

สักทอง



GTSJ

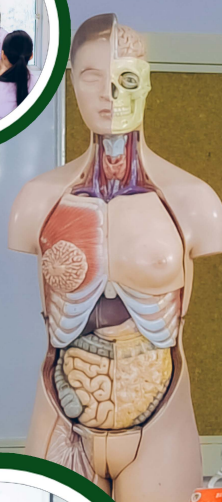
วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สทวท.)

The Golden Teak : Science and Technology Journal

ปีที่ 10 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม - ธันวาคม 2566

Vol.10 No.2 July - December 2023

ISSN 2985 - 2161 (Online)



สถาบัน

วิจัยและพัฒนา

มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร



สังกัด : วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สทวท.)

The Golden Teak : Science and Technology Journal (GTSJ.)

ปีที่ 10 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม-ธันวาคม 2566 Vol.10 No.2 July-December 2023

ISSN 2985-2161 (Online)

วัตถุประสงค์	เพื่อตีพิมพ์ผลงานวิจัย ผลงานสร้างสรรค์ และผลงานวิชาการ สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ได้แก่ ฟิสิกส์ เคมี ชีววิทยา คณิตศาสตร์ วิทยาการคอมพิวเตอร์ วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม วิทยาศาสตร์การอาหาร เทคโนโลยีการเกษตร วิทยาศาสตร์ประยุกต์และเทคโนโลยี สาธารณสุข เทคโนโลยีอุตสาหกรรม และอุตสาหกรรมศึกษา เผยแพร่แก่นักวิชาการและบุคคลทั่วไป	
ขอบเขต	จัดพิมพ์เสนอผลงานวิจัย ผลงานสร้างสรรค์ และผลงานวิชาการ ในสาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ	
เจ้าของ	มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร	
ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปรียานุช พรหมภาสิต รองศาสตราจารย์ ดร.ระมัต โขชัย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชญาดา กลิ่นจันทร์	รักษาราชการแทนอธิการบดี มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร
บรรณาธิการ	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฉัฒมิษา ตันตีสันติสม	มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร
ผู้ช่วยบรรณาธิการ	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เสาวลักษณ์ ยอดวิญญูวงศ์	มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร
กองบรรณาธิการ	Professor Dr.Shong Huang ศาสตราจารย์ ดร.เกษม จันทร์แก้ว ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญา ศาสตราจารย์ ดร.พานิช วุฒิพุกษ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ชนศักดิ์ ป้ายเที่ยง	National Taiwan Normal University มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ

รองศาสตราจารย์ ดร.ชिरาฎมิ เพชรเย็น	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.สมพร ไชยยะ	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร.วิลาศ พุ่มพิมล	มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิยะวรรณ ศุภวิทิตพัฒนา	มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม
รองศาสตราจารย์ วชิระ สิงห์คง	มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ขวัญดาว แจ่มแจ่ม	มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร
รองศาสตราจารย์ ดร.นิรุทธิ์ พิพรรณจินดา	มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ แคนชัย เครื่องเงิน	มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ มนูญ บุลย์ประมุข	มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วันวิสา รักพ่วง	มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วสุนธรา รตโนภาส	มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร
อาจารย์ ดร.สุรเชษฐ์ ตุ่มมี	มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร

ฝ่ายจัดการ

รองศาสตราจารย์ ดร.สุณี บุญพิทักษ์
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประจักษ์ ก๊กก้อง
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปาริชาติ เตชะ
 อาจารย์ประภัสสรฯ ท่อทอง
 นายทวิช ปิ่นวิเศษ
 นางสาวมาริสฯ การะเวก

ผู้จัดทำและเผยแพร่ สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร

กำหนดออก ปีละ 2 ฉบับ

ฉบับที่ 1 เดือน มกราคม-มิถุนายน

ฉบับที่ 2 เดือน กรกฎาคม-ธันวาคม

สำนักงาน สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร

ตำบลนครชุม อำเภอเมือง จังหวัดกำแพงเพชร 62000

โทรศัพท์ 0-5570-6555 ต่อ 1760

http://research.kpru.ac.th/journal_science/

บทความที่ตีพิมพ์ทุกบทความผ่านการพิจารณาจากผู้ทรงคุณวุฒิและบทความหรือข้อคิดเห็นใดๆ
 ที่ปรากฏในวารสารเป็นวรรณกรรมของผู้เขียนโดยเฉพาะ มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชรและ
 บรรณาธิการไม่จำเป็นต้องเห็นด้วย

บรรณาธิการแถลง

วารสารสักทอง : วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ในฉบับนี้ นำเสนอบทความวิจัยที่ครอบคลุมประเด็นหลากหลาย ไม่ว่าจะเป็นด้านชีววิทยา เช่น การคัดเลือกแบคทีเรีย ผลของแป้งข้าวตัดแปลง ด้านสิ่งแวดล้อม เช่น การศึกษาคุณภาพน้ำ การขึ้นรูปภาชนะจากเศษอ้อย ด้านพลังงานทดแทน เช่น การเตรียมสารสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ การศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้พลังงานทดแทน ด้านวัสดุศาสตร์ เช่น ลักษณะเฉพาะของผ้าไม่ทอ-เส้นใยผสม ลักษณะเฉพาะของหมึกนาโน รวมไปถึงด้านเทคโนโลยีสารสนเทศ เช่น ระบบตรวจสอบครุภัณฑ์ เป็นต้น

กองบรรณาธิการ หวังเป็นอย่างยิ่งว่า บทความที่เกิดจากความพากเพียรของนักวิจัยเหล่านี้ จะเป็นประโยชน์ต่อผู้อ่าน และสร้างแรงบันดาลใจในการพัฒนางานวิจัยของประเทศต่อไป

บรรณาธิการ

สัปดาห์ : วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สทวส.)

The Golden Teak : Science and Technology Journal (GTSJ.)

ปีที่ 10 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม-ธันวาคม 2566 Vol.10 No.2 July-December 2023

ISSN 2985-2161 (Online)

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
○ บรรณาธิการแถลง.....	ก
○ บทความวิจัย	
การคัดเลือกแบคทีเรียกรดแลคติกที่สร้างแบคเทอริโอซินจากไส้กรอกอีสานเพื่อยับยั้ง สุดสายชล หอมทอง และศศิวิมล ภูซันชัย Staphylococcus aureus Bacilus cereus และ Escherichia coli Selection of Bacteriocin-Producing Lactic Acid Bacteria from Thai Sausages for Inhibition of Staphylococcus aureus, Bacilus cereus and Escherichia coli Sudsachon Homthong and Sasiwimol Pukhunsai.....	1
การพัฒนาเครื่องขึ้นรูปภาชนะจากเศษอ้อยที่ควบคุมการทำงานด้วยระบบพีแอลซี นัฐพงษ์ ทองปาน, ลัดดาวัลย์ จำปา, นันทวัน หัตถมาศ, มลฤดี โอปมาวุฒิกุล, กัญญา ภัทรกุลอมร และ พรอารีย์ ศิริผลกุล The Development of a Container Molding Machine from Sugarcane Residue Controlled by a PLC System Natthapong Thongpan, Laddawan Champa, Nanthawan Hadthamard, Monluedee Opamawutthikul, Kanya Phattakunamon and Pornarree Siriphollakul.....	14
การเตรียมสารไอออนผสมเพอรอฟสไกต์เพื่อใช้เป็นชั้นดูดกลืนแสงในเซลล์แสงอาทิตย์ พรณพัฒน์ แพงสาย และพรณวัฒน์ แพงสาย Preparation of Mixed-Cation-Halide Perovskite as Light Absorber Layer in Photovoltaic Cells Pornapat Pang sai and Pornawat Pang sai.....	36

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง

หน้า

การศึกษาความเป็นไปได้การใช้พลังงานทดแทนด้วยระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคา อาคารเรียน 7 วิทยาลัยเทคนิคกำแพงเพชร ณัฐดนัย เรือนคำ, คมกริช กลิ่นศรีสุข และเทอดพล เพชรจันทร์ A Feasibility Study of Using Renewable Energy with Solar Cells Installed on the Roof of Building 7, Kamphaeng Phet Technical College Nuthdanai Rueankham, Komkrit Klinsresuk and Terdpon Phetchan.....	54
การพัฒนาระบบตรวจสอบครุภัณฑ์ สำนักงานส่งเสริมวิชาการและงานทะเบียน มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร จิรศักดิ์ สิงห์บุตร, จินดาพร อ่อนเกต, คมกริช กลิ่นอาจ และน้ำพัก ข่ายทอง The Development of Durable Article Verification System : Case Study on the Office of Academic Promotion and Registration, Kamphaengphet Rajabhat University Jirasak Singhabutr, Jindaporn Ongate, Komkrit Klinart and Namphak Khaithong.....	80
การศึกษาคุณภาพน้ำจากการใช้ประโยชน์ที่ดินในพื้นที่ชุ่มน้ำบึงโขงหลง จังหวัดบึงกาฬ ชนิษฐา ธรรมโรจน์ และสุนันทา เลาวัฒนศิริ A Study on Water Quality from Land Uses in Bueng Khong Long Wetland, Bueng Kan Province Khnittha Thammaroj and Sunantha Laowansiri.....	95
การเตรียมและการหาลักษณะเฉพาะของผ้าไม่ทอจากพอลิแลคติกแอซิดและ พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ด้วยกระบวนการเมลต์โบลว์น ธัญญา ชลปรีชา, พัชรี ประทุมพงษ์, หยาดนภา ผาเจริญ, นที ศรีสวัสดิ์, นรจรพร เรื่องไพศาล, สุรเชษฐ์ คุ้มมี และชिरาวุฒิ เพชรเย็น Preparation and Characterization of Nonwovens from Poly (Lactic Acid) and Poly (Butylene Succinate) by Melt blown Process Thananya Cholprecha, Patcharee Pratumpong, Yardnapar Parcharoen, Natee Srisawat, Nanjaporn Roungpaisan, Surachet Toommee and Chiravoot Pechyen.....	115

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง

หน้า

การพัฒนาลักษณะเฉพาะของหมึกนาโนจากซิลิคอนคาร์ไบด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์/ อนุภาคนาโนเงินสังเคราะห์ สำหรับตรวจวัดสารฆ่าแมลง วิชาญา ศิริโสสม, สุรเชษฐ์ ตุ่มมี, สมยศ คงคาร์ตัน และชिरาวุฒิ เพชรเย็น Development of Composite with Synthesized Silver Nanoparticles for Pesticide Residuals Detection Wichaya Sirisom, Surachet Toomsee, Somyote Kongkarat and Chiravoot Pechyen.....	136
การเตรียมและศึกษาลักษณะเฉพาะของเส้นใยผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ด้วยกระบวนการเมลต์โบลน อารีรัตน์ มากมี, เบญจมาภรณ์ ตั้งนรวิษณุ, หยาดนภา ผาเจริญ, นรจพร เรืองไพศาล, ชिरาวุฒิ เพชรเย็น และ สุรเชษฐ์ ตุ่มมี Preparation and Characterization of Poly (lactic acid) and Poly (butylene succinate) Blend Fibers by Melt-Blown Areerut Magmae, Benchamaporn Tangnorawich, Yardnapar Parcharoen, Nanjaporn Rongpaisan, Chiravoot Pechyen and Surachet Toomsee.....	154
ผลของแป้งข้าวตัดแปลงต่อการเจริญของ <i>Lacticaseibacillus paracasei</i> ที่แยกมาจาก ต้นหอมดอง ทิตยา พานิชเจริญ, วีระพล มีตา, ศิริพร ทิพย์สิงห์ และรัชฌู เมยดง Effect of Rice Modified Starch on the Growth of <i>Lacticaseibacillus paracasei</i> Isolated from Pickled Spring Onions Thitaya Panicharoen, Veelaphol Meeta, Siriporn Tipsing and Ratchanu Meidong.....	168

- คำแนะนำสำหรับผู้ส่งบทความ
- แบบฟอร์มการส่งบทความ
- แบบฟอร์มค่าใช้จ่ายในการตีพิมพ์เผยแพร่
- จริยธรรมในการตีพิมพ์ในวารสาร (Publication Ethics)
- ประกาศมหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร



การคัดเลือกแบคทีเรียกรดแลคติกที่สร้างแบคเทอริโอซินจากไส้กรอกอีสานเพื่อยับยั้ง
Staphylococcus aureus *Bacillus cereus* และ *Escherichia coli*

Selection of Bacteriocin-Producing Lactic Acid Bacteria from Thai Sausages for
Inhibition of *Staphylococcus aureus*, *Bacillus cereus* and *Escherichia coli*

สุดสายชล หอมทอง*

Sudsaiichon Homthong

ศศิวิมล ภูซันซาย**

Sasiwimol Pukhunsai

Received : May 3, 2023

Revised : September 5, 2023

Accepted : October 6, 2023

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อคัดเลือกแบคทีเรียกรดแลคติกที่ผลิตสารแบคทีริโอซินที่สามารถยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียก่อโรคในอาหารที่คัดเลือกได้จากไส้กรอกอีสาน โดยสามารถคัดแยกแบคทีเรียกรดแลคติก 24 ไอโซเลท ได้จากไส้กรอกอีสานจำนวน 10 ตัวอย่าง บริเวณรอบมหาวิทยาลัยบูรพา เมื่อนำมาทดสอบฤทธิ์การยับยั้งเชื้อแบคทีเรียทดสอบคือ *Escherichia coli* ATCC 25992 , *Staphylococcus aureus* ATCC 25923 และ *Bacillus cereus* ATCC 25592 โดยวิธี Agar well diffusion พบว่ามี 8 ไอโซเลท ที่สามารถยับยั้งเชื้อทดสอบโดย 7 ไอโซเลท สามารถยับยั้ง *S. aureus* และ *B. cereus* และอีก 1 ไอโซเลท สามารถยับยั้ง *B. cereus* ได้ การทดสอบส่วนใสปราศจากเซลล์ที่ได้จาก 8 ไอโซเลท กับเอนไซม์ Proteinase พบว่าส่วนใสปราศจากเซลล์ถูกยับยั้งแสดงว่าสารยับยั้งคือโปรตีนและอาจจะเป็นแบคเทอริโอซิน โดยพบว่าแบคเทอริโอซินที่ได้จากไอโซเลท SV10-I21 และ SV10-I24 สามารถทนความร้อนที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส 10 นาที

คำสำคัญ : ไส้กรอกอีสาน / แบคทีเรียกรดแลคติก / แบคเทอริโอซิน / *Staphylococcus aureus* / *Bacillus cereus* / *Escherichia coli*

*อาจารย์ประจำภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

Lecturer in Department of Microbiology Faculty of Science Burapha University(Corresponding Author)

e-mail: sudsaiich@buu.ac.th

**นักศึกษาประจำสาขาวิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

Student of the Department of Microbiology Faculty of Science Burapha University

ABSTRACT

The objective of this research was to screen lactic acid bacteria that could produce bacteriocins with the ability to inhibit pathogenic bacteria in food obtained from Thai sausages. Twenty four lactic acid bacteria were isolated from 10 samples of Thai sausages nearby Burapha University, Chonburi Province and these isolates were screened for inhibition of *Staphylococcus aureus* ATCC 25923, *Bacillus cereus* ATCC 255922 and *Escherichia coli* ATCC 25992 by agar well diffusion assay test. Eight isolates displayed antimicrobial activity (7 isolates) inhibited growth of *S. aureus* and *B. cereus*, whereas 1 isolate inhibited growth of *B. cereus*. Antimicrobial substance produced by 8 isolates were inactivated when treated with proteolytic enzymes. Then this inhibition substance was protein and it may be bacteriocin. Bacteriocin produced by SV10-I21 and SV10-I24 isolates were found to be heat resistant at 95 °C for 10 minutes

Keywords : Thai Sausage / Lactic Acid Bacteria / Bacteriocin / *Staphylococcus aureus* / *Bacillus cereus* / *Escherichia coli*

บทนำ

อุตสาหกรรมอาหารได้นำวัตถุดิบเสียมาใช้เพื่อลดปัญหาและยืดอายุอาหาร (ดวงจันทร์, 2551) และจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนอยู่ในอาหารที่นอกจากจะเป็นสาเหตุให้อาหารเน่าเสียบางชนิดยังสามารถก่อโรคทางเดินอาหารได้อีกด้วยยกตัวอย่างเช่น *Staphylococcus aureus* ซึ่งสร้างสารพิษแอนโทโรทอกซินปนเปื้อนในอาหาร สารพิษนี้มีคุณสมบัติพิเศษ คือ ทนต่อความร้อนได้ดีมาก การให้ความร้อนถึงแม้จะทำลายตัวเชื้อ แต่จะไม่สามารถทำลายสารพิษของเชื้อนี้ได้ การกำจัดสารพิษของเชื้อนี้ให้หมดไปต้องใช้ความร้อนที่สูงมากและเป็นเวลานาน (ศนิ, 2560) และยังมีรายงานว่าพบผู้ป่วยติดเชื้อ *Escherichia coli* O104:H4 ในทวีปยุโรป รวมทั้งสิ้น 2,763 ราย (จีรพัฒน์, 2554) ในการผลิตเนื้อสัตว์แปรรูปผู้ผลิตนิยมใส่ กรดเบนโซอิกและกรดเบนโซเอต ที่มีความเป็นพิษระดับปานกลาง ถ้าได้รับในปริมาณที่สูงมากอาจทำให้เกิดอาการคลื่นไส้ อาเจียน ปวดท้อง ท้องเสีย อาการเลือดตกใน อัมพาตทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของตับและไตลดลงหรืออาจส่งผลถึงขั้นพิการได้และถ้าได้รับเกิน 500 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักตัว 1 กิโลกรัมอาจเสียชีวิตได้ (สุริยา, 2557)

ปัจจุบันผู้บริโภคได้ตระหนักถึงอันตรายจากสารกันเสียและต้องการอาหารที่ปราศจากสารเคมีเจือปน ส่งผลให้ผู้ผลิตหรือโรงงานอุตสาหกรรมหันมาสนใจวิธีการทางธรรมชาติคือการใช้จุลินทรีย์เช่นการใช้แบคทีเรียกรดแลคติกและการใช้แบคทีเรียโอซินที่ได้จากแบคทีเรียกรดแลคติก (Ananou, 2007) แบคทีเรียกรดแลคติกเป็นแบคทีเรียแกรมบวก ไม่สร้างสปอร์ เป็นพวก microaerophilic หรือ facultatively anaerobe และไม่สร้างเอนไซม์คะตะเลส ทนกรด และต้องการสารอาหารซับซ้อนเพื่อใช้ในการเจริญ สามารถสร้างกรดแลคติกเป็นผลิตภัณฑ์สุดท้ายในการหมัก แบคทีเรียกรดแลคติกได้ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมการหมักอาหารอย่างแพร่หลายเนื่องจากจัดเป็นแบคทีเรียที่ยอมรับว่าปลอดภัย (Generally Recognized as Safe : GRAS) และสามารถผลิต

สารยับยั้งแบคทีเรียก่อโรคและแบคทีเรียที่ทำให้อาหารเน่าเสีย เช่น แบคทีเรียโอซิน กรดแลคติกโดอะเซทิล และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เป็นต้น (Schillinger, et al., 1996) แบคทีเรียโอซินคือเปปไทด์หรือโปรตีนที่สังเคราะห์จากไรโบโซมและมีฤทธิ์ในการยับยั้งแบคทีเรีย เชื้อรา และไวรัส (Carlos, et al., 2021) แบคทีเรียโอซินแตกต่างจากสารปฏิชีวนะ คือแบคทีเรียโอซินมีฤทธิ์การยับยั้งแคบและเป็นพิษกับแบคทีเรียที่มีความสัมพันธ์ใกล้เคียงกัน (อรอนงค์, 2550) แบคทีเรียโอซินมีบทบาทในทางควบคุมความปลอดภัยในอาหารคือการใช้แบคทีเรียโอซินบริสุทธิ์หรือบริสุทธิ์บางส่วนใช้เติมเป็นส่วนหนึ่งในส่วนประกอบอาหาร (Deegan, et al., 2006) แบคทีเรียโอซินสามารถยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียแกรมบวกที่ไม่พึงประสงค์หลายชนิด เช่น *Bacillus*, *Enterococcus*, *Listeria*, *Clostridium* และ methicillin-resistant *S. aureus* (Klaenhammer, 1993; Yaacob, et al., 2022) ในงานศึกษาก่อนหน้านี้ได้มีการคัดแยกแบคทีเรียกรดแลคติกที่สามารถสร้างแบคทีเรียโอซินจากอาหารหมักได้ 464 สายพันธุ์และพบว่าแบคทีเรียกรดแลคติกรหัส L459 สามารถยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียก่อโรคได้ดีที่สุดและแบคทีเรียกรดแลคติกรหัส L.13 สามารถยับยั้งการเน่าเสียในขนมจีนเส้นสดได้ (คณิน, 2561)

งานวิจัยที่เกี่ยวกับการแยกแบคทีเรียกรดแลคติกจากอาหารหมักมีผู้รายงานไว้มากมายพบว่าแบคทีเรียกรดแลคติกที่แยกจากอาหารหมักมีสายพันธุ์แตกต่างกันและสามารถยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียก่อโรคทางอาหารได้ ดังรายงานของ ผุคตี และคนอื่นๆ (2559) ที่สามารถคัดแยกแบคทีเรียกรดแลคติกจากผลิตภัณฑ์เนื้อหมัก เช่น แหนม และไส้กรอกอีสาน ได้ถึงจำนวน 26 ไอโซเลท ที่มีความสามารถในการยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียก่อโรคอาหาร เป็นพิษทั้ง 4 สายพันธุ์ ได้แก่ *L. monocytogenes*, *S. Typhimurium*, *S. aureus* และ *E. coli* นอกจากนี้ยังพบว่า แบคทีเรียแลคติกที่คัดแยกได้มีความสามารถในการยับยั้งแบคทีเรียก่อโรคอาหารเป็นพิษทั้งแกรมบวกและแกรมลบ ได้เป็นจำนวน 42 และ 36 ไอโซเลท ตามลำดับ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจเลือกไส้กรอกอีสานซึ่งเป็นอาหารพื้นบ้านไทย ทางภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือของไทยซึ่งหาได้ง่ายในทุกภูมิภาคมาทำการศึกษา ซึ่งไส้กรอกอีสานผลิตจากเนื้อหมูบด มันหมู และข้าวเจ้าหุงสุก ปุรงรสด้วยเกลือ เครื่องเทศสมุนไพร ผสมให้เข้ากันบรรจุใส่ไส้หมูแล้วมัดด้วยเชือกเป็นข้อ ปลอบยวให้เกิดการหมักซึ่งจะเกิดแบคทีเรียกรดแลคติกขึ้นขณะหมักหลายชนิด ในโครงการวิจัยนี้จึงทำการคัดแยกแบคทีเรียกรดแลคติกที่สร้างแบคทีเรียโอซินที่คัดแยกได้จากไส้กรอกอีสาน จากนั้นทำการศึกษาความสามารถของแบคทีเรียโอซินในการยับยั้ง *S. aureus*, *B. cereus* และ *E. coli* เพื่อนำไปประยุกต์เป็นหัวเชื้อในการหมักอาหารและใช้ในการยืดอายุอาหารสำหรับควบคุมการเจริญของแบคทีเรียก่อโรคและแบคทีเรียที่ก่อให้เกิดการเน่าเสียในอาหาร

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การคัดแยกแบคทีเรียที่มีความสามารถในการผลิตแบคทีเรียโอซินจากไส้กรอกอีสาน

1.1 การเก็บตัวอย่าง

เก็บตัวอย่างไส้กรอกอีสานจากร้านขายแผงลอยบริเวณรอบมหาวิทยาลัยบูรพา จำนวน 10 ตัวอย่าง โดยทำการเก็บใส่ถุงปราศจากเชื้อ จากนั้นนำมาล้างห้องปฏิบัติการและดำเนินการวิเคราะห์ในขั้นตอนต่อไป

1.2 การคัดแยกแบคทีเรียกรดแลคติกจากไส้กรอกอีสาน (ดัดแปลงจาก ศิรินาถ, 2556)

นำไส้กรอกอีสานจากร้านขายแผงรอยบริเวณรอบมหาวิทยาลัยบูรพาจำนวน 10 ตัวอย่าง โดยทำการชั่งตัวอย่าง ตัวอย่างละ 25 กรัมจากนั้นเติมอาหาร de Man, Rogosa and Sharpe (MRS) broth ปริมาตร 225 มิลลิลิตรตีบตัวอย่างให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยเครื่องตีบอาหารด้วยความเร็วเป็นเวลา 2 นาที จากนั้นทำการเจือจางให้ได้ความเจือจางที่ 10^{-3} , 10^{-4} และ 10^{-5} ด้วย 0.85% NaCl หลังจากนั้นปิเปตตัวอย่างที่ผ่านการเจือจางแล้วมา 0.1 มิลลิลิตร Spread บน MRS agar ที่เติม 0.5% CaCO_3 บ่มที่อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 24-48 ชั่วโมง เลือกโคโลนีที่คาดว่าจะเป็นแบคทีเรียกรดแลคติกทำการชิตบนอาหาร MRS agar บ่มที่อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมงในสภาวะวไร้ออกซิเจน จากนั้นเลือกโคโลนีที่มีความแตกต่างกันนำไปชิตลงบนอาหาร MRS agar 1-2 ครั้งเพื่อให้ได้เชื้อบริสุทธิ์พร้อมจัดรหัสไอโซเลทของเชื้อแบคทีเรียกรดแลคติกที่แยกได้

2. ศึกษาคุณลักษณะทางสรีรวิทยาและชีวเคมีบางประการ

2.1 ตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาภายใต้กล้องจุลทรรศน์

โดยการนำเชื้อแบคทีเรียกรดแลคติกบริสุทธิ์ที่แยกได้จากไส้กรอกเปรี้ยว นำไปย้อม สีแกรมและส่องดูภายใต้กล้องจุลทรรศน์ สังเกตการติดสี รูปร่างเซลล์ การสร้างสปอร์ การจัดเรียงตัวเรียงตัวของเซลล์ โดยแบคทีเรียกรดแลคติกเป็นแบคทีเรียแกรมบวกติดสีย้อมสีม่วงคริสตัลไวโอเลตมีลักษณะทางสัณฐานภายใต้กล้องจุลทรรศน์ เซลล์มีรูปร่างแท่งและกลม ไม่สร้างสปอร์

2.2 การทดสอบปฏิกิริยาคะตาเลส (Catalase test)

ทดสอบโดยใช้ 3% H_2O_2 ลงบนแผ่นสไลด์ที่ฆ่าเชื้อแล้ว จากนั้นนำไม้แหลมที่ฆ่าแล้วแตะเชื้อจากโคโลนีมาเล็กน้อยผสมเข้ากับหยด 3% H_2O_2 แล้วสังเกตการเปลี่ยนแปลงทันที โดยแบคทีเรียกรดแลคติกจะให้ผลเป็นลบไม่เกิดฟองก๊าซ

เก็บรักษาแบคทีเรียกรดแลคติกที่แยกได้ ในอาหารเลี้ยงเชื้อ MRS broth ที่เติมสารละลาย 20% glycerol ที่เก็บที่อุณหภูมิ -20°C

3. การคัดเลือกแบคทีเรียกรดแลคติกที่สามารถผลิตแบคทีเรียโอซิน (ดัดแปลงจาก Pringsulaka, et al., 2011)

3.1 การเตรียมสารสกัดส่วนใสปราศจากเซลล์ (Cell free supernatant)

นำแบคทีเรียกรดแลคติกทุกไอโซเลทที่คัดแยกได้มาเลี้ยงในอาหาร MRS broth 100 มิลลิลิตร บ่มที่อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยง 8,000 rpm ที่ 4°C 10 นาที เพื่อแยกเซลล์ ออกจากนั้นนำส่วนใสปราศจากเซลล์ปรับ pH เป็น pH 6.5 ด้วย HCl หรือ 5 M NaOH จากนั้นนำมากรองโดยใช้กระดาษกรองขนาด 0.45 ไมโครเมตร

3.2 การเตรียมแบคทีเรียทดสอบ

S. aureus, *B. cereus* และ *E. coli* จากภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา เลี้ยงในอาหาร Trypticase soy broth (TSB) 50 มิลลิลิตร บ่มที่อุณหภูมิ 35°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.3 การทดสอบความสามารถในการผลิตสารยับยั้งของแบคทีเรียกรดแลคติกด้วยวิธี Agar well diffusion นำเชื้อ *S. aureus*, *E. coli* และ *B. cereus* จากข้อ 3.2 ทำการป้ายเชื้อลงในจานอาหาร Trypticase

Soft soy agar (TSA) โดยเจือจางให้ได้แบคทีเรียความเข้มข้น 10^8 CFU/ml 1 ชนิดต่อ 1 งาน จากนั้นใช้แท่งเหล็กที่มีรูปราศจากเชื้อ (Cork-borers) เจาะรูเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร และ ปิเปิดส่วนใสปราศจากเซลล์จากข้อ 3.1 มา 50 ไมโครลิตรถ่ายลงหลุมที่เจาะแล้วนำไปบ่มที่ 37°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยทำการทดลอง 3 ซ้ำ สังเกตการเกิดบริเวณใสรอบๆ หลุมและคัดเลือกเชื้อแบคทีเรียกรดแลคติกที่มีบริเวณยับยั้ง (inhibition zone)

4. การทดสอบยืนยันว่าสารยับยั้งเชื้อทดสอบเป็นโปรตีน (นภดล และคนอื่นๆ, 2554)

นำส่วนใสปราศจากเซลล์จากข้อ 3.1 มา 10 มิลลิตร ทดสอบกับเอนไซม์ย่อยโปรตีน Proteinase K ความเข้มข้น 1 มิลลิตร นำไปบ่มที่ 37°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมงจากนั้นนำไปทดสอบ antibacterial activity ด้วยวิธี Agar well diffusion โดยนำเชื้อ *S. aureus*, *B. cereus* และ *E. coli* จากข้อ 3.2 ทำการ swab ลงบนอาหาร TSA โดยเจือจางให้ได้แบคทีเรียความเข้มข้น 10^8 CFU/ml 1 ชนิดต่อ 1 งาน จากนั้นใช้ Cork-borers ปราศจากเชื้อเจาะรูเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 มิลลิตรเมตร และนำส่วนใสปราศจากเซลล์ที่ผ่านการบ่ม 2 ชั่วโมง มา 50 ไมโครลิตรถ่ายลงหลุมที่เจาะแล้วนำไปบ่มที่ 37°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง สังเกตการเกิดบริเวณใสรอบๆ หลุม และเปรียบเทียบกับส่วนใสปราศจากเซลล์ที่ไม่ใส่เอนไซม์ Proteinase K ซึ่งเป็นชุดควบคุม โดยทำการทดลอง 3 ซ้ำ

5. การทดสอบการทนความร้อนของแบคทีเรียโอซิน (สมใจ และคนอื่นๆ, 2550)

นำส่วนใสปราศจากเซลล์จากข้อ 3.1 มา 10 มิลลิตร นำมาให้ความร้อนที่ 95°C เป็นเวลา 10 และ 30 นาที จากนั้นนำไปทดสอบ antibacterial activity ด้วยวิธี Agar well diffusion โดยทำการทดลอง 3 ซ้ำ

ผลการวิจัย

1. การคัดแยกแบคทีเรียกรดแลคติกจากไส้กรอกเปรี้ยว

จากการเก็บตัวอย่างไส้กรอกอีสานจำนวน 10 ตัวอย่าง สามารถแยกเชื้อแบคทีเรียกรดแลคติกที่ผลิตกรดแลคติกซึ่งสังเกตได้จากการเห็นวงใสรอบโคโลนีโดยใช้ 0.5 % CaCO_3 MRS agar และนำเชื้อแบคทีเรียที่ผลิตกรดได้ไปทดสอบด้วยการย้อมแกรม และทดสอบการสร้างเอนไซม์อะไมเลส และออกซิเดส พบว่าสามารถแยกแบคทีเรียแกรมบวก ไม่สร้างเอนไซม์อะไมเลสและ ออกซิเดส ทั้งหมด 24 ไอโซเลท โดยมีรูปร่างท่อนสั้น 10 ไอโซเลท ท่อนยาว 3 ไอโซเลท ท่อนสั้นรูปไข่ 1 ไอโซเลท และทรงกลม 10 ไอโซเลท แสดงดังตารางที่ 1

2. การคัดแยกแบคทีเรียกรดแลคติกที่ผลิตสารยับยั้งเชื้อทดสอบด้วยวิธี agar well diffusion

เมื่อนำไปทดสอบความสามารถในการยับยั้ง *S. aureus*, *B. cereus* และ *E. coli* จะพบการเกิดบริเวณใสรอบๆ หลุมและคัดเลือกเชื้อแบคทีเรียกรดแลคติกที่มี inhibition zone โดยพบว่ามี 8 ไอโซเลท ที่สามารถยับยั้งเชื้อทดสอบได้ คือ SV9-I17 ยับยั้ง *B. cereus* ขณะที่ไอโซเลท SV9-I18, SV10-I19, SV10-I20, SV10-I21, SV10-I22, SV10-I23 และ SV10-I24 ยับยั้ง *S. aureus* และ *B. cereus* ดังแสดงในตารางที่ 1

3. การทดสอบยืนยันว่าสารยับยั้งที่ออกฤทธิ์ยับยั้งเชื้อทดสอบเป็นโปรตีน

คัดเลือกส่วนใสปราศจากเซลล์ของเชื้อไอโซเลท SV9-I17, SV9-I18, SV10-I19, SV10-I20 SV10-I21, SV10-I22S, V10-I23 และ SV10-I24 มาทำการทดสอบกับเอนไซม์ Proteinase K โดยให้มีความเข้มข้นสุดท้ายเท่ากับ 1 mg/ml บ่มไว้ที่อุณหภูมิ 37°C ก่อนนำไปทดสอบความสามารถในการยับยั้ง

S. aureus, *B. cereus* และ *E. coli* ด้วยวิธี agar well diffusion พบว่าส่วนใสปราศจากเซลล์จากไอโซเลท SV9-I17, SV9-I18, SV10-I20, SV10-I21, SV10-I22, SV10-I23 และ SV10-I24 เป็นโปรตีนเนื่องจากจะไม่ยับยั้งเชื้อทดสอบ ซึ่งคาดว่าน่าจะเป็นแบคทีเรียโอสซิน ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 1 จำนวนไอโซเลท รูปร่าง และความสามารถในการผลิตสารยับยั้ง *S. aureus*, *B. cereus* และ *E. coli* เมื่อทดสอบด้วยวิธี agar well diffusion

ตัวอย่างที่	จำนวนไอโซเลท	รูปร่าง	รหัสเชื้อ	Inhibition zone (mm) Mean \pm SD		
				<i>S. aureus</i>	<i>B. cereus</i>	<i>E. coli</i>
1	-	-	-	-	-	-
2	-	-	-	-	-	-
3	9	ทรงกลม	SV3-I1	-	-	-
		ทรงกลม	SV3-I2	-	-	-
		ทรงกลม	SV3-I3	-	-	-
		ทรงกลม	SV3-I4	-	-	-
		ทรงกลม	SV3-I5	-	-	-
3		ทรงกลม	SV3-I6	-	-	-
		ทรงกลม	SV3-I7	-	-	-
		ทรงกลม	SV3-I8	-	-	-
		ทรงกลม	SV3-I9	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-
5	2	ท่อนสั้น	SV5-I10	-	-	-
		ท่อนยาว	SV5-I11	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-
7	2	ท่อนสั้น	SV7-I12	-	-	-
		ท่อนสั้น	SV7-I13	-	-	-
8	2	ท่อนสั้น	SV8-I14	-	-	-
		ท่อนสั้น	SV8-I15	-	-	-

ตารางที่ 1 (ต่อ)

ตัวอย่างที่	จำนวนไอโซเลท	รูปร่าง	รหัสเชื้อ	Inhibition zone (mm) Mean \pm SD		
				<i>S. aureus</i>	<i>B. cereus</i>	<i>E. coli</i>
9	3	ท่อนสั้น	SV9-I16	-	-	-
		ท่อนยาว	SV9-I17	-	12.2 \pm 0.26	-
		ท่อนสั้น	SV9-I18	11.1 \pm 0.26	13.0 \pm 0.17	-
10	6	ท่อนสั้น	SV10-I19	14.3 \pm 0.3	15.1 \pm 0.26	-
		ท่อนสั้น	SV10-I20	9.1 \pm 0.1	9.2 \pm 0.1	-
		ท่อนยาว	SV10-I21	12.3 \pm 0.26	13.3 \pm 0.1	-
		ท่อนสั้นรูป ไข่	SV10-I22	1.11 \pm 0.3	10.2 \pm 0.2	-
		ท่อนสั้น	SV10-I23	12.2 \pm 0.2	8.1 \pm 0.17	-
		ทรงกลม	SV10-I24	15.0 \pm 0.4	14.3 \pm 0.3	-

4. การทดสอบการทนความร้อนของแบคทีเรียโอซิน

เมื่อนำส่วนใสปราศจากเซลล์ไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 และ 30 นาที และนำไปทดสอบความสามารถในการยับยั้ง *E. coli*, *S. aureus* และ *B. cereus* โดยวิธี agar well diffusion พบว่าเมื่อใช้อุณหภูมิ 95 °C เป็นเวลา 10 นาที ไอโซเลท SV10-I23 มีกิจกรรมยับยั้ง *B. cereus* ATCC 255922 เพียงชนิดเดียวและ ไอโซเลท V10-I21, SV10-I24 มีกิจกรรมยับยั้ง *S. aureus* ATCC 25923 และ *B. cereus* ATCC 255922 เมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 95 °C เป็นเวลา 10 นาที ส่วนการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 95 °C เป็นเวลา 30 นาที จะไม่พบไอโซเลทใดเลยที่มีความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียทดสอบ แสดงผลดังตารางที่ 3

ตารางที่ 2 ผลของเอนไซม์ย่อยโปรตีนต่อแบคทีเรียโอซินเมื่อนำมาทดสอบความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียทดสอบของส่วนใสปราศจากเซลล์

รหัสเชื้อ	Proteinase K		
	Inhibition zone (mm) Mean \pm SD		
	<i>S. aureus</i>	<i>B. cereus</i>	<i>E. coli</i>
SV9-I17	-	-	-
SV9-I18	-	-	-
SV10-I19	6.1 \pm 0.1	7.2 \pm 0.2	-
SV10-I20	-	-	-
SV10-I21	-	-	-
SV10-I22	-	-	-
SV10-I23	-	-	-
SV10-I24	-	-	-

ตารางที่ 3 ผลของอุณหภูมิต่อการทดสอบความสามารถในการทนร้อนของสารที่น่าจะเป็นแบคทีเรียโอซินเมื่อนำมาทดสอบความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียทดสอบของส่วนใสปราศจากเซลล์

รหัสเชื้อ	Inhibition zone (mm) Mean \pm SD					
	95 °C 10 นาที			95 °C 30 นาที		
เชื้อทดสอบ	<i>S. aureus</i>	<i>B. cereus</i>	<i>E. coli</i>	<i>S. aureus</i>	<i>B. cereus</i>	<i>E. coli</i>
SV9-I17	-	-	-	-	-	-
SV9-I18	-	-	-	-	-	-
SV10-I20	-	-	-	-	-	-
SV10-I21	8.2 \pm 0.26	14.3 \pm 0.3	-	-	-	-
SV10-I22	-	-	-	-	-	-
SV10-I23	-	9.1 \pm 0.1	-	-	-	-
SV10-I24	15.2 \pm 0.5	6.3 \pm 0.1	-	-	-	-

อภิปรายผล

จากการศึกษาขั้นต้นแรกทำการเก็บตัวอย่างไส้กรอกอีสาน 10 ตัวอย่างจากตลาดรอบมหาวิทยาลัยบูรพา เพื่อนำมาแยกแบคทีเรียกรดแลคติกที่คาดว่าผลิตแบคทีเรียโอซิน จากการศึกษพบว่าสามารถคัดเลือกมา 24 ไอโซเลท ซึ่งน่าจะเป็นแบคทีเรียกรดแลคติก เนื่องจาก ลักษณะพื้นฐานภายใต้กล้องจุลทรรศน์ มีทั้งรูปร่างแท่ง และรูปร่างกลม การติดสีแกรมสีม่วง เป็นแกรมบวก การทดสอบคะตาเลสที่ให้ผลลบและออกซิเดสที่ให้ผลลบซึ่ง

สอดคล้องกับการทดลองของ นวัณน์ และคนอื่นๆ (2559) ได้คัดกรองแบคทีเรียกรดแลคติกจากน้ำพริกโดยเฉพาะเลี้ยงในอาหาร 1% CaCO₃ MRS จากน้ำพริกปลาร้าและน้ำพริกหนุ่มคัดแยกได้ 16 ไอโซเลต น่าจะเป็นแบคทีเรียกรดแลคติกเนื่องจากมีการสร้าง วงใส (clear zone) เมื่อเจริญในอาหาร MRS agar นอกจากนี้แบคทีเรียกรดแลคติกทุกตัวสามารถสร้างกรดได้ แล้ว บางสายพันธุ์ยังสามารถสร้างแบคเทริโอซิน ได้ซึ่งเป็นโปรตีนหรือเพปไทด์ที่ถูกสร้างขึ้นจากไรโบโซมที่ช่วยส่งเสริมการยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียที่ก่อโรคและอาหารเน่าเสีย (อรอนงค์, 2550) สำหรับการตรวจพบแบคทีเรียกรดแลคติกในการศึกษานี้ยังสอดคล้องกับบุคคลิและคนอื่นๆ (2559) ที่สามารถคัดแยกแบคทีเรียกรดแลคติกจากผลิตภัณฑ์เนื้อหมักเช่นแหนม และไส้กรอก-อีสาน จำนวน 42 ตัวอย่าง ได้ถึง 325 ไอโซเลต

เมื่อนำแบคทีเรียกรดแลคติกที่คัดเลือกได้มาทดสอบฤทธิ์การยับยั้งแบคทีเรีย โดยการนำส่วนใสปราศจากเซลล์ที่ผลิตจากแบคทีเรียกรดแลคติกมาปรับ pH เป็น 6.5 เพื่อให้ทราบได้ว่าฤทธิ์ยับยั้งแบคทีเรียทดสอบไม่ได้มาจากความเป็นกรดของกรดแลคติก จากนั้นนำไปทดสอบด้วยวิธี agar well diffusion โดยใช้แบคทีเรียทดสอบดังนี้ *E. coli* ATCC 25992, *S. aureus* ATCC 25923 และ *B. cereus* ATCC 25922 พบว่ามี 7 ไอโซเลตคือ SV9-I18, SV10-19, SV10-I20, SV10-I21, SV10-I22S, V10-I23 และ SV10-I24 ที่มีกิจกรรมยับยั้งทั้ง *S. aureus* ATCC 25923 และ *B. cereus* ATCC 25922 ส่วนไอโซเลต SV9-I17 มีกิจกรรมยับยั้งเฉพาะ *B. cereus* ATCC 25922 โดยมี inhibition zone อยู่ในช่วง 9-15 มิลลิเมตร ซึ่งการยับยั้งนี้ให้ผลสอดคล้องกับ รัชณุ และคนอื่นๆ (2564) ที่ทำการคัดแยกแบคทีเรียแลคติกและเชื้อมีการยับยั้ง *B. cereus* โดยมี inhibition zone อยู่ในช่วง 13.8-21.6 มิลลิเมตร นอกจากนี้ผลของแบคทีเรียแลคติกในการยับยั้งเชื้อก่อโรคนั้นยังสอดคล้องกับการศึกษาของ วรายุทธ และคนอื่นๆ (2550) ที่พบว่าแบคเทริโอซินจากแบคทีเรียกรดแลคติกไอโซเลต NO5 สามารถยับยั้งเชื้อทดสอบ *S. aureus* ATCC 25923 และ *B. cereus* ATCC11778 ได้การที่แบคทีเรียกรดแลคติกสามารถยับยั้งแบคทีเรียทดสอบได้อาจเนื่องมาจากในระหว่างการเจริญแบคทีเรียกรดแลคติกสามารถสร้างสารแบคเทริโอซินและสารคล้ายแบคเทริโอซิน (Bacteriocin-Like Molecules) ซึ่งมีฤทธิ์ในการยับยั้งจุลินทรีย์หลายชนิดเช่น *L. monocytogenes* และ *S. aureus* เป็นต้น (Vuyst & Leroy, 2007) โดยแบคเทริโอซินจะยึดเกาะผิวเซลล์ของเชื้อและสร้างรูในชั้นเยื่อหุ้มเซลล์ ทำลายการซึมผ่านของเยื่อหุ้มเซลล์ และทำให้เซลล์เสียสภาวะสมดุล เอนไซม์สำคัญภายในเซลล์เสียคุณสมบัติ (Bruno & Montville, 1993) แต่จากผลการทดสอบนี้ไม่พบว่ามีไอโซเลตใดเลยที่มีฤทธิ์ยับยั้ง *E. coli* ทั้งนี้เนื่องจากแบคทีเรียแกรมบวกมีชั้นของผนังเซลล์ที่ประกอบด้วยเพปทิโดไกลแคนเป็นส่วนใหญ่ ส่วนแบคทีเรียแกรมลบนั้นมีเยื่อหุ้มชั้นนอกที่ประกอบด้วยลิโปโพลีแซ็กคาไรด์หุ้มอยู่อีกชั้นทำให้สามารถป้องกันไม่ให้สารยับยั้งเข้าสู่เซลล์ได้ดีกว่าแบคทีเรียแกรมบวก (อมรรัตน์ และคนอื่นๆ, 2559)

หลังจากคัดเลือกแบคทีเรียกรดแลคติกที่มีความสามารถผลิตสารยับยั้งแบคทีเรียทดสอบ พบว่ามีเพียงพบว่ามี 8 ไอโซเลตคือ SV9-I17, SV9-I18, SV10-19, SV10-I20, SV10-I21, SV10-I22S, V10-I23 และ SV10-I24 ที่มีกิจกรรมยับยั้งเชื้อทดสอบดังนั้นจึงได้ทำการคัดเลือก 8 ไอโซเลต ไปทดสอบว่าสารยับยั้งที่มีฤทธิ์ยับยั้งเป็นแบคเทริโอซินจริงหรือไม่ โดยการนำไปทดสอบการย่อยโปรตีนโดยการใส่ Proteinase K จากนั้นนำไป

ทดสอบด้วยวิธี agar well diffusion พบว่าส่วนใสปราศจากเซลล์จากไอโซเลท SV9-I17, SV9-I18, SV10-I20, SV10-I21, SV10-I22S, V10-I23 และ SV10-I24 ที่ไม่มีกิจกรรมยับยั้งเชื้อทดสอบ สอดคล้องกับการศึกษาของ ศิรินาถ (2556) ที่ศึกษาผลของเอนไซม์ต่อความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียอินดิเคเตอร์ของแบคทีเรียโอซิน พบว่าสารที่ผลิตโดย *Enterococcus faecium* PDN-Ta10 ที่ทำการย่อยด้วยเอนไซม์ proteinase K, pepsin และ trypsin นั้นไม่สามารถยับยั้งแบคทีเรียอินดิเคเตอร์ได้ ส่วนเอนไซม์ catalase catalase มีผลให้ความสามารถในการยับยั้งเชื้อลดลงเล็กน้อย แสดงว่าสารยับยั้งนั้นเป็นสารโปรตีน และไม่ใช่นิโคตินออกไซด์ ซึ่งเป็นคุณสมบัติของสารแบคทีเรียโอซิน ดังนั้นจึงคัดเลือกส่วนใสปราศจากเซลล์จากไอโซเลท SV9-I17, SV9-I18, SV10-I20, SV10-I21, SV10-I22S, SV10-I23 และ SV10-I24 เนื่องจากไม่มีกิจกรรมยับยั้งเชื้อทดสอบ ไปทดสอบความสามารถในการทนร้อนของแบคทีเรียโอซินหรือสารคล้ายแบคทีเรียโอซินโดยนำส่วนใสปราศจากเซลล์ที่ได้ไปให้ความร้อนอุณหภูมิ 95 °C 10 และ 30 นาที จากนั้นนำไปทดสอบความสามารถในการยับยั้งเชื้อทดสอบด้วยวิธี agar well diffusion พบว่าเมื่อใช้อุณหภูมิ 95 °C นาน 10 นาที ไอโซเลท SV10-I21, SV10-I24 มีกิจกรรมยับยั้ง *S. aureus* ATCC 25923 ส่วนไอโซเลท SV10-I21, SV10-I23, SV10-I24 มีกิจกรรมยับยั้ง *B. cereus* ATCC 25922 ส่วนเมื่อใช้ความร้อนนาน 30 นาที พบว่าไม่มีไอโซเลทใดที่มีความสามารถในการยับยั้งเชื้อทดสอบเลย โดยทั่วไปกระบวนการแปรรูปอาหารด้วยความร้อนสูงอาจส่งผลต่อแบคทีเรียโอซินที่ไม่ทนความร้อนได้ ดังนั้นสารคล้ายแบคทีเรียโอซินที่ได้จากไอโซเลทที่ไม่ทนความร้อนถ้าจะนำไปใช้ในการถนอมอาหารกับอาหารที่ต้องผ่านความร้อนจะไม่มีประสิทธิภาพ ดังนั้นไอโซเลท SV10-I21 และ SV10-I24 ผลิตสารที่คล้ายแบคทีเรียโอซินซึ่งมีฤทธิ์ยับยั้งเชื้อทดสอบและทนต่อความร้อนได้ดีกว่าไอโซเลทอื่นๆ

จากการทดลองเมื่อนำไอโซเลท SV10-I21 จำแนกระดับสกุลพบว่ามีความน่าจะเป็นแบคทีเรีย *Lactobacillus* เนื่องจากลักษณะสัณฐานวิทยาภายใต้กล้องจุลทรรศน์ มีรูปร่างท่อนยาว แกรมบวก ไม่สร้างคตาเลส และออกซิเดส สอดคล้องกับรายงานของ ผุสดี และคนอื่นๆ (2559) ที่สามารถคัดแยก *Lactobacillus* spp. จากไส้กรอกอีสานและแฮม และไอโซเลท SV10-I24 ไปจำแนกระดับสกุลพบว่ามีความน่าจะเป็นแบคทีเรีย *Pediococcus* เนื่องจากลักษณะสัณฐานวิทยาภายใต้กล้องจุลทรรศน์ มีรูปร่างกลมเป็นกลุ่ม 4 เซลล์ แกรมบวก ไม่สร้างคตาเลส และออกซิเดส มักพบในผลิตภัณฑ์ไส้กรอก (Raccach, 2014) ซึ่งจากผลดังกล่าวจะต้องทำการทดสอบทางชีวเคมีและทางพันธุกรรมต่อไปเพื่อจัดจำแนกให้ได้ในระดับสายพันธุ์ต่อไป

จากการศึกษาจะเห็นได้ว่าไอโซเลท SV10-I24 และ SV10-I21 ที่คาดว่าน่าจะเป็น *Pediococcus* และ *Lactobacillus* เป็นไอโซเลทที่น่าสนใจ หากได้มีการศึกษาข้อมูลต่างๆ เพิ่มเติม ซึ่งน่าจะนำไปใช้เป็นตัวเชื้อเริ่มต้นในการผลิตอาหารหมักหรือนำไปใช้ในการถนอมอาหาร จากรายงานของ อรอนงค์ (2550) รายงานว่าแบคทีเรียโอซิน subclass 2a เช่น เพดดิโอซิน PA-1/ACh ได้รับความสนใจมากขึ้น เนื่องจากสามารถยับยั้งเชื้อ *L. monocytogenes* โดยการนำไปใช้ร่วมกับวิธี Modified Atmosphere Packaging (MAP) ซึ่งวิธี MAP จะใช้ในการบรรจุผลิตภัณฑ์จำพวกเนื้อภายใต้ภาวะ ที่มีคาร์บอนไดออกไซด์ในระดับสูง เพื่อลดการเน่าเสียอันเนื่องมาจากแบคทีเรียแกรมลบ และภาวะดังกล่าวยังช่วยให้แบคทีเรียแลคติกเพิ่มจำนวนและสร้างแบคทีเรียโอซินที่ได้ ทำให้อายุการเก็บของอาหาร ที่แช่เย็น ถึงแม้ว่าฤทธิ์ของแบคทีเรียโอซินที่จะไม่สามารถทำลายผนังเซลล์

ของกลุ่มแกรมลบได้ แต่สามารถใช้ร่วมกับกรรมวิธีอื่นอาหารร่วมกับการถนอมอาหารโดยไม่ใช้ความร้อนคือ วิธี HHP และวิธีกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าการใช้ และ PEF ร่วมกับไนซิน การใช้แลคติซิน 3147 ร่วมกับวิธี HHP การใช้สายพันธุ์แบคทีเรียแลคติกที่สร้างแบคทีเรียโอซินที่จำนวน 7 สายพันธุ์ร่วมกับวิธี HHP ที่ ความดัน 300 and 500 MPa ในซีสมที่มีการปนเปื้อนเชื้อ *E. coli* O157: H7 พบว่าให้ประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อมากกว่าใช้วิธีใดวิธีหนึ่ง (Deegan, 2006) จากรายงานจะเห็นได้ว่าการใช้แบคทีเรียโอซินร่วมกับการถนอมอาหารด้วยวิธีอื่นทำให้เชื้อจุลินทรีย์ที่ทำให้อาหารเน่าเสียเจริญได้ช้าลงและสามารถชะลอการเน่าเสียของอาหารได้อีกด้วย รวมทั้งจากรายงานของคณิน (2561) ที่พบว่า *Lactobacillus plantarum* สามารถผลิตแบคทีเรียโอซินที่สามารถชะลอการเน่าเสียของเต้าหู้แผ่นและเส้นก๋วยเตี๋ยวเส้นใหญ่ได้อีกด้วย จากผลการวิจัยพบสารที่สามารถยับยั้ง *S. aureus* และ *B. cereus* และสารดังกล่าวอาจจะเป็นแบคทีเรียโอซิน โดยพบว่าแบคทีเรียโอซินหรือสารที่คล้ายแบคทีเรียโอซินที่ได้จากไอโซเลท SV10-I21 และ SV10-I24 สามารถทนความร้อนที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส ได้ 10 นาที ดังนั้นจึงต้องนำไอโซเลทดังกล่าวไปจัดจำแนกสายพันธุ์ต่อไปและอาจนำไปใช้ประโยชน์ในการยับยั้งการเน่าเสียของอาหารต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพาที่เอื้อเฟื้อสถานที่ อุปกรณ์ และงบประมาณจากเงินรายได้ของภาควิชาในการทำวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- คณิน อิ่มทองคำ. (2561). การคัดแยกแบคทีเรียกรดแลคติกที่ผลิตสารแบคทีเรียโอซินเพื่อใช้ในการยืดอายุการเก็บรักษาอาหาร. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาชีววิทยาประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- ดวงจันทร์ เสงส์สวัสดิ์. (2551). วัตถุประสงค์เสียในผลิตภัณฑ์อาหารและความปลอดภัยของผู้บริโภค. *วารสารอาหาร*, 38(4), 296-300.
- ธีรพัฒน์ เวชชประสิทธิ์. (2554). *Escherichia coli* 0104 : H4 เชื้อแบคทีเรีย *E. coli* ระบาด. *นิตยสาร สสวท.* 39(173), 6-8.
- นวัฒน์ เกตุสวัสดิวงศ์, ธีระชัย ชนานันต์ และนฤมล ชนานันต์. (2559). การคัดกรองแบคทีเรียกรดแลคติกจากน้ำพริก. *Thai Journal of Science and Technology*, 5(1), 67-76.
- นภดล เมตตาเมธา. (2554). การคัดแยกและจำแนกแบคทีเรียแลคติกที่สามารถสร้างแบคทีเรียโอซินจากหมมปลา. *วารสารวิทยาศาสตร์ มศว*, 27(1), 110-112.
- ผุสดี ตั้งวัชรินทร์, จิรโรจน์ นิธิสันถวะคุปต์ และกานต์ สุขสุแพทย์ (2559). การคัดแยกและการคัดเลือกแบคทีเรียแลคติกที่มีสมบัติความเป็นโปรไบโอติกเบื้องต้น จากผลิตภัณฑ์เนื้อหมัก. *วารสารเกษตรพระจอมเกล้า*, 34(2), 67-76.
- รัชฎู เมยคง, ภัทรรพรณ สุขสวัสดิ์ และศิริพร ทิพย์สิงห์. (2564). การคัดเลือกแบคทีเรียกรดแลคติกที่มีคุณสมบัติเป็นโปรไบโอติกจากผลิตภัณฑ์อาหารหมัก. *วารสารก้าวทันโลกวิทยาศาสตร์*, 21(1), 101-118.
- วรายุทธ สุระนรากุล, สัมภาษณ์ คุณสุข, ปาริชาติ พุ่มขจร และพงศ์ศักดิ์ รัตนชัยกุลโสภณ. (2550). คุณสมบัติของแบคทีเรียโอซินที่สร้างโดยแลคติกแอซิดแบคทีเรียที่แยกได้จากอาหารหมัก. *วารสารวิจัย มข*, 7(1), 17-26.
- ศนิ จิระสถิตย์. (2560). จุลินทรีย์ก่อโรคในอาหาร. *วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา*, 22(2), 218-232
- ศรินาถ ศรีอ่อนนวล และนพรัตน์ มะเห. (2556). การคัดเลือกแบคทีเรียแลคติกที่สร้างสารแบคทีเรียโอซินจากปลาตุกร้า. *วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย*, 5(2), 1-14.
- สมใจ ศิริโชค. (2550). การคัดเลือกและการจัดจำแนกชนิดแบคทีเรียแลคติก ที่สร้างแบคทีเรียโอซินได้จากอาหารหมัก และการศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นของแบคทีเรียโอซินที่ผลิตได้. *วารสารวิทยาศาสตร์ มศว*, 27(1), 92-104.
- สุวิมา จันทพิรกิจ. (2557). อันตราย (ไม่รู้ตัว) จากเนื้อสัตว์แปรรูป. *วารสารอาหาร*, 44(3), 24-28.
- อมรรัตน์ สีสุกอง, กัลยาภรณ์ จันตรี และศรีสุดา หาญภาคภูมิ. (2559). การศึกษาฤทธิ์ต้านแบคทีเรียของสารสกัดจากพืชบางชนิด. *วารสารวิจัยและพัฒนา วไลยอลงกรณ์ในพระบรมราชูปถัมภ์*, 11(1), 69-82.
- อรอนงค์ พริ้งศุลกะ. (2550). แบคทีเรียโอซินที่สร้างจากแบคทีเรียแลคติก. *วารสารวิทยาศาสตร์ มศว*, 23(2), 145-160.

- Ananou, S., Maqueda, M., Martínez-Bueno, M. & Valdivia, E. (2007). **Biopreservation, an ecological approach to improve the safety and shelf-life of foods**. Communicating Current Research and Educational Topics and Trends in Applied Microbiology A. Méndez-Vilas
- Bruno, M.E.C. & Montville, T.J. (1993). Common Mechanistic Action of Bacteriocins from Lactic Acid Bacteria. **Applied and Environmental Microbiology**, **59**(9), 3003-3010.
- Carlos J., González H., Martínez-Tapia A., Lazcano-Hernández G., García-Pérez B. E. & Castrejón-Jiménez N.S. (2021) Bacteriocins from Lactic Acid Bacteria. A Powerful Alternative as Antimicrobials, Probiotics, and Immunomodulators in Veterinary Medicine. **Animals (Basel)**, **11**(4), 979.
- Deegan, L.H., Cotter, P.D., Hill, C. & Ross, P. (2006), Bacteriocins: Biological tools for biopreservation and shelf-life extension. **International Dairy Journal**, **16**, 1058-1071.
- Klaenhammer, T.R. (1993). Genetics of bacteriocins produced by lactic acid bacteria. **FEMS Microbiology Reviews**, **12**(1-3), 39-86.
- Pringsulaka O., Thongngam N., Suwannasai N. & Atthakor W. (2011). Partial characterisation of bacteriocins produced by lactic acid bacteria isolated from Thai fermented meat and fish products. **Food Control**, **23**(2), 547-551.
- Raccach, M. (2014). **Pediococcus**. In Encyclopedia of Food Microbiology (second edition).
- Schillinger, U. & Holzapfel, W. H. (1995). The genus *Carnobacterium*. In B. J. B. Wood and W. H. Holzapfel (Eds.). **The Lactic Acid Bacteria : The Genera of Lactic Acid Bacteria** (pp. 307-326), U.K: Chapman & Hall.
- Vuyst, L.D. & Leroy, F. (2007). Bacteriocins from Lactic Acid Bacteria: Production, Purification, and Food Applications. **Journal of Molecular Microbiology and Biotechnology**, **13**(4), 194-199.
- Yaacob, S. NS., Wahab, R.A., Misson, M., Sabullah, M.K., Huyop, F. & Zin, N.M. (2022). Lactic acid bacteria and their bacteriocins: new potential weapons in the fight against methicillin-resistant *Staphylococcus aureus*. **Future Microbiology**, **17**(9).
<https://doi.org/10.2217/fmb-2021-0256>.



การพัฒนาเครื่องขึ้นรูปภาชนะจากเศษอ้อยที่ควบคุมการทำงานด้วยระบบ
พีแอลซี

The Development of a Container Molding Machine from Sugarcane Residue
Controlled by a PLC System

นัฐพงษ์ ทองปาน*

Natthapong Thongpan

ลัดดาวัลย์ จำปา**

Laddawan Champa

นันทวัน หัตถมาศ***

Nanthawan Hadthamard

มลฤดี โอปมาวุฒิกุล****

Monluedee Opamawutthikul

กัญญา ภัทรกุลอมร*****

Kanya Phattakunamon

พรอารีย์ ศิริผลกุล*****

Pornarree Siriphollakul

Received : July 4, 2023

Revised : September 5, 2023

Accepted : December 1, 2023

บทคัดย่อ

การสร้างมูลค่าให้เศษอ้อยที่เป็นวัสดุเหลือใช้ในไร่เป็นแนวทางหนึ่งที่จะลดการเกิดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) จากการเผาเศษอ้อยได้ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเครื่องขึ้นรูปภาชนะที่ควบคุมการทำงานด้วยระบบพีแอลซี ออกแบบแม่พิมพ์ 4 แบบ สำหรับขึ้นรูปภาชนะใส่อาหารว่าง ภาชนะใส่ผลไม้ ภาชนะใส่กระดาษ และภาชนะใส่ไข่ ส่วนผสมของเยื่อกระดาษจากเศษอ้อยประกอบด้วย ชุยกะดาษ:เส้นใยใบอ้อย:เส้นใยขานอ้อย ในอัตราส่วน 1:1:1 ซึ่งใช้ในการขึ้นรูปภาชนะทั้ง 4 แบบ เมื่อทดสอบสภาวะที่เหมาะสมแล้ว กำหนดให้การขึ้นรูปใช้สภาวะเดียวกัน คือ แรงดันลม 6 บาร์ อุณหภูมิแม่พิมพ์ 140 องศาเซลเซียส ระยะเวลาการเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็ว 0.004 เมตรต่อวินาที และเวลาดึงกระดาษบนแม่พิมพ์นาน 60 วินาที จะได้ภาชนะที่มีรูปทรงสมบูรณ์ภายในเวลา 145 วินาที มีความหนา 1.068-1.689 มิลลิเมตร ความชื้นร้อยละ 6.08-6.62 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงเท่ากับ 773.10-963.80 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร และมีค่าความต้านทานต่อแรงกดเท่ากับ 1,375.20-1,476.30 กิโลปาสคาล ซึ่งภาชนะทั้ง 4 แบบ สามารถใช้ในการรองรับบรรจุภัณฑ์ได้จริง โดยเครื่องต้นแบบนี้ใช้ระยะเวลาคืนทุนภายใน 5 เดือน 21 วัน ด้วยต้นทุนการใช้งานเครื่องขึ้นรูปภาชนะ 1.98-2.02 บาทต่อชิ้น

จากผลงานวิจัยนี้สามารถสร้างความต้องการใช้เศษอ้อยได้ตั้งแต่ต้นน้ำจนถึงปลายน้ำ จึงมีแนวโน้มที่จะช่วยลดการเผาเศษอ้อยได้ในอนาคต

คำสำคัญ : เครื่องขึ้นรูปภาชนะ / ภาชนะ / ระบบพีแอลซี / เศษอ้อย

*อาจารย์ประจำหลักสูตรระบบอัตโนมัติและหุ่นยนต์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏกาญจนบุรี
Lecturer in Automation and Robotics Technology, Faculty of Industrial Technology, Kanchanaburi
Rajabhat University(Corresponding Author) e-mail: natthaphong@kru.ac.th

**อาจารย์ประจำหลักสูตรเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏกาญจนบุรี
Lecturer in Industrial Technology, Faculty of Industrial Technology, Kanchanaburi Rajabhat
University

***อาจารย์ประจำหลักสูตรเทคโนโลยีสมัยใหม่และการจัดการพืช คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏ
กาญจนบุรี
Lecturer in Modern Technology for Plant Management, Faculty of Science and Technology,
Kanchanaburi Rajabhat University

****อาจารย์ประจำหลักสูตรวิทยาศาสตร์ทั่วไป คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏกาญจนบุรี
Lecturer in General Science, Faculty of Education, Kanchanaburi Rajabhat University

*****อาจารย์ประจำหลักสูตรคหกรรมศาสตร์ศึกษา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏกาญจนบุรี
Lecturer in Home Economics Education, Faculty of Science and Technology, Kanchanaburi Rajabhat
University

*****อาจารย์ประจำหลักสูตรวิศวกรรมเกษตร คณะเกษตรศาสตร์และทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล
ตะวันออก
Lecturer in Agricultural Engineering, Faculty of Agricultural and Nature Resource, Rajamangala
University of Technology Tawan-ok

ABSTRACT

Enhancing the value of sugarcane residue as a reusable material in plantations represents a viable strategy to mitigate the generation of fine particulate matter (PM 2.5) resulting from the incineration of sugarcane residue. The objective of this research is to develop a container molding machine controlled by a programmable logic controller (PLC) system, designed with four molds for shaping trays intended for snacks, fruit, seedlings, and egg storage. The pulp composition derived from sugarcane residue encompasses paper fluff, sugarcane leaf fibers, and bagasse fibers in a ratio of 1:1:1, forming the basis for all four container types. Under standardized molding conditions, including 6-bar air pressure, a mold temperature of 140 degrees Celsius, a cylinder moving at a speed of 0.004 meters per second, and a 60-second mold dwell time, the resulting containers exhibit complete desired shapes within a 145-second timeframe. These containers possess a thickness ranging from 1.068 to 1.689 millimeters, moisture content of 6.08-6.62 percent, tensile strength of 77.31-96.38 Newtons per square centimeter, and pressure resistance between 137.52-147.63 Newtons per square centimeter. The prototype machine recouped its investment within 5 months and 21 days, with a cost of 1.98-2.02 baht per piece for utilizing the container molding machine. The research findings indicate the potential to stimulate demand for sugarcane residue throughout the entire supply chain, from upstream to downstream, thereby suggesting a prospective contribution to reducing the incineration of sugarcane residue in the future.

Keywords : Container Molding Machine / Container / PLC System / Sugarcane Residue

บทนำ

จากวิถีชีวิตที่เปลี่ยนไปของประชากรเวลาที่มีอยู่จำกัดในสังคมที่รีบเร่ง ผู้บริโภคส่วนใหญ่มักจำเป็นต้องพึ่งพาร้านสะดวกซื้อที่มีอาหารปรุงสำเร็จวางขายหากแต่ก็เกิดผลกระทบต่อสุขภาพจากอัตราการบริโภคที่ขยายตัวขึ้นอย่างต่อเนื่องผนวกกรรมเข้ามา จึงทำให้เกิดปัญหาสะสมทางด้านสิ่งแวดล้อมเกี่ยวกับการจัดการขยะบรรจุภัณฑ์แบบใช้ครั้งเดียวทิ้ง (กระวี, 2562) เป็นจำนวนมากและยากต่อการกำจัดและทำลาย

แนวนโยบายของภาครัฐในประเทศซึ่งมีการสนับสนุนให้นำวัสดุธรรมชาติที่สามารถขึ้นรูปมาเป็นภาชนะบรรจุเพื่อใช้ทดแทนการใช้พลาสติก เพราะมีความสามารถในการย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradation) จะได้ช่วยขจัดปัญหาที่กล่าวมาข้างต้นได้อย่างตรงจุด (สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, 2565) ประเทศไทยเองก็เป็นประเทศเกษตรกรรมที่มีการผลิตเพราะปลูกพืชอาหารที่หลากหลาย เช่น ข้าว มันสำปะหลัง ยางพารา และอ้อย เป็นต้น โดยมีนักวิจัยจำนวนมากที่พยายามคิดค้นเทคโนโลยีที่จะขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ธรรมชาติให้นำมาใช้ประโยชน์ได้กว้างขวาง หากแต่ติดปัญหาตรงที่การขึ้นรูป

ผลิตภัณฑ์ธรรมชาติมาเป็นบรรจุภัณฑ์ที่มีปัจจัยสำคัญมากมาย เช่น อุณหภูมิ ความดัน ความหนาชิ้นงาน แรงกด ชนิดของแม่แบบ รวมถึงวัสดุธรรมชาติต้นทาง (สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย, 2564)

ในปี 2560/61 ประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกอ้อย 11,542,550 ไร่ ส่วนใหญ่เป็นอ้อยโรงงานที่ถูกตัดจำหน่ายให้แก่โรงงานผลิตน้ำตาลทราย ประเทศไทยจึงมีปริมาณการส่งออกน้ำตาลทรายมากเป็นอันดับ 2 ของโลก อย่างไรก็ตาม ส่วนที่นำมาผลิตน้ำตาลทรายได้จะใช้เพียงลำต้นอ้อยที่ให้น้ำคั้นเท่านั้น ยอดและใบอ้อยจะถูกตัดแต่งทิ้งก่อนเข้าสู่กระบวนการหีบอ้อย คิดเป็นประมาณ 1 ใน 6 ของปริมาณผลผลิตอ้อยทั้งหมด และส่วนใหญ่เป็นเศษวัสดุเหลือใช้ที่ถูกทิ้งไว้ในไร้อ้อย มีเพียงบางส่วนติดไปกับลำต้นอ้อยตอนที่ส่งเข้าโรงงาน (สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย, 2561) สำหรับการจัดการยอดและใบอ้อยนั้น โรงงานน้ำตาลทรายบางแห่งจะนำไปหมักเป็นวัสดุปรับปรุงคุณภาพดิน ในส่วนของเกษตรกรยังไม่มีความรู้หรือแนวทางการใช้ประโยชน์อื่น นอกจากการไถกลบในไร่เพื่อเป็นปุ๋ย แต่เนื่องจากเศษอ้อยมีปริมาณมากเกินไป เกษตรกรจึงเผาทิ้งจนเกิดฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5) กลายเป็นปัญหามลพิษทางอากาศที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพของคนในชุมชน

งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้เศษอ้อยที่ได้จากใบอ้อยแห้งและชานอ้อยที่ผ่านกระบวนการหีบอ้อยจากโรงงานน้ำตาล เป็นวัสดุธรรมชาติต้นทางในการนำมาขึ้นรูปเป็นภาชนะบรรจุ จึงได้มีการสร้างเครื่องขึ้นรูปภาชนะบรรจุจากเศษอ้อย โดยทั่วไปแล้วการพัฒนาเครื่องขึ้นรูปภาชนะจากวัสดุธรรมชาติ นิยมใช้หลักการอัดขึ้นรูปร้อน (Hot Compression Process) ด้วยการสร้างแรงกดลงมากกระทำกับชุดรับแรงกดขณะที่ยังร้อน เพื่อให้วัสดุธรรมชาติขึ้นรูปตามแม่พิมพ์ ซึ่งมักเป็นวัสดุธรรมชาติที่อยู่ในสภาพเปียก เครื่องขึ้นรูปภาชนะจึงมักมีการติดตั้งชุดสูญญากาศเพื่อดูดน้ำออกจากแม่พิมพ์ ระหว่างการใช้อุณหภูมิสูงเพื่อให้วัสดุอ่อนตัวร่วมกับแรงกดที่มาก วัสดุจะเกิดเป็นรูปทรงตามแม่พิมพ์ ในการขึ้นรูปภาคโคมจากเส้นใยหญ้าเนเปียร์ ใช้อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส ร่วมกับความดัน 30 บาร์ กดนาน 15 นาที (จารุณี และปริญญ์, 2562) การพัฒนาเครื่องขึ้นรูปภาชนะที่ใช้เตาแก๊สเป็นแหล่งพลังงานเพื่อให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์ ร่วมกับการใช้กำลังอัดไฮดรอลิกจากคันโยก เพื่อขึ้นรูปจานและถ้วยจากกาบหมากและกาบกล้วย (ภัทรพงศ์ และคนอื่นๆ, 2562) ปัจจุบันมีการพัฒนากลไกการทำงานของเครื่องให้สะดวกสบาย ใช้เวลาขึ้นรูปน้อยลง และควบคุมสภาวะการทำงานให้แม่นยำยิ่งขึ้น ในการขึ้นรูปจานและถ้วยจากกาบหมาก (สมเกียรติ และธมยันตี, 2563) ใบบัว ใบตอง กาบหมาก ใบไม้ และใบผักตบชวา มีการนำระบบพีแอลซี (Programmable Logic Control: PLC) มาใช้ในการควบคุมการทำงานของระบบชุดอัดขึ้นรูป และควบคุมอุณหภูมิของแม่พิมพ์ให้คงที่ยิ่งขึ้น โดยอุณหภูมิการขึ้นรูปวัสดุธรรมชาติเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 120-150 องศาเซลเซียส (ธนากร และจิตติมา, 2564)

จากแนวคิดเบื้องต้นที่ต้องการต่อยอดการใช้ประโยชน์กระดาษจากเศษอ้อย เพื่อพัฒนาเครื่องขึ้นรูปภาชนะบรรจุ อาทิ ถาดใส่อาหารวุ้นที่ไม่สัมผัสกับอาหารโดยตรง โดยใช้กระดาษจากเศษอ้อยเป็นวัสดุขึ้นรูปด้วยการอัดขึ้นรูปร้อน และนำระบบพีแอลซีมาควบคุมสภาวะการทำงานของเครื่อง

วิธีดำเนินการวิจัย

การพัฒนาเครื่องขึ้นรูปภาชนะจากเศษอ้อยควบคุมการทำงานด้วยระบบพีแอลซี ตั้งกรอบแนวคิดตามความต้องการของผู้ประสงค์จะใช้งานคือ ใช้พลังงานไฟฟ้า มีขนาดที่เหมาะสม เคลื่อนย้ายง่าย มีระบบป้องกัน

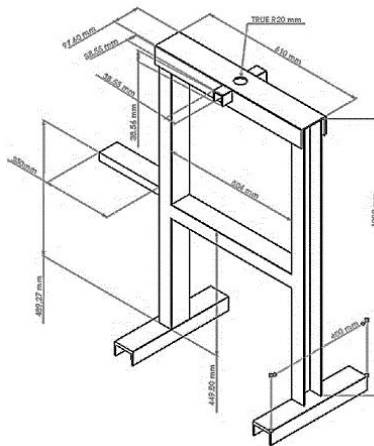
หรือเดือนอันตรายระหว่างการใช้งาน และรองรับการขึ้นรูปภาชนะแบบอื่นได้ จากนั้นผู้วิจัยดำเนินงานตามขั้นตอนนี้

ขั้นตอนที่ 1 การออกแบบ และสร้างเครื่องขึ้นรูปภาชนะจากเศษอ้อย

เครื่องขึ้นรูปภาชนะจากเศษอ้อยถูกออกแบบให้มีส่วนประกอบที่สำคัญ 3 ส่วน ซึ่งแต่ละส่วนมีการออกแบบโครงสร้าง และกลไกการทำงานแตกต่างกัน มีรายละเอียดดังนี้

1. การออกแบบ และสร้างโครงสร้างเครื่องขึ้นรูปภาชนะ

ตัวโครงสร้างเครื่องขึ้นรูปทำจากเหล็กตัวซี ขนาดของตัวเครื่องสูง 1,040 มิลลิเมตร กว้าง 570 มิลลิเมตร และฐานมีความยาว 400 มิลลิเมตร ติดตั้งล้อพลาสติกขนาด 63.5 มิลลิเมตร จำนวน 4 ล้อ การกดอัดเป็นแบบอัดจากด้านบนลงสู่ด้านล่าง คานด้านบนติดตั้งกระบอบสูบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร ความยาวก้านสูบ 250 มิลลิเมตร ด้านบนมีการติดตั้งเสาประคองแม่พิมพ์กดอัด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 22 มิลลิเมตร ความยาว 460 มิลลิเมตร เพื่อป้องกันแม่พิมพ์หมุนตัวขณะกดอัดขึ้นรูป ด้านซ้ายมือของโครงสร้างติดตั้งตู้ควบคุมการทำงานของเครื่อง ด้านล่างมีคานรองรับการติดตั้งแม่พิมพ์ตัวเมีย ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 แบบ 2 มิติ ของโครงสร้างเครื่องขึ้นรูปภาชนะจากเศษอ้อย

2. การออกแบบและติดตั้งระบบควบคุมการทำงานของเครื่องขึ้นรูปภาชนะ

2.1 ระบบพีแอลซี

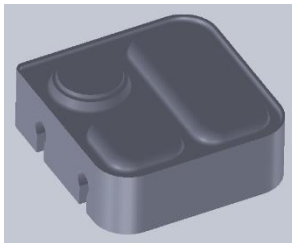
ระบบพีแอลซีทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของเครื่องขึ้นรูป ประกอบด้วย 1) อุปกรณ์ส่งสัญญาณเข้า ทำหน้าที่ส่งสัญญาณระหว่างช่องสัญญาณภาครับ ภายในอุปกรณ์จะมีสวิทช์ และลิมิตสวิทช์เป็นส่วนประกอบภายในระบบ และ 2) อุปกรณ์ภาคส่งสัญญาณออก ทำหน้าที่รับสัญญาณมาจากพีแอลซี ส่งผลให้โซลินอยด์วาล์วตัดต่อลมทำงานไปยังกระบอบสูบ ซึ่งอุปกรณ์ภายในภาคส่งสัญญาณออกจะมีโซลินอยด์วาล์ว 5/2 และหลอดไฟแสดงสถานะการทำงาน ทั้งนี้ได้เชื่อมต่อสายไฟจากแหล่งจ่ายเข้าระบบพีแอลซีภาคส่งสัญญาณออกที่ขั้ว Com1 และเชื่อมต่อสายสัญญาณของจอแสดงผลแบบทัชสกรีนเข้ากับขั้ว RS 422 ของพีแอลซี

2.2 ระบบทำความร้อน

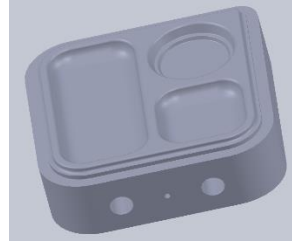
ระบบทำความร้อน ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของชุดทำความร้อนที่แม่พิมพ์ ประกอบด้วย 1) ฮีตเตอร์ ทำหน้าที่สร้างความร้อนให้กับแม่พิมพ์ 2) เซนเซอร์อุณหภูมิ ทำหน้าที่วัดอุณหภูมิและส่งสัญญาณกลับไปยังเครื่องควบคุมอุณหภูมิ เพื่อประมวลผลและแสดงผลค่าของอุณหภูมิที่อ่านได้ และ 3) เครื่องควบคุมอุณหภูมิ ทำหน้าที่รับสัญญาณจากเซนเซอร์ เพื่อควบคุมอุณหภูมิของฮีตเตอร์ให้อยู่ในค่าที่ตั้งไว้ หากมีอุณหภูมิสูงเกินค่าที่ตั้งไว้ เครื่องควบคุมอุณหภูมิจะสั่งให้ตัดกระแสไฟฟ้าที่ป้อนไปยังฮีตเตอร์ และสั่งให้ต่อกระแสไฟฟ้าเมื่อค่าอุณหภูมิ ต่ำกว่าค่าที่กำหนด โดยมี 4) โซลิดสเตตรีเลย์ ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ในการตัดและต่อวงจร

3. การออกแบบและสร้างแม่พิมพ์ขึ้นรูป

ชุดแม่พิมพ์ขึ้นรูปประกอบด้วย แม่พิมพ์ส่งแรงกดและแม่พิมพ์รับแรงกด อย่างละ 1 ชิ้น ซึ่งแม่พิมพ์ขึ้นรูปที่ออกแบบมีจำนวนทั้งสิ้น 4 แบบ ได้แก่ 1) ถาดใส่อาหารว่าง มีขนาดของแม่พิมพ์ส่งแรงกดและแม่พิมพ์รับแรงกด (กว้างxยาวxสูง) เท่ากับ 220x250x45 มิลลิเมตร แสดงดังภาพที่ 2 2) ถาดใส่ผลไม้ มีขนาดของแม่พิมพ์ส่งแรงกดและแม่พิมพ์รับแรงกด (กว้างxยาวxสูง) เท่ากับ 178x218x45 มิลลิเมตร แสดงดังภาพที่ 3 3) ถาดเพาะกล้า มีขนาดของแม่พิมพ์ส่งแรงกดและแม่พิมพ์รับแรงกด (กว้างxยาวxสูง) เท่ากับ 120x160x110 มิลลิเมตร และ 140x180x90 มิลลิเมตร ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 4 และ 4) ถาดใส่ไข่ มีขนาดของแม่พิมพ์ส่งแรงกดและแม่พิมพ์รับแรงกด (กว้างxยาวxสูง) เท่ากับ 124x264x117 มิลลิเมตร แสดงดังภาพที่ 5

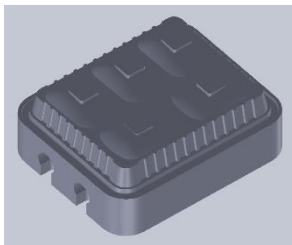


(ก)

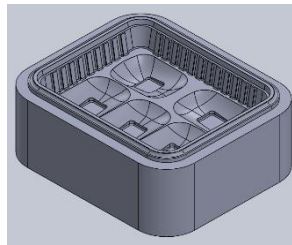


(ข)

ภาพที่ 2 แม่พิมพ์ส่งแรงกด (ก) และแม่พิมพ์รับแรงกด (ข) ของถาดใส่อาหารว่าง

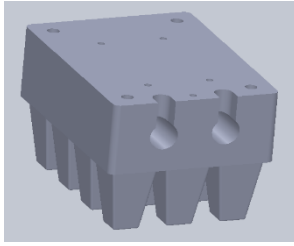


(ก)

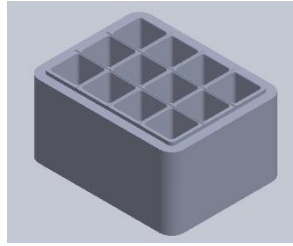


(ข)

ภาพที่ 3 แม่พิมพ์ส่งแรงกด (ก) และแม่พิมพ์รับแรงกด (ข) ของถาดใส่ผลไม้



(ก)

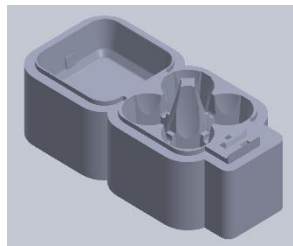


(ข)

ภาพที่ 4 แม่พิมพ์ส่งแรงกด (ก) และแม่พิมพ์รับแรงกด (ข) ของถาดเพาะกล้า



(ก)



(ข)

ภาพที่ 5 แม่พิมพ์ส่งแรงกด (ก) และแม่พิมพ์รับแรงกด (ข) ของกล่องใส่ไข่

ซึ่งแม่พิมพ์แต่ละแบบได้แนวความคิดมาจากต้นแบบที่ใช้งานอยู่ในท้องตลาดโดยได้ศึกษาและทำการคัดเลือกต้นแบบผลิตภัณฑ์ที่ไม่ได้สัมผัสกับอาหารโดยตรงเพื่อลดขั้นตอนในการทำงานเกี่ยวกับมาตรฐานด้านความปลอดภัยต่อผู้บริโภค ทั้งนี้ผู้วิจัยได้ทำการศึกษผลิตภัณฑ์ที่แปลกใหม่และใช้กันอยู่ในชีวิตประจำวันเพื่อตอบสนองต่อกระแสด้านความต้องการในการใช้งานภาชนะและบรรจุภัณฑ์รักษ์โลก

ขั้นตอนที่ 2 การพัฒนาเครื่องขึ้นรูปภาชนะจากเศษอ้อย

ส่วนที่ 1 งานโครงสร้างของเครื่องขึ้นรูปภาชนะด้วยระบบนิวเมติกส์ไฟฟ้า

(1) ตัดเหล็กตัว C ขนาด (กว้างXยาว) 3X2 นิ้ว ให้ได้ความยาว 1,000 มิลลิเมตร จำนวน 2 ชิ้น ความยาว 400 มิลลิเมตร จำนวน 2 ชิ้น และความยาว 500 มิลลิเมตร จำนวน 1 ชิ้น

(2) ตัดเหล็กตัว C ขนาด (กว้างXยาว) 4X3 นิ้ว ให้ได้ความยาว 600 มิลลิเมตร จำนวน 1 ชิ้น

(3) เชื่อมประกอบโดยกระบวนการเชื่อมอาร์กโลหะด้วยมือ

ส่วนที่ 2 งานสร้างแม่พิมพ์ของเครื่องขึ้นรูปภาชนะด้วยระบบนิวเมติกส์ไฟฟ้า ใช้เครื่องกัดซีเอ็นซีกัดแท่งอลูมิเนียมอัลลอยด์ที่มีความหนา 100 มิลลิเมตร (กว้างXยาว) 200X200 มิลลิเมตร ให้มีรูปทรงตามภาชนะทั้ง 4 แบบ ได้แก่ ถาดใส่อาหารว่าง ถาดใส่ผลไม้ ถาดเพาะกล้า และกล่องใส่ไข่ ตามที่ออกแบบแม่พิมพ์ไว้เบื้องต้น

ส่วนที่ 3 งานสร้างตู้ควบคุมเครื่องอัดขึ้นรูปภาชนะด้วยระบบนิวเมติกส์ไฟฟ้า เจาะช่องที่หน้าตู้ควบคุมเพื่อติดตั้งอุปกรณ์ควบคุม ได้แก่ หน้าจอแสดงผลแบบทัชสกรีน สวิตช์ปุ่มกด หลอดไฟแสดงสถานะการ

ทำงาน อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ สวิตช์ฉุกเฉิน อุปกรณ์พีแอลซี และติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมนิวเมติกส์โซลินอยด์ วาล์ว แบบ 5/2 พร้อมต่อท่อลมและสายไฟเข้ากับพีแอลซี

ส่วนที่ 4 งานติดตั้งอุปกรณ์เครื่องขึ้นรูปภาชนะด้วยระบบนิวเมติกส์ไฟฟ้า

(1) ติดตั้งกระบอกสูบแบบทำงาน 2 ทิศทาง เข้าตัวโครงสร้างเครื่องขึ้นรูปภาชนะ โดยติดตั้งไว้ ด้านบนของโครงสร้าง

(2) ติดตั้งฐานรองและแม่พิมพ์ตัวเมีย โดยติดตั้งแม่พิมพ์ตัวเมียในตำแหน่งด้านล่างของเครื่องอัด

(3) ติดตั้งแม่พิมพ์ตัวผู้เข้ากับชุดหัวจับ

ขั้นตอนที่ 3 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปภาชนะของเครื่องขึ้นรูปภาชนะจากเศษอ้อย

ส่วนผสมของเยื่อกระดาษจากเศษอ้อยประกอบด้วย ขุยกระดาษ:เส้นใยใบอ้อย:เส้นใยชานอ้อย ในอัตราส่วน 1:1:1 (มลฤดี, 2565) ที่ซึ่งนำมาศึกษาสภาวะในการขึ้นรูป 1) การเตรียมขุยกระดาษมีวิธีการเตรียม คือ นำเศษกระดาษเอ 4 มาแช่น้ำหลังจากนั้นนำมาปั่นให้ละเอียด แยกเตรียมเป็นส่วนผสมในอัตราส่วน 1/3 ส่วน 2) วิธีการเตรียมเยื่อกระดาษจากเศษใบอ้อย คือ ใช้เศษใบอ้อยแห้งและชานอ้อยแห้ง ในอัตราส่วน 1:1 นำแต่ละส่วนมาผ่านการย่อยด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 10 จะได้เส้นใยใบอ้อยและเส้นใยชานอ้อยที่ถูกกำจัดลิกนิน และเฮมิเซลลูโลสออกไป ให้เหลือเพียงเซลลูโลสไว้ ซึ่งเส้นใยทั้ง 2 ชนิดนี้ มีลักษณะโดยรวมเหมือนกัน คือ เป็นเส้นใยที่มีขนาดเล็ก แข็ง และมีสีน้ำตาล สำหรับการขึ้นรูปภาชนะใส่อาหารว่าง และภาชนะใส่ผลไม้ทำการขึ้นรูปด้วยแผ่นกระดาษ ส่วนการขึ้นรูปภาชนะกระดาษ และกล่องใส่ไข่จะต้องทำการขึ้นรูปจากเศษอ้อย ซึ่งมีวิธีการขึ้นรูปและการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปภาชนะ ดังนี้

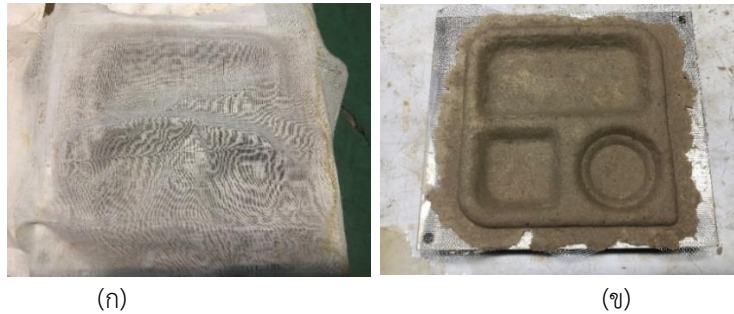
1. วิธีการขึ้นรูป

1.1 การขึ้นรูปเปียง

(1) ผสมขุยกระดาษ :ใบอ้อย:ชานอ้อย ในอัตราส่วน 1:1:1 (อัตราส่วนของเส้นใย 1 ส่วน มีน้ำหนักเท่ากับ 70 กรัม) จากนั้นนำมาตีผสมเป็นเยื่อเศษอ้อยสำหรับใช้ทดสอบการขึ้นรูปภาชนะกระดาษและกล่องใส่ไข่

(2) นำตะแกรงสแตนเลสขนาด 40 เมช (Mesh) กดบนแม่พิมพ์ที่อยู่บนแท่นกดนิวเมติกส์ เพื่อให้ตะแกรงเปลี่ยนรูปร่างตามแบบแม่พิมพ์

(3) นำตะแกรงออกจากแม่พิมพ์แล้วนำเยื่อเศษอ้อยเทลงบนตะแกรง เกลี่ยเยื่อ ให้กระจายทั่วตัวตะแกรง แล้วนำผ้าขาวบางมาปิดทับเยื่อด้านบน เพื่อป้องกันเยื่อกระดาษติดแม่พิมพ์ขณะขึ้นรูป ภาพที่ 6 (ก) หลังจากการขึ้นรูปจะได้ชิ้นงาน ภาพที่ 6 (ข)



ภาพที่ 6 การขึ้นรูปเยื่อกระดาษแบบเปียก (ก) การเทเยื่อบนตะแกรง (ข) การขึ้นรูปภาชนะแบบเปียก

1.2 การขึ้นรูปแห้ง

- (1) นำแผ่นเยื่อกระดาษที่ได้จากการขึ้นรูปเปียกมาวางลงในแม่พิมพ์ขึ้นรูปร้อน
- (2) ปรับตั้งอุณหภูมิของแม่พิมพ์และระยะเวลาในการกดค้างตำแหน่งของกระบอกสูบที่เครื่องควบคุมอุณหภูมิ ทั้งนี้อุณหภูมิที่ใช้ขึ้นรูปต้องกำหนดค่าให้เท่ากันทั้งแม่พิมพ์ตัวบนและตัวล่าง
- (3) กดปุ่มเริ่มการทำงานของเครื่อง ระบบจะทำงานอัตโนมัติตั้งแต่ขั้นตอนการอัดขึ้นรูปจนกระทั่งได้ภาชนะที่มีลักษณะแห้ง

(4) นำภาชนะที่ขึ้นรูปเสร็จแล้วออกจากแม่พิมพ์ และนำมาตัดแต่งขอบของภาชนะให้เรียบร้อย

2. การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปภาชนะ

งานวิจัยนี้ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปภาชนะจำนวน 3 ปัจจัย คือ แรงดัน 3 ระดับ ได้แก่ 4 5 และ 6 บาร์ อุณหภูมิ 5 ระดับ ได้แก่ 110 120 130 140 และ 150 องศาเซลเซียส และระยะเวลาในการกดค้างของกระบอกสูบ 4 ระดับ ได้แก่ 60 70 80 และ 90 วินาที

2.1 การศึกษาระดับอุณหภูมิและระยะเวลาการกดค้างของกระบอกสูบที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูป

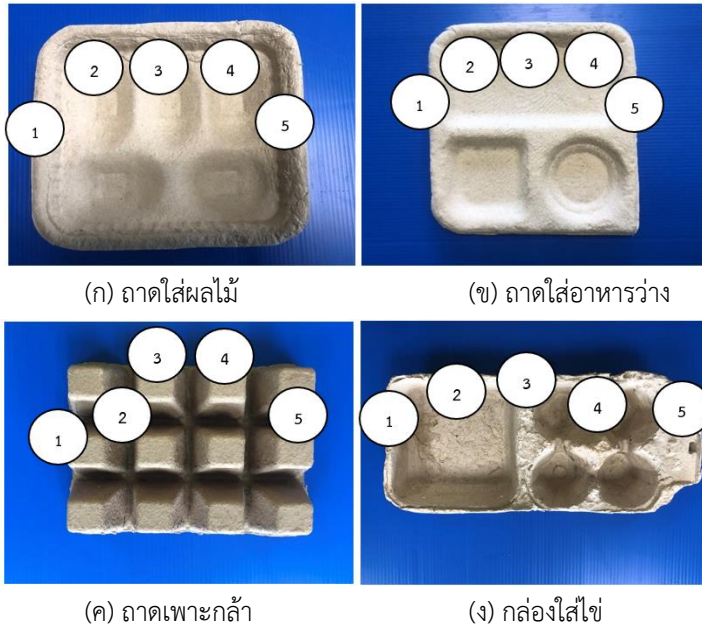
การศึกษาอุณหภูมิ ที่ระดับ 110 120 130 140 และ 150 องศาเซลเซียส และระยะเวลาการกดค้างกระบอกสูบ ที่ระยะเวลา 60 70 80 และ 90 วินาที เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปภาชนะทั้ง 4 แบบ โดยทำการทดสอบจำนวน 5 ซ้ำต่อแบบ

มีรายละเอียดการดำเนินงานดังนี้

- (1) ค่าความชื้นของภาชนะ อ้างอิงวิธี AOAC (2000) Methods 938.08 (AOAC, 2000)
- (2) พิจารณาและประเมินคุณภาพโดยรวมของภาชนะ ได้แก่ ความสมบูรณ์ของชิ้นงาน การคืนรูป การแตกร้าว และสี แบ่งเป็นคะแนน 3 ระดับ

(3) คัดเลือกระดับอุณหภูมิและระยะเวลาการกดค้างของกระบอกสูบสำหรับภาชนะแต่ละแบบ โดยคัดเลือกจากสภาวะที่ได้รับคะแนนสูงที่สุด และทำให้ภาชนะมีความชื้นน้อยกว่าร้อยละ 10 เพื่อให้เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน มผช. 1557/2563

(4) ความหนาเฉลี่ยของภาชนะ วัดด้วยไมโครมิเตอร์ที่มีช่วงการวัด 0-25 มิลลิเมตร ค่าความละเอียด 0.001 มิลลิเมตร ทั้ง 5 ตำแหน่งของภาชนะใส่อาหารว่าง ภาชนะใส่ผลไม้ ภาชนะเพาะกล้า และกล่องใส่ไข่ หลังจากการขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิและระยะเวลาการกดค้ำของกระบอกสูบที่ผ่านการคัดเลือกจากข้อ (3) ข้างต้น แต่จะนำมาศึกษาพร้อมกับการปัจจัยแรงดันที่ 4 5 และ 6 บาร์ จากนั้นเปรียบเทียบความหนาเฉลี่ยของภาชนะทั้งหมดเพื่อคัดเลือกแรงดันที่ทำให้ภาชนะแต่ละแบบมีความหนาน้อยที่สุด แสดงดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 ตำแหน่งการตรวจสอบความหนาของภาชนะทั้ง 4 แบบ

2.2 การศึกษาประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องขึ้นรูปภาชนะ

นำค่าแรงดัน อัตราเร็วของการเคลื่อนที่ของกระบอกสูบ อุณหภูมิ และระยะเวลาการกดค้ำของกระบอกสูบ ที่ผ่านการคัดเลือกจากขั้นตอนต่างๆ เพื่อนำมาทดลองขึ้นรูปกับภาชนะทั้ง 4 แบบ จำนวน 5 ชิ้นต่อแบบ และตรวจสอบคุณภาพของภาชนะที่ขึ้นรูปแล้ว ด้วยคุณสมบัติเชิงกลของภาชนะในระบบมาตรฐานระหว่างประเทศที่ใช้ในการทดสอบผลิตภัณฑ์ ดังนี้ (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2550)

ก. ความต้านทานต่อแรงดึงแบบอัตราการยืดตัวคงที่ (Constant rate of elongation) ตามมาตรฐาน ISO 1924-2:2008 ของชิ้นงานที่ถูกเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 27 ± 1 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 65 ± 2 เป็นเวลาไม่น้อยกว่า 24 ชั่วโมงก่อนนำมาสุ่มชิ้นงานจำนวน 5 ชิ้นต่อภาชนะ 1 แบบ กำหนดระยะห่างระหว่างตัวหนีบเท่ากับ 100 มิลลิเมตร

ข. ความต้านแรงกด โดยเครื่อง Texture Analyzer รุ่น TA.XT. plus ตามมาตรฐาน ISO 12192:2011 ทำการสุ่มชิ้นงานมา 5 ชิ้นต่อภาชนะ 1 แบบ ตัดตัวอย่างให้มีความกว้าง 1.5 เซนติเมตร มาวัดค่าความต้านทานแรงดึง มีระยะห่างระหว่างตัวหนีบเท่ากับ 100 มิลลิเมตร

2.3 การศึกษาเชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมของเครื่องขึ้นรูปภาชนะจากเศษอ้อย

นำค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นในการดำเนินงานทั้งหมดมาวิเคราะห์มูลค่าเชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมของการใช้งานเครื่องขึ้นรูปภาชนะนี้ เพื่อให้เกิดเป็นภาชนะทั้ง 4 แบบ ดังรายการต่อไปนี้

- (1) ค่าใช้จ่ายในการทำงานของเครื่องขึ้นรูปภาชนะจากเศษอ้อย
- (2) ต้นทุนต่อหน่วยในการทำงานของเครื่องขึ้นรูปภาชนะจากเศษอ้อย
- (3) ระยะเวลาการคืนทุนของเครื่องขึ้นรูปภาชนะจากเศษอ้อย

ผลการวิจัย

1. ผลการพัฒนาเครื่องขึ้นรูปภาชนะจากเศษอ้อย

การออกแบบ กำหนดขนาด และกำหนดตำแหน่งของอุปกรณ์การทำงานต่างๆ ของเครื่องขึ้นรูปภาชนะจากเศษอ้อยที่ควบคุมการทำงานด้วยระบบพีแอลซี ถูกออกแบบโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป และแสดงผลเป็นภาพ 3 มิติ จากนั้นดำเนินการจัดทำเครื่องขึ้นรูปภาชนะตามแบบที่เขียนแบบไว้ แสดงดังภาพที่ 8

1.1 ผลการพัฒนาโครงสร้างของเครื่องขึ้นรูปภาชนะจากเศษอ้อย

เครื่องขึ้นรูปภาชนะจากเศษอ้อย ประกอบด้วยส่วนประกอบสำคัญ 3 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1 ส่วนโครงสร้างเครื่อง: ลักษณะเครื่องเป็นทรงสูง มีขนาด (กว้างxยาวxสูง) เท่ากับ 60x40x112 เซนติเมตร โครงสร้างหลักทำจากเหล็กตัว C ขนาด (กว้างxยาว) 3x2 นิ้ว ด้วยความหนา 3.2 มิลลิเมตร มีล้อเลื่อนขนาด 2.5 นิ้ว เป็นแบบพลาสติกแข็ง ติดตั้งที่ฐานเครื่องทั้ง 4 มุมการทำงานของเครื่องกดกระแทกบนแม่พิมพ์ในแนวตั้งจากด้านบนลงสู่ด้านล่าง ด้วยการทำงานของกระบอกสูบลัดที่ติดตั้งไว้ที่ด้านบนของเครื่อง

ส่วนที่ 2 ส่วนของชุดอัดขึ้นรูปภาชนะ ประกอบไปด้วย 2 ส่วนย่อย ได้แก่

(1) กระบอกสูบลัด: เป็นกระบอกสูบแบบทำงาน 2 ทิศทาง จำนวน 1 กระบอก เคลื่อนที่เข้าออกด้วยแรงลม ภายในมีลูกสูบที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร ระยะความยาวก้านสูบ 250 มิลลิเมตร ก้านสูบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร

(2) ฐานยึดแม่พิมพ์: เป็นฐานสำหรับยึดติดกับส่วนของแม่พิมพ์ วัสดุทำจากเหล็ก ประกอบด้วยฐานยึดแม่พิมพ์ตัวบนและแม่พิมพ์ตัวล่าง อยางละ 1 แผ่น แต่ละแผ่นมีขนาดเท่ากันคือ (กว้างxยาว) 250x250 มิลลิเมตร ความหนา 8 มิลลิเมตร ตำแหน่งของฐานยึดแม่พิมพ์ตัวบนจะยึดติดกับส่วนปลายของกระบอกสูบ ส่วนฐานยึดแม่พิมพ์ตัวล่างถูกติดตั้งให้สูงจากคานของโครงสร้างประมาณ 13 เซนติเมตร ยึดด้วยสลักเกลียว จำนวน 9 ตัว

ส่วนที่ 3 ส่วนของตู้ควบคุมไฟฟ้า ประกอบด้วยส่วนประกอบต่างๆ ดังนี้

(1) ตู้ควบคุมไฟฟ้า ขนาด (กว้างxยาวxสูง) 570x690x250 มิลลิเมตร ความหนา 1 มิลลิเมตร

(2) พีแอลซี จำนวน 1 เครื่อง มีช่องดิจิตอลอินพุต 16 ช่อง ช่องดิจิตอลเอาต์พุตชนิดรีเลย์ 14 ช่อง แหล่งจ่ายไฟฟ้าภาคกำลังขนาด 220 VAC

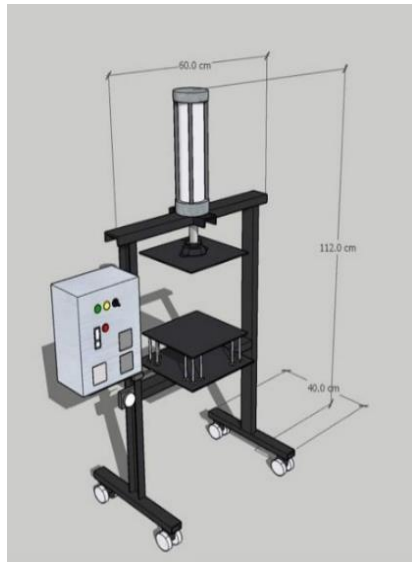
(3) โซลินอยด์วาล์ว 2 คอยด์ แบบ 5/2 จำนวน 1 ตัว พอร์ตลมเข้าและลมออกมีขนาด 1/8 นิ้ว ใช้แรงดันไฟฟ้าขนาด 220 VAC

(4) จอแสดงผลแบบทัชสกรีน จำนวน 1 ชิ้น

(5) อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิและแรงดันไฟฟ้าขนาด 220 VAC กระแสไฟฟ้า 3 A ควบคุมอุณหภูมิได้ตั้งแต่ 0 ถึง 400 องศาเซลเซียส

(6) โซลิตสเตตรีเลย์ ขนาด 25 A จำนวน 2 ชุด

(7) ลิมิตสวิตช์ แรงเคลื่อนไฟฟ้า 220 VAC จำนวน 1 ตัว



(ก)



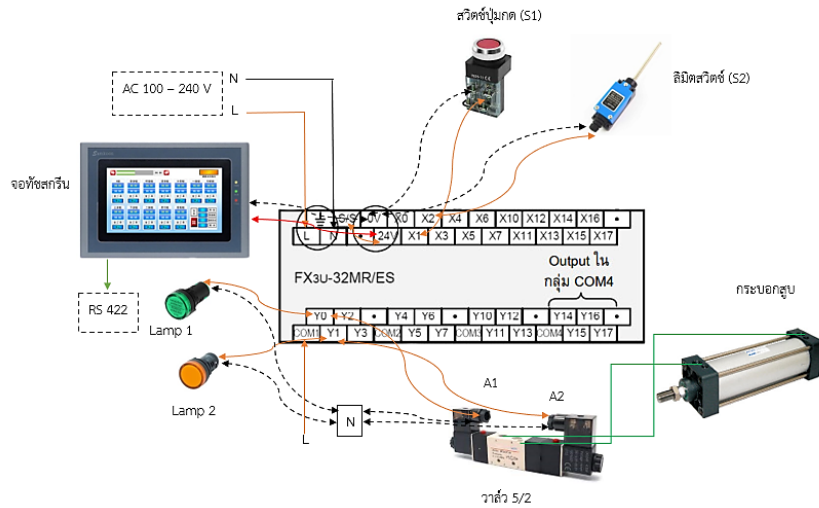
(ข)

ภาพที่ 8 เครื่องขึ้นรูปภาชนะที่สร้างเสร็จ (ก) แบบตัวเครื่อง (ข) เครื่องต้นแบบที่พัฒนา

1.2 ผลการพัฒนากระบวนการควบคุมการทำงานของเครื่องขึ้นรูปภาชนะจากเศษอ้อย

1.2.1 ระบบควบคุมการทำงานของกระบอกสูบอัดด้วยระบบพีแอลซี

การทำงานของเครื่องขึ้นรูปภาชนะถูกควบคุมด้วยระบบพีแอลซี ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ PLC Mitsubishi รุ่น PX3S มีช่องดิจิตอลอินพุตจำนวน 16 ช่อง ช่องดิจิตอลเอาต์พุตชนิดรีเลย์ จำนวน 14 ช่อง และมีช่องสื่อสารเป็นแบบ RS 422 แหล่งจ่ายไฟฟ้าภาคกำลังขนาด 220 VAC ซึ่งได้เชื่อมต่อการทำงานดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 ส่วนประกอบของระบบพีแอลซี

1.3 ผลการสร้างแม่พิมพ์ของเครื่องขึ้นรูปภาชนะจากเศษอ้อย

จากการออกแบบแม่พิมพ์สำหรับขึ้นรูปภาชนะทั้ง 4 แบบ เมื่อนำอลูมิเนียมอัลลอยด์มากัดขึ้นรูปให้ เกิดเป็นแม่พิมพ์ส่งแรงอัดและแม่พิมพ์รับแรงอัด จำนวน 1 ชุดต่อภาชนะ 1 แบบ ได้แม่พิมพ์แต่ละแบบดังนี้

ตารางที่ 1 แม่พิมพ์ส่งแรงกดและแม่พิมพ์รับแรงกดของภาชนะทั้ง 4 แบบ

แม่พิมพ์	แม่พิมพ์ส่งแรงกด	แม่พิมพ์รับแรงกด
1. ถาดใส่อาหารว่าง		
2. ถาดใส่ผลไม้		
3. ถาดเพาะกล้า		
4. ถาดใส่ไข่		

(1) แม่พิมพ์ลาดใส่อาหารว่าง: ขนาดของแม่พิมพ์ส่งแรงกด และแม่พิมพ์รับแรงกด (กว้างxยาวxสูง) เท่ากับ 220x250x45 มิลลิเมตร ออกแบบเพื่อรองรับการวางแก้ว อาหารว่าง และช้อน ตามลำดับ

(2) แม่พิมพ์ลาดใส่ผลไม้: ขนาดของแม่พิมพ์ส่งแรงกด และแม่พิมพ์รับแรงกด (กว้างxยาวxสูง) เท่ากับ 178x218x45 มิลลิเมตร ออกแบบเพื่อรองรับการบรรจุผลไม้ได้ 5 ผล โดยไม่ให้ผลไม้เคลื่อนที่ไปมาในภาชนะ

(3) แม่พิมพ์ลาดเพาะกล้า: ขนาดของแม่พิมพ์ส่งแรงกด และแม่พิมพ์รับแรงกด (กว้างxยาวxสูง) เท่ากับ 120x160x110 มิลลิเมตร และ 140x180x90 มิลลิเมตร ตามลำดับ

(4) แม่พิมพ์กล่องใส่ไข่: ขนาดของแม่พิมพ์ส่งแรงกด และแม่พิมพ์รับแรงกด (กว้างxยาวxสูง) เท่ากับ 124x264x117 มิลลิเมตร ได้แบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ตัวกล่องที่ยึดติดกับตัวฝาปิด ที่ตัวกล่องสามารถบรรจุไข่ได้สูงสุด 4 ฟอง ช่องใส่ไข่เป็นทรงกลม ก้นลึกประมาณ 50 มิลลิเมตร มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 46 มิลลิเมตร ฝากล่องมีรูไว้สำหรับล็อกปิดฝากล่อง

2. ผลการศึกษาระดับแรงดันที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปภาชนะ

จากการศึกษาระดับแรงดัน ที่ระดับ 4 5 และ 6 บาร์ ที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิในการขึ้นรูป ที่อุณหภูมิ 110 120 130 140 และ 150 องศาเซลเซียส และระยะเวลาในการกดค้างของกระบอกสูบ ที่ระยะเวลา 60 70 80 และ 90 วินาที เพื่อคัดเลือกสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปภาชนะทั้ง 4 แบบ ได้ผลดังนี้

2.1 ผลการศึกษาแรงดันที่กระทำต่อพื้นที่ หน้าตัดของแม่พิมพ์

ด้วยขนาดของแม่พิมพ์ เมื่อนำมาคำนวณหาพื้นที่หน้าตัดของแม่พิมพ์ร่วมกับแรงที่กระทำบนแม่พิมพ์ แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของการขึ้นรูปภาชนะ โดยได้กำหนดขอบเขตระดับแรงดันที่ศึกษา จำนวน 3 ระดับ ได้แก่ 4 5 และ 6 บาร์ มีผลการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แรงที่กระทำบนแม่พิมพ์เมื่อกดกระบอกสูบ

แม่พิมพ์	พื้นที่หน้าตัดของแม่พิมพ์ (ตารางเซนติเมตร: cm ²)	แรงที่กระทำบนแม่พิมพ์ (ปาสคาล: mPa)		
		4 บาร์	5 บาร์	6 บาร์
ลาดใส่อาหารว่าง	342.25	0.094	0.117	0.140
ลาดใส่ผลไม้	238.00	0.135	0.168	0.202
ลาดเพาะกล้า	192.00	0.167	0.209	0.250
กล่องใส่ไข่	210.00	0.153	0.191	0.229

จากตารางที่ 2 จากรูปแบบแม่พิมพ์ที่แตกต่างกันพบว่า แม่พิมพ์ของการขึ้นรูปลาดเพาะกล้า มีแรงมากระทำบนแม่พิมพ์มากที่สุด 0.167-0.25 เมกะปาสคาล รองลงมาคือ แม่พิมพ์ของกล่องใส่ไข่ ลาดใส่ผลไม้ และลาดใส่อาหารว่างที่มีแรงมากระทำบนแม่พิมพ์เท่ากับ 0.153-0.229, 0.135-0.202 และ 0.094-0.140 เมกะปาสคาล ตามลำดับ

2.2 ผลการศึกษาอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ของกระบอกสูบ

ผู้วิจัยกำหนดระยะเวลาที่กระบอกสูบใช้เพื่อให้แม่พิมพ์ตัวผู้ประกบกับแม่พิมพ์ตัวเมียไว้ 3 ระดับ คือ 30 60 และ 90 วินาที ด้วยข้อมูลนี้ นำมาหาอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ของกระบอกสูบจากการคำนวณ โดยใช้ระยะทางที่กระบอกสูบเคลื่อนที่ออกต่อเวลาที่กระบอกสูบใช้เพื่อเคลื่อนที่ออก มีค่าเท่ากับ 0.003 0.004 และ 0.008 เมตรต่อวินาที กำหนดอุณหภูมิคงที่สำหรับคัดเลือกกระด้นที่แรงดันที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูป ภาชนะไว้ที่ 140 องศาเซลเซียส โดยใช้กล่องใส่ไข่เป็นกรณีศึกษา ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 คุณภาพโดยรวมของกล่องใส่ไข่หลังการขึ้นรูป

แรงดัน (บาร์)	อัตราเร็วกระบอกสูบ (เมตรต่อวินาที)	คุณภาพ (คะแนน)	แปลผล
4	0.003	1.3	ชิ้นงานไม่มีความสมบูรณ์ มีการคิ่นตัว
	0.004	1.0	ชิ้นงานไม่มีความสมบูรณ์ มีการคิ่นตัว
	0.008	1.0	ชิ้นงานไม่มีความสมบูรณ์ มีการคิ่นตัว
5	0.003	2.2	ชิ้นงานมีความสมบูรณ์เล็กน้อย มีการคิ่นตัวเล็กน้อย
	0.004	2.0	ชิ้นงานมีความสมบูรณ์เล็กน้อย มีการคิ่นตัวเล็กน้อย
	0.008	1.8	ชิ้นงานไม่มีความสมบูรณ์ มีการคิ่นตัว
6	0.003	3.0	ชิ้นงานมีความสมบูรณ์
	0.004	3.0	ชิ้นงานมีความสมบูรณ์
	0.008	2.6	ชิ้นงานมีความสมบูรณ์เล็กน้อย พบรอยแตก 1 จุด

จากตารางที่ 3 พบว่า การใช้อัตราเร็วของกระบอกสูบที่ 0.003-0.004 เมตรต่อวินาที ร่วมกับแรงดันลม 6 บาร์ จะได้ชิ้นงานที่มีความสมบูรณ์ ไม่พบการแตกร้าว และไม่เกิดการคิ่นตัวของชิ้นงาน ด้วยคะแนน 3.0 คะแนน แต่หากเพิ่มอัตราเร็วของกระบอกสูบให้อยู่ที่ 0.008 เมตรต่อวินาที พบการเกิดรอยแตกบนชิ้นงาน ผู้วิจัยจึงเลือกแรงดันลมที่ 6 บาร์ และอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ของกระบอกสูบเท่ากับ 0.004 เมตรต่อวินาที เป็นค่าคงที่ในการศึกษาระดับอุณหภูมิในการขึ้นรูป

2.3 ผลการศึกษาระดับอุณหภูมิและระยะเวลาการกดค้างของกระบอกสูบที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูป

1) ความขึ้นและคุณภาพโดยรวมของภาชนะ

ผลการพิจารณาคุณภาพโดยรวมร่วมกับความขึ้นของภาชนะ พบว่า สภาวะการขึ้นรูปที่ทำให้ภาชนะมีคะแนนการประเมินคุณภาพโดยรวมสูงที่สุดคือ อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส ระยะเวลาการกดค้างของกระบอกสูบนาน 60 วินาที ด้วยสภาวะนี้ทำให้ภาชนะแต่ละแบบมีรูปทรงสมบูรณ์เป็นไปตามแม่พิมพ์ ไม่มีการคิ่นรูปหลังจากการขึ้นรูปแล้ว ไม่มีรอยแตกร้าว สีภาชนะเป็นปกติ และมีความขึ้นเหลืออยู่ร้อยละ 6.08-6.62 ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ความชื้นของภาชนะเมื่อขึ้นรูปด้วยสภาวะที่แตกต่างกัน

สภาวะในการขึ้นรูป		ถาดใส่อาหารว่าง		ถาดใส่ผลไม้		ถาดเพาะกล้า		กล่องใส่ไข่	
อุณหภูมิ (°C)	ระยะเวลา กัดค้ำ (sec)	ความชื้น (%±SD)	คะแนน คุณภาพ	ความชื้น (%±SD)	คะแนน คุณภาพ	ความชื้น (%±SD)	คะแนน คุณภาพ	ความชื้น (%±SD)	คะแนน คุณภาพ
110	60	13.40±0.01	1.40	13.37±0.03	1.20	13.85±0.02	1.00	13.54±0.01	1.20
	70	13.13±0.02	1.20	13.00±0.01	1.20	13.41±0.01	1.40	13.18±0.01	1.00
	80	12.52±0.03	1.40	12.05±0.01	1.00	12.78±0.02	1.20	12.77±0.02	1.40
	90	12.48±0.01	1.20	11.88±0.01	1.20	12.94±0.03	1.00	12.60±0.02	1.20
120	60	11.78±0.01	1.40	11.21±0.02	1.00	12.10±0.03	1.00	11.85±0.01	1.00
	70	11.67±0.01	1.00	11.15±0.02	1.40	11.92±0.01	1.40	11.85±0.02	1.00
	80	11.06±0.03	1.00	10.96±0.01	1.20	11.30±0.01	1.20	11.26±0.02	1.20
	90	10.77±0.01	1.20	10.69±0.02	1.00	11.00±0.01	1.40	10.96±0.01	1.20
130	60	10.19±0.02	1.20	10.00±0.02	1.20	10.37±0.01	1.20	10.35±0.03	1.20
	70	8.83±0.01	1.60	8.60±0.03	2.00	9.57±0.01	1.80	8.94 ±0.01	1.80
	80	8.41±0.01	1.80	8.35±0.01	1.60	8.74±0.02	2.00	8.56±0.02	1.80
	90	7.74±0.01	1.80	7.54±0.03	1.80	7.98±0.01	1.80	7.90±0.02	1.60
140	60	6.21±0.02	3.00	6.08±0.02	3.00	6.62±0.01	3.00	6.21±0.02	3.00
	70	5.43±0.01	2.80	5.37±0.02	2.80	5.97±0.01	2.80	5.57±0.03	2.60
	80	5.23±0.01	2.60	5.23±0.01	2.40	5.55±0.01	2.20	5.28±0.02	2.20
	90	4.59±0.02	1.80	4.45±0.03	2.40	4.90±0.03	2.40	4.78±0.01	1.60
150	60	4.22±0.01	2.20	4.16±0.03	2.20	4.61±0.01	2.40	4.53±0.02	2.20
	70	3.51±0.01	1.40	3.46±0.01	1.20	3.95±0.01	1.40	3.82±0.01	1.40
	80	3.03±0.02	1.40	2.82±0.01	1.20	3.85±0.02	1.20	3.13±0.01	1.20
	90	2.27±0.01	1.20	2.09±0.02	1.00	2.50±0.02	1.00	2.39±0.01	1.00

2) ความหนาของภาชนะ

จากการเปรียบเทียบความหนาของภาชนะทั้งหมดพบว่า ถาดใส่ผลไม้มีความหนาเฉลี่ยมากที่สุด รองลงมาคือ ถาดใส่อาหารว่าง ถาดเพาะกล้า และกล่องใส่ไข่ ทั้งนี้เมื่อใช้แรงดันที่ 4 5 และ 6 บาร์ ภาชนะทั้ง 4 แบบมีความหนาเฉลี่ยเท่ากับ 1.14-2.10 มิลลิเมตร 1.12-1.84 มิลลิเมตร และ 1.07-1.69 มิลลิเมตร ตามลำดับ เห็นได้ว่าการใช้แรงดัน 6 บาร์ จะทำให้ภาชนะทั้ง 4 แบบ มีค่าความหนาเฉลี่ยน้อยที่สุด ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ความหนาของภาชนะทั้ง 4 แบบ

สภาวะของภาชนะ		ความหนาของภาชนะ (มิลลิเมตร)			
ความดัน (บาร์)	ตำแหน่ง	ภาดใส่อาหารว่าง (mm±SD)	ภาดใส่ผลไม้ (mm±SD)	ภาดเพาะกล้า (mm±SD)	กล่องใส่ไข่ (mm±SD)
4	จุดที่ 1	1.34±0.01	1.93±0.03	1.28±0.01	1.12±0.00
	จุดที่ 2	1.18±0.04	2.12±0.06	1.34±0.02	1.12±0.01
	จุดที่ 3	1.92±0.01	2.41±0.02	1.27±0.01	1.21±0.07
	จุดที่ 4	1.81±0.01	2.12±0.06	1.33±0.03	1.12±0.01
	จุดที่ 5	1.34±0.01	1.93±0.02	1.28±0.00	1.12±0.01
ค่าเฉลี่ย		1.52±0.30	2.10±0.18	1.30±0.03	1.14±0.05
5	จุดที่ 1	1.51±0.01	1.73±0.04	1.12±0.01	1.10±0.01
	จุดที่ 2	1.68±0.02	1.89±0.04	1.20±0.07	1.13±0.01
	จุดที่ 3	1.80±0.01	1.97±0.01	1.12±0.01	1.18±0.02
	จุดที่ 4	1.68±0.01	1.89±0.02	1.20±0.05	1.12±0.01
	จุดที่ 5	1.50±0.03	1.73±0.01	1.12±0.01	1.10±0.05
ค่าเฉลี่ย		1.63±0.12	1.84±0.10	1.15±0.05	1.12±0.04
6	จุดที่ 1	1.12±0.07	1.55±0.03	1.20±0.03	1.02±0.01
	จุดที่ 2	1.30±0.02	1.73±0.03	1.16±0.03	1.08±0.02
	จุดที่ 3	1.80±0.04	1.88±0.02	1.11±0.01	1.13±0.01
	จุดที่ 4	1.30±0.01	1.73±0.01	1.16±0.03	1.09±0.01
	จุดที่ 5	1.12±0.07	1.55±0.01	1.10±0.06	1.02±0.01
ค่าเฉลี่ย		1.33±0.26	1.69±0.13	1.15±0.05	1.07±0.04

2.4 ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงและแรงกดของภาชนะ

การทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงและแรงกดของภาชนะนี้อ้างอิงจากมาตรฐานระหว่างประเทศ (ISO 1924-2:2008, ISO 12192:2011) เมื่อนำภาชนะแต่ละแบบมาตรวจสอบความต้านทานต่อแรงดึงและแรงกดของภาชนะ โดยการสุ่มชิ้นงานจำนวน 5 ชิ้นต่อภาชนะ 1 แบบ กำหนดระยะห่างระหว่างตัวหนีบเท่ากับ 100 มิลลิเมตร ดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ความต้านทานต่อแรงดึงและแรงกดของภาชนะ

ความต้านทาน	การขึ้นรูปแบบแห้ง		การขึ้นรูปแบบเปียก	
	ถาดใส่อาหารว่าง	ถาดใส่ผลไม้	ถาดเพาะกล้า	กล่องใส่ไข่
แรงดึง (kN/m ² ±SD)	963.80 ±3.08	863.00±3.91	773.10±1.26	816.00±1.64
แรงกด (kPa±SD)	1,518.70±1.59	1,476.30±5.90	1,375.20±4.07	1,459.80±5.16

จากตารางที่ 6 พบว่า ถาดใส่อาหารว่างมีค่าความต้านทานแรงดึงมากที่สุด รองลงมาคือ ถาดใส่ผลไม้ กล่องใส่ไข่ และถาดเพาะกล้า ด้วยค่าเฉลี่ย 963.80, 863.00, 816.00 และ 773.10 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร ตามลำดับ ในส่วนของค่าความต้านทานแรงกด สามารถเรียงลำดับจากค่ามากไปน้อย คือ ถาดใส่อาหารว่าง ถาดใส่ผลไม้ กล่องใส่ไข่ และถาดเพาะกล้า มีค่าเท่ากับ 1,518.70 1,476.30 1,459.80 และ 1,375.20 กิโลปาสคาล ตามลำดับ จากการเปรียบเทียบระหว่างการขึ้นรูปแบบแห้งและการขึ้นรูปแบบเปียก พบว่า การขึ้นรูปแบบแห้งมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงและแรงกดของภาชนะที่สูงกว่า การขึ้นรูปแบบเปียก

2.5 ผลการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมของเครื่องขึ้นรูปภาชนะจากเศษอ้อย

จากความสามารถในการขึ้นรูปภาชนะได้ 27 ชิ้นต่อชั่วโมง เปิดใช้งานเครื่อง 8 ชั่วโมงต่อวัน ทำงาน 300 วันต่อปี จะใช้ระยะเวลาค้ำทุนสำหรับการผลิตถาดใส่อาหารว่างเท่ากับ 4 เดือน 27 วัน ถาดใส่ผลไม้ มีระยะเวลาค้ำทุนเท่ากับ 5 เดือน 9 วัน ถาดเพาะกล้ามีระยะเวลาค้ำทุนเท่ากับ 5 เดือน 14 วัน และกล่องใส่ไข่มีระยะเวลาค้ำทุนเท่ากับ 5 เดือน 21 วัน ภาชนะทั้ง 4 แบบ มีต้นทุนการใช้งานเครื่องขึ้นรูปภาชนะแตกต่างกัน ประกอบด้วย ถาดใส่อาหารว่างมีต้นทุนการผลิต 1.98 บาทต่อชิ้น ถาดใส่ผลไม้มีต้นทุนการผลิต 2.00 บาทต่อชิ้น ถาดเพาะกล้ามีต้นทุนการผลิต 2.01 บาทต่อชิ้น และกล่องใส่ไข่มีต้นทุนการผลิต 2.02 บาทต่อชิ้น

อภิปรายผล

เครื่องขึ้นรูปภาชนะบรรจุภัณฑ์อาหารจากเศษอ้อยมีโครงสร้างหลักทำจากเหล็ก ใช้แหล่งพลังงานไฟฟ้า ระบบการทำงานถูกควบคุมด้วยระบบพีแอลซีเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงาน ส่วนของแม่พิมพ์สามารถถอดเปลี่ยนได้ ในที่นี้พัฒนาแม่พิมพ์ขึ้นรูปเป็นภาชนะได้ 4 แบบ คือ ถาดใส่อาหารว่าง ถาดใส่ผลไม้ ถาดเพาะกล้า และกล่องใส่ไข่ การขึ้นรูปใช้แรงกดจากกระบอกสูบร่วมกับการให้ความร้อนสูงที่แม่พิมพ์ สภาวะการขึ้นรูปที่เหมาะสมคือ แรงดันลม 6 บาร์ อุณหภูมิแม่พิมพ์ 140 องศาเซลเซียส อัตราเร็วในการเคลื่อนที่ของกระบอกสูบ 0.004 เมตรต่อวินาที และระยะเวลาการค้ำค้ำงของกระบอกสูบนาน 60 วินาที จะได้ภาชนะที่มีรูปร่างสมบูรณ์ มีความชื้นร้อยละ 6.08-6.62 เป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน มผช. 1557/2563 สามารถต้านทานแรงดึงและแรงกดได้ 773.10-963.80 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร และ 1,375.20-1,518.70 กิโลปาสคาลตามลำดับ จากการเปรียบเทียบระหว่างการขึ้นรูปแบบแห้งและการขึ้นรูปแบบเปียก พบว่า การขึ้นรูปแบบแห้งมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงและแรงกดของภาชนะที่สูงกว่า การขึ้นรูปแบบเปียก ความสามารถในการขึ้นรูปภาชนะ 1 ชิ้น

ใช้เวลาเพียง 2.25 นาที จึงใช้ระยะเวลาคืนทุนไม่เกิน 5 เดือน 21 วัน มีจุดคุ้มทุนไม่เกิน 33 วันต่อปี และมีต้นทุนการใช้งานเครื่องอยู่ที่ 2 บาทต่อชิ้น

เมื่อเปรียบเทียบระบบควบคุมการทำงานของเครื่องขึ้นรูปภาชนะจากเศษอ้อยนี้ กับเครื่องขึ้นรูปภาชนะของ นพตล และสมนึก (2555) พบว่า เครื่องขึ้นรูปภาชนะมีจุดเหมือนกันคือ ใช้แท่นกคินิวเมติกส์และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของกระบอกสูบเท่ากัน แต่การพัฒนาเครื่องขึ้นรูปภาชนะจากงานวิจัยนี้ เพิ่มระยะความยาวก้านสูบอีก 30 มิลลิเมตร เนื่องจากระยะชักที่เพิ่มขึ้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของกระบอกสูบก็จะเพิ่มขึ้นตาม ส่งผลให้มีแรงในการกดอัดชิ้นรูปที่เพิ่มขึ้น และใช้ระบบพีแอลซีเพื่อควบคุมการเคลื่อนที่เข้า-ออกของกระบอกสูบ พร้อมทั้งควบคุมการหน่วงเวลาการค้างตำแหน่งของกระบอกสูบด้วยไทม์เมอร์ จึงใช้งานสะดวกและแม่นยำกว่า การควบคุมจากมือกดที่เป็นโซลินอยด์วาล์วไฟฟ้า ควบคุมกับการใช้ไทม์เมอร์ควบคุมระยะเวลาการกดค้างของกระบอกสูบ

การใช้อุณหภูมิสูงเป็นหนึ่งในปัจจัยสำคัญที่ทำให้ความชื้นหลงเหลืออยู่ในภาชนะน้อย และมีผลต่อการคงตัวของชิ้นงาน การพัฒนาเครื่องขึ้นรูปภาชนะให้มีระบบควบคุมความร้อนแม่พิมพ์ที่ติดตั้งบริเวณหน้าตู้ควบคุม และออกแบบตำแหน่งการติดตั้งฮีตเตอร์จำนวน 4 ตัวๆ ละ 500 วัตต์ ไว้ที่ด้านบน 2 ตัว และด้านล่าง 2 ตัว ทำให้เครื่องขึ้นรูปทำความร้อนให้ถึงค่าที่กำหนดได้อย่างรวดเร็ว เห็นได้จากการใช้ระยะเวลาการเพิ่มอุณหภูมิให้ถึง 140 องศาเซลเซียส เพียง 5 นาที 30 วินาที เมื่อเครื่องขึ้นรูปภาชนะตั้งอยู่ในอุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส) สอดคล้องกับงานวิจัยของ สมเกียรติ และธมยันตี (2563) ที่ออกแบบระบบควบคุมการทำงานของเครื่องอัดภาชนะจากกาบหมากด้วยพีแอลซี และมีระบบควบคุมอุณหภูมิที่แม่พิมพ์ นอกเหนือจากนั้น ผู้วิจัยให้ความสำคัญกับความปลอดภัยขณะทำงาน โดยการกำหนดให้พีแอลซีทำหน้าที่ควบคุมการทำงาน มีการแจ้งสถานะการทำงาน แจ้งเตือนอันตรายจากกระแสไฟฟ้า และแจ้งเตือนเมื่อค่าเปลี่ยนแปลงไปจากระดับที่ตั้งไว้ ส่งผลให้ผู้ประเมินมีความพึงพอใจด้านความปลอดภัยจากการใช้งานเครื่องขึ้นรูปภาชนะอยู่ในระดับมากที่สุด

การสร้างแม่พิมพ์สำหรับขึ้นรูปภาชนะ ผู้วิจัยได้ออกแบบภาชนะไว้ 4 แบบ ได้แก่ ถาดใส่อาหารว่าง ถาดใส่ผลไม้ ถาดเพาะกล้า และกล่องใส่ไข่ ใช้ระดับแรงดันลม 6 บาร์ และอุณหภูมิของแม่พิมพ์ 140 องศาเซลเซียส เช่นเดียวกับการขึ้นรูปภาชนะของ นพตล และสมนึก (2555) แต่มีการศึกษาอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ของกระบอกสูบ และระยะเวลาการกดค้างของกระบอกสูบเพิ่มเติม แล้วพบว่า การขึ้นรูปภาชนะทั้ง 4 แบบ จากเศษอ้อยหรือแผ่นกระดาษจากเศษอ้อย ควรกำหนดอัตราเร็วของกระบอกสูบเท่ากับ 0.004 เมตรต่อวินาที และกำหนดระยะเวลาการกดค้างของกระบอกสูบนาน 60 วินาที จึงจะได้ภาชนะที่มีรูปทรงสมบูรณ์ตามแบบของแม่พิมพ์ ไม่มีการคืนรูป ไม่มีรอยแตกร้าว สีภาชนะเป็นปกติ และมีความชื้นอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนกำหนดไว้ (น้อยกว่าร้อยละ 10)

จากผลการพัฒนาเครื่องขึ้นรูปภาชนะที่สามารถขึ้นรูปภาชนะ 1 ชิ้นใช้เวลาเพียง 2.25 นาที เร็วกว่าเครื่องขึ้นรูปภาชนะจากงานวิจัยของ นพตล และสมนึก (2555) ประมาณ 15.56 เท่า ที่ความดันและอุณหภูมิเดียวกัน นับเป็นอีกจุดเด่นของผลงานวิจัยนี้ ซึ่งความสามารถในการขึ้นรูปที่รวดเร็ว จะแปรผกผันกับระยะเวลาการคืนทุนและจุดคุ้มทุนตามหลักเศรษฐศาสตร์ ด้วยระยะเวลาการขึ้นรูปข้างต้น สามารถขึ้นรูปภาชนะแต่ละ

แบบได้ 27 ชิ้นภายใน 1 ชั่วโมง ซึ่งมากกว่าการขึ้นรูปภาชนะจากใบไม้ถึง 16 ชิ้น (กิตติศักดิ์ และคนอื่นๆ, 2564) อย่างไรก็ตาม ต้นทุนการผลิตต่อชิ้นของภาชนะแต่ละแบบจะไม่เท่ากัน เป็นผลจากราคาของแม่พิมพ์ที่มีความซับซ้อนต่างกัน โดยราคาต้นทุนของเครื่องขึ้นรูปกล่องใส่ไข่มีราคาสูงที่สุดคือ 76,455 บาท รองลงมาคือ เครื่องขึ้นรูปภาชนะกะลา ถาดใส่ผลไม้ และถาดใส่อาหารว่าง ด้วยราคา 73,455 71,455 และ 66,455 บาท ตามลำดับ แต่เมื่อเปรียบเทียบกับราคาเครื่องขึ้นรูปที่จำหน่ายในท้องตลาด พบว่าเครื่องขึ้นรูปภาชนะที่ผู้วิจัยออกแบบมีต้นทุนต่ำกว่า เนื่องจากมีขนาดเล็กและใช้วัสดุอุปกรณ์ที่จำหน่ายในประเทศ

ข้อเสนอแนะในการวิจัย

1. ในการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ที่มีความซับซ้อนควรออกแบบแม่พิมพ์ขึ้นรูปเป็นแบบเปียกพร้อมระบบดูดน้ำออกจากเยื่อกระดาษที่เป็นระบบสุญญากาศ เพื่อให้สามารถขึ้นรูปจากเยื่อกระดาษเปียกได้รวดเร็วและลดปริมาณน้ำในภาชนะได้มากขึ้น
2. ควรมีการศึกษาวิธีการเกลี่ยเยื่อกระดาษบนแม่พิมพ์ให้เกิดความสม่ำเสมอได้ทุกชิ้นงาน ซึ่งจะเป็นการควบคุมคุณภาพของชิ้นงานได้อีกทางหนึ่ง
3. ควรมีการพัฒนาเครื่องขึ้นรูปภาชนะที่สามารถตัดแต่งขอบภาชนะได้ภายในเครื่องเดียว เพื่อช่วยประหยัดแรงงานคนและลดต้นทุนการผลิตได้

การนำไปใช้ประโยชน์

ในด้านการนำไปใช้ประโยชน์ทางกลุ่มผู้วิจัยได้มอบต้นแบบเครื่องขึ้นรูปภาชนะจากเศษอ้อย ให้กับองค์การบริหารส่วนตำบลหนองกุ่ม อำเภอปอพลอย จังหวัดกาญจนบุรี เพื่อสนับสนุนกลุ่มชุมชนที่สามารถต่อยอดเป็นผลิตภัณฑ์ในระดับชุมชนต่อไป เพื่อแก้ปัญหา PM 2.5 จากการเผาเศษอ้อยในจังหวัดกาญจนบุรี ด้วยการสร้างมูลค่าให้เศษอ้อยกลายเป็นวัตถุดิบเพื่อการผลิตเยื่อกระดาษ ต่อยอดสู่การพัฒนาเครื่องขึ้นรูปภาชนะใส่อาหารว่าง ถาดใส่ผลไม้ ถาดเพาะกล้า และกล่องใส่ไข่ จากเศษอ้อย และกระดาษจากเศษอ้อย ทุกชิ้นงานที่ผลิตได้สามารถลดการเผาใบอ้อยได้ 114.34 กรัม

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่อุดหนุนทุนการวิจัยประจำปีงบประมาณ 2564 เพื่อใช้ศึกษาวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- กระวี ตรีอำนรรค. (2562). การพัฒนาเครื่องจักรกึ่งอัตโนมัติสำหรับการคว้านเมล็ดและปอกเปลือกเงาะเพื่อแปรรูปผลผลิตระดับวิสาหกิจชุมชน (รายงานผลการวิจัย). นครราชสีมา : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- กิตติศักดิ์ เมืองกลาง ญัฐพงษ์ รักด่านกลา ญัฐวุฒิ ดงกระโทก ทักษ์คนัย จันทินอก และธรรณธร ชิดการ. (2564). เครื่องขึ้นรูปภาชนะจากวัสดุธรรมชาติ. วารสารเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, 6(2), 65-76.
- จารุณี เข้มพิลา และปริญนิล แสงรัตน์. (2562). การศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตภาชนะย่อยสลายได้จากหญ้าเนเปียร์ เพื่อลดปริมาณขยะจากการใช้ถาดโฟม (รายงานผลการวิจัย). มหาสารคาม : มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม.
- ธนากร เมียงอารมณ และธิติมา เกตุแก้ว. (2564). การพัฒนาเครื่องขึ้นรูปภาชนะบรรจุอาหารจากวัสดุธรรมชาติ (รายงานการวิจัย). กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี
- นพดล จันทรัลักษ์ณ์ และสมนึก วัฒนศรียกุล. (2555). การออกแบบและสร้างเครื่องขึ้นรูปภาชนะที่ทำจากเส้นใยธรรมชาติ. ใน รายงานสืบเนื่องจากการประชุมวิชาการชายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี พ.ศ. 2555 วันที่ 17-19 ตุลาคม พ.ศ. 2555(หน้า 1770-1775). กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยศรีปทุม.
- ภัทรพงศ์ แหล่งไธสง ณรงค์ พลสงบ วีระศักดิ์ วุฒิมังค์ และศรายุทธ ดนตรี. (2562). การสร้างเครื่องอัดขึ้นรูปบรรจุภัณฑ์จากวัสดุธรรมชาติ. (รายงานผลการวิจัย). บุรีรัมย์ : มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์.
- มลฤดี โอปมาวุฒิกุล. (2565). การพัฒนากระบวนการผลิตเยื่อกระดาษเศษอ้อย (รายงานผลการวิจัย). กาญจนบุรี : มหาวิทยาลัยราชภัฏกาญจนบุรี.
- กระทรวงอุตสาหกรรม. (2550). ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องยกเลิกและกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระดาษเหนียว พ.ศ.2550 ฉบับที่ 3688. (2550, กุมภาพันธ์ 16), ราชกิจจานุเบกษา, 124 (ตอนพิเศษ 68 ง), 8. กรุงเทพฯ : กระทรวงอุตสาหกรรม.
- สมเกียรติ สุทธิยาพิพัฒน์ และธมยันตี ประยูรพันธ์. (2563). การออกแบบและพัฒนาบรรจุภัณฑ์อาหารจากกาบหมากเพื่อสร้างมูลค่าเพิ่มที่นำสู่ความเข้มแข็งของชุมชนและเศรษฐกิจฐานราก. วารสารมหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์, 12(1). 120-131.
- สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย. (2564). รายงานสถานการณ์การปลูกอ้อย ปีการผลิต 2563/64. [Online]. Available : <https://old.ocsb.go.th/upload/journal/fileupload/923-9200.pdf> [2566, เมษายน 5].
- สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย. (2561). รายงานสถานการณ์การปลูกอ้อย ปีการผลิต 2560/61. [Online]. Available : <https://www.ocsb.go.th> [2566, เมษายน 10].
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2563). มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน ภาชนะจากพืช มผช. 1557/2563. กรุงเทพฯ : กระทรวงอุตสาหกรรม.

- สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. (2565). แผนปฏิบัติการด้านการขับเคลื่อนการพัฒนาประเทศไทย ด้วยโมเดลเศรษฐกิจ BCG พ.ศ. 2564-2570. [Online]. Available : <https://waa.inter.nstda.or.th/stks/pub/bcg/BCG-Action-Plan-2564-2570-256502-02.pdf> [2566, พฤษภาคม 2].
- AOAC. (2000). **The Official Methods of Analysis**. (17 th ed.). Association of Official Analytical Chemists, Washington DC.



การเตรียมสารไอออนผสมเพอโรฟสไกต์เพื่อใช้เป็นชั้นดูดกลืนแสงในเซลล์แสงอาทิตย์
Preparation of Mixed-Cation-Halide Perovskite as Light Absorber Layer in

Photovoltaic Cells

พรณพัฒน์ แผงสาย*

Pornapat Pangsai

พรณวัฒน์ แผงสาย**

Pornawat Pangsai

Received : August 30, 2023

Revised : January 8, 2024

Accepted : March 29, 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางเพอโรฟสไกต์, ศึกษาลักษณะการดูดกลืนแสงและช่องว่างพลังงานของฟิล์มบางเพอโรฟสไกต์, ศึกษาสัญญาณและลักษณะพื้นผิวทางกายภาพของฟิล์มบางเพอโรฟสไกต์, ศึกษาการมีอยู่ของธาตุบนพื้นผิวตัวอย่างของฟิล์มบางเพอโรฟสไกต์และศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนองค์ประกอบฟิล์มบางเพอโรฟสไกต์กับประสิทธิภาพการแปลงพลังงานแสงไปเป็นพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยทำการศึกษาฟิล์มบางเพอโรฟสไกต์ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอโรฟสไกต์โดยใช้สารประกอบ $(\text{MAPbI}_3)_x(\text{MAPbBr}_3)_{1-x}$ และ $(\text{MAPbI}_3)_x(\text{FAPbBr}_3)_{1-x}$ ที่สัดส่วนองค์ประกอบ $x = 1.0, 0.8, 0.6, 0.4, 0.2$ และ 0.0 เป็นชั้นดูดกลืนแสง พิจารณาให้ใช้ชั้นวัสดุการนำส่งอิเล็กตรอนและชั้นวัสดุนำส่งโฮลที่ค่าความเข้มข้นคงที่ ทำการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการเคลือบฟิล์มตัวอย่างด้วยการหมุนเหวี่ยง จากผลการวิจัยพบว่า (1) โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางเพอโรฟสไกต์นั้นมีความบริสุทธิ์ไม่เพียงพอ เนื่องจากพบเฟสปนเปื้อนที่เกิดจากสารประกอบ PbI_2 และ PbBr_2 ที่เปลี่ยนแปลงไปโครงสร้างผลึกเพอโรฟสไกต์ได้ไม่สมบูรณ์ (2) ฟิล์มบางเพอโรฟสไกต์สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็นได้และมีช่องว่างพลังงานที่เหมาะสมในการนำมาประยุกต์ใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์ (3) ฟิล์มบางเพอโรฟสไกต์ที่มีสัดส่วน x มีค่ามากจะมีลักษณะพื้นผิวทางกายภาพเป็นแบบเส้นและกระจายตัวทั่วทั้งพื้นผิว ในขณะที่ฟิล์มบางเพอโรฟสไกต์ที่มีสัดส่วน x มีค่าน้อย

*อาจารย์ประจำสาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์

Lecturer in the Department of Science Faculty of Science and Technology Phetchabun Rajabhat University (Corresponding Author) e-mail: narongsak503@gmail.com

**ผู้ตรวจระบบการผลิตพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน

Renewable energy production and energy conservation system inspector ministry of energy

จะมีลักษณะพื้นผิวทางกายภาพเป็นแบบเม็ดผลึกขนาดเล็กและมีช่องว่างระหว่างผลึกกว้าง (4) พิล์มบางเพอรอฟสไกต์พบธาตุบนพื้นผิวตัวอย่างเป็นไปตามสัดส่วนองค์ประกอบของฟิล์มบางที่เตรียมไว้ (5) เซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ให้ค่าประสิทธิภาพสูงสุดที่ฟิล์มบาง เพอรอฟสไกต์สัดส่วน $(\text{MAPbI}_3)_{0.8}(\text{FAPbBr}_3)_{0.2}$ เนื่องจากมีลักษณะการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็น ช่องว่างพลังงานที่เหมาะสมและลักษณะพื้นผิวทางกายภาพที่กระจายตัวทั่วทั้งพื้นผิว จึงมีความเหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้กับเซลล์แสงอาทิตย์ต่อไป

คำสำคัญ : สารไอออน / เพอรอฟสไกต์ / เซลล์แสงอาทิตย์

ABSTRACT

The purposes of this research are to study the crystal structure of perovskite thin film, to study the characteristics of light absorption and energy gap of perovskite thin film, to study the morphology and physical surface characteristics of perovskite thin film, to study the existence of trace elements on sample surface of perovskite thin film and to study variation of elemental composition of the perovskite thin film with the power conversion of solar cells. We used $(\text{MAPbI}_3)_x(\text{MAPbBr}_3)_{1-x}$ and $(\text{MAPbI}_3)_x(\text{FAPbBr}_3)_{1-x}$, at $x = 1.0, 0.8, 0.6, 0.4, 0.2$ and 0.0 , as light-absorbing layers. In order to study the effect of the composition variation of the perovskite material all devices consisted of the same electron transport layer material and hole transport material. Thin films were prepared by spin coating technique. After the experiment, the results showed that (1) the crystal structure of the perovskite thin film contained PbI_2 and PbBr_2 due to the unreacted precursors. (2) Perovskite thin films absorbed light in the visible region which is suitable for solar cells application. (3) Iodide perovskite had spike-shape morphology, while mixed halide perovskite thin films had particle-like morphology. (4) Elemental ratios of the perovskite thin films were consistent with the prepared precursors. (5) Perovskite solar cells made of $(\text{MAPbI}_3)_{0.8}(\text{FAPbBr}_3)_{0.2}$ film provided highest efficiency due to suitable light absorption in the visible region, appropriate energy gap and uniform surface. These are good combinations for solar cell applications.

Keywords : Mixed-Cation-Halide / Perovskite / Photovoltaic Cells

บทนำ

ปัจจุบันพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานที่ยั่งยืนและสะอาดที่สามารถเติมเต็มความต้องการทางพลังงานในอนาคต เพราะพลังงานที่โลกได้รับได้จากดวงอาทิตย์มีมากกว่าการใช้พลังงานที่มีอยู่ในปัจจุบันหลายพันเท่า เซลล์แสงอาทิตย์เป็นหนึ่งในอุปกรณ์ที่มีความสำคัญในการให้พลังงานไฟฟ้า (การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย,

2561) โดยมีหลักการทำงานคือเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า ในปัจจุบันมีเซลล์แสงอาทิตย์อยู่หลากหลายชนิดขึ้นอยู่กับลักษณะและวิธีการเตรียมในแต่ละยุคสมัย ยกตัวอย่างเช่น เซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอน (silicon solar cells) เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง (thin film solar cells) เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเกิดใหม่ (emerging solar cells) เป็นต้น (สหรัฐ, 2561) ปัจจุบันมีเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดใหม่ที่ทำให้ประสิทธิภาพสูงและได้มีการวิจัยศึกษาอย่างกว้างขวาง คือ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอโรฟสไกต์ (perovskite solar cells) (L. M. Z. T. Yan K., 2020) เนื่องจากมีค่าประสิทธิภาพสูงใกล้เคียงกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอน และมีจุดเด่น คือ มีราคาถูก ผลิตง่าย สามารถประยุกต์ใช้ในสถานที่ต่างๆ ได้ดีและมีรายงานว่าระยะเวลาใช้ในการให้พลังงานคืนทุน (energy payback time, EPBT) อยู่ที่ประมาณ 5-6 เดือน เมื่อเปรียบเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอนหรือชนิดอื่นๆ ที่ใช้เวลาประมาณ 1-2 ปี เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอโรฟสไกต์ (perovskite solar cells : PSCs) เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สารประกอบที่มีโครงสร้างผลึกแบบเพอโรฟสไกต์ โดยใช้การผสมสารอินทรีย์และอนินทรีย์ระหว่างตะกั่วกับฮาไลด์ (halide) เป็นพื้นฐาน มาสร้างเป็นชั้นดูดกลืนแสง (light-absorber active layer) จากการรวบรวมข้อมูลที่มีการจดบันทึก พบว่าค่าประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ของอุปกรณ์ที่ใช้วัสดุเหล่านี้ได้เพิ่มขึ้นจาก 3% ในปี 2009 ปัจจุบันอยู่ที่ 25% สำหรับโครงสร้างแบบเดี่ยว ถูกบันทึกเมื่อปี 2019 และ 28% สำหรับโครงสร้างแบบควบคู่กับซิลิกอน ในปีเดียวกัน (อธิป, 2561)

วิธีดำเนินการวิจัย

เครื่องมือและวัสดุสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง การเตรียมสารประกอบ ขั้นตอนการดำเนินการ เทคนิคการเตรียมชิ้นงาน และเทคนิควิเคราะห์และหลักการทำงานของเครื่องมือ

1. เครื่องมือและวัสดุสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

- (1) กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (optical microscope, ยี่ห้อ Olympus, รุ่น BX51)
- (2) เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (x-ray diffractometer, XRD)
- (3) เครื่องวิเคราะห์การดูดกลืนรังสีของสารที่อยู่ในช่วงแสงอัลตราไวโอเล็ตและแสงที่ตามองเห็น
- (4) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (desktop scanning electron microscope)
- (5) เครื่องวิเคราะห์ธาตุเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ (energy dispersespectrophotometer)
- (6) เครื่องจำลองแสงอาทิตย์ (solar simulator, ยี่ห้อ Pecell, รุ่น PEC-L11)
- (7) เครื่องชั่งทศนิยมสี่ตำแหน่ง (semi-micro balance, ยี่ห้อ Sartorius, รุ่น Secura125-1S)
- (8) เครื่องกวนสารให้ความร้อน (hotplate, ยี่ห้อ IKA, รุ่น C-MAG HS7)
- (9) เครื่องล้างความถี่สูง (ultrasonic cleaner, ยี่ห้อ Protronics intertrade)
- (10) เครื่องทำความสะอาดยูวี-โอโซน (UV-ozone cleaner, ยี่ห้อ Technovision)
- (11) เครื่องเคลือบผิวตัวอย่างด้วยการปั่นเหวี่ยง (spin coater, ยี่ห้อ Essol, รุ่น SC-950P)
- (12) ตู้ดูดควัน (fume hood, ยี่ห้อ Neoflow, รุ่น PP3)
- (13) เครื่องบักกรีปรับอุณหภูมิและความถี่สูง (temperature and high frequency scaling)

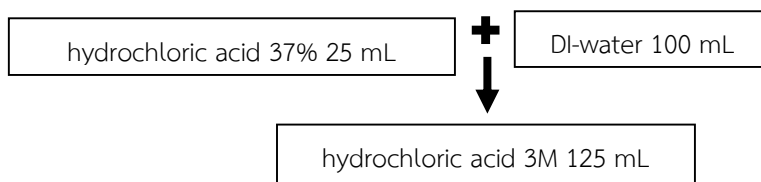
(14) ปืนกาว (glue gun, ยี่ห้อ STANLEY, รุ่น 69-GR20)

1.2 วัสดุสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- (1) สารกรดไฮโดรคลอริก (hydrochloric acid 37%, HCl)
- (2) น้ำที่ผ่านการกำจัดไอออน (deionized water, DI-water)
- (3) สารไทเทเนียมไดไอโซโพรพอกไซด์ (titanium diisopropoxide, $C_{16}H_{28}O_6Ti$)
- (4) สารเอทานอล (ethanol, C_2H_6O)
- (5) สารไดเมทิลฟอร์มมาไมด์ (dimethylformamide C_3H_7ON)
- (6) ผงเลดไอโอดด์ (lead (II) iodide, PbI_2)
- (7) ผงเมทิลแอมโมเนียมไอโอดด์ (methylammonium iodide, MAI)
- (8) ตะเลดโบรไมด์ (lead (II) bromide, $PbBr_2$)
- (9) ผงเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (methylammonium bromide, MABr)
- (10) ผงฟอร์มามิดีนียมโบรไมด์ (formamidinium bromide, FABr)
- (11) ผงคอปเปอร์ไทโอไซยาเนต (copperthiocyanate, $CuSCN$)
- (12) สารไดเอทิลซัลไฟด์ (diethylsulfide, $C_4H_{10}S$)
- (13) ผงคาร์บอนแบล็ก (carbon black)
- (14) ผงแกรไฟต์ (graphite)
- (15) ผงโพลีไวนิลอะซิเตท (poly(vinyl acetate, PBAC)
- (16) สารคลอโรเบนซีน (chlorobenzene, C_6H_5Cl)
- (17) ผงสังกะสี (zinc powder, Zn)
- (18) สารแอลกอฮอล์ชนิดไอโซโพรพิล (isopropyl alcohol, C_3H_8O)
- (19) สารอะซิโตน (acetone, C_3H_8O)
- (20) ตะกั่วเส้น (lead wire)

2. การเตรียมสารประกอบ

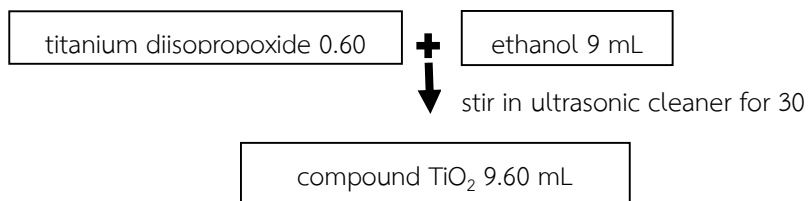
2.1 ขั้นตอนการเตรียมกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 3 โมลาร์ ผสมกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 37 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 25 มิลลิลิตร กับน้ำปราศจากไอออนปริมาตร 100 มิลลิลิตร ลงในขวดบรรจุสารขนาด 250 มิลลิลิตร กวนสารที่อุณหภูมิห้อง สำหรับขั้นตอนการเตรียมกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 3 โมลาร์ แสดงดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ขั้นตอนการเตรียมกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 3 โมลาร์

2.2 ขั้นตอนการเตรียมสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมสารไทเทเนียมไดไอโซโพรพอกไซด์ ปริมาตร 0.60 มิลลิลิตร กับสารเอทานอลปริมาตร 9 มิลลิลิตร ลงในขวดบรรจุสารขนาด 10 มิลลิลิตร กวนสารให้ผสมกันที่อุณหภูมิห้องในเครื่องล้างความถี่สูง เป็นเวลา 30 นาที

ขั้นตอนการเตรียมสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์ แสดงดังภาพที่ 2



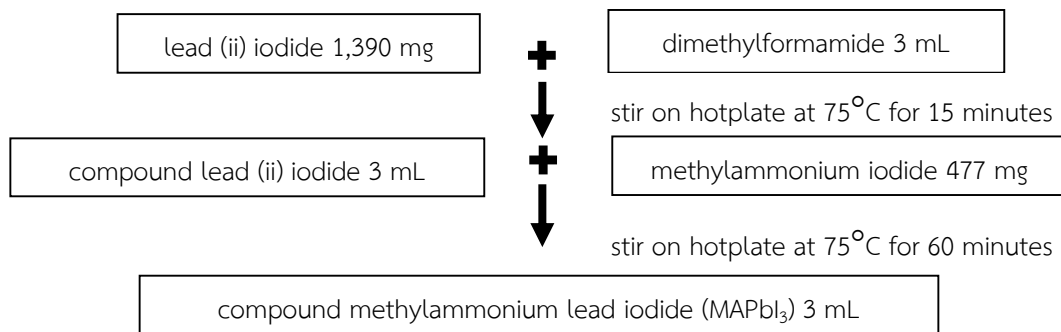
ภาพที่ 2 ขั้นตอนการเตรียมสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์

2.3 ขั้นตอนการเตรียมสารประกอบเมทิลแอมโมเนียมเลดไอโอไดด์

ขั้นตอนที่ 1 เตรียมสารประกอบเลดไอโอไดด์ จากการผสมผงเลดไอโอไดด์ปริมาตร 1,390 มิลลิกรัม กับสารไดเมทิลฟอร์มาไมด์ปริมาตร 3 มิลลิลิตร ลงในขวดบรรจุสารขนาด 5 มิลลิลิตร กวนสารให้ผสมกันที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส บนเครื่องกวนสารให้ความร้อน เป็นเวลา 15 นาที

ขั้นตอนที่ 2 ผสมผงเมทิลแอมโมเนียมไอโอไดด์ปริมาตร 480 มิลลิกรัม กับสารประกอบเลดไอโอไดด์ที่เตรียมไว้ กวนสารที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส บนเครื่องกวนสารให้ความร้อน เป็นเวลา 60 นาที

ขั้นตอนการเตรียมสารประกอบเมทิลแอมโมเนียมเลดไอโอไดด์ แสดงดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ขั้นตอนการเตรียมสารประกอบเมทิลแอมโมเนียมเลดไอโอไดด์

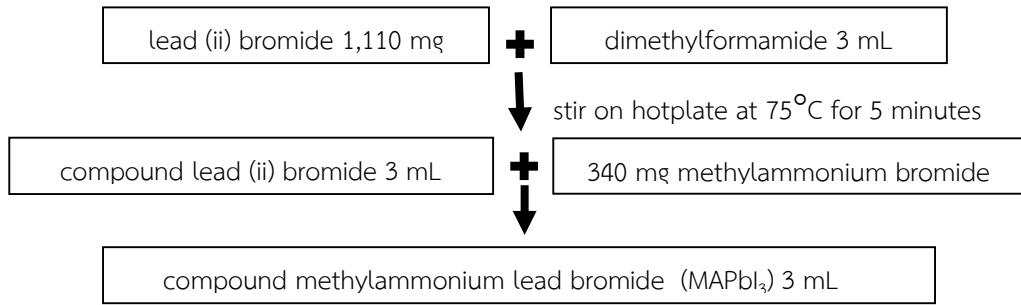
2.4 ขั้นตอนการเตรียมสารประกอบเมทิลแอมโมเนียมเลดโบรไมด์

ขั้นตอนที่ 1 เตรียมสารประกอบเลดโบรไมด์ จากการผสมผงเลดโบรไมด์ปริมาตร 1,110 มิลลิกรัมกับสารไดเมทิลฟอร์มาไมด์ปริมาตร 3 มิลลิลิตร ลงในขวดบรรจุสารขนาด 5 มิลลิลิตรกวนสารให้ผสมกันที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส บนเครื่องกวนสารให้ความร้อน เป็นเวลา 5 นาที

ขั้นตอนที่ 2 ผสมผงเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ปริมาตร 340 มิลลิกรัม กับสารประกอบเลดโบรไมด์ที่เตรียมไว้ กวนสารที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส บนเครื่องกวนสารให้ความร้อน เป็นเวลา 20 นาที

ขั้นตอนที่ 3 นำสารประกอบที่ได้มารองตะกอนออก เพื่อให้ได้สารประกอบที่ปราศจากตะกอน

ขั้นตอนการเตรียมสารประกอบเมทิลแอมโมเนียมเลดโบรไมด์ แสดงดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 ขั้นตอนการเตรียมสารประกอบเมทิลแอมโมเนียมเลดโบรไมด์

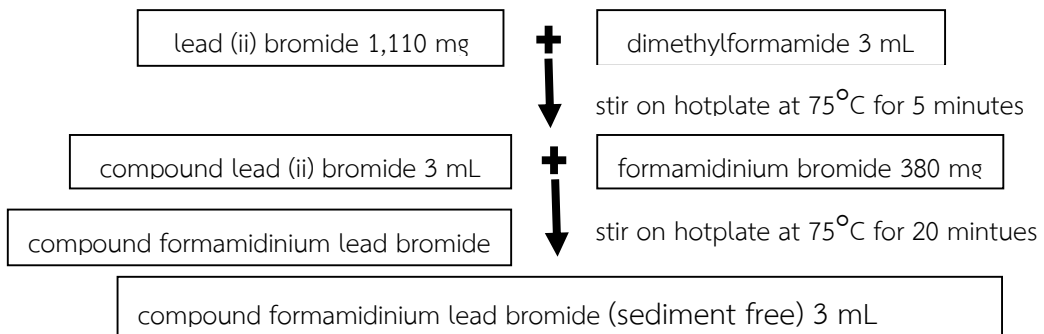
2.5 ขั้นตอนการเตรียมสารประกอบฟอร์มามิเดียมเลดโบรไมด์

ขั้นตอนที่ 1 เตรียมสารประกอบเลดโบรไมด์ จากการผสมผงเลดโบรไมด์ปริมาตร 1,110 มิลลิกรัม กับสารไดเมทิลฟอร์มามิเดียมปริมาตร 3 มิลลิลิตร ลงในขวดบรรจุสารขนาด 5 มิลลิลิตร กวนสารให้ผสมกันที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส บนเครื่องกวนสารให้ความร้อน เป็นเวลา 5 นาที

ขั้นตอนที่ 2 ผสมผงฟอร์มามิเดียมโบรไมด์ปริมาตร 380 มิลลิกรัม กับสารประกอบเลดโบรไมด์ที่เตรียมไว้ กวนสารที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส บนเครื่องกวนสารให้ความร้อน เป็นเวลา 20 นาที

ขั้นตอนที่ 3 นำสารประกอบที่ได้มารองตะกอนออก เพื่อให้ได้สารประกอบที่ปราศจากตะกอน

ขั้นตอนการเตรียมสารประกอบฟอร์มามิเดียมเลดโบรไมด์ แสดงดังภาพที่ 5

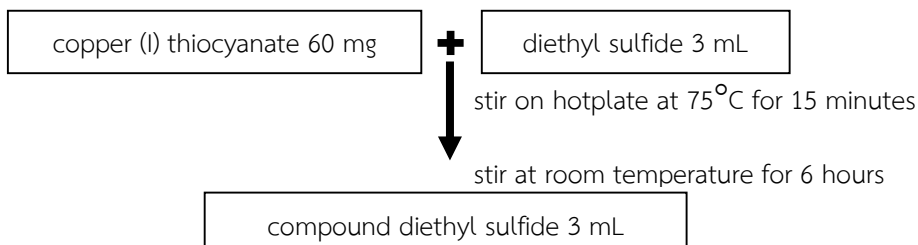


ภาพที่ 5 ขั้นตอนการเตรียมสารประกอบฟอร์มามิเดียมเลดโบรไมด์

2.6 ขั้นตอนการเตรียมสารประกอบคอปเปอร์ไทโอไซยาเนต ผสมผงคอปเปอร์ไทโอไซยาเนต ปริมาตร 60 มิลลิกรัม กับสารไดเอทิลซัลไฟด์ปริมาตร 3 มิลลิลิตร ลงในขวดบรรจุสารขนาด 5 มิลลิลิตร

กวนสารให้ผสมกันที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส บนเครื่องกวนสารให้ความร้อน เป็นเวลา 15 นาที จากนั้น กวนสารที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

ขั้นตอนการเตรียมสารประกอบคอปเปอร์ไทโอไซยาเนต แสดงดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 ขั้นตอนการเตรียมสารประกอบคอปเปอร์ไทโอไซยาเนต

2.7 ขั้นตอนการเตรียมสารประกอบคาร์บอน

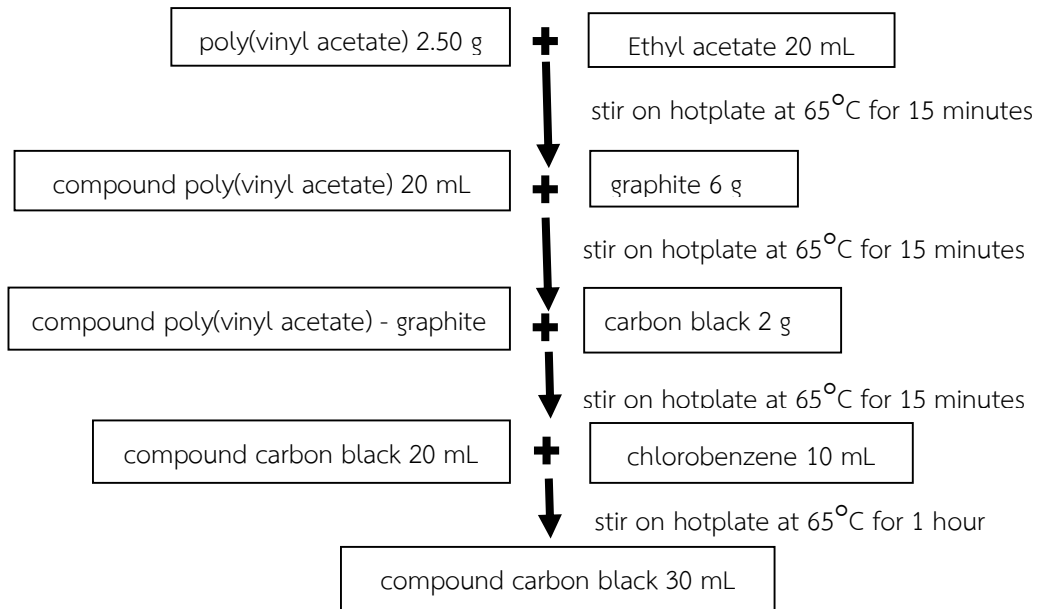
ขั้นตอนที่ 1 เตรียมสารประกอบโพลีไวนิลอะซิเตท จากการผสมผงโพลีไวนิลอะซิเตทปริมาตร 2.50 กรัม กับสารเอทิลอะซิเตทปริมาตร 20 มิลลิลิตร ลงในขวดบรรจุสารขนาด 50 มิลลิลิตร กวนสารให้ผสมกันที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส บนเครื่องกวนสารให้ความร้อน เป็นเวลา 30 นาที

ขั้นตอนที่ 2 เตรียมสารประกอบโพลีไวนิลอะซิเตท-แกรไฟท์ จากการผสมผงแกรไฟท์ปริมาตร 6 กรัม กับสารประกอบโพลีไวนิลอะซิเตทที่เตรียมไว้ กวนสารให้ผสมกันที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส บนเครื่องกวนสารให้ความร้อน เป็นเวลา 30 นาที

ขั้นตอนที่ 3 เตรียมสารประกอบคาร์บอน จากการผสมผงคาร์บอนแบล็กปริมาตร 2 กรัม กับสารประกอบโพลีไวนิลอะซิเตทที่เตรียมไว้ กวนสารให้ผสมกันที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส บนเครื่องกวนสารให้ความร้อน เป็นเวลา 30 นาที

ขั้นตอนที่ 4 ผสมสารคลอโรเบนซีนปริมาตร 10 มิลลิลิตร กับสารประกอบคาร์บอนที่เตรียมไว้ กวนสารให้ผสมกันที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที

ขั้นตอนการเตรียมสารประกอบคาร์บอน แสดงดังภาพที่ 7

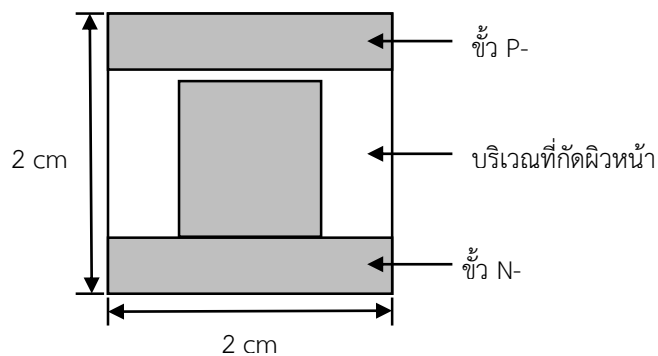


ภาพที่ 7 ขั้นตอนการเตรียมสารประกอบกบคาร์บอน

3. ขั้นตอนการดำเนินการ

3.1 ขั้นตอนการเตรียมแผ่นกระจกนำไฟฟ้า

ขั้นตอนที่ 1 นำแผ่นกระจกนำไฟฟ้า (fluorine doped tin oxide glass, FTO) มาวัดค่าความต้านทานด้วยเครื่องมัลติมิเตอร์ เพื่อหาตำแหน่งที่เคลือบชั้น FTO ไว้ แล้วตัดกระจกให้ได้ขนาด 2x2 เซนติเมตร โดยเลือกตัดด้านที่ไม่นำไฟฟ้า เช็ดคราบน้ำมันที่เกิดจากการอุปกรณ์ตัดกระจกออกด้วยสารเอทานอล จากนั้นติดแผ่นเทปโพลีไธไมด์เพื่อกำหนดบริเวณขั้วที่ต้องการแสดงดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 กระจกนำไฟฟ้า FTO สำหรับเตรียมขั้วไฟฟ้า

ขั้นตอนที่ 2 เตรียมสารประกอบสังกะสี ผสมการผสมสังกะสีปริมาณ 1/2 ซ้อนตักสารเคมี กับน้ำปราศจากไอออนปริมาณพอท่วมสาร ลงในบีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร กวนสารที่อุณหภูมิห้องจนผงสังกะสีแตกตัวจนหมด

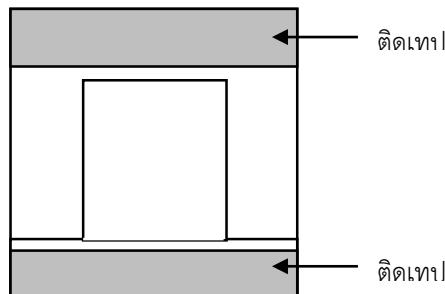
3.2 ขั้นตอนการล้างแผ่นกระจกนำไฟฟ้า

ขั้นตอนที่ 1 นำแผ่นกระจกนำไฟฟ้าใส่ในอ่างแก้วในแนวตั้งฉากกับพื้นอ่าง เติมน้ำยาล้างจาน ผสมน้ำให้ท่วมแผ่นกระจก ทำการล้างในเครื่องล้างความถี่สูงที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 15 นาทีแล้วเทน้ำยาล้างจานออก

ขั้นตอนที่ 2 เติมน้ำลงในอ่างให้ท่วมแผ่นกระจก ทำการล้างในเครื่องล้างความถี่สูงที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 5 นาที แล้วเทน้ำออก

3.3 ขั้นตอนการเตรียมชั้นวัสดุนำส่งอิเล็กตรอน (electron transport material, ETM)

ขั้นตอนที่ 1 นำแผ่นกระจกนำไฟฟ้าที่ผ่านการล้างจนสะอาดแล้ว มาทำการติดเทปโพลีเอไมต์ในลักษณะแสดงดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 กระจกนำไฟฟ้า FTO สำหรับเตรียมเคลือบผิวชั้นวัสดุการนำส่งอิเล็กตรอน

ขั้นตอนที่ 2 นำแผ่นกระจกไปอบแสงด้วยเครื่องทำความสะอาดยูวี-โอโซน เป็นเวลา 10 นาที

ขั้นตอนที่ 3 นำแผ่นกระจกไปให้ความร้อนสูงบนเครื่องเตาให้ความร้อนหน้าดำ ทำการให้อุณหภูมิโดยแบ่งออกเป็น 6 ลำดับ ดังนี้

ลำดับที่ 1 ให้ความร้อนที่ 83 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที

ลำดับที่ 2 ให้ความร้อนที่ 167 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที

ลำดับที่ 3 ให้ความร้อนที่ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที

ลำดับที่ 4 ให้ความร้อนที่ 333 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที

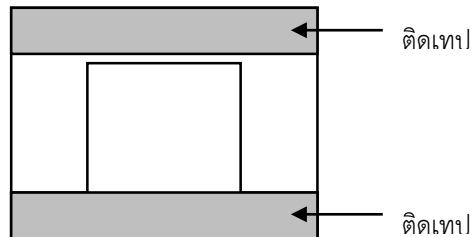
ลำดับที่ 5 ให้ความร้อนที่ 417 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที

ลำดับที่ 6 ให้ความร้อนที่ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

จากนั้นทำการปิดเตา พักให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จะได้กระจกนำไฟฟ้าที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยชั้นวัสดุการนำส่งอิเล็กตรอน

3.4 ขั้นตอนการเตรียมชั้นเพอรอฟสไกต์ (perovskite)

ขั้นตอนที่ 1 นำแผ่นกระจกนำไฟฟ้าที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยชั้นวัสดุการนำส่งอิเล็กตรอนแล้ว มาทำการติดเทปแอมไตในลักษณะแสดงดังภาพที่ 10



ภาพที่ 10 กระจกนำไฟฟ้า FTO สำหรับเตรียมเคลือบผิวชั้นเพอรอฟสไกต์

ขั้นตอนที่ 2 นำแผ่นกระจกไปอบแสงด้วยเครื่องทำความสะอาดยูวี-โอโซนเป็นเวลา 10 นาที

ขั้นตอนที่ 3 นำแผ่นกระจกไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที และให้ความร้อนกับสารประกอบเพอรอฟสไกต์ (MAPbI_3 หรือ MAPbBr_3 หรือ FAPbBr_3) ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที เพื่อเป็นการเตรียมความพร้อมสำหรับการลงชั้นเพอรอฟสไกต์

ขั้นตอนที่ 4 นำแผ่นกระจกติดตั้งในเครื่องเคลือบผิวตัวอย่างด้วยการหมุนเหวี่ยง หดสารประกอบเพอรอฟสไกต์ปริมาตร 60 ไมโครลิตร ลงให้ทั่วบริเวณแผ่นกระจกที่ไม่ได้ติดเทป ทำการหมุนเหวี่ยง แบ่งออกเป็น 2 ลำดับ ดังนี้

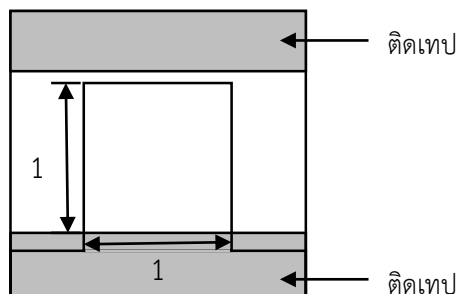
ลำดับที่ 1 หมุนเหวี่ยงที่ความเร็ว 1,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 วินาที เพื่อให้สารประกอบกระจายตัวทั่วทั้งแผ่นกระจก

ลำดับที่ 2 หมุนเหวี่ยงที่ความเร็ว 4,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 วินาที เพื่อให้

ขั้นตอนที่ 5 นำแผ่นกระจกไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วพักให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 30 นาที จะได้กระจกนำไฟฟ้าที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยชั้น เพอรอฟสไกต์

3.5 ขั้นตอนการเตรียมชั้นวัสดุการนำส่งโฮล (hole transport material, HTM)

ขั้นตอนที่ 1 นำแผ่นกระจกนำไฟฟ้าที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยชั้นเพอรอฟสไกต์แล้ว มาทำการติดเทปโพลิแอมไตในลักษณะ แสดงดังภาพที่ 11



ภาพที่ 11 กระจกนำไฟฟ้า FTO สำหรับเตรียมเคลือบผิวชั้นวัสดุการนำส่งโฮล

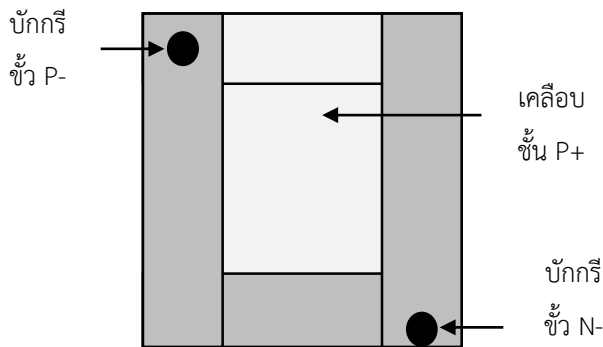
ขั้นตอนที่ 2 นำแผ่นกระจกไปอบแสงด้วยเครื่องทำความสะอาดยูวี-โอโซนเป็นเวลา 10 นาที
 ขั้นตอนที่ 3 นำแผ่นกระจกติดตั้งในเครื่องเคลือบผิวตัวอย่างด้วยการหมุนเหวี่ยง หดสารประกอบคอปเปอร์ไทโอไซยาเนตปริมาตร 60 ไมโครลิตร ลงให้ทั่วบริเวณแผ่นกระจกที่ไม่ได้ติดเทป ทำการหมุนเหวี่ยง แบ่งออกเป็น 2 ลำดับ ดังนี้

ลำดับที่ 1 หมุนเหวี่ยงที่ความเร็ว 1,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 วินาที เพื่อให้สารประกอบกระจายตัวทั่วทั้งแผ่นกระจก

ลำดับที่ 2 หมุนเหวี่ยงที่ความเร็ว 2,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 วินาที เพื่อให้

3.6 ขั้นตอนการเตรียมขั้วคาร์บอน (carbon electrode)

ขั้นตอนที่ 1 นำแผ่นกระจกนำไฟฟ้าที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยชั้นวัสดุคาร์บอนสังเคราะห์แล้ว มาทำการติดเทปโพลีเอไมด์ในลักษณะ แสดงดังภาพที่ 12



ภาพที่ 12 กระจกนำไฟฟ้า FTO สำหรับเตรียมเคลือบผิวขั้วคาร์บอน

ขั้นตอนที่ 2 เคลือบสารประกอบคาร์บอนลงบนแผ่นกระจกให้ทั่วบริเวณ active area โดยใช้ไม้ปาดสาร คาร์บอนที่ได้ต้องมีไม่มช่องว่างและมีลักษณะบาง เพื่อลดค่าความต้านทานที่เกิดขึ้น พักให้แห้งตัวที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

ขั้นตอนที่ 3 ลอกเทปฝั่งซ้ายออกทั้งแผ่น ทำการบักกรีขั้วพี และเปิดเทปฝั่งขวาล่างของแผ่นกระจกขึ้น ทำการบักกรีขั้วเอ็น

ขั้นตอนที่ 4 ทำการติดกาวให้ทั่วบริเวณที่ไม่ได้ติดเทป โดยใช้ปืนกาว เพื่อป้องกันความชื้นเข้าไปสัมผัสกับเซลล์แสงอาทิตย์ จะได้กระจกนำไฟฟ้าที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยขั้วคาร์บอน FTO เทคนิคนี้เป็นกระบวนการเตรียมแผ่นฟิล์มบาง เริ่มต้นโดยการหดสารที่ต้องการเตรียมแผ่นฟิล์มบางลงบนพื้นผิว จากนั้นทำเครื่องมือและวัสดุสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

- 1.1 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (optical microscope, ยี่ห้อ Olympus, รุ่น BX51)
- 1.2 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (x-ray diffractometer, XRD)
- 1.3 เครื่องวิเคราะห์การดูดกลืนรังสีของสารที่อยู่ในช่วงแสงอัลตราไวโอเล็ต

- 1.4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ SEC, รุ่น SNE-4500M)
- 1.5 เครื่องวิเคราะห์ธาตุเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ EDX or EDS, ยี่ห้อ SEC, รุ่น SNE-4500
- 1.6 เครื่องจำลองแสงอาทิตย์ (solar simulator, ยี่ห้อ Peccell, รุ่น PEC-L11)
- 1.7 เครื่องชั่งทศนิยมสี่ตำแหน่ง (semi-micro balance, ยี่ห้อ Sartorius, รุ่น Secura125-1S)
- 1.8 เครื่องกวนสารให้ความร้อน (hotplate, ยี่ห้อ IKA, รุ่น C-MAG HS7)
- 1.9 เครื่องล้างความถี่สูง (ultrasonic cleaner, ยี่ห้อ Protronics intertrade)
- 1.10 เครื่องทำความสะอาดยูวี-โอโซน ยี่ห้อ Technovision, รุ่น 208 UV-O₃ Cleaning)
- 1.11 เครื่องเคลือบผิวตัวอย่างด้วยการปั่นเหวี่ยง (spin coater, ยี่ห้อ Essol, รุ่น SC-950P)
- 1.12 ตู้ดูดควัน (fume hood, ยี่ห้อ Neoflow, รุ่น PP3)
- 1.13 เครื่องปั๊มรีไซเคิลน้ำและน้ำเสีย ยี่ห้อ MBR Electronics, รุ่น USS-9200)
- 1.14 ปืนกาว (glue gun, ยี่ห้อ STANLEY, รุ่น 69-GR20)

2. เทคนิคเตรียมการชิ้นงาน

2.1 เทคนิคการเคลือบผิวตัวอย่างด้วยการหมุนเหวี่ยง (spin coating technique)

การวิจัยครั้งนี้ใช้เทคนิคเคลือบผิวตัวอย่างด้วยการหมุนเหวี่ยงในการเคลือบฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ เพอร์อฟสไกต์ และคอปเปอร์ไทโอไซยาเนต บนพื้นผิวแผ่นกระจกนำไฟฟ้า การหมุนเหวี่ยงจนสารกระจายตัวทั่วพื้นผิว จะทำให้ได้แผ่นฟิล์มบางระดับนาโนเมตร



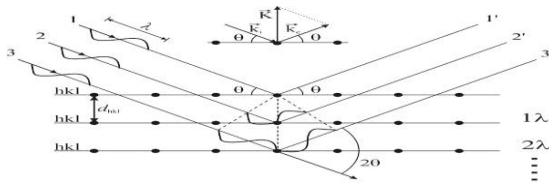
ภาพที่ 13 เครื่องเคลือบผิวตัวอย่างด้วยการหมุนเหวี่ยง

3. เทคนิคที่ใช้วิเคราะห์และหลักการทางานเครื่องมือของ

3.1. เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (x-ray diffraction, XRD)

เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของธาตุและสารประกอบทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณโดยอาศัยกฎของแบรกก์ (Bragg's law) ดังสมการที่ 1 กล่าวคือ เมื่อรังสีเอ็กซ์ตกกระทบกับระนาบของผลึกที่มุมตกกระทบ θ รังสีบางส่วนจะเกิดการเลี้ยวเบนที่มุมสะท้อน θ แสดงดังภาพที่ 14 ซึ่งผลการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของระนาบผลึกที่ต่างกันจะเกิดที่มุม θ ที่ต่างกัน

$$2d \sin\theta = n\lambda \quad (1)$$



ภาพที่ 14 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เมื่อตกกระทบระนาบของวัสดุ

3.2 การดูดกลืนรังสีของสารที่อยู่ในช่วงความยาวคลื่นอัลตราไวโอเล็ตและแสงที่ตามองเห็น เป็นเทคนิคที่ใช้ระบุชนิดและปริมาณของสารต่างๆ ที่มีอยู่ในตัวอย่าง โดยอาศัยหลักการดูดกลืนรังสีของสารที่อยู่ในช่วงความยาวคลื่นอัลตราไวโอเล็ตและที่ตามองเห็น ความยาวคลื่นประมาณ 190-1,000 นาโนเมตร โดยที่ความยาวคลื่นแสงจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณและชนิดของสารที่อยู่ในตัวอย่าง เมื่อทำการวัดปริมาณของแสงที่ผ่านหรือสะท้อนมาจากตัวอย่างเทียบกับแสงจากแหล่งกำเนิดที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆ ตามกฎของเบียร์แลมเบิร์ต (Beer Lambert's law) ดังสมการที่ 2 ค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ของสารจะแปรผันกับจำนวนโมเลกุลที่มีการดูดกลืนแสง

$$A = \epsilon bc \tag{2}$$

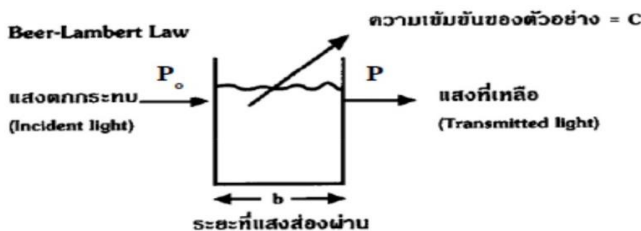
เมื่อ ϵ คือ สัมประสิทธิ์การลดทอน มีหน่วยเป็น $L \cdot mol^{-1} \cdot cm^{-1}$

b คือ ความยาวที่แสงส่องผ่านวัสดุตัวอย่าง มีหน่วยเป็น cm

c คือ ความเข้มข้นของสารประกอบในสารละลาย มีหน่วยเป็น $mol \cdot L^{-1}$

จากสมการจากคุณสมบัติหลักการทวิภาคของคลื่น-อนุภาค ได้กล่าวไว้ว่าคลื่นแสงสามารถที่จะกระทำตัวเป็นอนุภาคได้ ซึ่งอนุภาคนี้เรียกว่า โฟตอน พลังงานโฟตอนคือ $E = hv$ ซึ่ง h คือค่าคงที่พลังค์ (Planck's constant) และ ν คือความถี่ เราสามารถแสดงความสัมพันธ์ ระหว่างความยาวคลื่นและพลังงานได้ดังนี้

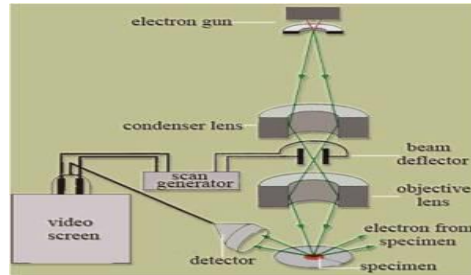
$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{hc}{E} = \frac{1.24}{E} \mu m \tag{3}$$



ภาพที่ 15 การดูดกลืนรังสีของสารที่อยู่ในช่วงความยาวคลื่นอัลตราไวโอเล็ตและที่ตามองเห็น

4. เทคนิคการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) เป็นเทคนิควิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานของตัวอย่าง โดยมีหลักการการทำงานคล้ายกับกล้องจุลทรรศน์เชิงแสง (optical microscope, OM) แต่เปลี่ยนจากแสงเป็นลำอิเล็กตรอน โดยกลุ่มอิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิด (electron gun) จะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าให้เคลื่อนที่ผ่านเลนส์คอนเดนเซอร์ (condenser lens)

เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอนโดยสามารถปรับให้ขนาดของอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ



ภาพที่ 16 ภาพจำลองส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด

5. เทคนิคการวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์ (energy dispersive x-ray spectroscopy) เป็นเทคนิควิเคราะห์องค์ประกอบและการมีอยู่ของธาตุบนพื้นผิวชิ้นงานตัวอย่างละเอียดและมีความสมบูรณ์มาก โดยมีหลักการการทำงานอยู่ที่การกระตุ้นวัตถุตัวอย่างโดยอนุภาคพลังงานสูง อันได้แก่อนุภาคอิเล็กตรอน ซึ่งจะถูกล่อยออกมาจากหลอดกำเนิดรังสีเอ็กซ์ (x-ray tube)

6. เทคนิคการวัดประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ (techniques for measuring solar cell) เป็นเทคนิค วิเคราะห์ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยใช้เครื่องจำลองแสงอาทิตย์ เป็นอุปกรณ์ที่ให้สมบัติ ความรับรังสี (irradiance) และสเปกตรัม (spectrum) ใกล้เคียงกับแสงอาทิตย์ธรรมชาติ เพื่อการวัดลักษณะ กระแสและแรงดันไฟฟ้า (I-V curve) ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ คือ อัตราส่วนระหว่างกำลังไฟฟ้า กระแสตรงที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ (PV) ต่อกำลังแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบ ดังสมการ 4

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} \times 100 \text{ เปอร์เซ็นต์} = \frac{I_m V_m}{P_{in}} \times 100 \text{ เปอร์เซ็นต์} \quad (4)$$

ผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนองค์ประกอบของฟิล์มบาง เพอรอฟสไกต์ [(MAPbI₃)_x(MAPbBr₃)_{1-x} และ (MAPbI₃)_x(FAPbBr₃)_{1-x} เมื่อ x = 1, 0.8, 0.6, 0.4, 0.2 และ 0.0] กับลักษณะ โครงสร้างผลึกของธาตุและสารประกอบ, ลักษณะการดูดกลืนแสง, ลักษณะพื้นผิวทางกายภาพ, ลักษณะการมี อยู่ของธาตุบนพื้นผิวของฟิล์มบาง และประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์

1. ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนองค์ประกอบของฟิล์มบางเพอรอฟสไกต์กับโครงสร้างผลึก ของธาตุและสารประกอบ ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ ผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางเพอรอฟสไกต์ ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ โดยทำการวัดจุดสูงสุดของการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ ตั้งแต่มุม 2θ เท่ากับ 10 องศา ถึง 60 องศา แสดงผลดังภาพที่ 14 จะพบว่าตำแหน่งของระนาบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ ฟิล์มบาง (MAPbI₃)_x(MAPbBr₃)_{1-x} จะปรากฏที่ตำแหน่งมุม 2θ เท่ากับ 14.1, 20.0, 24.4, 28.4, 31.8, 34.9, 40.3, 42.9 และ 50.1 องศา ซึ่งสอดคล้องกับระนาบการเลี้ยวเบน (110), (200), (202), (220), (310), (312), (224), (314) และ (404) ตามลำดับ

ตำแหน่งของระนาบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง PbI_2 มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบหกเหลี่ยม (hexagonal) ปรากฏที่ตำแหน่งมุม 2θ เท่ากับ 12.6, 22.6, 26.0, 30.2, 39.7 และ 47.8 องศา สอดคล้องกับระนาบการเลี้ยวเบน (100), (111), (002), (102), และ (110) ตามลำดับ

ตำแหน่งของระนาบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง $(MAPbI_3)_x(FAPbBr_3)_{1-x}$ ปรากฏที่ตำแหน่งมุม 2θ เท่ากับ 14.8, 21.0, 29.9, 33.6, 36.9, 42.8 และ 45.6 องศา สอดคล้องกับระนาบการเลี้ยวเบน (100), (110), (200), (210), (211), (220) และ (221) ตามลำดับ

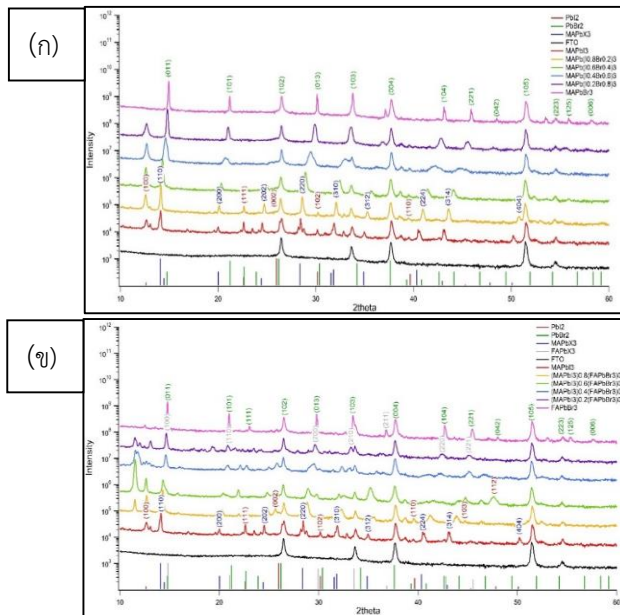
ตำแหน่งของระนาบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง $PbBr_2$ มีโครงสร้างผลึกแบบแปดเหลี่ยม (octahedral) ปรากฏที่ตำแหน่งมุม 2θ เท่ากับ 14.8, 21.2, 26.2, 30.4, 34.2, 37.6, 42.6, 44.1, 49.4, 51.9, 54.2, 56.8 และ 58.4 องศา สอดคล้องกับระนาบการเลี้ยวเบน (011), (101), (102), (013), (103), (004), (104), (221), (042), (105), (223), (125) และ (006) ตามลำดับ

จากผลการวิจัย เมื่อพิจารณาจุดสูงสุดกราฟของการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์พบเฟสปนเปื้อนเกิดขึ้นนั้น หมายถึงฟิล์มบางตัวอย่างที่เตรียมไว้ไม่มีความบริสุทธิ์ ซึ่งเฟสปนเปื้อนดังกล่าวคาดว่าจะน่าจะเป็นเฟสของ PbI_2

เฟสของ PbI_2 พบมากในฟิล์มบางตัวอย่างที่มีสัดส่วนองค์ประกอบดังนี้ $MAPbI_3$, $(MAPbI_3)_{0.8}(MAPbBr_3)_{0.2}$, $(MAPbI_3)_{0.6}(MAPbBr_3)_{0.4}$ และ $(MAPbI_3)_{0.4}(MAPbBr_3)_{0.6}$ และเฟสปนเปื้อนของ $PbBr_2$ พบมากในฟิล์มบางตัวอย่าง $(MAPbI_3)_{0.2}(FAPbBr_3)_{0.8}$ และ $MAPbBr_2$ นอกจากนี้ฟิล์มบางตัวอย่าง $(MAPbI_3)_{0.4}(MAPbBr_3)_{0.6}$ พบว่า มีลักษณะฐานของจุดสูงสุดกราฟการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่กว้างกว่าสัดส่วนอื่นๆ เกิดจากโครงสร้างผลึกเปลี่ยนแปลงไปไม่สมบูรณ์ อันเกิดจากอุณหภูมิขณะเตรียมฟิล์มบางนั้นไม่เหมาะสม สามารถตรวจสอบได้จากเทคนิคการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด สามารถสันนิษฐานได้ว่าจะมีลักษณะพื้นผิวทางกายภาพเป็นเม็ดผลึกขนาดเล็ก มีระยะห่างระหว่างผลึกกว้าง

พิจารณาภาพที่ 14 เฟสของ PbI_2 พบมากในฟิล์มบางตัวอย่างที่มีสัดส่วนองค์ประกอบดังนี้ $MAPbBr_3$ และ $(MAPbI_3)_{0.8}(FAPbBr_3)_{0.2}$ และเฟสปนเปื้อนของ $PbBr_2$ พบมากในฟิล์มบางตัวอย่าง $(MAPbI_3)_{0.6}(FAPbBr_3)_{0.4}$, $(MAPbI_3)_{0.4}(FAPbBr_3)_{0.6}$, $(MAPbI_3)_{0.2}(FAPbBr_3)_{0.8}$ และ $FAPbBr_3$ นอกจากนี้ฟิล์มบางตัวอย่าง $(MAPbI_3)_{0.4}(FAPbBr_3)_{0.6}$ พบว่า มีลักษณะฐานของจุดสูงสุดกราฟการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่กว้างกว่าสัดส่วนอื่น ๆ คล้ายกับฟิล์มบางตัวอย่าง $(MAPbI_3)_{0.4}(MAPbBr_3)_{0.6}$ จึงพอประมาณได้ว่าที่สัดส่วน x น้อยกว่า 0.6 จะทำให้ฟิล์มบางเพอโรฟสไกต์มีลักษณะเป็นเม็ดผลึกขนาดเล็ก มีระยะห่างระหว่างผลึกกว้าง ส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานแสงไปเป็นพลังงานไฟฟ้าต่ำ เนื่องมาจากเม็ดผลึกไม่ต่อเนื่องกันทำให้แสงส่องผ่านไปได้จึงทำให้ดูดกลืนแสงได้ไม่เต็มประสิทธิภาพเท่าที่ควร และเป็นอุปสรรคของอิเล็กตรอนและโฮลอิสระที่จะต้องเคลื่อนที่ไปยังชั้นวัสดุนำส่งพาหะอิเล็กตรอนและชั้นวัสดุนำส่งพาหะโฮลต่อไป

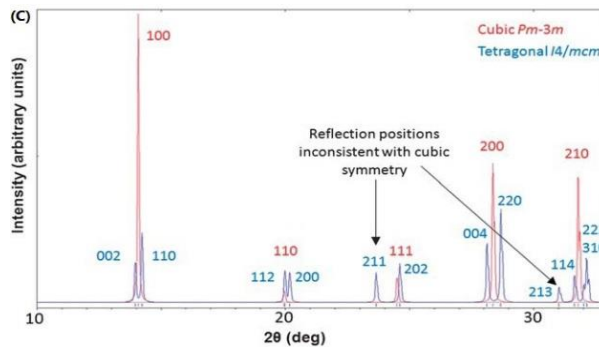
เมื่อเปรียบเทียบกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นกับมุม 2θ จากการทดลองเทียบกับผลการทดลองของ Joshua M. Pearce (Joshua M. Pearce, 2021) พบว่ามีเฟสตรงกันที่โครงสร้างผลึกแบบทรงเตตระโกนอล



ภาพที่ 17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นกับมุม 2θ

(ก)ฟิล์มบาง $(\text{MAPbI}_3)_x(\text{MAPbBr}_3)_{1-x}$

(ข)ฟิล์มบาง $(\text{MAPbI}_3)_x(\text{FAPbBr}_3)_{1-x}$



ภาพที่ 18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นกับมุม 2θ ของฟิล์มบาง MAPbI₃ โดย JoshuaM.Pearce อภิปรายผล

การวิจัยในครั้งนี้พบว่า การเตรียมไอออนผสมเพอรอฟสไกต์เพื่อใช้เป็นชั้นดูดกลืนแสงในเซลล์แสงอาทิตย์ ให้ค่าประสิทธิภาพสูงสุดอยู่ที่ 2.516 % โดยใช้แผ่นฟิล์มบาง $(\text{MAPbI}_3)_{0.8}(\text{FAPbBr}_3)_{0.2}$ เป็นชั้นดูดกลืนแสง มีช่องว่างพลังงานกว้าง 1.72 eV เปรียบเทียบกับการทดลองของ Aurelion M. A. Leguy (Aureline M. A. Leguy , 2021) ค่าช่องว่างพลังงานจะอยู่ในช่วง 1.55-2.24 eV ถ้าเทียบที่สัดส่วน $x = 0.8$ นั้นพบว่าค่าช่องว่างพลังงานมีค่าประมาณ 1.69 eV มีการคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.03 eV เกิดจากการที่ผลึกของ PbI_2 เปลี่ยนแปลงไปเป็นผลึกเพอรอฟสไกต์ได้ไม่หมด แผ่นฟิล์มบางตัวอย่างดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่น 634 nm อยู่ในช่วงแสงสีส้ม

มีลักษณะพื้นผิวทางกายภาพเป็นแบบแท่งกระจายตัวทั่วทั้งผิวตัวอย่าง เปรียบเทียบกับการทดลองของ Lung-Chien Chen (Lung-Chien Chen, 2021) ที่มีลักษณะพื้นผิวทางกายภาพเป็นแบบเม็ดผลึกขนาดใหญ่ กระจายตัวทั่วทั้งผิวตัวอย่าง มีระยะห่างระหว่างผลึกแคบ พบว่าการทดลองที่ได้นั้นแตกต่างออก เกิดจากขั้นตอน การให้ความร้อนก่อนการเตรียมฟิล์มบางชั้นเพอรอฟสไกต์ เนื่องจากกระจกนำไฟฟ้าที่ใช้มีลักษณะบาง กระจาย ความร้อนได้ง่ายเมื่อนำออกจากเตาให้ความร้อน ทำให้เมื่อทำการติดตั้งกระจกนำไฟฟ้าลงในเครื่องเคลือบผิว ตัวอย่างด้วยวิธีหมุนเหวี่ยงพบว่าอุณหภูมิของแผ่นกระจกนำไฟฟ้านั้นลดลงไปมาก ทำให้ลักษณะพื้นผิวทาง กายภาพมี ลักษณะเป็นเส้นหรือแท่งนั่นเอง และจากการตรวจวัดด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ เปรียบเทียบ กับการทดลองของ Joshua M. Pearce (Joshua M. Pearce, 2021) พบว่ามีเฟสปนเปื้อนอยู่ อันเกิดจากเฟส ของ PbI_2 และ $PbBr_2$ ที่เปลี่ยนแปลงไปเป็นผลึกเพอรอฟสไกต์ได้ไม่หมด ส่งผลให้ความสามารถในการดูดกลืน แสงและค่าช่องว่างพลังงานของฟิล์มบางตัวอย่างคลาดเคลื่อนจากผลอื่นๆ

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนการวิจัยจากสาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์และสาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ได้เอื้อเพื่อ สถานที่ ห้องปฏิบัติการและการใช้เครื่องมือต่างๆในการดำเนินการวิจัย จนทำให้งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ อย่างสมบูรณ์

เอกสารอ้างอิง

- การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. (2561). **ประกาศคณะกรรมการพัฒนาระบบพลังงานไฟฟ้าทางออก
สุดท้ายที่เหลืออยู่**. กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น).
- สหรัฐ เพ็ชรกุล (2561). **อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ**. กรุงเทพฯ : คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอม
เกล้าคุณทหารลาดกระบัง.
- อธิป เพ็งพัด. (2561). **การวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ ใน คู่มือปฏิบัติการฟิสิกส์ระดับสูง 2
(315394)**. ขอนแก่น : ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- Aureline, M.A. (2016, November). **Experimental and theoretical optical properties of
methylammonium lead halide perovskite**, *Nanoscale*, **48**, 6317-6327.
- Joshua M. Pearce. (2016, April 26). **Crystal Structure Formation of CH₃NH₃PbI₃ Perovskite.
Material**, **P.1, 9**, 1-13.
- L. M. Z. T. Yan K. (2020, August 14). **Application of Methylamine Gas in Fabricating
Organic-Inorganic Hybrid Perovskite Solar Cells**. *Energy Technology*, **4**, 113-114.
- Lung-Chien Chen. (2016, June). **Efficient luminescent solar cells based on tailored mixed-
cation perovskites**. *Sci Adv*, 2375-2548.
- Yan, H., Kyong, P., Delaquis & Mazza, G. (2015). **Hybrid halide perovskite solar cell
Precursors : Colloidal chemistry and coordination engineering behind processing
for high efficiency**. New York : McGraw-Hill.



การศึกษาความเป็นไปได้การใช้พลังงานทดแทนด้วยระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้ง
บนหลังคาอาคารเรียน 7 วิทยาลัยเทคนิคกำแพงเพชร

A Feasibility Study of Using Renewable Energy with Solar Cells Installed on
the Roof of Building 7, Kamphaeng Phet Technical College

ณัฐดนัย เรือนคำ*

Nuthdanai Rueankham

คมกริช กลิ่นศรีสุข*

Komkrit Klinsresuk

เทอดพล เพชรจันทร์*

Terdpon Phetchan

Received : October 30, 2023

Revised : February 7, 2024

Accepted : March 11, 2024

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้การใช้พลังงานทดแทนด้วยระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคาอาคารเรียน 7 วิทยาลัยเทคนิคกำแพงเพชร โดยเปรียบเทียบต้นทุนในการลงทุนระหว่างระบบสายส่งของการไฟฟ้า (On grid system) และระบบโดดเดี่ยว (Off grid system) ที่ติดตั้งบนหลังคาอาคาร 7 วิทยาลัยเทคนิคกำแพงเพชร รวบรวมข้อมูลใบบันทึกค่าไฟของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคจังหวัดกำแพงเพชร และนำข้อมูลมาวิเคราะห์ พบว่า อาคารมีพื้นที่ใช้สอย 300 ตารางเมตร จำนวน 4 ชั้น มีผู้ใช้งานมากที่สุด หลังคาโปร่งโล่งไม่มีสิ่งกีดขวางปริมาณแสงแดด มีความเป็นไปได้สูงในการติดตั้งเพื่อผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์และการประมาณการติดตั้งระบบผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคาของระบบสายส่งของการไฟฟ้า (On grid system) ขนาด 20 kWp ใช้งบลงทุน 335,927 บาท ผลิตพลังงานไฟฟ้าออกมาได้ 80 kWh หรือ 80 หน่วย สามารถลดค่าไฟฟ้าได้เดือนละ 12,720 บาท หรือ 152,640 บาทต่อปี ระยะเวลาคืนทุน 2.20 ปี ที่อายุโครงการ 20 ปี มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) มีค่าเท่ากับ 12,982,950 อัตราผลตอบแทนต่อต้นทุน (BCR) มีค่าเท่ากับ 20.36 ระยะเวลาคืนทุน (PB) มีค่าเท่ากับ 0.25 ปี และอัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) มีค่าเท่ากับร้อยละ 19.98 ส่วนระบบโดดเดี่ยว (Off grid system) ขนาด 20 kWp ใช้งบลงทุน 800,330 บาท สามารถลดค่าไฟฟ้าได้เดือนละ 12,720 บาท หรือ 152,640 บาทต่อปี ระยะเวลาคืนทุน 5.24 ปี ที่อายุโครงการ 20 ปี มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) มีค่าเท่ากับ 12,073,411 อัตราผลตอบแทนต่อต้นทุน (BCR) มีค่าเท่ากับ 8.04

*อาจารย์ประจำแผนกวิชาไฟฟ้า วิทยาลัยเทคนิคกำแพงเพชร

Lecturer in the Department of Electrical Engineering Kamphaeng Phet Technical College

(Corresponding Author) e-mail: nuthdanai25170@gmail.com

ระยะเวลาคืนทุน (PB) มีค่าเท่ากับ 0.61 ปี และอัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) มีค่าเท่ากับร้อยละ 14.53 ดังนั้นการนำพลังงานทดแทนด้วยระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคาในรูปแบบระบบสายส่งของการไฟฟ้า (On grid system) มาใช้ในพื้นที่อาคารเรียน 7 วิทยาลัยเทคนิคกำแพงเพชร จึงมีความเป็นไปได้และมีความคุ้มค่า

คำสำคัญ : พลังงานทดแทน / ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ / ระบบสายส่งของการไฟฟ้า / ระบบโดดเดี่ยว / จุดคุ้มทุน

ABSTRACT

The purpose of this research is to study the feasibility of using renewable energy with a solar cell system installed on the roof of Building 7, Kamphaeng Phet Technical College. By comparing investment costs between the electricity transmission system (On grid system) and the isolated system (Off grid system) installed on the roof of Building 7, Kamphaeng Phet Technical College. Collect data from electricity bill records of the Provincial Electricity Authority, Kamphaeng Phet Province. and bring the data to analyze. It was found that the building has a usable area of 300 square meters, 4 floors, and has the most users. The roof is clear and there is no obstruction of the amount of sunlight. There is a high possibility of installation to produce electricity with solar energy and estimate for installing an electricity generation system with a solar cell system installed on the roof of the electricity transmission system (On grid system) size 20 kWp requires an investment budget of 335,927 baht. Produces 80 kWh or 80 units of electrical energy. Can reduce electricity costs by 12,720 baht per month or 152,640 baht per year. Payback period 2.20 years. At the project life of 20 years, the net present value (NPV) is equal to 12,982,950, the cost of return (BCR) is equal to 20.36, the payback period (PB) is equal to 0.25 years, and the internal rate of return (IRR) is equal to 19.98 percent. As for the isolated system (Off grid system), size 20 kWp, an investment budget of 800,330 baht, it can reduce electricity costs by 12,720 baht per month or 152,640 baht per year, with a payback period of 5.24 years. At the project life of 20 years, the net present value (NPV) is equal to 12,073,411, the cost of return (BCR) is equal to 8.04, the payback period (PB) is equal to 0.61 years, and the internal rate of return (IRR) is equal to 14.53 percent. Therefore, using renewable energy with a solar cell system installed on the roof in the form of a transmission system of the electricity authority (On grid system) to be used in the classroom building 7 of Kamphaeng Phet Technical College. Therefore it is possible and cost-effective.

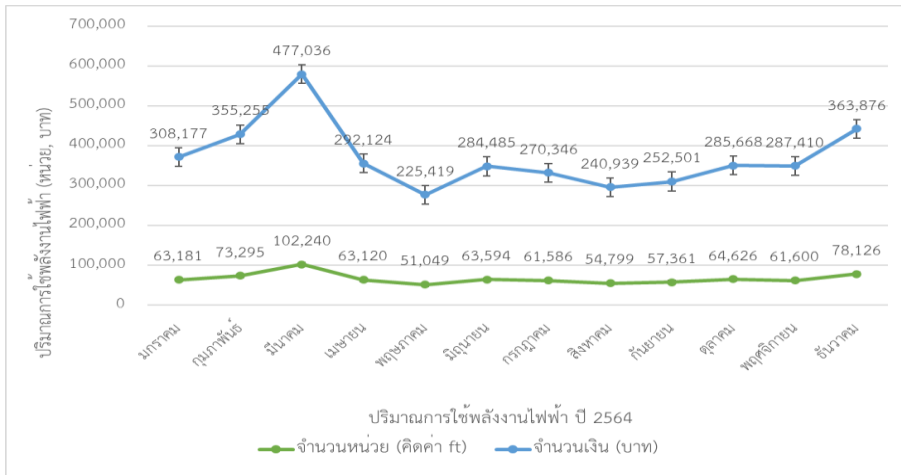
Keywords : renewable energy / Solar cell systems / On grid system / Off grid system / Break-even point

บทนำ

ปัจจุบันประเทศไทยมีความต้องการพลังงานรวมภายในประเทศ (สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน, 2565ก) เพื่อใช้ในการพัฒนาในด้านต่างๆ โดยเฉพาะการผลิตกระแสไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ การจัดหาแหล่งพลังงานในประเทศ เช่น ถ่านหินลิกไนต์ แก๊สธรรมชาติ พลังน้ำ ยังไม่เพียงพอและการนำเข้าแหล่งพลังงานจากต่างประเทศ เช่น น้ำมันดิบ ถ่านหิน ไฟฟ้า ทำให้ต้องสูญเสียเงินตราให้ต่างประเทศเป็นจำนวนมาก รัฐบาลได้มีการส่งเสริมให้มีการใช้พลังงานทดแทน เพื่อให้สามารถตอบสนองความต้องการใช้ในกิจกรรมการผลิตต่างๆ ได้อย่างเพียงพอในการผลิตพลังงานไฟฟ้า นอกจากนี้กระทรวงพลังงาน (สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน, 2565ข) ได้วางกรอบแผนบูรณาการพลังงานแห่งชาติที่ให้ความสำคัญใน 3 ด้านประกอบด้วย ด้านความมั่นคงทางพลังงาน (Security) ด้านเศรษฐกิจ (Economy) และด้านสิ่งแวดล้อม (Ecology) โดยทั้งหมดนั้นเป็นการดำเนินการเพื่อตอบสนองความต้องการใช้พลังงานรวมถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและชุมชน และเพื่อความสอดคล้องกับอัตราการเจริญเติบโตของประชากร ทั้งนี้พลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Energy) (นิพิฐพนธ์, อีริศศิลป์ และชน, 2565) นับว่าเป็นพลังงานทางเลือกหรือพลังงานสะอาดที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากที่สุดอย่างหนึ่ง กลุ่มประเทศพัฒนาแล้วต่างนิยมใช้ไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์กันอย่างแพร่หลายทั้งในภาคธุรกิจและภาคครัวเรือน เพราะมีความต้องการลดภาระการนำเข้าพลังงานหลักและตระหนักถึงภาวะโลกร้อนมากขึ้น ทำให้มีความต้องการใช้แผงโซลาร์เซลล์ (Solar Cells Modules) เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งประเทศไทยก็เป็นประเทศหนึ่งที่มีการพัฒนาการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ ในการนำมาผลิตเป็นพลังงานไฟฟ้าที่สามารถใช้ในการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมของประเทศได้อย่างดี โดยมีศักยภาพความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ตามบริเวณต่างๆ อยู่ในช่วง 27.2 ถึง 28.4 MJ/m²-day โดยเฉพาะเดือนเมษายน และพฤษภาคม ซึ่งเป็นค่าความเข้มแสงที่เหมาะสมกับการติดตั้งโซลาร์เซลล์ กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานกระทรวงพลังงาน (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, ม.ป.ป.) ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Photovoltaic System) เป็นการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรงด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic: PV) เป็นระบบที่ใช้กันอย่างแพร่หลายและมีความน่าสนใจสูง เนื่องจากสามารถช่วยเสริมความมั่นคงในระบบสายส่งไฟฟ้า (Zeyringer, et al, 2015) ระบบโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์แบ่งตามการใช้งานเป็น 2 ระบบ คือ ระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระหรือแบบโดดเดี่ยว และระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อบริษัทจำหน่าย (ณัชชิสร์ และคนอื่นๆ, 2563) เสนอเหตุผลและความจำเป็นที่มหาวิทยาลัยต่างๆ ในประเทศไทยควรติดตั้งและใช้งานระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อบริษัทจำหน่ายเป็นโครงสร้างพื้นฐานสำคัญสำหรับมหาวิทยาลัยในประเทศไทยที่ควรพิจารณาและ จัดสรรงบประมาณหรือขอทุนงบประมาณเพื่อติดตั้ง ที่นอกจากจะช่วยลดภาระค่าใช้จ่ายด้านไฟฟ้าของ มหาวิทยาลัยในระยะยาวแล้ว ยังส่งผลดีต่อสิ่งแวดล้อมและธรรมชาติในการช่วยลดปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ก่อให้เกิดปัญหาสภาวะโลกร้อนในปัจจุบัน (ธัญญพัทธ์ และคนอื่นๆ) ได้ศึกษาการจำลองสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาแบบเชื่อมต่อกับระบบสายส่งของเทศบาลตำบลแม่มาะ จังหวัดลำปาง ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ทั้งปีมีค่าเท่ากับ 152.12 เมกะวัตต์ชั่วโมง สมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้ามีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.711ประสิทธิภาพของระบบ

ผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาเท่ากับร้อยละ 16.81 ที่อายุโครงการ 25 ปี ระยะคืนทุน 8.3 ปี ลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก 91.06 ตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อปี สอดคล้องกับ (นิพิฐพนธ์, อีริศศิลป์ และแชน, 2565) ได้เสนอแนวทางการใช้ประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อสนับสนุนนโยบาย (Green Office) ในพื้นที่มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร แม่สอด สำหรับลดค่ากระแสไฟฟ้ามีความเป็นไปได้ที่จะใช้ประโยชน์โดยตรง มีค่าความเข้มแสงอาทิตย์ระหว่าง 4.19 kWh/m²-day หรือ 15.08 MJ/m²-day ถึง 6.25 kWh/m²-day หรือ 22.5 MJ/m²-day มีพื้นที่ขนาดใหญ่ โปรงโล่ง ไม่มีอะไรปิดกั้นปริมาณแสงแดด ความคุ้มค่าในการลงทุนมีความเหมาะสมแก่การลงทุน โดยการติดตั้งระบบผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์แบบระบบออนกริด จะต้องลงทุนจำนวน 7,159,035 บาท สามารถลดค่าไฟฟ้าได้เดือนละจำนวน 150,000 บาท หรือจำนวน 1,800,000 บาทต่อปี จะมีระยะเวลาคืนทุนเท่ากับ 2.77 ปี ส่วนการติดตั้งระบบผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์แบบระบบออฟกริด จะลงทุน 22,729,850 บาท ผลิตค่าไฟฟ้าได้จำนวน 14,400 หน่วย คิดเป็นมูลค่าไฟฟ้าจำนวน 81,320.82 บาท/เดือน หรือจำนวน 975,849.84 บาท/ปี มีระยะเวลาคืนทุนเท่ากับ 4.58 ปี ซึ่งระบบผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์แบบระบบออนกริดมีความคุ้มค่ามากกว่าระบบผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์แบบระบบออฟกริด

สถานการณ์การใช้พลังงานไฟฟ้าภายในอาคารเรียน 7 วิทยาลัยเทคนิคกำแพงเพชร เป็นอาคารที่ใช้ประกอบการเรียนแผนกวิชาสามัญสัมพันธ์ ช่วงเวลา 08.00 น.-17.30 น. มีปริมาณการใช้พลังงานส่วนใหญ่มาจากระบบปรับอากาศ ระบบแสงสว่าง เครื่องใช้ไฟฟ้าสำนักงาน เป็นต้น โดยสถิติการใช้พลังงานทั้งหมดในปี พ.ศ. 2564 ของวิทยาลัยเทคนิคกำแพงเพชร เป็นดังนี้ ตั้งแต่เดือนมกราคม ถึงเดือนมีนาคมมีแนวโน้มการใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้น (จาก 63,181 kWh/เดือน เป็น 102,210 kWh/เดือน) เนื่องจากช่วงระยะเวลาดังกล่าวยังมีการจัดการเรียนการสอนในภาคเรียนที่สองอยู่ ซึ่งค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าจะสูงสุดของปีในเดือนมีนาคม เพราะว่าอุณหภูมิเริ่มสูงขึ้นในช่วงฤดูร้อนจึงมีการใช้หลอดประเภทเครื่องปรับอากาศเพิ่มขึ้น จากนั้นในเดือนเมษายนซึ่งเป็นเดือนที่ร้อนที่สุดแต่ปริมาณการใช้ไฟฟ้าลดลงจากเดือนมีนาคม (จาก102,210 kWh/เดือน ลดลงเหลือ 63,120 kWh/เดือน) เพราะว่าวิทยาลัยได้ปิดภาคเรียนการใช้หลอดทางไฟฟ้าจึงลดลงส่งผลให้ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าลดลงด้วย กระทั่งถึงกลางเดือนพฤษภาคม การใช้พลังงานไฟฟ้ากลับสู่เสถียรภาพเหมือนต้นปี กล่าวคืออยู่ในช่วง 51,042 kWh/เดือน ถึง 78,620 kWh/เดือน แสดงดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 สถิติการใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งหมดในปี 2564 ของวิทยาลัยเทคนิคกำแพงเพชร จากใบบันทึกค่าไฟฟ้าการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคจังหวัดกำแพงเพชร

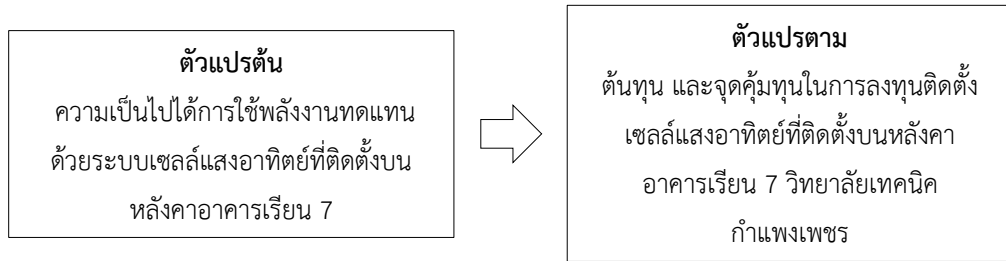
สถิติปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งหมดในปี 2564 ของวิทยาลัยเทคนิคกำแพงเพชร ที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าในแต่ละเดือนมีจำนวนหน่วยการใช้ในปริมาณที่สูง ทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายด้านพลังงานเพิ่มขึ้นตามปริมาณการใช้ จึงมีแนวทางที่จะนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์ เพื่อผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์โดยติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาอาคารเรียน 7 วิทยาลัยเทคนิคกำแพงเพชร ในรูปแบบการติดตั้งระบบสายส่งไฟฟ้า (On grid system) เป็นระบบการผลิตไฟฟ้าจากโซลาร์เซลล์ที่เชื่อมต่อเข้ากับระบบจำหน่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคและระบบโดดเดี่ยว (Off grid system) เป็นระบบที่ผลิตไฟฟ้าจากโซลาร์เซลล์ที่ไม่ได้เชื่อมต่อเข้ากับระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เพื่อลดค่าใช้จ่ายด้านการใช้พลังงานไฟฟ้าที่มีแนวโน้มสูงขึ้น จากปัญหาดังกล่าวจึงพยายามหาแนวทางที่จะแก้ไขในการลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้าที่เกิดขึ้น (จุฬารัตน์, 2558) จึงจำเป็นที่ต้องมีการศึกษาความรู้เกี่ยวกับจุดคุ้มทุน ระยะเวลาคืนทุนและต้นทุนในการลงทุนสำหรับการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาอาคาร

ดังนั้น ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะศึกษาแนวทางการใช้ประโยชน์จากการใช้พลังงานทดแทนด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ในการผลิตไฟฟ้าสำหรับใช้ในอาคารเรียน 7 วิทยาลัยเทคนิคกำแพงเพชร เนื่องจากอาคารเรียน 7 เป็นอาคารของแผนกวิชาสามัญสัมพันธ์ที่มีจำนวนนักเรียนนักศึกษาทุกสาขาวิชาใช้พื้นที่อาคารมากที่สุด อาคารสูงโปร่งมีจำนวน 4 ชั้น หลังคาโล่งไม่มีสิ่งกีดขวางแสงแดด จึงเป็นอาคารที่มีความเหมาะสมที่สุดในติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาอาคาร และสามารถนำไปเป็นต้นแบบในการใช้พลังงานทดแทนด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ในการผลิตไฟฟ้าที่ใช้ในอาคารต่างๆ ของวิทยาลัยเทคนิคกำแพงเพชรในอนาคตต่อไป

วิธีดำเนินการวิจัย

1. กรอบแนวคิดในการวิจัย ความเป็นไปได้การใช้พลังงานทดแทนด้วยระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคาอาคารมาใช้ประโยชน์ในการผลิตไฟฟ้า เพื่อลดค่าใช้จ่ายด้านการใช้พลังงานไฟฟ้า ซึ่งทำให้ทราบถึงต้นทุนจุดคุ้มทุนของการลงทุน พร้อมเป็นข้อมูลประกอบการตัดสินใจในการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาให้กับ

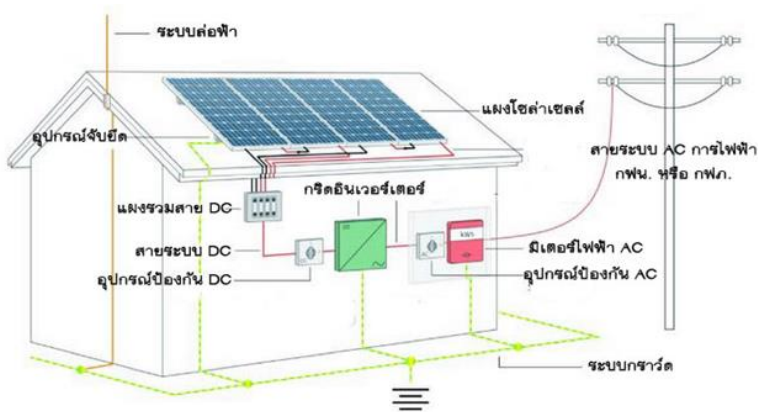
อาคารต่อไป ผู้วิจัยได้กำหนดตัวแปรที่ใช้สำหรับการวิจัยครั้งนี้ได้แก่ ตัวแปรอิสระ (Independent variable) ได้แก่ การศึกษาความเป็นไปได้และการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาอาคารเรียน 7 วิทยาลัยเทคนิค กำแพงเพชร ส่วนตัวแปรตาม (Dependent variable) ได้แก่ ต้นทุน และจุดคุ้มทุนในการลงทุนติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาอาคารเรียน 7 วิทยาลัยเทคนิคกำแพงเพชร เมื่อนำมาเขียนกรอบแนวคิดในการวิจัย (Conceptual frame work) เป็นดังนี้



ภาพที่ 2 กรอบแนวคิดในการวิจัย

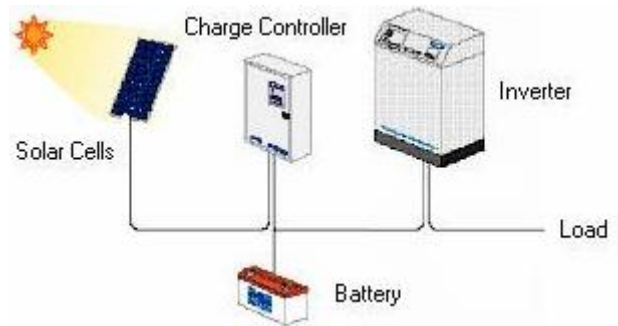
2. ทฤษฎีและหลักการของระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ (เฉลิมพล, 2564)

2.1 ระบบสายส่งไฟฟ้า (On grid system) หรือแบบเชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายระบบจำหน่ายไฟฟ้า (Grid Connected) เป็นระบบการผลิตไฟฟ้าจากโซลาเซลล์ที่เชื่อมต่อเข้ากับระบบจำหน่ายไฟ ของการไฟฟ้านครหลวงหรือการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค



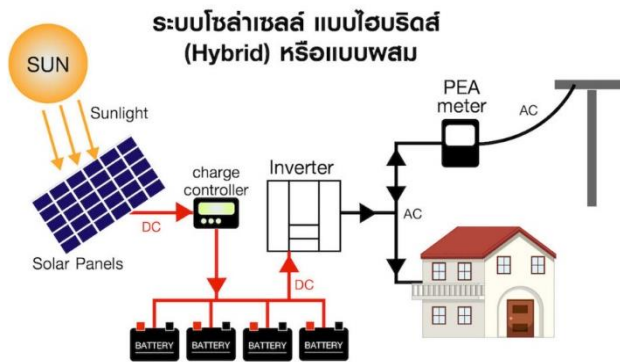
ภาพที่ 3 ระบบสายส่งไฟฟ้า (On grid system)

2.2 ระบบโดดเดี่ยว (Off Grid System) หรือ แบบอิสระ (Stand Alone) คือระบบที่ผลิตไฟฟ้าจากโซลาเซลล์แล้วไม่ได้เชื่อมต่อเข้ากับระบบจำหน่ายของการไฟฟ้านครหลวงหรือการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค



ภาพที่ 4 ระบบโดดเดี่ยว (Off Grid System)

2.3 ระบบไฮบริด (Hybrid) หรือแบบผสม เป็นระบบที่นำเอาระบบออนกริดและออฟกริดมารวมกัน โดยจะมีระบบแบตเตอรี่ มาสำรองพลังงานเพื่อใช้งานในเวลาที่ไม่มีแสงอาทิตย์

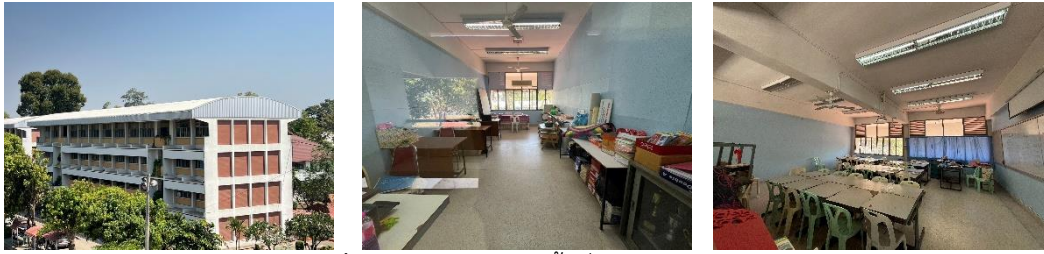


ภาพที่ 5 ระบบไฮบริด (Hybrid)

3. ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.1 วิธีการศึกษาความเป็นไปได้การใช้พลังงานทดแทนด้วยระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคาอาคารเรียน 7 วิทยาลัยเทคนิคกำแพงเพชรมาใช้ประโยชน์ในพื้นที่นี้

3.1.1 สถานที่เก็บข้อมูลที่ใช้ในการวิจัยจะใช้พื้นที่ภายในอาคารเรียน 7 ซึ่งเป็นอาคารเรียนของแผนกวิชาสามัญสัมพันธ์ เป็นสถานที่ใช้เก็บข้อมูล ลักษณะอาคารสูง 4 ชั้น หลังคาโล่ง รับแสงแดดตลอดทั้งวัน เป็นอาคารเรียนที่ทุกสาขาวิชาใช้งานมากที่สุด มีการใช้งานประเภทเครื่องใช้ไฟฟ้า 3 ระบบ ได้แก่ 1) ระบบแสงสว่าง 2) ระบบปรับอากาศ และ 3) ระบบอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่นๆ (พัดลม คอมพิวเตอร์ โปรเจคเตอร์ เป็นต้น)



ภาพที่ 6 แสดงลักษณะเชิงพื้นที่ของอาคารเรียน 7

3.1.2 วิธีการเก็บข้อมูลในการวิจัยครั้งนี้จะเก็บข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้า โดยคิดจากปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งหมด ค่าพลังงานที่ใช้กับเครื่องใช้ไฟฟ้าแต่ละชนิด และใบบันทึกการใช้พลังงานไฟฟ้าโดยมีระยะเวลาในการเก็บข้อมูล 12 เดือน ตั้งแต่เดือนมกราคม 2565 ถึงเดือนธันวาคม 2565 แล้วนำมาคำนวณปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงสุด เพื่อนำมากำหนดขนาดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ตัวควบคุมการชาร์จ แบตเตอรี่ และอินเวอร์เตอร์

3.1.3 วิธีการวิเคราะห์ข้อมูลในการวิจัยครั้งนี้จะวิเคราะห์ข้อมูลจากการคำนวณความต้องการพลังงานไฟฟ้าของอาคารเรียน 7 นำมาวิเคราะห์โดยใช้สูตรคำนวณดังนี้ (นิธิรุพนธ์, อีริศิลป์ และแซน, 2565)

$$\text{พลังงานไฟฟ้า} = \frac{\text{กำลังไฟฟ้าที่ใช้ทั้งหมด (วัตต์)} \times \text{เวลาที่เปิดใช้งาน (ชั่วโมง)}}{1,000} \quad (1)$$

มีหน่วยเป็น กิโลวัตต์-ชั่วโมง (kWh) หรือ unit หรือ หน่วย

3.1.4 การคำนวณกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ควรติดตั้ง ควรพิจารณาว่าจะใช้เซลล์แสงอาทิตย์สำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าให้กับเครื่องใช้ไฟฟ้าใดบ้าง เพื่อจะได้ติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ได้เพียงพอกับความ ต้องการและไม่ติดตั้งมากเกินไปจนเกิดความจำเป็นซึ่งจะทำให้ระบบมีราคาแพงเกินไป โดยใช้สูตรการคำนวณ ดังต่อไปนี้ (พิชยดา, 2556 อ้างอิงใน นิธิรุพนธ์, อีริศิลป์ และแซน, 2565)

$$P_{\text{cel}} = \frac{P_L \times D}{Q \times A \times B \times C} \quad (2)$$

กำหนดให้

P_L คือความต้องการพลังงานไฟฟ้าในหนึ่งวัน

Q คือพลังงานแสงอาทิตย์ในหนึ่งวัน (Wh/m^2)

(สำหรับประเทศไทยเท่ากับ $4,000 \text{ Wh/m}^2$ โดยประมาณ)

A คือค่าชดเชยการสูญเสียของเซลล์แสงอาทิตย์กำหนดค่าประมาณ 0.8

B คือค่าชดเชยการสูญเสียเชิงความร้อนกำหนดค่าประมาณ 0.85

C คือประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์โดยทั่วไปกำหนดค่าประมาณ 0.9

D คือความเข้มแสงโดยปกติความเข้มแสงประมาณ 1,000 W/m²

เมื่อนักวิจัยต้องการกำหนดขนาดกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ (P_{cell}) จะต้องทราบตัวแปรอิสระ (หรือตัวแปรต้น) ได้แก่ ความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าในหนึ่งวัน (P_L) ก่อน พลังงานจากแสงอาทิตย์ที่ผลิตได้ในหนึ่งวันซึ่งประเทศไทยใช้ค่าเฉลี่ยโดยประมาณเท่ากับ 4,000 Wh/m² (Q) อัตราส่วนของประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ (C) ซึ่งกำหนดโดยประมาณร้อยละ 90 ค่าความเข้มของแสง (D) กำหนดโดยประมาณ 1,000 W/m² และค่าขดเคยการสูญเสียของเซลล์แสงอาทิตย์ (A) กำหนดโดยประมาณร้อยละ 80 และค่าขดเคยการสูญเสียเชิงความร้อน (B) กำหนดค่าประมาณร้อยละ 85 เมื่อกำหนดค่าตามสูตรที่ (2) จะได้กำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ในหน่วยวัตต์ (W)

3.2 วิธีการศึกษาและวิเคราะห์ความคุ้มค่าการใช้พลังงานทดแทนด้วยระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคาอาคารเรียน 7 วิทยาลัยเทคนิคกำแพงเพชรมาใช้ประโยชน์ในพื้นที่ของอาคารเรียน 7 นี้

3.2.1 วิธีการเก็บข้อมูล ในการวิจัยครั้งนี้จะเก็บข้อมูลจากการประมาณการจำนวนแผงเซลล์แสงอาทิตย์และแบตเตอรี่ ในระบบสายส่งของการไฟฟ้า (On grid system) จากค่าความต้องการ การใช้พลังงานไฟฟ้าสูงสุดของอาคารเรียน 7 เพื่อประมาณการ การผลิตพลังงานและต้นทุนพลังงานของระบบพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งพิจารณาจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้คำนวณคือ ขนาดแผง 550 W 48 V และแบตเตอรี่ลิเธียม 5 kW 600 V ส่วนในระบบโดดเดี่ยว (Off grid system) ประมาณการจำนวนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และอินเวอร์เตอร์ จากค่าความต้องการการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงสุดของอาคารเรียน 7 เพื่อประมาณการ การผลิตพลังงานและต้นทุนพลังงานของระบบพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งพิจารณาจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้คำนวณคือ ขนาดแผง 550 W 48 V

3.2.2 การวิเคราะห์ความเหมาะสมของโครงการด้านเศรษฐศาสตร์ในการลงทุนสร้างระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคาอาคารเรียน 7 วิทยาลัยเทคนิคกำแพงเพชร ระบบสายส่งของการไฟฟ้า (On grid system) และระบบโดดเดี่ยว (Off grid system) พิจารณาจากมูลค่าผลประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการเปรียบเทียบกับมูลค่าการลงทุนตลอดระยะเวลาในการดำเนินโครงการโดยคำนวณในรูปดัชนีหลักทางเศรษฐกิจ ได้แก่ คือ

3.2.2.1 มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value : NPV) เป็นการเปรียบเทียบมูลค่าการลงทุนกับผลประโยชน์ด้านเศรษฐกิจที่คาดว่าจะเกิดขึ้น ตลอดช่วงระยะเวลาการดำเนินโครงการ โดยใช้อัตราส่วนลด (Discount rate) เป็นมูลค่าปัจจุบัน ซึ่งคำนวณได้ดังสมการ (บดินทร์ และคนอื่นๆ, 2562)

$$NPV = \sum_{i=1}^T \frac{(B_i - C_i)}{(1+r)^i} - C_0 \quad (3)$$

เกณฑ์ในการตัดสินใจในการลงทุนของโครงการคือ ถ้า NPV มากกว่า 0 แสดงว่าคุ้มค่าต่อการลงทุน หรือถ้า NPV น้อยกว่า 0 แสดงว่าไม่คุ้มค่าต่อการลงทุน และถ้า NPV เท่ากับ 0 แสดงว่าคุ้มทุน

3.2.2.2 อัตราผลตอบแทนต่อต้นทุน (Benefit-Cost Ratio : CBR) แสดงให้เห็นถึงอัตราส่วนของมูลค่าปัจจุบันของผลประโยชน์กับมูลค่าปัจจุบันของเงินลงทุนโครงการ โดยหากมีค่ามากกว่า 1 แสดงว่าโครงการจะให้ผลตอบแทนที่คุ้มค่าที่จะลงทุน ซึ่งคำนวณได้ดังสมการ (บดินทร์ และคนอื่นๆ, 2562)

$$PB = \frac{C_0 - \frac{B_i}{(1+r)^i}}{(B_i - C_i) \frac{1}{(1+r)^i}} \quad (4)$$

กำหนดให้

C_0 คือเงินลงทุนเริ่มแรกของโครงการ

B_i คือผลตอบแทนที่เกิดขึ้นในแต่ละปี

C_i คือต้นทุนที่เกิดขึ้นในแต่ละปี

T คือระยะเวลาหรืออายุโครงการ (20 ปี)

r คืออัตราคิดลด (Discount rate)

3.2.2.3 ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period : PB) คือระยะเวลา (เป็นจำนวนปี/เดือนหรือวัน) ที่กระแสเงินสดรับจากโครงการสามารถชดเชยกระแสเงินสดจ่ายลงทุนสุทธิตอนเริ่มโครงการพอดี เนื่องจากโครงการมีลักษณะการลงทุนเพียงครั้งเดียวในปีแรก และให้ผลตอบแทนทุกปี ซึ่งคำนวณได้ดังสมการ (เขมณัญญ์, 2562)

$$PB = \frac{C_0}{(B_i - C_i)} \quad (5)$$

3.2.2.4 อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return : IRR) คืออัตราส่วนลดที่ทำให้มูลค่าปัจจุบันสุทธิของโครงการมีค่าเท่ากับศูนย์ และอัตราส่วนนี้แสดงให้เห็นถึงผลตอบแทนที่จะได้รับจากการลงทุนมีผลตอบแทนเป็นร้อยละเท่าใด ซึ่งคำนวณได้ดังสมการ (เขมณัญญ์, 2562)

$$\sum_{i=1}^T \frac{(B_i - C_i)}{(1+IRR)^i} - C_0 = 0 \quad (6)$$

3.2.2 การคำนวณหาราคาดัชนีต้นทุนของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และจุดคุ้มทุนในการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบระบบสายส่งของการไฟฟ้า (On grid system) และระบบโดดเดี่ยว (Off grid system) คำนวณจากการใช้สูตรดังต่อไปนี้ (อวยชัย และคนอื่นๆ, 2563)

$$\text{ราคาดัชนีต้นทุนของแผงเซลล์แสงอาทิตย์} = \text{จำนวนแผงเซลล์แสงอาทิตย์} \times (\text{ราคาแผง} + \text{ค่าติดตั้งอุปกรณ์}) \quad (7)$$

$$\text{จุดคุ้มทุนในการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์} = \frac{\text{ราคาดัชนีต้นทุนของแผงเซลล์แสงอาทิตย์}}{\text{ค่าพลังงานที่ประหยัดได้}} \quad (8)$$

ผลการวิจัย

1. ผลการศึกษาเปรียบเทียบต้นทุนและจุดคุ้มทุนของการลงทุนในการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาของอาคารเรียน 7 วิทยาลัยเทคนิคกำแพงเพชร ของระบบสายส่งของการไฟฟ้า (On grid system) และของระบบโดดเดี่ยว (Off grid system) มาใช้ประโยชน์ในพื้นที่ของอาคารเรียน 7 มีดังนี้

1.1 ผลของการศึกษาข้อมูลทั่วไปและลักษณะของอาคาร ผู้วิจัยได้เข้าสำรวจตรวจวัดการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารเรียน 7 วิทยาลัยเทคนิคกำแพงเพชร ขนาดพื้นที่ใช้สอย 300 ตารางเมตร จำนวน 4 ชั้น ได้แก่ ชั้นที่ 1 ประกอบด้วยห้องเรียนวิทยาศาสตร์ และห้องพักครู ชั้นที่ 2 ประกอบด้วยห้องเรียนภาษาไทย ห้องเรียนภาษาอังกฤษ และห้องพักครู ชั้นที่ 3 ประกอบด้วยห้องเรียนสังคมศึกษา และห้องพักครู ชั้นที่ 4 ประกอบด้วยห้องเรียนภาษาไทย ห้องพลานามัย ห้องโสตทัศนศึกษา ห้องเรียนพระพุทธศาสนา และห้องพักครู ลักษณะโครงสร้างทั่วไปประกอบด้วย ผนังโดยรวมใช้ก่ออิฐฉาบปูน พื้นอาคารเป็นคอนกรีตปูกระเบื้อง หลังคาเป็นเมทัลชีส ลักษณะประตูบานเปิด หน้าต่างเป็นกระจกกรอบเหล็ก ผนังแบ่งเป็นส่วนต่างๆ พื้นที่หลังคาสำหรับติดตั้งแผง 36 แผงมีเพียงพอ ทำมุมเอียง 15 องศา ในทิศทางทิศตะวันตกเฉียงใต้



ภาพที่ 7 รูปทรงอาคาร หลังคา

1.2 ลักษณะการใช้พลังงานไฟฟ้าภายในพื้นที่อาคารเรียน 7 ผู้วิจัยได้เข้าสำรวจ ตรวจวัดการใช้พลังงานไฟฟ้าและเก็บรวบรวมข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบแสงสว่าง ระบบปรับอากาศ และอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่นๆ ได้แก่ คอมพิวเตอร์ พัดลมตั้งโต๊ะ โพรเจคเตอร์ และเครื่องปริ้นเตอร์ การเก็บรวบรวมข้อมูลการใช้พลังงานของเครื่องใช้ไฟฟ้าเหล่านี้ กระทำโดยการสำรวจพิกัดกำลังของเครื่องใช้ไฟฟ้าหรือโหลดแต่ละตัวที่ใช้ในอาคารเรียน 7 จากนั้นหาค่าเฉลี่ยเวลาการใช้กำลังไฟฟ้าของอุปกรณ์เหล่านี้ แล้วดำเนินการคำนวณการใช้พลังงานตามสูตรที่ (1) จะได้ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าเป็นกิโลวัตต์-ชั่วโมง (kWh)

1.3 การประมาณค่าความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงสุด โดยการเก็บข้อมูลกำลังไฟฟ้า อุปกรณ์ไฟฟ้า ค่าไฟฟ้า ในพื้นที่อาคารเรียน 7 ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงสุดภายในพื้นที่อาคารเรียน 7 ที่ใช้ไฟฟ้าช่วงระยะเวลา 08.30-16.30 น.

ลำดับที่	ประเภทการใช้พลังงาน	พลังงานไฟฟ้า (กิโลวัตต์-ชั่วโมง)
1	ระบบแสงสว่าง	8.334
2	ระบบปรับอากาศ	9.825
3	ระบบอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่นๆ	11.822
รวม		29.986

ที่มา : การคำนวณความต้องการพลังงานไฟฟ้าของอาคารเรียน 7 จากสูตรการคำนวณพลังงานไฟฟ้า

จากตารางที่ 1 ความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงสุดของอาคารเรียน 7 ได้แก่ ระบบอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่นๆ รองลงมาได้แก่ระบบปรับอากาศ และระบบแสงสว่าง ตามลำดับ

1.4 ผลการวิเคราะห์การใช้พลังงานไฟฟ้าที่ใช้จริง จากใบเสร็จจ่ายไฟรวมทุกอาคาร และสถานที่ ระยะเวลา เดือนมกราคม 2565 ถึงเดือนธันวาคม 2565 ในวิทยาลัยเทคนิคกำแพงเพชร ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าไฟฟ้าที่ใช้จริงระยะเวลาเดือนมกราคม 2565 ถึงเดือนธันวาคม 2565 วิทยาลัยเทคนิคกำแพงเพชร

เดือน	จำนวน (หน่วย)	ค่าไฟฟ้าต่อหน่วย	จำนวนเงิน (บาท)
มกราคม	59,916	5.06	303,700
กุมภาพันธ์	74,999	4.80	360,013
มีนาคม	72,039	4.61	332,252
เมษายน	56,395	4.48	253,089
พฤษภาคม	76,976	5.03	387,919
มิถุนายน	107,393	5.10	547,742
กรกฎาคม	117,758	5.17	609,169
สิงหาคม	104,669	5.07	531,531
กันยายน	106,778	5.76	615,471
ตุลาคม	76,129	5.88	448,185
พฤศจิกายน	107,403	5.87	631,495
ธันวาคม	87,909	5.92	520,428
ค่าสูงสุด	117,758	5.92	631,495
ค่าต่ำสุด	56,395	4.48	253,089
ค่าเฉลี่ย	87,364	5.23	461,749

ที่มา : (การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคจังหวัดกำแพงเพชร, 2565)

จากตารางที่ 2 พลังงานไฟฟ้าที่ใช้จริงที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงที่สุดอยู่ในช่วงเดือน กรกฎาคม 2565 และการใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำที่สุดอยู่ในช่วงเดือนเมษายน 2565

1.5 ประมาณการคิดค่าไฟฟ้าแบบ TOU มีหลักการคิดค่าไฟฟ้า การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคได้แบ่งประเภทผู้ใช้ไฟฟ้าเป็น 7 ประเภท ได้แก่ 1) บ้านอยู่อาศัย 2) กิจการขนาดเล็ก 3) กิจการขนาดกลาง 4) กิจการขนาดใหญ่ 5) กิจการเฉพาะอย่าง 6) ส่วนราชการ และองค์กรที่ไม่แสวงหากำไร และ 7) สูบน้ำเพื่อการเกษตร โดยวิทยาลัยเทคนิคกำแพงเพชร เป็นผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทที่ 3 และถูกแบ่งออกเป็นรูปแบบอัตราตามช่วงเวลาของการใช้ (Time of Use Rate : TOU) มีการแบ่งช่วงเวลาการใช้งานดังนี้ 1) เวลา 09.00-22.00 น. ของวันจันทร์ถึงวันศุกร์ เป็นช่วงเวลา On peak 2) เวลา 22.00-09.00 น. ของวันจันทร์ถึงวันศุกร์ เป็นช่วงเวลา Off peak และ 3) วันเสาร์ –วันอาทิตย์ และวันหยุด ทั้งวันเป็นช่วงเวลา Off peak โดยวิธีคิดค่าไฟฟ้าที่ปรากฏอยู่ที่ใบเสร็จค่าไฟฟ้าแต่ละเดือนประกอบด้วย (ภานุพงศ์ เครืออินทร์, 2561) 1) ค่าพลังงานไฟฟ้า คิดตามประเภทของผู้ใช้ไฟฟ้า 2) ค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้า คิดจากความต้องการพลังงานไฟฟ้า (kW) 3) ค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ (PF) 4) ค่าบริการรายเดือน 5) อัตราช่วงเวลาการใช้ (TOU) ประกอบด้วย 5.1) ค่าไฟฟ้าฐาน คือ ค่าพลังงานไฟฟ้า ค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้า และค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ (PF) 5.2) ค่าไฟฟ้าแปรผัน (Ft) และ 5.3) ค่าภาษีมูลค่าเพิ่ม (ร้อยละ 7) การคิดค่าไฟฟ้าแบบ TOU ประเมินค่าไฟฟ้าภายในอาคาร 7 วิทยาลัยเทคนิคกำแพงเพชร ทำงานตลอด 8 ชั่วโมง ทำงานตลอด 22 วัน/เดือน และทำงาน 9 เดือน/ปี เพื่อคิดที่ค่าของโหลดที่ทำงานทุกวันตามข้อมูลสรุปตามตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ประมาณการคิดค่าไฟฟ้าแบบ TOU ของอาคารเรียน 7 วิทยาลัยเทคนิคกำแพงเพชร

ค่าไฟฟ้าแบบ TOU ของอาคารเรียน 7 วิทยาลัยเทคนิคกำแพงเพชร	
ความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุด	29.986 kWh
พลังงานไฟฟ้า kWh	5,330.044 หน่วย
อัตราค่าไฟฟ้าแปรผัน Ft	0.9343
ค่าบริการ	312.24
1. ค่าพลังงานไฟฟ้าสูงสุด (29.986 × 132.93) (บาท)	3,986.039
2. ค่าพลังงานไฟฟ้า (5,330.044 × 4.1839) (บาท)	22,300.371
3. ค่าไฟฟ้าฐาน (บาท)	26,286.410
4. ค่า Ft (5,330.044 × 0.9343) (บาท)	4,979.860
5. ภาษีมูลค่าเพิ่มร้อยละ 7 (31,266.270 × 0.07) (บาท)	2,188.638
6. ค่าไฟฟ้ารวมที่ต้องชำระ (31,266.270 + 2,188.638) (บาท)	33,454.91

ที่มา : การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ค่า Ft ของปี 2565 เดือนกันยายน-ธันวาคม เท่ากับ 0.9343 บาท/หน่วย โดยค่า Ft จะมีการปรับทุกๆ 4 เดือน

1.5.1 การคิดค่าไฟฟ้าแบบ TOU สามารถคำนวณหาค่าพลังงานไฟฟ้าของอาคารเรียน 7 วิทยาลัยเทคนิคกำแพงเพชร ตามข้อมูลในตารางที่ 2 มาใช้ในการคำนวณตามขั้นตอนดังนี้

1.5.1.1 ค่าพลังงานไฟฟ้า หาได้จาก (กานูพงค์, 2561)

$$\text{Electricity Charge} = (N_{\text{Peak}} \times \text{Rate Electricity Charge}_{\text{Peak}}) + [(N_{\text{Off Peak}} + N_{\text{Holiday}}) \times \text{Rate Electricity Charge}_{\text{Off Peak}}]$$

โดยกำหนดให้

N_{Peak}	คือจำนวนหน่วยไฟฟ้าในช่วง Peak (หน่วย)
$\text{Rate Electricity Charge}_{\text{Peak}}$	คืออัตราค่าไฟฟ้าในช่วง Peak (บาท)
$N_{\text{Off Peak}}$	คือจำนวนหน่วยไฟฟ้าในช่วง Off Peak (หน่วย)
N_{Holiday}	คือจำนวนหน่วยไฟฟ้าในช่วง Holiday (หน่วย)
$\text{Rate Electricity Charge}_{\text{Off Peak}}$	คืออัตราค่าไฟฟ้าในช่วง Off Peak (บาท)

$$\text{Electricity Charge} = (5,330.04 \times 4.1839) + [(0+0) \times 2.6037]$$

$$\text{Electricity Charge} = 22,300.371 \text{ บาท}$$

1.5.1.2 ค่าพลังงานไฟฟ้าสูงสุด หาได้จาก (กานูพงค์, 2561)

$$\text{Peak Demand} = \text{Demand}_{\text{Peak}} \times \text{Rate Peak Demand}$$

$$\text{Peak Demand} = 29.986 \times 132.93$$

$$\text{Peak Demand} = 3,986.039 \text{ บาท}$$

1.5.1.3 ค่าปรับเพาเวอร์แฟกเตอร์ (PF) จากใบเสร็จค่าไฟฟ้าโดยผู้ใช้ไฟฟ้ามีค่า PF ล้าหลัง หากในรอบเดือนมีความต้องการพลังงานไฟฟ้ารีแอกทีฟเฉลี่ยใน 15 นาทีที่สูงสุด เมื่อคิดเป็น kVar เกิน 61.97 เปอร์เซนต์ ของพลังงานไฟฟ้ารีแอกทีฟเฉลี่ยใน 15 นาที เมื่อคิดเป็น kW เฉพาะส่วนเกินจะต้องเสียค่า PF ในอัตรา กิโลวาร์ละ 56.07 บาท เนื่องจากอาคารเรียน 7 วิทยาลัยเทคนิคกำแพงเพชร ไม่มีความต้องการพลังงานไฟฟ้ารีแอกทีฟ จึงไม่เสียค่าปรับส่วนนี้

$$\text{PF} = 0 \text{ บาท}$$

1.5.1.4 ค่าไฟฟ้าฐาน หาได้จาก (กานูพงค์, 2561)

$$\text{Electricity Charge}_{\text{Bass}} = \text{Electricity Charge} + \text{Peak Demand} + \text{PF} + \text{Service Charge}$$

$$\text{Electricity Charge}_{\text{Bass}} = 22,300.371 + 3,986.039 + 0 + 312.24$$

$$\text{Electricity Charge}_{\text{Bass}} = 26,286.410 \text{ บาท}$$

1.5.1.5 ค่าไฟฟ้าแปรผัน (Ft) หาได้จาก (กานูพงค์, 2561)

$$\text{Ft} = N_{\text{Peak}} \times \text{Rate Ft}$$

$$\text{Ft} = 5,330.044 \times 0.9343$$

$$\text{Ft} = 4,979.860 \text{ บาท}$$

1.5.1.6 ค่าไฟฟ้ายรวมที่ต้องชำระ หาได้จาก (กานูพงค์, 2561)

$$\text{Electricity Charge}_{\text{Total}} = (\text{Electricity Charge}_{\text{Bass}} + Ft) \times \text{VAT}$$

$$\text{Electricity Charge}_{\text{Total}} = (26,286.410 + 4,979.860) \times 7\%$$

$$\text{Electricity Charge}_{\text{Total}} = 33,454.91 \text{ บาท}$$

1.6 ประเมินการการคำนวณต้นทุนและจุดคุ้มทุนของการลงทุนในการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ ของระบบสายส่งของการไฟฟ้า (On grid system) ซึ่งคำนวณจาก ค่าแผง ค่าอินเวอร์เตอร์ ค่าตัวป้องกันย้อนกลับ ค่าบำรุงต่อปี ค่าอุปกรณ์และติดตั้งหารด้วยค่าพลังงานที่ลดลงจากการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อคำนวณออกมาจะได้จุดคุ้มทุน (ปี) (อวยชัย และคนอื่นๆ, 2563) จากค่าความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าในพื้นที่ของอาคารเรียน 7 วิทยาลัยเทคนิคกำแพงเพชร เพื่อประมาณการการผลิตพลังงานและต้นทุนพลังงานของระบบพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์ โดยพิจารณาจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้คำนวณคือแผงขนาด 550 W 48 V ราคา 4,400 บาทต่อแผง และอินเวอร์เตอร์ 10 kW 3 ph ราคา 49,390 บาทต่อตัว ตัวป้องกันย้อนกลับ รุ่น DTUS-666H 380 V 3 ph ราคา 3,700 บาทต่อตัว ในขนาดพื้นที่หลังคาที่สามารถติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ 300 ตารางเมตร ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ประเมินการคำนวณต้นทุนและจุดคุ้มทุนของการลงทุนในการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคา ระบบสายส่งของการไฟฟ้า (On grid system)

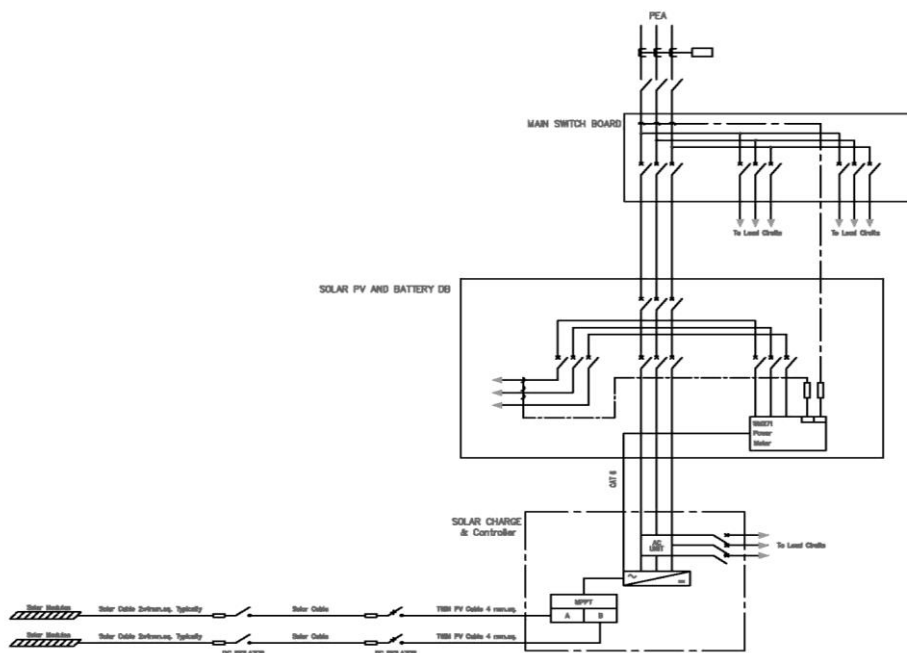
ขนาดการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคา (kW)		10	20	30
ต้นทุน	(1) ขนาดแผง (W)	550	550	550
	(2) จำนวนแผง	18	36	54
	(3) ค่าแผง (บาท)	79,200	158,400	237,600
	(4) ตัวป้องกันย้อนกลับ	3,700	3,700	31,790
	(5) อินเวอร์เตอร์	49,390	62,490	91,590
	(6) ค่าซ่อมบำรุงต่อปี	15,000	15,000	20,000
	(7) ค่าอุปกรณ์และติดตั้ง	100,000	100,000	300,000
	(8) รวม (บาท)	247,290	339,590	680,980
(9) ค่าพลังงานที่ลดลงจากการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ (บาท/ปี)		76,320	152,640	228,960
(10) จุดคุ้มทุน (ปี) (10) = (8)/(9)		3.24	2.20	2.97

อ้างอิง : ราคาข้อมูลจาก ห้างหุ้นส่วนจำกัด ซีดีพีเอส อัลลิเมทีด เอ็นเนอร์จี, บริษัท โซลาร์ ดี คอร์ปอเรชัน จำกัด และบริษัท วิศวแอนด์เซอร์วิส จำกัด

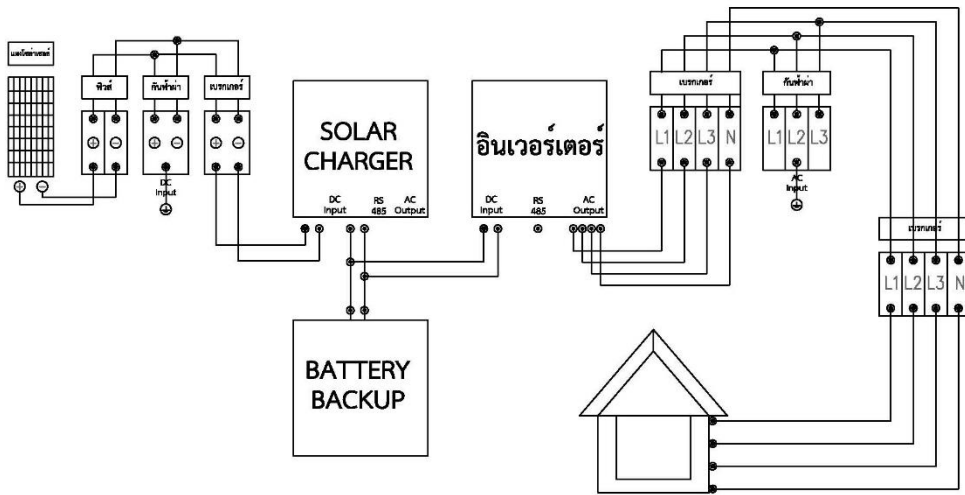
ที่มา : ข้อมูลจากการประมาณการจำนวนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ อินเวอร์เตอร์ และตัวป้องกันย้อนกลับ ในระบบสายส่งของการไฟฟ้า (On grid system)

จากตารางที่ 4 การติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาอาคารเรียน 7 ขนาด 10 kWp ด้วยต้นทุน 247,290 บาท มีกำลังการผลิต 40 kWh ต่อวัน โดยคิดค่าไฟฟ้าหน่วยละ 5.30 บาทต่อกิโลวัตต์ ซึ่งทำให้สามารถลดค่าพลังงานไฟฟ้าได้ 76,320 บาทต่อปี จุดคุ้มทุน 3.24 ปี ส่วนขนาด 20 kWp ด้วยต้นทุน 335,927 บาท มีกำลังการผลิต 80 kWh ต่อวัน โดยคิดค่าไฟฟ้าหน่วยละ 5.30 บาทต่อกิโลวัตต์ ซึ่งทำให้สามารถลดค่าพลังงานไฟฟ้าได้ 152,640 บาทต่อปี จุดคุ้มทุน 2.20 ปี และส่วนขนาด 30 kWp ด้วยต้นทุน 680,980 บาท มีกำลังการผลิต 120 kWh ต่อวัน โดยคิดค่าไฟฟ้าหน่วยละ 5.30 บาทต่อกิโลวัตต์ ซึ่งทำให้สามารถลดค่าพลังงานไฟฟ้าได้ 228,960 บาทต่อปี จุดคุ้มทุน 2.97 ปี

ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ของระบบสายส่งของการไฟฟ้า (On grid system) ประกอบด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (PV) ตัวป้องกันย้อนกลับ อินเวอร์เตอร์และอุปกรณ์ต่างๆ สำหรับเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า โดยรูปแบบการเชื่อมต่อของระบบสามารถเขียน single line diagram และวงจรแสดงรายละเอียดการต่อวงจรไฟฟ้า แสดงดังภาพที่ 8



(ก) แสดง single line diagram



(ข) แสดงวงจรการต่อวงจรไฟฟ้า

ภาพที่ 8 single line diagram และวงจรแสดงรายละเอียดการต่อวงจรไฟฟ้า

1.7 การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ของการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ระบบสายส่งของการไฟฟ้า (On grid system) เป็นการวิเคราะห์ในรอบระยะเวลา 20 ปี กำหนดอัตราคิดลดร้อยละ 6.22 (MRR ของธนาคารกรุงไทย) พบว่า ระยะเวลาคืนทุนของโครงการคือ 0.25 ปี มีมูลค่าปัจจุบันสุทธิของโครงการ (NPV มีค่าเท่ากับ 12,982,950 ซึ่งค่าที่ได้มากกว่า 0 แสดงว่าโครงการนี้มีความคุ้มค่าในการลงทุนและอัตราผลตอบแทนต่อต้นทุน (BCR) มีค่าเท่ากับ 20.36 ซึ่งมีความมากกว่า 1 แสดงว่าโครงการนี้มีผลประโยชน์จากการลงทุน และอัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) มีค่าร้อยละ 19.98 ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ระบบสายส่งของการไฟฟ้า (On grid system)

ปีที่	ปริมาณ กระแสไฟฟ้า ที่ผลิตได้ (kWh)	อัตราค่า ไฟฟ้าที่ จำหน่าย	รวมรายได้	ต้นทุนการผลิต	$\frac{B_i}{(1+r)^T}$	$\frac{C_i}{(1+r)^T}$
1	233,600	5.66	-	339,590	-	319,704.38
2	233,600	5.66	1,322,176	33,959	1,171,862.55	30,098.32
3	233,600	5.66	1,322,176	33,959	1,103,240.96	28,335.83
4	233,600	5.66	1,322,176	33,959	1,038,637.69	26,676.55
5	233,600	5.66	1,322,176	33,959	977,817.45	25,114.43

ตารางที่ 5 (ต่อ)

ปีที่	ปริมาณ กระแสไฟฟ้า ที่ผลิตได้ (kWh)	อัตราค่า ไฟฟ้าที่ จำหน่าย	รวมรายได้	ต้นทุนการผลิต	$\frac{B_i}{(1+r)^T}$	$\frac{C_i}{(1+r)^T}$
6	233,600	5.66	1,322,176	33,959	920,558.70	23,643.79
7	233,600	5.66	1,322,176	33,959	866,652.89	22,259.26
8	233,600	5.66	1,322,176	33,959	815,903.68	20,955.81
9	233,600	5.66	1,322,176	33,959	768,126.23	19,728.68
10	233,600	5.66	1,322,176	33,959	723,146.51	18,573.42
11	233,600	5.66	1,322,176	33,959	680,800.71	17,485.80
12	233,600	5.66	1,322,176	33,959	640,934.58	16,461.87
13	233,600	5.66	1,322,176	33,959	603,402.92	15,497.91
14	233,600	5.66	1,322,176	33,959	568,069.02	14,590.38
15	233,600	5.66	1,322,176	33,959	534,804.20	13,736.00
16	233,600	5.66	1,322,176	33,959	503,487.29	12,931.65
17	233,600	5.66	1,322,176	33,959	474,004.23	12,174.40
18	233,600	5.66	1,322,176	33,959	446,247.62	11,461.50
19	233,600	5.66	1,322,176	33,959	420,116.39	10,790.34
20	233,600	5.66	1,322,176	33,959	395,515.33	10,158.48
รวม	4,672,000	-	25,121,344	984,811	13,653,329	670,379
มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV)				12,982,950		
อัตราผลตอบแทนต่อต้นทุน (BCR)				20.36		
ระยะเวลาคืนทุน (PB)				0.25 ปี		
อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR)				19.98 %		

ที่มา : จากการคำนวณ

1.8 ประมาณการการคำนวณต้นทุนและจุดคุ้มทุนของการลงทุนในการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ ของระบบโดดเดี่ยว (Off grid system) ซึ่งคำนวณจาก ค่าแผง ค่าอินเวอร์เตอร์ ค่าตัวควบคุมการชาร์จค่าแบตเตอรี่ ค่าบำรุงต่อปี ค่าอุปกรณ์และติดตั้งหารด้วยค่าพลังงานที่ลดลงจากการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อคำนวณออกมาจะได้จุดคุ้มทุน (ปี) (อวยชัย และคนอื่นๆ, 2563) จากค่าความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าในพื้นที่ของอาคารเรียน 7 วิทยาลัยเทคนิคกำแพงเพชร เพื่อประมาณการการผลิตพลังงานและต้นทุนพลังงานของระบบพลังงานเซลล์

แสงอาทิตย์ โดยพิจารณาจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้คำนวณคือแผงขนาด 550 W 48 V ราคา 4,400 บาทต่อแผง ค่าตัวควบคุมการชาร์จ รุ่น LUNA Power Module 5 kW ราคา 28,990 บาทต่อเครื่อง และแบตเตอรี่ลิเธียม รุ่น LUNA Battery Module 5 kW 600 V ราคา 199,580 บาทต่อลูก อินเวอร์เตอร์ 10 kW 3 ph ราคา 49,390 บาทต่อตัว ในขนาดพื้นที่หลังคาที่สามารถติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ 300 ตารางเมตร ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ประมาณการคำนวณต้นทุนและจุดคุ้มทุนของการลงทุนในการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ ระบบโดดเดี่ยว (Off grid system)

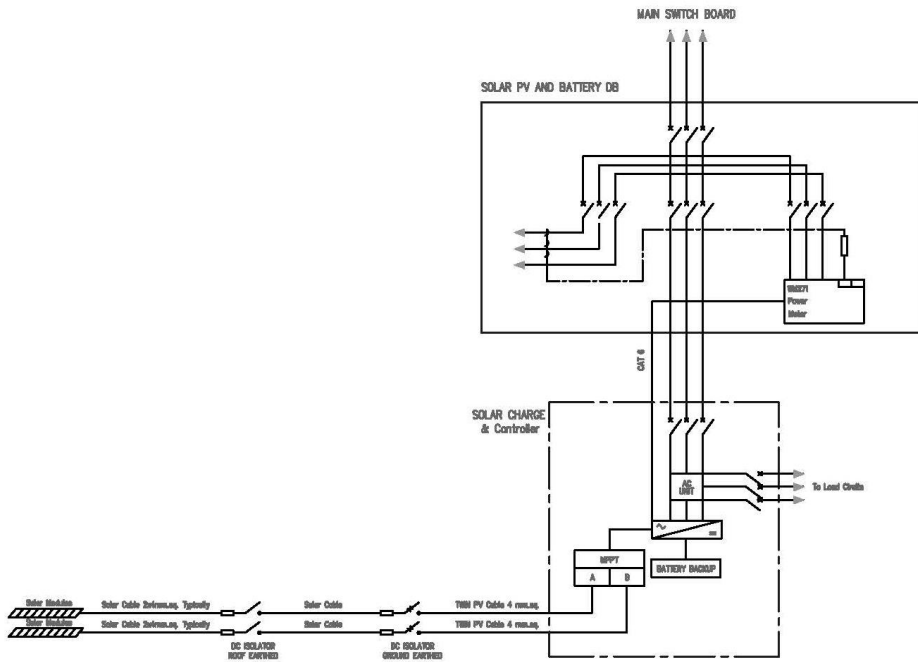
ขนาดการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคา (kW)		10	20	30
ต้นทุน	(1) ขนาดแผง (W)	550	550	550
	(2) จำนวนแผง	18	36	54
	(3) ค่าแผง (บาท)	79,200	158,400	237,600
	(4) ค่าตัวควบคุมการชาร์จ	28,990	28,990	31,490
	(5) ค่าแบตเตอรี่	199,580	399,160	598,740
	(6) ค่าอินเวอร์เตอร์	49,390	98,780	148,170
	(7) ค่าซ่อมบำรุงต่อปี	15,000	15,000	20,000
	(8) ค่าอุปกรณ์และติดตั้ง	100,000	100,000	300,000
	(9) รวม (บาท)	472,160	800,330	1,336,000
(10) ค่าพลังงานที่ลดลงจากการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ (บาท/ปี)		76,320	152,640	228,960
(11) จุดคุ้มทุน (ปี) $(11) = (9)/(10)$		6.18	5.24	5.83

อ้างอิง : ราคาข้อมูลจาก ห้างหุ้นส่วนจำกัด ซีดีทีเอส ออลิมิเต็ด เอ็นเนอร์จี้, บริษัท โซลาร์ ดี คอร์ปอเรชัน จำกัด และบริษัท วิศวแอนด์เซอร์วิส จำกัด

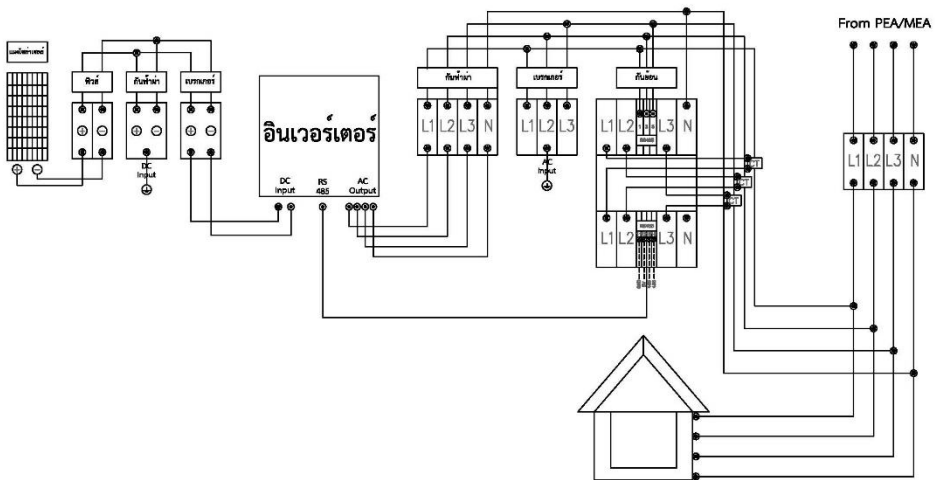
ที่มา : ข้อมูลจากการประมาณการจำนวนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ อินเวอร์เตอร์ ตัวควบคุมการชาร์จ และแบตเตอรี่ในระบบโดดเดี่ยว (Off grid system)

จากตารางที่ 6 การติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาอาคารเรียน 7 ขนาด 10 kWp ด้วยต้นทุน 472,160 บาท มีกำลังการผลิต 40 kWh ต่อวัน โดยคิดค่าไฟฟ้าหน่วยละ 5.30 บาทต่อกิโลวัตต์ ซึ่งทำให้สามารถลดค่าพลังงานไฟฟ้าได้ 76,320 บาทต่อปี จุดคุ้มทุน 6.18 ปี ส่วนขนาด 20 kWp ด้วยต้นทุน 800,330 บาท มีกำลังการผลิต 80 kWh ต่อวัน โดยคิดค่าไฟฟ้าหน่วยละ 5.30 บาทต่อกิโลวัตต์ ซึ่งทำให้สามารถลดค่าพลังงานไฟฟ้าได้ 152,640 บาทต่อปี จุดคุ้มทุน 5.24 ปี และส่วนขนาด 30 kWp ด้วยต้นทุน 1,336,000 บาท มีกำลังการผลิต 120 kWh ต่อวัน โดยคิดค่าไฟฟ้าหน่วยละ 5.30 บาทต่อกิโลวัตต์ ซึ่งทำให้สามารถลดค่าพลังงานไฟฟ้าได้ 228,960 บาทต่อปี จุดคุ้มทุน 5.83 ปี

ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ของระบบโดดเดี่ยว (Off grid system) ประกอบด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (PV) ตัวควบคุมการชาร์จ แบตเตอรี่ อินเวอร์เตอร์และอุปกรณ์ต่างๆ สำหรับเชื่อมต่อ โดยรูปแบบการเชื่อมต่อของระบบสามารถเขียน single line diagram และวงจรแสดงรายละเอียดการต่อวงจรไฟฟ้า แสดงดังภาพที่ 9



(ก) แสดง single line diagram



(ข) แสดงวงจรการต่อวงจรไฟฟ้า

ภาพที่ 9 single line diagram และวงจรแสดงรายละเอียดการต่อวงจรไฟฟ้า

1.9 การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ของการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ระบบสายส่งของการไฟฟ้า (On grid system) เป็นการวิเคราะห์ในรอบระยะเวลา 20 ปี กำหนดอัตราคิดลดร้อยละ 6.22 (MRR ของธนาคารกรุงไทย) พบว่า ระยะเวลาคืนทุนของโครงการคือ 0.61 ปี มีมูลค่าปัจจุบันสุทธิของโครงการ (NPV มีค่าเท่ากับ 12,073,411 ซึ่งค่าที่ได้มากกว่า 0 แสดงว่าโครงการนี้มีความคุ้มค่าในการลงทุนและอัตราผลตอบแทนต่อต้นทุน (BCR) มีค่าเท่ากับ 8.64 ซึ่งมีค่ามากกว่า 1 แสดงว่าโครงการนี้มีผลประโยชน์จากการลงทุน และอัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) มีค่าร้อยละ 14.53 ดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ระบบโดดเดี่ยว (Off grid system)

ปีที่	ปริมาณ กระแสไฟฟ้า ที่ผลิตได้ (kWh)	อัตราค่า ไฟฟ้าที่ จำหน่าย	รวมรายได้	ต้นทุนการผลิต	$\frac{B_i}{(1+r)^T}$	$\frac{C_i}{(1+r)^T}$
1	233,600	5.66	-	800,330	-	753,464.50
2	233,600	5.66	1,322,176	80,033	1,171,862.55	70,934.33
3	233,600	5.66	1,322,176	80,033	1,103,240.96	66,780.58
4	233,600	5.66	1,322,176	80,033	1,038,637.69	62,870.06
5	233,600	5.66	1,322,176	80,033	977,817.45	59,188.53
6	233,600	5.66	1,322,176	80,033	920,558.70	55,722.59
7	233,600	5.66	1,322,176	80,033	866,652.89	52,459.60
8	233,600	5.66	1,322,176	80,033	815,903.68	49,387.69
9	233,600	5.66	1,322,176	80,033	768,126.23	46,495.66
10	233,600	5.66	1,322,176	80,033	723,146.51	43,772.98
11	233,600	5.66	1,322,176	80,033	680,800.71	41,209.73
12	233,600	5.66	1,322,176	80,033	640,934.58	38,796.58
13	233,600	5.66	1,322,176	80,033	603,402.92	36,524.74
14	233,600	5.66	1,322,176	80,033	568,069.02	34,385.94
15	233,600	5.66	1,322,176	80,033	534,804.20	32,372.38
16	233,600	5.66	1,322,176	80,033	503,487.29	30,476.72
17	233,600	5.66	1,322,176	80,033	474,004.23	28,692.08
18	233,600	5.66	1,322,176	80,033	446,247.62	27,011.93

ตารางที่ 7 (ต่อ)

ปีที่	ปริมาณ กระแสไฟฟ้า ที่ผลิตได้ (kWh)	อัตราค่า ไฟฟ้าที่ จำหน่าย	รวมรายได้	ต้นทุนการผลิต	$\frac{B_i}{(1+r)^T}$	$\frac{C_i}{(1+r)^T}$
19	233,600	5.66	1,322,176	80,033	420,116.39	25,430.18
20	233,600	5.66	1,322,176	80,033	395,515.33	23,941.04
รวม	4,672,000		25,121,344	2,320,957	13,653,329	1,579,918
มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV)			12,073,411			
อัตราผลตอบแทนต่อต้นทุน (BCR)			8.64			
ระยะเวลาคืนทุน (PB)			0.61 ปี			
อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR)			14.53 %			

ที่มา : จากการคำนวณ

2. ผลการศึกษาความเป็นไปได้การใช้พลังงานทดแทนด้วยระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคาอาคารเรียน 7 วิทยาลัยเทคนิคกำแพงเพชร ในการนำพลังงานแสงอาทิตย์ มาใช้ประโยชน์ในพื้นที่ของอาคารเรียน 7 ซึ่งแนวทางการนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์ คณะผู้วิจัยได้นำเสนอข้อมูลแนวทางการใช้ประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์ แก่คณะกรรมการสถานศึกษาของวิทยาลัยเทคนิคกำแพงเพชร โดยได้นำเสนอแนวทางการนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์ ดังนี้

2.1 การใช้พลังงานแสงอาทิตย์ช่วยลดค่าใช้จ่ายพลังงานไฟฟ้าได้จริง น่าสนใจนำมาติดตั้งใช้จริง

2.2 ความเป็นไปได้ในการใช้พื้นที่ติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ติดตั้งบนหลังคาที่มีความเหมาะสมและความเข้มข้นของแสงมีเพียงพอต่อการผลิตกระแสไฟฟ้าได้ตลอดปี ค่าเฉลี่ยความเข้มแสงอาทิตย์ กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน ปี 2560 ตำบลในเมือง อำเภอเมืองกำแพงเพชร จังหวัดกำแพงเพชร มีค่าเฉลี่ยทั้งปีเท่ากับ 17.953 kW/m²-day โดยมีค่าความเข้มแสงอาทิตย์มากที่สุดในเดือนเมษายนมีค่าเท่ากับ 21.630 kW/m²-day และค่าความเข้มแสงอาทิตย์น้อยที่สุดในเดือนธันวาคมมีค่าเท่ากับ 15.790 kW/m²-day

2.3 พื้นที่หลังคาของอาคารเรียน 7 มีพื้นที่ขนาดใหญ่เพียงพอสำหรับติดตั้ง โปรงโถง ไม่มีสิ่งกีดขวางปิดกั้นปริมาณแสงแดดจึงทำให้ส่วนใหญ่มีแสงแดดในทุกฤดูโดยช่วงเวลาที่มีความเข้มแสงมากที่สุดในแต่ละวันคือเวลา 10.00 น ถึง 14.00 น. ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่เซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตกระแสไฟฟ้ามากที่สุด

2.4 การใช้พลังงานไฟฟ้าจากพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์ระบบสายส่งของการไฟฟ้า (On grid system) มีความเหมาะสมมากกว่าระบบโดดเดี่ยว (Off grid system) เมื่อเทียบกับต้นทุนในการติดตั้ง

2.5 การใช้ไฟฟ้าจากพลังงานแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ควรเริ่มจากการใช้พลังงานไฟฟ้าด้านหลอดไฟแสงสว่าง และพัดลมภายในอาคารก่อน เพราะมีปริมาณการใช้ไฟฟ้าที่ไม่มากนัก ประกอบกับภายในอาคาร

ห้องเรียนมีเครื่องปรับอากาศ เมื่อเปิดใช้พร้อมกันทำให้พลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตไม่พออาจส่งผลเสียให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าชำรุดได้

2.6 อาคารเรียน 7 วิทยาลัยเทคนิคกำแพงเพชร ควรเป็นต้นแบบในการอนุรักษ์พลังงานให้กับอาคารเรียนอื่นที่มีรูปแบบใกล้เคียงกัน และให้แก่ประชาชน โดยการประยุกต์ใช้รูปแบบการอนุรักษ์พลังงานต่างๆ จริงภายในวิทยาลัยเทคนิคกำแพงเพชร เช่นระบบการบริหารจัดการพลังงาน การติดฟิล์มกระจก การใช้เครื่องใช้ไฟฟ้าชนิดประหยัดพลังงาน เป็นต้น

อภิปรายผล

1. การศึกษาความเป็นไปได้การใช้พลังงานทดแทนด้วยระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคาอาคารเรียน 7 วิทยาลัยเทคนิคกำแพงเพชร จากการศึกษาสรุปว่าการติดตั้ง ระบบการผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ สำหรับลดค่าพลังงานไฟฟ้าของอาคารเรียน 7 วิทยาลัยเทคนิคกำแพงเพชร ที่ต้องการลดค่าพลังงานไฟฟ้าในแต่ละเดือน จากฐานข้อมูลความเข้มแสงอาทิตย์ระดับตำบล ค่าเฉลี่ยความเข้มแสงอาทิตย์ กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน ปี 2560 ตำบลในเมือง อำเภอเมืองกำแพงเพชร จังหวัดกำแพงเพชร มีค่าเฉลี่ยทั้งปีเท่ากับ $17.953 \text{ kW/m}^2\text{-day}$ โดยมีค่าความเข้มแสงอาทิตย์มากที่สุดในเดือนเมษายนมีค่าเท่ากับ $21.630 \text{ kW/m}^2\text{-day}$ และค่าความเข้มแสงอาทิตย์น้อยที่สุดในเดือนธันวาคมมีค่าเท่ากับ $15.790 \text{ kW/m}^2\text{-day}$ ปริมาณความเข้มแสงจะมีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของระบบผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ แสงมีความเข้มมากที่สุดในแต่ละวันคือช่วงเวลา 10.00 น. ถึง 14.00 น. ช่วงเวลาดังกล่าวเป็นช่วงเวลาที่เซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตกระแสไฟฟ้ามากที่สุดประกอบกับที่ตั้งของอาคารเรียน 7 วิทยาลัยเทคนิคกำแพงเพชรมีพื้นที่หลังคาอาคารขนาดใหญ่ โปรงโล่ง ไม่มีสิ่งกีดขวาง หรือบดบังหลังคาของอาคาร จึงส่งผลให้มีปริมาณแสงแดดมากพอในทุกฤดูที่ใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าจากเหตุผลต่างๆ ที่กล่าวมาแสดงให้เห็นว่าแท้จริงแล้วอาคารเรียน 7 วิทยาลัยเทคนิคกำแพงเพชรมีความเป็นไปได้สูงในการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งเป็นพลังงานที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติและสามารถเป็นแหล่งพลังงานทดแทนของอาคารเรียน 7 และอาคารอื่นในวิทยาลัยเทคนิคกำแพงเพชรได้อย่างดี ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของนิพิฐพนธ์, ธีรศิลป์ และแซน (2565) ได้ศึกษาแนวทางการใช้ประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อสนับสนุนนโยบาย (Green Office) ในพื้นที่มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร แม่สอด

2. การศึกษาเปรียบเทียบต้นทุนในการลงทุนระหว่างระบบสายส่งของการไฟฟ้า (On grid system) และระบบโดดเดี่ยว (Off grid system) ที่ติดตั้งติดตั้งบนหลังคาอาคาร 7 วิทยาลัยเทคนิคกำแพงเพชร เพื่อวิเคราะห์ความคุ้มค่า พบว่ารูปแบบที่เหมาะสมในการลงทุนเพื่อติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ในการผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยระบบสายส่งของการไฟฟ้า (On grid system) มีความคุ้มทุนมากกว่าระบบโดดเดี่ยว (Off grid system) และมีระยะเวลาคืนทุนเร็วกว่า ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของนิพิฐพนธ์, ธีรศิลป์ และแซน (2565) ที่ได้ศึกษาเรื่องแนวทางการใช้ประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อสนับสนุนนโยบาย (Green office) ในพื้นที่มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร แม่สอด และสอดคล้องกับงานวิจัยของของอวยชัย และคนอื่นๆ (2563) ได้ศึกษาเรื่องการคำนวณจุดคุ้มทุนสำหรับการติดตั้งโซล่าเซลล์ให้กับอาคารที่พักอาศัยในพื้นที่ตำบลบางเขน

อำเภอเมือง จังหวัดนนทบุรี และงานวิจัยของชูฤต และธีระพงษ์ (2564) เห็นว่าการใช้พลังงานจากการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาให้ผลตอบแทนที่คุ้มค่าต่อการลงทุน ช่วยลดการใช้พลังงานไฟฟ้าลดค่าใช้จ่ายและส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทน

ข้อเสนอแนะจากการวิจัย

ความเป็นไปได้ของการใช้พลังงานทดแทนด้วยระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งแสงอาทิตย์ติดตั้งบนหลังคาอาคาร 7 วิทยาลัยเทคนิคกำแพงเพชร ด้วยระบบสายส่งของการไฟฟ้า (On grid system) มีความคุ้มค่ามากกว่าระบบโดดเดี่ยว (Off grid system) และมีระยะเวลาคืนทุนเร็วกว่า เห็นควรให้ผู้บริหารมีการส่งเสริมการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังของอาคารภายในวิทยาลัยเทคนิคกำแพงเพชรด้วยรูปแบบดังกล่าว

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ แผนกวิชาช่างไฟฟ้ากำลัง วิทยาลัยเทคนิคกำแพงเพชร ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ ขอขอบคุณ ดร.ชัต อินทะสี ที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับงานวิจัยครั้งนี้ ขอขอบคุณผู้ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ทุกท่าน และขอขอบคุณทุกคนในทีมวิจัยที่ทำให้งานวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคจังหวัดกำแพงเพชร. (2565). เอกสารหนังสือแจ้งค่าไฟฟ้า. กำแพงเพชร : การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค.
- เชมณัฐ พรหมมินทร์. (2562). การประเมินทางเศรษฐศาสตร์และประสิทธิภาพหลังการติดตั้งระบบไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนหลังคา : กรณีศึกษาห้างสรรพสินค้า. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาเทคโนโลยีและการจัดการพลังงาน สหสาขาวิชาเทคโนโลยีและการจัดการพลังงานบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- จุฬารัตน์ จำปรัตน์. (2558). การเงินของโครงการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาเศรษฐศาสตร์ธุรกิจ ภาควิชาเศรษฐศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- เฉลิมพล สัตยาอุฒพิงศ์. (2564). โซลาร์เซลล์ 101. กรุงเทพฯ : โปรวิชั่น.
- ชุกฤต อดกานนท์ และธีระพงษ์ ศรีสุข. (2564). การวิเคราะห์การใช้พลังงานจากการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยโซลาร์เซลล์สำหรับโฮมออฟฟิศ. ใน การประชุมวิชาการและนำเสนอผลงานวิจัยระดับชาติ ครั้งที่ 8 มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ วันที่ 29 พฤษภาคม 2564(หน้า 857-864).
 ขอนแก่น : มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ.
- ณัฏฐ์ ศรีสุขพรชัย วัชระ วงศ์ปัญญา บุญวัฒน์ วิจารณ์พล และวัฒน์พงษ์ รักษ์วิเชียร. (2563, มกราคม-มิถุนายน). การศึกษาสภาพการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนหลังคาและเชื่อมต่อสายส่งสำหรับมหาวิทยาลัยในประเทศไทย. สัปดาห์ที่ 10 ฉบับที่ 1 กรกฎาคม - ธันวาคม 2566 ISSN 2985-2161 (Online), 7(1), 1-13.
- ชญพัทธ์ ทิพย์ศุภวงศ์, วัชระ วงศ์ปัญญา, บุญวัฒน์ วิจารณ์พล, เกศนีย์ อินอัย และวราคม วงศ์ชัย. (2565, มกราคม-มิถุนายน). การจำลองสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาแบบเชื่อมต่อกับระบบสายส่งของเทศบาลตำบลแม่เมาะ จังหวัดลำปาง. วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์ สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (เพื่อการพัฒนาท้องถิ่น), 17(1), 81-97.
- นิธิฐพนธ์ ถาษา, ธีรศิลป์ กันธา และแซน ต๊ะปุก. (2565, มกราคม-มิถุนายน). แนวทางการใช้ประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อสนับสนุนนโยบาย (Green Office) ในพื้นที่มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร แม่สอด. สัปดาห์ที่ 10 ฉบับที่ 1 กรกฎาคม - ธันวาคม 2566 ISSN 2985-2161 (Online), 9(1), 65-83.
- บดินทร์ เสนานนท์, กัญญาณัฐ ทองเทพ, กมล จิรเสรีอมรกุล, วันจักรี เลนนาวรี, เสริมสุข บัวเจริญ และยิ่งรักษ์ อรรถเวชกุล. (2562, กรกฎาคม-ธันวาคม). การวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ 8 เมกะวัตต์ระหว่างการติดตั้งแบบระบบคงที่กับแบบระบบติดตามดวงอาทิตย์ในประเทศไทย. วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์ สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (เพื่อการพัฒนาท้องถิ่น), 14(2), 1-19.

- พัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, กรม. (ม.ป.ป.). ความเข้มแสงจากดวงอาทิตย์ กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน ปี 2560. [Online]. Available : https://pei.dede.go.th/dataset/7c15871b-a09e-4046-8d82-026b65d44ed8/resource/41ab6cb8-beb9-4262-ad50-ff643b418997/download/data_solar_intensity_2560.xlsx [2565, ธันวาคม 30].
- ภานุพงศ์ เครืออินทร์. (2561). การจัดการพลังงานไฟฟ้าและค่าไฟฟ้าสำหรับโรงสูบน้ำของการประปาส่วนภูมิภาค. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน (สนพ.). กระทรวงพลังงาน. (2565ก). โครงการส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทนเพื่อลดรายจ่าย ด้านพลังงานสำหรับชุมชน. [Online]. Available : <http://e-lib.dede.go.th/mm-data/Bib15166โครงการส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทนเพื่อลดรายจ่ายด้านพลังงานสำหรับชุมชน.pdf> [2565, ธันวาคม 9].
- สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน (สนพ.). กระทรวงพลังงาน. (2565ข). สถานการณ์พลังงานรายไตรมาส มกราคม-กันยายน ปี 2565. [Online]. Available : <http://www.eppo.go.th/index.php/th/energy-information/> [2565, ธันวาคม 9].
- อวยชัย วงศ์รัตน์, พิเชษฐ รัตนบุญทวี, สิทธิศักดิ์ มาดี และอดิศักดิ์ ทองช่วย. (2563, มกราคม-มิถุนายน). การคำนวณจุดคุ้มทุนสำหรับการติดตั้งโซลาร์เซลล์ให้กับอาคารพักอาศัยรวมพื้นที่ตำบลบางเขน อำเภอเมืองนนทบุรี จังหวัดนนทบุรี. วารสารวิจัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร, 3(1), 31-38.
- อังสนา พจนศิริ. (2559). การศึกษาต้นทุนและผลตอบแทนของโครงการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคาในอาคารธุรกิจขนาดเล็ก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการขนส่งและโลจิสติกส์ มหาวิทยาลัยบูรพา.
- Zeyringer, M., Pachauri, S., Schmid, E., Schmidt, J., Worrell, E. & Morawetz, U.B. (2015). Analyzing Grid Extension and Stand-alone Photovoltaic Systems for the Cost-effective Electrification of Kenya. *Energy Sustain Dev*, 25, 75-86.



การพัฒนาาระบบตรวจสอบครุภัณฑ์ สำนักส่งเสริมวิชาการและงานทะเบียน
มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร

The Development of Durable Article Verification System :
Case Study on the Office of Academic Promotion and Registration,
Kamphaengphet Rajabhat University

จิรศักดิ์ สิงหบุตร*

Jirasak Singhabutr

จินดาพร อ่อนเกต**

Jindaporn Ongate

คมกริช กลิ่นอาจ*

Komkrit Klinart

น้ำพัก ช่ายทอง*

Namphak Khaithong

Received : December 26, 2023

Revised : February 4, 2024

Accepted : March 2, 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ มีวัตถุประสงค์ คือ 1) เพื่อพัฒนาาระบบตรวจสอบครุภัณฑ์ สำนักส่งเสริมวิชาการและงานทะเบียน มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร 2) เพื่อประเมินประสิทธิภาพการใช้งานของระบบตรวจสอบครุภัณฑ์ สำนักส่งเสริมวิชาการและงานทะเบียน มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร โดยการพัฒนาระบบนั้นใช้ดำเนินการตามหลักการวางจรรยาบรรณการพัฒนาระบบ โดยใช้แผนภาพการไหลของข้อมูล แผนภาพความสัมพันธ์ข้อมูล ภาษา PHP ระบบจัดการฐานข้อมูล SQL Server 2008 R2 และ React Framework ส่วนการประเมินประสิทธิภาพระบบนั้น กำหนดประชากร 3 คนซึ่งเป็นเจ้าหน้าที่ผู้รับผิดชอบเกี่ยวกับครุภัณฑ์ โดยใช้แบบประเมินประสิทธิภาพระบบ สถิติที่ใช้ในการประเมิน ได้แก่ ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ผลการวิจัยพบว่า 1) ระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถเพิ่มข้อมูลครุภัณฑ์ใหม่ สร้าง QR Code สำหรับติดที่ครุภัณฑ์ สแกน QR Code

*เจ้าหน้าที่สำนักส่งเสริมวิชาการและงานทะเบียน มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร

Officer at the the office of Academic Promotion and Registration, Kamphaengphet Rajabhat University

**อาจารย์ประจำหลักสูตรเทคโนโลยีสารสนเทศ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร

Information Tecnology hLecturer at the Faculty of Science and Technology, Kamphaengphet Rajabhat University(Corresponding Author) e-mail: jindaporn_o@kpru.ac.th

เพื่อตรวจสอบและปรับปรุงข้อมูลครุภัณฑ์ รวมทั้งสร้างรายงานการตรวจสอบครุภัณฑ์ประจำปีเพื่อส่งไปยังงานพัสดุกลาง 2) ผลการประเมินประสิทธิภาพการใช้งานของระบบ พบว่า ภาพรวมอยู่ในระดับมาก ที่ค่าเฉลี่ย 4.12 และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.73 สำหรับด้านที่ได้ค่าเฉลี่ยสูงสุด คือ ด้านความง่ายต่อการใช้งานระบบที่ค่าเฉลี่ย 4.33 และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.58 สำหรับด้านที่ได้ค่าเฉลี่ยต่ำสุด คือ ด้านการทำงานได้ตามฟังก์ชันของระบบ และด้านความปลอดภัยต่อการใช้งานระบบ ที่ค่าเฉลี่ย 4.00 โดยมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.84 และ 0.87 ตามลำดับ

คำสำคัญ : เว็บแอปพลิเคชัน / ครุภัณฑ์ / QR Code / ระบบตรวจสอบ

ABSTRACT

This research aims to: 1) develop a durable article verification system for the Office of Academic Promotion and Registration at Kamphaeng Phet Rajabhat University; 2) assess the operational efficiency of the system. The development of the system adheres to the principle of system development life cycle, utilizing data flow diagrams, entity-relationship diagrams, PHP programming language, SQL Server 2008 R2 DBMS, and the React Framework. The evaluation of system performance involved a population of three personnel responsible for durable article management through an evaluation form. Statistical measures employed for evaluation included mean and standard deviation. The research findings indicate that: 1) the developed system allows for the addition of new durable article data, generation of QR codes for object labeling, QR code scanning for data verification and updating, including the generation of annual durable article verification reports for submission to the department of supplies; and 2) the evaluation of system performance revealed overall satisfaction with an average score of 4.12 and standard deviations of 0.73. The highest mean score was shown in the ease of system use category, with an average score of 4.33 and a standard deviation of 0.58. The lowest mean score was observed in the system's adherence to functional requirements and security aspects, with the same average score of 4.00 and standard deviations of 0.84 and 0.87, respectively.

Keywords : Web Application / Durable Article / QR Code / Verification System

บทนำ

ความหมายของ “ครุภัณฑ์” คือ สินทรัพย์ที่หน่วยงานมีไว้เพื่อใช้ในการดำเนินงานมีลักษณะคงทน มีอายุการใช้งานเกินกว่า 1 ปีและมีมูลค่าตั้งแต่ 5,000 บาทขึ้นไป (หน่วยตรวจสอบภายใน สำนักงานปลัดกระทรวงมหาดไทย, 2555) เช่น เครื่องคอมพิวเตอร์ ตู้เอกสาร โต๊ะทำงาน หรืออุปกรณ์อื่นๆ ที่ไม่ใช่วัสดุสิ้นเปลืองใช้งานแล้วหมดไป เช่น กระดาษ แก้วพลาสติกที่ไม่สามารถซ่อมแซมเพื่อนำกลับมาใช้งานได้อีก แต่ครุภัณฑ์เมื่อมีการ

ชำรุดหรือเสียหายจะสามารถซ่อมแซมและนำกลับมาใช้งานได้ การตรวจสอบและเก็บข้อมูลครุภัณฑ์มีความสำคัญในการวางแผนจัดการงบประมาณ โดยครุภัณฑ์ที่มีการชำรุดหรือเสียหายจะต้องทำการซ่อมบำรุงเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ ครุภัณฑ์ที่เสื่อมสภาพจะต้องดำเนินการจำหน่ายและวางแผนจัดซื้อครุภัณฑ์ใหม่ และหากครุภัณฑ์สูญหายไม่สามารถยืนยันการมีอยู่ได้จะต้องตรวจสอบกับเจ้าหน้าที่ของหน่วยงานและหาแหล่งที่อยู่หรือสาเหตุการหายไปของครุภัณฑ์

หน่วยงานต่างๆ ในมหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชรได้รับงบประมาณจัดซื้อครุภัณฑ์เพื่อใช้ในการดำเนินงานของหน่วยงาน ซึ่งมหาวิทยาลัยได้จัดทำทะเบียนครุภัณฑ์ไว้ และมีการตรวจสอบครุภัณฑ์ทุกปีงบประมาณ โดยแต่ละปีงบประมาณกลุ่มงานพัสดุจะให้แต่ละหน่วยงานตรวจสอบครุภัณฑ์ในหน่วยงานของตนเองและรายงานกลับไปยังกลุ่มงานพัสดุ จากการสอบถามเจ้าหน้าที่ผู้รับผิดชอบเกี่ยวกับครุภัณฑ์ของสำนักส่งเสริมวิชาการและงานทะเบียน พบว่า หลังจากที่สำนักส่งเสริมวิชาการและงานทะเบียนได้รับเอกสารข้อมูลครุภัณฑ์ เจ้าหน้าที่จะหาครุภัณฑ์ ตรวจสอบครุภัณฑ์ และกรอกข้อมูลลงในเอกสาร ซึ่งการตรวจสอบจะใช้ระยะเวลาเพราะครุภัณฑ์ที่จะต้องตรวจสอบมีเป็นจำนวนมากและติดตั้งอยู่หลายที่ และในการตรวจสอบอาจไม่พบครุภัณฑ์บางตัวจึงต้องใช้เวลาในการค้นหาทำให้เกิดความยากลำบากในการตรวจสอบ (อมลณัฐ, 2561) ดังนั้นการพัฒนาระบบตรวจสอบครุภัณฑ์ สำนักส่งเสริมวิชาการและงานทะเบียน มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร จะช่วยให้การจัดเก็บข้อมูลและตรวจสอบครุภัณฑ์ของสำนักส่งเสริมวิชาการและงานทะเบียนมีความสะดวกรวดเร็ว ทราบที่อยู่ของครุภัณฑ์อย่างชัดเจน ส่งผลให้การตรวจสอบเป็นไปตามกำหนดเวลาและมีประสิทธิภาพ อีกทั้งระบบที่พัฒนาขึ้นจะสามารถเชื่อมต่อได้กับทุกระบบเครือข่ายโดยได้ข้อเสนอแนะจากงานวิจัย เรื่อง การประยุกต์ใช้คิวอาร์โค้ดในการจัดเก็บข้อมูลครุภัณฑ์ออนไลน์ ของคณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร (เจษฎา และรุจโรจน์, 2563) ที่เชื่อมต่อกับระบบเครือข่ายภายในมหาวิทยาลัยเท่านั้น ดังนั้นเมื่อสามารถเชื่อมได้กับทุกระบบเครือข่ายจะทำให้ระบบง่ายต่อการใช้งานและสามารถตรวจสอบครุภัณฑ์เวลาใด ที่ใดก็ได้ โดยใช้การสแกน QR Code จากสมาร์ตโฟน และสามารถตรวจสอบล่วงหน้าได้โดยไม่ต้องรอเอกสารข้อมูลครุภัณฑ์จากกลุ่มงานพัสดุ เมื่อถึงเวลาการตรวจสอบครุภัณฑ์ตามกำหนดการของกลุ่มงานพัสดุ ไม่เพียงแต่ออกรายงานตรวจนับครุภัณฑ์เท่านั้น (อมลณัฐ, 2561) ระบบยังสามารถออกรายงานสรุปตามเอกสารของกลุ่มงานพัสดุและสามารถจัดส่งให้กลุ่มงานพัสดุได้ทันที อีกทั้งยังสามารถออกรายงานอื่นตามความต้องการของผู้ใช้ได้อีกด้วย

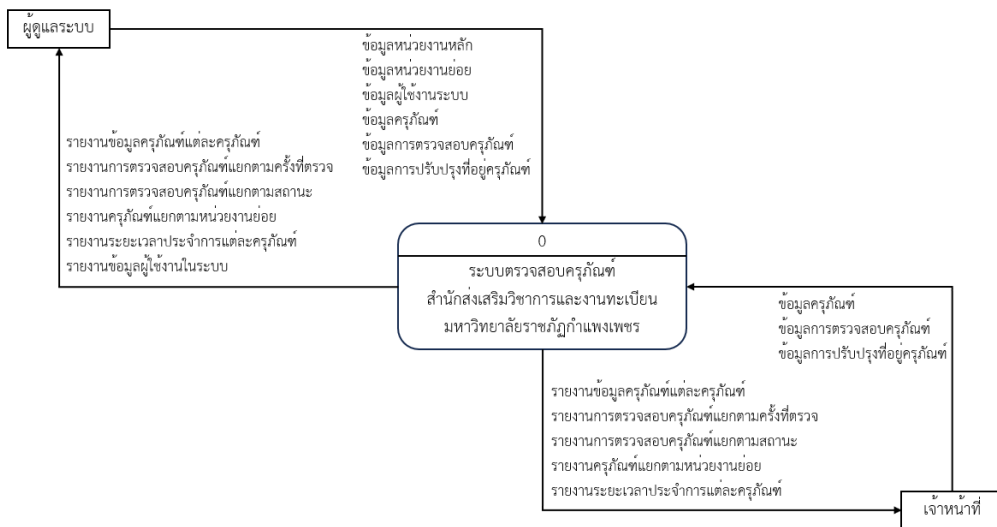
วิธีดำเนินการวิจัย

1. การพัฒนาระบบ ผู้วิจัยได้พัฒนาระบบตรวจสอบครุภัณฑ์ สำนักส่งเสริมวิชาการและงานทะเบียน มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร โดยนำหลักการทฤษฎีวงจรการพัฒนาระบบ (System Development Life Cycle: SDLC) (โอภาส, 2560) มาใช้เป็นแนวทางในการออกแบบพัฒนาระบบซึ่งมีวิธีการดำเนินการวิจัยดังนี้

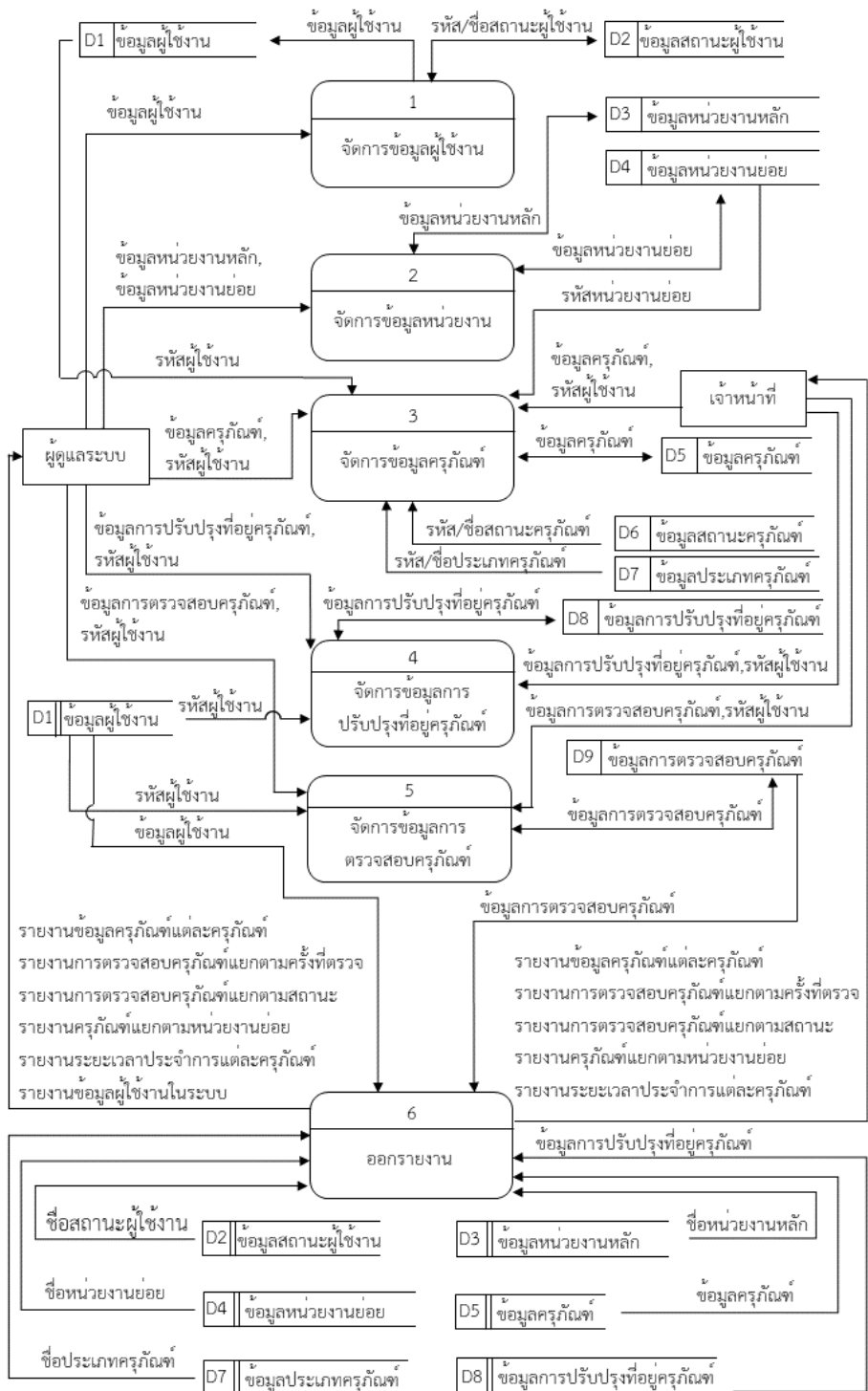
1) การวางแผนโครงการ ผู้วิจัยได้สัมภาษณ์ข้อมูลจากเจ้าหน้าที่ผู้รับผิดชอบเกี่ยวกับครุภัณฑ์ของสำนักส่งเสริมวิชาการ เกี่ยวกับการตรวจสอบครุภัณฑ์ของสำนักในแต่ละปีงบประมาณ โดยใช้การสัมภาษณ์แบบกึ่งโครงสร้าง และสอบถามความต้องการของผู้ใช้งาน เพื่อนำไปวิเคราะห์และออกแบบระบบต่อไป

2) การวิเคราะห์ ผู้วิจัยได้สัมภาษณ์ รวบรวมข้อมูลและขั้นตอนการดำเนินการจากเจ้าหน้าที่ผู้รับผิดชอบเกี่ยวกับครุภัณฑ์ของสำนักส่งเสริมวิชาการและงานทะเบียน และสอบถามความต้องการของผู้ใช้ระบบ และได้กำหนดขอบเขตในการพัฒนาระบบตรวจสอบครุภัณฑ์สำนักส่งเสริมวิชาการและงานทะเบียน มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร

จากนั้นผู้วิจัยได้วิเคราะห์และสร้างแผนภาพบริบท (Context Diagram) ดังภาพที่ 1 แผนภาพกระแสข้อมูล (Dataflow Diagram) ดังภาพที่ 2 เพื่ออธิบายการไหลของข้อมูล และแผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูล (Entity-Relationship Diagram : E-R Diagram) เพื่อดูความสัมพันธ์ของข้อมูลและนำไปสู่การออกแบบฐานข้อมูล



ภาพที่ 1 แผนภาพบริบท (Context Diagram) ของระบบตรวจสอบครุภัณฑ์ สำนักส่งเสริมวิชาการและงานทะเบียน มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร



ภาพที่ 2 แผนภาพกระแสข้อมูล (Data Flow Diagram) level 1 ของระบบตรวจสอบครุภัณฑ์ สำนักส่งเสริมวิชาการและงานทะเบียน มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร

3) การออกแบบ ผู้วิจัยได้ออกแบบระบบการทำงาน ฐานข้อมูล ส่วนติดต่อผู้ใช้งาน และรายงานต่างๆ เพื่อให้สะดวกต่อการพัฒนาระบบ และสะดวกต่อการใช้งานของผู้ใช้

4) การนำไปใช้ ผู้วิจัยพัฒนาระบบในรูปแบบเว็บแอปพลิเคชัน โดยใช้ PHP เชื่อมต่อกับฐานข้อมูล SQL Server และพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันโดยใช้ React framework ในระหว่างการพัฒนา ระบบ ผู้วิจัยได้ทดสอบการทำงานของระบบ โดยกรอกข้อมูลจำลองเพื่อตรวจสอบการทำงานของระบบ หากพบข้อผิดพลาด ผู้วิจัยได้มีการปรับปรุงแก้ไขระบบให้ถูกต้อง เมื่อพัฒนาระบบเสร็จสิ้นแล้ว ผู้วิจัยได้นำเสนอระบบให้กับเจ้าหน้าที่ผู้รับผิดชอบเกี่ยวกับครุภัณฑ์ของสำนักส่งเสริมวิชาการและงานทะเบียน พร้อมทั้งแนะนำวิธีการใช้งานระบบ และให้ผู้ใช้งานได้ใช้งานจริง

5) การบำรุงรักษา ผู้วิจัยได้ดูแลระบบให้สามารถใช้งานได้อยู่เสมอ หากผู้ใช้งานแจ้งถึงข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นในระบบ ผู้วิจัยจะดำเนินการปรับปรุงแก้ไขให้ถูกต้อง

2. การประเมินประสิทธิภาพระบบ ในการประเมินประสิทธิภาพระบบ ใช้ประชากรทั้งหมด 3 คน โดยมีคุณสมบัติดังนี้

- 1) เป็นเจ้าหน้าที่รับผิดชอบงานพัสดุครุภัณฑ์ สังกัดสำนักส่งเสริมวิชาการและงานทะเบียน
- 2) มีประสบการณ์ด้านงานพัสดุ ไม่น้อยกว่า 2 ปี ในวันที่ทำแบบประเมิน

โดยใช้แบบประเมินประสิทธิภาพระบบตรวจสอบครุภัณฑ์ สำนักส่งเสริมวิชาการและงานทะเบียน แบบมาตราส่วนประมาณค่า 5 ระดับ โดยประเมินประสิทธิภาพ 4 ด้าน ได้แก่ ด้านความสามารถในการทำงานของระบบ ด้านการทำงานได้ตามฟังก์ชันของระบบ ด้านความยากง่ายต่อการใช้งานระบบ และ ด้านความปลอดภัยต่อการใช้งานระบบ และนำผลจากแบบประเมินมาหาค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และมีเกณฑ์ในการแปลผลดังนี้ (เอี่ยมพร, 2554)

ค่าเฉลี่ย 4.51-5.00	หมายถึง	ประสิทธิภาพอยู่ในระดับมากที่สุด
ค่าเฉลี่ย 3.51-4.50	หมายถึง	ประสิทธิภาพอยู่ในระดับมาก
ค่าเฉลี่ย 2.51-3.50	หมายถึง	ประสิทธิภาพอยู่ในระดับปานกลาง
ค่าเฉลี่ย 1.51-2.50	หมายถึง	ประสิทธิภาพอยู่ในระดับน้อย
ค่าเฉลี่ย 1.01-1.50	หมายถึง	ประสิทธิภาพอยู่ในระดับน้อยที่สุด

ผลการวิจัย

1. ผลการพัฒนา ระบบตรวจสอบครุภัณฑ์ สำนักส่งเสริมวิชาการและงานทะเบียน มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร

ผู้วิจัยได้สรุปปัญหาที่เกิดขึ้นจากการสัมภาษณ์ พบว่า ในการตรวจสอบครุภัณฑ์เกิดความล่าช้า เนื่องจากต้องรอเอกสารข้อมูลครุภัณฑ์จากกลุ่มงานพัสดุ เพื่อนำข้อมูลครุภัณฑ์จากเอกสารมาเทียบกับครุภัณฑ์เพื่อบันทึกการตรวจสอบประจำปีงบประมาณนั้นๆ และการตามหาที่อยู่ครุภัณฑ์ค่อนข้างลำบากเนื่องจากไม่มีการบันทึกที่อยู่ของครุภัณฑ์อย่างละเอียด ดังนั้นจึงได้พัฒนาระบบระบบตรวจสอบครุภัณฑ์ สำนักส่งเสริม

วิชาการและงานทะเบียน มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชรตามที่ได้ออกแบบไว้ โดยข้อมูลในระบบจะถูกเก็บไว้ในฐานข้อมูล ผู้ใช้งานสามารถเข้าสู่ระบบเพื่อใช้งาน และระบบสามารถทำงานได้ ดังนี้

- จัดการข้อมูลผู้ใช้งาน
- จัดการข้อมูลหน่วยงาน
- จัดการข้อมูลครุภัณฑ์ สามารถเพิ่ม แก้ไขข้อมูลครุภัณฑ์ และเรียกดูข้อมูลครุภัณฑ์ได้ ดังภาพที่

3 ภาพที่ 4 ภาพที่ 5 และ ภาพที่ 6 ตามลำดับ

- สร้าง QR Code ของแต่ละครุภัณฑ์และสามารถดาวน์โหลดหรือพิมพ์ QR Code ดังภาพที่ 7 เพื่อนำไปติดที่ครุภัณฑ์

- จัดการข้อมูลการปรับปรุงที่อยู่ครุภัณฑ์
- จัดการข้อมูลการตรวจสอบครุภัณฑ์ ดังภาพที่ 8 และสามารถตรวจสอบโดยการสแกน QR

Code โดยใช้กล้องจากสมาร์ทโฟน หรือใช้ตัวสแกน QR Code ของระบบ ดังภาพที่ 9 ภาพที่ 10 และภาพที่ 11

- ออกรายงาน ได้แก่ รายงานครุภัณฑ์ประจำปี รายงานครุภัณฑ์แยกประเภท รายงานระยะเวลาใช้งานครุภัณฑ์ รายงานที่อยู่ครุภัณฑ์ และรายงานครุภัณฑ์ตามสถานะ ตัวอย่างรายงาน ดังภาพที่ 12 และ สามารถดาวน์โหลดรายงานเป็นไฟล์ Excel ได้ ดังภาพที่ 13

ลำดับ	รูปภาพ	หมายเลขครุภัณฑ์	รายการครุภัณฑ์	หน่วยงาน	ปีงบประมาณ	สถานะ	จัดการ
6		KPRU.51-13.00-0322	เครื่องฉายสไลด์ยี่ห้อ Sharp รุ่นของเล่น	สำนักงานส่งเสริมวิสาหกิจขนาดกลางและย่อม	2566	ใช้งานดี	
7		KPRU.51-13.00-0332	เครื่องฉายสไลด์ยี่ห้อ Sharp รุ่นของเล่น	สำนักงานส่งเสริมวิสาหกิจขนาดกลางและย่อม	2566	ใช้งานดี	
8		KPRU.51-13.00-0333	เครื่องฉายสไลด์ยี่ห้อ Sharp รุ่นของเล่น	สำนักงานส่งเสริมวิสาหกิจขนาดกลางและย่อม	2566	ใช้งานดี	
9		KPRU.51-13.00-0334	เครื่องฉายสไลด์ยี่ห้อ Sharp รุ่นของเล่น	สำนักงานส่งเสริมวิสาหกิจขนาดกลางและย่อม	2566	ใช้งานดี	
10		KPRU.51-13.00-0335	เครื่องฉายสไลด์ยี่ห้อ Sharp รุ่นของเล่น	สำนักงานส่งเสริมวิสาหกิจขนาดกลางและย่อม	2566	ใช้งานดี	
11		KPRU.51-13.00-0336	เครื่องฉายสไลด์ยี่ห้อ Sharp รุ่นของเล่น	สำนักงานส่งเสริมวิสาหกิจขนาดกลางและย่อม	2566	ใช้งานดี	
12		KPRU.51-13.00-0337	เครื่องฉายสไลด์ยี่ห้อ Sharp รุ่นของเล่น	สำนักงานส่งเสริมวิสาหกิจขนาดกลางและย่อม	2566	ใช้งานดี	
13		KPRU.52-04.00-0035	เครื่องปรับอากาศ แวลงใช้พลังงาน ขนาด 28,300 BTU	ศูนย์วิจัย	2566	ใช้งานดี	
14		KPRU.52-04.00-0036	เครื่องปรับอากาศแวลงใช้พลังงาน ขนาด 33,000 BTU	ศูนย์วิจัย	2566	ใช้งานดี	
15		KPRU.52-04.00-0037	เครื่องปรับอากาศ แวลงใช้พลังงาน ขนาด 28,300 BTU	ศูนย์วิจัย	2566	ใช้งานดี	

ภาพที่ 3 รายการครุภัณฑ์ในระบบ

เพิ่มครุภัณฑ์

หมายเลขครุภัณฑ์: KPRU43-04 00-0635

ชื่อรายการครุภัณฑ์: คอมพิวเตอร์สำนักงาน

ประเภทครุภัณฑ์: 13.00 ครุภัณฑ์คอมพิวเตอร์

จำนวน: 1 หน่วยนับ: เครื่อง ราคา/หน่วย: 25000

ที่มาครุภัณฑ์: - ข้อมูลสัญญา: - ประเภทเงิน: งบปกติ

คุณลักษณะ: เครื่องคอมพิวเตอร์ยี่ห้อ Lenovo รุ่น ThinkCentre 57 ความเร็ว 2.0 GHz จอ WLCD 19" พร้อมโต๊ะวางคอมพิวเตอร์ และเก้าอี้หนึ่ง มีลิ้น มีที่พนัก

Preview Image:

รูปครุภัณฑ์: Choose File K..g

วันที่: 24 เดือน: พฤศจิกายน ปีที่ซื้อ: 2566 วันที่: 24 เดือน: พฤศจิกายน ปีที่รับ: 2566 ปีงบประมาณ: 2543

หน่วยงานที่ติดตั้ง: งานเทคโนโลยีสารสนเทศ สถานะครุภัณฑ์: ใช้งานดี

บันทึก ยกเลิก

ภาพที่ 4 แบบฟอร์มการเพิ่มข้อมูลครุภัณฑ์

KPRU51-13 00-0333 เครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับประมวลผลทั่วไป เครื่องคอมพิวเตอร์ยี่ห้อ Lenovo รุ่นThinkCentre 57 ความเร็ว 2.0 GHz จอ WLCD 19" พร้อมโต๊ะวางคอมพิวเตอร์ และเก้าอี้หนึ่ง มีลิ้น มีที่พนัก

฿29,750.00 บาท จำนวน 1 ชุด ประเภทเงิน งบประมาณแผ่นดิน ที่มาครุภัณฑ์ -

13.00 ครุภัณฑ์คอมพิวเตอร์ ปี 2551 ชื่อเมื่อ 1 มีนาคม 2551 และรับวันที่ 1 มีนาคม 2551 ผู้ขาย หจก.โรจนกุลคอมพิวเตอร์ เป็นครุภัณฑ์ประจำหน่วยงาน สำนักส่งเสริมวิชาการและงานทะเบียน สถานะ: ใช้งานได้ เอกสารอ้างอิง ไม่พบเอกสารอ้างอิง ปีที่ตรวจล่าสุด 2566 ตรวจโดยเจ้าหน้าที่ ธีรศักดิ์ สิงหนุต

ตรวจสอบ อัปเดตข้อมูล

ข้อมูลอัปเดตล่าสุด 23 พฤศจิกายน 2566 เวลา 13:44

สถานะ: ใช้งานได้

หน่วยงาน: สำนักส่งเสริมวิชาการและงานทะเบียน

ที่ตั้ง: เครื่องอยู่ที่ศูนย์ฯพรพ. ชั้น 5 ห้อง สำนักงานอยู่ เจริญวิชาการและงานทะเบียน (งานทะเบียนและประมวลผล) เลขครุภัณฑ์เดิมที่ติดมากับเครื่อง 744000100010600516288 ผู้ตรวจ ธีรศักดิ์ สิงหนุต

KPRU51-13.00-0333

ตรวจสอบ

ภาพที่ 5 รายละเอียดแต่ละครุภัณฑ์

หมายเลขครุภัณฑ์
KPRU51-13.00-0333

ชื่อรายการ *
เครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับประมวลผลทั่วไป

ประเภทครุภัณฑ์ *
13.00 เครื่องคอมพิวเตอร์

คุณลักษณะ *
เครื่องคอมพิวเตอร์ยี่ห้อ Lenovo รุ่นThinkCentre 57 3071L

ราคา *
29750.0

หน่วยเงิน *
ชุด

ที่มาครุภัณฑ์ *
-

ผู้ขาย *
ทศกโรจนาเทคโนโลยี

ประเภทเงิน *
โอนประเภทสมทบเงิน

วันที่ เดือน ปีที่ซื้อ วันที่ เดือน ปีที่รับ
1 มีนาคม 2551 1 มีนาคม 2551

ชื่อประเภทครุภัณฑ์
2551

บันทึก

ภาพที่ 6 แบบฟอร์มการแก้ไขข้อมูลครุภัณฑ์




KPRU51-13.00-0333

ดาวน์โหลด

ภาพที่ 7 ตัวอย่างเมนูดาวน์โหลด QR Code แต่ละครุภัณฑ์

ตรวจสอบครุภัณฑ์หมายเลข : KPRU51-13.00-0334



กรุณาอัพโหลดรูปภาพ

เพิ่มการตรวจสอบประจำปี 2567

ปีที่ตรวจสอบ

หน่วยงานที่ติดตั้ง

สถานะ

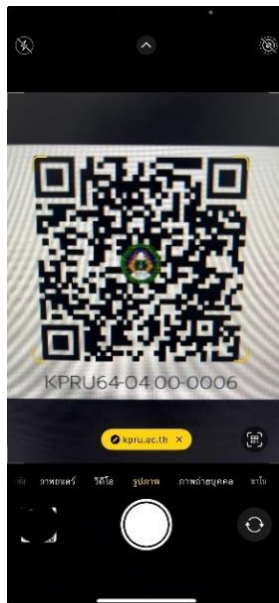
หลักฐาน
 No file chosen

หน่วยงานปัจจุบัน : สำนักส่งเสริมวิชาการและงานทะเบียน
รายละเอียดที่อยู่ : เครื่องอยู่ที่คุนภักดีตยา ลาเต้ สำนักงานส่งเสริมวิชาการและงานทะเบียน (งานทะเบียนและประมวลผล) เลขครุภัณฑ์ที่ติดมากับเครื่องเดิม 744000100106005120
สถานะ : ใช้งานได้
ผู้บันทึกข้อมูล : ชรัสศักดิ์ สิงหนุต
ข้อมูลล่าสุด 23 พฤศจิกายน 2566 เวลา 13:47

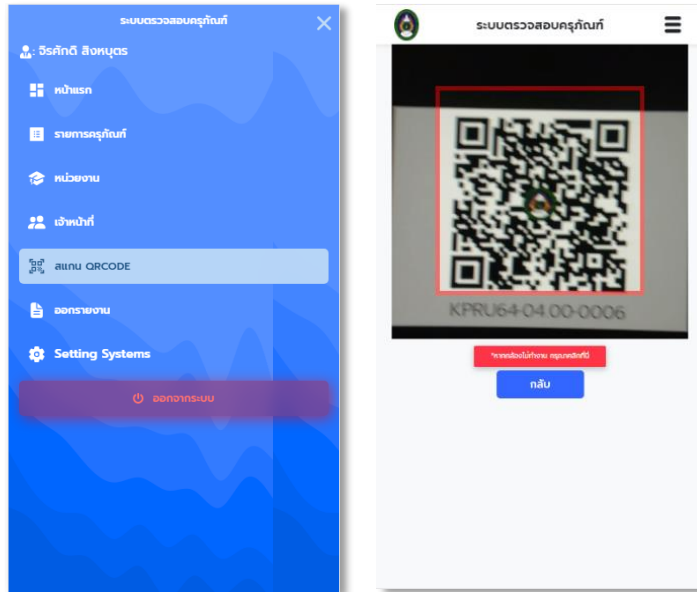
บันทึกตามข้อมูลล่าสุด

บันทึกการตรวจสอบใหม่

ภาพที่ 8 การตรวจสอบครุภัณฑ์



ภาพที่ 9 การสแกน QR Code ด้วยกล้องสมาร์ทโฟน



ภาพที่ 10 การสแกนด้วยเมนูสแกน QR Code จากระบบ



ภาพที่ 11 รายละเอียดครุภัณฑ์จากการสแกน QR Code

วันที่	หมายเลขบัญชี	รายการ	จำนวน	ราคาต่อหน่วย	รวมรวม	งบประมาณ	ประเภทครุภัณฑ์	หน่วยงานย่อย	สถานะ
14/02/2551	KPRU51-04.00-0029	เครื่องจัดเก็บเก็บเอกสารระบบอิเล็กทรอนิกส์	1	315000.0	315000.0	งบประมาณแผ่นดิน	04.00 ครุภัณฑ์สำนักงาน	สำนักส่งเสริมวิชาการและงานทะเบียน	ใช้งานได้
01/03/2551	KPRU51-13.00-0272	เครื่องคอมพิวเตอร์สำนักงาน	1	29750.0	29750.0	งบประมาณแผ่นดิน	13.00 ครุภัณฑ์คอมพิวเตอร์	สำนักส่งเสริมวิชาการและงานทะเบียน	ใช้งานได้
01/03/2551	KPRU51-13.00-0278	เครื่องคอมพิวเตอร์สำนักงาน (Workgroup Server)	1	80000.0	80000.0	งบประมาณแผ่นดิน	13.00 ครุภัณฑ์คอมพิวเตอร์	สำนักส่งเสริมวิชาการและงานทะเบียน	ใช้งานได้
01/03/2551	KPRU51-13.00-0320	เครื่องคอมพิวเตอร์สำนักงาน	1	29750.0	29750.0	งบประมาณแผ่นดิน	13.00 ครุภัณฑ์คอมพิวเตอร์	สำนักส่งเสริมวิชาการและงานทะเบียน	ใช้งานได้
01/03/2551	KPRU51-13.00-0321	เครื่องคอมพิวเตอร์สำนักงาน	1	29750.0	29750.0	งบประมาณแผ่นดิน	13.00 ครุภัณฑ์คอมพิวเตอร์	สำนักส่งเสริมวิชาการและงานทะเบียน	ใช้งานได้
01/03/2551	KPRU51-13.00-0322	เครื่องคอมพิวเตอร์สำนักงาน	1	29750.0	29750.0	งบประมาณแผ่นดิน	13.00 ครุภัณฑ์คอมพิวเตอร์	สำนักส่งเสริมวิชาการและงานทะเบียน	ใช้งานได้
01/03/2551	KPRU51-13.00-0332	เครื่องคอมพิวเตอร์สำนักงาน	1	29750.0	29750.0	งบประมาณแผ่นดิน	13.00 ครุภัณฑ์คอมพิวเตอร์	สำนักส่งเสริมวิชาการและงานทะเบียน	ใช้งานได้
01/03/2551	KPRU51-13.00-0333	เครื่องคอมพิวเตอร์สำนักงาน	1	29750.0	29750.0	งบประมาณแผ่นดิน	13.00 ครุภัณฑ์คอมพิวเตอร์	สำนักส่งเสริมวิชาการและงานทะเบียน	ใช้งานได้
01/03/2551	KPRU51-13.00-0334	เครื่องคอมพิวเตอร์สำนักงาน	1	29750.0	29750.0	งบประมาณแผ่นดิน	13.00 ครุภัณฑ์คอมพิวเตอร์	สำนักส่งเสริมวิชาการและงานทะเบียน	ใช้งานได้
01/03/2551	KPRU51-13.00-0335	เครื่องคอมพิวเตอร์สำนักงาน	1	29750.0	29750.0	งบประมาณแผ่นดิน	13.00 ครุภัณฑ์คอมพิวเตอร์	สำนักส่งเสริมวิชาการและงานทะเบียน	ใช้งานได้

ภาพที่ 12 รายงานตามรูปแบบที่เลือก

วันที่	หมายเลขบัญชี	รายการ	จำนวน	ราคาต่อหน่วย	รวมรวม	งบประมาณ	ประเภทครุภัณฑ์	หน่วยงานย่อย	สถานะ
14/02/2551	KPRU51 04.00.0029	เครื่องจัดเก็บเก็บเอกสารระบบอิเล็กทรอนิกส์	1	315000.0	315000.0	งบประมาณแผ่นดิน	04.00 ครุภัณฑ์สำนักงาน	สำนักส่งเสริมวิชาการและงานทะเบียน	ใช้งานได้
01/03/2551	KPRU51 13.00.0272	เครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับประมวลผลทั่วไป	1	29750.0	29750.0	งบประมาณแผ่นดิน	13.00 ครุภัณฑ์คอมพิวเตอร์	สำนักส่งเสริมวิชาการและงานทะเบียน	ใช้งานได้
01/03/2551	KPRU51 13.00.0278	เครื่องคอมพิวเตอร์ทำหน้าที่แม่ข่ายระดับสูง (Workgroup Server)	1	80000.0	80000.0	งบประมาณแผ่นดิน	13.00 ครุภัณฑ์คอมพิวเตอร์	สำนักส่งเสริมวิชาการและงานทะเบียน	ใช้งานได้
01/03/2551	KPRU51 13.00.0320	เครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับประมวลผลทั่วไป	1	29750.0	29750.0	งบประมาณแผ่นดิน	13.00 ครุภัณฑ์คอมพิวเตอร์	สำนักส่งเสริมวิชาการและงานทะเบียน	ใช้งานได้
01/03/2551	KPRU51 13.00.0321	เครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับประมวลผลทั่วไป	1	29750.0	29750.0	งบประมาณแผ่นดิน	13.00 ครุภัณฑ์คอมพิวเตอร์	สำนักส่งเสริมวิชาการและงานทะเบียน	ใช้งานได้
		เครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับ	1				13.00 ครุภัณฑ์	สำนักส่งเสริมวิชาการและงานทะเบียน	ใช้งานได้

ภาพที่ 13 รายงานครุภัณฑ์ประจำปีแบบไฟล์ Excel

2. ผลการประเมินประสิทธิภาพระบบตรวจสอบครุภัณฑ์ สำนักส่งเสริมวิชาการและงานทะเบียน มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร ซึ่งมีผลการประเมิน ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลประเมินประสิทธิภาพระบบตรวจสอบครุภัณฑ์ สำนักส่งเสริมวิชาการและงานทะเบียน มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร

หัวข้อ	ค่าเฉลี่ย	S.D.	ความหมาย
ด้านความสามารถในการทำงานของระบบ	4.22	0.65	มาก
1. สามารถเพิ่มและแก้ไขข้อมูลครุภัณฑ์ได้	4.33	0.58	มาก
2. สามารถเพิ่มข้อมูลหน่วยงานได้	4.33	0.58	มาก
3. สามารถจัดการสถานะครุภัณฑ์ได้	4.33	0.58	มาก
4. สามารถสร้าง QR Code สำหรับตรวจสอบครุภัณฑ์ได้	4.00	1.00	มาก
5. สามารถตรวจสอบและอัปเดตที่อยู่ครุภัณฑ์ได้	4.33	0.58	มาก
6. สามารถสแกน QR Code เพื่อตรวจสอบและอัปเดตที่อยู่ครุภัณฑ์ได้	4.00	1.00	มาก
ด้านการงานได้ตามฟังก์ชันของระบบ	4.00	0.84	มาก
7. ความถูกต้องในการจัดการข้อมูลหน่วยงาน	4.00	1.00	มาก
8. ความถูกต้องในการจัดการข้อมูลครุภัณฑ์	4.00	1.00	มาก
9. ความถูกต้องในการเพิ่มข้อมูลการตรวจสอบและอัปเดตที่อยู่ของครุภัณฑ์	4.00	1.00	มาก
10. ความถูกต้องในการออกรายงานข้อมูลครุภัณฑ์ประจำปีงบประมาณต่างๆ	4.00	1.00	มาก
11. ความถูกต้องในการออกรายงานครุภัณฑ์แยกตามหน่วยงาน	4.00	1.00	มาก
12. ความถูกต้องของการรายงานข้อมูลครุภัณฑ์แต่ละครุภัณฑ์	4.00	1.00	มาก
13. ความถูกต้องของ QR Code ที่สร้างจากระบบ	4.00	1.00	มาก
ด้านความยากง่ายต่อการใช้งานระบบ	4.33	0.50	มาก
14. ความง่ายในการใช้งานระบบ	4.33	0.58	มาก
15. ความเหมาะสมในการเลือกใช้ชนิดตัวอักษรและความชัดเจนของข้อความที่แสดงบนจอภาพ	4.33	0.58	มาก
16. ความเหมาะสมของปริมาณข้อมูลที่น่าเสนอในแต่ละหน้าจอ	4.33	0.58	มาก
ด้านความปลอดภัยต่อการใช้งานระบบ	4.00	0.87	มาก
17. การกำหนดชื่อผู้ใช้และรหัสผ่านเข้าใช้งานระบบ	4.00	1.00	มาก
18. การตรวจสอบสิทธิ์ผู้ใช้	4.00	1.00	มาก
19. การกำหนดสิทธิ์ของผู้ใช้งานระบบ	4.00	1.00	มาก
ค่าเฉลี่ยรวมทุกด้าน	4.12	0.73	มาก

จากตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่าผลการประเมินประสิทธิภาพในภาพรวมของการทำงานของระบบ อยู่ในระดับมาก ค่าเฉลี่ย 4.12 หากพิจารณาเป็นรายด้าน พบว่า ด้านความยากง่ายต่อการใช้งานระบบอยู่ในระดับมาก

ค่าเฉลี่ย 4.33 ด้านความสามารถในการทำงานของระบบอยู่ในระดับมาก ค่าเฉลี่ย 4.22 ด้านการทำงานได้ตามฟังก์ชันของระบบและด้านความปลอดภัยต่อการใช้งานระบบ อยู่ในระดับมาก ค่าเฉลี่ย 4.00 ตามลำดับ

อภิปรายผล

งานวิจัยเรื่องการพัฒนาเว็บตรวจสอบครุภัณฑ์ สำนักส่งเสริมวิชาการและงานทะเบียน มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร สามารถอภิปรายตามวัตถุประสงค์ได้ดังนี้

1. เพื่อพัฒนาระบบตรวจสอบครุภัณฑ์ สำนักส่งเสริมวิชาการและงานทะเบียน มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร ซึ่งผู้วิจัยได้พัฒนาระบบที่มีการจัดเก็บข้อมูลในฐานข้อมูลและจัดการข้อมูลผ่านระบบเครือข่าย โดยผู้ใช้งานสามารถเข้าสู่ระบบเพื่อจัดการข้อมูลผู้ใช้งาน จัดการข้อมูลหน่วยงาน จัดการข้อมูลครุภัณฑ์ สร้าง QR Code จัดการข้อมูลการปรับปรุงที่อยู่ครุภัณฑ์ จัดการข้อมูลการตรวจสอบครุภัณฑ์ ตรวจสอบครุภัณฑ์โดยการสแกน QR Code และออกรายงานต่างๆ ได้แก่ รายงานครุภัณฑ์ประจำปี รายงานครุภัณฑ์แยกประเภท รายงานระยะเวลาใช้งานครุภัณฑ์ รายงานที่อยู่ครุภัณฑ์ และรายงานครุภัณฑ์ตามสถานะ ซึ่งผู้ใช้งานสามารถตรวจสอบครุภัณฑ์ได้อย่างรวดเร็วและถูกต้อง สะดวกต่อการใช้งาน อีกทั้งการใช้เทคโนโลยี QR Code ในระบบทำให้เข้าถึงข้อมูลครุภัณฑ์ได้ง่ายและระบุครุภัณฑ์ได้อย่างถูกต้อง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย เรื่อง การประยุกต์ใช้คิวอาร์โค้ดในการจัดเก็บข้อมูลครุภัณฑ์ออนไลน์ ของคณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร (เจษฎา และรุจโรจน์, 2563) และสอดคล้องกับงานวิจัย เรื่อง การใช้รหัสคิวอาร์โค้ดบนระบบปฏิบัติการบนมือถือเพื่อการบริหารจัดการครุภัณฑ์ (พินทุสร และคนอื่นๆ, 2560)

2. เพื่อประเมินประสิทธิภาพระบบตรวจสอบครุภัณฑ์ สำนักส่งเสริมวิชาการและงานทะเบียน มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร ผู้วิจัยได้ทำการประเมินประสิทธิภาพระบบโดยสอบถามจากผู้ใช้งาน ได้แก่ เจ้าหน้าที่รับผิดชอบงานพัสดุครุภัณฑ์ สังกัดสำนักส่งเสริมวิชาการและงานทะเบียน พบว่า ผลการประเมินประสิทธิภาพในภาพรวมของการทำงานของระบบ อยู่ในระดับมาก ค่าเฉลี่ย 4.12 หากพิจารณาเป็นรายด้าน พบว่าด้านความง่ายต่อการใช้งานระบบอยู่ในระดับมาก ค่าเฉลี่ย 4.33 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย เรื่อง แนวทางการพัฒนาระบบควบคุมครุภัณฑ์ด้วยบาร์โค้ดสองมิติ (QR Code) กรณีศึกษา วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ (ศรีนทิพย์, 2563) ด้านความสามารถในการทำงานของระบบอยู่ในระดับมาก ค่าเฉลี่ย 4.22 ด้านการทำงานได้ตามฟังก์ชันของระบบและด้านความปลอดภัยต่อการใช้งานระบบ อยู่ในระดับมาก ค่าเฉลี่ย 4.00 ตามลำดับ ซึ่งจากผลประเมินจะเห็นได้ว่าระบบมีประสิทธิภาพสามารถนำไปใช้งานได้จริง และผู้วิจัยจะต้องติดตามการนำระบบไปใช้งาน หากพบข้อผิดพลาด หรือได้รับข้อเสนอแนะ ควรมีการปรับปรุงระบบเพื่อให้ระบบมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณผู้ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ทุกท่าน เจ้าหน้าที่ผู้รับผิดชอบเกี่ยวกับครุภัณฑ์ของสำนักส่งเสริมวิชาการและงานทะเบียนที่ให้ข้อมูล ใช้งานระบบ และประเมินประสิทธิภาพระบบ ทำให้งานวิจัยครั้งนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- เจษฎา เปาจีน และรุจโรจน์ แก้วอุไร. (2563). การประยุกต์ใช้คิวอาร์โค้ดในการจัดเก็บข้อมูลครุภัณฑ์ออนไลน์ของคณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร. *Journal of Information and Learning*, 31(3), 37-46.
- พินทุสร ปัสนะจะโน, ตะวัน ขุนอาสา, ธนา จันทร์อบ และรามเศวร์ พร้อมชินสมบัติ. (2560). การใช้รหัสคิวอาร์โค้ดบนระบบปฏิบัติการบนมือถือเพื่อการบริหารจัดการครุภัณฑ์. *ศรีปทุมปริทัศน์ ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*, 9(1), 88-97.
- ศรินทิพย์ งามถิ่น. (2563). แนวทางการพัฒนาระบบควบคุมครุภัณฑ์ด้วยบาร์โค้ดสองมิติ (QR Code) กรณีศึกษา วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ *วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยการจัดการและเทคโนโลยีอีสเทิร์น*, 17(1), 393-407.
- หน่วยตรวจสอบภายใน สำนักงานปลัดกระทรวงมหาดไทย. (2555). *คู่มือการปฏิบัติงาน การตรวจสอบ และการควบคุมวัสดุ ครุภัณฑ์*. [Online]. Available : https://www.chaisor.go.th/attach_file/e94f80039aa50fbf51ab071b4f44e703.pdf [2565, กรกฎาคม 4].
- อมลนัฐ โชติกิจนุสรณ์. (2561). การพัฒนาระบบตรวจนับครุภัณฑ์คอมพิวเตอร์และอุปกรณ์ต่อพ่วงด้วยรหัสแถบสองมิติ. *วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเชีย ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*, 12(3), 186-199.
- โอภาส เอี่ยมสิริวงศ์. (2560). *การวิเคราะห์และออกแบบระบบ (ฉบับปรับปรุงเพิ่มเติม)*. กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดดูเคชั่น.
- เอี่ยมพร หลินเจริญ. (2554). *ระเบียบวิธีวิจัยทางสังคมศาสตร์*. พิษณุโลก : มหาวิทยาลัยนเรศวร.



การศึกษาคุณภาพน้ำจากการใช้ประโยชน์ที่ดินในพื้นที่ชุ่มน้ำบึงโขงหลง จังหวัดบึงกาฬ
A Study on Water Quality from Land Uses in Bueng Khong Long Wetland,

Bueng Kan Province

ชนิษฐา ธรรมโรจน์*

Khnittha Thammaroj

สุนันทา เลาวณ์ศิริ**

Sunantha Laowansiri

Received : April 18, 2023

Revised : July 5, 2023

Accepted : October 6, 2023

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินคุณภาพของน้ำจากการใช้ประโยชน์ที่ดินโดยรอบพื้นที่ชุ่มน้ำบึงโขงหลง จังหวัดบึงกาฬ โดยกำหนดจุดเก็บตัวอย่างน้ำผิวดิน 5 พื้นที่ ได้แก่ พื้นที่สงวน พื้นที่ชุมชน พื้นที่เพื่อการอนุรักษ์ น้ำอุปโภคและบริโภค พื้นที่วัดคุณภาพน้ำโดยรวม และพื้นที่กิจกรรมเพื่อเป็นสถานที่พักผ่อน ทำการเก็บตัวอย่างน้ำจำนวน 8 ครั้ง (1 ครั้ง/เดือน) เป็นระยะเวลา 8 เดือน ในช่วงเดือนพฤษภาคมถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2563 จากผลการศึกษาพบว่าจุดเก็บน้ำทั้ง 5 พื้นที่ ระหว่างเดือนพฤษภาคม-เดือนธันวาคม มีค่าความเป็นกรด-ด่าง อยู่ในช่วง 5.85 ± 0.04 ถึง 8.56 ± 0.01 อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดินประเภทที่ 2, 3 และ 4 ของแข็งละลายน้ำทั้งหมดมีค่าอยู่ในช่วง 10.00 ± 0.00 มิลลิกรัม/ลิตร ถึง 35.33 ± 0.32 มิลลิกรัม/ลิตร ออกซิเจนละลายในน้ำมีค่าอยู่ในช่วง 4.18 ± 0.01 มิลลิกรัม/ลิตร ถึง 8.79 ± 0.02 มิลลิกรัม/ลิตร อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดินประเภทที่ 2 และ 3 ปีโอดีมีค่าอยู่ในช่วง 1.55 ± 0.15 มิลลิกรัม/ลิตร ถึง 13.15 ± 0.05 มิลลิกรัม/ลิตร อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดินประเภทที่ 3, 4 และ 5 แอมโมเนียไนโตรเจนมีค่าอยู่ในช่วง 0.007 ± 0.006 มิลลิกรัม/ลิตร ถึง 0.055 ± 0.005 มิลลิกรัม/ลิตร อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดินประเภทที่ 2 ทีเคเอ็นมีค่าอยู่ในช่วง 0.22 ± 0.00 มิลลิกรัม/ลิตร ถึง

*นักศึกษาลัทธิศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืน คณะสิ่งแวดล้อมและ
ทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Students of Master Degree of Science, Program in Sustainable Environmental Management,
Faculty of Environmental and Resource Studies, Mahasarakham University
e-mail: sunantha18@yahoo.com

**อาจารย์สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืน คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
Lecture in Department of Sustainable Environmental Management, Faculty of Environmental and
Resource Studies, Mahasarakham University (Corresponding Author)

0.95±0.11 มิลลิกรัม/ลิตร แบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มทั้งหมดมีค่าอยู่ในช่วงน้อยกว่า 3 MPN/100 ml ถึง 93.0 MPN/100 ml อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดินประเภทที่ 2 แบคทีเรียกลุ่มฟีคัลโคลิฟอร์มมีค่าอยู่ในช่วงน้อยกว่า 3 MPN/100 ml ถึง 21.0 MPN/100 ml อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดินประเภทที่ 2 ดัชนีคุณภาพน้ำของน้ำในที่ชุ่มน้ำบึงโขงหลงทั้ง 5 พื้นที่ พบว่ามีคะแนนอยู่ในช่วง 58.14 ถึง 88.39 อยู่ในเกณฑ์ดัชนีคุณภาพน้ำพอใช้จนถึงดี ดัชนีคุณภาพน้ำในเดือนพฤษภาคมอยู่ในเกณฑ์คุณภาพดี ดัชนีคุณภาพน้ำช่วงเดือนมิถุนายนถึงกันยายนอยู่ในเกณฑ์คุณภาพพอใช้ถึงดี ในขณะที่ดัชนีคุณภาพน้ำช่วงเดือนตุลาคมถึงธันวาคมอยู่ในเกณฑ์คุณภาพพอใช้ โดยรวมการใช้ประโยชน์ที่ดินในพื้นที่สงวน พื้นที่ชุมชน พื้นที่เพื่อการอนุรักษ์น้ำเพื่อการอุปโภคและบริโภค พื้นที่ตรวจวัดคุณภาพน้ำโดยรวม และพื้นที่กิจกรรมเพื่อเป็นสถานที่พักผ่อน พบว่าดัชนีคุณภาพน้ำอยู่ในเกณฑ์คุณภาพพอใช้ถึงดี สามารถสรุปได้ว่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานแหล่งน้ำผิวดินประเภทที่ 2 และ 3

คำสำคัญ : การใช้ประโยชน์ที่ดิน / คุณภาพน้ำ / พื้นที่ชุ่มน้ำบึงโขงหลง / ดัชนีคุณภาพน้ำ

ABSTRACT

This research aimed to study the water quality in Bueng Khong Long Wetlands, Bueng Kan Province affected by land use. Sampling points for surface water selected from different land use areas in five different locations such as reserved area, community area, water conservation area, water quality measurement area and recreational area. Water samples were collected eight times, once per months over a period of eight months from May to December 2020. The results demonstrated that all five water sampling areas between May to December, the pH was in the range of 5.85±0.04 to 8.56±0.01 in surface water standards type 2, 3 and 4. Total dissolved solids (TDS) were in the range of 10.00±0.00 mg/l to 35.33±0.32 mg/l. Dissolved oxygen (DO) was in the range of 4.18±0.01 mg/l to 8.79±0.02 mg/l in surface water standards type 2 and 3. The biochemical oxygen demand (BOD) was in the range of 1.55±0.15 mg/l to 13.15±0.05 mg/l in surface water standards type 3, 4 and 5. The ammonium nitrogen was in the range of 0.007±0.006 mg/l to 0.055±0.005 mg/l in surface water standards type 2. Total kjedahl nitrogen (TNK) was in the range of 0.22±0.00 mg/l to 0.95±0.11 mg/l. Total coliform bacteria (TCB) value in ranged of less than 3 MPN/100 ml to 93.0 MPN/100 ml in surface water standards type 2. The fecal coliform bacteria (FCB) values in the range of less than 3 MPN/100 ml to 21.0 MPN/100 ml in surface water standards type 2. The water quality index (WQI) in Bueng Khong Long Wetlands of the five land use areas found that the score was in the range of 58.14 to 88.39, in the water quality index criteria were fair to good. The water quality index in May was in good quality. The water quality indexes from June to September were in fair to good quality. While the water quality indexes from October

to December were in fair quality. Overall, land use areas in reserved area, community area, water conservation area, water quality measurement area and recreational area were found that the water quality index were in fair to good quality. It can be concluded that in surface water standards type 2 and 3.

Keywords : Land Use / Water Quality / Bueng Khong Long Wetlands /

Water Quality Index

บทนำ

จังหวัดบึงกาฬ เป็นจังหวัดที่ตั้งอยู่ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนบนสุดของประเทศไทย จัดตั้งเป็นจังหวัดลำดับที่ 77 ของประเทศไทย อยู่ห่างจากกรุงเทพมหานคร 751 กิโลเมตร มีพื้นที่ทั้งหมด 4,305 ตารางกิโลเมตร เป็นจังหวัดที่มีสถานที่ท่องเที่ยวหลายแห่ง ได้แก่ น้ำตก ภูเขา พื้นที่ติดกับแม่น้ำโขง และยังมีพื้นที่ชุ่มน้ำโลกถึง 2 แห่ง คือ พื้นที่ชุ่มน้ำกุดทิง และพื้นที่ชุ่มน้ำบึงโขงหลง (สำนักงานทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมจังหวัดบึงกาฬ, 2562)

บึงโขงหลงเป็นบึงน้ำจืดที่มีพื้นที่ครอบคลุมเขตอำเภอกะลาสิริ และอำเภอบึงโขงหลง มีลักษณะเป็นรูปเขาวัวแคบๆ บริเวณบึงมีความยาวประมาณ 13 กิโลเมตร ความลึกเฉลี่ย 0.5-1 เมตร โดยมีจุดที่ลึกที่สุด 6 เมตร และมีพื้นที่กว่า 13,837.5 ไร่ การใช้ประโยชน์ที่ดินในพื้นที่ชุ่มน้ำเขตห้ามล่าสัตว์ป่าบึงโขงหลง ส่วนใหญ่เป็นพื้นที่ปลูกไม้ผล เนื้อที่ 62,162 ไร่ รองลงมา ได้แก่ นาข้าว โดยมีเนื้อที่ 28,876 ไร่ และแม่น้ำ ลำคลอง หนอง บึง เนื้อที่ 17,097 ไร่ ตามลำดับ ที่เหลือเป็นชุมชนและสิ่งก่อสร้าง พืชหญ้า พื้นที่ลุ่ม พืชไร่ ป่าผลัดใบ (สำนักงานทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมจังหวัดบึงกาฬ, 2562) เป็นแหล่งธรรมชาติที่มีความสำคัญมีคุณค่าการใช้ประโยชน์ด้านเป็นแหล่งประกอบอาชีพและการท่องเที่ยว ได้แก่ ด้านการประมง จัดเป็นแหล่งประมงปลาน้ำจืดขนาดใหญ่ที่สุดของจังหวัดบึงกาฬ สามารถสร้างรายได้ให้ชุมชนปีละจำนวนมาก ด้านการปศุสัตว์พบว่า เป็นแหล่งที่อุดมสมบูรณ์ของพืชอาหารและน้ำเหมาะสำหรับการเลี้ยงโคและกระบือด้วยวิธีธรรมชาติ ด้านการเกษตรเป็นพื้นที่แหล่งน้ำขนาดใหญ่เหมาะต่อการเพาะปลูกพืชเศรษฐกิจชนิดต่างๆ ได้แก่ การทำนาข้าวทั้งปีและนาปรัง มะเขือเทศ แตงโม พืชผักสวนครัว พื้นที่โดยรอบบางส่วนมีการทำสวนยางพารามากขึ้น และด้านการท่องเที่ยวมีจุดท่องเที่ยวเป็นที่นิยมมาพักผ่อนและเยี่ยมชมธรรมชาติคือหาดคำสมบูรณ์ การใช้ประโยชน์จากพื้นที่ชุ่มน้ำเขตห้ามล่าสัตว์ป่าบึงโขงหลง คิดเป็นมูลค่าทางเศรษฐกิจโดยรวมเท่ากับ 3.12 ล้านบาท/ปี จำแนกเป็นมูลค่าจากการประมง 1.73 ล้านบาท/ปี การท่องเที่ยว 0.19 ล้านบาท/ปี และการบริการ 1.20 บาท/ปี (สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2561)

ปัจจุบันพื้นที่ชุ่มน้ำบึงโขงหลง มีการใช้ประโยชน์ของที่ดินในรูปแบบต่างๆ เช่น พื้นที่สงวน พื้นที่ชุมชน พื้นที่เกษตรกรรม หรือแม้กระทั่งเป็นพื้นที่ทำกิจกรรม รวมไปถึงเป็นแหล่งท่องเที่ยวให้นักท่องเที่ยวได้มาเยี่ยมชมธรรมชาติที่สวยงาม ปัญหาการเพิ่มขึ้นของนักท่องเที่ยวจนเกินขีดความสามารถในการรองรับของพื้นที่บึงโขงหลง อาจเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดปัญหาในการจัดการทรัพยากรธรรมชาติได้ เช่น ปัญหาความแออัด สิ่งอำนวยความสะดวกในบริเวณนั้นไม่เพียงพอต่อความต้องการ ผลกระทบที่เกิดจากกิจกรรมนันทนาการนำไปสู่ความ

เสื่อมโทรมของทรัพยากร (ชวลิต, 2564) อีกทั้งการใช้ประโยชน์ที่ดินบึงโขงหลงในรูปแบบต่างๆ อาจส่งผลต่อคุณภาพน้ำของพื้นที่ชุ่มน้ำบึงโขงหลงได้ จากงานวิจัยของ อธิญาพรหม, ชริกกา และศันสนีย์ (2564) ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินของกลุ่มน้ำสาขาลำโดมใหญ่ด้วยกรอบแนวคิด DPSIR พบว่าการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินของกลุ่มน้ำสาขาลำโดมใหญ่เป็นปัจจัยเริ่มต้นที่สำคัญของสภาพปัญหาสิ่งแวดล้อมในพื้นที่ ได้แก่ มลพิษทางน้ำ และมลพิษทางดิน ซึ่งอาจก่อให้เกิดผลกระทบต่อทรัพยากรธรรมชาติ สิ่งแวดล้อมและระบบนิเวศในพื้นที่นั้น

สำหรับปัญหาด้านการขยายพื้นที่เกษตรกรรมในเขตพื้นที่บึงโขงหลง มีส่วนทำให้เกิดปัญหาต่างๆ ได้แก่ การขาดแคลนน้ำ คุณภาพน้ำลดลง การใช้น้ำบาดาลเพิ่มสูงขึ้น โดยสาเหตุที่สำคัญเกิดจากจำนวนประชากรที่เพิ่มมากขึ้น การขยายตัวของพื้นที่เมือง การขยายพื้นที่ทำการประมง สิ่งปฏิภนจากฟาร์ม ส่วนปัญหาในเขตพื้นที่ชุมชนมีการปล่อยน้ำเสียจากครัวเรือนลงสู่แหล่งน้ำ จึงเป็นอีกหนึ่งสาเหตุที่ก่อให้เกิดปัญหาในด้านการจัดการทรัพยากรน้ำ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาแนวทางจัดการและมาตรการควบคุมการใช้ที่ดินและการใช้น้ำในพื้นที่บึงโขงหลง รวมไปถึงการรักษาคุณภาพและการพัฒนาแหล่งน้ำ งานวิจัยในครั้งนี้จึงมีความสนใจที่จะศึกษาคุณภาพของน้ำและประมาณคุณภาพของน้ำจากการใช้ประโยชน์ที่ดินโดยรอบในพื้นที่ชุ่มน้ำบึงโขงหลง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินคุณภาพของน้ำจากการใช้ประโยชน์ที่ดินโดยรอบพื้นที่ชุ่มน้ำบึงโขงหลงจังหวัดบึงกาฬ

วิธีดำเนินการวิจัย

จุดเก็บตัวอย่างน้ำ

การเก็บตัวอย่างน้ำของพื้นที่ชุ่มน้ำบึงโขงหลง จังหวัดบึงกาฬ รวมทั้งสิ้น 5 พื้นที่ (ภาพที่ 1) ได้แก่ จุดที่ 1 พื้นที่สงวน ได้แก่ เขตห้ามล่าสัตว์ป่าบึงโขงหลง ตำบลบึงโขงหลง พิกัด 48Q, x=0395569 y=1993078

จุดที่ 2 พื้นที่ชุมชน ได้แก่ ท่าเรือโคกคล้าย หลังวัดดอนหม้อทอง บ้านโคกกระแซ หมู่ที่ 2 ตำบลบ้านต้อง และ โรงเรียนโสกก่ามวิทยา บ้านโสกก่าม หมู่ที่ 1 ตำบลโสกก่าม พิกัด 48Q, x=0392967 y=1995300

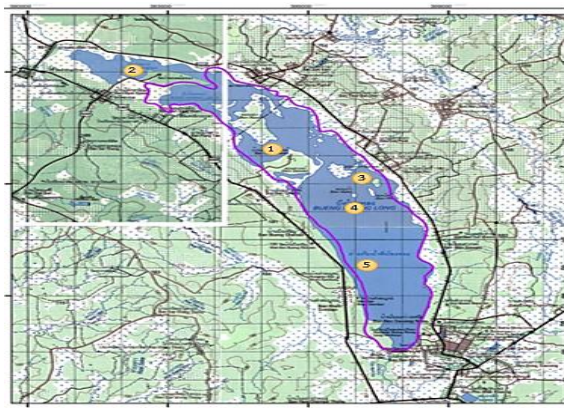
จุดที่ 3 พื้นที่เพื่อการอนุรักษ์น้ำเพื่อการอุปโภคและบริโภค ได้แก่ จุดสูบน้ำประปาบ้านโสภโธ ตำบลบึงโขงหลง และจุดสูบน้ำเทศบาลประปาตำบลบึงโขงหลง หลังสถานีตำรวจภูธรบึงโขงหลง ตำบลบึงโขงหลง พิกัด 48Q, x=0397075 y=1992774

จุดที่ 4 พื้นที่ตรวจวัดคุณภาพน้ำโดยรวม ได้แก่ บริเวณกลางบึงโขงหลง พิกัด 48Q, x=0397358 y=1990585

จุดที่ 5 พื้นที่กิจกรรมเพื่อเป็นสถานที่พักผ่อน ได้แก่ แพอาหารบ้านคำสมบูรณ์ อาคารชมวิวดำคำสมบูรณ์ หมู่ที่ 3 ตำบลบึงโขงหลง และแพอาหารคำสมบูรณ์ (ร้านดวงตาปลาเผา) หมู่ที่ 3 ตำบลบึงโขงหลง และกิจกรรมทางน้ำ พิกัด 48Q, x=0396793 y=1988994

การเก็บน้ำตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์จำนวน 8 ครั้ง (1 ครั้ง/เดือน) ช่วงเดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2563 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2563 โดยครั้งที่ 1 เดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2563 ตัวแทนฤดูร้อน ครั้งที่ 2, 3, 4 และ 5 ตั้งแต่

เดือนมิถุนายนถึงเดือนกันยายน 2563 เป็นตัวแทนฤดูฝน ครั้งที่ 6, 7 และ 8 ตั้งแต่เดือนตุลาคมถึงเดือนธันวาคม 2563 เป็นตัวแทนฤดูหนาว



ภาพที่ 1 จุดเก็บตัวอย่างน้ำทั้ง 5 พื้นที่ในบึงโขงหลงของพื้นที่ชุ่มน้ำบึงโขงหลง
ที่มา : สำนักงานทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมจังหวัดบึงกาฬ (2562)

การเก็บตัวอย่างน้ำ

เก็บตัวอย่างน้ำ ณ จุดเก็บตัวอย่างที่กำหนดไว้ ใช้วิธีเก็บแบบจ้วงตัก (Grab Sample) โดยเก็บตัวอย่างน้ำเพื่อวิเคราะห์แบคทีเรียโคลิฟอร์มทั้งหมด (Total Coliform Bacteria: TCB) และฟีคัลโคลิฟอร์ม (Fecal Coliform Bacteria: FCB) เก็บตัวอย่างน้ำที่ระดับความลึก 30 เซนติเมตร จากผิวน้ำ (กรมควบคุมมลพิษ, 2553) เก็บตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (Total Dissolved Solids: TDS) ออกซิเจนละลายในน้ำ (Dissolved oxygen: DO) บีโอดี (Biochemical Oxygen Demand: BOD) แอมโมเนียไนโตรเจน (Ammonia Nitrogen: $\text{NH}_3\text{-N}$) และทีเคเอ็น (Total Kjeldahl Nitrogen: TKN) เก็บตัวอย่างน้ำถ้า น้ำลึกเกิน 2 เมตร ให้เก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 เมตร จากผิวน้ำ ถ้า น้ำลึกน้อยกว่า 2 เมตร ให้เก็บตัวอย่างน้ำที่บริเวณจุดกึ่งกลางของความลึกของน้ำ

การดำเนินงานวิจัย

1. กำหนดจุดเก็บตัวอย่างลงในแผนที่สภาพภูมิประเทศ มาตราส่วน 1:200 และฐานข้อมูลระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ โดยนำข้อมูลจากสำนักงานทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมจังหวัดบึงกาฬ (2562)
2. เก็บตัวอย่างน้ำผิวน้ำ 5 พื้นที่ จำนวน 1 ครั้ง/เดือน เป็นระยะเวลา 8 เดือน เริ่มเก็บช่วงฤดูร้อนในเดือนพฤษภาคม ช่วงฤดูฝนตั้งแต่เดือนมิถุนายนไปจนถึงเดือนกันยายน และในช่วงฤดูหนาวเก็บตั้งแต่เดือนตุลาคมถึงเดือนธันวาคม แล้วนำตัวอย่างไปวิเคราะห์คุณภาพน้ำ ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง ของแข็งละลายน้ำทั้งหมด ออกซิเจนละลายในน้ำ บีโอดี แอมโมเนียไนโตรเจน ทีเคเอ็น แบคทีเรียโคลิฟอร์มทั้งหมด และฟีคัลโคลิฟอร์ม
3. เก็บตัวอย่างน้ำแบบจ้วงตักโดยใช้เครื่อง Kemmerer Sampler การเก็บตัวอย่าง ณ จุดเดียวกัน แต่ต่างเวลากัน

4. เมื่อเก็บตัวอย่างน้ำเสร็จแล้ว ระบุรายละเอียดต่างๆ ของน้ำตัวอย่าง ติดฉลากระบุชื่อจุดเก็บ หรือ พิกัดตำแหน่ง วันที่ เวลาของการเก็บตัวอย่าง แหล่งน้ำของตัวอย่าง วิธีการเก็บรักษา พารามิเตอร์ที่ต้องการ วิเคราะห์และสถานที่เก็บ จากนั้นนำไปแช่ในถังน้ำแข็งเพื่อรักษาอุณหภูมิน้ำตัวอย่างไม่เกิน 4 องศาเซลเซียส เพื่อนำตัวอย่างส่งวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการต่อไป

5. การวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำ ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง ของแข็งละลายน้ำทั้งหมด ออกซิเจนละลายในน้ำ บีโอดี แอมโมเนียไนโตรเจน และทีเคเอ็น แบคทีเรียโคลิฟอร์มทั้งหมด และฟีคัลโคลิฟอร์ม ทำการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ การวิเคราะห์คุณภาพน้ำผิวดิน ตามวิธีการของ AWWA, APHA, WPCF (2017); มั่นสิน และมันรัช (2551)

ดัชนีคุณภาพน้ำ (Water Quality Index: WQI)

คะแนนที่ให้ดัชนีชี้วัดคุณภาพน้ำ ตามมาตรฐานกรมควบคุมมลพิษ (กรมควบคุมมลพิษ, 2565) ใช้ดัชนีคุณภาพน้ำ 5 พารามิเตอร์ ประกอบด้วย ออกซิเจนละลายในน้ำ ความสกปรกในรูปของสารอินทรีย์หรือ บีโอดี การปนเปื้อนของแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มทั้งหมด การปนเปื้อนของแบคทีเรียกลุ่มฟีคัลโคลิฟอร์ม และ แอมโมเนียไนโตรเจน และยั้มนำคะแนนดัชนีชี้วัดคุณภาพน้ำมาเทียบกับมาตรฐานน้ำในแหล่งน้ำผิวดินได้ดังนี้ คะแนน 71-90 อยู่ในเกณฑ์คุณภาพน้ำดี เทียบเท่ากับมาตรฐานน้ำในแหล่งน้ำผิวดินประเภทที่ 2 คะแนน 61-70 อยู่ในเกณฑ์คุณภาพน้ำพอใช้ เทียบเท่ากับมาตรฐานน้ำในแหล่งน้ำผิวดินประเภทที่ 3 คะแนน 31-60 อยู่ในเกณฑ์คุณภาพน้ำเสื่อมโทรม เทียบเท่ากับมาตรฐานน้ำในแหล่งน้ำผิวดินประเภทที่ 4 และคะแนน 0-30 อยู่ในเกณฑ์คุณภาพน้ำเสื่อมโทรมมาก เทียบเท่ากับมาตรฐานน้ำในแหล่งน้ำผิวดินประเภทที่ 5

สูตรการคำนวณ WQI (คะแนนรวม) = ค่าเฉลี่ยของคะแนนทั้ง 5 พารามิเตอร์-ค่าการปรับความถูกต้องของคะแนน (กรมควบคุมมลพิษ, 2565)

การวิเคราะห์ข้อมูล

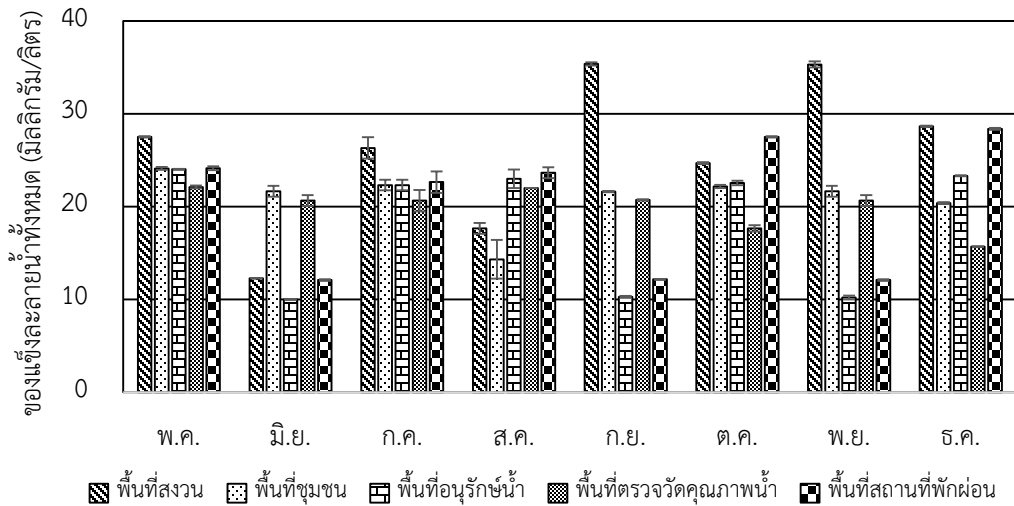
ผู้ศึกษาวิเคราะห์ข้อมูลด้วยสถิติพื้นฐานค่าเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดยใช้ข้อมูลของชุดทดลองในแต่ละชุดทดลองที่วิเคราะห์ตัวอย่างน้ำ 3 ซ้ำ

ผลการวิจัย

คุณภาพน้ำทางกายภาพ

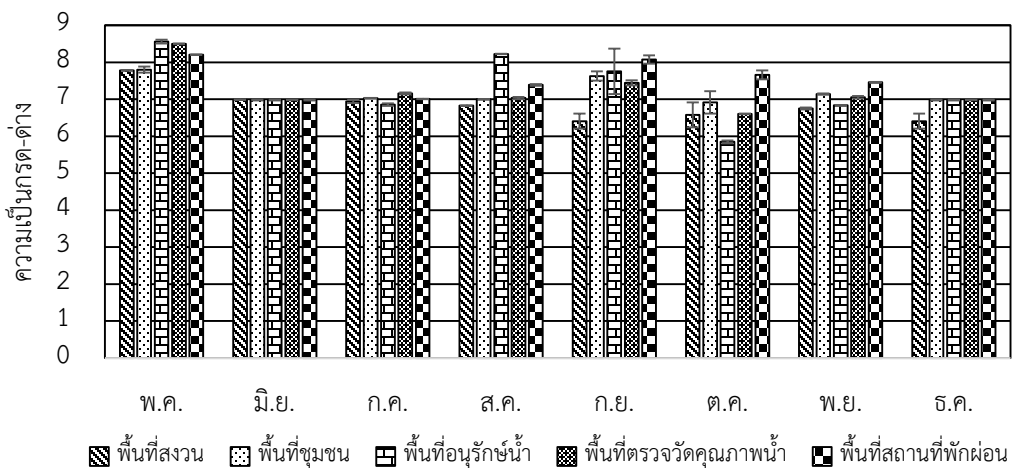
ของแข็งละลายน้ำทั้งหมด

จากภาพที่ 2 แสดงของแข็งละลายน้ำทั้งหมดของคุณภาพน้ำจากการใช้ประโยชน์ที่ดินในพื้นที่ชุ่มน้ำ บึงโงงหลง ค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมดของจุดเก็บตัวอย่างน้ำทั้ง 5 พื้นที่ เดือนพฤษภาคม-ธันวาคม มีค่าอยู่ในช่วง 10.00 ± 0.00 มิลลิกรัม/ลิตร ถึง 35.33 ± 0.32 มิลลิกรัม/ลิตร โดยพบว่าจุดเก็บตัวอย่างน้ำในพื้นที่สวน เขตห้ามล่าสัตว์ป่าบึงโงงหลงมีแนวโน้มค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมดสูง ในขณะที่เดือนมิถุนายนค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมดของจุดเก็บตัวอย่างน้ำทั้ง 5 พื้นที่ มีค่าต่ำอยู่ในช่วง 10.00 ± 0.00 มิลลิกรัม/ลิตร ถึง 21.67 ± 0.58 มิลลิกรัม/ลิตร



ภาพที่ 2 ของแข็งละลายน้ำทั้งหมดของคุณภาพน้ำจากการใช้ประโยชน์ที่ดินในพื้นที่ชุ่มน้ำบึงโขงหลง
คุณภาพน้ำทางเคมี
ความเป็นกรด-ด่าง

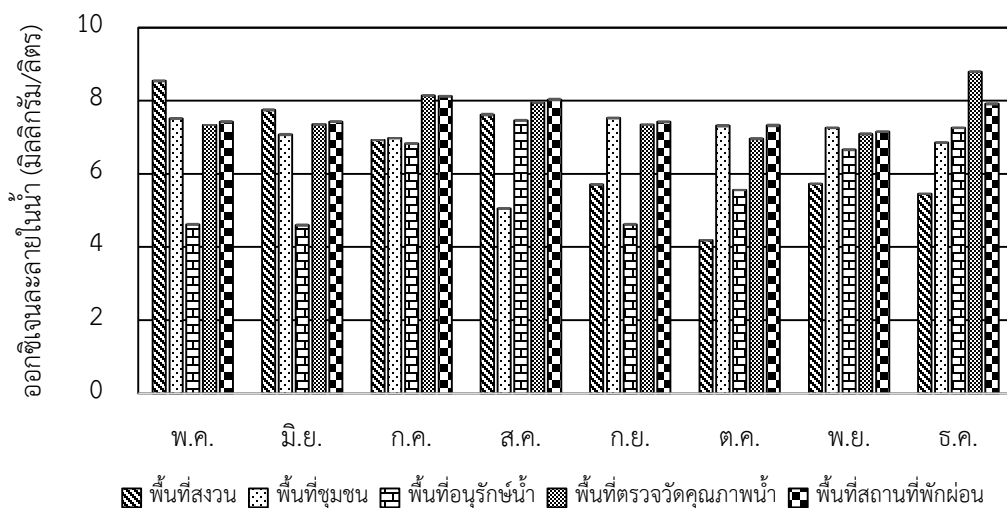
จากภาพที่ 3 แสดงค่าความเป็นกรด-ด่าง ของคุณภาพน้ำจากการใช้ประโยชน์ที่ดินในพื้นที่ชุ่มน้ำบึงโขงหลง พบว่าค่าความเป็นกรด-ด่าง ของจุดเก็บน้ำทั้ง 5 พื้นที่ ในเดือนพฤษภาคม-ธันวาคม มีค่าอยู่ในช่วง 5.85 ± 0.04 ถึง 8.56 ± 0.01 อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดินประเภทที่ 2, 3 และ 4 กำหนดให้ค่าความเป็นกรด-ด่าง อยู่ในช่วง 5-9 พบว่าเดือนพฤษภาคมเป็นช่วงฤดูร้อนมีค่าความเป็นกรด-ด่าง สูงกว่าฤดูอื่นๆ มีค่าอยู่ในช่วง 7.78 ± 0.01 ถึง 8.56 ± 0.01



ภาพที่ 3 ความเป็นกรด-ด่าง ของคุณภาพน้ำจากการใช้ประโยชน์ที่ดินในพื้นที่ชุ่มน้ำบึงโขงหลง

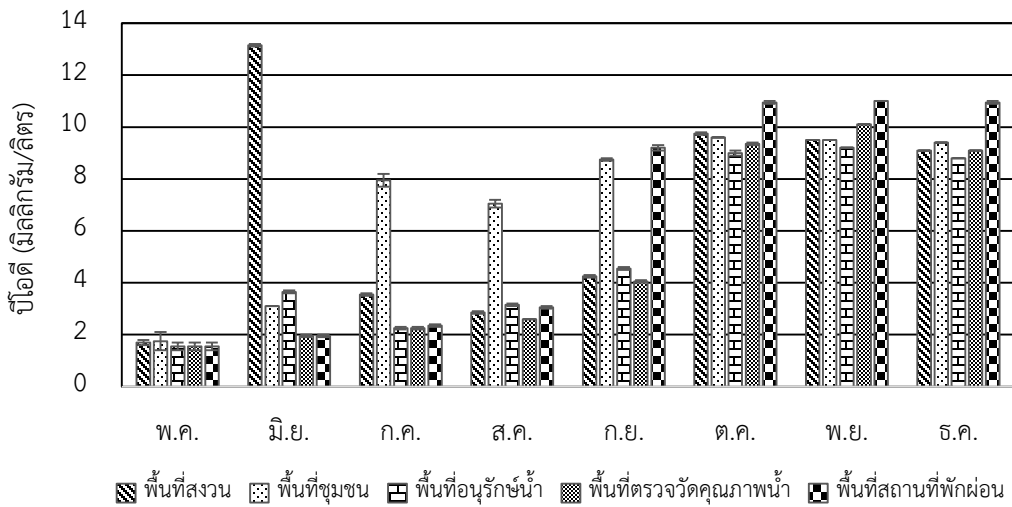
ออกซิเจนละลายในน้ำ

จากภาพที่ 4 แสดงออกซิเจนละลายในน้ำของคุณภาพน้ำจากการใช้ประโยชน์ที่ดินในพื้นที่ชุ่มน้ำบึงโขงหลง พบว่าค่าออกซิเจนละลายในน้ำของจุดเก็บตัวอย่างน้ำทั้ง 5 พื้นที่ ในเดือนพฤษภาคม-ธันวาคม อยู่ในช่วง 4.18 ± 0.01 มิลลิกรัม/ลิตร ถึง 8.79 ± 0.02 มิลลิกรัม/ลิตร อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดินประเภทที่ 2 และ 3 พื้นที่สงวนเดือนกันยายน-พฤศจิกายน พื้นที่ชุมชนเดือนสิงหาคม พื้นที่เพื่อการอนุรักษ์น้ำเพื่อการอุปโภคและบริโภคเดือนพฤษภาคม มิถุนายน กันยายน และตุลาคม มีค่าออกซิเจนละลายน้ำมากกว่า 4.00 มิลลิกรัม/ลิตร แต่ไม่ถึง 6.00 มิลลิกรัม/ลิตร พบว่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดินประเภทที่ 3 ในขณะที่การใช้ประโยชน์ที่ดิน 5 พื้นที่ของเดือนอื่นๆ พบว่าออกซิเจนละลายน้ำมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 6.00 มิลลิกรัม/ลิตร อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดินประเภทที่ 2



ภาพที่ 4 ออกซิเจนละลายในน้ำของคุณภาพน้ำจากการใช้ประโยชน์ที่ดินในพื้นที่ชุ่มน้ำบึงโขงหลง ปีอดีต

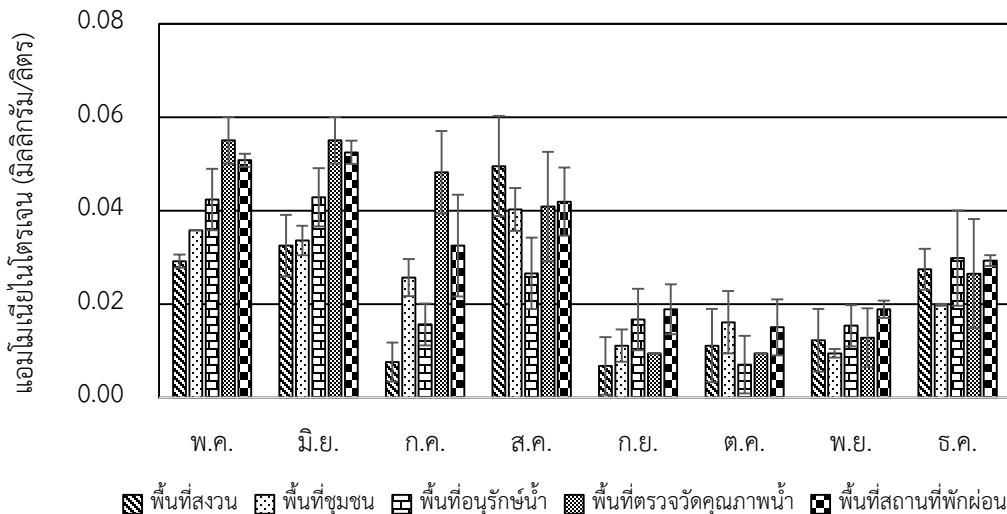
จากภาพที่ 5 แสดงบีโอดีของคุณภาพน้ำจากการใช้ประโยชน์ที่ดินในพื้นที่ชุ่มน้ำบึงโขงหลง พบว่าค่าบีโอดีของจุดเก็บตัวอย่างน้ำทั้ง 5 พื้นที่ ในเดือนพฤษภาคม-ธันวาคม มีค่าอยู่ในช่วง 1.55 ± 0.15 มิลลิกรัม/ลิตร ถึง 13.15 ± 0.05 มิลลิกรัม/ลิตร จุดเก็บตัวอย่างน้ำพื้นที่สงวนอยู่ในพื้นที่เขตห้ามล่าสัตว์ป่าบึงโขงหลง เดือนมิถุนายน ซึ่งเป็นช่วงปลายฤดูร้อนเข้าสู่ฤดูฝนมีค่าบีโอดีสูงสุด เท่ากับ 13.15 ± 0.05 มิลลิกรัม/ลิตร เดือนตุลาคม-ธันวาคม ช่วงฤดูหนาวจึงทำให้ค่าบีโอดีสูงมากกว่า 4.0 มิลลิกรัม/ลิตร มีค่าอยู่ในช่วง 8.80 ± 0.00 มิลลิกรัม/ลิตร ถึง 10.95 ± 0.05 มิลลิกรัม/ลิตร ในขณะที่เดือนมิถุนายน-กันยายน เป็นช่วงฤดูฝนพบว่าค่าบีโอดีมีแนวโน้มต่ำ เนื่องจากเกิดการเจือจางจากปริมาณน้ำฝน (สุชัญญา, สิทธิชัย และบุหรัน, 2566)



ภาพที่ 5 ปีไอดีของคุณภาพน้ำจากการใช้ประโยชน์ที่ดินในพื้นที่ชุ่มน้ำบึงโขงหลง

แอมโมเนียไนโตรเจน

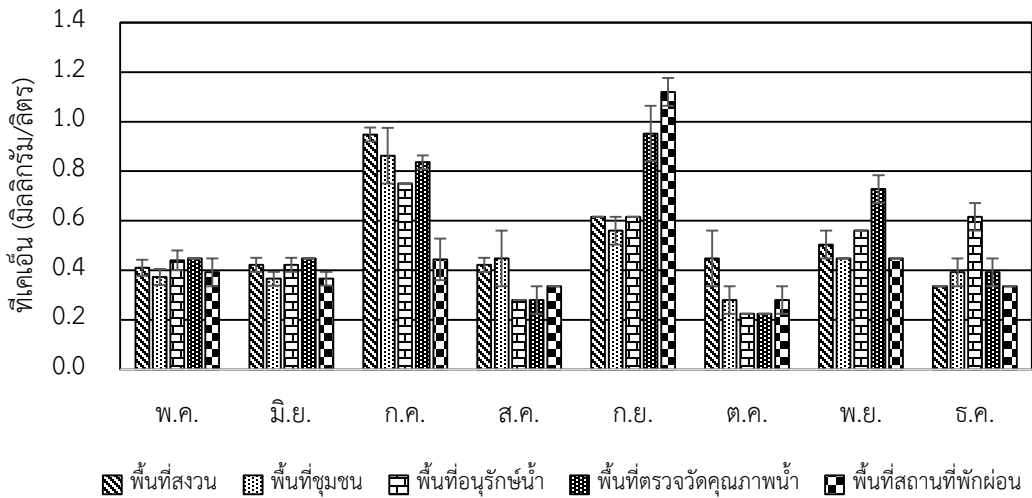
จากภาพที่ 6 แสดงค่าแอมโมเนียไนโตรเจนของคุณภาพน้ำจากการใช้ประโยชน์ที่ดินในพื้นที่ชุ่มน้ำบึงโขงหลง พบว่าจุดเก็บตัวอย่างน้ำทั้ง 5 พื้นที่ ในเดือนพฤษภาคม-ธันวาคมพบแอมโมเนียไนโตรเจนอยู่ในช่วง 0.007 ± 0.006 มิลลิกรัม/ลิตร ถึง 0.055 ± 0.005 มิลลิกรัม/ลิตร ค่าแอมโมเนียไนโตรเจนอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดินประเภทที่ 2 โดยเดือนพฤษภาคมและมิถุนายนมีค่าแอมโมเนียไนโตรเจนค่อนข้างสูงมีค่าอยู่ในช่วง 0.029 ± 0.001 มิลลิกรัม/ลิตร ถึง 0.055 ± 0.005 มิลลิกรัม/ลิตร ในขณะที่เดือนกันยายนเป็นช่วงปลายฝนต้นหนาว และเดือนตุลาคม-ธันวาคม เป็นช่วงฤดูหนาว พบว่ามีค่าแอมโมเนียไนโตรเจนต่ำอยู่ในช่วง 0.007 ± 0.006 มิลลิกรัม/ลิตร ถึง 0.03 ± 0.001 มิลลิกรัม/ลิตร



ภาพที่ 6 แอมโมเนียไนโตรเจนของคุณภาพน้ำจากการใช้ประโยชน์ที่ดินในพื้นที่ชุ่มน้ำบึงโขงหลง

ทีเคเอ็น

จากภาพที่ 7 แสดงค่าทีเคเอ็นของคุณภาพน้ำจากการใช้ประโยชน์ที่ดินในพื้นที่ชุ่มน้ำบึงโขงหลง พบว่า ค่าทีเคเอ็นของจุดเก็บน้ำทั้ง 5 พื้นที่ ในเดือนพฤษภาคม-ธันวาคม มีค่าอยู่ในช่วง 0.22 ± 0.00 มิลลิกรัม/ลิตร ถึง 0.95 ± 0.11 มิลลิกรัม/ลิตร เดือนกรกฎาคมและกันยายนของจุดเก็บน้ำจากการใช้ประโยชน์ที่ดินทั้ง 5 พื้นที่ที่มีค่าทีเคเอ็นสูงอยู่ในช่วง 0.44 ± 0.08 มิลลิกรัม/ลิตร ถึง 1.12 ± 0.06 มิลลิกรัม/ลิตร ในขณะที่เดือนตุลาคมของจุดเก็บน้ำจากการใช้ประโยชน์ที่ดินทั้ง 5 พื้นที่ แนวโน้มมีค่าทีเคเอ็นต่ำสุดอยู่ในช่วง 0.22 ± 0.00 มิลลิกรัม/ลิตร ถึง 0.45 ± 0.11 มิลลิกรัม/ลิตร



ภาพที่ 7 ทีเคเอ็นของคุณภาพน้ำจากการใช้ประโยชน์ที่ดินในพื้นที่ชุ่มน้ำบึงโขงหลง

คุณภาพน้ำทางชีวภาพ

แบคทีเรียโคลิฟอร์มทั้งหมด

จากตารางที่ 1 แสดงค่าแบคทีเรียโคลิฟอร์มทั้งหมดของคุณภาพน้ำจากการใช้ประโยชน์ที่ดินในพื้นที่ชุ่มน้ำบึงโขงหลง พบว่าจุดเก็บน้ำทั้ง 5 พื้นที่ ในเดือนพฤษภาคม-ธันวาคม พบแบคทีเรียโคลิฟอร์มทั้งหมดมีค่าอยู่ในช่วงน้อยกว่า 3 MPN/100 ml ถึง 93.0 MPN/100 ml แบคทีเรียโคลิฟอร์มทั้งหมดอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดินประเภทที่ 2

แบคทีเรียฟีคัลโคลิฟอร์ม

จากตารางที่ 1 แสดงค่าแบคทีเรียฟีคัลโคลิฟอร์มของคุณภาพน้ำจากการใช้ประโยชน์ที่ดินในพื้นที่ชุ่มน้ำบึงโขงหลง พบว่าจุดเก็บน้ำทั้ง 5 พื้นที่ในเดือนพฤษภาคม-ธันวาคมพบแบคทีเรียฟีคัลโคลิฟอร์มมีค่าอยู่ในช่วงน้อยกว่า 3 MPN/100 ml ถึง 21.0 MPN/100 ml แบคทีเรียฟีคัลโคลิฟอร์มอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดินประเภทที่ 2

ตารางที่ 1 แบคทีเรียโคลิฟอร์มทั้งหมดและแบคทีเรียฟีคัลโคลิฟอร์ม ของคุณภาพน้ำจากการใช้ประโยชน์ที่ดินในพื้นที่ชุ่มน้ำบึงโขงหลง

จุดเก็บตัวอย่าง	แบคทีเรีย (MPN/100 ml)							
	พฤษภาคม		มิถุนายน		กรกฎาคม		สิงหาคม	
	Fecal Coliform	Total Coliform	Fecal Coliform	Total Coliform	Fecal Coliform	Total Coliform	Fecal Coliform	Total Coliform
พื้นที่สงวน	9.2	9.2	<3	<3	<3	<3	<3	<3
พื้นที่ชุมชน	3.6	3.6	<3	<3	<3	<3	<3	<3
พื้นที่อนุรักษ์น้ำ	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3
พื้นที่ตรวจวัดคุณภาพน้ำ	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3
พื้นที่สถานที่พักผ่อน	9.2	9.2	<3	<3	<3	<3	<3	<3
พื้นที่สงวน	3.6	9.2	<3	<3	<3	<3	<3	<3
พื้นที่ชุมชน	9.2	9.2	<3	<3	<3	<3	<3	<3
พื้นที่อนุรักษ์น้ำ	3.6	3.6	<3	<3	<3	<3	<3	<3
พื้นที่ตรวจวัดคุณภาพน้ำ	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3
พื้นที่สถานที่พักผ่อน	21.0	93.0	7.4	7.4	<3	<3	<3	<3

ดัชนีคุณภาพน้ำ

ตารางที่ 2 แสดงดัชนีคุณภาพน้ำในบึงโขงหลงของพื้นที่การใช้ประโยชน์ที่ดินทั้ง 5 พื้นที่ ได้มีการนำมาคำนวณคะแนนตามดัชนีคุณภาพน้ำพบว่ามีคะแนนอยู่ในช่วง 58.14 ถึง 88.39 อยู่ในเกณฑ์ดัชนีคุณภาพน้ำพอใช้จนถึงดี เดือนพฤษภาคมเป็นช่วงฤดูร้อนพบว่าดัชนีคุณภาพน้ำอยู่ในเกณฑ์คุณภาพน้ำดี บ่งบอกถึงการใช้ประโยชน์ที่ดินในช่วงระยะเวลานั้นมีปริมาณที่น้อยและมีการปนเปื้อนน้อย เดือนมิถุนายน-กันยายน เป็นช่วงฤดูฝนพบว่าดัชนีคุณภาพน้ำมีค่าอยู่ในเกณฑ์คุณภาพน้ำพอใช้และดี ในขณะที่เดือนตุลาคม-ธันวาคมเป็นช่วงฤดูหนาวพบว่าดัชนีคุณภาพน้ำอยู่ในเกณฑ์คุณภาพน้ำพอใช้

ตารางที่ 2 ดัชนีคุณภาพน้ำ

ดัชนีคุณภาพน้ำ								
ตัวอย่าง	พฤษภาคม		มิถุนายน		กรกฎาคม		สิงหาคม	
พื้นที่สวน	88.39	ดี	62.54	พอใช้	68.76	พอใช้	71.44	ดี
พื้นที่ชุมชน	88.09	ดี	69.79	พอใช้	61.96	พอใช้	59.43	พอใช้
พื้นที่อนุรักษ์น้ำ	83.69	ดี	63.89	พอใช้	72.21	ดี	70.76	ดี
พื้นที่ตรวจวัดคุณภาพน้ำ	87.96	ดี	86.38	ดี	74.52	ดี	73.22	ดี
พื้นที่สถานที่พักผ่อน	88.28	ดี	86.62	ดี	74.59	ดี	72.23	ดี
พื้นที่สวน	72.58	ดี	57.06	พอใช้	58.59	พอใช้	57.91	พอใช้
พื้นที่ชุมชน	62.59	พอใช้	61.13	พอใช้	61.98	พอใช้	60.73	พอใช้
พื้นที่อนุรักษ์น้ำ	70.11	ดี	58.55	พอใช้	60.37	พอใช้	61.44	พอใช้
พื้นที่ตรวจวัดคุณภาพน้ำ	71.67	ดี	61.26	พอใช้	61.48	พอใช้	58.14	พอใช้
พื้นที่สถานที่พักผ่อน	62.09	พอใช้	61.96	พอใช้	61.46	พอใช้	63.02	พอใช้

อภิปรายผล

คุณภาพน้ำทางกายภาพ

ของแข็งละลายน้ำทั้งหมดของจุดเก็บตัวอย่างน้ำของการใช้ประโยชน์ที่ดินทั้ง 5 พื้นที่ ในเดือน พฤษภาคม-ธันวาคม มีค่าอยู่ในช่วง 10.00 ± 0.00 มิลลิกรัม/ลิตร ถึง 35.33 ± 0.32 มิลลิกรัม/ลิตร (ภาพที่ 2) โดยพบว่าจุดเก็บตัวอย่างน้ำพื้นที่สวนเขตห้ามล่าสัตว์ป่าบึงโขงหลง มีแนวโน้มค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมดสูง เนื่องจากการย่อยสลายของใบไม้ ตะกอน แผลงก่ตอน ซากพืช และซากสัตว์ที่ตายในช่วงฤดูร้อนได้อย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมดสูงตามไปด้วย ค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมดจะสัมพันธ์กับค่าความเค็ม หากของแข็งละลายน้ำทั้งหมดมีค่าสูงค่าความเค็มก็จะสูงด้วยเช่นกัน ของแข็งละลายน้ำทั้งหมดหากมีปริมาณมากจะส่งผลต่อการเป็นอยู่และการขยายพันธุ์ของสัตว์น้ำลดลง และมีผลต่อการใช้น้ำในการเกษตรหากมีค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมดมากเกินไปส่งผลพืชเจริญเติบโตช้าหรือตายได้ และก่อให้เกิดปัญหาดินเค็ม เป็นต้น ค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมดเดือนพฤษภาคมของจุดเก็บตัวอย่างน้ำของการใช้ประโยชน์ที่ดินทั้ง 5 พื้นที่ มีค่าต่ำ อยู่ในช่วง 10.00 ± 0.00 มิลลิกรัม/ลิตร ถึง 21.67 ± 0.58 มิลลิกรัม/ลิตร เนื่องจากเกิดการเจือจางน้ำตัวอย่างในฤดูฝน (สุชัยญา, สิทธิชัย และบุหริน, 2566) จากงานวิจัยของสุชัยญา, สิทธิชัย และบุหริน (2566) ได้ศึกษาการจัดการคุณภาพน้ำสำหรับการเกษตรข้าวหอมมะลิในพื้นที่ลุ่มน้ำโขงเหนือ โดยเก็บตัวอย่างน้ำในฤดูแล้งในเดือน มีนาคม 2563 และฤดูฝนในเดือนกรกฎาคม 2563 พื้นที่ศึกษาอ่างเก็บน้ำ ตำบลสนโศก อำเภอดอกคำใต้ จังหวัดพะเยา ทั้งหมด 3 แห่ง ได้แก่ น้ำห้วยตาดแะ ห้วยชมพู และห้วยผาหนีบ พบว่าค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมดอยู่ในช่วง 109.7 ± 1.3 มิลลิกรัม/ลิตร ถึง 355.1 ± 1.5 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งมีค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมดสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยนี้ โดยพบว่าแหล่งน้ำในพื้นที่ชุ่มน้ำบึงโขงหลงเป็นแหล่งน้ำจืดมีความเค็มน้อยจึงส่งผลให้

มีค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมดต่ำ

คุณภาพน้ำทางเคมี

ความเป็นกรด-ด่าง ของคุณภาพน้ำจากการใช้ประโยชน์ที่ดินในพื้นที่ชุ่มน้ำบึงโขงหลง พบว่าค่าความเป็นกรด-ด่าง ของจุดเก็บน้ำของการใช้ประโยชน์ที่ดินทั้ง 5 พื้นที่ ในเดือนพฤษภาคม-ธันวาคม มีค่าอยู่ในช่วง 5.85 ± 0.04 ถึง 8.56 ± 0.01 (ภาพที่ 3) จุดเก็บตัวอย่างน้ำพื้นที่สงวนเขตห้ามล่าสัตว์ป่าบึงโขงหลงมีแนวโน้มค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำ เนื่องจากพื้นที่ดังกล่าวมีพืชน้ำและสิ่งมีชีวิตอาศัยอยู่เป็นจำนวนมากและอาจเกิดการย่อยสลายซากพืชและซากสัตว์ในสภาวะไร้ออกซิเจนบริเวณก้นบ่อในช่วงฤดูร้อน ซึ่งส่งผลให้เกิดการย่อยสลายได้เร็ว ส่งผลให้ผลิตรวดออกมาจึงทำให้บริเวณดังกล่าวมีค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำ ซึ่งพบว่าจุดเก็บน้ำของการใช้ประโยชน์ที่ดินทั้ง 5 พื้นที่ ในเดือนพฤษภาคม-ธันวาคม อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน ประเภทที่ 2, 3 และ 4 (คณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ, 2537) ซึ่งแตกต่างกับงานวิจัยของสุรางคนา และคนอื่นๆ (2566) ศึกษาการติดตามตรวจสอบคุณภาพน้ำ กรณีศึกษาคลองสามกองและคลองสำโรง จังหวัดสงขลา โดยเก็บตัวอย่างน้ำคลองสามกองและคลองสำโรง คลองละ 2 สถานี เก็บตัวอย่าง 1 ครั้ง/เดือน เป็นระยะเวลา 6 เดือน ตั้งแต่เดือนกันยายน 2565 ถึงเดือนกุมภาพันธ์ 2566 พบว่าคลองสามกองค่าความเป็นกรด-ด่าง อยู่ในช่วง 6.09 ถึง 6.65 ในขณะที่คลองสำโรงค่าความเป็นกรด-ด่าง อยู่ในช่วง 6.41 ถึง 7.02 เนื่องจากบริเวณพื้นที่ชุ่มน้ำบึงโขงหลงมีการใช้ประโยชน์ที่ดินหลากหลายจึงทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่าง มีค่าแตกต่างกัน โดยปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง ที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับสภาพอากาศ กระบวนการทางธรรมชาติ รวมถึงกิจกรรมต่างๆ ของมนุษย์ ในขณะที่งานวิจัยของสุรางคนา และคนอื่นๆ (2566) ศึกษาคุณภาพน้ำคลองที่เกิดจากการใช้ประโยชน์ของชุมชนเท่านั้น

ออกซิเจนละลายในน้ำของจุดเก็บตัวอย่างน้ำของการใช้ประโยชน์ที่ดินทั้ง 5 พื้นที่ เดือนพฤษภาคม-ธันวาคมอยู่ในช่วง 4.18 ± 0.01 มิลลิกรัม/ลิตร ถึง 8.79 ± 0.02 มิลลิกรัม/ลิตร (ภาพที่ 4) ซึ่งเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดินประเภทที่ 2, 3 และ 4 กำหนดค่าออกซิเจนละลายน้ำมากกว่าหรือเท่ากับ 6.0 มิลลิกรัม/ลิตร, 4.0 มิลลิกรัม/ลิตร และ 2.0 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ (คณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ, 2537) จากงานวิจัยนี้พบว่าออกซิเจนละลายในน้ำอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดินประเภทที่ 2 และ 3 โดยพบว่าพื้นที่สงวนในเดือนกันยายน-ธันวาคมช่วงปลายฝนต้นหนาวและฤดูหนาว พื้นที่ชุมชนเดือนสิงหาคมช่วงฤดูฝน พื้นที่เพื่อการอนุรักษ์น้ำเพื่อการอุปโภคและบริโภคเดือนพฤษภาคม มิถุนายน กันยายน และตุลาคม มีค่าออกซิเจนละลายน้ำอยู่ในช่วงมากกว่า 4.00 มิลลิกรัม/ลิตร แต่ไม่ถึง 6.00 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดินประเภทที่ 3 ในขณะที่พื้นที่และเดือนอื่นๆ พบว่าออกซิเจนละลายน้ำมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 6.00 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดินประเภทที่ 2 พื้นที่เพื่อการอนุรักษ์น้ำเพื่อการอุปโภคและบริโภคในเดือนพฤษภาคม มิถุนายน กันยายน และตุลาคม พบว่ามีค่าออกซิเจนละลายน้ำต่ำ เนื่องจากปัจจัยออกซิเจนละลายในน้ำมาน้อยแตกต่างกันขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ความดันบรรยากาศ และของแข็งละลายน้ำ ซึ่งแตกต่างจากงานวิจัยของสุรางคนา และคนอื่นๆ (2566) ศึกษาการติดตามตรวจสอบคุณภาพน้ำ กรณีศึกษาคลองสามกองและคลองสำโรง จังหวัดสงขลา โดยเก็บตัวอย่างน้ำคลองสามกอง

และคลองสำโรง คลองละ 2 สถานี เก็บตัวอย่าง 1 ครั้ง/เดือน เป็นระยะเวลา 6 เดือน ตั้งแต่เดือนกันยายน 2565 ถึงเดือนกุมภาพันธ์ 2566 พบว่าคลองสามก่องค่าออกซิเจนละลายในน้ำอยู่ในช่วง 1.0 มิลลิกรัม/ลิตร ถึง 4.7 มิลลิกรัม/ลิตร ในขณะที่คลองสำโรงค่าออกซิเจนละลายในน้ำอยู่ในช่วง 0.8 มิลลิกรัม/ลิตร ถึง 5.4 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งมีค่าออกซิเจนละลายในน้ำต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยนี้ เนื่องจากแหล่งน้ำในพื้นที่ชุ่มน้ำบึงโขงหลงเป็นแหล่งน้ำตามธรรมชาติ การผลิตออกซิเจนละลายในน้ำเกิดจากการละลายของออกซิเจนในอากาศและการสังเคราะห์แสงของสาหร่าย ซึ่งพบว่าการใช้ประโยชน์ที่ดินทั้ง 5 พื้นที่ ยังไม่เกินขีดความสามารถในการรองรับได้จึงส่งผลให้มีค่าออกซิเจนละลายในน้ำสูง ค่าออกซิเจนละลายในน้ำสูงแสดงถึงแหล่งน้ำมีคุณภาพดี ปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าออกซิเจนละลายในน้ำที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับ การดูดซึมโดยตรงจากชั้นบรรยากาศ ความดันบรรยากาศ การไหล การสังเคราะห์แสงของพืช อุณหภูมิ ความลึก และความเค็มของน้ำ เป็นต้น

ปีโอติของจุดเก็บตัวอย่างน้ำของการใช้ประโยชน์ที่ดินทั้ง 5 พื้นที่ เดือนพฤษภาคม-ธันวาคมอยู่ในช่วง 1.55 ± 0.15 มิลลิกรัม/ลิตร ถึง 13.15 ± 0.05 มิลลิกรัม/ลิตร (ภาพที่ 5) จุดเก็บตัวอย่างน้ำในพื้นที่สงวน เดือนมิถุนายน เป็นช่วงปลายฤดูร้อนเข้าสู่ฤดูฝนซึ่งมีปริมาณน้ำฝนน้อยพบว่ามีค่าปีโอติสูงสุดเท่ากับ 13.15 ± 0.05 มิลลิกรัม/ลิตร เนื่องจากเกิดการระเหยของน้ำในช่วงปลายฤดูร้อนเข้าสู่ฤดูฝน ส่งผลให้สิ่งปนเปื้อนในแหล่งน้ำมีความเข้มข้นมากกว่า ในขณะที่พื้นที่สงวนตั้งอยู่ในพื้นที่เขตห้ามล่าสัตว์ป่าบึงโขงหลงที่มีต้นไม้และพรรณไม้ต่างๆ ทำให้มีสารอินทรีย์จากการย่อยสลายซากพืชซากสัตว์จึงส่งผลให้มีค่าปีโอติสูงกว่าปกติ การเก็บตัวอย่างน้ำเดือนตุลาคม-ธันวาคมเป็นช่วงฤดูหนาวพบว่ามีค่าปีโอติมาก เนื่องจากในฤดูหนาวถึงอุณหภูมิจะต่ำกว่าฤดูร้อน แต่ช่วงกลางวันจะพบว่าความเข้มข้นแสงแดดสูงจึงเกิดการระเหยของน้ำ ซึ่งส่งผลให้สิ่งปนเปื้อนในแหล่งน้ำมีความเข้มข้นมากเช่นกัน ในขณะที่การเก็บตัวอย่างน้ำเดือนมิถุนายน-กันยายนเป็นช่วงฤดูฝนพบว่ามีค่าปีโอติต่ำเนื่องจากเกิดการเจือจางความสกปรกของน้ำจากปริมาณน้ำฝน (สุชัยญา, สิทธิชัย และบุหริน, 2566) ซึ่งเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดินประเภทที่ 2, 3 และ 4 กำหนดค่าปีโอติไม่เกิน 1.5 มิลลิกรัม/ลิตร, 2.0 มิลลิกรัม/ลิตร และ 4.0 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ โดยพบว่าจุดเก็บตัวอย่างน้ำของการใช้ประโยชน์ที่ดินทั้ง 5 พื้นที่ เดือนพฤษภาคมเป็นช่วงฤดูร้อนพบว่ามีค่าปีโอติต่ำที่สุด อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดินประเภทที่ 3 ที่กำหนดค่าปีโอติไม่เกิน 2.0 มิลลิกรัม/ลิตร สอดคล้องกับงานวิจัยของอันธิกา (2562) ศึกษาคุณภาพน้ำผิวดินบริเวณรอบนิคมอุตสาหกรรมโรจนะ จังหวัดพระนครศรีอยุธยา พบว่ามีค่าปีโอติอยู่ในช่วง 1.70 มิลลิกรัม/ลิตร ถึง 2.21 มิลลิกรัม/ลิตร ในขณะที่จุดเก็บตัวอย่างน้ำในพื้นที่เพื่อการอนุรักษ์น้ำเพื่อการอุปโภคและบริโภค พื้นที่ตรวจวัดคุณภาพน้ำโดยรวม และพื้นที่กิจกรรมเพื่อเป็นสถานที่พักผ่อน ช่วงเดือนมิถุนายน-สิงหาคม อยู่ในช่วงฤดูฝน พบว่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดินประเภทที่ 4 ที่กำหนดค่าปีโอติไม่เกิน 4.0 มิลลิกรัม/ลิตร (คณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ, 2537) ในขณะที่จุดเก็บตัวอย่างน้ำของการใช้ประโยชน์ที่ดินทั้ง 5 พื้นที่ ช่วงเดือนกันยายนเป็นช่วงปลายฤดูฝนต้นฤดูหนาว และเดือนตุลาคม-ธันวาคม เป็นช่วงฤดูหนาว พบว่ามีค่าปีโอติสูงกว่า 4.0 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งแสดงว่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดินประเภทที่ 5 การใช้ประโยชน์ที่ดินในพื้นที่ชุ่มน้ำบึงโขงหลง พบว่าพื้นที่ชุมชน และพื้นที่กิจกรรมเพื่อเป็นสถานที่พักผ่อน มีแนวโน้มค่าปีโอติมากกว่าพื้นที่สงวน พื้นที่เพื่อการอนุรักษ์น้ำเพื่อการอุปโภคและบริโภค และพื้นที่ตรวจวัด

คุณภาพน้ำโดยรวม เนื่องจากพื้นที่ชุมชนประกอบด้วยท่าเรือ โรงเรียน วัด และหมู่บ้าน ซึ่งมีชุมชนอาศัยอยู่บริเวณริมพื้นที่ชุ่มน้ำบึงโขงหลงจึงเกิดการปนเปื้อนน้ำเสียจากชุมชนไหลลงสู่พื้นที่ชุ่มน้ำบึงโขงหลง และพื้นที่กิจกรรมเพื่อเป็นสถานที่พักผ่อน มีกิจกรรมทางน้ำ แอ้ออาหาร และอาคารชมวิว จึงมีการปนเปื้อนน้ำเสียไหลลงสู่พื้นที่ชุ่มน้ำบึงโขงหลงด้วยเช่นกัน ซึ่งส่งผลให้มีค่าบีโอดีสูง โดยค่าบีโอดีในแต่ละพื้นที่มีการเปลี่ยนแปลงไปในแต่ละวันซึ่งส่งผลให้ค่าบีโอดีของน้ำผิวดินเปลี่ยนแปลงไป โดยแหล่งน้ำที่มีค่าบีโอดีมากย่อมแสดงว่ามีความสกปรกมาก อาจเกิดการเน่าเสียได้และยังส่งผลเสียต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ

แอมโมเนียไนโตรเจนของคุณภาพน้ำจากการใช้ประโยชน์ที่ดินในพื้นที่ชุ่มน้ำบึงโขงหลง (ภาพที่ 6) จุดเก็บตัวอย่างน้ำของการใช้ประโยชน์ที่ดินทั้ง 5 พื้นที่ พบว่าแอมโมเนียไนโตรเจนค่อนข้างแกว่งเนื่องจากปัจจัยของสภาพอากาศ ความเป็นกรด-ด่าง และการย่อยสลายทางชีวภาพ เป็นต้น เดือนพฤษภาคม-ธันวาคมพบว่าแอมโมเนียไนโตรเจนอยู่ในช่วง 0.007 ± 0.006 มิลลิกรัม/ลิตร ถึง 0.055 ± 0.005 มิลลิกรัม/ลิตร โดยเดือนพฤษภาคมและมิถุนายนมีค่าแอมโมเนียไนโตรเจนค่อนข้างสูง เนื่องมาจากช่วงเวลาที่เก็บตัวอย่างน้ำบึงโขงหลงในเดือนพฤษภาคมอยู่ในช่วงฤดูร้อนและเดือนมิถุนายนอยู่ในช่วงปลายฤดูร้อนต้นฤดูฝน ซึ่งมีปริมาณฝนตกน้อยในฤดูดังกล่าวเกิดการย่อยสลายของซากสัตว์ มูลสัตว์ และปุ๋ยยูเรีย ได้อย่างรวดเร็วจึงส่งผลให้ค่าแอมโมเนียไนโตรเจนสูงมีค่าอยู่ในช่วง 0.029 ± 0.001 มิลลิกรัม/ลิตร ถึง 0.055 ± 0.005 มิลลิกรัม/ลิตร โดยมาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดินประเภทที่ 2 ค่าแอมโมเนียไนโตรเจนมีค่าไม่เกิน 0.5 มิลลิกรัม/ลิตร (คณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ, 2537) จากงานวิจัยนี้พบว่าจุดเก็บตัวอย่างน้ำของการใช้ประโยชน์ที่ดินทั้ง 5 พื้นที่ ในเดือนพฤษภาคม-ธันวาคม พบค่าแอมโมเนียไนโตรเจนอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดินประเภทที่ 2 ซึ่งคล้ายกับงานวิจัยของสุชัยณูญา, สิทธิชัย และบุหริน (2566) ได้ศึกษาการจัดการคุณภาพน้ำสำหรับการเกษตรข้าวหอมมะลิในพื้นที่ลุ่มน้ำโขงเหนือ โดยเก็บตัวอย่างน้ำในฤดูแล้งในเดือนมีนาคม 2563 และฤดูฝนในเดือนกรกฎาคม 2563 พื้นที่ศึกษาอ่างเก็บน้ำ ตำบลสันโค้ง อำเภอดอกคำใต้ จังหวัดพะเยา ทั้งหมด 3 แห่ง ได้แก่ น้ำห้วยตาดแซะ ห้วยชมพู และห้วยผาหนีบ พบว่าค่าแอมโมเนียไนโตรเจนอยู่ในช่วง 0.03 ± 0.0 มิลลิกรัม/ลิตร ถึง 0.07 ± 0.0 มิลลิกรัม/ลิตร

ทีเคเอ็นเป็นผลรวมของอินทรีย์ไนโตรเจนและแอมโมเนียไนโตรเจน โดยไนโตรเจนเป็นธาตุอาหารที่ปนเปื้อนกับน้ำจากกิจกรรมการประมง เกษตรกรรม อุตสาหกรรม และชุมชน เช่น มูลสัตว์ ปุ๋ยอินทรีย์ ปุ๋ยเคมี ผงซักฟอก และอาหารสัตว์ เป็นต้น ทีเคเอ็นของจุดเก็บน้ำของการใช้ประโยชน์ที่ดินทั้ง 5 พื้นที่ มีค่าค่อนข้างแกว่งเนื่องจากปัจจัยของสภาพอากาศ ความเป็นกรด-ด่าง และการย่อยสลายทางชีวภาพ เป็นต้น โดยในเดือนพฤษภาคม-ธันวาคม มีค่าทีเคเอ็นอยู่ในช่วง 0.22 ± 0.00 มิลลิกรัม/ลิตร ถึง 0.95 ± 0.11 มิลลิกรัม/ลิตร (ภาพที่ 7) จะเห็นได้ว่าในเดือนกรกฎาคมและกันยายนของจุดเก็บน้ำของการใช้ประโยชน์ที่ดินทั้ง 5 พื้นที่ มีค่าทีเคเอ็นสูงเนื่องจากระยะเวลาในการเก็บน้ำตัวอย่างอยู่ในช่วงฤดูฝนซึ่งที่มีปริมาณน้ำในบึงโขงหลงมาก และอาจเกิดการไหลบ่าของน้ำฝนที่ปนเปื้อนปุ๋ยที่มีไนโตรเจนในแปลงเกษตรและมูลสัตว์จากการทำปศุสัตว์ ธาตุอาหารส่วนเกินจะถูกน้ำฝนชะล้างออกไปและไหลลงสู่แหล่งน้ำ ซึ่งแตกต่างจากงานวิจัยของสายธาร (2557) ศึกษาประสิทธิภาพป่าพรุพื้นที่ชุ่มน้ำตามธรรมชาติในการบำบัดน้ำเสียชุมชนบ้านไม้ขาว อำเภอกลาง จังหวัดภูเก็ต พบว่าค่าทีเคเอ็น

คุณภาพน้ำพรุทุ่งเตียนอยู่ในช่วง 0.040 มิลลิกรัม/ลิตร ถึง 0.003 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งมีค่าที่เคเอ็นน้อยกว่างานวิจัยนี้ เนื่องจากพื้นที่ชุ่มน้ำบึงโขงหลงมีการใช้ประโยชน์ที่ดินหลากหลายจึงทำให้ค่าที่เคเอ็นมีค่าแตกต่างกัน เนื่องจากปัจจัยสภาพอากาศ ความเป็นกรด-ด่าง การย่อยสลายทางชีวภาพ รวมถึงกิจกรรมต่างๆ ของมนุษย์ เป็นต้น ในขณะที่งานวิจัยของสายธาร (2557) ศึกษาประสิทธิภาพป่าพรุพื้นที่ชุ่มน้ำตามธรรมชาติในการบำบัดน้ำเสียชุมชนเท่านั้น

คุณภาพน้ำทางชีวภาพ

แบคทีเรียโคลิฟอร์มทั้งหมดของคุณภาพน้ำจากการใช้ประโยชน์ที่ดินในพื้นที่ชุ่มน้ำบึงโขงหลงแบคทีเรียกลุ่มนี้มักพบในลำไส้ของสัตว์เลือดอุ่น แต่โคลิฟอร์มอีกหลายชนิดก็มีแหล่งที่พบในดิน ปริมาณของโคลิฟอร์มแบคทีเรียใช้เป็นดัชนีชี้วัดคุณภาพของน้ำถ้าพบโคลิฟอร์มแบคทีเรียในน้ำปริมาณมากบ่งชี้ถึงความไม่สะอาดไม่ถูกสุขลักษณะ อาจมีการปนเปื้อนของอุจจาระของคนหรือสัตว์เลือดอุ่น หากมีการรับแบคทีเรียชนิดนี้ในปริมาณมากในมนุษย์จะทำให้เกิดโรคท้องร่วงจึงจะต้องมีการควบคุมปริมาณแบคทีเรียโคลิฟอร์มทั้งหมดในแหล่งน้ำต่างๆ เกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดินประเภทที่ 2 และ 3 กำหนดค่าแบคทีเรียโคลิฟอร์มทั้งหมดไม่เกิน 5,000 MPN/100 ml และ 20,000 MPN/100 ml ตามลำดับ (คณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ, 2537) ในการศึกษาครั้งนี้ (ตารางที่ 1) พบว่าจุดเก็บน้ำของการใช้ประโยชน์ที่ดินทั้ง 5 พื้นที่ ในเดือนพฤษภาคม-ธันวาคมพบว่าแบคทีเรียโคลิฟอร์มทั้งหมดมีค่าอยู่ในช่วงน้อยกว่า 3 MPN/100 ml ถึง 93.0 MPN/100 ml แบคทีเรียโคลิฟอร์มทั้งหมดอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดินประเภทที่ 2 โดยเดือนกันยายนพบว่าพื้นที่กิจกรรมเพื่อเป็นสถานที่พักผ่อนพบแบคทีเรียโคลิฟอร์มทั้งหมดมากกว่าพื้นที่ชุมชนพื้นที่สวน และพื้นที่เพื่อการอนุรักษ์น้ำเพื่อการอุปโภคและบริโภค เนื่องจากพื้นที่กิจกรรมเพื่อเป็นสถานที่พักผ่อน มีกิจกรรมแพอาหาร อาคารชมวิว และกิจกรรมทางน้ำ จึงมีการปนเปื้อนแบคทีเรียโคลิฟอร์มทั้งหมดมากกว่าพื้นที่อื่นๆ ในขณะที่พื้นที่ตรวจวัดคุณภาพน้ำโดยรวมพบแบคทีเรียโคลิฟอร์มทั้งหมดน้อยที่สุดเนื่องจากเป็นพื้นที่ที่อยู่กลางพื้นที่ชุ่มน้ำบึงโขงหลงซึ่งไม่มีการไปใช้ประโยชน์ในการทำกิจกรรมต่างๆ อีกทั้งอยู่ห่างไกลจากชุมชนจึงส่งผลให้มีการปนเปื้อนแบคทีเรียโคลิฟอร์มทั้งหมดน้อยมาก แตกต่างกับงานวิจัยของสัมฤทธิ์ และคนอื่นๆ (2563) ศึกษาการประเมินคุณภาพและการจัดการแหล่งน้ำร่วมกับชุมชนบ้านพุน้ำร้อน ตำบลบ้านเก่า อำเภอเมืองจังหวัดกาญจนบุรี พบว่าแบคทีเรียโคลิฟอร์มทั้งหมด มีค่าอยู่ในช่วง 23 MPN/100 ml ถึง 350 MPN/100 ml เนื่องจากแหล่งน้ำของสัมฤทธิ์ และคนอื่นๆ (2563) เป็นแหล่งน้ำที่อยู่ในเมืองจึงมีการปนเปื้อนแบคทีเรียโคลิฟอร์มทั้งหมดมากกว่าการใช้ประโยชน์ที่ดินทั้ง 5 พื้นที่ในพื้นที่ชุ่มน้ำบึงโขงหลง

แบคทีเรียฟีคัลโคลิฟอร์มพบได้ในสิ่งขับถ่ายจากสัตว์เลือดอุ่น ไม่ก่อให้เกิดโรคโดยตรง การตรวจพบฟีคัลโคลิฟอร์มแบคทีเรียในแหล่งน้ำจึงเป็นตัวบ่งชี้ถึงการปนเปื้อนของสิ่งขับถ่ายของคนรวมถึงสัตว์เลือดอุ่นอื่นๆ ที่อาจมีเชื้อโรคที่ทำให้เกิดอาการต่อระบบทางเดินอาหารในสกุลอื่นปะปนอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดินประเภทที่ 2 และ 3 กำหนดค่าแบคทีเรียฟีคัลโคลิฟอร์ม ไม่เกิน 1,000 MPN/100 ml และ 4,000 MPN/100 ml ตามลำดับ (คณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ, 2537) ในการศึกษาครั้งนี้ (ตารางที่ 1) พบว่าเดือนกันยายนในพื้นที่กิจกรรมเพื่อเป็นสถานที่พักผ่อนพบแบคทีเรียฟีคัลโคลิฟอร์มมากกว่าพื้นที่ชุมชน พื้นที่สวน และพื้นที่เพื่อ

การอนุรักษ์น้ำเพื่อการอุปโภคและบริโภค เนื่องจากพื้นที่กิจกรรมเพื่อเป็นสถานที่พักผ่อน มีกิจกรรมแพอาหาร อาคารชมวิวและกิจกรรมทางน้ำ จึงมีการปนเปื้อนแบคทีเรียพีคัลโคลิฟอร์มมากกว่าพื้นที่อื่นๆ ในขณะที่พื้นที่ตรวจวัดคุณภาพน้ำโดยรวมพบแบคทีเรียพีคัลโคลิฟอร์มน้อยที่สุดเนื่องจากเป็นพื้นที่ที่อยู่กลางพื้นที่ชุ่มน้ำบึงโขงหลงซึ่งไม่มีการไปใช้ประโยชน์ในการทำกิจกรรมต่างๆ อีกทั้งอยู่ห่างไกลจากชุมชนจึงส่งผลให้มีการปนเปื้อนแบคทีเรียพีคัลโคลิฟอร์มน้อยมาก โดยจุดเก็บน้ำของการใช้ประโยชน์ที่ดินทั้ง 5 พื้นที่ ในเดือนพฤษภาคม-ธันวาคม พบแบคทีเรีย พีคัลโคลิฟอร์มมีค่าอยู่ในช่วงน้อยกว่า 3 MPN/100 ml ถึง 21.0 MPN/100 ml แบคทีเรียพีคัลโคลิฟอร์มอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดินประเภทที่ 2 ซึ่งแตกต่างกับงานวิจัยของสัมฤทธิ์ และคนอื่นๆ (2563) ศึกษาการประเมินคุณภาพและการจัดการแหล่งน้ำร่วมกับชุมชนบ้านพุน้ำร้อน ตำบลบ้านเก่า อำเภอเมือง จังหวัดกาญจนบุรี พบว่าแบคทีเรียพีคัลโคลิฟอร์มมีค่าอยู่ในช่วง 14 MPN/100 ml ถึง 350 MPN/100 ml ที่พบแบคทีเรียพีคัลโคลิฟอร์มมากกว่างานวิจัยนี้เนื่องจากแหล่งน้ำของสัมฤทธิ์ และคนอื่นๆ (2563) เป็นแหล่งน้ำที่อยู่ในเมืองจึงมีการปนเปื้อนแบคทีเรียพีคัลโคลิฟอร์มมากกว่าการใช้ประโยชน์ที่ดินทั้ง 5 พื้นที่ในพื้นที่ชุ่มน้ำบึงโขงหลง

ดัชนีคุณภาพน้ำ

ดัชนีคุณภาพน้ำพบว่ามีคะแนนอยู่ในช่วง 58.14 ถึง 88.39 อยู่ในเกณฑ์ดัชนีคุณภาพน้ำพอใช้ถึงดี (ตารางที่ 2 และ 3) ตามเกณฑ์คะแนนดัชนีคุณภาพน้ำ ซึ่งเห็นได้ว่าในเดือนพฤษภาคมเป็นช่วงฤดูร้อน พบว่าการใช้ประโยชน์ที่ดินทั้ง 5 พื้นที่ คุณภาพน้ำอยู่ในเกณฑ์คุณภาพน้ำดี บ่งบอกถึงการใช้ประโยชน์ที่ดินในช่วงเวลานั้นมีการปนเปื้อนน้อย ในเดือนมิถุนายน-กันยายนเป็นช่วงฤดูฝนพบว่ามีการใช้ประโยชน์ที่ดินที่ส่งผลต่อดัชนีคุณภาพน้ำในพื้นที่ชุ่มน้ำบึงโขงหลงมีมากน้อยต่างกันจึงทำให้ค่าดัชนีคุณภาพน้ำของแต่ละจุดมีค่าอยู่ในเกณฑ์คุณภาพน้ำดีและพอใช้สลับกันไปต่างช่วงระยะเวลาของการใช้ประโยชน์ที่ดินในแต่ละพื้นที่ ในขณะที่เดือนตุลาคม-ธันวาคมเป็นช่วงฤดูหนาวพบว่าดัชนีคุณภาพน้ำอยู่ในเกณฑ์คุณภาพน้ำพอใช้ บ่งบอกว่าคุณภาพน้ำในบึงโขงหลงในช่วงระยะนั้นได้มีการใช้ประโยชน์ที่ดินทั้ง 5 พื้นที่มากกว่าระยะเวลาของฤดูกาลอื่นๆ ทำให้เกิดการปนเปื้อนมาก แต่ทั้งนี้คุณภาพของน้ำในบึงโขงหลงยังสามารถนำมาใช้ในการอุปโภคและบริโภคได้และยังเป็นไปตามมาตรฐานแหล่งน้ำผิวดินประเภทที่ 2 และ 3 โดยภาพรวมการใช้ประโยชน์ที่ดินในพื้นที่สงวน พื้นที่ชุมชน พื้นที่เพื่อการอนุรักษ์น้ำเพื่อการอุปโภคและบริโภค พื้นที่ตรวจวัดคุณภาพน้ำโดยรวม และพื้นที่กิจกรรมเพื่อเป็นสถานที่พักผ่อน พบว่าดัชนีคุณภาพน้ำอยู่ในเกณฑ์คุณภาพน้ำพอใช้ถึงดี (ตารางที่ 2) เนื่องจากการใช้ประโยชน์ที่ดินในพื้นที่ชุ่มน้ำบึงโขงหลงมีประชาชนอาศัยอยู่ไม่หนาแน่น และมีความเป็นธรรมชาติค่อนข้างมาก จึงส่งผลต่อการปนเปื้อนน้ำเสียในปริมาณและความเข้มข้นไม่มากจากกิจกรรมการใช้ประโยชน์ที่ดินต่างๆ ซึ่งระบบธรรมชาติสามารถบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนได้โดยระบบทางธรรมชาติเอง (Self-Purification)

ตารางที่ 3 สรุปผลการวิเคราะห์ดัชนีคุณภาพน้ำ

WQI	คะแนน	เกณฑ์คุณภาพน้ำ
ต่ำสุด	58.14	พอใช้
สูงสุด	88.39	ดี

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาและเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการคณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ที่ให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำในการวิเคราะห์คุณภาพน้ำและงานวิจัยเป็นอย่างดี

เอกสารอ้างอิง

- คณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ. (2537). ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 8 ออกตามความในพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535 เรื่องกำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน. [Online]. Available : <https://www.pcd.go.th/laws/4168> [2566, มีนาคม 30].
- ควบคุมมลพิษ, กรม. (2553). วิธีการปฏิบัติสำหรับการเก็บตัวอย่างน้ำจากแหล่งน้ำ. [Online]. Available : <https://www.pcd.go.th/publication/4209> [2566, มีนาคม 30].
- ควบคุมมลพิษ, กรม. (2565). ดัชนีคุณภาพน้ำแหล่งน้ำผิวดิน. [Online]. Available : <https://www.pcd.go.th/waters-ดัชนีคุณภาพน้ำแหล่งน้ำผิวดิน-water-quality-indexwqi> [2566, มีนาคม 30].
- ชวลิต อภิหิรัญตระกูล. (2564). **ขีดความสามารถในการรองรับได้ของแหล่งท่องเที่ยวในพื้นที่อุทยานแห่งชาติแม่แจ่มจังหวัดแม่ฮ่องสอน**. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการป่าไม้อำนวยการและพัฒนารักษาการ มหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมจังหวัดบึงกาฬ, สำนักงาน. (2562). รายงานประจำปี พ.ศ. 2561 : สำนักงานทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมจังหวัดบึงกาฬ. [Online]. Available : <http://www.buengkan.go.th/index.php/site-map/2013-06-16-13-59-21> [2566, มีนาคม 30].
- มันสิน ตัญกุลเวศม์ และมันรัช ตัญกุลเวศม์. (2551). **คู่มือวิเคราะห์คุณภาพน้ำ**. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สัมฤทธิ์ มากสง, มนสิณี ดาบเงิน, กาญจนา เชียงทอง, ธงชัย สอนเพี้ย และตรีสุคนธ์ เจริญชัยชาญกิจ. (2563). การประเมินคุณภาพและการจัดการแหล่งน้ำร่วมกับชุมชนบ้านพุน้ำร้อน ตำบลบ้านเก่า อำเภอเมืองจังหวัดกาญจนบุรี. **วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี**, 28(6), 1014-1028.
- สายธาร ทองพร้อม. (2557). ประสิทธิภาพป่าพรุพื้นที่ชุ่มน้ำตามธรรมชาติ ในการบำบัดน้ำเสียชุมชนบ้านไม้ขาว อำเภอลาด จังหวัดภูเก็ต. **SDU Res.J**, 7(3), 1-15.
- สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. (2561). **โครงการเพิ่มประสิทธิภาพการจัดการพื้นที่ชุ่มน้ำของประเทศไทย**. [Online]. Available : http://43.249.65.15/ramsarsite60/project/02/?fbclid=IwAR1y-lIVYRcUVs3znQQmh6RtyvSY0TrVfn2jLzWfX8Xhltuy-8URTC_aRU [2566, กรกฎาคม 11].
- สุชัยญา ทองเครือ, สิทธิชัย มุ่งดี และบุหรัน พันธุ์สุวรรณ. (2566). **การจัดการคุณภาพน้ำสำหรับการเกษตรข้าวหอมมะลิในพื้นที่ลุ่มน้ำโขงเหนือ (รายงานการวิจัย)**. พะเยา : คณะพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยพะเยา.

- สุรางคณา ตรังคานนท์, วิชัยรัตน์ แก้วเจือ, นูรนาเดีย เส้น هرم, พรชิตา ชูอินทร์, ธนินยา เกาศล และ
ณัฐชา โรยสุวรรณ. (2566). การติดตามตรวจสอบคุณภาพน้ำ : กรณีศึกษาคลองสามกองและ
คลองสำโรง จังหวัดสงขลา. ใน การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 28 วันที่ 24-26
พฤษภาคม พ.ศ. 2566(หน้า 7-3, 1-3). กู้เก๋ต : มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- อติญาพรรณ ศรีบุญขำ, ฆริกา คันธา และศันสนีย์ อรัญวาสน์. (2564). ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงการใช้
ประโยชน์ที่ดินของกลุ่มน้ำสาขาลำโดมใหญ่. วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา, 26(3), 1777-1795.
- อันธิกา เสี่ยมใจ. (2562). คุณภาพน้ำผิวดินบริเวณรอบนิคมอุตสาหกรรมโรจนะ จังหวัดพระนครศรีอยุธยา.
วารสารเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, 15(1), 17-27.
- AWWA, APHA, WPCF. (2017). *Standard Methods for the Examination of Water and
Wastewater*. (23 rd ed.). Washington D.C. APHA.



การเตรียมและการหาลักษณะเฉพาะของผ้าไม่ทอจากพอลิแลคติกแอซิดและ
พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ด้วยกระบวนการเมลต์โบลว์น

Preparation and Characterization of Nonwovens from Poly (Lactic Acid)
and Poly (Butylene Succinate) by Melt blown Process

ธัญญา ชลปรีชา*

Thananya Cholprecha

พัชรี ประทุมพงษ์**

Patcharee Pratumpong

หยาดนภา ผาเจริญ***

Yardnapar Parcharoen

นที ศรีสวัสดิ์****

Natee Srisawat

นรรจพร เรืองไพศาล****

Nanjaporn Rongpaisan

สุรเชษฐ์ ตุ่มมี*****

Surachet Toommee

ชिरาวุฒิ เพชรเย็น*****

Chiravoot Pechyen

Received : February 11, 2023

Revised : September 27, 2023

Accepted : March 1, 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเตรียม และจำแนกลักษณะของผ้าไม่ทอจากพอลิแลคติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ซึ่งเป็น พอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้แทนการใช้พอลิเมอร์สังเคราะห์ ด้วยกระบวนการเมลต์โบลว์น โดย ทำการปรับค่าพารามิเตอร์ในกระบวนการเมลต์โบลว์นเพื่อศึกษาลักษณะของผ้าไม่ทอที่พารามิเตอร์การขึ้นรูปแตกต่างกัน 6 สภาวะ ได้แก่ ความดันลม 0.2 และ 0.4 เมกะปาสคาล และระยะห่างจากหัวฉีดถึงตัวม้วนเก็บที่ 15 30 และ 45 เซนติเมตรตามลำดับ ผลจากการศึกษารูปร่างสันฐานพบว่า การเพิ่มความดันลม และระยะห่างจากหัวฉีดถึงตัวม้วนเก็บส่งผลให้เส้นใยจากผ้าไม่ทอของพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิดมีขนาดเล็กลง นอกจากนี้ การทดสอบสมบัติทางกล ชี้ให้เห็นว่าความสามารถในการทนต่อแรงดึง และร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด มีแนวโน้มมากขึ้นเมื่อเพิ่มความดันลม เมื่อศึกษาสมบัติทางความร้อน พบว่าผ้าพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตสามารถเกิดผลึกได้มากกว่าเมื่อเพิ่มระยะห่างของหัวฉีดกับตัวม้วนเก็บสอดคล้องกับโครงสร้างผลึกจากการวัดการเลี้ยวเบน

ของรังสีเอ็กซ์ จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าพอลิแลคติกแอซิดสามารถขึ้นรูปเป็นผ้าไม่ทอได้สมบูรณ์ทุกสภาวะ ในขณะที่พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตควรใช้ระยะห่างจากหัวฉีดถึงตัวม้วนเก็บมากกว่า 15 เซนติเมตรขึ้นไป อย่างไรก็ตามพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิดสามารถขึ้นรูปเป็นผ้าไม่ทอได้ด้วยกระบวนการเมลต์โบลนและสามารถพัฒนาไปใช้สำหรับอุตสาหกรรมสิ่งทอต่อไปได้

คำสำคัญ : พอลิแลคติกแอซิด / พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต / ผ้าไม่ทอ / เมลต์โบลน

*นักศึกษาลัทธิวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุและสิ่งทอ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

Master of Science program students Department of Materials and Textile Technology, Faculty of Science and Technology, Thammasat University(Corresponding Author) e-mail: s.toommee@gmail.com

**อาจารย์ประจำสาขาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
Lecturer of Physics, Faculty of Science and Technology, Thammasat University

***อาจารย์ประจำวิทยาลัยแพทยศาสตร์นานาชาติจุฬาภรณ์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
Lecturer at Chulabhorn International College of Medicine, Thammasat University

****อาจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมเคมีสิ่งทอและเส้นใย คณะวิศวกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี
Lecturer in Textile and Fiber Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

*****อาจารย์ประจำคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร
Lecturer at Faculty of Industrial Technology, Kamphaeng Phet Rajabhat University

*****อาจารย์ประจำสาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุและสิ่งทอ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
Lecturer in Materials and Textile Technology, Faculty of Science and Technology, Thammasat University

ABSTRACT

This research aimed to prepare and characterize nonwovens from poly lactic acid and polybutylene succinate, which is a biodegradable polymer instead of using synthetic polymers. This research using the melt-blown process while varying the melt-blown process parameters to study the characteristics of non-woven fabrics, including air pressure (0.2 and 0.4 MPa) and die-to-collector distance (15, 30, and 45 cm). The result shown that increasing the air pressure and die-to-collector distance resulted in the production of smaller fibers. Simultaneously, the tensile strength was dependent on the polymer, air pressure, and die-to-collector distance used, and the percentage elongation at the break tended to increase with an increasing die-to-collector distance. Regarding thermal properties, the PBS nonwovens exhibited an increased level of crystallinity when the die-to-collector distance was raised, consistent with the degree of crystallinity obtained from X-ray diffraction analysis. Poly lactic acid could be successfully processed into nonwovens under all six investigated conditions, whereas nonwoven polybutylene succinate could not be formed at a die-to-collector distance of 15 cm. However, both polymers demonstrated the feasibility of being processed into nonwovens using the melt-blown technique, showing potential for applications in the textile industry.

Keywords : Poly (lactic acid) / Poly (butylene succinate) / Nonwovens / Melt blown

บทนำ

ผ้าไม่ทอ (Nonwovens) คือ ผ้าที่เกิดจากการขึ้นรูปเส้นใยโดยตรงอย่างมีทิศทาง หรือกระจัดกระจายไม่มีทิศทาง แล้วทำให้เส้นใยยึดติดกันด้วยกระบวนการเชิงกล กระบวนการทางเคมี กระบวนการความร้อน กระบวนการที่ใช้สารละลาย หรือการผสมผสานกันระหว่างกระบวนการก็ได้ ในปัจจุบันผ้าไม่ทอมีความสำคัญและมีความต้องการสูงในอุตสาหกรรมสิ่งทอ (Peng, et al., 2019) เนื่องจากสามารถปรับแต่งสมบัติของผ้าได้จากสมบัติที่แตกต่างกันของพอลิเมอร์ สามารถออกแบบให้มีลักษณะ และสมบัติที่หลากหลายเพื่อให้เหมาะสมสำหรับการใช้งานที่แตกต่างกัน เช่น เฟอร์นิเจอร์ เครื่องนุ่งห่ม กีฬา งานด้านโยธา การแพทย์ สิ่งแวดล้อม การเกษตร ฯลฯ อีกทั้งยังมีกระบวนการผลิตที่รวดเร็ว สามารถผลิตได้ในปริมาณมาก มีต้นทุนการผลิตต่ำ จึงสามารถใช้สำหรับผลิตภัณฑ์ใช้แล้วทิ้ง (Disposable) ได้ (Yalcin, 2015)

โดยทั่วไปแล้ววัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิตผ้าไม่ทอ จะเป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ชนิดต่างๆ เช่น พอลิเอทิลีน พอลิโพรพิลีน ไนลอน และพอลิคาร์บอเนต พอลิเมอร์เหล่านี้ล้วนเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากอุตสาหกรรมปิโตรเลียมในกระบวนการผลิตมีการปลดปล่อยสารพิษจำนวนมากระหว่างกระบวนการสังเคราะห์ ทำให้ใช้เวลานานในการย่อยสลายหรือบางชนิดไม่สามารถย่อยสลายได้ ส่งผลให้เกิดเป็นปัญหาขยะพลาสติก

(Chen & Patel, 2012) ในงานวิจัยนี้สนใจเรื่องปัญหาสิ่งแวดล้อม และอยากลดปัญหาดังกล่าว จึงใช้พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพในการผลิตผ้าไม่ทอแทนพอลิเมอร์สังเคราะห์ พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพมีอยู่หลายชนิด แต่ที่ได้รับความนิยม และผู้วิจัยสนใจมากที่สุดคือ พอลิแลคติกแอซิด (Poly lactic acid: PLA) และพอลิบิวทีลีนซัคซิเนต (Poly butylene succinate: PBS) เนื่องจากผลิตจากวัตถุดิบทางธรรมชาติ จึงสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพโดยไม่ก่อสารพิษ มีความเข้ากันได้ทางชีวภาพ มีสมบัติทางความร้อนที่ดี (Nor & Mariatti, 2020) สามารถแปรรูปได้หลากหลายทั้งการหล่อฟิล์ม การอัดรีด การขึ้นรูปแบบเป่า และการปั่นเส้นใย PLA ได้มาจากแหล่งพลังงานหมุนเวียน ปัจจุบันมีการผลิตในโรงงานระดับโลกสองแห่งโดย NatureWorks LLC ในสหรัฐอเมริกาและ Total Corbion ในประเทศไทย กำลังการผลิต PLA ที่คาดการณ์ไว้จะเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงปี 2561 ถึง 2566 (Shen Su, et al., 2013) PLA เป็นพอลิเอสเตอร์อเนกประสงค์ มีคุณสมบัติที่ดีหลายประการ เช่น โมดูลัสความยืดหยุ่นสูง ความแข็งแรงสูง ความโปร่งใสสูง (ในสถานะอสัณฐาน) และการนำไปใช้กระบวนการผลิตง่าย สำหรับ PBS เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ชีวภาพอื่นๆ PBS มีประสิทธิภาพเชิงนิเวศที่ดีกว่า มีความสำคัญทางเศรษฐกิจในการใช้งานหลายประเภท (Shen Su, et al., 2013) PBS ยังมีคุณสมบัติที่ต้องการมากมาย เช่น ความยืดหยุ่นสูงและเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีเยี่ยม

สำหรับการผลิตผ้าไม่ทอสามารถผลิตได้หลากหลายกรรมวิธี เช่น กระบวนการปั่นหลอม (Melt spinning) มีลักษณะเส้นใยยาวแบบต่อเนื่อง (Jompang, et al., 2013) กระบวนการสปันบอนด์ (Spun bond) เป็นกระบวนการปั่นเส้นใยอย่างต่อเนื่องทำให้มีลักษณะเป็นเส้นใยยาวเหมือนกระบวนการปั่นหลอม ได้รับความนิยมมากในปัจจุบันแต่มีลักษณะเส้นใยค่อนข้างใหญ่เมื่อเทียบกับกระบวนการอื่น และกระบวนการเมลต์โบลน (Melt blown) เป็นกระบวนการที่ใช้ในการอัดรีดแบบต่อเนื่องอาศัยกระแสลมร้อนในการผลิตผ้าไม่ทอ ซึ่งเป็นกระบวนการผลิตในขั้นตอนเดียว (Duran, et al., 2013) โดยสามารถสร้างเส้นใยจากพอลิเมอร์ที่ถูกหลอมเหลวได้โดยตรงไม่ต้องใช้กลไกการดึง จึงช่วยให้กระบวนการนี้ได้เปรียบด้านต้นทุนอย่างชัดเจน นอกจากนี้ กระบวนการเมลต์โบลน ยังให้ผลผลิตมากกว่ากระบวนการอื่น และเป็นวิธีที่สามารถทำให้เส้นใยมีขนาดเล็กถึงไมโครและนาโนได้ จึงมีความน่าสนใจเป็นอย่างมากในการผลิตผ้าไม่ทอด้วยกระบวนการเมลต์โบลน อย่างไรก็ตาม กระบวนการเมลต์โบลนมีข้อจำกัดในด้านดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ที่ใช้ในการขึ้นรูปจำเป็นต้องมีค่า 1000 กรัมต่อ 10 นาทีขึ้นไป ซึ่งพอลิแลคติกแอซิด และพอลิบิวทีลีนซัคซิเนต มีค่าดัชนีการไหลต่ำกว่า 1000 มาก ผู้วิจัยจึงสนใจปรับค่าพารามิเตอร์ในกระบวนการเมลต์โบลนเพื่อขึ้นรูปผ้าไม่ทอจากพอลิแลคติกแอซิด และพอลิบิวทีลีนซัคซิเนต (Kathryn, 2013) และเนื่องด้วยสัณฐานวิทยาของเส้นใยมีความไวต่อพารามิเตอร์ในกระบวนการเมลต์โบลนมาก จึงจำเป็นต้องมีระบบควบคุมที่แม่นยำในการผลิต จากการศึกษางานวิจัยต่างๆ พบว่า การเพิ่มความดันลมหรือความเร็วลม (ATR) ส่งผลให้เกิดแรงต้าน (Drag force) ที่สูงขึ้น และการลดทอน (Attenuation) สูงขึ้น ซึ่งจะช่วยลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย ในขณะที่ความดันลมที่สูงเกินไปสามารถทำลายเส้นใยได้เช่นกัน นอกจากนี้ระยะห่างจากหัวฉีดถึงตัวม้วนเก็บ (Die-to-collector distance: DCD) ยังส่งผลต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยโดยตรง (Yahya & Olos, 2021) และอิทธิพลของระยะห่างจากหัวฉีดถึงตัวม้วนเก็บ ต่อสมบัติของเส้นใยจะแตกต่างกันตามสมบัติของวัสดุที่ใช้ขึ้นรูป ความไม่เสถียร ความไม่

อำนาจของพอลิเมอร์ต่อกระบวนการเมลต์โบลว์น ส่งผลให้เกิดสัมพันธภาพของเส้นใยเปลี่ยนไป แม้จะมีความรู้อย่างกว้างขวางเกี่ยวกับกระบวนการเมลต์โบลว์น แต่กลไกการสร้างเส้นใยในกระบวนการนี้ยังคงต้องการการมองเชิงลึกอีกมากในสภาวะการขึ้นรูปผ้าไม่ทอ (Bresee & Qureshi, 2002)

ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมผ้าไม่ทอจากพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการเมลต์โบลว์น และศึกษาอิทธิพลของกระบวนการผลิต ได้แก่ ชนิดของพอลิเมอร์ คือ พอลิแลคติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ความดันอากาศที่ใช้ในการขึ้นรูป และระยะห่างจากหัวฉีดถึงตัวม้วนเก็บ จากนั้นศึกษารูปร่างลักษณะสัมพันธภาพสมบัติทางความร้อน สมบัติทางกล และโครงสร้างผลึกของผ้าที่ได้ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (DSC) เครื่องทดสอบแรงดึง และเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ และสามารถพัฒนาผ้าไม่ทอที่สามารถย่อยสลายได้ประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอต่อไป

วิธีดำเนินการวิจัย

วัสดุและอุปกรณ์

พอลิแลคติกแอซิด Ingeo™ Biopolymer 3251D, NatureWorks, LLC, USA; MFR 24 g/10min (180°C/2.16 kg), density 1.24 g cm⁻³, พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเกรด FZ78tm, PTT MCC BIOCHEM, Thailand; MFR 27.96 g/10min (180°C/2.16 kg), density 1.31 g cm⁻³, เครื่องวัดดัชนีการไหลของเม็ดพอลิเมอร์ (Melt flow indexer รุ่น XRL-400A), เครื่องผลิตผ้าเมลต์โบลว์น (Melt blown machine) รุ่น SR V-N-28 ยี่ห้อ NIHON YUKI SR-RUDER BAMBI แสดงดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 เครื่องผลิตผ้าเมลต์โบลว์น

การเตรียมตัวอย่าง

เตรียมพอลิเมอร์ก่อนขึ้นรูปแผ่นผ้า โดยการนำเม็ดพอลิแลคติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต มาอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมงขึ้นไป เพื่อไล่ความชื้นให้พอลิเมอร์มีสมบัติที่ดีที่สุด

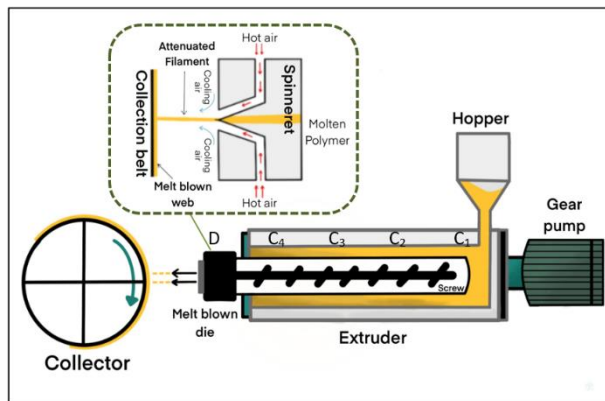
ศึกษาดัชนีการไหลของเม็ดพอลิแลคติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ด้วยเครื่องวัดดัชนีการไหลของเม็ดพอลิเมอร์ (Melt flow indexer) ที่อุณหภูมิ 180-250 องศาเซลเซียส น้ำหนักที่ใช้ 2.16 กิโลกรัม โดยค่าที่ได้แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบค่าดัชนีการไหล ของพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต

Polymer	MFI (g/10min)							
	180°C	190°C	200°C	210°C	220°C	230°C	240°C	250°C
PBS(FZ78tm)	27.96	31.98	40.06	45.94	58.34	66.84	67.66	80.02
PLA(3251D)	25.00	43.06	51.28	82.97	103.40	120.84	-	-

การเตรียมผ้าแบบไม่ทอด้วยกระบวนการเมลต์โบลว์น

สำหรับการทดลองนี้เป็นออกแบบห้องปฏิบัติการ และสร้างชุดทดลองในการผลิตผ้าแบบไม่ถักทอด้วยกระบวนการเมลต์โบลว์นขึ้นเอง ซึ่งเป็นเทคนิคการเป่าหลอมละลายที่ใช้การอัดรีดแบบต่อเนื่องในขั้นตอนเดียว โดยใช้กระแสมเป็นหลัก แสดงดังภาพที่ 2 ในขั้นตอนแรกป้อนเม็ดพอลิเมอร์เข้าไปในเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยวผ่านทางกรวยหรือ ฮอปเปอร์ (Hopper) พอลิเมอร์จะค่อยๆ หลอมละลายด้วยความร้อนจากสกรูและถูกอัดออกมาทางช่องเล็กๆ (Spinneret) จากนั้นพอลิเมอร์ที่ถูกหลอมเหลวจะถูกกดทอนให้เล็กลงเป็นไมโครไฟเบอร์ด้วยกระแสมร้อน ในระหว่างนี้เส้นใยจะถูกส่งไปยังตัวม้วนเก็บ (Collector) และจะเกิดพันธะที่จุดสัมผัสระหว่างเส้นใยกับเส้นใย สุดท้ายเส้นใยถูกทำให้เย็นที่อุณหภูมิห้องเพื่อสร้างผ้าแบบไม่ถักทอ



ภาพที่ 2 กระบวนการขึ้นรูปเส้นใยของเมลต์โบลน

ในงานวิจัยนี้ทำการปรับตั้งพารามิเตอร์ให้คงที่ดังนี้ อัตราเร็วการหมุนของสกรู (TP) 13.2 รอบต่อนาที หัวฉีดแบบกลม 3 รู (เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.35 มิลลิเมตร) อุณหภูมิในกระบวนการขึ้นรูปปรับให้เหมาะสมตามชนิดของพอลิเมอร์ สำหรับพอลิแลคติกแอซิดใช้อุณหภูมิที่ตำแหน่ง C_1-C_4 อยู่ที่ 170-240 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิที่หัวฉีด (D) 250 องศาเซลเซียส พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตใช้อุณหภูมิตำแหน่ง C_1-C_4 อยู่ที่ 170-270 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิที่หัวฉีด (D) 275 องศาเซลเซียส อ้างอิงตามตำแหน่งดังภาพที่ 2 และมีการปรับตั้งสภาวะการขึ้นรูปแผ่นผ้าไม่ทอดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สภาวะการปรับตั้งการขึ้นรูปแผ่นเส้นใยด้วยกระบวนการเมลต์โบลว์น

Sample code		Conditions	
		DCD (cm)	Air pressure (MPa)
Poly lactic acid (PLA)	PLA-1	15	0.2
	PLA-2	15	0.4
	PLA-3	30	0.2
	PLA-4	30	0.4
	PLA-5	45	0.2
	PLA-6	45	0.4
Polybutylene succinate (PBS)	PBS-1	15	0.2
	PBS-2	15	0.4
	PBS-3	30	0.2
	PBS-4	30	0.4
	PBS-5	45	0.2
	PBS-6	45	0.4

วิธีการทดสอบ และวิเคราะห์ผล







หลังจากขึ้นรูปผ้าแบบไม่ถักทอจากพอลิแลคติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตในสภาวะการขึ้นรูปที่แตกต่างกันแล้วนำไปทดสอบสมบัติต่างๆ เพื่อศึกษาอิทธิพลของกระบวนการผลิต ดังนี้

1. ทดสอบสมบัติทางความร้อน ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (DSC) NETZSCH DSC 214 ตัวอย่าง (ประมาณ 3 มิลลิกรัม) ถูกทำให้ร้อนในบรรยากาศไนโตรเจน (อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อนาที) ที่อุณหภูมิ 25-200 องศาเซลเซียส ที่อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที
2. ศึกษาลักษณะสัณฐานด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) JEOL JSM-6610LV, Oxford X-Max 50 วัดที่ 10 กิโลโวลต์ กำลังขยาย x1000 เท่า (Low vacuum mode) ขนาดตัวอย่าง 1x1 เซนติเมตร ทำการเคลือบผิวด้วยทองคำก่อนนำไปทดสอบ
3. ทดสอบสมบัติทางกลของตัวอย่าง ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง Instron universal testing machine (INSTRON 5560) ตามมาตรฐาน ASTM D 638 ใช้ขนาดตัวอย่าง 1x10 เซนติเมตรจำนวนตัวอย่างละ 10 ชิ้นงานทดสอบที่อัตราการดึง 10 มิลลิเมตรต่อนาที
4. วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของผ้าไม่ทอโดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD), Bruker AXS Model D8 Advance, Germany Diffraction patterns ของตัวอย่างวัดโดย Cu-K α radiation (ความยาวคลื่น 0.154 นาโนเมตร) ที่ 30 กิโลโวลต์ และ 10 มิลลแอมแปร์ ศึกษาในช่วงมุม 2 θ ตั้งแต่ 5 ถึง 40 องศา

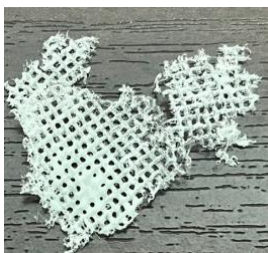





ผลการวิจัย

ผลการศึกษาลักษณะปรากฏทางกายภาพ

ผ้าไม่ทอขึ้นรูปจากพอลิเมอร์ 2 ชนิด ด้วยกระบวนการเมลต์โบลว์ในสภาวะแตกต่างกัน แสดงดังภาพที่ 3 และภาพที่ 4 สังเกตได้ว่าผ้าไม่ทอพอลิแลคติกแอซิดมีลักษณะนุ่มฟูคล้ายสำลี สำหรับผ้าไม่ทอพอลิบิวทิลีน-ซัคซิเนตมีลักษณะแข็งเปราะ และบางกว่า และไม่สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นผ้าที่สมบูรณ์ได้ในสภาวะที่ 1 และ 2 หรือที่ระยะห่างระหว่างหัวฉีดถึงตัวม้วนเก็บ 15 เซนติเมตร

Air pressure (MPa)	Die to collector distance (DCD)		
	15 cm	30 cm	45 cm
0.2			
0.4			

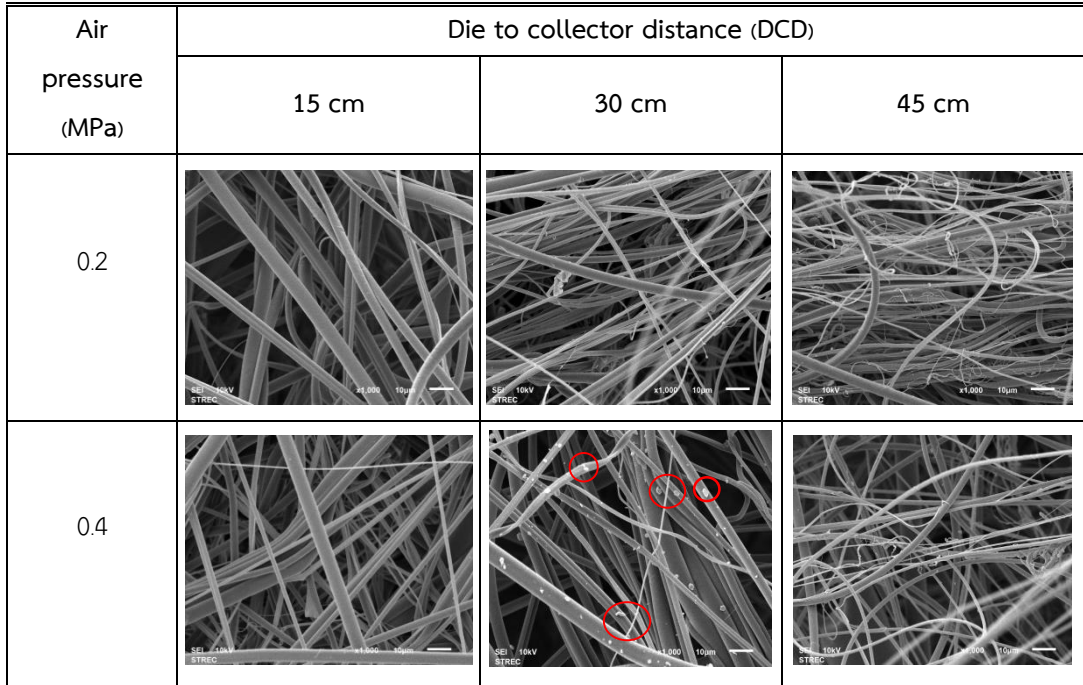
ภาพที่ 3 แสดงลักษณะของผ้าไม่ทอขึ้นรูปจากพอลิแลคติกแอซิดด้วยกระบวนการเมลต์โบลว์ขึ้นรูปที่สภาวะแตกต่างกัน

Air pressure (MPa)	Die to collector distance (DCD)		
	15 cm	30 cm	45 cm
0.2			
0.4			

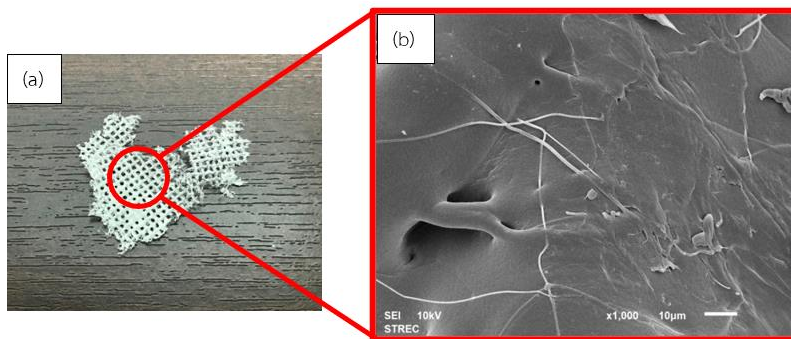
ภาพที่ 4 แสดงลักษณะของผ้าไม่ทอขึ้นรูปจากพอลิเอทิลีนซักซิเนตด้วยกระบวนการเมลต์โบลน ขึ้นรูปที่สภาวะแตกต่างกัน

การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของผ้าไม่ทอด้วยกระบวนการเมลต์โบลน ภาพที่ 5 แสดงภาพถ่ายกล้อง SEM ที่กำลังขยาย 1000 เท่าของผ้าไม่ทอจากพอลิแลคติกแอซิดขึ้นรูปด้วยกระบวนการเมลต์โบลนในสภาวะที่แตกต่างกัน 6 สภาวะ มีลักษณะเป็นเส้นใยยาวคล้ายกัน แต่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และการจัดเรียงตัวของเส้นใยแตกต่างกันออกไปตามสภาวะการขึ้นรูป พอลิแลคติกขึ้นรูปที่ระยะห่างจากหัวฉีดถึงตัวม้วนเก็บ 15 เซนติเมตร ความดันลมที่ 0.2 เมกะปาสคาล ลักษณะเส้นใยเรียงเป็นระเบียบ เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 3.19 ไมโครเมตร พอลิแลคติกขึ้นรูปที่ระยะห่างจากหัวฉีดถึงตัวม้วนเก็บ 15 เซนติเมตร ความดันลมที่ 0.4 เมกะปาสคาล มีลักษณะเส้นใยยาวเรียงเป็นระเบียบเช่นกัน เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2.95 ไมโครเมตร ซึ่งเล็กกว่าสภาวะแรก พอลิแลคติกขึ้นรูปที่ระยะห่างจากหัวฉีดถึงตัวม้วนเก็บ 30 เซนติเมตร ความดันลมที่ 0.2 เมกะปาสคาล เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2.79 ไมโครเมตร พอลิแลคติกขึ้นรูปที่ระยะห่างจากหัวฉีดถึงตัวม้วนเก็บ 30 เซนติเมตร ความดันลมที่ 0.4 เมกะปาสคาล เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 3.46 ไมโครเมตร เมื่อสังเกตจากภาพในสภาวะนี้มีหยดเส้นใยเล็กๆ เกาะอยู่บริเวณเส้นใยทั้งนี้อาจเป็นเพราะความกดอากาศหรือความดันลมที่สูงเกินไปทำให้เส้นใยสลายหาย และสร้างหยดเส้นใยเล็กๆ (Droplets, Flies) ออกมา และมาถูกรวมเข้ากับเส้นใย (Yahya & Olos, 2021) ผ้าไม่ทอขึ้นรูปที่ระยะห่างจากหัวฉีดถึงตัวม้วนเก็บ 45 เซนติเมตร ความดันลมที่ 0.2 เมกะปาสคาล ได้เส้นใยยาวมีลักษณะโค้งงอจัดเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ

2.77 ไมโครเมตร และพอลิแลคติกขึ้นรูปที่ระยะห่างจากหัวฉีดถึงตัวม้วนเก็บ 45 เซนติเมตร ความดันลมที่ 0.4 เมกะปาสคาล เส้นใยมีความโค้งงอคล้ายกับภาพก่อนหน้านี้ เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2.25 ไมโครเมตร



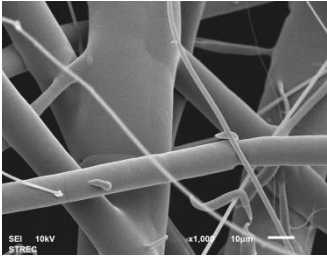
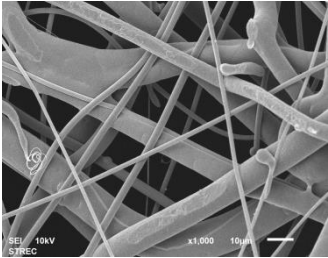
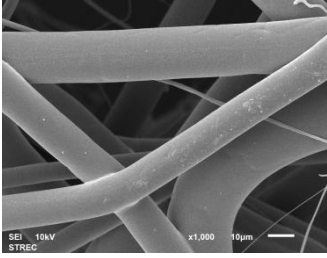
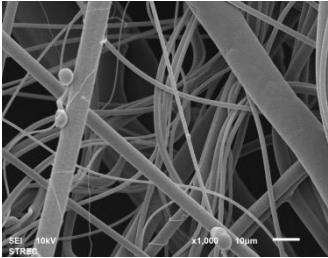
ภาพที่ 5 รูปร่างสัณฐานของผ้าไม่ทอขึ้นรูปจากพอลิแลคติกแอซิดด้วยกระบวนการเมลต์โบลว์น ขึ้นรูปที่สภาวะแตกต่างกัน



ภาพที่ 6 ตัวอย่างชิ้นงานพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตขึ้นรูปด้วยกระบวนการเมลต์โบลว์น ระยะห่างจากหัวฉีดถึงตัวม้วนเก็บ 15 เซนติเมตร ความดันลม 0.2 เมกะปาสคาล (a) ภาพจากแสงจริง (b) กำลังขยาย 1000 เท่า

การขึ้นรูปผ้าไม่ทอจากพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่ระยะห่างจากหัวฉีดถึงตัวม้วนเก็บ 15 เซนติเมตร ความดันลมที่ 0.2 และ 0.4 เมกะปาสคาล ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นผ้าได้อย่างสมบูรณ์ แสดงดังภาพที่ 6 (a) เนื่องจากระยะที่ใกล้เกินไป กระแสพอลิเมอร์ที่ถูกหลอมเหลวใช้เวลาในการแข็งตัวหรือเกิดผลึกได้ไม่ทันเมื่อ

พอลิเมอร์กระทบกับตัวเก็บเส้นใยขณะนั้นพอลิเมอร์ยังมีลักษณะเหนียวหนืดอยู่และถูกรวมตัวเป็นก้อนเส้นใยขนาดใหญ่ลักษณะดังภาพที่ 6 (b)

Air pressure (MPa)	Die to collector distance (DCD)	
	30 cm	45 cm
0.2		
0.4		

ภาพที่ 7 รูปร่างสัณฐานของผ้าไม่ทอจากพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นผ้าได้อย่างสมบูรณ์ ด้วยกระบวนการเมลต์โบลว์นที่สภาวะแตกต่างกัน

ภาพที่ 7 แสดงภาพของผ้าไม่ทอจากพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตขึ้นรูปด้วยกระบวนการเมลต์โบลว์นในสภาวะที่แตกต่างกัน 4 สภาวะ มีลักษณะเป็นเส้นใยยาวคล้ายกัน ขนาดของเส้นใยค่อนข้างใหญ่ พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ขึ้นรูปที่ระยะห่างจากหัวฉีดถึงตัวม้วนเก็บ 30 เซนติเมตร ความดันลมที่ 0.2 เมกะปาสคาล เส้นใยมีขนาดใหญ่มาก มีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยประมาณ 11.80 ไมโครเมตร พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตขึ้นรูปที่ระยะห่างจากหัวฉีดถึงตัวม้วนเก็บ 30 เซนติเมตร ความดันลมที่ 0.4 เมกะปาสคาล เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยประมาณ 6.79 ไมโครเมตร พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตขึ้นรูปที่ระยะห่างจากหัวฉีดถึงตัวม้วนเก็บ 45 เซนติเมตร ความดันลมที่ 0.2 เมกะปาสคาล เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยประมาณ 11.82 ไมโครเมตร พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตขึ้นรูปที่ระยะห่างจากหัวฉีดถึงตัวม้วนเก็บ 45 เซนติเมตร ความดันลมที่ 0.4 เมกะปาสคาล เส้นใยมีขนาดเล็กกว่าสภาวะอื่น เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยประมาณ 4.21 ไมโครเมตร

ตารางที่ 3 ตารางสรุปค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใยที่สภาวะแตกต่างกัน

Sample code		Conditions		Diameter (μm)
		DCD (cm)	Air pressure (MPa)	
Poly lactic acid (PLA)	PLA-1	15	0.2	3.19
	PLA-2	15	0.4	2.95
	PLA-3	30	0.2	2.79
	PLA-4	30	0.4	3.46
	PLA-5	45	0.2	2.77
	PLA-6	45	0.4	2.25
Polybutylene succinate (PBS)	PBS-1	15	0.2	-
	PBS-2	15	0.4	-
	PBS-3	30	0.2	11.80
	PBS-4	30	0.4	6.79
	PBS-5	45	0.2	11.82
	PBS-6	45	0.4	4.21

เมื่อพิจารณารูปร่างสัณฐานและวิเคราะห์อิทธิพลในกระบวนการผลิต พบว่า ชนิดของพอลิเมอร์ส่งผลต่อรูปร่างสัณฐานของผ้าไม่ทออย่างชัดเจน คือ เส้นใยที่ได้จากผ้าพอลิแลคติกแอซิด มีขนาดเล็กและเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยมีขนาดที่สม่ำเสมอว่าผ้าพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต นอกจากนี้ ระยะห่างจากหัวฉีดถึงตัวม้วนเก็บยังมีผลกระทบโดยตรงกับขนาดของเส้นใย คือ เมื่อเพิ่มระยะห่างจากหัวฉีดถึงตัวม้วนเก็บเป็น 30 และ 45 เซนติเมตร ขนาดเส้นใยของผ้าไม่ทอจากพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิดมีแนวโน้มลดลงอย่างเห็นได้ชัด รวมถึงความดันลมที่เพิ่มขึ้นขนาดเส้นใยก็มีแนวโน้มลดลงเช่นกัน

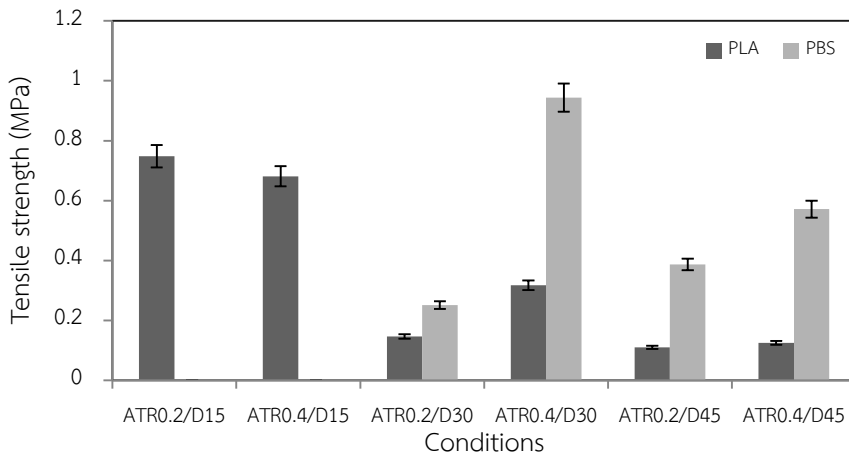
ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล

การทดสอบสมบัติทางกลผ้าไม่ทอ ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง (Instron universal testing machine (INSTRON 5560)) โดยจะทดสอบชิ้นงานที่สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นผ้าสมบูรณ์เท่านั้น ผ้าไม่ทอจากพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่สภาวะ 1 และ 2 ไม่สามารถทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงได้ ผลการทดสอบความทนต่อแรงดึง (Tensile strength) และ ร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด (%Elongation at break) ของผ้าไม่ทอแสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 สมบัติเชิงกลของผ้าไม่ทอจากพอลิเมอร์ 2 ชนิดผลิตด้วยกระบวนการเมลต์โบลว์น

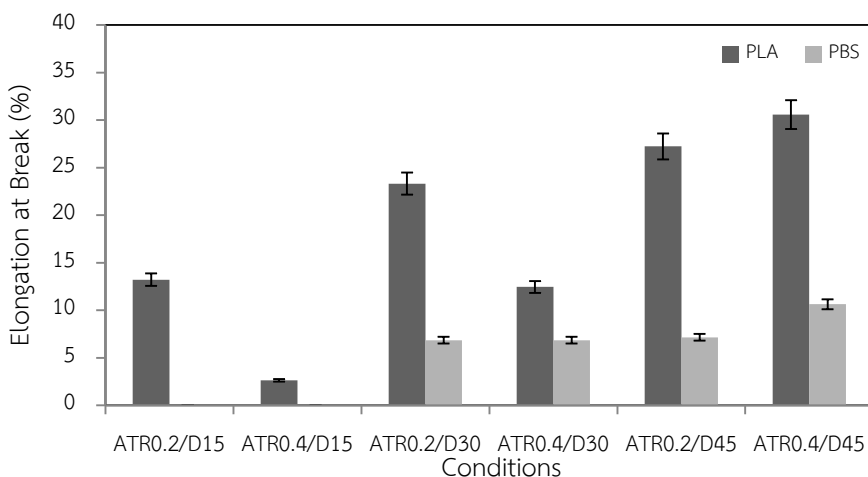
Polymers	Condition		Tensile strength (MPa)	%Elongation
	Air pressure (MPa)	DCD (cm)		
Poly lactic acid (PLA)	0.2	15	0.75 ± 0.04	13.22 ± 0.66
	0.4	15	0.68 ± 0.03	2.63 ± 0.13
	0.2	30	0.15 ± 0.01	23.32 ± 1.16
	0.4	30	0.32 ± 0.02	12.45 ± 0.62
	0.2	45	0.11 ± 0.01	27.24 ± 1.36
	0.4	45	0.13 ± 0.01	30.58 ± 1.53
Polybutylene succinate (PBS)	0.2	15	-	-
	0.4	15	-	-
	0.2	30	0.25 ± 0.01	6.86 ± 0.34
	0.4	30	0.95 ± 0.05	6.85 ± 0.34
	0.2	45	0.39 ± 0.02	7.16 ± 0.36
	0.4	45	0.57 ± 0.03	10.63 ± 0.53

จากการทดสอบแสดงผลการทดสอบในภาพที่ 8 ค่าความสามารถในการทนต่อแรงดึง (Tensile strength) ของผ้าไม่ทอจากพอลิแลคติกแอซิดและ พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตขึ้นรูปด้วยกระบวนการเมลต์โบลว์น พบว่า ผ้าไม่ทอจากพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่สภาวะที่ 4 มีความสามารถในการทนต่อแรงดึงมากที่สุด คือ 0.95 เมกะปาสคาล และเมื่อสังเกตภาพรวมของกราฟผ้าไม่ทอจากพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีค่าความสามารถในการทนต่อแรงดึงสูงกว่าผ้าไม่ทอจากพอลิแลคติกแอซิดมากในทุกสภาวะที่สามารถทดสอบได้ เมื่อพิจารณาผลกระทบของความดันลม พบว่าความดันลมที่มากขึ้นส่งผลให้ความสามารถในการทนต่อแรงดึงของผ้ามีแนวโน้มสูงขึ้น และพิจารณาผลกระทบจากระยะห่างจากหัวฉีดถึงตัวม้วนเก็บ สำหรับผ้าไม่ทอพอลิแลคติกแอซิดมีค่าความสามารถทนต่อแรงดึงสูงที่ระยะห่างจากหัวฉีดถึงตัวม้วนเก็บ 15 เซนติเมตร และมีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะห่างจากหัวฉีดถึงตัวม้วนเก็บ เพิ่มขึ้นต่าง ในทางกลับกันผ้าจากพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีค่าความสามารถทนต่อแรงดึงมากกว่าที่ระยะห่างจากหัวฉีดถึงตัวม้วนเก็บ 30 เซนติเมตร



ภาพที่ 8 ความสามารถในการทนต่อแรงดึงของผ้าพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ที่สภาวะการขึ้นรูปแตกต่างกัน

ภาพที่ 9 แสดงค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด (%Elongation at break) ของผ้าไม่ทอจากพอลิแลคติกแอซิดและ พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต พิจารณาชนิดของพอลิเมอร์ที่ใช้ในการขึ้นรูป พบว่า ผ้าจากพอลิแลคติกแอซิดมีร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดสูงกว่าผ้าจากพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตในทุกๆ สภาวะ นอกจากนี้แล้วอิทธิพลของความดันลมยังส่งผลต่อร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของผ้า คือ เมื่อความดันลมสูงขึ้นผ้าที่ได้มีแนวโน้มของร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดสูงขึ้นด้วย และเมื่อพิจารณาผลกระทบของระยะห่างจากหัวฉีดถึงตัวม้วนเก็บ พบว่า ร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของผ้าจากพอลิแลคติกแอซิดมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มระยะห่างจากหัวฉีดถึงตัวม้วนเก็บเช่นเดียวกับผ้าจากพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีแนวโน้มสูงขึ้นเล็กน้อยเมื่อเพิ่มระยะห่างจากหัวฉีดถึงตัวม้วนเก็บ

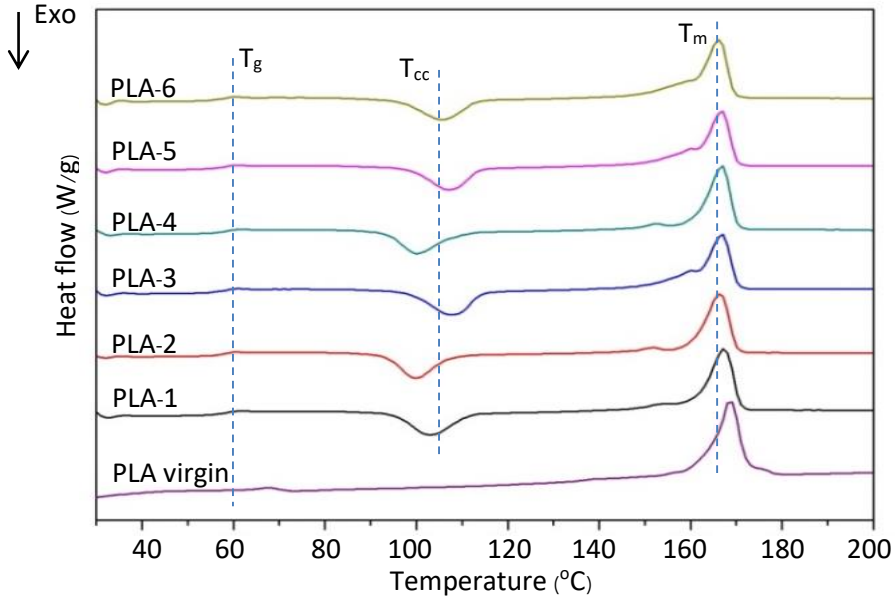


ภาพที่ 9 ค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด ของผ้าพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ที่สภาวะการขึ้นรูปแตกต่างกัน

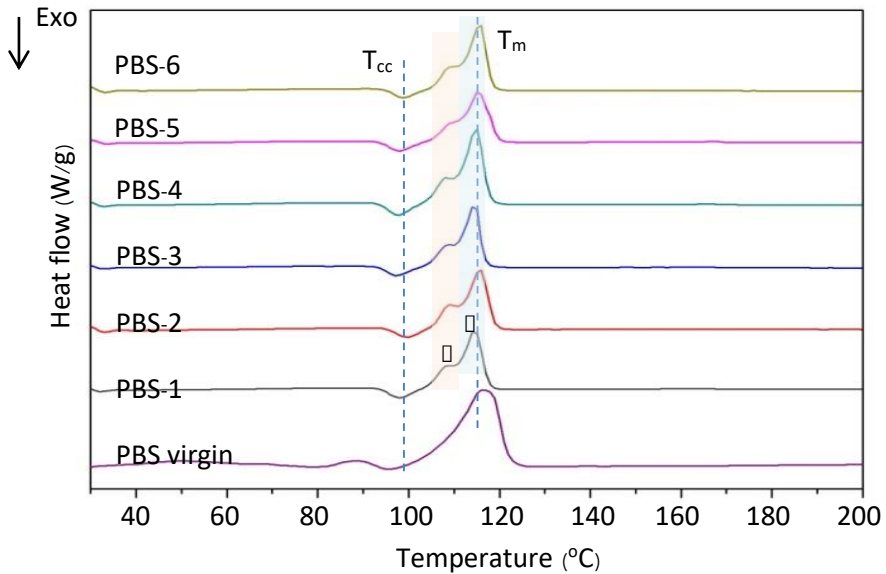
ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน

การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (DSC) ของเม็ด พอลิแลคติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตก่อนขึ้นรูป และผ้าไม่ทอ ภาพที่ 10 (a)-(b) และสรุปตารางที่ 5 อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, T_g) ของเม็ด PLA บริสุทธิ์อยู่ที่ประมาณ 68.10 °C. ในทางตรงกันข้าม อุณหภูมิดังกล่าวลดลงเหลือประมาณ 60.10 °C ในผ้าไม่ทอของ PLA ซึ่งแทบจะไม่เปลี่ยนแปลงเลยในทั้ง 6 สภาวะ เกี่ยวกับความกดอากาศที่แตกต่างกันและ DCD ที่ใช้ในการก่อตัวเส้นใยโดย กระบวนการเมลต์โบลว์ ดังนั้นกล่าวได้ว่ากระบวนการเมลต์โบลว์ส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของสายโซ่โพลีเมอร์ PLA แต่ไม่ขึ้นอยู่กับการ DCD และความดันอากาศที่ใช้ นอกจากนี้กราฟเส้นโค้ง DSC ของตัวอย่างทั้ง 6 สภาวะที่แตกต่างกันของ PLA แสดงจุดสูงสุดของการคายความร้อนซึ่งสอดคล้องกับอุณหภูมิการตกผลึกเย็น (Cold crystallization temperature, T_{cc}) ของกระบวนการ ซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ และการจัดเรียงใหม่ของสายโซ่ โพลีเมอร์ PLA ถึงกระนั้น T_{cc} ก็แตกต่างกันไปตามตัวอย่างผ้าไม่ทอของ PLA ที่แตกต่างกัน เม็ด PLA บริสุทธิ์และ ผ้าไม่ทอของ PLA แสดงพฤติกรรมการตกผลึกหลายอย่าง แต่ค่าสูงสุดของ T_{cc} ไม่ปรากฏในเม็ด PLA บริสุทธิ์ เนื่องจากการตกผลึกเกิดขึ้นใน PLA ที่ผ่านกระบวนการเมลต์โบลว์ (ผ้าไม่ทอของ PLA) และเงื่อนไขของการขึ้น รูปในกระบวนการเมลต์โบลว์ที่แตกต่างกัน นำไปสู่ค่า T_{cc} ที่แตกต่างกัน อุณหภูมิหลอมเหลวของผลึก (T_m) มี ค่าประมาณเท่ากันสำหรับผ้าไม่ทอ PLA ทั้ง 6 สภาวะ ประมาณ 167 °C แตกต่างจาก T_m ของเม็ด PLA เล็กน้อย การตกผลึกซ้ำของผลึกที่มีความคงตัวทางความร้อนที่แตกต่างกันนั้นเชื่อมโยงกับการอธิบายจุดสูงสุดหรือพีค สูงสุดของ T_m พีคของการดูดกลืนความร้อนเกิดจากผลึกที่แตกต่างกัน 3 ประเภท การหลอมซ้ำของผลึกที่เกิดขึ้น ระหว่างการตกผลึกซ้ำ และพีคสูงสุดของการอบอ่อน (Annealing peak) ซึ่งแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของ เศษส่วนอสัณฐานแข็ง (RAF) จาก RAF ที่มีลักษณะคล้ายของแข็งไปเป็นลักษณะคล้ายของเหลว RAF การค้นพบ นี้สอดคล้องกับการวิจัยก่อนหน้านี้ (Puchalski, et al., 2019) สำหรับ PBS และเม็ดบริสุทธิ์และผ้าไม่ทอของ PBS และ PLA ต่างๆ มักจะแสดงการเปลี่ยนแปลง T_{cc} และ T_m ที่แตกต่างกัน ดังภาพที่ 10 (b) เมื่อวิเคราะห์ ผลกระทบของ DCD และความดันอากาศต่อพฤติกรรมทางความร้อน พบว่าผ้าไม่ทอ PBS และ PLA แสดง พฤติกรรมทางความร้อนที่คล้ายกัน โดย T_{cc} ของเม็ด PBS บริสุทธิ์อยู่ที่ 95.4°C และเพิ่มขึ้นเป็น 97-98 °C ในผ้า ไม่ทอ PBS โดยธรรมชาติแล้วสายโซ่โพลีเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่าควรจะตกผลึกก่อน เนื่องจากอัตราการ เคลื่อนที่และการแพร่กระจายของสายโซ่จะสูงกว่าที่อุณหภูมิที่กำหนด ดังนั้นกระบวนการเมลต์โบลว์ ส่งผล กระบวนการเคลื่อนที่ของสายโซ่โพลีเมอร์ PBS โดยการเปลี่ยนแปลงใน DCD และความดันอากาศมีผลกระทบ เล็กน้อยและไม่มีผลกระทบที่มีนัยสำคัญต่อ T_{cc} ของผ้าไม่ทอ PBS (Chae, H.G., et al., 2004) กราฟการหลอม ละลายในเวลาต่อมาของเม็ด PBS บริสุทธิ์ และผ้าไม่ทอ PBS ที่แตกต่างกันเผยให้เห็นว่า T_m ของเม็ด PBS บริสุทธิ์ คือ 116.4 °C จากนั้นลดลงเหลือ 114 °C ในผ้าไม่ทอ PBS นั่นคือกระบวนการเมลต์โบลว์ส่งผลต่อการ ละลายของ PBS นอกจากนี้พบการรวมกันของ α - และ β -crystal เชื่อมต่อกับพีคของการหลอมเหลว การ ปรากฏที่ซับซ้อนของจุดหลอมเหลวสองจุดน่าจะเกิดจากการปฏิสัมพันธ์ของการเปลี่ยนเฟส β - ถึง α และกลไก

การตกผลึกใหม่ เชื่อกันว่ากลไกการเปลี่ยนเฟสที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการให้ความร้อนทำให้ T_m ของ β -crystal สูงกว่าของ α -one อย่างมาก (Yang, et al., 2011)



(a)



(b)

ภาพที่ 10 กราฟสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ของผ้าไม่ทอ ขึ้นรูปด้วยกระบวนการเมลดโบล์วินที่สภาวะการขึ้นรูปที่แตกต่างกัน

การวิเคราะห์การให้ความร้อน DSC ของวัสดุที่ศึกษาสรุปไว้ในตารางที่ 5 ในแง่ของความแปรผันโดยประมาณใน T_g , T_m , อุณหภูมิการตกผลึก (T_c), T_{cc} และระดับความเป็นผลึก (X_c) สำหรับตัวอย่างผ้าไม่ทอ PLA และ PBS ที่ศึกษา X_c ถูกคำนวณโดยใช้สมการต่อไปนี้

$$\%X_c = \frac{\Delta H_m - \Delta H_{cc}}{\Delta H_f^0} \times 100 \quad (1)$$

โดยที่ ΔH_m คือเอนทัลปีการหลอมเหลว ΔH_{cc} คือเอนทัลปีของการตกผลึกเย็น และ ΔH_f^0 คือเอนทัลปีการหลอมของโพลีเมอร์ที่เป็นผลึก 100% (เท่ากับ 93.1 J/g สำหรับ PLA (Tsuji H., 2005) และ 110.3 J/g สำหรับ PBS (Hu, et al., 2017))

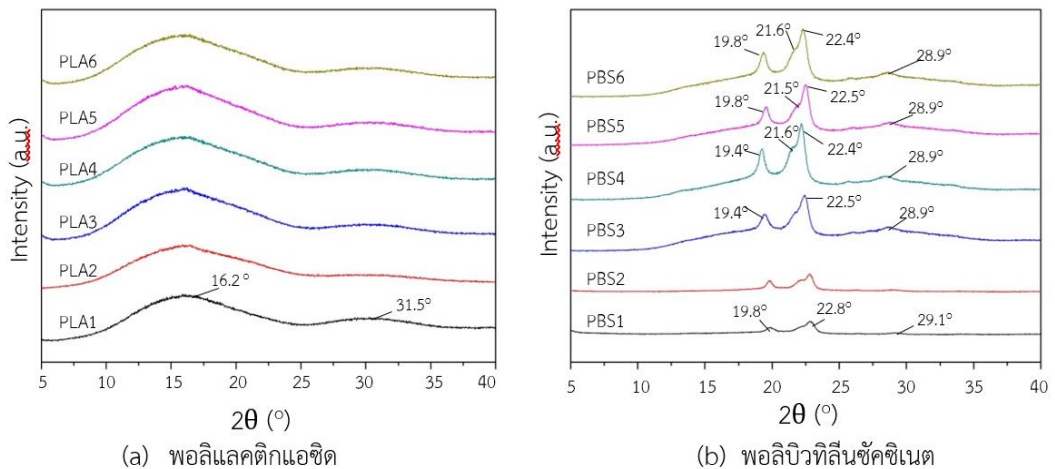
ตารางที่ 5 สมบัติทางความร้อนของเม็ดพอลิแลคติกแอซิด และ พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ผ้าไม่ทอพอลิแลคติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต

Conditions		Poly lactic acid (PLA)					Polybutylene succinate (PBS)			
Air pressure (MPa)	DCD (cm)	T_g (°C)	T_m (°C)	T_{cc} (°C)	ΔH_m (J/g)	X_c (%)	T_{cc} (°C)	T_m (°C)	ΔH_m (J/g)	X_c (%)
Neat		68.1	169.2	-	41.3	-	95.4	116.4	77.9	61.93
0.2	15	60.1	167.1	105.8	54.7	15.80	98.1	114.5	72.0	56.80
0.4	15	60.2	167.3	100.7	51.3	21.03	98.7	114.6	80.4	64.53
0.2	30	60.0	167.3	109.0	42.4	10.05	97.3	114.5	70.9	55.51
0.4	30	60.1	167.0	100.9	44.3	13.34	97.4	114.8	75.7	59.61
0.2	45	60.2	167.0	108.9	50.3	18.93	97.1	114.4	72.3	56.34
0.4	45	60.0	167.2	106.5	52.23	20.91	97.5	114.6	80.2	64.88

ผลการทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

จากผลการทดสอบลักษณะโครงสร้างผลึกของผ้าพอลิแลคติกแอซิด และผ้าพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ด้วยการทดสอบเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ภาพที่ 4 แสดงผลรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของผ้าพอลิแลคติกแอซิด ทั้ง 6 สภาวะ มีลักษณะพีกกว้าง (Broad) ซึ่งให้เห็นว่าส่วนใหญ่พอลิแลคติกแอซิดอยู่ในสถานะอสัณฐานหรือปริมาณของผลึกต่ำ อย่างไรก็ตามผ้าพอลิแลคติกแอซิดทั้ง 6 สภาวะ พบพีคการเลี้ยวเบนที่สามารถสังเกตสองจุดที่ $2\theta = 16.2^\circ$ และ 31.5° เหมือนกัน สอดคล้องกับพีคการเลี้ยวเบนของเส้นใยพอลิแลคติกแอซิดบริสุทธิ์ (Elwathig, Salah, You & Muhuo, 2018) สำหรับผ้าพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตแสดงผลรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ในภาพที่ 4 พบว่ามีความเป็นผลึกมากกว่าผ้าพอลิแลคติกแอซิดอย่างชัดเจน โดยกราฟของ PBS1 และ PBS2 ปรากฏพีคที่ความเข้มสูงสุดที่ $2\theta = 22.8^\circ$ และพีคที่มีความเข้มน้อยลงมา คือ 19.8° และ 29.1° มีความเป็นผลึกน้อยกว่าสภาวะอื่นอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากทั้ง 2 สภาวะมีระยะการขึ้นรูป (DCD) ที่ 15 เซนติเมตรซึ่ง

ใกล้เกินไป พอลิเมอร์ไม่สามารถจัดเรียงผลึกได้ทันขณะขึ้นรูป ส่งผลให้ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นผ้าที่สมบูรณ์ได้และมีความเป็นผลึกน้อยกว่าสภาวะอื่น ในขณะที่เดียวกันการเพิ่มระยะห่างจากหัวฉีดถึงตัวม้วนเก็บมากขึ้นเป็น 30 และ 45 เซนติเมตร ในตัวอย่าง PBS3 PBS4 PBS5 PBS6 ส่งผลให้ความเป็นผลึกมากขึ้นดังกราฟ แสดงให้เห็นว่าระยะห่างจากหัวฉีดถึงตัวม้วนเก็บ มีผลกระทบต่อความเป็นผลึกของผ้าพอลิবিทิลีนซัคซิเนต นอกจากนี้แล้วความดันลมยังมีผลต่อความเป็นผลึกของผ้าพอลิবিทิลีนซัคซิเนตเช่นกัน สังเกตได้จากกราฟ PBS4 และPBS6 เป็นการขึ้นรูปที่ความดันลม 0.4 เมกะปาสคาล มีพีคความเข้มสูงกว่าสภาวะที่ความดันลม 0.2 เมกะปาสคาลอย่างชัดเจน และปรากฏพีคที่ความเข้มสูงสุดที่ $2\theta=22.5^\circ$ และพีคที่มีความเข้มน้อยลงมา คือ 19.8° 21.6° และ 29.1° สอดคล้องกับพีคการเลี้ยวเบนของเส้นใยพอลิแลคติกแอสซิติก (Chaiwutthinan, 2014) และสามารถกล่าวได้ว่าการเพิ่มระยะห่างจากหัวฉีดถึงตัวม้วนเก็บ และความดันลมช่วยเพิ่มปริมาณความเป็นผลึกของผ้าพอลิবিทิลีนซัคซิเนต



ภาพที่ 8 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของผ้าไม่ทอ ขึ้นรูปด้วยกระบวนการเมลต์โบลวินที่สภาวะการขึ้นรูปที่แตกต่างกัน

อภิปรายผล

จากการศึกษาการเตรียมผ้าไม่ทอด้วยกระบวนการเมลต์โบลวิน และศึกษาอิทธิพลของกระบวนการผลิต ได้แก่ ชนิดของพอลิเมอร์ คือ พอลิแลคติกแอสซิติก และพอลิবিทิลีนซัคซิเนต ความดันลมที่ใช้ในการขึ้นรูป 0.2 และ 0.4 เมกะปาสคาลและ ระยะห่างจากหัวฉีดถึงตัวม้วนเก็บที่ 15 30 และ 45 เซนติเมตร จากนั้นศึกษาสมบัติทางความร้อน รูปร่างสันฐาน สมบัติทางกล โครงสร้างผลึก และหมู่ฟังก์ชันของผ้าไม่ทอ สามารถสรุปได้ว่า พอลิแลคติกแอสซิติก สามารถขึ้นรูปเป็นผ้าไม่ถักทอได้ดีทั้ง 6 สภาวะ สำหรับพอลิবিทิลีนซัคซิเนต ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นเส้นใยที่สมบูรณ์ได้ในระยะ 15 เซนติเมตร เนื่องจากพอลิবিทิลีนซัคซิเนต มีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ค่อนข้างต่ำทำให้พอลิเมอร์ที่ถูกเป่าลงบนตัวม้วนเก็บแข็งตัวไม่ทันในระยะนี้ สอดคล้องกับผลการศึกษาศมบัติทางความร้อน ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (DSC) ซึ่งให้เห็นว่า

พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตสามารถเกิดผลึกได้มากกว่าเมื่อเพิ่มระยะห่างของหัวฉีดกับตัวหมุนเก็บ การศึกษารูปร่าง สัณฐานพบว่าผ้าพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีขนาดเส้นใยใหญ่กว่าผ้าพอลิแลคติกแอซิดอย่างชัดเจน นอกจากนี้การเพิ่มความดันลม และระยะห่างจากหัวฉีดถึงตัวหมุนเก็บส่งผลให้เส้นใยที่ได้จากผ้าไม่ทอของพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิดมีขนาดเล็กลง นอกจากนี้ผลทดสอบสมบัติทางกล ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง ยังชี้ให้เห็นว่า ความสามารถในการทนต่อแรงดึงและ ร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด มีแนวโน้มมากขึ้นเมื่อเพิ่มความดันลมในการขึ้นรูป โดยที่ผ้าพอลิแลคติกแอซิดและ ผ้าพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต มีความสามารถทนแรงดึงสูงสุดที่ ระยะห่างหัวฉีดกับตัวหมุนเก็บ 15 และ 30 เซนติเมตรตามลำดับ และร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดมากสุดในระยะ 45 เซนติเมตร ผลจากการศึกษาโครงสร้างผลึกพบว่าผ้าพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีความเป็นผลึกมากกว่าผ้าพอลิแลคติกแอซิด และปริมาณผลึกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มระยะห่างของหัวฉีดกับตัวหมุนเก็บ ดังนั้นสามารถกล่าวได้ว่าอิทธิพลของกระบวนการผลิต ได้แก่ ชนิดของพอลิเมอร์ คือ พอลิแลคติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ความดันอากาศที่ใช้ในการขึ้นรูป และระยะห่างจากหัวฉีดถึงตัวหมุนเก็บ ล้วนมีผลกระทบต่อขนาดเส้นใยของผ้า สมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกล และโครงสร้างผลึกอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตามผ้าไม่ทอสามารถเตรียมได้จากพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิดด้วยกระบวนการเมลต์โบลว์น และสามารถพัฒนาไปใช้สำหรับอุตสาหกรรมสิ่งทอต่อไปได้

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณทุนสนับสนุนการวิจัย ทุนพัฒนาบัณฑิต (วช.) จากสำนักงานวิจัยแห่งชาติ ที่ให้การสนับสนุนทุนในการทำวิจัย ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยราชภัฏวชิรญาณบุรี และมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ที่อำนวยความสะดวกทางด้านเครื่องมือ และอุปกรณ์ต่างๆ ในการทำงานวิจัย

References

- Bresee, R.R. & Qureshi, U.A. (2002). Fiber motion near the collector during melt blowing : part2-fly formation. **International nonwovens journal**, **11**(3), 21-27.
- Chae, H.G., Park, S.H., Kim, B.C. & Kim, D.K. (2004). Effect of methyl substitution of the ethylene unit on the physical properties of poly (butylene succinate). **J. Polym. Sci. Part B Polym. Phys**, **42**, 1759-1766.
- Chuayjulit, S., Chaiwutthinan, P., Samutthong, S., Saravari, O. & Boonmahitthisud, A. (2014). Effects of Poly (butylene succinate) and Calcium Carbonate on the Physical Properties of Plasticized Poly(vinyl chloride). **Journal of Metals, Materials and Minerals**, **24**(2), 15-21.
- Chaiwutthinan, P., Pimpan, V., Chuayjulit, S. & Leejarkpai, T. (2015). Biodegradable Plastics Prepared from Poly (lactic acid), Poly(butylene succinate) and Microcrystalline Cellulose Extracted from Waste-Cotton Fabric with a Chain Extender. **Journal of Environmental Polymer Degradation**, **23**(1), 114-125.
- Chen, G.Q. & Patel, M.K. (2012). Plastics derived from biological sources: present and future: A technical and environmental review. **Chemical Reviews**, **112**, 2082-99.
- Duran, K., Deniz, D., Gurkan, O. & Kevser, K. (2013). Investigation of the physical properties of melt blown nonwovens for air filtration. **Journal of textile & apparel**, **23**(2), 136-142.
- Elwathig, H., Salah, E., You, W. & Muhuo, Y. (2017). Biodegradable poly (lactic acid)/poly (butylene succinate) fibers with high elongation for health care products. **Textile Research Journal**, **88**(15), 1735-1744.
- Hu, X., Su, T., Pan, W., Li, P. & Wang, Z. (2017). Difference in solid-state properties and enzymatic degradation of three kinds of poly (butylene succinate)/cellulose blends. **RSC Adv**, **7**, 35496-35503.
- Jompang, L., Supaphorn, T., Jessada, W., Prayoon, S., Chiyaprek, A., Tirapong, C., Narin, K., Narongchai, O. & Narongchai, O. (2013). Poly (lactic acid) and poly (butylene succinate) blend fibers prepared by melt spinning technique. **Energy Procedia**, **34**(5), 493-499.
- Kathryn, C.D. (2013). Overview and analysis of the meltblown process and parameters. **Journal of textile & apparel, Technology and management**, **6**(1), 1-21.

- Nor, F.Z. & Mariatti, J. (2020) A review on degradation mechanisms of polylactic acid: hydrolytic photodegradative microbial and enzymatic degradation. **Polymer engineering and science**, **60**, 2061-2075.
- Peng, M., Jia, H. & Jiang, L. (2019). Study on structure and property of PP/TPU meltblown nonwovens. **Journal Text Inst**, **110**, 468-475.
- Puchalski, M., Siwek, P., Panayotov, N., Berova, M., Kowalska, S. & Krucnska, I. (2019) Influence of various climatic conditions on the structural changes of semicrystalline pla spun-bonded mulching nonwovens during outdoor composting. **Polymers**, **11**, 559.
- Shen, S., Rodion, K., Sengul, T. & Stephan, K. (2013). Polylactide (PLA) and its blends with poly(butylene succinate) (PBS): a brief review. **Journal Polymers (Basel)**, **11**(7), 1193.
- Tsuji, H. (2005). Poly (lactide) stereocomplexes : Formation, structure, properties, degradation, and applications. **Macromol. Biosci**, **5**, 569–597.
- Yahya, K. & Olos, M. (2021). Revealing of process-structure-property relationships of fine polypropylene fiber mats generated via melt blowing. **Polymers Advanced Technologies**, **10**(32), 5270.
- Yang, J., Pan, P., Hua, L., Xie, Y., Dong, T., Zhu, B., Inoue, Y. & Feng, X. (2011). Fractionated crystallization, polymorphic crystalline structure, and spherulite morphology of poly (butylene adipate) in its miscible blend with poly (butylene succinate). **Polymer**, **52**, 3460.3468.
- Yalcin Y. (2015). Effect of air quenching on characteristics of thermoplastic polyurethane meltblown nonwoven. **Journal textile and apparel**, **25**(3), 236-245.



การพัฒนาลักษณะเฉพาะของหมึกนาโนจากซิลิคอนคาร์ไบด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวป์/
อนุภาคนาโนเงินสังเคราะห์ สำหรับตรวจวัดสารฆ่าแมลง

Development of Composite with Synthesized Silver Nanoparticles for
Pesticide Residuals Detection

วิชญา ศิริโสม*

Wichaya Sirisom

สุรเชษฐ์ ตุ่มมี**

Surachet Toommee

สมยศ คงคาร์ตัน***

Somyote Kongkarat

ชิราวุฒิ เพชรเย็น***

Chiravoot Pechyen

Received : November 3, 2022

Revised : September 11, 2023

Accepted : March 1, 2024

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ ได้ศึกษาการพัฒนาลักษณะเฉพาะของหมึกนาโน จากซิลิคอนคาร์ไบด์ มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวป์ และอนุภาคนาโนเงินสังเคราะห์ สำหรับการตรวจจับสารฆ่าแมลงตกค้าง สารกำจัดศัตรูพืช ถูกใช้อย่างกว้างขวางในเกษตรกรรมเพื่อควบคุมคุณภาพ วัชพืช และแมลงศัตรูพืช เพื่อให้ตอบสนองต่อความต้องการของผู้บริโภค อย่างไรก็ตามการใช้สารกำจัดศัตรูพืชที่ไม่ถูกต้องหรือในปริมาณมากสามารถนำไปสู่การตกค้างลงบนผลผลิต หรือสิ่งแวดล้อมซึ่งจะมีผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์หรือสัตว์ได้ ในการศึกษาครั้งนี้หมึกนาโนจะประดิษฐ์ขึ้นโดยการนำซิลิคอนคาร์ไบด์ มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวป์ และอนุภาคนาโนเงินสังเคราะห์ ที่ได้จากการสังเคราะห์วิธีที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เนื่องจากใช้แป้งข้าวโพดเป็นตัวรีดิวซ์ในอัตราส่วน

*นักศึกษาลัทธิตรีวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุและสิ่งทอ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

Master of Science program students Materials and Textile Technology Faculty of Science and Technology Thammasat University(Corresponding Author) e-mail: s.toommee@gmail.com

**อาจารย์ประจำคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร

Lecturer at Faculty of Industrial Technology Kamphaeng Phet Rajabhat University

***อาจารย์ประจำสาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุและสิ่งทอ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
Lecturer in Materials and Textile Technology Faculty of Science and Technology Thammasat University

1:1:0 1:1:0.5 1:1:1 และ 1:1:2 และชั้นของโคโตซานที่ทำหน้าที่เป็นเหมือนกาวเพื่อทำให้หมึกนาโนมีความเสถียร โดยจะนำหมึกนาโนมาใช้ในส่วนของขั้วทำงาน ของการวิเคราะห์ทางไฟฟ้าเคมีโดยวิธีไซคลิกโวลแทมโมแกรม และในศึกษาและวิเคราะห์สมบัติทางด้านอื่นๆ เช่น เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ รามานสเปกโทรสโคปี และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จากผลการทดลองพบว่าการนำอนุภาคนาโนเงินสังเคราะห์มาประยุกต์ใช้ในงานทำให้ประสิทธิภาพของการนำไฟฟ้าดีกว่าก่อนการเพิ่มอนุภาคนาโนเงิน และด้วยปริมาณอัตราส่วนที่เหมาะสมจะส่งผลต่อการนำไฟฟ้าเช่นกัน ซึ่งในการศึกษานี้จึงสนใจวิธีที่สามารถตรวจวัดสารกำจัดศัตรูพืช ที่ไม่มีขั้นตอนที่ซับซ้อน ใช้เวลาไม่นาน เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ไม่ต้องใช้อุณหภูมิสูง ไม่อันตรายต่อผลผลิตในการทดสอบ และสามารถนำไปตรวจจับสารกำจัดศัตรูพืชตกค้างได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ : หมึกนาโน / มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ / ซิลิคอนคาร์ไบด์ / อนุภาคนาโนเงินสังเคราะห์ / สารกำจัดศัตรูพืชตกค้าง

ABSTRACT

The purposes of this study were to develop and characterize nano-ink for organophosphorus pesticide residue detection. Pesticides are widely applied in agriculture to control quality and limit weeds and pests to meet consumer demands. However, abuse of pesticides may lead to pesticide residue in food and the environment, damaging the health of humans and animals. In this study, The nano-ink was mainly fabricated by silicon carbide, multi-walled carbon nanotubes, synthesized silver nanoparticles was synthesized by green method with corn starch (Co-S) in ratio of 1:1:0 1:1:0.5 1:1:1 and 1:1:2 and a layer of chitosan acting as a fixing glue to stabilize this nano-ink which were used in working electrode and investigated by X-ray diffraction (XRD), Raman spectroscopy and scanning electron microscope (SEM). The results of the experiment, it was found the application of silver nanoparticles in this work resulted in better electrical conductivity than before the addition of silver nanoparticles and the ratio of silver nanoparticles will affect the electrical conductivity as well. Furthermore, the resulting manufacturing process did not require high temperatures, complex processes or did not harm vegetables in process and can be used to detect pesticide residues effectively.

Keywords : Nano-ink / Multi-walled Carbon Nanotubes / Silicon Carbide / Silver Nanoparticles / Pesticide Residuals

บทนำ

สารกำจัดศัตรูพืชหรือยาฆ่าศัตรูเป็นสิ่งที่ไม่ได้สำหรับการเพิ่มการผลิตอาหาร ยังถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในเกษตรกรยุคใหม่เพื่อควบคุมวัชพืช แมลงศัตรูพืชและควบคุมการเจริญเติบโตของพืช เพื่อตอบสนองต่อความต้องการของผู้บริโภค ในขณะที่การใช้สารกำจัดศัตรูพืชที่มากเกินไปหรือใช้ไม่ถูกต้องตามหลักการอาจนำไปสู่การตกค้างในอาหารและสิ่งแวดล้อมได้ และจะส่งผลกระทบต่อสุขภาพของผู้บริโภคและเกษตรกร (Min, 2020) สารกำจัดศัตรูพืชกลุ่ม ออร์กาโนฟอสเฟตเป็นสารสังเคราะห์ที่มีเอสเทอร์ เอไมด์ อนุพันธ์ของไทออลของฟอสฟอริก ฟอสฟอนิก ฟอสฟอโรไทโออิก หรือ กรดฟอสฟอโรไทโออิก ซึ่งถูกนำมาใช้ควบคุมศัตรูพืชทางการเกษตร, คราวเรือน หรือ แมลงศัตรูพืช โดยถูกจัดอันดับความเป็นพิษระดับหนึ่ง (เป็นพิษสูง) หรือความเป็นพิษระดับสอง (เป็นพิษปานกลาง) ตามการจำแนกประเภทของสำนักงานปกป้องสิ่งแวดล้อมสหรัฐ (Songa & Okonkwo, 2016) โดยผลกระทบจากการได้รับสารเคมีกำจัดศัตรูพืชจำพวกแมลง กลุ่มสารออร์กาโนฟอสเฟตมีฤทธิ์ขัดขวางการทำงานของระบบประสาทส่วนกลาง และระบบประสาทรอบนอก โดยจะจับกับตัวเอนไซม์โคลีนเอสเตอเรส ซึ่งมีหน้าที่ส่งสัญญาณประสาทหยุดการทำงาน ผลการจับ ตัวกับเอนไซม์ทำให้ปริมาณของเอนไซม์ลดลง และมีผลต่อกล้ามเนื้อ ต่อม และกล้ามเนื้อเรียบซึ่งควบคุมอวัยวะต่างๆ ในการทำงานมากกว่าปกติ เนื่องจากปริมาณเอนไซม์โคลีนเอสเตอเรส มีไม่มากพอที่จะหยุดการทำงาน พบอาการ ม่านตาหรี่ หายใจลำบาก เวียนศีรษะ อาเจียน มือสั่น เดินโซเซ ชัก หมดสติ ระบบกล้ามเนื้อพบอาการกล้ามเนื้ออ่อนแรง ตะคริวที่กล้ามเนื้อ ต่อมต่างๆ ต่อมน้ำลายขับน้ำลายออกมา มาก ต่อมเหงื่อขับเหงื่อออกมามาก (กองโรคจากการประกอบอาชีพและสิ่งแวดล้อม, 2557) ดังนั้นจึงมีการพัฒนาวิธีตรวจสอบสารตกค้างที่มีประสิทธิภาพเพื่อความปลอดภัยทางด้านอาหารและด้านสาธารณสุข โดยมักจะใช้เทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟี โครมาโตกราฟีของเหลวที่มีประสิทธิภาพสูง หรือวิธีโครมาโตกราฟีร่วมกับแมสสเปกโตรเมตรี ซึ่งวิธีเหล่านี้จะให้ข้อมูลเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณของสารตกค้างที่มีความแม่นยำสูง แต่เนื่องด้วยวิธีนี้กระบวนการเตรียมตัวอย่างจะมีความซับซ้อนและอุปกรณ์ค่อนข้างมีราคาแพง (Songa & Okonkwo, 2016) ในงานวิจัยนี้จึงต้องศึกษาพัฒนาวัสดุหุ้มระดับนาโนเพื่อตรวจสอบสารกำจัดศัตรูพืช กลุ่ม ออร์กาโนฟอสเฟต จากวัสดุคอมโพสิต ได้แก่ ซิลิคอนคาร์ไบด์, มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ และอนุภาคนาโนเงินสังเคราะห์ ซึ่งอิเล็กทรอนิกส์แปลงซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC) ได้รับความสนใจมากขึ้นในด้านเคมีไฟฟ้าเคมี การวิเคราะห์เนื่องจากคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีที่เสถียร มีการนำไฟฟ้าสูง และมี aspect ratio สูง background current ต่ำ ตัวเร่งตัวเร่ง ปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ดีเยี่ยม ความสามารถทางชีวภาพที่ดี คุณสมบัติการดูดซับที่ดี มีฤทธิ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาคด้วยไฟฟ้าที่ชัดเจน และไม่มีความเป็นพิษ จากการศึกษาซิลิคอนคาร์ไบด์ได้ถูกนำมาเป็นส่วนประกอบในการสร้างเซนเซอร์เคมีไฟฟ้า จากอิเล็กโทรดคาร์บอนกลาส ดัดแปลงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์เพื่อตรวจสอบพาราไรออนโดยตรง แสดงอัตราการตอบสนองที่สูงด้วยช่วงการตรวจจับเชิงเส้นที่กว้างและความสามารถในการดูดซับยาฆ่าแมลงอย่างพาราไรออนที่มันคง (Bakytkarim, et al., 2019; Iannotta, S., et al., 2016; Yu, Z.-Y., et al., 2005) อีกทั้งในการศึกษาได้นำวิธี Drop casting มาใช้ในงาน เนื่องจากเป็นเทคนิคที่สะดวกที่สุด สำหรับการสะสมของวัสดุนาโนบนพื้นผิวอิเล็กโทรด ในทางห้องปฏิบัติการ จะพิจารณาถึงสารยึดเกาะที่ตรึงสารแขวนลอยบนพื้นผิวอิเล็กโทรด โคโตะซาน

มักถูกใช้เป็นสารยึดเกาะในการเตรียมอิเล็กโทรดด้วยวิธี Drop casting (Vellakkat, M.; Hundekal, D, 2016; Mazurków, J.; Kusior, A.; Radecka, M., 2021; Rashed, A, et al., 2022) คุณสมบัติโคโตซาน ด้วยความที่ไม่มีความเป็นพิษ การยึดเกาะที่ดีพร้อมการขึ้นรูปฟิล์มที่ดีเยี่ยมความสามารถ ความแข็งแรงเชิงกลสูง การซึมผ่านสูง และความสามารถในการดูดซับที่เยี่ยมของไอออนของโลหะ ซึ่งดีต่อการตรวจจับ (Mazurków, J., et al., 2021) นอกจากนี้ ความแตกต่างของน้ำหนักโมเลกุล และมีกระบวนการลดหมู่อะซีทิล (deacetylation) ส่งผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีด้วยเช่นกัน (Ratuchne, F., et al., 2018) ตัวอย่างเช่น ในรายงานนี้ ได้ทดสอบผลกระทบของน้ำหนักโมเลกุลของอนุภาคนาโนของโคโตซานในการจัดการยา ในการไหลดยาจะสูงสุดได้ก็ต่อเมื่อโคโตซานมี DD อยู่ที่ 90% และจากค่ามวลโมเลกุล ทั้ง 3 โมเลกุลที่แตกต่างกัน คือ 55 kDa เนื่องจากเส้นใยที่สั้นกว่าในสารละลายโคโตซาน และมีความหนืด/น้ำหนักเฉลี่ยของโมเลกุลที่ต่ำกว่า หมู่อะมิโนอิสระจึงง่ายต่อการ protonate ซึ่งส่งผลให้ปฏิกิริยาไอออนิกมีประสิทธิภาพมากขึ้นในการดูดซับ 5-Fluorouracil (5-FU) (Yang, H.-C.; Hon, M.-H., 2009) อย่างไรก็ตาม สารละลายโคโตซานยังมีความเสถียรทางความร้อนต่ำ และมีลักษณะไม่นำไฟฟ้าอีกด้วย การเพิ่มอนุภาคนาโนบางส่วนสามารถปรับปรุงการยึดเกาะทางชีวภาพของโคโตซานได้ เนื่องจากความสามารถพิเศษของโลหะออกไซด์ในการส่งเสริมจลนศาสตร์การถ่ายโอนอิเล็กตรอนอย่างรวดเร็วระหว่างอิเล็กโทรดและอิเล็กโทรไลต์ (Aranaz, I.; Harris, R.; Heras, A., 2010; Wei, X.; Zhang, M.; Gorski, W., 2003)

วัสดุคาร์บอนผสมคาร์บอน เช่น มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ (MWCNT) ถูกนำมาใช้เพื่อประดิษฐ์อิเล็กโทรดนำไฟฟ้าแบบยืดหยุ่นสำหรับการใช้งานเซ็นเซอร์เนื่องจากโครงข่ายที่มีรูพรุนที่เป็นเอกลักษณ์ พื้นที่ผิวที่สูงขึ้น อัตราการขนส่งอิเล็กตรอนที่ดีเยี่ยมและคุณสมบัติทางกลที่แข็งแรง อย่างไรก็ตาม มีการใช้คอมโพสิตอนุภาคนาโนที่เป็นโลหะ ในการถ่ายโอนอิเล็กตรอนระหว่างสารละลายและพื้นผิวของอิเล็กโทรดนำไปสู่สัญญาณที่ได้รับการปรับปรุงและความไวของเซ็นเซอร์ที่ดีขึ้น (Kokulnathan, T., et al., 2017; Gurban, A.-M., et al., 2023) นอกจากนี้ การสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโน ด้วยวิธีที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โดยการนำแป้งมาเป็นตัวรีดิวซ์ (Ponsanti, Tangnorawich, Ngernyuang, & Pechyen, 2020) และคุณสมบัติของนาโนเงินสังเคราะห์ที่มีทั้งสมบัติทางแสง การต้านจุลชีพ สมบัติทางไฟฟ้า ทางด้านไบโอเซนเซอร์ (Iravani, et al., 2014) ซึ่งเป็นที่น่าสนใจสำหรับการประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดทางชีวภาพ เนื่องจาก คลื่นผิวพลาสมอน (SPR) ของอนุภาคนาโนเงินสังเคราะห์ได้รับอิทธิพลอย่างสูงจากโมเลกุลที่ดูดซับบนพื้นผิว และความยาวคลื่นของ SPR สามารถปรับได้ตามความเข้มข้นของโมเลกุลที่ดูดซับ (Varghese, et al., 2020)

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาการพัฒนาและลักษณะเฉพาะของหมึกนาโน จากซิลิคอนคาร์ไบด์, มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ และอนุภาคนาโนเงินสังเคราะห์ โดยอัตราส่วนที่ต่างกัน จะมีผลต่อการแสดงผลทางไฟฟ้าเคมี เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการตรวจจับสารกำจัดศัตรูพืช กลุ่มออร์กาโนฟอสฟอรัส โดยมีขั้นตอนที่ไม่ซับซ้อน และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม กระบวนการผลิตไม่ต้องใช้อุณหภูมิสูงและระบบสุญญากาศ และไม่อันตรายต่อผักหรือผลไม้ระหว่างการตรวจหาสารกำจัดศัตรูพืช (Bakytkarim, et al., 2019)

วิธีดำเนินการวิจัย

สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ (Multi-walled carbon nanotubes, 3-12 μm 99.99% : บริษัท นาโนเจเนสโตร จำกัด) ซิลิคอนคาร์ไบด์ (50nm, 99.9% : Sigma-aldrich) ซิลเวอร์ไนเตรต (AR grade, 99%, VITTAYAPUN) เซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (Cetyl trimethylammonium bromide, 98.0% : KemAus) แป้งข้าวโพด (ร้านค้าทั่วไป), ไคโตซาน (Chitosan, Mw = 125-500 kDa and 500-900 kDa, %DD = 90-95% : บริษัท ไปโอ21 จำกัด) กรดแอซีติก (Acetic acid, CH_3COOH 99.7% : บริษัท เอเพกซ์ เคมีเคิล จำกัด) น้ำจัดไอออน (Deionized water)

การเตรียมอนุภาคนาโนเงินสังเคราะห์

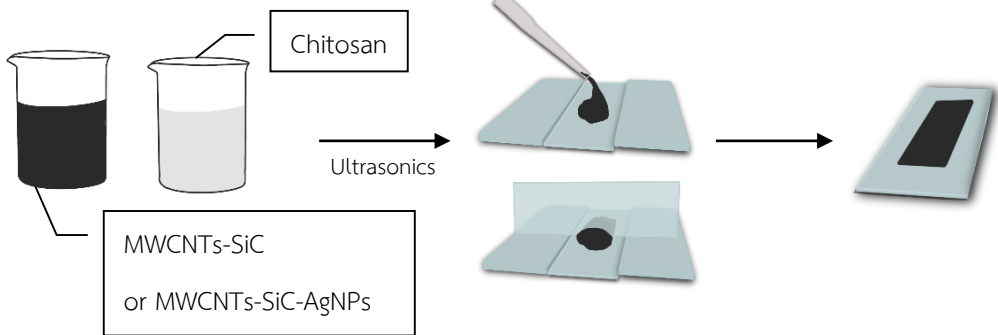
เตรียมแป้งข้าวโพด 10 กรัม ละลายน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส คนจนเป็นเนื้อเดียวกัน นำสารละลายแป้งข้าวโพดทำการสังเคราะห์อนุภาคนาโนเงิน แบ่งเป็น 2 ขั้นตอน ในขั้นตอนแรกนำซิลเวอร์ไนเตรต 15 มิลลิโมลาร์ ละลายน้ำกลั่น 330 ไมโครลิตร และเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ 0.1 โมลาร์ ละลายน้ำ 10 มิลลิลิตร จากนั้นนำสารละลายซิลเวอร์ไนเตรตและเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ผสมเข้าด้วยกัน และทำการเติมสารละลายแป้งข้าวโพด 460 ไมโครลิตร หลังจากนั้นนำสารละลายผสมให้เข้ากัน และนำไปแช่ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิเป็นเวลา 1 ชั่วโมงด้วยอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ก่อนจะนำมาใช้ในขั้นตอนที่สอง

ในขั้นตอนที่สองนำซิลเวอร์ไนเตรต 15 มิลลิโมลาร์ ละลายน้ำกลั่น 3 มิลลิลิตร และเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ 0.2 โมลาร์ ละลายน้ำกลั่น 2.5 มิลลิลิตร นำสารละลายซิลเวอร์ไนเตรตและเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ผสมเข้าด้วยกัน หลังจากนั้นนำไปผสมกับ สารละลายน้ำแป้งข้าวโพดปริมาตร 8 ลิตรและน้ำกลั่นปริมาตร 10 มิลลิลิตร นำสารละลายส่วนที่หนึ่งมาผสมกับสารละลายในขั้นตอนที่สองให้เข้ากัน และนำไปแช่ในอ่างควบคุมเป็นเวลา 24 ชั่วโมงด้วยอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

หลังจาก 24 ชั่วโมง นำสารละลายอนุภาคนาโนเงินสังเคราะห์ออกจากอ่างควบคุม จะเห็นเป็นสารแขวนลอย นำมาเทลงบนจานแก้ว และนำไปทำให้แห้งด้วยการนำไปอบที่ตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิที่ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นนำไปบดด้วยโกร่งบดสาร ก่อนบดด้วยลูกบดเซอร์โคเนียมในเอทานอลด้วยเครื่อง ball mill เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ก่อนจะนำมาบดด้วยโกร่งบดสารอีกครั้ง เพื่อให้ได้เป็นผงละเอียด

การเตรียมหมึกนาโน สำหรับ ขี้ทำงาน

เตรียมมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ซิลิคอนคาร์ไบด์ และอนุภาคนาโนเงินสังเคราะห์ ในอัตราส่วน 1:1:0 1:1:0.5 และ 1:1:1 และเตรียมสารละลายไคโตซานที่ความเข้มข้นต่างกัน 50mg ในสารละลายกรดแอซีติก 0.1M ปริมาตร 10 มิลลิลิตร นำไปกวนเป็นเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส จากนั้นนำหมึกในแต่ละอัตราส่วนผสมเข้ากับไคโตซานด้วยเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 20 นาที เมื่อเข้ากันนำหมึกนาโนที่ได้หยดลงบนแผ่นกระดาษด้วยหลอดหยด และนำกระดาษใส่ไดออกไซด์ขึ้นปาดให้หมึกมีความเสมอกัน จากนั้นทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 วัน หรือใช้เครื่องเป่าลมร้อน



ภาพที่ 1 กระบวนการการขึ้นรูปหมึกนาโนจากเตรียมมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ซิลิคอนคาร์ไบด์ และ อนุภาคนาโนเงินสังเคราะห์

การวิเคราะห์และทดสอบสมบัติของหมึกนาโนที่ประดิษฐ์จากมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ซิลิคอนคาร์ไบด์ และอนุภาคนาโนเงินสังเคราะห์ และไคโตซาน

หลังจากเตรียมหมึกนาโนจากจากมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ซิลิคอนคาร์ไบด์ อนุภาคนาโนเงินสังเคราะห์ และไคโตซาน ในอัตราส่วนต่างๆ หลังจากนั้นนำหมึกนาโนที่ได้มาวิเคราะห์และทดสอบสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางเคมีและสมบัติอื่นๆ รวมไปถึงการทดสอบกับสารกำจัดศัตรูพืชที่ความเข้มข้นที่ต่างกันดังนี้

1. วิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของหมึกนาโนที่ประดิษฐ์จากมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ซิลิคอนคาร์ไบด์ อนุภาคนาโนเงินสังเคราะห์ และไคโตซาน ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (scanning electron microscopy : SEM)
2. วิเคราะห์โครงสร้างของผลึกของหมึกนาโนที่ประดิษฐ์จากมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ซิลิคอนคาร์ไบด์ อนุภาคนาโนเงินสังเคราะห์ และไคโตซาน ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer : XRD)
3. วิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุลของหมึกนาโนที่ประดิษฐ์จากมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ซิลิคอนคาร์ไบด์ อนุภาคนาโนเงินสังเคราะห์ และไคโตซาน ด้วยเครื่องรามานสเปกโทรสโกปี (Raman spectroscopy)
4. วิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าเคมีของหมึกนาโนที่ประดิษฐ์จากมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ซิลิคอนคาร์ไบด์ อนุภาคนาโนเงินสังเคราะห์ และไคโตซาน ด้วยเครื่องไซคลิกโวลแทมเมตรี (Cyclic Voltammetry : CV)

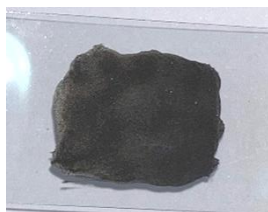
ผลการวิจัย

1. การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ ของหมึกนาโนประดิษฐ์จากมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ซิลิคอนคาร์ไบด์ อนุภาคนาโนเงินสังเคราะห์ และไคโตซาน

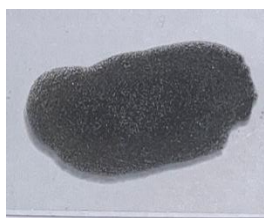
การตรวจสอบคุณลักษณะของหมึกนาโนประดิษฐ์จากมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ซิลิคอนคาร์ไบด์ อนุภาคนาโนเงินสังเคราะห์ โดยการนำมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ซิลิคอนคาร์ไบด์ และโคโตซานที่ทำการละลายในกรดแอสซิดิกที่ความเข้มข้น 0.1M ในอัตราส่วน 1:1:1 โดยมีปริมาณของโคโตซาน ที่ 25 มิลลิกรัม และ 50 มิลลิกรัม และมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ซิลิคอนคาร์ไบด์ นาโนเงินสังเคราะห์ และสารละลายโคโตซาน ในอัตราส่วนที่ต่างกันได้แก่ 1:1:0.5:1 1:1:1:1 และ 1:1:1:2 ตามดังแสดงในภาพที่ 2 ซึ่งพบว่า ภาพ 2a มีการใส่โคโตซานในปริมาณ 25 มิลลิกรัม หมึกมีการแตกเล็กน้อยไม่เป็นเนื้อเดียวกัน จึงทำการเพิ่มปริมาณโคโตซานเป็น 50 มิลลิกรัม ปรากฏว่าหมึกเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น หลังจากนั้นทำการเติมนาโนเงินสังเคราะห์ในปริมาณ 25 และ 100 ตามลำดับ พบว่าที่ปริมาณ 25 มิลลิกรัม มีความเป็นเนื้อเดียวกันมากกว่าการเติมนาโนเงินสังเคราะห์ในปริมาณที่ 50 มิลลิกรัม (ภาพที่ 2d) จึงทดลองเพิ่มทั้งปริมาณของนาโนเงินสังเคราะห์และโคโตซานเป็น 100 และ 100 มิลลิกรัม ตามลำดับ พบว่ามีความเป็นเนื้อเดียวกันมากกว่าขึ้น ดังภาพที่ 2e



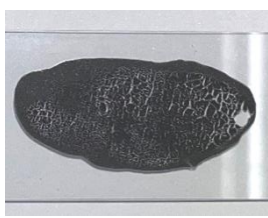
(a) MWCNTs : SiC : Cs (25mg)
1 : 1 : 1



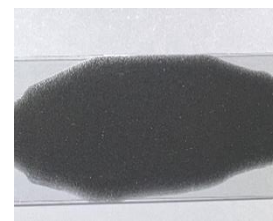
(b) MWCNTs : SiC :Cs (50mg)
1 : 1 : 1



(c) MWCNTs : SiC : AgNPs
: Cs (50mg)
1 : 1 : 0.5 : 1



(d) MWCNTs : SiC : AgNPs
: Cs (50mg)
1 : 1 : 1 : 1



(e) MWCNTs : SiC : AgNPs
: Cs(50mg)
1 : 1 : 2 : 2

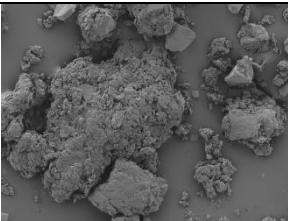
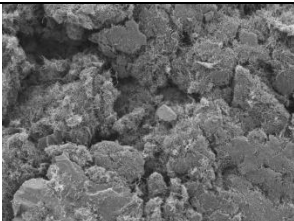
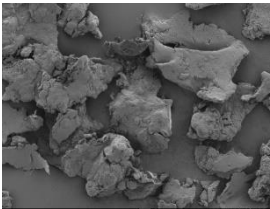
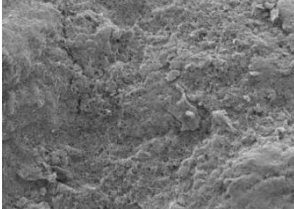
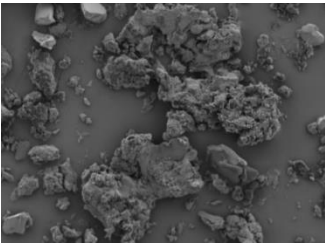
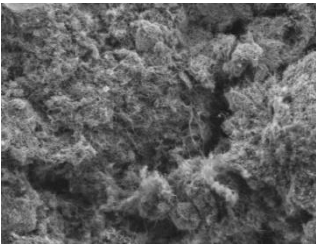
ภาพที่ 2 ลักษณะปรากฏของหมึกทั้ง 5 รูปแบบ ได้แก่ (a) MWCNTs:SiC-Cs(25mg) 1:1 (b) MWCNTs:SiC-Cs(50mg) 1:1 (c) MWCNTs:SiC:AgNPs-Cs (50mg) 1:1:0.5 (d) MWCNTs: SiC:AgNPs-Cs (50mg) 1:1:1 (e) MWCNTs:SiC:AgNPs -Cs (100mg) 1:1:2

2. ลักษณะสัณฐานวิทยาของหมึกนาโนประดิษฐ์จากมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ซิลิคอนคาร์ไบด์ อนุภาคนาโนเงินสังเคราะห์ และโคโตซาน

ลักษณะสัณฐานวิทยาของหมึกนาโนประดิษฐ์จากมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวป์ ซิลิคอนคาร์ไบด์ อนุภาคนาโนเงินสังเคราะห์ และไคโตซาน ในอัตราส่วนที่ต่างกัน ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด กำลังขยาย 500X และ 5000X พบว่าอัตราส่วนระหว่าง มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวป์ ซิลิคอนคาร์ไบด์ และไคโตซาน ที่มี Mw ของไคโตซานที่ต่างกัน ที่ไคโตซาน Mw 500-900 kDa 25 มิลลิกรัม มีลักษณะพื้นผิวที่ค่อนข้างเรียบกว่า ที่กำลังขยาย 5000X และเมื่อเทียบระหว่าง ปริมาณไคโตซานที่ 50 มิลลิกรัมแต่น้ำหนักโมเลกุลของไคโตซานต่างกันพบว่า ที่น้ำหนักโมเลกุลที่ 125-500 kDa มีลักษณะเป็นแผ่น และเป็นเนื้อเดียวกันมากกว่าที่ 500-900 kDa 50 มิลลิกรัม และจากการใส่อนุภาคนาโนเงินสังเคราะห์ลงในจากมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวป์ ซิลิคอนคาร์ไบด์ และไคโตซาน ในอัตราส่วน 0.5% และ 1% ในปริมาณ 25 มิลลิกรัม และ 50 มิลลิกรัม ตามลำดับ พบว่า ที่ 0.5% ของอนุภาคนาโน และไคโตซาน น้ำหนักโมเลกุล 500-900 kDa 50 มิลลิกรัม พบว่า ที่กำลังขยาย 5000X มีความเป็นแผ่นเดียว ไม่มีรอยแยกของเนื้อสาร และที่ 1% ของอนุภาคนาโนเงินสังเคราะห์ ในปริมาณ 25 มิลลิกรัม มีความเรียบมากกว่า ที่ไคโตซาน น้ำหนักโมเลกุล 125-500 kDa 50 มิลลิกรัม และน้ำหนักโมเลกุล 500-900 kDa 50 มิลลิกรัม

ตารางที่ 1 สัณฐานลักษณะสัณฐานวิทยาของหมึกนาโนประดิษฐ์จากมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวป์

ซิลิคอนคาร์ไบด์ อัตราส่วน 1:1 และไคโตซาน ที่มี Mw = 125-500 kDa (Medium) 50 มิลลิกรัม และ 500-900 kDa (High) 25 มิลลิกรัม และ 50 มิลลิกรัม ตามลำดับ

ตัวอย่าง	กำลังขยาย	
	500X	5000X
MWCNTS-SiC-50 mg of chitosan (M)		
MWCNTS-SiC-25 mg of chitosan (H)		
MWCNTS-SiC-50 mg of chitosan (H)		

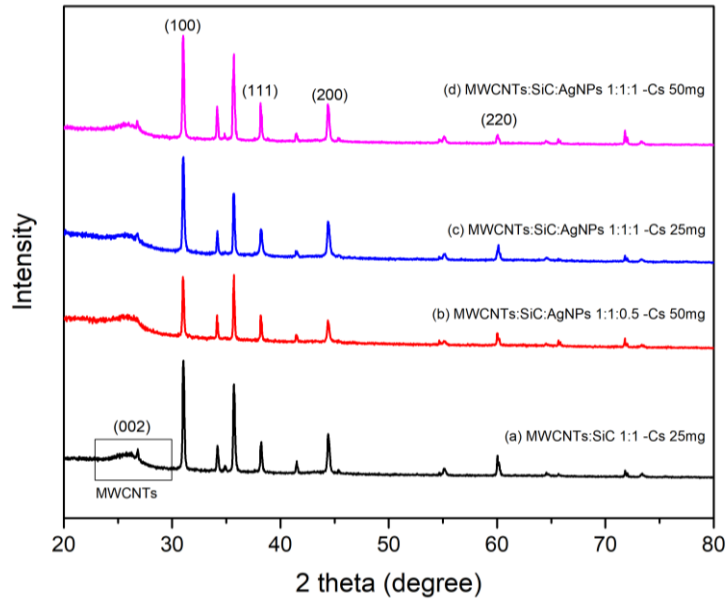
ตารางที่ 2 สัณฐานลักษณะสัณฐานวิทยาของหมึกกานาโนประดิษฐ์จากมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์

ซิลิคอนคาร์ไบด์ อนุภาคนาโนเงินสังเคราะห์ และโคโตซาน ที่มี Mw = 125-500 kDa (Medium) 50 มิลลิกรัม และ 500-900 kDa (High) 25 มิลลิกรัม และ 50 มิลลิกรัม ตามลำดับ

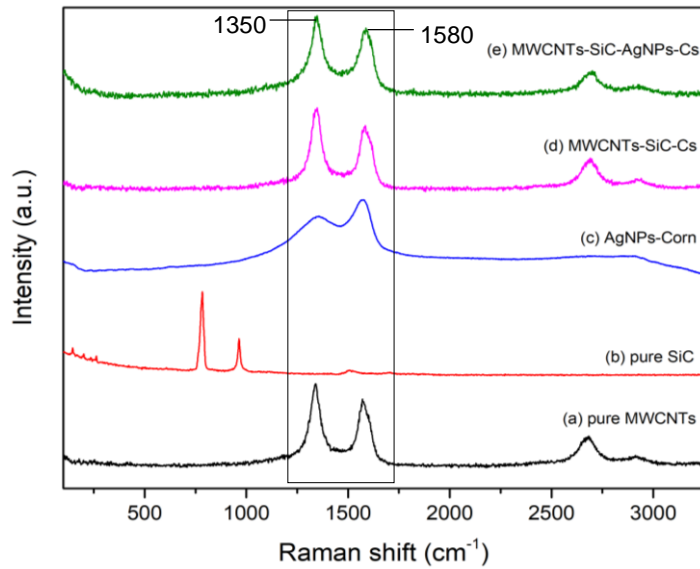
ตัวอย่าง	กำลังขยาย	
	500X	5000X
MWCNTS-SiC- 0.5% AgNPs-50 mg of chitosan (H)		
MWCNTS-SiC- 1% AgNPs-50 mg of chitosan (M)		
MWCNTS-SiC- 1% AgNPs - 50 mg of chitosan (H)		
MWCNTS-SiC- 1% AgNPs - 25 mg of chitosan (H)		

3. การวิเคราะห์ลักษณะทางเคมีและโครงสร้างผลึกของหมึกนาโนประดิษฐ์จากมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ซิลิคอนคาร์ไบด์ อนุภาคนาโนเงินสังเคราะห์ และโคโตซาน

วิเคราะห์ลักษณะของหมึกนาโนประดิษฐ์ด้วยเทคนิค XRD ดังภาพที่ 3 แสดงสเปกตรัม XRD ของ (a) MWCNTs:SiC 1:1 -Cs 25mg,(b) MWCNTs:SiC:AgNPs 1:1:0.5 -Cs 50mg,(c) MWCNTs:SiC:AgNPs 1:1:1 -Cs 25mg และ (d) MWCNTs:SiC:AgNPs 1:1:1 -Cs 50mg ตามลำดับ XRD แสดงสเปกตรัมของ MWCNTs เป็นช่วงพีคกว้าง ในช่วง 2θ จาก 20° ถึง 30° เนื่องจากโครงสร้างผลึกของ AgNPs มีสเปกตรัม XRD ที่คมชัด และเข้มมากกว่า และจะแสดงการลดลงในภาพที่ 3b 3c และ 3d ได้อย่างชัดเจน เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของ AgNPs และแสดงพีคที่ $2\theta = 38.21^\circ, 44.42^\circ$ และ 64.55° สอดคล้องกับระนาบ (111), (200) และ (220) (Faced centered cubic (FCC)) โดยเป็นลักษณะเฉพาะของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ (Verma, et al., 2021) และการวิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุลด้วยเครื่อง Raman spectroscopy เป็นการศึกษาการวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลึกของ MWCNTs ดังภาพที่ 4 แสดงสเปกตรัมรามานของ a) Pure MWCNTs b) Pure SiC c) AgNPs-Corn d) MWCNTs-SiC-Cs และ e) MWCNTs-SiC-AgNPs-Cs โดยจะแสดงการยืดตัวของพันธะ C-C ในวัสดุกราฟไฟท์ ทำให้เกิดคุณสมบัติที่เรียกว่า G-band ซึ่งจะแสดงการเกิดไฮบริดเซชัน sp^2 โดย G band แสดงถึงความเครียดที่เกิดจากแรงภายนอกที่กระทำต่อโครงสร้างของมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ แถบ G นั้นจะเกิดขึ้นที่ประมาณ 1580 cm^{-1} ส่วนแถบ D ที่สังเกตพบที่ ประมาณ 1350 cm^{-1} เกิดจากการที่ไม่เป็นระเบียบของโครงสร้างคาร์บอน และสัญญาณ 2D อยู่ที่ประมาณ 2700 cm^{-1} (Biru, El & Iovu, H., 2018) จะพบแถบคาร์บอน D และ G เท่านั้น แต่ไม่พบพีคของซิลิคอนคาร์ไบด์ (790 และ 970 cm^{-1}) เนื่องจากการกระเจิงแสงของคาร์บอนจะสูงกว่าซิลิคอนคาร์ไบด์อย่างน้อย 10 เท่า ซึ่งการกระเจิงของคาร์บอนก็ยังคลุมสัญญาณของซิลิคอนคาร์ไบด์ (Zhang et al, 2017) หลังจากมีการใส่ AgNPs จะเห็นถึงแถบ D และ G ที่มีความเข้มข้น เมื่อเทียบกับภาพที่ 4d เนื่องจากการเกิดข้อบกพร่องโดยการจับกันระหว่าง AgNPs กับ MWCNTs จะแสดงให้เห็นถึงการมีอยู่ของวัสดุคอมโพสิต AgNPs จะแสดงพีคอยู่ที่ อยู่ที่ 1292 , และ 1544 cm^{-1} เนื่องจากการสั่นแบบยืด C=O ของกลุ่มคาร์บอกซิลิกที่มีทั้งสมมาตรและไม่สมมาตร (Joshi, N., Jain, N., Pathak, A., Singh, J., Prasad, R., & Upadhyaya, C. P., 2018) นอกจากนี้เมื่อมีโคโตซานเข้ามาทำปฏิกิริยาต่อมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ จะมีการเพิ่มพลังงานสำหรับการสั่นและจะเห็นได้ว่าเกิดการเลื่อนของแถบสัญญาณรามาน (Verma, D., et al., 2021)



ภาพที่ 3 สเปกตรัม XRD ของ (a) MWCNTs:SiC 1:1 -Cs 25mg,(b) MWCNTs:SiC:AgNPs 1:1:0.5 -Cs 50mg,(c) MWCNTs:SiC:AgNPs 1:1:1 -Cs 25mg และ (d) MWCNTs:SiC:AgNPs 1:1:1 -Cs 50mg



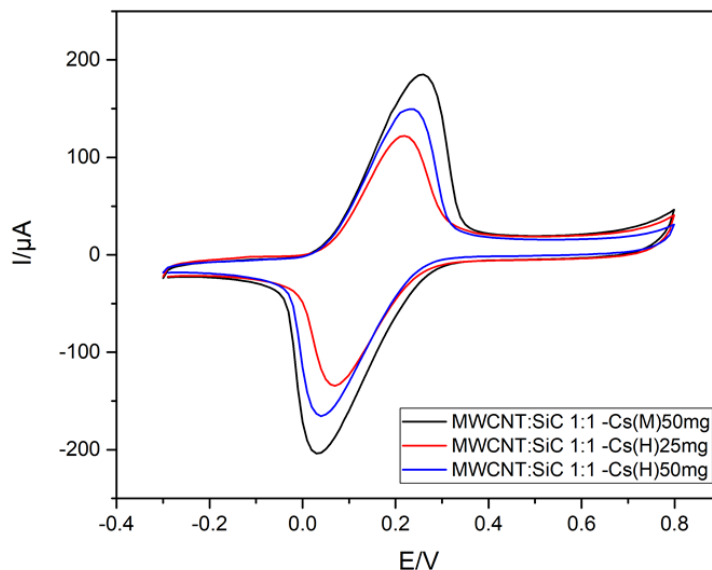
ภาพที่ 4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเข้มสัญญาณรามานของ a) Pure MWCNTs b) Pure SiC c) AgNPs-Corn d) MWCNTs-SiC-Cs e) MWCNTs-SiC-AgNPs-Cs

4. การวิเคราะห์สมบัติเชิงเคมีไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าใช้งาน

การวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าเคมีของขั้วไฟฟ้าประดิษฐ์ประกอบด้วย มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์, ซิลิคอนคาร์ไบด์ อนุภาคนาโนเงินสังเคราะห์ และโคโตซาน ด้วยเครื่องวิเคราะห์ของ PalmSens BV ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี (Cyclic voltammetry: CV)

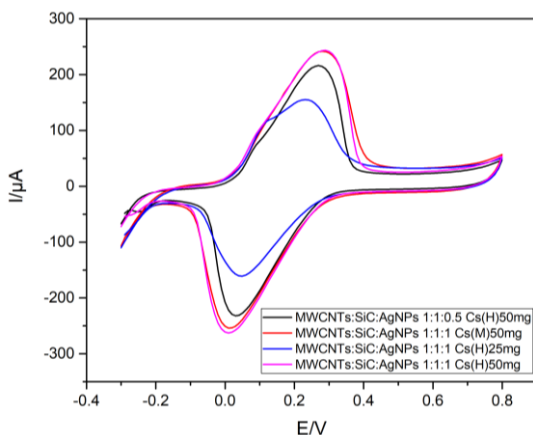
จากภาพที่ 5 เป็นการวิเคราะห์สมบัติการนำไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าประดิษฐ์ประกอบด้วย มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์, ซิลิคอนคาร์ไบด์อัตราส่วน 1:1 และโคโตซาน ที่มี Mw = 125-500 kDa (Medium) 50 มิลลิกรัม และ 500-900 kDa (High) 25 มิลลิกรัม และ 50 มิลลิกรัม ตามลำดับ และผสมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เป็นสารละลายน้ำแล้วจะแตกตัวเป็นไอออนได้ และส่งผลให้มีการนำไฟฟ้าได้ดีมากขึ้น ระหว่างโพแทสเซียมคลอไรด์กับโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนฟอร์เรต

จากภาพที่ 6 เป็นการวิเคราะห์สมบัติการนำไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าประดิษฐ์ประกอบด้วย มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์, ซิลิคอนคาร์ไบด์, อนุภาคนาโนเงิน ในอัตราส่วน 1:1:0.5 1:1:1 และโคโตซาน ที่มี Mw = 125-500 kDa (Medium) 50 มิลลิกรัม และ 500-900 kDa (High) 25 มิลลิกรัม และ 50 มิลลิกรัม ตามลำดับ เมื่อนำอนุภาคนาโนเงินในแต่ละอัตราส่วนลงไปในส่วนประกอบที่มีมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ซิลิคอนคาร์ไบด์ และโคโตซานที่มีน้ำหนักโมเลกุลที่ต่างกัน ตามลำดับ และผสมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เป็นสารละลายน้ำแล้วจะแตกตัวเป็นไอออนได้ และส่งผลให้มีการนำไฟฟ้าได้ดี ระหว่างโพแทสเซียมคลอไรด์กับโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนฟอร์เรต และจากภาพที่ 7 เป็นการเปรียบเทียบคุณภาพการนำไฟฟ้าของหมึกนาโนประดิษฐ์ประกอบด้วย มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์, ซิลิคอนคาร์ไบด์, และมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์, ซิลิคอนคาร์ไบด์ และอนุภาคนาโนเงิน ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี แสดงให้เห็นว่าการมีอยู่ของอนุภาคนาโนเงินมีค่าการนำไฟฟ้าที่สูงกว่าการไม่มีอยู่ของอนุภาคนาโนเงิน

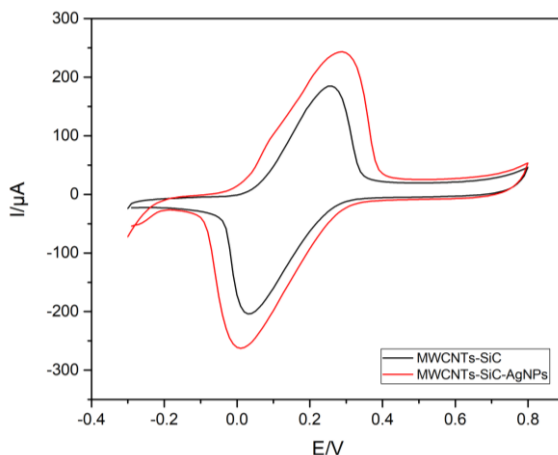


ภาพที่ 5 กราฟเปรียบเทียบคุณภาพการนำไฟฟ้าของหมึกนาโนประดิษฐ์ประกอบด้วย

มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์, ซิลิคอนคาร์ไบด์ อัตราส่วน 1:1 และโคโตซาน ที่มี Mw = 125-500 kDa (Medium) 50 มิลลิกรัม และ 500-900 kDa (High) 25 มิลลิกรัม และ 50 มิลลิกรัม ตามลำดับ ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี ในสารละลาย $5 \text{ mmol dm}^{-3} \text{ K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]/\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ 0.1 M KCl ที่ช่วงศักย์ไฟฟ้า -0.3 - 0.8 โวลต์ สแกนเรท 0.1 โวลต์/วินาที



ภาพที่ 6 กราฟเปรียบเทียบคุณภาพการนำไฟฟ้าของหมึกนาโนประติษฐ์ประกอบด้วย มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์, ซิลิคอนคาร์ไบด์, อนุภาคนาโนเงิน ในอัตราส่วน 1:1:0.5 1:1:1 และโคโตซาน ที่มี Mw = 125-500 kDa (Medium) 50 มิลลิกรัม และ 500-900 kDa (High) 25 มิลลิกรัม และ 50 มิลลิกรัม ตามลำดับ ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี ในสารละลาย $5 \text{ mmol dm}^{-3} \text{ K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]/\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ 0.1 M KCl ที่ช่วงศักย์ไฟฟ้า -0.3 - 0.8 โวลต์ สแกนเรท 0.1 โวลต์/วินาที



ภาพที่ 7 กราฟเปรียบเทียบคุณภาพการนำไฟฟ้าของหมึกนาโนประติษฐ์ประกอบด้วย มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์, ซิลิคอนคาร์ไบด์, และ มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์, ซิลิคอนคาร์ไบด์อนุภาคนาโนเงิน ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี ในสารละลาย $5 \text{ mmol dm}^{-3} \text{ K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]/\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ 0.1 M KCl ที่ช่วง ศักย์ไฟฟ้า -0.3 - 0.8 โวลต์ สแกนเรท 0.1 โวลต์/วินาที

จากผลการทดลองการเตรียมหมึกนาโนประดิษฐ์จากซิลิคอนคาร์ไบด์/มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์/อนุภาคนาโนเงินสังเคราะห์ในอัตราส่วนที่ต่างกัน ได้แก่ MW/CNTs:SiC 1:1 และ ไคโตซาน ในปริมาณ 25 และ 50 มิลลิกรัม และการนำอนุภาคนาโนเงินมาเป็นส่วนประกอบในอัตราส่วนที่ต่างกัน ได้แก่ ซิลิคอนคาร์ไบด์:มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์:อนุภาคนาโนเงินสังเคราะห์ 1:1:0.5 1:1:1 ไคโตซานปริมาณ 50 มิลลิกรัม ปริมาตร 10 มิลลิลิตร และ 1:1:2 ไคโตซานปริมาณ 50 มิลลิกรัม สามารถสรุปได้ว่า ที่อัตราส่วน 1:1 และ ไคโตซานปริมาณ 50 มิลลิกรัม หมึกมีความเป็นเนื้อเดียวกันมากกว่าเมื่อปาดลงบนแผ่นแก้ว และที่อัตราส่วน 1:1:0.5 ไคโตซาน 50 มิลลิกรัม และที่อัตราส่วน 1:1:2 ไคโตซาน 50 มิลลิกรัม ใน 0.1M กรดแอสซิดิก ปริมาตร 20 มิลลิลิตร มีความเป็นเนื้อเดียวกันมากกว่าเมื่อใส่อนุภาคนาโนเงินสังเคราะห์ลงไป และในส่วนของ ลักษณะสัญญาณวิทยาของหมึกนาโนประดิษฐ์จากมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ซิลิคอนคาร์ไบด์ อนุภาคนาโนเงินสังเคราะห์ และไคโตซาน ในอัตราส่วนที่ต่างกัน ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด กำลังขยาย 500X และ 5000X พบว่าอัตราส่วนระหว่าง มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ซิลิคอนคาร์ไบด์ และไคโตซาน ที่มี Mw ของไคโตซานที่ต่างกัน ที่ไคโตซาน Mw 500-900 kDa 25 มิลลิกรัม มีลักษณะพื้นผิวที่ค่อนข้างเรียบกว่าที่กำลังขยาย 5000X และเมื่อเทียบระหว่าง ปริมาณไคโตซานที่ 50 มิลลิกรัมแต่น้ำหนักโมเลกุลของไคโตซานต่างกันพบว่า ที่น้ำหนักโมเลกุลที่ 125-500 kDa มีลักษณะเป็นแผ่น และเป็นเนื้อเดียวกันมากกว่าที่ 500-900 kDa 50 มิลลิกรัม และจากการใส่อนุภาคนาโนเงินสังเคราะห์ลงในมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ซิลิคอนคาร์ไบด์ และไคโตซาน ในอัตราส่วน 0.5% และ 1% ในปริมาณ 25 มิลลิกรัมและ 50 มิลลิกรัม ตามลำดับ พบว่า ที่ 0.5% ของอนุภาคนาโน และไคโตซาน น้ำหนักโมเลกุล 500-900 kDa 50 มิลลิกรัม พบว่า ที่ความขยาย 5000X ไม่มีรอยแยกของเนื้อสาร และที่ 1% ของอนุภาคนาโนเงินสังเคราะห์ ในปริมาณ 25 มิลลิกรัม มีความเรียบมากกว่าที่ไคโตซาน น้ำหนักโมเลกุล 125-500 kDa 50 มิลลิกรัม และ น้ำหนักโมเลกุล 500-900 kDa 50 มิลลิกรัม ซึ่งลักษณะของหมึกนั้นจะส่งผลต่อการนำไฟฟ้าด้วย และเมื่อนำไปตรวจการนำไฟฟ้าทางเคมีด้วยเครื่องวิเคราะห์ของ PalmSens BV ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี (Cyclic voltammetry: CV) พบว่าหมึกนาโนประดิษฐ์เชิงประกอบมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ซิลิคอนคาร์ไบด์ และไคโตซานที่มีน้ำหนักโมเลกุล 125-500 kDa 50 มิลลิกรัม นำไฟฟ้าดีที่สุด และเมื่อใส่อนุภาคนาโนเงิน พบว่า ที่ อัตราส่วน 1:1:1 ไคโตซานที่น้ำหนักโมเลกุล 125-500 kDa (Medium) 50 มิลลิกรัม และ 500-900 kDa (High) 50 มิลลิกรัม นำไฟฟ้าได้ดีและใกล้เคียงกันมากที่สุด จากการวิเคราะห์สมบัติเชิง เคมีไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าใช้งาน ด้วยเครื่องวิเคราะห์ของ PalmSens BV เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี ที่ช่วงศักย์ไฟฟ้า -0.3 - 0.8 โวลต์ สแกนเรท 0.1 โวลต์/วินาที โดยทำการทดสอบก่อนและหลังใส่อนุภาคนาโน เงินสังเคราะห์ ก่อนใส่พบว่าที่อัตราส่วนมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์และซิลิคอนคาร์ไบด์ 1:1 และ ปริมาณไคโตซาน 50 มิลลิกรัม น้ำหนักโมเลกุล 125-500 kDa นำไฟฟ้าดีที่สุด และจากการทดลองหลังจากใส่อนุภาคนาโนเงินสังเคราะห์พบว่า ที่อัตราส่วนของมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์, ซิลิคอนคาร์ไบด์ และอนุภาคนาโน เงินสังเคราะห์ 1:1:1 ไคโตซานที่น้ำหนักโมเลกุล 125-500 kDa (Medium) 50 มิลลิกรัม นำไฟฟ้าดีมากกว่า และเมื่อนำมาเปรียบเทียบ คุณภาพระหว่างก่อนและหลังการใส่อนุภาคนาโนเงินสังเคราะห์ของหมึกนาโนประดิษฐ์ที่ประกอบด้วย มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ ซิลิคอนคาร์ไบด์ และมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์

ซิลิคอนคาร์ไบด์ และอนุภาคนาโนเงิน ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี พบว่าในการใส่อนุภาคนาโนเงิน ในหมึกนาโนส่งผลให้มีการนำกระแสที่ดี ทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ ในการตรวจจับยาฆ่าแมลงได้ ทำให้มีความไวต่อการตรวจจับ ดังนั้นการใส่อนุภาคนาโนเงินสังเคราะห์จึงเพิ่มประสิทธิภาพในการนำไปใช้ต่อยอดในด้านอื่นๆ ได้อีก

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณการสนับสนุนจาก มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ทั้งการเอื้อเพื่อการใช้สถานที่และเครื่องในการงานวิจัย รองศาสตราจารย์ ดร. ชีราวุฒิ เพชรเย็น อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำในการดำเนินการค้นคว้าวิจัย และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่ใช้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- กองโรคจากการประกอบอาชีพและสิ่งแวดล้อม. (2557). โรคจากสารเคมีกำจัดศัตรูพืช. [Online]. Available : <https://shorturl.asia/utHyM> [2565, กุมภาพันธ์ 19].
- Aranaz, I.; Harris, R.; Heras, A. (2010). Chitosan Amphiphilic Derivatives Chemistry and Applications *Curr. Org Chem*, 14, 308-330.
- Bakytkarim, Y., Tursynbolat, S., Zeng, Q., Huang, J. & Wang, L. (2019). Nanomaterial ink for on-site painted sensor on studies of the electrochemical detection of organophosphorus pesticide residuals of supermarket vegetables. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 841, 45-50.
- Biru, E.I. & Lovu, H. (2018). **Graphene Nanocomposites Studied by Raman Spectroscopy. In Raman Spectroscopy; Morari Do Nascimento, G.,Ed.** IntechOpen : London, UK.
- Choudhury, N.A., Northrop, P.W.C., Crothers, A.C., Jain, S., Subramanian, V.R. (2012). Chitosan hydrogel-based electrode binder and electrolyte membrane for EDLCs: Experimental studies and model validation. *J.Appl. Electrochem*, 42, 935-943.
- Gurban, A.-M., Zamfir, L.-G., Epure, P., Suica-Bunghez, I.-R., Senin, R.M., Jecu, M.-L., Jinga, M.L., Doni, M. (2023). Flexible Miniaturized Electrochemical Sensors Based on Multiwalled Carbon Nanotube-Chitosan Nanomaterial for Determination of Nitrite in Soil Solutions. *Chemosensors*, 11, 224.
- Iannotta, S., Romeo, A., D'Angelo, P. & Tarabella, G. (2016). **Chapter 5—SiC Biosensing and Electrochemical Sensing: State of the Art and Perspectives. Silicon Carbide Biotechnology.** (2 nd ed.). Sadow, S.E., Ed.; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands.
- Iravani, S., Korbekandi, H., Mirmohammadi, S.V. & Zolfaghari, B. (2014). Synthesis of silver nanoparticles: chemical, physical and biological methods. *Research in Pharmaceutical Sciences*, 9(6), 385-406
- Joshi, N., Jain, N., Pathak, A., Singh, J., Prasad, R. & Upadhyaya, C. P. (2018). Biosynthesis of silver nanoparticles using Carissa carandas berries and its potential antibacterial activities. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 86(3), 682-689.
- Kokulnathan, T., Raja, N., Chen, S.-M., Sukanya, R. & Thirumalraj, B. (2017). Chitosan Stabilized Multi-Walled Carbon Nanotubes for Electrochemical Determination of Dihydroxybenzene Isomers. *J. Electrochem Soc*, 164, H958-H966.

- Mazurków, J., Kusior, A. & Radecka, M. (2021). Nonenzymatic Glucose Sensors Based on Copper Sulfides : Effect of Binder-Particles Interactions in Drop-Casted Suspensions on Electrodes Electrochemical Performance. *Sensors*, 21, 802.
- Min, J. (2020). Pesticide residues detection by characteristics. *China Scholarly Community Encyclopeia*. [Online]. Available : <https://encyclopedia.pub/2407> [2022, February 16].
- Ponsanti, K., Tangnorawich, B., Ngernyuang, N. & Pechyen, C. (2020). A flower shape-green synthesis and characterization of silver nanoparticles (AgNPs) with different starch as a reducing agent. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(5), 11003-11012.
- Rashed, A., Ahmed, J., Faisal, M., Alsareii, S., Jalalah, M. & Harraz, F.A. (2022). Highly sensitive and selective thiourea electrochemical sensor based on novel silver nanoparticles/ chitosan nanocomposite. *Colloids Surfaces A Physicochem Eng Asp*, 644, 128879.
- Ratuchne, F., Danczuck, M. & De Castro, E.G. (2018). Enhanced Stability and Conductivity of (polyaniline/chitosan) Composites. *Orbital Electron. J. Chem*, 10, 239-246.
- Songa, E.A. & Okonkwo, J.O. (2016). Recent approaches to improving selectivity and sensitivity of enzyme-based biosensors for organophosphorus pesticides: A review. *Talanta*, 155, 289-304.
- Thakur, V.K. & Thakur, M.K. (2014). Recent Advances in Graft Copolymerization and Applications of Chitosan : A Review. *ACS Sustain Chem Eng*, 2, 2637-2652.
- Varghese A.K., Pavai, P.T., Rugmini, R., Prasad, M.S., Kamakshi, K. & Sekhar, K.C. (2020). Green synthesized Ag nanoparticles for bio-sensing and photocatalytic applications. *ACS Omega*, 5(22), 13123-13129.
- Vellakkat, M. & Hundekal, D. (2016). Electrical conductivity and supercapacitor properties of polyaniline/chitosan/nickel oxide honey-comb nanocomposite. *J. Appl. Polym. Sci*, 134, 44536.
- Verma, D., Chauhan, D., Das Mukherjee, M., Ranjan, K.R., Yadav, A.K. & Solanki, P.R. (2021). Development of MWCNT decorated with green synthesized AgNps-based electrochemical sensor for highly sensitive detection of BPA. *Journal of Applied Electrochemistry*, 51(3), 447-462.
- Wei, X., Zhang, M. & Gorski, W. (2003). Coupling the Lactate Oxidase to Electrodes by Ionotropic Gelation of Biopolymer. *Anal Chem*, 75, 2060-2064.
- Yang, H.-C. & Hon, M.-H. (2009). The effect of the molecular weight of chitosan nanoparticles and its application on drug delivery. *Microchem. J.*, 92, 87-91.

- Ye, H., Xu, H., Xu, X., Zheng, C., Li, X., Wang, L., Liu, X. & Chen, G. (2013). An electrochemiluminescence sensor for adrenaline assay based on the tyrosinase/SiC/chitosan modified electrode. **Chem Commun**, **49**, 7070-7072.
- Yu, Z.-Y., Kong, D.-S., Wu, S.-X., Wang, L. & Wang, H.-Q. (2005). Electrocatalysis of a SiC particle-modified glassy carbon electrode for the oxidation of adrenaline in a KRPB physiological solution. **J.SerbianChem Soc**, **70**, 745-752.
- Zhang, X.S., Yang, L.W., Liu, H.T. & Zu, M. (2017). A novel high-content CNT-reinforced SiCmatrix composite-fiber by precursor infiltration and pyrolysis process. **RSC Advances**, **7**(38), 23334-23341.



การเตรียมและศึกษาลักษณะเฉพาะของเส้นใยผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิด
และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ด้วยกระบวนการเมลต์โบลวน์

Preparation and Characterization of Poly (lactic acid) and Poly (butylene
succinate) Blend Fibers by Melt-Blown Process

อารีรัตน์ มากมี*

Areerut Magmae

เบญจมาภรณ์ ตังนรวิษณุ**

Benchamaporn Tangnorawich

หยาดนภา ผาเจริญ***

Yardnapar Parcharoen

นรรจพร เรืองไพศาล****

Nanjaporn Rongpaisan

ชิราวุฒิ เพชรเย็น*****

Chiravoot Pechyen

สุรเชษฐ์ ตุ่มมี*****

Surachet Toommee

Received : November 2, 2022

Revised : September 27, 2023

Accepted : March 1, 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาและเตรียมเส้นใยผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิด (PLA) กับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (PBS) ที่อัตราส่วนต่างๆ ด้วยกระบวนการเมลต์โบลวน์ (Melt blown) ซึ่งเป็นเทคนิคที่มีความรวดเร็ว ต้นทุนต่ำและเส้นใยที่ได้มีขนาดเล็กละเอียด (ระดับนาโนเมตร ถึงไมโครเมตร) โดยจะขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิหัวฉีด (Die) ที่ 270 องศาเซลเซียส และมีสภาวะการปรับแต่งขึ้นรูปดังนี้ อัตราการป้อนพอลิเมอร์ที่ 13.2 กรัม/รู/นาที ความดันลม (ATR) ที่ 0.4 เมกะปาสคาล และระยะห่างระหว่างปลายหัวฉีดถึงตัวเก็บเส้นใย 45 เซนติเมตร ศึกษาสัณฐานวิทยา ศึกษาสมบัติเชิงกล ศึกษาพฤติกรรมทางความร้อนและโครงสร้างผลึก จากการทดลองพบว่าลักษณะเส้นใยจะไม่ต่อเนื่อง และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีผลต่อขนาดของเส้นใยเมื่อปริมาณเพิ่มขึ้น การศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วย (DSC) แสดงอุณหภูมิการตกผลึกแบบเย็น (T_{cc}) ของพอลิแลคติกแอซิดที่ 105.8 องศาเซลเซียส และแผ่นเส้นใยผสมอยู่ที่ 91.7 องศาเซลเซียส ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการเติมพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตลงไปอาจมีผลต่อการตกผลึกของพอลิแลคติกแอซิดได้ ซึ่งสอดคล้องกับผลของการทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ที่พบการ

เป็นผลึกเพิ่มขึ้นของพอลิแลคติกแอซิดเมื่อเติมพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต 10 ร้อยละโดยน้ำหนัก และยังพบว่าการเพิ่มพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตยังช่วยเพิ่มสมบัติการต้านทานแรงดึงอีกด้วย

คำสำคัญ : พอลิแลคติกแอซิด / พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต / เมลต์โบลวน์ / ผ้าแบบไม่ถักทอ

*นักศึกษาลัทธิสุตริวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุและสิ่งทอ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

Master of Science program students, Department of Materials and Textile Technology, Faculty of Science and Technology, Thammasat University(Corresponding Author) e-mail: s.toommee@gmail.com

**อาจารย์ประจำสาขาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

Lecturer of Physics, Faculty of Science and Technology, Thammasat University

***อาจารย์ประจำวิทยาลัยแพทยศาสตร์นานาชาติจุฬาภรณ์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

Lecturer at Chulabhorn International College of Medicine, Thammasat University

****อาจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมเคมีและสิ่งทอและเส้นใย คณะวิศวกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี

Lecturer in Chemical and Textile and Fiber Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

*****อาจารย์ประจำสาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุและสิ่งทอ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

Lecturer in Materials and Textile Technology, Faculty of Science and Technology, Thammasat University

*****อาจารย์ประจำคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร

Lecturer at Faculty of Industrial Technology, Kamphaeng Phet Rajabhat University

ABSTRACT

In this research, polylactic acid (PLA) and polybutylene succinate (PBS) blended fibers were studied and prepared at different ratios by Melt Blown process. Which is a fast technique, low cost and the resulting fiber is small and fine (nanometer to micrometer). It will be molded with a nozzle temperature at 270 °C and the condition of adjusting the forming is Polymer feed rate of 13.2 g/hole/min, air pressure (ATR) of 0.4 MPa, and distance between nozzle tip and fiber collector 45 cm. Then the physical, Thermal, mechanical properties and crystallization structure were studied. From the experiment, it was found that the fiber characteristics were not continuous and polybutylene succinate effects the fiber size as the volume increases. The thermal properties (DSC) showed the cold crystallization temperature (T_{cc}) of the polylactic acid at 105.8 °C and the composite fiber sheet at 91.7 °C. This suggests that the addition of polybutylene succinate may effect polylactic acid crystallization. This corresponds to the results of the X-ray diffraction test (XRD) which revealed increased crystallinity of polylactic acid when 10 %wt. of polybutylene succinate was added. It was also found that the addition of polybutylene succinate also increased the tensile properties. The results of this experiment, it is expected that the synthesized fibers will be useful for further development in the textile industry.

Keywords : Poly (lactic acid) / Poly (butylene succinate) / Melt blown / Nonwoven

บทนำ

อุตสาหกรรมสิ่งทอถือเป็นอุตสาหกรรมที่เติบโตอย่างรวดเร็วในปัจจุบันเมื่อเทียบกับอุตสาหกรรมในด้านอื่นๆ เนื่องจากเป็นอุตสาหกรรมที่เน้นการปรับปรุงสมบัติและสมรรถนะทางด้านเทคนิคของผลิตภัณฑ์มากกว่ารูปร่างหรือความสวยงาม สิ่งทอจึงเหมาะสมที่จะนำมาพัฒนางานในด้านต่างๆ เช่น ด้านการเกษตร ด้านการแพทย์ เป็นต้น (เข็มชัย, 2549) และหนึ่งในสิ่งทอที่กำลังได้รับความสนใจอย่างมากคือ ผ้าแบบไม่ถักทอ (Nonwoven) ซึ่งเป็นผ้าที่ขึ้นรูปจากเส้นใยโดยตรงที่อาศัยกลไกทางความร้อนหรือทางเคมี โดยที่ไม่ต้องอาศัยเครื่องทอผ้าในกระบวนการผลิตแต่มีรูปลักษณะและสมบัติเชิงกลใกล้เคียงหรือเหนือกว่าผ้าแบบทอ นอกจากนี้ผ้าแบบไม่ถักทอ ยังมีจุดเด่นตรงที่สามารถออกแบบให้มีลักษณะและสมบัติที่หลากหลายเพื่อให้เหมาะสมสำหรับการใช้งานที่แตกต่างกันไป (สมจิตต์, ขนิษฐา และพรทิพย์, 2549) กระบวนการขึ้นรูปผ้าแบบไม่ถักทอมีหลายวิธี เช่น การปั่นด้วยไฟฟ้า (Electrospinning) การปั่นด้วยแรง (Force spinning) กระบวนการปั่นหลอม (Melt spinning) การสปันบอนด์ (Spun bond) และการเป่าหลอม (Melt blown) เป็นต้น

กระบวนการเมลต์โพลีเมอร์ถือเป็นหนึ่งในกระบวนการที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมการผลิต เนื่องจากสามารถผลิตเส้นใยที่มีขนาดเล็กละเอียด (ระดับนาโนเมตรถึงไมโครเมตร) มีสมบัติการรอกที่ดี สามารถผลิตได้ในปริมาณมาก ประหยัดเวลา ไม่ซับซ้อน ต้นทุนต่ำและนำไปใช้งานร่วมกับผ้าแบบไม่ทักทอชนิดอื่นได้ สามารถนำไปใช้งานได้หลากหลาย เช่น แผ่นกรองด้านในหน้ากากอนามัย และผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์แบบใช้แล้วทิ้ง เป็นต้น (จूरรัตน์, 2552) นอกจากนี้ยังเป็นกระบวนการผลิตที่สามารถเข้ากับเม็ดพอลิเมอร์ได้หลายชนิด เช่น พอลิพรอพิลีน (Polypropylene) พอลิสไตรีน (Polystyrene) และพอลิเอสเตอร์ (Polyester) เป็นต้น (Duran, et al., 2013) แต่เนื่องด้วยปัญหาสิ่งแวดล้อมที่ได้รับความสำคัญในปัจจุบัน การใช้พอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมจึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจในอุตสาหกรรมสิ่งทอ และพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่นิยมนำมาใช้ในปัจจุบันคือ พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid หรือ PLA) เป็นพอลิเมอร์ที่ได้มาจากทรัพยากรหมุนเวียน ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม มีความเข้ากันได้ดีทางชีวภาพ มีความคงตัวทางความร้อนที่ดี พอลิแลคติกแอซิดเป็นพอลิเอสเตอร์อเนกประสงค์ที่ใช้งานได้หลากหลายด้าน แต่ยังคงมีจุดอ่อนที่สำคัญคือความเปราะ และความเป็นผลึกที่ต่ำ ซึ่งจุดอ่อนเหล่านี้ยังคงกลายเป็นปัญหาหลักของการประยุกต์ใช้งาน (Yuanyuan, et al., 2016)

การปรับปรุงสมบัติด้านความแข็งแรงของพอลิแลคติกแอซิดสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การเติมอนุภาคนาโนของสารอนินทรีย์ อาศัยกระบวนการขึ้นรูปพอลิเมอร์ และอีกหนึ่งวิธีที่นิยมใช้คือการผสมพอลิเมอร์ชนิดอื่นเข้าไปเพื่อทำการปรับปรุงสมบัติเพราะเป็นวิธีที่ง่ายและสามารถปรับปรุงโครงสร้างได้เป็นอย่างดี (Huiqin et al., 2020) โดยพอลิเมอร์ที่นำมาผสมนั้นจะต้องเป็นพอลิเมอร์ที่มีความเหนียว มีความยืดหยุ่นเพื่อที่จะช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นของพอลิแลคติกแอซิด ซึ่งพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเป็นตัวเลือกที่น่าสนใจ โดยจากการศึกษาของ Elwathig Hassan, et al. (2018) ที่ศึกษาเส้นใยผสมของพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (Polybutylene succinate หรือ PBS) โดยกระบวนการปั่นหลอม พบว่าเส้นใยผสมพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีความเข้ากันได้สูง และมีความเป็นผลึกเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเติมพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต 12 เปอร์เซ็นต์ (โดยน้ำหนัก) ในพอลิแลคติกแอซิดทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงลดลง 39 เปอร์เซ็นต์ และค่าการยืดตัว (Elongation) เพิ่มขึ้น 40 เปอร์เซ็นต์ (Elwathig, et al. 2018) นอกจากนี้ Nikoleta, et al. (2014) ยังได้ศึกษาการผลิตเส้นใยผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตในอัตราส่วนที่ต่างกัน ผ่านกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต (Electrospinning) จากการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนและโครงสร้างผลึกแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตจะทำให้อุณหภูมิกลายแก้ว (T_g) ลดลง และเส้นใยมีความเป็นผลึกเพิ่มขึ้น นอกจากนี้พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตยังแสดงผล พลาสติไซเซอร์ (Plasticizer effect) ซึ่งทำให้เส้นใยมีความอ่อนนุ่ม ยืดหยุ่น ทนต่อความร้อนและสภาวะกรดต่างเพิ่มขึ้น (Nikoleta, et al., 2014) เช่นเดียวกันกับ Tadashi Yokohara, et al. (2008) ที่พบว่าการเพิ่มพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต จะช่วยเพิ่มอัตราการตกผลึกของพอลิแลคติกแอซิด นอกจากนี้อุณหภูมิของการตกผลึกแบบเย็น (Cold-crystallization) ของสารผสมจะต่ำกว่าอุณหภูมิของพอลิแลคติกแอซิดปกติ ซึ่งเป็นผลมาจากความสามารถในการสร้างนิวเคลียสของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่นำไปสู่การสร้างผลึกของพอลิแลคติกแอซิดระหว่างเย็นตัว (Tadashi & Masayuki, 2008) จากงานวิจัยข้างต้น

พบว่าพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (Polybutylene succinate หรือ PBS) ถือเป็นหนึ่งทางเลือกที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของพอลิแลคติกแอซิดได้ดี เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีความยืดหยุ่นสูง มีความเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable) รวมถึงเป็นวัสดุชีวภาพที่หาได้ง่ายและมีต้นทุนต่ำอีกด้วย (Shen, Rodion, Sengul & Stephan, 2019)

ในงานวิจัยนี้ กระบวนการเมลต์โบลวนำมามาใช้เพื่อผลิตผ้าแบบไม่ถักทอของพอลิแลคติกแอซิดบริสุทธิ์ พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์ และพอลิแลคติกแอซิดผสมพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน จากนั้นศึกษาสัณฐานวิทยา ศึกษาสมบัติเชิงกล ศึกษาสมบัติทางความร้อนและโครงสร้างผลึกของเส้นใยเพื่อเป็นประโยชน์ในการนำไปพัฒนาในอุตสาหกรรมสิ่งทอต่อไป

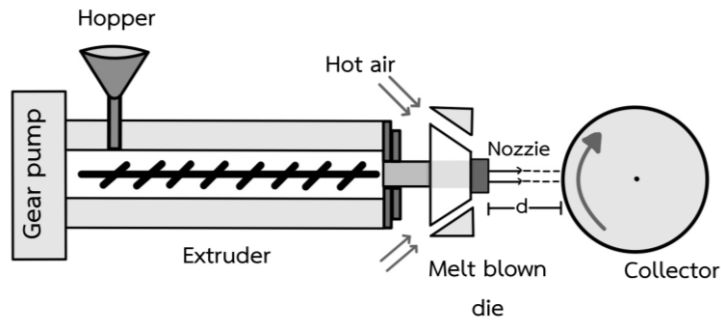
วิธีดำเนินการวิจัย

สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

พอลิแลคติกแอซิด (Poly (lactic acid); PLA, Ingeo™ Biopolymer 3251D, Nature Works, LLC, USA; MFI 24 g/10 min, density 1.24 g cm⁻³) พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (Poly(butylene succinate); PBS, Biopolymer™ FZ78TM, PTT MCC Biochem, Thailand; MFI 27.96 g/10 min, density 1.31 g cm⁻³) เครื่องผลิตผ้าเมลต์โบลว (Melt blown machine)

การเตรียมเม็ดพอลิเมอร์และการขึ้นรูปผ้าแบบไม่ถักทอด้วยกระบวนการเมลต์โบลว

การเตรียมเม็ดพอลิเมอร์โดยจะนำเม็ดพอลิแลคติกแอซิดและเม็ดพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมาอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้น ทำการผสมเม็ดพอลิเมอร์ทั้งสอง โดยใช้อัตราส่วนของเม็ดพอลิแลคติกแอซิดต่อพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ดังนี้ 100/0, 97.5/2.5, 95/5, 90/10 และ 0/100 โดยน้ำหนัก จากนั้นนำเม็ดพอลิเมอร์ผสมไปขึ้นรูปด้วยกระบวนการเมลต์โบลว กระบวนการเมลต์โบลว เป็นกระบวนการเป่าหลอมที่ขึ้นรูปจากเม็ดพอลิเมอร์โดยตรง โดยเม็ดพอลิเมอร์จะถูกป้อนผ่านเครื่องอัดรีด (Extruder) โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิที่ใช้ตั้งแต่ตัวถังใส่พอลิเมอร์ (Hopper) จนถึงหัวฉีดอยู่ที่ประมาณ 170 ถึง 270 องศาเซลเซียส ตามลำดับ พอลิเมอร์ที่ถูกหลอมเหลวจนได้อุณหภูมิและความหนืดที่เหมาะสม จากนั้นพอลิเมอร์จะถูกป้อนด้วยอัตราการป้อนเนื้อพอลิเมอร์ (Throughput Rate: TP) อยู่ที่ 13.2 กรัมต่อรูต่ออนาที แล้วถูกเป่าด้วยความดันลมที่ 0.4 เมกะปาสคาล เข้าสู่แม่พิมพ์แบบสามรูที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.35 มิลลิเมตร ระยะห่างระหว่างหัวฉีดถึงตัวเก็บผ้าคือ 45 เซนติเมตร และอัตราการไหลของไนโตรเจนอยู่ที่ 40 มิลลิตรต่ออนาที โดยแสดงกระบวนการขึ้นรูปผ้าแบบไม่ถักทอ ดังภาพที่ 1 หลังจากนั้นจะได้แผ่นผ้าไม่ถักทอที่ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตในอัตราส่วนที่ต่างกันบนตัวเก็บเส้นใย และนำไปทดสอบสมบัติต่างๆ ของแผ่นผ้าต่อไป



ภาพที่ 1 กระบวนการขึ้นรูปเส้นใยของเมลต์โบลวน์

การวิเคราะห์และทดสอบสมบัติของแผ่นผ้าแบบไม่ถักทอระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต หลังจากขึ้นรูปแผ่นเส้นใยผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตด้วยกระบวนการเมลต์โบลวน์ทั้ง 5 อัตราส่วน ในสภาวะที่กำหนดแล้ว จึงนำแผ่นเส้นใยมาศึกษาสมบัติต่างๆ ดังนี้

1. ศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใยผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) ที่ 20 กิโลโวลต์ กำลังขยาย $\times 1000$ เท่า และ $\times 5000$ (Low vacuum mode) ขนาดตัวอย่าง 1×1 เซนติเมตร

2. ศึกษาสมบัติเชิงกลของเส้นใยผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง Instron universal testing machine (INSTRON 5560) ตามมาตรฐาน ASTM-D638 ที่อัตราการดึง 10 มิลลิเมตร/นาที โดยจะใช้ตัวอย่างขนาด 1×10 เซนติเมตร

3. ศึกษาสมบัติทางความร้อนของเส้นใยผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential scanning calorimetry analyzer: DSC) ตัวอย่างจะถูกให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 25 ถึง 200 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศไนโตรเจน (อัตราการไหล 20 มิลลิลิตรต่อนาที) และมีอัตราการให้ความร้อน (Heating rate) ที่ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที

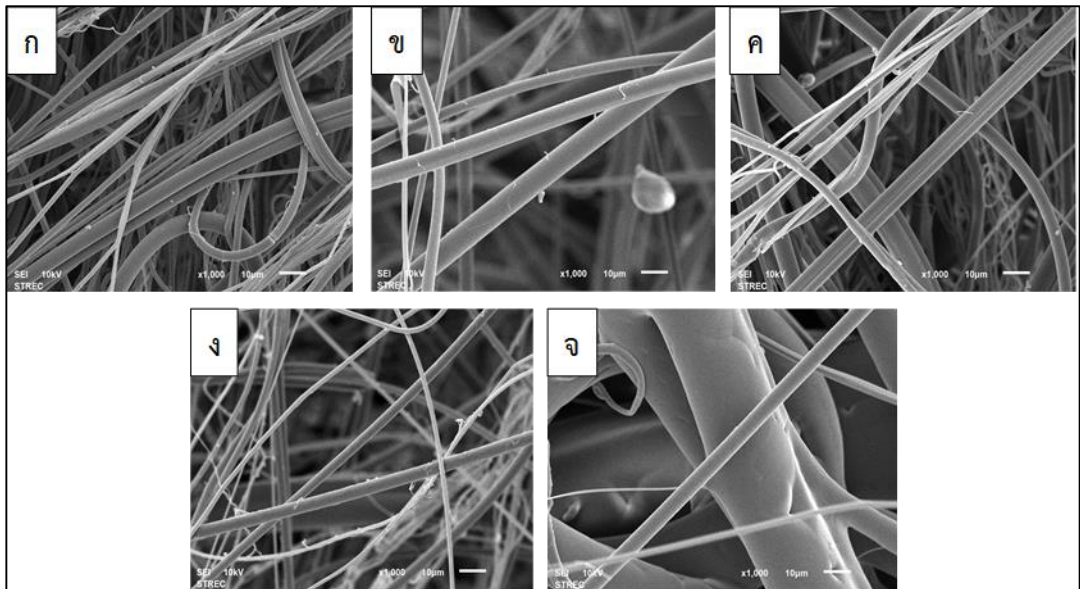
4. ศึกษาโครงสร้างผลึกของเส้นใยผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray diffraction: XRD) โดยใช้แหล่งกำเนิดรังสี Cu $K\alpha$ ในช่วงมุมการเลี้ยวเบน ตั้งแต่ 5 ถึง 40 องศา

ผลการวิจัย

การทดสอบสัณฐานวิทยา

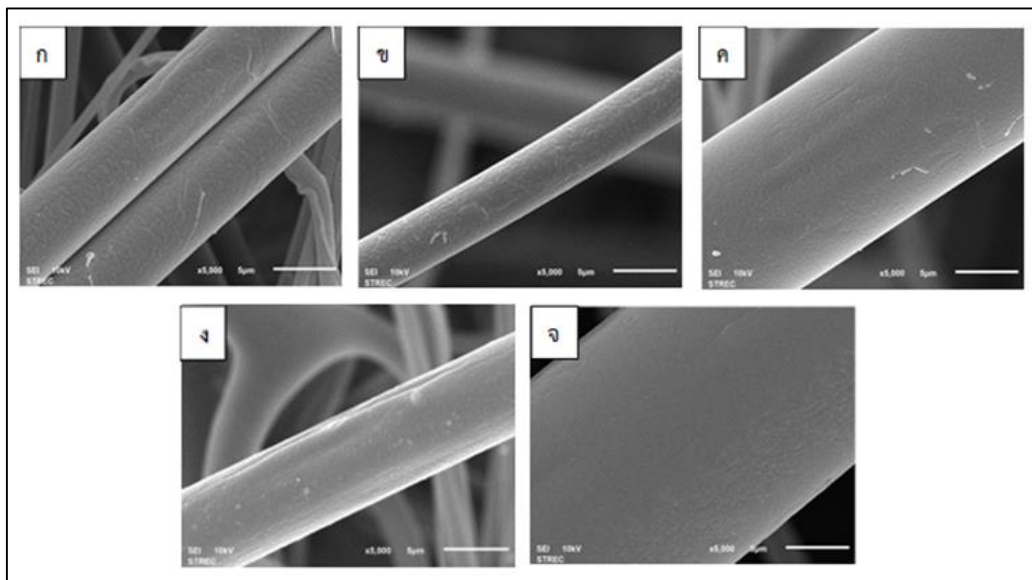
จากการศึกษาสัณฐานวิทยาของเส้นใยผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่อัตราส่วนต่างๆ ด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงดังภาพที่ 2 พบว่าลักษณะของเส้นใยที่ได้ของแต่ละอัตราส่วนจะเป็นลักษณะของเส้นใยที่ไม่ต่อเนื่องและไม่สม่ำเสมอ เหตุเพราะเป็นการขึ้นรูปในลักษณะฉีดพ่นด้วยลมร้อนที่มีความเร็วสูงทำให้เส้นใยไม่มีโอกาสไหลผ่านรูหัวฉีดอย่างต่อเนื่องและดึงยืดยาวเหมือนกันขึ้นรูปผ้าแบบไม่ถักทอวิธีอื่น ส่งผลทำให้แผ่นเส้นใยมีความแข็งแรงน้อย (จूरितน์, 2552) และสังเกตว่าที่บริเวณเส้นใยจะพบเศษของพอลิเมอร์ติดอยู่จึงสันนิษฐานว่าอาจเกิดจากผลความเร็วลมที่สูงจึงทำให้เกิดการแตกของของพอลิเมอร์ที่

ถูกหลอมก่อนที่จะถูกทำให้เป็นเส้นใย (Monika et al., 2011) และการศึกษาขนาดของเส้นใยผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิবিวิทิลีนซัคซิเนต พบว่าแผ่นเส้นใยพอลิแลคติกแอซิดบริสุทธิ์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเท่ากับ 2.26 ไมโครเมตร และแผ่นเส้นใยพอลิবিวิทิลีนซัคซิเนตมีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยอยู่ที่ 6.46 ไมโครเมตร และแผ่นเส้นใยผสมที่มีอัตราส่วนของพอลิবিวิทิลีนซัคซิเนต 2.5 5 และ 10 ร้อยละโดยน้ำหนัก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยอยู่ที่ 4.21 3.30 และ 3.10 ไมโครเมตร ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าพอลิবিวิทิลีนซัคซิเนตทำให้แผ่นเส้นใยมีขนาดที่เล็กลงเมื่อปริมาณของพอลิবিวิทิลีนเพิ่มมากขึ้น



ภาพที่ 2 สัณฐานวิทยาของเส้นใยผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิবিวิทิลีนซัคซิเนตที่อัตราส่วนต่างๆ ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด $\times 1000$ เท่า; (ก) 100/0, (ข) 97.5/2.5, (ค) 95/5, (ง) 90/10 และ (จ) 0/100

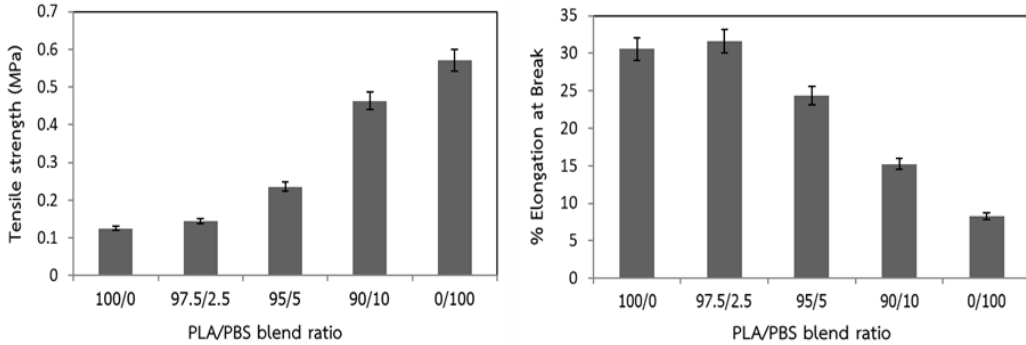
นอกจากนี้ยังศึกษาลักษณะความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ทั้งสอง พบว่าเส้นใยพอลิแลคติกแอซิดบริสุทธิ์มีพื้นผิวเรียบเช่นเดียวกับพอลิবিวิทิลีนซัคซิเนต เมื่อพิจารณาแผ่นเส้นใยผสม พบว่า ในขณะที่เฟสพอลิবিวิทิลีนซัคซิเนตมีการกระจายตัวที่สม่ำเสมออยู่ในองค์ประกอบทั้งหมดของเส้นใยผสมทั้งหมด เนื่องจากไม่พบการแยกเฟสที่ชัดเจนของส่วนประกอบรวมถึงไม่พบรูพรุน ซึ่งบ่งชี้ได้ถึงความเข้ากันได้ของพอลิแลคติกแอซิดและพอลิবিวิทิลีนซัคซิเนต การเพิ่มปริมาณพอลิবিวิทิลีนซัคซิเนตลงไป จะทำให้เฟสการกระจายตัวของพอลิবিวิทิลีนซัคซิเนตชัดเจนขึ้นโดยมีการรวมตัวของอนุภาคน้อยลงในส่วนผสม และลักษณะโดยทั่วไปจะหยาบขึ้นเมื่อมีปริมาณพอลิবিวิทิลีนซัคซิเนตเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 3



ภาพที่ 3 สันฐานวิทยาของเส้นใยผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่อัตราส่วนที่แตกต่างกัน ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดที่กำลังขยาย $\times 5000$ เท่า ; (ก) 100/0, (ข) 97.5/2.5, (ค) 95/5, (ง) 90/10 และ (จ) 0/100

การทดสอบความทนต่อแรงดึง

จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของแผ่นเส้นใยผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง Instron universal testing machine พบว่าความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) ของแผ่นเส้นใยพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์มีค่าสูงกว่าแผ่นใยพอลิแลคติกแอซิดบริสุทธิ์ และการเพิ่มปริมาณพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตลงไปส่งผลให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามปริมาณของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ดังภาพที่ 4 ในขณะที่เปอร์เซ็นต์การยืดตัวที่จุดแตกหัก (% Elongation at break) ของแผ่นเส้นใยพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์มีค่าการยืดตัวที่จุดแตกหักต่ำกว่าแผ่นเส้นใยพอลิแลคติกแอซิด เมื่อเพิ่มปริมาณของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตลงไปค่าความยืดตัวที่จุดแตกหักจะค่อยๆ ลดลง ตามปริมาณของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่เพิ่มขึ้น ดังภาพที่ 4 ผลที่ได้ทั้งหมดมีความแตกต่างจากงานของ (Elwathig, Salah, You & Muhuo, 2018) ที่ศึกษาคุณสมบัติของพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตโดยกระบวนการเมลต์โบลน พบว่าพอลิแลคติกแอซิดบริสุทธิ์มีค่าต้านทานแรงดึงสูงสุด และเมื่อเพิ่มปริมาณพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงลดลง ในขณะที่ค่าการยืดตัวของพอลิแลคติกแอซิดมีค่าต่ำสุด และมีเปอร์เซ็นต์การยืดตัวเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (Elwathig, Salah, You & Muhuo, 2018) ซึ่งเป็นไปได้ว่าผลลัพธ์ที่ได้ อาจแตกต่างกันไปตามเกรดของวัสดุและวิธีการขึ้นรูปแผ่นเส้นใยที่แตกต่างกัน (Phiriyawirut, Sarapat, Sirima, & Prasertchol, 2019) หรือลักษณะโครงสร้างที่เปลี่ยนแปลงไปในระหว่างกระบวนการขึ้นรูปแผ่นเส้นใย



ภาพที่ 4 กราฟแสดงสมบัติเชิงกลของเส้นใยผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต

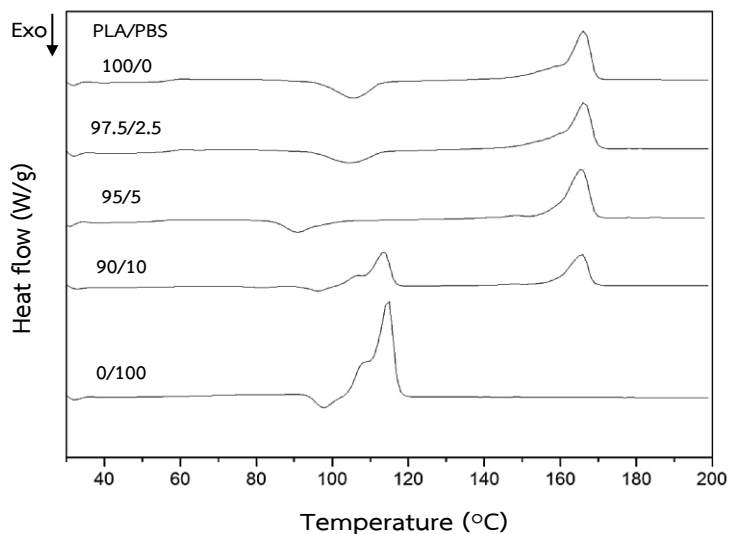
การทดสอบสมบัติทางความร้อน

การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (DSC) ของเส้นใยพอลิแลคติกแอซิดบริสุทธิ์ พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์ และเส้นใยพอลิแลคติกแอซิดผสมพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตด้วยอัตราการผลิตเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที แสดงไว้ดังภาพที่ 5 และสรุปข้อมูลไว้ในตารางที่ 1 จากการทดสอบพบว่าเส้นใยของพอลิแลคติกแอซิดบริสุทธิ์ มีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) อยู่ที่ 60.5 องศาเซลเซียส มีอุณหภูมิการตกผลึกแบบเย็น (T_{cc}) ที่ 105.8 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) โดยประมาณอยู่ที่ 166 องศาเซลเซียส ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์การตกผลึกที่ 18 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่เส้นใยพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีอุณหภูมิการตกผลึกแบบเย็น (T_{cc}) อยู่ที่ 97.8 องศาเซลเซียส อุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) อยู่ที่ 114.8 องศาเซลเซียส และมีเปอร์เซ็นต์การตกผลึกที่ 41 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีความเป็นผลึกสูงมากเมื่อเทียบกับเส้นใยของพอลิแลคติกแอซิด สามารถยืนยันโดย XRD ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความเข้มข้นของค่าสูงสุดของการเลี้ยวเบนอย่างชัดเจน

ตารางที่ 1 อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว อุณหภูมิการหลอมเหลว อุณหภูมิการตกผลึก และความร้อนแฝงของการหลอมเหลวผ่านเส้นใยผสมพอลิแลคติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ในอัตราส่วนต่างๆ

PLA/PBS blend ratio	PLA phase				PBS phase		
	T_g (°C)	T_m (°C)	T_{cc} (°C)	ΔH_m (J/g)	T_m (°C)	T_{cc} (°C)	ΔH_m (J/g)
100/0	60.7	166.3	105.8	51.2	-	-	-
97.5/2.5	60.5	166.3	104.5	52.4	-	-	-
95/5	60.2	166.5	96.2	51.8	-	-	-
90/10	59.4	165.6	91.7	26.2	113.5	96.2	30.0
0/100	-	-	-	-	114.6	97.8	81.6

สำหรับเส้นใยผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (PLA/PBS) กราฟ แสดงเฉพาะ สมบัติทางความร้อนของเฟสพอลิแลคติกแอซิด เมื่อปริมาณพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตอยู่ในช่วง 2.5 และ 5 ร้อยละ โดยน้ำหนัก เมื่อเพิ่มปริมาณของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเป็น 10 ร้อยละโดยน้ำหนัก กราฟ DSC จึงจะแสดงสมบัติ ทางความร้อนของทั้งเฟสพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของปริมาณ พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตยังส่งผลให้อุณหภูมิการตกผลึกแบบเย็น (T_c) ลดลงต่ำกว่าอุณหภูมิของพอลิแลคติกแอซิด บริสุทธิ์ ซึ่งอาจเป็นผลมาจากความสามารถในการสร้างนิวเคลียสของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่นำไปสู่การสร้างผลึก ของพอลิแลคติกแอซิดระหว่างเย็นตัว (Nikoleta, et al., 2014) ในขณะที่อุณหภูมิหลอมเหลวและอุณหภูมิการ เปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วไม่ได้มีการเปลี่ยนแปลงมากนัก

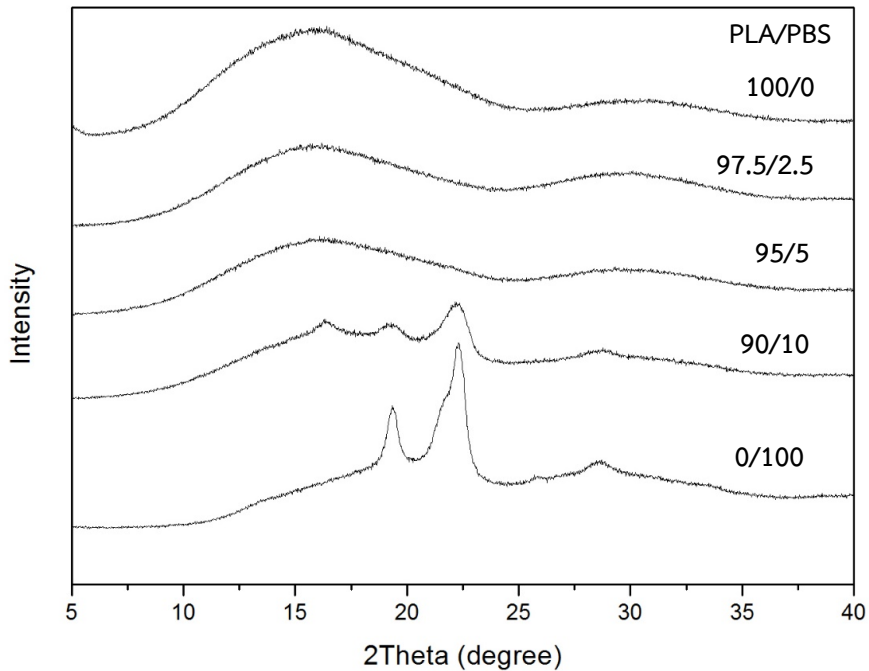


ภาพที่ 5 กราฟ DSC แสดงการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของเส้นใยผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและ พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตในอัตราส่วนที่ต่างกัน

การทดสอบความเป็นผลึก

จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างความเป็นผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction: XRD) โดยใช้แหล่งกำเนิดรังสี $\text{Cu K}\alpha$ ในช่วงมุมการเลี้ยวเบน (2θ) ตั้งแต่ 5 ถึง 40 องศา ของแผ่น เส้นใยพอลิแลคติกแอซิดบริสุทธิ์ พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์ และแผ่นเส้นใยผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ดังภาพที่ 6 จากผลการวิเคราะห์พบว่าแผ่นเส้นใยพอลิแลคติกแอซิดบริสุทธิ์ ไม่แสดง พิกการเลี้ยวเบนที่ชัดเจน ส่วนใหญ่จะแสดงลักษณะของพีคที่กว้าง (Broad) แสดงถึงความเป็นอสัณฐาน (Amorphous) หรือมีปริมาณผลึกน้อย ซึ่งแสดงมุมการเลี้ยวเบนที่มุม 2θ ประมาณ 16.2 องศา และ 31.2 องศา ตามลำดับ ซึ่งแตกต่างจากพอลิแลคติกแอซิดบริสุทธิ์ (Nikoleta, et al., 2014) ส่วนแผ่นเส้นใย

พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์ แสดงพีคที่ตำแหน่ง 2 ที่มุม 19.4 22.3 และ 29.1 องศา ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างผลึกแบบโมโนคลินิกหรือแอลฟา (Monoclinic, α) (Jeong, Seung & Ji, 2005)



ภาพที่ 6 การเปรียบเทียบของรังสีเอ็กซ์ของเส้นใยผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตในอัตราส่วนที่ต่างกัน

สำหรับแผ่นเส้นใยผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต จากการวิเคราะห์พบว่า แผ่นเส้นใยที่มีปริมาณพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตอยู่ที่ 2.5 และ 5 ร้อยละโดยน้ำหนัก ไม่ปรากฏพีคของความเป็นผลึก แต่แสดงให้เห็นเฉพาะการมีอยู่ของออสันฐานเช่นเดียวกับแผ่นเส้นใยพอลิแลคติกแอซิด แต่ความเข้มข้นของพีคที่ 2 θ ประมาณ 16.2 และ 31.2 องศา มีค่าลดลง ซึ่งบ่งบอกได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างผลึกเล็กน้อย และเมื่อเพิ่มพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตปริมาณ 10 ร้อยละโดยน้ำหนัก พบว่ามีพีคเพิ่มขึ้นที่ตำแหน่ง 19.4 และ 29.1 องศา เกิดขึ้นเมื่อเทียบกับแผ่นเส้นใยพอลิแลคติกแอซิดบริสุทธิ์ แสดงว่าพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตสามารถเพิ่มความ เป็นผลึกของพอลิแลคติกแอซิดได้ ซึ่งสอดคล้องกับผลของการทดสอบทางความร้อน (DSC) ที่เมื่อเติมพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตลงไปทำให้อุณหภูมิการตกผลึก (T_{cc}) ของพอลิแลคติกแอซิดลดลงและอาจส่งผลต่ออัตราการเกิดผลึก ได้ดังที่กล่าวมาข้างต้น

อภิปรายผล

จากผลการวิจัยในครั้งนี้สามารถสรุปได้ว่า เส้นใยผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ถูกเตรียมโดยกระบวนการเป่าลอม ซึ่งได้ทำการศึกษาพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (PLA/PBS) ที่อัตราส่วนดังนี้ 100/0, 97.5/2.5, 95/5, 90/10 และ 0/100 ร้อยละโดยน้ำหนัก จากการศึกษาลักษณะ สัณฐานวิทยาพบว่าเส้นใยจะไม่ต่อเนื่อง โดยกระบวนการเป่าลอมไม่สม่ำเสมอและมีเศษพอลิเมอร์หลงเหลืออยู่ เล็กน้อยตามเส้นใย เนื่องจากผลของกระบวนการขึ้นรูปแบบเป่าลอมที่อาศัยลมร้อนความเร็วสูงในการขึ้นรูป เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยผสมมีขนาดลดลงตามปริมาณของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่เพิ่มขึ้น และสารทั้งสองมีความเข้ากันได้โดยไม่แยกเฟส นอกจากนี้การเพิ่มพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตลงไปยังช่วยเพิ่มความเป็นผลึกของ พอลิแลคติกแอซิด โดยมีผลกับอุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) เพียงเล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับผลของการทดสอบการ เลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ที่พบความเป็นผลึกเพิ่มขึ้นของพอลิแลคติกแอซิดที่ปริมาณพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต 10 ร้อยละโดยน้ำหนัก นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตความต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น แต่ ความสามารถในการยืดตัวที่จุดแตกหักกลับมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยสรุปแล้วเส้นใยผสมระหว่าง พอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่ได้จากกระบวนการปั่นลอม เป็นวัสดุที่มีแนวโน้มจะสามารถนำไป ประยุกต์ใช้งานในหลากหลายด้าน

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณทุนสนับสนุนการวิจัย ทุนพัฒนาบัณฑิต (วช.) จากสำนักงานวิจัยแห่งชาติ ที่ให้การสนับสนุนทุนในการทำวิจัย ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยราชภัฏวชิรญาณบุรี และมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ที่อำนวยความสะดวกทางด้านเครื่องมือ และอุปกรณ์ต่างๆ ในการทำงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- เข็มชัย เหมะจันทร์. (2549). *สิ่งทอเทคนิค*. กรุงเทพฯ : ออฟเซ็ท ครีเอชั่น.
- จूरिरัตน์ ประสาร. (2552). *นอนวูฟเวน : ผ้าไม่ถักไม่ทอ*. [Online]. Available: https://www2.mtec.or.th/th/e-magazine/admin/upload/246_21_27.pdf [2565, กุมภาพันธ์ 14].
- สมจิตต์ ตั้งชัยวัฒนา, ขนิษฐา อัสวชัยนรงค์ และพรทิพย์ ลามอ. (2549). ผ้าไม่ทอ (Nonwoven). *วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ*, 54(171), 35-36.
- Duran K., Deniz D., Gurkan O. & Kevser K. (2013). Investigation of the physical properties of melt blown nonwovens for air filtration. *Journal of textile & apparel*, 23(2), 136-142.
- Elwathig, H., Salah, E.E., You, W. & Muhuo, Y. (2018). Biodegradable poly (lactic acid)/poly butylene succinate) fibers with high elongation for health care products. *Textile Research Journal*, 88(15), 1735-1744.
- Huiqin, H., Guo, X., Gu, J., Zhang, Y., Chen, Q. & Wei, Z. (2020). Biodegradable poly (lactic acid)/poly (butylene succinate) nanofibrous membrane with core-shell structure and high density for improved mechanical properties. *Journal of Polymer Research*, 27(9), 279-291.
- Jeong, E.H., Seung, S. & Ji, H. (2005). Electrospinning and structural characterization of ultrafine poly (butylene succinate) fibers. *Polymer*, 46(23), 9538-9543.
- Monika, R., Joanna, G., Janusz, F., Janusz, J. & Jaroslaw, J. (2011). PLA melt-blown fibrous structures for potential biomedical applications. *Engineering of Biomaterials*, 104(1), 5-7.
- Nikoleta, S., Dilyana, P., Rosica, M., Antoniya, T., Nevena, M., Philippe, D. & Iliya, R. (2014). Poly(L-lactide) and poly (butylene succinate) immiscible blends: From electrospinning to biologically active materials. *Materials Science & Engineering Materials for Biological Applications*, 41(1), 119-126.
- Phiriyawirut, M., Sarapat, K., Sirima, S. & Prasertchol, A. (2019). Porous electrospun nanofiber from biomass-based polyester blends of polylactic acid and polybutylene succinate. *Journal of Polymer Chemistry*, 9(1), 1-15.
- Shen, S., Rodion, K., Sengül, T. & Stephan, K. (2019). Polylactide (PLA) and its blends with poly (butylene succinate) (PBS): A Brief review. *Polymers*, 11(1193), 7-28.
- Tadashi, Y. & Masayuki, Y. (2008). Structure and properties for biomass-based polyester blends of PLA and PBS. *European Polymer Journal*, 44(3), 677-685.

Yuanyuan, C., Luke, M.G., John, A.K., John, G.L., Clement, L.H. & Declan, M.D. (2016). Review of multifarious applications of poly (lactic acid). **Polymer-Plastics Technology and Engineering**, 55(10), 1057-1075.



ผลของแป้งข้าวัดดัดแปลงต่อการเจริญของ *Lacticaseibacillus paracasei* ที่แยกมาจาก
ต้นหอมดอง

Effect of Rice Modified Starch on the Growth of *Lacticaseibacillus paracasei*
Isolated from Pickled Spring Onions

จิตยา พานิชเจริญ*

Thitaya Panicharoen

วีระพล มีตา*

Veelaphol Meeta

ศิริพร ทิพย์สิงห์**

Siriporn Tipsing

รัชณุ เมยดง**

Ratchanu Meidong

Received : May 2, 2023

Revised : September 5, 2023

Accepted : October 6, 2023

บทคัดย่อ

โพรไบโอติกส์เป็นกลุ่มจุลินทรีย์ที่มีประโยชน์ต่อมนุษย์ ในการศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อแยกแบคทีเรียกรดแล็กติกจากอาหารหมักดอง ทดสอบความสามารถในการยับยั้งเชื้อก่อโรค กิจกรรมต้านอนุมูลอิสระ และศึกษาผลของแป้งดัดแปลงจากข้าวต่อการเจริญของโพรไบโอติกส์ ผลการวิจัยสามารถแยกแบคทีเรียกรดแล็กติกได้ 61 ไอโซเลต โดยจำนวน 29 ไอโซเลต มีความสามารถในการยับยั้งแบคทีเรียก่อโรคทดสอบ โดยไอโซเลต LF22b มีประสิทธิภาพในการยับยั้งแบคทีเรียก่อโรค *Salmonella enterica* Typhimurium DMST 8023 (22.66 มิลลิเมตร), *Staphylococcus aureus* DMST 562 (20.45 มิลลิเมตร) และ *Escherichia coli* DMST 4212 (18.33 มิลลิเมตร) สูงสุดอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีกิจกรรมต้านอนุมูลอิสระ (ร้อยละ 48.12) อีกทั้งยังพบว่าแป้งดัดแปลงจากข้าวช่วยส่งเสริมการเจริญของไอโซเลต LF22b อย่างมีนัยสำคัญ ไอโซเลต LF22b ถูกจำแนกโดย

*นักศึกษาลัทธิสุตรวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏ
บ้านสมเด็จเจ้าพระยา

Bachelor of Science Students Department of Microbiology Faculty of Science and Technology
Bansomdejchaopraya Rajabhat University e-mail: ratchanu.me@bsru.ac.th

**อาจารย์ประจำสาขาวิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา
Lecturer, Department of Microbiology Faculty of Science and Technology Bansomdejchaopraya
Rajabhat University(Corresponding Author)

ใช้ลำดับนิวคลีโอไทด์ของยีน 16S rDNA พบว่าเป็น *Lacticaseibacillus paracasei* จากผลการทดลองนี้ สามารถบ่งชี้ได้ว่า *L. paracasei* LF22b มีประสิทธิภาพที่จะนำไปใช้พัฒนาเครื่องดื่มเพื่อสุขภาพต่อไป

คำสำคัญ : แบคทีเรียกรดแล็กติก / การต้านเชื้อ / การต้านอนุมูลอิสระ / โปรไบโอติกส์

ABSTRACT

Probiotics are a group of microorganisms that are beneficial to human. The objectives of this study were to isolate lactic acid bacteria from fermented foods, to investigate antimicrobial activity and antioxidant activity and to study the effects of modified rice starch on the growth of probiotics. It was found that 61 isolates of lactic acid bacteria were isolated and 29 isolates inhibited pathogenic tested strains. Isolate LF22b showed significantly highest effective antimicrobial activity against *Salmonella enterica* Typhimurium DMST 8023 (22.66 mm), *Staphylococcus aureus* DMST 562 (20.45 mm) and *Escherichia coli* DMST 4212 (18.33 mm). Moreover, this isolate exhibited antioxidant activity (48.12 %). Modified rice starch significantly enhanced the growth of LF22b. Isolate LF22b was identified based on 16S rDNA sequencing as *Lacticaseibacillus paracasei*. These results indicated that *L. paracasei* LF22b is effective for further development of functional beverage.

Keywords : Lactic Acid Bacteria / Antimicrobial / Antioxidant / Prebiotics

บทนำ

โปรไบโอติกส์เป็นแบคทีเรียที่ให้ประโยชน์ต่อสุขภาพของโฮสต์เมื่อได้รับในปริมาณที่เหมาะสม (FAO/WHO, 2006) แบคทีเรียกลุ่มใหญ่ที่ถูกนำมาศึกษา และพบว่ามีคุณสมบัติเป็นโปรไบโอติกส์คือ แบคทีเรียกรดแล็กติก (lactic acid bacteria; LAB) ซึ่งสามารถแยกได้จากอาหารหมักดองหลายชนิด เช่น นมหมัก ซีส (de Souza, Borgonovi, Casarotti, Todorov & Penna, 2019) และอาหารหมักที่ทำจากผัก (รัชชู, ภัทร วรธรณ และศิริพร, 2564) แบคทีเรียกรดแล็กติกมีลักษณะทั่วไปคือ เป็นแบคทีเรียแกรมบวก ไม่สร้างสปอร์ รวมถึงไม่มีการสร้างเอนไซม์คะตะเลส (Catalase) มีทั้งชนิดที่มีรูปท่อน และรูปกลม (Wansutha, Yuenyaow, Jantama & Jantama, 2018) ทนต่อกรด และต่าง เป็นกลุ่มแบคทีเรียที่มีประโยชน์ในลำไส้ของมนุษย์ สามารถผลิตสารประกอบของโปรตีนที่มีประสิทธิภาพในการยับยั้งแบคทีเรียอื่นๆ ที่ก่อให้เกิดโรคในลำไส้ได้ เรียกสารนั้นว่าแบคเทอริโอซิน (bacteriocin) กลุ่มแบคทีเรียกรดแล็กติกที่มีการศึกษากันอย่างมาก เช่น สายพันธุ์ *Lactiplantibacillus plantarum* (Angmo, Kumari, Savitri & Bhalla, 2016) *Pediococcus pentosaceus* และ *Lactococcus lactis* (Ibarra-Martinez, et al., 2022) ทั้งนี้แบคทีเรียกรดแล็กติกจัดเป็นแบคทีเรียที่มีประโยชน์ต่อร่างกายของมนุษย์เป็นอย่างมาก เช่น มีประสิทธิภาพในการต้านทานแบคทีเรียก่อโรค ช่วยกระตุ้นระบบภูมิคุ้มกัน ป้องกันโรคมุมิแพ้ มะเร็ง รักษาอาการลำไส้แปรปรวน รักษาโรคลำไส้อักเสบ และ

อาการท้องร่วงที่เกิดจากยาปฏิชีวนะ (Shokryazdan, et al., 2014) เป็นต้น ทำให้ในปัจจุบันผู้คนมีความสนใจในโพรไบโอติกส์มากขึ้น

นอกจากคุณสมบัติหลักของโพรไบโอติกส์ที่สามารถต้านจุลินทรีย์ก่อโรคได้แล้ว (Angmo, Kumari, Savitri & Bhalla, 2016) ในปัจจุบันได้มีความสนใจในการศึกษาคุณสมบัติเชิงหน้าที่ (Functional properties) ที่เป็นคุณสมบัติเสริมที่ต่อร่างกายของโฮสต์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งคุณสมบัติการต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant) มีการศึกษาที่รายงานถึงแบคทีเรียกรดแล็กติกที่มีกิจกรรมต้านอนุมูลอิสระ เช่นสายพันธุ์ *L. delbrueckii* subsp. *bulgaricus* (Ding, et al., 2017), *L. plantarum* (Lin, et al., 2020), *Weissella confusa* (Sharma, Kandasamy, Kavitate & Shetty, 2018) สารต้านอนุมูลอิสระมีความสามารถในการชะลอวัย ชะลอกระบวนการที่ทำให้เข้าสู่วัยชรา ลดความเสี่ยงในการเป็นโรคมะเร็ง ช่วยในเรื่องความผิดปกติของสมอง โรคข้ออักเสบ ต้อกระจก หลอดเลือดแดง ลดความเสี่ยงของโรคหัวใจและหลอดเลือด (Shori, et al., 2022)

ปัจจุบันมีการนำโพรไบโอติกส์ไปพัฒนาผลิตภัณฑ์ส่งเสริมสุขภาพมากขึ้น และเริ่มมีการพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่เรียกว่า ซินไบโอติกส์ (Synbiotic) นั่นก็คือผลิตภัณฑ์ที่มีทั้งโพรไบโอติกส์และพรีไบโอติกส์ การที่จุลินทรีย์โพรไบโอติกส์ที่มีประโยชน์ต่อมนุษย์จะรอดชีวิตในระบบทางเดินอาหารได้นาน จำเป็นจะต้องมีอาหารของโพรไบโอติกส์นั่นคือสารประกอบพรีไบโอติกส์ ตัวอย่างแหล่งของพรีไบโอติกส์ที่มีรายงาน เช่น สารสกัดจากเมล็ดถั่วเหลือง สามารถส่งเสริมการเจริญของเชื้อโพรไบโอติกส์ได้สูงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับการใช้กลูโคสเป็นแหล่งคาร์บอน (Wongputtisin, Ramaraj, Unpaprom, Kawaree & Pongtrakul, 2015) ในงานของ Ferronato, Rossi, Pinto & Garavaglia, (2021) รายงานว่าสารสกัดพรีไบโอติกส์จากรำข้าวสามารถส่งเสริมการเจริญของ *L. acidophilus* และ *L. plantarum* ได้อย่างมีนัยสำคัญ และมีรายงานการสกัดสารประกอบจากหอมแดง ที่เป็นสารประกอบในกลุ่ม inulin-fructooligosaccharides ซึ่งสารประกอบที่สกัดได้นี้มีคุณสมบัติของพรีไบโอติกส์ซึ่งประกอบด้วยคาร์บอนที่ละลายในระบบทางเดินอาหาร มีคุณสมบัติการหมัก และสามารถส่งเสริมการเจริญของโพรไบโอติกส์ได้ (Aisara, et al., 2021) ทั้งนี้จากงานของมัลลิกา (2562) ได้ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดสารประกอบที่มีสมบัติเป็นพรีไบโอติกส์จากข้าวเชิงเศรษฐกิจ (ข้าวขาวดอกมะลิ 105) พบว่ามีสารประกอบพรีไบโอติกส์ที่สามารถส่งเสริมการเจริญของแบคทีเรียโพรไบโอติกส์ในกลุ่ม *Lactobacillus* spp. ได้สูง อีกทั้งในงานของ Ashwar, et al. (2018) พบว่าแป้งข้าวตัดแปลงมีสมบัติของพรีไบโอติกส์เมื่อใช้ร่วมในกระบวนการห่อหุ้มเซลล์พบว่าช่วยให้ *L. casei*, *L. brevis* และ *L. plantarum* หลังการห่อหุ้มเซลล์ สามารถรอดชีวิตในสภาวะของทางเดินอาหารและระหว่างการเก็บรักษาได้สูง จากข้อมูลนี้จึงมีความสนใจในการพัฒนาแป้งข้าวตัดแปลงจากข้าวขาวดอกมะลิ 105 และนำมาใช้ศึกษาสมบัติการเป็นพรีไบโอติกส์ต่อการเจริญของแบคทีเรียโพรไบโอติกส์สายพันธุ์ที่คัดเลือกได้ต่อไป

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อแยกแบคทีเรียกรดแล็กติกจากอาหารหมักดอง และตรวจสอบคุณสมบัติความเป็นโพรไบโอติกส์ ประกอบด้วยความสามารถในการยับยั้งเชื้อก่อโรค และสมบัติในการผลิตสารต้านอนุมูลอิสระ รวมถึงศึกษาสมบัติของแป้งข้าวตัดแปลงในด้านการเป็นพรีไบโอติกส์ต่อโพรไบโอติกส์สายพันธุ์ที่คัดเลือกเพื่อเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการนำไปใช้พัฒนาเครื่องสำอางต่อไป

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การคัดเลือกแบคทีเรียกรดแล็กติกจากอาหารหมักดอง

นำตัวอย่างอาหารหมักดอง (เช่น ผักดอง แหนมปลา แหนมหมู แหนมเนื้อ หม่าและหน่อไม้ดอง) จำนวน 24 ตัวอย่าง ที่นำมาจากตลาดในจังหวัดสมุทรสาคร ราชบุรี ชัยภูมิ นครราชสีมา และกรุงเทพมหานคร มาแยกเชื้อแบคทีเรียกรดแล็กติก โดยใช้วิธีที่ดัดแปลงมาจาก รัชชู, ภัทรวรรณ และศิริพร (2564) ใช้ตัวอย่าง 1 กรัม ใส่ลงในสารละลายไฮโปทอนิกคลอไรด์ (NaCl) ร้อยละ 0.85 (Normal saline solution; NSS) ปริมาตร 9 มิลลิลิตร จากนั้นทำการเจือจางก่อนนำไปเกลี่ย (Spread) ลงในอาหาร de Man, Rogosa and Sharpe (MRS) agar ที่ผสมแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO₃) ร้อยละ 0.5 (MRS-CaCO₃) จากนั้นนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง เลือกโคโลนีที่ปรากฏในรูปร่าง โคโลนีและมีลักษณะโคโลนีที่แตกต่างกันไปทำให้บริสุทธิ์ด้วยการขีดลาก (Streak) ลงบนอาหาร MRS-CaCO₃ จากนั้นทำการตรวจสอบลักษณะเบื้องต้นของแบคทีเรียกรดแล็กติก ด้วยการทดสอบการสร้างเอนไซม์คะตาเลส (Catalase) การติดสีแกรม และลักษณะเซลล์ แล้วนำเชื้อแบคทีเรียกรดแล็กติกที่ติดสีแกรมบวก ไม่สร้างสปอร์ และไม่สร้างเอนไซม์คะตาเลส เก็บในกลีเซอรอล (Glycerol) ร้อยละ 20 ที่ตู้ -80 องศาเซลเซียส เพื่อใช้ในการศึกษาต่อไป

2. การตรวจสอบประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อก่อโรค

การศึกษานี้ใช้วิธี Agar well diffusion assay (Georgieva et al., 2015) โดยเลี้ยงแบคทีเรียกรดแล็กติกแต่ละไอโซเลตในอาหาร MRS broth นำไปบ่มแบบเขย่าที่ 150 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 6,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที ที่ 4 องศาเซลเซียส เพื่อเก็บส่วนใส (Supernatant) จากนั้นปรับ pH เท่ากับ 7.0 (2 N NaOH) และเติมเอนไซม์คะตาเลส (1.0 mg/ml) เรียก Neutralized cell free supernatant (NCFS) โดยทำการกรองตัวอย่างก่อนนำไปใช้ทดสอบ ในส่วนของเชื้อก่อโรคนั้นนำเชื้อก่อโรค (*Salmonella enterica* Typhimurium DMST 8023, *Staphylococcus aureus* DMST 562 และ *Escherichia coli* DMST 4212) เลี้ยงในอาหาร Mueller Hinton broth (MHB) บ่มที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นปรับความขุ่นให้เท่ากับ McFarland 0.5 และทำการ Swab ลงบนผิวหน้าอาหาร MH agar (MHA) ทำการเจาะหลุมด้วย Cork borer ขนาด 5 มิลลิเมตร แล้วหยดตัวอย่าง NCFS ที่เตรียมไว้ ปริมาตร 80 ไมโครลิตร ลงในหลุมที่เจาะไว้ โดยหลุมควบคุมเติม MRS broth นำไปบ่มที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ในตู้บ่มเพาะเชื้อ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทำการตรวจสอบ และวัดขนาดโซนใสที่เกิดการยับยั้ง

3. การทดสอบกิจกรรมต้านอนุมูลอิสระของแบคทีเรียกรดแล็กติก

ในการศึกษานี้ใช้วิธี DPPH assay ที่ดัดแปลงมาจาก Ding et al., (2017) โดยทำการเพาะเลี้ยงแบคทีเรียกรดแล็กติกในอาหาร MRS broth เป็นเวลา 18 ชั่วโมง เมื่อครบเวลานำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 6,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที ที่ 4 องศาเซลเซียส ทำการเก็บส่วนใส เพื่อใช้ในการทดสอบต่อไป การทำปฏิกิริยาเริ่มจากเติมส่วนใสของเซลล์ ปริมาตร 50 ไมโครลิตร ลงในแต่ละหลุม 96-well microtiter plate แล้วเติมสาร 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) ปริมาตร 150 ไมโครลิตร ลงในหลุม ผสมให้เข้ากัน

(ให้ค่าเป็น A sample) ในขณะที่ blank จะเติม MRS broth ปริมาตร 50 ไมโครลิตร (A control) แล้วเติมสาร DPPH solution ปริมาตร 150 ไมโครลิตร ลงในหลุมเดียวกัน จากนั้นนำไปตั้งไว้ในที่มืดเป็นเวลา 30 นาที เมื่อครบเวลานำไปวัดค่าดูดกลืนแสงที่ 517 นาโนเมตร ด้วย Microplate reader (Spectrostar nano, Germany) โดยในการทดสอบจะใช้ Trolox (100 µg/ml) เป็นสารมาตรฐาน แล้วนำมาคำนวณค่า Antioxidant (%) ดังนี้

$$\text{Antioxidant (\%)} = [(A \text{ control} - A \text{ sample}) \div A \text{ control}] \times 100$$

4. การศึกษาผลของพรีไบโอติกส์ต่อการเจริญของโพรไบโอติกส์

แบคทีเรียกรดแล็กติกที่เลือกมาศึกษาคือ โอโซเลต LF22b เนื่องจากมีกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระ การยับยั้งแบคทีเรียก่อโรค และมีกิจกรรมต้านอนุมูลอิสระสูง ซึ่งโอโซเลตนี้แยกมาจากตัวอย่างอาหารหมักคือ ต้นหอมแดง โดยใช้อาหารเลี้ยงเชื้อ Minimal Medium (MM) (1 ลิตร ประกอบด้วย Yeast extract; 20 g, Beef extract; 5 g, Peptone; 10 g, MnSO₄·H₂O; 0.02 g, MgSO₄; 0.05 g, Sodium citrate; 0.1 g, Ammonium citrate; 5 g, Ferrous sulfate; 0.2 g, แหล่งคาร์บอน; 1.0 g, pH 7.0) โดยกลุ่มทดลองที่ 1 ใช้ กลูโคส กลุ่มทดลองที่ 2 ใช้แป้งข้าวัดดัดแปลง (ที่เตรียมขึ้นโดยใช้ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ด้วยกระบวนการใช้ความร้อนร่วมกับการใช้เอนไซม์) และกลุ่มทดลองที่ 3 ใช้อินูลิน ในการตรวจสอบผลของพรีไบโอติกส์ในการส่งเสริมการเจริญของแบคทีเรียกรดแล็กติกสายพันธุ์ LF22b นั้นได้ทำการศึกษโดยใช้เชื้อ LF22b ลงไปในอาหารเลี้ยงเชื้อ MM ที่ผสมแหล่งคาร์บอนต่างๆ ให้มีค่าความขุ่นเริ่มต้น (OD₆₀₀) เท่ากับ 0.05 แล้วนำไปบ่มที่ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ตรวจการเจริญและวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) หลังบ่ม ที่เวลา 0, 24 และ 48 ชั่วโมง โดยตรวจการเจริญด้วยวิธี Drop plate technique บนอาหาร MRS-CaCO₃ เมื่อครบเวลาบ่มทำการนับจำนวนโคโลนี และนำมาคำนวณการเจริญ (CFU/ml) ขณะที่ตรวจวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ด้วยเครื่อง pH Meter (Seven Easy, Mettler Toledo, Switzerland) เปรียบเทียบผลของพรีไบโอติกส์ชนิดต่างๆ ต่อการเจริญของโพรไบโอติกส์โดยนำข้อมูลการเจริญในหน่วย log CFU/ml ไปวิเคราะห์

5. การจำแนกเชื้อแบคทีเรียกรดแล็กติก

จำแนกแบคทีเรียกรดแล็กติกโอโซเลต LF22b โดยใช้ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเซลล์ร่วมกับการจำแนกโดยใช้ลำดับนิวคลีโอไทด์ของยีน 16S rDNA โดยเพิ่มจำนวนยีนที่บริเวณ 16S rRNA gene ด้วยวิธีปฏิกิริยาลูกโซ่พอลิเมอเรส (Polymerase chain reaction; PCR) โดยใช้ไพรเมอร์ 20F (5'-GAGTTTGATCCTGGCTCAG-3') และ 1500R (5'-GTTACCTTGTTACGACTT-3') โดยผลิตภัณฑ์ PCR ที่ได้ทำให้บริสุทธิ์ด้วย GenepHlow™ GeV/PCR Kit (Geneaid Biotech Ltd., Taiwan) โดยอุณหภูมิต่างๆ ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาลูกโซ่พอลิเมอเรส คือ (1) initial denaturation ที่อุณหภูมิ 94 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 นาที (2) denaturation ที่อุณหภูมิ 94 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 นาที (3) annealing ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 นาที (4) elongation ที่อุณหภูมิ 72 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 นาที โดยทำซ้ำ 25 รอบ และ (5) final extension ที่อุณหภูมิ 72 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 นาที จากนั้นนำผลิตภัณฑ์ PCR ของยีน 16S rDNA ที่ทำให้บริสุทธิ์แล้วไปหาลำดับนิวคลีโอไทด์ และนำลำดับนิวคลีโอไทด์ของยีน 16S rDNA ที่ได้ไปเทียบกับลำดับนิวคลีโอไทด์ในฐานข้อมูลของ National Center for Biotechnology Information

(NCBI) โดยใช้โปรแกรม Blastn (<https://blast.ncbi.nlm.nih.gov/Blast.cgi>) และ EzTaxon server และสร้าง Phylogenetic tree ด้วยโปรแกรม MEGA 7.0 (Kumar, Stecher & Tamura, 2016)

6. การวิเคราะห์ข้อมูล

ในการทดลองการคัดเลือกแบคทีเรียกรดแล็กติกจากอาหารหมักดอง การตรวจสอบประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อก่อโรค การทดสอบกิจกรรมต้านอนุมูลอิสระของแบคทีเรียกรดแล็กติก และการศึกษาผลของพรีไบโอติกส์ต่อการเจริญของโพรไบโอติกส์ทุกการทดลองทำสามซ้ำ ใช้โปรแกรม SPSS โดยสถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลคือ ค่าความแปรปรวน (analysis of variance, ANOVA) และหาความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ที่ความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$)

ผลการวิจัย

1. ผลการคัดเลือกแบคทีเรียกรดแล็กติกจากอาหารหมักดอง

ในการศึกษานี้ได้ทำการคัดเลือกแบคทีเรียกรดแล็กติกจากอาหารหมักดอง จำนวน 24 ตัวอย่าง จากกรุงเทพมหานคร (ปลาสาม ไส้กรอกวุ้นเส้น แหนมเนื้อ แหนมหมูและไส้กรอกอีสาน) ได้ 25 ไอโซเลต จังหวัดนครปฐม (กิมจิ แหนมปลา ต้นหอมดองและผักเสี้ยนดอง) ได้ 7 ไอโซเลต จังหวัดชัยภูมิ (หม่า แหนมเห็ด ปลาสามและหม่า) ได้ 11 ไอโซเลต จังหวัดสมุทรสาคร (ไส้กรอกอีสาน หอยดอง ผักดอง แหนมหนังหมู ปูดองเกลือ ไส้กรอกอีสานและปลาสาม) ได้ 12 ไอโซเลต และจังหวัดราชบุรี (แหนมหมู หน่อไม้ดอง หม่า ปลาสาม) ได้ 6 ไอโซเลต รวมทั้งหมด 61 ไอโซเลต ซึ่งทุกไอโซเลตมีลักษณะเบื้องต้นของแบคทีเรียกรดแล็กติก ได้แก่ เป็นแบคทีเรีย แกรมบวก ไม่สร้างเอนไซม์คอะตาเลส และไม่สร้างสปอร์ เป็นต้น

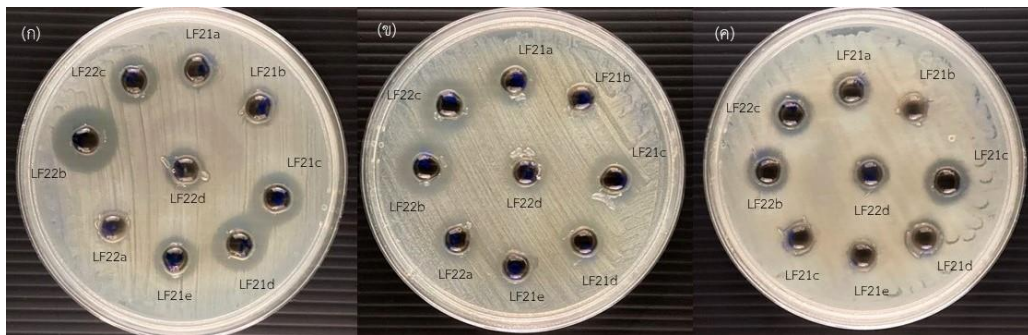
2. ผลการยับยั้งแบคทีเรียก่อโรค

คุณสมบัติที่สำคัญของแบคทีเรียกรดแล็กติกในการเป็นโพรไบโอติกส์คือ มีความสามารถในการยับยั้งแบคทีเรียก่อโรค เมื่อทดสอบด้วยวิธี Agar well diffusion assay โดยจากการทดลองพบว่าจากแบคทีเรียกรดแล็กติกทั้งหมด 61 ไอโซเลต มี 29 ไอโซเลตที่สามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรียก่อโรคได้ โดยแบคทีเรียกรดแล็กติก 10 ไอโซเลตที่ยับยั้งเชื้อก่อโรค *Salmonella Typhimurium*, *S. aureus* และ *E. coli* ได้ดีที่สุด แสดงในตารางที่ 1 ได้แก่ ไอโซเลต LF12c, LF13b, LF13c, LF17a, LF17b, LF17e, LF21c, LF22b, LF22c และ LF23d ผลการทดสอบกิจกรรมการต้านเชื้อแบคทีเรียก่อโรค พบว่าไอโซเลต LF22b สามารถยับยั้งก่อโรคทดสอบสองสายพันธุ์ได้สูงสุดคือ *Salmonella Typhimurium* (22.66 ± 0.57 มิลลิเมตร) และ *S. aureus* (20.45 ± 0.57 มิลลิเมตร) และพบว่าไอโซเลต LF13b สามารถยับยั้ง *E. coli* ได้สูงที่สุด (18.33 ± 1.52 มิลลิเมตร) โดยภาพของแบคทีเรียกรดแล็กติกบางไอโซเลตในการยับยั้งเชื้อก่อโรคด้วยวิธี agar well diffusion assay ดังแสดงในภาพที่ 2 ซึ่งไอโซเลตที่มีกิจกรรมในการยับยั้งแบคทีเรียก่อโรคสูงแยกมาจากอาหารหมักดองประเภทต้นหอมดอง ปลาสาม และแหนมเห็ด เป็นต้น

ตารางที่ 1 กิจกรรมการยับยั้งแบคทีเรียก่อโรคของแบคทีเรียกรดแล็กติก

ไอโซเลต	เส้นผ่านศูนย์กลางของโซนใสในการยับยั้ง (มิลลิเมตร)		
	<i>Salmonella</i> Typhimurium	<i>S. aureus</i>	<i>E. coli</i>
LF12c	17.33 ± 0.57 ^b	15.00 ± 0 ^b	16.33 ± 1.15 ^e
LF13b	17.33 ± 1.52 ^b	15.33 ± 0.57 ^{bc}	18.33 ± 1.52 ^g
LF13c	16.66 ± 0.57 ^b	15.33 ± 1.15 ^{bc}	17.33 ± 2.51 ^f
LF17a	16.66 ± 0.57 ^b	14.33 ± 0.57 ^{ab}	13.66 ± 0.57 ^{bc}
LF17b	18.66 ± 0.57 ^c	13.00 ± 1.00 ^a	13.00 ± 1.00 ^{ab}
LF17e	15.33 ± 0.57 ^a	15.33 ± 0.57 ^{bc}	12.33 ± 0.57 ^a
LF21c	16.00 ± 0 ^{ab}	14.00 ± 0 ^{ab}	15.33 ± 0.57 ^d
LF22b	22.66 ± 0.57 ^d	20.45 ± 0.57 ^e	15.66 ± 0.57 ^{de}
LF22c	19.66 ± 0.57 ^c	19.66 ± 0.57 ^d	14.00 ± 0 ^c
LF23d	17.33 ± 0.57 ^b	17.33 ± 0.57 ^c	15.66 ± 0.57 ^{de}

ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแต่ละคอลัมน์แสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ค่าความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$)

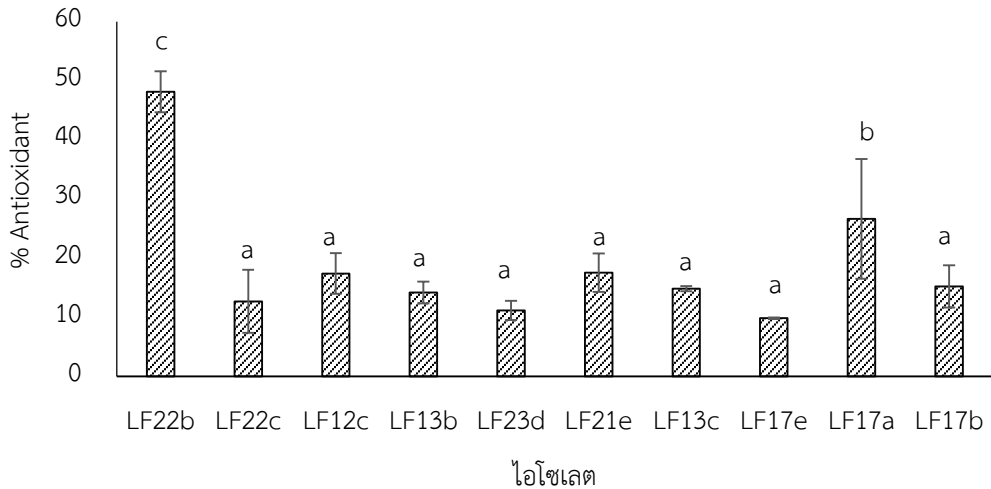


ภาพที่ 1 ผลการยับยั้งเชื้อก่อโรคของแบคทีเรียกรดแล็กติกเมื่อทดสอบด้วยวิธี agar well diffusion assay ต่อเชื้อ *Salmonella* Typhimurium (ก); *S. aureus* (ข); *E. coli* (ค)

3. ผลทดสอบกิจกรรมต้านอนุมูลอิสระของแบคทีเรียกรดแล็กติก

กิจกรรมต้านอนุมูลอิสระของเชื้อแบคทีเรียกรดแล็กติกด้วยวิธี DPPH assay ของแบคทีเรียกรดแล็กติกทั้ง 10 ไอโซเลต พบว่ามีค่ากิจกรรมต้านอนุมูลอิสระอยู่ระหว่าง ร้อยละ 9.82±0.04 - 48.12±3.76 ซึ่งไอโซเลต LF22b มีกิจกรรมต้านอนุมูลอิสระสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ที่ร้อยละ 48.12±3.76 ดังแสดงในภาพที่ 3 รองลงมาคือ ไอโซเลต LF17a (ร้อยละ 26.64±9.58) และกลุ่มเชื้อไอโซเลต LF22c, LF12c, LF13b, LF23d, LF21e, LF13c และ LF17e มีกิจกรรมต้านอนุมูลอิสระไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

โดยไอโซเลต LF22b ซึ่งมีกิจกรรมต้านอนุมูลอิสระสูงที่สุดแยกมาจากต้นหอมแดง ขณะที่ไอโซเลต LF17a แยกมาจากแห้วหมู



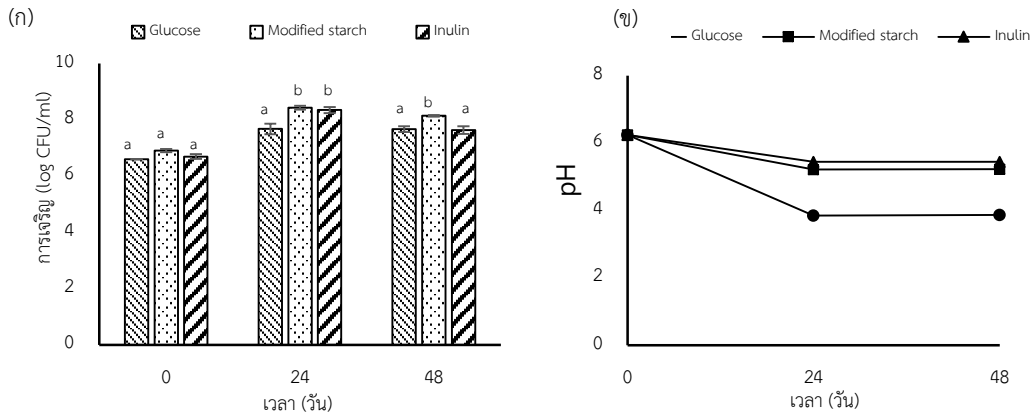
ภาพที่ 2 กิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระของแบคทีเรียกรดแล็กติกไอโซเลตต่างๆ (ตัวอักษรที่แตกต่างกันบนแท่งกราฟแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ร้อยละ 95 ($p < 0.05$))

4. ผลการศึกษาผลของพีโรไบโอติกส์ต่อการเจริญของโพรไบโอติกส์

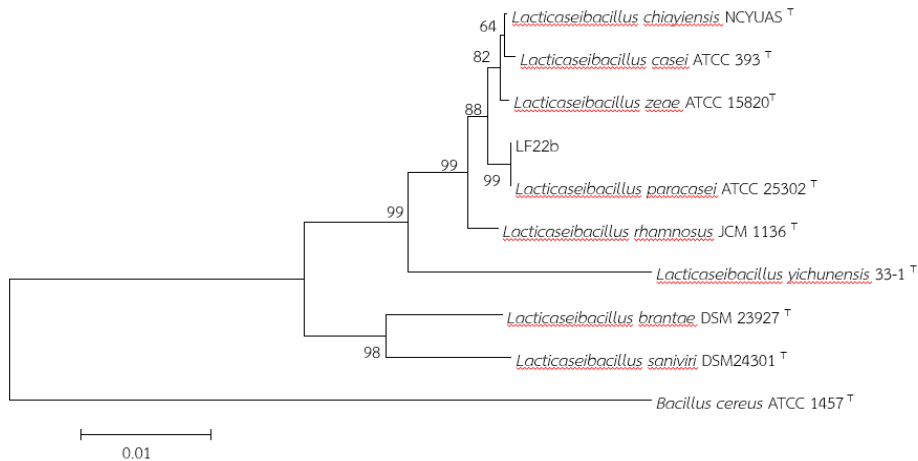
ผลการเจริญของ LF22b ในแหล่งคาร์บอนชนิดต่างๆ แสดงในภาพที่ 4ก โดยเมื่อเลี้ยงในอาหารเลี้ยงเชื้อ MM ที่มีแหล่งคาร์บอนที่ต่างกันคือ กลูโคส (Glucose) แป้งดัดแปลง (Modified starch) และอินนูลิน (Inulin) และเมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง เชื้อเจริญในอาหารที่มีแป้งดัดแปลง ($8.42 \pm 0.22 \log \text{ CFU/ml}$) ได้ดีเทียบเท่าอินนูลิน ($8.34 \pm 0.17 \log \text{ CFU/ml}$) และสูงกว่าการเจริญในกลูโคส ($7.67 \pm 0.15 \log \text{ CFU/ml}$) และเมื่อบ่มครบ 48 ชั่วโมง เชื้อที่เพาะเลี้ยงในอาหารทุกกลุ่มมีการเจริญลดลง ในขณะที่ค่า pH ชั่วโมงที่ 0 มีค่า pH เริ่มต้นอยู่ที่ 6.24 เมื่อผ่านไป 24 ชั่วโมงมีค่า pH ของอาหารทั้ง 3 สูตรอยู่ระหว่าง 3.21-5.84 และเมื่อผ่านไป 48 ชั่วโมงมีค่า pH ลดลงอยู่ที่ 3.87-5.44 เนื่องจากระหว่างการเจริญมีการเปลี่ยนแหล่งคาร์บอนให้เป็นกรดอินทรีย์จึงทำให้อาหารเลี้ยงเชื้อมีค่า pH ที่ลดลง แสดงในภาพที่ 4ข

5. ผลการจำแนกไอโซเลต LF22b

จากการทดสอบความสามารถในการยับยั้งเชื้อก่อโรค (*Salmonella Typhimurium*, *S. aureus* และ *E. coli*) การมีกิจกรรมต้านอนุมูลอิสระสูง และผลของแป้งข้าวดัดแปลงที่มีสมบัติพีโรไบโอติกส์ต่อการเจริญของไอโซเลต LF22b จึงจัดว่าไอโซเลตนี้เป็นสายพันธุ์ที่มีศักยภาพสูงในการถูกนำไปใช้ต่อและมีคุณสมบัติเบื้องต้นของการเป็นแบคทีเรียโพรไบโอติกส์ จึงนำไอโซเลตนี้มาจัดจำแนกโดยใช้ลำดับนิวคลีโอไทด์ของยีน 16S rDNA พบว่าไอโซเลต LF22b ใกล้เคียงกับเชื้อ *L. paracasei* ที่ร้อยละ 99.93 โดยมีความใกล้เคียงกับเชื้ออื่นๆ ในกลุ่ม *Lactocaseibacillus* sp. ซึ่งแสดงใน Phylogenetic tree ดังภาพที่ 5



ภาพที่ 3 การเจริญของแบคทีเรียกรดแล็กติกไอโซเลต LF22b ในแหล่งคาร์บอนชนิดต่างๆ (ก) และค่า pH ระหว่างการเจริญในแหล่งคาร์บอนชนิดต่างๆ (ข) (ตัวอักษรที่แตกต่างกันบนแท่งกราฟแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$))



ภาพที่ 4 Phylogenetic tree จากการวิเคราะห์ลำดับนิวคลีโอไทด์ของยีน 16S rDNA ของไอโซเลต LF22b เมื่อเทียบกับเชื้อกลุ่ม *Lactiseibacillus* sp. โดยมี outgroup คือแบคทีเรียสายพันธุ์ *Bacillus cereus*

อภิปรายผล

แบคทีเรียกรดแล็กติกเป็นแบคทีเรียกลุ่มหลักในกระบวนการหมัก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอาหารหมักดอง ในงานวิจัยนี้จึงแยกเชื้อแบคทีเรียกรดแล็กติกจากอาหารหมักดองประเภทต่างๆ ได้แก่ ผักดอง แหนมปลา แหนมหมู แหนมเนื้อ หม่าและหน่อไม้ดอง เป็นต้น อีกทั้งแบคทีเรียกรดแล็กติกมีรายงานถึงการนำไปศึกษาคุณสมบัติการเป็นโพรไบโอติกส์ ประกอบไปด้วยคุณสมบัติด้านการยับยั้งเชื้อก่อโรค (Zhang, et al., 2022) การเกาะที่เยื่อบุลำไส้ ความปลอดภัย (de Souza, Borgonovi, Casarotti, Todorov & Penna, 2019) และ

คุณสมบัติเชิงหน้าที่ต่างๆ เช่นการสร้างสารกาบา หรือมีกิจกรรมต้านอนุมูลอิสระ (Ding, et al., 2017) ทั้งนี้ในปัจจุบันผู้คนเริ่มให้ความสนใจกับผลิตภัณฑ์ที่มีโพรไบโอติกส์มากขึ้น การคัดเลือกโพรไบโอติกส์เพื่อนำไปพัฒนาเครื่องดื่มนั้นจากแหล่งที่เหมาะสม จะทำให้ได้โพรไบโอติกส์ที่มีความหลากหลายทางสายพันธุ์มากขึ้น ซึ่งแบคทีเรียกรดแล็กติกจากงานวิจัยนี้จะถูกศึกษาและพัฒนาให้เป็นโพรไบโอติกส์ที่มีศักยภาพได้ในการผลิตผลิตภัณฑ์เพื่อสุขภาพต่อไป โดยเฉพาะแบคทีเรียกรดแล็กติก ซึ่งเป็นแบคทีเรียกลุ่มใหญ่ที่ถูกนำมาศึกษาสมบัติการเป็นโพรไบโอติกส์ เช่น สายพันธุ์ *L. plantarum* จากแป้งข้าวหมัก (He, et al., 2022) *L. helveticus* แยกจากผลิตภัณฑ์น้ำนมหมัก (Zhong, et al., 2021) และ *L. plantarum* แยกมาจากผักดอง (Zhang, et al., 2022) เป็นต้น โดยไอโซเลตที่คัดเลือกไปศึกษาต่อในงานวิจัยนี้คือ LF22b ซึ่งถูกจำแนกโดยลักษณะทางสัณฐานวิทยาและการใช้ลำดับนิวคลีโอไทด์ของยีน 16S rDNA พบว่าใกล้เคียงกับเชื้อ *L. paracasei* ที่สุดที่ร้อยละ 99.93

การต้านเชื้อก่อโรค (antimicrobial activity) จัดเป็นสมบัติที่สำคัญของเกณฑ์การคัดเลือกแบคทีเรียโพรไบโอติกส์ ในงานวิจัยนี้มี 29 ไอโซเลต ที่มีกิจกรรมในการยับยั้งแบคทีเรียก่อโรค *Salmonella* Typhimurium, *S. aureus* และ *E. coli* การที่แบคทีเรียโพรไบโอติกส์สามารถยับยั้งแบคทีเรียก่อโรคได้นั้นเนื่องมาจากการผลิตกรดอินทรีย์ H_2O_2 และการสร้างแบคทีเรียโอซิน (Georgieva, et al., 2015) ซึ่งจากการทดลองนี้ได้ทำการทดสอบเบื้องต้นพบว่า *L. paracasei* LF22b สามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรียก่อโรคได้อาจมาจากแบคทีเรียโอซินที่เชื้อผลิตขึ้นมา ดังนั้น *L. paracasei* LF22b จึงถูกคัดเลือกไปศึกษาต่อ อันเนื่องมาจากสมบัติหลักของโพรไบโอติกส์ในด้านการยับยั้งแบคทีเรียก่อโรค ซึ่งสายพันธุ์นี้สามารถยับยั้งได้ทั้งแบคทีเรียแกรมบวกและแกรมลบ (Broad spectrum) ทั้งนี้มีผลการศึกษาว่า *L. paracasei* ZFM54 สามารถยับยั้งเชื้อ *Salmonella* Typhimurium, *Micrococcus luteus* และ *Listeria monocytogenes* ได้ (Ye, et al., 2021)

อีกหนึ่งคุณสมบัติของแบคทีเรียโพรไบโอติกส์ที่มีความสำคัญ และได้ตรวจสอบในครั้งนี่คือกิจกรรมการต้านสารอนุมูลอิสระ (Antioxidant activity) ซึ่งมีรายงานว่าการผลิตสารอนุมูลอิสระในร่างกายที่มากเกินไปจะเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เซลล์ถูกทำลาย (Shang, et al., 2022) ปัจจุบันจึงมีการศึกษาหาแนวทางในการดำเนินการของสารอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้น โดยในงานนี้พบว่าแบคทีเรียกรดแล็กติกที่นำมาศึกษามีกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระ ซึ่งมีงานวิจัยที่ศึกษากิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระของแบคทีเรียกรดแล็กติกส์ เช่น *L. delbrueckii* subsp. *bulgaricus* F17 ที่มีกิจกรรมต้านอนุมูลอิสระสูงถึงร้อยละ 59 (Ding, et al., 2017), สายพันธุ์ *L. rhamnosus* MG4502, *L. gasseri* MG4524, *Limosilactobacillus reuteri* MG5149 และ *Weissella cibaria* MG5285 ที่มีกิจกรรมต้านอนุมูลอิสระมากกว่าร้อยละ 26.1 (Jeong, et al., 2021) รวมถึงสายพันธุ์ *L. paracasei* LP33 ที่ใช้ในกระบวนการหมักเครื่องดื่มเพื่อสุขภาพ พบว่าผลิตภัณฑ์จากการหมักจากเชื้อโพรไบโอติกส์สายพันธุ์นี้มีกิจกรรมต้านอนุมูลอิสระที่สูงขึ้น (Zhang, et al., 2023)

แบคทีเรียโพรไบโอติกส์จะส่งผลที่ดีต่อสุขภาพของโฮสต์ได้เมื่อสามารถรอดชีวิตในผลิตภัณฑ์ระหว่างกระบวนการเก็บรักษา และคงความมีชีวิตเมื่อผ่านสภาวะที่ไม่เหมาะสมในระบบทางเดินอาหาร โดยหนึ่งในหลายๆ กระบวนการที่นักวิจัยศึกษาคือ การมีพรีไบโอติกส์ชนิดที่เหมาะสมกับโพรไบโอติกส์สายพันธุ์นั้น (Succi, et al., 2017) ในงานวิจัยนี้จึงได้นำแป้งข้าวคั่วที่ได้นี้เตรียมขึ้นโดยคณะผู้วิจัย (ไม่ได้แสดงข้อมูล) มาทดสอบ

คุณสมบัติในการเป็นแหล่งพรีไบโอติกส์ต่อเชื้อ *L. paracasei* LF22b เมื่อเทียบกับแหล่งคาร์บอนที่ไม่ใช่พรีไบโอติกส์ (กลูโคส) และอินูลินซึ่งเป็นพรีไบโอติกส์ทางการค้า พบว่าแป้งข้าวัดดแปลงส่งเสริมการเจริญของ *L. paracasei* LF22b ได้ดีเทียบเท่ากับอินูลิน และสูงกว่ากลูโคสอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) การที่แป้งดัดแปลงมีสมบัติของพรีไบโอติกส์เมื่อทดสอบกับ *L. paracasei* LF22b พิจารณาจากผลการส่งเสริมการเจริญของเชื้อนั้นเมื่อเทียบกับแหล่งคาร์บอนที่เป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว (Cunningham, et al., 2021) มีงานวิจัยหลายงานที่ศึกษาแป้งทนย่อย (Resistant starch) หรือแป้งดัดแปลงในด้านคุณสมบัติการเป็นพรีไบโอติกส์ โดยจุลินทรีย์จะย่อยแป้งทนย่อยและผลิตกรดอินทรีย์ออกมา ซึ่งเป็นลักษณะที่แบคทีเรียโพรไบโอติกส์ใช้พรีไบโอติกส์ชนิดอื่นและเกิดผลิตภัณฑ์ขึ้น โดยแป้งดัดแปลงที่รายงานคุณสมบัติการเป็นพรีไบโอติกส์เช่นแป้งดัดแปลงที่ทำมาจากมันฝรั่ง (Wang, et al., 2022) ข้าว (Ashwar, et al., 2021) ถั่ว (Jaiturong, et al., 2020) และถั่วลันเตา (Cui, Ma, Li & Hu, 2021) เป็นต้น ผลจากการศึกษานี้จึงเป็นข้อมูลเบื้องต้น สามารถบ่งชี้ได้ว่าแป้งข้าวัดดแปลงมีคุณสมบัติเป็นพรีไบโอติกส์ที่เหมาะสมต่อการเจริญของ *L. paracasei* LF22b ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้ข้อมูลนี้ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์เพื่อสุขภาพต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม ประเภท Fundamental Fund มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2566

เอกสารอ้างอิง

- มัลลิกา โลงนุช. (2562). การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดสารพรีไบโอติกส์จากข้าวหอมมะลิ (สายพันธุ์ **ขาวดอกมะลิ 105**). บัณฑิตนิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา.
- รัชชู เมยตง, ภัทรวรรณ สุขสวัสดิ์ และศิริพร ทิพย์สิงห์. (2564). การคัดเลือกแบคทีเรียกรดแล็กติกที่มีคุณสมบัติความเป็นพรีไบโอติกส์จากผลิตภัณฑ์อาหารหมัก. **วารสารก้าวหน้าโลกวิทยาศาสตร์**, 21(1), 101-118.
- Aisara, J., Wongputtisin, P., Deejing, S., Maneewong, C., Unban, K., Khanongnuch, C., Kosma, P., Blaukopf, M. & Kanpiengjai, A. (2020). Potential of inulin-fructooligosaccharides extract produced from red onion (*Allium cepa* var. *viviparum* (Metz) Mansf.) as an alternative prebiotic product. **Plants**, 10, 2401.
- Angmo, K., Kumari A., Savitri. & Bhalla, T.C. (2016). Probiotic characterization of lactic acid bacteria isolated from fermented foods and beverage of ladakh. **LWT-Food Science and Technology**, 66, 248-435.
- Ashwar, B.A., Gani, A., Gani, A., Shah, A. & Masoodi, F.A. (2018). Production of RS4 from rice starch and its utilization as an encapsulating agent for targeted delivery of probiotics. **Food Chemistry**, 239, 287-294.
- Ashwar, B.A., Gani, A., Ashraf, Z., Jhan, F., Shah, A., Gani, A. & Wani, T.A. (2021). Prebiotic potential and characterization of resistant starch developed from four Himalayan rice cultivars using β -amylase and transglucosidase enzymes. **LWT-Food Science and Technology**, 143, 111085.
- Cui, W., Ma, Z., Li, X. & Hu, X. (2021). Structural rearrangement of native and processed pea starches following simulated digestion in vitro and fermentation characteristics of their resistant starch residues using human fecal inoculum. **International Journal of Biological Macromolecules**, 172, 490-502.
- Cunningham, M., Azcarate-Peril, M.A., Barnard, A., Benoit, V., Grimaldi, R., Guyonnet, D., Holscher, H.D., Hunter, K., Manurung, S., Obis, D., Steinert, R.E., Swanson, K.S., Sinderen, D., Vulevi, J.M.I. & Gibson, G.R. (2021). Shaping the future of probiotics and prebiotics. **Trends in Microbiology**, 29(8), 667-685.

- de Souza, B.M.S., Borgonovi, T.F., Casarotti, S.N., Todorov, S.D. & Penna, A.L.B. (2019). *Lactobacillus casei* and *Lactobacillus fermentum* strains Isolated from mozzarella cheese: probiotic potential, safety, acidifying kinetic parameters and viability under gastrointestinal tract conditions. **Probiotics and antimicrobial proteins**, 11(2), 382-396.
- Ding, W., Wang, L., Zhang, J., Ke, W., Zhou, J., Zhu, J. & Long, R. (2017). Characterization of antioxidant properties of lactic acid bacteria isolated from spontaneously fermented yak milk in the Tibetan plateau. **Journal of Functional Foods**, 35, 481-488.
- FAO/WHO. (2006). **Probiotics in Food: Health and Nutritional Properties and Guidelines for Evaluation**. Report of a Joint FAO Food Nutrition Paper 85. World Health Organization and Food and Agriculture Organization of the United Nations, ISBN 92-5-105513-0, Rome.
- Ferronato, A.N., Rossi, R., Pinto, L.M.N. & Garavaglia, J. (2021). Development of a freeze-dried symbiotic obtained from rice bran. **Biotechnology Reports**, 30, e00636.
- Georgieva, R., Yocheva, L., Tserovska, L., Zhelezova, G., Stefanova, N., Atanasova, A., Danguleva, A., Ivanova, G., Karapetkov, N., Rumyan, N. & Karaivanova, E. (2015). Antimicrobial activity and antibiotic susceptibility of *Lactobacillus* and *Bifidobacterium* spp. intended for use as starter and probiotic cultures. **Biotechnology & Biotechnological Equipment**, 29(1), 84-91.
- He, L., Chen, Y., Zhang, H., Wang, H., Chen, S., Liu, S. & Liu, Y. (2022). Isolation and identification of *Lactobacillus* and yeast species and their effect on the quality of fermented rice cakes. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, 77, 102984.
- Ibarra-Martínez, D., Muñoz-Ortega, M.H., Quintanar-Stephano, A., Luz, S., Hernández, M., Ávila-Blanco, M.E. & Ventura-Juárez, J. (2022). Antibacterial activity of supernatants of *Lactococcus lactis*, *Lactobacillus rhamnosus*, *Pediococcus pentosaceus* and curcumin against *Aeromonas hydrophila* *in vitro* study. **Veterinary Research Communications**, 46, 459-470.
- Jaiturong, P., Laosirisathian, N., Sirithunyalug, B., Eitssayeam, S., Sirilun, S., Chaiyana, W. & Sirithunyalug, J. (2020). Physicochemical and prebiotic properties of resistant starch from *Musa sapientum* Linn, ABB group, cv Kluai Namwa Luang. **Heliyon**, 6(12), e05789.

- Jeong, Y., Kim, H., Lee, J.Y., Won, G., Choi, S.I., Kim, G.H. & Kang, C.H. (2021). The antioxidant, anti-diabetic, and anti-adipogenesis potential and probiotic properties of lactic acid bacteria isolated from human and fermented foods. **Fermentation**, **7**(3), 123.
- Kumar, S., Stecher, G. & Tamura, K. (2016). MEGA7: Molecular evolutionary genetics analysis version 7.0 for Bigger Datasets. **Molecular Biology and Evolution**, **33**(7), 1870-1874.
- Lin, X., Xia, Y., Yang, Y., Wang, G., Zhou, W. & Ai, L. (2020). Probiotic characteristics of *Lactobacillus plantarum* AR113 and its molecular mechanism of antioxidant. **LWT-Food Science and Technology**, **126**, 109278.
- Shang, Z., Li, M., Zhang, W., Cai, S., Hu, X. & Yi, J. (2022). Analysis of phenolic compounds in pickled chayote and their effects on antioxidant activities and cell protection. **Food Research International**, **157**, 111325.
- Sharma, S., Kandasamy, S., Kavitha, D. & Shetty, P.H. (2018). Probiotic characterization and antioxidant properties of *Weissella confusa* TKR780676, isolated from an Indian fermented food. **LWT-Food Science and Technology**, **97**, 53-60.
- Shokryazdan, P., Sieo, C.C., Kalavathy, R., Liang, J.B., Alitheen, N.B., Jahromi, M.F. & Ho, Y.W. (2014). Probiotic potential of *Lactobacillus* strains with antimicrobial activity against some human pathogenic strains. **BioMed Research International**, **16**, 927268.
- Shori, A.B., Aljohani, G.S., Al-zahrani, A.J., Al-sulbi, O.S. & Baba, A.S. (2022). Viability of probiotics and antioxidant activity of cashew milk-based yogurt fermented with selected strains of probiotic *Lactobacillus* spp. **LWT-Food Science and Technology**, **153**, 112482.
- Succi, M., Tremonte, P., Pannella, G., Tipaldi, L., Cozzolino, A., Romaniello, R., Sorrentino, E. & Coppola, R. (2017). pre-cultivation with selected prebiotics enhances the survival and the stress response of *Lactobacillus rhamnosus* strains in simulated gastrointestinal transit. **Frontiers in Microbiology**, **8**, 1067.
- Wang, Z., Lin, Y., Liu, L., Zheng, B., Zhang, Y. & Zeng, H. (2022). Effect of lotus seed resistant starch on lactic acid conversion to butyric acid fermented by rat fecal microbiota. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, **70**(5), 1525-1535.
- Wansutha, S., Yuenyaow, L., Jantama, K. & Jantama, S.S. (2018). Antioxidant activities of almond milk fermented with lactic acid bacteria. **Thai Journal of Pharmaceutical Sciences (TJPS)**, **42**, 115-119. [In Thai]

- Wongputtisin, P., Ramaraj, R., Unpaprom, Y., Kawaree, R. & Pongtrakul, N. (2015). Raffinose family oligosaccharides in seed of *Glycine max* cv. Chiang Mai60 and potential source of prebiotic substances. **International Journal of Food Science & Technology**, 50(8), 1750-1756. [In Thai]
- Ye, P., Wang, J., Liu, M., Li, P. & Gu, Q. (2021). Purification and characterization of a novel bacteriocin from *Lactobacillus paracasei* ZFM54. **LWT-Food Science and Technology**, 143, 111125.
- Zhang, J., Zhang, C., Lei, P., Xin, X., Liu, D. & Yi, H. (2022). Isolation, purification, identification, and discovery of the antibacterial mechanism of LD-phenyllactic acid produced by *Lactiplantibacillus plantarum* CXG9 isolated from a traditional Chinese fermented vegetable. **Food Control**, 132, 108490.
- Zhang, J., Huang, X., Cheng, J. & Wang, C. (2023). Effect of *Lactobacillus* (*L. acidophilus* NCIB1899, *L. casei* CRL 431, *L. paracasei* LP33) fermentation on free and bound polyphenolic, antioxidant activities in three *Chenopodium quinoa* cultivars. **Journal of Food Science**, 88(6), 2679-2692.
- Zhong, Z., Hu, R., Zhao, J., Liu, W., Kwok, L. Y., Sun, Z. & Chen, Y. (2021). Acetate kinase and peptidases are associated with the proteolytic activity of *Lactobacillus helveticus* isolated from fermented food. **Food Microbiology**, 94, 103651.

คำแนะนำสำหรับผู้ส่งบทความ

วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชรมีวัตถุประสงค์เพื่อตีพิมพ์ ผลงานวิจัย ผลงานสร้างสรรค์ และผลงานวิชาการ สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ได้แก่ ฟิสิกส์ เคมี ชีววิทยา คณิตศาสตร์ วิทยาการคอมพิวเตอร์ วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม วิทยาศาสตร์การอาหาร เทคโนโลยีการเกษตร วิทยาศาสตร์ประยุกต์และเทคโนโลยี สาธารณสุข เทคโนโลยีอุตสาหกรรม และอุตสาหกรรมศึกษา เผยแพร่แก่นักวิชาการและบุคคลทั่วไป ปีละ 2 ฉบับ บทความที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารจะต้องผ่านการตรวจพิจารณาจาก กองบรรณาธิการ และผู้ทรงคุณวุฒิ จำนวน 3 ท่าน/บทความ โดยใช้การ Peer-review เป็นแบบ double blinded หากมีความเห็นว่าจะต้องมีการปรับ แก้ไขทางกองบรรณาธิการจะส่งคืนเพื่อแก้ไขและขอสงวนสิทธิ์การพิจารณาไม่ลงพิมพ์เมื่อไม่ผ่านการพิจารณา (ซึ่งผู้ทรงคุณวุฒิที่ตรวจพิจารณาบทความจะไม่อยู่ในสังกัดเดียวกันกับผู้แต่ง) สำหรับการเรียกเก็บค่าธรรมเนียมการตีพิมพ์บทความ จำนวน 4,500 บาท/เรื่อง ทางวารสารจะเรียกเก็บค่าธรรมเนียมในขั้นตอน Peer Review ผู้ที่มีความประสงค์จะส่งบทความเพื่อรับการพิจารณาตีพิมพ์ให้ปฏิบัติตามคำแนะนำ ดังต่อไปนี้

การส่งต้นฉบับและการพิมพ์บทความ

หลักเกณฑ์การส่งต้นฉบับและการพิมพ์บทความ

1. ต้นฉบับต้องพิมพ์ตามรูปแบบและคำแนะนำในการเขียนบทความของวารสารนี้เท่านั้น
2. ต้นฉบับที่ส่งมาให้พิจารณาตีพิมพ์จะต้องไม่เคยตีพิมพ์ในวารสารฉบับอื่นมาก่อน และจะต้องไม่ส่งตีพิมพ์ซ้ำซ้อนในวารสารหลายฉบับในเวลาเดียวกัน
3. การตีพิมพ์บทความลงในวารสาร จะเรียงตามลำดับก่อนหลังตามวันที่ได้รับเรื่อง
4. กองบรรณาธิการขอสงวนสิทธิ์ในการพิจารณาและตีพิมพ์บทความทุกเรื่องรวมทั้งการปรับปรุงบทความบางส่วนตามข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิที่เป็นผู้อ่านบทความ
5. กรณีเป็นบทความวิจัยหรือบทความวิชาการของนักศึกษามหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร กองบรรณาธิการจะคัดเลือกบทความที่นักศึกษาส่งซึ่งอาจไม่ได้ตีพิมพ์ทุกบทความ
6. บทความที่ตีพิมพ์ลงในวารสาร ถือเป็นผลงานทางวิชาการหรืองานวิจัยของคุณและผู้เขียนไม่ใช่ความคิดเห็นของกองบรรณาธิการ ผู้เขียนและคณะต้องรับผิดชอบต่อบทความของตน
7. บทความที่ได้ผ่านการพิจารณาแล้ว ทางกองบรรณาธิการจะแจ้งผลการพิจารณาให้ทราบเป็นลายลักษณ์อักษร

การส่งต้นฉบับ

ส่งต้นฉบับเอกสารพร้อมไฟล์ข้อมูลมาที่ http://research.kpru.ac.th/old/journal_science/ และสามารถสอบถามรายละเอียดได้ที่ สถาบันวิจัยและพัฒนา อาคาร 1 ชั้น 2 มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร ตำบลนครชุม อำเภอเมือง จังหวัดกำแพงเพชร 62000 โทรศัพท์ 0 5572 1879, 0 5572 2500 ต่อ 1760 หรือนายทวิช ปิ่นวิเศษ โทรศัพท์ 08 4593 9223


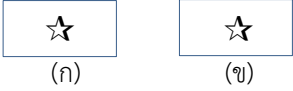
รูปแบบการพิมพ์บทความ

1. ให้พิมพ์ลงบนกระดาษ ตั้งค่ากระดาษเป็น B5 (JIS) โดยจำนวนหน้าของเนื้อหาและเอกสารอ้างอิง รวมทั้งสิ้นไม่เกิน 10 หน้า ใช้ตัวอักษร TH Sarabun PSK และแต่ละหน้าไม่เกิน 30 บรรทัด

2. ข้อปฏิบัติการพิมพ์แต่ละหัวข้อ/ส่วนประกอบ มีดังนี้

ที่	หัวข้อ/ส่วนประกอบ	คำอธิบาย
1	ชื่อบทความ	ระบุชื่อบทความทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ขนาดตัวอักษร 16 พอยท์ ตัวหนา ไว้กึ่งกลางหน้ากระดาษ
2	ชื่อผู้เขียนบทความ	ระบุชื่อผู้วิจัย, ผู้ร่วมวิจัย (ถ้ามี), อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์, กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ทุกคนทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ใช้ขนาดตัวอักษร 14 พอยท์ ตัวหนา ไว้กึ่งกลางหน้ากระดาษ
3	สังกัดผู้เขียนบทความ	ระบุวุฒิการศึกษา ชื่อสถาบันการศึกษา ตำแหน่งทางวิชาการ หน่วยงานที่สังกัดทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ใช้ขนาดตัวอักษร 12 พอยท์ ไว้ที่เชิงอรรถท้ายหน้า
4	บทคัดย่อ (Abstract)	บทคัดย่อมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ เนื้อความของบทคัดย่อไม่เกิน 10 บรรทัดและภาษาอังกฤษ ไม่เกิน 300 คำ เป็นการเขียนข้อสรุปหลักของผลการวิจัยทั้งหมดแบบสรุป กระชับ และได้ใจความ ประกอบด้วย วัตถุประสงค์ของการวิจัย วิธีดำเนินการวิจัย ผลการวิจัย ใช้ขนาดตัวอักษร 14 พอยท์
5	คำสำคัญ (Keywords)	ระบุคำสำคัญ 2-5 คำทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ไว้ท้ายบทคัดย่อ ใช้ขนาดตัวอักษร 14 พอยท์
6	เนื้อหา (Content)	ทุกหัวข้อ ใช้ขนาดตัวอักษร 14 พอยท์ ตัวหนา วางไว้ชิดขอบซ้าย ส่วนรายละเอียด ใช้ขนาดตัวอักษร 14 พอยท์ ประกอบด้วย <ol style="list-style-type: none">บทนำ (Introduction) เขียนแสดงที่มาและความสำคัญของปัญหา แนวคิดและทฤษฎี วัตถุประสงค์ ไม่ควรคัดลอกข้อความ เนื้อหาของเอกสารอื่นมาอ้างอิงทั้งข้อความ และไม่ควรรีใช้เอกสารอ้างอิงที่เกิน 10 ปีวิธีดำเนินการวิจัย (Objectives) อธิบายเกี่ยวกับประชากร และกลุ่มตัวอย่างหรือแหล่งข้อมูล เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย การเก็บรวบรวมข้อมูลและการวิเคราะห์ข้อมูลโดยเขียนให้กระชับและชัดเจน

(ต่อ)

ที่	หัวข้อ/ส่วนประกอบ	คำอธิบาย						
	เนื้อหา (Content) (ต่อ)	<p>3. ผลการวิจัย (Conclusion) รายงานผลการวิจัยตามวัตถุประสงค์ ควรมีตารางและภาพประกอบได้ ใช้คำที่เข้าใจง่าย และชัดเจน ไม่ซ้ำซ้อน ภาพเป็นไฟล์ .JPEG</p> <p>4. อภิปรายผล (Discussion) วิเคราะห์ผลการวิจัยเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องตามหลักวิชาการ อาจมีข้อเสนอแนะเพื่อการวิจัยในอนาคตและแนวทางการนำไปใช้ประโยชน์</p> <p>5. บทสรุป สรุปประเด็นที่พบและประเด็นการศึกษาและหากเป็นบทความวิชาการจะมี 3 หัวข้อ คือ บทนำ เนื้อหา และการอ้างอิงแหล่งสารสนเทศ และสรุป</p>						
7	กิตติกรรมประกาศ	ควรมีเพื่อแสดงคำขอบคุณ สำหรับแหล่งทุนสนับสนุนหรือผู้ช่วยเหลืองานวิจัยและเตรียมเอกสาร						
8	รูปภาพ ตาราง และสมการ (ถ้ามี)	<p>รูปภาพ</p> <p>คำอธิบายรูปภาพให้พิมพ์ไว้ใต้รูปภาพและอยู่กึ่งกลางคอลัมน์หรือกึ่งหน้ากระดาษ หากรูปภาพแบ่งเป็น 2 ส่วน ให้มีการระบุคำอธิบายของแต่ละส่วน โดยใช้ตัวอักษรในการวงเล็บเรียงลำดับ เช่น (ก) (ข) หรือ (A) (B)</p> <p>ตัวอย่างรูปภาพ</p> <div style="text-align: center;"> ภาพที่ 1</div> <div style="text-align: center;"> ภาพที่ 2</div> <p>ตาราง</p> <p>ตารางที่แสดงผลการวิเคราะห์ข้อมูลใช้ตารางแบบเส้นคู่เปิด-ปิดตาราง ดังตัวอย่าง</p> <p>ตารางที่ 1</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"><tbody><tr><td>A</td><td>B</td><td>C</td></tr><tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td></tr></tbody></table>	A	B	C	1	2	3
A	B	C						
1	2	3						

(ต่อ)

ที่	หัวข้อ/ส่วนประกอบ	คำอธิบาย
		การระบุหมายเลขลำดับรูปภาพและตารางในบทความควรระบุเป็นภาพที่ และตารางที่ เช่น ภาพที่ 1 และตารางที่ 1 สมการ การเขียนสมการให้เขียนไว้กลางคอลัมน์ เว้นบรรทัดบนและล่างอย่างละ 1 บรรทัดและมีการระบุลำดับของสมการโดยใช้ตัวเลขที่พิมพ์อยู่ในวงเล็บ เช่น (1) (2) ตำแหน่งของหมายเลขสมการจะต้องอยู่ชิดด้านขวาของคอลัมน์ ดังตัวอย่าง $A + B = C \qquad (1)$
9	การอ้างอิงในเนื้อหา	ลงรายการ (ชื่อผู้แต่ง, ปี) ตามรูปแบบที่กำหนดไว้ในวารสารนี้ (ยึดรูปแบบ APA)
10	เอกสารอ้างอิง (References)	การอ้างอิงในเนื้อหาทุกรายการต้องนำไปใส่ไว้ในเอกสารอ้างอิงท้ายบทความในรูปแบบการลงรายการบรรณานุกรมที่กำหนดไว้ในวารสารนี้ (ยึดรูปแบบ APA)

รูปแบบการอ้างอิงในเนื้อหาและบรรณานุกรม

หนังสือ

รูปแบบการลงรายการอ้างอิงและบรรณานุกรมหนังสือ

อ้างอิง	ภาษาไทย	(ชื่อ, ปี)
	ภาษาอังกฤษ	(นามสกุล, ตัวอักษรแรกของชื่อ., ปี)
บรรณานุกรม	ภาษาไทย	ชื่อ/นามสกุล./ (ปีที่พิมพ์)/ ชื่อเรื่อง./ (ครั้งที่พิมพ์)/ สถานที่พิมพ์:/ สำนักพิมพ์หรือโรงพิมพ์.
	ภาษาอังกฤษ	นามสกุล./ อักษรย่อชื่อแรก ชื่อกลาง (ปีที่พิมพ์)/ ชื่อเรื่อง/ครั้งที่พิมพ์./ สถานที่พิมพ์:/ สำนักพิมพ์ หรือโรงพิมพ์.

1. ผู้แต่งคนเดียว

(สมพงษ์, 2548)

สมพงษ์ ชูมาก. (2548). กฎหมายระหว่างประเทศแผนกคดีเมือง. (พิมพ์ครั้งที่ 3).

กรุงเทพฯ : โอเดียนสโตร์.

(สมเด็จพระเจ้าพี่นางเธอเจ้าฟ้ากัลยาณิวัฒนา, 2531)

กัลยานิวัฒนา, สมเด็จพระเจ้าพี่นางเธอเจ้าฟ้า. (2531). **เจ้านายเล็กๆ ยุวกษัตริย์.**

(พิมพ์ครั้งที่ 2). กรุงเทพฯ : ด่านสุทธาการพิมพ์.

(Wilson, 2007)

Wilson, K. (2007). **Smart choice.** (2 nd ed). London : Oxford University Press.

2. ผู้แต่งมากกว่า 3 คน

(อวยพร และคนอื่นๆ, 2548)

อวยพร พานิช และคนอื่นๆ. (2548). **ภาษาและหลักการเขียนเพื่อการสื่อสาร.**

กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

(Crouhy, et al., 2006)

Crouhy, M., et al. (2006). **The essentials of risk management.** New York :

McGraw-Hill.

3. ผู้แต่งเป็นหน่วยงาน

(มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช, 2546)

สุโขทัยธรรมาธิราช, มหาวิทยาลัย. (2546). **เอกสารประกอบการสอนชุดวิชาการ**

วิจัยการบริหารการศึกษา. นนทบุรี : มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช.

(สำนักงานคณะกรรมการการศึกษาแห่งชาติ, 2541)

การศึกษาแห่งชาติ, สำนักงานคณะกรรมการ. (2541). **การปฏิรูปการเรียนรู้ตามแนวคิด**

5 ทฤษฎี. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์ไอดีเอสแควร์,

(Ministry, 2002)

Education, Ministry of. (2002). **Chiangmai : Nop Bueri Si Nakon Ping.**

Bangkok : Ministry of Education.

4. วิทยานิพนธ์

(เขวงศักดิ์, 2543)

เขวงศักดิ์ เขียวเงิน. (2543). **การดำเนินงานการประกันคุณภาพการศึกษาของ**

สถาบันราชภัฏกำแพงเพชร. วิทยานิพนธ์ครุศาสตรมหาบัณฑิต

บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันราชภัฏกำแพงเพชร.

(โอภามา, 2550)

โอภามา จำเแะ. (2550). **การจัดการตลาดทางเลือกเกษตรอินทรีย์ : กรณีศึกษา**

สหกรณ์การเกษตรยั่งยืนแม่ทาจำกัด ตำบลแม่ทา กิ่งอำเภอแม่อน

จังหวัดเชียงใหม่. วิทยานิพนธ์พัฒนาชุมชนมหาบัณฑิต

คณะสังคมสงเคราะห์ศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

(Almeida, 1990)

Almeida, D.M. (1990). **Father's participation in family work : Consequences for fathers' stress and father child relation.** Master's thesis, University of Victoria.

5. รายงานการประชุม

(นิทัศน์, 2540)

นิทัศน์ ภัทรโยธิน. (2540). **ตลาดซื้อขายสินค้าเกษตรล่วงหน้า ในการประชุม นักบัญชีทั่วประเทศ ครั้งที่ 15 วิสัยทัศน์นักบัญชีไทย.** วันที่ 27-28 มิถุนายน พ.ศ. 2540 (หน้า 19-35). กรุงเทพฯ : สมาคมนักบัญชีและผู้สอบบัญชีรับอนุญาตแห่งประเทศไทย.

(Paitoon, 1995)

Paitoon Sinlarat. (1995). Success and failure of facility in Thai university. In Somwang Pitiyanuwat, et al. (Eds), **Preparing teachers for All the World's Children: An Era of Transformation Proceedings of International Conference, Bangkok 1992.** (pp. 217-233). Bangkok : UNICEF.

วารสาร

รูปแบบการลงรายการอ้างอิงและบรรณานุกรมวารสาร การลงรายการชื่อผู้แต่งเหมือนหนังสือ

อ้างอิง (ชื่อ/ปีที่พิมพ์)

บรรณานุกรม ชื่อ/นามสกุล/(ปี/เดือน/วัน)/ชื่อบทความ/**ชื่อวารสาร**,/ปีที่(ฉบับที่)/หน้า (มัลลวีร์, นิตย และวิลาวลัย, 2549)

มัลลวีร์ อุดลวัฒน์ศิริ, นิตย บุษงามงคล และวิลาวลัย จตุรอำรง. (2549, กรกฎาคม-ธันวาคม). การศึกษาและพัฒนาพฤติกรรมทางจริยธรรมของเยาวชนในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ. **วารสารศึกษาศาสตร์**, 29(3-4), 83-92.

(Bekerian, 1993)

Bekerian, D.A. (1993, June). In search of the typical eyewitness. **American Psychologist**, 48, 574-576.

หนังสือพิมพ์

รูปแบบการลงรายการอ้างอิงและบรรณานุกรมหนังสือพิมพ์ การลงรายการชื่อผู้แต่งเหมือนหนังสือ

อ้างอิง (ชื่อ/ปี)

บรรณานุกรม ชื่อ/นามสกุล./ปี/เดือน/วัน). ชื่อบทความหรือพาดหัวข่าว./
ชื่อหนังสือพิมพ์./หน้า.

(สมศรี, 2550)

สมศรี หาญอนันตสุข. (2550, มิถุนายน 26). ภาครัฐธรรมนุญใหม่จะสร้าง
มิติใหม่ให้สังคมพุทธ. **มติชน**, หน้า 7.

(Krishman, 2007)

Krishman, E. (2007, June 26). Rebuilding self-esteem

Bangkok post, p.1, 12.

จุลสาร

รูปแบบการอ้างอิงและบรรณานุกรมจุลสาร แผ่นพับ แผ่นปลิว

อ้างอิง (ชื่อผู้แต่งหรือหน่วยงานที่ผลิต./ปี)

บรรณานุกรม ชื่อผู้แต่งหรือหน่วยงานที่ผลิต./ปี)./ชื่อเรื่อง./[แผ่นพับ]/สถานที่พิมพ์:/
ผู้แต่งหรือหน่วยงานที่ผลิต.

(การท่องเที่ยวแห่งประเทศไทย, 2541)

การท่องเที่ยวแห่งประเทศไทย. (2541). **ท่องเที่ยวสงขลา**. [แผ่นพับ].

สงขลา : การท่องเที่ยวแห่งประเทศไทย.

(Research and Training Center on Independent Living, 1993)

Research and Training Center on Independent Living. (1993).

Guidelines for reporting and writing about

people with disabilities. [Brochure]. Lawrence :

Research and Training Center on Independent Living.

โสตทัศนวัสดุ

รูปแบบการลงรายการอ้างอิงและบรรณานุกรมโสตทัศนวัสดุ

อ้างอิง (ชื่อผู้สร้างหรือผู้ผลิต./ปี)

บรรณานุกรม ชื่อผู้สร้างหรือผู้ผลิต./ปี)./ชื่อเรื่อง./[ประเภทโสตทัศนวัสดุ]/สถานที่ผลิต:/
หน่วยงานหรือบริษัทที่ผลิต.

(ยุพดี, 2530)

ยุพดี พยัฆพันธ์ (ผู้บรรยาย). (2530). **ยาสมุนไพร**. [แถบบันทึกเสียง].

กรุงเทพฯ : องค์กรวิทยาศาสตร์การแพทย์.

ซีดีรอม

รูปแบบการลงรายการอ้างอิงและบรรณานุกรมซีดี-รอม (CD-ROM)

อ้างอิง (ชื่อผู้แต่ง./ปี)

บรรณานุกรม ชื่อผู้แต่ง./ปี./ชื่อเรื่อง./[CD-ROM]./Available:/แหล่งที่มา./[ปี./เดือน/วันที่สืบค้น].
(อุทยานประวัติศาสตร์กำแพงเพชร, 2543)

อุทยานประวัติศาสตร์กำแพงเพชร. (2543). [CD-ROM]. Available :
ฐานข้อมูลไปคูให้เต็มดลล้าค่าความเป็นไทย. [2544, มิถุนายน 23].
(Social Science Index, 1999)

Social Science Index. (1999). [CD-ROM]. Available : UMI/Social
Science Index. [2005, June 26].

เอกสารอิเล็กทรอนิกส์

1. การลงรายการอ้างอิงและบรรณานุกรมหนังสืออิเล็กทรอนิกส์

อ้างอิง (ชื่อผู้แต่ง./ปี)

บรรณานุกรม ชื่อผู้แต่ง./ปี./ชื่อเรื่อง./[Online]. Available : แหล่งที่มา./
[ปี, เดือน/วันที่สืบค้น].

(อรรถศิษฐ์, 2542).

อรรถศิษฐ์ วงศ์มณีโรจน์. (2542). ความอุดมสมบูรณ์ของดิน. [Online].
Available : [http://158.108.200.11/soil/009421/
chap1.htm#era1](http://158.108.200.11/soil/009421/chap1.htm#era1). [2550, กุมภาพันธ์ 20].

(Abell, 2002)

Abell, S.K. (2002). Science teacher education : An international
perspeetive. [Online]. Available : [http://ebook.Springkerlink.
com/Search/Search Results.aspx?](http://ebook.Springkerlink.com/Search/Search Results.aspx?) [2007, June 30].

2. การลงรายการอ้างอิงและบรรณานุกรมวารสารอิเล็กทรอนิกส์

อ้างอิง (ชื่อผู้แต่ง./ปี)

บรรณานุกรม ชื่อผู้แต่ง./ปี./บทความ./ชื่อวารสาร [Online], /ปีที่./ฉบับที่).
Available:/แหล่งที่มา./[ปี./เดือน/วันที่สืบค้น].

(Kenneth, 1998)

Kenneth, I. (1998). A Buddhist response to the nature of human
rights. **Journal of Buddhist Ethies** [Online], 2, (9).
Available : <http://www.cac.psu.edu/Jbe/twocont.html>.
[2006, August 12].

3. การลงรายการอ้างอิงและบรรณานุกรมหนังสือพิมพ์อิเล็กทรอนิกส์

- อ้างอิง** (ชื่อผู้แต่ง, วัน/เดือน/ปี)
- บรรณานุกรม** ชื่อผู้แต่ง./ (ปี./เดือน/วัน)./บทความหรือพาดหัวข่าว ใน **ชื่อหนังสือพิมพ์**
[Online]. Available : แหล่งที่มา [ปี, เดือน วันที่สืบค้น].
(ชุม, (นามแฝง), 25 ตุลาคม 2542)
ชุม. (นามแฝง). (2542, ตุลาคม 25). บุญของคนไทย ใน **ไทยรัฐ**. [Online].
Available : <http://www.thairath.co.th>. [2542, ตุลาคม 25].
(ศธ. ยุติการถ่ายโอนสถานศึกษาบัญชี 2, 2550)
ศธ. ยุติการถ่ายโอนสถานศึกษาบัญชี 2. (2550, มิถุนายน 23). ใน **ไทยรัฐ**.
[Online]. Available : <http://www.thairath.co.th>. [2550, มิถุนายน 30].

4. การลงรายการอ้างอิงและบรรณานุกรมจากเว็บไซต์เว็บ (www.)

- อ้างอิง** (ชื่อผู้แต่ง./ปี)
- บรรณานุกรม** ชื่อผู้แต่ง./ (ปี)./ชื่อเรื่องหรือหัวข้อเรื่อง./[Online]./Available:/แหล่งที่มา./
[ปี./เดือน/วันที่สืบค้น].
(ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ, ม.ป.ป.)
เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ, ศูนย์. (ม.ป.ป.).
การจัดการศึกษาทางไกล. [Online]. Available : <http://www.nectec.or.th/courseware/cai/0015.htm>. [2550, กรกฎาคม 1].
(Ministry of Education, 2005)
Education, Ministry of. (2005). **The Regional Seminar on Higher Education in Southeast Asian Countries**. [Online].
Available : <http://www.inter.mua.go.th/news/News%20January%202005.htm>. [2006, January 5].

การสัมภาษณ์

การลงรายการอ้างอิงและบรรณานุกรมจากการสัมภาษณ์

- อ้างอิง** (ชื่อผู้ให้สัมภาษณ์./ปี/เดือน/วันที่สัมภาษณ์)
- บรรณานุกรม** ชื่อผู้ให้สัมภาษณ์./ (ปี./เดือน/วันที่สัมภาษณ์)./ตำแหน่ง./สัมภาษณ์.
(ดิลก, 2543)
ดิลก บุญเรืองรอด. (2543, กรกฎาคม 14). อธิการบดี, สถาบันราชภัฏ
สวนสุนันทา. สัมภาษณ์.
(Page, 1991)
Page, O. (1991, March 5). President, Austin Peay State University. Interview.

แบบฟอร์มการส่งบทความเพื่อเผยแพร่ใน สัปดาห์ : วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

1. ข้าพเจ้า (นาย/นาง/นางสาว).....
2. ระดับการศึกษาสูงสุด.....ตำแหน่งทางวิชาการ.....
3. สถานะภาพของผู้ส่งบทความ อาจารย์ บุคคลทั่วไป
4. ที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้สะดวก
.....
โทรศัพท์.....E-mail.....
5. ประเภทบทความ บทความวิจัย บทความวิชาการ
6. ชื่อบทความ
(ภาษาไทย).....
(ภาษาอังกฤษ).....
7. บทความฉบับนี้มีการอ้างอิงบทความจาก สัปดาห์ : วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จำนวน.....บทความ โดยเป็นบทความของอาจารย์ มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร จำนวน.....บทความ หรืออ้างอิงบทความของอาจารย์ มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร จากวารสารอื่นๆ จำนวน.....บทความ
8. บทความฉบับนี้มิได้คัดลอกผลงาน มิได้ละเมิดลิขสิทธิ์ และไม่ขัดต่อกฎหมายใดๆ ซึ่งผู้เขียนบทความเขียนโดยใช้ความรู้ ความสามารถและการสังเคราะห์ของตนเอง
9. ผู้เขียนบทความยินยิตใช้ค่าเสียหายใดๆ ที่อาจมีผู้เรียกร้องหรือฟ้องร้องตามกฎหมายทุกประการ โดยไม่เกี่ยวข้องกับพิจารณาตีพิมพ์บทความของกองบรรณาธิการหรือเจ้าของวารสาร
10. กรณีบทความที่มีผู้เขียนบทความมากกว่า 1 คน ผู้เขียนบทความทุกคนได้ลงชื่อยืนยันการเป็นผู้เขียนบทความ โดยยอมรับและปฏิบัติตามเงื่อนไขของวารสารนี้ทุกประการ

ข้าพเจ้าขอรับรองว่าบทความนี้ไม่เคยตีพิมพ์ในวารสาร รายงานสืบเนื่องจากการประชุมวิชาการ รวมทั้งไม่อยู่ระหว่างยื่นขอตีพิมพ์ในวารสารใดมาก่อน และยินยอมว่าบทความที่ตีพิมพ์ลงใน สัปดาห์ : วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร ถือเป็นลิขสิทธิ์ของ มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร ในการนี้ข้าพเจ้าดำเนินการจัดพิมพ์ตามรูปแบบการเขียนบทความที่ มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร ได้กำหนดไว้ทุกประการ และได้ตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลตามรายการตรวจสอบบทความ และข้าพเจ้าได้ส่งบทความในระบบ Online ที่ <http://research.kpru.ac.th/sendjournal/> เป็นที่เรียบร้อยแล้ว

ลงชื่อ.....
(.....)

ผู้เขียนบทความ

ลงชื่อ.....
(.....)

ผู้เขียนบทความ

ลงชื่อ.....
(.....)

ผู้ส่งบทความ

ลงชื่อ.....
(.....)

ผู้ส่งบทความ

ลงชื่อ.....
(.....)

ผู้ส่งบทความ

- หมายเหตุ**
- 1.ถ้ามีผู้เขียนบทความมากกว่า 1 คน ขอให้ลงชื่อเป็นผู้ส่งบทความทุกคน
 - 2.บทความที่ส่งมาโดยไม่มีใบรายการตรวจสอบบทความหรือไม่ครบหรือไม่ถูกต้องตามที่กำหนดไว้ จะไม่ดำเนินการในขั้นตอนใดๆ จนกว่าจะมีการส่งรายการตรวจสอบบทความดังกล่าว ผู้เขียนบทความสามารถ download แบบฟอร์มรายการตรวจสอบบทความได้จาก http://research.kpru.ac.th/old/journal_science/

แบบฟอร์มรายการตรวจสอบบทความเพื่อนำส่งตีพิมพ์ในวารสาร

“สัปดาห์ : วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี”

คำชี้แจง : ผู้เขียนบทความโปรดทำเครื่องหมาย ✓ ลงหน้ารายการที่ท่านได้ตรวจสอบบทความของท่านในรายการที่พบว่ามีปรากฏในบทความของท่านอย่างครบถ้วนถูกต้องแล้วตามคำแนะนำสำหรับผู้ส่งบทความที่วารสารได้กำหนดไว้

- เป็นบทความที่ไม่เคยตีพิมพ์เผยแพร่ที่ไหนมาก่อน
- ไม่ได้เป็นบทความที่อยู่ระหว่างการพิจารณาของวารสารหรือการประชุมทางวิชาการอื่นๆ
- ไฟล์ที่ส่งได้จัดทำตามรูปแบบที่ระบุในคำแนะนำในการเตรียมต้นฉบับเท่านั้น อยู่ในรูปแบบของ

Word และใช้ตัวอักษร TH SarabunPSK เท่านั้น

- รูปภาพประกอบเป็นไฟล์ที่มีนามสกุล .JPEG เท่านั้น

บทความวิชาการมีหัวข้อตามที่กำหนด ดังนี้

- ชื่อเรื่อง/บทความ มีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ
- ชื่อ/ที่อยู่ผู้เขียน มีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ
- บทคัดย่อ มีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ
- คำสำคัญ มีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ
- บทนำ
- เนื้อหา
- สรุป
- เอกสารอ้างอิง

บทความวิจัยมีหัวข้อตามที่กำหนด ดังนี้

- ชื่อบทความ มีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ
- ชื่อ/ที่อยู่ผู้เขียนบทความ มีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ
- บทคัดย่อ มีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ
- คำสำคัญ มีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ
- บทนำ
- วิธีดำเนินการวิจัย
- ผลการวิจัย
- อภิปรายผล
- กิตติกรรมประกาศ
- เอกสารอ้างอิง

แบบฟอร์มการส่งบทความเพื่อเผยแพร่ใน สัปดาห์ : วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

1. ข้าพเจ้า (นาย/นาง/นางสาว).....
 ตำแหน่งทางวิชาการ (ถ้ามี).....
2. กำหนดการที่คาดว่าจะสำเร็จการศึกษา วันที่.....เดือน.....พ.ศ.
3. ที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้สะดวก
เลขที่.....ตำบล.....อำเภอ.....จังหวัด.....
รหัสไปรษณีย์.....โทรศัพท์.....
E-mail.....
4. ประเภทบทความ บทความวิจัย บทความวิชาการ
5. ชื่อบทความ
(ภาษาไทย).....
.....
(ภาษาอังกฤษ).....
.....
6. บทความฉบับนี้มีการอ้างอิงบทความจาก สัปดาห์ : วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จำนวน.....บทความ
7. อ้างอิงบทความของอาจารย์ มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร จำนวน.....บทความ
8. อ้างอิงบทความของอาจารย์ มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร จากวารสารอื่นๆ จำนวน.....บทความ
ข้าพเจ้าขอรับรองว่าบทความนี้ไม่เคยลงตีพิมพ์ในวารสารใดมาก่อน และยินยอมว่าบทความที่ตีพิมพ์ลงใน สัปดาห์ : วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร ถือเป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร ในการนี้ข้าพเจ้าดำเนินการจัดพิมพ์ตามรูปแบบการเขียนบทความที่มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร ได้กำหนดไว้ทุกประการ และได้ตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลตามรายการตรวจสอบบทความเป็นที่เรียบร้อยแล้ว
ลงชื่อ.....
(.....)
ความคิดเห็นของประธานกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์
“พิจารณาบทความแล้วเห็นสมควรเผยแพร่ได้”
ลงชื่อ.....
(.....)
ประธานกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์
ลงชื่อ.....
(.....)

หมายเหตุ 1. ถ้ามีผู้เขียนบทความมากกว่า 1 คน ขอให้ลงชื่อเป็นผู้เขียนบทความทุกคน ผู้เขียนบทความ
2. บทความที่ส่งมาโดยไม่มีใบรายการตรวจสอบบทความหรือมีไม่ครบฝ่ายจัดการวารสารจะไม่ดำเนินการในขั้นตอนใดๆ
จนกว่าจะมีการส่งรายการตรวจสอบบทความดังกล่าว ผู้เขียนบทความสามารถ download
แบบฟอร์มรายการตรวจสอบบทความได้จาก http://research.kpru.ac.th/old/journal_science/

แบบฟอร์มรายการตรวจสอบบทความเพื่อนำส่งตีพิมพ์ในวารสาร

“สัปดาห์ : วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี”

คำชี้แจง : ผู้เขียนบทความโปรดทำเครื่องหมาย ✓ ลงหน้ารายการที่ท่านได้ตรวจสอบบทความของท่านในรายการที่พบว่ามีปรากฏในบทความของท่านอย่างครบถ้วนถูกต้องแล้วตามคำแนะนำสำหรับผู้ส่งบทความที่วารสารได้กำหนดไว้

- เป็นบทความที่ไม่เคยตีพิมพ์เผยแพร่ที่ไหนมาก่อน
- ไม่ได้เป็นบทความที่อยู่ระหว่างการพิจารณาของวารสารหรือการประชุมทางวิชาการอื่นๆ
- ไฟล์ที่ส่งได้จัดทำตามรูปแบบที่ระบุในคำแนะนำในการเตรียมต้นฉบับเท่านั้น อยู่ในรูปแบบของ

Word และใช้ตัวอักษร TH SarabunPSK เท่านั้น

- รูปภาพประกอบเป็นไฟล์ที่มีนามสกุล .JPEG เท่านั้น

บทความวิชาการมีหัวข้อตามที่กำหนด ดังนี้

- ชื่อเรื่อง/บทความ มีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ
- ชื่อ/ที่อยู่ผู้เขียน มีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ
- บทคัดย่อ มีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ
- คำสำคัญ มีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ
- บทนำ
- เนื้อหา
- สรุป
- เอกสารอ้างอิง

บทความวิจัยมีหัวข้อตามที่กำหนด ดังนี้

- ชื่อบทความ มีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ
- ชื่อ/ที่อยู่ผู้เขียนบทความ มีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ
- บทคัดย่อ มีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ
- คำสำคัญ มีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ
- บทนำ
- วิธีดำเนินการวิจัย
- ผลการวิจัย
- อภิปรายผล
- กิตติกรรมประกาศ
- เอกสารอ้างอิง

แบบฟอร์มค่าใช้จ่ายในการตีพิมพ์บทความเพื่อเผยแพร่ในวารสาร

สังกัด : วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

1. ข้อมูลผู้ส่งบทความ

ชื่อ นางสาว/นาง/นาย

เบอร์โทร..... e-mail

ที่อยู่จัดส่งใบเสร็จรับเงิน เลขที่.....ตำบล.....อำเภอ.....

จังหวัด.....รหัสไปรษณีย์.....

2. ค่าดำเนินการตรวจประเมินบทความ บทความละ 4,500 บาท

3. ค่าสมัครสมาชิกวารสาร ปีละ 1,000 บาท

มีความประสงค์สมัครสมาชิก ไม่มีความประสงค์สมัครสมาชิก

4. การชำระเงิน

โอนเงินเข้าบัญชีธนาคารกรุงไทย สาขาซากงราว จำนวน.....บาท

เลขบัญชี 347-0-60979-9

ชื่อบัญชี สังกัด : วารสารมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร

แจ้งหลักฐานการชำระเงินทางระบบส่งบทความ

ลงชื่อผู้ส่งบทความ.....

(.....)

...../...../.....

หมายเหตุ : กรณีบทความไม่ได้รับการพิจารณาให้ตีพิมพ์ลงในวารสาร สังกัด : วารสารวิทยาศาสตร์และ

เทคโนโลยี ทางกองบรรณาธิการจะไม่คืนค่าใช้จ่ายในการตีพิมพ์ของท่าน

จริยธรรมในการตีพิมพ์ในวารสาร “สักทอง” (Publication Ethics)

การเผยแพร่ผลงานวิชาการ ผลงานสร้างสรรค์ในปัจจุบันมีหลายลักษณะ ซึ่งประกอบด้วย หนังสือ ตำรา เอกสารประกอบการสอน งานแปล บทความวิชาการ บทความวิจัย งานวิจัยที่ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการ งานวิจัยที่นำเสนอในการประชุมวิชาการ งานประดิษฐ์หรืองานสร้างสรรค์ วารสาร “สักทอง : วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี” มุ่งมั่นที่จะรักษามาตรฐานด้านจริยธรรมในการตีพิมพ์อย่างต่อเนื่อง ดังนั้นทุกฝ่ายที่เกี่ยวข้องจะต้องปฏิบัติตามหลักการและมาตรฐานด้านจริยธรรมในการตีพิมพ์ (Publication Ethics) อย่างเคร่งครัด ดังนี้

บทบาทและหน้าที่ของบรรณาธิการและกองบรรณาธิการ (Duties of Editors)

1. บรรณาธิการและกองบรรณาธิการต้องรักษามาตรฐานของวารสาร รวมทั้งพัฒนาวารสารให้มีคุณภาพ และทันสมัยอยู่เสมอ
2. บรรณาธิการและกองบรรณาธิการต้องไม่มีส่วนได้ส่วนเสียกับผู้พิมพ์ ผู้ทรงคุณวุฒิ และจะต้องไม่นำบทความหรือวารสารไปใช้ประโยชน์ในเชิงธุรกิจ และนำไปเป็นผลงานของตนเอง
3. บรรณาธิการและกองบรรณาธิการต้องปฏิบัติตามขั้นตอนการพิจารณาคุณภาพของบทความอย่างเคร่งครัด
4. บรรณาธิการและกองบรรณาธิการมีหน้าที่พิจารณาและตรวจสอบบทความที่ส่งมาเพื่อขอลงตีพิมพ์ในวารสารทุกบทความ โดยพิจารณาความสอดคล้องของเนื้อหา กับเป้าหมายและขอบเขตของวารสาร รวมทั้งตรวจสอบคุณภาพของบทความก่อนตีพิมพ์
5. บรรณาธิการและกองบรรณาธิการต้องไม่แก้ไขผลการประเมินบทความของผู้ทรงคุณวุฒิ
6. บรรณาธิการและกองบรรณาธิการต้องใช้เหตุผลทางวิชาการในการพิจารณาบทความทุกครั้งโดยปราศจากอคติที่มีต่อบทความ ผู้พิมพ์ และสังกัดของผู้พิมพ์
7. หากบรรณาธิการและกองบรรณาธิการตรวจสอบพบว่าบทความที่ตรวจพิจารณา มีการคัดลอกผลงาน บรรณาธิการและกองบรรณาธิการต้องแจ้งให้ผู้พิมพ์ทราบทันที และปฏิเสธการตีพิมพ์บทความนั้น
8. บรรณาธิการและกองบรรณาธิการต้องไม่เปิดเผยข้อมูลของผู้ทรงคุณวุฒิ และผู้พิมพ์ ให้แก่บุคคลอื่นๆ ที่ไม่เกี่ยวข้อง
9. บรรณาธิการและกองบรรณาธิการจะไม่รับบทความที่เคยตีพิมพ์เผยแพร่แล้ว

บทบาทและหน้าที่ของผู้ทรงคุณวุฒิตรวจประเมินบทความ (Duties of Reviewers)

1. ผู้ทรงคุณวุฒิต้องคำนึงถึงคุณภาพบทความเป็นหลัก โดยพิจารณาบทความด้วยหลักการและเหตุผลทางวิชาการ โดยปราศจากอคติ และไม่มีส่วนได้ส่วนเสียกับผู้นิพนธ์
2. ผู้ทรงคุณวุฒิต้องรักษาระยะเวลาในการตรวจประเมินตามกรอบเวลาที่กำหนด และไม่เปิดเผยข้อมูลของบทความให้ผู้ที่ไม่มีส่วนเกี่ยวข้อง
3. ผู้ทรงคุณวุฒิควรประเมินบทความในสาขาวิชาที่ตนมีความเชี่ยวชาญโดยพิจารณาความสำคัญของเนื้อหาในบทความที่จะมีต่อสาขาวิชานั้นๆ คุณภาพของการวิเคราะห์ และความเข้มข้นของผลงาน ไม่ควรใช้ความคิดเห็นส่วนตัวที่ไม่มีข้อมูลรองรับมาเป็นเกณฑ์ในการตัดสินบทความวิจัย
4. ผู้ทรงคุณวุฒิต้องไม่แสวงหาผลประโยชน์จากบทความที่ตรวจประเมินโดยเด็ดขาด
5. หากผู้ทรงคุณวุฒิตรวจสอบพบว่าบทความที่ตรวจพิจารณา มีการคัดลอกผลงานจากที่อื่นๆ ผู้ทรงคุณวุฒิต้องแจ้งให้บรรณาธิการวารสารทราบทันที หรือปฏิเสธบทความนั้น โดยการประเมินให้ “ไม่ผ่าน”

บทบาทและหน้าที่ของผู้นิพนธ์ (Duties of Authors)

1. บทความของผู้นิพนธ์ต้องเป็นบทความที่ไม่เคยตีพิมพ์หรือเผยแพร่ที่ไหนมาก่อน
2. ชื่อผู้นิพนธ์ที่ปรากฏในบทความต้องเป็นผู้ที่มีส่วนในการเรียบเรียงบทความนี้จริง
3. ผู้นิพนธ์ต้องไม่คัดลอกผลงานของผู้อื่น และต้องมีการอ้างอิงทุกครั้งเมื่อนำผลงานของผู้อื่นมาเสนอหรืออ้างอิงในเนื้อหาและท้ายบทความของตนเอง ถ้าวารสารทราบว่าบทความของผู้นิพนธ์มีการคัดลอกผลงานของผู้อื่น ทางวารสารจะไม่ขอรับผิดชอบ และให้เอาผิดจากผู้นิพนธ์ทุกประการ
4. ผู้นิพนธ์ต้องไม่บิดเบือนข้อมูล หรือให้ข้อมูลที่เป็นเท็จในบทความ
5. ผู้นิพนธ์ต้องเขียนบทความให้ตรงตามรูปแบบที่วารสารกำหนดไว้ในคำแนะนำของวารสารอย่างถูกต้อง รวมทั้งต้องไม่บิดเบือนข้อมูล หรือให้ข้อมูลที่เป็นเท็จในบทความ
6. ผู้นิพนธ์ต้องยินยอมโอนลิขสิทธิ์ให้แก่วารสารก่อนการตีพิมพ์ และไม่นำบทความไปเผยแพร่หรือตีพิมพ์กับแหล่งอื่นๆ หลังจากที่ได้รับการตีพิมพ์แล้ว



ประกาศมหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร
เรื่อง การเรียกเก็บและการเบิกจ่ายเงินค่าธรรมเนียมการตีพิมพ์บทความในวารสาร
ค่าสมัครสมาชิกวารสาร และค่าเล่มวารสาร พ.ศ. ๒๕๖๒

ตามที่ มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชรมีการจัดทำวารสารเพื่อตีพิมพ์เผยแพร่ผลงานวิจัย ผลงานสร้างสรรค์ และผลงานวิชาการในสาขามนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์ และสาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ได้แก่ สักทอง : วารสารมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์ และสักทอง: วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ดังนั้น เพื่อให้การดำเนินการดังกล่าวเป็นไปด้วยความเรียบร้อย อาศัยอำนาจตามความในมาตรา ๓๑ แห่งพระราชบัญญัติมหาวิทยาลัยราชภัฏ พ.ศ. ๒๕๔๗ ประกอบกับข้อ ๕.๒ และข้อ ๖ แห่งข้อบังคับมหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชรว่าด้วยการจัดบริการวิชาการและจัดหารายได้ พ.ศ. ๒๕๕๙ และที่แก้ไขเพิ่มเติม และมติที่ประชุมคณะกรรมการบริหารมหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร ครั้งที่ ๒/๒๕๖๒ เมื่อวันที่ ๑๒ กุมภาพันธ์ พ.ศ. ๒๕๖๒ จึงออกประกาศไว้ดังต่อไปนี้

ข้อ ๑ ประกาศนี้เรียกว่า “ประกาศมหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร เรื่อง การเรียกเก็บและการเบิกจ่ายเงินค่าธรรมเนียมการตีพิมพ์บทความในวารสาร ค่าสมัครสมาชิกวารสาร และค่าเล่มวารสาร พ.ศ. ๒๕๖๒”

ข้อ ๒ ประกาศนี้ให้ใช้บังคับตั้งแต่วันที่ ๒๑ กุมภาพันธ์ ๒๕๖๒ เป็นต้นไป

ข้อ ๓ ในประกาศนี้

“มหาวิทยาลัย” หมายความว่า มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร

“อธิการบดี” หมายความว่า อธิการบดีมหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร

“สถาบันวิจัยและพัฒนา” หมายความว่า สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏ

กำแพงเพชร

“วารสาร” หมายความว่า วารสารของมหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร ได้แก่ สักทอง : วารสารมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์ หรือสักทอง : วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

“บุคลากรภายใน” หมายความว่า ข้าราชการพลเรือน พนักงานมหาวิทยาลัย พนักงานราชการ ลูกจ้างชั่วคราว สังกัดมหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร และนักศึกษาซึ่งกำลังศึกษาอยู่ในมหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร

“บุคคลภายนอก” หมายความว่า บุคคลอื่นใดที่ไม่ได้สังกัดมหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร

“ผู้ทรงคุณวุฒิ” หมายความว่า ผู้ที่มีความรู้ความเชี่ยวชาญสาขามนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์ สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และสาขาอื่นๆ ตามที่กองบรรณาธิการเห็นสมควร

“สมาชิก” หมายความว่า บุคลากรภายในหรือบุคคลภายนอกที่สมัครเป็นสมาชิกวารสาร

ข้อ ๔ มหาวิทยาลัยเรียกเก็บเงินค่าธรรมเนียมการตีพิมพ์บทความ ค่าสมาชิกวารสาร และค่าเล่มวารสารจากบุคลากรภายในและบุคคลภายนอก ดังนี้

๔.๑ ค่าธรรมเนียมการตีพิมพ์บทความในวารสาร บทความละ ๔,๕๐๐ บาท

๔.๒ ค่าสมัครสมาชิกวารสาร ปีละ ๑,๐๐๐ บาท

๔.๓ ค่าเล่มวารสาร เล่มละ ๕๐๐ บาท

ข้อ ๕ เงินค่าธรรมเนียมที่เรียกเก็บจากการตีพิมพ์บทความ ค่าสมาชิกวารสาร และค่าเล่มวารสาร จากบุคลากรภายในและบุคลากรภายนอก ในข้อ ๔ ให้ดำเนินการดังนี้

๕.๑ ใช้ใบเสร็จเบ็ดเตล็ดของมหาวิทยาลัยเป็นใบเสร็จรับเงินที่เรียกเก็บตามประกาศนี้

๕.๒ นำเงินฝากธนาคารกรุงไทย สาขาซากังราว ในชื่อบัญชี สักทอง : วารสารมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์ ของมหาวิทยาลัย

๕.๓ เมื่อสิ้นปีงบประมาณหากมีเงินเหลือให้สมทบเป็นเงินรายได้เงินฝากถอนคืนวารสารมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์ ของสถาบันวิจัยและพัฒนา

ข้อ ๖ สถาบันวิจัยและพัฒนาเบิกจ่ายเงินค่าธรรมเนียมการตีพิมพ์บทความ ค่าสมาชิกวารสาร และค่าเล่มวารสาร ในข้อ ๔ ดังนี้

๖.๑ จัดสรรเป็นเงินรายได้ประเภทเงินฝากถอนคืนของมหาวิทยาลัย ร้อยละ ๑๐

๖.๒ จัดสรรเป็นเงินรายได้ประเภทเงินฝากถอนคืนของสถาบันวิจัยและพัฒนา ไม่เกินร้อยละ ๑๐

๖.๓ ค่าตอบแทนผู้ทรงคุณวุฒิที่ตรวจบทความ คนละ ๑,๐๐๐ บาท ต่อ ๑ บทความ

๖.๔ ค่าตอบแทนผู้ทรงคุณวุฒิที่ตรวจบทความคัดย่อและบรรณานุกรมภาษาอังกฤษ บทความละ

๓๐๐ บาท

๖.๕ ค่าใช้สอยในการประชุมกองบรรณาธิการ ไม่เกินครั้งละ ๑,๐๐๐ บาท

๖.๖ ค่าใช้สอยในการจัดส่งบทความให้ผู้ทรงคุณวุฒิ ไม่เกินบทความละ ๒๐๐ บาท

การเบิกจ่ายเพื่อจัดสรรเป็นเงินรายได้ในข้อ ๖.๑ และ ๖.๒ ให้เป็นหน้าที่ของเจ้าหน้าที่การเงินเป็นผู้เบิกจ่าย

ข้อ ๗ ค่าใช้จ่ายอื่นที่นอกเหนือจากที่ระบุไว้ในข้อ ๖ ให้เบิกจ่ายตามระเบียบกระทรวงการคลัง หรือระเบียบมหาวิทยาลัย

ข้อ ๘ ให้อธิการบดีเป็นผู้รักษาการตามประกาศนี้ ในกรณีที่เกิดปัญหาจากการปฏิบัติตามประกาศนี้ ให้อธิการบดีมีอำนาจตีความและวินิจฉัยชี้ขาด การวินิจฉัยชี้ขาดของอธิการบดีถือเป็นที่สุด

ประกาศ ณ วันที่ ๒๑ กุมภาพันธ์ พ.ศ. ๒๕๖๒



(รองศาสตราจารย์สุวิทย์ วงษ์บุญมาก)

อธิการบดีมหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร



<https://research.kpru.ac.th>

ที่มาภาพ : คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร