

Journal of Science and Technology Buriram Rajabhat University

วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์



ปีที่ 8
ฉบับที่ 2

เดือน กรกฎาคม - ธันวาคม 2567

มหาวิทยาลัย
ราชภัฏบุรีรัมย์

คณะวิทยาศาสตร์
Faculty of
Science

ISSN 2774-0757 (Online)

บทบรรณาธิการ

วารสาร “วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์” หรือ Journal of Science and Technology Buriram Rajabhat University เป็นวารสารที่ตีพิมพ์เผยแพร่บทความวิชาการ บทความวิจัย โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเป็นแหล่งเผยแพร่ความรู้ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีที่ครอบคลุมเนื้อหาด้านวิทยาศาสตร์บริสุทธิ์ และวิทยาศาสตร์ประยุกต์และสาขาอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง ส่งเสริมอาจารย์ นักศึกษา นักวิจัย รวมถึงนักวิชาการทั่วไป ได้มีโอกาสเผยแพร่ผลงานวิชาการและผลงานวิจัย รวมทั้งพัฒนาคุณภาพวารสารอย่างต่อเนื่องเพื่อให้เป็นวารสารที่มีคุณภาพ

วารสาร “วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์” ปีที่ 8 ฉบับที่ 2 กำหนดเผยแพร่เดือนกรกฎาคม ถึง เดือนธันวาคม 2567 มีบทความวิจัยนำเสนอทั้งหมด 8 เรื่อง สำหรับเนื้อหาในฉบับนี้ได้ทำการเผยแพร่ผลงานวิชาการในรูปแบบของสหสาขาวิชาโดยประกอบด้วยเนื้อหาเกี่ยวกับเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า เรื่อง การออกแบบสร้างรถสามล้อไฟฟ้าด้วยมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านโดยประยุกต์ใช้การอัดประจุแบตเตอรี่จากโซล่าเซลล์ ตลอดจนการบูรณาการข้ามศาสตร์ระหว่างเทคโนโลยีวัสดุและนวัตกรรมทางการแพทย์ จำนวน 2 เรื่อง ได้แก่ การพัฒนาโคโตะซาน/คอลลาเจนไฮโดรเจลที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและมีคุณสมบัติต้านแบคทีเรียโดยใช้นาโนเงินชีวสังเคราะห์จากสารสกัดน้ำกระชายขาว และการเพิ่มประสิทธิภาพอิเล็กโทรด SPCE ด้วยอนุภาคนาโนของทองคำและแพลทินัมเพื่อปรับปรุงการตรวจวัดภาวะเครียดจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน อีกทั้งศาสตร์ด้านชีววิทยาและเทคโนโลยีชีวภาพ จำนวน 3 เรื่อง ได้แก่ การผลิตเครื่องดื่มคอมบูชาจากรากบัว ผลทางด้านจุลินทรีย์และกายภาพของขนมปังที่ห่อด้วยผ้าเคลือบไขผึ้งห่ออาหาร และการเพาะเลี้ยงเมล็ดในหลอดทดลองและการผลิตเมล็ดเทียมจากเอื้องไม้เท้าฤๅษี (*Dendrobium pendulum* Roxb.) ในสภาพปลอดเชื้อ นอกจากนี้ยังมีบทความวิจัยในด้านวิทยาการคอมพิวเตอร์และสารสนเทศอีกจำนวน 2 เรื่อง ได้แก่ การพัฒนาเกม 2 มิติ อิงพีคกระบวนภูมิศาสตร์ เพื่อส่งเสริมการท่องเที่ยวอำเภอเมือง จังหวัดบุรีรัมย์ และการพัฒนาระบบสารสนเทศเพื่อการจัดการงานพัสดุตามแนวคิดแบบสัณฐานศึกษา องค์การบริหารส่วนจังหวัดบุรีรัมย์ ทั้งนี้จะเห็นได้ว่าบทความที่นำเสนอลงในวารสารมีความหลากหลายของเนื้อหาอย่างมาก แต่ทุกบทความที่ได้รับการพิจารณาได้มีการประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์ที่สามารถต่อยอดการวิจัยที่ครอบคลุม ส่งผลให้นักวิจัยหรือผู้ที่สนใจสามารถนำไปพัฒนาหรือสร้างองค์ความรู้ใหม่ได้อย่างสร้างสรรค์

อีกทั้งผลงานบทความวิชาการและบทความวิจัยทุกงานยังคงไว้ซึ่งคุณภาพจากการกลั่นกรองของผู้ทรงคุณวุฒิ ที่ทำการประเมินงานคุณภาพตามลำดับขั้นตอนของการตรวจสอบคุณภาพของงานวิชาการให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น กองบรรณาธิการจะพิจารณาบทความเบื้องต้นในด้านเนื้อหาและความถูกต้องของรูปแบบการพิมพ์ หากรูปแบบการพิมพ์ไม่ถูกต้องตามหลักเกณฑ์ กองบรรณาธิการจะไม่รับพิจารณาต้นฉบับ หากผ่านการพิจารณาบทความจะเข้าสู่การประเมินบทความโดยผู้ทรงคุณวุฒิตรวจสอบบทความ (peer reviewer) ซึ่งเป็นบุคคลภายนอกจากหลากหลายสถาบัน อย่างน้อย 3 คน โดยการประเมินคุณภาพของบทความจะเป็นแบบ double blinded กล่าวคือ ผู้นิพนธ์และผู้ประเมินจะไม่ทราบตัวตนและไม่ถูกเปิดเผยข้อมูลให้ทราบ

บทความที่ตีพิมพ์ลงในวารสารถือว่าเป็นลิขสิทธิ์ของวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์ สำหรับข้อเขียนและข้อคิดเห็นใด ๆ ในวารสารนี้เป็นความคิดเห็นส่วนตัวและเป็นการรับผิดชอบของผู้นิพนธ์ทั้งสิ้น ไม่ใช่ความเห็นของกองบรรณาธิการ และกองบรรณาธิการไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป หากมีประเด็นทางกฎหมายเกี่ยวกับเนื้อหา ผู้นิพนธ์จะต้องเป็นผู้รับผิดชอบ และถ้ามีการศึกษาวิจัยในมนุษย์ ผู้นิพนธ์จะต้องแนบหนังสือรับรองที่ได้รับอนุญาตให้ทำการวิจัยในมนุษย์จากคณะกรรมการพิจารณาจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์ (ethics committee) และระบุหมายเลขหรือรหัสการรับรองลงในบทความ หากมีการศึกษาวิจัยในสัตว์ทดลอง เช่น ในหนูทดลอง การวิจัยนั้นจะต้องผ่านการรับรองจากคณะกรรมการพิจารณาจริยธรรมการใช้สัตว์ทดลอง

กองบรรณาธิการหวังว่า วารสารฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ทางวิชาการสำหรับผู้อ่านทุกท่าน หากท่านใด
ประสงค์จะส่งบทความเพื่อเผยแพร่ กองบรรณาธิการยินดีรับตีพิมพ์ โดยทุกบทความต้องผ่านการพิจารณาลั่นกรอง
จากผู้ทรงคุณวุฒิ หากท่านมีข้อเสนอแนะประการใด กองบรรณาธิการยินดีรับคำเพื่อนำไปปรับปรุงและพัฒนา
คุณภาพวารสารให้มีมาตรฐานยิ่งขึ้น

บรรณาธิการ

วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์

ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์ มาลีณี จุฑาปะมา อธิการบดี มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุพัตรา รักการศิลป์ รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภาพร ชื่นชูจิตร์ คณบดีคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์

บรรณาธิการผู้ทรงคุณวุฒิ

- | | |
|--|-----------------------------|
| 1. ศาสตราจารย์ ดร.ชิตชนก เหลือสินทรัพย์ | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 2. ศาสตราจารย์ ดร.อลงกลด แทนอมทอง | มหาวิทยาลัยขอนแก่น |
| 3. รองศาสตราจารย์ ดร.ปรีชา ประเทพา | มหาวิทยาลัยมหาสารคาม |
| 4. รองศาสตราจารย์ ดร.ไพโรจน์ ประมวล | มหาวิทยาลัยมหาสารคาม |
| 5. รองศาสตราจารย์ ดร.วิภาวี ทิพย์แก้ว | มหาวิทยาลัยขอนแก่น |
| 6. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เกตุจันทร์ จำปาไชยศรี | มหาวิทยาลัยนเรศวร |
| 7. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เสรี ปานซาง | มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ |
| 8. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ น.สพ.ประยุทธ์ กุศลรัตน์ | มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา |
| 9. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธวัช อารีราษฎร์ | มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม |
| 10. อาจารย์ ดร. สุนันทา กลิ่นถาวร | มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม |
| 11. ผศ.ดร.ถิรนนท์ สอนแก้ว | มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง |

บรรณาธิการ

อาจารย์ ดร.ทิพวัลย์ แสนคำ

รองบรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุธีรา สุนทรารักษ์

กองบรรณาธิการ

1. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรัณย์ จำรัสธนสารย์
2. อาจารย์ ดร.ชาติวุฒิ ธนาจิรันธ
3. อาจารย์กิตติคุณ บุญเกตุ
4. อาจารย์พุทธรชาด ลิ้มศิริเรืองโร

ผู้ทรงคุณวุฒิประจำฉบับ

- | | |
|--|-----------------------------------|
| 1. ศาสตราจารย์ ดร.วรวัฒน์ เสี่ยงมิบูลย์ | มหาวิทยาลัยมหาสารคาม |
| 2. ศาสตราจารย์ ดร.ไพโรจน์ ประมวล | มหาวิทยาลัยมหาสารคาม |
| 3. ศาสตราจารย์ ดร.ปรีชา ประเทพา | มหาวิทยาลัยมหาสารคาม |
| 4. รองศาสตราจารย์ ดร.วรปภา อารีราษฎร์ | มหาวิทยาลัยมหาสารคาม |
| 5. รองศาสตราจารย์ ดร.กุลวดี โรจน์ไพศาลกิจ | มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์ |
| 6. รองศาสตราจารย์ ดร.สามารถ ใจเตี้ย | มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ |
| 7. รองศาสตราจารย์ ดร.ธีระชัย บงการณ | มหาวิทยาลัยนเรศวร |
| 8. รองศาสตราจารย์ ดร.วันไชย คำเสน | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา |
| 9. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พงษ์นรินทร์ ศรีพลอย | มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา |
| 10. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภัทรนันท์ ทวดอาจ | มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์ |
| 11. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิตตะวัน กุโปลา | มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์ |
| 12. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประภาพันท์ ศิริจันทร์แสง | มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์ |
| 13. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภัทรนันท์ ทวดอาจ | มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์ |
| 14. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จตุพัฒน์ สมป์ปิโต | มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์ |
| 15. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนินทร์ มหัทธนชัย | มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ |
| 16. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ราตรี คำโหมง | มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์ |
| 17. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธรัช อารีราษฎร์ | มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม |
| 18. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภินันท์ นันทิยา | มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ |
| 19. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เดือนฉาย ไชยบุตร | มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ |
| 20. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประภัสรา ศิริจันทร์แสง | มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์ |

สารบัญ

เรื่อง

หน้า

การออกแบบสร้างรถสามล้อไฟฟ้าด้วยมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน โดยประยุกต์ใช้การอัดประจุแบตเตอรี่จากโซลาร์เซลล์.....1	1
ดุสิต อุทิศสุนทร และ คมสันต์ บันลือหาญ	
การพัฒนาโคโตซาน/คอลลาเจนไฮโดรเจลที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และมีคุณสมบัติต้านแบคทีเรียโดยใช้อนุภาคนาโนเงินชีวสังเคราะห์ จากสารสกัดน้ำกระชายขาว.....21	21
ชานนท์ สมจิตรกุล เอกรัฐ หิตโกเมท ชีราวุฒิ เพชรเย็น และ ปัญจพร วงศ์วิทยากุล	
การผลิตเครื่องดื่มคอมบูชาจากรากบัว.....41	41
พันธุ์ระวี หมดศรี และ อธิษฐา เตียนธนา	
การพัฒนาเกม 2 มิติ อิงพิภักระบบภูมิศาสตร์ เพื่อส่งเสริมการท่องเที่ยว อำเภอเมือง จังหวัดบุรีรัมย์.....51	51
วรินทร์พิพัชร วัชรพงษ์เกษม ณัฐพัฒน์ วิเศษทรานนท์ และ อธิพัล สมเสมอ	
ผลทางด้านจุลินทรีย์และกายภาพของขนมปังที่ห่อด้วยผ้าเคลือบไขผึ้งห่ออาหาร.....63	63
นงลักษณ์ สายเทพ	
การเพิ่มประสิทธิภาพอิเล็กทรอนิกส์ SPCE ด้วยอนุภาคนาโนของทองคำและแพลทินัม เพื่อปรับปรุงการตรวจจับภาวะเครียดจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน.....73	73
สนธยา พงษ์ธานี หยาตนาภา ผาเจริญ ศีตกานต์ นัตพบสุข และ ชีราวุฒิ เพชรเย็น	
การเพาะเลี้ยงเมล็ดในหลอดทดลองและการผลิตเมล็ดเทียมจากเอื้องไม้ทำฤๅษี (<i>Dendrobium pendulum</i> Roxb.) ในสภาพปลอดเชื้อ89	89
จิราภรณ์ นิคมัทศน์ นิศากร สุวรรณ และจรูญ มากน้อย	
การพัฒนาระบบสารสนเทศเพื่อการจัดการงานพัสดุตามแนวคิดแบบลิ้น กรณศึกษา องค์การบริหารส่วนจังหวัดบุรีรัมย์.....109	109
จุฑาทิพย์ โล่เจริญรัตน์ วิไลรัตน์ ยาทองไชย และ ณปภัช วรรณตรง	

การออกแบบสร้างรถสามล้อไฟฟ้าด้วยมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน
โดยประยุกต์ใช้การอัดประจุแบตเตอรี่จากโซล่าเซลล์
Design of an Electric Tricycle with a Brushless DC Motor
Using Solar Cell Charging Application

ดุสิต อุทิศสุนทร* และ คมสันต์ บันลือหาญ

Dusit Uthitsunthorn* and Komsan Bunluehan

สาขาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์

Department of Electrical Engineering Technology, Faculty of Industrial,

Buriram Rajabhat University

E-mail: dusit.ut.@bru.ac.th

Received : August 14, 2024

Revised : November 12, 2024

Accepted : November 29, 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบสร้างรถสามล้อไฟฟ้าด้วยมอเตอร์ไร้แปรงถ่านและศึกษาการทำงานของระบบขับเคลื่อนรถสามล้อไฟฟ้า การออกแบบใช้มอเตอร์ไร้แปรงถ่านขนาด 24 โวลต์ 350 วัตต์ ควบคุมความเร็วรอบด้วยไอซี MC33035 ด้านบนมีแผงโซล่าเซลล์แบบโมโนคริสตัลไลน์ (Mono crystalline) ขนาด 250 วัตต์ แรงดัน 31.2 โวลต์ กระแส 8.02 แอมป์ จำนวน 2 แผงต่อขนานผ่านวงจรอัดประจุเพื่อเก็บสะสมพลังงานเข้าแบตเตอรี่ จากผลการทดลองพบว่าที่ระยะทาง 100 เมตร รับน้ำหนักสูงสุดที่ 100 กิโลกรัม มีความเร็ว 7.16 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ใช้เวลา 91.60 วินาที สามารถออกตัวเคลื่อนที่บนทางชันสูงสุดที่ระดับ 30 องศา ในสภาวะที่มีน้ำหนักบรรทุกสูงสุดไม่เกิน 100 กิโลกรัม ใช้เวลานานสูงสุดที่เวลา 3.48 วินาที จากนั้นทดสอบวงจรอัดประจุกระแสไฟฟ้าเข้าแบตเตอรี่ผ่านแผงเซลล์แสงอาทิตย์เต็ม ที่แรงดัน 24.90 โวลต์ ใช้เวลา 6 ชั่วโมงเมื่อแบตเตอรี่อัดประจุเต็มแล้วทดสอบการขับเคลื่อนต่อเนื่องรวมระยะทางทั้งสิ้น 4,000 เมตร แรงดันลดลงเหลือ 21.60 โวลต์ ใช้เวลา 29.20 นาที จึงหยุดการเคลื่อนที่

คำสำคัญ: มอเตอร์ไร้แปรงถ่าน วงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ไร้แปรงถ่าน รถสามล้อไฟฟ้า

ABSTRACT

The objective of this research is to design and construct an electric tricycle powered by a 24-volt, 350-watt brushless motor, controlled by an MC33035 integrated circuit. The tricycle's energy is supplemented by two 250-watt, 31.2-volt, 8.02-amp mono-crystalline solar panels, which are connected in parallel to charge the battery through a dedicated charging circuit. Testing shows that the tricycle can transport up to 100 kilograms over a 100-meter distance, achieving a speed of 7.16 kilometers per hour in 91.6 minutes. It can initiate movement on slopes of up to 30 degrees while carrying the maximum load, taking 3.48 seconds to start. The battery reaches a full charge of 24.9 volts after 6 hours of solar charging. In continuous operation, the fully charged battery sustains a 4,000-meter journey, dropping to 21.6 volts in 29.2 minutes before stopping.

KeyWords: DC Brushless Motor, Brushless Motor Speed Control, Electric Tricycle

บทนำ

ในปัจจุบันทั่วโลกต้องพบปัญหาความเสี่ยงด้านการขาดแคลนพลังงานและราคาเชื้อเพลิงที่สูงขึ้น ทำให้ประเทศต้องวางแผนการต่าง ๆ ด้านพลังงานเพื่อป้องกันการขาดแคลนพลังงานในอนาคต และต้องดำเนินการมาตรการประหยัดพลังงานควบคู่กันกับการใช้พลังงานทดแทน เนื่องจากวิกฤตการณ์ราคาน้ำมันแปรปรวนอย่างรวดเร็วและมีราคาแพง นอกจากนั้นการใช้เครื่องยนต์จากน้ำมันทำให้เกิดมลภาวะปล่อยไอเสียคาร์บอนไดออกไซด์ เกิดสภาวะโลกร้อนจากการเผาไหม้พลังงานเชื้อเพลิงสร้างมลภาวะทางอากาศ เพราะควันที่ออกมาจากท่อไอเสียปล่อยเข้าสู่ชั้นบรรยากาศ สร้างมลพิษเกิดสภาวะเรือนกระจกและการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศโลก ซึ่งส่งผลเสียโดยตรงต่อธรรมชาติและสุขภาพจากอุณหภูมิโลกที่สูงมากยิ่งขึ้นและน้ำมันกำลังจะหมดไปในอนาคต

จากปัญหาราคาน้ำมันเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ส่งผลกระทบโดยตรงต่อผู้บริโภคที่เติมน้ำมันสำหรับรถยนต์ส่วนบุคคลและภาระต้นทุนค่าใช้จ่ายจากการขนส่งสินค้าต่าง ๆ รถที่ใช้เชื้อเพลิงจากน้ำมันจะมีเสียงเครื่องยนต์ดังสร้างมลพิษทางเสียง ซึ่งในปัจจุบันนี้มีแนวความคิดการใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเป็นต้นกำเนิดพลังงานกลในการขับเคลื่อนทดแทนเครื่องยนต์ โดยใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ทดแทนลดการใช้น้ำมันเชื้อเพลิง ดังนั้นแบตเตอรี่จึงเป็นแหล่งกำเนิดพลังงานที่สำคัญของการขับเคลื่อนรถไฟฟ้า แต่ปัญหาสำหรับรถไฟฟ้าที่พบจากการเดินทางเมื่อแบตเตอรี่ใกล้หมดพลังงาน จะต้องมีการชาร์จ

แบตเตอรี่เข้าไปสะสมพลังงานใหม่ ซึ่งสถานีการชาร์จรถไฟฟ้าในปัจจุบันนั้นมีน้อย และข้อจำกัดการชาร์จรถไฟฟ้าที่บ้านเกี่ยวกับค่าใช้จ่ายไฟฟ้าที่สูงขึ้น อีกทั้งเมื่อเกิดปัญหาไฟฟ้าติดขัดอันเนื่องมาจากไฟดับ หรือไฟตก จะส่งผลกระทบต่อการชาร์จทำให้ขาดแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่มั่นคงไม่สามารถส่งกระแสไฟฟ้าเพื่อชาร์จแบตเตอรี่ของรถไฟฟ้าได้ต่อเนื่อง

การวิจัยครั้งนี้จึงทำการออกแบบประยุกต์สร้างรถสามล้อไฟฟ้า โดยใช้พลังงานจากเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Cell) มาเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าให้อยู่ในรูปของกระแสไฟฟ้าแล้วเก็บสะสมในแบตเตอรี่ (สุโรจน์ แสงสนิท, 2567) เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ถูกคิดค้นขึ้นมาเพื่อแก้ปัญหาเกี่ยวกับการชาร์จแบตเตอรี่ อีกทั้งรถไฟฟ้าใช้มอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านในการขับเคลื่อนสามารถทำการควบคุมได้ง่าย มีความคล่องตัว ไม่มีมลพิษทางอากาศและเสียงรบกวน การบำรุงรักษาง่ายกว่าเมื่อเทียบกับการใช้เครื่องยนต์และทำการออกแบบวงจรประยุกต์ใช้เซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Cell) ในการชาร์จแบตเตอรี่ รถสามล้อไฟฟ้าที่ออกแบบสามารถใช้กับไฟฟ้าในบ้านเรือนทั่วไปในการอัดประจุไฟฟ้าและจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (ฝ่ายวิจัยนโยบาย สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, 2560) ซึ่งใช้โครงสร้างและวัสดุอุปกรณ์ที่หาซื้อได้ภายในประเทศ

วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อออกแบบสร้างรถสามล้อไฟฟ้าด้วยมอเตอร์ไร้แปรงถ่านโดยการประยุกต์ใช้การการอัดประจุแบตเตอรี่จากโซลาเซลล์
2. เพื่อศึกษาการทำงานของรถสามล้อไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน

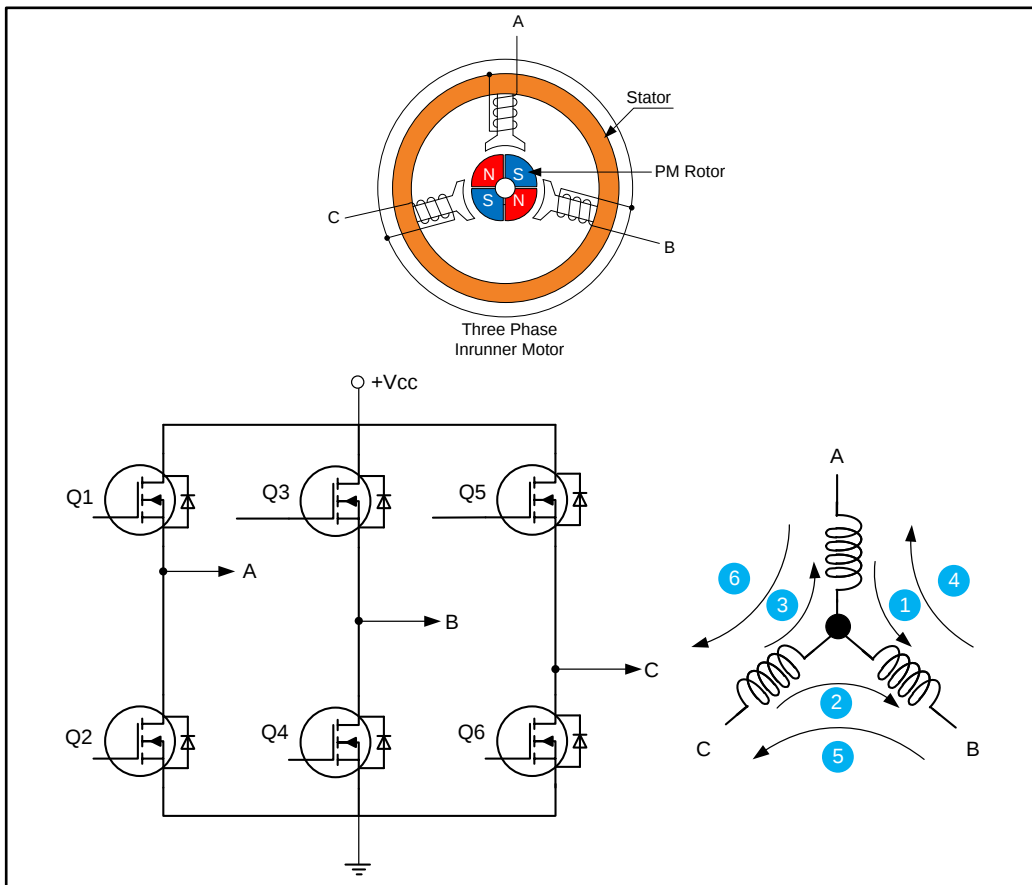
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้ทำการศึกษาค้นคว้าทฤษฎีและเอกสารที่เกี่ยวข้อง โดยจัดแบ่งเนื้อหาในด้านต่าง ๆ มีรายละเอียดดังนี้

1. มอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน

มอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน (Brushless DC: BLDC) นำมาใช้งานอย่างแพร่หลายในยานยนต์ไฟฟ้าเพื่อการขับเคลื่อนต้นกำลังแทนเครื่องยนต์ โครงสร้างของมอเตอร์ดังกล่าวประกอบ 1 มอเตอร์ชนิดนี้มีหลักทำงาน โดยอาศัยตัวควบคุมอิเล็กทรอนิกส์ทำหน้าที่ควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดสเตเตอร์ ที่ทำหน้าที่เป็นชุดสร้างสนามแม่เหล็กลักษณะแบบเดียวกับการทำงานของซิงโครนัสมอเตอร์แบบใช้แม่เหล็กถาวร (Permanence Magnet Synchronous Motor: PMSM) โดยการเรียงกระแสเข้าไปยังขดลวดที่อยู่บนโรเตอร์เพื่อสร้างแม่เหล็กไฟฟ้า (Rambabu , 2007) ซึ่งการทำงานดังกล่าว จะให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนที่ความเร็วรอบเท่ากับสนามแม่เหล็กหมุน ที่ถูกสร้าง

มาจากป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าในส่วนของโรเตอร์ จากนั้นก็ทำให้เกิดการดูดและผลักกับขั้วแม่เหล็กที่อยู่ที่สเตเตอร์และทำให้เกิดการหมุนเคลื่อนที่รอบแกนหมุน การควบคุมสามารถทำได้โดยการปรับค่ากระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวด และทำการปรับความถี่ของแหล่งจ่ายอาร์เมเจอร์ที่สเตเตอร์ โดยแปรผันตามความเร็วของตัวโรเตอร์ เป็นผลทำให้เกิดสนามแม่เหล็กที่เกิดจากอาร์เมเจอร์ มอเตอร์แบบ BLDC จึงเป็นรูปแบบหนึ่งของมอเตอร์แบบซิงโครนัส (Synchronous Motor) (Pillay and Krishnan, 1989) ดังนั้นหากให้เกิดการหมุนต่อเนื่อง จะต้องควบคุมสวิทช์สถานะการทำงานโดยใช้มอสเฟต (MOSFET) ต่อกันเป็นแบบบริดจ์จำนวน 6 ตัว เพื่อให้สามารถสับเปลี่ยนขั้วแหล่งจ่าย ทำการสับขั้วให้กระแสไหลในจังหวะที่เหมาะสมตามลำดับไป ดังภาพประกอบ 1 และเมื่อกระทำต่อเนื่องไปจนครบ 6 ขั้น จะเกิดการหมุน 1 รอบ ดังนั้นระหว่างขั้นต่าง ๆ นี้ ขั้ว A B และ C จะถูกสับเปลี่ยนขั้วไปมาระหว่างบวกและลบ (วันนาเดีย นาวะ, 2563)



ภาพประกอบ 1 โครงสร้างของมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน

หมายเหตุ จาก P. Pillay & R. Krishnan. (1989) . Modeling, Simulation and Analysis of a Permanent Magnet Brushless DC motor drive part II: The brushless DC motor drive. IEEE Transactions on Industry application, Vol.25

การควบคุมมอเตอร์ชนิดนี้จะใช้ตัวจับตำแหน่งของโรเตอร์ทำหน้าที่แปลงข้อมูล (Encoder) จากโรเตอร์จะต้องใช้ตัวจับตำแหน่งและความเร็วของโรเตอร์ (Rotor Position Sensor) เพื่อให้การปรับความถี่ที่ป้อนให้กับสเตเตอร์ลักษณะเหมือนวงจรอินเวอร์เตอร์แบบ 3 เฟส โดยการควบคุมแต่ละเฟสต่างกัน 120 องศา (David, 2021) ต้องจ่ายไฟที่สอดคล้องกันให้กับมอเตอร์ทำงานสลับกันแบบ 2 เฟส ดังภาพประกอบ 1 มอเตอร์มีขั้วลวด 3 เฟสคือ A B และ C การควบคุมมอเตอร์จะจ่ายไฟให้เฟส A และเฟส B ส่วนเฟส C จะไม่มีการจ่ายไฟ ต่อมาจะสลับการจ่ายไฟให้กับเฟส B และเฟส C ส่วนเฟส A จะไม่มีการจ่ายไฟ จากนั้นจะจ่ายไฟให้กับเฟส C และเฟส A ส่วนเฟส B จะไม่มีการจ่ายไฟ โดยจะสลับกันจนทำให้เกิดการหมุนของมอเตอร์ดังแสดงใน (Robinson, 2006 และ Mubeen, 2008)

2. การคำนวณหาขนาดของมอเตอร์

มอเตอร์กระแสตรงนำมาใช้งานหลากหลาย และมีกำลังสูงกว่าเมื่อเทียบกับมอเตอร์แบบแปร่งถ่าน มอเตอร์ชนิดนี้ไม่มีแรงเสียดทานจึงทำให้มีแรงหมุนมากแต่ความร้อนน้อยเนื่องจากไม่มีแปร่งถ่านเมื่อส่งกระแสไฟจึงไม่เกิดประกายไฟ อีกทั้งการใช้แม่เหล็กถาวรทำให้เกิดแรงบิดสูงในการจ่ายกระแสยังคงที่สม่ำเสมอ (Krause,1986) ซึ่งการหาขนาดกำลังไฟฟ้าของมอเตอร์สามารถหาได้ดังสมการที่ (1)

$$P = T \times \frac{2\pi N}{60} \quad (1)$$

โดยที่ P = กำลังไฟฟ้ามีหน่วยเป็นวัตต์
T = แรงบิดมีหน่วยเป็นนิวตันเมตร
N = ความเร็วรอบมีหน่วยเป็นรอบต่อนาที

จากความสัมพันธ์ของสมการที่ (1) ในการหาค่าขนาดของแรงบิดนั้นหาได้จากสมการที่ (2)

$$T = F \times r \quad (2)$$

เมื่อ $F = ma$

ดังนั้น $T = ma \times r \quad (3)$

โดยที่ T = แรงบิดมีหน่วยเป็นนิวตันเมตร
 m = มวลมีหน่วยเป็นกิโลกรัม
 a = อัตราเร่งมีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที
 r = รัศมีล้อรถมีหน่วยเป็นเมตร

งานวิจัยนี้กำหนดน้ำหนักสูงสุดที่ 100 กิโลกรัม กำหนดอัตราเร่งเท่ากับ 0.833 เมตรต่อวินาที รัศมีของล้อเท่ากับ 0.25 เมตร แทนค่าลงในสมการที่ (3) จะได้ค่าแรงบิดเท่ากับ 20.82 นิวตันเมตร กำหนดความเร็วรอบเท่ากับ 150 รอบต่อวินาที แทนค่าแรงบิดและความเร็วรอบลงในสมการที่ (1) จะได้มอเตอร์ขนาด 326.95 วัตต์

การหาขนาดกระแสของมอเตอร์หาได้จากสมการที่ (4)

$$I = \frac{P}{V \times \text{eff}} \quad (4)$$

เมื่อ I = กระแสมีหน่วยเป็นแอมป์
 P = กำลังไฟฟ้ามีหน่วยเป็นวัตต์
 V = แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงมีหน่วยเป็นโวลต์
 eff = ค่าประสิทธิภาพ

เลือกใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 24 โวลต์ กำหนดประสิทธิภาพเท่ากับ 0.85 ค่ากำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ขนาด 326.95 วัตต์ แทนค่าลงในสมการที่ (4) จะได้ขนาดกระแสเท่ากับ 16.02 แอมป์ จากการค้นคว้าข้อมูลที่มีจำหน่ายโดยทั่วไปงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้มอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน (BLDC) ขนาด 350 วัตต์ แรงดัน 24 โวลต์

วิธีดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการออกแบบสร้างและศึกษาการทำงานของรถสามล้อไฟฟ้าที่ใช้การอัดประจุจากพลังงานแสงอาทิตย์เปลี่ยนเป็นกระแสไฟฟ้าแล้วเก็บพลังงานไว้ในแบตเตอรี่ เพื่อใช้ในการขับเคลื่อน มีโครงสร้างหลักแนวคิดสามารถดัดแปลงและนำไปใช้งานหลากหลาย มีรายละเอียดดังนี้

1. การออกแบบรถสามล้อไฟฟ้าด้วยโปรแกรม Sketch Up

การออกแบบสร้างรถสามล้อไฟฟ้าใช้โครงสร้างที่มีความแข็งแรงน้ำหนักเบา เพื่อขับเคลื่อนชุดต้นกำลังด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า โดยทำการออกแบบโครงสร้างด้วยโปรแกรม Sketch Up ดังภาพประกอบ 2

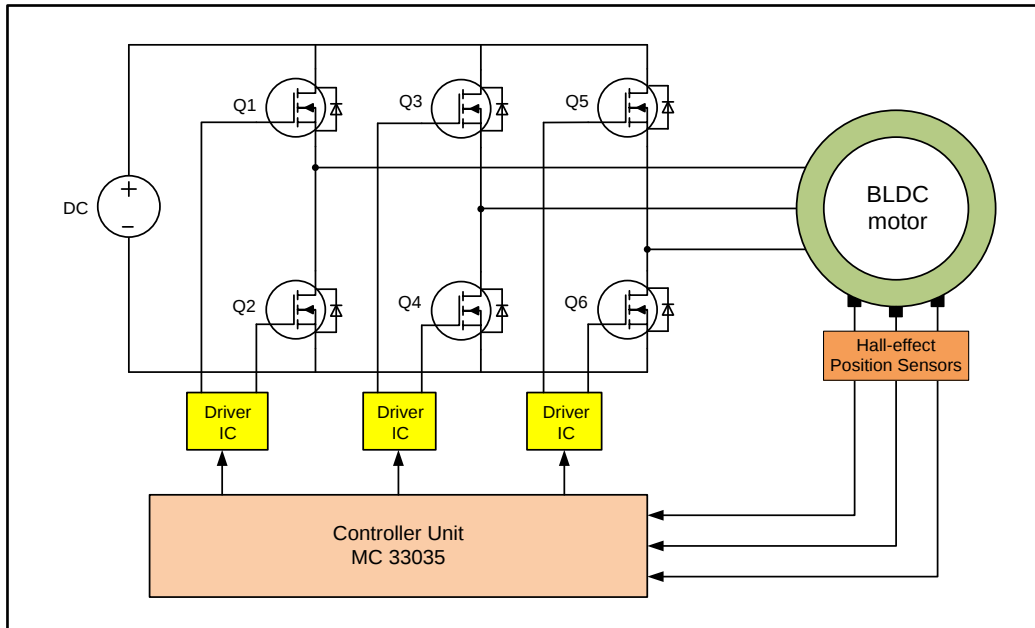


ภาพประกอบ 2 แบบจำลอง 3 มิติรูปทรงของรถสามล้อไฟฟ้าด้วยมอเตอร์ไร้แปรงถ่าน

โครงสร้างรถสามล้อไฟฟ้าทำจากเหล็กที่มีความหนา 2.0 มิลลิเมตร และ 1.5 มิลลิเมตร หมายเลข (1) ติดตั้งมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านขนาด 350 วัตต์ 24 โวลต์ หมายเลข (2) ทำการขับเคลื่อนล้อหลังด้วยแกนเพลาลูกปืนตึกตามีเส้นผ่านศูนย์กลางวงใน 2.5 เซนติเมตร หมายเลข (3) เมื่อเปิดสวิตช์และบิดคันเร่งไฟฟ้าจะส่งสัญญาณไฟฟ้าไปยังชุดควบคุมมอเตอร์ ประกอบด้วยวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ ไฟแสดงสถานะแบตเตอรี่ สวิตช์ตัดวงจร และวงจรการอัดประจุโซล่าเซลล์ หมายเลข (4) ผ่านชุดล้อหน้าและล้อหลังใช้ขนาดขอบ 17x1.40 นิ้ว หมายเลข (5) ทำให้รถเคลื่อนที่ส่งกำลังทางกลผ่านชุดโซสเตอร์ 428 สเตอร์ล้อย 45 ฟัน สเตอร์เพลลา 14 ฟัน หมายเลข (6) มีแผงโซล่าเซลล์อยู่โครงสร้างด้านบนขนาด P_{max} 250 วัตต์, V_{mp} 31.2 โวลต์, I_{mp} 8.02 แอมป์ หมายเลข (7) ใช้พลังงานจากแบตเตอรี่แบบ Deep cycle ขนาด 12 โวลต์ 60 แอมแปร์-ชั่วโมง 2 ลูก ต่อแบบอนุกรมเป็นแรงดัน 24 โวลต์ หมายเลข (8) ใช้คอปป์ป้องกันการสั่นสะเทือนจากการขับเคลื่อน หมายเลข (9) คันเร่งไฟฟ้าติดตั้งอยู่มือจับด้านขวา หมายเลข (10) เมื่อแรงดันต่ำกว่าระดับจะทำการอัดประจุพลังงานแสงอาทิตย์มาเก็บไว้ที่แบตเตอรี่ การหยุดรถ จะทำการลดความเร็วและใช้เบรกมือ (Drum Break) ที่ล้อทั้งสองด้าน (วิรุณ โมณะตระกูล และคณะ, 2557)

2. การออกแบบและสร้างวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ไร้แปรงถ่าน

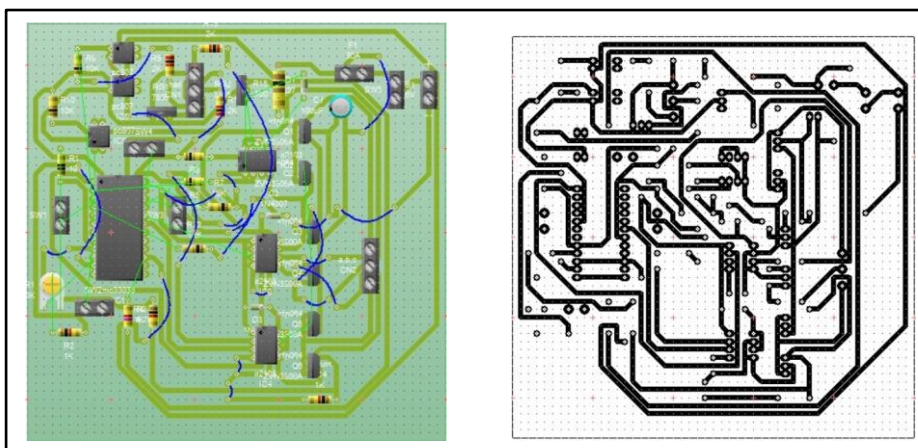
ผู้วิจัยทำการออกแบบวงจรควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน การทำงานขับเคลื่อนประกอบด้วย มอเตอร์ วงจรการควบคุม และคันเร่ง โดยใช้แบตเตอรี่แบบแห้ง (Deep cycle) วงจรการขับเคลื่อนรถสามล้อไฟฟ้าด้วยไอซี MC33035 ให้ทำงานตามเงื่อนไขทำโดย ฮอลล์เซ็นเซอร์ (Hall sensor) ในตัวมอเตอร์หน้าที่กำหนดตำแหน่งในการจ่ายสัญญาณให้ับขาเกตของ มอสเฟตที่ ดังภาพประกอบ 3 การต่อใช้งานตามเอกสารใน (ฐิติกร ปันดอกไม้ และคณะ, 2565)



ภาพประกอบ 3 วงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ไร้แปรงถ่านด้วย IC เบอร์ MC33035

หมายเหตุ จาก ฐิติกร ปั่นดอกไม้ และคณะ (2565) *รถจักรยานไฟฟ้าขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน*. การประชุมวิชาการระดับชาติ สำหรับนักศึกษา มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร ครั้งที่ 2.

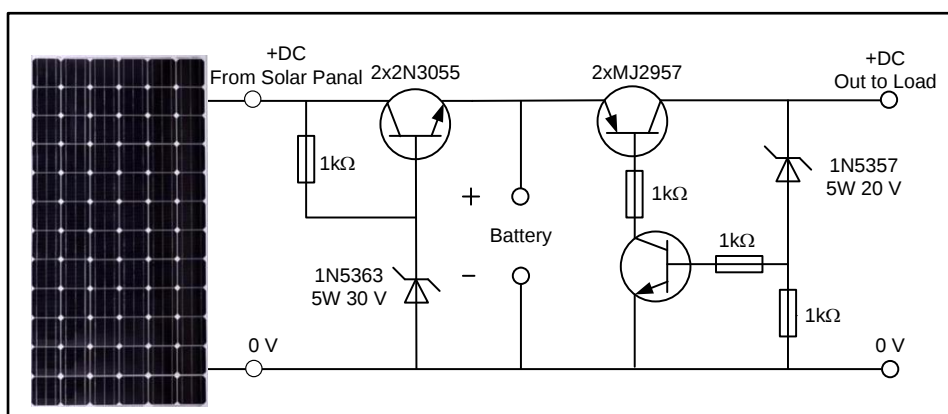
การออกแบบวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ไร้แปรงถ่าน ศึกษาหาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ MC33035 (ON Semiconductor , 2024) ซึ่งเป็นวงจรสร้างสัญญาณพัลส์ PWM ควบคุมความเร็วมอเตอร์เพื่อควบคุมการทำงานของวงจรกำลังที่ใช้มอเตอร์เฟส P064 ขนาดแรงดันได้สูงสุดถึง 60 โวลต์ 70 แอมป์ ดังภาพประกอบ 3 สัญญาณเอาต์พุตของวงจรนำไปใช้ในการปรับระดับควบคุมความเร็วมอเตอร์ไร้แปรงถ่าน จากนั้นทำการออกแบบลายวงจรพิมพ์ (PCB Board) ด้วยโปรแกรม Circuit Wizard ดังภาพประกอบ 4



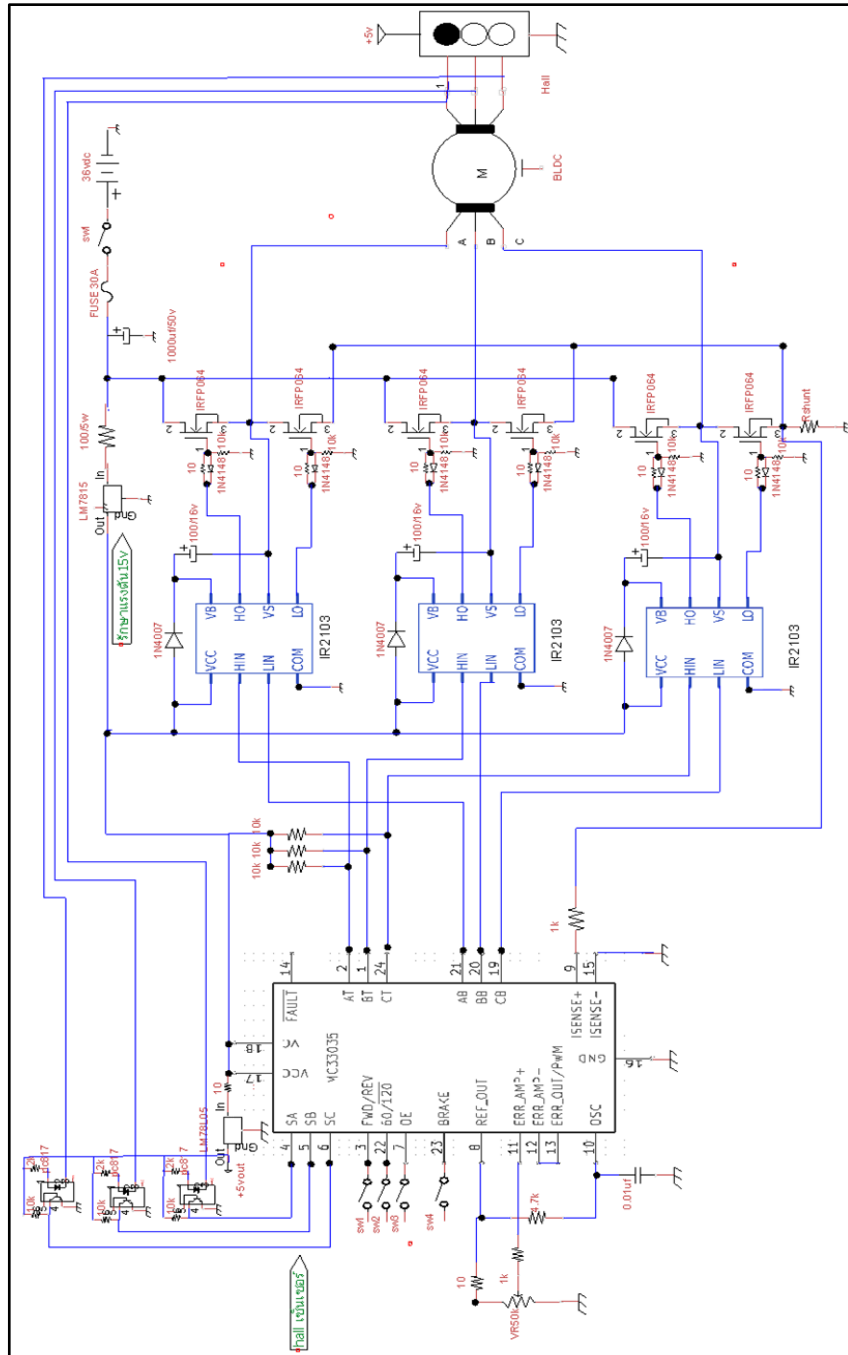
ภาพประกอบ 4 การออกแบบวงจรแผ่นปริ้น (PCB Board) ด้วยโปรแกรม Circuit Wizard

3. วงจรการอัดประจุพลังงานแสงอาทิตย์เข้าแบตเตอรี่

งานวิจัยนี้ออกแบบวงจรการประจุกระแสไฟฟ้าที่มาจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์เข้าแบตเตอรี่ มีหน้าที่อัดประจุกระแสไฟเข้าเมื่อแรงดันแบตเตอรี่อยู่ในระดับต่ำ และทำการตัดการจ่ายกระแสไฟที่ไปอัดประจุยังแบตเตอรี่เมื่อแรงดันของแบตเตอรี่อยู่ในระดับที่สูง โดยใช้เซ็นเซอร์ไดโอดในการรักษาระดับแรงดัน (Homemade Circuit, 2024) ดังภาพประกอบ 5 เพื่อป้องกันการอัดประจุเกิน (Over Charging) ซึ่งจะทำให้แบตเตอรี่เกิดความเสียหายและเสื่อมสภาพก่อนอายุการใช้งาน



ภาพประกอบ 5 การออกแบบวงจรอัดประจุพลังงานแสงอาทิตย์



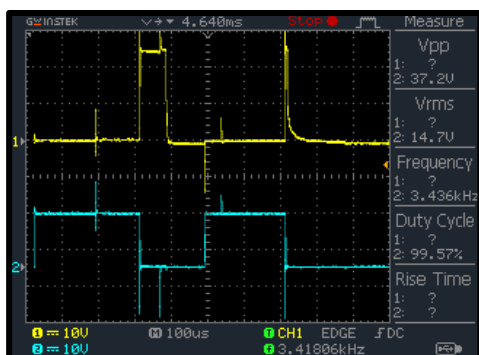
ภาพประกอบ 6 วงจรการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านด้วย IC เบอร์ MC33035

ผลการดำเนินการวิจัย

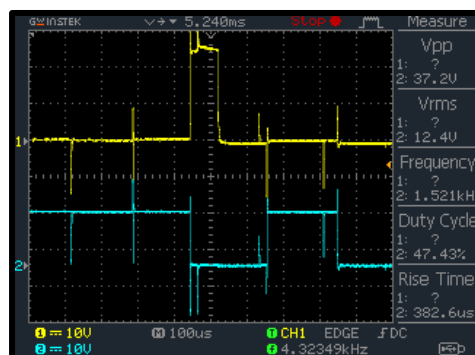
ส่วนนี้ทำการทดสอบการทำงานในการขับเคลื่อนประกอบด้วยการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักบรรทุกเพื่อหาค่าความเร็ว กระแส เวลา โดยใช้สถานที่ทดสอบภายในบริเวณสนามฟุตบอลมหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์ระยะทาง 100 เมตร การอัดประจุแบตเตอรี่จากโซลาเซลล์ ตลอดจนระยะทางในการใช้งานต่อการอัดประจุ 1 ครั้ง เพื่อหาขอบเขตการทำงานของรถไฟฟ้า มีรายละเอียดดังนี้

1. ผลการทดสอบวัดรูปสัญญาณชุดขับเคลื่อนไดร์ฟ IRF 064N ที่ขา G

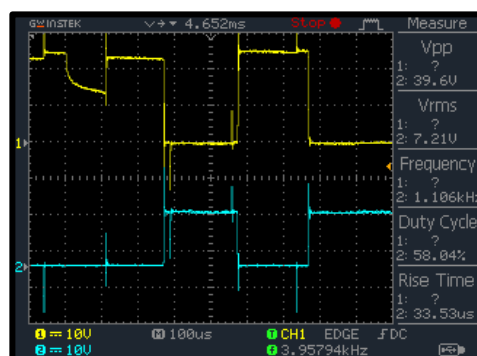
การทดสอบโดยจ่ายไฟเลี้ยงของวงจร 24 โวลต์ ตามที่ได้มีการออกแบบไว้ทำการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเข้าวงจรป้อนสัญญาณพัลส์เข้ากับขาเกตของมอสเฟตวงจร IRF 064N ทั้งหมด 6 ตัว ดังภาพประกอบ 5 ซึ่งสามารถแสดงสัญญาณเอาต์พุตของวงจรสร้างพัลส์ PWM วัดรูปสัญญาณชุดขับเคลื่อนไดร์ฟ IRF 064N ที่ขา G ตัวที่ 1 วัดคร่อมตัวที่ 2 ของเฟส A ขา G ตัวที่ 3 วัดคร่อมตัวที่ 4 ของเฟส B และ ขา G ตัวที่ 5 วัดคร่อมตัวที่ 6 ของเฟส C ทำการวัดโดยใช้ฮอสซิลโลสโคป CH1 และ CH2 ที่ความเร็วรอบ 400 รอบต่อนาที ดังภาพประกอบ 6



ภาพประกอบ 7 มอสเฟตตัวที่ 1 และ 2 เฟส A



ภาพประกอบ 8 มอสเฟตตัวที่ 3 และ 4 เฟส B



ภาพประกอบ 9 มอสเฟตตัวที่ 5 และ 6 เฟส C

การวัดสัญญาณของแรงดันที่ได้จากขา G ของมอสเฟตตามภาพประกอบ 7 ถึงภาพประกอบ 9 ซึ่งจะดูลักษณะการทำงานในช่วงของการเปิด - ปิด การทำงานของมอสเฟตทั้ง 6 ตัว โดยมอสเฟตตัวที่ 1 จะทำงานก่อนแล้วตามด้วยมอสเฟตตัวที่ 2 , 3 , 4 , 5 และตัวที่ 6 ตามลำดับ

2. การทดสอบภาระของโหลดที่ความเร็วสูงสุด

ในส่วนนี้ทำการทดสอบการขับเคลื่อนรถสามล้อไฟฟ้าที่ระยะทาง 100 เมตร โดยใช้ น้ำหนักเป็นภาระโหลดซึ่งประกอบด้วย น้ำหนักคนขับ น้ำหนักของรถและน้ำหนักบรรทุกทุก ดังภาพประกอบ 10 รวมกันทั้งหมดเพื่อให้ได้พิกัดน้ำหนักดังตารางที่ 1 จากการทดสอบที่ความเร็วสูงสุด ภายในสนามกีฬามหาวิทยาลัยดังภาพประกอบ 13 จะพบว่าเมื่อมีภาระน้ำหนักมากขึ้นกระแส โหลดมีขนาดเพิ่มขึ้นในขณะที่ความเร็วลดลง โดยเมื่อโหลดมีภาระการรับน้ำหนักที่พิกัดสูงสุดขนาด 100 กิโลกรัม กระแสขณะออกตัวสูงเท่ากับ 40.12 แอมป์ จากนั้นจะลดลงสู่กระแสปกติ มีค่าเท่ากับ 17 แอมป์ ความเร็วลดลงเหลือ 7.16 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ใช้เวลา 91.60 วินาที และช่วงน้ำหนัก 60 กิโลกรัม กระแสขณะออกตัวสูงเท่ากับ 37.24 แอมป์ จากนั้นจะลดลงสู่กระแสปกติ มีค่าเท่ากับ 12 แอมป์ แต่มีความเร็วสูงสุดเท่ากับ 8.15 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ใช้เวลา 44.16 วินาที



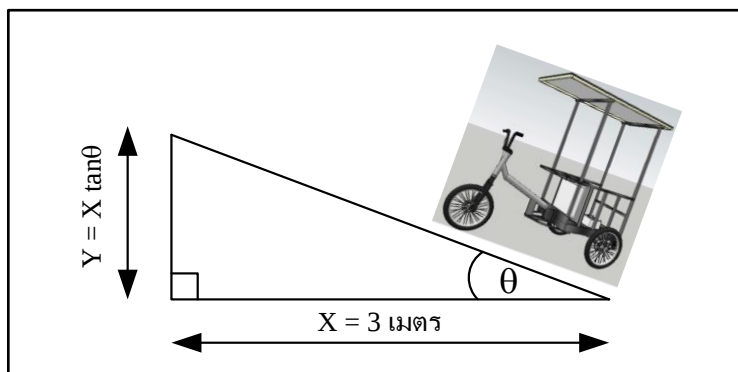
ภาพประกอบ 10 ผู้ทดสอบและน้ำหนักของผู้ทำการทดสอบการขับเคลื่อนรถสามล้อไฟฟ้า

ตารางที่ 1 การทดสอบทางไฟฟ้าในการรับน้ำหนักของการขับเคลื่อนมอเตอร์ไร้แปรงถ่าน

น้ำหนัก (กิโลกรัม)	แรงดัน (โวลต์)	กระแส (แอมป์)		ความเร็ว (กิโลเมตร/ชั่วโมง)	เวลา (วินาที)
		ขณะออกตัว	ปกติมอเตอร์		
60	24	37.24	12	8.15	44.16
70	24	38.13	13	7.92	45.42
80	24	38.52	14	7.77	46.31
90	24	39.01	15	7.65	47.05
100	24	40.12	17	7.16	91.60

3. ผลทดสอบสมรรถนะการขึ้นทางชัน

การทดสอบนี้ทำการจำลองการขับขี่เมื่อต้องไต่ขึ้นทางลาดชันที่ต้องรับภาระน้ำหนักในสถานการณ์จริงโดยการกำหนดความชันขอบเขตการทดสอบประกอบด้วยความชัน 10 องศา 20 องศา และ 30 องศา ตามการออกแบบดังภาพประกอบ 11 โดยมีผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 2



ภาพประกอบ 11 ทดสอบประสิทธิภาพในการขับเคลื่อนของรถสามล้อไฟฟ้า

ตารางที่ 2 การทดสอบสมรรถนะการขับขี่ขึ้นทางชัน

สภาวะการขับขี่น้ำหนักบรรทุก (กิโลกรัม)	เวลาของการทดสอบขับขี่ขึ้นทางชัน (วินาที)		
	มุม 10 องศา	มุม 20 องศา	มุม 30 องศา
60	1.85	1.95	2.25
70	1.92	2.34	2.56
80	2.06	2.63	3.84
90	2.68	2.98	3.21
100	2.82	3.12	3.48

จากการทดสอบขึ้นทางชันที่น้ำหนักต่ำสุด 60 กิโลกรัม จนถึงน้ำหนักสูงสุดที่ 100 กิโลกรัม พบว่าที่ระดับความชัน 10 องศา สภาวะรถที่มีน้ำหนักบรรทุกต่ำสุดนั้นจะสามารถเคลื่อนที่ออกตัวใช้เวลา 1.85 วินาที สภาวะน้ำหนักสูงสุด ใช้เวลา 2.82 วินาที ที่ระดับความชัน 20 องศา น้ำหนักบรรทุกต่ำสุดนั้นจะสามารถเคลื่อนที่ออกตัวใช้เวลา 1.95 วินาที สภาวะน้ำหนักสูงสุด ใช้เวลา 3.12 วินาที ที่ระดับความชัน 30 องศา น้ำหนักบรรทุกต่ำสุดนั้นจะสามารถเคลื่อนที่ออกตัวใช้เวลา 2.25 วินาที สภาวะน้ำหนักสูงสุด ใช้เวลา 3.48 วินาที

4. การทดสอบการการอัดประจุพลังงานของโซลาร์เซลล์

ในส่วนนี้ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบการเก็บสะสมพลังงานจากแสงอาทิตย์เข้าแบตเตอรี่ที่ได้จากการผลิตไฟฟ้าของแผงโซลาร์เซลล์ โมโนคริสตัลไลน์ (Monocrystalline) ขนาดแผงโซลาร์เซลล์ กำลังไฟฟ้า (Pmax) 250 วัตต์ แรงดันสูงสุด (Vmax) 31.2 โวลต์ กระแสสูงสุด (Imax) 8.02 แอมป์ จำนวน 2 แผงต่อขนานกันและทดสอบการอัดประจุไฟฟ้าด้วยแผงโซลาร์เซลล์แรงดันเริ่มต้นที่ 21.02 โวลต์ ดังตารางที่ 3 เมื่อวันที่ 20 กันยายน พ.ศ.2566



ภาพประกอบ 12 ทดสอบวัดค่าของแผงโซลาร์เซลล์โดยใช้แสงจากดวงอาทิตย์

จากตารางที่ 3 ผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าค่าความส่องสว่าง ค่าแรงดัน ค่ากระแส และค่ากำลังไฟฟ้าจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้น ค่าการส่องสว่างของแสงมีค่ามากที่สุดที่เวลา 13.00 น. มีค่า 171,600 ลักซ์ แรงดันมีค่า 25.85 โวลต์, 1.88 แอมป์ และ 48.59 วัตต์ มากที่สุดและหลังจาก 14.00 น. ค่าการส่องสว่างของแสง ค่าแรงดัน ค่ากระแส และค่ากำลังไฟฟ้าจะค่อย ๆ ลดลงตามลำดับ จากนั้นนำกระแสที่ได้มาเข้าวงจรการอัดประจุแบตเตอรี่ ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4 จะเห็นว่าเมื่อเริ่มการอัดประจุที่เวลา 8.00 น. วัดค่าแรงดันได้ 21.62 โวลต์ เมื่อเวลานานขึ้นพบว่าแรงดันและกระแสแบตเตอรี่เพิ่มขึ้นจนถึงเวลา 15.00 น. มีแรงดันคงที่ 24.90 โวลต์ เมื่อแรงดันแบตเตอรี่ใกล้จะเต็มกระแสการอัดประจุจะเริ่มน้อยลงจนทำการปลดวงจรการอัดประจุแบตเตอรี่

ตารางที่ 3 วัดค่าปริมาณไฟฟ้าของแผงโซลาร์เซลล์โดยใช้แสงจากดวงอาทิตย์

เวลา	ค่าการส่องสว่าง (ลักซ์)	แรงดัน (โวลต์)	กระแส (แอมป์)	กำลังไฟฟ้า (วัตต์)
8.00 น.	83,000	21.02	1.71	35.94
9.00 น.	88,000	21.61	1.75	37.81
10.00 น.	128,000	22.78	1.78	40.54
11.00 น.	133,000	23.63	1.81	42.77
12.00 น.	148,500	24.66	1.83	45.12
13.00 น.	171,600	25.85	1.88	48.59
14.00 น.	165,900	24.83	1.86	46.18
15.00 น.	152,300	24.16	1.85	44.69
16.00 น.	146,500	24.34	1.83	44.54
17.00 น.	132,100	23.32	1.79	41.74
18.00 น.	121,300	22.22	1.72	38.21

ตารางที่ 4 การทดสอบวงจรการอัดประจุของแบตเตอรี่ผ่านโซลาร์เซลล์

เริ่มการอัดประจุ เวลา	แรงดัน (โวลต์)	กระแส (แอมป์)	แรงดันจากแบตเตอรี่ (โวลต์)
เริ่มต้น	-	-	21.62
8.00 น.	24.22	2.13	21.89
9.00 น.	24.52	2.25	22.02
10.00 น.	25.73	2.38	22.35
11.00 น.	26.68	2.43	23.16
12.00 น.	27.63	2.62	23.37
13.00 น.	28.84	2.78	23.78
14.00 น.	27.86	2.71	23.81
15.00 น.	27.18	2.51	24.90
16.00 น.	27.26	2.03	24.90
17.00 น.	26.34	1.53	24.90
18.00 น.	25.23	1.22	24.90

5. การทดสอบการใช้งานของแบตเตอรี่ที่ความเร็วสูงสุดในการการการอัดประจุพลังงาน

การทดสอบนี้เป็นการใช้งานของแบตเตอรี่ของรถสามล้อไฟฟ้าในการขับเคลื่อนที่ความเร็วสูงสุดน้ำหนัก 100 กิโลกรัม ดังภาพประกอบ 13 เพื่อหาค่าแรงดัน ระยะทาง เวลา และความเร็ว ในการใช้งานต่อการการอัดประจุไฟฟ้า 1 ครั้ง ตามตารางที่ 5



ภาพประกอบ 13 ทดสอบประสิทธิภาพในการขับเคลื่อนของรถสามล้อไฟฟ้า

ตารางที่ 5 ทดสอบระยะทางกรณีที่มีการอัดประจุแบตเตอรี่เต็ม 100 % ที่แรงดัน 24.90 V

ระยะทาง (เมตร)	แรงดันแบตเตอรี่ (โวลต์)	กระแสไหล (แอมป์)	ความเร็ว (กิโลเมตร/ชั่วโมง)	กำลังไฟฟ้า (วัตต์)	เวลา (นาที)
เริ่มต้น	24.90	-	-	-	-
500	24.64	13.5	7.72	332.6	3.40
1000	24.51	13.0	7.68	318.6	7.20
1500	24.38	12.7	7.63	309.6	11.01
2000	24.25	13.2	7.59	320.1	14.40
2500	24.12	13.5	7.55	325.6	18.20
3000	23.99	12.9	7.45	309.5	22.03
3500	22.86	12.5	7.33	298.3	25.40
4000	21.60	12.0	7.25	284.4	29.20
ค่าเฉลี่ย		12.91	7.52	312.3	16.35

จากตารางที่ 5 ผลการทดสอบการใช้งานขับเคลื่อนรถสามล้อไฟฟ้าจากการอัดประจุพลังงาน แบตเตอรี่ 1 ครั้ง จะเห็นได้ว่าที่จุดเริ่มต้นค่าแรงดันมีค่า 24.90 โวลต์ เมื่อรถเคลื่อนที่จนหยุดนิ่ง ที่ระยะทาง 4,000 เมตร ทำให้แรงดันแบตเตอรี่ลดลงเหลือ 21.60 โวลต์ กระแสไหล 12 แอมป์ ความเร็ว 7.25 กิโลเมตรต่อชั่วโมง กำลังไฟฟ้าขนาด 284.4 วัตต์ ใช้เวลาทั้งสิ้น 29.20 นาที โดยมีความเร็วเฉลี่ย 7.52 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

สรุปและการอภิปรายผล

จากผลการศึกษาทดสอบรถสามล้อไฟฟ้าด้วยมอเตอร์ไร้แปรงถ่านในครั้งนี้ ใช้งบประมาณในการออกแบบสร้างเป็นจำนวนเงินทั้งสิ้น 12,500 บาท ผลการทดสอบที่พิกัดแรงดันไฟฟ้า 24 โวลต์ สามารถทำความเร็วสูงสุด 8.15 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ที่น้ำหนักโหลดที่ 60 กิโลกรัม และกระแสไฟฟ้าสูงสุดในขณะออกตัวมีค่าเท่ากับ 37.24 แอมป์ เมื่อขับเคลื่อนได้แล้วกระแสลดลงสู่สภาวะปกติมีค่าเท่ากับ 12 แอมป์ เมื่อเพิ่มชิ้นน้ำหนักโหลดจนถึงสูงสุดที่ 100 กิโลกรัม ความเร็วลดลงเหลือ 7.16 กิโลเมตรต่อชั่วโมง กระแสไฟฟ้าขณะออกตัวเพิ่มขึ้นมีค่าเท่ากับ 40.12 แอมป์ กระแสปกติเพิ่มขึ้นมีค่าเท่ากับ 17 แอมป์ จะพบว่าเมื่อน้ำหนักมากขึ้นกระแสออกตัวมากขึ้นแต่ความเร็วลดลงสอดคล้องกับผลวิจัยของ วิฑิตกร ปันดอกไม้ และคณะ (2565) จากนั้นทำการทดสอบสมรรถนะในการขึ้นทางชันตามที่ออกแบบ พบว่าสามารถออกตัวเคลื่อนที่บนทางชันสูงสุดที่ระดับ 30 องศา ในสภาวะที่มีน้ำหนักบรรทุกสูงสุด ไม่เกิน 100 กิโลกรัม แต่เมื่อระดับความชันมากก็จะใช้เวลานานสูงสุดที่เวลา 3.48 วินาที โดยหากมีการบรรทุกน้ำหนักมากเกินความชันสูงอาจส่งผลต่อการขับเคลื่อนจากออกตัวไม่ได้ จึงแนะนำให้บรรทุกมากเกินค่าที่ออกแบบไว้ จากนั้นทดสอบวงจรอัดประจุแบตเตอรี่ผ่านโซล่าเซลล์เริ่มต้นที่ค่าแรงดัน 21.02 โวลต์ เมื่อเวลาผ่านไปกระแสและแรงดันมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ สูงสุดที่เวลา 13.00 น. มีค่าการส่องสว่าง 171,600 ลักซ์ จ่ายกระแส 1.88 แอมป์ และลดลงมาจนกระทั่งเวลา 15.00 น. แบตเตอรี่จึงเต็มมีแรงดันคงที่ 24.90 โวลต์ ใช้เวลาทั้งสิ้น 6 ชั่วโมง เมื่อแบตเตอรี่เต็มแล้วทำการทดสอบการเคลื่อนที่ต่อเนื่องระยะทางเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ แต่ความเร็วลดลงจนกระทั่งรถสามล้อไฟฟ้าหยุดการเคลื่อนที่ รวมระยะทางทั้งสิ้น 4,000 เมตร แรงดันลดลงเหลือ 21.60 โวลต์ ใช้เวลา 29.20 นาที ทั้งนี้จากการทดลองกระแสขณะออกตัวสูงประมาณ 2-4 เท่าของกระแสปกติ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับน้ำหนักรวมจะมีผลกับกระแสที่ใช้และความเร็ว ซึ่งน้ำหนักรวมมากกระแสขณะสตาร์ทจะสูง ความเร็วสูงสุดจะลดลงสอดคล้องกับ นนทวรรณ กัญไชยตะ และคณะ (2548) เพราะฉะนั้นจึงต้องเลือกมอเตอร์ที่สามารถทนกระแสในช่วงเวลานี้ จากการทดสอบการชาร์จพลังงานจากแสงอาทิตย์จะพบว่าช่วงเวลาที่ดีที่สุดในการชาร์จประมาณ 11.00 - 15.00 น. เพราะว่าช่วงเวลานี้จะมีค่าการส่องสว่างที่เหมาะสมมากกว่าช่วงเวลาอื่น ๆ หากต้องการให้การชาร์จแบตเตอรี่ทำงานได้เร็วขึ้นจะต้องเปลี่ยน

ขนาดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์และปรับขนาดกระแสให้สูงขึ้น จากผลการออกแบบและศึกษาการทำงานดังกล่าวเป็นแนวทางในการพัฒนาในอนาคต

ข้อเสนอแนะ

สำหรับการออกแบบงานวิจัยนี้มีข้อเสนอแนะแนวทางในการพัฒนาปรับปรุงดังนี้

1. ต้นกำลังมอเตอร์ควรใช้มอเตอร์ที่มีกำลังไฟฟ้าและความเร็วรอบสูงกว่านี้ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการขับเคลื่อนรถไฟฟ้าด้วยมอเตอร์ไร้แปรงถ่านให้ความเร็วขับเคลื่อนสูงขึ้น
2. ด้านการขับเคลื่อนวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ควรเลือกมอเตอร์ที่สามารถทนต่อกระแสสูง ๆ ขณะออกตัวและวงจรป้องกันเพราะจะทำให้เกิดความเสียหาย ส่วนวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ควรมีการพัฒนาให้มีระบบการขับเคลื่อนถอยหลังได้
3. การทดสอบพลังงานแสงอาทิตย์ควรทดสอบในช่วงที่แสงเปลี่ยนแปลงตามความชื้นและอุณหภูมิช่วงฤดูกาลต่าง ๆ ใน 1 ปี เพื่อศึกษาแนวโน้มและพัฒนาระบบ
4. วงจรการชาร์จแบตเตอรี่ควรพัฒนางจรให้สามารถชาร์จกระแสสูงที่ใช้ระยะเวลาเร็วขึ้น และเลือกชนิดแบตเตอรี่แบบBMS สามารถป้องกันในการเก็บพลังงานและจ่ายได้แอมแปร์-ชั่วโมง (Ah) มากขึ้น
5. ควรใช้แผงโซลาร์เซลล์ที่มีขนาดกำลังวัตต์และกระแสมากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- จิตติกร ปิ่นดอกไม้, ฤกษ์ ปิ่นงาม, ณัฐพล แดนประสาท, วีระพล พลีสัตย์, อธิธิพล เหลาพรม และรุ่งโรจน์ สงวนวัฒนา. (2565). รถจักรยานไฟฟ้าขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน. *การประชุมวิชาการระดับชาติ สำหรับนักศึกษา มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร ครั้งที่2* (น. 786-794). กำแพงเพชร: มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร
- นันทวรรณ กั้นไยดี, แสงเพชร นาคจีน และ เจษฎากร ไชยมงคล. (2548). *การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน*. (ปริญญาณิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต). พิษณุโลก: มหาวิทยาลัยนเรศวร.
- ฝ่ายวิจัยนโยบาย สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. (2560). *อุตสาหกรรมยานยนต์ไฟฟ้า* (รายงานการศึกษา). ปทุมธานี: ฝ่ายวิจัยนโยบาย สวทช.
- วันนาเดีย นาแว. (2563). *การพัฒนากระบวนการประมาณค่าแรงบิดสำหรับมอเตอร์ไร้แปรงถ่านด้วยเทคนิคไร้เซนเซอร์* (วิทยานิพนธ์ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต). กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

- วิรุณ โมนะตระกูล, วสันต์ เขียรสุวรรณ และ ปรีตถกร เหมะรัตน์. (2557). การออกแบบรถสามล้อไฟฟ้า เอนกประสงค์ต้นแบบ. *การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 28 MENETT* (น. 485-492). ขอนแก่น: มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- สุโรจน์ แสงสนิท. (2567). ยานยนต์ไฟฟ้าแห่งอนาคตเพื่อตอบรับการมุ่งสู่การเป็นศูนย์กลางยานยนต์ไฟฟ้าของประเทศไทย. จาก <https://www.thailand-energy-academy.org>.
- David, T. (2021). *Introduction to Brushless DC Motors AN1164, Diodes Incorporated*. From <https://www.diodes.com>.
- Homemade Circuit. (2024). *9 Simple Solar Battery Charger Circuits*. From <https://www.homemade-circuit.com/hoe-to-make-solar-battery-charger>.
- Mubeen, M. (2008). *Brushless DC Motor Primer*. Motion Tech Trends.
- ON Semiconductor.(2024). *Brushless DC Motor Controller*. ON Semiconductor and are trademarks of Semiconductor Components Industries. From <https://www.onsemi.com>
- Krause, P. (1986). *Analysis of Electric Machinery*. McGraw-Hill.
- Pillay, P. & Krishnan, R. (1989). Modeling, Simulation and Analysis of a Permanent Magnet Brushless DC motor drive part II: The brushless DC motor drive. *IEEE Transactions on Industry application*, Vol.25, 274-279.
- Rambabu, S. (2007). *Modeling and Control of A Brushless DC Motor* (Master's thesis). Rourkela: National Institute of Technology.
- Robinson, S. (2006). *Drive and Control Electronics Enhance the Brushless Motor's Advantages*. Apex.

การพัฒนาไคโตซาน/คอลลาเจนไฮโดรเจลที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ
และมีคุณสมบัติต้านแบคทีเรียโดยใช้อนุภาคนาโนเงินชีวสังเคราะห์
จากสารสกัดน้ำกระชายขาว

Development of thermosensitive chitosan/collagen hydrogel with
antibacterial properties using biosynthesized silver nanoparticles
from aqueous extract of fingerroot

ชานนท์ สมจิตกรกุล¹ เอกรัฐ หิตโกเมท² ชिरาวุฒิ เพชรเย็น^{1,3} และ ปัญจพร วงศ์วิทยากุล^{*2}
Chanon Somjitkul¹, Ekarat Hitakomate², Chiravoot Pechyen^{1,3},
and Panjaporn Wongwittthakakool^{*2}

สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุและสิ่งทอ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์¹

คณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์²

ศูนย์แห่งความเป็นเลิศทางวิชาการด้านเทคโนโลยีสมัยใหม่และการผลิตขั้นสูง
สำหรับนวัตกรรมทางการแพทย์แห่งมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์³

Department of Materials and Textile Technology, Faculty of Science and Technology,
Thammasat University¹

Faculty of Dentistry, Thammasat University²

Center of Excellence in Modern Technology and Advanced Manufacturing for Medical Innovation,
Thammasat University³

E-Mail: panja_w@tu.ac.th

Received : May 23, 2024
Revised : September 26, 2024
Accepted : November 29, 2024

บทคัดย่อ

ไฮโดรเจลที่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ถูกพัฒนาเพื่อใช้ในการวิศวกรรมเนื้อเยื่อกระดูก โดยช่วยกระตุ้นการสร้างกระดูกใหม่และนำส่งสารออกฤทธิ์ งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการเตรียมไคโตซาน/คอลลาเจนไฮโดรเจลที่มีคุณสมบัติต้านแบคทีเรีย โดยการเติมอนุภาคนาโนเงินที่สังเคราะห์จากสารสกัดกระชายขาว (โบเซนเบอร์เกีย โรหุนดา) เป็นตัวรีดิวซ์ อนุภาคนาโนเงินจึงถูกแสดงคุณลักษณะด้วยการทดสอบสมบัติทางทางสเปกโตรโฟโตเมตรี ลักษณะสัณฐานวิทยา และสมบัติทางชีวภาพ พบว่าอนุภาคนาโนเงินมีลักษณะทรงกลมขนาด 20 - 40 นาโนเมตร มีฤทธิ์ยับยั้งแบคทีเรีย สแตฟิโลค็อกคัส ออเรียส และซูโดโมนาส แอรูจิโนซา อนุภาคนาโนเงินที่สังเคราะห์ขึ้นถูกผสมกับไคโตซาน/คอลลาเจนไฮโดรเจล

ให้มีความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ได้ทำการตรวจสอบคุณสมบัติทางรีโอโลยี สันฐานวิทยาเชิงโครงสร้าง และชีวภาพ พบว่าการเติมอนุภาคนาโนเงินช่วยเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิการเกิดเจลและคุณสมบัติทางรีโอโลยี รวมถึงเพิ่มประสิทธิภาพในการต้านแบคทีเรียเมื่อเทียบกับไฮโดรเจลที่ไม่มีอนุภาคนาโนเงิน

คำสำคัญ: ไคโตซาน คอลลาเจนไฮโดรเจล ความไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ อนุภาคนาโนเงิน

ABSTRACT

Thermosensitive hydrogels have been developed for use in bone tissue engineering, promoting new bone formation and delivering active substances. This research focuses on the preparation of chitosan/collagen hydrogels with antibacterial properties by incorporating silver nanoparticles synthesized using an extract of fingerroot (*Boesenbergia rotunda*) as a reducing agent. The silver nanoparticles were characterized by spectrophotometric analysis, morphology, and biological properties, and were found to be spherical in shape with a size range of 20 – 40 nm. They exhibited antibacterial activity against *Staphylococcus aureus* and *Pseudomonas aeruginosa*. The synthesized silver nanoparticles were then mixed with the chitosan/collagen hydrogel at a concentration of 1% (w/v), and their rheological, structural, and biological properties were evaluated. It was found that the addition of silver nanoparticles altered the gelation temperature, rheological properties, and significantly enhanced the antibacterial efficiency compared to hydrogels without silver nanoparticles.

Keywords : Chitosan, Collagen Hydrogel, Thermosensitive, Silver nanoparticles

บทนำ

การปลูกถ่ายกระดูก (bone grafting) เป็นวิธีการที่แพทย์ใช้กันอย่างแพร่หลายในศัลยกรรม รากเทียมและศัลยกรรมปริทันต์ โดยการปลูกถ่ายกระดูกสามารถทำได้ทั้งจากการใช้เนื้อเยื่อกระดูกของ ตัวผู้ป่วยเอง (autogenous bone) หรือจากบุคคลอื่น (allogenic bone) ข้อเสียของการใช้เนื้อเยื่อ จากผู้ป่วยเองคือการเกิดการบาดเจ็บซ้ำซ้อนจากการผ่าตัดเพื่อเก็บเนื้อเยื่อ ส่วนการใช้กระดูกจากบุคคล อื่นมีปัญหาเรื่องความเข้ากันได้และขนาดที่เหมาะสมของกระดูก จึงมีการใช้วัสดุปลูกถ่ายกระดูก ทดแทน เช่น กระดูกวัว (xenogenic bone) และวัสดุสังเคราะห์ เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว

ไฮโดรเจลที่ไวต่ออุณหภูมิ (thermosensitive hydrogel) ได้รับความนิยมในการใช้เป็นวัสดุปลูกถ่ายทดแทน เนื่องจากคุณสมบัติที่สามารถเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็งที่อุณหภูมิของร่างกาย โครงสร้างของไฮโดรเจลคล้ายกับเมทริกซ์นอกเซลล์ (extracellular matrix) ทำให้สนับสนุนการเกาะติดของเซลล์ (cell attachment) การแบ่งตัวของเซลล์ (cell proliferation) การเคลื่อนที่ของเซลล์ (cell migration) และการเปลี่ยนแปลงของเซลล์เพื่อไปทำหน้าที่ต่าง ๆ (cell differentiation) (Liu *et al.*, 2023) ไคโตซาน (chitosan) เป็นอะมิโนพอลิแซ็กคาไรด์ที่ได้จากไคติน (chitin) มีความสามารถในการเข้ากับร่างกายได้ดี (biocompatibility) และสามารถย่อยสลายทางชีวภาพ (biodegradability) ได้ จึงถูกนำมาใช้ในการผลิตไฮโดรเจล โดยมีเบต้ากลีเซอโรฟอสเฟต (b-glycerophosphate) เป็นสารเชื่อมขวาง (crosslinking agent) เพื่อเพิ่มความแข็งแรงของไฮโดรเจล การเติมคอลลาเจน (collagen) ลงไปในสารละลายไคโตซานจะช่วยปรับปรุงสมบัติทางชีวภาพของไฮโดรเจลให้ดียิ่งขึ้น โดยเฉพาะในด้านการเกาะติดและการแบ่งตัวของเซลล์ (Xiong and Xiong, 2022)

จากการศึกษาพบว่าไคโตซาน/คอลลาเจนไฮโดรเจลที่มีเบต้ากลีเซอโรฟอสเฟตเป็น สารเชื่อมขวาง มีสมบัติพิเศษที่ช่วยปรับปรุงความแข็งแรง ความสามารถในการรับแรงอัด (compressibility) และการติดกัน (cohesiveness) ของไฮโดรเจล นอกจากนี้ยังพบว่าไฮโดรเจลนี้มีความเสถียรต่อค่าพีเอช (pH stability) และเข้ากับร่างกายได้ดี เหมาะสมที่จะใช้เป็นโครงเลี้ยงเซลล์ (scaffold) สำหรับการสร้างเนื้อเยื่อใหม่ (tissue regeneration) ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญในการรักษาการติดเชื่อและอักเสบหลังการผ่าตัด (Dang *et al.*, 2017)

การติดเชื่อแบคทีเรียในกระบวนการปลูกถ่ายกระดูกและศัลยกรรมปริทันต์เป็นปัญหาที่พบได้บ่อย อนุภาคนาโนเงินเป็นหนึ่งในสารต้านแบคทีเรียที่มีประสิทธิภาพสูง ไม่เพียงแต่สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย แต่ยังมีฤทธิ์ต้านไวรัสและเชื้อราอีกด้วย การเติมอนุภาคนาโนเงินในไฮโดรเจล จึงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการป้องกันการติดเชื่อ โดยเฉพาะแบคทีเรียที่พบในแผลผ่าตัด เช่น *Staphylococcus aureus* และ *Pseudomonas aeruginosa* (Yathavan *et al.*, 2023) โดยอนุภาคนาโนเงินมีกลไกในการเข้าไปทำลายโครงสร้างของเยื่อหุ้มเซลล์ ในเซลล์แบคทีเรีย จากนั้นรวมตัวกับดีเอ็นเอและจับตัวเป็นก้อนกับไซโตพลาสซึมของแบคทีเรียที่ถูกทำลาย ทำให้เกิดการรั่วซึมของ 15

ผู้วิจัยจึงมีความต้องการที่จะศึกษาการสังเคราะห์ไคโตซาน/คอลลาเจนไฮโดรเจลที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และเพื่อศึกษาผลของอนุภาคนาโนเงินที่สังเคราะห์จากสารสกัดน้ำของกระชายขาวต่อสมบัติต่าง ๆ ของไฮโดรเจล เพื่อพัฒนาให้ไฮโดรเจลสามารถป้องกันการเกิดและการเจริญเติบโตของแบคทีเรียได้ โดยใช้เป็นโครงเลี้ยงเซลล์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อสังเคราะห์โคโตซาน/คอลลาเจนไฮโดรเจลที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และมีคุณสมบัติด้านแบคทีเรีย

- 1.1 สังเคราะห์อนุภาคนาโนเงินจากกระชายขาวเพื่อใช้เป็นสารต้านแบคทีเรีย
- 1.2 ตรวจสอบผลการยับยั้งการเจริญของเชื้อแบคทีเรีย ของอนุภาคนาโนเงินจากกระชายขาว
- 1.3 สังเคราะห์โคโตซาน/คอลลาเจนไฮโดรเจล ที่มีอนุภาคนาโนเงินจากกระชายขาว พร้อมทั้งตรวจสอบฤทธิ์การต้านเชื้อแบคทีเรีย

2. เพื่อศึกษาผลของอนุภาคนาโนเงินที่สังเคราะห์ด้วยสารสกัดน้ำของกระชายขาว ต่อคุณสมบัติทางกายภาพและพฤติกรรมหย่นหด ของโคโตซาน/คอลลาเจนไฮโดรเจล

- 2.1 วิเคราะห์พฤติกรรมทางรีโอโลยีของไฮโดรเจล
- 2.2 วัดความพรุนของไฮโดรเจล และโครงสร้างสัณฐานของไฮโดรเจล
- 2.3 ตรวจสอบสมบัติทางเคมี และทางชีวภาพของไฮโดรเจล

วิธีดำเนินการวิจัย

การเตรียมสารสกัดน้ำของกระชายขาว

นำส่วนรากของกระชายขาวสด 20 กรัม มาล้างด้วยน้ำกลั่นให้สะอาด ผึ่งให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำมาหั่นเป็นชิ้นเล็ก ๆ ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร ต้มกระชาย 20 กรัมในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส บนเครื่องกวนสารแบบให้ความร้อน เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นกรองกระชายออกจากสารละลายด้วยกระดาษกรอง (วอทแมน เบอร์ 1) แล้วนำไปเก็บไว้ในเครื่องทำความเย็น อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส จนกว่าจะนำไปวิเคราะห์ทดสอบ โดยกระชายขาวสด 20 กรัม จะสามารถผลิตน้ำกระชายได้ปริมาตร 100 มิลลิลิตร

การสังเคราะห์อนุภาคนาโนเงิน

นำสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต (AgNO_3 , Sigma-Aldrich, ประเทศสหรัฐอเมริกา) ความเข้มข้น 0.02 โมลาร์ ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ผสมกับสารสกัดน้ำกระชายขาว ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้มีปริมาตรรวม 100 มิลลิลิตรในขวดปริมาตร นำสารละลายผสมไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง สังเกตการณ์เปลี่ยนแปลงสีของสารละลายจากสารละลายใสไม่มีสีกลายเป็นสารละลายสีน้ำตาลแดง สีของสารละลายที่เข้มข้นแสดงถึงการเกิดของอนุภาคนาโนเงิน (Sarwer *et al.*, 2022) ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำสารละลายที่ได้ไปเข้าเครื่องหมุนเหวี่ยงเพื่อให้อนุภาคนาโนเงินตกตะกอน 3 ครั้ง ครั้งละ 30 นาที ที่ความเร็วรอบ 20,000 รอบต่อนาที แต่ละรอบจะทำการล้างตะกอนด้วยน้ำกลั่น เมื่อเสร็จสิ้น

จะนำตะกอนอนุภาคนาโนมาแขวนลอยในสารสกัดน้ำกระชายขาว สัดส่วนน้ำกระชายขาว 1 มิลลิลิตร ต่ออนุภาคนาโน 1 มิลลิกรัม

การตรวจสอบลักษณะของอนุภาคนาโนเงิน

นำสารละลายอนุภาคนาโนเงินที่ได้จากการสังเคราะห์ มาวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องวิเคราะห์การดูดกลืนแสง (UV-Vis spectrometer; BIORAD SmartspecTM3000) ที่ Resolution 1 นาโนเมตร ในช่วงความยาวคลื่น 300 - 800 นาโนเมตร เพื่อศึกษาการเกิดอนุภาคนาโนเงิน เปรียบเทียบกับสารละลายอนุภาคนาโนเงินทางการค้า

ตรวจสอบโครงสร้างพื้นฐานและขนาดของอนุภาคนาโนเงินด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscopy; TEM, JEOL JEM-2010) ที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 200 กิโลโวลต์ โดยก่อนการวิเคราะห์ให้นำสารละลายอนุภาคนาโนเงินไปเขย่าด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง (sonocate) เป็นระยะเวลา 5 นาที ทำการหยดสารละลายอนุภาคนาโนเงินลงบนตะแกรงทองแดงที่เคลือบคาร์บอน (Carbon coated copper grid) นำไประเหยน้ำออกด้วยเครื่องอบสูญญากาศ (vacuum dry) ก่อนทำการถ่ายภาพ TEM

การตรวจสอบผลการยับยั้งการเจริญของเชื้อแบคทีเรีย

เพาะเชื้อ สแตฟิโลค็อกคัส ออเรียส (*Staphylococcus aureus*, ATCC 25923) และ ซูโดโมนาส แอรูจิโนซา (*Pseudomonas aeruginosa*, ATCC 27853) บน Sabouraud dextrose agar (SDA, Difco, USA) มาเพาะเลี้ยงบนจานอาหารเลี้ยงเชื้อแบบแข็งชนิด Brain heart infusion (BHI) agar ที่เติม 10% horse serum และบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3-7 วัน นำเชื้อมาเพาะเลี้ยงต่อในอาหารเลี้ยงเชื้อแบบเหลว BHI broth ที่มี 10% Horse serum แล้วมาปรับความเข้มข้นให้ได้ 1.5×10^6 CFU/mL และเจือจางลงทีละ 10 เท่าลงอีก 2 ครั้ง

หาความเข้มข้นต่ำสุดของสารที่ยับยั้งการเจริญของเชื้อ (Minimum Inhibitory Concentration, MIC) โดยวิธีการเจือจาง microbroth dilution โดยนำสารละลายอนุภาคนาโนเงิน และแบคทีเรียแต่ละชนิดมาเจือจางเป็นลำดับส่วนลงทีละ 2 เท่า ด้วย BHI broth ใส่ใน 96-well microtiter plate จากนั้นเติมแบคทีเรียที่ปรับความเข้มข้นแล้วลงในแต่ละหลุมของ microtiter plate ที่มีสารทดสอบอยู่ หลังจากนั้นนำไปบ่มที่ 37 องศาเซลเซียส ในสภาวะไร้ออกซิเจนเป็นเวลา 3 วัน อ่านผลการเจริญของแบคทีเรียจากการสังเกตความขุ่นของเชื้อที่ทดสอบในแต่ละหลุม เปรียบเทียบกับหลุมควบคุมซึ่งมีเชื้อแบคทีเรียอย่างเดียว และหลุมที่มีอาหารเลี้ยงเชื้อเพียงอย่างเดียว โดยค่า MIC คือค่าความเข้มข้นที่น้อยที่สุดของสารทดสอบในหลุมทดลองที่สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อได้

หาค่าความเข้มข้นต่ำสุดของสารทดสอบที่สามารถฆ่าเชื้อแบคทีเรียได้ (Minimum bactericidal concentration, MBC) โดยส่วนผสมสารละลายอนุภาคนาโนเงินที่จากหลุมทดสอบของการทดลองหาค่า MIC ที่ยับยั้งการเจริญของเชื้อมา spread plate บนอาหาร BHI agar นำจานเพาะเชื้อไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ในสภาวะไร้ออกซิเจน เป็นเวลา 5 วัน อ่านผลโดยดูการเจริญของ

เชื้อทดสอบ แผลผลโดยอ่านค่าความเข้มข้นที่ต่ำที่สุดที่ฆ่าเชื้อได้ 99.99% ซึ่งจะเป็นค่า MBC และดูค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสายละลายอนุภาคนาโนเงินที่เพิ่มขึ้นกับปริมาณของเชื้อที่ลดลง

การสังเคราะห์ไคโตซาน/คอลลาเจนไฮโดรเจล

เตรียมสารละลายไคโตซาน ความเข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ในตัวทำละลายกรดอะซิติก ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร และเตรียมสารละลายคอลลาเจน ความเข้มข้น 2 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ในตัวทำละลายกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 0.02 โมลต่อลิตร นำสารละลายทั้งสองชนิดมาผสมกันด้วยสัดส่วนระหว่างไคโตซานต่อคอลลาเจน 3:1 เติมนูนาโนเงินที่สังเคราะห์ได้ลงไป ความเข้มข้นร้อยละ 0 และ 1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส โดยกวนด้วยความเร็ว 100 รอบต่อนาที จากนั้นค่อย ๆ หยดเบต้ากลีเซอรอเฟอสเฟต ความเข้มข้น ร้อยละ 56 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรลงไปให้มีความเข้มข้นในไฮโดรเจล ร้อยละ 14 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ผสมจนเป็นเนื้อเดียวกัน เก็บสารละลายไฮโดรเจลไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เพื่อใช้ในการทดลองลำดับถัดไป

การทดสอบสมบัติรีโอโลยี

วิเคราะห์พฤติกรรมทางรีโอโลยีของไฮโดรเจล ได้แก่ มอดุลัสสะสม (storage modulus, G') และมอดุลัสสูญเสีย (loss modulus, G'') ด้วย Oscillatory Rheometer (Thermo Scientific: HAAKE MARS) ตรวจดูอุณหภูมิการเกิดเจล (gelation temperature) โดยให้ความร้อนตั้งแต่ 4 ถึง 45 องศาเซลเซียส ที่ ความเครียด ร้อยละ 1 และความถี่ 1 เฮิร์ตซ์ และวัดเวลาการเกิดเจล (gelation time) จากการทำ time sweep ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ความเครียด ร้อยละ 1 และความถี่ 1 เฮิร์ตซ์

การวัดความพรุน (porosity) ของไฮโดรเจล

นำไฮโดรเจลไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปแช่แข็งที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เตรียมเป็นไฮโดรเจลไลโอไฟไลซ์ (lyophilized hydrogel) โดยทำให้แห้งด้วยการแช่เยือกแข็ง (freeze dry) เป็นเวลา 48 ชั่วโมง นำไปวิเคราะห์หาความพรุนด้วยระบบสแกน Micro CT (BRUKER SKYSCAN 1173 Micro-CT) ซึ่งทำงานที่ 58 กิโลโวลต์ และ 24 มิลลิแอมป์ ด้วยความละเอียด 20 ไมโครเมตร

การวิเคราะห์โครงสร้างพื้นฐานของไฮโดรเจล

นำตัวอย่างไลโอไฟไลซ์ไปเคลือบผิวหน้าด้วยทองคำ ตรวจสอบลักษณะของรูพรุนของไฮโดรเจลโดยด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM, JEOL JCM-600)

การตรวจสอบลักษณะทางเคมีของไฮโดรเจล

หมู่ทางเคมีของไฮโดรเจลถูกพิจารณา ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Fourier transform infrared spectroscopy; FTIR, Thermo Scientific: Nicolet is5) โดยนำ

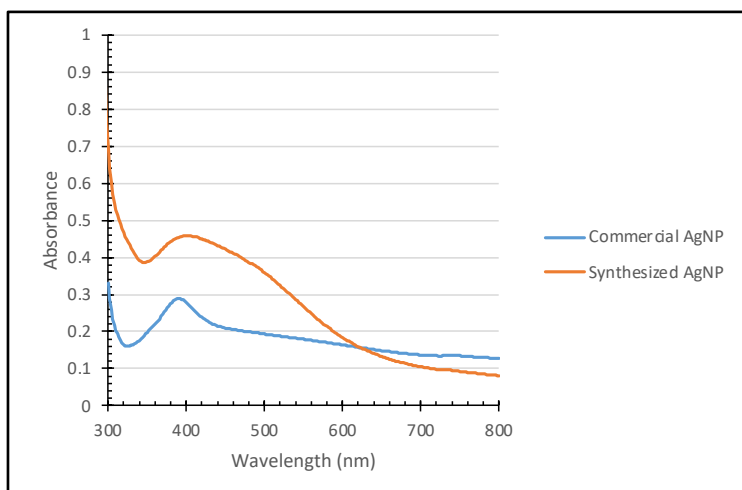
ตัวอย่างไฮโดรเจลไอโอไฟโลซีไปสแกนในช่วงเลขคลื่น 4000 ถึง 600 cm^{-1} จำนวน 64 ครั้ง ความละเอียด 4 cm^{-1}

การประเมินคุณสมบัติต้านจุลชีพของไฮโดรเจล

เตรียมชิ้นงานตัวอย่างไฮโดรเจลในแม่พิมพ์ทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร สูง 3 มิลลิเมตร จำนวนชิ้นงานตัวอย่างแต่ละกลุ่มทดสอบ คือ 3 ชิ้น ($n=3$) นำไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนการทดสอบเพื่อให้เกิดเจลสมบูรณ์ จากนั้นนำชิ้นงานตัวอย่างไปฆ่าเชื้อภายใต้แสงอัลตราไวโอเลต เป็นเวลา 30 นาที ทดสอบฤทธิ์การต้านจุลชีพด้วย disc diffusion method โดยมีกลุ่มควบคุมแบบบวก (positive control) ได้แก่ Ciprofloxacin นำชิ้นงานตัวอย่าง วางลงบน Sabouraud dextrose agar (SDA, Diffco, USA) ที่เพาะเชื้อ สแตฟิโลค็อกคัส ออเรียส (*Staphylococcus aureus*, ATCC 25923) และซูโดโมนา สแอรูจิโนซา (*Pseudomonas aeruginosa*, ATCC 27853) (American Type Culture Collection) ไว้ และนำไปบ่มเชื้อที่ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ในสภาพชื้น หลังจากนั้นวัดบริเวณยับยั้งเชื้อ (inhibition zone) และนับจำนวนโคโรนียของแบคทีเรีย

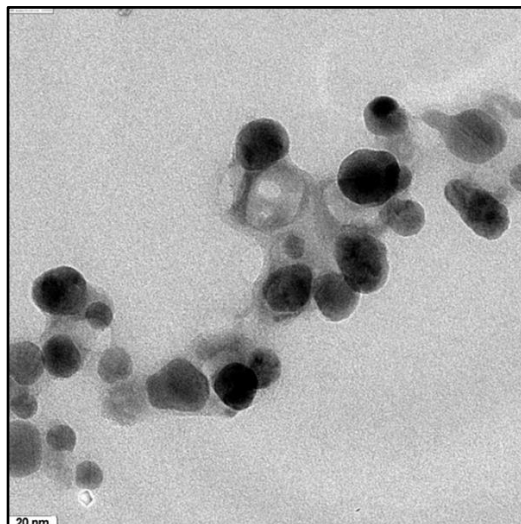
ผลการวิจัย

การสังเคราะห์อนุภาคนาโนเงินจากการใช้สารสกัดน้ำกระชายขาวเป็นตัวรีดิวซ์ ได้อนุภาคนาโนเงินที่มีการดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่นประมาณ 400 - 420 นาโนเมตร ทดลองเปรียบเทียบกับอนุภาคนาโนเงินทางการค้า ผลการทดลองแสดงในภาพประกอบ 1



ภาพประกอบ 1 UV-Vis absorption spectrum ของอนุภาคนาโนเงินชีวสังเคราะห์ (Synthesized AgNP) และอนุภาคนาโนเงินทางการค้า (Commercial AgNP)

ผลการตรวจสอบขนาดอนุภาคนาโนเงินที่สังเคราะห์ได้จาก TEM แสดงในภาพประกอบ 2 พบว่าอนุภาคนาโนเงินที่สังเคราะห์ขึ้นเป็นทรงกลมและมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางอยู่ระหว่าง 20 - 40 นาโนเมตร



ภาพประกอบ 2 ภาพถ่าย TEM ของอนุภาคนาโนเงินชีวสังเคราะห์

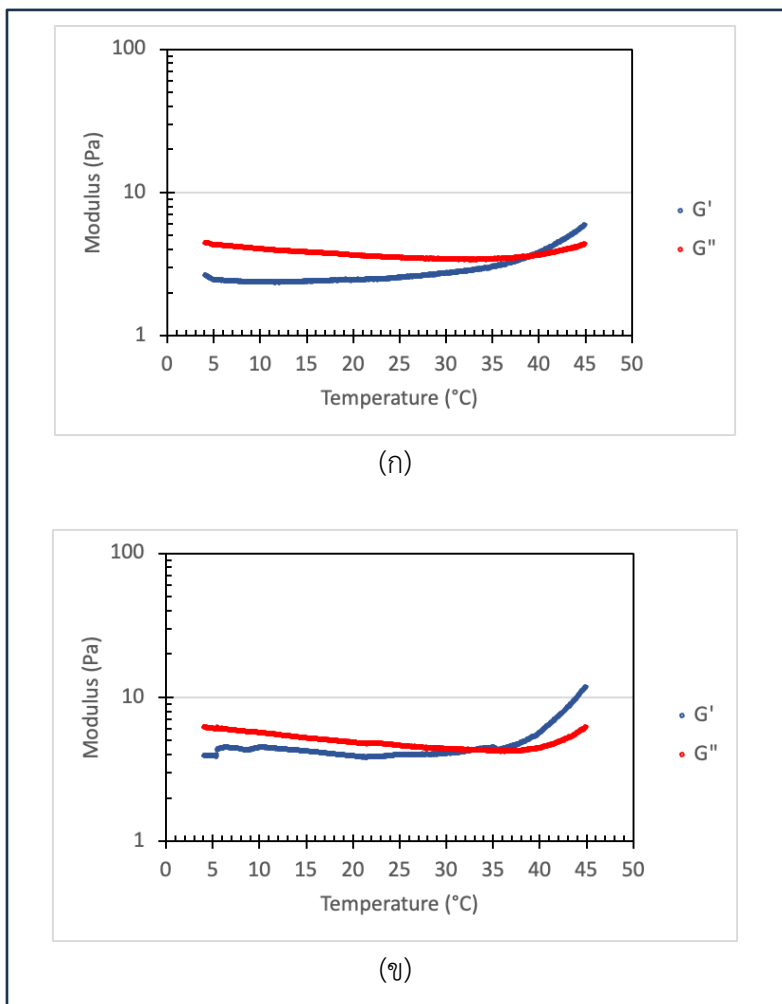
ความสามารถในการยับยั้งของเชื้อ (Minimal inhibitory concentration, MIC) และความเข้มข้นต่ำสุดของสารทดสอบที่สามารถฆ่าเชื้อแบคทีเรียได้ (Minimum bactericidal concentration, MBC) ดังแสดงในตารางที่ 1 พบว่า ค่า MIC และ MBC ของอนุภาคนาโนเงินชีวสังเคราะห์ต่อ *Staphylococcus aureus* และ *Pseudomonas aeruginosa* มีความเข้มข้นเท่ากัน และค่า MIC ต่ำกว่า MBC

ตารางที่ 1 การยับยั้งการเจริญของเชื้อแบคทีเรียของอนุภาคนาโนเงิน

Bacteria	MIC (mg/ml)	MBC (mg/ml)
<i>Staphylococcus aureus</i> ATCC 29213	3.125	6.25
<i>Pseudomonas aeruginosa</i> ATCC 27853	3.125	6.25

การศึกษากระบวนการในการเกิดเจลโดยพิจารณาจากพฤติกรรมหยุ่นหนืด (viscoelastic behavior) โดยวัดมอดุลัสสะสม (Storage modulus, G') และมอดุลัสสูญเสีย (Loss modulus, G'') ของไฮโดรเจล ในช่วงอุณหภูมิ 4 ถึง 45 องศาเซลเซียส ถูกแสดงในภาพประกอบ 3 จะเห็นว่า ในช่วงเริ่มต้นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส G' น้อยกว่า G'' และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ G' และ G'' มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และความแตกต่างระหว่าง G' และ G'' ลดลง จนกระทั่งถึงอุณหภูมิหนึ่งค่า G' เท่ากับ G'' แสดง

การเปลี่ยนแปลงจากโซลเป็นเจล (sol-gel transition) หลังการเกิดเจล ค่า G' มากกว่า G'' เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น อุณหภูมิการเกิดเจล (อุณหภูมิที่ ค่า G' เท่ากับ G'') และค่ามอดุลัส สรุปลไว้ในตารางที่ 2



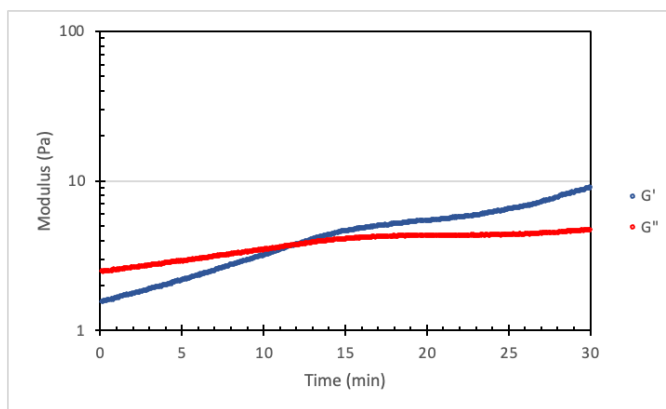
ภาพประกอบ 3 พฤติกรรมหยุ่นหนืด ได้แก่ มอดุลัสสะสม (Storage modulus, G') และมอดุลัสสูญเสีย (Loss modulus, G'') เทียบกับอุณหภูมิ (Temperature) ของไคโตซาน/คอลลาเจนไฮโดร-เจล; (ก) ปราศจากอนุภาคนาโนเงินชีวสังเคราะห์ และ (ข) อนุภาคนาโนเงินชีวสังเคราะห์สังเคราะห์ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร

ตารางที่ 2 แสดงอุณหภูมิการเกิดเจล และค่ามอดุลัส ไคโตซาน/คอลลาเจนไฮโดรเจล มีอุณหภูมิการเกิดเจลที่ 39.04 องศาเซลเซียส การเติมอนุภาคนาโนเงินมีผลต่ออุณหภูมิการเกิดเจล โดยเมื่อเพิ่มอนุภาคนาโนเงินปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของไฮโดรเจล อุณหภูมิการเกิดเจลลดลงเหลือ 32.94 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ยังพบว่าค่ามอดุลัสของไฮโดรเจลที่มีอนุภาคนาโนเงินอยู่มีค่าสูงกว่าไฮโดรเจลที่ปราศจากอนุภาคนาโนเงิน

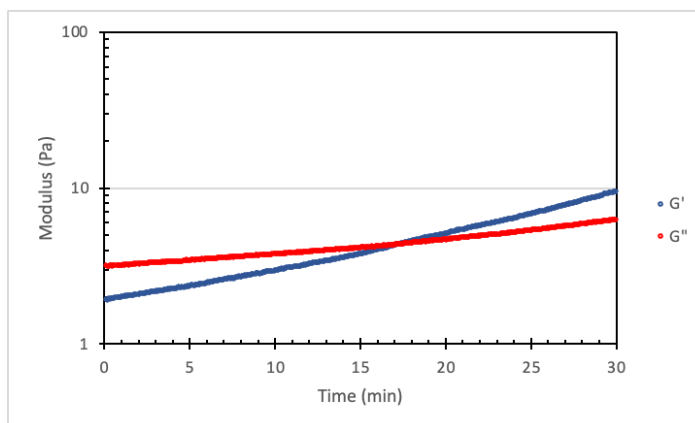
ตารางที่ 2 อุณหภูมิการเกิดเจล (Gelation temperature) และมอดุลัส (G' และ G'') ของไคโตซาน/คอลลาเจนไฮโดรเจล

AgNP concentration (% w/v)	Gelation temperature (°C)	$G' = G''$ (Pa)
0	39.04	3.618
1	32.94	4.310

เมื่อวัดค่าเวลาการเกิดเจลของไฮโดรเจลด้วยการทดสอบทางรีโอโลยี โดยการทำให้ time sweep ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ภาพประกอบ 4 แสดงพฤติกรรมหุ่ยนหนืดของไคโตซาน/คอลลาเจนไฮโดรเจลที่เติมอนุภาคนาโนเงินเทียบกับเวลา พบว่าที่เวลาเริ่มต้น G' น้อยกว่า G'' อย่างไรก็ตามความแตกต่างระหว่าง G' และ G'' ลดลงเมื่อเวลาเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า ทั้ง G' และ G'' เพิ่มขึ้นกับการเพิ่มเวลา เวลาการเกิดเจล และค่ามอดุลัส สรุปไว้ในตารางที่ 3 จะเห็นได้ว่า ไคโตซาน/คอลลาเจนไฮโดรเจล มีเวลาการเกิดเจล 11.88 นาที การเพิ่มปริมาณอนุภาคนาโนเงินร้อยละ 1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ส่งผลให้เวลาการเกิดเจลของไฮโดรเจลยาวขึ้น ค่ามอดุลัสที่ตำแหน่งการเปลี่ยนแปลงจากโซลเป็นเจล ของไฮโดรเจลที่มีอนุภาคนาโนเงินเป็นส่วนประกอบสูงกว่าไฮโดรเจลปราศจากอนุภาคนาโนเงิน



(ก)



(ข)

ภาพประกอบ 4 พฤติกรรมหนืดหนืด ได้แก่ มอดุลัสสะสม (Storage modulus, G') และมอดุลัสสูญเสีย (Loss modulus, G'') เทียบกับเวลา (Time) ของไคโตซาน/คอลลาเจนไฮโดรเจล; (ก) ปราศจากอนุภาคนาโนเงินชีวสังเคราะห์ และ (ข) อนุภาคนาโนเงินชีวสังเคราะห์ ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร

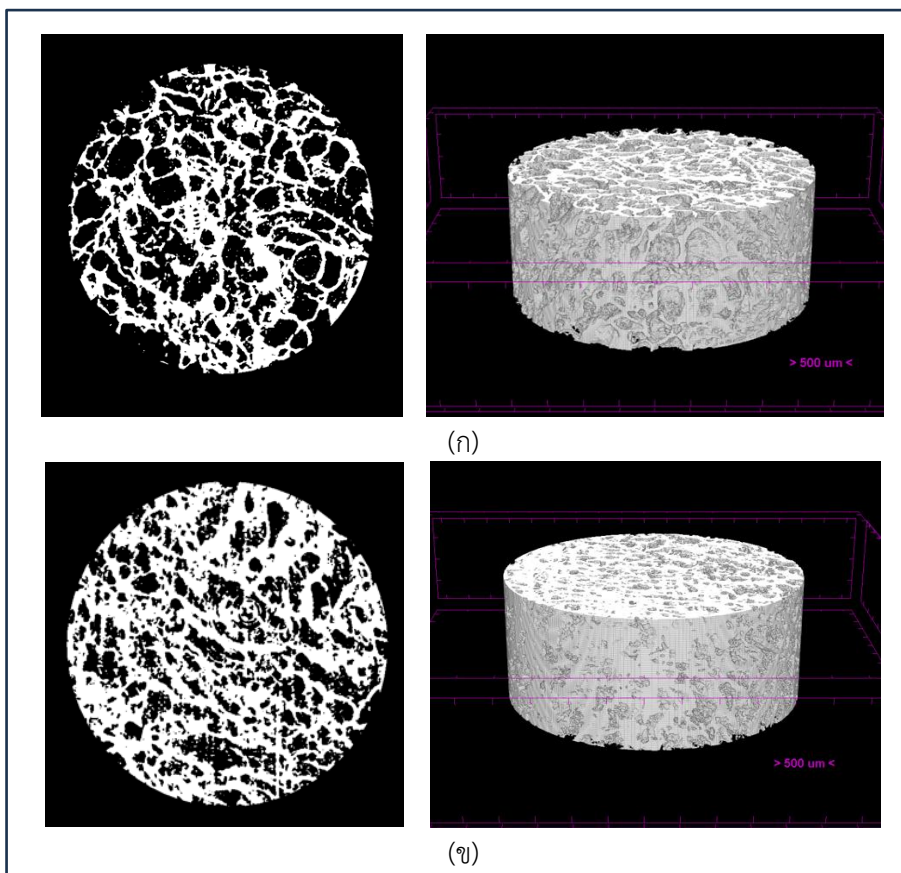
ตารางที่ 3 เวลาการเกิดเจล (Gelation time) และมอดุลัส (G' และ G'') ของไคโตซาน/คอลลาเจนไฮโดรเจล

AgNP concentration (% w/v)	Gelation time (min)	$G' = G''$ (Pa)
0	11.88	3.765
1	17.26	4.395

การวัดความพรุนของไฮโดรเจลไลโอไฟไลซ์ด้วยระบบสแกน Micro CT มีผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4 และรูปภาพประกอบ 5 พบว่า ร้อยละความพรุนของไคโตซาน/คอลลาเจนไฮโดรเจล ที่มีอนุภาคนาโนเงินมีปริมาณน้อยกว่าไฮโดรเจลที่ปราศจากอนุภาคนาโนเงิน และเมื่อพิจารณาภาพถ่ายจะเห็นว่ารูพรุนมีลักษณะเป็น interconnection ระหว่างรูพรุน

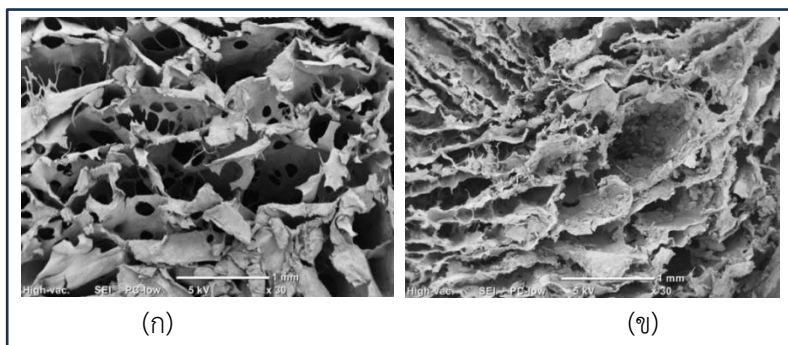
ตารางที่ 4 ร้อยละความพรุน (% Porosity) ของไคโตซาน/คอลลาเจนไฮโดรเจล

AgNP concentration (% w/v)	Porosity (%)
0	57.96±0.74
1	38.8±1.58



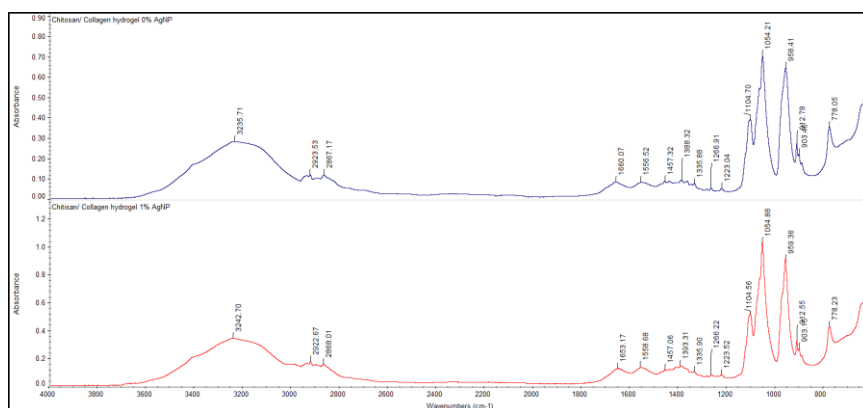
ภาพประกอบ 5 ภาพถ่าย Micro CT ของไคโตซาน/คอลลาเจนไฮโดรเจลไลโอฟิลิซ์; (ก) ปราศจากอนุภาคนาโนเงินชีวสังเคราะห์ และ (ข) อนุภาคนาโนเงินชีวสังเคราะห์ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร

ภาพประกอบ 6 แสดงภาพถ่าย SEM ของไฮโดรไฮโดรเจลไลโอฟิลิซ์ เห็นได้ว่าขนาดรูพรุนของไฮโดรเจลที่มีอนุภาคนาโนเงินเป็นส่วนประกอบมีขนาดเล็กกว่าไฮโดรเจลปราศจากอนุภาคนาโนเงิน แต่ยังมีลักษณะเป็น interconnection ระหว่างรูพรุน โดยมีคอลลาเจนไฟเบอร์อยู่ด้วย อย่างไรก็ตามที่ผนังรูพรุนของไฮโดรเจลที่มีอนุภาคนาโนเงินเป็นส่วนประกอบมีเฟส (phase) ขนาดเล็กกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ



ภาพประกอบ 6 ภาพถ่าย SEM ของไคโตซาน/คอลลาเจนไฮโดรเจลไลโอฟิลิซ์; (ก) ปราศจากอนุภาคนาโนเงินชีวสังเคราะห์ และ (ข) อนุภาคนาโนเงินชีวสังเคราะห์ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร

FTIR spectra ของไฮโดรเจล แสดงไว้ในภาพประกอบ 7 จะเห็นว่า ไฮโดรเจลไลโอฟิลิซ์ที่ปราศจากอนุภาคนาโนเงินแสดงการปรากฏของพีคในตำแหน่งเลขคลื่นเดียวกัน โดยพีคที่ปรากฏแสดงหมู่เอไมด์ ที่เป็นหมู่ฟังก์ชันของไคโตซานและคอลลาเจน โดยพีคที่ปรากฏในช่วงเลขคลื่น 1660.07 cm^{-1} เป็น stretching vibration ของหมู่ carbonyl ($\text{C}=\text{O}$), 1556.52 cm^{-1} เป็น N-H bending และ C-N stretching vibration, 1388.32 cm^{-1} เป็น C-N stretching และยังพบ broad band ในช่วง $3600\text{--}3000\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นหมู่ไฮดรอกซิล (OH) จากพันธะ C-OH ร่วมกับการดูดซับโมเลกุลของน้ำ อย่างไรก็ตาม ยังพบการซ้อนทับของพีคที่ตำแหน่ง 3400 cm^{-1} ซึ่งเป็น N-H stretching และที่ $2923.53\text{--}2857.17\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็น C-H stretching vibration จากพันธะ CH, CH_2 และ CH_3 อีกด้วย สำหรับตำแหน่ง $1104.70\text{--}1054.21\text{ cm}^{-1}$ แสดง C-O stretching vibration ทั้งไฮโดรเจลที่ปราศจากอนุภาคนาโนเงินและมีอนุภาคนาโนเงินเป็นส่วนประกอบแสดงการปรากฏของพีคในตำแหน่งเลขคลื่นเดียวกัน



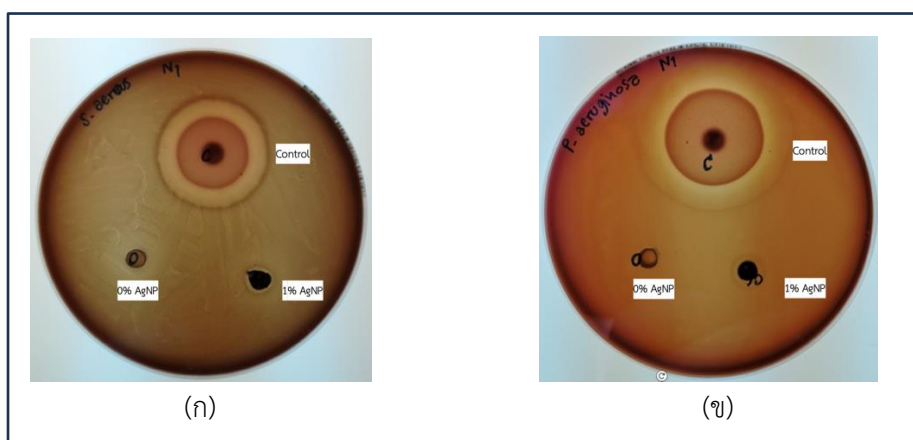
ภาพประกอบ 7 FTIR spectra ของไคโตซาน/คอลลาเจนไฮโดรเจลไลโอฟิลิซ์ที่มีอนุภาคนาโนเงินสังเคราะห์ความเข้มข้นร้อยละ 0 และ 1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร (% w/v)

ตารางที่ 5 แสดงขนาดของบริเวณยับยั้งเชื้อ รอบไฮโดรเจลที่ปราศจากอนุภาคนาโนเงินและที่มีอนุภาคนาโนเงินเป็นส่วนประกอบอยู่ ร้อยละ 1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จากผลการทดลองจะเห็นว่า ไฮโดรเจลที่ปราศจากอนุภาคนาโนเงินไม่แสดงบริเวณยับยั้งเชื้อ รอบไฮโดรเจล การเติมอนุภาคนาโนเงินลงในไคโตซาน/คอลลาเจนไฮโดรเจล แสดงบริเวณยับยั้งเชื้อ กับทั้ง *S. aureus* และ *P. aeruginosa* อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุมแบบบวก พบว่าบริเวณยับยั้งเชื้อรอบไฮโดรเจลมีขนาดเล็กกว่ากลุ่มควบคุมแบบบวก ดังแสดงในภาพประกอบ 8

ตารางที่ 5 ขนาดของบริเวณยับยั้งเชื้อ รอบไคโตซาน/คอลลาเจนไฮโดรเจล

Bacterial strains	Zone of inhibition (cm)		
	Positive control ^a	0 % AgNP	1 % AgNP
<i>Staphylococcus aureus</i>	3.0 $\pm$ 0	0	0.8 $\pm$ 0
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	4.0 $\pm$ 0	0	1.0 $\pm$ 0.1

^a Ciprofloxacin



ภาพประกอบ 8 ภาพถ่ายการเจริญเติบโตของ (ก) *S. aureus* และ (ข) *P. aeruginosa* ที่เพาะเลี้ยงด้วยแผ่น ไคโตซาน/คอลลาเจนไฮโดรเจลที่มีอนุภาคนาโนเงินชีวสังเคราะห์ความเข้มข้นร้อยละ 0 และ 1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร (% w/v)

อภิปรายผล

อนุภาคนาโนเงินที่สังเคราะห์ได้ปรากฏ Surface Plasmon Resonance (SPR) ที่ตำแหน่งเดียวกันกับอนุภาคนาโนเงินทางการค้าที่มีขนาดอนุภาค 20 - 40 นาโนเมตร และจากภาพถ่าย TEM ก็ยืนยันว่า อนุภาคนาโนเงินที่สังเคราะห์ได้มีขนาดอยู่ในช่วง 20 - 40 นาโนเมตร ซึ่งขนาดของอนุภาคนาโนเงินมีผลต่อประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ อนุภาคนาโนเงินที่มีขนาดเล็กจะมีประสิทธิภาพที่ดีในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย (Bruna *et al.*, 2021) เนื่องจากมีพื้นที่ผิวในการสัมผัสกับเซลล์แบคทีเรียมาก จากผลการทดลองจึงพบว่า อนุภาคนาโนเงินชีวสังเคราะห์ มีค่า MIC และ MBC ต่อเชื้อ *S. aureus* และ *P. aeruginosa* ต่ำ โดย *S. aureus* อยู่ในกลุ่มแบคทีเรียแกรมบวก และ *P. aeruginosa* อยู่ในกลุ่มแบคทีเรียแกรมลบ มีรายงานว่าแบคทีเรียแกรมลบไวต่ออนุภาคนาโนเงินมากกว่าแบคทีเรียแกรมบวก เนื่องจากผนังเซลล์ของแบคทีเรียแกรมลบบางกว่าแบคทีเรียแกรมบวก ผนังเซลล์ที่หนาอาจลดการแทรกซึมของอนุภาคนาโนเงินเข้าไปในเซลล์ได้ (Yin *et al.*, 2020) อย่างไรก็ตามอนุภาคนาโนเงินชีวสังเคราะห์จากกระชายขาวมีประสิทธิภาพในการยับยั้งและฆ่าเชื้อแบคทีเรียได้ทั้งแบคทีเรียแกรมบวกและแบคทีเรียแกรมลบ โดยมีแนวโน้มสอดคล้องกับงานวิจัยที่แสดงให้เห็นว่าแสดงให้เห็นว่าอนุภาคนาโนเงินนาโนที่สังเคราะห์จากกระชายขาว มีฤทธิ์ต้านเชื้อแบคทีเรียทั้งแบคทีเรียแกรมบวกและแกรมลบได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยอนุภาคเหล่านี้มีผลในการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียผ่านกลไกการทำลายโครงสร้างเยื่อหุ้มเซลล์แบคทีเรีย ทำให้ความสามารถในการอยู่รอดลดลงจนแบคทีเรียตายในที่สุด (Kaul *et al.*, 2023)

จากพฤติกรรมหนืดหนืดที่แสดง ในภาพประกอบ 3 และ 4 พบว่า ค่า G' น้อยกว่า G'' ที่อุณหภูมิต่ำ แสดงถึงการเป็นของเหลวของโคโตะซาน/คอลลาเจนไฮโดรเจล ไฮโดรเจลสามารถไหลได้ที่อุณหภูมิและเวลาก่อนการเกิดเจล จึงแสดงให้เห็นว่า G'' (viscous behavior) มีอำนาจเหนือ G' (elastic behavior) เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ไฮโดรเจลเริ่มเกิดพันธะเชื่อมขวางระหว่างโคโตะซานและ b-GP ร่วมกับการเกิดเป็นคอลลาเจนไฟเบอร์ ซึ่งไปขัดขวางการไหลของไฮโดรเจล ทำให้ค่า G' มีค่าลดลง และยิ่งลดลงมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิมากขึ้น ในทางกลับกัน ค่า G' มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น และยังมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จึงทำให้ความแตกต่างระหว่างค่า G' และ G'' น้อยลงด้วย โดยที่อัตราในการเพิ่มขึ้นของ G' มีมากกว่าอัตราในการลดลงของ กำหนดอุณหภูมิที่ทำให้ ค่า G' เท่ากับ G'' เป็นอุณหภูมิการเกิดเจล (Couto *et al.*, 2009) จากตารางที่ 2 ที่พบว่าไฮโดรเจลที่มีอนุภาคนาโนเงินเป็นส่วนประกอบมีอุณหภูมิการเกิดเจลต่ำกว่าไฮโดรเจลที่ปราศจากอนุภาคนาโนเงิน เนื่องจากในการเกิดเจล การเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้โมเลกุลของน้ำที่มีพันธะไฮโดรเจนกับสายโซ่พอลิเมอร์เกิดการสั่นและหมุน ความแรงพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์และน้ำอ่อนลง โมเลกุลน้ำจึงออกสายโซ่พอลิเมอร์ ส่งผลให้สายโซ่พอลิเมอร์สามารถสร้างพันธะกับโมเลกุลอื่นได้ (Kaur *et al.*, 2021) ทั้งนี้ อนุภาคนาโนเงินที่สังเคราะห์ได้เป็นสารแขวนลอยอยู่ในน้ำ เมื่อผสมลงในโคโตะซาน/คอลลาเจน

ไฮโดรเจลโดยวิธีทางตรงก่อนการเกิดเจล อาจจะไปดูดซับบนผิวของสายโซ่พอลิเมอร์ได้ ทำให้มีปริมาณพอลิเมอร์ที่จะเกิดพันธะเชื่อมขวางในการเกิดเจลจำนวนลดลง ด้วยเหตุนี้อุณหภูมิการเกิดเจลของไฮโดรเจลจึงต่ำลง อย่างไรก็ตามการเพิ่มขึ้นของค่ามอดูลัสที่อุณหภูมิการเกิดเจลกับการเติมอนุภาคนาโนเงิน สามารถอธิบายด้วยการเติมอนุภาคที่มีความแข็ง (stiffness) ลงไปในไฮโดรเจล เมื่ออนุภาคนาโนเงินมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้น ความแข็งของไฮโดรเจลจึงเพิ่มขึ้น

ผลการศึกษาศสมบัติทางรีโอโลยีเทียบกับเวลา พบว่า เมื่อให้ความร้อนกับไฮโดรเจลที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ที่เวลาเริ่มต้น G' มีค่าน้อยกว่า G'' สามารถใช้คำอธิบายเดียวกันกับผลของอุณหภูมิได้ คือ ที่เวลาเริ่มต้นไฮโดรเจลเป็นของเหลวที่สามารถไหลได้ สมบัติหยุ่นหนืดของไฮโดรเจลจึงอยู่ภายใต้อิทธิพลของ G'' มากกว่า G' แต่เมื่อเวลามากขึ้น การเกิดพันธะเชื่อมขวางระหว่างไคโตซานและ b-GP เพิ่มขึ้น ทำให้จำกัดการไหลและมีความเป็นอีลาสติกมากขึ้น ค่า G' และ G'' จึงมีค่าสูงขึ้น อย่างไรก็ตามอัตราเร็วในการเพิ่ม G' มากกว่า G'' ทำให้ความแตกต่างระหว่างค่า G' และ G'' ลดลงจนถึงเวลาที่ทำให้เกิดเจล นั่นคือ G' เท่ากับ G'' เมื่อกระบวนการเกิดเจลเกิดขึ้น G' มีค่าสูงกว่า G'' เมื่อพิจารณาเวลาในการเกิดเจลในตารางที่ 3 พบว่า เวลาในการเกิดเจลของไฮโดรเจลสูงขึ้นเมื่อเติมอนุภาคนาโนเงิน เมื่ออุณหภูมิคงที่ต้องอาศัยเวลาในการนำโมเลกุลของน้ำและอนุภาคนาโนเงินออกจากสายโซ่พอลิเมอร์เพื่อให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดพันธะเชื่อมขวาง อนุภาคนาโนเงินที่เติมลงไปมีพื้นที่ผิวสัมผัสกับสายโซ่พอลิเมอร์มากขึ้น จึงทำให้ใช้เวลาในการนำออกจากสายโซ่นานมากขึ้น

ไคโตซาน/คอลลาเจนไฮโดรเจลที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและมีคุณสมบัติด้านแบคทีเรียเป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้องและกลายเป็นเจลเมื่อถึงอุณหภูมิเฉพาะ เช่น อุณหภูมิร่างกาย (37 องศาเซลเซียส) กระบวนการเกิดเจลเกิดขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิทำให้เกิดการถ่ายเทโปรตอนระหว่างหมู่ฟอสเฟตประจุลบ (anionic phosphate group) ของ b-GP และ หมู่เอมีนประจุบวก (cationic amine group) ของไคโตซาน ซึ่งเป็นแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิต (electrostatic attraction) (Lavertu, Fillion, & Buschmann, 2008) การเกิด การเปลี่ยนแปลงจากโซลเป็นเจล ขึ้นอยู่กับ pH ความเข้มข้นของ b-GP และอุณหภูมิ โดย b-GP มีความเป็นเบสอ่อน เมื่อเติมลงในสารละลายไคโตซาน/คอลลาเจนในกรด จะไปทำให้สารละลายไคโตซาน/คอลลาเจนเป็นกลาง เกิดกระบวนการสร้างเจลร่วมกับการเกิดคอลลาเจนไฟเบอร์ขึ้นใหม่ (Moreira *et al.*, 2016) เจลที่เกิดขึ้นมีการเชื่อมโยงพันธะในลักษณะที่เป็นพอลิเมอร์โครงร่างตาข่าย (polymeric network) ล้อมรอบโมเลกุลของน้ำไว้ เมื่อนำน้ำออกจากไฮโดรเจลโดยการทำให้แห้ง จะเห็นเป็นรูพรุนในไฮโดรเจล จากผลการทดลอง จะเห็นได้ว่า ความพรุนของไคโตซาน/ไฮโดรเจลลดลงเมื่อเติมอนุภาคนาโนเงินลงในไฮโดรเจล นั้นแสดงว่าอนุภาคนาโนเงินที่สังเคราะห์ได้ส่งผลต่อพอลิเมอร์โครงร่างตาข่ายของไฮโดรเจล ซึ่งสอดคล้องกับผลของอุณหภูมิและเวลาในการเกิดเจล ที่อธิบายไว้ก่อนหน้านี้ว่าอนุภาคนาโนเงินอาจจะไปดูดซับบนผิวของสายโซ่พอลิเมอร์ และจากภาพถ่าย SEM ที่พบว่า การเติมอนุภาคนาโนเงินที่สังเคราะห์ได้ลงไปไคโตซาน/คอลลาเจนไฮโดรเจลทำให้รูพรุนมีขนาดเล็กลง และที่ผนังรูพรุนมี phase ขนาดเล็กกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ

สนับสนุนคำอธิบายที่ว่า อนุภาคนาโนเงินดูดซับบนสายโซ่พอลิเมอร์ทำให้มีต่อการเกิดพอลิเมอร์ โครงร่างตาข่าย ของไฮโดรเจล และการที่รูพรุนมีขนาดเล็กและมีอนุภาคนาโนเงินกระจายตัวอยู่ในผนัง เป็นสาเหตุให้ร้อยละความพรุนลดลงนั่นเอง

จาก FTIR spectra ของไฮโดรเจล ที่แสดงไว้ในภาพประกอบ 7 ที่พบว่า การปรากฏของพีคต่าง ๆ ของไฮโดรเจลที่ปราศจากอนุภาคนาโนเงินและมีอนุภาคนาโนเงินเป็นส่วนประกอบอยู่ในตำแหน่งเลขคลื่นเดียวกัน นั้นแสดงว่าอนุภาคนาโนเงินไม่ส่งผลต่อแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตย์ ระหว่างไคโตซานและคอลลาเจน และไม่มี interaction ระหว่าง hydroxyl group ของไคโตซาน และ Ag การที่ hydroxyl group และ Ag มี interaction กัน จะทำให้พีคที่ตำแหน่ง 3235.71 cm^{-1} เลื่อนไปทางเลขคลื่นต่ำกว่า และความเข้มของ amide peak ที่ 1660.07 cm^{-1} และ 1556.52 cm^{-1} จะหายไป และมีพีคใหม่เกิดขึ้น และที่ตำแหน่ง 1388.32 cm^{-1} ที่เป็น C-N stretching และตำแหน่ง $1104.70 - 1054.21\text{ cm}^{-1}$ ที่แสดง C-O stretching vibration จะมีความเข้มลดลงด้วย (Xie, et al., 2018)

จากผลการทดลองตามตารางที่ 5 และภาพประกอบ 8 แสดงให้เห็นว่า อนุภาคนาโนเงินที่สังเคราะห์ได้สามารถช่วยให้ไคโตซาน/คอลลาเจนไฮโดรเจลมีสมบัติในการต้านเชื้อแบคทีเรีย ดังเห็นได้จากการปรากฏบริเวณยับยั้งเชื้อ ของไฮโดรเจลที่มีอนุภาคนาโนเงินเป็นส่วนประกอบอยู่ การที่ inhibition size ของไฮโดรเจลต่อเชื้อ *S. aureus* มีขนาดเล็กกว่า inhibition size ของไฮโดรเจลต่อเชื้อ *P. aeruginosa* สามารถอธิบายได้จากความไวต่ออนุภาคนาโนของแบคทีเรียแกรมลบดังที่ได้ อธิบายไปก่อนหน้านี้ อย่างก็ตาม inhibition size ของไฮโดรเจลต่อเชื้อแบคทีเรียทั้งสองชนิดนี้มีขนาดเล็ก เมื่อเปรียบเทียบกับตัวควบคุม อาจจะเป็นเนื่องมาจากการที่อนุภาคนาโนเงินในไฮโดรเจลดูดซับอยู่บนสายโซ่พอลิเมอร์และถูกล้อมรอบด้วยพอลิเมอร์โครงร่างตาข่าย ทำให้จำกัดการแพร่ออกมาสัมผัสกับเชื้อ

จากการวิจัยสรุปได้ว่าสามารถสังเคราะห์ไคโตซาน/คอลลาเจนไฮโดรเจล ที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และมีคุณสมบัติต้านแบคทีเรียได้สำเร็จ โดยใช้สารสกัดน้ำกระชายขาวเป็นตัวรีดิวซ์ในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนเงิน โดยสามารถสังเคราะห์อนุภาคนาโนเงินที่มีขนาด $20 - 40$ นาโนเมตร มี Surface Plasmon Resonance (SPR) เทียบเท่ากับอนุภาคนาโนเงินทางการค้า และมีประสิทธิภาพในการยับยั้งและฆ่าเชื้อแบคทีเรีย *S. aureus* และ *P. aeruginosa* ได้ การเติมอนุภาคนาโนเงิน ส่งผลต่ออุณหภูมิการเกิดเจล เวลาการเกิดเจล ร้อยละความพรุน ขนาดรูพรุน โครงสร้างสัณฐาน และคุณสมบัติทางเคมีของไฮโดรเจล โดยไฮโดรเจลที่มีอนุภาคนาโนเงินเป็นส่วนประกอบ แสดงบริเวณยับยั้งเชื้อ กับ *S. aureus* และ *P. aeruginosa* แต่ขนาดของบริเวณยับยั้งเชื้อ เล็กกว่ากลุ่มควบคุมแบบบวก จากผลการทดลอง พบว่าไคโตซาน/คอลลาเจนไฮโดรเจลที่มีอนุภาคนาโนเงินเป็นส่วนประกอบ มีศักยภาพในการนำไปใช้เป็นวัสดุชีวการแพทย์สำหรับการสร้างกระดูก โดยสามารถควบคุมการปล่อยยา ยับยั้งการติดเชื้อ และลดการอักเสบได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.หยาดนภา ผาเจริญ วิทยาลัยวิทยาลัยแพทยศาสตร์
นานาชาติจุฬาภรณ์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ที่ให้คำแนะนำข้อมูลวิจัย และสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ
(วช.) ที่อุดหนุนทุนการวิจัยประจำปีงบประมาณ 2563 เพื่อใช้ศึกษาวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- Bruna, T., Maldonado-Bravo, F., Jara, P., & Caro, N. (2021). Silver Nanoparticles and Their Antibacterial Applications. *Int J Mol Sci*, 22(13). doi:10.3390/ijms22137202.
- Couto, D.S., Hong, Z., & Mano, J.F. (2009). Development of bioactive and biodegradable chitosan-based injectable systems containing bioactive glass nanoparticles. *Acta Biomaterialia*, 5(2), 115-123.
- Dang, Q., Liu, K., Zhang, Z., Liu, C., Liu, X., Xin, Y., ...Fan, B. (2017). Fabrication and evaluation of thermosensitive chitosan/collagen/ α , β -glycerophosphate hydrogels for tissue regeneration. *Carbohydr Polym*, 167, 145-157. doi:10.1016/j.carbpol.2017.03.053.
- Govindaraju, K., Selvaraj, T., Kiruthiga, V., & Singaravelu, G. (2010). Biogenic silver nanoparticles by *Solanum torvum* and their promising antimicrobial activity. *Journal of Biopesticides*, 3, 394-399.
- Hong, K.H. (2007). Preparation and properties of electrospun poly (vinyl alcohol)/silver fiber web as wound dressings. *Polymer Engineering & Science*, 47(1), 43-49.
- Huang, H., Yuan, Q., & Yang, X. (2004). Preparation and characterization of metal–chitosan nanocomposites. *Colloids and surfaces B: Biointerfaces*, 39(1-2), 31-37.
- Kaul, S., Ahmed, S., Nandini, V.V., Lathief, J., & Boruah, S. (2023). Evaluation of Physical Properties of Denture Base Resins Containing Silver Nanoparticles of *Aloe barbadensis* Miller, *Morinda citrifolia*, and *Boesenbergia rotunda* and Its Anti-microbial Effect: An In Vitro Study. *Cureus*, 15(11).

- Kaur, K., Sa'Paiva, S., Caffrey, D., Cavanagh, B.L., & Murphy, C.M. (2021). Injectable chitosan/collagen hydrogels nano-engineered with functionalized single wall carbon nanotubes for minimally invasive applications in bone. *Materials Science and Engineering: C*, 128, 112340.
- Lara, H.H., Garza-Treviño, E.N., Ixtepan-Turrent, L., & Singh, D.K. (2011). Silver nanoparticles are broad-spectrum bactericidal and virucidal compounds. *Journal of nanobiotechnology*, 9, 1-8.
- Lavertu, M., Filion, D., & Buschmann, M.D. (2008). Heat-induced transfer of protons from chitosan to glycerol phosphate produces chitosan precipitation and gelation. *Biomacromolecules*, 9(2), 640-650.
- Li, X., Xu, H., Chen, Z.S., & Chen, G. (2011). Biosynthesis of Nanoparticles by Microorganisms and Their Applications. *Journal of Nanomaterials*, 2011, 1-16. doi:10.1155/2011/270974.
- Liu, J., Yang, L., Liu, K., & Gao, F. (2023). Hydrogel scaffolds in bone regeneration: Their promising roles in angiogenesis. *Frontiers in Pharmacology*, 14, 1050954.
- Moreira, C.D., Carvalho, S.M., Mansur, H.S., & Pereira, M.M. (2016). Thermogelling chitosan–collagen–bioactive glass nanoparticle hybrids as potential injectable systems for tissue engineering. *Materials Science and Engineering: C*, 58, 1207-1216.
- Murugadoss, A., & Chattopadhyay, A. (2007). A 'green' chitosan–silver nanoparticle composite as a heterogeneous as well as micro-heterogeneous catalyst. *Nanotechnology*, 19(1), 015603.
- Ramteke, C., Chakrabarti, T., Sarangi, B.K., & Pandey, R.A. (2013). Synthesis of silver nanoparticles from the aqueous extract of leaves of *Ocimum sanctum* for enhanced antibacterial activity. *Journal of chemistry*.
- Roy, N., & Barik, A. (2010). Green synthesis of silver nanoparticles from the unexploited weed resources. *International Journal of Nanotechnology and applications*, 4(2), 95-101.
- Sarwer, Q., Amjad, M.S., Mehmood, A., Binish, Z., Mustafa, G., Farooq, A., ... Pérez de la Lastra, J.M. (2022). Green synthesis and characterization of silver nanoparticles using *Myrsine africana* leaf extract for their antibacterial, antioxidant and phytotoxic activities. *Molecules*, 27(21), 7612.

- Siripanth, J., & Wongwitthayakool, P. (2018). Flexural Strength and Viscoelastic Properties of Acrylic Resin Denture Base Material Containing Silver Nanoparticle Synthesized from Fingerroot Aqueous Extract. *Key Engineering Materials*, 777, 178-182. doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.777.178.
- Wongwitthayakool, P., & Pudla, M. (2018). Thermal Properties of Acrylic Resin Denture Base Material Containing Silver Nanoparticle Synthesized from Aqueous Extract of *Boesenbergia rotunda*. *Key Engineering Materials*, 777, 173-177. doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.777.173.
- Xie, Y., Liao, X., Zhang, J., Yang, F., & Fan, Z. (2018). Novel chitosan hydrogels reinforced by silver nanoparticles with ultrahigh mechanical and high antibacterial properties for accelerating wound healing. *International Journal of Biological Macromolecules*, 119, 402-412.
- Xiong, Y., & Xiong, Y. (2022). Applications of bone regeneration hydrogels in the treatment of bone defects: A review. *Journal of Materials Science*, 1-27.
- Yathavan, B., Chhibber, T., Steinhauß, D., Pulsipher, A., Alt, J.A., Ghandehari, H., & Jafari, P. (2023). Matrix-Mediated Delivery of Silver Nanoparticles for Prevention of *Staphylococcus aureus* and *Pseudomonas aeruginosa* Biofilm Formation in Chronic Rhinosinusitis. *Pharmaceutics*, 15(10), 2426.
- Yin, I.X., Zhang, J., Zhao, I.S., Mei, M.L., Li, Q., & Chu, C.H. (2020). The Antibacterial Mechanism of Silver Nanoparticles and Its Application in Dentistry. *Int J Nanomedicine*, 15, 2555-2562. doi:10.2147/ijn.S246764.

การผลิตเครื่องดื่มคอมบูชาจากรากบัว Manufacture of Kombucha from lotus root

พันธ์ระวี หมวดศรี* และ วีระยุทธ เตียนธนา

Phanrawi Muadsri* and Teerayut Theantana

สาขาวิชาชีววิทยาและเทคโนโลยีชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์
Department of Biology and Biotechnology, Faculty of Science and Technology,
Nakhon Sawan Rajabhat University
Email: peerawon@gmail.com

Received : June 24, 2024
Revised : October 21, 2024
Accepted : November 29, 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการผลิตคอมบูชาจากรากบัวอบแห้ง ที่มีอุณหภูมิในการอบแห้งรากบัวหลวงที่แตกต่างกัน โดยจุลินทรีย์โพรไบโอติกซึ่งมีการศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการอบแห้ง ของวัตถุดิบทั้งหมด 3 สภาวะคือ ที่อุณหภูมิ 50 55 และ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง โดยได้มีการวิเคราะห์ ค่าความเป็นกรด-ด่าง ค่าความหวาน จำนวนจุลินทรีย์ สารต้านอนุมูลอิสระ และปริมาณสารฟลาโวนอยด์ จากระยะเวลาในการหมัก 15 วัน พบว่า ค่าความเป็นกรด-ด่าง ของตัวอย่างมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง ค่าความหวาน มีค่าที่เพิ่มขึ้น และลดลงในบางตัวอย่าง ในขณะที่จำนวนจุลินทรีย์ในคอมบูชา จากรากบัวที่อบแห้งอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส มีจำนวนจุลินทรีย์สูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 คือ เท่ากับ 8.7×10^7 cfu/ml ในวันที่ 15 ของการหมัก นอกจากนี้ คอมบูชาจากรากบัวอบแห้งที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส มีค่าเปอร์เซ็นต์การยับยั้งอนุมูลอิสระโดยวิธี DPPH สูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 คือเท่ากับ 90.03 เปอร์เซ็นต์ และมีปริมาณสารฟลาโวนอยด์ที่สูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 คือเท่ากับ 342 mgCE/mlDW นอกจากนี้ ยังพบว่าคอมบูชาจากรากบัวอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส มีค่าเปอร์เซ็นต์การยับยั้งอนุมูลอิสระ และมีปริมาณสารฟลาโวนอยด์ใกล้เคียงกับ คอมบูชาจากรากบัวอบแห้งที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส จากการทดลองคอมบูชาจากรากบัวที่มีการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส มีความเหมาะสมในการนำไปต่อยอดในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ต่อไป

คำสำคัญ: รากบัว คอมบูชา โพรไบโอติก โพรไบโอติก

ABSTRACT

This research investigates the production of Kombucha from dried lotus root with different drying temperatures (50, 55, and 60 degrees Celsius) using probiotic microorganisms. The study examines the optimal drying conditions of the raw material, with three different drying temperatures at 50, 55, and 60 degrees Celsius for 48 hours. The pH, sweetness value, number of microorganisms, antioxidant activity, and flavonoid content were analyzed after 15 days of fermentation. It was found that the pH of the samples decreased continuously, while the sweetness value increased and decreased in some samples. The highest microbial count was found in the Kombucha from dried lotus root dried at 50 degrees Celsius, with a statistically significant difference at a 95% confidence level, reaching 8.7×10^7 cfu/ml on day 15 of fermentation. Additionally, Kombucha from dried lotus root at 55 degrees Celsius showed the highest free radical inhibition percentage using the DPPH method, with a statistically significant difference at a 95% confidence level, reaching 90.03%. It also had the highest flavonoid content at 342 mgCE/mlDW, with statistical significance at a 95% confidence level. Furthermore, Kombucha from dried lotus root at 50 degrees Celsius showed free radical inhibition and flavonoid content similar to that of Kombucha from dried lotus root at 55 degrees Celsius. Based on the experiment, Kombucha from lotus root dried at 50 degrees Celsius is suitable for further product development.

Key Words: Lotus root, Kombucha, Prebiotic, Probiotic

บทนำ

คอมบูชา (Kombucha) หรือชาหมัก เป็นเครื่องดื่มที่ส่งผลดีต่อสุขภาพของผู้ที่บริโภค เพราะไม่เพียงมีสรรพคุณเช่นเดียวกับชา แต่ยังมีเชื้อโพรไบโอติกที่เป็นกลุ่มเชื้อจุลินทรีย์ และยีสต์ที่เป็นประโยชน์ต่อร่างกายอุดมไปด้วยสารต้านอนุมูลอิสระ (Ahmed *et al.*, 2020) ในผลิตภัณฑ์ Kombucha ที่หมักจากชาเขียวจะอุดมไปด้วยสารต้านอนุมูลอิสระหลายชนิดที่ช่วยป้องกัน หรือยับยั้งความเสียหายของเซลล์ที่เกิดขึ้นจากอนุมูลอิสระอย่างสารโพลีฟีนอล (Polyphenol) (ธีรพงษ์ เทพภรณ์, 2557) โดยในปัจจุบันมีงานวิจัยที่ศึกษาคุณสมบัติของ Kombucha ในด้านนี้กับหนูทดลองที่ได้รับสารละลายตะกั่วติดต่อกัน 45 วัน โดยแบ่งหนูทดลองออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่กิน Kombucha ควบคู่กับได้รับ

สารตะกั่ว กับกลุ่มที่ไม่ได้กิน Kombucha พบว่าเซลล์ที่ถูกทำลายจากสารตะกั่วของหนูทดลองกลุ่มแรกนั้นมีจำนวนลดลง แสดงให้เห็นว่า เครื่องดื่มชนิดนี้สามารถช่วยลดความเป็นพิษของตับจากการได้รับสารเคมีที่เป็นพิษได้ (Kapp and Sumner, 2019)

โพรไบโอติก (Probiotic) เป็นเชื้อจุลินทรีย์ที่อาศัยอยู่ในลำไส้ใหญ่ของมนุษย์ ซึ่งเป็นจุลินทรีย์ที่มีประโยชน์ต่อร่างกาย เช่น แบคทีเรียที่สร้างกรดแล็กติก (Lactic acid bacteria, LAB) ที่มักพบในผลิตภัณฑ์อาหารหมัก เช่น กิมจิ นมเปรี้ยว โยเกิร์ตและแหมม เป็นต้น (ธารารัตน์ ศุภศิริ, 2542) ซึ่งเชื่อโพรไบโอติกสามารถช่วยในการปรับสมดุลลำไส้ มีความสามารถยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียก่อโรค ช่วยย่อยอาหารที่มนุษย์ย่อยไม่ได้ หรือย่อยได้ไม่หมด ช่วยการเพิ่มการดูดซึมของสารอาหาร ลดระดับคอเรสเตอรอล และสร้างวิตามินที่เป็นประโยชน์กับร่างกาย (Fuller, 1989) ซึ่งการที่เชื่อในกลุ่มโพรไบโอติกจะสามารถเพิ่มจำนวนได้นั้นนอกจากการรับประทานอาหารที่มีแบคทีเรียกลุ่มโพรไบโอติกโดยตรงแล้วนั้นผู้บริโภคสามารถเพิ่มปริมาณเชื้อโพรไบโอติกได้อีกวิธีคือการรับประทานอาหารที่มีสารอาหารที่ไปถึงเชื้อโพรไบโอติกที่อยู่ในลำไส้ได้โดยตรงที่เรียกว่า พรีไบโอติก (Gibson and Roberfroid, 1995)

บัวหลวง จัดเป็นไม้ล้มลุก มีอายุหลายปี ลำต้นมีทั้งเป็นเหง้าอยู่ใต้ดินและเป็นไหลอยู่เหนือดินได้น้ำ ลักษณะของเหง้าเป็นท่อนยาว มีปล้องสีเหลืองอ่อนจนถึงสีเหลือง ในรากบัวหลวงมีสารที่มีคุณสมบัติเป็นสารพรีไบโอติก (Phanrawi, 2017) ซึ่งสารพรีไบโอติก (Prebiotic) คือ สารอาหารซึ่งร่างกายมนุษย์ไม่สามารถย่อย และไม่ถูกดูดซึมในระบบทางเดินอาหารทั้งกระเพาะอาหารและลำไส้เล็ก แต่จะถูกย่อยด้วยแบคทีเรียบริเวณลำไส้ใหญ่ โดยจะกระตุ้นการทำงานและส่งเสริมการเจริญของจุลินทรีย์โพรไบโอติก จัดเป็นอาหารในกลุ่มอาหารฟังก์ชัน (Functional food) คืออาหารที่มีสารอื่นที่เป็นประโยชน์ต่อสุขภาพ นอกเหนือจากมีสารอาหารที่มีคุณค่าทางโภชนาการ เช่น ช่วยป้องกันโรค และรักษาโรคได้แล้ว ยังมีประโยชน์ต่อสุขภาพ ซึ่งสารพรีไบโอติก สามารถพบได้ในอาหารหลายชนิด โดยเฉพาะในผักที่มีการสะสมอาหาร เช่น รากชิโครี หัวอาร์ทิโชค กระเทียม ห่อไม้ฝรั่ง ผลไม้บางชนิด และในเมล็ดธัญพืชบางชนิด เป็นต้น (Fuller and Gibson, 1997)

จากที่กล่าวมาข้างต้น ผู้วิจัยมีแนวความคิดในการพัฒนาเครื่องดื่มเพื่อสุขภาพโดยการหมักขารากบัว เพื่อให้ผู้บริโภคได้คุณประโยชน์จากสารสำคัญในขารากบัว แล้วยังได้สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่เกิดจากการหมักโดยเชื้อจุลินทรีย์ที่มีประโยชน์ด้วย ซึ่งผู้วิจัยต้องการพัฒนากระบวนการผลิตคอมบูชาจากรากบัว โดยมีการควบคุมอุณหภูมิในการอบแห้งรากบัวเพื่อเป็นการหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิต นอกจากนี้ผู้วิจัยคาดว่าจะช่วยส่งเสริมการนำรากบัวมาแปรรูปทำให้เกิดการสร้างรายได้ในชุมชนในพื้นที่เป้าหมาย ซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีความต้องการในการแปรรูปผลิตภัณฑ์จากรากบัว ซึ่งในการทดลองนี้พื้นที่เป้าหมายที่มีความร่วมมืออยู่ในชุมชนคือ เขตพื้นที่ องค์การบริหารส่วนตำบลทับกฤช อำเภอยางชุมน้อย จังหวัดนครราชสีมา ที่มีเกษตรกรทำนาบัวหลวงเป็นจำนวนมาก

วิธีการดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมหัวเชื้อ Symbiotic Culture of Bacteria and Yeast หรือเรียกว่า SCOBY โดยนำใบชาดำ 2.575 กรัม ต้มกับน้ำสะอาด 500 มิลลิลิตร เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นปรับความหวานให้ได้ 15 บริกซ์ จากนั้นกรองใบชาออกและนำน้ำใส่ขวดโหล รอให้น้ำเย็นใส่สับปะรดลงในขวดโหล 150 กรัม ปิดปากโหลด้วยผ้าขาวบางมัดด้วยยาง จากนั้นนำโหลไปวางในที่ร่มที่อุณหภูมิห้อง อย่างน้อย 1-21 สัปดาห์ หรือจนกว่าหัวเชื้อ “SCOBY” จะขึ้นใช้จุลินทรีย์ที่ก่อตัวเป็นเซลล์โกลที่มีลักษณะคล้ายวุ้นอยู่ด้านบนน้ำหมักเพื่อนำไปหมักคอมบูชาจากรากบัว

2. หมักคอมบูชาจากรากบัวด้วยเชื้อจุลินทรีย์ SCOBY โดยการนำรากบัวที่ได้จากนาบัวในเขตพื้นที่อำเภอทับกฤช มาทำการล้างแล้วหั่นเป็นชิ้นมาผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 55 และ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง มาทำการต้มในน้ำสะอาด 80 องศาเซลเซียส ในอัตราส่วน 1 : 30 w/v (g/ml) เป็นเวลา 15 นาที ปรับบริกซ์น้ำตาลให้ได้ 15 Brix ทิ้งให้เย็นจากนั้นลงหัวเชื้อ SCOBY หมักทิ้งไว้ 15 วันทำการเก็บผล

3. วัดการเจริญของเชื้อโพรไบโอติกในผลิตภัณฑ์ชารากบัวหมัก นำตัวอย่างก่อนและหลังการหมักมาทำการวัดการเจริญของเชื้อโพรไบโอติกโดยการนับจำนวนจุลินทรีย์ที่มีชีวิตโดยวิธี Pour plate โดยใช้อาหาร MRS วัดค่า pH และวัดค่าความหวาน

4. การวิเคราะห์ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระในคอมบูชาจากรากบัว โดยวิธี DPPH

ทดสอบประสิทธิภาพในการต้านสาร อนุมูลอิสระ DPPH radical scavenging ability โดยใช้ 2,2- diphenyl-1-picryl-hydrazyl radical (DPPH) เป็น อนุมูลอิสระ เริ่มจากนำ สารสกัดตัวอย่าง ปริมาตร 150 ไมโครลิตร ใส่ในหลอดทดลอง เติมสารละลาย DPPH ความเข้มข้น 0.6 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 3 มิลลิลิตร เขย่าให้ เข้ากัน เก็บในที่มืดอุณหภูมิห้อง 30 นาที วัดค่าการดูดกลืน แสงที่ความยาวคลื่น 517 นาโนเมตร โดยใช้น้ำกลั่นเป็น blank แทนสารสกัดตัวอย่าง และใช้ Trolox ความเข้มข้น 25, 50, 100, 300 และ 600 μM เป็นสารมาตรฐาน นำค่าที่ได้ไปสร้างกราฟมาตรฐาน จากนั้นนำผลที่ได้จาก การทดสอบสารสกัดจากสมุนไพรไปเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐาน เพื่อคำนวณหาประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระ รายงานผลในหน่วยของ μmol Trolox ต่อตัวอย่าง 1 กรัม

5. การวิเคราะห์ปริมาณสารฟลาโวนอยด์ในคอมบูชาจากรากบัว (ดัดแปลงวิธีจาก Prommuak *et al.*, 2008)

วิเคราะห์ปริมาณสารฟลาโวนอยด์โดยวิธี aluminum chloride colorimetry โดยใช้เคอร์ซีติน (Quercetin) เป็นสารมาตรฐาน (ความเข้มข้น 12.5-100 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร) ละลายสารสกัดด้วยเมทานอล นำสารสกัดแต่ละชนิดมา 0.5 มิลลิลิตร ความเข้มข้นของสารสกัด 1 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร แล้วเติมเอทานอล 95 % ลงไป 1.5 มิลลิลิตร จากนั้นเติมสารละลาย aluminium chloride ความเข้มข้น 10 % ปริมาณ 0.1 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันแล้วนำไปเติมสารละลาย potassium acetate ความเข้มข้น 1 โมลาร์

ปริมาณ 0.1 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตร ด้วยน้ำกลั่นจนครบ 5 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที นำสารละลายที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 415 นาโนเมตร คำนวณหาปริมาณสารฟลาโวนอยด์ ในสารสกัดโดยเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานของสารมาตรฐาน เคอร์ซีติน ในหน่วยมิลลิกรัมสมมูลของเคอร์ซีตินต่อกรัมสาร สกัด (mg of quercetin equivalent /g extract)

วิเคราะห์ผลโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS ในการเปรียบเทียบความแตกต่างรายคู่ด้วยวิธี Scheffe' test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ผลการวิจัย

ผลการวัดการเจริญของเชื้อโพรไบโอติกของคอมบูชาจากรากบัวอบแห้ง

ผลของการวัดจำนวนจุลินทรีย์ของคอมบูชาจากรากบัวอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 55 และ 60 องศาเซลเซียส พบว่า จำนวนจุลินทรีย์ในน้ำหมักตลอดระยะเวลาการหมักของทุกสภาวะมีแนวโน้มไม่คงที่ เนื่องมาจากการใช้หัวเชื้อที่อยู่ในรูป SCOBY ซึ่งเป็นแผ่นวุ้นโดยมีเชื้อจุลินทรีย์ที่มีความหลากหลาย ซึ่งเชื้อจุลินทรีย์ที่ตรวจสอบในน้ำหมักเป็นกลุ่มเชื้อ Lactic Acid Bacteria (LAB) เมื่อมีการเจริญของเชื้อในกลุ่มที่สร้างแผ่นวุ้นทำให้เชื้อจุลินทรีย์ที่อยู่ในน้ำหมัก สามารถเข้าไปอยู่ในรูพรุนของแผ่นวุ้นได้ ทำให้จำนวนของเชื้อมีการเปลี่ยนแปลงได้ จึงต้องทำการวัดจำนวนจุลินทรีย์ในน้ำหมักเพื่อตรวจสอบว่าจำนวนเชื้อโพรไบโอติกที่มีในน้ำหมักมีปริมาณเพียงพอต่อการบริโภคแล้วทำให้เกิดประโยชน์ต่อร่างกายหรือไม่ จากผลของจำนวนจุลินทรีย์ในน้ำหมักคอมบูชาจากรากบัวอบแห้ง (ตารางที่ 1) เมื่อการหมักเสร็จสิ้นมีค่ามากกว่า 10^6 cfu/ml ซึ่งเป็นค่าต่ำที่สุดเมื่อบริโภคเข้าไปแล้วทำให้เกิดประโยชน์ต่อร่างกาย โดยคอมบูชาจากรากบัวอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีการเจริญของเชื้อมากที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเวลาผ่านไป 9 วัน พบจำนวนเชื้อจุลินทรีย์ 7.5×10^7 cfu/ml ในขณะที่คอมบูชาจากรากบัวอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 ให้จำนวนเชื้อจุลินทรีย์สูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ความเชื่อมั่นร้อยละ 95 คือเท่ากับ 8.7×10^7 cfu/ml เมื่อสิ้นสุดการหมักที่เวลา 15 วัน จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิในการอบแห้งมีผลต่อการเพิ่มจำนวนของเชื้อจุลินทรีย์ในคอมบูชาจากรากบัว นอกจากนี้อุณหภูมิในการอบแห้งยังมีผลต่อการเจริญต่อการเข้าสู่ช่วง log phase ของจุลินทรีย์ในคอมบูชาจากรากบัวจะเห็นได้ว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงกว่าจะทำให้เชื้อจุลินทรีย์สามารถเจริญเข้าสู่ช่วง log phase ได้ดีกว่ารากบัวที่อบแห้งในอุณหภูมิที่ต่ำกว่า ซึ่งผลจะสอดคล้องกับความเป็นกรด - ด่างที่เกิดขึ้น (ภาพประกอบ 1) ทั้งนี้อุณหภูมิในการอบที่สูงทำให้เกิดการย่อยสลายสารโพรไบโอติกในรากบัวให้กลายเป็นน้ำตาล ทำให้ช่วงแรกเจริญได้เร็วกว่าแต่ในระยะเวลาการหมักที่นานขึ้นเป็นระยะเวลาที่ 15 วัน ในกลุ่มตัวอย่างที่ใช้รากบัวอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำกว่ากลับมีค่าการเจริญสูงกว่าเป็นเพราะมีงานวิจัยพบว่า ในรากบัวมีสารในกลุ่มสารโพรไบโอติกอยู่ซึ่งในระยะแรกของการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์จะใช้น้ำตาลกลุ่มที่นำมาใช้ในการเจริญได้ง่ายก่อน หลังจากนั้นเชื้อจุลินทรีย์ค่อยจะเริ่มใช้น้ำตาลจาก

กลุ่มที่ต้องมีการย่อยสลายแล้วค่อยใช้ได้ ซึ่งสารในกลุ่มสารพรีไบโอติกส่วนใหญ่จะเป็นน้ำตาลในกลุ่มโอลิโกแซ็กคาไรด์ที่นำไปใช้ได้ยากกว่า จึงทำให้เชื้อจุลินทรีย์เพิ่มจำนวนมากขึ้นในตอนท้ายของการหมักในเวลา 15 วัน (Phanrawi, 2017) (ตารางที่ 1)

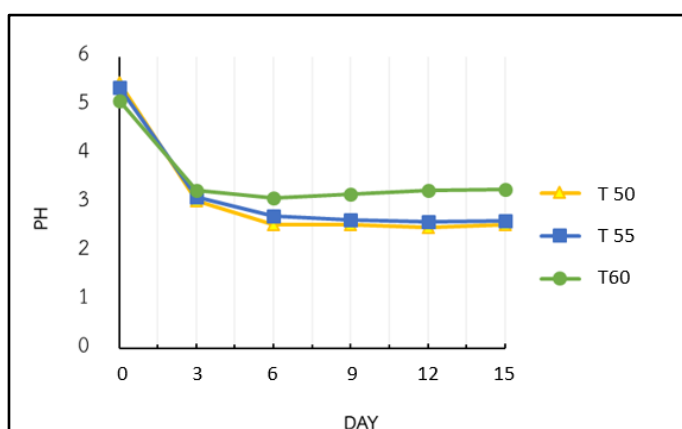
ตารางที่ 1 ผลของอุณหภูมิในการอบแห้งขารากบัวต่อการเจริญของเชื้อโพรไบโอติกในผลิตภัณฑ์คอมบูชาจากรากบัว

Sample (Lotus root)	Day / (cfu/ml)					
	0	3	6	9	12	15
T 50	1.35×10^5 ^a	4.1×10^6 ^c	3.0×10^6 ^c	2.5×10^7 ^c	3.5×10^7 ^a	8.7×10^5 ^a
T 55	1.3×10^5 ^a	2.4×10^7 ^a	1.1×10^7 ^b	6.3×10^7 ^b	7.0×10^6 ^c	8.0×10^5 ^b
T 60	1.2×10^5 ^a	8.0×10^6 ^b	6.2×10^7 ^a	7.5×10^7 ^a	2.8×10^7 ^b	2.1×10^5 ^c

* Means within the same column follow by different letters showed significantly different between treatments by Scheffe' test at $P \leq 0.05$

ผลการวัดค่าความเป็นกรด-ด่างของคอมบูชาจากรากบัวอบแห้ง

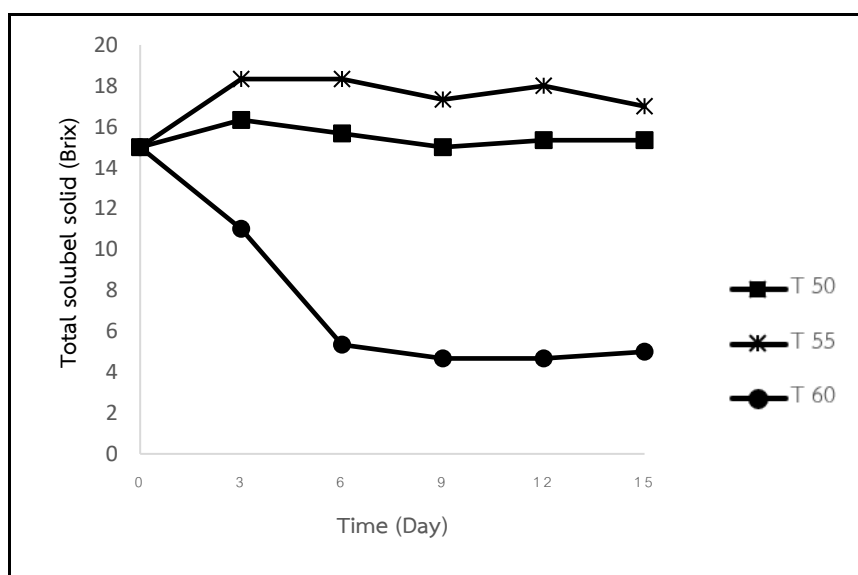
จากการวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง พบว่า คอมบูชาจากรากบัวอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 55 และ 60 องศาเซลเซียส มีค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้น เท่ากับ 5.46 ± 0.15 , 5.37 ± 0.17 และ 5.10 ± 0.07 ตามลำดับ และลดอย่างต่อเนื่องจนถึงวันที่ 12 จากนั้นค่าความเป็นกรด-ด่าง มีการเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในวันที่ 15 ซึ่งเป็นวันสิ้นสุดการหมัก เท่ากับ 2.54 ± 0.10 , 2.62 ± 0.11 และ 3.27 ± 0.22 ตามลำดับ (ภาพประกอบ 1)



ภาพประกอบ 1 ค่า pH ของผลิตภัณฑ์คอมบูชาจากรากบัวในระหว่างกระบวนการหมัก

ผลการวัดค่าความหวานของคอมบูชาจากรากบัวอบแห้ง

ผลจากการวัดค่าความหวานของคอมบูชาจากรากบัวอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 55 และ 60 องศาเซลเซียส โดยทั้ง 3 สภาวะ มีค่าความหวานเริ่มต้นที่ 15 Brix เท่ากัน โดยคอมบูชาจากรากบัวอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 55 และ 60 องศาเซลเซียส โดยตลอดระยะเวลาการหมักทั้ง 3 สภาวะ พบว่า คอมบูชาจากรากบัวอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 และ 55 องศาเซลเซียส มีค่าความหวานเพิ่มขึ้น ในขณะที่คอมบูชาจากรากบัวอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีค่าความหวานลดลงไม่คงที่หลังสิ้นสุดการหมัก ซึ่งมีทั้งค่าความหวานที่ลดลงและเพิ่มขึ้น (ภาพประกอบ 2) มีความเป็นไปได้ว่าเชื้อ SCOBY ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ซึ่งเกิดจากเชื้อธรรมชาติ โดยใช้สับปะรด น้ำตาล ชาเป็นสารตั้งตัว ทำให้เกิดเชื้อแบคทีเรียและยีสต์ที่หลากหลายทำให้มีแบคทีเรียบางชนิด เช่นแบคทีเรียสกุล *Gluconobacter* ที่มีความสามารถในการเปลี่ยนน้ำตาลเป็นกรดอะซิติก และยังสามารถในการผลิตน้ำตาลแอลกอฮอล์ซึ่งเป็นสารให้ความหวานที่ใช้ในอาหาร เพื่อทดแทนน้ำตาล มักพบให้ลูกอม หมากฝรั่ง อาหารสำหรับผู้ที่ต้องการควบคุมน้ำหนัก เป็นต้น (นิสา ร่มสัมช่า และคณะ, 2564)

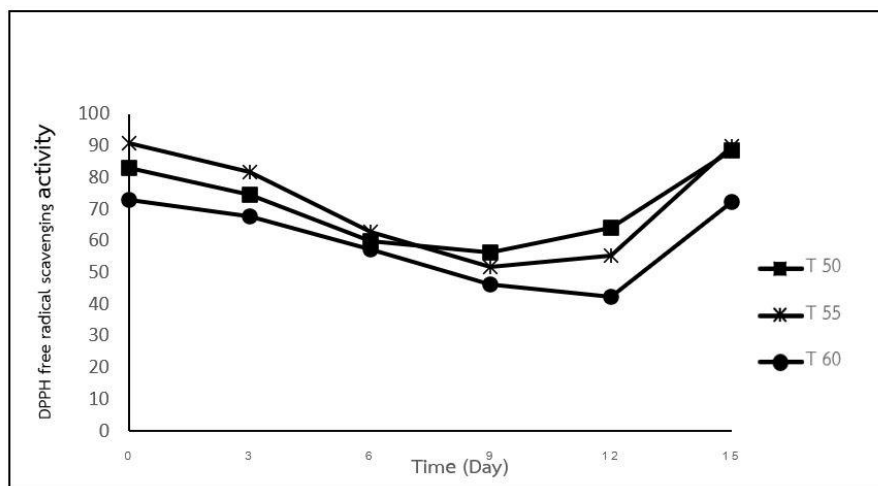


ภาพประกอบ 2 การเปลี่ยนแปลงของความหวาน (Brix) ระหว่างกระบวนการหมักในผลิตภัณฑ์คอมบูชาจากรากบัว

ผลการทดสอบประสิทธิภาพการต้านสารอนุมูลอิสระ โดยวิธี DPPH radical scavenging ability จากการหมักคอมบูชาจากรากบัวอบแห้ง

ผลการทดสอบประสิทธิภาพในการต้านสารอนุมูลอิสระ โดยวิธี DPPH radical scavenging ability ของคอมบูชาจากรากบัวอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 55 และ 60 องศาเซลเซียส พบว่า คอมบูชาจาก

รากบัวอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 55 และ 60 องศาเซลเซียส มีค่ากิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระที่ลดลงตั้งแต่เริ่มหมักและลดลงเรื่อย ๆ จนถึงระยะเวลาการหมักที่ 12 วัน ค่ากิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระจึงค่อย ๆ เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนสิ้นสุดการหมัก โดยกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระร้อยละที่สูงที่สุด อยู่ในช่วงระยะเวลาการหมักที่ 15 วัน มีกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระร้อยละ เท่ากับ 88.73 ± 17.23 , 90.03 ± 1.76 , 72.22 ± 3.35 ตามลำดับ (ภาพประกอบ 3) ซึ่งเป็นไปได้ว่ากิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระที่ลดลงอย่างต่อเนื่องและเพิ่มขึ้น เนื่องจากจำนวนจุลินทรีย์ที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้แบคทีเรียกรดอะซิติกที่เพิ่มขึ้นก็ส่งผลต่อกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน แต่เนื่องจากในสภาวะที่เป็นกรด phenolic compound จะมีความเสถียรมากขึ้นทำให้ยากที่จะปลดปล่อยโปรตรอนที่จะไปจับกับ DPPH ทำให้กิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระลดลง (จุฑามาศ พรสันเทียะ และคณะ, 2563)

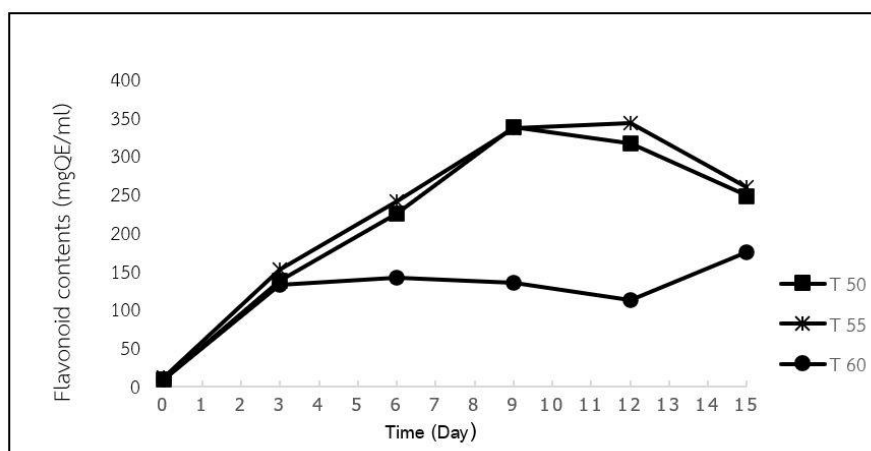


ภาพประกอบ 3 ค่าประสิทธิภาพการต้านอนุมูลอิสระในระหว่างการหมักผลิตภัณฑ์คอมบูชาจากรากบัว

ผลการวิเคราะห์ปริมาณสารฟลาโวนอยด์ในคอมบูชาจากรากบัว

ผลการวิเคราะห์สารฟลาโวนอยด์ aluminum chloride colorimetry ของคอมบูชาจากรากบัวอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 55 และ 60 องศาเซลเซียส พบว่า มีปริมาณสารฟลาโวนอยด์สูงที่สุด เท่ากับ 316, 342 และ 174 mgQE/ml ตามลำดับ (ภาพประกอบ 4) โดยปริมาณสารฟลาโวนอยด์ของคอมบูชาจากรากบัวอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสสูงที่สุดอยู่ในช่วงเวลาหมักที่ 9 วัน ในขณะที่คอมบูชาจากรากบัวอบแห้งที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส มีปริมาณสารฟลาโวนอยด์สูงที่สุดอยู่ช่วงระยะเวลาหมักที่ 12 วัน และคอมบูชาจากรากบัวอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสมีปริมาณสารฟลาโวนอยด์สูงที่สุดอยู่ช่วงระยะเวลาหมักที่ 15 วัน จากผลของการ

วิเคราะห์กิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระกับจำนวนจุลินทรีย์ และการเพิ่มขึ้นของปริมาณสารฟลาโวนอยด์อาจเกิดจากจุลินทรีย์บางชนิดที่อยู่ใน SCOBY ซึ่งมีความสามารถในการย่อยสลายสารประกอบโพลีฟีนอลใน รากบัวให้กลายเป็นฟลาโวนอยด์ในขณะที่อุณหภูมิที่สูงขึ้น ส่งผลต่อปริมาณสารฟลาโวนอยด์ทั้งหมด และความสามารถในการยับยั้งอนุมูล DPPH ลดลงไปด้วย (Laureys *et al.*, 2020)



ภาพประกอบ 4 ปริมาณสารฟลาโวนอยด์ทั้งหมดระหว่างการหมักในผลิตภัณฑ์คอมบูชาจากรากบัว

สรุปผลการวิจัย

จากการทดลองผลิตคอมบูชาจากรากบัวอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส จะให้สภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการนำมาเป็นวัตถุดิบในการหมักเมื่อเทียบระยะเวลาในการหมักกับปริมาณ สารต้านอนุมูลอิสระที่ได้ และอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง เมื่อเทียบกับอีก 2 สภาวะที่ทำการทดลองเพราะในคอมบูชาจากรากบัวอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสใช้อุณหภูมิในการอบที่ต่ำกว่าทำให้ช่วยในเรื่องการประหยัดพลังงานในการอบแห้ง และยังคงคุณลักษณะของวัตถุดิบได้ดี อีกทั้งหลังจากการหมักยังให้ปริมาณสารฟลาโวนอยด์ใกล้เคียงกับคอมบูชาจากรากบัวอบแห้งที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส ในระยะเวลาการหมักที่ 9 วัน นอกจากนี้ยังพบว่าในคอมบูชาจากรากบัวอบแห้งที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส มีจำนวนเชื้อจุลินทรีย์อยู่ในปริมาณที่สูงกว่าคอมบูชาจากรากบัวอบแห้งที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียสด้วย จากที่กล่าวมาคอมบูชาจากรากบัวอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส สามารถนำไปต่อยอดเป็นผลิตภัณฑ์อาหารเพื่อสุขภาพได้ในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากสถาบันวิจัย และพัฒนามหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์ ประจำปี 2565

เอกสารอ้างอิง

- จุฑามาศ พรสันเทียะ, ทิพย์วรินทร์ รีมลัดวน, กุณทิกา เวชกลาง และนิสา ร่มสั่มซ่า. (2563). *ฤทธิ์ยับยั้งแบคทีเรีย และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของคอมบูชาในกระบวนการหมัก, นครราชสีมา: คณะวิทยาศาสตร์และศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน.*
- ธารรัตน์ ศุภศิริ. (2542). Probiotic: แบคทีเรียเพื่อสุขภาพ, *วารสารวิทยาศาสตร์, 53*(6), 357-360.
- ธีรพงษ์ เทพภรณ์. (2557). *ชา. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.*
- นิสา ร่มสั่มซ่า, จุฑามาศ พรสันเทียะ, ทิพย์วรินทร์ รีมลัดวน และกุณทิกา เวชกลาง. (2564). *คุณสมบัติทางชีวภาพของผลิตภัณฑ์คอมบูชาที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการหมัก. นครราชสีมา: คณะวิทยาศาสตร์และศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน.*
- Ahmed, R.F., Hikal, M.S., & Abou-Taleb, K.A. (2020). Biological, chemical and antioxidant activities of different types Kombucha. *Annals of Agricultural Sciences, 65*(1), 35-41.
- Fuller, R. (1989). Probiotics in man and animals. *J Appl Bacteriol, 66*(5), 365-378.
- Fuller, R., & Gibson, G.R. (1997). Modification of the intestinal microflora using probiotics and prebiotics. *Scand. J Gastroenterol, 32*, 28-31.
- Gibson, G.R., & Roberfroid, M.B. (1995). Dietary modulation of the human colonic microbiota: introducing the concept of prebiotic. *J Nutr, 125*, 1401-1412.
- Kapp, M.J. & Sumner, W. (2019). Kombucha: a systematic review of the empirical evidence of human health benefit. *Annals of Epidemiology, 30*, 66-70.
- Laureys, D., Britton, S.J., & De Clippeleer, J. (2020). Kombucha Tea Fermentation: A Review, *Journal of the American Society of Brewing Chemists. 78*(3), 165-174.
- Phanrawi, M. (2017). The Influence of lotus root extract on *Lactobacillus casei* subsp. *rhamnosus* growth in fermented milk. *NSRU Science and Technology Journal, 9*(9), 20-25.
- Prommuak, C., De-Eknamkul, W., & Shotipruk, A. (2008). Extraction of flavonoids and carotenoids from Thai silk waste and antioxidant activity of extracts. *Separation and Purification Technology, 62*(2), 444-448.

การพัฒนาเกม 2 มิติ อิงพิกัดระบบภูมิศาสตร์ เพื่อส่งเสริมการท่องเที่ยว
อำเภอเมือง จังหวัดบุรีรัมย์
Development of a 2D Location-Based Game to Promote Tourism in
Mueang District, Buriram Province

วรินทร์พิพัชร วัชรพงษ์เกษม ณัฐพัฒน์ วิเศษทรานนท์ และ อธิธิพล สมเสมอ*
Warinphiphat Watcharapongkasem, Nattapat Wisettranon and
Aittiphon Somsamer*

สาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์
Technology Information Program, Faculty of Science, Buriram Rajabhat University
Email: aittiphon.somsamer@gmail.com

Received : June 27, 2024
Revised : September 19, 2024
Accepted : November 29, 2024

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์ 1) พัฒนาและหาคุณภาพของเกม 2 มิติ อิงพิกัดระบบภูมิศาสตร์ เพื่อส่งเสริมการท่องเที่ยว อำเภอเมือง จังหวัดบุรีรัมย์ 2) เพื่อประเมินความพึงพอใจของนักท่องเที่ยวที่มีต่อเกม 2 มิติ อิงพิกัดระบบภูมิศาสตร์ เพื่อส่งเสริมการท่องเที่ยว อำเภอเมือง จังหวัดบุรีรัมย์ กลุ่มตัวอย่างในการวิจัย ได้แก่ ผู้เชี่ยวชาญด้านเกมและการท่องเที่ยวจำนวน 5 คน โดยใช้วิธีการเลือกแบบเจาะจง (Purposive sampling) และนักท่องเที่ยวที่เดินทางมาท่องเที่ยวในจังหวัดบุรีรัมย์ จำนวน 385 คน โดยใช้วิธีการเลือกแบบบังเอิญ (Accidental sampling) เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยประกอบไปด้วย 1) เกม 2 มิติ อิงพิกัดระบบภูมิศาสตร์ เพื่อส่งเสริมการท่องเที่ยว อำเภอเมือง จังหวัดบุรีรัมย์ 2) แบบประเมินคุณภาพของเกม 2 มิติ ที่ผ่านการหาคุณภาพด้วยค่าความตรงของเนื้อหาโดยมีค่า IOC ตั้งแต่ 0.5 ขึ้นไป และ 3) แบบประเมินความพึงพอใจของนักท่องเที่ยวที่มีต่อเกม 2 มิติ ที่ผ่านการหาคุณภาพด้วยค่าความตรงของเนื้อหาโดยมีค่า IOC ตั้งแต่ 0.5 ขึ้นไป ผลจากการวิจัยพบว่า 1) ผลการประเมินคุณภาพของเกม 2 มิติ โดยผู้เชี่ยวชาญ ในภาพรวมมีคุณภาพอยู่ในระดับมากที่สุด และ 2) ผลการประเมินความพึงพอใจของผู้เล่นที่มีต่อเกม 2 มิติ ในภาพรวมมีความพึงพอใจอยู่ในระดับมาก

คำสำคัญ: เกม 2 มิติ อิงพิกัดระบบภูมิศาสตร์ การท่องเที่ยว บุรีรัมย์

ABSTRACT

The objectives of this research were: 1) to develop and evaluate the quality of a 2D Location-Based Game to Promote Tourism in Mueang District, Buriram Province, and 2) to assess tourists' satisfaction with the 2D Location-Based Game to Promote Tourism in Mueang District, Buriram Province. The research sample consisted of 5 experts in gaming and tourism, selected through purposive sampling, and 385 tourists visiting Buriram Province, selected through accidental sampling. The research instruments included: 1) a 2D Location-Based Game to Promote Tourism in Mueang District, Buriram Province, 2) a quality assessment form for the 2D game, which was validated for content validity with an IOC value of 0.5 or higher, and 3) a satisfaction assessment form for tourists regarding the 2D game, also validated for content validity with an IOC value of 0.5 or higher. The research findings revealed that: 1) the overall quality assessment of the 2D game by experts was at the highest level, and 2) the overall satisfaction assessment of players towards the 2D game was at a high level.

Keywords: 2D game, Location-based, Tourism, Buriram

บทนำ

อุตสาหกรรมการท่องเที่ยวถือเป็นปัจจัยหลักสำคัญของการพัฒนาและส่งเสริมเศรษฐกิจในประเทศเป็นอย่างมาก ที่ได้มีการมุ่งนำจุดเด่นและความเป็นอัตลักษณ์ของท้องถิ่นมานำเสนอ เพื่อเป็นแรงจูงใจในการดึงดูดจากนักท่องเที่ยว (การท่องเที่ยวแห่งประเทศไทย, 2564) ถึงกระนั้นจากแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงทางด้านสถานะทางสังคม การดำเนินชีวิต ได้ส่งผลกระทบเป็นอย่างมาก อันเนื่องจากการระบาดของเชื้อไวรัสโควิด-19 ในช่วงต้นปี พ.ศ. 2563 สะท้อนให้เห็นอย่างชัดเจนจากรายได้ของประเทศที่ลดลงอย่างมาก รายได้สะสมจากการท่องเที่ยวภายในประเทศอยู่ที่ 4.8 แสนล้านบาท (กองเศรษฐกิจการท่องเที่ยวและกีฬา, 2563) และในปีต่อมาลดลงเหลือ 2.16 แสนล้านบาท คิดเป็นร้อยละ 55.15 (กองเศรษฐกิจการท่องเที่ยวและกีฬา, 2565) ผู้ประกอบการที่พึ่งพาธุรกิจท่องเที่ยวจำนวนมากต้องหยุดชะงัก เกิดสถานะการว่างงานและสร้างความไม่มั่นคงในอุตสาหกรรมนี้ กระทรวงการท่องเที่ยวและกีฬาร่วมกับหน่วยงานที่เกี่ยวข้องจึงได้จัดทำแผนพัฒนาการท่องเที่ยวแห่งชาติ ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2566-2570) เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาและผลักดันการท่องเที่ยวให้สอดคล้องกับความท้าทายและสถานการณ์การท่องเที่ยวที่เปลี่ยนไปจากการระบาดของเชื้อไวรัส

จังหวัดบุรีรัมย์ เป็นหนึ่งในเมืองรองตามนโยบายของแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ฉบับที่ 12 ที่ให้ความสำคัญในการสร้างรายได้และกระจายรายได้สู่ท้องถิ่น ก็ได้รับผลกระทบจากสถานการณ์เดียวกัน ด้วยเป็นแหล่งท่องเที่ยวที่มีอัตลักษณ์อันโดดเด่นทั้งด้านประวัติศาสตร์ วัฒนธรรม อีกทั้งยังเป็นที่ยึดใจในฐานะเมืองแห่งเกษตรกรรมและหัตถกรรม (สิริวิธยา คำชมภู และคณะ, 2564) เพื่อเป็นการกระตุ้นฟื้นฟูเศรษฐกิจดังที่กล่าวมาข้างต้น ในแผนพัฒนาการท่องเที่ยวแห่งชาติ ฉบับที่ 3 ยุทธศาสตร์ที่ 4 ได้เสนอแนวทางให้มีการประยุกต์และพัฒนาเทคโนโลยีนำมาช่วยส่งเสริมการท่องเที่ยวเพื่อต่อยอดและสร้างคุณค่าจากทรัพยากรธรรมชาติในปัจจุบันให้ยั่งยืน

การใช้เทคโนโลยีที่ช่วยส่งเสริมการท่องเที่ยวนั้นมีมากมายหลายประเภท และเกมถือเป็นเทคโนโลยีที่สร้างการเรียนรู้ที่น่าสนใจและตื่นเต้น ได้รับความนิยมกันในกลุ่มคนรุ่นใหม่ สามารถนำมาประยุกต์เป็นเครื่องมือในการช่วยส่งเสริมการท่องเที่ยว ที่กระตุ้นและเกิดการมีส่วนร่วมต่อสถานที่ท่องเที่ยวได้ (ณัฐกมล ฤงสุวรรณ และศุภกรณ ดิษฐพันธ์, 2564) ตัวอย่างเช่น เกม Pokémon GO ที่มีการใช้เทคโนโลยีอิงพิกัดระบบภูมิศาสตร์ (Location-based) ให้ผู้เล่นได้ออกเดินทางไปสัมผัสประสบการณ์ยังสถานที่จริง เป็นการเพิ่มจำนวนนักท่องเที่ยว เพื่อให้เกิดการกระจายรายได้และสภาวะทางเศรษฐกิจที่เพิ่มขึ้นของพื้นที่นั้น ๆ (การท่องเที่ยวแห่งประเทศไทย, 2564)

จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้น คณะผู้วิจัยจึงมีเป้าหมายที่จะพัฒนาเกม 2 มิติ อิงพิกัดระบบภูมิศาสตร์ เพื่อส่งเสริมการท่องเที่ยว อำเภอเมือง จังหวัดบุรีรัมย์ โดยเกมที่พัฒนาขึ้นใช้ร่วมกับเทคโนโลยี Location-based เชื่อมโยงกับการทำภารกิจภายในเกม และนำเสนอข้อมูลความรู้ต่าง ๆ ของแหล่งท่องเที่ยวในอำเภอเมือง จังหวัดบุรีรัมย์ ผ่านรูปแบบการเล่นที่กระตุ้นผู้เล่นได้ออกเดินทางไปยังสถานที่จริง เพื่อมุ่งหวังให้เป็นเกมที่กระตุ้นอุตสาหกรรมการท่องเที่ยว อีกทั้งยังได้เรียนรู้ถึงคุณค่าของแหล่งท่องเที่ยว เป็นต้นแบบในการพัฒนาเกมรูปแบบอิงพิกัดระบบภูมิศาสตร์และเพิ่มศักยภาพการท่องเที่ยวให้กับประเทศต่อไป

วัตถุประสงค์การวิจัย

1. พัฒนาและหาคุณภาพของเกม 2 มิติ อิงพิกัดระบบภูมิศาสตร์ เพื่อส่งเสริมการท่องเที่ยว อำเภอเมือง จังหวัดบุรีรัมย์
2. เพื่อประเมินความพึงพอใจของนักท่องเที่ยวที่มีต่อเกม 2 มิติ อิงพิกัดระบบภูมิศาสตร์ เพื่อส่งเสริมการท่องเที่ยว อำเภอเมือง จังหวัดบุรีรัมย์

ขอบเขตของการวิจัย

1. ขอบเขตด้านเนื้อหาและพื้นที่ ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับแหล่งท่องเที่ยว ที่อยู่ในอำเภอเมือง จังหวัดบุรีรัมย์ ด้วยข้อมูลได้แก่ ลักษณะสำคัญทางสภาพแวดล้อม บริบทโดยรอบ จุดเด่นและเอกลักษณ์ของสถานที่ท่องเที่ยว เพื่อนำข้อมูลเหล่านี้ไปใช้ประกอบในการออกแบบและพัฒนาเกม
2. ขอบเขตด้านตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา ประกอบไปด้วย

2.1 ตัวแปรต้น (Independent variables) ได้แก่ เกม 2 มิติ อิงพิภักระบบภูมิศาสตร์ เพื่อส่งเสริมการท่องเที่ยว อำเภอเมือง จังหวัดบุรีรัมย์

2.2 ตัวแปรตาม (Dependent variables) ได้แก่ คุณภาพของเกม 2 มิติ อิงพิภักระบบภูมิศาสตร์ เพื่อส่งเสริมการท่องเที่ยว อำเภอเมือง จังหวัดบุรีรัมย์ และความพึงพอใจของนักท่องเที่ยวที่มีต่อเกม 2 มิติ อิงพิภักระบบภูมิศาสตร์ เพื่อส่งเสริมการท่องเที่ยว อำเภอเมือง จังหวัดบุรีรัมย์

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การท่องเที่ยว (Tourism) หมายถึง กิจกรรมที่มีการเดินทางจากที่อยู่อาศัยปกติไปยังสถานที่ต่าง ๆ เป็นการชั่วคราวด้วยความสมัครใจและพึงพอใจของผู้เดินทาง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อการพักผ่อน การแลกเปลี่ยนวัฒนธรรม การศึกษา การเยี่ยมญาติพี่น้องหรือเพื่อน ซึ่งไม่ใช่เพื่อการประกอบอาชีพหารายได้ (เบญพร แยมจำเมือง, 2566)

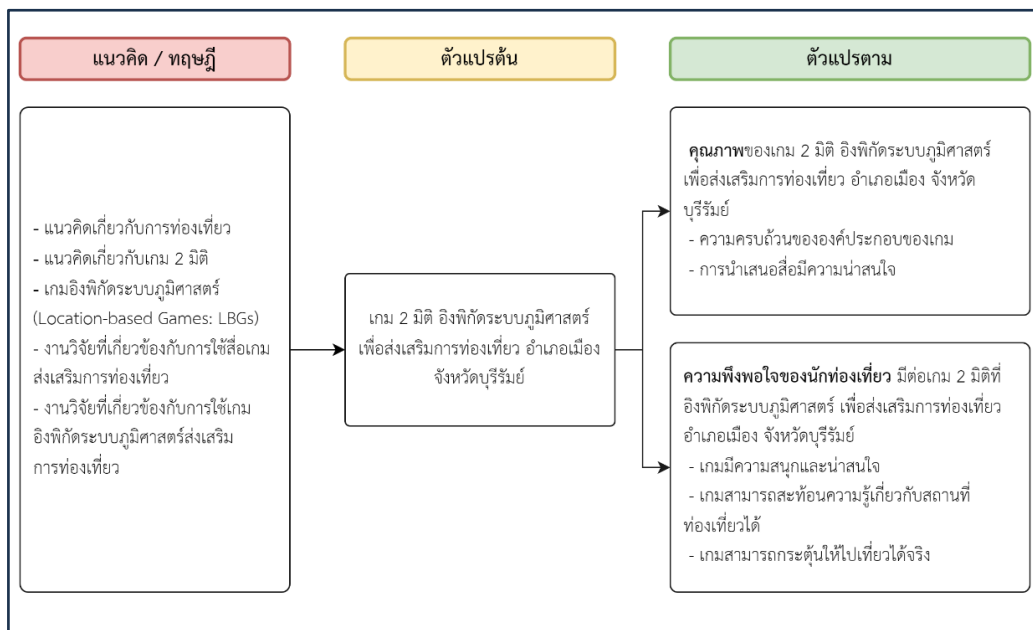
เกม 2 มิติ (2D Game) หมายถึง โปรแกรมประเภทหนึ่ง ที่สามารถสร้างการมีปฏิสัมพันธ์กับผู้เล่นได้โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ความเพลิดเพลินเป็นหลัก และแสดงผลในรูปแบบพื้นผิวเรียบ 2 มิติ คือ แกน X (แนวนอน) และแกน Y (แนวตั้ง) ผู้เล่นจะมองเห็นมุมมองของเกมจากด้านข้าง ด้านบน หรือด้านหน้า เป็นหลัก แต่จะไม่สามารถมองเห็นด้านความลึก หรือ มุมมองได้อย่างอิสระเหมือนเกม 3 มิติ (3D Game) (พงษ์พิพัฒน์ สายทอง และคณะ, 2564)

เกมอ้างอิงพิภักทางภูมิศาสตร์ (Location-based Games : LBGs) หมายถึง เกมที่ผสมผสานโลกเสมือนจริงเข้ากับโลกแห่งความจริง โดยใช้เทคโนโลยี GPS ในการระบุตำแหน่งของผู้เล่น และแสดงผลข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับสถานที่นั้น ๆ ภายในเกม ตัวอย่างเช่น Pokémon GO ซึ่งประสบความสำเร็จอย่างมากในการดึงดูดผู้เล่นให้ออกไปสำรวจสถานที่ต่าง ๆ LBGs จึงกลายเป็นเครื่องมือสำคัญที่ช่วยส่งเสริมการท่องเที่ยว (Batsaras and Xinogalos, 2023)

มีงานวิจัยจำนวนมากที่ชี้ให้เห็นว่า การใช้เกมเป็นเครื่องมือช่วยในการส่งเสริมหรือประชาสัมพันธ์การท่องเที่ยวนั้น ส่งผลให้ผู้เล่นได้รับความรู้และมีความเข้าใจเพิ่มมากขึ้นเกี่ยวกับแหล่งท่องเที่ยว ตัวอย่างเช่น งานวิจัยของ วสันต์ ดอนแก้ว และคณะ (2567) พบว่าเกม 2 มิติที่ใช้เป็นสื่อประชาสัมพันธ์การท่องเที่ยวเชิงอนุรักษ์ ในจังหวัดเชียงรายส่งผลต่อความรู้และความเข้าใจของนักท่องเที่ยวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 งานวิจัยของ ณัฐกมล กุญสุวรรณ และศุภกรณ์ ดิษฐพันธ์ (2564) พบว่า การเข้าถึงกลุ่มเป้าหมายที่ชื่นชอบเกม เป็นการสร้างแรงบันดาลใจในการท่องเที่ยวด้วยประสบการณ์ดิจิทัล อีกทั้งยังเป็นการสร้างความสัมพันธ์ของการเล่นเกมร่วมกับการท่องเที่ยวในสถานที่จริง งานวิจัยของ พชรณัฐ ไคนุ่นภา และกิตติพงษ์ แก้วประเสริฐ (2564) พบว่า การประยุกต์เทคโนโลยีเพื่อเพิ่มมูลค่าของการท่องเที่ยวเชิงประวัติศาสตร์ด้วยสื่อเกมแอนิเมชัน ทำให้ช่วยสร้างความน่าสนใจและช่วยส่งเสริมการท่องเที่ยวให้นักท่องเที่ยวได้เกิดความตระหนักถึงวัฒนธรรมอันทรงคุณค่า

และจากงานวิจัยหลายงานวิจัยชี้ให้เห็นว่า การใช้สื่อเทคโนโลยีการอ้างอิงพิกัดทางภูมิศาสตร์ (Location-based) เป็นเครื่องมือในการส่งเสริมการท่องเที่ยวและมีส่วนช่วยในการรับรู้ข้อมูล สร้างประสบการณ์ร่วมกับสถานที่จริงให้ผู้เล่นได้ ตัวอย่างเช่น งานวิจัยของ Mileva *et al.* (2021) พบว่า แอปพลิเคชันในรูปแบบของเกมที่อ้างอิงพิกัดทางภูมิศาสตร์นั้น มีศักยภาพในการส่งเสริมการท่องเที่ยว โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการดึงดูดความสนใจและสร้างการรับรู้ อีกทั้งยังเป็นการสร้างประสบการณ์ที่ดีให้กับนักท่องเที่ยวด้วย งานวิจัยของ Sheahan *et al.* (2021) พบว่าสื่อเกมในรูปแบบที่อ้างอิงพิกัดทางภูมิศาสตร์ มีศักยภาพในการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของการเรียนรู้ โดยนำเสนอประสบการณ์ที่ผสมผสานระหว่างโลกความจริงและโลกเสมือนจริง ซึ่งนำไปสู่ความเข้าใจอย่างลึกซึ้งเกี่ยวกับสถานที่ ผู้คน และวัฒนธรรม

กรอบแนวคิดในการวิจัย



ภาพประกอบ 1 กรอบแนวคิดในการวิจัย

วิธีการดำเนินการวิจัย

ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

1. ประชากร ประกอบไปด้วย 2 กลุ่ม ได้แก่ 1) ผู้เชี่ยวชาญที่ประสบการณ์เฉพาะทางในการพัฒนาเกมและการท่องเที่ยวในจังหวัดบุรีรัมย์ 2) นักท่องเที่ยวที่มีขีดความสามารถในการท่องเที่ยวภายในอำเภอเมืองบุรีรัมย์ จังหวัดบุรีรัมย์

2. กลุ่มตัวอย่าง ประกอบไปด้วย 2 กลุ่ม ได้แก่ 1) ผู้เชี่ยวชาญที่มีประสบการณ์การพัฒนาเกมไม่ต่ำกว่า 3 ปี จำนวน 3 คนและผู้เชี่ยวชาญด้านการท่องเที่ยวในจังหวัดบุรีรัมย์ไม่ต่ำกว่า 3 ปี จำนวน 2 คน ทั้งหมด 5 คน โดยใช้วิธีการเลือกแบบเจาะจง (Purposive sampling) 2) นักท่องเที่ยวที่เดินทางมาท่องเที่ยวในจังหวัดบุรีรัมย์ จำนวน 385 คน ได้จากการคำนวณสูตรของ Cochran โดยกำหนดระดับความเชื่อมั่น 95% และขอบเขตความคลาดเคลื่อน $\pm 5\%$ โดยใช้วิธีการเลือกแบบบังเอิญ (Accidental sampling)

เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

1. เกม 2 มิติ อิงพิภักระบบภูมิศาสตร์ เพื่อส่งเสริมการท่องเที่ยว อำเภอเมือง จังหวัดบุรีรัมย์
2. แบบประเมินคุณภาพของเกม 2 มิติ สำหรับผู้เชี่ยวชาญ ที่พัฒนาขึ้น
3. แบบประเมินความพึงพอใจของนักท่องเที่ยวที่มีต่อเกม 2 มิติ ที่พัฒนาขึ้น

ขั้นตอนในการสร้างเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

1. เกม 2 มิติ อิงพิภักระบบภูมิศาสตร์ เพื่อส่งเสริมการท่องเที่ยว โดยมีขั้นตอนการสร้างดังนี้

1.1 ขั้นตอนการวิเคราะห์ (Analysis phase)

โดยคณะผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์เกี่ยวกับเนื้อหาและสถานที่ จากการคัดเลือกด้วยเกณฑ์การอิงพิภักระบบภูมิศาสตร์โดยผู้เชี่ยวชาญ และได้สถานที่ทั้งหมด 3 แห่ง ได้แก่ วนอุทยานเขากระโดง ศูนย์เรียนรู้พื้นที่ชุ่มน้ำและนกกระเรียนพันธุ์ไทย และอ่างเก็บน้ำห้วยจระเข้มาก

1.2 ขั้นตอนการออกแบบ (Design phase) โดยมีรายละเอียดดังนี้

1.2.1 การออกแบบแนวความคิด โดยมีเป้าหมายหลักของเกม คือ การตามหาชิ้นส่วนโบราณที่อยู่กับตัวละครศัตรู ซึ่งผู้เล่นต้องกำจัดตัวละครศัตรูที่อยู่ภายในแต่ละด่านของเกม และเก็บรวบรวมชิ้นส่วนให้ครบ กำหนดให้ด่านภายในเกมมีทั้งหมด 3 ด่าน โดยแบ่งเป็นด่านที่ผู้เล่นสามารถเข้าเล่นได้เลยจำนวน 1 ด่าน และด่านผู้เล่นต้องเดินทางไปยังสถานที่จริงในการเข้าเล่นจำนวน 2 ด่าน

1.2.2 การออกแบบตัวละคร ประกอบไปด้วยการสร้างภาพร่างของตัวละครหลังจากที่ร่างภาพแล้ว จึงทำการสร้างภาพเคลื่อนไหวของตัวละครในรูปแบบ Sprite sheet เพื่อเตรียมนำไปใช้ในการพัฒนาเกม โดยใช้โปรแกรม Clip Studio Paint และโปรแกรม Adobe Animate

1.2.3 การออกแบบฉากพื้นหลัง โดยออกแบบให้คล้ายกับสถานที่ท่องเที่ยวจากการคัดเลือกโดยผู้เชี่ยวชาญ ประกอบไปด้วยการสร้างร่างภาพฉากพื้นหลัง หลังจากนั้นจึงทำ

การสร้างฉากและจัดลำดับรูปแบบของฉากใช้เทคนิค Parallax โดยใช้โปรแกรม Adobe Animate และโปรแกรม Tiled

1.2.4 การออกแบบเมนูและหน้าจอสำหรับผู้ใช้งาน โดยมีระบบต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น ระบบการใช้อาวุธ ระบบการซื้อของ ระบบช่องเก็บของ เป็นต้น ประกอบไปด้วยการร่างภาพหน้าเมนู หลังจากนั้น จึงสร้างชิ้นส่วนของหน้าเมนูแต่ละอันเตรียมนำไปประกอบการพัฒนาเกมต่อไป โดยใช้โปรแกรม Adobe Animate

1.2.5 การออกแบบระบบตรวจสอบพิกัดระบบภูมิศาสตร์ โดยเป็นการอ้างอิงตำแหน่งละติจูดและลองจิจูดของผู้เล่นเป็นหลัก จากการกำหนดพื้นที่จำลองที่อยู่ภายในเกม เพื่อเป็นการตรวจสอบว่าผู้เล่นอยู่ในพื้นที่แหล่งท่องเที่ยวที่กำหนดหรือไม่

1.3 ขั้นตอนการพัฒนา (Development phase)

โดยคณะผู้วิจัยได้ทำการสร้างต้นแบบของเกม (Prototype) ก่อนเพื่อเป็นการทดลองระบบคำสั่ง ฟังก์ชัน การใช้งาน และกลไกในการพัฒนาเกมต่าง ๆ หลังจากนั้นจึงนำภาพกราฟิกที่ผ่านขั้นตอนการออกแบบ มาประกอบเข้ากับในส่วนของต้นแบบเกมที่ได้มีการพัฒนาไว้เป็นโครงร่างแล้วโดยใช้โปรแกรม Construct 3

1.4 ขั้นตอนการทดสอบและประเมิน (Evaluation phase)

หลังจากการขั้นตอนพัฒนาแล้ว คณะผู้วิจัยจึงได้ทำการทดสอบระบบเบื้องต้นเพื่อตรวจสอบหาข้อผิดพลาดและปัญหาที่เกิดขึ้นภายในเกม หลังจากนั้นนำไปใช้ในการทดสอบและประเมินผลโดยกลุ่มตัวอย่างในการวิจัย

2. แบบประเมินคุณภาพ โดยมีขั้นตอนการสร้างดังนี้

คณะผู้วิจัยศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการสร้างแบบประเมินคุณภาพ โดยมีลักษณะเป็นแบบมาตราส่วน (Rating scale) 5 ระดับ แบ่งออกเป็น 7 ด้าน จำนวนทั้งหมด 35 ข้อคำถาม จากนั้นนำแบบประเมินไปให้ผู้เชี่ยวชาญตรวจสอบด้านความตรงของเนื้อหา (Content Validity) เพื่อหาค่าความสอดคล้องระหว่างวัตถุประสงค์ IOC โดยคัดเลือกข้อคำถามที่มีค่าดัชนี IOC ตั้งแต่ 0.5 ขึ้นไป สุดท้ายนำแบบประเมินที่มีการปรับปรุงแก้ไขแล้ว ไปใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูล

3. แบบประเมินความพึงพอใจ โดยมีขั้นตอนการสร้างดังนี้

คณะผู้วิจัยศึกษาข้อมูลจากเอกสาร ตำรา และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสร้างแบบประเมินความพึงพอใจโดยมีลักษณะเป็นแบบมาตราส่วน (Rating scale) 5 ระดับ จำนวนทั้งหมด 7 ข้อคำถาม จากนั้นนำแบบประเมินความพึงพอใจไปให้ผู้เชี่ยวชาญตรวจสอบความถูกต้อง เช่นเดียวกันกับการตรวจสอบความถูกต้องของแบบประเมินคุณภาพ สุดท้ายนำแบบประเมินความพึงพอใจที่มีการปรับปรุงแก้ไขแล้ว ไปใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูลต่อไป

การเก็บรวบรวมข้อมูล

คณะผู้วิจัยนำเกม 2 มิติที่พัฒนาขึ้น ไปใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูลการประเมินหาคุณภาพโดยผู้เชี่ยวชาญ และการประเมินความพึงพอใจของกลุ่มตัวอย่างนักท่องเที่ยวยุคใหม่ที่เล่นเกม 2 มิติ

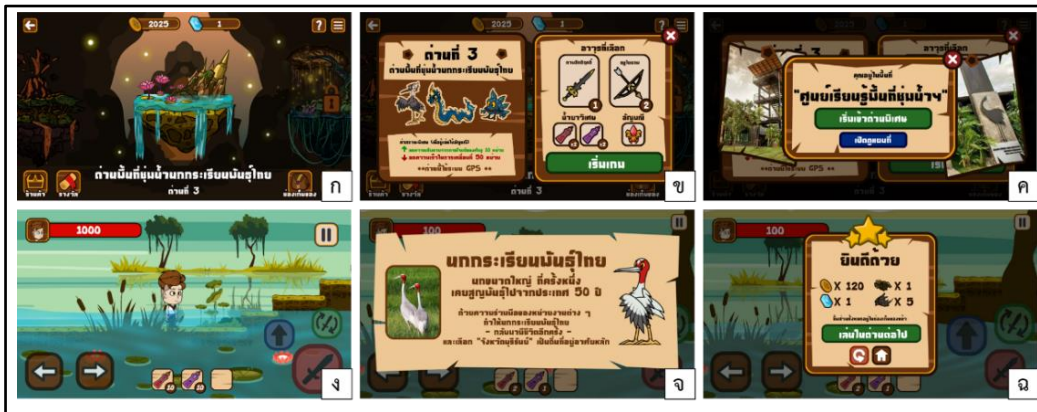
การวิเคราะห์ข้อมูล

หลังจากที่คณะผู้วิจัยได้เก็บรวบรวมข้อมูล นำผลที่ได้มาวิเคราะห์ข้อมูล โดยใช้สถิติ ค่าเฉลี่ย (Mean) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) จากนั้นนำผลการวิเคราะห์ที่ได้มาพิจารณาเปรียบเทียบกับเกณฑ์การประเมิน (บุญชม ศรีสะอาด, 2556) ดังนี้

ค่าเฉลี่ย 4.51-5.00	หมายถึง มากที่สุด
ค่าเฉลี่ย 3.51-4.50	หมายถึง มาก
ค่าเฉลี่ย 2.51-3.50	หมายถึง ปานกลาง
ค่าเฉลี่ย 1.51-2.50	หมายถึง น้อย
ค่าเฉลี่ย 1.00-1.50	หมายถึง น้อยสุด

ผลการวิจัย

1. ผลจากการพัฒนาของเกม 2 มิติ ได้เกมในรูปแบบแนวแพลตฟอร์ม (Platformer) โดยมีด่านทั้งหมด 3 ด่าน ที่เกี่ยวกับแหล่งท่องเที่ยวในอำเภอเมือง จังหวัดบุรีรัมย์ และมีส่วนการแสดงผล 6 ส่วนหลักตามลำดับ ประกอบไปด้วย หน้าเมนูหลักเลือกด่าน หน้ารายละเอียดของด่านที่เลือก หน้าตรวจสอบพิกัดระบบภูมิศาสตร์ของผู้เล่นก่อนเข้าด่าน หน้าจอการเล่นภายในเกม หน้าแสดงข้อมูลความรู้ภายในด่าน และหน้าจบเกมเมื่อผู้เล่นเล่นครบเสร็จสิ้นของแต่ละด่าน ดังภาพประกอบ 2



ภาพประกอบ 2 (ก) หน้าเมนูหลัก (ข) หน้าแสดงรายละเอียดของด่าน (ค) หน้าตรวจสอบพิกัดระบบภูมิศาสตร์ (ง) หน้าจอการเล่นเกม (จ) หน้าแสดงข้อมูลความรู้ (ฉ) หน้าจบเกม

2. ผลการประเมินหาคุณภาพของเกม 2 มิติ ที่พัฒนาขึ้น นำไปให้ผู้เชี่ยวชาญจำนวน 5 คน หาคุณภาพของเกม 2 มิติ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงผลการประเมินคุณภาพของเกม 2 มิติโดยผู้เชี่ยวชาญ

รายการ	$\bar{X}$	S. D.	ความหมาย
1. ด้านตัวอักษร (Text)	4.47	0.68	มาก
2. ด้านกราฟิก (Graphics)	4.80	0.30	มากที่สุด
3. ด้านเสียง (Audio)	4.40	0.58	มาก
4. ด้านหน้าจอผู้ใช้งาน (User Interface)	4.65	0.52	มากที่สุด
5. ด้านการควบคุม (Controls)	4.45	0.63	มาก
6. ด้านระบบเกม (Gameplay)	4.56	0.57	มากที่สุด
7. ด้านการนำเสนอ (Presentation)	4.75	0.34	มากที่สุด
โดยรวม	4.58	0.52	มากที่สุด

จากตารางที่ 1 ผลการประเมินคุณภาพของเกม 2 มิติ โดยผู้เชี่ยวชาญ ในภาพรวมมีคุณภาพอยู่ในระดับมากที่สุด ($\bar{X} = 4.58$, S. D. = 0.52) เมื่อพิจารณาเป็นรายด้านพบว่า ด้านกราฟิก มีค่าเฉลี่ยสูงสุดเป็นอันดับแรกในระดับมากที่สุด ($\bar{X} = 4.80$, S. D. = 0.30) ด้านการนำเสนอ มีค่าเฉลี่ยสูงสุดเป็นอันดับสองในระดับมากที่สุด ($\bar{X} = 4.75$, S. D. = 0.34) และ ด้านหน้าจอผู้ใช้งาน มีค่าเฉลี่ยสูงสุดเป็นอันดับสามในระดับมากที่สุด ($\bar{X} = 4.65$, S. D. = 0.52)

3. ผลการประเมินความพึงพอใจของนักท่องเที่ยงที่มีต่อเกม 2 มิติที่พัฒนาขึ้น และนำไปให้กับกลุ่มตัวอย่างนักท่องเที่ยงจำนวน 385 คน ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงผลการประเมินความพึงพอใจของเกม 2 มิติโดยกลุ่มตัวอย่างนักท่องเที่ยง

รายการ	$\bar{X}$	S. D.	ความหมาย
ความสนุกสนานของเกมโดยรวม	4.45	0.73	มาก
ความสวยงามของภาพกราฟิกในเกม	4.62	0.52	มากที่สุด
ภาพ เสียง และการเคลื่อนไหวสมดูลกัน	4.49	0.61	มาก
ประโยชน์ที่ได้รับจากการเล่นเกม	4.54	0.76	มากที่สุด
เนื้อหาข้อมูลเกี่ยวกับแหล่งท่องเที่ยวเข้าใจได้ง่าย	4.25	0.82	มาก
เล่นเกมแล้ว รู้สึกอยากไปสถานที่จริง	4.50	0.73	มาก
เล่นเกมแล้ว ได้รู้จักสถานที่ท่องเที่ยวมากขึ้น	4.42	0.83	มาก
โดยรวม	4.47	0.71	มาก

จากตารางที่ 2 ผลการประเมินความพึงพอใจของเกม 2 มิติ โดยกลุ่มตัวอย่างนักท่องเที่ยง ในภาพรวมมีความพึงพอใจอยู่ในระดับมาก ($\bar{X} = 4.47$, S. D. = 0.71) และเมื่อพิจารณาเป็นรายการ

แต่ละข้อพบว่า ความสวยงามของภาพกราฟิกในเกม มีค่าเฉลี่ยสูงสุดเป็นอันดับแรกอยู่ในระดับมากที่สุด ($\bar{X} = 4.62$, S. D. = 0.52) ประโยชน์ที่ได้รับจากการเล่นเกม มีค่าเฉลี่ยสูงสุดเป็นอันดับสองอยู่ในระดับมากที่สุด ($\bar{X} = 4.54$, S. D. = 0.76) และเมื่อเล่นเกมแล้ว รู้สึกอยากไปสถานที่จริง มีค่าเฉลี่ยสูงสุดเป็นอันดับสามอยู่ในระดับมาก ($\bar{X} = 4.50$, S. D. = 0.73)

อภิปรายผลการวิจัย

จากผลการวิจัยของเกม 2 มิติ อิงพิภักดระบบภูมิศาสตร์ เพื่อส่งเสริมการท่องเที่ยว อำเภอเมือง จังหวัดบุรีรัมย์ สามารถอภิปรายเป็นประเด็นสำคัญได้ดังนี้

1. จากผลการพัฒนาและการประเมินหาคุณภาพของเกม 2 มิติ อิงพิภักดระบบภูมิศาสตร์ เพื่อส่งเสริมการท่องเที่ยว อำเภอเมือง จังหวัดบุรีรัมย์ จากข้อคำถามในการประเมินหาความคุณภาพ ซึ่งมีคะแนนค่าเฉลี่ยมากที่สุด พบว่า ปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณภาพ คือ ด้านกราฟิก และด้านการนำเสนอ อันเป็นส่วนประกอบของเกมที่มีอำนาจสามารถสร้างการรับรู้เนื้อหาข้อมูล การนำเสนอเกี่ยวกับสถานที่ท่องเที่ยวได้ และยังเป็นเครื่องมือช่วยสร้างแรงจูงใจให้กับนักท่องเที่ยว ทั้งนี้เนื่องมาจากการออกแบบภาพกราฟิกภายในเกมที่มีความโดดเด่นใช้เป็นสื่อช่วยการส่งเสริมการท่องเที่ยว ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของวสันต์ ดอนแก้ว และคณะ (2567) ที่ได้ทำการวิจัยเรื่อง การผลิตสื่อประชาสัมพันธ์การท่องเที่ยวเชิงอนุรักษ์เชิงรายได้ด้วยเกม 2 มิติ ที่แสดงให้เห็นว่า สื่อส่งเสริมการท่องเที่ยวในรูปแบบของเกมที่มีการออกแบบภาพกราฟิกให้เป็นเอกลักษณ์ สอดคล้องกับเนื้อหาการท่องเที่ยว สามารถช่วยความน่าสนใจให้กับเกม และยังเป็นการเพิ่มแรงจูงใจของนักท่องเที่ยวได้ อีกทั้งเป็นการนำเสนอข้อมูลของการส่งเสริมการท่องเที่ยวในรูปแบบใหม่

2. จากผลการประเมินความพึงพอใจของนักท่องเที่ยวที่มีต่อเกม 2 มิติ อิงพิภักดระบบภูมิศาสตร์ เพื่อส่งเสริมการท่องเที่ยว อำเภอเมือง จังหวัดบุรีรัมย์ ที่มีการใช้กับกลุ่มตัวอย่างนักท่องเที่ยวจำนวน 385 คน จากข้อคำถามในการประเมินความพึงพอใจซึ่งมีคะแนนค่าเฉลี่ยมากที่สุด พบว่า ปัจจัยที่ส่งผลต่อความพึงพอใจของนักท่องเที่ยว ได้แก่ 1) ความสวยงามของภาพกราฟิกภายในเกม แสดงให้เห็นว่าการออกแบบภาพกราฟิกให้มีความสอดคล้องเข้ากันกับเนื้อหาภายในเกมอันจะส่งผลทำให้เกิดภาพที่น่าจดจำสำหรับนักท่องเที่ยว ช่วยเพิ่มความน่าสนใจให้กับเกมได้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของวสันต์ ดอนแก้ว และคณะ (2567) ที่ได้ทำการวิจัยเรื่อง การผลิตสื่อประชาสัมพันธ์การท่องเที่ยวเชิงอนุรักษ์เชิงรายได้ด้วยเกม 2 มิติ พบว่า งานภาพกราฟิกที่มีความเป็นเอกลักษณ์ สามารถช่วยดึงดูดความน่าสนใจของเกมจากนักท่องเที่ยวได้ ส่งผลต่อการจดจำเนื้อหาและองค์ความรู้ภายในเกม 2) ประโยชน์ที่ได้รับจากการเล่นเกมโดยมีการนำเอาความรู้ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการท่องเที่ยว มาแนะนำในรูปแบบของใหม่ ที่มีการสอดแทรกเนื้อหาในระหว่างการเล่นเกม ส่งผลทำให้เกิดแรงจูงใจในการให้นักท่องเที่ยวได้เกิดการเรียนรู้มากยิ่งขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ ธัญนันท์ สัจจะบริบูรณ์

และคณะ (2563) ที่ได้ทำการวิจัยเรื่อง การพัฒนาบทเรียนแบบเกมฟิสิกเซลอาร์ต 2 มิติ เรื่องเมทริกซ์ โดยการนำเอาเนื้อหาในบทเรียนมาพัฒนาในรูปแบบเกม ซึ่งช่วยสร้างแรงจูงใจให้แก่ผู้เรียนนั้น เกิดความกระตือรือร้นที่อยากจะเรียนรู้ อีกทั้งยังเป็นการสร้างบรรยากาศการเรียนรู้ในรูปแบบใหม่ และ 3) การดึงดูดให้ผู้เล่นมีความรู้สึกรักอยากไปสถานที่ท่องเที่ยวจริง เนื่องจากเกมมีการใช้ระบบอิงฟิสิกส์ระบบภูมิศาสตร์ เพื่อเป็นการสร้างประสบการณ์ให้เกิดมีส่วนร่วมกับสถานที่ท่องเที่ยวจริง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย Mileva *et al.* (2021) ได้ทำการวิจัยเรื่อง The potential of location-based gamification apps for promoting Sofia as a tourist destination (ศักยภาพของแอปพลิเคชันเกมอิงฟิสิกส์ระบบภูมิศาสตร์ในการส่งเสริมกรุงโซเฟียในฐานะจุดหมายปลายทางของการท่องเที่ยว) พบว่าการใช้สื่อเกมแอปพลิเคชันในรูปแบบที่อ้างอิงฟิสิกส์จากสถานที่จริงนั้น มีศักยภาพในการดึงดูดความสนใจของนักท่องเที่ยว สร้างประสบการณ์การท่องเที่ยวที่ดี และยังเป็นส่งเสริมให้เกิดการมีส่วนร่วมกับแหล่งท่องเที่ยววันนั้นด้วย

ข้อเสนอแนะ

ควรพัฒนาเกมให้มีการเพิ่มรางวัลพิเศษเพื่อส่งเสริมทางการตลาด เช่น ส่วนลดอาหาร หรือสินค้าพิเศษจากร้านค้าที่เข้าร่วมกิจกรรม ควรมีการเพิ่มด่านพิเศษที่สามารถเล่นได้เฉพาะในวันตามเทศกาล ประเพณีหรือวันสำคัญ ของจังหวัด เพื่อเป็นการดึงดูดและส่งเสริมการประชาสัมพันธ์กิจกรรมนั้น ๆ และสามารถพัฒนาเกมต่อยอดไปเป็นการเล่นในรูปแบบออนไลน์แบบหลายคนได้

เอกสารอ้างอิง

- กองเศรษฐกิจการท่องเที่ยวและกีฬา. (2563). *สถานการณ์ด้านการท่องเที่ยวเดือนธันวาคม พ.ศ. 2563*. สืบค้น 5 พฤษภาคม 2567, จาก https://www.mots.go.th/download/article/article_20210217155048.pdf.
- กองเศรษฐกิจการท่องเที่ยวและกีฬา. (2565). *สถานการณ์ด้านการท่องเที่ยวเดือนธันวาคม พ.ศ. 2564*. สืบค้น 5 พฤษภาคม 2567, จาก https://www.mots.go.th/download/article/article_20220127114136.pdf.
- การท่องเที่ยวแห่งประเทศไทย. (2564). *9 แนวโน้มใหม่ในอนาคตการท่องเที่ยว*. สืบค้น 4 พฤษภาคม 2567, จาก <https://thai.tourismthailand.org/Articles/9tat>.
- ณัฐกมล ถุงสุวรรณ และศุภกรณ์ ดิษฐพันธ์. (2564). การพัฒนาเกมเพื่อการท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรม โดยใช้แนวคิดเกมฟิสิกส์ กรณีศึกษาจังหวัดน่าน. *วารสารศิลปกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย*, 8(2), 26–42.

- ธัญนันท์ สัจจะบริบูรณ์, โกวิทย์ ชนะเคน, สุชาติรัตน์ จันทาพูนธยาน์, และทิวากร ภู่งาม. (2563). การพัฒนาบทเรียนแบบเกมฟิสิกเซลอาร์ต 2 มิติ เรื่องเมทริกซ์. *วารสารรัชต์ภาคย์*, 14(37), 60-69.
- นิรินลักษ์ โรจน์วรรณวิช. (2566). ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการตัดสินใจเดินทางมาท่องเที่ยวเชิงธรรมชาติ ในจังหวัดภูเก็ตของนักท่องเที่ยวชาวไทย หลังการแพร่ระบาดของโควิด-19 (วิทยานิพนธ์ ปริญญาบริหารธุรกิจมหาบัณฑิต) กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยกรุงเทพ.
- บุญชม ศรีสะอาด. (2556). *การวิจัยเบื้องต้น* (พิมพ์ครั้งที่ 9). กรุงเทพฯ: สุวีริยาสาส์น.
- เบญพร แยมจำเมือง. (2566). *การท่องเที่ยวเชิงสุขภาพ*. เอกสารประกอบการสอน TIM 1413 รายวิชา การท่องเที่ยวเชิงสุขภาพ. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา.
- พงษ์พิพัฒน์ สายทอง, วีรภัทร จันทจรตฤภัทร และศิวดล ภาภิรมย์. (2564). การออกแบบเกมดิจิทัล. *วารสารวิชาการวิทยาลัยสันตพล*, 7(2), 222-224.
- พชรณัฐ ไคนุ่นภา และกิตติพงษ์ แก้วประเสริฐ. (2564). การผลิตเกมแอนิเมชันเพื่อเพิ่มมูลค่าและสนับสนุนกิจกรรมการท่องเที่ยวเชิงประวัติศาสตร์ในเขตเมืองกาญจนบุรีให้เป็นการท่องเที่ยวแบบดิจิทัล. *วารสารการบัญชีและการจัดการ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม*, 13(4), 213-227.
- วสันต์ ดอนแก้ว, ดุลยฤทธิ์ วงศ์ชัย และเศรษฐชัย ไชยิก. (2567). การผลิตสื่อประชาสัมพันธ์การท่องเที่ยวเชิงอนุรักษ์เชิงรายด้วยเกม 2 มิติ. *วารสารร่มยุงทอง*, 2(1), 32-33.
- สิริวิญา คำชมภู, เสรี วงษ์มณฑา, ขวลิย์ ณ ถลาง และผกามาศ ชัยรัตน์. (2564). แนวทางการพัฒนาการท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมของจังหวัดบุรีรัมย์. *วารสารสมาคมนักวิจัย*, 26(4), 212-213.
- Batsaras, C., & Xinogalos, S. (2023). A Comparative Analysis of Low or No-Code Authoring Tools for Location-Based Games. *Multimodal Technologies and Interaction*, 7(9), 86.
- Mileva, S., Assenova, M., Petrov, E., & Gyaurova, V. (2021). The potential of location-based gamification apps for promoting Sofia as a tourist destination. *Tourism*, 31(1), 21-27.
- Sheahan, J., Davies, H., & Hjorth, L. (2021). The Art of Tacit Learning in Serious Location-Based Games. *Frontiers in Education*, 6. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.3389/FEDUC.2021.686633>.

ผลทางด้านจุลินทรีย์และกายภาพของขนมปังที่ห่อด้วยผ้าเคลือบไขผึ้งห่ออาหาร The Microbial and Physical Effect of Bread Wrapped with Beeswax Wrap

นงลักษณ์ สายเทพ

Nonglak Saithep

สาขาวิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง

Biology Program, Faculty of Science, Lampang Rajabhat University

Email: nonglak_pim_saithep@yahoo.com

Received : July 10, 2024

Revised : September 30, 2024

Accepted : November 29, 2024

บทคัดย่อ

ผ้าเคลือบไขผึ้งห่ออาหารได้รับความนิยมเนื่องจากทำมาจากวัสดุธรรมชาติ ถือเป็นทางเลือกที่ยั่งยืนในการใช้ทดแทนถุงพลาสติกและพลาสติกห่ออาหาร สามารถช่วยป้องกันการเน่าเสียและลดการเกิดเชื้อก่อโรคในอาหารได้ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของผ้าฝ้ายเคลือบไขผึ้งทั้งทางด้านจุลินทรีย์ และทางกายภาพในการห่อขนมปัง โดยได้วิเคราะห์และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์ผ้าเคลือบไขผึ้ง จำนวน 3 สูตร เป็นระยะเวลา 14 วัน จากผลการทดลองพบว่า ขนมปังที่ห่อด้วยผ้าเคลือบไขผึ้งทั้ง 3 สูตร มีปริมาณการเจริญของแบคทีเรียที่น้อยกว่าพลาสติกห่ออาหาร สามารถลดการสูญเสียน้ำหนักของขนมปัง อีกทั้งยังไม่พบการเจริญของเชื้อราบนขนมปัง

คำสำคัญ: ผ้าเคลือบไขผึ้งห่ออาหาร กายภาพ จุลินทรีย์

ABSTRACT

Beeswax-coated cloth wraps have gained popularity because they are made from natural materials and serve as a sustainable alternative to plastic bags and plastic wraps. They can help prevent spoilage and reduce the occurrence of foodborne pathogens. This research aimed to study the microbial and physical effectiveness of beeswax-coated cotton cloth in wrapping bread. The efficiency of three different formulas of beeswax-coated cloth was analyzed and compared over 14 days. The experimental results showed that bread wrapped with all three formulas of beeswax-coated cloth had lower

bacterial growth than plastic wrap, reduced weight loss of the bread, and no mold growth was observed on the bread.

Key Words: Beeswax wrap, Physical, Microbiological

บทนำ

พลาสติกถือเป็นวัสดุสังเคราะห์ที่มีบทบาทอย่างมากในชีวิตประจำวัน และมีแนวโน้มการใช้งานมากขึ้น เนื่องจากพลาสติกมีคุณสมบัติเบา แข็งแรง ทนทาน และราคาถูก สามารถผลิตให้มีรูปแบบต่าง ๆ ตามที่ต้องการได้ด้วยเทคโนโลยีการผลิตที่ก้าวหน้าและทันสมัย (สุทธิษา ก้อนเรือง และคณะ, 2563) ทำให้ปัจจุบันมีผลิตภัณฑ์พลาสติกหลากหลายรูปแบบและมีสีสันสวยงามให้เลือกใช้อย่างมากมาย ด้วยคุณสมบัติที่โดดเด่นทำให้พลาสติกได้รับความนิยมอย่างรวดเร็ว ยกตัวอย่างเช่น การใช้พลาสติกห่ออาหารหรือที่เรารู้จักกันดีในนามของ พลาสติกแรป (plastic wrap) เป็นผลิตภัณฑ์ที่นิยมใช้ห่ออาหาร หรือคลุมปิดปากภาชนะบรรจุอาหาร ด้วยคุณสมบัติที่หลากหลาย ทั้งช่วยห่ออาหารที่ทานเหลือ ช่วยยืดอายุของสดในตู้เย็น (ชินวัฒน์ ทองซัซ, 2567) แต่พลาสติกแรปเหล่านี้ถือว่าเป็นหนึ่งในขยะพลาสติกจำนวนมากที่เกิดขึ้นจากพฤติกรรมผู้บริโภคของมนุษย์ และถูกทิ้งเป็นขยะมากในทุก ๆ วันทั่วโลก โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในเมืองและชุมชนขนาดใหญ่ ปัญหาขยะพลาสติกจำนวนมากสาละวันยังเพิ่มจำนวนมากขึ้นทุก ๆ ปี (ทวิพร ขจรเกียรติอาษา, 2566) ถึงแม้จะมีการตื่นตัวและรณรงค์ ให้นำพลาสติกกลับมาใช้ใหม่ แต่เมื่อนำมาใช้ซ้ำหลาย ๆ ครั้งคุณภาพของพลาสติกด้อยลง อีกทั้งต้องคำนึงถึงความสะอาดและความปลอดภัย และเมื่อเปรียบเทียบปริมาณการนำเอาขยะพลาสติกกลับมาใช้ใหม่กับขยะพลาสติกที่ถูกทิ้งทั้งหมดในแต่ละวันยังถือว่าเป็นเพียงส่วนน้อยเท่านั้น (บุญชนิต ว่องประพินกุล และสุจิตรา วาสนาดำรงดี, 2564) ปัจจุบันจึงมีผลิตภัณฑ์ที่ใช้แทนพลาสติกแรปที่ใช้ครั้งเดียวแล้วทิ้ง ด้วยผ้าคลุมอาหารจากไขผึ้ง (beeswax wrap) ที่สามารถใช้แทนพลาสติกแรปได้ ด้วยคุณสมบัติที่คล้ายกับพลาสติกแรปคือ สามารถห่ออาหารได้ คลุมปิดปากภาชนะได้ แต่ไม่ต้องของผ้าคลุมอาหารจากไขผึ้งนั้นคือ สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้ และย่อยสลายได้เร็วกว่าพลาสติกแรป ไม่มีสารเคมีอันตรายตกค้าง (Goldilocks-USA, 2021)

วัตถุประสงค์การวิจัย

เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการห่ออาหาร ของผ้าเคลือบไขผึ้งกับพลาสติกห่ออาหาร ทางด้านกายภาพและจุลินทรีย์

วิธีการดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมผ้าเคลือบไขผึ้ง

เตรียมผ้าเคลือบไขผึ้ง (ภาพประกอบ 1) จำนวน 3 สัตว์ โดยมีอัตราส่วนของส่วนผสมตามตารางที่ 1 จากนั้นนำมาละลายโดยการตุ๋นในหม้อ 2 ชั้น ใช้แรงจุ่มไขผึ้งที่ละลายแล้วมาทาเคลือบบนผ้าฝ้ายแท้ 100% ขนาด 10x10 นิ้ว จากนั้นนำไปรีดโดยใช้กระดาษไขวางด้านล่างและด้านบนของผ้า ใช้ความร้อนประมาณ 60 – 80 องศาเซลเซียส แล้วผึ่งให้แห้ง เก็บไว้ในกล่องพลาสติก (super lock) ที่ฆ่าเชื้อด้วย 75% alcohol



ภาพประกอบ 1 ผ้าเคลือบไขผึ้งห่ออาหารทั้ง 3 สัตว์

ตารางที่ 1 ปริมาณของไขผึ้ง ยางสน และน้ำมันมะพร้าวที่ใช้เคลือบผ้าฝ้ายทั้ง 3 สัตว์

สัตว์ที่	ปริมาณส่วนผสม (กรัม)		
	ไขผึ้ง	ยางสน	น้ำมันมะพร้าว
1	70	-	-
2	70	20	-
3	70	20	10

2. ศึกษาผลของผ้าเคลือบไขผึ้งต่อคุณภาพขนมปังทางด้านจุลินทรีย์และกายภาพ

นำผ้าเคลือบไขผึ้งทั้ง 3 สัตว์ รวมทั้งผ้าเคลือบไขผึ้งจากท้องตลาด และพลาสติกห่ออาหาร มาห่อขนมปังซึ่งตัดเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมขนาด 6 x 4 x 2 เซนติเมตร เป็นเวลา 14 วัน วิเคราะห์ค่าต่าง ๆ ดังนี้

2.1 วิเคราะห์จำนวนแบคทีเรีย

เชื้อจากขนมปัง 1 กรัม กับสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) 0.85 % ปริมาตร 9 มิลลิลิตร เจือจางต่อไปจนถึงความเข้มข้น 10^{-2} 10^{-3} 10^{-4} ใช้ไมโครปิเปตดูดตัวอย่างแต่ละความเข้มข้น ปริมาณ 1 มิลลิลิตร ลงบนผิวหน้าอาหารวุ้นที่อยู่ในจานเพาะเชื้อ ทำการ Spread plate แล้วนำไปบ่ม 24-48 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส นับจำนวนโคโลนี (colony) นำมาวิเคราะห์ค่าจุลินทรีย์มาตรฐาน (Total count bacteria) (Zhuozhuo *et al.*, 2019)

2.2 วิเคราะห์ค่าการสูญเสียน้ำหนัก (% weight loss)

นำขนมปังไปชั่งน้ำหนักเป็นเวลา 14 วัน จากนั้นหาค่าการสูญเสียน้ำหนัก (% weight loss) โดยใช้สูตรการคำนวณดังนี้

$$\text{การสูญเสียน้ำหนัก (ร้อยละ)} = \frac{\text{ผลต่างของน้ำหนักขนมปังก่อนและหลังการห่อด้วยผ้าไขผึ้ง}}{\text{น้ำหนักของขนมปังก่อนการห่อด้วยผ้าไขผึ้ง}} \times 100$$

2.3 วัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

วัดความเป็นกรด-ด่าง (pH) โดยการชั่งขนมปัง 2 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 8 มิลลิลิตร นำไปวัดความเป็นกรด-ด่าง โดย pH meter

2.4 วิเคราะห์ปริมาณเชื้อราที่เจริญบนขนมปัง

ตรวจวัดพื้นที่ของเชื้อราที่เจริญบนขนมปังโดยประมาณ นำค่าที่ได้มาคำนวณร้อยละการเจริญของเชื้อรา โดยใช้สูตรการคำนวณดังนี้

$$\text{การเจริญของเชื้อราบนขนมปัง (ร้อยละ)} = \frac{\text{พื้นที่ผิวของขนมปังที่มีเชื้อราเจริญ}}{\text{พื้นที่ผิวทั้งหมดของขนมปัง}} \times 100$$

วิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติของผลวิเคราะห์ต่าง ๆ ที่ระดับนัยสำคัญ $P \leq 0.05$ ด้วย one-way analysis of variance (ANOVA) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วย least significant difference (LSD) โดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์ทางสถิติของ IBM SPSS Statistics (trial version)

ผลการวิจัย

1. ผลการวิเคราะห์จำนวนแบคทีเรีย

ผลการวิเคราะห์จำนวนแบคทีเรียของขนมปังที่ห่อด้วยผ้าเคลือบไขผึ้งทั้ง 3 สูตร รวมทั้ง ผ้าเคลือบไขผึ้งจากท้องตลาด และพลาสติกห่ออาหาร วันที่ 1 ไม่พบแบคทีเรีย วันที่ 14 มีจำนวนจุลินทรีย์เฉลี่ยเท่ากับ 2.4×10^3 cfu/g, 5×10^2 cfu/g, 2.1×10^3 cfu/g, 1.1×10^4 cfu/g และ 7.7×10^5 cfu/g ตามลำดับ

(ตารางที่ 2) แสดงให้เห็นว่า ผ้าใช้ผึ่งห่ออาหารทั้ง 3 สูตร มีปริมาณการเจริญเติบโตของแบคทีเรียน้อยกว่า ผ้าใช้ผึ่งจากท้องตลาด และพลาสติกห่ออาหาร

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์จำนวนแบคทีเรียของขนมปังที่ห่อด้วยผ้าเคลือบไขผึ่งและพลาสติกห่ออาหาร

วันที่	จำนวนจุลินทรีย์เฉลี่ย (cfu/g)				
	สูตรที่ 1	สูตรที่ 2	สูตรที่ 3	ผ้าใช้ผึ่งจากท้องตลาด	พลาสติกห่ออาหาร
วันที่ 1	0	0	0	0	0
วันที่ 14	2.4×10 ³ a	5×10 ² a	2.1×10 ³ a	1.1×10 ⁴ b	7.7×10 ⁵ c

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่กำกับค่าเฉลี่ยในแต่ละแถว หากต่างกัน แสดงว่ามีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับ $p \leq 0.05$

2 ผลการวิเคราะห์ค่าการสูญเสียน้ำหนัก (% weight loss)

ผลการวิเคราะห์ค่าการสูญเสียน้ำหนักของขนมปังที่ห่อด้วยผ้าเคลือบไขผึ่งทั้ง 3 สูตร รวมทั้งผ้าเคลือบไขผึ่งจากท้องตลาด และพลาสติกห่ออาหาร แสดงในตารางที่ 3 ขนมปังที่ห่อด้วยผ้าเคลือบไขผึ่งทั้ง 3 สูตร และผ้าเคลือบไขผึ่งจากท้องตลาด มีค่าการสูญเสียน้ำหนักน้อยที่สุด ดังตัวอย่างวันที่ 6 ซึ่งผ้าเคลือบไขผึ่งสูตรที่ 1 สูตรที่ 2 สูตรที่ 3 ผ้าเคลือบไขผึ่งจากท้องตลาด และพลาสติกห่ออาหาร มีค่าการสูญเสียน้ำหนัก 0.37%, 0.41%, 0.10%, 0.11% และ 0.86% ตามลำดับ วันที่ 7 มีค่าการสูญเสียน้ำหนัก 0.59%, 0.56%, 0.10%, 0.15% และ 1.01% ตามลำดับ วันที่ 8 มีค่าการสูญเสียน้ำหนัก 0.37%, 0.41%, 0.10%, 0.25% และ 0.98% ตามลำดับ วันที่ 11 มีค่าการสูญเสียน้ำหนัก 0.57%, 0.34%, 0.16%, 0.19% และ 0.94% ตามลำดับ และวันที่ 12 มีค่าการสูญเสียน้ำหนัก 0.43%, 0.55%, 0.26%, 0.11%, และ 0.73% ตามลำดับ

ตารางที่ 3 ผลการศึกษาค่าการสูญเสียน้ำหนัก (% weight loss) ของขนมปังที่ห่อด้วยผ้าใช้ผึ่งและพลาสติกห่ออาหาร

วันที่	% weight loss				
	ผ้าเคลือบไขผึ่ง			ผ้าเคลือบไขผึ่งจากท้องตลาด	พลาสติกห่ออาหาร
	สูตรที่ 1	สูตรที่ 2	สูตรที่ 3		
1	0.28 ^b	0.32 ^c	0.40 ^d	0.11 ^a	2.09 ^e
2	0.27 ^b	0.60 ^c	0.26 ^b	0.11 ^a	2.07 ^d

ตารางที่ 3 (ต่อ)

วันที่	% weight loss				
	ผ้าเคลือบไขผึ้ง			ผ้าเคลือบไขผึ้งจาก ท้องตลาด	พลาสติกห่อ อาหาร
3	0.49 ^d	0.57 ^e	0.26 ^b	0.15 ^a	0.28 ^c
4	0.71 ^e	0.65 ^d	0.09 ^a	0.24 ^c	0.16 ^b
5	0.39 ^d	0.60 ^a	0.06 ^e	0.19 ^b	0.34 ^c
6	0.37 ^b	0.41 ^c	0.10 ^a	0.11 ^a	0.86 ^d
7	0.59 ^d	0.56 ^c	0.10 ^a	0.15 ^b	1.01 ^e
8	0.37 ^c	0.41 ^d	0.10 ^a	0.25 ^b	0.98 ^e
9	0.54 ^d	0.46 ^c	0.09 ^a	0.27 ^b	0.85 ^e
10	0.45 ^d	0.36 ^c	0.20 ^b	0.09 ^a	0.83 ^e
11	0.57 ^d	0.34 ^c	0.16 ^a	0.19 ^b	0.94 ^e
12	0.43 ^c	0.55 ^d	0.26 ^b	0.11 ^a	0.73 ^e
13	0.86 ^d	0.17 ^a	0.25 ^b	0.32 ^c	0.90 ^e
14	0.28 ^d	0.18 ^b	0.20 ^c	0.13 ^a	0.90 ^e

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่กำกับค่าเฉลี่ยในแต่ละแถว หากต่างกัน แสดงว่ามีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับ $p \leq 0.05$

3 ผลการวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

ผลการวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของขนมปังที่ห่อด้วยผ้าเคลือบไขผึ้งทั้ง 3 สูตร รวมทั้ง ผ้าเคลือบไขผึ้งจากท้องตลาด และพลาสติกห่ออาหาร แสดงในตารางที่ 4 พบว่า ผ้าเคลือบไขผึ้งสูตรที่ 1 สูตรที่ 2 สูตรที่ 3 จากท้องตลาด และพลาสติกห่ออาหาร มีค่า pH วันที่ 0 เท่ากับ 5.91, 5.91, 6.08, 6.05 และ 6.10 ตามลำดับ วันที่ 14 มีค่า pH เท่ากับ 6.27, 6.24, 6.22, 6.07 และ 5.89 ตามลำดับ

ตารางที่ 4 ผลการวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของขนมปังที่ห่อด้วยผ้าเคลือบไขผึ้ง และพลาสติกห่ออาหาร

(วันที่)	ความเป็นกรด-ด่าง (pH)				
	ผ้าไขผึ้งสูตรที่	ผ้าไขผึ้งสูตรที่	ผ้าไขผึ้งสูตรที่	ผ้าไขผึ้งจาก	พลาสติก
	1	2	3	ท้องตลาด	ห่ออาหาร
วันที่ 1	5.91 ^a	5.91 ^a	6.08 ^b	6.05 ^{bc}	6.10 ^c
วันที่ 14	6.27 ^e	6.24 ^d	6.22 ^c	6.07 ^b	5.89 ^a

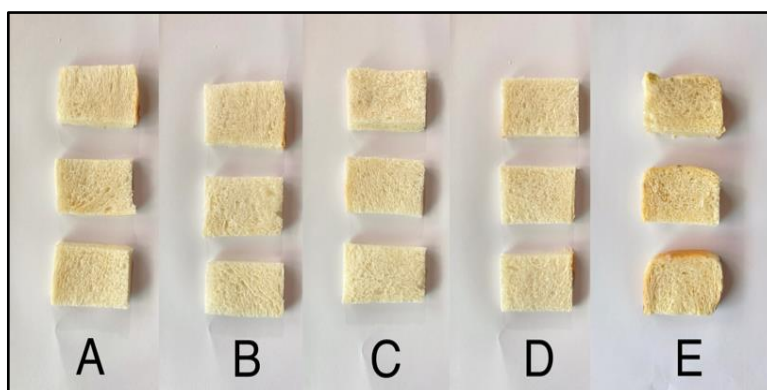
หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่กำกับค่าเฉลี่ยในแต่ละแถว หากต่างกัน แสดงว่ามีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับ $p \leq 0.05$

4 ผลการวิเคราะห์ปริมาณเชื้อราที่เจริญบนขนมปัง

การศึกษาการเจริญของเชื้อราบนขนมปังที่ห่อด้วยผ้าเคลือบไขฝั้ทั้ง 3 สูตร รวมทั้ง ผ้าเคลือบไขฝั้จากท้องตลาด และพลาสติกห่ออาหาร แสดงในตารางที่ 5 และภาพประกอบ 2 ไม่พบเชื้อราบนขนมปังที่ห่อด้วยผ้าเคลือบไขฝั้ทั้ง 3 สูตร และผ้าเคลือบไขฝั้จากท้องตลาด แต่พบในพลาสติกห่ออาหาร

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์ปริมาณเชื้อราบนขนมปังที่ห่อด้วยผ้าเคลือบไขฝั้และพลาสติกห่ออาหาร

วัสดุห่ออาหาร	การเจริญของเชื้อรา (%)	
	วันที่ 0	วันที่ 14
ผ้าเคลือบไขฝั้สูตรที่ 1	0	0
ผ้าเคลือบไขฝั้สูตรที่ 2	0	0
ผ้าเคลือบไขฝั้สูตรที่ 3	0	0
ผ้าเคลือบไขฝั้จากท้องตลาด	0	0
พลาสติกห่ออาหาร	0	13



ภาพประกอบ 2 การเจริญของเชื้อราบนขนมปังที่ห่อด้วยผ้าเคลือบไขฝั้สูตรที่ 1 (A) สูตรที่ 2 (B) สูตรที่ 3 (C) จากท้องตลาด (D) และพลาสติกห่ออาหาร (E)

อภิปรายผลการวิจัย

จากผลการวิเคราะห์จำนวนแบคทีเรียที่เจริญบนขนมปังที่ห่อด้วยผ้าเคลือบไขผึ้งทั้ง 3 สูตร ผ้าเคลือบไขผึ้งจากท้องตลาด และพลาสติกห่ออาหาร แสดงดังตารางที่ 2 พบว่าขนมปังที่ห่อด้วยผ้าเคลือบไขผึ้งทั้ง 3 สูตร มีจำนวนแบคทีเรียน้อยกว่า ผ้าเคลือบไขผึ้งจากท้องตลาด และพลาสติกห่ออาหาร อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Crystal *et al.* (2017) ที่ได้ทดสอบประสิทธิภาพของ Abeego ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ห่ออาหารที่มีจำหน่ายโดยทั่วไป ประกอบด้วยสารจากธรรมชาติ เช่น ขี้ผึ้ง และน้ำมันพืช สามารถแสดงประสิทธิภาพในการต่อต้านจุลินทรีย์ได้ งานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์ความสามารถและองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ห่ออาหาร ที่มีผลต่อการเจริญเติบโตและการจำลองตัวเองของจุลินทรีย์หลากหลายกลุ่ม ผลการทดลองพบว่าผลิตภัณฑ์ห่ออาหาร Abeego สามารถยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียทั้งแกรมบวกและแกรมลบได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) สำหรับผลการศึกษาค่าการสูญเสียน้ำหนักของขนมปังของงานวิจัยนี้ แสดงให้เห็นว่า ขนมปังที่ห่อด้วยผ้าไขผึ้งทั้ง 3 สูตร และผ้าเคลือบไขผึ้งจากท้องตลาด มีค่าการสูญเสียน้ำหนักน้อยกว่าขนมปังที่ห่อด้วยพลาสติกห่ออาหารอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ส่วนผลการวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของขนมปังที่ห่อด้วยผ้าเคลือบไขผึ้งห่ออาหารทั้ง 3 สูตร และจากท้องตลาด มีค่า pH เพิ่มขึ้น นั่นคือมีสภาพเป็นกรดอ่อน ส่วนขนมปังที่ห่อด้วยพลาสติกห่ออาหารมีค่า pH ลดลง คือมีสภาพค่อนข้างเป็นกรด แสดงให้เห็นว่าค่า pH นั้นมีผลต่ออัตราการเติบโตและการดำรงอยู่ของจุลินทรีย์ โดยมีค่าที่ต้องการแตกต่างกันไปสำหรับจุลินทรีย์แต่ละชนิด (Peter *et al.*, 2020) ในส่วนของผลการวิเคราะห์ปริมาณเชื้อราที่พบการเจริญเติบโตของเชื้อราบนขนมปังที่ห่อด้วยพลาสติกห่ออาหารสอดคล้องกับงานวิจัยของ ปรียา วิบูลเศรษฐ์ (2540) พบว่าเชื้อราสามารถเจริญได้ในอาหารที่มีความชื้นเพียงเล็กน้อยและในสภาพที่ค่อนข้างเป็นกรด งานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่าง ของขนมปังที่ห่อด้วยผ้าเคลือบไขผึ้งห่ออาหาร ผลการทดลองพบว่าขนมปังที่ห่อด้วยผ้าเคลือบไขผึ้งจากท้องตลาดสามารถควบคุมค่าความเป็นกรด-ด่างได้ เมื่อเปรียบเทียบกับชุดการทดลองอื่น และยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Justyna *et al.* (2020) ที่ศึกษาคุณสมบัติในการต้านจุลินทรีย์ของผลิตภัณฑ์สิ่งทอที่ดัดแปลงโดยไขผึ้ง พบว่าผ้าดัดแปลงโดยไขผึ้งมีฤทธิ์ปานกลางในการต่อต้านเชื้อรา คือมีฤทธิ์ต้าน *Aspergillus niger* ส่วนการเจริญของเชื้อราบนขนมปังที่ห่อด้วยพลาสติกห่ออาหารพบว่า ผ้าเคลือบไขผึ้งทั้ง 3 สูตร และจากท้องตลาด ไม่พบการเจริญของเชื้อราบนขนมปัง ส่วนขนมปังที่ห่อด้วยพลาสติกห่ออาหารพบเชื้อราเจริญเติบโตบนผิวขนมปัง 13% แสดงให้เห็นว่าผ้าเคลือบไขผึ้งสามารถป้องกันการเจริญเติบโตของเชื้อรา ซึ่งเป็นสาเหตุของอาหารเน่าเสียได้ดีกว่าพลาสติกห่ออาหาร

สรุปผลการวิจัย

ผ้าเคลือบไขผึ้งทั้ง 3 สูตร มีประสิทธิภาพในการป้องกันการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่สามารถลดการสูญเสียน้ำหนักของขนมปัง อีกทั้งยังไม่พบการเจริญของเชื้อราบนขนมปัง จึงสามารถใช้ห่ออาหารเพื่อรักษาคุณภาพของอาหาร และป้องกันการเจริญของจุลินทรีย์แทนการใช้พลาสติกห่ออาหารได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิจัยทางชีววิทยาและจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมีสำหรับการทำวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- ชินวัฒน์ ทองซั. (2567). การใช้ฟิล์มยืดห่อหุ้มอาหารให้ปลอดภัย. จาก http://lib3.dss.go.th/fulltext/dss_j/2560_65_204_p27-28.pdf.
- ปรียา วิบูลเศรษฐ์. (2540). การเน่าเสียของอาหาร. วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร, 1, 74-91.
- ทวีพร ขจรเกียรติอาษา. (2566). ปัญหาทางกฎหมายเกี่ยวกับการจัดการขยะพลาสติกแบบใช้ครั้งเดียวทิ้งจากร้านอาหารที่ใช้บริการส่งอาหาร. (วิทยานิพนธ์ปริญญานิติศาสตรมหาบัณฑิต). กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยศรีปทุม.
- บุญชนิต ว่องประพินกุล และสุจิตรา วาสนาดำรงดี. (2564). ขยะพลาสติกจากการส่งอาหารออนไลน์. วารสารสิ่งแวดล้อม, 25(1), 1-10.
- สุทธิษา ก้อนเรือง, การะเกด แก้วใหญ่, ธวัฒน์ชัย เทพนวล และมารีสา เชษฐวรรณสิทธิ์. (2563). การผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากเส้นใยต้นสาคุ. วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ, 23(2), 65-73.
- Crystal, T., Jarosław, A. & Francis, N. (2017). The anti-microbial effect of food wrap containing beeswax products. *Journal of microbiology biotechnology and food science*, 7(3), 145-8.
- Goldilocks-USA. (2021). *Goldilocks beeswax wraps : The eco-friendly alternative to plastic*. from <https://goldilocksgoods.com>.
- Justyna, S., Waldemar, M., Stanisława, K., Anita, J., Tomasz, R., Aleksandra, S. &

- Beata, G. (2020). Beeswax-modified textiles: method of preparation and assessment of antimicrobial properties. *Polymers*, 12(344), 1-15.
- Peter, L., Daniela, D., Oded, L. & Nuno, P. (2020). Understanding how microorganisms respond to acid pH is central to their control and successful exploitation. *Frontiers in microbiology*, 11, 1-8.
- Zhuozhuo, Z., Xinhua, Z., Fanrong, K. & Wenchuan, G., (2019). Quantitatively determining the total bacterial count of raw goat milk using dielectric spectra. *Journal of dairy Science*, 102, 7895–7903.

การเพิ่มประสิทธิภาพอิเล็กโทรด SPCE ด้วยอนุภาคนาโนของทองคำและแพลทินัม
เพื่อปรับปรุงการตรวจวัดภาวะเครียดจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน
Enhancing SPCE Electrodes with Gold and Platinum Nanoparticles for
Improved Oxidative Stress Detection

สนธยา พงษ์ธานี^{1*} หยาดนภา ผาเจริญ² ศีตกานต์ นัตพบสุข² และ ชีราวุฒิ เพชรเย็น^{1,3}
Sonthaya Pongthanee^{1*}, Yardnapar Parcharoen², Sitakan Natphopsuk³ and
Chiravoot Pechyen^{1,3}

¹สาขาวิชานวัตกรรมและเทคโนโลยีวัสดุ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

¹ Materials Innovation and Technology Faculty of Science and Technology, Thammasat University

²วิทยาลัยแพทยนานาชาติจุฬารักษ์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

²Chulabhorn International College of Medicine, Thammasat University

³หัวหน้าศูนย์ความเป็นเลิศด้านเทคโนโลยีสมัยใหม่และการผลิตขั้นสูงสำหรับนวัตกรรมทางการแพทย์

³Center of Excellence in Modern Technology and Advanced Manufacturing for Medical innovation

Email: Pongthanee.sty@gmail.com

Received : August 7, 2024

Revised : October 4, 2024

Accepted : November 29, 2024

บทคัดย่อ

ปัจจุบันปัญหาสุขภาพที่เกี่ยวข้องกับภาวะเครียดออกซิเดชัน (Oxidative Stress) มีบทบาทสำคัญในการพัฒนาโรคหลายชนิด เช่น โรคเบาหวาน โรคหัวใจ และโรคระบบประสาท การตรวจวัดภาวะนี้มีความสำคัญอย่างยิ่งในทางการแพทย์ วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือการพัฒนาเซนเซอร์ที่ใช้อนุภาคทองคำ (AuNPs) และอนุภาคแพลทินัม (PtNPs) โดยสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัมและวิเคราะห์การทดสอบด้วยเทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer: XRD) แสดงตำแหน่งการเลี้ยวเบนของอนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัมจากนั้นใช้เทคนิคชุบด้วยไฟฟ้าลงบนขั้วไฟฟ้าคาร์บอนพิมพ์สกรีน (Screen-Printed Carbon Electrode, SPCE) สำหรับใช้ในเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตริกเพื่อตรวจวัดภาวะเครียดออกซิเดชันในอนาคต โดยใช้อนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัมกับสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ (Potassium chloride: KCl) ที่กระแสไฟฟ้า -0.25 โวลต์, -0.5 โวลต์, -0.75 โวลต์ และ -1 โวลต์ และวิเคราะห์ผลด้วยการทดสอบด้วยรามานสเปกโทรสโกปีพบพีคที่ 1200-1450 cm^{-1} และ 1500-1600 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคของคาร์บอน ทองคำและแพลทินัมที่ทับซ้อนกันและใช้เทคนิคกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy: SEM) แสดงลักษณะอนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัมที่ชัดเจน และแสดงขนาดอนุภาคที่ค่าเฉลี่ย 6.4 นาโนเมตร

เมื่อทดสอบชีวไฟฟ้าที่ขั้วไฟฟ้าด้วยเทคนิค ไซคลิกวอลเทมเมตรี พบว่าการชุบที่กระแสไฟฟ้า -0.25 โวลต์ ให้สัญญาณที่ปรับปรุงชัดเจนที่สุดเมื่อเทียบกับกระแสไฟฟ้าอื่น ๆ รวมถึงชีวไฟฟ้าที่ไม่ได้ปรับปรุง การศึกษานี้สรุปว่าการใช้อนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัมสามารถปรับปรุงสัญญาณของชีวไฟฟ้า SPCE ได้อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสามารถนำไปใช้ในงานวิจัยการตรวจจับภาวะเครียดออกซิเดชันในอนาคต

คำสำคัญ: อนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัม, ไซคลิกวอลเทมเมตรี, ภาวะเครียดออกซิเดชัน, ชีวไฟฟ้าคาร์บอนพิมพ์สกรีน

ABSTRACT

Currently, health issues related to oxidative stress play a significant role in the development of various diseases, such as cancer, heart disease, and neurodegenerative disorders. Monitoring oxidative stress is critical in medical diagnostics. This research aims to develop a sensor utilizing gold nanoparticles (AuNPs) and platinum nanoparticles (PtNPs). The nanoparticles were synthesized and characterized using X-ray diffraction (XRD), revealing the diffraction patterns of gold and platinum nanoparticles. These nanoparticles were then electrochemically deposited onto Screen-Printed Carbon Electrodes (SPCE) for use in cyclic voltammetry (CV) to detect oxidative stress markers in future applications. The gold and platinum nanoparticles were combined with a potassium chloride (KCl) solution and electroplated at potentials of -0.25 V, -0.5 V, -0.75 V, and -1.0 V. Raman spectroscopy analysis showed peaks at $1200-1450\text{ cm}^{-1}$ and $1500-1600\text{ cm}^{-1}$, corresponding to overlapping peaks of carbon, gold, and platinum. Scanning Electron Microscopy (SEM) was employed to visualize the gold and platinum nanoparticles, revealing an average particle size of 6.4 nm . In cyclic voltammetry testing, the electrode electroplated at -0.25 V exhibited the most significant signal enhancement compared to other potentials and the unmodified electrode. This study concludes that gold and platinum nanoparticles can substantially improve the signal performance of SPCEs, and the modified electrodes hold promising potential for future research in oxidative stress detection.

Key Words: AuPtNPs, Cyclic voltammetry, Oxidative stress, Screen-Printed Carbon Electrode

บทนำ

ปัจจุบันปัญหาสุขภาพที่เกี่ยวข้องกับภาวะเครียดออกซิเดชัน (Oxidative stress) เป็นประเด็นที่ได้รับความสนใจอย่างมาก เนื่องจากภาวะเครียดออกซิเดชันเป็นสาเหตุหลักของการเกิดโรคเรื้อรังหลายชนิด เช่น โรคหัวใจและหลอดเลือด โรคมะเร็ง โรคเบาหวาน และโรคทางระบบประสาท เช่น อัลไซเมอร์ (Storz and Imlay, 1999) ซึ่งภาวะเครียดออกซิเดชันเกิดจากการสะสมของอนุมูลอิสระที่มากเกินไปทำให้เกิดความเสียหายต่อเซลล์และเนื้อเยื่อต่าง ๆ ของร่างกายการตรวจจับและวิเคราะห์ระดับภาวะเครียดออกซิเดชันในร่างกายจึงเป็นสิ่งสำคัญในการวินิจฉัยและติดตามโรค (Sies *et al.*, 2017) การใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี (Cyclic voltammetry; CV) เป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการตรวจจับสารเคมีที่เกี่ยวข้องกับภาวะเครียดออกซิเดชัน อย่างเช่น ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide), ซูเปอร์ออกไซด์ (superoxide), และสารชีวโมเลกุลอื่น ๆ ที่สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ (Elgrishi *et al.*, 2018) การปรับปรุงขั้วไฟฟ้าพิมพ์สกรีน (Screen-Printed Carbon Electrode: SPCE) ด้วยอนุภาคนาโนทองคำ (Gold nanoparticles: AuNPs) และแพลทินัม (Platinum nanoparticles: PtNPs) มีความสำคัญหลายประการโดยวัตถุประสงค์หลักของการปรับปรุงขั้วไฟฟ้า SPCE คือ 1) เพิ่มความไวในการตรวจจับ อนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัมมีพื้นที่ผิวที่กว้างและคุณสมบัติทางเคมีที่ช่วยเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้าและการถ่ายโอนอิเล็กตรอน ทำให้การตรวจจับสารออกซิเดชันมีความไวสูงขึ้น (Dechtrirat *et al.*, 2018) 2) เพิ่มความเสถียรของขั้วไฟฟ้า การเคลือบอนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัมบน SPCE สามารถเพิ่มความเสถียรในการทำงานของขั้วไฟฟ้า ทำให้สามารถใช้งานได้นานขึ้นและลดการเสื่อมสภาพของขั้วไฟฟ้า (Wang *et al.*, 2022) 3) ประหยัดค่าใช้จ่าย SPCE เป็นขั้วไฟฟ้าที่ผลิตง่ายและราคาถูก การปรับปรุงด้วยอนุภาคนาโนทำให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นโดยไม่ต้องลงทุนมากในการผลิตอุปกรณ์ที่มีความซับซ้อน 4) การวิเคราะห์ที่แม่นยำและรวดเร็ว การใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรีกับขั้วไฟฟ้าที่ปรับปรุงแล้วสามารถวิเคราะห์ระดับของสารเคมีที่เกี่ยวข้องกับภาวะเครียดออกซิเดชัน ได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ 5) การประยุกต์ใช้ในงานวิจัยและการแพทย์ ขั้วไฟฟ้าที่ปรับปรุงแล้วสามารถนำไปใช้ในการวิจัยด้านชีวเคมีและการแพทย์ เพื่อศึกษากระบวนการออกซิเดชันและพัฒนาวิธีการตรวจจับโรคที่เกิดจากภาวะเครียดออกซิเดชันได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ดังนั้น การปรับปรุงขั้วไฟฟ้า SPCE ด้วยอนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัมเพื่อใช้ในเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี จึงเป็นการพัฒนาที่มีความสำคัญและมีศักยภาพในการตรวจจับและวิเคราะห์สารออกซิเดชันที่เกี่ยวข้องกับภาวะเครียดออกซิเดชัน ซึ่งสามารถนำไปสู่การพัฒนาการวินิจฉัยและการรักษาโรคได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

การศึกษาการปรับปรุงขั้วไฟฟ้า SPCE ด้วยอนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัมเพื่อใช้ในเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี เพื่อการตรวจจับภาวะเครียดออกซิเดชัน โดยที่เรื่องภาวะเครียดออกซิเดชัน

(Faradilla *et al.*, 2022) เป็นที่นิยมในวงการการแพทย์ในปัจจุบัน การพัฒนา SPCE ด้วยอนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัมเป็นผลมาจากความต้องการในการพัฒนาเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพในการตรวจวัดออกซิเดชันและเกี่ยวกับภาวะอนุมูลอิสระในร่างกาย (Free radicles) ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญในการเกิดโรคต่าง ๆ รวมถึงภาวะที่เกี่ยวกับอายุ มะเร็ง โรคหัวใจ และโรคเรื้อรังอื่น ๆ การพัฒนาขั้วไฟฟ้าที่มีความไวต่อการตอบสนองและความถูกต้อง ในการตรวจวัดออกซิเดชันจึงเป็นสิ่งที่ช่วยเรื่องการอ่านสัญญาณได้ดีมากขึ้น SPCE ที่ปรับปรุงด้วยอนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัมมีความไวต่อการตอบสนองที่สูงต่อการเปลี่ยนแปลงในออกซิเดชัน ทำให้เป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการวัดระดับภาวะเครียดออกซิเดชัน ในตัวอย่างทดลองและที่สำคัญเป็นอุปกรณ์ที่สามารถผลิตได้ในขนาดที่เล็กและราคาถูก ทำให้เหมาะสำหรับการใช้งานในสถานที่ต่าง ๆ และสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์ในช่วงเวลาที่เร็วขึ้นการใช้ SPCE ที่ปรับปรุงด้วยอนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัมในเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี เป็นการพัฒนาเทคนิคที่มีความถูกต้องและอ่อนไหวต่อการวัดภาวะเครียดออกซิเดชัน ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้งานได้ง่ายและความไวต่อการทำงานการศึกษาดังกล่าวมีความสำคัญอย่างมากในการเข้าใจและการควบคุมสุขภาพของมนุษย์ โดยเฉพาะในการวิเคราะห์และการตรวจวัดภาวะเครียดออกซิเดชันที่เป็นปัจจัยสำคัญในการเกิดโรคต่าง ๆ อย่างมีประสิทธิภาพและถูกต้อง (Faradilla *et al.*, 2022)

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การศึกษาและพัฒนากการปรับปรุงขั้วไฟฟ้า SPCE ด้วยอนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัม และใช้เทคนิคการชุบด้วยไฟฟ้า (Electrolytic Deposition) ลงบน SPCE เพื่อปรับปรุงสัญญาณโดยใช้ในเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี ในการวิเคราะห์การปรับปรุงสัญญาณเปรียบเทียบกับขั้วไฟฟ้าแบบปกติที่ไม่ได้มีการชุบไฟฟ้า

วัตถุประสงค์การวิจัย

สังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัมเพื่อนำมาปรับปรุงขั้วไฟฟ้า SPCE ด้วยวิธีการชุบด้วยไฟฟ้าเพื่อปรับปรุงสัญญาณ และหากระแสไฟฟ้าที่สามารถปรับปรุงสัญญาณได้ดีที่สุดสำหรับพัฒนาเป็นเซ็นเซอร์ตรวจวัดภาวะเครียดออกซิเดชัน

วิธีการดำเนินการวิจัย

เครื่องมือการวิจัย

ไฮโดรเจนเตตระคลอโรออร์เตต (Hydrogen Tetrachloroaurate; $\text{HAuCl}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$), ดีไฮโดรเจนเฮกซะคลอโรแพลทีเนต (IV) เฮกซะไฮเดรต (Dihydrogen hexachloroplatinate (IV) hexahydrate; $\text{H}_2\text{PtCl}_6 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), กรดคลอโรจีนิก (Chlorogenic Acid; CGA) เป็นสารเคมีใช้สำหรับวิเคราะห์ทดสอบ โดยถูกเตรียมในรูปแบบของสารละลายในน้ำปราศจากไอออน (DI Water), โพแทสเซียมคลอไรด์

(Potassium chloride; KCl) ความเข้มข้น 0.5 M ในน้ำปราศจากไอออน, ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ซาลีน (Phosphate-buffered saline; PBS) 1 M ในน้ำปราศจากไอออน และ เครื่องปาล์มเซ็นส์ (PalmSens4; FRA / EIS: 10 μ Hz up to 1 MHz) สำหรับวัดกระแสไฟฟ้าที่ถูกปรับปรุงด้วยอนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัม

1. สังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัม (AuPtNPs)

เตรียมสารละลายทองคำ 0.5 กรัม ในน้ำปราศจากไอออน 250 มิลลิลิตร และ แพลทินัม 0.5 กรัม ในน้ำปราศจากไอออน 250 มิลลิลิตร จากนั้นเตรียม CGA 1 กรัมในน้ำ 7 มิลลิลิตร นำไปให้ความร้อนจนเดือด 10 นาที ใส่สารละลายแพลทินัมที่เตรียมไว้ 1 มิลลิลิตร ให้ความร้อนที่ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 นาที นำไปแช่ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2.5 ชั่วโมง เมื่อครบเวลานำมาตั้งให้ความร้อนจนเดือดและใส่สารละลายทองคำที่เตรียมไว้ 1 มิลลิลิตร และกวนให้เข้ากัน โดยสารละลายทั้งหมดจะเป็นสัดส่วน 1:1:1 และทิ้งไว้ข้ามคืน (Chen and Meng, 2021; Chen *et al.*, 2021)

การเตรียมอนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัมที่สังเคราะห์แล้วเพื่อนำไปทดสอบด้วย XRD เพื่อระบุชนิดของอนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัม เริ่มจากล้างสารละลาย CGA ที่ไม่เกิดปฏิกิริยาให้เหลือแค่อนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัมบริสุทธิ์ด้วยการปั่นเหวี่ยง จากนั้นนำไปใส่เครื่องทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze dry) เป็นเวลา 24 ชั่วโมงแล้วจึงนำไปทดสอบ

2. การชุบด้วยไฟฟ้า (Electrolytic Deposition) ลงบนขั้วไฟฟ้า SPCE

เตรียมอนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัม 2% ในสารละลาย KCl ความเข้มข้น 0.5 M ในน้ำปราศจากไอออน จากนั้นใช้ไมโครปิเปตดูดสารละลายที่ผสมไว้หยดลงบนขั้วไฟฟ้า SPCE ที่ต่ออยู่บนเครื่องปาล์มเซ็นส์ จนสารละลายคลุมทั่วส่วนของขั้วไฟฟ้าทำงาน (Working Electrode) จากนั้นให้กระแสไฟฟ้าที่ -0.25 โวลต์, -0.5 โวลต์, -0.75 โวลต์ และ -0.1 โวลต์ ใช้เวลาในการให้กระแสไฟฟ้าที่ 300 วินาทีโดยใช้โหมดวัดกระแสไฟฟ้าตามเวลา (Chronoamperometer; CA) (Parchaen, 2014 และ Weichun Ye, 2012) ทำทั้งหมด 5 ซ้ำ จากนั้นนำไปอบให้แห้งใช้อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นนำไปเก็บไว้ในตู้ดูดความชื้นเพื่อนำไปทดสอบด้วยเทคนิค รามานสเปกโทรสโกปี และ SEM เพื่อยืนยันการเกิดปฏิกิริยาระหว่างอนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัมบนขั้วไฟฟ้า SPCE และ ทดสอบการปรับปรุงสัญญาณด้วยเครื่องปาล์มเซ็นส์ในโหมดไซคลิกโวลแทมเมทรี (Cyclic voltammetry; CV) ต่อไป

3. การทดสอบการปรับปรุงสัญญาณบนขั้วไฟฟ้า SPCE ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี

เตรียมสารละลาย PBS 1 M ในน้ำปราศจากไอออน นำขั้วไฟฟ้า SPCE ที่ชุบด้วยไฟฟ้ากับอนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัมต่อกับเครื่องปาล์มเซ็นส์ใช้ไมโครปิเปตดูดสารละลายที่ผสมไว้หยดลงบนขั้วไฟฟ้า SPCE จากนั้นให้กระแสไฟฟ้าที่ -0.25 โวลต์, -0.5 โวลต์, -0.75 โวลต์ และ -0.1 โวลต์ ใช้เวลาในการให้กระแสไฟฟ้าที่ 300 วินาที โดยใช้โหมดไซคลิกโวลแทมเมทรี ทำทั้งหมด 3 ซ้ำ จากนั้น

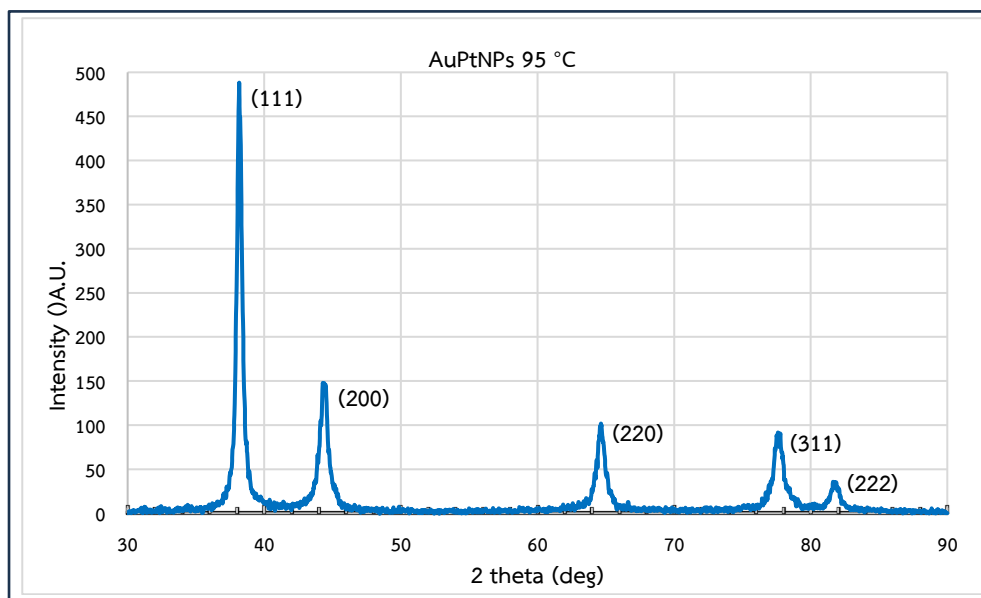
วิเคราะห์ผลจากกราฟที่แสดงค่าโดยเครื่องปาล์มเซ็นส์เพื่อหาช่วงไฟฟ้าที่ให้กระแสไฟฟ้าสูงที่สุด (Lisund *et al.*, 2022; Parcharoen, 2014)

ผลการวิจัย

1. การตรวจสอบสมบัติของอนุภาคนาโน

1.1. การตรวจสอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction: XRD)

การตรวจสอบสมบัติของอนุภาคนาโนด้วยเทคนิค XRD เป็นเทคนิคที่นำรังสีเอกซ์มาใช้ในการวิเคราะห์และระบุโครงสร้างผลึกของสารประกอบและแร่ ผลการวิเคราะห์จาก XRD ทำให้สามารถแยกแยะประเภทและชนิดของวัสดุที่พบในธรรมชาติว่ามีรูปแบบโครงสร้างผลึกแบบใด (Holder and Schaak, 2019 และ Mourdikoudis *et al.*, 2018) ผลการทดสอบด้วยเทคนิค XRD จากภาพประกอบ 1 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของอนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัมมีตำแหน่งการเลี้ยวเบนอยู่ที่ 2 theta ประมาณ 38.1°, 44.4°, 64.8°, 77.6° และ 81.8° ตามลำดับโดยที่ 81.8° เป็นตำแหน่งการเลี้ยวเบนของแพลทินัม เนื่องจากระนาบ (111), (200), (220), (311) และ (222) (Mavukkandy *et al.*, 2016; Sneha *et al.*, 2014) ซึ่งตำแหน่งดังกล่าวเป็นตำแหน่งการเลี้ยวเบนของอนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัมอ้างอิงจาก (Kumar *et al.*, 2017)

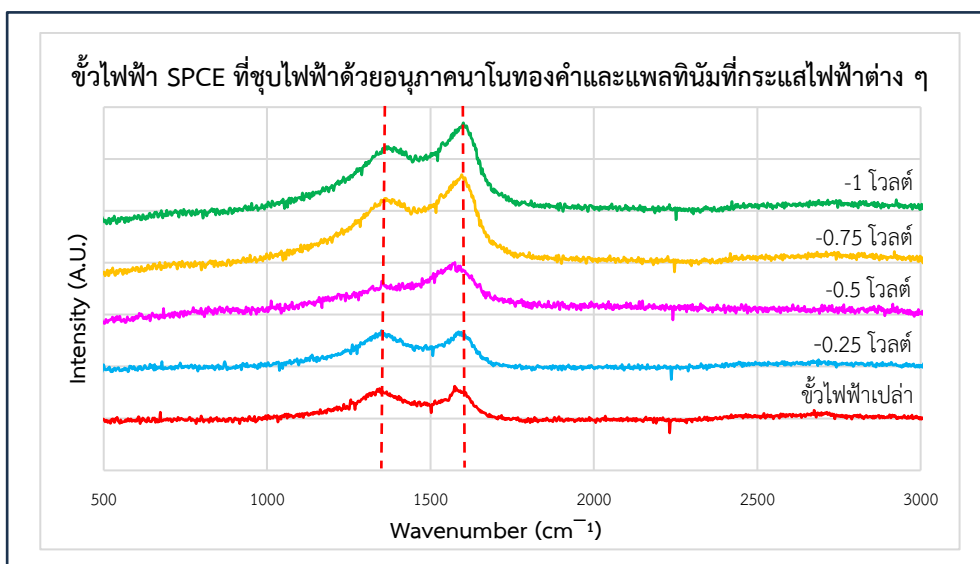


ภาพประกอบ 1 กราฟแสดงผล XRD patterns ของผลึกอนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัม

2. การตรวจสอบข้อไฟฟ้า SPCE ที่ผ่านการชุบด้วยไฟฟ้า (Electrolytic Deposition) ด้วยอนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัม

2.1. การตรวจสอบด้วยเทคนิครามานสเปกโทรสโคปี (Raman Spectroscopy)

เทคนิครามานสเปกโทรสโคปี เป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการตรวจยืนยันเอกลักษณ์ของสารโดยอาศัยหลักการทางแสง โดยที่สารแต่ละตัวจะมีลักษณะการกระเจิงแสงไม่เหมือนกัน โดยหลังจากการชุบไฟฟ้าด้วยอนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัมลงบนข้อไฟฟ้า SPCE ข้อไฟฟ้าถูกนำมาตรวจสอบการมีอยู่ของอนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัม

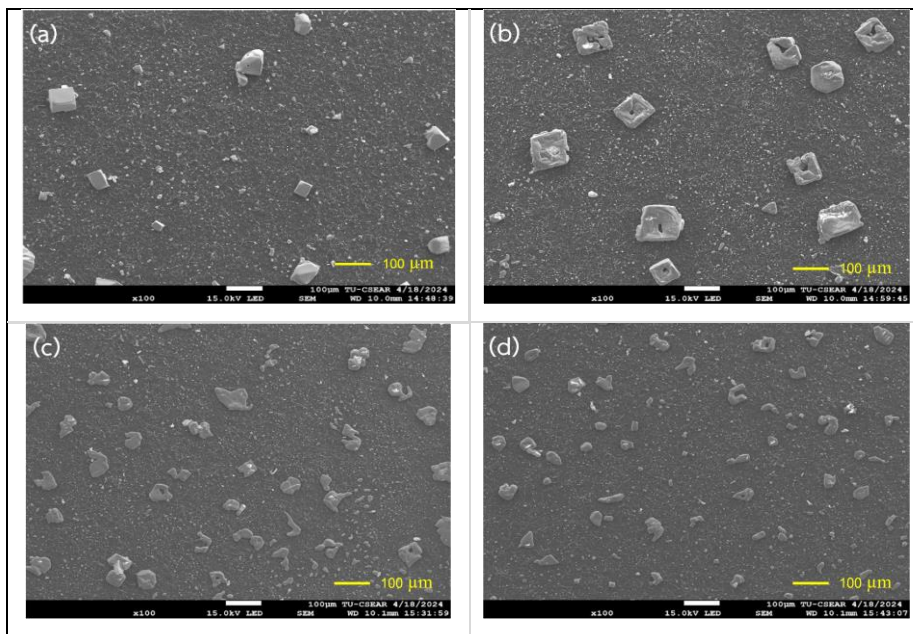


ภาพประกอบ 2 พิกของข้อไฟฟ้า SPCE ที่ชุบด้วยอนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัมที่กระแสไฟฟ้าต่าง ๆ มีดังนี้: ที่กระแสไฟฟ้า -0.25 โวลต์: พิกอยู่ที่ 1351.558 cm^{-1} และ 1594.545 cm^{-1} ที่กระแสไฟฟ้า -0.5 โวลต์: พิกอยู่ที่ 1349.63 cm^{-1} และ 1568.51 cm^{-1} ที่กระแสไฟฟ้า -0.75 โวลต์: พิกอยู่ที่ 1348.665 cm^{-1} และ 1584.903 cm^{-1} ที่กระแสไฟฟ้า -1 โวลต์: พิกอยู่ที่ 1348.665 cm^{-1} และ 1580.081 cm^{-1} ข้อไฟฟ้าที่ไม่ผ่านการชุบไฟฟ้า: พิกอยู่ที่ 1349.63 cm^{-1} และ 1578.153 cm^{-1}

2.2. การตรวจสอบด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)

การใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เป็นเทคนิคที่ใช้ในการตรวจสอบพื้นผิวของอนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัม ซึ่งสามารถให้ข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับโครงสร้างพื้นผิว ขนาด และการกระจายตัวของอนุภาคนาโนได้ ภาพที่แสดงในภาพประกอบ 3 เป็นภาพของอนุภาคนาโนทองคำและ

แพลทินัมบนพื้นผิวขั้วไฟฟ้า SPCE ที่ผ่านการชุบด้วยไฟฟ้าที่ใช้กระแสไฟฟ้า -0.25 โวลต์, -0.5 โวลต์, -0.75 โวลต์ และ -1 โวลต์ โดยขยายด้วยกำลังขยาย 100 เท่า และใช้พลังงานลำแสงอิเล็กตรอนที่ 15.0 กิโลโวลต์



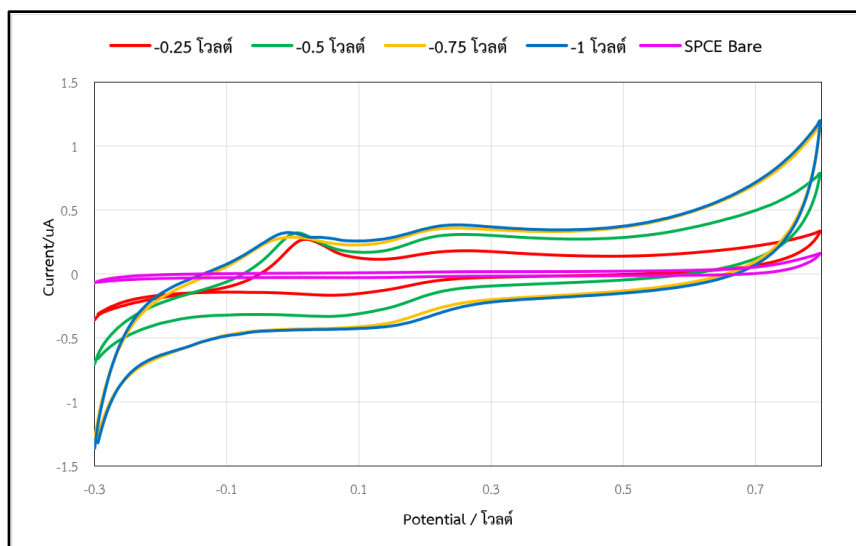
ภาพประกอบ 3 แสดงภาพจากเทคนิค SEM ของอนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัมบนพื้นผิวของขั้วไฟฟ้า SPCE: (a) ขั้วไฟฟ้า SPCE ที่ชุบด้วยกระแสไฟฟ้า -0.25 โวลต์ (b) ขั้วไฟฟ้า SPCE ที่ชุบด้วยกระแสไฟฟ้า -0.5 โวลต์ (c) ขั้วไฟฟ้า SPCE ที่ชุบด้วยกระแสไฟฟ้า -0.75 โวลต์ (d) ขั้วไฟฟ้า SPCE ที่ชุบด้วยกระแสไฟฟ้า -1 โวลต์

จากภาพประกอบ 3 จะเห็นความแตกต่างของสัณฐานวิทยาของพื้นผิว SPCE เมื่อมีการกระตุ้นไฟฟ้าที่ต่างกันระหว่าง -0.25 โวลต์, -0.5 โวลต์, -0.75 โวลต์ และ -1.0 โวลต์ ซึ่งส่งผลต่อการจัดเรียงตัวและขนาดของอนุภาคที่เกิดขึ้นบนพื้นผิว โดยสามารถอธิบายความแตกต่างได้ดังนี้ ภาพ (a) ที่ศักย์ไฟฟ้า -0.25 โวลต์ พบว่ามีการกระจายตัวของอนุภาคในรูปทรงที่ค่อนข้างสม่ำเสมอ และอนุภาคมีขนาดเล็กเมื่อเปรียบเทียบกับภาพอื่น ๆ ภาพ (b) ที่ศักย์ไฟฟ้า -0.5 โวลต์ อนุภาคที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวมีขนาดใหญ่ขึ้นและมีการกระจายตัวเป็นกลุ่ม ๆ อย่างเห็นได้ชัด การรวมตัวของอนุภาคแสดงถึงกระบวนการเติบโตที่ชัดเจนขึ้น ภาพ (c) ที่ศักย์ไฟฟ้า -0.75 โวลต์ สัณฐานวิทยาของอนุภาคเปลี่ยนไปเป็นลักษณะที่มีความแตกต่างทั้งในด้านรูปทรงและการกระจายตัว มีการกระจายที่ไม่สม่ำเสมอ และการจัดเรียงตัวของอนุภาคไม่เป็นระบบเท่าในภาพ (a) และ (b) ภาพ (d) ที่ศักย์ไฟฟ้า -1.0 โวลต์ การกระจายตัวของอนุภาคมีความไม่สม่ำเสมออย่างชัดเจนมากที่สุด และขนาดของอนุภาคยังคงมีการเติบโตและกระจาย

ไปในลักษณะที่ซับซ้อนกว่า ความแตกต่างของสัญญาณวิทยาเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของศักย์ไฟฟ้า ซึ่งส่งผลต่อกระบวนการสะสมและการจัดเรียงตัวของอนุภาคบนพื้นผิว SPCE

2.3. การตรวจสอบสัญญาณชีวไฟฟ้า SPCE ที่ปรับปรุงด้วยอนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัม ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี

เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี เป็นวิธีการวัดปฏิกิริยาทางไฟฟ้าของสารเคมีในสารละลายที่ใช้ตรวจสอบสมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์ของชีวไฟฟ้าและปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่พื้นผิวของชีวไฟฟ้า การปรับปรุงสมบัติของชีวไฟฟ้าด้วยอนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัมสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของชีวไฟฟ้าได้ โดยเพิ่มพื้นที่ผิวที่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้มากขึ้นและปรับปรุงคุณสมบัติทางไฟฟ้าเคมี การทดสอบใช้สารละลาย PBS เป็นอิเล็กโทรไลต์ และใช้กระแสไฟฟ้าต่างกันว่า -0.25 โวลต์, -0.5 โวลต์, -0.75 โวลต์ และ -1 โวลต์ เป็นเวลา 300 วินาที ทำซ้ำทั้งหมด 3 ซ้ำ



ภาพประกอบ 4 แสดงกราฟเปรียบเทียบของ การทดสอบสัญญาณไฟฟ้าด้วยเทคนิค CV ที่กระแสไฟฟ้าแตกต่างกันของชีวไฟฟ้า SPCE ที่ชุบไฟฟ้าด้วยอนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัม

ตารางที่ 1 ผลการทำไซคลิกโวลแทมเมทรี (CV) สำหรับอิเล็กโทรดทั้งห้า (-0.25 โวลต์, -0.5 โวลต์, -0.75 โวลต์, -1 โวลต์ และ SPCE)

อิเล็กโทรด	I _{pa}	E _{pa}	I _{pc}	E _{pc}	ΔE _p (mV)	คุณภาพ ของฟิค	เชิงเส้นของ I _p / V ^{1/2} (%)	กระแสความจุ (μA)
-0.25 โวลต์	0.33	0.80	-0.36	-0.30	1097.74	0.94	91.99	9.41
-0.5 โวลต์	0.78	0.80	-0.70	-0.30	1097.74	0.27	74.97	3.05
-0.75 โวลต์	1.16	0.80	-1.30	-0.30	1097.74	0.43	7.36	9.80
-1 โวลต์	1.19	0.80	-1.36	-0.30	1097.74	0.19	62.94	8.18
SPCE	0.16	0.80	-0.07	-0.30	1097.74	0.01	83.31	3.67

คำจำกัดความในตาราง

- I_{pa} (กระแสฟิคแอโนดิก): แสดงค่ากระแสสูงสุดที่สังเกตได้ในระหว่างการออกซิเดชัน
- E_{pa} (ศักย์ที่กระแสฟิคแอโนดิก): ศักย์ที่กระแสฟิคแอโนดิกเกิดขึ้น
- I_{pc} (กระแสฟิคคาโทดิก): แสดงค่ากระแสสูงสุดที่สังเกตได้ในระหว่างการรีดักชัน
- E_{pc} (ศักย์ที่กระแสฟิคคาโทดิก): ศักย์ที่กระแสฟิคคาโทดิกเกิดขึ้น
- ΔE_p (mV): ความแตกต่างระหว่างศักย์ของฟิคแอโนดิกและคาโทดิก คำนวณโดยอิงถึงปฏิกิริยาทางอิเล็กโทรเคมีที่มีการย้อนกลับได้มากขึ้น
- คุณภาพของฟิค: บ่งบอกถึงคุณภาพหรือความชัดเจนของฟิคที่สังเกตได้
- เชิงเส้นของ I_p ต่อ V^{1/2}: บ่งบอกถึงความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างกระแสฟิค (I_p) กับรากที่สองของอัตราสแกน (V^{1/2}) เชิงเส้นสูงบ่งชี้ถึงกระบวนการควบคุมการกระจายตัว
- กระแสความจุ: บ่งบอกถึงกระแสที่ไม่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี แต่เป็นผลจากชั้นความจุ

อภิปรายผลการวิจัย

การปรับปรุงชีวไฟฟ้า SPCE ด้วยอนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัม โดยใช้ CGA เป็นตัวรีดิวซ์และสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส จากนั้นทำการชุบไฟฟ้าลงบนชีวไฟฟ้า SPCE ที่กระแสไฟฟ้า -0.25 โวลต์, -0.5 โวลต์, -0.75 โวลต์, และ -1 โวลต์ พบว่ากระแสไฟฟ้า -0.25 โวลต์ สามารถปรับปรุงสัญญาณได้ดีที่สุด การทดลองตรวจสอบผลตั้งแต่การสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัม รวมถึงการปรับปรุงสัญญาณด้วยเทคนิคต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

ผลการตรวจสอบโครงสร้างผลึกของอนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัมด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction: XRD) พบว่า อนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัมมีตำแหน่งการเลี้ยวเบนอยู่ที่ 2 theta ประมาณ 38.1°, 44.4°, 64.8°, 77.6° และ 81.8° ตามลำดับโดยที่ 81.8° เป็นตำแหน่ง

การเลี้ยวเบนของแพลทินัม เนื่องจากระนาบ (111), (200), (220), (311) และ (222) ซึ่งอนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัมที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส มีโครงสร้างผลึกแบบ face-centered cubic (FCC) โดยพิคหลักที่ 38.1° เป็นพิคที่บ่งบอกถึงการมีอยู่ของโครงสร้างผลึกทองคำและแพลทินัมแบบ FCC ในปริมาณที่มากและเป็นระเบียบ (Dheyab *et al.*, 2020; Khalil *et al.*, 2014; Lee *et al.*, 2012)

การตรวจสอบข้อไฟฟ้า SPCE ที่ผ่านการชุบไฟฟ้าด้วยอนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัม โดยใช้เทคนิครามานสเปกโทรสโคปี พบว่ามีการเลื่อนตำแหน่งจุดพิคและความเข้มของพิคที่สูงขึ้นของสเปกตรัมรามานเมื่อใช้กระแสไฟฟ้าที่แตกต่างกันเปรียบเทียบกับ SPCE ที่ไม่ได้ชุบไฟฟ้า ดังนั้นกระแสไฟฟ้าที่ใช้มีอิทธิพลต่อคุณลักษณะของสเปกตรัมรามาน ซึ่งอาจเกิดจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างอนุภาคนาโนและ SPCE นำไปสู่การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติพื้นผิว ภาพประกอบ 2 แสดงให้เห็นว่าพิคของข้อไฟฟ้า SPCE ที่ไม่ได้ผ่านการชุบกับข้อไฟฟ้า SPCE ที่ผ่านการชุบไฟฟ้าด้วยกระแสไฟฟ้าต่าง ๆ มีความยาวคลื่นที่ใกล้เคียงกัน แต่แตกต่างกันที่ความเข้ม ซึ่งข้อไฟฟ้า SPCE ที่ผ่านการชุบไฟฟ้ามีความเข้มที่สูงกว่า เนื่องจากความยาวคลื่นของคาร์บอนบนข้อไฟฟ้า และความยาวคลื่นของทองคำและแพลทินัมมีความใกล้เคียงกันมาก (Li *et al.*, 2023; Liu *et al.*, 2024; Ren *et al.*, 2007) ดังนั้นการตรวจสอบด้วยเทคนิครามานสเปกโทรสโคปีจึงบอกได้เพียงเบื้องต้นว่ามีอนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัมอยู่บนพื้นผิวของข้อไฟฟ้า SPCE จึงได้มีการตรวจสอบด้วยเทคนิค SEM เพิ่มเติม

การตรวจสอบลักษณะโครงสร้างและขนาดของอนุภาคนาโนด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) พบว่าลักษณะอนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัม ที่สังเคราะห์ได้มีขนาดประมาณ 6.4 นาโนเมตร

การตรวจสอบพื้นผิวของข้อไฟฟ้า SPCE ที่ปรับปรุงด้วยอนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัม โดยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าการปรับปรุงข้อไฟฟ้าด้วยอนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัมบนพื้นผิวของข้อไฟฟ้า SPCE ที่ใช้กระแสไฟฟ้าต่างกัมีผลต่อขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคนาโน การใช้กระแสไฟฟ้าที่สูงขึ้นทำให้อัตราการกระจายตัวของอนุภาคนาโนลดลงและการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ โดยที่กระแสไฟฟ้าต่ำ -0.25 โวลต์ อนุภาคนาโนมีขนาดเล็กและการกระจายสม่ำเสมอมากกว่า แต่เมื่อกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นที่ -0.5 โวลต์, -0.75 โวลต์ และ -1 โวลต์ อนุภาคนาโนมีขนาดเกาะกลุ่มและการกระจายตัวได้น้อยลง

การตรวจสอบสัญญาณข้อไฟฟ้า SPCE ที่ปรับปรุงด้วยอนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัม ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี ผลการใช้กระแสไฟฟ้าในการปรับปรุงข้อไฟฟ้า SPCE ด้วยอนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัมบนข้อไฟฟ้า SPCE แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการตอบสนองกระแสไฟฟ้าของการวัด CV การปรับปรุงด้วยอนุภาคนาโนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี โดยงานวิจัยนี้พบว่ากระแสไฟฟ้าที่ปรับปรุงและให้ผลดีที่สุดคือ -0.25 โวลต์ โดยวัดจากพื้นที่ใต้กราฟที่มีค่ามากที่สุด ได้แก่ -0.25 โวลต์ มีพื้นที่ใต้กราฟ 5.72 ตารางเซนติเมตร, -0.5 โวลต์ มีพื้นที่ใต้

กราฟ 2.24 ตารางเซนติเมตร, -0.75 โวลต์ มีพื้นที่ใต้กราฟ 0.71 ตารางเซนติเมตร และ -1 โวลต์ มีพื้นที่ใต้กราฟ 0.57 ตารางเซนติเมตร

จากตารางที่ 1 อิเล็กโทรดที่ศักย์ -0.25 โวลต์ แสดงกระแสฟิคที่ค่อนข้างต่ำ ($I_{pa}=0.33 \mu A$, $I_{pc}=-0.36 \mu A$) ค่าความแตกต่างของศักย์ที่น้อย แสดงให้เห็นถึงการโยกย้ายอิเล็กตรอนที่ช้า ในขณะที่อิเล็กโทรดที่ศักย์ -0.5 โวลต์ แสดงกระแสฟิคที่สูงขึ้นมาก ($I_{pa}=0.78 \mu A$, $I_{pc}=-0.70 \mu A$) ซึ่งบ่งชี้ถึงกิจกรรมทางอิเล็กโทรเคมีที่ดีขึ้นเมื่อเทียบกับอิเล็กโทรดที่ศักย์ -0.25 โวลต์ อิเล็กโทรดที่ศักย์ -0.75 และ -1 โวลต์ แสดงกระแสฟิคที่สูงที่สุดในบรรดาอิเล็กโทรดทั้งหมด (อิเล็กโทรดที่ศักย์ -1 โวลต์ มี $I_{pa}=1.19 \mu A$, $I_{pc}=-1.36 \mu A$) ซึ่งบ่งชี้ถึงกิจกรรมทางอิเล็กโทรเคมีที่สูง อิเล็กโทรด SPCE แสดงกระแสฟิคที่ต่ำที่สุด ($I_{pa}=0.16 \mu A$, $I_{pc}=-0.07 \mu A$) ซึ่งบ่งบอกถึงกิจกรรมทางอิเล็กโทรเคมีที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับอิเล็กโทรดอื่น ๆ

อิเล็กโทรดทุกชนิดมีค่า ΔE_p เท่ากันที่ 1097.74 มิลลิโวลต์ ซึ่งแสดงถึงความแตกต่างของศักย์ที่สูงและอาจเป็นผลมาจากความต้านทานภายในสูงหรือปฏิกิริยาทางอิเล็กโทรเคมีที่ไม่สามารถย้อนกลับได้ง่าย คุณภาพฟิคที่สูงสุดพบในอิเล็กโทรดที่ศักย์ -0.25 โวลต์ (0.94) แสดงถึงฟิคที่ชัดเจน ในขณะที่ SPCE แสดงคุณภาพฟิคที่ต่ำมาก (0.01) ซึ่งบ่งบอกถึงฟิคที่ไม่ชัดเจนหรือแบนราบ

สมการเชิงเส้นของ I_p ต่อ $v^{1/2}$ ของอิเล็กโทรดที่ศักย์ -0.25 โวลต์ แสดงเชิงเส้นสูงสุด (91.99%) ซึ่งบ่งบอกถึงกระบวนการควบคุมการกระจายตัวของประจุที่ดี ในขณะที่อิเล็กโทรดที่ศักย์ -0.75 โวลต์ แสดงเชิงเส้นต่ำสุด (7.36%) ซึ่งบ่งชี้ว่าปัจจัยอื่นอาจมีผลต่อการกระแสดูดซับ

อิเล็กโทรดที่ศักย์ -0.75 โวลต์ มีค่ากระแสความจุสูงสุด (9.80 μA) แสดงถึงความจุสูงมาก ในขณะที่ SPCE และอิเล็กโทรดที่ศักย์ -0.5 โวลต์ มีกระแสความจุต่ำกว่า ซึ่งแสดงถึงความจุน้อยกว่า

จากการเปรียบเทียบกิจกรรมทางอิเล็กโทรเคมี อิเล็กโทรดที่ศักย์ -0.75 และ -1 โวลต์ แสดงกิจกรรมทางอิเล็กโทรเคมีที่สูงสุด ซึ่งเห็นได้จากกระแสฟิคที่สูงขึ้น ค่าความแตกต่างระหว่างศักย์ฟิคสูงสุดในทุกอิเล็กโทรดแสดงถึงการย้อนกลับของปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่ไม่ค่อยดี อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบคุณภาพฟิคและเชิงเส้น อิเล็กโทรดที่ศักย์ -0.25 และ -0.75 โวลต์ โดดเด่นในด้านคุณภาพฟิคและเชิงเส้นตามลำดับ ส่วน SPCE แสดงผลการทำงานต่ำสุดในทุกมิติที่วัดได้ กระแสความจุสูงในอิเล็กโทรดที่ศักย์ -0.75 โวลต์ บ่งบอกถึงความจุที่มีนัยสำคัญ ข้อมูลนี้แสดงให้เห็นว่าอิเล็กโทรดที่ศักย์ -0.75 และ -1 โวลต์ ควรได้รับการสำรวจเพิ่มเติมสำหรับการใช้งานที่ต้องการกิจกรรมทางอิเล็กโทรเคมีสูง ส่วนอิเล็กโทรดที่ศักย์ -0.25 โวลต์ นำเสนอบาลานซ์ที่ดีระหว่างคุณภาพฟิคและเชิงเส้น ส่วนอิเล็กโทรด SPCE แสดงผลการทำงานต่ำในทุกมิติที่วัดได้

สรุปผลการทดลอง

ภาวะเครียดออกซิเดชันเป็นปัจจัยสำคัญในการเกิดโรคเรื้อรังและโรคทางระบบประสาท การตรวจจับภาวะนี้ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี (CV) สามารถเพิ่มความแม่นยำได้โดยการปรับปรุง ขั้วไฟฟ้า SPCE ด้วยอนุภาคนาโนทองคำ (AuNPs) และแพลทินัม (PtNPs) การศึกษานี้สังเคราะห์ อนุภาคนาโนทองคำและแพลทินัม และใช้เทคนิคการชุบไฟฟ้าบน SPCE เพื่อเพิ่มความไวในการตรวจจับ โดยใช้กระแสไฟฟ้าที่ศักย์ -0.25 โวลต์ พบว่าปรับปรุงสัญญาณได้ดีที่สุด ผลการวิเคราะห์ ด้วย XRD และ SEM ยืนยันโครงสร้างผลึกแบบ FCC ของอนุภาคนาโนที่ขนาดเฉลี่ย 6.4 นาโนเมตร การทดลองด้วย CV แสดงว่าอิเล็กโทรดที่ศักย์ -0.25 โวลต์ มีคุณภาพฟิคและเชิงเส้นที่ดีที่สุด ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการพัฒนาวิธีวินิจฉัยทางการแพทย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพได้ในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

- Chen, R., Wu, S. & Meng, C. (2021). Size-tunable green synthesis of platinum nanoparticles using chlorogenic acid. *Research on Chemical Intermediates*, 47(5), 1775-1787. <https://doi.org/10.1007/s11164-020-04377-4>.
- Chen, R., Yi, G., Wu, S. & Meng, C. (2021). Controlled green synthesis of Au-Pt bimetallic nanoparticles using chlorogenic acid. *Research on Chemical Intermediates*, 47(10), 4051-4066. <https://doi.org/10.1007/s11164-021-04513-8>.
- Dechtrirat, D., Yingyuad, P., Prajongtat, P., Chuenchom, L., Sriprachuabwong, C., Tuantranont, A. & Tang, I.M. (2018). A screen-printed carbon electrode modified with gold nanoparticles, poly(3,4-ethylenedioxythiophene), poly(styrene sulfonate) and a molecular imprint for voltammetric determination of nitrofurantoin. *Microchimica Acta*, 185(5), 261. <https://doi.org/10.1007/s00604-018-2797-3>.
- Dheyab, M., Abdul Aziz, A., Jameel, M., Khaniabadi, M.P. & Oglat, A. (2020). Rapid Sonochemically-Assisted Synthesis of Highly Stable Gold Nanoparticles as Computed Tomography Contrast Agents. *Applied Sciences*, 10, 7020. <https://doi.org/10.3390/app10207020>.
- Elgrishi, N., Rountree, K. J., Mc Carthy, B.D., Rountree, E.S., Eisenhart, T.T. & Dempsey, J.L. (2018). A Practical Beginner's Guide to Cyclic Voltammetry. *Journal of Chemical Education*, 95(2), 197-206. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.7b00361>.

- Faradilla, P., Setiyanto, H., Manurung, R.V. & Saraswaty, V. (2022). Electrochemical sensor based on screen printed carbon electrode–zinc oxide nano particles/molecularly imprinted-polymer (SPCE–ZnONPs/MIP) for detection of sodium dodecyl sulfate (SDS) [10.1039/D1RA06862H]. *RSC Advances*, 12(2), 743-752. <https://doi.org/10.1039/D1RA06862H>
- Holder, C.F. & Schaak, R.E. (2019). Tutorial on powder X-ray diffraction for characterizing nanoscale materials. *ACS NANO*, 13, 7359-7365.
- Khalil, M., Mostafa, Y. & torad, E. (2014). Biosynthesis and characterization of Pt and Au-Pt nanoparticles and their photo catalytic degradation of methylene blue. *International Journal of Advanced Research*, 2, 694-703.
- Kumar, M., Boddeti, G. & Annapurna, N. (2017). Green Synthesis and Characterization of Platinum Nanoparticles using Sapindus mukorossi Gaertn. Fruit Pericarp. *Asian Journal of Chemistry*, 29, 2541-2544. <https://doi.org/10.14233/ajchem.2017.20842A>
- Lee, C.F., Chang, C.L., Yang, J.C., Lai, H.Y. & Chen, C.H. (2012). Morphological determination of face-centered-cubic metallic nanoparticles by X-ray diffraction. *Journal of Colloid and Interface Science*, 369(1), 129-133. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jcis.2011.12.053>
- Li, Z., Deng, L., Kinloch, I. A. & Young, R.J. (2023). Raman spectroscopy of carbon materials and their composites: Graphene, nanotubes and fibres. *Progress in Materials Science*, 135, 101089.
- Lisnund, S., Blay, V., Muamkhunthod, P., Thunyanon, K., Pansalee, J., Monkathok, J., Maneechote, P., Chansaenpak, K. & Pinyou, P. (2022). Electrodeposition of Cobalt Oxides on Carbon Nanotubes for Sensitive Bromhexine Sensing. *Molecules*, 27(13), 4078.
- Liu, Y., Liu, C., Xin, Y., Liu, P., Xiao, A. & Ling, Z. (2024). A Signal-Based Auto-Focusing Method Available for Raman Spectroscopy Acquisitions in Deep Space Exploration. *Remote Sensing*, 16(5), 820.
- Mavukkandy, M., Chakraborty, S., Abbasi, T. & Abbasi, S.A. (2016). A clean-green synthesis of platinum nanoparticles utilizing a pernicious weed lantana (*Lantana camara*). *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 9, 84-90. <https://doi.org/10.3844/ajeassp.2016.84.90>.
- Mourdikoudis, S., Pallares, R.M. & Thanh, N.T. (2018). Characterization techniques for nanoparticles: comparison and complementarity upon studying nanoparticle properties. *Nanoscale*, 10(27), 12871-12934.

- Parcharoen, Y., Kajitvichyanukul, P., Sirivisoot, S., & Termsuksawad, P. (2014). Hydroxyapatite electrodeposition on anodized titanium nanotubes for orthopedic applications. *Applied Surface Science*, 311, 54-61.
- Ren, B., Liu, G.k., Lian, X.B., Yang, Z. & Tian, Z.Q. (2007). Raman spectroscopy on transition metals. *Analytical and bioanalytical chemistry*, 388, 29-45. <https://doi.org/10.1007/s00216-007-1141-2>.
- Sies, H., Berndt, C. & Jones, D. P. (2017). Oxidative stress. *Annual review of biochemistry*, 86, 715-748.
- Sneha, K., Esterle, A., Sharma, N. & Sahi, S. (2014). Yucca-derived synthesis of gold nanomaterial and their catalytic potential. *Nanoscale research letters*, 9, 627. <https://doi.org/10.1186/1556-276X-9-627>.
- Storz, G. & Imlayt, J.A. (1999). Oxidative stress. *Current Opinion in Microbiology*, 2(2), 188-194. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1369-5274\(99\)80033-2](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1369-5274(99)80033-2).
- Wang, J., Xu, S., Sun, P., Du, H. & Wang, L. (2022). Enhanced electrochemical performance of screen-printed carbon electrode by RF-plasma-assisted polypyrrole modification. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 33(25), 19923-19936. <https://doi.org/10.1007/s10854-022-08811-8>.
- Weichun Y.H.K., Liu, Q., Yan, J., Zhou, Feng., Wang, C. (2012). Electrochemical deposition of Au–Pt alloy particles with cauliflower-like microstructures for electrocatalytic methanol oxidation. *International Journal of Hydrogen Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.11.132>.

การเพาะเลี้ยงเมล็ดในหลอดทดลองและการผลิตเมล็ดเทียมจากเอื้องไม้เท้าฤๅษี
(*Dendrobium pendulum* Roxb.) ในสภาพปลอดเชื้อ
In Vitro Seed Culture and Artificial Seed Production of *Dendrobium*
pendulum Roxb. in Aseptic Conditions

จิราภรณ์ นิคมทัศน์¹ นิสากกร สุวรรณ² และจรรย์ มากน้อย³
Jiraporn Nikomtat¹, Nisakorn Suwan² and Charun Maknoi³

¹สาขาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์

¹Biology Program, Faculty of Science and Technology, Uttaradit Rajabhat University

²สาขาวิชาเกษตรศาสตร์ คณะเทคโนโลยีการเกษตรมหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง

²Agricultural Program, Faculty of agricultural technology, Lampang Rajabhat University

³สวนพฤกษศาสตร์บ้านร่มเกล้า พิษณุโลก ในพระราชดำริ

³Ban Romklao Phitsanulok Botanical Garden, Phitsanulok

*Corresponding author email: jnikomtat@uru.ac.th

Received : September 11, 2024

Revised : October 24, 2024

Accepted : November 29, 2024

บทคัดย่อ

นำเมล็ดเอื้องไม้เท้าฤๅษีมาตรวจสอบการมีชีวิตด้วยสาร Triphenyl tetrazolium chloride (TTC) พบว่าเอ็มบริโอแสดงสีแดงบางส่วนของเอ็มบริโอและทั้งเอ็มบริโอของเมล็ดตัวอย่างศึกษาในเวลา 48 ชั่วโมง เพาะเลี้ยงเมล็ดบนอาหารเพาะเลี้ยงบนอาหารสูตร MS และ 1/2MS ที่เติมน้ำตาลซูโครสเข้มข้นต่างกัน 3 ระดับ (15, 20 และ 30 กรัมต่อลิตร) เป็นเวลา 8 และ 12 สัปดาห์ พบว่าเมล็ดพัฒนาเป็นโปรโตคอร์มในอาหารทุกสูตร ทั้งนี้สูตรอาหาร 1/2MS ที่เติมน้ำตาล 20 กรัมต่อลิตร แสดงการพัฒนาของโปรโตคอร์มเร็วกว่าน้ำตาลระดับอื่น ดังนั้นสูตรอาหาร 1/2MS ที่เติมน้ำตาล 20 กรัมต่อลิตร จึงถูกเลือกเป็นอาหารในการศึกษาขั้นตอนต่อไป การกำจัดน้ำออกจากเมล็ดเทียม 0-6 ชั่วโมง พบร้อยละ ปริมาณน้ำที่เหลืออยู่ในเมล็ดเทียมชั่วโมงที่ 6 และร้อยละการรอดชีวิตอยู่ที่ 27.98 และ 65 ± 13.7 ตามลำดับ จากนั้นนำต้นอ่อนมาเพาะเลี้ยงบนอาหารที่เติม BA (0, 1, 2 และ 4 มิลลิกรัมต่อลิตร) ร่วมกับ NAA (0, 0.5 และ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร) เพาะเลี้ยงต้นอ่อนเป็นเวลา 8 สัปดาห์ พบว่าสูตรอาหารที่เติม BA ความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตรมีผลทำให้เอื้องไม้เท้าฤๅษีสามารถพัฒนาไปเป็นต้นได้สมบูรณ์กว่าสูตรอาหารอื่น แสดงค่าเฉลี่ยจำนวนยอดต่อต้นเท่ากับ 2.07 ± 0.68 ยอด ค่าเฉลี่ยความสูงต่อต้นเท่ากับ 0.87 ± 0.34 เซนติเมตร และค่าเฉลี่ยจำนวนรากต่อต้นสูงสุดเท่ากับ 0.53 ± 0.72 รากโดยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 กับสูตรอื่น

คำสำคัญ: การเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อ การเพาะเลี้ยงเมล็ด เมล็ดเทียม กล้วยไม้ *Dendrobium pendulum*

Abstract

Dendrobium pendulum Roxb.'s seed viability was determined using triphenyl tetrazolium chloride (TTC). Partial red staining was observed in the embryos, and the embryos of all examined seeds had completed the dissected perfecting record within 48 hours. Seeds were grown in vitro on MS and 1/2 MS media with various concentrations of sucrose (15, 20, and 30 grams per liter) for periods of 8 and 12 weeks. All of the media successfully supported seed germination and protocorm development. The 1/2 MS medium supplemented with 20 grams per liter of sucrose exhibited faster protocorm development compared to the other sucrose concentrations. Therefore, the 1/2 MS medium with 20 grams per liter of sucrose was selected for further study. Concurrently, we also studied the dehydration time of artificial seeds, ranging from 0 to 6 hours. The water content and survival percentage of the seeds dehydrated for 6 hours were 27.98% and 65±13.7%, respectively. The seedlings were then cultured on media supplemented with BA (0, 0.5, 1, 2, and 4 milligrams per liter) combined with NAA (0, 0.5, and 1 milligram per liter) for 8 weeks. It was found that the medium supplemented with 1 milligram per liter of BA resulted in the most complete development of the orchid, showing an average of 2.07±0.68 shoots per plant, an average height of 0.87±0.34 centimeters per plant, and the highest average of 0.53±0.72 roots per plant, with significant differences at the 95 percent confidence level ($p \leq 0.05$) compared to other media.

Key Words: Tissue Culture, Seed culture, Artificial seed, Orchid, *Dendrobium pendulum*

บทนำ

กล้วยไม้เป็นหนึ่งในกลุ่มพืชที่มีความหลากหลายทางชีวภาพมากที่สุดในโลก โดยมีจำนวนชนิดมากถึง 28,000 ชนิด จัดอยู่ใน 850 สกุล (Kew Gardens, 2022) อย่างไรก็ตาม กล้วยไม้หลายชนิดกำลังเผชิญกับภัยคุกคามจากการทำลายถิ่นที่อยู่อาศัย การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและการทำเกษตรกรรม (Gale *et al.*, 2018) การอนุรักษ์กล้วยไม้จึงเป็นเรื่องที่มีความสำคัญอย่างยิ่ง โดยเฉพาะกล้วยไม้ที่เสี่ยงต่อการสูญพันธุ์ เช่น เอื้องไม้เท้าฤๅษี (*Dendrobium pendulum* Roxb.) ซึ่งเป็น

กล้วยไม้ที่มีความงดงามและมีความสำคัญทางเศรษฐกิจ (Teixeira da Silva *et al.*, 2015) นอกจากนี้ยังอยู่ในบัญชีพืชเสี่ยงสูญพันธุ์ในประเทศบังคลาเทศ (Bhattacharjee *et al.*, 2023) การเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อพืชในหลอดทดลองเป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพในการขยายพันธุ์กล้วยไม้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกล้วยไม้ที่มีความเสี่ยงต่อการสูญพันธุ์ (Teixeira da Silva *et al.*, 2015) การเพาะเลี้ยงเมล็ดแบบไม่พึ่งพาเชื้อรา (asymbiotic seed germination) ได้รับการพัฒนามาตั้งแต่การศึกษาของ Knudson (1922) ซึ่งเป็นรากฐานสำคัญของการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อกล้วยไม้ (Liau *et al.*, 2003)

เอื้องไม้เท้าฤๅษี (*D. pendulum* Roxb.) มีความสำคัญในวงการไม้ดอกไม้ประดับ พบได้ในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ เช่น ประเทศไทย กัมพูชา เวียดนาม ลาว พม่า และบางส่วนของประเทศจีน (Zhu *et al.*, 2013) นอกจากนี้ยังมีการนำเข้ามาปลูกในพื้นที่ทางตอนเหนือของออสเตรเลีย โดยเจริญเติบโตในป่าฝนเขตร้อนและมักพบตามต้นไม้หรือโขดหิน โดยใช้รากอากาศในการดูดซับความชื้นและสารอาหารจากบรรยากาศและน้ำฝน (Zhu *et al.*, 2013) กล้วยไม้ในสกุล *Dendrobium* มีการนำมาใช้ประโยชน์ในด้านการแพทย์แผนโบราณ โดยเฉพาะในประเทศจีน ถูกใช้เป็นสมุนไพรสำคัญในตำรายาจีนโบราณมานานนับพันปี สารสำคัญที่พบในกล้วยไม้สกุลนี้ เช่น โพลีแซ็กคาไรด์และอัลคาลอยด์ มีฤทธิ์ทางเภสัชวิทยา เช่น ด้านการอักเสบ ด้านอนุมูลอิสระ และเสริมสร้างระบบภูมิคุ้มกัน นอกจากนี้ยังมีการใช้เป็นยาบำรุงร่างกายและยาชูกำลังในตำรายาจีน (Chen *et al.*, 2016)

การเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อพืชเป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพในการขยายพันธุ์กล้วยไม้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกล้วยไม้ที่มีความเสี่ยงต่อการสูญพันธุ์ (Teixeira da Silva *et al.*, 2015) การเพาะเมล็ดกล้วยไม้ด้วยเทคนิค การเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อพืชสามารถเพิ่มอัตราการรอดชีวิตของเมล็ดได้อย่างมีนัยสำคัญ การเพาะเลี้ยงเมล็ดแบบไม่พึ่งพาเชื้อราช่วยให้เมล็ดกล้วยไม้สามารถงอกได้ในสภาพแวดล้อมที่ควบคุมได้ซึ่งช่วยเพิ่มอัตราการงอกและลดการสูญเสียเมล็ด (Hossain *et al.*, 2013) การใช้สูตรอาหารที่เหมาะสม เช่น สูตร MS (Murashige and Skoog) และสูตร VW (Vacin and Went) ช่วยให้การพัฒนาของโปรโตคอร์มและต้นกล้าเป็นไปอย่างรวดเร็ว (Utami & Hariyanto, 2019) นอกจากนี้การเพาะเลี้ยงในหลอดทดลองยังช่วยป้องกันการปนเปื้อนจากเชื้อโรคและแมลงศัตรูพืช ทำให้ต้นกล้าที่ได้มีคุณภาพสูงและพร้อมสำหรับการนำไปปลูกในสภาพแวดล้อมภายนอก (Kauth *et al.*, 2008)

การผลิตเมล็ดเทียมจากโปรโตคอร์มกล้วยไม้เป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพในการขยายพันธุ์และอนุรักษ์พันธุ์กล้วยไม้ โดยเฉพาะในกล้วยไม้ที่มีการขยายพันธุ์ตามธรรมชาติที่ยากลำบาก เมล็ดเทียมถูกสร้างขึ้นโดยการห่อหุ้ม โปรโตคอร์มและโปรโตคอร์มไลค์บอดี (PLBs) ด้วยโซเดียมอัลจิเนต ซึ่งช่วยป้องกันการสูญเสียน้ำและสารอาหาร อีกทั้งยังช่วยเพิ่มอัตราการรอดชีวิตของโปรโตคอร์มเมื่อนำไปเพาะเลี้ยงในสภาพแวดล้อมที่ไม่ปลอดเชื้อ (Gantait & Sinniah, 2012) มีรายงานแสดงให้เห็นว่าเมล็ดเทียมสามารถพัฒนาเป็นต้นกล้าได้อย่างสมบูรณ์เมื่ออยู่ในสภาพแวดล้อมที่เหมาะสม การใช้สารห่อหุ้มที่เหมาะสม เช่น โซเดียมอัลจิเนต เป็นปัจจัยสำคัญในการสร้างเมล็ดเทียมที่มีคุณภาพ (Miyoshi & Mii, 1995) การใช้เมล็ดเทียมยังช่วยลดการใช้สารเคมีในการควบคุมโรคและแมลงศัตรูพืช (Saiprasad,

2001) นอกจากนี้การศึกษายังพบว่าเมล็ดเทียมจากกล้วยไม้สกุล *Dendrobium* สามารถเก็บรักษาในสภาพเย็นได้เป็นระยะเวลานานโดยไม่สูญเสียความสามารถในการงอก (Kauth *et al.*, 2006) การผลิตเมล็ดเทียม จึงเป็นวิธีที่มีประโยชน์ในการเก็บรักษาและการขนส่งพันธุ์พืชที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจและการอนุรักษ์ (Gantait & Sinniah, 2012)

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อสนองโครงการอนุรักษ์พันธุกรรมพืชอันเนื่องมาจากพระราชดำริ สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี
2. เพื่อศึกษาชนิดของสูตรอาหารและระดับน้ำตาลซูโครสที่ความเข้มข้นเหมาะสมต่อการพัฒนาเป็นโปรโตคอร์ม
3. เพื่อศึกษาระยะเวลาต่อการกำจัดน้ำออกจากเมล็ดเทียม
4. เพื่อศึกษาความเข้มข้นของ BA และ NAA ในสูตรอาหารที่ความเข้มข้นเหมาะสมต่อการพัฒนาเป็นต้นที่สมบูรณ์

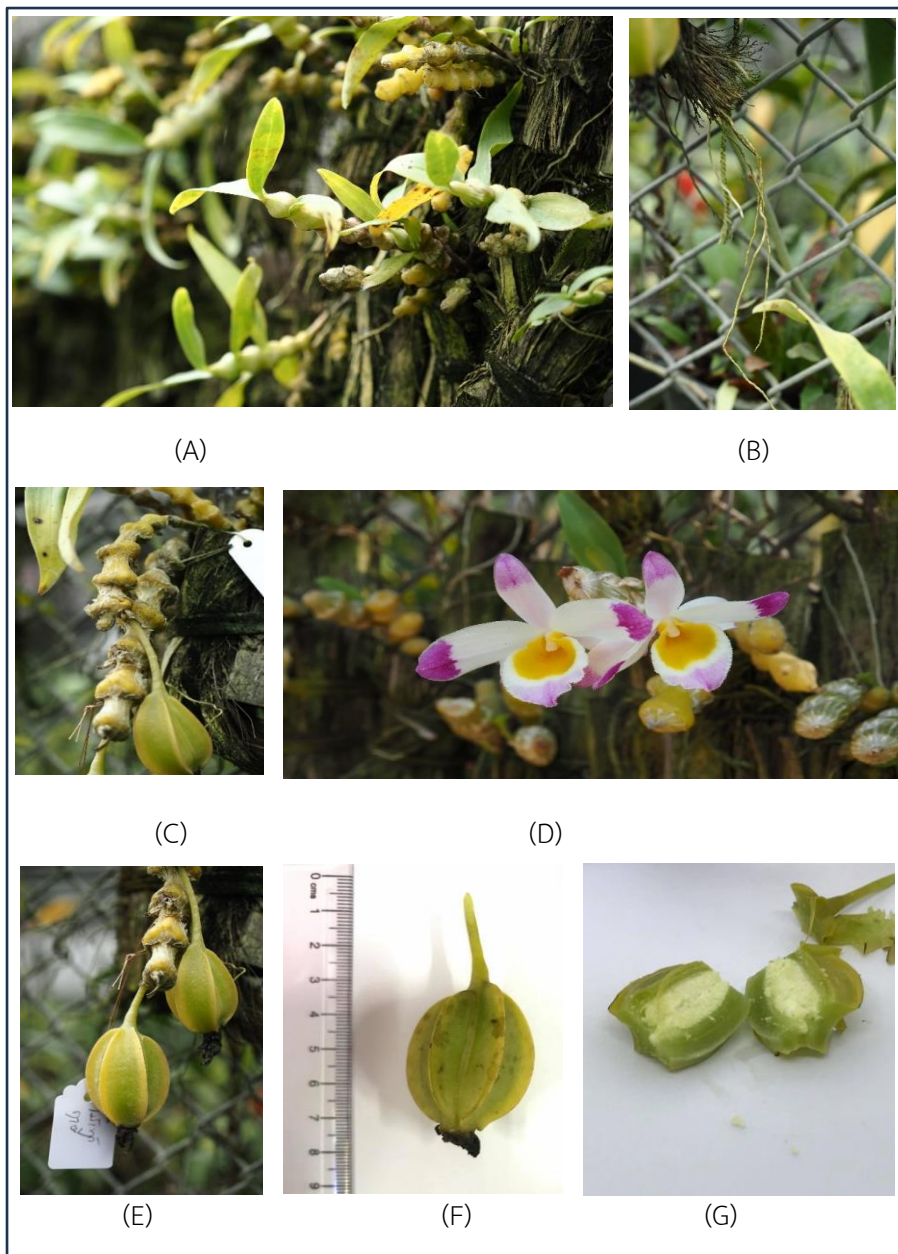
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กล้วยไม้เป็นพืชวงศ์ใหญ่วงศ์หนึ่งของพืชมีดอก (class Angiospermae) ประกอบด้วยสกุล (genera) มากกว่า 800 สกุล และมีประมาณ 30,000 ชนิด (species) ในธรรมชาติมีแหล่งกำเนิดที่สำคัญ 2 แหล่ง คือ ลาตินอเมริกา และเอเชียแปซิฟิก โดยประเทศไทยเป็นศูนย์กลางของแหล่งเอเชียแปซิฟิก ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดของกล้วยไม้เขตร้อนที่มีมากกว่า 1,100 ชนิด พบทั้งที่ขึ้นอยู่บนต้นไม้ ผิวดิน บนภูเขา และพื้นดิน (ครุฑจิต ธรรมศิริ, 2550) ส่งผลให้มีความหลากหลายของพันธุ์กล้วยไม้สูง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าประเทศไทยมีสภาพแวดล้อมที่เอื้ออำนวยต่อการเจริญเติบโตของกล้วยไม้มาก โดยเฉพาะกล้วยไม้ป่าที่พบในภูมิภาคนี้มีลักษณะเด่นที่เป็นเอกลักษณ์ กล้วยไม้ป่าของไทยมีประมาณ 177 สกุล 1,136 ชนิด (อบฉันทน์ ไทยทอง, 2548)

ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของเอื้องไม้เท้าฤๅษี (*D. pendulum* Roxb.)

กล้วยไม้เอื้องอาคัย มีการเจริญทางข้าง (sympodial) รากสีขาวชุ่น กว้าง 0.1 เซนติเมตร ยาว 22.5-31.5 เซนติเมตร ลำลูกกล้วยยาว 6-17 เซนติเมตร สีเหลือง ใส ส่วนข้อกว้าง 1.5-2.0 เซนติเมตร ปล้องกว้าง 1.0-1.2 เซนติเมตร จำนวน 5-9 ใบต่อด้าน แผ่นใบ กว้าง 1.2-1.8 เซนติเมตร ยาว 5.2-9.0 เซนติเมตร ปลายเรียวแหลม สีเขียวออกตามข้อเรียงเวียนรอบต้น (จิราภรณ์ นิคมทัศน และคณะ, 2565) ช่อดอกสั้นที่ออกตามข้อของลำต้นที่ไม่มีใบ ดอกมีขนาดประมาณ 2.5 ถึง 3 นิ้ว สีขาวอมชมพูหรือม่วง กลีบเลี้ยงหลักสีขาวมีสีม่วงแต้ม โดยกลีบปากของดอกมีลักษณะเป็นรูปไต มีสีขาวและมีลวดลายสีเหลืองและม่วงที่ปลายกลีบ (Bhattacharjee *et al.*, 2023) ฝักรูปไข่ ห้อยลง กว้าง 2.4-3.2 เซนติเมตร ยาว 3-4 เซนติเมตร สีเขียวอ่อน สันแหลมเป็นปีกสีเหลืองอ่อน 6 สัน สันกว้าง 0.2-0.3 เซนติเมตร

รอยตะเข็บสีออกเหลือง ก้านผลยาว 2.4-3.0 เซนติเมตร เมล็ดสีครีม ขนาด 0.45-0.53 มิลลิเมตร (จิราภรณ์ นิคมัทศน์และคณะ, 2565) (ภาพประกอบ 1)



ภาพประกอบ 1 ลักษณะของเอื้องไม้เท้าฤๅษี (*Dendrobium pendulum* Roxb.): ลักษณะวิสัยและใบ (A), ราก (B), ลำลูกกล้วย (C), ดอก (D), ฝัก (E-F), และเมล็ด (G)

การเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อพืช

การเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อพืชเป็นการนำชิ้นส่วนของพืช (explant) ซึ่งอาจเป็นปลายยอด ปลายราก ใบ ตาข้าง อวัยวะต่าง ๆ (organ) เนื้อเยื่อเจริญ (meristem) อับเรณู (pollen หรือ microspore) เซลล์เดี่ยว (single cell) เซลล์ไร้ผนัง (protoplast) หรือเนื้อเยื่อชนิดใด ๆ ของพืช มาเพาะเลี้ยงบนอาหารสังเคราะห์ที่มีองค์ประกอบของ ธาตุอาหาร สารควบคุมการเจริญเติบโต หรือสารอื่น ๆ ในปริมาณที่เหมาะสม เพาะเลี้ยงในสภาพปลอดเชื้อและ เก็บรักษาในสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมและควบคุมได้ จะมีผลทำให้ชิ้นเนื้อเยื่อที่เพาะเลี้ยงมีการเจริญและพัฒนาในรูปแบบต่าง ๆ ได้ และอาจพัฒนาขึ้นเป็นต้นพืชต้นใหม่ที่สมบูรณ์ได้ การที่ชิ้นส่วนพืชหรือเซลล์เดี่ยว ๆ ที่นำมาเพาะเลี้ยงสามารถพัฒนาขึ้นเป็นพืชต้นใหม่ได้ เรียกคุณสมบัตินี้ว่า โททิโพเทนซี (totipotency) (ชนากานต์ ลักษณะ, 2567)

เทคโนโลยีการผลิตเมล็ดเทียม

เมล็ดพืชเทียมเป็นเมล็ดที่มนุษย์สร้างขึ้นโดยนำเอาไซมาติกเอ็มบริโอ (somatic Embryo) มาหุ้มด้วยสารอื่นเพื่อให้มีโครงสร้างคล้ายเมล็ดจริงบางที่เรียกว่า เอนแคปซูเลตไซมาติก เอ็มบริโอ (encapsulate somatic embryo) การหุ้มเอ็มบริโอด้วยมีหลายวิธีด้วยกัน วิธีที่นิยมมากคือหุ้มด้วยสารไฮโดรเจล (hydrogel) เช่น โซเดียมแอลจิเนต (sodium Alginate) เจลาติน (gelatin) คาราจีแนน (carrageenan) หรือโลคัสบีนกัน (locusbean gum) เป็นต้น โดยเตรียมอาหารสูตรที่เหมาะสมต่อการเจริญของเนื้อเยื่อ เช่น สูตรมูราชิกและสคูคผสมสารไฮโดรเจลที่เหมาะสมจะได้สารละลายที่มีลักษณะเหนียวคล้ายคอลลอยด์ จากนั้นจึงนำเอ็มบริโอที่ยัดที่เตรียมไว้ผสมลงไปคนให้กระจายทั่วกัน จากนั้นดูดสารละลายไฮโดรเจลที่มีเอ็มบริโออยู่หยดลงไปบนสารคอมเพล็กซิงเอเจนต์ (complexing agent) ได้แก่ แคลเซียมคลอไรด์ (calcium salt) โพแทสเซียม (potassium) หรือแอมโมเนียมคลอไรด์ (ammonium chloride) หรือใช้อุณหภูมิต่ำ สารอาหารที่ผสมกับไฮโดรเจลนี้จะเป็นอาหารเลี้ยงเอ็มบริโอ จึงทำหน้าที่คล้ายเอนโดสเปิร์ม เรียกส่วนนี้ว่าอาหารสะสมเทียม (artificial endosperm) แคลเซียมแอลจิเนตซึ่งเป็นสารที่ค่อนข้างแข็งสารนี้จะหุ้มส่วนของไฮโดรเจลไว้ ทำหน้าที่เป็นเปลือกเมล็ดเทียม (artificial seed coat) โครงสร้างของเมล็ดพืชเทียมที่หุ้มด้วยแคลเซียมแอลจิเนตมีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ ไซมาติกเอ็มบริโอ (somatic embryo) หรือเอ็มบริโอที่ทำหน้าที่แทนไซโกติกเอ็มบริโอ (zygotie embryo) อาหารสะสมเทียม (artificial endosperm) ทำหน้าที่หุ้มเอ็มบริโอและเปลือกเมล็ดเทียม (artificial seed coat) เป็นส่วนนอกที่ค่อนข้างแข็ง ทำหน้าที่แทนเปลือกเมล็ด (จิรา ณ หนองคาย, 2551)

การผลิตเมล็ดเทียมถือเป็นการเก็บรักษาพันธุ์พืชไว้ในรูปแบบของการอนุรักษ์ในสภาพนอกธรรมชาติ เป็นการเลียนแบบเมล็ดพืชที่ได้จากการผสมพันธุ์ตามธรรมชาติ เมล็ดเทียมสามารถเก็บรักษาไว้ภายใต้อุณหภูมิต่ำและสภาวะแห้ง ถือเป็นวิธีที่ง่ายต่อการอนุรักษ์พันธุ์กรรมพืช ซึ่งเป็นการเก็บเมล็ดเทียมไว้ได้นานเพียงใดนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัย ทั้งอายุของชิ้นส่วนพืช อุณหภูมิที่เหมาะสมในการเก็บ เวลา

ที่ใช้ในการเคลือบเมล็ด และอาหารที่ใช้ในการทำเอนโดสเปิร์มเทียม เนื้อเยื่อที่เก็บรักษาอยู่ในสภาพปลอดเชื้อ ระยะเวลาการเพาะเลี้ยงในขวดแก้วลดลง สามารถนำเมล็ดเทียมลงแปลงปลูกได้โดยตรง ต้นที่ได้จากเมล็ดเทียมจะมีความเป็นแบบเดียวกัน ซึ่งถือเป็นข้อได้เปรียบเมื่อเทียบกับเมล็ดจากธรรมชาติ ทำให้ได้ผลผลิตที่ได้มีราคาต่อหน่วยต่ำลงมากและยังสะดวกต่อการเคลื่อนย้ายด้วย (นิอร คงประดิษฐ์, 2550)

วิธีดำเนินงานวิจัย

ตรวจสอบการมีชีวิตของเมล็ดกล้วยไม้

เก็บฝักกล้วยไม้ทำฤๅษีจากสวนพฤกษศาสตร์บ้านร่มเกล้า พิษณุโลก ในพระราชดำริ จังหวัดพิษณุโลกในเดือนตุลาคม พ.ศ. 2563 เตรียมสาร TTC (triphenyl tetrazolium chloride) ร้อยละ 0.8 เติมน้ำ Tween 20 ปรับ pH เป็น 7.0 ใส่ในขวดสีชา เชื่อมเมล็ดแช่ในสารละลาย TTC นำไปเก็บไว้ในที่มืดอุณหภูมิ 25-28 องศาเซลเซียส เมื่อครบเวลา 24 และ 48 ชั่วโมง นำไปส่องดูการติดสีด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงเลนส์ประกอบ จากนั้นตรวจสอบการติดสีแดงของเมล็ดกล้วยไม้หลังแช่เมล็ดไว้ 24 และ 48 ชั่วโมง บันทึกการติดสีแดง วิธีการดัดแปลงมาจากวิธีของ Verleysen และคณะ (2004) (อ้างอิงจากอารักษ์ จันทศิลป์และรัตน หิรัญพันธุ์, 2549)

ศึกษาสูตรอาหารที่เติมน้ำตาลซูโครสที่ความเข้มข้นเหมาะสมต่อการพัฒนาเป็นโปรโตคอร์ม

นำฝักกล้วยไม้มาล้างทำความสะอาดด้วยน้ำยาล้างจานและล้างน้ำประปาไหลผ่านให้สะอาด นำฝักที่ล้างสะอาดฉีดพ่นด้วยแอลกอฮอล์ความเข้มข้นร้อยละ 70 ก่อนนำเข้าตู้ปลอดเชื้อ ซ้ำเชื้อฝักกล้วยไม้โดยจุ่มแอลกอฮอล์ความเข้มข้นร้อยละ 95 และผ่านไฟ รอกให้ไฟเผาที่ฝักดับจึงฆ่าเชื้อโดยการเผาไฟอีกครั้ง ฆ่าฝักและเชื่อมเมล็ดลงในอาหารเพาะเลี้ยงบนอาหารสูตร MS และ 1/2MS ที่เติมน้ำตาลซูโครสเข้มข้นต่างกัน 3 ระดับ (15, 20 และ 30 กรัมต่อลิตร) เพาะเลี้ยงภายใต้อุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส ความเข้มแสงประมาณ 3,000 ลักซ์ ระยะเวลาให้แสง 16 ชั่วโมงต่อวัน เป็นเวลา 8 และ 12 สัปดาห์ (ดัดแปลงจาก ศุภาวีร์ แสงจันทร์จิระเดชและจักรพงษ์ แท่งทอง, 2015) ถ่ายภาพและบันทึกค่าคะแนนพื้นที่การเกิดโปรโตคอร์ม โดยระดับคะแนน 0 - 5 แบ่งค่าระดับคะแนน ดังนี้

- คะแนน 5 หมายถึง เมล็ดพัฒนาเป็นโปรโตคอร์มจำนวนร้อยละ 100 ของเมล็ดในขวด
- คะแนน 4 หมายถึง เมล็ดพัฒนาเป็นโปรโตคอร์มจำนวนร้อยละ 75 ของเมล็ดในขวด
- คะแนน 3 หมายถึง เมล็ดพัฒนาเป็นโปรโตคอร์มจำนวนร้อยละ 50 ของเมล็ดในขวด
- คะแนน 2 หมายถึง เมล็ดพัฒนาเป็นโปรโตคอร์มจำนวนร้อยละ 25 ของเมล็ดในขวด
- คะแนน 1 หมายถึง เมล็ดพัฒนาเป็นโปรโตคอร์มไม่ถึงร้อยละ 25 ของเมล็ดในขวด
- คะแนน 0 หมายถึง เมล็ดไม่มีการพัฒนาเป็นโปรโตคอร์ม

ศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมต่อการกำจัดน้ำออกจากเมล็ดเทียม

นำโปรโตคอร์มขนาด 2-3 มิลลิเมตร แขนงอาหารเหลวที่เติมโซเดียมอัลจิเนต ความเข้มข้นร้อยละ 3 หยด โปรโตคอร์มลงในแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ ล้างเมล็ดเทียมด้วยน้ำกลั่นซับให้แห้ง นำเมล็ดเทียมมาเพาะเลี้ยงในอาหารเหลวที่เติมน้ำตาลซูโครสความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ เขย่าเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมาจัดน้ำออก โดยวางบนกระดาษกรองในตู้ปลอดเชื้อเป็นเวลา 0, 1, 2, 3, 4, 5 และ 6 ชั่วโมง คำนวณปริมาณน้ำที่เหลือน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งของเมล็ดเทียมจำนวน 20 เมล็ดต่อการกำจัดน้ำออกแต่ละชั่วโมง ตามสูตรด้านล่าง เพาะเลี้ยงเมล็ดเทียมที่กำจัดน้ำออกแต่ละชั่วโมงบนอาหาร 1/2MS ที่เติมน้ำตาลซูโครส 20 กรัมต่อลิตร เป็นเวลา 4 สัปดาห์

$$\text{ปริมาณน้ำที่เหลือในเมล็ดเทียม (\%)} = 100 - \left[\frac{\text{FW} - \text{DW} \times 100}{\text{FW}} \right]$$

เมื่อ FW = น้ำหนักเมล็ดเทียมสดก่อนกำจัดน้ำออก (fresh Weight)
DW = น้ำหนักเมล็ดเทียมเมื่อกำจัดน้ำออกแต่ละชั่วโมง (dry Weight)

เมื่อครบแต่ละเวลานำเมล็ดเทียม 20 เมล็ด มาเพาะเลี้ยงบนสูตรอาหาร 1/2MS (น้ำตาล 20 กรัมต่อลิตร) ขวดละ 4 เมล็ด ภายใต้อุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส ความเข้มแสงประมาณ 3,000 ลักซ์ ระยะเวลาให้แสง 16 ชั่วโมงต่อวัน เมื่อครบ 4 สัปดาห์ ถ่ายภาพและบันทึกจำนวนเมล็ดเทียมที่มีชีวิต โดยสังเกตจากต้นอ่อนมีสีเขียว บันทึกลักษณะของต้นอ่อน ได้แก่ สีของต้นอ่อน การเกิดรากและการเกิด protocorm-like body (PLBs) (ดัดแปลงจาก จตุพร หงษ์ทองคำและคณะ, 2560)

ศึกษาความเข้มข้นของ BA และ NAA ในสูตรอาหารที่ความเข้มข้นเหมาะสมต่อการพัฒนาเป็นต้นที่สมบูรณ์

นำต้นอ่อนเอื้องไม้เท้าฤษีขนาดความสูงประมาณ 5 มิลลิเมตร มาเพาะเลี้ยงบนสูตรอาหาร 1/2MS (น้ำตาล 20 กรัมต่อลิตร) ที่เติมสารควบคุมการเจริญ BA (0, 1, 2 และ 4 มิลลิกรัมต่อลิตร) ร่วมกับ NAA (0, 0.5 และ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร) รวม 12 สูตรอาหาร สูตรอาหารละ 5 ขวด ต้นอ่อนขวดละ 3 ต้น รวมเป็นจำนวน 15 ต้นต่อสูตรอาหาร เพาะเลี้ยงภายใต้อุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส ความเข้มแสง ประมาณ 3,000 ลักซ์ ระยะเวลาให้แสง 16 ชั่วโมงต่อวัน เป็นเวลา 8 สัปดาห์ บันทึกความสูงต้น (เซนติเมตร) จำนวนยอดต่อต้นและจำนวนรากต่อต้น (ดัดแปลงจากศุภาวีร์ แสงจันทร์จิระเดช และจักรพงษ์ แห่งทอง, 2015)

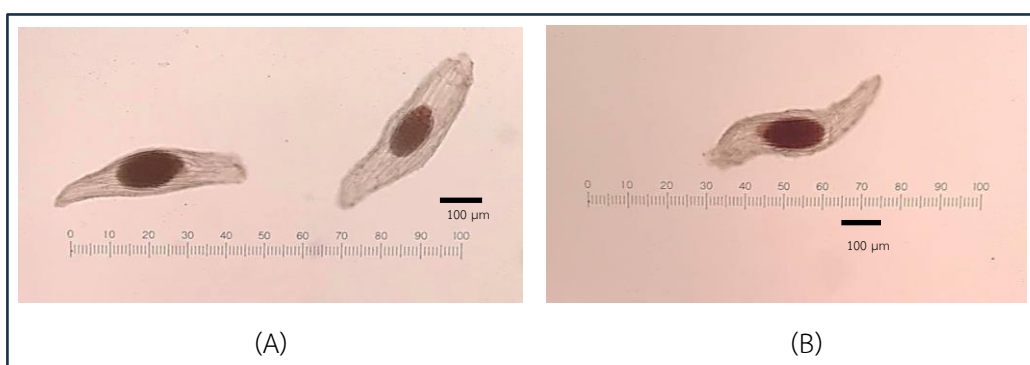
วิเคราะห์ข้อมูลและผลการวิจัย

ทุกการทดลองวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design, CRD) คำนวณค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation; SD) ค่าร้อยละ นำค่าเฉลี่ยมาวิเคราะห์หาความแปรปรวนแบบทางเดียว One-way ANOVA ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยวิธี Duncan's Multiple Rang test (DMRT)

ผลการวิจัย

ผลการตรวจสอบการมีชีวิตของเมล็ดกล้วยไม้

การตรวจสอบการติดสีแดงของเมล็ดกล้วยไม้หลังแช่เมล็ดไว้ในสารละลาย TTC เป็นเวลา 24 และ 48 ชั่วโมง พบว่าทั้ง 24 และ 48 ชั่วโมง เอ็มบริโอแสดงสีแดงบางส่วนของเอ็มบริโอและทั้งเอ็มบริโอของเมล็ดตัวอย่างศึกษา (ภาพประกอบ 2)



ภาพประกอบ 2 การติดสีของเมล็ดกล้วยไม้: ตรวจสอบการติดสีของเมล็ดที่ 24 ชั่วโมง (A), ตรวจสอบการติดสีของเมล็ดที่ 48 ชั่วโมง; scale bar= 100 ไมโครเมตร (B)

ผลการศึกษาสูตรอาหารที่เติมน้ำตาลซูโครสที่ความเข้มข้นเหมาะสมต่อการพัฒนาเป็นโปรโตคอร์ม

เชื้อเมล็ดลงบนอาหารเพาะเลี้ยงบนอาหารสูตร MS และ 1/2MS ที่เติมน้ำตาลซูโครสเข้มข้นต่างกัน 3 ระดับ (15, 20 และ 30 กรัมต่อลิตร) เป็นเวลา 8 และ 12 สัปดาห์ บันทึกค่าคะแนนพื้นที่การเกิดโปรโตคอร์ม 0 - 5 แบ่งค่าระดับคะแนน เอื้องไม้เท้าฤๅษีเมื่อเพาะเลี้ยงเป็นเวลา 8 สัปดาห์ พบว่าทุกสูตรอาหารที่สามารถแสดงค่าคะแนนการพัฒนาเป็นโปรโตคอร์มได้เป็นอย่างดี มีค่าคะแนนตั้งแต่ 4.00 ± 0.00 ถึง 5.00 ± 0.00 โดยสูตรอาหาร 1/2MS ที่เติมน้ำตาลซูโครส 15, 20 และ 30 กรัมต่อลิตร มีค่าคะแนนอยู่ที่ 5.00 ± 0.00 และมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 กับสูตรอาหาร MS ที่เติมน้ำตาลซูโครส 20 และ 30 กรัมต่อลิตร ขณะที่สัปดาห์ที่ 12 พบว่าอาหารทุกสูตรมีค่าคะแนน 5.00 ± 0.00 (ตารางที่ 1 และภาพประกอบ 3) ทั้งนี้สูตรอาหาร

1/2MS ที่เติมน้ำตาล 20 กรัมต่อลิตร แสดงการพัฒนาของโปรโตคอร์มเร็วกว่าน้ำตาลระดับอื่น ดังนั้น สูตรอาหาร 1/2MS ที่เติมน้ำตาล 20 กรัมต่อลิตร จึงถูกเลือกเป็นอาหารเพาะเลี้ยงเอ็มเอ็มแท่งพืช

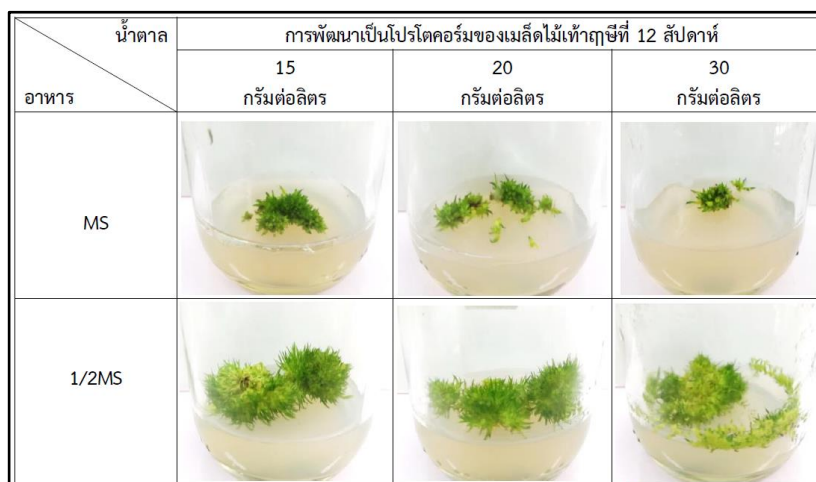
ตารางที่ 1 การเกิดโปรโตคอร์มของเมล็ดเอ็มเอ็มแท่งพืชบนอาหารและระดับน้ำตาลซูโครสที่ต่างกัน เมื่อเพาะเลี้ยงเป็นเวลา 8 และ 12 สัปดาห์

สูตรอาหาร	น้ำตาลซูโครส (กรัมต่อลิตร)	ค่าคะแนนของการเกิดโปรโตคอร์ม* $\pm$ SD	
		8 สัปดาห์	12 สัปดาห์
MS	15	4.70 $\pm$ 0.46 ^b	5.00 $\pm$ 0.00 ^{ns}
	20	4.10 $\pm$ 0.70 ^a	5.00 $\pm$ 0.00
	30	4.00 $\pm$ 0.00 ^a	5.00 $\pm$ 0.00
1/2MS	15	5.00 $\pm$ 0.00 ^b	5.00 $\pm$ 0.00
	20	5.00 $\pm$ 0.00 ^b	5.00 $\pm$ 0.00
	30	5.00 $\pm$ 0.00 ^b	5.00 $\pm$ 0.00

*ค่าเฉลี่ย $\pm$ SD คะแนนการเกิดโปรโตคอร์มเต็ม 5 คะแนน

ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรกำกับต่างกันในกลุ่มนี้ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี Duncan's Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ns: not significant หมายถึงทุกสูตรอาหารไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อเปรียบเทียบด้วยวิธี Duncan's Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95



ภาพประกอบ 3 การเกิดโปรโตคอร์มของเอ็มเอ็มแท่งพืชบนอาหารสูตร MS และ 1/2MS ที่เติมน้ำตาลซูโครสระดับที่ต่างกัน เป็นเวลา 12 สัปดาห์

ผลการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมต่อการกำจัดน้ำออกจากเมล็ดเทียม

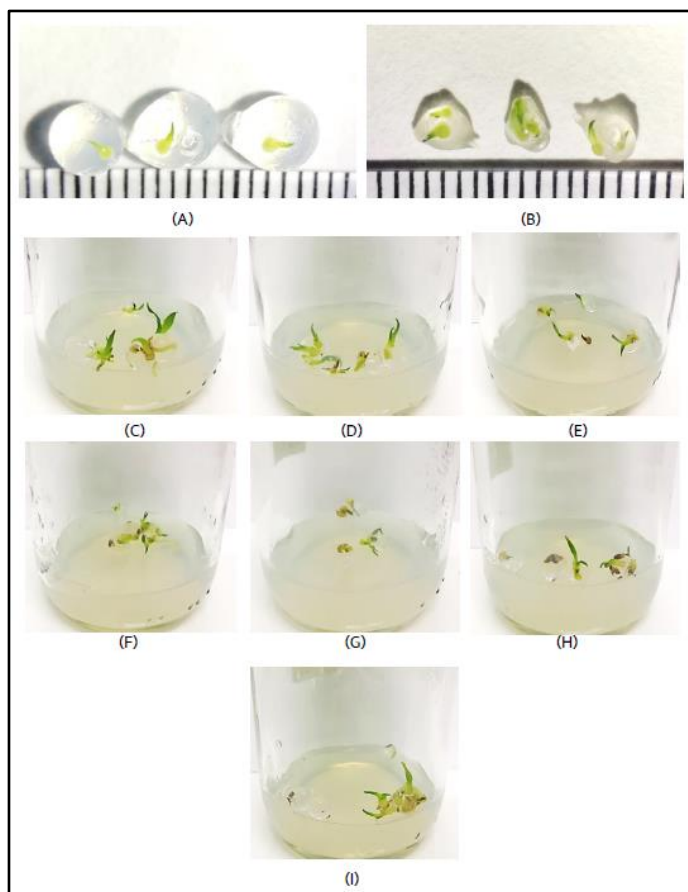
นำเมล็ดเทียมที่มีโปรโตคอร์มขนาด 2-3 มิลลิเมตร มาเพาะเลี้ยงในอาหารเหลวที่เติมน้ำตาลซูโครส จากนั้นนำมากำจัดน้ำออก ผลการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมต่อการกำจัดน้ำออกจากเมล็ดเทียมของเอื้องไม้เท้าฤๅษี พบร้อยละปริมาณน้ำที่เหลืออยู่ในเมล็ดเทียมชั่วโมงที่ 6 อยู่ที่ 27.98 เมื่อตรวจสอบร้อยละการรอดชีวิตของเมล็ดเทียมหลังจากเพาะเลี้ยงบนอาหารสูตร 1/2MS ที่เติมน้ำตาล 20 กรัมต่อลิตร พบว่าแสดงร้อยละการรอดชีวิตอยู่ที่ 65 ± 13.69 ซึ่งต่ำกว่าร้อยละ 90 ในทุกชั่วโมงของการกำจัดน้ำออก (ตารางที่ 2)

การตรวจสอบลักษณะของโปรโตคอร์มที่เจริญเป็นต้นอ่อนที่สมบูรณ์ของเมล็ดเทียม พบว่าต้นอ่อนจากเมล็ดเทียมเอื้องไม้เท้าฤๅษีที่รอดชีวิตแสดงลักษณะใบสีเขียวเข้ม พบการเกิดราก และ PLBs ในเมล็ดเทียมชั่วโมงที่ 0 และ 1 (ภาพประกอบ 4)

ตารางที่ 2 ปริมาณน้ำที่เหลือในเมล็ดเทียมจากการกำจัดน้ำออกที่ 0-6 ชั่วโมง ร้อยละการรอดชีวิตและลักษณะของต้นอ่อนกล้วยไม้เมื่อเพาะเลี้ยงเป็นเวลา 4 สัปดาห์

	เวลาในการกำจัดน้ำออก (ชั่วโมง)*							ลักษณะของต้นอ่อน
	0	1	2	3	4	5	6	
ปริมาณน้ำที่เหลือในเมล็ดเทียม (ร้อยละ)	100.00	74.19	61.35	53.81	38.32	31.45	27.98	ส่วนใหญ่ใบอ่อนมีสีเขียวเข้ม พบการเกิดรากและพบ PLBs
การรอดชีวิต* (ร้อยละ)	65 ± 28.5	70 ± 32.6	50 ± 30.6	60 ± 37.9	55 ± 27.4	35 ± 22.4	65 ± 13.7	ในเมล็ดเทียมชั่วโมงที่ 0 และ 1

*ค่าเฉลี่ยร้อยละการรอดชีวิต $\pm$ SD จากเมล็ดเทียมจำนวน 20 เมล็ด (n=20) เมื่อเพาะเลี้ยงบนอาหาร 1/2MS ที่เติมน้ำตาลซูโครส 20 กรัมต่อลิตร เป็นเวลา 4 สัปดาห์



ภาพประกอบ 4 เมล็ดเหียงเนื้อไม้เท้าฤๅษี: เมล็ดเหียงชั่วโมงที่ 0 (A), เมล็ดเหียงที่กำลังงอกชั่วโมงที่ 6 (B), ต้นอ่อนจากเมล็ดเหียงที่กำลังงอกชั่วโมงที่ 0, 1, 2, 3, 4, 5 และ 6 เพาะเลี้ยงบนอาหารเป็นเวลา 4 สัปดาห์ (C-I) ตามลำดับ

ผลการศึกษาความเข้มข้นของ BA และ NAA ในสูตรอาหารที่ความเข้มข้นเหมาะสมต่อการพัฒนาเป็นต้นที่สมบูรณ์

นำต้นอ่อนขนาดความสูง 5 มิลลิเมตรมาเพาะเลี้ยงบนสูตรอาหาร 1/2MS (น้ำตาล 20 กรัมต่อลิตร) ที่เติมสารควบคุมการเจริญ BA (0, 0.5, 1, 2 และ 4 มิลลิกรัมต่อลิตร) ร่วมกับ NAA (0, 0.5 และ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร) รวม 12 สูตรอาหาร ๆ ละ 15 ต้น เพาะเลี้ยงต้นอ่อนเป็นเวลา 8 สัปดาห์ พบว่าสูตรอาหารที่เติม BA 1 มิลลิกรัมต่อลิตรมีผลทำให้กล้วยไม้เนื้อไม้เท้าฤๅษีแสดงการเจริญเติบโตได้ดีกว่าสูตรอื่น โดยมีลักษณะต้นแข็งแรง มีรากสมบูรณ์ แสดงค่าเฉลี่ยจำนวนยอดต่อต้น จำนวนรากต่อต้นและความสูงต้น เท่ากับ 2.07 ± 0.68 ยอด 0.53 ± 0.72 ราก และ 0.87 ± 0.34 เซนติเมตร ตามลำดับ รองลงมา

ได้แก่ สูตรอาหารที่เติม BA 2 มิลลิกรัมต่อลิตร ร่วมกับ NAA 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยแสดงจำนวนยอดต่อต้น จำนวนรากต่อต้นและความสูงต้น เท่ากับ 2.13 ± 0.62 ยอด 0.13 ± 0.50 ราก และ 0.89 ± 0.24 เซนติเมตร ตามลำดับ (ตารางที่ 3)

ตารางที่ 3 ผลของ BA และ NAA ในสูตรอาหารที่ความเข้มข้นเหมาะสมต่อจำนวนยอด จำนวนรากและความสูงต้นของต้นอ่อนกล้วยไม้เอื้องไม้เท้าฤๅษี เมื่อเพาะเลี้ยงเป็นเวลา 8 สัปดาห์

สารควบคุมการเจริญเติบโต (มิลลิกรัมต่อลิตร)		การพัฒนาเป็นต้นที่สมบูรณ์*		
BA	NAA	จำนวนยอด/ต้น	จำนวนราก/ต้น	ความสูงต้น (เซนติเมตร)
0	0	1.87 ± 0.50^{cde}	0.40 ± 0.61^{bc}	0.74 ± 0.20^{abcde}
0	0.5	1.33 ± 0.60^{ab}	0.07 ± 0.25^a	0.72 ± 0.24^{abcde}
0	1	1.07 ± 0.25^a	0.00 ± 0.00^a	0.63 ± 0.22^{abc}
1	0	2.07 ± 0.68^{de}	0.53 ± 0.72^c	0.87 ± 0.34^{de}
1	0.5	1.60 ± 0.49^{bcd}	0.07 ± 0.25^a	0.66 ± 0.22^{abcd}
1	1	2.00 ± 0.97^{cde}	0.13 ± 0.34^{ab}	0.83 ± 0.44^{cde}
2	0	1.87 ± 0.50^{cde}	0.00 ± 0.00^a	0.59 ± 0.11^{ab}
2	0.5	2.13 ± 0.62^e	0.13 ± 0.50^{ab}	0.89 ± 0.24^e
2	1	1.53 ± 0.50^{bc}	0.00 ± 0.00^a	0.64 ± 0.19^{abc}
4	0	2.00 ± 0.00^{cde}	0.00 ± 0.00^a	0.57 ± 0.23^a
4	0.5	2.27 ± 0.57^e	0.07 ± 0.25^a	0.81 ± 0.22^{bcde}
4	1	1.93 ± 0.57^{cde}	0.00 ± 0.00^a	0.74 ± 0.24^{abcde}

*ค่าเฉลี่ย $\pm$ SD จากต้นอ่อนกล้วยไม้ 15 ต้น (n=15) ที่มีตัวอักษรกำกับต่างกันในกลุ่มหนึ่ง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อเปรียบเทียบกับวิธี Duncan's Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

อภิปรายผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสนองพระราชดำรินโยบายอนุรักษ์พันธุกรรมพืชอันเนื่องมาจากพระราชดำริสมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี เพื่อศึกษาชนิดของสูตรอาหารและระดับน้ำตาลซูโครสที่ความเข้มข้นเหมาะสมต่อการพัฒนาเป็นโปรโตคอร์ม และเพื่อศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมต่อการกำจัดน้ำออกจากเมล็ดเทียมของกล้วยไม้เอื้องไม้เท้าฤๅษี การศึกษาลักษณะทางพฤกษศาสตร์และเก็บรวบรวมฝักของกล้วยไม้ ณ โรงเรือนรวบรวมพันธุ์กล้วยไม้สวนพฤกษศาสตร์บ้านร่มเกล้า พิษณุโลก ในพระราชดำรินเดือนตุลาคม พ.ศ. 2563 (จิราภรณ์ นิคมทัศนและคณะ, 2565) นำเมล็ดเอื้องไม้เท้าฤๅษีมาตรวจสอบการมีชีวิตของเมล็ดกล้วยไม้ ส่งผลต่อความสามารถในการออกของเมล็ด โดยสังเกตการเปลี่ยนสีของเอ็มบริโอหลังจากการแช่เมล็ดในสาร TTC เมล็ดที่สมบูรณ์จะมี

เอมบริโอที่มีชีวิต ซึ่งจะเปลี่ยนเป็นสีแดงซึ่งเป็นวิธีทางชีวเคมีที่ใช้ประเมินความมีชีวิตของเมล็ดได้อย่างรวดเร็ว เนื่องจากการตรวจสอบการหายใจในเซลล์เมล็ดที่มีชีวิต เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ดีไฮโดรเจนเนส ช่วยในการปล่อยไอออนไฮโดรเจนซึ่งจะทำปฏิกิริยากับสารละลาย TTC ที่ไม่มีสี ส่งผลให้เกิดสารประกอบสีแดง 1,3,5-triphenylformazan (TPF) ขึ้น เมล็ดที่มีเอมบริโอสีแดงถือว่าเป็นมีชีวิต (จุฑารัตน์ กรดสันและคณะ, 2562) พบว่าเมื่อแช่เมล็ดจนถึง 48 ชั่วโมง เอมบริโอแสดงสีแดงบางส่วนของเอมบริโอและทั้งเอมบริโอของเมล็ดตัวอย่างศึกษา

การศึกษาสูตรอาหารที่เติมน้ำตาลซูโครสที่ความเข้มข้นเหมาะสมต่อการพัฒนาเป็นโปรโตคอร์มจากเมล็ดกล้วยไม้ เขี่ยเมล็ดลงบนอาหารเพาะเลี้ยงบนอาหารสูตร MS และ 1/2MS ที่เติมน้ำตาลซูโครสเข้มข้นต่างกัน 3 ระดับ (15, 20 และ 30 กรัมต่อลิตร) เมื่อเพาะเลี้ยงเป็นเวลา 8 และ 12 สัปดาห์ พบว่าเอื้องไม้เท้าฤๅษีสามารถออกเป็นโปรโตคอร์มได้ดี ทั้งนี้ปัจจัยในการงอกของเมล็ดกล้วยไม้แต่ละชนิดขึ้นอยู่กับสูตรอาหารและสภาวะการเพาะเลี้ยง โดยมีรายงานว่ากล้วยไม้ชนิดเดียวกัน เมื่อนำไปเพาะเลี้ยงในสูตรอาหารต่างกันก็จะแสดงการงอกที่แตกต่างกันได้ มีรายงานการศึกษาสูตรอาหารต่อการงอกของเมล็ดกล้วยไม้ชนิดต่าง ๆ ได้แก่ สูตรอาหาร MS, 1/2MS, VW (Vacin and Went, 1949), ND (Tokuhara and Mii, 1993), MT, Hyponex, KC (Knudson C) (กุลนาถ อบสุวรรณ และสุนทร ทารพันธ์, 2559; ศุภาวีร์ แสงจันทร์จิรเดชและจักรพงศ์ แห่งทอง, 2015; ไชนิยะ สะมาลาและคณะ, 2559; จตุพร หงษ์ทองคำและรชยา พรหมวงศ์, 2560; จุฑารัตน์ กรดสันและคณะ, 2562; Wongrasee & Bunnag, 2018 ; Tikendra *et al.*, 2018) นอกจากนี้ในการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อพืชให้ประสบความสำเร็จต้องมีการคัดเลือกสูตรอาหารให้เหมาะสม รวมถึงการเติมน้ำตาลและการเติมสารควบคุมการเจริญเติบโตที่จำเป็นต่อการงอกและการพัฒนาของกล้วยไม้ให้เจริญเป็นต้นที่สมบูรณ์ (ศุภาวีร์ แสงจันทร์จิรเดช และจักรพงศ์ แห่งทอง, 2015; Tikendra *et al.*, 2018) จากผลการศึกษาน้ำตาลที่เหมาะสม พบว่าเอื้องไม้เท้าฤๅษีสามารถงอกได้ดีที่สูตรอาหารที่เติมน้ำตาลทั้ง 3 ระดับ คือ 15, 20 และ 30 กรัมต่อลิตร โดยไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$) ทั้งนี้ระหว่างการศึกษาคณะผู้วิจัยได้สังเกตระยะเวลาการงอกของโปรโตคอร์ม พบว่าอาหารที่เติมน้ำตาล 20 กรัมต่อลิตรเกิดการพัฒนารูปของโปรโตคอร์มได้เร็วกว่าระดับน้ำตาล 15 และ 30 กรัมต่อลิตร คณะผู้วิจัยจึงเลือกอาหารที่เติมน้ำตาล 20 กรัมต่อลิตร ในการเติมลงในอาหารเพื่อศึกษาขั้นตอนต่อไปสอดคล้องกับ Takano *et al.* (1990) ศึกษาผลของซูโครสต่อการเพิ่มโปรโตคอร์มของ *Cymbidium Mini Drea* 'Golden Color' พบว่าความเข้มข้นที่เหมาะสมควรอยู่ในระดับต่ำกว่า 30 กรัมต่อลิตร และรายงานของอำนาจวิทย์ ขาววิทย์พันธุ์ (1977) (อ้างจากศุภาวีร์ แสงจันทร์จิรเดช และจักรพงศ์ แห่งทอง, 2015) พบว่าปริมาณน้ำตาลมีผลต่อการเจริญเติบโตของต้นอ่อนของหาวายลูกผสม เมื่อไม่เติมน้ำตาลซูโครสหรือเติมน้ำตาลซูโครสเพียง 5 กรัมต่อลิตร ต้นอ่อนเจริญเติบโตเพิ่มขึ้นน้อย นอกจากนี้มีรายงานอาหารสูตร MS และ 1/2MS ที่เติมน้ำตาล 15, 20 และ 30 กรัม ต่อลิตร ชักนำให้เกิดร้อยละการงอกของเมล็ดเอื้องดอกมะขาม (*D. delacourii* Guillaumin) ได้ร้อยละ 100 ทั้งนี้

สำหรับเมล็ด เอื้องดอกมะขามอาหารสูตร 1/2MS ที่เติมน้ำตาล 15 กรัมต่อลิตรมีการให้ค่าคะแนนของพื้นที่การเกิดต้นอ่อนเฉลี่ยสูงสุด (ศุภาวีร์ แสงจันทร์จิรเดชและจักรพงศ์ แท่งทอง (2015) การใช้น้ำตาล ความเข้มข้นสูงอาจมีผลยับยั้งการเจริญของกล้วยไม้เนื่องจากความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสทำให้เกิด osmotic stress เนื้อเยื่อพืชต้องนำพลังงานส่วนหนึ่งไปใช้ปรับแรงดันออสโมซิสภายในและภายนอกเซลล์ พืชให้สมดุลกัน ทำให้สูญเสียพลังงานส่วนนี้แทนที่จะนำพลังงานไปใช้ในการเจริญเติบโตทั้งหมด อีกทั้งการใช้น้ำตาลความเข้มข้นสูงยังยับยั้งการเจริญเติบโตของต้นอ่อนกล้วยไม้อีกด้วย (จตุพร หงส์ทองคำ และรชยา พรมงศ์, 2560) ดังนั้น จากการศึกษาสูตรอาหารที่เติมน้ำตาลซูโครสต่อการพัฒนาเป็น โปรโตคอร์มจากเมล็ดกล้วยไม้ จึงมีความเกี่ยวข้องกับ 3 ปัจจัย ได้แก่ สูตรอาหาร ความเข้มข้นของอาหาร และความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครส

นำเมล็ดเทียมมาการจัดน้ำออกผลการศึกษา พบว่าเมื่อถึงชั่วโมงที่ 6 มีปริมาณน้ำที่เหลืออยู่ใน เมล็ดเทียมอยู่ร้อยละ 27.98 โดยพบว่าปริมาณน้ำที่เหลืออยู่แต่ละชั่วโมงในเมล็ดเทียมยังมีปริมาณ มากกว่ารายงานของจตุพร หงส์ทองคำและคณะ (2560) ซึ่งพบปริมาณน้ำที่เหลืออยู่ในเมล็ดเทียม กล้วยไม้เอื้องกุหลาบกระเปาะเปิดชั่วโมงที่ 1-6 เท่ากับร้อยละ 37.51, 30.30, 28.95, 21.98, 14.90 และ 14.06 ตามลำดับ ทั้งนี้ในการเก็บรักษาเมล็ดเทียมที่อุณหภูมิต่ำกว่าการมีปริมาณน้ำที่สูงภายในเมล็ดเทียม อาจก่อให้เกิดการสร้างความเค็มขึ้นภายในเมล็ดเทียม ในระหว่างการเก็บรักษาและเป็นอันตรายต่อ ขึ้นส่วนพืชที่อยู่ภายใน จึงจำเป็นต้องกำจัดน้ำออกจากเมล็ดเทียมให้ได้มากที่สุด โดยที่พืชที่อยู่ภายใน ยังคงมีชีวิตอยู่ เพื่อเพิ่มอัตราการรอดชีวิตของตัวอย่างพืชภายหลังจากการเก็บรักษา (จตุพร หงส์ทองคำ และคณะ, 2560 และ Wongrasee & Bunnag, 2018) เมื่อตรวจสอบร้อยละการรอดชีวิตของ เมล็ดเทียมหลังจากเพาะเลี้ยงเป็นเวลา 4 สัปดาห์ พบว่าเอื้องไม้เท้าฤๅษีแสดงร้อยละการรอดชีวิตอยู่ ระหว่าง 35-70 ซึ่งต่ำกว่าร้อยละ 90 ในทุกชั่วโมงของการกำจัดน้ำออก ลักษณะของโปรโตคอร์มที่เจริญ เป็นต้นอ่อนที่สมบูรณ์ของเมล็ดเทียม พบว่า ต้นอ่อนจากเมล็ดเทียมที่รอดชีวิต พบ PLBs ในเมล็ดเทียม ชั่วโมงที่ 0 และ 1 ทั้งนี้กล้วยไม้สามารถพบการเกิด PLBs ซึ่งเป็นลักษณะของการเจริญเติบโตที่มีโครงสร้าง คล้ายโปรโตคอร์มสามารถเกิดได้โดยตรงไม่ต้องผ่านแคลลัสเรียกว่า โซมาติกเอ็มบริโอเจนเนซิสแบบทางตรง และการเกิดโดยผ่านแคลลัสก่อนเรียกว่าโซมาติกเอ็มบริโอเจนเนซิสแบบทางอ้อม นอกจากนี้ PLBs ยังมี บทบาทสำคัญต่อการเพิ่มจำนวนต้นกล้วยไม้ได้โดยตรง ประหยัดเวลา ขนาดรูปร่างเป็นแบบเดียวกัน และสามารถทำการปรับสภาพพืชได้ดี (Hossain *et al.*, 2010 และนรารัตน์และคณะ, 2562)

การเพาะเลี้ยงเอื้องไม้เท้าฤๅษี บนสูตรอาหารที่เติม BA 1 มิลลิกรัมต่อลิตรมีผลทำให้กล้วยไม้ พัฒนาเป็นต้นที่สมบูรณ์โดยใช้เพียง BA เติมนลงในอาหารเพาะเลี้ยง ทั้งนี้รายงานจากศุภาวีร์ แสงจันทร์จิรเดชและจักรพงศ์ แท่งทอง (2015) กล่าวว่า การเพาะเลี้ยงกล้วยไม้ในช่วงแรกการพัฒนา ส่วนยอดของโปรโตคอร์มนั้นนิยมใช้สารควบคุมการเจริญกลุ่มไซโตไคนิน อย่างเดียวหรือไซโตไคนิน ความเข้มข้นสูงร่วมกับออกซินความเข้มข้นต่ำเพื่อเพิ่มจำนวนยอด แต่ถ้าเพาะเลี้ยงในอาหารที่เติมสาร ควบคุมการเจริญเติบโตกลุ่มออกซินอย่างเดียว หรือมีสัดส่วนระหว่างไซโตไคนินต่อออกซินในระดับสูง ขึ้นจะพัฒนารากได้ดีขึ้น ดังนั้น จากการศึกษาความเข้มข้นของสารควบคุมการเจริญเติบโตในสูตร

อาหารต่อการพัฒนาเป็นต้นที่สมบูรณ์ของกล้วยไม้ จึงมีความเกี่ยวข้องกับ 4 ปัจจัย ได้แก่ ชนิดพืช สูตรอาหารชนิดของสารควบคุมการเจริญเติบโตและสัดส่วนของสารควบคุมการเจริญเติบโต

ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาการกระตุ้นการงอกของโปรโตคอร์มให้เกิดในระยะเวลาที่เร็วขึ้น
2. ศึกษาการเก็บรักษาเมล็ดเทียมเอื้องไม้เท้าฤๅษีให้เก็บรักษาได้ยาวนานขึ้น เช่น การเก็บรักษาในอุณหภูมิต่าง ๆ การเติมสารชะลอการเจริญเติบโต

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2563 คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ สวนพฤกษศาสตร์บ้านร่มเกล้า พิษณุโลก ดร.บัวหลวง ฝ่ายเยื่อแห่ง สถาบันวิจัยสิ่งแวดล้อมเพื่อความยั่งยืน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย หลักสูตรชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์ และศูนย์ประสานงานโครงการอนุรักษ์พันธุกรรมพืชอันเนื่องมาจากพระราชดำริ สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี (อพ.สธ.) มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์

เอกสารอ้างอิง

- กุลนาถ ออบสุวรรณ และสุนทรี ทารพันธ์. (2559). ผลของสูตรอาหารต่อการเติบโตของต้นกล้วยไม้สกุลหวาย *D. Fleischeri* และ *D. Judy Rutz. Veridian E-Journal, Science and Technology Silpakorn University*, 3(6), 340-348.
- ครรชิต ธรรมศิริ. (2550). *เทคโนโลยีการผลิตกล้วยไม้* (ปรับปรุงครั้งที่ 2). กรุงเทพฯ: อัมรินทร์พรินต์ติ้งแอนด์พับลิชชิ่ง.
- จตุพร หงส์ทองคำ, รชยา พรหมวงศ์ และสุรัชย์ รัตนสุข. (2560). การขยายพันธุ์และการเก็บรักษาพันธุ์กล้วยไม้เอื้องกุหลาบกระเปาะเปิด โดยเทคนิคเมล็ดเทียม. *SDU Research Journal*, 10(3), 187-201.
- จตุพร หงส์ทองคำ และรชยา พรหมวงศ์. (2560). การขยายพันธุ์กล้วยไม้ในหลอดแก้วของกล้วยไม้กระแจะร้อน (*Cymbidium aloifolium* (L.) Sw.) กล้วยไม้ป่าใกล้สูญพันธุ์ในกลุ่มป่าชุมชน. *วารสารเกษตรพระวรุณ*, 14(2), 146-154.
- จิรา ณ หนองคาย. (2551). *หลักและเทคนิคการขยายพันธุ์พืชในประเทศไทย* (พิมพ์ครั้งที่ 1).

- กรุงเทพฯ: โอเดียนสโตร์.
- จิราภรณ์ นิคมทัศน, จริญญา มากน้อย, พิชัย ใจกล้า, บัวหลวง ฝ้ายเหื้อ, นิศากร สุวรรณ, วิทยา ภิระ, ธนิกานต์ หลิมเจริญ, ศุภวัฒน์ ไสแจ่ม และสุภานัน พุทธา. (2565). การขยายพันธุ์และการเก็บรักษาพันธุ์กล้วยไม้เลี้ยงสูงพันธุ์บางชนิด ในสวนพฤกษศาสตร์บ้านร่มเกล้า พิษณุโลก ในพระราชดำริ. (รายงานการวิจัย) สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ.
- จุฑารัตน์ กรดสัน, ศุทธิณัฐ์ สุนทรกลัมภ์ และปวีณา แก้วอุบล. (2562). ผลของโคโตซานต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการออกของโพโทคอร์มกล้วยไม้เอื้องเทียนส้ม (*Coelogyne brunnea* Lindl. (Orchidaceae)). *แก่นเกษตร*, 47(1), 141-150.
- ชนากานต์ ลักษณะ. (2567). *การเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อพืชเศรษฐกิจและพืชสมุนไพร*. ชลบุรี: คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยบูรพา.
- ไชนียะ สมะลา, สิริรัตน์ พรหมทอง, ครรชิต ธรรมศิริ, ศศิกานต์ ประสงค์สม และฐกฤต อิมสมบุรณ์. (2559). การศึกษาสูตรอาหารที่มีผลต่อการงอกของเมล็ดกล้วยไม้เหลืองจันทร์บูร. *วารสารพืชศาสตร์สงขลานครินทร์*, 3(ฉบับพิเศษ), M02/43-47.
- นิอร คงประดิษฐ์. (2550). *การขยายพันธุ์ในหลอดทดลองและการเก็บรักษาโพโทคอร์ม โดยเทคโนโลยีการผลิตเมล็ดเทียมของกล้วยไม้กะเหรี่ยงปากเป็ด (Cymbidium finlaysonianum Lindl.)* (วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต). สงขลา: สาขาพฤกษศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ศุภาวีร์ แสงจันทร์จิรเดช และจักรพงศ์ แท่งทอง. (2015). การเพาะเมล็ดเอื้องดอกมะขาม (*Dendrobium delacourii* Guillaumin) ในสภาพปลอดเชื้อ. *SDU Research Journal*, 8(1), 109-118.
- อบฉันท ไทยทอง. (2548). *กล้วยไม้เมืองไทย*. กรุงเทพฯ: อัมรินทร์พรินต์ติ้งแอนด์พับลิชชิ่ง.
- อารักษ์ จันศิลป์ และรัตนา ทิรัญพันธุ์. (2549). การเก็บรักษากล้วยไม้ม้าวิ่ง (*Doritis pulcherrima* Lindl.) ในหลอดทดลอง โดยการเก็บรักษาเมล็ดและวิธีชะลอการเจริญเติบโต. (รายงานการวิจัย) สงขลา: มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- Bhattacharjee, B., Hossain, M.E., Ayesha, M.N. & Islam, S.M.S. (2023). Morphological diversity analysis of some existing and endangered *Dendrobium* orchid species in Bangladesh. *Journal of Botanical Sciences*, 14(2), 146-154. Retrieved from <https://www.banglajol.info/index.php/JBS/article/download/68911/46102>.
- Chen, N.D., You, T., Li, J., Bai, L.T., Hao, J.W. & Xu, X.Y. (2016). A comparative study of three tissue-cultured *Dendrobium* species and their wild correspondences by headspace gas chromatography-mass spectrometry combined with chemometric methods. *Journal of Chromatography B*, 1022, 73-82.

- Gale, S.W., Fay, M.F. & Chase, M.W. (2018). Orchid conservation: How can we meet the challenges in the twenty-first century? *Journal of Experimental Botany*, 70(22), 6611–6625. <https://doi.org/10.1093/jxb/erz334>.
- Gantait, S. & Sinniah, U.R. (2012). Encapsulation technology for artificial seed production of *Phalaenopsis bellina* (Rchb.f.) Christenson. *Scientia Horticulturae*, 139, 47-52.
- Hossain, M.M., Kant, R., Van, P.T., Winarto, B., Zeng, S. & Teixeira da Silva, J.A. (2013). The application of biotechnology to orchids. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 32, 69–139.
- Hossain, M.M., Sharma, M., Teixeira da Silva, J. & Pathak, P. (2010). Seed germination and tissue culture of *Cymbidium giganteum* Wall. ex Lindl. *Scientia Horticulturae*, 123, 479-487.
- Kauth, P.J., Dutra, D., Johnson, T.R., Stewart, S.L., Kane, M.E. & Vendrame, W.A. (2006). Techniques and applications of *in vitro* orchid seed germination. *Orchid Biology: Reviews and Perspectives*, 9, 375–393.
- Kauth, P.J., Dutra, D., Johnson, T.R., Stewart, S.L., Kane, M.E. & Vendrame, W. (2008). Techniques and applications of *in vitro* orchid seed germination. In J. A. Teixeira da Silva (Ed.), *Floriculture, Ornamental and Plant Biotechnology: Advances and Topical Issues* (pp. 375-393). Global Science Books.
- Kew Gardens. (2022). *Exploring the orchid family tree*. from <https://www.kew.org/read-and-watch/orchid-family-tree>.
- Liau, C.H., You, S.J., Prasad, V., Hsiao, H.H., Lu, J.C., Yang, N.S. & Chan, M. T. (2003). Agrobacterium tumefaciens-mediated transformation of an *Oncidium* orchid. *Plant Cell Reports*, 21(10), 993–998.
- Miyoshi, K. & Mii, M. (1995). Stimulatory effects of sodium alginate on the conversion of somatic embryos in carrot (*Daucus carota* L.). *Plant Science*, 107(2), 219-226.
- Saiprasad, G.V.S. (2001). Artificial seeds and their applications. *Resonance*, 6(5), 39-47.
- Takano, T., Oyamada, T. & Hirai, J. (1990). Improvement in nutrient composition of culture media for the growth and multiplication of PLB in *Cymbidium*. In *Proceedings of the Nagoya International Orchid Show* (pp. 95-101). Nagoya, Japan.
- Teixeira da Silva, J.A., Cardoso, J.C., Dobránszki, J. & Zeng, S. (2015). *Dendrobium* micropropagation: A review. *Plant Cell Reports*, 34(5), 671–704.

- Tikendra, L., Amom, T. & Nongdam, P. (2018). Effect of phytohormones on rapid in vitro propagation of *Dendrobium thyrsiflorum* Rchb.f.: An endangered medicinal orchid. *Pharmacognosy Magazine*, 14(58), 495-500.
- Tokuhara, K. & Mii, M. (1993). Micropropagation of *Phalaenopsis* and *Doritaenopsis* by culturing shoot tips of flower stalk buds. *Plant Cell Reports*, 13(1), 7-11. <https://doi.org/10.1007/BF00233397>.
- Utami, E.S.W. & Hariyanto, S. (2019). In vitro seed germination and seedling development of a rare Indonesian native orchid *Phalaenopsis amboinensis* J.J. Sm. *Scientifica*, 2019, 8105138.
- Vacin, E.F. & Went, F.W. (1949). Some pH changes in nutrient solutions. *Botanical Gazette*, 110(4), 605–613. <https://doi.org/10.1086/335561>.
- Verleysen, H., Samyn, G., Van Bockstaele, E. & Debergh, P. (2004). Evaluation of analytical techniques to predict viability after cryopreservation. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 77(1), 11-21. <https://doi.org/10.1023/B:TICU.0000016468.78464.36>.
- Wongrasee, N. & Sumontip, B. (2018). A simple and reproducible protocol for plant regeneration and cryopreservation of *Grammatophyllum speinocum* BL. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, 40(1), 251-257.
- Zhu, G., Li, J. & Zhang, X. (2013). Photosynthetic characteristics of four wild *Dendrobium* species in China. *HortScience*, 49(8), 1023-1030.

การพัฒนาระบบสารสนเทศเพื่อการจัดการงานพัสดุตามแนวคิดแบบลีน
กรณีศึกษา องค์การบริหารส่วนจังหวัดบุรีรัมย์
The Development of Supply Management Information System
Based on Lean Concept: A Case Study of Buriram Provincial
Administrative Organization

จุฑาทิพย์ โล้เจริญรัตน์^{1*} วิลไรตน์ ยาทองไชย¹ และ ณปภัช วรณตรง²
Juthathip Lojarernrat^{1*}, Wilairat Yathongchai¹, and Napaphat Wannatrongs²

¹สาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์

¹Department of Information Technology, Faculty of Science, Buriram Rajabhat University

²สาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์

²Department of Computer Science, Faculty of Science, Buriram Rajabhat University

*Email: Juthathip.Lojarernrat@bru.ac.th

Received : September 22, 2024

Revised : October 16, 2024

Accepted : November 29, 2024

บทคัดย่อ

งานพัฒนานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) พัฒนาระบบสารสนเทศเพื่อการจัดการงานพัสดุตามแนวคิดแบบลีน และ 2) ศึกษาความพึงพอใจของผู้ใช้ที่มีต่อการใช้งานระบบ ทั้งนี้เพื่อให้ได้สารสนเทศในการวางแผนและบริหารจัดการพัสดุขององค์กรให้มีความรวดเร็ว โดยมีกลุ่มตัวอย่างคือ กลุ่มผู้บริหารและกลุ่มผู้ปฏิบัติงานพัสดุ องค์การบริหารส่วนจังหวัดบุรีรัมย์ จำนวน 33 คน เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยคือ แบบสอบถามความพึงพอใจในการใช้งานระบบ สถิติที่ใช้ในการวิจัย ได้แก่ ร้อยละ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดยมีขั้นตอนการพัฒนาตามวงจรการพัฒนาระบบ ที่ทำการศึกษาสภาพปัจจุบัน และปัญหาของงานพัสดุขององค์การบริหารส่วนจังหวัดบุรีรัมย์ รวมถึงความต้องการที่มีต่อระบบงานใหม่ จากนั้นทำการวิเคราะห์และออกแบบระบบด้วยหลักการเชิงวัตถุ โดยนำแนวคิดแบบลีนมาประยุกต์เพื่อลดขั้นตอนและเวลาที่ใช้ในกระบวนการทำงานพัสดุ เครื่องมือที่ใช้พัฒนาคือ ภาษาเอชทีเอ็มแอล ภาษาพีเอชพี ลาราวเวลเฟรมเวิร์ก (Laravel Framework) และระบบจัดการฐานข้อมูลมายเอสคิวแอล ผลการวิจัยพบว่า ระบบทำงานในรูปแบบเว็บแอปพลิเคชันที่มีฟังก์ชันสำคัญในการทำงาน คือ 1) จัดการข้อมูลพื้นฐาน 2) จัดสรรข้อมูลงบประมาณ 3) ขออนุมัติดำเนินการจัดซื้อ และ 4) เบิกจ่ายพัสดุ เมื่อศึกษาการทำงานของระบบระหว่างเดือนกรกฎาคม - กันยายน 2567 ระบบสามารถช่วยลดเวลาในการทำงานลงได้ร้อยละ 22 และผลการศึกษาความพึงพอใจของผู้ใช้ พบว่า มีความพึงพอใจอยู่ในระดับมากที่สุด ($\bar{X} = 4.56$, S.D. = 0.12)

ABSTRACT

This project aims to: 1) design and develop a lean-based information system for procurement management, and 2) assess user satisfaction. The study involves 33 executives and procurement staff from the Buriram Provincial Administrative Organization, with data collected through a satisfaction questionnaire. The data was analyzed using percentages, means, and standard deviations. The development follows a systematic cycle, addressing current procurement issues and system requirements. The system is designed using object-oriented principles and lean concepts to streamline processes. Development tools include HTML, PHP, the Laravel framework, and MySQL. Research shows that the system functions as a web application with key features: 1) managing basic data, 2) allocating budget information, 3) requesting procurement approvals, and 4) disbursing items. From July to September 2023, the system reduced work time by 22%, with user satisfaction rated highly ($\bar{X} = 4.56$, S.D. = 0.12).

Key Words: Management Information System, Supplies, Lean Concept, Provincial Administrative Organization

บทนำ

ในยุคดิจิทัล เทคโนโลยีสารสนเทศ (Information Technology: IT) พัฒนารวดเร็วและมีบทบาทสำคัญในการบริหารจัดการในด้านต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นด้านธุรกิจ การสื่อสาร รวมถึงด้านเศรษฐกิจ โดยเป็นเครื่องมือที่ช่วยในการรับส่งข้อมูลและประมวลผลอย่างมีประสิทธิภาพ การใช้เทคโนโลยีสารสนเทศช่วยสนับสนุนการตัดสินใจ และการดำเนินงานขององค์กรทั้งในระดับชาติและนานาชาติ ทำให้การบริหารจัดการมีความเชื่อมั่นและความสมดุล (วีรยุทธ ทิพนานนท์ และวิชาญ เจริญวิไลรัตน์, 2564) ในด้านการบริหารจัดการงานพัสดุขององค์กร ได้แก่ การซื้อ การจ้าง และการเบิกจ่าย ได้มีการนำเทคโนโลยีสารสนเทศเข้ามาช่วยทำให้การทำงานมีความรวดเร็วและมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น เช่น การจัดทำฐานข้อมูลเพื่อควบคุมพัสดุ ลดปัญหาการสูญหาย และใช้พื้นที่ในการจัดเก็บอย่างมีประสิทธิภาพ เป็นต้น (อรรถพล จันทรสมุทร, 2562) เพื่อให้ระบบจัดการงานพัสดุเป็นไปอย่างเป็นระบบ

มีประสิทธิภาพ ใช้งบประมาณได้ถูกต้อง ให้ได้มาซึ่งพัสดุที่มีคุณภาพใช้ในราชการอย่างคุ้มค่า โปร่งใส และตรวจสอบได้

ในปัจจุบันองค์การบริหารส่วนจังหวัดบุรีรัมย์บริหารจัดการงานพัสดุ โดยเริ่มต้นปีงบประมาณด้วยการขออนุมัติและแต่งตั้งคณะกรรมการเพื่อจัดซื้อจัดจ้าง ข้อมูลจัดเก็บในรูปแบบกระดาษ และบันทึกด้วยระบบมือ (Manual) ตามแบบฟอร์มที่กำหนด ปัญหาที่พบคือ ก่อนสิ้นปีงบประมาณกองพัสดุ และทรัพย์สินต้องทำรายงานการเบิกจ่ายพัสดุลงเหลือ ซึ่งต้องรวบรวมข้อมูลจากหน่วยงานต่าง ๆ แต่การเชื่อมโยงข้อมูลค่อนข้างยาก ทำให้การรวบรวมข้อมูลล่าช้า นอกจากนี้การจัดทำสารสนเทศสำหรับหัวหน้าหน่วยงานก็ใช้เวลามาก ซึ่งเทคนิคแบบลีน (Lean) เป็นแนวคิดที่ใช้ในการปรับปรุงและเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการทำงาน โดยมุ่งเน้นการลดระยะเวลาและขั้นตอน (อดิگانต์ ม่วงเงิน, 2562) ลีนช่วยขจัดความสูญเปล่าและเน้นงานที่มีคุณค่า (Value Added) ส่งผลให้ลดต้นทุน ปรับปรุงประสิทธิภาพการดำเนินงาน และตอบสนองความต้องการของผู้ใช้อย่างมีประสิทธิภาพสูง ต้นทุนต่ำ และใช้เวลาอันน้อยที่สุด โดยการใช้หลักการ ECRS (Eliminate, Combine, Rearrange, Simplify) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงาน

จากที่กล่าวมาข้างต้น ผู้พัฒนาจึงมีแนวคิดในการศึกษาการพัฒนาระบบสารสนเทศ เพื่อการจัดการงานพัสดุตามแนวคิดแบบลีน กรณีศึกษา องค์การบริหารส่วนจังหวัดบุรีรัมย์ เพื่อปรับปรุงการบริหารจัดการพัสดุให้รวดเร็วและมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยใช้หลักการ ECRS ในการปรับปรุงกระบวนการทำงานหรือสร้างอุปกรณ์ช่วยให้ทำงานง่ายขึ้น ซึ่งจะช่วยให้มีความสะดวกและรวดเร็วขึ้นในการทำงาน เป็นการจัดระบบให้การทำงานมีระเบียบและเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานด้วย

วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อพัฒนาระบบสารสนเทศเพื่อการจัดการงานพัสดุตามแนวคิดแบบลีน กรณีศึกษา องค์การบริหารส่วนจังหวัดบุรีรัมย์
2. เพื่อศึกษาความพึงพอใจของผู้ใช้ที่มีต่อการใช้งานระบบสารสนเทศเพื่อการจัดการงานพัสดุตามแนวคิดแบบลีน กรณีศึกษา องค์การบริหารส่วนจังหวัดบุรีรัมย์

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. งานพัสดุดังองค์การบริหารส่วนจังหวัดบุรีรัมย์

เป็นองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นขนาดใหญ่ที่มีเขตพื้นที่รับผิดชอบทั่วจังหวัดบุรีรัมย์ จัดตั้งเพื่อบริการสาธารณประโยชน์ พัฒนางานของเทศบาลและองค์การบริหารส่วนตำบล และประสานแผนพัฒนาท้องถิ่นเพื่อลดความซ้ำซ้อนในการทำงาน (องค์การบริหารส่วนจังหวัดบุรีรัมย์, 2566) มีส่วนราชการในสังกัดทั้งหมด 11 สังกัด หน่วยงานที่ทำหน้าที่ในการควบคุมพัสดุ คือ กองพัสดุและทรัพย์สิน ซึ่งสำนัก และกองต่าง ๆ จะมีฝ่ายบริหารงานทั่วไป รับผิดชอบหน้าที่ในการจัดทำจัดซื้อจัดจ้างพัสดุ

ภายในสำนักหรือกอง ดำเนินการจัดทำเรื่องอนุมัติจัดซื้อจัดจ้างพัสดุ แล้วรายงานไปยังกองพัสดุและทรัพย์สิน เพื่อให้ดำเนินการจัดซื้อจัดจ้างพัสดุต่อไป

2. ระบบสารสนเทศเพื่อการจัดการ

การเก็บรวบรวมข้อมูล การประมวลผลและการสร้างสารสนเทศขึ้นมาเพื่อช่วยในการตัดสินใจ การประสานงานและการควบคุม รวมความสามารถของผู้ใช้งาน และคอมพิวเตอร์เข้าด้วยกัน เพื่อให้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยจะรวมทั้งสารสนเทศจากภายในและภายนอกสารสนเทศที่เกี่ยวข้องกับองค์กรในอดีตและปัจจุบัน เพื่อนำมาประมวลผลและจัดรูปแบบเพื่อสนับสนุนการทำงาน (กาญจน์วริน สิทธิปรีชาพงษ์, 2565) หากระบบสารสนเทศที่จัดการงานอย่างเป็นระบบแล้ว ยังช่วยให้มีความสะดวกในการจัดเก็บข้อมูล และรวดเร็วในการสืบค้นข้อมูลอีกด้วย

3. แนวคิดแบบสลิน

เป็นเครื่องมือที่ช่วยสร้างความเป็นเลิศในกระบวนการผลิต โดยมุ่งเน้นการจัดการกระบวนการให้ปราศจากความสูญเสียที่เพิ่มต้นทุน เพื่อปรับตัวและตอบสนองความต้องการของผู้ใช้งานอย่างทันทั่วถึง และเพิ่มประสิทธิภาพในการปฏิบัติงาน (ศิริพร จันทรหอม, 2562) หลักการ ECRS เป็นการตัดขั้นตอนที่ไม่จำเป็นออกไป เพื่อให้การดำเนินการมีความรวดเร็ว มีการนำขั้นตอนมารวมกัน เพื่อให้ประหยัดเวลา แล้วนำขั้นตอนทั้งหมดมาจัดเรียงลำดับใหม่ให้มีความเหมาะสม เพื่อให้เป็นระบบงานที่มีระเบียบมากขึ้น ซึ่งสามารถทำให้การดำเนินงานมีประสิทธิภาพมากขึ้น และเป็นประโยชน์แก่องค์กร

4. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สุริยัน นิลทะราช (2562) ได้พัฒนาระบบสารสนเทศการบริหารงานพัสดุที่มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร โดยศึกษาสภาพปัจจุบัน ปัญหา และความต้องการ รวมถึงการพัฒนาและประเมินระบบกลุ่มตัวอย่างประกอบด้วยบุคลากร 98 คน แบ่งเป็น 2 กลุ่ม: 1) ผู้บริหาร 14 คน (เลือกแบบเจาะจง) และ 2) ผู้ปฏิบัติงานด้านพัสดุ 84 คน (สุ่มแบบแบ่งชั้น) ใช้แบบสัมภาษณ์มีโครงสร้างและแบบสอบถาม (ค่าความเชื่อมั่น 0.97) การวิเคราะห์ข้อมูลใช้ค่าความถี่ ค่าร้อยละ ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และการวิเคราะห์เชิงเนื้อหา

ธนภัทร เจริญขวัญ และคณะ (2562) ได้ออกแบบและพัฒนาระบบคลังวัสดุอุปกรณ์สำหรับสถาบันวิจัยและพัฒนามหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา โดยใช้ ADDIE Model ซึ่งประกอบด้วย 5 ขั้นตอน: การวิเคราะห์, การออกแบบ, การพัฒนา, การทดลองใช้, และการประเมินผล ใช้เครื่องมือ เช่น Bootstrap Framework, PHP, และ MySQL ผลการประเมินจากผู้เชี่ยวชาญ 3 คน และผู้ใช้งาน 13 คน พบว่าระบบมีประสิทธิภาพดีและความพึงพอใจอยู่ในระดับดี ระบบนี้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบริหารงานวัสดุอุปกรณ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

อดิگانต์ ม่วงเงิน (2562) ใช้เทคนิคแบบสลินในการปรับปรุงกระบวนการทำงานของระบบตู้รับคืนหนังสืออัตโนมัติที่สำนักบรรณสารการพัฒนาสถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์ โดยใช้วิจัยเชิงปฏิบัติการ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและประสิทธิผล วัตถุประสงค์คือการวิเคราะห์และเสนอแนวทาง

การปรับปรุงโดยใช้หลักการ ECRS เพื่อลดขั้นตอนที่ไม่สร้างมูลค่า เช่น Over Processing และ Waiting ผลการปรับปรุงลดขั้นตอนจาก 17 ขั้นตอนเหลือ 10 ขั้นตอน ลดลง 7 ขั้นตอน หรือร้อยละ 58.82 ซึ่งช่วยลดเวลาการรอคอยและเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ

วิทยา ปารีเลียม และศิริพรรณ จินะบุญเรือง (2564) ได้พัฒนากระบวนการจัดซื้อจัดจ้างพัสดุ โดยใช้แนวคิดแบบลีนที่โรงพยาบาลแม่จัน จังหวัดเชียงราย จากการสัมภาษณ์และสนทนากลุ่มกับผู้ปฏิบัติงาน 11 คนที่มีประสบการณ์ประมาณ 10 ปี พบว่ามีปัญหาเอกสารมากเกินไปและการจัดการที่แบ่งส่วนทำให้เกิดความล่าช้า การพัฒนาระบบใหม่โดยใช้ Google Drive แทนระบบมือ (Manual) ลดขั้นตอนจาก 41 เป็น 31 ขั้นตอน และระยะเวลาในการทำงานจาก 802 นาที เป็น 442.50 นาที

วิธีการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการวิจัยและพัฒนา (Research and Development) มีขั้นตอนการวิจัย ดังนี้

ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

1. ประชากรที่ใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ ประกอบด้วย กลุ่มผู้บริหารองค์การบริหารส่วนจังหวัดบุรีรัมย์ จำนวน 65 คน และกลุ่มผู้ปฏิบัติงานด้านพัสดุ จำนวน 33 คน

2. กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ ได้มาโดยการเลือกแบบเจาะจงทั้งหมด ได้แก่ กลุ่มผู้บริหารองค์การบริหารส่วนจังหวัดบุรีรัมย์ จำนวน 11 คน และกลุ่มผู้ปฏิบัติงานพัสดุ จำนวน 22 คน เพื่อทำการศึกษาสภาพปัจจุบัน ปัญหา และความต้องการระบบสารสนเทศ รวมถึงใช้งานระบบสารสนเทศเพื่อการจัดการงานพัสดุตามแนวคิดแบบลีน กรณีศึกษา องค์การบริหารส่วนจังหวัดบุรีรัมย์ เพื่อศึกษาความพึงพอใจในการใช้งานระบบของผู้ใช้

เครื่องมือการวิจัย

1. ระบบสารสนเทศเพื่อการจัดการงานพัสดุตามแนวคิดแบบลีน กรณีศึกษา องค์การบริหารส่วนจังหวัดบุรีรัมย์

2. แบบสอบถามความพึงพอใจในการใช้งานระบบสารสนเทศเพื่อการจัดการงานพัสดุตามแนวคิดแบบลีน กรณีศึกษา องค์การบริหารส่วนจังหวัดบุรีรัมย์

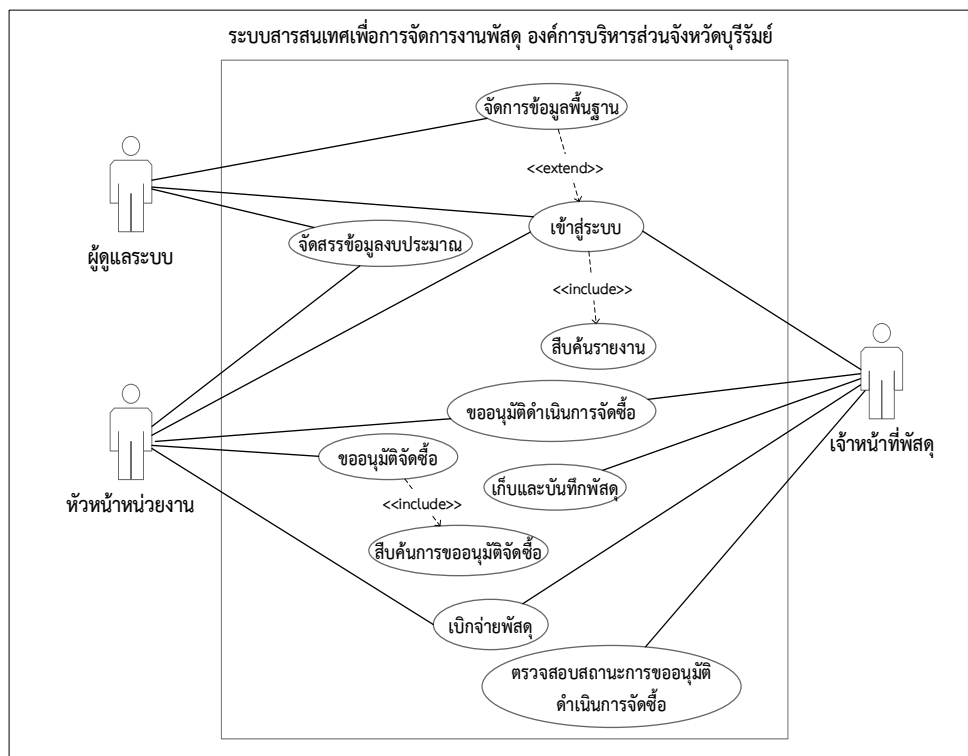
ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้มีขั้นตอนดำเนินการวิจัย ประกอบด้วย 6 ขั้นตอน ดังนี้

1. ศึกษาสภาพปัจจุบัน ปัญหา และความต้องการโดยการสัมภาษณ์แบบมีโครงสร้างกับผู้บริหารและเจ้าหน้าที่พัสดุ เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์และออกแบบระบบสารสนเทศที่เหมาะสม

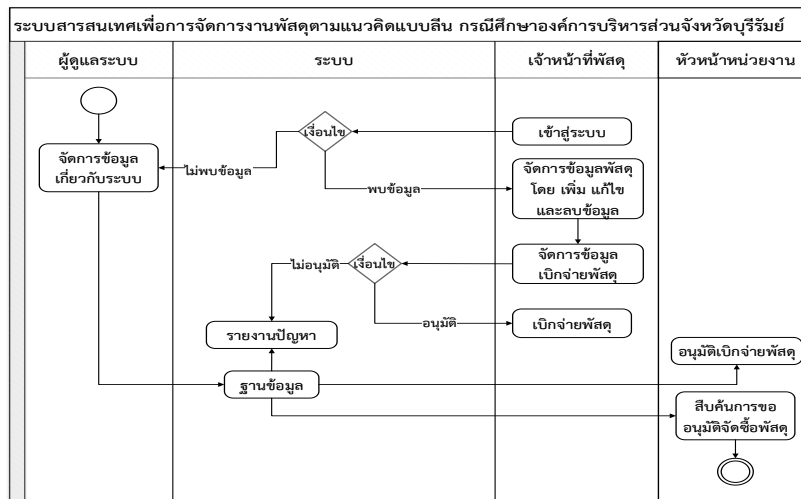
2. การวิเคราะห์และออกแบบระบบ จากการศึกษาปัญหาและเก็บรวบรวมข้อมูลจึงได้นำมาวิเคราะห์และออกแบบระบบด้วยหลักการเชิงวัตถุ (Object Oriented Analysis and Design) นำเสนอ

ด้วยแผนภาพยูเอ็มแอล (UML) ดังภาพประกอบ 1 ยูสเคสไดอะแกรม (Use Case Diagram) ที่นำเสนอการทำงานโดยรวมของระบบมีผู้ใช้หรือผู้ติดต่อกับระบบ คือ ผู้ที่เกี่ยวข้องกับระบบ (Actor) ประกอบด้วย ผู้ดูแลระบบ (Admin) หัวหน้าหน่วยงาน และเจ้าหน้าที่พัสดุ เป็นต้น และกระบวนการทำงานหลัก (Use Case) เป็นทำงานของระบบ ทำให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างแอกเตอร์กับยูสเคส และยูสเคสกับยูสเคสที่มีความสัมพันธ์กัน ดังนี้



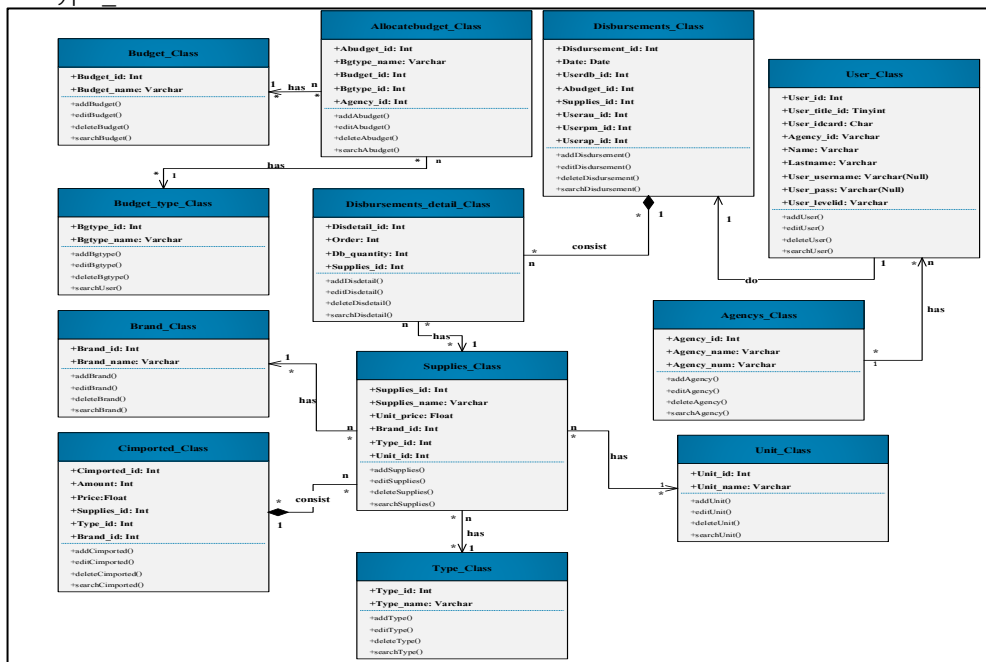
ภาพประกอบ 1 แผนภาพยูสเคสกระบวนการทำงานของระบบ

นำเสนอภาพรวมการทำงานของระบบด้วยแผนภาพกิจกรรม (Activity Diagram) ที่อธิบายกิจกรรมที่เกิดขึ้นในลักษณะกระแสการไหลของการทำงาน (Workflow) ดังภาพประกอบ 2



ภาพประกอบ 2 แผนภาพกิจกรรมการทำงานของระบบ

ซึ่งมีคลาสและความสัมพันธ์ของคลาสที่ใช้ในการทำงาน 12 คลาส คือ Budget_type_Class, Allocatebudget_Class, Disbursements_Class, User_Class, Agencys_Class, Budget_Class, Disbursements_detail_Class, Brand_Class, Supplies_Class, Unit_Class, Cimported_Class และ Type_Class ดังภาพประกอบ 3



ภาพประกอบ 3 คลาสไดอะแกรม (Class Diagram)

5. การพัฒนาและทดสอบระบบ ระบบทำงานในรูปแบบเว็บแอปพลิเคชันที่พัฒนาด้วยพีเอชพี และลาราวเอลเฟรมเวิร์ก พร้อมกับมายเอสคิวแอลสำหรับการจัดการฐานข้อมูล โดยใช้การทดสอบแบบ Black Box Testing เพื่อตรวจสอบการทำงานของระบบตามวัตถุประสงค์ที่กำหนด โดยใช้ข้อมูลสมมุติ (Test Data) และการกรอกข้อมูลเหมือนการใช้งานจริง เพื่อประเมินการตอบสนองของระบบ การเบิกจ่ายพัสดุต่อความต้องการของผู้ใช้ นอกจากนี้ ยังใช้การทดสอบแบบ White Box Testing เพื่อตรวจสอบข้อผิดพลาดของระบบ โดยเรียกใช้คำสั่งต่าง ๆ ในโปรแกรมให้มากที่สุด เพื่อวิเคราะห์การทำงานของระบบและค้นหาข้อบกพร่องที่อาจเกิดขึ้นจากคำสั่งเหล่านั้นด้วย

6. การติดตั้งและประเมินผลระบบ เมื่อทำการทดสอบระบบจนสามารถใช้ระบบได้ตามที่วางแผนไว้ จากนั้นติดตั้งและใช้งานระบบ พร้อมทำการประเมินผลระบบ คือ

1) การประเมินผลการใช้งานระบบตามแนวคิดสิน โดยการเก็บบันทึกข้อมูลจริง ณ องค์การบริหารส่วนจังหวัดบุรีรัมย์ มีการเก็บข้อมูลก่อนปรับปรุง และหลังการปรับปรุงกระบวนการทำงาน โดยจะทำการเก็บตัวอย่างของเอกสารแต่ละขั้นตอนในกระบวนการจัดการงานพัสดุ ช่วงก่อนการนำระบบสารสนเทศมาใช้ ช่วงเดือนเมษายน - มิถุนายน 2567 และช่วงเดือนกรกฎาคม - กันยายน 2567 เป็นวันเวลาราชการ เป็นระยะเวลา 135 วัน เพื่อทำการเปรียบเทียบข้อมูลก่อนและหลังการนำระบบสารสนเทศมาใช้ โดยการเก็บข้อมูลของกระบวนการจัดซื้อ ระยะเวลาที่ใช้

2) การศึกษาความพึงพอใจของผู้ใช้ คือ กลุ่มผู้บริหารและกลุ่มผู้ปฏิบัติงานพัสดุ จำนวน 33 คน ด้วยแบบสอบถามแบบมาตรฐานส่วนประมาณค่า (Rating Scale) ซึ่งกำหนดค่าคะแนนเป็น 5 ระดับตามมาตรวัดลิเคิร์ต (Likert Scale) ที่ผ่านการหาค่าดัชนีความสอดคล้องระหว่างข้อคำถามกับวัตถุประสงค์ (Index Of Item Objective Congruence : IOC) จากผู้เชี่ยวชาญ 3 ท่าน เพื่อหาค่าเฉลี่ยส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเทียบกับเกณฑ์การประเมินเพื่อแปลความหมาย ดังนี้ (บุญชม ศรีสะอาด, 2560)

ค่าเฉลี่ย 4.51 – 5.00 หมายถึง ระดับมากที่สุด

ค่าเฉลี่ย 3.51 – 4.50 หมายถึง ระดับมาก

ค่าเฉลี่ย 2.51 – 3.50 หมายถึง ระดับปานกลาง

ค่าเฉลี่ย 1.51 – 2.50 หมายถึง ระดับน้อย

ค่าเฉลี่ย 1.00 – 1.50 หมายถึง ระดับน้อยที่สุด

จากนั้นดำเนินการสรุปผลการวิจัยโดยจัดทำรายงานและทำการเผยแพร่ผลการวิจัย

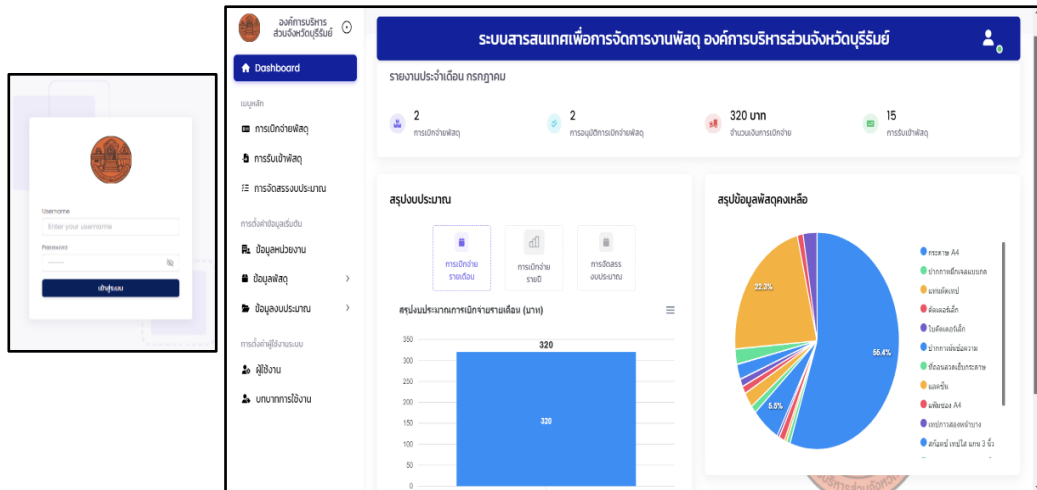
ผลการพัฒนา

งานพัฒนานี้นำเสนอผลการศึกษา 2 ส่วน คือ ผลการพัฒนาระบบ และผลการศึกษาความพึงพอใจ ดังนี้

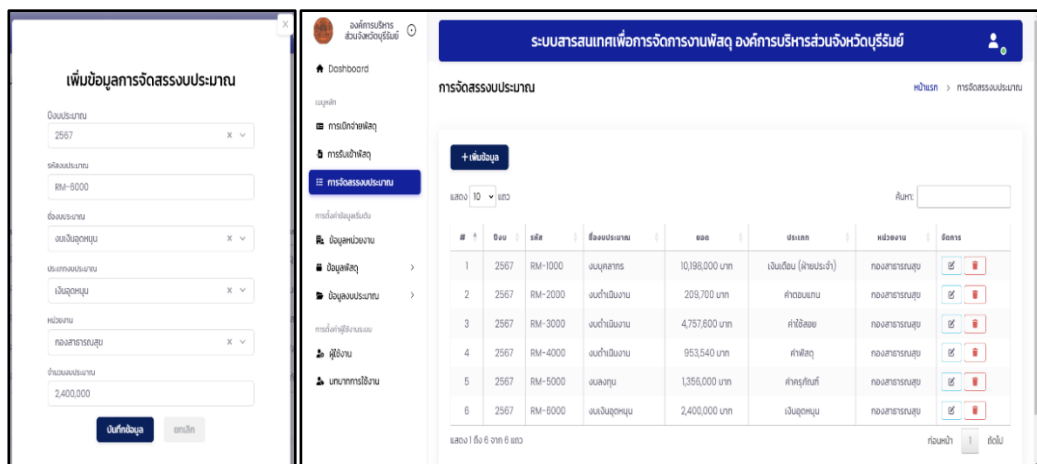
1. ผลการพัฒนาระบบสารสนเทศ ได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ

1) ผลการทำงานของระบบ ประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ และสามารถใช้งานระบบได้ดังนี้

1.1) ส่วนผู้ดูแลระบบ สามารถล็อกอินเข้าสู่ระบบจะปรากฏหน้าสรุปต่าง ๆ โดยสามารถจัดการข้อมูลพื้นฐานผ่านทางเว็บเบราว์เซอร์ ดังภาพประกอบ 4 และ 5



ภาพประกอบ 4 หน้าจอหลักเมื่อล็อกอินเข้าสู่ระบบ



ภาพประกอบ 5 การเพิ่มข้อมูลจัดสรรงบประมาณ

1.2) ส่วนผู้ใช้งาน ประกอบด้วย หัวหน้าหน่วยงาน และเจ้าหน้าที่พัสดุ สามารถเพิ่มลบ แก้ไขข้อมูลต่าง ๆ และค้นหารายงานต่าง ๆ ดังภาพประกอบ 6 และ 7

เพิ่มข้อมูลพัสดุ

จัดส่งไปรษณีย์: 2567

พัสดุ: การฝึกอบรม / Delta / 30kg/พนักงาน / 80

ราคาต่อหน่วย: 70

จำนวน: 4

วันที่ปิดรับ: 4 กรกฎาคม 2024

หมายเหตุ:

จัดการข้อมูลพัสดุ

จัดส่งไปรษณีย์: 2567

พัสดุ: การฝึกอบรม

วันที่ปิดรับ: 08/08/2024 - 07/07/2024

+ เพิ่มข้อมูล

#	ชื่อ	ชื่อพัสดุ	ราคาต่อหน่วย	จำนวน	วันที่เริ่ม	วันที่จบ
1	2567	พัสดุ อบรม A4 + ฝึกอบรม A	150 บาท	241 ชิ้น	05 ก.ค. 67	
2	2567	พัสดุ อบรม A4 + ฝึกอบรม A	270 บาท	3 ชิ้น	05 ก.ค. 67	

ภาพประกอบ 6 การจัดการข้อมูลพัสดุ

ตรวจสอบข้อมูลก่อนกดยืนยัน

ยืนยันการอนุมัติเบิกจ่ายพัสดุ

บัญชีพัสดุ

จัดส่งไปรษณีย์: 2567

พัสดุ: การฝึกอบรม

วันที่ปิดรับ: 08/08/2024 - 07/07/2024

เช็คข้อมูลพัสดุ (1)

ประเภท (1): ฝึกอบรม

ขนาด (1): 30kg/พนักงาน

หน่วย (1): ชิ้น

วันที่เริ่ม (1): 05 ก.ค. 67

วันที่จบ (1): 07 ก.ค. 67

จำนวน (1): 241 ชิ้น

ราคาต่อหน่วย (1): 150 บาท

จำนวนรวม (1): 35,400 บาท

วันที่เริ่ม	วันที่จบ	จำนวน	ราคาต่อหน่วย	รวม
04 กรกฎาคม 2567	07 กรกฎาคม 2567	4	70	280

ภาพประกอบ 7 หน้าจออนุมัติใบเบิกพัสดุเพื่อออกรายงานบัญชีพัสดุ

2) ผลการดำเนินงานพัสดุด้วยระบบสารสนเทศเพื่อการจัดการงานพัสดุตามแนวคิดแบบสิ้น การปรับปรุงกระบวนการทำงานโดยประยุกต์ใช้หลักการ ECRS^{HT} ปรับปรุงกระบวนการทำงาน ได้ยกเลิกและรวมขั้นตอนบางอย่าง รวมถึงหาวิธีทำงานให้ง่ายขึ้นและจัดลำดับขั้นตอนใหม่ เพื่อลดขั้นตอน ลดรอบเวลา และเพิ่มประสิทธิภาพของระบบสารสนเทศงานพัสดุ สรุปผลได้ดังนี้

2.1) การลดขั้นตอนของกระบวนการทำงาน พบว่า จากเดิม 19 ขั้นตอน ขั้นตอนลดลง 8 ขั้นตอน เหลือ 11 ขั้นตอน ร้อยละของการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 57.894 แสดงตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบผลก่อนและหลังปรับปรุงสำหรับขั้นตอนของกระบวนการทำงาน

ขั้นตอน/ตัวชี้วัด	หน่วย	ก่อน	หลัง	ร้อยละของการเปลี่ยนแปลง	หมายเหตุ
ลดขั้นตอนของกระบวนการทำงาน	ขั้นตอน	19	11	57.894% ▼	ขั้นตอนลดลง จำนวน 8 ขั้นตอน

2.2) การลดรอบเวลาการทำงานทั้งหมด พบว่า ลดรอบเวลาการทำงานทั้งหมดของกระบวนการลดลง 67 วัน เหลือเพียง 19 วัน ซึ่งจากเดิมใช้รอบเวลาการทำงานทั้งหมดของกระบวนการเท่ากับ 86 วัน ร้อยละของการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 22.093 แสดงตามตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบผลก่อนและหลังปรับปรุงสำหรับรอบเวลาการทำงานทั้งหมด

ขั้นตอน/ตัวชี้วัด	หน่วย	ก่อน	หลัง	ร้อยละของการเปลี่ยนแปลง	หมายเหตุ
ลดรอบเวลาการทำงานทั้งหมดของกระบวนการทำงาน	วัน	86	19	22.093% ▼	ลดรอบเวลาการทำงานทั้งหมดลง 67 วัน

2. ผลการศึกษาความพึงพอใจของผู้ใช้ระบบ

ผู้วิจัยได้ดำเนินการเก็บรวบรวมข้อมูลโดยใช้วิธีแจกแบบประเมินความพึงพอใจ สามารถสรุปผลการศึกษาความพึงพอใจ ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ความพึงพอใจของผู้ใช้ที่มีต่อระบบสารสนเทศ

รายการ	$\bar{X}$	S.D.	ระดับ
1. ด้านประสิทธิภาพในการใช้งาน (Efficiency)			
1.1 ระบบสามารถช่วยลดเวลาในการดำเนินงานพัสดุ	4.58	0.71	มากที่สุด
1.2 ระบบสามารถประมวลผลข้อมูลได้อย่างแม่นยำ	4.55	0.71	มากที่สุด
1.3 การใช้ระบบทำให้การจัดการพัสดุมีความคล่องตัวและยืดหยุ่นมากขึ้น	4.52	0.71	มากที่สุด
1.4 ระบบมีความเร็วในการประมวลผลข้อมูล	4.61	0.40	มากที่สุด
1.5 ระบบมีความเสถียรในการใช้งาน	4.52	0.62	มากที่สุด
1.6 ระบบสามารถรองรับการประมวลผลข้อมูลขนาดใหญ่ได้	4.45	0.66	มาก
เฉลี่ย	4.53	0.27	มากที่สุด
2. ด้านประสิทธิผลในการใช้งาน (Effectiveness)			
2.1 ความถูกต้องในการจัดเก็บข้อมูลพัสดุ	4.64	0.65	มากที่สุด
2.2 ความถูกต้องของการปรับปรุงแก้ไขข้อมูลพัสดุ	4.52	0.62	มากที่สุด

ตารางที่ 3 (ต่อ)

รายการ	$\bar{X}$	S.D.	ระดับ
2.3 ระบบมีฟังก์ชันและคุณสมบัติที่ตอบสนองต่อความต้องการของผู้ใช้งาน	4.67	0.48	มากที่สุด
2.4 ความถูกต้องของการสรุปรายงานต่าง ๆ	4.64	0.55	มากที่สุด
2.5 ระบบช่วยเพิ่มความถูกต้องและความครบถ้วนของข้อมูลที่ใช้ในการตัดสินใจ	4.70	0.47	มากที่สุด
2.6 ผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลจากระบบมีความถูกต้อง	4.79	0.41	มากที่สุด
เฉลี่ย	4.66	0.23	มากที่สุด
3. ด้านการลดความสูญเสีย (Waste Elimination)			
3.1 ระบบช่วยลดการเกิดข้อผิดพลาดในการทำงาน	4.55	0.66	มากที่สุด
3.2 ระบบช่วยลดการทำงานที่ซ้ำซ้อนในการดำเนินงาน	4.52	0.62	มากที่สุด
3.3 ระบบช่วยลดขั้นตอนที่ไม่จำเป็นในกระบวนการจัดการงานพัสดุ	4.55	0.56	มากที่สุด
3.4 ระบบช่วยลดเวลาในการดำเนินงาน	4.48	0.57	มาก
3.5 ระบบช่วยเพิ่มความสะดวกสบายในการทำงาน	4.52	0.71	มากที่สุด
เฉลี่ย	4.52	0.23	มากที่สุด
4. ด้านความสามารถในการเรียนรู้ (Learnability)			
4.1 ระบบใช้งานง่าย และมีคำแนะนำการใช้งาน	4.61	0.66	มากที่สุด
4.2 มีระบบช่วยเหลือผู้ใช้ในขณะปฏิบัติงาน	4.55	0.62	มากที่สุด
4.3 มีคู่มือประกอบการใช้งานระบบ	4.45	0.71	มาก
4.4 ความเหมาะสมในการเลือกใช้นาฬิกาสัญลักษณ์หรือรูปภาพเพื่ออธิบายสื่อความหมาย	4.48	0.62	มาก
4.5 ความเป็นมาตรฐานเดียวกันในการออกแบบหน้าจอ	4.52	0.62	มากที่สุด
4.6 การใช้สีของตัวอักษรและรูปภาพที่เหมาะสม	4.58	0.56	มากที่สุด
4.7 การใช้ถ้อยคำบนจอภาพสามารถสื่อความหมายให้เข้าใจได้ง่าย	4.48	0.67	มาก
เฉลี่ย	4.52	0.20	มากที่สุด
5. ด้านความเชื่อถือได้ในการใช้งาน (Reliability)			
5.1 การกำหนดรหัสผู้ใช้ และรหัสผ่านในการตรวจสอบผู้ใช้งานระบบ	4.39	0.66	มาก

ตารางที่ 3 (ต่อ)

รายการ	$\bar{X}$	S.D.	ระดับ
5.2 การตรวจสอบสิทธิการใช้งานของผู้ใช้ระบบในระดับต่าง ๆ	4.70	0.58	มากที่สุด
5.3 ความสามารถในการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล	4.58	0.66	มากที่สุด
5.4 มีระบบป้องกันความปลอดภัยสำหรับข้อมูล	4.52	0.71	มากที่สุด
เฉลี่ย	4.54	0.29	มากที่สุด
โดยรวม	4.56	0.12	มากที่สุด

จากตารางที่ 3 พบว่า ระดับคะแนนประเมินความพึงพอใจภาพรวมอยู่ในระดับมากที่สุด ค่าเฉลี่ย 4.56 โดยด้านที่มีค่าเฉลี่ยมากที่สุดคือ ด้านประสิทธิภาพในการใช้งาน อยู่ในระดับมากที่สุด ($\bar{X} = 4.66$, S.D. = 0.23) รองลงมาคือ ด้านความเชื่อถือได้ในการใช้งาน อยู่ในระดับมากที่สุด ($\bar{X} = 4.54$, S.D. = 0.29) ด้านประสิทธิภาพในการใช้งาน อยู่ในระดับมากที่สุด ($\bar{X} = 4.53$, S.D. = 0.27) และด้านที่มีค่าเฉลี่ยน้อยที่สุด คือ ด้านการลดความสูญเสีย อยู่ในระดับมากที่สุด ($\bar{X} = 4.52$, S.D. = 0.23) และด้านความสามารถในการเรียนรู้ อยู่ในระดับมากที่สุด ($\bar{X} = 4.52$, S.D. = 0.20)

อภิปรายผลการวิจัย

จากการวิจัย การพัฒนาระบบสารสนเทศเพื่อการจัดการงานพัสดุตามแนวคิดแบบสลิน กรณศึกษา องค์การบริหารส่วนจังหวัดบุรีรัมย์ มีประเด็นการอภิปรายผล ดังนี้

การพัฒนาระบบสารสนเทศเพื่อการจัดการงานพัสดุตามแนวคิดแบบสลิน กรณศึกษา องค์การบริหารส่วนจังหวัดบุรีรัมย์ พบว่า ระบบสารสนเทศมีคุณสมบัติในด้านต่าง ๆ ดังนี้ คือ การนำข้อมูลเข้าระบบ การค้นหาข้อมูล และการสรุปผลรายงานข้อมูล ระบบครอบคลุมการจัดการงานพัสดุ เช่น การลงบัญชีและการเบิกจ่ายพัสดุ โดยมีโมดูลสำหรับผู้ใช้งาน 3 กลุ่ม ได้แก่ โมดูลสำหรับผู้ดูแลระบบ โมดูลสำหรับหัวหน้าหน่วยงาน และโมดูลสำหรับเจ้าหน้าที่พัสดุ หลังปรับปรุงโดยประยุกต์ใช้หลักการของ ECRS^{HT} ปรับปรุงกระบวนการทำงาน พบว่า ขั้นตอนของกระบวนการทำงานลดลงจำนวน 8 ขั้นตอน เหลือ 11 ขั้นตอน จากเดิมจำนวน 19 ขั้นตอน รอบเวลาทั้งหมดของกระบวนการลดลง 67 วัน เหลือเพียง 19 วัน จากเดิมใช้รอบเวลาทั้งหมด 86 วัน ร้อยละของการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 22.093 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของวิทยา ปารีเสียม และศิริพรรณ จินะบุญเรือง (2566) ได้พัฒนารูปแบบกระบวนการจัดซื้อจัดจ้างพัสดุด้วยการใช้แนวคิดขจัดความสิ้นเปลืองและสูญเปล่า (Lean) มาประยุกต์ใช้กรณศึกษา โรงพยาบาลแม่จัน จังหวัดเชียงราย สามารถลดความสูญเปล่าในกระบวนการจัดซื้อจัดจ้างพัสดุลงเหลือเพียง 31 ขั้นตอน จากเดิมที่มีอยู่ 41 ขั้นตอน

การศึกษาความพึงพอใจของผู้ใช้งานระบบ พบว่า ภาพรวมค่าเฉลี่ย 4.56 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของสุกัญญา ทับทิม (2562) ได้พัฒนาระบบงานพัสดุสำนักงาน โดยใช้โปรแกรมทะเบียนวัสดุสำนักงาน ผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้บริการหลังการพัฒนาฯ ภาพรวมอยู่ในระดับมากที่สุด ($\bar{X} = 4.76$) อีกทั้งยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ ธนภัทร เจริญขวัญ และคณะ (2562) ได้ทำการศึกษาวิจัยเรื่อง ระบบบริหารคลังวัสดุอุปกรณ์: กรณีศึกษา สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา ผลการประเมินความพึงพอใจต่อการใช้งานระบบ พบว่า มีความพึงพอใจต่อระบบโดยรวมอยู่ในระดับมาก ($\bar{X} = 4.15$)

จากการอภิปรายผลข้างต้น สามารถสรุปได้ว่า การพัฒนาระบบสารสนเทศเพื่อการจัดการงานพัสดุตามแนวคิดแบบลิน กรณีสึกษา องค์การบริหารส่วนจังหวัดบุรีรัมย์ ระบบมีฟังก์ชันการนำเข้าข้อมูลเข้าระบบการค้นหา และการสรุปผลรายงาน พร้อมโมดูลสำหรับผู้ใช้งาน 3 กลุ่ม ได้แก่ ผู้ดูแลระบบ หัวหน้าหน่วยงาน และเจ้าหน้าที่พัสดุ หลังการปรับปรุงตาม ECRS^{HT} สามารถลดขั้นตอนทั้งหมด 19 ขั้นตอนเหลือเพียง 11 ขั้นตอน และลดเวลาการทำงานจาก 86 วันเหลือเพียง 19 วัน เปลี่ยนแปลงร้อยละ 22 ความพึงพอใจของผู้ใช้งานมีค่าเฉลี่ยโดยรวม 4.56 ซึ่งสูงมาก จึงส่งผลให้การจัดการงานพัสดุมีความรวดเร็วมากขึ้น สามารถเรียกดูรายงานรวมทั้งตรวจสอบข้อมูลพัสดุดังกล่าวได้ตลอดเวลา สามารถแก้ไขหรือสืบค้นข้อมูลพัสดุได้อย่างสะดวก ถูกต้องและครบถ้วน โดยปรับปรุงวิธีการทำงาน หรือสร้างอุปกรณ์ช่วยให้ทำงานง่ายขึ้น จึงช่วยให้มีความสะดวกและรวดเร็วขึ้นในการทำงาน เป็นการจัดระบบให้การทำงานมีระเบียบและเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานด้วย

ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัย

ข้อเสนอแนะในการนำไปใช้

นำระบบสารสนเทศเพื่อการจัดการงานพัสดุไปใช้หน้าเว็บไซต์ขององค์กรให้เห็นได้อย่างชัดเจน และควรง่ายต่อการเข้าใช้งานระบบ

ข้อเสนอแนะเพื่อการวิจัยต่อไป

ให้มีการอบรมภายในองค์กร เพื่อประชาสัมพันธ์และส่งเสริมการใช้ประโยชน์จากข้อมูลในระบบสารสนเทศออนไลน์ เพื่อผลักดันให้องค์กรสามารถนำความรู้ไปพัฒนางานของบุคลากรได้

เอกสารอ้างอิง

กาญจน์วริน สิทธิพิริชาพงษ์. (2565). การศึกษาความต้องการการใช้งานระบบสารสนเทศ เพื่อสนับสนุนการบริหารจัดการ มหาวิทยาลัย (NSRU MIS) ระดับบุคคล มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์ (รายงานการวิจัย). นครสวรรค์: มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์.

- ธนภัทร เจริญชัย, จารุวรรณ เพชรรักษ์, และพุดธิธรร ตุ๊กเตียน. (2562). ระบบบริหารคลังวัสดุ อุปกรณ์:กรณีศึกษาสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา. ใน *การประชุมมหาดไทยวิชาการระดับชาติและนานาชาติ ครั้งที่ 10*. (น.1429-1438). สงขลา : มหาวิทยาลัยมหาดไทยใหญ่.
- บุญชม ศรีสะอาด. (2560). *การวิจัยเบื้องต้น*. (พิมพ์ครั้งที่ 10). กรุงเทพฯ: สุวีริยาสาส์น.
- วีรยุทธ ทิพนานนท์ และ วิชาญ เจริญวิไลรัตน์. (2564). สารสนเทศในการบริหารต่อสื่อเทคโนโลยี เพื่อการจัดการเรียนรู้ของบุคลากร ทางการศึกษาโรงเรียนบ้านโกรกสิงขร อำเภोजอมบึง จังหวัดราชบุรี. *วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์*. 1(1), 1-10.
- วิทยา ปารีเลียม และ ศิริพรรณ จินะบุญเรือง. (2564). การพัฒนารูปแบบกระบวนการจัดซื้อจัดจ้างพัสดุด้วยการใช้แนวคิดขจัดความสิ้นเปลืองและสูญเสีย (Lean) มาประยุกต์ใช้ กรณีศึกษาโรงพยาบาลแม่จัน จังหวัดเชียงราย. *การบริหารนิติบุคคลและนวัตกรรมการท้องถิ่น*. 9(1), 93-105.
- ศิริพร จันทร์หอม. (2562). การศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดซื้อเวชภัณฑ์ โดยการนำแนวคิดระบบการผลิตแบบลีน มาประยุกต์ใช้ กรณีศึกษา การจัดซื้อเวชภัณฑ์ลักษณะฝากขายโรงพยาบาลธรรมศาสตร์เฉลิมพระเกียรติ (การค้นคว้าอิสระ). ปทุมธานี : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- สุริยัน นิลทะราช. (2562). การพัฒนาระบบสารสนเทศการบริหารงานพัสดุ เพื่อการควบคุมวัสดุ มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารศาสตรบัณฑิต). สกลนคร: มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร)
- สุกัญญา ทับทิม. (2562). การพัฒนาระบบงานพัสดุสำนักงาน โดยใช้โปรแกรมทะเบียนวัสดุสำนักงานสำหรับสำนักงาน คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม. *วิทยาการจัดการ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม*, 6(1), 49-58.
- อรรถพล จันทร์สมุด. (2562). ระบบสารสนเทศการจัดการวัสดุสิ้นเปลือง : กรณีศึกษา สำนักงานคณบดีคณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ. *แม่โจ้เทคโนโลยีสารสนเทศและนวัตกรรม มหาวิทยาลัยแม่โจ้*. 5(2), 13-26.
- อดิگانต์ ม่วงเงิน. (2562). การประยุกต์ใช้เทคนิคแบบลีน (ECRS^{HT}) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการทำงานระบบตู้รับคืนหนังสืออัตโนมัติ สำนักบรรณสารการพัฒนา สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์ (รายงานการวิจัย). กรุงเทพฯ: สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์ องค์การบริหารส่วนจังหวัดบุรีรัมย์. *อำนาจหน้าที่ขององค์การบริหารส่วนจังหวัด*. สืบค้นเมื่อ 8 ตุลาคม 2566. จาก <http://www.bpao.go.th>.

สารบัญ

- การออกแบบสร้างรถสามล้อไฟฟ้าด้วยมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน
โดยประยุกต์ใช้การอัดประจุแบตเตอรี่จากโซลาร์เซลล์.....1
ดุสิต อุทิศสุนทร และ คมสันต์ บันลือหาญ
- การพัฒนาโคโตน/คอลลาเจนไฮโดรเจลที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ
และมีคุณสมบัติต้านแบคทีเรียโดยใช้นุภาคนาโนเงินชีวสังเคราะห์
จากสารสกัดน้ำกระชายขาว.....21
ชานนท์ สมจิตตรกุล เอกรัฐ หิตโกเมท ชีราวุฒิ เพชรเย็น และ ปญจพร วงศ์วิทยากุล
- การผลิตเครื่องดื่มคอมบูชาจากรากบัว.....41
พันธ์ระวี หมวดศรี และ ชีระยุทธ เตียนธนา
- การพัฒนาเกม 2 มิติ อิงพีคกระบบภูมิศาสตร์เพื่อส่งเสริมการท่องเที่ยว
อำเภอเมืองจังหวัดบุรีรัมย์.....51
วรินทร์พิพัชร วัชรพงษ์เกษม ณัฐพัฒน์ วิเศษทรานนท์และ อภิรพีลา สมเสมอ
- ผลทางด้านจุลินทรีย์และกายภาพของขนมปังที่ห่อด้วยผ้าเคลือบไขผึ้งห่ออาหาร.....63
นงลักษณ์ สายเทพ
- การเพิ่มประสิทธิภาพอิเล็กโทรด SPCE ด้วยอนุภาคนาโนของทองคำและแพลทินัม
เพื่อปรับปรุงการตรวจจับภาวะเครียดจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน.....73
สนธยา พงษ์ธานีหยาดนภา ฟ้าเจริญ ศีตกานต์ นัดพบสุข และ ชีราวุฒิ เพชรเย็น
- การเพาะเลี้ยงเมล็ดในหลอดทดลองและการผลิตเมล็ดเทียมจากอื้องไม้เท้าฤๅษี
(*Dendrobium pendulum* Roxb.) ในสภาพปลอดเชื้อ.....89
จิราภรณ์ นิคมทัศนนิศากร สุวรรณ และ จริญญา มากน้อย
- การพัฒนาระบบสารสนเทศเพื่อการจัดการงานพัสดุตามแนวคิดแบบลิ้น
กรณศึกษา องค์การบริหารส่วนจังหวัดบุรีรัมย์.....109
จุฑาทิพย์ โล่เจริญรัตน์ วิไลรัตน์ ยาทองไชย และ ณปภัช วรรณตรง