336, E - mail: pawinee.t169@gmail.com

Abstract

This research aimed to develop bio-foam from banana sheath and cassava starch (81 cultivar) with natural waxes as coating agents for food packaging. This research proposed to produce food containers from banana sheath by using cassava starch (81 cultivar) as a binder. The bio-foam was prepared by dissolving the cassava starch (81 cultivar) in water with the concentration of 10 % (w/v) at 95 °C for 20 min and mixed with 350 g banana sheath. The bio-foam was formed in a mold by a hot compression process at 100 °C for 30 seconds. The bio-foam container was removed from the mold and coated with three types of natural wax, namely bee wax, soy wax, and coconut oil wax, in which the variation on wax content (5, 10 and 15 g) was also studied. The physical and mechanical properties; water absorption, moisture absorption, oil resistance, compression test, puncture strength, morphology analysis and the degradation of the bio-foam were evaluated. The results showed that the appropriate wax type and content for coating the bio-foam was 15 g of bee wax. The water absorption and moisture absorption decreased while the oil resistance, compression test and puncture strength increased compared with the control sample. Morphological analysis of the bio-foam coated with bee wax showed a smoother surface than the one without the coating. The degradation study of the bio-foam samples buried under the ground showed 20 - 52 % degradation in three months. Bio-foam containers from banana sheath and cassava starch (81 cultivar) coated with natural waxes was biodegradable which can help reduce the amount of waste and can be used as foam trays, souvenir packaging and foam coasters.

Keywords: Bio-Foam; Banana Sheath; Cassava Starch; Natural Wax; Food Packaging

บทนำ

โฟมพอลิโพรพิลีนเป็นบรรจุภัณฑ์พลาสติกที่มีการใช้งานเป็นจำนวนมาก เนื่องจากราคาถูก และน้ำหนักเบา แต่หลังจากการใช้งานโฟมพอลิโพรพิลีนเหล่านี้ไม่สามารถย่อยสลายได้และมีการปล่อยสารซึ่งเป็นสารพิษ ส่งผลให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมตามมา ด้วยเหตุนี้บรรจุภัณฑ์ที่ย่อยสลายได้ทางธรรมชาติ หรือโฟมชีวภาพ (Bio-foam) จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการนำมาใช้ทดแทนโฟมทางการค้าจากปิโตรเลียม โดยการใช้พอลิเมอร์ทางธรรมชาติ เช่น แป้ง ตัวอย่างเช่น แป้งมันสำปะหลัง [1] - [2] แป้งสาเก [3] แป้งข้าวโพด และแป้งมันฝรั่ง [4] เป็นต้น แต่โฟมที่ผลิตจากแป้งเพียงอย่างเดียว ทำให้สมบัติด้านความแข็งแรง การต้านทานน้ำดำ และแตกหักง่าย [5] จึงต้องมีการปรับปรุงคุณสมบัติของโฟมแป้ง โดยการผสมวัสดุจากธรรมชาติซึ่งมีอยู่หลากหลายชนิด ได้แก่ ไคโตซาน [6] หรือเส้นใยจากธรรมชาติ [7] เป็นต้น เพื่อช่วยพัฒนาคุณสมบัติโฟมชีวภาพให้เหมาะกับการใช้งานมากขึ้น เช่น การลดอัตราการดูดซับความชื้น รวมไปถึงปรับปรุงคุณสมบัติทางกลให้ดีขึ้น จากงานวิจัย [8] ได้ศึกษาการเตรียมโฟมชีวภาพจากแป้งมันสำปะหลังผสมเส้นใยธรรมชาติและไคโตซาน เมื่อทดสอบความต้านทานแรงดึง พบว่าการเพิ่มปริมาณของเส้นใยและไคโตซานที่มากขึ้น ทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงขึ้น แสดงให้เห็นว่าโฟมชีวภาพมีสมบัติทางกลใกล้เคียงกับโฟมทางการค้าพอลิโพรพิลีน เช่นเดียวกับงานวิจัย [9] ได้ศึกษาการทดสอบการย่อยสลายด้วยการฝังกลบในดิน พบว่าโฟมชีวภาพแป้งมันสำปะหลังผสมเส้นใยจากชานอ้อยสามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติร้อยละ 80 - 85 ในระยะเวลา 90 วัน อีกทั้งการเติมเส้นใยธรรมชาติช่วยปรับปรุงคุณสมบัติทางกล

ของโพลิเมอร์ชีวภาพได้อีกด้วย และจากงานวิจัย [10] ศึกษาการเตรียมโพลิเมอร์ชีวภาพจากแป้งมันสำปะหลังผสมเส้นใยจากผักตบชวาเคลือบด้วยไขผึ้ง พบว่าการเคลือบไขผึ้งช่วยปรับปรุงให้โพลิเมอร์ชีวภาพมีความสามารถในการละลายน้ำต่ำ ยังคงรูปร่างหลังจากแช่ลงในน้ำ และค่าความต้านทานการโค้งงอที่สูงกว่าโพลิเมอร์ชีวภาพที่ไม่ได้เคลือบด้วยไขผึ้ง จากข้อดีของการใช้พอลิเมอร์ธรรมชาติซึ่งมีความโดดเด่น เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมของโพลิเมอร์ชีวภาพ ด้วยเหตุนี้ ผู้วิจัยมุ่งศึกษาการผลิตโพลิเมอร์ชีวภาพจากวัสดุธรรมชาติ คือ เส้นใยจากกากกล้วย เนื่องจากกล้วยมีการปลูกกันทั่วไปในท้องถิ่น กล้วยใช้ประโยชน์ได้ทุกส่วนตั้งแต่ลำต้น ใบ และผล พบว่ากากกล้วยเป็นส่วนที่มีปริมาณเส้นใยอยู่มาก ลักษณะของเส้นใยจากกล้วยน้ำว้ามีลักษณะค่อนข้างเรียวยาว มีคุณสมบัติเหนียวและมีความแข็งแรงเป็นพิเศษ ช่วยสร้างความแข็งแรง ทนทาน และไม่สลายตัวเมื่ออยู่ในน้ำ [11] ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีของกากกล้วย ประกอบด้วยเซลลูโลสร้อยละ 31 และเฮมิเซลลูโลสร้อยละ 15 [12] จึงสนใจที่จะนำเส้นใยจากกากกล้วยเป็นวัสดุหลักในการผลิตโพลิเมอร์ชีวภาพ และใช้แป้งมันสำปะหลัง (พันธุ์ 81) เป็นตัวประสาน เนื่องจากเป็นพืชที่เพาะปลูกมากในตำบลโคกสำโรง จังหวัดลพบุรี มีส่วนประกอบของคาร์โบไฮเดรตสูง ทำให้วัสดุเข้ากันได้ดีและมีความเหนียวมากขึ้น โดยจากงานวิจัย [13] ได้ทำการพัฒนาบรรจุภัณฑ์จากเส้นใยเปลือกทุเรียนและใช้แป้งมันสำปะหลังซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวประสาน แต่เนื่องจากโพลิเมอร์ชีวภาพที่ได้นั้นอาจไม่ทนต่อการรั่วซึมของของเหลว จึงจำเป็นต้องเคลือบด้วยไฮดรอกซีลิกซ์ เพื่อสามารถใส่อาหารทิ้งไว้เป็นเวลานานขึ้นโดยไม่รั่วซึม คงรูปทรงเดิมไม่เสียหายในระหว่างการใช้งาน ผู้วิจัยจึงทำการศึกษาการเคลือบโพลิเมอร์ชีวภาพด้วยไฮดรอกซีลิกซ์ (Bees Wax) ไขถั่วเหลือง (Soy Wax) และไขน้ำมันมะพร้าว (Coconut Wax) ซึ่งเป็นวัสดุที่ได้จากธรรมชาติ เพื่อปรับปรุงให้โพลิเมอร์ชีวภาพที่ผลิตได้นั้นมีคุณสมบัติต้านการต้านทานน้ำ และลดการดูดซึมน้ำของโพลิเมอร์ชีวภาพ [14] - [16] และทำการขึ้นรูปโดยกระบวนการอัดขึ้นรูปด้วยความร้อน จากนั้นศึกษาคูสมบัติทางกายภาพ และทางกลของโพลิเมอร์ชีวภาพ ได้แก่ การดูดซึมน้ำ การดูดซับความชื้น การต้านทานน้ำ การทนความร้อน การต้านทานแรงกด การต้านทานแรงเฉาะ ศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานนิเวศ และศึกษาการย่อยสลายของโพลิเมอร์ชีวภาพ ซึ่งโพลิเมอร์ชีวภาพที่ได้จากงานวิจัยนี้เป็นแนวทางในการใช้วัสดุที่สามารถลดการก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม ทดแทนโพลิเมอร์ที่ผลิตจากพอลิเมอร์สังเคราะห์ อีกทั้งใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการพัฒนาการผลิตโพลิเมอร์ชีวภาพเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมต่อไป

ระเบียบวิธีวิจัย

1. การเตรียมแป้งจากหัวมันสำปะหลัง (พันธุ์ 81)

ดัดแปลงตามวิธี [17] โดยหัวมันสำปะหลัง (พันธุ์ 81) ได้รับความอนุเคราะห์จากเกษตรกร อำเภอโคกสำโรง จังหวัดลพบุรี นำหัวมันสำปะหลัง (พันธุ์ 81) ล้างทำความสะอาด ผ่าเอาเปลือกออก ทิ้งให้เป็นชิ้นเล็ก ๆ นำไปปั่นละเอียดกับน้ำ (อัตราหัวมันต่อน้ำเท่ากับ 1:2) เป็นเวลา 2 นาที ด้วยเครื่องปั่นผสมไฟฟ้า (Sharp, EM-ICE 2, ประเทศไทย) กรองผ่านผ้าขาวบางทิ้งไว้ให้แบ่งตกตะกอน จากนั้นเทส่วนของเหลวด้านบนออกแล้วล้างตะกอนแป้งด้วยไฮเดียมเมตาไบซัลไฟต์ (98-100.5%, Sigma-Aldrich) ร้อยละ 0.5 (อัตราส่วน 1:5 โดยน้ำหนัก) นาน 30 นาที นำไปปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) ที่ความเร็วรอบเท่ากับ 3,000 rpm เป็นเวลา 10 นาที ล้างด้วยน้ำกลั่น 2 รอบ แล้วนำแป้งที่ได้ไปอบด้วยตู้อบลมร้อน (Memmert, UN 110, ประเทศเยอรมัน) ที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง นำมาบดให้ละเอียดและร่อนผ่านตะแกรง บรรจุผงแป้งในภาชนะที่มีฝาปิด และเก็บรักษาในโถดูดความชื้นที่อุณหภูมิห้องเท่ากับ 28 ± 2 °C

2. การเตรียมเส้นใยจากกากกล้วย

ดัดแปลงตามวิธี [18] นำต้นกล้วยน้ำว้าที่ตัดผลออกแล้ว ได้รับความอนุเคราะห์จาก ตำบลบางขันหมาก อำเภอเมือง จังหวัดลพบุรี นำต้นกล้วยมาลอกกาบออก ล้างทำความสะอาด นำกากกล้วยที่แห้งเป็นชิ้นเล็ก ๆ จากนั้นเก็บใส่ในภาชนะที่มีฝาปิด เพื่อนำไปใช้ในขั้นต่อไป

3. การเตรียมตัวประสานหรือสารยึดเกาะ

ละลายแป้งมันสำปะหลัง (พันธุ์ 81) ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ในน้ำกลั่น ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 95 °C เป็นเวลา 20 นาที ต้มจนสารละลายแป้งสุกกลายเป็นสารละลายแป้งเปียกใส

4. การผสมอัตราส่วนเส้นใยจากกล้วยต่อตัวประสาน

ดัดแปลงตามวิธี [19] ชั่งน้ำหนักกล้วย 350 กรัม ปั่นผสมกับสารละลายแป้งเปียกใส จากนั้นนำเยื่อไปร่อนในน้ำ เพื่อให้เยื่อกระจายอย่างสม่ำเสมอ ขึ้นรูปบนเฟรมไม้ขนาด 20 x 30 เซนติเมตร ฝั่งขึ้นงานให้แห้งเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ลอกชิ้นงานออกจากตะแกรงด้วยความระมัดระวัง

5. การเคลือบไขมันธรรมชาติ ด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปด้วยความร้อน

ดัดแปลงตามวิธี [10] เตรียมสารเคลือบผิวธรรมชาติจากไขผึ้ง ไขถั่วเหลือง (บริษัท ท้างหุ้นส่วน จำกัด ชายนต์พิศ คอลซัพพลาย ประเทศไทย) และไขน้ำมันมะพร้าว (Naturel, บริษัท ลำสูง จำกัด, ประเทศไทย) ปริมาณอย่างละ 5 10 และ 15 กรัม จากนั้นเทลงไปบนชิ้นงาน นำไปอัดขึ้นรูปภาชนะโดยเครื่องขึ้นรูปด้วยความร้อน (ได้รับความอนุเคราะห์จากศูนย์เรียนรู้ปรัชญาเศรษฐกิจพอเพียง 9 ตามพ่อ บ้านบางขันหมากได้ อำเภอมือง จังหวัดลพบุรี) ที่อุณหภูมิ 100 °C ทำการอัดค้างไว้จับเวลาประมาณ 30 วินาที ดังรูปที่ 1 นำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ ภาชนะที่ผ่านการขึ้นรูปแล้วนำไปตากแดดที่อุณหภูมิ 30 - 38 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ก่อนนำไปทดสอบสมบัติต่าง ๆ



รูปที่ 1 การอัดขึ้นรูปด้วยความร้อนของการผลิตโฟมชีวภาพจากเส้นใยจากกล้วยและแป้งมันสำปะหลัง (พันธุ์ 81)

6. ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ และทางกลของโฟมชีวภาพจากเส้นใยจากกล้วยและแป้งมันสำปะหลัง (พันธุ์ 81) หลังเคลือบด้วยไขมันธรรมชาติ

การทดสอบสมบัติการดูดซับความชื้น (Moisture Absorption)

ดัดแปลงตามวิธี [20] โดยนำชิ้นงานขนาด 14 x 22 x 1.5 เซนติเมตร มาไล่ความชื้นด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105±2 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักชิ้นงานก่อนทดสอบ (W_0) จากนั้นนำชิ้นงานมาเก็บในโถที่มีสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 75±2 อุณหภูมิ 28±2 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำชิ้นงานมาชั่งน้ำหนักหลังการทดสอบ (W_1) โดยแต่ละตัวอย่างทำการทดสอบ 3 ซ้ำ บันทึกน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงของชิ้นงานทดสอบและคำนวณหาค่าร้อยละการดูดซับความชื้น ดังสมการที่ (1)

$$\text{ร้อยละการดูดซับความชื้น} = \frac{(W_1 - W_0)}{W_0} \times 100 \quad (1)$$

การทดสอบสมบัติการดูดซึมน้ำ (Water Absorption)

ดัดแปลงตามวิธี [21] โดยนำชิ้นงานขนาด 14 x 22 x 1.5 เซนติเมตร มาไล่ความชื้นด้วยตู้อบลมร้อน

ที่อุณหภูมิ 105 ± 2 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ซึ่งน้ำหนักชิ้นงานก่อนทดสอบ (W_i) นำโอเอซีสดัดให้มีขนาดเท่ากับมิติภายในของชิ้นงานขนาด นำโอเอซีสไปแช่น้ำให้อิ่มตัวเป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำโอเอซีสวางลงด้านในของภาชนะตัวอย่างเป็นเวลา 180 นาที นำชิ้นงานมาชั่งน้ำหนักหลังการทดสอบ (W_a) โดยแต่ละตัวอย่างทำการทดสอบ 3 ชิ้น บันทึกน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงของชิ้นงานทดสอบและคำนวณค่าร้อยละการดูดซึมน้ำ ดังสมการที่ (2) [22]

$$\text{ร้อยละการดูดซึมน้ำ} = \frac{(W_a - W_i)}{W_i} \times 100 \quad (2)$$

การทดสอบการต้านทานน้ำมัน (Oil Resistant)

ดัดแปลงตามวิธี [23] โดยนำชิ้นงานขนาด $14 \times 22 \times 1.5$ เซนติเมตร วางบนกระดาษขาวและนำทรายน้ำหนัก 2 กรัม วางบนชิ้นงาน จากนั้นหยดน้ำมันพืชลงไปบนกองทรายจนชุ่ม และสังเกตการณ์ซึมผ่านได้ของน้ำมันไปยังกระดาษขาว บันทึกเวลาที่น้ำมันซึมผ่านกระดาษขาวเป็นค่าในการต้านทานน้ำมันของโพลีเอทิลีน

การศึกษาคุณสมบัติทางกล การต้านทานแรงกด และการต้านทานแรงเจาะ (Compression Test and Puncture Strength)

วิเคราะห์โดยใช้เครื่อง Texture Analyser (Stable Microsystems, TA-XT2, ประเทศอังกฤษ) ทดสอบการต้านทานแรงกดใช้หัววัดแบบแผ่นแบน (Flat Plate Compression Test) [24] ส่วนทดสอบการต้านทานแรงเจาะใช้หัววัด HDP/CFS และ HDP/90 Heavy Duty Platform ดัดชิ้นงานให้มีขนาด 2.5×2.5 เซนติเมตร โดยแต่ละตัวอย่างทำการวิเคราะห์ 3 ชิ้น [25] - [26]

การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา (Morphology Analysis)

การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของชิ้นทดสอบจะตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงชนิดสเตอริโอ (Stereo Optical Microscope, model SZX16-DP21, ญี่ปุ่น) เพื่อศึกษาลักษณะพื้นผิวของชิ้นงาน โดยเตรียมชิ้นงานขนาด 2.5×2.5 cm ติดตั้งชิ้นงานบนแท่นวางชิ้นงานปรับกำลังขยายอยู่ในช่วง 100x

การทดสอบการทนความร้อน (Heat Resistance Analysis)

ดัดแปลงตามวิธี [27] เพื่อตรวจสอบในเชิงคุณภาพของโพลีเอทิลีนในด้านความต้านทานความร้อนที่มีแนวโน้มการเสีรูปร่างเนื่องจากความร้อน โดยนำชิ้นงานตัวอย่างมาอบด้วยเตาอบไมโครเวฟโดยใช้กำลังไฟฟ้า 700 วัตต์ เป็นเวลา 5 นาที เพื่อสังเกตลักษณะการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง และลักษณะการเสีรูปร่าง

ศึกษาอัตราการย่อยสลายของชิ้นงาน

นำชิ้นงานขนาด $14 \times 22 \times 1.5$ เซนติเมตร นำมาชั่งน้ำหนักชิ้นงานก่อนทดสอบ (A) จากนั้นนำไปฝังลงในดินร่วน โดยความชื้นเริ่มต้นของดินเท่ากับ 24 โดยน้ำหนัก บรรจุดินลงในถังเพาะชำขนาด $80 \times 48 \times 50$ เซนติเมตร และฝังชิ้นงานให้มีความลึกประมาณ 10 เซนติเมตร เป็นเวลา 3 เดือน ที่อุณหภูมิ 32 ± 2 °C โดยวางในที่ร่ม และไม่มีน้ำให้ น้ำหนักการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักชิ้นงาน (B) ชุดควบคุมที่ใช้คือ โพลีเอทิลีน (PS) บันทึกผลการทดลองและคำนวณการย่อยสลายของชิ้นงาน ดังสมการที่ (3) [28]

$$\text{ร้อยละการย่อยสลาย} = \frac{(A - B)}{A} \times 100 \quad (3)$$

7. การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม SPSS® version 12 (SPSS Inc., สหรัฐอเมริกา) และวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ผลการวิจัยและการอธิบายผล

1. ผลการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ และทางกลของโฟมชีวภาพจากเส้นใยกาบกล้วยและแป้งมันสำปะหลัง (พันธุ์ 81) หลังเคลือบด้วยไขมันธรรมชาติ

จากตารางที่ 1 แสดงผลการทดสอบการดูดซับความชื้นและการดูดซึมน้ำของโฟมชีวภาพจากเส้นใยกาบกล้วยและแป้งมันสำปะหลัง (พันธุ์ 81) หลังเคลือบไขมันธรรมชาติจากไขผึ้ง ไขถั่วเหลือง และไขน้ำมันมะพร้าว ปริมาณ 5 10 และ 15 กรัม ซึ่งเป็นสมบัติทางกายภาพที่สำคัญที่สุดสำหรับโฟมชีวภาพ ซึ่งภาชนะที่ดูค้ำน้ำน้อย แสดงว่ามีความต้านทานน้ำได้สูง ในทางตรงกันข้ามภาชนะที่ดูดซึมน้ำได้ดีอาจทำให้ภาชนะเกิดการเสีรูไปได้ พบว่าค่าการดูดซับความชื้น และค่าการดูดซึมน้ำมีค่าน้อยลงเมื่อปริมาณของสารเคลือบมากขึ้น จะเห็นได้ว่าการเคลือบด้วยไขผึ้งสามารถต้านทานการดูดซับความชื้น และต้านทานการดูดซึมน้ำได้ดีที่สุด รองลงมาคือเคลือบด้วยไขถั่วเหลือง และเคลือบด้วยไขน้ำมันมะพร้าว เนื่องจากไขผึ้งประกอบไปด้วย ไฮโดรคาร์บอนสายยาวที่ไม่ชอบน้ำสูง จึงทำให้ชิ้นงานมีความต้านทานน้ำมากขึ้น [29] มีประสิทธิภาพในการปรับปรุงการต้านทานความชื้นและต้านทานการดูดซึมน้ำ [14], [30] ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย [31] พบว่าโฟมชีวภาพจากแป้งมันสำปะหลังผสมเส้นใยเปลือกข้าวโพดและสารเติมแต่งไขผึ้ง ช่วยลดการดูดซึมน้ำและความชื้นได้ดีกว่าโฟมชีวภาพจากแป้งเพียงชนิดเดียว แต่มีค่าการดูดซับความชื้น (ร้อยละ 9.43) และค่าการดูดซึมน้ำ (ร้อยละ 15 - 20) มีค่าต่ำกว่าโฟมชีวภาพจากเส้นใยกาบกล้วยและแป้งมันสำปะหลัง (พันธุ์ 81) หลังเคลือบด้วยไขผึ้ง (ค่าการดูดซับความชื้นร้อยละ 3.68 และค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 7.43) และจากผลการศึกษาค่าการต้านทานน้ำมันของโฟมชีวภาพที่เคลือบด้วยไขมันธรรมชาติ พบว่าสามารถต้านทานการซึมของน้ำมันได้นานขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณของสารเคลือบไขมันธรรมชาติ โดยโฟมชีวภาพที่เคลือบด้วยไขผึ้งมีค่าการต้านทานน้ำมันนานที่สุด เนื่องจากไขผึ้งมีสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนที่ยาวกว่า เกิดการเคลือบกระจายทั่วชิ้นงาน ช่วยเติมเต็มช่องว่าง ทำให้พื้นผิวเรียบเนียนมากขึ้น จึงลดการแทรกซึมของน้ำและน้ำมันได้ดี สอดคล้องกับงานวิจัย [32] พบว่าชิ้นงานกระดาษที่เคลือบด้วยไขผึ้งสามารถต้านทานการซึมผ่านของน้ำมันได้มากกว่า 24 ชั่วโมง

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกายภาพของโฟมชีวภาพจากเส้นใยกาบกล้วยและแป้งมันสำปะหลัง (พันธุ์ 81) หลังเคลือบด้วยไขมันธรรมชาติ

ตัวอย่าง	การดูดซับความชื้น (%)	การดูดซึมน้ำ (%)	การต้านทานน้ำมัน (นาท)
350:10:5B	8.25±1.26 ^c	18.52±2.34 ^c	< 5
350:10:10B	7.45±1.13 ^d	13.39±2.56 ^d	90
350:10:15B	3.68±1.24 ^e	7.43±1.66 ^e	2,880
350:10:5S	9.14±1.56 ^c	20.38±2.15 ^c	< 5
350:10:10S	8.23±1.49 ^c	19.12±2.11 ^c	< 5
350:10:15S	6.24±1.38 ^d	13.94±1.93 ^d	1,740
350:10:5C	9.49±1.61 ^a	38.05±3.45 ^a	< 5
350:10:10C	6.82±1.70 ^a	35.04±2.86 ^a	< 5
350:10:15C	6.08±1.68 ^b	29.72±2.98 ^b	< 5

หมายเหตุ: B = เคลือบไขผึ้ง S = เคลือบไขถั่วเหลือง C = เคลือบไขน้ำมันมะพร้าว
ข้อมูลในตารางแสดงเป็นค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวนอนมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

จากการทดสอบค่าต้านทานแรงกดและค่าต้านทานแรงเฉาะของชิ้นงานดังตารางที่ 2 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณสารเคลือบจะทำให้ค่าความต้านทานแรงกดและค่าความต้านทานแรงเฉาะมีค่าเพิ่มขึ้น ($p \leq 0.05$) และการเคลือบด้วยไขผึ้งมีค่ามากที่สุด เนื่องจากการเคลือบด้วยไขผึ้งมีสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนที่ยาวกว่า เมื่อสารเคลือบแห้งยังทำหน้าที่ช่วยในการเป็นตัวประสานหรือเป็นสารเชื่อมระหว่างชั้นของชิ้นงานได้ จึงทำให้เมื่อเพิ่มปริมาณสารเคลือบส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงกดและค่าความต้านทานแรงเฉาะมากขึ้นตามลำดับ รองลงมาคือ การเคลือบด้วยไขถั่วเหลือง เนื่องจากขนาดสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนมีความยาวสั้นลงมา ค่าความต้านทานแรงกดและค่าความต้านทานแรงเฉาะจึงต่ำกว่าการเคลือบด้วยไขผึ้ง ส่วนชิ้นงานที่เคลือบด้วยไขน้ำมันมะพร้าว พบว่าค่าความต้านทานแรงกดและค่าความต้านทานแรงเฉาะน้อยที่สุด เนื่องจากการเคลือบไขน้ำมันมะพร้าวซึ่งมีสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนที่สั้นเกิดการแทรกซึมลงไปนในชิ้นงานทำให้ไปทำลายความแข็งแรงของชิ้นงานหรือตัวประสาน ซึ่งการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัย [29] - [30] ได้ศึกษาปริมาณสารเคลือบผิวจากไขผึ้ง พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณไขผึ้งมากขึ้นค่าความต้านทานแรงเฉาะ และค่าทนต่อแรงดึงขาดสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบสมบัติทางกลกับโพลีเอทิลีน พบว่าโพลีเอทิลีนจากเส้นใยจากกล้วยและแป้งมันสำปะหลัง (พันธุ์ 81) หลังเคลือบไฮดรอกซีมีสมบัติทางกลที่ต่ำกว่า [8]



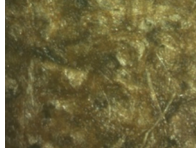
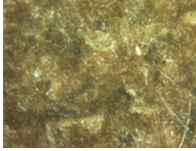
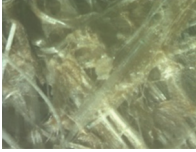

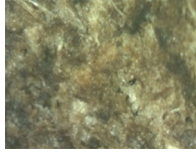
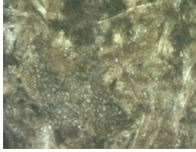
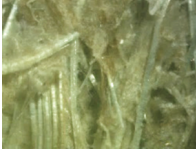



ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางกลของโพลีเอทิลีนจากเส้นใยจากกล้วยและแป้งมันสำปะหลังที่เคลือบด้วยไฮดรอกซี

ตัวอย่าง	ค่าความต้านทานแรงกด (นิวตันต่อตารางเมตร)	ค่าความต้านทานแรงเฉาะ (นิวตันต่อตารางเมตร)
350:10:5B	7.07±1.26 ^{bc}	10.06±1.15 ^{bc}
350:10:10B	12.44±1.51 ^a	12.07±1.47 ^{ab}
350:10:15B	13.53±1.65 ^a	13.58±0.94 ^a
350:10:5S	5.46±0.38 ^{cde}	8.41±1.98 ^{cd}
350:10:10S	6.76±0.38 ^{bcd}	9.47±0.51 ^c
350:10:15S	7.25±0.54 ^b	10.21±1.52 ^{bc}
350:10:5C	4.79±0.26 ^e	6.71±1.29 ^e
350:10:10C	5.21±0.12 ^{de}	7.79±0.25 ^{cd}
350:10:15C	6.07±0.23 ^{bcd}	9.44±1.33 ^c

หมายเหตุ: B = เคลือบไขผึ้ง S = เคลือบไขถั่วเหลือง C = เคลือบไขน้ำมันมะพร้าว
 ข้อมูลในตารางแสดงเป็นค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
 ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวนอนมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

โพลีเอทิลีนจากเส้นใยจากกล้วยและแป้งมันสำปะหลัง (พันธุ์ 81) หลังเคลือบด้วยไฮดรอกซี ทำการตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงชนิดสโคปออปติคัล ศึกษาลักษณะพื้นผิวของโพลีเอทิลีนที่เคลือบด้วยไฮดรอกซีดังตารางที่ 3 แสดงชิ้นงานก่อนเคลือบและหลังเคลือบด้วยไฮดรอกซี ได้แก่ ไขผึ้ง ไขถั่วเหลือง และไขน้ำมันมะพร้าว ปริมาณ 5 10 และ 15 กรัม พบว่าชิ้นงานก่อนการเคลือบด้วยไฮดรอกซีจะมีช่องว่างเป็นบางจุด ส่วนชิ้นงานที่เคลือบด้วยไฮดรอกซีปริมาณมากขึ้น ทำให้สารเคลือบกระจายอยู่ทั่วชิ้นงานได้ดีกว่า พื้นผิวเรียบเนียน เกิดการเติมเต็มช่องว่างมากขึ้นกว่าชิ้นงานที่เคลือบด้วยไฮดรอกซีที่ปริมาณต่ำกว่ามีส่วนช่วยทำให้ชิ้นงานมีค่าความต้านทานแรงกดและค่าความต้านทานแรงเฉาะได้สูงขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัย [35] ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของโพลีเอทิลีนจากแป้งมันสำปะหลังผสมเส้นใยจากชานอ้อยและเติมน้ำมันเป็นสารเติมแต่ง พบว่าเมื่อปริมาณสารเติมแต่งมากขึ้น ช่วยอุดช่องว่าง ลดรอยแตก ทำให้พื้นผิวเรียบเนียนกว่าปริมาณสารเติมแต่งที่น้อย

ตารางที่ 3 ภาพทางสัณฐานวิทยาของโฟมชีวภาพจากเส้นใยจากกล้วยและแป้งมันสำปะหลังที่เคลือบด้วยไขมันธรรมชาติ

ตัวอย่าง	ก่อนเคลือบ	ปริมาณสารเคลือบ (กรัม)		
		5	10	15
350:10:B				
350:10:S				
350:10:C				

































หมายเหตุ: B = เคลือบไขผึ้ง S = เคลือบไขถั่วเหลือง C = เคลือบไขน้ำมันมะพร้าว
ข้อมูลในตารางแสดงเป็นค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวนอนมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ผลการทดสอบการทนความร้อนของชิ้นงานโฟมชีวภาพจากเส้นใยจากกล้วยและแป้งมันสำปะหลัง (พันธุ์ 81) หลังเคลือบด้วยไขมันธรรมชาติ ได้แก่ ไขผึ้ง ไขถั่วเหลือง และไขน้ำมันมะพร้าว ปริมาณ 5 10 และ 15 กรัม ที่ผ่านการอบจากเตาไมโครเวฟที่กำลังไฟ 700 วัตต์ พบว่าเมื่อชิ้นงานผ่านการอบไมโครเวฟเป็นเวลา 1 - 3 นาที ชิ้นงานไม่มีการเปลี่ยนแปลงและมีความร้อนเกิดขึ้นบนชิ้นงาน แต่เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการอบด้วยไมโครเวฟเป็นเวลา 5 นาที พบว่าตรงกลางชิ้นงานเริ่มไหม้ เหนียว งอเล็กน้อย และชิ้นงานมีความร้อนมากขึ้น เนื่องจากบริเวณที่มีคลื่นไมโครเวฟมากที่สุดคือ บริเวณตรงกลางของเตาอบไมโครเวฟ [33] อีกทั้งสารเคลือบเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนน้ำหนักโมเลกุลสูง มีจุดเดือดที่สูง จึงทำให้เส้นใยและสายโซ่โมเลกุลของแป้งเกิดการไหม้เกิดการเสียรูปได้ง่าย สอดคล้องกับงานวิจัย [27]

จากตารางที่ 4 แสดงการย่อยสลายโดยธรรมชาติของโฟมชีวภาพจากเส้นใยจากกล้วยและแป้งมันสำปะหลัง (พันธุ์ 81) หลังเคลือบด้วยไขมันธรรมชาติ นำชิ้นงานฝังในดินร่วนไม่มีการให้น้ำ (ความชื้นในดินร้อยละ 24) เป็นเวลา 3 เดือน พบว่าร้อยละการย่อยสลายอยู่ในช่วง 20 - 52 เมื่อเปรียบเทียบกับโฟมพอลิสไตรีน (ชุดควบคุม) ซึ่งไม่เกิดการย่อยสลาย แต่เมื่อเพิ่มปริมาณสารเคลือบไขมันมากขึ้นร้อยละการย่อยสลายมีค่าลดลง เนื่องจากการเคลือบปริมาณไขมันที่มากช่วยป้องกันการซึมผ่านของน้ำได้ดี เกิดการขัดขวางการทำงานของจุลินทรีย์ไม่สามารถเกิดการย่อยสลายได้ จึงทำให้ร้อยละการย่อยสลายลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย [34] ศึกษาอัตราการย่อยสลายของโฟมชีวภาพจากแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ผสมกับเส้นใยจากชานอ้อยร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของแป้งเติมสารเติมแตงน้ำมันออริกาน (ร้อยละ 0 - 8 โดยน้ำหนักของแป้ง) พบว่าร้อยละการย่อยสลายลดลงเมื่อปริมาณสารเติมแตงมากขึ้นจากร้อยละ 57.09 - 28.8 ในระยะเวลา 30 วัน จากผลการทดลองพบว่า โฟมชีวภาพเคลือบด้วยไขมันธรรมชาติ ค่าร้อยละการย่อยสลายมากที่สุด รองลงมาคือ ชิ้นงานที่เคลือบด้วยไขถั่วเหลือง และชิ้นงานที่เคลือบด้วยไขผึ้ง เนื่องจากสายโซ่โมเลกุลของไขมันธรรมชาติค่อนข้างสั้นกว่า

สารเคลือบชนิดอื่น จึงเกิดการย่อยสลายได้ดีกว่าอีกทั้งเส้นใยจากกากกล้วยและแป้งเป็นโมเลกุลชีวภาพสามารถย่อยสลายได้ง่ายจึงช่วยให้ชิ้นงานย่อยสลายได้ดียิ่งขึ้น [2]

ตารางที่ 4 การย่อยสลายของโฟมชีวภาพจากเส้นใยกากกล้วยและแป้งมันสำปะหลัง (พันธุ์ 81) หลังเคลือบด้วยไฮดรอกซิด

ตัวอย่าง	ลักษณะทางกายภาพ				% การย่อยสลาย
	ระยะเวลา (เดือน)				
	0	1	2	3	
ชุดควบคุม (PS)					0.00
350:10:5B					25.39
350:10:10B					21.71
350:10:15B					20.09
350:10:5S					42.17
350:10:10S					30.42
350:10:15S					27.32
350:10:5C					52.16

ตารางที่ 4 การย่อยสลายของโฟมชีวภาพจากเส้นใยจากกล้วยและแป้งมันสำปะหลัง (พันธุ์ 81) หลังเคลือบด้วยไขธรรมชาติ (ต่อ)

ตัวอย่าง	ลักษณะทางกายภาพ				% การย่อยสลาย
	ระยะเวลา (เดือน)				
	0	1	2	3	
350:10:10C					51.01
350:10:15C					42.14

จากผลการวิจัยโดยรวมของชิ้นงานแต่ละอัตราส่วนมีข้อดีข้อเด่นที่แตกต่างกันออกไป จากการศึกษาพบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมในการทำโฟมชีวภาพ คือ โฟมชีวภาพจากเส้นใยจากกล้วยและแป้งมันสำปะหลัง (พันธุ์ 81) ที่เคลือบด้วยไขฝั ง 15 กรัม โดยโฟมชีวภาพมีความเรียบสม่ำเสมอมีความสามารถในการทนแรงกดและแรงเจาะได้ดี มีการดูดซึมน้ำ การละลายน้ำต่ำ และมีการต้านทานน้ำมันได้ดีในระดับหนึ่งก่อนที่จะทิ้ง อีกทั้งยังสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพได้ จึงเหมาะสมสำหรับนำไปใช้ในการผลิตเป็นภาชนะโฟมชีวภาพ ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ตัวอย่างโฟมชีวภาพต้นแบบจากเส้นใยจากกล้วยและแป้งมันสำปะหลัง (พันธุ์ 81) ที่เคลือบด้วยไขฝั ง

สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นโฟมชีวภาพจากเส้นใยจากกล้วยและแป้งมันสำปะหลัง (พันธุ์ 81) ที่เคลือบด้วยไขธรรมชาติ จากการทดสอบสมบัติที่สำคัญของโฟมชีวภาพทั้งทางกายภาพ และทางกล พบว่าโฟมชีวภาพจากเส้นใยจากกล้วย น้ำหนัก 350 กรัม และแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ทำหน้าที่เป็นตัวประสานเคลือบด้วยไขฝั ง ปริมาณ 15 กรัม เป็นอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากโฟมชีวภาพใช้ครั้งเดียวแล้วทิ้งจะให้ความสำคัญมากไป ที่เรื่องการดูดซึมน้ำ เนื่องจากภาชนะที่ดีควรต้องต้านทานน้ำได้ในระดับหนึ่งก่อนที่จะทิ้ง และรองลงมาคือ ในการถือภาชนะที่ขอบด้านใดด้านหนึ่งเหมือนกับเป็นการเพิ่มแรงกดให้กับชิ้นงาน ซึ่งโฟมชีวภาพจากเส้นใยจากกล้วย และแป้งมันสำปะหลัง (พันธุ์ 81) เคลือบด้วยไขฝั ง 15 กรัม มีค่าร้อยละการดูดซับความชื้น และการดูดซึมน้ำที่ต่ำ และค่าการต้านทานน้ำมัน ค่าการต้านทานแรงกด และค่าต้านทานแรงเจาะมีค่าสูงกว่าเคลือบด้วยไขถั่วเหลือง และไขน้ำมันมะพร้าว เมื่อตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยา ลักษณะพื้นผิวของโฟมชีวภาพมีสารเคลือบ กระจายอยู่ทั่วชิ้นงาน เกิดการเติมเต็มช่องว่างพื้นผิวจึงเนียนขึ้นมากกว่าการเคลือบสารเคลือบที่ปริมาณต่ำกว่า

และจากการศึกษาอัตราการย่อยสลายโดยธรรมชาติพบว่าโฟมชีวภาพสามารถย่อยสลายได้ร้อยละ 20 - 52 ในระยะเวลา 3 เดือน เนื่องจากเส้นใยจากกากกล้วยและแป้งเป็นชีวโมเลกุลสามารถย่อยสลายได้ง่ายจึงช่วยให้ชิ้นงานย่อยสลายได้ดียิ่งขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับงบประมาณสนับสนุนการดำเนินงานวิจัยจากเครือข่ายการวิจัยภาคกลางตอนบนโครงการวิจัยและนวัตกรรมเพื่อถ่ายทอดเทคโนโลยีสู่ชุมชนฐานราก ประจำปีงบประมาณ 2563 และขอขอบคุณสาขาวิชาเคมี (ค.บ.) สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร และศูนย์วิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์สำหรับการทำวิจัยในครั้งนี้

References

- [1] Cabanillas, A., Julio, Nun~ez J., Cruz-Tirado, J. P., Vejarano, R., Tapia-Bla'cido, D. R., Arteaga, H., and Siche, R. (2019). Pineapple Shell Fiber as Reinforcement in Cassava Starch Foam Trays. **Polymers and Polymer Composites**. Vol. 27, No. 8, pp. 1-11. DOI: 10.1177/0967391119848187
- [2] Machado, C. M., Benelli, P., and Tessaro, I. C. (2020). Study of Interactions Between Cassava Starch and Peanut Skin on Biodegradable Foams. **International Journal of Biological Macromolecules**. Vol. 147, pp. 1343-1353. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2019.10.098
- [3] Hendrawati, N., Wibowo, A. A., Chrisnandari, R. D., and Adawiyah, R. (2021). Biodegradable Foam Tray based on Sago Starch with Beeswax as Coating Agent. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. Vol. 1073, pp. 1-7. DOI: 10.1088/1757-899X/1073/1/012006
- [4] Bergel, B. F., da Luz, L. M., and Santana, R. M. C. (2017). Comparative Study of the Influence of Chitosan as Coating of Thermoplastic Starch Foam from Potato, Cassava and Corn Starch. **Progress in Organic Coatings**. Vol. 106, pp. 27-32. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2017.02.010
- [5] Carr, L. G., Parra, D. F., Ponce, P., Lugao, A. B., and Buchler, P. M. (2006). Influence of Fibers on the Mechanical Properties of Cassava Starch Foams. **Journal of Environmental Polymer Degradation**. Vol. 14, pp. 179-183. DOI: 10.1007/s10924-006-0008-5
- [6] Mathias, J.-D., Tessier-Doyen, N., and Michaud, P. (2011). Development of a Chitosan-Based Biofoam: Application to the Processing of a Porous Ceramic Material. **International Journal of Molecular Sciences**. Vol. 12, Issue 2, pp. 1175-1186
- [7] Kaisangsri, N., Kerdchoechuen, O., and Laohakunjit, N. (2014). Characterization of Cassava Starch based Foam Blended with Plant Proteins, Kraft Fiber, and Palm Oil. **Carbohydrate Polymers**. Vol. 110, pp. 70-77. DOI: 10.1016/j.carbpol.2014.03.067
- [8] Kaisangsri, N., Kerdchoechuen, O., and Laohakunjit, N. (2012). Biodegradable Foam Tray from Cassava Starch Blended with Natural Fiber and Chitosan. **Industrial Crops and Products**. Vol. 37, pp. 542-546. DOI: 10.1016/j.indcrop.2011.07.034

- [9] Ana Elisa, S., Verdelheze, A. E. S., Oliveira, A. L. M., Rezende, M. I., Muller, C. M. O., Yamashita, F., and Mali, S. (2013). Physical Properties, Photo- and Bio-degradation of Baked Foams Based on Cassava Starch, Sugarcane Bagasse Fibers and Montmorillonite. **Journal of Polymers and the Environment**. Vol. 21, pp. 266-274
- [10] Chaireh, S., Ngasatool, P., and Kaewtatip, K. (2020). Novel Composite Foam Made from Starch and Water Hyacinth with Beeswax Coating for Food Packaging Applications. **International Journal of Biological Macromolecules**. Vol. 165, Part A, pp. 1382-1391. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2020.10.007
- [11] Ritthison, S., Rattanaudnusorn, S., and Lunprom, S. (2012). Biopulping from Banana Seudostem of Num-Wa by Trichoderma viride. **KKU Science Journal**. Vol. 40, No. 3, pp. 899-912 (in Thai)
- [12] Mukhopadhyay, S., Figueiro, R., Arpac, Y., and Sentrick, R. (2008). Banana Fibers-Variability and Fracture Behaviour. **Journal of Engineering Fibers and Fabrics**. Vol. 3, Issue 2, pp. 39-45
- [13] Ninlanon, W., Puttame, K., Sawasdikarn, J., Muisee, K., and Sriaklong, P. (2021). Development of Packaging from Durian Rind Fibers using Bleached and Unbleached Fibers. **Journal of Science and Technology Mahasarakham University**. Vol. 40, No. 6, pp. 422-429 (in Thai)
- [14] Monedero, F. M., Fabra, M. J., Talens, P., and Chiralt, A. (2009). Effect of Oleic Acid-beeswax Mixtures on Mechanical, Optical and Water Barrier Properties of Soy Protein Isolate Based Films. **Journal of Food Engineering**. Vol. 91, pp. 509-515. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2008.09.034
- [15] Qiu, T. Y., Lei, Z., Qiang, G. W., and Meng, G. (2012). Investigation of the Effects of Wax Additive on the Properties of Asphalt Binder. **Construction and Building Materials**. Vol. 36, pp. 578-584. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.06.024
- [16] Reis, M. O., Olivato, J. B., Bilck, A. P., Zanela, J., Grossmann, M. V. E., and Yamashita, F. (2018). Biodegradable Trays of Thermoplastic Starch/Poly (Lactic Acid) Coated with Beeswax. **Industrial Crops and Products**. Vol. 112, pp. 481-487. DOI: 10.1016/j.indcrop.2017.12.045
- [17] Theamdee, P., and Pansaeng, N. (2019). The Effect of Glycerol on the Properties of Biodegradable Cassava Starch (Saai Dieow Cultivar) Film for Plastic Plant Bag Application. **Naresuan University Journal Science and Technology**. Vol. 27, No. 4, pp. 27-38. DOI: 10.14456/nujst.2019.34
- [18] Luepong, K., Sasithorn, N., and Manarungwit, K. (2016). Kraft Paper Preparation from Water Hyacinth, Pineapple Leaves and Leaf Sheath of Banana Tree. **RMUTP Research Journal**. Vol. 11, No. 1, pp. 15-22 (in Thai)
- [19] Spada, J. C., Seibert, S. F., and Tessaro, I. C. (2021). Impact of PLA Poly (Lactic Acid) and PBAT Poly (butyleneadipate-co-terephthalate) Coating on the Properties of Composites with High Content of Rice Husk. **Journal of Polymers and the Environment**. Vol. 29, pp. 1324-1331. DOI: 10.1007/s10924-020-01957-8

- [20] Bergel, B. F., Dias Osorio, S., da Luz, L. M., and Santana, R. M. C. (2018). Effects of Hydrophobized Starches on Thermoplastic Starch Foams Made from Potato Starch. **Carbohydrate Polymers**. Vol. 200, pp. 106-114. DOI: 10.1016/j.carbpol.2018.07.047
- [21] Sanguansook, P. (2009). **Development of Molded-Pulp Pot Packaging from Palm Oil Sludge and Activated Sludge Cake for Plant Seedlings**. Master of Science. Packaging Technology, Department of Packaging Technology, Dissertation University of Kasetsart University
- [22] Pervaiz, M., Oakley, P., and Sain, M. (2014). Development of Novel Wax-enabled Thermoplastic Starch Blends and Their Morphological, Thermal and Environmental Properties. **International Journal of Composite Materials**. Vol. 4, No. 5, pp. 204-212. DOI: 10.5923/j.cmaterials.20140405.02
- [23] Sirilert, T. and Kitthaisong, W. (2011). Development of Chitosan Film Laminated with Paper material for Food Packaging forming. **Journal of Food Technology, Siam University**. Vol. 6, No. 1, pp. 55-63
- [24] Combrzyński, M., Wójtowicz, A., Mitrus, M., Oniszczyk, T., Matwijczuk, A., Pawelczyk, P., and Mościcki, L. (2019). Effect of Starch Type and Screw Speed on Mechanical Properties of Extrusion-cooked Starch-based Foams. **International Agrophysics**. Vol. 33, pp. 233-240. DOI: 10.31545/INTAGR/109517
- [25] Schmidt, V. C. R. and Laurindo, J. B. (2010). Characterization of Foams Obtained from Cassava Starch, Cellulose Fibres and Dolomitic Limestone by a Thermopressing Process. **Brazilian Archives of Biology and Technology**. Vol. 53, No. 1, pp. 185-192
- [26] Theamdee, P. and Sooksamran, K. (2020). Development of a Biodegradable Film from Jicama Starch (*Pachyrhizus erosus* (L.) Urbar) for Plant Bag Application. **RMUTP Research Journal Science & Technology**. Vol. 14, No. 1, pp. 1-14 (in Thai)
- [27] Denthet, S. and Na-Ayutthaya, S. (2014). An Analysis of the Efficiency of Development Package Food from the Rice Straw for Enhances Economical Cost. **The Journal of Applied Science**. Vol. 13, No. 1, pp. 14-29 (in Thai)
- [28] Nguyen, D. M., Do, T. V. V., Grillet, A. C., Thuc, H. H., and Thuc, C. N. H. (2016). Biodegradability of Polymer Film based on Low Density Polyethylene and Cassava Starch. **International Biodeterioration & Biodegradation**. Vol. 115, pp. 257-265. DOI: 10.1016/j.ibiod.2016.09.004
- [29] Yang, L. and Paulson, A. T. (2000). Effects of Lipids on Mechanical and Moisture Barrier Properties of Edible Gelatin Film. **Food Research International**. Vol. 33, pp. 571-578. DOI: 10.1016/S0963-9969(00)00093-4
- [30] Sothornvit, R. (2009). Effect of Hydroxypropyl Methylcellulose and Lipid on Mechanical Properties and Water Vapor Permeability of Coated Paper. **Food Research International**. Vol. 42, pp. 307-311 (in Thai)
- [31] Polat, S., Uslu, M.-K., Aygün, A., and Certel, M. (2013). The Effects of the Addition of Corn Husk Fibre, Kaolin and Beeswax on Cross-Linked Corn Starch Foam. **Journal of Food Engineering**. Vol. 116, Issue 2, pp. 267-276. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2012.12.017

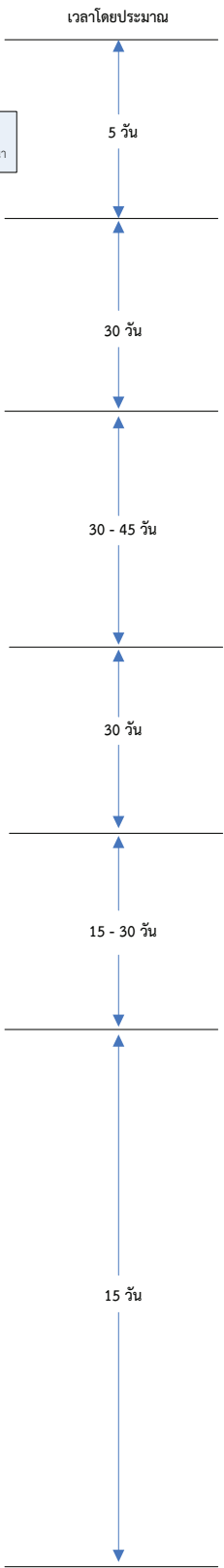
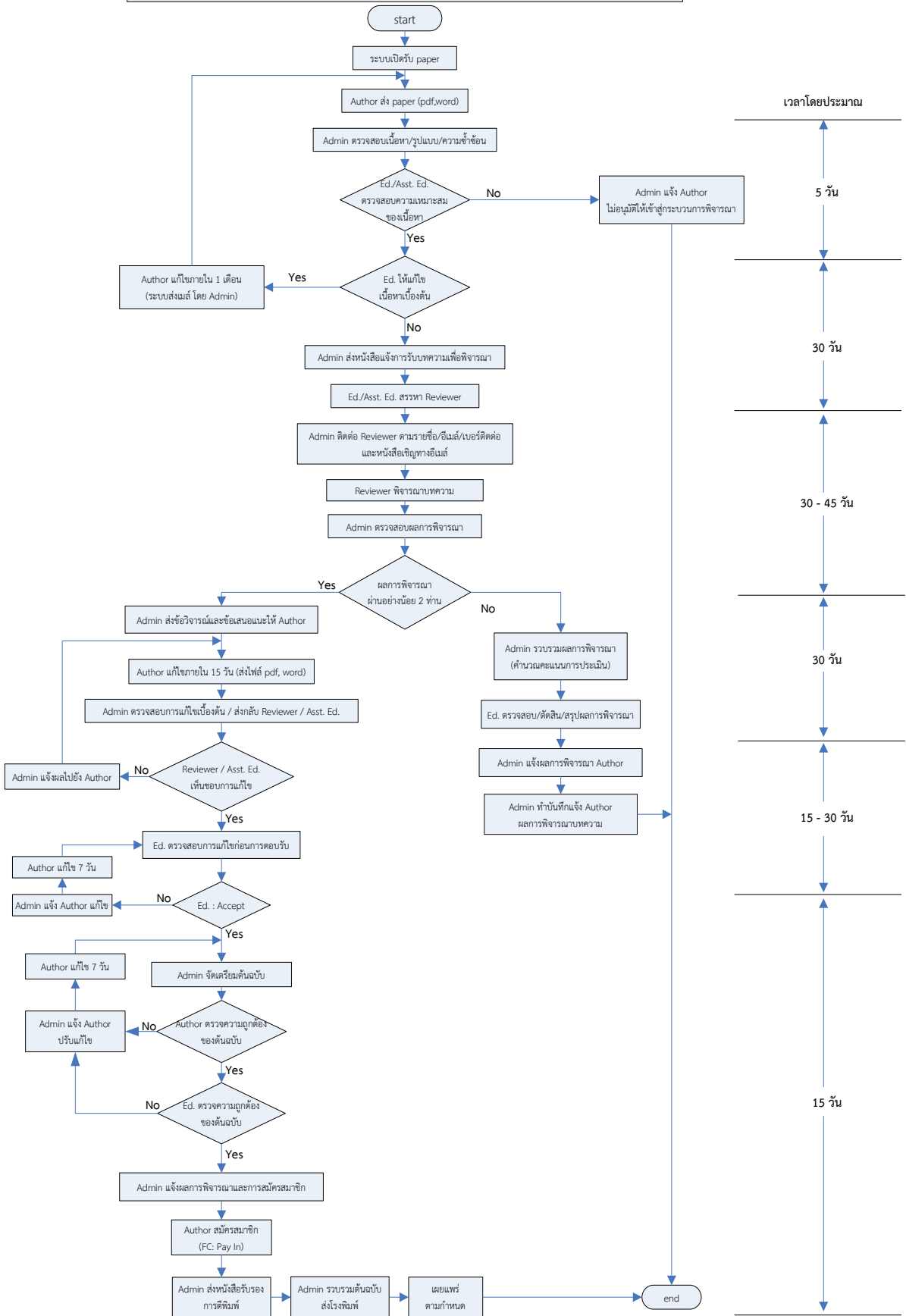
- [32] Zhang, W., Xiao, H., and Qian, L. (2014). Enhanced Water Vapor Barrier and Grease Resistance of Paper Bilayer-Coated with Chitosan and Beeswax. **Carbohydrate Polymers**. Vol. 101, pp. 401-406. DOI: 10.1016/j.carbpol.2013.09.097
- [33] Vadivambal, R. and Jayas, D. S. (2008). Non-uniform Temperature Distribution During Microwave Heating of Food Materials-A Review. **Food and Bioprocess Technology**. Vol. 3, No. 2, pp. 161-171. DOI: 10.1007/s11947-008-0136-0
- [34] Ketkaew, S., Kasemsiri, P., Hiziroglu, S., Mongkolthanaruk, W., Wannasutta, R., Pongsa, U., and Chindaprasirt, P. (2017). Effect of Oregano Essential Oil Content on Properties of Green Biocomposites based on Cassava Starch and Sugarcane Bagasse for Bioactive Packaging. **Journal Polymer Environment**. Vol. 26, pp. 311-318



คำแนะนำสำหรับผู้เขียน

RMUTI
ราชมงคลอีสาน

ผังการดำเนินงานวารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี



วารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
RMUTI JOURNAL Science and Technology

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 ชื่อความ “ตารางที่ x” ใช้ขนาดตัวอักษร 16 ตัวหนา วางด้านบนชิดซ้ายหน้ากระดาษ ตามด้วยชื่อตารางที่เป็นตัวอักษรขนาด 16 ไม่หนา

กรณีบทความภาษาอังกฤษ ข้อความ “Table x” ใช้ขนาดตัวอักษร 12 ตัวหนา วางด้านบน ซิดซ้ายหน้ากระดาษ ตามด้วยชื่อดารงที่เป็นตัวอักษรขนาด 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 จำนวนคำสำคัญที่กำหนดให้มีคำสำคัญได้ อย่างน้อย 3 คำ แต่ไม่เกิน 5 คำ

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

ข. ส่วนเนื้อหา

1. บทนำ (Introduction) เพื่ออธิบายถึงความสำคัญของปัญหา และวัตถุประสงค์ของการวิจัย รวมถึงการทบทวนวรรณกรรม และเอกสารที่เกี่ยวข้อง

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

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

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

5. บทสรุป (Conclusion) สรุปประเด็น และสาระสำคัญของการวิจัย

6. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgements) เพื่อแสดงความขอบคุณแก่ผู้ให้ความช่วยเหลือในการวิจัย อาจมีหรือไม่มีก็ได้

7. เอกสารอ้างอิง (References) เป็นรายการเอกสารที่ถูกอ้างไว้ในส่วนของเนื้อเรื่อง เพื่อใช้เป็นหลักในการค้นคว้าวิจัย จำนวนเอกสารที่นำมาอ้างอิงตอนท้ายต้องมีจำนวนตรงกับที่ถูกอ้างไว้ในส่วนของเนื้อเรื่อง 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 เพื่อให้สามารถเข้าใจได้เมื่อมีการจัดพิมพ์แบบขาว - ดำ
- 9) ขนาดของรูปต้องไม่ใหญ่เกินกว่าความกว้างของหน้ากระดาษที่กำหนดไว้
- 10) หากเป็นการคัดลอกรูปภาพมาจากที่อื่น ผู้เขียนควรมีการอ้างอิงแหล่งที่มาให้ถูกต้อง

6. รูปแบบการใส่ตารางในเนื้อหาบทความ

- 1) ชื่อตารางห้ามขึ้นต้นด้วยคำว่า “แสดง”
- 2) ตารางที่แสดงต้องมีคำอธิบายอยู่ในเนื้อหาบทความที่มีการระบุถึงตารางนั้น ๆ
- 3) คำอธิบายตาราง ให้เขียนไว้ด้านบนของตาราง โดยจัดคำอธิบายไว้ชิดขอบด้านซ้ายของหน้ากระดาษ และตารางอยู่กึ่งกลางหน้ากระดาษ ควรจัดเนื้อหาตารางให้อยู่บนหน้าเดียวกัน กรณีที่ตารางมีความยาวเกินหน้ากระดาษ ให้ใส่ชื่อตาราง “ตารางที่ x” ไว้ที่ด้านบนของตารางในหน้าแรก และใส่ชื่อตาราง “ตารางที่ x (ต่อ)” ไว้ที่ด้านบนของตารางในหน้าถัดไป
- 4) ขนาดของตารางต้องไม่ใหญ่เกินกว่าความกว้างของหน้ากระดาษที่กำหนดไว้
- 5) การเว้นระยะบรรทัด ก่อนชื่อตาราง ให้เว้น 1 บรรทัด และหลังสิ้นสุดตาราง ให้เว้น 1 บรรทัด
- 6) การกำหนดเส้นขอบตาราง ให้กำหนดเฉพาะเส้นด้านบน และด้านล่างของบรรทัด ดังตัวอย่าง

ตารางที่ 1 ตัวอย่างการนำเสนอตาราง

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

7. รูปแบบการใส่สมการในเนื้อหาบทความ

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

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

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

8. การดำเนินงานของกองบรรณาธิการ

- 1) บทความที่ส่งเข้าวารสาร ต้องส่งผ่านระบบออนไลน์ที่ <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/rmutijo/index> โดยดำเนินการสมัครสมาชิก และชำระค่าสมาชิกจำนวน 1,000 บาท ซึ่งจะมีอายุสมาชิก 1 ปี
- 2) บทความที่ถูกส่งเข้ามาในระบบ กองบรรณาธิการจะพิจารณาบทความเบื้องต้นเกี่ยวกับความถูกต้องของรูปแบบทั่วไป บทความที่ไม่ดำเนินการตามรูปแบบที่กำหนดจะไม่รับเข้าสู่กระบวนการพิจารณาโดยผู้ทรงคุณวุฒิ และจะส่งกลับเพื่อทำการแก้ไข ดังนั้น เพื่อให้เกิดความรวดเร็วในเข้าสู่กระบวนการพิจารณาผล ผู้เขียนควรดำเนินการจัดทำวารสารให้ถูกต้องตามรูปแบบที่กำหนดอย่างเคร่งครัด
- 3) เมื่อบทความผ่านการพิจารณาให้ตีพิมพ์ลงในวารสาร และผู้เขียนได้ดำเนินการจัดเตรียมเอกสารต่าง ๆ อย่างถูกต้อง ครบถ้วนตามข้อกำหนดของวารสารเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ผู้เขียนจะได้รับหนังสือรับรองการตีพิมพ์บทความเพื่อเป็นการยืนยัน
- 4) หากทางวารสารตรวจพบว่าบทความที่ถูกส่งเข้ามา มีการคัดลอก หรือเผยแพร่ในที่อื่น ๆ ก่อนหน้า หรือมีการดำเนินการใด ๆ อันเป็นการกระทำที่ผิดจรรยาบรรณของนักวิจัย ทางวารสารจะดำเนินการทำหนังสือแจ้งไปยังหน่วยงานต้นสังกัด และระงับการพิจารณาและรับบทความจากผู้เขียนบทความนั้นเป็นระยะเวลาอย่างน้อย 5 ปี



หมายเลขสมาชิก

.....
(สำหรับเจ้าหน้าที่)

แบบฟอร์มการส่งบทความ
วารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

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 (พร้อมค่านำหน้าชื่อ)

1.

2.

3.

4.

5.

ขอเสนอชื่อผู้ทรงคุณวุฒิที่มีความเชี่ยวชาญในสาขาที่เกี่ยวข้อง

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

คุณวุฒิ.....สาขาที่เกี่ยวข้อง.....

หน่วยงานที่สังกัด.....

ที่อยู่สำหรับส่งเอกสาร.....

หมายเลขโทรศัพท์.....Email.....

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

คุณวุฒิ.....สาขาที่เกี่ยวข้อง.....

หน่วยงานที่สังกัด.....

ที่อยู่สำหรับส่งเอกสาร.....

หมายเลขโทรศัพท์.....Email.....

หมายเหตุ

1. ผู้ทรงคุณวุฒิต้องมีตำแหน่งทางวิชาการ ระดับ ผศ. ขึ้นไป หรือจบการศึกษาระดับปริญญาเอก และต้องไม่สังกัดหน่วยงานเดียวกับผู้ประพันธ์

2. กองบรรณาธิการขอสงวนสิทธิ์ในการเป็นผู้พิจารณาคัดเลือกผู้ทรงคุณวุฒิเพื่อพิจารณาผลงานทางวิชาการ

3. เจ้าของบทความที่ผ่านการพิจารณาให้ตีพิมพ์ลงในวารสาร จะต้องสมัครสมาชิกวารสาร มทร.อีสาน อย่างน้อย 1 ปี เพื่อเป็นการยืนยันการตีพิมพ์บทความลงในวารสาร

ข้าพเจ้าได้รับทราบและยินดีปฏิบัติตามเงื่อนไขและข้อกำหนดต่าง ๆ ในแบบฟอร์มแนบท้าย ซึ่งมีรายละเอียดอยู่ใน “คำแนะนำผู้เขียน” ที่ทางกองบรรณาธิการ วารสาร มทร.อีสาน ได้กำหนดขึ้น และยินดีให้กองบรรณาธิการมีสิทธิ์ที่จะไม่รับพิจารณา หากไม่จัดรูปแบบตามที่กำหนด ยินยอมให้มีสิทธิ์ในการเลือกสรรหาผู้กลั่นกรองโดยอิสระเพื่อพิจารณาด้านฉบับที่ข้าพเจ้า (และผู้แต่งร่วม) ส่งมา ยินยอมให้กองบรรณาธิการสามารถตรวจแก้ไขต้นฉบับดังกล่าวได้ตามที่เห็นสมควร และข้าพเจ้า “ขอรับรองว่า บทความนี้ไม่เคยลงตีพิมพ์ในวารสารใดมาก่อน ไม่อยู่ระหว่างการพิจารณาจากวารสารอื่น และยินยอมว่าบทความที่ตีพิมพ์ลงในวารสารวิชาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ถือเป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน”

หากข้าพเจ้ามีความประสงค์ในการขอยกเลิกการพิจารณาบทความหลังจากวันที่ได้รับหนังสือยืนยันการรับบทความ ข้าพเจ้ายินดีรับผิดชอบค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานที่มหาวิทยาลัยฯ ดำเนินการตามกระบวนการของวารสาร มทร.อีสาน ตามที่จ่ายจริง

ลงชื่อ.....

(.....)



หนังสือรับรองการตีพิมพ์บทความ
วารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

ขอรับรองว่าบทความ.....

เรื่อง

โดย

ได้ผ่านการประเมินจากคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ
และตีพิมพ์ในวารสาร มทร.อีสาน
ปีที่..... ฉบับที่.....(..... พ.ศ.....)

(.....)
บรรณาธิการ วารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน



ใบสมัครสมาชิก
วารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

หมายเลขสมาชิก

.....
(สำหรับเจ้าหน้าที่)

วันที่สมัคร

ข้าพเจ้า (นาย/นาง/นางสาว).....

ที่อยู่

.....โทรศัพท์.....

ออกใบเสร็จในนาม ชื่อ

ที่อยู่.....

มีความประสงค์เป็นสมาชิก

วารสารวิชาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน (1 ปี มี 3 ฉบับ 1,000 บาท)

โดย สมัครเป็นสมาชิกใหม่ จำนวน ปี เริ่มตั้งแต่ปีที่ ฉบับที่

ต่ออายุสมาชิก จำนวน ปี เริ่มตั้งแต่ปีที่ ฉบับที่

พร้อมกันนี้ได้ส่งค่าสมาชิก จำนวน.....บาท

(ตัวอักษร).....

ซึ่งได้ชำระเงินผ่านทางบัญชีกองทุนสนับสนุนการวิจัย ธนาคารกรุงไทย สาขาม.เทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
ชื่อบัญชี “กองทุนสนับสนุนการวิจัย มทร.อีสาน” บัญชีออมทรัพย์ เลขที่ 980-9-74231-2

หมายเหตุ กรุณาส่งหลักฐานการจ่ายเงินและใบสมัครสมาชิกมายังสถาบันวิจัยและพัฒนาที่ E-mail : rmuti.journal@gmail.com
พร้อมเขียนชื่อ-นามสกุล ให้ชัดเจน การสมัครสมาชิกจะมีผลสมบูรณ์เมื่อทางวารสารได้มีการตรวจสอบเอกสารต่าง ๆ
อย่างถูกต้องแล้วเท่านั้น

ลงชื่อ.....ผู้สมัคร

(.....)



หนังสือยืนยันการถอนบทความ
วารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

ข้าพเจ้า (นาย/นาง/นางสาว).....

สังกัดหน่วยงาน

มีความประสงค์ขออนุญาตพิจารณาบทความเรื่อง.....

.....

.....

ที่ได้ส่งเข้ามายังวารสาร มทร.อีสาน เมื่อวันที่ และยินยอมรับผิดชอบ

ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการตามกระบวนการของวารสาร มทร.อีสาน เป็นจำนวนเงิน

(.....) โดยชำระเงินผ่านทางบัญชีกองทุนสนับสนุนการวิจัยธนาคารกรุงไทย

สาขาม.เทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา ชื่อบัญชี “กองทุนสนับสนุนการวิจัย มทร.อีสาน” บัญชีออมทรัพย์

เลขที่ 980-9-74231-2

หมายเหตุ กรุณาส่งหลักฐานการชำระเงินและหนังสือยืนยันการถอนบทความ มายังสถาบันวิจัยและพัฒนาที่ E-mail :

rmuti.journal@gmail.com พร้อมเขียนชื่อ-นามสกุล ให้ชัดเจน ข้อมูลการชำระเงินจะมีผลสมบูรณ์ เมื่อทางวารสาร

ได้มีการตรวจสอบเอกสารต่าง ๆ อย่างถูกต้องแล้วเท่านั้น

ลงชื่อ.....ผู้ถอนบทความ

(.....)



RMUTI

ราชภัฏนครราชสีมา



RMUTI JOURNAL

Science and Technology

Vol.15 No.1 January - April 2022



Institute of Research and Development

Rajamangala University of Technology Isan

744 Suranarai Road, Muang, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

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

E-mail : rmutijournal@gmail.com <http://ind.rmuti.ac.th/2015>