

บทความวิจัย

- ◆ ผลของปริมาณแป้งกล้วยหอมเขียวทดแทนแป้งสาลีที่มีต่อคุณลักษณะของขนมปัง
วิจิตรา เหลียวตระกูล วชิรญา เหลียวตระกูล วรภา วงศ์แสงธรรม รัตนา หงส์บุญเรือง และ สรวิศ สิงห์ท้วม
- ◆ การใช้สารชีวเมกเทนทีในผลิตภัณฑ์ลบลอร์รูกวน
กรรณิการ์ อ่อนสำลี
- ◆ การประเมินคุณภาพทางด้านฉลาก ด้านกายภาพ ค่าความเป็นกรด-ด่าง และทางจุลชีววิทยาของน้ำดื่มบรรจุขวดที่จำหน่าย
ในเขตเทศบาลนครอุบลราชธานี ประเทศไทย
สุบัณฑิต นิมรัตน์ ศิริพร จิรารัตนกุลชัย และ วีรพงศ์ วุฒิพันธุ์ชัย
- ◆ Properties of Polypropylene Conductive Fiber from Sheath-Core Bicomponent Fiber
Natee Srisawat and Piyanut Jingjit
- ◆ แบบจำลองพื้นผิวดอกบองและการหาสูตรอาหารที่เหมาะสมสำหรับการเพิ่มการผลิตกรดแกมมา-ไลโนเลนิกในมอส
Physcomitrella patens โดยใช้วิธีพื้นผิวดอกบอง
พิชิต โชตก
- ◆ การต้านรังสียูวีและการยับยั้งแบคทีเรียของด้ายที่เคลือบด้วยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ด้วยเครื่องกรอด้วย
วรวิทย์ ศรีวิทยากุล มาหามะสุโฮมิ มะแซ พงศ์พัฒน์ ศิริธรรม วงศกร อ่อนเกตุพล และ พีรวัส คงสง
- ◆ สมบัติการดูดซับน้ำมันทอดอาหารของอนุพลาเวนาจากเส้นใยเซลลูโลสฟางข้าว
จิตต์โสภา เฉลียวศักดิ์
- ◆ การดูดซับสารละลายโครเมียม (III) ด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์อะพาไทต์
ชญญะ พรหมศร อภิสิฏฐ์ ศงสะเสน และ บุญธนา วรรณเลิศ
- ◆ ฤทธิ์ต้านแบคทีเรียของผ้าย้อมคราม
แก้วกัลยา โสติดิสวัสดิ์
- ◆ การพัฒนาผลิตภัณฑ์อัดเม็ดจากข้าวหักไรซ์เบอร์รี่
น้ำฝน สามสาลี และ เสกสรร มังคลานันท์
- ◆ ลักษณะวัสดุผสมซีเมนต์เพสต์กับเส้นใยผลตาลโตนดใส่ท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวชนิดเส้นผ่านการปรับปรุงผิว
ภายนอกด้วยกระบวนการชุบผิวโดยไม่ใช้ไฟฟ้า
สุชาติ จันทรมณีย์ นันทชัย ชูศิลป์ ชาตรี หอมเขียว และ ดนุพล ตันนโยภาส
- ◆ การพัฒนาไอศกรีมนมเสริมอกไก่
สุธิดา กิจจาวรเสถียร วรธร ป้อมเย็น และ วรลักษณ์ ป้อมน้อย
- ◆ การพัฒนาผลิตภัณฑ์ผัดไทยกรอบชนิดแห้ง
จินตนา เชื้อนพรัตน์ วรยศ เจริญยิ่ง ดวงกมล แสงธีรกิจ ปาริสุทธิ์ เฉลิมชัยวัฒน์ และ พรพาวดา จันทโร
- ◆ การดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูบนถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกากน้ำตาลโดยวิธีการกระตุ้นด้วยสารเคมีและไมโครเวฟ
อดิศักดิ์ จตุรพิริย์ ตฤณ ปฐมนิธิกุลโย เอกราชันย์ ไชยชนะ และ ธัญญา เสาวภาคย์
- ◆ การพัฒนาและประเมินผลเครื่องอบแห้งแบบบีบความร้อนขนาดเล็กสำหรับกล้วยน้ำว้าสด
ไพโรจน์ จันทรแก้ว
- ◆ Real-time Travel Time Prediction Algorithm Using Spatiotemporal Speed Interval Patterns Matching
Krit Jedwanna and Weerathep Chanintornthep

วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร

RMUTP RESEARCH JOURNAL

ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์สทรรัตน์ วงษ์ศรีษะ

รักษาราชการแทนอธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

รองศาสตราจารย์ ดร.นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ และพัฒนาคณาจารย์

บรรณาธิการ

ดร.ประกอบ ชาติกุฎต์

กองบรรณาธิการ จากหน่วยงานภายนอก

ศาสตราจารย์ ดร.ทงเกียรติ	เกียรติศิริโรจน์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ศาสตราจารย์ ดร.สัมพันธ์	ฤทธิเดช	เลขาธิการคณะกรรมการการอุดมศึกษา (กกอ.)
ศาสตราจารย์ ดร.สมชาย	วงศ์วิเศษ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.สุชัยวีร์	สุวรรณสวัสดิ์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ศาสตราจารย์ ดร.อรรถกร	เก่งพล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ศาสตราจารย์ ดร.สันติ	แมนศิริ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ศาสตราจารย์ ดร.ทรงศักดิ์	เพ็ชรมิตร	มหาวิทยาลัยมหิดล
รองศาสตราจารย์ ดร.สายประสิทธิ์	เกิดนิยม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร.ทวีชัย	อมรศักดิ์ชัย	มหาวิทยาลัยมหิดล
รองศาสตราจารย์ ดร.รัตติกร	ยี่มนิรัฐ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รองศาสตราจารย์ ดร.ธงชัย	พองสมุทร	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

กองบรรณาธิการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รุ่งอรุณ พรเจริญ	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรลักษณ์ ปัญญาธิพิงศ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กัลทิมา เข้าวชาญชัยกุล	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ว่าที่เรือตรี ดร.ทรงวุฒิ มงคลเลิศมณี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัตนพล มงคลรัตนาสีห์	ดร.ชลากร อุดมรักษาสกุล
ดร.สิงห์แก้ว ปือกเห็ง	ดร.วราพร ทองจีน
นางสาวเจนจิรา บ.ป.สูงเนิน	นางสาวพัชรนันท์ ยั่งรวริเชียร
นายปิยวัฒน์ เจริญทรัพย์	

รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิผู้ประเมินบทความ (Peer Review)
ประจำปี 15 ฉบับที่ 1 เดือนมกราคม – มิถุนายน 2564

รองศาสตราจารย์ ดร.เฉลิม เรืองวิริยะชัย	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.ณัฐกาญจน์ หงส์ศรีพันธ์	มหาวิทยาลัยศิลปากร
รองศาสตราจารย์ ดร.ปรียานุช บวรเรืองโรจน์	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รองศาสตราจารย์ ดร.เพ็ญวิสาข์ พิสิษฐศักดิ์	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.วรพจน์ สุนทรสุข	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.วราภรณ์ บุญทรัพย์ทิพย์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.สกุล ท่อโนทยาน	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร.สุธา ขาวเอียร	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รองศาสตราจารย์ ดร.เสาวณีย์ เลิศวรสิริกุล	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.อรุณี คงดี อัลเดรด	มหาวิทยาลัยแม่โจ้
รองศาสตราจารย์ ดร.โกวิทป์ ปิยะมั่งคลา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์วรนุช ศรีเจษฎารักษ์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กาญจนา มัทธอนทวี	มหาวิทยาลัยสยาม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติ สถาพรประสาธน์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักรพันธ์ อารัมพงษ์พันธ์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จันทร์ทิพย์ เศรษฐยานนท์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิตศิริ ราชตะนะพันธุ์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทองใส จันทนาการ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนิต สวัสดิ์เสวี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิรมล ปัญญาบุญกุล	มหาวิทยาลัยบูรพา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุศราภา ลีละวัฒน์	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิยรัตน์ ศิริวงศ์ไพศาล	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พินิตา กังขุ่น	มหาวิทยาลัยทักษิณ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรทิพย์ ฐูปถมพงศ์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรรณสวัสดิ์ รัฐพิทักษ์สันติ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สโรช บุญศิริพันธ์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิริวรรณ แก้วสุวรรณ	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุจินดา ศรีวัฒน์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุพรรณิการ์ สมใจเพ็ง	มหาวิทยาลัยบูรพา

รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิผู้ประเมินบทความ (Peer Review)
ประจำปี 15 ฉบับที่ 1 เดือนมกราคม – มิถุนายน 2564

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิพงษ์ พุฒคำ

มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อารยา เชาวเรืองฤทธิ์

มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุษา แสงวัฒนาโรจน์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุษารัตน์ รัตนคำนวน

มหาวิทยาลัยแม่โจ้

ดร.กอบัว ไชยศิวมงคล

มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง

ดร.นครินทร์ สัทธรรมนวงศ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ดร.สิริมา ชินสาร

มหาวิทยาลัยบูรพา

สารบัญ

วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร

ปีที่ 15 ฉบับที่ 1 มกราคม – มิถุนายน 2564 ISSN 2651-1096 (Online)

หน้า

บทความวิจัย:

ผลของปริมาณแป้งกล้วยหอมเขียวทดแทนแป้งสาลีที่มีต่อคุณลักษณะของขนมปัง วิจิตรา เหลียวตระกูล วชิรญา เหลียวตระกูล วรภา วงศ์แสงธรรม รัตนา หงส์บุญเรือง และ สรวิต สิงห์ท้วม	1
การใช้สารชีวเมกเทนทีในผลิตภัณฑ์มัลเบอร์รี่กวน กรรณิการ์ อ่อนสำลี	14
การประเมินคุณภาพทางด้านฉลาก ด้านกายภาพ ค่าความเป็นกรด-ด่าง และทางจุลชีววิทยาของ น้ำดื่มบรรจุขวดที่จำหน่ายในเขตเทศบาลนครอุบลราชธานี ประเทศไทย สุภัณฑิ์ นิมรัตน์ ศิริพร จิรารัตนกุลชัย และ วีรพงศ์ วุฒิพันธุ์ชัย	26
Properties of Polypropylene Conductive Fiber from Sheath-Core Bicomponent Fiber Natee Srisawat and Piyanut Jingit	39
แบบจำลองพื้นผิวตอบสนองและการหาสูตรอาหารที่เหมาะสมสำหรับการเพิ่มการผลิตกรดมา- ไลโนเลนิกในมอส <i>Physcomitrella patens</i> โดยใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง พิชิต โชตก	51
การต้านรังสียูวีและการยับยั้งแบคทีเรียของด้ายที่เคลือบด้วยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ด้วยเครื่องกรอด้วย วรวิทย์ ศรีวิทยากุล มาหามะสุโฮมิ มะแซ พงศ์พัฒน์ ศิริธรรม วงศกร อ่อนเกตุพล และ พีรวัส คงสง สมบัติการดูดซับน้ำมันทอดอาหารของนอนวูฟเวนจากเส้นใยเซลลูโลสฟางข้าว จิตต์โสภา เฉลียวศักดิ์	66
การดูดซับสารละลายโครเมียม (III) ด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์อะพาไทต์ ธัญญา พรหมศร อภิสิษฐ์ ศงสะเสน และ บุญธนา วรณเลิศ	77
ฤทธิ์ต้านแบคทีเรียของผ้าย้อมคราม แก้วกัลยา โสติธวัศ	91
การพัฒนาผลิตภัณฑ์อัดเม็ดจากข้าวหักไรซ์เบอร์รี่ น้ำฝน สามสาลี และ เสกสรร มังคลานันท์	105
	116

สารบัญ

วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร

ปีที่ 15 ฉบับที่ 1 มกราคม – มิถุนายน 2564 ISSN 2651-1096 (Online)

	หน้า
ลักษณะวัสดุผสมซีเมนต์เพสต์กับเส้นใยผลตาลโตนดใส่ท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวชนิดสั้น ผ่านการปรับปรุงผิวภายนอกด้วยกระบวนการชุบผิวโดยไม่ใช้ไฟฟ้า สุชาติ จันทรมณีย์ นันทชัย ชูศิลป์ ชาตรี หอมเขียว และ ดนุพล ตันนโยภาส	129
การพัฒนาไอศกรีมนมเสริมอกไก่ สุธิดา กิจจารุเสถียร วรธร ป้อมเย็น และ วรลักษณ์ ป้อมน้อย	145
การพัฒนาผลิตภัณฑ์ผัดไทยกรอบชนิดแห้ง จินตนา เชื้อนพรัตน์ วรายศ เจริญยิ่ง ดวงกมล แสงธีรกิจ ปาริสุทธิ์ เณลิษชัยวัฒน์ และ พรราวตา จันทโร	156
การดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูบนถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกากน้ำตาลโดยวิธีการกระตุ้นด้วยสารเคมี และไม่โครเวฟ อดิศักดิ์ จตุรพิริย์ ตฤณ ปฐมนิธิภิญโญ เอกราชนย์ ไซยชนะ และ ธนัญญา เสาวภาคย์	167
การพัฒนาและประเมินผลเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนขนาดเล็กสำหรับกล้วยน้ำว้าสไลด์ ไฟโรจน์ จันทร์แก้ว	179
Real-time Travel Time Prediction Algorithm Using Spatiotemporal Speed Interval Patterns Matching Krit Jedwanna and Weerathep Chanintornthep	193

<http://journal.rmutp.ac.th/>

ผลของปริมาณแป้งกล้วยหอมเขียวทดแทนแป้งสาลีที่มีต่อคุณลักษณะของขนมปัง

วิจิตรา เหลียวตระกูล* วชิรญา เหลียวตระกูล วรภา วงศ์แสงธรรม รัตนา หงษ์บุญเรือง และ สรวิศ สิงห์ท้วม

คณะเทคโนโลยีการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
60 หมู่ที่ 3 ตำบลหันตรา อำเภอพระนครศรีอยุธยา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา 13000

รับบทความ 27 กรกฎาคม 2563 แก้ไขบทความ 16 ตุลาคม 2563 ตอรับบทความ 17 ธันวาคม 2563

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการใช้แป้งกล้วยหอมเขียวทดแทนแป้งสาลีต่อปริมาณจำเพาะ ความหนาแน่น ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ และการยอมรับทางประสาทสัมผัสของขนมปังจากแป้งกล้วยหอมเขียวทดแทนแป้งสาลี โดยใช้แป้งกล้วยหอมเขียวทดแทนแป้งสาลีร้อยละ 0 (ชุดควบคุม), 10, 20 และ 30 ของน้ำหนักแป้งทั้งหมด พบว่าเมื่อใช้ปริมาณแป้งกล้วยหอมเขียวเพิ่มขึ้น ทำให้ลักษณะปรากฏของขนมปังมีสีคล้ำลง ปริมาตรจำเพาะของขนมปังลดลงจาก 4.22 เป็น 2.69 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ในขณะที่ความหนาแน่นของขนมปังเพิ่มขึ้นจาก 0.24 เป็น 0.37 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดและกิจกรรมการออกฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับขนมปังชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) และพบว่า ผู้บริโภคให้คะแนนความชอบในด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่นรส รสชาติ ลักษณะเนื้อสัมผัส และการยอมรับโดยรวมของขนมปังที่ใช้ปริมาณแป้งกล้วยหอมเขียวร้อยละ 10 ถึงร้อยละ 30 ทดแทนแป้งสาลีไม่แตกต่างกันกับขนมปังชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) ดังนั้นขนมปังที่ใช้ปริมาณแป้งกล้วยหอมเขียวร้อยละ 30 ทำให้ขนมปังมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดและกิจกรรมการออกฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระสูงที่สุด และเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค

คำสำคัญ : แป้งกล้วยหอมเขียว; ขนมปัง; ปริมาตรจำเพาะ; กิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระ; การยอมรับทางประสาทสัมผัส

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +669 2765 4788, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: L_wijitra@hotmail.com

<http://journal.rmutp.ac.th/>

Effect of Cavendish Banana Flour Content as Replacement for Wheat Flour on Bread Quality

Wijitra Liaotrakoon* Vachiraya Liaotrakoon Wanpa Wongsangtham
Rattana Hongboonrueng and Soravit Singhtoum

Faculty of Agricultural Technology and Agro Industry, Rajamangala University of Technology
Suvarnabhumi

60 Moo. 3, Huntra, Phra Nakhon Si Ayutthaya, Phra Nakhon Si Ayutthaya 13000

Received 27 July 2020; Revised 16 October 2020; Accepted 17 December 2020

Abstract

The objective of this research was to study the effect of substitution of wheat flour with Cavendish banana flour on specific volume, density, antioxidant activity, and the sensory acceptance of bread using Cavendish banana flour instead of wheat flour as 0% (control), 10%, 20% and 30% of the total flour weight. It was found that an increasing amount of Cavendish banana flour caused the darker of the bread appearance, and the specific volume of the bread decreased from 4.22 to 2.69 cm³/g, while the bread density increased from 0.24 to 0.37 g/cm³. The total phenolic content and antioxidant activity of the bread made of Cavendish banana flour instead of wheat flour were significantly greater than the control bread ($p \leq 0.05$). Also, the sensory acceptance scores by panelists in terms of appearance, color, aroma, taste, texture, and overall acceptance of bread using 10-30% of Cavendish banana flour content were not significantly different compared to the control bread ($p > 0.05$). Therefore, the bread using 30% Cavendish banana flour gave the highest amount of total phenolic compounds and antioxidant activity with well accepted by consumers.

Keywords : Cavendish Banana Flour; Bread; Specific Volume; Antioxidant Activity; Sensory Acceptance

* Corresponding Author. Tel.: +669 2765 4788, E-mail Address: L_wijitra@hotmail.com

1. บทนำ

กล้วยสามารถปลูกได้ในทุกภาคของประเทศไทย ทั้งกล้วยเศรษฐกิจและกล้วยพันธุ์พื้นเมือง กล้วยเป็นพืชอาหารที่อุดมด้วยสารอาหารประกอบด้วยน้ำตาลซูโครส ฟรุคโตส และกลูโคส เส้นใยอาหาร วิตามินบี 6 แมกนีเซียม โพแทสเซียม โปรตีนกรดอะมิโนอาร์จินีน (Arginine) และกรดอะมิโนฮิสทีดีน (Histidine) เป็นต้น การสุกของกล้วยแต่ละระยะทำให้องค์ประกอบทางเคมีของกล้วยแตกต่างกัน ส่งผลต่อประโยชน์ต่อร่างกายที่แตกต่างกัน โดยผลดิบของกล้วยให้รสฝาด ช่วยรักษาอาการท้องเสียเรื้อรัง และรักษาแผลในกระเพาะอาหารได้ ส่วนผลสุกของกล้วยให้รสหวาน และช่วยระบบขับถ่ายได้ [1]

กล้วยหอมที่ปลูกในประเทศไทยมีหลากหลายสายพันธุ์ เช่น กล้วยหอมทอง กล้วยหอมจันทร์ และกล้วยหอมเขียว เป็นต้น ซึ่งกล้วยหอมเขียวหรือกล้วยหอมเขียวคาเวนดิช (*Musa acuminata*, Subgroup *Cavendish*) เป็นพืชทางเศรษฐกิจที่มีการบริโภคภายในประเทศและส่งออกต่างประเทศในปริมาณมาก กล้วยหอมเขียวมีลักษณะเนื้อนุ่มฟู มีผลขนาดใหญ่ให้น้ำหนักมาก และเปลือกทนต่อการขนส่ง จึงเหมาะสมสำหรับเป็นกล้วยส่งออกที่สามารถบริโภคสดหรือนำไปแปรรูป กล้วยหอมเขียวมีปริมาณแป้งและน้ำตาลน้อย แต่มีใยอาหาร (ร้อยละ 6.0–15.5) สารแทนนิน (Tannin) วิตามิน แคโรทีนอยด์ (Carotenoid) และสารต้านอนุมูลอิสระสูง ทั้งยังอุดมไปด้วยแป้งทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ (Resistant Starch) (ประมาณร้อยละ 40.9–58.5) กรดอะมิโนที่จำเป็น กรดไขมันไม่อิ่มตัว และโพแทสเซียม [2]–[4]

ปัจจุบันนิยมนำกล้วยมาแปรรูปเป็นแป้งกล้วยที่เป็นอาหารเพื่อสุขภาพ โดยแป้งกล้วยเหมาะสมสำหรับผู้บริโภคที่ต้องการหลีกเลี่ยงอาหารจากแป้งสาลี หรือมีอาการแพ้โปรตีนในแป้งสาลี และเพื่อประโยชน์ทางโภชนาการ ผลิตภัณฑ์บางประเภทสามารถใช้แป้งกล้วย

ทดแทนแป้งสาลีได้ทั้งหมด (ร้อยละ 100) จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์อาหารที่ไม่มีกลูเตน (Gluten-Free Products) แป้งกล้วยสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอาหารหลากหลายชนิด เช่น ขนมอบ ขนมไทย และเครื่องดื่ม เป็นต้น [5]

ขนมปังเป็นขนมอบประเภทหนึ่งที่มีการบริโภคอย่างกว้างขวางทั่วโลก เมื่อนำแป้งกล้วยมาทดแทนแป้งสาลีในผลิตภัณฑ์ขนมปัง ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เพื่อสุขภาพ เป็นการพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่ตอบสนองความต้องการและมีคุณภาพเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภคโดยเฉพาะผู้บริโภคที่รักษาสุขภาพ [6]–[8] นอกจากนี้ยังมีรายงานการนำวัตถุดิบทางการเกษตรที่มีคุณค่าทางโภชนาการมาทดแทนแป้งสาลีในผลิตภัณฑ์ขนมปัง อาทิเช่น ขนมปังเสริมเนื้อตาลสุก [9], [10] ขนมปังแซนด์วิชจากกากั่วเหลืองทดแทนแป้งสาลี [11] ขนมปังจากรำข้าวไรซ์เบอร์รี่ทดแทนแป้งสาลี [12], [13] และขนมปังจากแป้งมันเทศสีม่วงทดแทนแป้งสาลี [14] นอกจากนี้มีการนำแป้งกล้วยน้ำว้าทดแทนแป้งสาลีในผลิตภัณฑ์บราวนี่ [15] และแป้งกล้วยไข่ทดแทนแป้งข้าวเจ้าในผลิตภัณฑ์ขนมทองม้วน [16] ถือเป็นการนำวัตถุดิบทางการเกษตรที่มีศักยภาพในประเทศมาใช้ในการเกิดประโยชน์ รวมทั้งเป็นการสร้างมูลค่าเพิ่มจากสถานะผลผลิตล้นตลาด และผลผลิตตกเกรดจากการจำหน่าย ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาศักยภาพของแป้งกล้วยหอมเขียวคาเวนดิชในการใช้ประโยชน์ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ขนมปังทดแทนแป้งสาลีในการพัฒนาเป็นอาหารเพื่อสุขภาพ สามารถสร้างมูลค่าเพิ่มและได้ผลิตภัณฑ์ขนมปังที่มีประโยชน์ต่อร่างกายมากขึ้น อาจนำไปสู่การพัฒนาต่อยอดเพื่อจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ได้

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 การเตรียมแป้งกล้วยหอมเขียว

กล้วยหอมเขียวคาเวนดิชจากสวนในพื้นที่อำเภอท่าช้าง จังหวัดสิงห์บุรี นำมาเตรียมเป็นแป้งกล้วยหอม

เขียว ดังนี้ นำกล้วยหอมเขียวระยะห่าม ซึ่งเป็นระยะการสุกของกล้วยระยะที่ 3 มาปอกเปลือก นำกล้วยหอมเขียวมาแช่ในสารละลายเกลือความเข้มข้นร้อยละ 0.05 นาน 15 นาที สไลด์ให้เป็นแว่นบาง ๆ หนาประมาณ 0.2 เซนติเมตร นำมาอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง หลังจากการอบแห้ง นำกล้วยหอมเขียวที่อบแห้งแล้วมาบดให้ละเอียดด้วยเครื่องบดละเอียดด้วยตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร (MF10 Model, MF 2.0 Sieve, IKA) แล้วร่อนแป้งโดยใช้ตะแกรง (Retsch, Germany) ขนาด 250 ไมครอน แป้งกล้วยหอมเขียวที่ได้มีปริมาณความชื้นร้อยละ 4.50 ± 0.31 จากนั้นทำการเก็บแป้งกล้วยหอมเขียวในถุงพลาสติกบรรจูปิดสนิท และเก็บที่อุณหภูมิห้อง วิเคราะห์ค่าสี L^* , a^* และ b^* ของแป้งกล้วยหอมเขียว

โดยเครื่องวัดค่าสี (Color QuestXE, HunterLab, USA) ซึ่งค่า L^* แสดงค่าความสว่าง (Lightness) จากสีขาวจนไปถึงสีดำ ส่วน a^* มีค่าสีแดงจนถึงสีเขียว ส่วน b^* มีค่าสีเหลืองจนถึงสีน้ำเงิน

2.2 การศึกษาปริมาณแป้งกล้วยหอมเขียวทดแทนแป้งสาลีในผลิตภัณฑ์ขนมปัง

การใช้แป้งกล้วยหอมเขียวมาทดแทนแป้งสาลีในผลิตภัณฑ์ขนมปังในปริมาณที่แตกต่างกัน 4 ระดับ ได้แก่ แป้งกล้วยหอมเขียวร้อยละ 0 (ชุดควบคุม), 10, 20 และ 30 ซึ่งมีส่วนผสมแสดงดังตารางที่ 1 ส่วนกระบวนการผลิตขนมปังเป็นดังรูปที่ 1 เมื่อได้ขนมปังแล้ว พักไว้ให้เย็นและนำมาบรรจุในถุงพลาสติกปิดสนิท

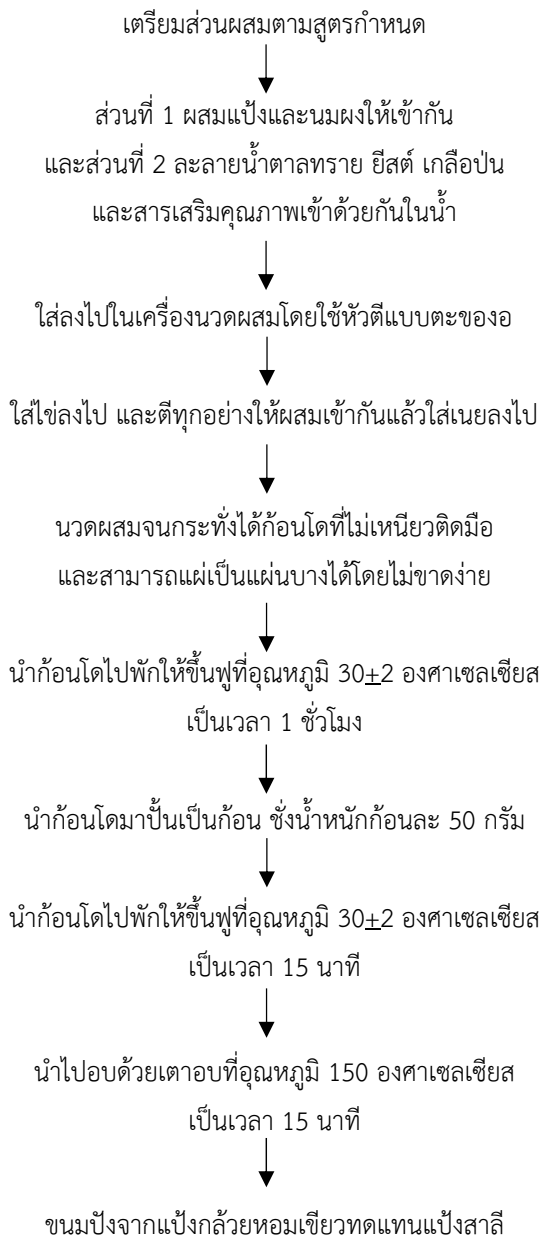
ตารางที่ 1 ส่วนผสมในการผลิตขนมปังจากแป้งกล้วยหอมเขียวทดแทนแป้งสาลี

ส่วนผสม (กรัม)	ปริมาณแป้งกล้วยหอมเขียว (ร้อยละ)			
	0	10	20	30
แป้งกล้วยหอมเขียว	0	50	100	150
แป้งสาลีสำหรับทำขนมปังชนิดโปรตีนสูง	500	450	400	350
น้ำตาลทราย	90	90	90	90
นมผง	20	20	20	20
ยีสต์	10	10	10	10
สารเสริมคุณภาพ (สารอิมัลซิไฟเออร์)	5	5	5	5
เกลือป่น	2	2	2	2
น้ำ	225	225	225	225
ไข่ไก่	140	140	140	140
เนยสดชนิดจืด	100	100	100	100

2.3 การวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารและความหนาแน่น

ทำการวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารและความหนาแน่นของตัวอย่างขนมปัง [17] ทำการหาปริมาณของขนมปังโดยการทดแทนปริมาตรเมล็ดงา ชั่งน้ำหนักขนมปังและนำขนมปังใส่ลงในภาชนะที่ทราบปริมาตร

เติมเมล็ดงาให้เต็มภาชนะ และวัดปริมาตรเมล็ดงาที่เต็มลงไปทั้งหมดด้วยกระบอกตวง คำนวณหาปริมาตรจำเพาะ (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม, cm^3/g) และความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร, g/cm^3) ของขนมปัง ทำการวิเคราะห์ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ



รูปที่ 1 กระบวนการผลิตขนมปัง
จากแป้งกล้วยหอมเขียวทดแทนแป้งสาลี

2.4 การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิก และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ

2.4.1 การสกัดตัวอย่าง

ทำการสกัดตัวอย่างขนมปังจากแป้งกล้วยหอมเขียวด้วยอะซิโตนความเข้มข้นร้อยละ 80 ในอัตราส่วน

1:4 ปั่นผสมให้เข้ากันเป็นเวลา 10 นาที ด้วยเครื่องกวนผสมแล้วนำมากรองสุญญากาศ โดยใช้กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1 (ดัดแปลงจาก [18], [19]) นำสารที่สกัดได้เก็บที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส เพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไป

2.4.2 การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด

การวิเคราะห์หาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดโดยวิธี Folin-Ciocalteu's Colorimetric Assay [20] โดยผสมสารสกัดจากตัวอย่างปริมาตร 0.3 มิลลิลิตร กับสาร Folin-Ciocalteu's Phenol Reagent ปริมาตร 1.5 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น 1.2 มิลลิลิตร เขย่าให้สารผสมกัน จากนั้นตั้งทิ้งไว้ในที่มืดนาน 30 นาที ที่อุณหภูมิห้อง วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 765 นาโนเมตร วิเคราะห์สารประกอบฟีนอลิกโดยนำค่าการดูดกลืนแสงของสารสกัดตัวอย่างมาเทียบกับกราฟมาตรฐานของกรดแกลลิก (Gallic Acid) ซึ่งค่าของตัวอย่างที่ได้จะแสดงเป็นมิลลิกรัมสมมูลกรดแกลลิกต่อตัวอย่าง 100 กรัม (mg GAE/ 100 g)

2.4.3 การวิเคราะห์กิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระ

การวิเคราะห์กิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระ โดยวิเคราะห์ความสามารถในการจับสารอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH Radical Scavenging Capacity Assay (ดัดแปลงจาก [18]) ดังนี้ สารสกัดตัวอย่าง 1 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น 2,2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) ความเข้มข้น 0.6 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 4 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน เก็บไว้ในที่มืดเป็นเวลา 30 นาที วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 515 นาโนเมตร วิเคราะห์ประสิทธิภาพของการต้านอนุมูลอิสระโดยนำค่าการดูดกลืนแสงของสารสกัดตัวอย่างมาเทียบกับกราฟมาตรฐานของกรดแกลลิก ซึ่งค่าของตัวอย่างที่ได้จะแสดงเป็น mg GAE/ 100 g

2.5 การทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัส

ทำการทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัสด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่นรส รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมของขนมปัง ด้วยวิธีการให้คะแนนความชอบ 9 ระดับ (9-Points Hedonic Scale) โดยมีค่าคะแนน ดังนี้ 1 = ไม่ชอบมากที่สุด 2 = ไม่ชอบมาก 3 = ไม่ชอบปานกลาง 4 = ไม่ชอบเล็กน้อย 5 = เฉย ๆ 6 = ชอบเล็กน้อย 7 = ชอบปานกลาง 8 = ชอบมาก และ 9 = ชอบมากที่สุด ใช้ผู้ทดสอบชิมจำนวน 30 คน

2.6 การวิเคราะห์ทางสถิติ

การศึกษาปริมาตรจำเพาะ ความหนาแน่น และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระของขนมปังมีการวางแผนการทดลองสุ่มแบบสมบูรณ์ (Complete Randomized Design, CRD) ทำการทดลอง 3 ซ้ำ ส่วนการวิเคราะห์ผลการศึกษากการทดสอบการยอมรับทางประสาทสัมผัสของขนมปังมีการวางแผนการทดลองสุ่มแบบบล็อกสมบูรณ์ (Randomized Complete Block Design, RCBD) วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติโดยรายงานเป็นค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และเปรียบเทียบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's New Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 ลักษณะปรากฏ ปริมาตรจำเพาะ และความหนาแน่นของขนมปังจากแป้งกล้วยหอมเขียวทดแทนแป้งสาลี

จากการศึกษาการใช้แป้งกล้วยหอมเขียวมาทดแทนแป้งสาลีในผลิตภัณฑ์ขนมปังในปริมาณที่แตกต่างกัน ได้แก่ ร้อยละ 0 (ชุดควบคุม), 10, 20 และ 30 พบว่า เมื่อปริมาณแป้งกล้วยหอมเขียวเพิ่มขึ้น ทำให้

ขนมปังมีสีคล้ำลง ดังแสดงรูปที่ 2 เนื่องจากแป้งกล้วยหอมเขียวมีสีขาวเหลืองโดยมีค่าสี L^* (ค่าความสว่าง) 83.71 ± 0.48 ค่าสี a^* (สีแดงและสีเขียว) 2.99 ± 0.34 และค่าสี b^* (สีเหลืองและสีน้ำเงิน) 14.54 ± 0.52 เมื่อนำไปเป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์อาหาร จะทำให้สีผลิตภัณฑ์เหลืองคล้ำลง สีของแป้งกล้วยมาจากรงควัตถุในกล้วยแต่ละสายพันธุ์ รวมทั้งการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลที่อาจเกิดขึ้นได้ในขั้นตอนการเตรียมกล้วยและการทำแห้ง [21] ทำให้แป้งกล้วยมีแนวโน้มสีไปทางสีแดง-เหลือง [22] จากรายงานของ A. A. Khoozani และคณะ [7] ที่มีการใช้แป้งกล้วยหอมเขียวทั้งเปลือกในการผลิตขนมปัง ทำให้ขนมปังมีดัชนีการเกิดสีน้ำตาลสูงขึ้น แต่มีคุณค่าทางโภชนาการ ปริมาณแป้งทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ และแร่ธาตุเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ส่วนผลปริมาตรจำเพาะและความหนาแน่นของขนมปังจากแป้งกล้วยหอมเขียวทดแทนแป้งสาลีแสดงดังตารางที่ 2 พบว่า เมื่อปริมาณแป้งกล้วยหอมเขียวเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 0 เป็นร้อยละ 30 มีผลต่อปริมาตรจำเพาะและความหนาแน่นของขนมปังอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยทำให้ปริมาตรจำเพาะของขนมปังลดลงจาก 4.22 เป็น 2.69 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ในขณะที่ความหนาแน่นของขนมปังเพิ่มขึ้นจาก 0.24 เป็น 0.37 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เช่นเดียวกับรายงานของ A. A. B. Gomes และคณะ [6] พบว่าขนมปังจากแป้งกล้วยร้อยละ 10-20 ทำให้ปริมาตรจำเพาะของขนมปังลดลง และสีคล้ำลง ในขณะที่ C. Y. L. Loong และ C. Y. H. Wong [23] พบว่าปริมาตรจำเพาะของขนมปังชุดควบคุมและสูตรที่มีการเติมแป้งกล้วยร้อยละ 15 ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) และจากรายงานของ W. Wanuwat และคณะ [14] พบว่าขนมปังที่ใช้แป้งมันเทศสีม่วงร้อยละ 10-30 ทดแทนแป้งสาลี มีปริมาตรจำเพาะน้อยกว่าขนมปังชุดควบคุม ส่งผลให้ขนมปังมีความหนาแน่นเนื้อและค่าความยืดหยุ่นลดลง เช่นเดียวกับการใช้รำข้าวไรซ์เบอร์รีทดแทนแป้งสาลีในปริมาณร้อยละ 20-80 ของน้ำหนักแป้ง ทำให้ขนมปังมีปริมาตรจำเพาะลดลง [12]



รูปที่ 2 ขนมปังจากแป้งกล้วยหอมเขียวทดแทนแป้งสาลีในปริมาณแตกต่างกันโดย ก) ร้อยละ 0 (ชุดควบคุม) ข) ร้อยละ 10 ค) ร้อยละ 20 ง) ร้อยละ 30 (บน) ขนมปังทั้งชิ้น และ (ล่าง) ขนมปังตัดขวาง

ตารางที่ 2 ผลปริมาตรจำเพาะและความหนาแน่นของขนมปังจากแป้งกล้วยหอมเขียวทดแทนแป้งสาลี

แป้งกล้วย หอมเขียว (ร้อยละ)	ปริมาตรจำเพาะ (cm ³ /g)	ความหนาแน่น (g/cm ³)
0 (ชุดควบคุม)	4.22±0.16 ^a	0.24±0.01 ^d
10	3.05±0.13 ^b	0.30±0.01 ^c
20	2.94±0.05 ^c	0.33±0.02 ^b
30	2.69±0.12 ^d	0.37±0.02 ^a

หมายเหตุ: อักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันตามแนวตั้ง หมายถึงค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ 3 ผลปริมาณสารประกอบฟีนอลิกและฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระของขนมปังจากแป้งกล้วยหอมเขียวทดแทนแป้งสาลี

แป้งกล้วย หอมเขียว (ร้อยละ)	สารประกอบ ฟีนอลิกทั้งหมด (mg GAE/ 100 g)	ฤทธิ์การต้านอนุมูล อิสระ DPPH (mg GAE/ 100 g)
0 (ชุดควบคุม)	25.64±1.22 ^d	13.54±0.55 ^b
10	28.41±1.09 ^c	20.27±0.48 ^a
20	32.47±0.98 ^b	20.85±0.72 ^a
30	35.71±1.25 ^a	21.54±0.53 ^a

หมายเหตุ: อักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันตามแนวตั้ง หมายถึงค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

3.2 กิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระของขนมปังจากแป้งกล้วยหอมเขียวทดแทนแป้งสาลี

ผลปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดและฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH ของขนมปังจากแป้งกล้วยหอมเขียวทดแทนแป้งสาลีร้อยละ 0 ถึงร้อยละ 30 แสดงดังตารางที่ 3 พบว่า เมื่อใช้แป้งกล้วยหอมเขียวทดแทนแป้งสาลี ทำให้ขนมปังมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดและกิจกรรมการออกฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระมากกว่าขนมปังที่ไม่มีแป้งกล้วยหอมเขียว (ชุดควบคุม) อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดและกิจกรรมการออกฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระเป็น 28.41-35.71 และ 20.27-21.54 มิลลิกรัมสมมูลกรดแกลลิกต่อตัวอย่าง 100 กรัม เทียบกับ 25.64 และ 13.54 มิลลิกรัมสมมูลกรดแกลลิกต่อตัวอย่าง 100 กรัม ตามลำดับ เมื่อใช้ปริมาณแป้งกล้วยหอมเขียวเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 10 เป็นร้อยละ 30 ทำให้ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของขนมปังเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) สอดคล้องกับขนมปังมีการออกฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) โดยเมื่อปริมาณแป้งกล้วยหอมเขียวในขนมปังเพิ่มขึ้น มีแนวโน้มทำให้มีฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระเพิ่มขึ้น (13.54 เป็น 21.54 มิลลิกรัมสมมูลกรดแกลลิกต่อตัวอย่าง 100

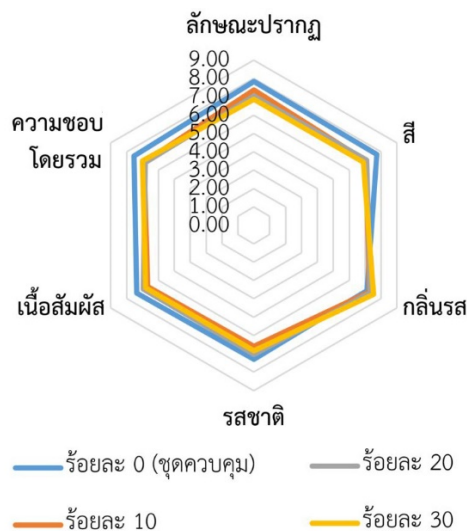
กรัม) ทั้งนี้เป็นผลมาจากแป้งกล้วยหอมมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกและมีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระ ซึ่งมากกว่าแป้งกล้วยน้ำว้า [21], [22]

3.3 การยอมรับทางประสาทสัมผัสของขนมปังจากแป้งกล้วยหอมเขียวทดแทนแป้งสาลี

จากการทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัสด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่นรส รสชาติ ลักษณะเนื้อสัมผัส และการยอมรับโดยรวม ได้ผลดังตารางที่ 4 และค่าคะแนนเฉลี่ยการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสของขนมปังจากแป้งกล้วยหอมเขียวทดแทนแป้งสาลีในปริมาณที่แตกต่างกันแสดงดังรูปที่ 3 พบว่า เมื่อใช้ปริมาณแป้งกล้วยหอมเขียวร้อยละ 10 ถึงร้อยละ 30 ทดแทนแป้งสาลีในขนมปัง ทำให้มีค่าคะแนนความชอบในด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่นรส รสชาติ ลักษณะเนื้อสัมผัส และการยอมรับโดยรวมไม่แตกต่างกันกับขนมปังชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) โดยผู้บริโภครู้สึกว่าคะแนนเฉลี่ยอยู่ในช่วงคะแนน 6.60-7.83 หมายถึงชอบเล็กน้อยถึงชอบมาก

อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาค่าคะแนนเฉลี่ยตามรูปที่ 3 พบว่าขนมปังชุดควบคุมมีคะแนนเฉลี่ยคุณลักษณะทุกด้านมากกว่าขนมปังที่ใช้แป้งกล้วยหอมเขียวทดแทนแป้งสาลี ยกเว้นด้านกลิ่นรสของขนมปังที่ใช้แป้งกล้วยหอมเขียวทดแทนแป้งสาลี ซึ่งแป้งกล้วยหอมเขียวจะมีกลิ่นเฉพาะตัว ทำให้ขนมปังมีกลิ่นรสของกล้วยหอม เมื่อใช้ปริมาณแป้งกล้วยหอมเขียวเพิ่มขึ้น ค่าคะแนนเฉลี่ยด้านกลิ่นรสมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และผู้บริโภคให้ค่าคะแนนเฉลี่ยมากกว่าชุดควบคุม ส่วนเนื้อสัมผัสของขนมปังที่ใช้แป้งกล้วยหอมเขียวทดแทนแป้งสาลีได้คะแนนเฉลี่ยน้อยกว่าชุดควบคุม เนื่องจากแป้งกล้วยหอมเขียวเป็นแป้งที่ไม่มีโปรตีนกลูเตน และมีปริมาณโปรตีนน้อย โดยทั่วไปเมื่อเพิ่มปริมาณแป้งกล้วยทดแทนแป้งสาลี ทำให้ผลิตภัณฑ์มีปริมาณโปรตีนและกลูเตนลดลง แต่มีปริมาณคาร์โบไฮเดรตมาก ความแข็งแรงของ

ผลิตภัณฑ์จึงเพิ่มขึ้น [24]-[26] นอกจากนี้แป้งกล้วยหอมเขียวยังมีปริมาณใยอาหารสูง ใยอาหารจะไปจับกับน้ำแทนแป้งโด โครงสร้างของขนมปังที่ได้จึงไม่แข็งแรง ทำให้กักเก็บก๊าซได้น้อยลง ผลิตภัณฑ์จึงไม่พองและฟู แต่จะมีความแข็งแรงมากขึ้น [27]-[29] และพบว่า แป้งกล้วยดิบอาจทำให้ความสามารถในการละลายน้ำลดลง ทำให้เมื่อนำมาใช้ในผลิตภัณฑ์อาหาร อาจทำให้มีความฝืดคอและความติดพันของผลิตภัณฑ์ได้ [30] สอดคล้องกับการศึกษาของ C. Segundo และคณะ [31] พบว่า ใยอาหารในแป้งกล้วยดิบทำให้การยึดเกาะกันระหว่างโมเลกุลในผลิตภัณฑ์และปริมาณน้ำอิสระลดลง ทำให้ผลิตภัณฑ์แข็งและแตกได้ง่ายขึ้น



รูปที่ 3 ค่าคะแนนเฉลี่ยการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสของขนมปังจากแป้งกล้วยหอมเขียวทดแทนแป้งสาลีในปริมาณที่แตกต่างกัน

จากรูปที่ 2 จะเห็นได้ว่า ขนมปังชุดควบคุมมีสีขาวสว่างกว่าตัวอย่างอื่นที่ทำการศึกษา ทำให้ได้รับการยอมรับจากผู้บริโภค โดยได้ค่าคะแนนเฉลี่ยมากที่สุด (รูปที่ 3) เช่นเดียวกับงานวิจัยของ A. H. Bakare และคณะ [32] ส่วนสีของผลิตภัณฑ์ขนมปังที่ใช้แป้งกล้วยหอมเขียวมีสีคล้ำลง แต่อย่างไรก็ตามผู้บริโภคให้การ

ยอมรับไม่แตกต่างกันกับชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) การที่ขนมปังมีสีคล้ำลง เนื่องจากเกิดจากสีน้ำตาลของแป้งกล้วยจากกระบวนการเตรียมและการอบแห้ง อาจเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard Reaction) เป็นปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล (Browning Reaction) ชนิดที่ไม่เกี่ยวข้องกับการเอนไซม์ (Non-Enzymatic Browning Reaction) และอาจเกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) โดยในแป้งกล้วยมีสารประกอบฟีนอลิก เมื่อมีการสัมผัสกับออกซิเจนใน

อากาศ สำหรับเอนไซม์พอลิฟีนอลออกซิเดส (Polyphenol Oxidase) ที่พบในกล้วยจะทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับสารประกอบโมโนฟีนอล ได้สารประกอบเมลานอยดินส์ (Melanoidins) ทำให้เกิดสีน้ำตาล [32]-[34] และพบว่า การใช้แป้งกล้วยแทนแป้งสาลีในผลิตภัณฑ์ขนมอบ ทำให้ผลิตภัณฑ์ขนมอบมีปริมาณแป้งน้อยมากขึ้น ส่งผลให้ค่าดัชนีน้ำตาลในเลือดลดลงเหมาะสมสำหรับผู้บริโภคที่ต้องการควบคุมน้ำหนัก [35]

ตารางที่ 4 คุณภาพทางประสาทสัมผัสของขนมปังจากแป้งกล้วยหอมเขียวทดแทนแป้งสาลี

ปริมาณแป้งกล้วยหอมเขียว (ร้อยละ)	คุณภาพทางประสาทสัมผัส					
	ลักษณะปรากฏ ^{ns}	สี ^{ns}	กลิ่นรส ^{ns}	รสชาติ ^{ns}	เนื้อสัมผัส ^{ns}	ความชอบโดยรวม ^{ns}
0 (ชุดควบคุม)	7.83±1.16	7.73±1.09	7.13±0.85	7.30±1.00	7.37±0.95	7.53±1.02
10	7.37±0.95	7.03±0.94	7.27±0.68	6.60±0.92	6.67±1.11	6.90±0.91
20	7.03±0.95	7.10±1.17	7.33±1.11	7.03±1.02	6.97±1.22	6.83±1.13
30	6.87±1.02	6.90±1.01	7.53±1.12	6.83±1.10	6.80±0.83	7.00±1.06

หมายเหตุ: ns หมายถึง ค่าเฉลี่ยไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$)

4. สรุป

จากการศึกษาการใช้แป้งกล้วยหอมเขียวทดแทนแป้งสาลีในผลิตภัณฑ์ขนมปังพบว่า เมื่อใช้ปริมาณแป้งกล้วยหอมเขียวเพิ่มขึ้น ทำให้ลักษณะปรากฏของขนมปังมีสีคล้ำลง ปริมาตรจำเพาะของขนมปังลดลง แต่ความหนาแน่นของขนมปังเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p\leq 0.05$) และทำให้ขนมปังที่ใช้แป้งกล้วยหอมเขียวทดแทนแป้งสาลีมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดและกิจกรรมการออกฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระมากกว่าขนมปังที่ไม่มีแป้งกล้วยหอมเขียว (ชุดควบคุม) อย่างมีนัยสำคัญ ($p\leq 0.05$) และพบว่า ผู้บริโภคให้คะแนนความชอบของขนมปังที่ใช้ปริมาณแป้งกล้วยหอมเขียวร้อยละ 0 ถึงร้อยละ 30 ทดแทนแป้งสาลีในขนมปังไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) ดังนั้นขนมปังสามารถใช้แป้งกล้วยหอมเขียวได้ถึงร้อยละ 30

ทดแทนแป้งสาลี ซึ่งเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค และมีสารต้านอนุมูลอิสระสูง

นอกจากนี้ในการศึกษาต่อไปควรมีการศึกษาถึงประโยชน์จากแป้งกล้วยหอมเขียวในด้านปริมาณแป้งทนย่อย (Resistance Starch) และปริมาณใยอาหาร (Dietary Fiber) เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์เชิงสุขภาพ ถือเป็นการนำผลผลิตทางการเกษตรอย่างกล้วยหอมเขียวมาสร้างมูลค่าเพิ่มโดยการนำมาประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์อาหาร และสามารถนำไปต่อยอดในผลิตภัณฑ์ขนมอบและขนมไทยอื่น ๆ ได้ต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณกองทุนส่งเสริมการวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ที่ให้การสนับสนุนงบประมาณในการทำวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] R. V. Da Mota, F.M. Lajolo, C. Ciacco and B. R. Cordenunsi, "Composition and functional properties of banana flour from different varieties," *Starch/Stärke*, vol. 52, pp. 63–68, 2000.
- [2] C. Sarawong, R. Schoenlechner, K. Sekiguchi, E. Berghofer and P. K. W. Ng, "Effect of extrusion cooking on the physicochemical properties, resistant starch, phenolic content and antioxidant capacities of green banana flour," *Food Chemistry*, vol. 14, pp. 33–39, Jan. 2014.
- [3] T. B. Tribess, J. P. Hernández-Urbe, M. G. C. Méndez-Montevalvo, E. W. Menezes, L. A. Bello-Pérez and C. C. Tadini, "Thermal properties and resistant starch content of green banana flour (*Musa cavendishii*) produced at different drying conditions," *LWT – Food Science and Technology*, vol. 42, pp. 1022–1025, 2009.
- [4] L. M. Rayo, L. C. Carvalho, F. A. H. Sarda, G. C. Dacanal, E. W. Menezes and C. C. Tadini. "Production of instant green banana flour (*Musa cavendishii*, var. Nanicao) by a pulsed-fluidized bed agglomeration," *LWT - Food Science and Technology*, vol. 63, no. 1, pp. 461-469, 2015.
- [5] W. Hutakoovit, J. Perapachara, D. Sukkho and W. Sutha, "Technology Transfer on Banana Flour and Food Product," *RMUTP Research Journal*, vol. 1, no. 1, pp. 107-116, May 2007.
- [6] A. A. B. Gomes, M. E. Ferreir and T. C. Pimentel, "Bread with flour obtained from green banana with its peel as partial substitute for wheat flour: Physical, chemical and microbiological characteristics and acceptance," *International Food Research Journal*, vol. 23, pp. 2214–2222, 2016.
- [7] A. A. Khoozani, B. Kebede, J. Birch and A. E. D. A. Bekhit, "The effect of bread fortification with whole green banana flour on its physicochemical, nutritional and in vitro digestibility," *Foods*, vol. 9, no. 152, 2020.
- [8] M. Seguchi, A. Tabara, K. Iseki, M. Takeuchi and C. Nakamura, "Development of gluten-free bread baked with banana (*Musa spp.*) flour," *Food Science and Technology Research*, vol. 20, pp. 613–619, 2014.
- [9] P. Chutamas and P. Woralak, "Utilization of palmyra palm (*Borassus abellifer* L.) of Phetchaburi community in bread making," *RMUTP Research Journal*, vol. 10, no. 1, pp. 168-178, Mar. 2016.
- [10] A. Rachan, "Sweet bread supplemented with ripe palm fruit pulps," *RMUTP Research Journal*, vol. 9, no. 2, pp. 99-113, Sep. 2015.
- [11] P. Yuphon and P. Wiyy, "Quality improvement of sandwich bread substituted," *The Journal of KMUTNB*, vol. 21, no. 3, Sep-Dec. 2011.

- [12] S. Sapantupong, "Development of bread with riceberry rice bran," *RMUTP Research Journal*, vol. 13, no. 2, pp. 186-195, 2019.
- [13] S. Raungrusmee, K. Jadwong and O. Wongtong. "Development of sandwich bread formulation substituted wheat flour with riceberry rice bran," *Phranakhon Rajabhat Research Journal (Science and Technology)*, vol. 13, no. 1, pp. 123-138, 2018.
- [14] W. Wanuwat, N. Kongnonkok and A. Suksomboon, "Effect of utilization of purple sweet potato flour as wheat flour replacement on the properties of bread," *Agricultural Science Journal*, vol. 44, no. 2(Suppl.), pp. 421-424, 2013.
- [15] N. Dangsungwal, N. Siri Wong and S. Riebroy. "Use of banana flour substituted for wheat flour in brownie," In *Proceedings of 49th Kasetsart University Annual Conference: Agricultural Extension and Home Economics*. Bangkok, Thailand, 2011, pp. 66-73.
- [16] P. Rittilert and N. Khotpae "Properties of flour and starch from unripe banana 'Kluai Khai' flesh and their application in Tong Muan," *Journal of Agriculture*, vol. 34, no. 3, pp. 513-524, 2018.
- [17] C. S. Hathorn, M. A. Biswas, P. N. Gichuhi and A. C. Bovell-Benjamin, "Comparison of chemical, physical, micro-structural, and microbial properties of breads supplemented with sweet potato flour and high-gluten dough enhancers," *LWT – Food Science and Technology*, vol. 41, pp. 803-815, 2008.
- [18] L. C. Wu, H. W. Hsu, Y. C. Chen, C. C. Chiu, Y. I. Lin and J. A. A. Ho, "Antioxidant and antiproliferative activities of red pitaya," *Food Chemistry*, vol. 95, pp. 319-327, 2006.
- [19] K. Mahattanatawee, J. A. Manthey, G. Luzio, S. T. Talcott, K. Goodner and E. A. Baldwin, "Total antioxidant activity and fiber content of select Florida-grown tropical fruits," *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, vol. 54, pp. 7355-7363, 2006.
- [20] Y. Y. Lim, T. T. Lim and J. J. Tee, "Antioxidant properties of several tropical fruits: A comparative study," *Food Chemistry*, vol. 103, pp. 1003-1008, 2007.
- [21] K. Sittisuanjik, and K. Sriruksa, "Comparative study on antioxidant activity, total phenolic contents and physicochemical properties of banana flours," *Agricultural Science Journal*, vol. 44, no. 2(Suppl.), pp. 213-216, 2013.
- [22] A. Pengpoo and K. Jamjang. "The production of banana flour with antioxidant from 4 types of bananas," In *Proceedings of The 3rd Kamphaeng Phet Rajabhat University National Conference*, Kamphaeng Phet Rajabhat University, Thailand, 2016, pp. 410-415.
- [23] C. Y. L. Loong and C. Y. H. Wong, "Chinese steamed bread fortified with green banana flour," *Food Research*, vol. 2, no. 4, pp. 320-330, 2018.

- [24] R. C. Hosney and D. E. Rogers, "Mechanism of sugar functionality in cookies" In *The Science of Cookies and Cracker Production*, H. Faridi, Ed. New York, 1994, pp. 203-226.
- [25] H. Chen, G. L. Rubenthaler and E. G. Schanus, "Effect of apple fibre and cellulose on the physical properties of wheat flour," *Journal of Food Science*, vol. 53, pp. 304-305, 1988.
- [26] T. G. A. S. Shayma and M. S. A. M. Alaa, "Effect of substitution percentage of banana peels flour in chemical composition, rheological characteristics of wheat flour and the viability of yeast during dough time," *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, vol. 19, no. 1, pp. 87-91, Jan. 2020.
- [27] M. D. Agrahar, P. Gulati, N. Kotwaliwale and C. Gupta, "Evaluation of nutritional, textural and particle size characteristics of dough and biscuits made from composite flours containing sprouted and malted ingredients," *Journal of Food Science and Technology*, vol. 52, no. 8, pp. 5129-5137, 2015.
- [28] K. H. Watters, "Cookies baking properties of defatted peanut, soybean and field pea flour," *Cereal Chemistry*, vol. 55, no. 6, pp. 853-863, 1978.
- [29] P. Bram, W. Edith, G. Hans, B. Kristof and A. D. Jan, "The role of gluten in a sugar-snap cookies system: A model approach based on gluten-starch blend," *Journal of Cereal Science*, vol. 48, pp. 863-869, 2008.
- [30] S. Pragati, I. Genitha and R. Kumar, "Comparative study of ripe and unripe banana flour during storage," *Journal of Food Processing & Technology*, vol. 5, no. 11, pp. 1-6, 2014.
- [31] C. Segundo, L. Roman, M. Gomez and M. M. Martinez, "Mechanically fractionated flour isolated from green bananas (*M. cavendishii* var. nanica) as a tool to increase the dietary fiber and phytochemical bioactivity of layer and sponge cakes," *Food chemistry*, vol. 219, pp. 240-248, 2017.
- [32] A. H. Bakare, O. D. Ogunbowale, M. O. Adegunwa and J. O. Olusanya, "Effects of pretreatments of banana (*Musa AAA*, Omini) on the composition, rheological properties, and baking quality of its flour and composite blends with wheat flour," *Food Science & Nutrition*, vol. 5, no. 2, pp. 182-196, 2017.
- [33] W. Tiboombun, M. Sungsrin and A. Moongngam, "Effect of replacement of unripe banana flour for rice flour on physical properties and resistant starch content of rice noodle," *International Journal of Nutrition and Food Engineering*, vol. 5, no. 9, pp. 558-561, 2011.
- [34] E. W. Menezes, C. C. Tadini, T. B. Tribess, A. Zuleta, J. Binaghi, N. Pak, G. Vera, M. C. T. Dan, A. C. Bertolini, B. R. Cordenunsi and F. M. Lajolo, "Chemical composition and

nutritional value of unripe banana flour (*Musa acuminata*, var Nanicao),” *Plants Foods for Human Nutrition*, vol. 66, no. 3, pp. 231-237, 2011.

[35] P. Raigond, R. Ezekiel and B. Raigond, “Resistant starch in food: a review,” *Journal of the Science of Food and Agriculture*, vol. 95, pp. 1968-1978, 2015.

<http://journal.rmutp.ac.th/>

การใช้สารชีวเมกเทนทีในผลิตภัณฑ์มัลเบอร์รี่กวน

กรรณิการ์ อ่อนสำลี*

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี

321 ตำบลทะเลชุบศร อำเภอเมือง จังหวัดลพบุรี 15000

รับบทความ 28 พฤษภาคม 2563 แก้ไขบทความ 19 ตุลาคม 2563 ตอบรับบทความ 17 ธันวาคม 2563

บทคัดย่อ

การยืดอายุการเก็บรักษาของมัลเบอร์รี่กวน โดยใช้สารชีวเมกเทนทีทดแทนปริมาณน้ำตาล และรักษาความชื้น ทำให้มีค่าวอเตอร์แอกทิวิตี (a_w) ของผลิตภัณฑ์ลดลง การวิจัยนี้วัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปริมาณสารชีวเมกเทนทีในผลิตภัณฑ์มัลเบอร์รี่กวน และศึกษาการเปลี่ยนแปลงของผลิตภัณฑ์มัลเบอร์รี่กวนระหว่างการเก็บรักษา ผลวิจัย พบว่า ปริมาณสารชีวเมกเทนที คือ อัตราส่วนมอลทิทอล : มอลโทเดกซ์ทริน 20 : 80 (ร้อยละ 90 ของปริมาณน้ำตาลทั้งหมด) และปริมาณกลีเซอรอลร้อยละ 10 ของปริมาณน้ำตาลทั้งหมด มีส่วนผสม ได้แก่ มัลเบอร์รี่ มอลโทเดกซ์ทริน มอลทิทอล กลีเซอรอล เกลือ และกรดซิตริก ร้อยละ 69.73 21.62 5.40 3.01 0.17 และ 0.07 ตามลำดับ องค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณ ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน เกล็ด กากใย ความชื้น ร้อยละ 76.92 2.39 0.14 4.19 4.30 และ 12.06 และพลังงานทั้งหมดโดยการคำนวณ 318.50 กิโลแคลอรีต่อ 100 กรัม ตามลำดับ ปริมาณแอนโทไซยานิน เท่ากับ 68.32 มิลลิกรัมไซยานิน-3-กลูโคไซด์ต่อกรัม ปริมาณกรดทั้งหมดในรูปของกรดซิตริก ร้อยละ 0.60 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และน้ำตาลทั้งหมด เท่ากับร้อยละ 1.74 และ 3.90 ผู้ทดสอบที่ไม่ผ่านการฝึกฝนให้คะแนนความชอบในระดับชอบปานกลาง (7 คะแนน) ผลิตภัณฑ์เก็บรักษาในขวดแก้วที่อุณหภูมิห้อง (27 ± 2 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 4 สัปดาห์ พบว่า คุณภาพทางด้านกายภาพ ได้แก่ ค่าวอเตอร์แอกทิวิตี (a_w) มีค่าเพิ่มขึ้น ความแข็ง การเกาะติดและความยากง่ายในการเคี้ยวมีค่าลดลง คุณภาพทางด้านเคมี พบว่า ความชื้นและปริมาณแอนโทไซยานินลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด ปริมาณยีสต์และราเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) แต่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนผักและผลไม้กวน (35/2558)

คำสำคัญ : มัลเบอร์รี่; ผลไม้กวน; สารชีวเมกเทนที

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +668 1531 3880, อีเมล: gannigar.w@lawasri.tru.ac.th

<http://journal.rmutp.ac.th/>

Use of Humectants in Mulberry Paste Product

Gannigar Onsamlee*

Faculty of Science and Technology, Thepsatri Rajabhat University
321 Thale Chup Son, Mueang, Lopburi 15000

Received 28 May 2020; Revised 19 October 2020; Accepted 17 December 2020

Abstract

The shelf-life extension of mulberry paste by using humectants to place sugar content could maintain the moisture while reducing the water activity (a_w) of the product. The objectives of this research were to study on humectants replacement and the changes of the mulberry paste product quality during storage. The sugar content in the standard formula was replaced by 10% w/w glycerol and 90% w/w of maltitol and maltodextrin mixture (20:80 w/w). The final mulberry paste product consisted of mulberry, maltodextrin, maltitol, glycerol, salt and citric acid by 69.80% 21.62% 5.40% 3.01%, 0.17% and 0.07%, respectively. The chemical compositions: carbohydrates, proteins, fat, ash, fiber, and moisture, of the product were 76.92% 2.39% 0.14% 4.19% 4.30% 12.06%, respectively. The total energy by calculation was 318.50 kcal/100 g. The anthocyanin content was 68.32 mg cyanidin-3-glucoside/g. Total titratable acidity (citric acid equivalent) was 0.60%. The reducing sugar and total sugar values were 1.74% and 3.90%, respectively. The consumer acceptance as evaluated by untrained panelists was in the level of moderately like (7 score). The product packed in glass bottle containers was stored at 27 ± 2 °C for 4 weeks. The a_w was increased while the textural properties: hardness, adhesiveness, and chewiness, were decreased. The chemical quality analysis showed significant decreases ($p \leq 0.05$) in the moisture and the anthocyanin contents. The microbial quality; total plate count and yeast and mold measurements were significantly increased ($p \leq 0.05$), however, the values were within the acceptable range according to the Thai community product standard (35/2558).

Keywords : Mulberry; Fruit Paste Product; Humectant

* Corresponding Author. Tel.: +668 1531 3880, E-mail Address: gannigar.w@lawasri.tru.ac.th

1. บทนำ

หม่อน หรือ มัลเบอร์รี่ (Mulberry) มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Morus alba* Linn. เป็นผลไม้ที่มีสีแดงอมม่วงหรือสีม่วง ซึ่งเป็นแหล่งของสารสำคัญต่างๆ ได้แก่ แอนโธไซยานิน กรดโพลีฟีนอล ซึ่งเป็นสารประกอบกลุ่มฟลาโวนอยด์ [1], [2] ผลมัลเบอร์รี่มีปริมาณไขมันกรดไขมัน ได้แก่ กรดไลโนเลอิกร้อยละ 26.40-74.77 และกรดปาล์มิติกร้อยละ 9.29-22.26 [3] วิตามินซี แร่ธาตุ และสารประกอบฟีนอลิกอีกด้วย [4], [5] เนื่องจากมัลเบอร์รี่มีลักษณะเนื้อผลไม้ที่อ่อนนุ่มสามารถรับประทานในรูปผลสด แห้ง หรือในรูปของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการผลิต [6] แต่ข้อเสียคือ บอบช้ำได้ง่ายทำให้อายุการเก็บรักษาสั้นปริมาณผลผลิตออกมาจากจนนำมาบริโภคไม่ทัน มัลเบอร์รี่ได้รับการวิจัยและพัฒนาการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์หลากหลายรูปแบบ เช่น แยมมัลเบอร์รี่ผสมผิวส้ม ไอศกรีม และไวน์ เป็นต้น [4], [7] น้ำมัลเบอร์รี่ [8] และไอศกรีมมัลเบอร์รี่ [9] จะเห็นว่ากระบวนการผลิตเป็นวิธีการยืดอายุการเก็บรักษาของ มัลเบอร์รี่ไว้สำหรับบริโภคได้นานขึ้นสำหรับการแปรรูปผลิตภัณฑ์บางประเภทมีปริมาณสารอาหารบางชนิดมากเกินไป เช่น น้ำตาล ส่งผลต่อร่างกาย เช่น การเกิดโรคเบาหวาน ความดันโลหิตสูง โรคหลอดเลือด และหัวใจ [10]

สารฮิวเมกเตน (Humectant) เป็นสารที่เติมในอาหารเพื่อรักษาความชื้น ส่งผลให้อาหารมีค่าวอเตอร์แอกทิวิตี (a_w) ลดลง สามารถเก็บรักษาได้นาน โดยที่เนื้อสัมผัสและกลิ่นรสไม่เปลี่ยนแปลง ตัวอย่างของสารฮิวเมกเตนที่ใช้ในอาหาร เช่น กลีเซอรอล น้ำตาล แอลกอฮอล์ เช่น ซอร์บิทอล มอลทิทอล รวมทั้งสารไฮโดรคอลลอยด์ เช่น เพกทิน กัม และแอลจีเนต เป็นต้น ซึ่งกลีเซอรอลสามารถลดความชื้น และป้องกันการเจริญของจุลินทรีย์โดยการลดค่าวอเตอร์แอกทิวิตี (a_w) ทำให้ผลิตภัณฑ์อาหารมีความหนืด และยังเป็นตัวทำละลายที่ดี ช่วยให้ผลิตภัณฑ์อาหารมีลักษณะอ่อนนุ่ม

[11] มอลทิทอลเป็นสารทดแทนความหวาน มีความหวาน 0.9 เท่าของซูโครส ให้พลังงานเท่ากับ 2.1 กิโลแคลอรีต่อกรัม และ มอลโทเด็กซ์ทริน มีคุณสมบัติทางด้านความเป็นเนื้อทำให้ผลิตภัณฑ์มีความหนืดสม่ำเสมอเนื้อสัมผัสเรียบ เนียน ซึ่งการเติมมอลโทเด็กซ์ทรินจะทำให้ผลิตภัณฑ์เหนียวและทำให้ความนุ่มของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น [12]

จังหวัดลพบุรีโดยกลุ่มเกษตรกรตำบลหนองผักแว่น อำเภอท่าหลวง มีการปลูกมัลเบอร์รี่อินทรีย์จำนวนมาก มีทั้งชนิดใบและผล สำหรับผลยังไม่มีการแปรรูปในเชิงพาณิชย์ รวมถึงยังไม่มีการพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ที่สามารถยืดอายุการเก็บรักษา ประกอบกับกลุ่มเกษตรกรมีความประสงค์ในการพัฒนาผลผลิตทางการเกษตรเพื่อยกระดับเศรษฐกิจของชุมชน สามารถผลิตเป็นของฝากโดยชุมชนผลิตเองได้ ใช้เทคโนโลยีไม่ซับซ้อน เครื่องมือหาง่าย และราคาไม่แพง ฉะนั้นเพื่อต้องการให้ชุมชนเห็นความสำคัญในการนำผลผลิตทางการเกษตรมาแปรรูปสามารถยืดอายุการเก็บรักษา ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีวัตถุประสงค์ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์มัลเบอร์รี่กวนโดยการใช้สารฮิวเมกเตนที่ ยกตัวอย่างเช่น กลีเซอรอล มอลทิทอล และ มอลโทเด็กซ์ทริน ทดแทนน้ำตาลทำให้ควบคุมปริมาณความชื้นและเพิ่มความคงตัวในผลิตภัณฑ์ ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีพลังงานลดลง เป็นอีกทางเลือกหนึ่งให้แก่ผู้บริโภคที่ยังต้องการรสหวานแต่ต้องจำกัดการรับประทานน้ำตาลหรือผู้ที่ต้องควบคุมน้ำตาลในเลือดและผู้ที่มีห่วงใยในด้านสุขภาพ นอกจากนี้เป็นการเพิ่มมูลค่าวัตถุดิบในชุมชนและเสริมสร้างรายได้ให้แก่ชุมชนต่อไป

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 การศึกษาปริมาณสารฮิวเมกเตนในผลิตภัณฑ์มัลเบอร์รี่กวน

ทำการผลิตผลิตภัณฑ์มัลเบอร์รี่โดยมีส่วนประกอบ ได้แก่ มัลเบอร์รี่ร้อยละ 69.73 น้ำตาลร้อยละ 30.03

เกลือร้อยละ 0.17 และกรดซิตริกร้อยละ 0.07 กรรมวิธีการผลิตสำหรับ 1 กิโลกรัม เริ่มจากปั่นมัลเบอร์รี่ให้ละเอียดโดยใช้ เครื่องปั่นยี่ห้อ Tefal Maxi Blend รุ่น BL30714D ประเทศฝรั่งเศส ความเร็วระดับ 2 เป็นเวลา 1 นาที เทใส่กระทะทองเหลือง และเติมน้ำตาลและส่วนผสมทั้งหมดลงไป กวนให้ส่วนผสมของน้ำตาลละลายทั้งหมด โดยใช้ อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ประมาณ 45 นาที จนของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดของผลิตภัณฑ์ เท่ากับ 82 องศาบริกซ์ กำหนดโดยใช้เครื่องวัดความหวาน Brix Atago รุ่น MASTER-3M ที่ให้เย็น และบรรจุใส่ขวดแก้วปิดสนิท [13] จากนั้นศึกษาอัตราส่วนของสารอิวมกเตน 3 ชนิด ได้แก่ กลีเซอรอล โมลโทเดกซ์ทริน และ โมลทิทอล โดยวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design ; CRD) โดยกำหนดให้ใช้ปริมาณกลีเซอรอลร้อยละ 10 ของปริมาณน้ำตาลทั้งหมด และศึกษาอัตราส่วนระหว่าง โมลทิทอลและโมลโทเดกซ์ทรินร้อยละ 90 ของปริมาณน้ำตาล ทั้งหมด 5 อัตราส่วน ได้แก่ 10:90 (สูตรที่ 1) 20:80 (สูตรที่ 2) 30:70 (สูตรที่ 3) 40:60 (สูตรที่ 4) และ 50:50 (สูตรที่ 5) เพื่อทดแทนปริมาณน้ำตาลทั้งหมด แสดงดังตารางที่ 1 โดยตัวอย่างควบคุม (Control) คือ สูตรที่ใช้น้ำตาลร้อยละ 100 จากนั้นนำไปวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพ ได้แก่ ค่าวอเตอร์แอกทิวิตี การวิเคราะห์เนื้อสัมผัสใช้เครื่องวัดลักษณะเนื้อสัมผัส ยี่ห้อ Stable Micro Systems รุ่น TA.TX.plus ได้แก่ ความแข็ง (Hardness) การเกาะติด (Adhesiveness) และความยากง่ายในการเคี้ยว (Chewiness) วัดค่าสี ($L^* a^* b^*$) โดยใช้เครื่องวัดค่าสี ระบบ CIE ยี่ห้อ Hunter lab รุ่น Color Flex EZ คุณภาพทางเคมี ได้แก่ ปริมาณกรดทั้งหมด ความชื้น [14] และปริมาณแอนโทไซยานินทั้งหมด (Total Anthocyanin Content) โดยวิธี pH-differential [15] คุณภาพทางประสาทสัมผัส โดยทดสอบชิมเพื่อประเมินความชอบ ด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่นรส ความหวาน ความแน่นเนื้อ ความเป็น

เนื้อเดียวกัน และความชอบโดยรวม ด้วยวิธี 9 Point Hedonic Scale กับผู้ทดสอบชิมที่ไม่ผ่านการฝึกฝน จำนวน 50 คน [16]

ตารางที่ 1 อัตราส่วนสารอิวมกเตนที่แทนปริมาณน้ำตาลทั้งหมดในผลิตภัณฑ์มัลเบอร์รี่กวน

สูตรที่	ร้อยละ 90 ของปริมาณน้ำตาลทั้งหมด		ร้อยละ 10 ของปริมาณ น้ำตาลทั้งหมด
	มอลทิทอล	มอลโทเดกซ์ทริน	กลีเซอรอล
1	10	90	10
2	20	80	10
3	30	70	10
4	40	60	10
5	50	50	10

หลังจากการศึกษาใช้อัตราส่วนสารอิวมกเตนที่แทนปริมาณน้ำตาลทั้งหมดในผลิตภัณฑ์มัลเบอร์รี่กวน แล้วนั้น นำผลิตภัณฑ์ที่ได้ผ่านการคัดเลือกวิเคราะห์คุณภาพผลิตภัณฑ์ โดยผลวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพ ได้แก่ ค่าวอเตอร์แอกทิวิตี (a_w) การวิเคราะห์เนื้อสัมผัส ได้แก่ ความแข็ง การเกาะติด และความยากง่ายในการเคี้ยว วัดค่าสี ($L^* a^* b^*$) ค่าสี L^* หมายถึง ค่าความสว่าง (0 คือ มืด 100 คือ สว่าง) a^* หมายถึง ค่าสีแดง และสีเขียว (+a คือ สีแดง -a คือ สีเขียว) b^* หมายถึง ค่าสีเหลือง และสีน้ำเงิน (+b คือ สีเหลือง -b คือ สีน้ำเงิน) องค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณ ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน เถ้า ความชื้น กากใย [14] และพลังงานทั้งหมดโดยการคำนวณ ปริมาณกรดทั้งหมดในรูปกรดซิตริก (มิลลิกรัมสมมูลของน้ำหนักรีดซิตริก เท่ากับ 0.00705) ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และน้ำตาลทั้งหมด [17] และปริมาณแอนโทไซยานินทั้งหมดโดยวิธี pH-differential [15] คุณภาพด้านจุลินทรีย์ ได้แก่ ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด ยีสต์และรา [14] คุณภาพทางประสาทสัมผัส โดยทดสอบชิมความชอบ ด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่นรส ความหวาน ความแน่น

เนื้อ ความเป็นเนื้อเดียวกัน และความชอบโดยรวม ด้วยวิธี 9 Point Hedonic Scale จากผู้ทดสอบชิมที่ไม่ผ่านการฝึกฝน จำนวน 50 คน [16] วางแผนการทดลองแบบ Randomized Complete Block Design (RCBD) แล้วนำผลทดสอบมาวิเคราะห์ผลทางสถิติด้วย Analysis of Variance (ANOVA) จากนั้นเปรียบเทียบความแตกต่างของคะแนนเฉลี่ยด้วย Duncan's New Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 นำไปศึกษาการเปลี่ยนแปลงการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ต่อไป

2.2 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของผลิตภัณฑ์ มัลเบอร์รีกวนระหว่างการเก็บรักษา

นำผลิตภัณฑ์มัลเบอร์รีกวนใส่ในขวดแก้วใสปิดฝาสนิท เก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง (27 ± 2 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 4 สัปดาห์ โดยสุ่มตัวอย่างมาตรวจทุก ๆ 1 สัปดาห์ มาวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพ ได้แก่ ค่าวอเตอร์แอคทิวิตี (a_w) การวิเคราะห์เนื้อสัมผัส ได้แก่ ความแข็ง การเกาะติด และความยากง่ายในการเคี้ยว วัดค่าสี (L^* , a^* , b^*) คุณภาพทางเคมี ได้แก่ ปริมาณกรดทั้งหมด ความชื้น [14] และปริมาณแอนโทไซยานินทั้งหมด โดยวิธี pH-differential [15] คุณภาพด้านจุลินทรีย์ ได้แก่ จุลินทรีย์ทั้งหมด ยีสต์และรา [14] และคุณภาพทางประสาทสัมผัส โดยใช้วิธีการทดสอบแบบ 9-point Hedonic Scale กับผู้ทดสอบชิมที่ไม่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 50 คน [16] และวางแผนการทดลองแบบ Randomized Complete Block Design (RCBD) แล้วนำผลทดสอบมาวิเคราะห์ผลทางสถิติด้วย Analysis of Variance (ANOVA) จากนั้นเปรียบเทียบความแตกต่างของคะแนนเฉลี่ยด้วย Duncan's New Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 ปริมาณสารฮิวเมกเตนท์ในผลิตภัณฑ์ มัลเบอร์รีกวน

การศึกษาปริมาณสารฮิวเมกเตนท์ในผลิตภัณฑ์มัลเบอร์รีกวน พบว่า อัตราส่วนของสารฮิวเมกเตนท์ระหว่าง มอลทิทอลต่อมอลโทเดกซ์ทรินในอัตราส่วน 20:80 มีคุณภาพเคมี กายภาพ และการทดสอบทางประสาทสัมผัสที่สุด จากการศึกษาผลิตภัณฑ์มัลเบอร์รีกวนทั้ง 5 อัตราส่วน พบว่า ค่าสี L^* ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ค่าสี a^* และค่า b^* มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ค่าวอเตอร์แอคทิวิตี (a_w) มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) จากผลการวิจัยพบว่า ค่าวอเตอร์แอคทิวิตี (a_w) ทั้ง 5 อัตราส่วน เป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนผักและผลไม้กวน 35/2558 [18] และจากการวิจัย พบว่าการใช้สารฮิวเมกเตนท์ส่งผลต่อคุณภาพทางกายภาพ เมื่อพิจารณาอัตราส่วนของมอลโทเดกซ์ทรินที่เพิ่มส่งผลให้ค่าวอเตอร์แอคทิวิตีลดลง เพราะมอลโทเดกซ์ทรินมีผลทำให้สมดุลไฮโดรฟิลิกและไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic) ในระบบของมัลเบอร์รีกวนเปลี่ยนไป กล่าวคือ มอลโทเดกซ์ทรินไปเพิ่มความไม่ชอบน้ำ ส่งผลทำให้ ค่าวอเตอร์แอคทิวิตีลดลง [19] และการใช้มอลทิทอลมีคุณสมบัติเป็นสารฮิวเมกเตนท์ที่มีหมู่ไฮดรอกซิลสามารถดึงดูดความชื้นของน้ำได้และเกิดพันธะไฮโดรเจนกับน้ำ สามารถลดความดันไอของผลิตภัณฑ์ทำให้ค่าวอเตอร์แอคทิวิตี (a_w) ของผลิตภัณฑ์ลดลง [20] นอกจากนั้น มอลทิทอล มีสมบัติเป็นสารคงความชื้น เมื่อระดับการใช้มากขึ้นส่งผลให้ปริมาณน้ำในผลิตภัณฑ์ระเหยออกไปได้น้อย [21] การใช้กลีเซอรอลเป็นส่วนประกอบ ทำให้ค่าวอเตอร์แอคทิวิตี (a_w) ลดลงเนื่องจากมีความสามารถในการจับโมเลกุลของน้ำได้ดีกว่าน้ำตาล มีคุณสมบัติช่วยให้ผลิตภัณฑ์มีลักษณะเนื้อสัมผัสอ่อนนุ่ม [22] อย่างไรก็ตาม ค่าวอเตอร์แอคทิวิตีเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนผักและผลไม้กวน 35/2558 ที่มีค่าไม่เกิน 0.85 เมื่อพิจารณาค่าความแข็งของผลิตภัณฑ์มัลเบอร์รีกวน และค่าความยากในการเคี้ยว ผลที่ได้คือมีความแตกต่าง

ตารางที่ 2 คุณภาพทางด้านกายภาพของผลิตภัณฑ์มัลเบอร์รี่กวนที่ใช้สารฮิวเมกเตนต์ทดแทนน้ำตาลทั้งหมด 5 อัตราส่วน

อัตราส่วน มอลทิทอลต่อ มอลโทเดกซ์ทริน	ค่าสี			ค่าวอเตอร์ แอกทิวิตี (a_w)	ความแข็ง (นิวตัน)	การเกาะติด ^{ns} (นิวตัน. วินาที)	ความยากง่าย ในการเคี้ยว
	L ^{ns}	a*	b*				
10:90	7.70 ± 0.13	3.31 ^c ± 0.19	-0.33 ^e ± 0.07	0.52 ^b ± 0.01	9.28 ^d ± 0.28	0.54 ± 0.17	5.63 ^b ± 1.37
20:80	7.72 ± 0.13	4.85 ^a ± 0.11	-0.77 ^d ± 0.07	0.52 ^b ± 0.01	13.34 ^c ± 0.66	0.57 ± 0.12	7.98 ^b ± 1.38
30:70	7.73 ± 0.04	3.44 ^c ± 0.03	-1.34 ^c ± 0.06	0.53 ^{ab} ± 0.01	15.25 ^c ± 0.84	0.62 ± 0.08	8.32 ^a ± 1.94
40:60	7.59 ± 0.20	3.07 ^d ± 0.06	-1.63 ^b ± 0.05	0.54 ^a ± 0.01	18.54 ^b ± 0.86	0.65 ± 0.04	9.15 ^a ± 1.19
50:50	7.76 ± 0.08	3.78 ^b ± 0.13	-1.74 ^a ± 0.05	0.54 ^a ± 0.01	20.78 ^a ± 0.10	0.67 ± 0.05	10.58 ^a ± 0.41

หมายเหตุ ^{a-e} ที่ต่างกันในแนวตั้งหมายถึงสิ่งทดลองมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

^{ns} สิ่งทดลองไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

ตารางที่ 3 คุณภาพทางด้านเคมีของผลิตภัณฑ์มัลเบอร์รี่กวนที่ใช้สารฮิวเมกเตนต์ทดแทนน้ำตาลทั้งหมด 5 อัตราส่วน

อัตราส่วนมอลทิทอล ต่อมอลโทเดกซ์ทริน	ความชื้น ^{ns} (%)	ปริมาณกรดทั้งหมด ^{ns} (%)	ปริมาณแอนโทไซยานินทั้งหมด (มิลลิกรัมไซยานิน-3-กลูโคไซด์ ต่อกรัม)
10:90	10.94 ± 0.65	0.50 ± 0.01	76.56 ^a ± 1.13
20:80	11.25 ± 0.46	0.60 ± 0.01	71.57 ^b ± 1.07
30:70	11.30 ± 0.40	0.80 ± 0.01	68.19 ^c ± 1.03
40:60	11.40 ± 1.09	0.81 ± 0.02	65.10 ^d ± 0.78
50:50	11.63 ± 0.28	0.80 ± 0.02	60.91 ^e ± 0.92

หมายเหตุ ^{a-e} ที่ต่างกันในแนวตั้งหมายถึงสิ่งทดลองมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

^{ns} สิ่งทดลองไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

ตารางที่ 4 คุณภาพทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์มัลเบอร์รี่กวนที่ใช้สารฮิวเมกเตนต์ทดแทนน้ำตาลทั้งหมด 5 อัตราส่วน

อัตราส่วน มอลทิทอล ต่อมอลโทเดกซ์ทริน	คะแนนความชอบ						
	ลักษณะ ปรากฏ ^{ns}	สี ^{ns}	กลิ่นรส	ความหวาน	ความแน่น เนื้อ	ความเป็นเนื้อ เดียวกัน	ความชอบ โดยรวม
10 : 90	6.90 ± 1.03	7.20 ± 0.89	6.23 ^b ± 1.23	5.50 ^b ± 1.28	6.73 ^b ± 1.14	6.87 ^b ± 1.31	6.53 ^b ± 1.13
20 : 80	7.13 ± 1.08	7.20 ± 0.81	7.00 ^a ± 0.95	6.00 ^b ± 1.3	7.07 ^{ab} ± 0.87	6.93 ^b ± 1.14	7.20 ^a ± 0.81
30 : 70	7.07 ± 0.94	7.37 ± 0.72	7.03 ^a ± 0.93	6.67 ^a ± 1.10	7.17 ^{ab} ± 0.95	7.30 ^{ab} ± 0.88	7.23 ^a ± 0.97
40 : 60	7.30 ± 0.83	7.47 ± 0.86	7.17 ^a ± 1.09	6.73 ^a ± 1.37	7.20 ^{ab} ± 0.89	7.40 ^{ab} ± 1.01	7.30 ^a ± 0.95
50 : 50	7.33 ± 1.19	7.67 ± 1.06	7.30 ^a ± 1.30	7.13 ^a ± 1.43	7.57 ^a ± 1.22	7.43 ^{ab} ± 1.17	7.37 ^a ± 0.71

หมายเหตุ ^{ab} ที่ต่างกันในแนวตั้งหมายถึงสิ่งทดลองมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

^{ns} สิ่งทดลองไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยค่าความแข็งแรงมีความสัมพันธ์แบบแปรผกผันกับปริมาณมอลโทเดกซ์ทริน เนื่องจากมอลโทเดกซ์ทรินเป็นสารอิวเมกเทนที่เพิ่มเนื้อผลิตภัณฑ์และปรับปรุงเนื้อสัมผัสผลิตภัณฑ์ให้มีลักษณะอ่อนนุ่ม [12] สำหรับค่าการเกาะติดไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) แสดงดังตารางที่ 2 ปริมาณความชื้นและปริมาณกรดทั้งหมด ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ในขณะที่ปริมาณแอนโทไซยานินมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยปริมาณ มอลโทเดกซ์ทรินเพิ่มขึ้นปริมาณแอนโทไซยานินมีแนวโน้มสูงขึ้นด้วย เนื่องจากมอลโทเดกซ์ทรินมีคุณสมบัติอยู่ระหว่างแป้งและน้ำตาล ช่วยลดการสูญเสียของแอนโทไซยานินจากความร้อน ในขั้นตอนการกวนผลิตภัณฑ์ [23] แสดงดังตารางที่ 3 คุณภาพทางประสาทสัมผัส พบว่า ลักษณะปรากฏ สี กลิ่นรส ความหวาน ความแน่นเนื้อ ความเป็นเนื้อเดียวกัน และความชอบโดยรวม โดยอัตราส่วนของการใช้ส่วนผสมของมอลทิทอลและมอลโทเดกซ์ทรินที่ 20:80 คุณภาพทางประสาทสัมผัสทุกด้านมีคะแนนความชอบปานกลาง (7 คะแนน) มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) แสดงดังตารางที่ 4 จากการศึกษาคุณภาพทางกายภาพ เคมี และ คุณภาพทางประสาทสัมผัส การใช้สารอิวเมกเทนในผลิตภัณฑ์มัลเบอร์รีกวนโดยอัตราส่วนระหว่างมอลทิทอลต่อมอลโทเดกซ์ทริน คือ 20:80 (ร้อยละ 90 ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด) และกลีเซอรอลร้อยละ 10 ของปริมาณน้ำตาลทั้งหมด มีส่วนผสมดังนี้ มัลเบอร์รีร้อยละ 69.73 มอลโทเดกซ์ทรินร้อยละ 21.62 มอลทิทอลร้อยละ 5.40 กลีเซอรอลร้อยละ 3.01 เกลือร้อยละ 0.17 และกรดซิตริกร้อยละ 0.07

3.2 คุณภาพผลิตภัณฑ์สุดท้ายของผลิตภัณฑ์มัลเบอร์รีกวน

ผลการศึกษาคูณภาพด้านกายภาพ เคมี จุลินทรีย์และทางประสาทสัมผัส พบว่า มัลเบอร์รีกวนสูตรสุดท้ายกับมัลเบอร์รีกวนสูตรควบคุม มีค่าคุณภาพทางกายภาพด้านค่าสี L^* a^* b^* และค่าการเกาะติดไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ค่าวอเตอร์แอคติวิตี (a_w) พบว่าในผลิตภัณฑ์มัลเบอร์รีกวนสูตรสุดท้ายมีค่าน้อยกว่ามัลเบอร์รีกวนสูตรควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ค่าวอเตอร์แอคติวิตีไม่เกิน 0.85 เป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนผักและผลไม้กวน 35/2558

คุณภาพทางเคมี พบว่า ผลิตภัณฑ์มัลเบอร์รีสูตรสุดท้าย มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยปริมาณโปรตีน ไขมัน โยอาหาร มากกว่าผลิตภัณฑ์มัลเบอร์รีกวนสูตรควบคุม และมีพลังงานลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ขณะที่ปริมาณแอนโทไซยานินทั้งหมดมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ผลิตภัณฑ์มัลเบอร์รีกวนสูตรสุดท้ายมีคุณค่าทางโภชนาการ ได้แก่ คาร์โบไฮเดรตร้อยละ 76.92 ความชื้นร้อยละ 12.06 โปรตีนร้อยละ 2.39 ไขมันร้อยละ 0.14 โยอาหารร้อยละ 4.30 ใยร้อยละ 4.19 และพลังงานทั้งหมดโดยการคำนวณเท่ากับ 318.50 กิโลแคลอรีต่อ 100 กรัม ปริมาณกรดทั้งหมดในรูปกรดซิตริกร้อยละ 0.60 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซิงและน้ำตาลทั้งหมดร้อยละ 1.74 และ 3.90 ตามลำดับ ปริมาณแอนโทไซยานินทั้งหมด เท่ากับ 68.32 มิลลิกรัม ไซยานิดิน -3-กลูโคไซด์ต่อกรัม แสดงดังตารางที่ 5

ด้านปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด ยีสต์และรา พบว่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนผักและผลไม้กวน 35/2558 [18] สำหรับคุณภาพทางประสาทสัมผัส พบว่า ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) (ไม่ได้แสดงข้อมูล)

ตารางที่ 5 คุณภาพทางเคมีของผลิตภัณฑ์มัลเบอร์รีกวนสูตรสุดท้ายเปรียบเทียบกับมัลเบอร์รีกวนสูตรควบคุม

คุณภาพทางเคมี	ผลิตภัณฑ์มัลเบอร์รีกวน	
	สูตรควบคุม	สูตรสุดท้าย
ความชื้น ^{ns} (%)	12.32 ± 0.38	12.06 ± 0.10
โปรตีน (%)	2.28 ^b ± 0.34	2.39 ^a ± 0.02
ไขมัน ^{ns} (%)	0.12 ± 0.53	0.14 ± 0.02
เถ้า (%)	1.68 ^b ± 0.02	4.19 ^a ± 0.37
ใยอาหาร (%)	2.37 ^b ± 0.25	4.30 ^a ± 0.84
คาร์โบไฮเดรต (%)	81.23 ^a ± 0.27	76.31 ^b ± 0.40
พลังงานทั้งหมดโดยการคำนวณ (กิโลแคลอรี)	335.11 ^a ± 1.11	316.09 ^b ± 1.48
ปริมาณกรดทั้งหมด ^{ns} (%)	0.10 ± 0.19	0.06 ± 0.28
น้ำตาลรีดิวซิง (%)	4.12 ^a ± 0.03	1.74 ^b ± 0.10
น้ำตาลทั้งหมด (%)	7.13 ^a ± 0.44	3.90 ^b ± 0.05
ปริมาณแอนโทไซยานินทั้งหมด (มิลลิกรัมไซยานิน-3-กลูโคไซด์ ต่อกรัม)	57.88 ^b ± 0.76	68.32 ^a ± 0.32

หมายเหตุ ^{ab} ที่ต่างกันในแนวนอนหมายถึงสิ่งทดลองมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

^{ns} สิ่งทดลองไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

3.3 การเปลี่ยนแปลงคุณภาพผลิตภัณฑ์ระหว่างการเก็บรักษา

ผลิตภัณฑ์มัลเบอร์รีกวน ใส่ในขวดแก้วใสปิดฝาสนิท เก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง (27 ± 2 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 4 สัปดาห์ โดยสุ่มตัวอย่างมาตรวจทุกๆ 1 สัปดาห์ พบว่าการเปลี่ยนแปลงคุณภาพในระหว่างการเก็บรักษา ส่งผลให้คุณภาพด้านกายภาพ เคมี จุลินทรีย์ และประสาทสัมผัส แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) กล่าวคือ ค่าสี L^* , a^* และ b^* ลดลงเมื่ออายุการเก็บนานขึ้น มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยค่าความสว่างของผลิตภัณฑ์มีแนวโน้มลดลงทุกสัปดาห์ เนื่องจากส่วนประกอบในผลิตภัณฑ์ทำปฏิกิริยากับน้ำตาลรีดิวซ์เกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด และสารเมลานอยดิน (Melanoidin) ส่งผลให้เกิดสีน้ำตาล [24] ค่าวอเตอร์แอกทิวิตี (a_w) ของผลิตภัณฑ์มัลเบอร์รีกวนมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเก็บนานขึ้นมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

เมื่อพิจารณาพร้อมกับปริมาณความชื้น (ตารางที่ 6) เพิ่มขึ้นพบว่าระยะเวลาการเก็บรักษาที่นานส่งผลให้ความชื้นเปลี่ยนแปลงโดยผลิตภัณฑ์มีการดูดซับน้ำโดยรอบ ทำให้เกิดการละลายของตัวถูกละลายได้ ส่งผลทำให้ค่าวอเตอร์แอกทิวิตี (a_w) เพิ่มขึ้น [24] ในขณะที่ความชื้นก็เพิ่มขึ้นด้วยส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีค่าความแข็งและค่าความยากในการเคี้ยว มีแนวโน้มลดลง ตลอดการเก็บรักษา 4 สัปดาห์ และมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) แสดงดังตารางที่ 6

ผลการศึกษาคูณภาพทางเคมี พบว่า ความชื้นของผลิตภัณฑ์มัลเบอร์รีกวนในระหว่างการเก็บรักษามีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) แต่ปริมาณกรดทั้งหมดระหว่างการเก็บรักษาไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ในขณะที่ปริมาณแอนโทไซยานินทั้งหมดของผลิตภัณฑ์มัลเบอร์รีกวนในระหว่างการเก็บรักษามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยเมื่อ

ตารางที่ 6 คุณภาพทางด้านกายภาพของผลิตภัณฑ์มัลเบอร์รี่กวนระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง ($27 \pm 2^\circ\text{C}$) ระยะเวลา 4 สัปดาห์

ปัจจัย	สัปดาห์				
	0	1	2	3	4
L*	10.54 ^a ±1.84	9.66 ^{ab} ±1.23	9.11 ^{ab} ±0.95	8.85 ^{ab} ±0.26	8.34 ^b ±0.45
a*	3.31 ^a ±0.19	2.74 ^b ±0.58	2.32 ^{bc} ±0.08	2.28 ^{bc} ±0.15	1.97 ^c ±0.11
b*	-1.21 ^a ±0.02	-1.26 ^a ±0.08	-1.36 ^a ±0.31	-2.06 ^b ±0.07	-2.69 ^c ±0.17
ค่าวอเตอร์แอคติวิตี	0.53 ^d ±0.01	0.57 ^c ±0.01	0.64 ^b ±0.02	0.65 ^{ab} ±0.01	0.67 ^a ±0.02
ความแข็ง (นิวตัน)	9.29 ^a ±0.28	9.15 ^a ±0.46	8.59 ^{ab} ±0.46	8.20 ^b ±0.30	8.10 ^b ±0.65
การเกาะติด ^{ns} (นิวตัน.วินาที)	0.80±0.09	0.76±0.09	0.75±0.08	0.74±0.07	0.73±0.02
ความยากในการเคี้ยว	5.62 ^a ±1.37	2.72 ^b ±0.32	2.52 ^b ±0.48	2.26 ^b ±0.49	1.72 ^b ±0.54

หมายเหตุ ^{a-d} ที่ต่างกันในแนวนอนหมายถึงสิ่งทดลองมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

^{ns} สิ่งทดลองไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

ตารางที่ 7 คุณภาพทางด้านเคมีและจุลินทรีย์ของผลิตภัณฑ์มัลเบอร์รี่กวนระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง ($27 \pm 2^\circ\text{C}$) ระยะเวลา 4 สัปดาห์

ปัจจัย	สัปดาห์				
	0	1	2	3	4
คุณภาพทางด้านเคมี					
ความชื้น (ร้อยละ)	11.25 ^d ±0.46	12.79 ^c ±0.88	13.11 ^{bc} ±0.52	13.86 ^{ab} ±0.09	14.26 ^a ±0.44
ปริมาณกรดทั้งหมด ^{ns} (ร้อยละ)	0.06±0.02	0.06±0.01	0.05±0.01	0.06±0.01	0.06±0.01
ปริมาณแอนโทไซยานินทั้งหมด (มิลลิกรัม.ไซยานิน-3-กลูโคไซด์ต่อกรัม)	67.12 ^a ±1.83	64.90 ^b ±0.80	62.14 ^c ±0.21	61.28 ^c ±1.55	58.62 ^d ±0.68
คุณภาพทางจุลินทรีย์ (โคโลนี/กรัม)					
ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด	<10	<10	<10	2.63×10 ³	2.33×10 ⁴
ปริมาณยีสต์และรา	<10	<10	<10	<10	2.44×10 ²

หมายเหตุ ^{a-d} ที่ต่างกันในแนวนอนหมายถึงสิ่งทดลองมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

^{ns} สิ่งทดลองไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

ตารางที่ 8 คุณภาพทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์มัลเบอร์รี่กวนระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง ($27 \pm 2^\circ\text{C}$) ระยะเวลา 4 สัปดาห์

สัปดาห์	คะแนนความชอบ						
	ลักษณะปรากฏ ^{ns}	สี ^{ns}	กลิ่นรส	ความหวาน	ความแน่นเนื้อ	ความเป็นเนื้อเดียวกัน	ความชอบโดยรวม
0	7.33±1.18	7.67±1.06	7.30 ^a ±1.29	7.13 ^a ±1.43	7.57 ^a ±1.22	7.80 ^a ±0.89	7.73 ^a ±1.23
1	7.3±0.84	7.47±0.86	7.17 ^a ±1.09	6.73 ^a ±1.36	7.20 ^{ab} ±0.89	7.40 ^{ab} ±1.00	7.53 ^a ±0.94
2	7.07±0.94	7.37±0.72	7.03 ^a ±0.93	6.67 ^a ±1.09	7.07 ^{ab} ±0.87	7.30 ^{ab} ±0.88	7.33 ^{ab} ±0.84
3	7.13±1.07	7.20±0.81	6.20 ^b ±1.40	6.00 ^b ±1.31	7.17 ^{ab} ±0.95	6.93 ^b ±1.14	6.80 ^{bc} ±1.21
4	6.90±1.03	7.20±0.89	6.23 ^b ±1.22	5.50 ^b ±1.28	6.73 ^b ±1.14	6.87 ^b ±1.31	6.53 ^c ±1.14

หมายเหตุ ^{ab} ที่ต่างกันในแนวนอนหมายถึงสิ่งทดลองมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

^{ns} สิ่งทดลองไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

อายุการเก็บรักษานานขึ้นปริมาณแอนโทไซยานิน ลดลง กล่าวคือ ความคงตัวของแอนโทไซยานินที่ลดลง โดยปัจจัยที่มีผล ได้แก่ อุณหภูมิ ออกซิเจน [25] และผลิตภัณฑ์การใช้กรดซิตริก ในสภาวะที่เป็นกรดทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสส่งผลให้แอนโทไซยานินจะเกิดการสลายตัวมากขึ้น [26], [27] คุณภาพทางจุลินทรีย์พบว่าปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเก็บรักษา โดยเริ่มมากขึ้นในสัปดาห์ที่ 3 เมื่อเก็บรักษาครบ 4 สัปดาห์ ผลิตภัณฑ์มีปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด 2.33×10^4 โคโลนีต่อตัวอย่าง 1 กรัม ส่วนปริมาณยีสต์และรา เท่ากับ 2.44×10^2 ซึ่งยังไม่เกินมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนผักและผลไม้กวน 35/2558 [18] แสดงดังตารางที่ 7

สำหรับคุณภาพทางประสาทสัมผัส พบว่าคุณลักษณะด้านลักษณะปรากฏและสีตลอดระยะเวลาในการเก็บรักษาเป็นเวลา 4 สัปดาห์ ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) เนื่องจากผลิตภัณฑ์มีลเอร์รี่กวนเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีสีไปในทางสีม่วงเข้มเกือบดำ ทำให้ผู้ทดสอบชิมที่ไม่ผ่านการฝึกฝนสังเกตการเปลี่ยนแปลงได้ยาก คุณลักษณะด้านกลิ่นรส ความหวาน ความแน่นเนื้อ ความเป็นเนื้อเดียวกัน และความชอบโดยรวมมีคะแนนความชอบลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่นรส ความหวาน ความแน่นเนื้อ ความเป็นเนื้อเดียวกัน และความชอบโดยรวม เท่ากับ 6.90 7.20 6.23 5.50 6.73 6.87 และ 6.53 คะแนนตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 8

4. สรุป

สารชีวเมกเทนทีนในผลิตภัณฑ์ลเอร์รี่กวน ใช้อัตราส่วนระหว่างมอลทิทอลต่อมอลโทเดกซ์ทริน อัตราส่วน 20:80 (ร้อยละ 90 ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด) และกลีเซอรอลร้อยละ 10 ของปริมาณน้ำตาลทั้งหมดมีส่วนผสมคือ ลเอร์รี่ร้อยละ 69.73 มอลโทเดกซ์ทริน

ร้อยละ 21.62 มอลทิทอลร้อยละ 5.40 กลีเซอรอลร้อยละ 3.01 เกลือร้อยละ 0.17 และกรดซิตริกร้อยละ 0.07 จำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด ยีสต์และราไม่เกินมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนผักและผลไม้กวน 35/2558 โดยผลิตภัณฑ์ได้เก็บในขวดแก้วใสปิดฝาสนิทไว้ที่อุณหภูมิห้อง (27 ± 2 องศาเซลเซียส) เป็นระยะเวลา 4 สัปดาห์

5. กิตติกรรมประกาศ

ได้รับการสนับสนุนการวิจัยประจำปีงบประมาณ 2562 จากมหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Y. Jiang and W. J. Nie, "Chemical properties in fruits of mulberry species from the Xinjiang province of China," *Food chemistry*, vol. 174, pp. 460-466, May 2015.
- [2] Q. Yuan and L. Zhao, "The Mulberry (*Morus alba* L.) Fruit-A Review of Characteristic Components and Health Benefits," *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, vol. 65, no. 48, pp. 10383-10394, Dec. 2017.
- [3] L. Liang, X. Wu, M. Zhu, W. Zhao, F. Li, Y. Zou and L. Yang, "Chemical composition, nutritional value, and antioxidant activities of eight mulberry cultivars from China," *Pharmacognosy Magazine*, vol. 8, no. 31, pp. 215-224, Jul.-Sep. 2012.
- [4] A. M. Pawlowska, W. Oleszek and A. Braca, "Quali-quantitative analyses of flavonoids of *Morus nigra* L. and *Morus alba* L.(Moraceae) fruits," *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, vol. 56, no. 9, pp. 3377-3380, Apr. 2008.

- [5] S. H. Bae and H. J. Suh, "Antioxidant activities of five different mulberry cultivars in Korea," *Agricultural Sciences*, vol. 4, no. 6, pp. 995-962, Aug. 2007.
- [6] S. Ercisli and E. Orhan, "Chemical composition of white (*Morus alba*), red (*Morus rubra*) and black (*Morus nigra*) mulberry fruits," *Food Chemistry*, vol. 103, no. 4, pp. 1380-1384, Dec. 2007.
- [7] M. Tomas, G. Toydemir, D. Boyacioglu, R. Hall, J. Beekwilder and E. Capanoglu, "Processing black mulberry into jam: Effects on antioxidant potential and in vitro bio accessibility," *Journal of the Science of Food and Agriculture*, vol. 97, no. 10, pp. 3106-3113, Feb. 2017.
- [8] M. Tomas, G. Toydemir, D. Boyacioglu, R. Hall, J. Beekwilder and E. Capanoglu, "The effects of juice processing on black mulberry antioxidants," *Food chemistry*, vol. 186, pp. 277-84, Nov. 2015.
- [9] A. F. Yesilisu and H. Temiz, "Effect of Pekmez Addition on the Physical, Chemical, and Sensory Properties of Ice Cream," *Czech Journal of Food Sciences*, vol. 28, pp. 538-546, Oct. 2015.
- [10] S. Songkhrampukdee, "Quality of Life for Diabetic Patients Selaphum, Roi-Et," *Journal of Mahasarakham Hospital*, vol. 9, no. 1, Apr-Jul. 2012.
- [11] G. Favetto, J. Chirife and G. Bartholomai, "Determination of moisture content in glycerol-containing intermediate moisture foods," *Journal of Food Science*, vol. 44, no. 4, pp. 1258-1259, Aug. 2006.
- [12] S. Y. Quek, N. K. Chok and P. Swedlund, "The physicochemical properties of spray-dried watermelon powders," *Chemical Engineering and Processing*, vol. 46, no. 5, pp. 386-392, May 2007.
- [13] R. Attabhanyo, S. Sampanvejsobha and A. Changchut, "Development of fruit for standardization and market study," The Thailand Research Fund, Faculty of Agriculture, Department of Product Development, Chiang Mai: Chiang Mai University, 2010.
- [14] AOAC, Official Methods of Analysis of AOAC International, 18th ed. *AOAC International*, 2005.
- [15] M. M. Giusti and R. E. Wrolstad, "Characterization and measurement of anthocyanins by UV-Visible spectroscopy," *Current Protocols in Food Analytical Chemistry*, vol. 0, no. 1, pp. F1.2.1-F1.2.13, Apr. 2001.
- [16] E. Chamber and M.B. Wolf. Sensory Testing Methods, 2nd ed., West Conshohocken, PA : ASTM, 1996.
- [17] J. H. Lane and L. Eynon, "Determination of reducing sugars by means of Fehling's solution with methylene blue as internal indicator," *Journal of the Society of Chemical Industry*, vol. 42, pp. 32-36, 1923.
- [18] Standard of Preserved Vegetable and fruit paste, Thai Industrial Standard Institute, TISI. 35/ 2003.

- [19] A. Farahnaky, N. Mansoori, M. Majzoobi and F. Badii, "Physicochemical and sorption isotherm properties of date syrup powder: Antiplasticizing effect of maltodextrin," *Journal Food and Bioproducts Processing*, vol. 98, pp. 133-141, Apr. 2016.
- [20] R. J. Prankerd, "Course: Formulation Chemistry II (VCF2071)" in *Section two: humectants and preservatives*. Victorian College of Pharmacy. Monash University. 2004, pp. 2-17.
- [21] L. O. B. Nabors, *Alternative Sweeteners: Third Edition, Revised and Expanded*, Marcel Dekker, Inc. New York, 2001.
- [22] V. Surojanametakul, "Glycerol; Food additives," *Food Journal (Thailand)*, vol. 33, no. 2, pp. 87-89, 2003.
- [23] A. Khunthawad and J. Sripui, "Effects of encapsulation by spray drying on physical properties of Mamea (Antidesma thwaitesianum) powder," in *Proceedings of 14th Graduate Research Conference*, Khon Kaen, 2010, pp. 1-7.
- [24] N. Rattanapanon Author, *Food chemistry*, 2nd ed, Chiang Mai: Chiang Mai University Press, 2007.
- [25] H. E. Khoo, A. Azlan, S. T. Tang and S. M. Lim, "Anthocyanidins and anthocyanins: colored pigments as food, pharmaceutical ingredients, and the potential health benefits," *Food & nutrition research*, vol. 61, no. 1, p. 1361779, Aug. 2017.
- [26] L.-Z. Lu, Y.-Z. Zhou, Y.-Q. Ma, Y.-L. Zhou, L.-X. Li, L. Zhou, Z.-Z. He and T. Zhen, "Anthocyanin extracts from purple sweet potato by means of microwave baking and acidified electrolysed water and their antioxidation in vitro," *International Journal of Food Science and Technology*, vol. 45, no. 7, pp. 1378-1385, Jun. 2010.
- [27] R. N. Cavalconti, D. T. Santos and M. A. A. Meireles, "Non-thermal stabilization mechanisms of anthocyanins in model and food systems-An overview," *Food Research International*, vol. 44, no. 2, pp. 499-509, Mar. 2011.

<http://journal.rmutp.ac.th/>

การประเมินคุณภาพทางด้านฉลาก ด้านกายภาพ ค่าความเป็นกรด-ด่าง และทางจุลชีววิทยาของน้ำดื่มบรรจุขวดที่จำหน่ายในเขตเทศบาลนคร อุบลราชธานี ประเทศไทย

สุภัณฑิต นิมรัตน์ ศิริพร จิรารัตนกุลชัย และ วีรพงศ์ วุฒิพันธุ์ชัย*

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

169 ถนนลงหาดบางแสน ตำบลแสนสุข อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี 20131

รับบทความ 24 เมษายน 2563 แก้ไขบทความ 21 ตุลาคม 2563 ตอรับบทความ 17 ธันวาคม 2563

บทคัดย่อ

การศึกษานี้ได้ศึกษาถึงรายละเอียดฉลากผลิตภัณฑ์ คุณภาพทางกายภาพ และคุณภาพทางจุลชีววิทยาของน้ำดื่มบรรจุขวดชนิดพลาสติกใส (30 ตัวอย่าง) และพลาสติกขาวขุ่น (3 ตัวอย่าง) ที่จำหน่ายในเขตเทศบาลนครอุบลราชธานี จากการศึกษาพบว่าน้ำดื่มบรรจุขวดชนิดพลาสติกใสจำนวน 12 ตัวอย่าง (ร้อยละ 36) และน้ำดื่มบรรจุขวดชนิดพลาสติกขาวขุ่นจำนวน 3 ตัวอย่าง (ร้อยละ 9) ไม่มีการระบุวันหมดอายุบนฉลาก ซึ่งไม่เป็นไปตามมาตรฐาน ประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 383 พ.ศ. 2560 และน้ำดื่มบรรจุขวดทุกตัวอย่างไม่มีกลิ่น ผลิตภัณฑ์น้ำดื่มบรรจุขวดชนิดพลาสติกใสจำนวน 4 ตัวอย่าง (ร้อยละ 12) และน้ำดื่มบรรจุขวดชนิดพลาสติกขาวขุ่นจำนวน 3 ตัวอย่าง (ร้อยละ 9) มีค่าความเป็นกรด-ด่างในช่วง $6.21 \pm 0.00 - 6.29 \pm 0.03$ ซึ่งไม่ผ่านมาตรฐานทางด้านค่าความเป็นกรด-ด่างที่กำหนดให้มีความระหว่าง 6.5–8.5 และน้ำดื่มบรรจุขวดทุกตัวอย่างมีปริมาณแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มและแบคทีเรียกลุ่มฟีคัลโคลิฟอร์มน้อยกว่า 2 เอ็มพีเอ็นต่อ 100 มิลลิลิตร และตรวจไม่พบ *E. coli* ดังนั้นจากการประเมินคุณภาพของน้ำดื่มบรรจุขวดชนิดพลาสติกใสและพลาสติกขาวขุ่นที่จำหน่ายในเขตเทศบาลนครอุบลราชธานีสามารถสรุปได้ว่าผลิตภัณฑ์น้ำดื่มบรรจุขวด 15 ตัวอย่าง (ร้อยละ 45) ไม่ผ่านมาตรฐานน้ำดื่มในภาชนะบรรจุปิดสนิทที่กำหนดโดยกระทรวงสาธารณสุขของประเทศไทย พ.ศ. 2524 และ พ.ศ. 2560 เนื่องจากไม่มีการระบุวันหมดอายุบนฉลากผลิตภัณฑ์และมีค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำกว่า 6.5

คำสำคัญ : น้ำดื่มบรรจุขวดชนิดพลาสติกใส; น้ำดื่มบรรจุขวดพลาสติกขาวขุ่น; แบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์ม; ฟีคัลโคลิฟอร์ม; *E. coli*

<http://journal.rmutp.ac.th/>

Assessment of Label, Physical, pH and Microbiological Qualities of Bottled Drinking Water Distributed in City Municipality of Ubon Ratchathani, Thailand

Subuntith Nimrat Siriporn Jirarattanakunchai and Verapong Vuthiphandchai*

Faculty of Science, Burapha University

169 Longhaad Bangsaen Road, Saensook, Mueang, Chon Buri 20131

Received 24 April 2020; Revised 21 October 2020; Accepted 17 December 2020

Abstract

In this study, examination of label information, physical and microbiological qualities was performed in 30 clear-plastic and 3 opaque-plastic bottled drinking water products distributed in city municipality of Ubon Ratchathani. Results showed that 12 clear-plastic (36%) and 3 opaque-plastic (9%) bottled drinking water samples had no expiry date on the product labels, which were discordant to the criteria for drinking water in sealed containers imposed by the Ministry of Public Health of Thailand no. 383 (2017). Odorless appearances of all drinking water samples were observed. Values of pH in 4 clear-plastic (12%) and 3 opaque-plastic (9%) bottled drinking water samples were in the ranges of 6.21 ± 0.00 – 6.29 ± 0.03 , which were below the allowable limit (pH 6.5–8.5). All bottled drinking water products contained numbers of total coliform and fecal coliform bacteria less than 2 MPN/100 mL and were devoid of *E. coli*. Therefore, based on the quality of clear-plastic and opaque-plastic bottled drinking water products distributed in city municipality of Ubon Ratchathani, 15 samples (45%) did not meet standard for drinking water in sealed containers declared by the Ministry of Public Health of Thailand (1981 and 2017) owing to no expiry date labeled on the products and pH value below 6.5.

Keywords : Clear Plastic Bottled Drinking Water; Opaque Plastic Bottled Drinking Water; Coliform Bacteria; Fecal Coliform Bacteria; *E. coli*

* Corresponding Author. Tel.: +66 3810 3093, E-mail Address: verapong@buu.ac.th

1. บทนำ

น้ำเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของเซลล์ต่าง ๆ ในร่างกายมนุษย์ มีบทบาทสำคัญต่อกิจกรรมของร่างกาย ไม่ว่าจะเป็นการควบคุมอุณหภูมิของร่างกายให้คงที่ การย่อยอาหาร การดูดซึมและการขนส่งสารอาหารระหว่างเซลล์ การไหลเวียนสารภายในร่างกาย การขับถ่ายและกำจัดของเสีย และช่วยให้ปฏิกิริยาเคมีต่างๆ ในระบบเมแทบอลิซึมของร่างกายเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ เป็นต้น [1] ดังนั้นน้ำดื่มจึงมีความสำคัญและต้องสะอาดปลอดภัยปราศจากสิ่งปนเปื้อนที่อาจก่อให้เกิดอันตรายต่อร่างกาย น้ำดื่มที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน คือ น้ำดื่มบรรจุขวด เนื่องจากมีความสะดวกและพกพาได้ง่าย จากข้อมูลของกระทรวงเกษตรของสหรัฐอเมริกา พ.ศ. 2558 คนอเมริกันบริโภคน้ำดื่มบรรจุขวดเฉลี่ย 138 ลิตรต่อคนต่อปี คิดเป็นปริมาณมากกว่าร้อยละ 38 ของน้ำดื่มที่บริโภคในประเทศสหรัฐอเมริกา สำหรับประเทศไทยจากข้อมูลศูนย์อัจฉริยะเพื่ออุตสาหกรรมอาหาร พ.ศ. 2558 คนไทยประมาณร้อยละ 30 บริโภคน้ำบรรจุขวดในชีวิตประจำวัน [2]

ตามปกติแล้วน้ำดื่มบรรจุขวดที่จำหน่ายในท้องตลาดต้องบรรจุอยู่ในภาชนะปิดสนิทและต้องผ่านกระบวนการผลิตจากโรงงานที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานในการควบคุมเพื่อให้ผลิตภัณฑ์น้ำดื่มบรรจุขวดมีคุณภาพและปลอดภัยต่อผู้บริโภคตรงตามมาตรฐานของกระทรวงสาธารณสุข ประเทศไทย แต่อย่างไรก็ตาม น้ำดื่มบรรจุขวดที่จำหน่ายในหลายจังหวัดของประเทศไทยไม่แสดงรายละเอียดบนฉลากผลิตภัณฑ์ที่ชัดเจนและครบถ้วน เช่น พระนครศรีอยุธยา (ร้อยละ 54) ระยอง (ร้อยละ 50) และชลบุรี (ร้อยละ 24) เป็นต้น [3]-[5] นอกจากนี้ยังพบว่าน้ำดื่มบรรจุขวดที่จำหน่ายในจังหวัดระยอง อ่างทองและฉะเชิงเทรา มีค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดโดยกระทรวงสาธารณสุขสูงถึงร้อยละ 36-64 [4], [6], [7]

การศึกษาคุณภาพทางจุลชีววิทยาของน้ำดื่มบรรจุขวด พบว่าน้ำดื่มบรรจุขวดที่จำหน่ายในบางพื้นที่ เช่น จังหวัดน่านและกาญจนบุรี มีการปนเปื้อนด้วยแบคทีเรียโคลิฟอร์มและฟีคัลโคลิฟอร์มประมาณร้อยละ 5-9 [8], [9] นอกจากนี้ดัชนี สุทธปริยากุล และคณะ [10] ยังพบว่าน้ำดื่มบรรจุขวดในพื้นที่กรุงเทพมหานครมีการปนเปื้อนแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโพรสปสูงกว่าน้ำประปา เนื่องจากน้ำประปามีปริมาณแบคทีเรียเกินค่ามาตรฐานเพียงร้อยละ 2 ในขณะที่น้ำดื่มบรรจุขวดกลับเกินค่ามาตรฐานสูงถึงร้อยละ 97 จากรายงานเหล่านี้สะท้อนให้เห็นว่าน้ำดื่มบรรจุขวดที่จำหน่ายในจังหวัดต่าง ๆ ของประเทศไทยมีความเสี่ยงที่จะก่อให้เกิดอาการเจ็บป่วยที่มีสาเหตุจากแบคทีเรียก่อโรคที่มีน้ำเป็นสื่อ เนื่องจากแบคทีเรียที่พบในน้ำดื่ม เช่น แบคทีเรียโคลิฟอร์ม ฟีคัลโคลิฟอร์ม และ *E. coli* เป็นแบคทีเรียที่พบได้ในระบบทางเดินอาหารของสัตว์เลื้อยคลานและถูกนำมาใช้เป็นแบคทีเรียดัชนีหรือตัวแทนบ่งชี้ถึงการปนเปื้อนสิ่งขับถ่ายจากมนุษย์และสัตว์เลื้อยคลาน รวมถึงการปนเปื้อนแบคทีเรียก่อโรคทางอาหารบางชนิด เช่น Pathogenic *E. coli*, *Salmonella*, *Shigella* และ *Vibrio* เป็นต้น [11], [12]

จังหวัดอุบลราชธานีเป็นเมืองใหญ่ริมฝั่งแม่น้ำมูลที่มีประวัติศาสตร์ที่ยาวนานมากกว่า 200 ปี ตั้งอยู่แถบภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนล่าง จากสถิติ พ.ศ. 2559 จังหวัดอุบลราชธานีมีจำนวนประชากรเป็นอันดับ 3 ของประเทศไทย รองจากกรุงเทพมหานครและนครราชสีมา ตามลำดับ [13] โดยเทศบาลนครอุบลราชธานีมีพื้นที่ประมาณ 29 ตารางกิโลเมตร ครอบคลุมพื้นที่ตำบลในเมือง อำเภอเมือง และเป็นเทศบาลนครที่มีประชากรอาศัยอยู่อย่างหนาแน่นมากเป็นอันดับที่ 4 ของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ รองจากเทศบาลนครอุดรธานี เทศบาลนครนครราชสีมา และเทศบาลนครขอนแก่น การเพิ่มขึ้นของประชากรภายในเทศบาลนครอุบลราชธานีส่งผลทำให้ความต้องการบริโภคน้ำดื่ม

บรรจุขวดเพิ่มมากขึ้น และปัจจุบันยังไม่มีข้อมูลเกี่ยวกับคุณภาพน้ำดื่มบรรจุขวดที่จำหน่ายในจังหวัดนี้ ดังนั้น เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับประชาชนผู้บริโภคและบ่งชี้ถึงคุณภาพของน้ำดื่มบรรจุขวด การศึกษาครั้งนี้จึงประเมินคุณภาพทางด้านฉลาก (ชื่อบริษัทที่ผลิต/สถานที่ผลิต/วันที่ผลิต/วันหมดอายุ) ด้านกายภาพ (กลิ่นของน้ำดื่ม และค่าความเป็นกรด-ด่าง) และคุณภาพทางด้านจุลชีววิทยา ของน้ำดื่มบรรจุขวดพลาสติกชนิดใสและชนิดทึบที่จำหน่ายในเขตเทศบาลนครอุบลราชธานี

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 การเก็บและการเตรียมตัวอย่างน้ำดื่มบรรจุขวด

ทำการเก็บตัวอย่างน้ำดื่มที่บรรจุในภาชนะปิดสนิทที่จำหน่ายในเขตเทศบาลนครอุบลราชธานี ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดอุบลราชธานี ในช่วงเดือนพฤศจิกายนถึงธันวาคม พ.ศ. 2561 โดยแบ่งเป็นน้ำดื่มบรรจุขวดพลาสติกชนิดใส 30 ตัวอย่าง และพลาสติกชนิดทึบ 3 ตัวอย่าง จากนั้นทำการบันทึกคุณภาพของตัวอย่างน้ำดื่มบรรจุขวด ได้แก่ รายละเอียดบนฉลาก (ชื่อบริษัทที่ผลิต/สถานที่ผลิต/วันที่ผลิต/วันหมดอายุ) ลักษณะบรรจุภัณฑ์

2.2 การตรวจกลิ่นและสังเกตความใส

ทำการตรวจกลิ่นของน้ำโดยการเปิดฝาและดมกลิ่นจากขวด [14] และสังเกตความใสของน้ำดื่มด้วยตาเปล่า

2.3 การวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง [14]

ทำการวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง ด้วยเครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (Denver Instrument, pH/mv/Temp. Meter Model UB-10, USA) โดยทำการสอบเทียบกับค่าการวัดสารละลายมาตรฐานที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 4, 7 และ 10 ตามลำดับ ก่อนทำการวัดตัวอย่างน้ำดื่ม จากนั้นวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง ของ

ตัวอย่างน้ำดื่มโดยตรวจวัดจำนวน 3 ข้าง แล้วนำค่าที่ได้ไปหาค่าเฉลี่ย (Average) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation)

2.4 การทดสอบแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มฟีคัลโคลิฟอร์ม และ *E. coli* โดยวิธี Most Probable Number [15]

2.4.1 การทดสอบขั้นแรก (Presumptive Phase)

ปิเปตตัวอย่างน้ำลงในอาหาร Lauryl Tryptose Broth (LST) 10 มิลลิลิตร ที่มีความเข้มข้น 2 เท่า จำนวน 5 หลอด ๆ ละ 10 มิลลิลิตร และปิเปตตัวอย่างน้ำลงในอาหาร LST 10 มิลลิลิตร ที่มีความเข้มข้น 1 เท่า หลอดละ 1 และ 0.1 มิลลิลิตร อย่างละ 5 หลอด ตามลำดับ นำไปบ่มเพาะเชื้อที่อุณหภูมิ 35 ± 0.5 องศาเซลเซียส นาน 24-48 ชั่วโมง เลือกหลอด LST ที่ให้ผลบวก (ขุ่น อาหารมีสีเหลืองและมีก๊าซใน Durham Tube) ไปทดสอบในขั้น Confirmation Phase ของโคลิฟอร์มและฟีคัลโคลิฟอร์มต่อไป

2.4.2 การทดสอบขั้นยืนยัน (Confirmed Phase)

นำหลอด LST ที่ให้ผลบวกถ่ายเชื้อลงใน Brilliant Green Lactose Bile broth (BGLB) ด้วยหลอดเชี่ยเชื้อ (Inoculating Loop) นำไปบ่มเพาะเชื้อที่อุณหภูมิ 35 ± 0.5 องศาเซลเซียส นาน 24-48 ชั่วโมง (แบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์ม) และนำหลอด LST ที่ให้ผลบวกถ่ายเชื้อลงใน *Escherichia coli* (EC) Medium นำไปบ่มเพาะเชื้อที่อุณหภูมิ 44.5 ± 0.2 องศาเซลเซียส ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ (Water Bath) นาน 24 ชั่วโมง (แบคทีเรียกลุ่มฟีคัลโคลิฟอร์ม) จากนั้นนับจำนวนหลอด BGLB ที่ให้ผลบวก (ขุ่นและมีก๊าซใน Durham Tube) นำไปเทียบกับตาราง Most Probable Number (MPN) จะได้ค่าเอ็มพีเอ็นโคลิฟอร์มต่อ 100 มิลลิลิตร และนับจำนวนหลอด EC ที่ให้ผลบวก (ขุ่นและมีก๊าซใน Durham Tube) นำไปเทียบกับตาราง MPN จะได้ค่าเอ็มพีเอ็นฟีคัลโคลิฟอร์มต่อ 100 มิลลิลิตร

2.4.3 การทดสอบขั้นสมบูรณ์ (Completed Phase) ของ *E. coli*

นำหลอด BGLB และ/หรือ EC ที่ให้ผลบวกไป เชียลงบนอาหารเลี้ยงเชื้อ Eosin Methylene Blue Agar (EMB) บ่มเพาะเชื้อที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง สังเกตลักษณะโคโลนีเฉพาะของ *E. coli* มีสีเขียวสะท้อนเงาโลหะ (Metallic Sheen) นำไปย้อมแกรมและศึกษาสัณฐานวิทยาภายใต้กล้องจุลทรรศน์ โดยเปรียบเทียบกับ *E. coli* สายพันธุ์มาตรฐาน คือ *E. coli* ATCC 25922 และทดสอบยืนยันโดยใช้ IMViC Test ต่อไป

2.5 การตรวจสอบทางชีวเคมี IMViC [15]

ทำการตรวจสอบคุณสมบัติทางชีวเคมีของ แบคทีเรีย ได้แก่ Indole Production Test, Methyl Red Test (MR Test), Voges-proskauer Test (VP Test) และ Citrate Utilization Test

2.5.1 Indole Production Test

ถ่ายเชื้อที่ต้องการทดสอบลงไปนร้อยละ 1 Tryptone Broth นำไปบ่มเพาะเชื้อที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส นาน 24-48 ชั่วโมง หยด Kovac's Reagent ลงไป 0.2-0.3 มิลลิลิตร เขย่าหลอดทดลองเบา ๆ 2-3 ครั้ง สังเกตการเปลี่ยนสีที่ผิวของอาหาร อ่านผลเป็นบวก เมื่อเกิดวงสีแดงที่ผิวอาหาร

2.5.2 Methyl Red Test

ถ่ายเชื้อที่ต้องการทดสอบลงไปนร้อยละ 1 MR-VP Broth นำไปบ่มเพาะเชื้อที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส นาน 24-48 ชั่วโมง หยด Methyl Red ลงไป 5 หยด สังเกตการเปลี่ยนสีของอาหารทันทีหลังจากหยด Indicator อ่านผลเป็นบวกเมื่ออาหารเปลี่ยนเป็นสีแดง

2.5.3 Voges-proskauer Test

ถ่ายเชื้อที่ต้องการทดสอบลงไปนร้อยละ 1 MR-VP Broth นำไปบ่มเพาะเชื้อที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส

นาน 24-48 ชั่วโมง หยดร้อยละ 5 ของ α -naphthol และ Creatine ลงไป 1-2 หยด เขย่าและหยดร้อยละ 40 ของ KOH ลงไป 2 หยด เขย่าให้เข้ากัน ทิ้งไว้ 10-15 นาที สังเกตการเปลี่ยนสีของอาหาร อ่านผลเป็นบวกเมื่ออาหารเปลี่ยนเป็นสีแดง

2.5.4 Citrate Utilization Test

ถ่ายเชื้อที่ต้องการทดสอบโดยการเชียลงบนผิวอาหาร Simmons' Citrate Agar นำไปบ่มเพาะเชื้อที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส นาน 24-48 ชั่วโมง สังเกตการเปลี่ยนสีของอาหารและการเจริญของแบคทีเรีย อ่านผลเป็นบวกเมื่ออาหารเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีน้ำเงิน

3. ผลการศึกษา

จากการศึกษาลักษณะทางกายภาพ ได้แก่ การตรวจวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง กลิ่น ลักษณะน้ำดื่มที่บรรจุภายในขวด ฉลาก (ชื่อบริษัทที่ผลิต/สถานที่ผลิต/วันที่ผลิต/วันหมดอายุ) ลักษณะขวด และคุณภาพทางด้านจุลชีววิทยา ได้แก่ ปริมาณแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์ม ฟีคัลโคลิฟอร์ม และ *E. coli* ในน้ำดื่มบรรจุขวดชนิดพลาสติกใส 30 ตัวอย่าง และพลาสติกขาวขุ่น 3 ตัวอย่าง ที่จำหน่ายในเขตเทศบาลนครอุบลราชธานี ประเทศไทย ได้ผลการทดลองดังนี้

3.1 ลักษณะทางด้านฉลากและคุณภาพทาง

กายภาพบางประการของน้ำดื่มบรรจุขวด

จากการสังเกตลักษณะของน้ำดื่มบรรจุขวดทั้งหมด 33 ตัวอย่าง (ตารางที่ 1) พบว่าน้ำดื่มบรรจุขวดชนิดพลาสติกใส 30 ตัวอย่าง และขวดชนิดพลาสติกขาวขุ่น 3 ตัวอย่าง มีลักษณะน้ำที่ใสและไม่มียาก จากการจดบันทึกข้อมูลที่ปรากฏบนฉลากพบว่าน้ำดื่มบรรจุขวดชนิดพลาสติกใสส่วนใหญ่ระบุชื่อบริษัทที่ผลิต สถานที่ผลิต วันที่ผลิต และวันหมดอายุ แต่มีน้ำดื่ม 15 ตัวอย่าง (ร้อยละ 45) ได้แก่ น้ำดื่มบรรจุขวดชนิดพลาสติกใส

ตารางที่ 1 คุณภาพทางด้านกายภาพของน้ำดื่มบรรจุขวดที่จำหน่ายในเขตเทศบาลนครอุบลราชธานี ประเทศไทย

ยี่ห้อ	ตัวอย่าง ที่	รายละเอียดบนฉลาก			ลักษณะบรรจุภัณฑ์	ลักษณะน้ำ	กลิ่น**	pH**	มาตรฐาน
		ชื่อบริษัท*	วันหมดอายุ*	สถานที่ตั้ง บริษัท*					คุณภาพ น้ำดื่มใน ภาชนะบรรจุที่ ปิดสนิท
น้ำดื่มบรรจุขวดชนิดพลาสติกใส									
1	1	✓	✓	✓	ขวดมีรอยขีดข่วน	ใส	ไม่มีกลิ่น	7.25±0.02	ผ่าน
	2	✓	✓	✓	ขวดมีรอยขีดข่วน, รอยบุบ	ใส	ไม่มีกลิ่น	7.13±0.03	ผ่าน
	3	✓	✓	✓	ขวดมีรอยขีดข่วน	ใส	ไม่มีกลิ่น	7.24±0.01	ผ่าน
2	4	✓	✓	✓	ขวดมีรอยขีดข่วน, รอยบุบ	ใส	ไม่มีกลิ่น	8.02±0.01	ผ่าน
	5	✓	✓	✓	ขวดมีรอยขีดข่วน	ใส	ไม่มีกลิ่น	8.02±0.00	ผ่าน
	6	✓	✓	✓	ขวดมีรอยขีดข่วน, รอยบุบ	ใส	ไม่มีกลิ่น	8.03±0.00	ผ่าน
3	7	✓	✓	✓	ขวดมีรอยขีดข่วน, รอยบุบ	ใส	ไม่มีกลิ่น	6.86±0.04	ผ่าน
	8	✓	✓	✓	ขวดมีรอยขีดข่วน	ใส	ไม่มีกลิ่น	6.95±0.01	ผ่าน
	9	✓	✓	✓	ขวดมีรอยขีดข่วน, รอยบุบ	ใส	ไม่มีกลิ่น	6.65±0.02	ผ่าน
4	10	✓	✓	✓	ขวดมีรอยขีดข่วน	ใส	ไม่มีกลิ่น	7.44±0.02	ผ่าน
	11	✓	✓	✓	ขวดมีรอยขีดข่วน	ใส	ไม่มีกลิ่น	7.54±0.01	ผ่าน
	12	✓	✓	✓	ขวดมีรอยขีดข่วน	ใส	ไม่มีกลิ่น	7.53±0.01	ผ่าน
5	13	✓	✓	✓	ขวดมีรอยขีดข่วน, รอยบุบ	ใส	ไม่มีกลิ่น	7.14±0.03	ผ่าน
	14	✓	✓	✓	ขวดมีรอยขีดข่วน	ใส	ไม่มีกลิ่น	7.20±0.00	ผ่าน
	15	✓	✓	✓	ขวดมีรอยขีดข่วน	ใส	ไม่มีกลิ่น	7.23±0.01	ผ่าน
6	16	✓	-	✓	ขวดมีรอยขีดข่วน, รอยบุบ	ใส	ไม่มีกลิ่น	6.68±0.01	ไม่ผ่าน
	17	✓	-	✓	ขวดมีรอยขีดข่วน	ใส	ไม่มีกลิ่น	6.64±0.02	ไม่ผ่าน
	18	✓	-	✓	ขวดมีรอยขีดข่วน	ใส	ไม่มีกลิ่น	6.64±0.02	ไม่ผ่าน
7	19	✓	✓	✓	ขวดมีรอยขีดข่วน, รอยบุบ	ใส	ไม่มีกลิ่น	8.02±0.01	ผ่าน
	20	✓	✓	✓	ขวดมีรอยขีดข่วน, รอยบุบ	ใส	ไม่มีกลิ่น	8.05±0.00	ผ่าน
	21	✓	✓	✓	ขวดมีรอยขีดข่วน, รอยบุบ	ใส	ไม่มีกลิ่น	8.04±0.06	ผ่าน
8	22	✓	-	✓	ขวดมีรอยขีดข่วน	ใส	ไม่มีกลิ่น	6.26±0.06	ไม่ผ่าน
	23	✓	-	✓	ขวดมีรอยขีดข่วน	ใส	ไม่มีกลิ่น	6.22±0.00	ไม่ผ่าน
	24	✓	-	✓	ขวดมีรอยขีดข่วน, รอยบุบ	ใส	ไม่มีกลิ่น	6.21±0.00	ไม่ผ่าน
9	25	✓	-	✓	ขวดมีรอยขีดข่วน, รอยบุบ	ใส	ไม่มีกลิ่น	6.71±0.09	ไม่ผ่าน
	26	✓	-	✓	ขวดมีรอยขีดข่วน, รอยบุบ	ใส	ไม่มีกลิ่น	6.75±0.02	ไม่ผ่าน
	27	✓	-	✓	ขวดมีรอยขีดข่วน, รอยบุบ	ใส	ไม่มีกลิ่น	6.80±0.01	ไม่ผ่าน
10	28	✓	-	✓	ขวดมีรอยขีดข่วน	ใส	ไม่มีกลิ่น	7.05±0.00	ไม่ผ่าน
	29	✓	-	✓	ขวดมีรอยขีดข่วน, รอยบุบ	ใส	ไม่มีกลิ่น	6.67±0.07	ไม่ผ่าน
	30	✓	-	✓	ขวดมีรอยขีดข่วน, รอยบุบ	ใส	ไม่มีกลิ่น	6.29±0.03	ไม่ผ่าน
11	31	✓	-	✓	ขวดมีรอยขีดข่วน, รอยบุบ	ใส	ไม่มีกลิ่น	6.28±0.02	ไม่ผ่าน

ตารางที่ 1 คุณภาพทางด้านกายภาพของน้ำดื่มบรรจุขวดที่จำหน่ายในเขตเทศบาลนครอุบลราชธานี ประเทศไทย (ต่อ)

ยี่ห้อ	ตัวอย่างที่	รายละเอียดบนฉลาก				ลักษณะบรรจุภัณฑ์	ลักษณะน้ำ	กลิ่น**	pH**	มาตรฐานคุณภาพน้ำดื่มในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิท
		ชื่อบริษัท*	วันหมดอายุ*	สถานที่ตั้งบริษัท*						
น้ำดื่มบรรจุขวดชนิดพลาสติกขุ่น										
11	32	✓	-	✓	ขวดมีรอยขีดข่วน, รอยบุบ	ใส	ไม่มีกลิ่น	6.29±0.02	ไม่ผ่าน	
	33	✓	-	✓	ขวดมีรอยขีดข่วน, รอยบุบ	ใส	ไม่มีกลิ่น	6.27±0.04	ไม่ผ่าน	

✓; พบ, - ; ไม่พบ,

* ประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 383 พ.ศ. 2560 เรื่องการแสดงฉลากของอาหารในภาชนะบรรจุ ได้กำหนดให้มีการแสดงวัน เดือน และปี ผลิต หรือหมดอายุ ชื่อและที่ตั้งของบริษัทผลิต [16]

**ประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 61 พ.ศ. 2524 เรื่องน้ำบริโภคในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิท ได้กำหนดค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำดื่มอยู่ระหว่าง 6.5-8.5 และต้องไม่มีกลิ่น [17]

ตารางที่ 2 ปริมาณแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์ม ฟีคัลโคลิฟอร์ม และ *E. coli* ในตัวอย่างน้ำดื่มบรรจุขวดที่จำหน่ายในเขตเทศบาลนครอุบลราชธานี ประเทศไทย

ยี่ห้อ	ตัวอย่างที่	Coliform (เอ็มพีเอ็นต่อ 100 มิลลิลิตร)	Fecal coliform (เอ็มพีเอ็นต่อ 100 มิลลิลิตร)	<i>E. coli</i> (เอ็มพีเอ็นต่อ 100 มิลลิลิตร)	มาตรฐานน้ำดื่มใน ภาชนะบรรจุที่ปิดสนิท *
น้ำดื่มบรรจุขวดชนิดพลาสติกใส					
1	1	< 2	< 2	ไม่พบ	ผ่าน
	2	< 2	< 2	ไม่พบ	ผ่าน
	3	< 2	< 2	ไม่พบ	ผ่าน
2	4	< 2	< 2	ไม่พบ	ผ่าน
	5	< 2	< 2	ไม่พบ	ผ่าน
	6	< 2	< 2	ไม่พบ	ผ่าน
3	7	< 2	< 2	ไม่พบ	ผ่าน
	8	< 2	< 2	ไม่พบ	ผ่าน
	9	< 2	< 2	ไม่พบ	ผ่าน
4	10	< 2	< 2	ไม่พบ	ผ่าน
	11	< 2	< 2	ไม่พบ	ผ่าน
	12	< 2	< 2	ไม่พบ	ผ่าน
5	13	< 2	< 2	ไม่พบ	ผ่าน
	14	< 2	< 2	ไม่พบ	ผ่าน
	15	< 2	< 2	ไม่พบ	ผ่าน
6	16	< 2	< 2	ไม่พบ	ผ่าน
	17	< 2	< 2	ไม่พบ	ผ่าน
	18	< 2	< 2	ไม่พบ	ผ่าน

ตารางที่ 2 ปริมาณแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์ม ฟีคัลโคลิฟอร์ม และ *E. coli* ในตัวอย่างน้ำดื่มบรรจุขวดที่จำหน่ายในเขตเทศบาลนครอุบลราชธานี ประเทศไทย (ต่อ)

ยี่ห้อ	ตัวอย่างที่	Coliform (เอ็มพีเอ็นต่อ 100 มิลลิลิตร)	Fecal coliform (เอ็มพีเอ็นต่อ 100 มิลลิลิตร)	<i>E. coli</i> (เอ็มพีเอ็นต่อ 100 มิลลิลิตร)	มาตรฐานน้ำดื่มใน ภาชนะบรรจุที่ปิดสนิท *
น้ำดื่มบรรจุขวดชนิดพลาสติกใส					
7	19	< 2	< 2	ไม่พบ	ผ่าน
	20	< 2	< 2	ไม่พบ	ผ่าน
	21	< 2	< 2	ไม่พบ	ผ่าน
8	22	< 2	< 2	ไม่พบ	ผ่าน
	23	< 2	< 2	ไม่พบ	ผ่าน
	24	< 2	< 2	ไม่พบ	ผ่าน
9	25	< 2	< 2	ไม่พบ	ผ่าน
	26	< 2	< 2	ไม่พบ	ผ่าน
	27	< 2	< 2	ไม่พบ	ผ่าน
10	28	< 2	< 2	ไม่พบ	ผ่าน
	29	< 2	< 2	ไม่พบ	ผ่าน
	30	< 2	< 2	ไม่พบ	ผ่าน
น้ำดื่มบรรจุขวดชนิดพลาสติกขุ่น					
11	31	< 2	< 2	ไม่พบ	ผ่าน
	32	< 2	< 2	ไม่พบ	ผ่าน
	33	< 2	< 2	ไม่พบ	ผ่าน

*ประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 61 พ.ศ. 2524 เรื่องน้ำบริโภคในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิท ได้กำหนดให้ตรวจพบปริมาณแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มน้อยกว่า 2.2 เอ็มพีเอ็นต่อ 100 มิลลิลิตร และไม่พบ *E. coli* [17]

จำนวน 12 ตัวอย่าง (ร้อยละ 36) และพลาสติกขาวขุ่นจำนวน 3 ตัวอย่าง (ร้อยละ 9) ที่ไม่มีการระบุวันหมดอายุบนฉลากผลิตภัณฑ์ตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 383 พ.ศ. 2560 เรื่องการแสดงฉลากของอาหารในภาชนะบรรจุ (ฉบับที่ 2) ต้องแสดงถึงวันหมดอายุ นอกจากนี้ค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำดื่มบรรจุขวดพบว่าส่วนใหญ่มีค่าความเป็นกรด-ด่างอยู่ในช่วง 6.21 ± 0.00 - 8.05 ± 0.00 ซึ่งตามมาตรฐานน้ำดื่มในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิทที่กำหนดโดยกระทรวงสาธารณสุขของประเทศไทยฉบับที่ 61 พ.ศ. 2524 นั้น ต้องมีค่าความเป็นกรด-ด่างอยู่ระหว่าง 6.5-8.5 ซึ่งพบว่ามีน้ำดื่มบรรจุขวดทั้งหมด 7 ตัวอย่าง ได้แก่ น้ำดื่ม

บรรจุขวดชนิดพลาสติกใสจำนวน 4 ตัวอย่าง (ร้อยละ 12) ที่มีค่าต่ำกว่ามาตรฐานของกระทรวงสาธารณสุข โดยมีค่าอยู่ในช่วง 6.21 ± 0.00 - 6.29 ± 0.03 และพบว่าน้ำดื่มบรรจุขวดพลาสติกขาวขุ่นจำนวน 3 ตัวอย่าง (ร้อยละ 9) มีค่าต่ำกว่ามาตรฐานของกระทรวงสาธารณสุข คือ มีค่าอยู่ในช่วง 6.27 ± 0.04 - 6.29 ± 0.02

3.2 ปริมาณแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มฟีคัลโคลิฟอร์ม และ *E. coli*

จากการศึกษาถึงคุณภาพทางจุลชีววิทยาในการตรวจหาปริมาณแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์ม ฟีคัลโคลิฟอร์ม และ *E. coli* ในตัวอย่างน้ำดื่มบรรจุขวดที่

จำหน่ายในเขตเทศบาลนครอุบลราชธานี พบว่าตัวอย่างน้ำดื่มบรรจุขวดทั้งหมด 33 ตัวอย่าง มีปริมาณแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์ม และฟิคัลโคลิฟอร์ม น้อยกว่า 2 เอ็มพีเอ็นต่อ 100 มิลลิลิตร และตรวจไม่พบ *E. coli* ผลที่ได้นั้นเป็นไปตามมาตรฐานเมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานของน้ำดื่มในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิทของกระทรวงสาธารณสุขของประเทศไทยที่กำหนดให้มีปริมาณแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์ม น้อยกว่า 2.2 เอ็มพีเอ็นต่อ 100 มิลลิลิตร และตรวจไม่พบ *E. coli* (ตารางที่ 2)

4. อภิปรายผลการศึกษา

จากการจัดบันทึกรายละเอียดผลจากบนผลิตภัณฑ์น้ำดื่มบรรจุขวดที่จำหน่ายในเขตเทศบาลนครอุบลราชธานี พบว่าน้ำดื่มบรรจุขวดส่วนใหญ่มีการระบุชื่อบริษัทที่ผลิต สถานที่ผลิต วันที่ผลิต และวันหมดอายุ แต่มีน้ำดื่มบรรจุขวดชนิดพลาสติกใสจำนวน 12 ตัวอย่าง (ร้อยละ 36) และน้ำดื่มบรรจุขวดชนิดพลาสติกขาวขุ่นจำนวน 3 ตัวอย่าง (ร้อยละ 9) ที่ไม่มีการระบุวันหมดอายุ ซึ่งไม่เป็นไปตามมาตรฐานประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 383 พ.ศ. 2560 เรื่องการแสดงฉลากของอาหารในภาชนะบรรจุ (ฉบับที่ 2) [16] สอดคล้องกับการศึกษาคุณภาพของน้ำดื่มบรรจุขวดในจังหวัดระยอง จากตัวอย่างน้ำดื่มบรรจุขวดทั้งหมด 48 ตัวอย่าง พบว่ามีการระบุรายละเอียดบนผลิตภัณฑ์ (ชื่อบริษัท วันผลิต/หมดอายุ และสถานที่ผลิต) จำนวน 24 ตัวอย่าง (ร้อยละ 50) และไม่ระบุวันผลิต/หมดอายุบนฉลากผลิตภัณฑ์จำนวน 24 ตัวอย่าง (ร้อยละ 50) ซึ่งพบว่าไม่เป็นไปตามมาตรฐานประกาศกระทรวงสาธารณสุข เรื่องการแสดงฉลากของอาหารในภาชนะบรรจุ [4] แต่อย่างไรก็ตามพบว่าน้ำดื่มบรรจุขวดชนิดพลาสติกใสที่จำหน่ายในจังหวัดชลบุรีทั้งหมดทุกตัวอย่างมีการระบุรายละเอียดครบถ้วน น้ำดื่มมีลักษณะใส ไม่มีกลิ่นซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานของน้ำดื่มบรรจุขวดของกระทรวงสาธารณสุขของประเทศไทย [5] และจาก

การศึกษาคุณภาพทางกายภาพของน้ำดื่มบรรจุขวดที่จำหน่ายในจังหวัดน่าน พบว่าตัวอย่างส่วนใหญ่มีการระบุรายละเอียดบนฉลากครบถ้วน และมีลักษณะของน้ำและกลิ่นเป็นไปตามมาตรฐานของน้ำดื่มบรรจุขวดของกระทรวงสาธารณสุขของประเทศไทย ยกเว้น 12 ตัวอย่าง (ร้อยละ 28) จากทั้งหมด 43 ตัวอย่างที่ระบุรายละเอียดบนฉลากไม่ครบถ้วน [8] จากการตรวจพบน้ำดื่มบรรจุขวดบางผลิตภัณฑ์ที่จำหน่ายในเขตเทศบาลนครอุบลราชธานีไม่ระบุวันหมดอายุลงบนฉลากผลิตภัณฑ์ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่บริษัทผู้ผลิตน้ำดื่มบรรจุขวดต้องดำเนินการปรับปรุงฉลากผลิตภัณฑ์ให้ตรงตามมาตรฐานคุณภาพน้ำดื่ม รวมทั้งเจ้าหน้าที่รัฐที่มีอำนาจรับผิดชอบควรเข้มงวดในการตรวจสอบคุณภาพน้ำดื่มให้มากยิ่งขึ้น เพื่อความปลอดภัยและคุณภาพชีวิตของผู้บริโภค

การศึกษาในครั้งนี้พบว่าน้ำดื่มบรรจุขวดทุกตัวอย่างมีค่าความเป็นกรด-ด่างอยู่ในช่วง 6.21 ± 0.00 - 8.05 ± 0.00 โดยตัวอย่างน้ำดื่มบรรจุขวดชนิดพลาสติกใสจำนวน 4 ตัวอย่าง (ร้อยละ 12) และตัวอย่างน้ำดื่มบรรจุขวดชนิดพลาสติกขาวขุ่นจำนวน 3 ตัวอย่าง (ร้อยละ 9) มีค่าความเป็นกรด-ด่างอยู่ในช่วง 6.21 ± 0.00 - 6.29 ± 0.03 เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานของน้ำดื่มในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิทตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 61 พ.ศ. 2524 [17] พบว่าน้ำดื่มบรรจุขวดทั้ง 7 ตัวอย่างนี้ไม่ผ่านมาตรฐานทางด้านค่าความเป็นกรด-ด่าง ซึ่งกำหนดให้มีค่าความเป็นกรด-ด่างอยู่ระหว่าง 6.5–8.5 สอดคล้องกับการศึกษาคุณภาพทางด้านกายภาพ ค่าความเป็นกรด-ด่าง และทางจุลชีววิทยาของน้ำดื่มบรรจุขวดชนิดพลาสติกใสและพลาสติกขาวขุ่นที่ผลิตในจังหวัดบุรีรัมย์ ที่พบว่าน้ำดื่มบรรจุขวด 7 ตัวอย่าง (ร้อยละ 32) ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำดื่มในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิทที่กำหนดโดยกระทรวงสาธารณสุขของประเทศไทย เนื่องจากค่าความเป็นกรด-ด่างที่ต่ำกว่า 6.5 [18] และจาก

การศึกษาคุณภาพทางด้านกายภาพของน้ำดื่มบรรจุขวดชนิดพลาสติกใสและพลาสติกขุ่นที่จำหน่ายในจังหวัดพระนครศรีอยุธยาจำนวน 33 ตัวอย่าง พบว่าน้ำดื่มบรรจุขวดทั้งหมดมีค่าความเป็นกรด-ด่างอยู่ในช่วง 6.26 ± 0.00 - 8.01 ± 0.00 โดยน้ำดื่มบรรจุขวดชนิดพลาสติกใส 3 ตัวอย่าง (ร้อยละ 9) มีค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำกว่ามาตรฐานน้ำดื่มในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิท [3] จากผลการทดลองในครั้งนี้พบว่าน้ำดื่มบรรจุขวดบางตัวอย่างมีค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำกว่ามาตรฐาน คือ 6.5 ดังนั้นบริษัทผู้ผลิตจึงควรมีความระมัดระวังในการตรวจสอบค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำดื่มให้อยู่ในช่วงมาตรฐานก่อนการจัดจำหน่าย รวมทั้งควรมีการปรับปรุงกระบวนการผลิตบางขั้นตอนที่ทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำดื่มไม่ตรงตามมาตรฐาน

น้ำที่ดื่มต่อสุขภาพคือน้ำที่มีฤทธิ์เป็นด่างอ่อน โดยมีความเป็นกรด-ด่างระหว่าง 7.25-8.50 เพื่อช่วยกำจัดความเป็นกรดและของเสียในร่างกายให้เกิดภาวะที่สมดุล น้ำที่มีฤทธิ์เป็นกรดจะมีโปรตอนของไฮโดรเจนซึ่งเป็นประจุบวก (H^+) สูง ดังนั้นจึงทำให้น้ำมีคุณสมบัติเช่นเดียวกับอนุมูลอิสระทั่วไปในการแข่งขันเข้าจับกับอิเล็กตรอนจากเซลล์ใกล้เคียงส่งผลให้น้ำนี้ไม่ควรบริโภค ส่วนน้ำที่มีฤทธิ์เป็นด่างจะมีอิเล็กตรอนที่เป็นประจุลบในปริมาณที่มากพอที่จะเข้าไปหยุดหรือยับยั้งปฏิกิริยาห่วงโซ่ของอนุมูลอิสระ รวมทั้งสามารถป้องกันโรคมะเร็งได้ [19] นอกจากนี้ น้ำที่มีฤทธิ์เป็นกรดมีคุณสมบัติในการกัดกร่อนโลหะ ส่งผลให้มีความเสี่ยงที่ภายในน้ำดื่มอาจปนเปื้อนไอออนของโลหะชนิดต่าง ๆ เช่น สังกะสี เหล็ก แมงกานีส และทองแดง ซึ่งสารเหล่านี้ทำให้น้ำมีรสชาติของโลหะ อีกทั้งสารโลหะไอออนบางชนิดยังมีความเป็นพิษต่อมนุษย์และสาเหตุของโรคต่าง ๆ ทั้งทางตรงและทางอ้อม จึงควรมีการตรวจวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำดื่ม รวมทั้งศึกษาผลของน้ำดื่มบรรจุขวดที่มีฤทธิ์เป็นกรดอ่อนต่อความเสี่ยงในการปนเปื้อนโลหะและปัญหาสุขภาพของผู้บริโภคต่อไปในอนาคต

การตรวจหาแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์ม ฟีคัลโคลิฟอร์ม และ *E. coli* จากตัวอย่างน้ำดื่มบรรจุขวดที่จำหน่ายในเขตเทศบาลนครอุบลราชธานี พบว่าน้ำดื่มบรรจุขวดทั้งหมด 33 ตัวอย่าง มีปริมาณแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มและฟีคัลโคลิฟอร์มน้อยกว่า 2 เอ็มพีเอ็นต่อ 100 มิลลิลิตร และตรวจไม่พบ *E. coli* ดังนั้นตัวอย่างน้ำดื่มบรรจุขวดทุกตัวอย่างจึงผ่านมาตรฐานทางด้านจุลชีววิทยาของน้ำดื่มในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิทตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 61 พ.ศ. 2524 [17] ซึ่งระบุให้มีปริมาณแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มน้อยกว่า 2.2 เอ็มพีเอ็นต่อ 100 มิลลิลิตร และตรวจไม่พบ *E. coli* การศึกษาก่อนหน้านี้ในน้ำดื่มบรรจุขวดชนิดพลาสติกใสและพลาสติกชนิดขาวขุ่นที่จำหน่ายในจังหวัดกาญจนบุรี พบว่าน้ำดื่มบรรจุขวดส่วนใหญ่ตรวจไม่พบแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์ม ฟีคัลโคลิฟอร์ม และ *E. coli* มีเพียงน้ำดื่มบรรจุขวด 2 ตัวอย่าง (ร้อยละ 4) ที่พบแบคทีเรียชนิดนี้ทั้ง 3 กลุ่มนี้ [9] แต่อย่างไรก็ตามจากการศึกษาน้ำดื่มบรรจุขวดพลาสติกชนิดขวดขาวขุ่นจำนวน 135 ตัวอย่าง ที่จำหน่ายในเขตเทศบาลนครพิษณุโลก พบว่ามีการปนเปื้อนของแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มน้อยอยู่ในช่วง 0.9-4.0 เอ็มพีเอ็น ต่อ 100 มิลลิลิตร และแบคทีเรียกลุ่มฟีคัลโคลิฟอร์มน้อยอยู่ในช่วง 0.9-4.6 เอ็มพีเอ็นต่อ 100 มิลลิลิตร น้ำดื่มบรรจุขวดพลาสติกชนิดขาวขุ่นจำนวน 11 ยี่ห้อ (ร้อยละ 73) ที่ผ่านมาตรฐานน้ำดื่มในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิทเท่านั้น [20]

น้ำดื่มบรรจุขวดทั้งหมดที่จำหน่ายในเขตเทศบาลนครอุบลราชธานีที่นำมาศึกษาในครั้งนี้ตรวจไม่พบแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์ม ฟีคัลโคลิฟอร์ม และ *E. coli* ทั้งนี้อาจเป็นเพราะกระบวนการบำบัดน้ำดื่มที่ใช้ในกระบวนการผลิตน้ำดื่มบรรจุขวด ได้แก่ กระบวนการ Reverse Osmosis (R.O) การใช้แสงอัลตราไวโอเลต (หลอด U.V.) และการใช้ระบบโอโซน (Ozone) อาจจะสามารถกำจัดแบคทีเรียที่ปนเปื้อนใน

น้ำ การตรวจไม่พบแบคทีเรีย ดังนั้นทั้งสามกลุ่มเป็นการบ่งชี้ได้ว่าน้ำดื่มบรรจุขวดที่จำหน่ายในเขตเทศบาลนครอุบลราชธานี อาจจะปราศจากเชื้อก่อโรคที่มีแหล่งมาจากการปนเปื้อนด้วยสิ่งขับถ่ายของมนุษย์และสัตว์เลือดอุ่น ยกตัวอย่างเช่น *Vibrio cholerae* ที่ก่อโรคอหิวาตกโรค (Cholera) *Shigella flexneri* หรือ *Shigella dysenteriae* ที่ก่อโรคบิด (Bacillary Dysentery) และ *Salmonella paratyphi* ที่ก่อโรคไข้รากสาดหรือไข้ไทฟอยด์ (Typhoid Fever) เป็นต้น จึงทำให้น้ำดื่มเหล่านี้อาจจะปลอดภัยต่อการบริโภคเนื่องจากผ่านมาตรฐานทางด้านจุลินทรีย์ของแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์ม ฟีคัลโคลิฟอร์ม และ *E. coli*

5. สรุป

จากการศึกษาในครั้งนี้ได้ทำการประเมินถึงคุณภาพทางด้านกายภาพ ได้แก่ กลิ่นของน้ำดื่ม และค่าความเป็นกรด-ด่าง คุณภาพทางด้านฉลาก (ชื่อบริษัทที่ผลิต/สถานที่ผลิต/วันที่ผลิต/วันหมดอายุ) และคุณภาพทางจุลชีววิทยา ได้แก่ การตรวจหาแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์ม ฟีคัลโคลิฟอร์มและ *E. coli* จากตัวอย่างน้ำดื่มบรรจุขวดที่จำหน่ายอยู่ในเขตเทศบาลนครอุบลราชธานี พบว่าน้ำดื่มบรรจุขวด 15 ตัวอย่าง ไม่ผ่านมาตรฐานประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 383 พ.ศ. 2560 เรื่องแสดงฉลากของอาหารในภาชนะบรรจุ (ฉบับที่ 2) เนื่องจากไม่มีการระบุวันหมดอายุบนฉลาก และใน 15 ตัวอย่างนี้ มีน้ำดื่ม 7 ตัวอย่างไม่ผ่านมาตรฐานของน้ำดื่มในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิทตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 61 พ.ศ. 2524 เพราะมีค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำกว่า 6.5 นั่นคือ อยู่ในช่วง $6.21 \pm 0.00 - 6.29 \pm 0.03$ และตัวอย่างน้ำดื่มทั้งหมดมีปริมาณแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์ม ฟีคัลโคลิฟอร์มน้อยกว่า 2 เอ็มพีเอ็นต่อ 100 มิลลิลิตร และตรวจไม่พบ *E. coli* ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานทางด้านจุลชีววิทยาของน้ำดื่มในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิทตาม

ประกาศกระทรวงสาธารณสุข ดังนั้นน้ำดื่มบรรจุขวดที่จำหน่ายในจังหวัดอุบลราชธานี ชนิดพลาสติกใสจำนวน 12 ตัวอย่าง (ร้อยละ 36) และพลาสติกขาวขุ่นจำนวน 3 ตัวอย่าง (ร้อยละ 9) ไม่ผ่านมาตรฐานน้ำดื่มในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิทที่กำหนดโดยกระทรวงสาธารณสุขของประเทศไทย ทางด้านกายภาพเนื่องจากไม่ผ่านคุณสมบัติทางด้านค่าความเป็นกรด-ด่าง และ/หรือ ไม่มีการระบุวันหมดอายุบนฉลากผลิตภัณฑ์

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่ให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์และสถานที่ในการทำวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] N. Rattanapanone. (2019, Aug 4). Function of water in body. In Food Network Solution. [Online]. Available: <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/6950/Thefunctionofwaterinthebody%20%20>
- [2] L. Mitremirt. (2017, Feb 20). From bottled drinking water to steam in the air: attempt to deal with a shortage clean water and safe water for consumption. [Online]. Available: <https://thaipublica.org/2017/10/landscape-architecture-and-sustainability02/>
- [3] S. Nimrat and V. Vuthiphandchai, "Physical and microbiological qualities of clear and opaque bottled drinking water distributed in Ayutthaya province," *Journal of Science & Technology Ubon Ratchathani University*, vol. 19, no. 3, pp. 193-207, 2017.

- [4] S. Nimrat, K. Supannapan and V. Vuthiphandchai, "Quality of bottled drinking water distributed in Rayong province, Thailand," *Journal of Science and Technology Mahasarakham University*, vol. 35, no. 5, pp. 538-547, 2016.
- [5] S. Nimrat and V. Vuthiphandchai, "Quality of plastic bottled drinking water, cupped drinking water and water from vending machines distributed in Chon Buri province, Thailand," *Journal of Science and Technology Mahasarakham University*, vol. 33, no. 6, pp. 638-647, 2014.
- [6] S. Nimrat, K. Supannapan, N. Butkhot and V. Vuthiphandchai, "Standard of bottled drinking water distributed in Aug Thong," *RMUTP Research Journal*, vol. 10, no. 2, pp. 135-147, Sep. 2016.
- [7] S. Nimrat and V. Vuthiphandchai, "Monitoring qualities of bottled drinking water sold in Chachoengsao province," *RMUTI Journal*, vol. 9, no. 3, pp. 127-136, 2016.
- [8] S. Nimrat and V. Vuthiphandchai, "Physical and microbiological qualities of clear bottled drinking water distributed in Nan province," *Journal of Science & Technology Ubon Ratchathani University*, vol. 16, no. 3, pp. 57-64. 2014.
- [9] S. Nimrat, S. Supannapan and V. Vuthiphandchai, "Quality of bottled drinking water distributed in Kanchanaburi province, Thailand," *Journal of Science and Technology Mahasarakham University*, vol. 34, no. 1, pp. 63-73, 2014.
- [10] D. Suttapreyasri, U. Tansuphasiri and N. Kungskulniti, "Quality of drinking water in Bangkok," *Mahidol Journal*, vol. 3, no. 4, pp. 167-171, 1996.
- [11] K. Sirisingha, *Chemistry of Water, Wastewater and Analysis*, 4th ed. Bangkok: Wisan Printing House, 2006.
- [12] A. Pumpuang, A. Cheewaphan, J. Amnouypon, Y. Supasirisun, T. Teawrattanukul, N. Pidet, N. Sampoonyachote, S. Ratthanasathian, S. Pewklieng and S. Boonsilp, "Prevalence and antibiotic susceptibility profile of fecal coliform isolated from beverage sold in Sangkhalok community," *Vajira Medical Journal: Journal of Urban Medicine*, vol. 61, no. 2, pp. 75-82, 2017.
- [13] S. Charoenmukayanan. (2018, Feb 4). Ubon Ratchathani province information. [Online]. Available: <https://www.77kaoded.com/content/40992>
- [14] American Public Health Association, American Water Works Association & Water Environment Federation, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 22nd ed. Baltimore: American Public Health Association, 2012.
- [15] J. L. Kornacki and J. L. Johnson, "Chapter 8: Enterobacteriaceae, coliforms, and *Escherichia coli* as quality and safety indicators," in *Compendium of Methods for the Microbiological Examination of Foods*, F. P. Downes and K. Ito, 4th ed.

- Washington DC: American Public Health Association, 2001, pp. 69-82.
- [16] Bureau of Food, Food and Drug Administration, Ministry of Public Health. (2019, Jan 20). Notification of the Ministry of Public Health No. 383, B.E. 2560 (2017), Re: The labeling of pre-packaged foods (No.2). [Online]. Available: <http://www.ratchakitcha.soc.go.th/DATA/PDF/2560/E/097/24.PDF>
- [17] Bureau of Food, Food and Drug Administration, Ministry of Public Health. (2019, Jan 20). Notification of the Ministry of Public Health (No.61) B.E. 2524 (1981) Re: Drinking water in sealed containers. [Online]. Available: <http://www.ratchakitcha.soc.go.th/DATA/PDF/2524/D/157/52.PDF>
- [18] S. Nimrat, N. Suechamnongkitchakarn, K. Supannapan and V. Vuthiphandchai, "Assessment of physical, pH and microbiological qualities of bottled drinking water produced in Burirum province, Thailand," *RMUTP Research Journal*, vol. 9, no. 2, pp. 32-43. 2015.
- [19] S. Varakamin, *Water for Life*, 5th ed. Bangkok: Samcharoen Panich Co. Ltd, 2006.
- [20] A. Phensri and P. Wachirawongsakorn, "The microbiological quality of polyethylene bottled drinking water sold in Phitsanulok municipality, Phitsanulok province," in *Proceeding of 4th Science Research National Conference*, Faculty of Science, Naresuan University, 2012, pp. 285-288.

<http://journal.rmutp.ac.th/>

Properties of Polypropylene Conductive Fiber from Sheath-Core Bicomponent Fiber

Natee Srisawat* and Piyanut Jingjit

Department of Textile Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Klong 6, Thanyaburi, Pathumthani 12110

Received 29 June 2020; Revised 23 October 2020; Accepted 17 December 2020

Abstract

This is the study of a conductive sheath-core bicomponent fibers. The intentions of the experiments were to investigate feasibility of conductive sheath-core bicomponent fiber forming, using selected materials, and the fibers' properties. The trails were to extrude the bicomponent fibers with conductive materials in sheath section and supporting materials in core section. The conductive carbon black was selected as conductive material to compound with polypropylene. The virgin polypropylene was chosen as core material in the fibers. It was problematic to form fibers using the conductive carbon black polypropylene compound alone, therefore, the virgin polypropylene was used as the core section in the fibers to promote production stability. The sheath-core carbon black compound bicomponent fibers were steadily produced with designated machine settings. The produced fibers were tested for their physical and mechanical properties and electrical conductivity. The results shows that the fibers with the carbon black polypropylene compound as the fibers' sheath section and the virgin polypropylene as the fibers' core section, have conductive property. The conductivity of the fibers increased when their sheath sections were thicker as the ratio of the carbon black compound become higher. Even though, thicker sheath section of the fibers (40% and over) have higher conductivity, the physical properties of the fibers become weaken and less applicable as textile fibers.

Keywords : Bicomponent Fiber; Polypropylene Fiber; Conductive Fiber; Carbon Black

* Corresponding Author. Tel.: +662 549 3451, E-mail Address: natee.s@en.rmutt.ac.th

1. Introduction

Fiber is a fundamental material for yarns, fabrics, clothing, and functional textiles. The advancement of on-going textile science and technology demands new materials to accomplish new needs and developments. The conductive textiles as flexible materials have been explored for the possibilities of improvement [1]-[3]. Conductive textiles are generally needed for both of their antistatic and conductive properties. A common measurement of the conductive property of textile materials is surface resistance (SR). The surface resistance of textile fibers justified as antistatic materials oblige to be between 10-108 ohm-sq [4]. A fundamental principle of forming conductive fibers is their capability of dispersing and transferring electric charge [5]. There are alternative approaches to make conductive fibers, for example impregnating with conductive particles, surface coating with conductive materials, etc [6], [7]. To make fibers with adequate conductivity using common impregnated conductive materials such as metal powder, conductive carbon black powder, and carbon nanotube, considerable amount of them are required, which consequently make the fiber forming problematic as well as curtail their physical properties [8]-[10]. To overcome such obstacle, sheath-core bicomponent fiber forming is an alternative positive method that has been proved to generate smoother production [11], [12]. The attempt to produce the conductive fibers with the conductive materials as the fibers' sheath and a strong

supporting material such as their core is a promising alternative. The aims of this study were finding applicable proportions of the sheath and core in the fibers and their properties. The experiments used carbon black powder impregnated in sheath section of the fibers for build up their conductive properties.

2. Research Methodology

The materials in this study were polypropylene polymer of Moplen HP61R from HMC Polymer Co.,Ltd. as a core side of the extruded fibers and 18% carbon black conductive (Timcal Ensaco 250G) mix-melted with 82% ExxonMobil™ PP7555KNE2 compound, produced at Salee Colour PLC, as a sheath side of the extruded fibers.



Fig. 1 Lab scale bicomponent extruder fed spinning machine model LBS-100, Hills, Inc.

The bicomponent fibers were formed with Lab Scale Bicomponent Extruder Fed Spinning Machine - Model LBS-100 by Hills, Inc., as shown in **Fig. 1**. The type of the bicomponent fiber

extrusions was the spin pack type 24-extrusion-sheath-core spinnerets with 0.5 mm. diameter. The extruded fibers were wound up using Leesona winding machine with 300 m/min winding speed. The setting conditions for the fibers are shown in **Table 1**.

Table 1 The bicomponent fiber extrusion machine conditions and fiber winding speeds

S/C	Melt Pump (A+B=12 rpm)	Temperature (°C)				Spin head	Spinning speed (m/min)
		Extruder A		Extruder B			
		A1	A2	B1	B2		
100/0	12 / 0						
90/10	10.8 / 1.2						
80/20	9.6 / 2.4						
70/30	8.4 / 3.6						
60/40	7.2 / 4.8						
50/50	6.0 / 6.0	210	220	210	220	230	300
40/60	4.8 / 7.2						
30/70	3.6 / 8.4						
20/80	2.4 / 9.6						
10/90	1.2 / 10.8						
0/100	0 / 12						

Remark: S/C = sheath-core, A1 and A2 = barrel temperature zone 1 and 2 of extruder A, B1 and B2 = barrel temperature zone 1 and 2 of extruder B

Ash Content: The ash content of the samples were tested following ASTM D 3173-73 testing standard using burning crucible at 780 °C for 45 minutes.

Optical Microscope (OM): The optical microscopic examination, using Olympus CX41 microscope with 4X magnifying power was performed and recorded with connected CCD.

Scanning Electron Microscopy (SEM): The surface of the bicomponent fiber specimens was inspected using scanning electron microscope: JEOL JSM-5410LV with gold sputtering coating at 20 kV, 500 and 2,000 magnifications. The SEM image of the sheath (CB-PP compound)/Core (PP) of the bicomponent fibers at S/C 40/60 ratio (scale bar: 50 and

40 micrometer) were taken with thermos scientific Prisma E – low vacuum mode.

Fiber strength test: The sheath-core bicomponent fibers (CB-PP compound /PP) with winding speed at 300 m/min were tested to evaluate their strengths using tensile strength tester (INSTRON 5569), following the ASTM D3822 Standard Test Method for Tensile Properties of Single Textile Fibers, with gauge lengths of 25 mm [1.0 in.], load cell of 10 N, and crosshead speed at 20 mm/min.

Fiber Shrinkage test: The fibers were tested for measuring their shrinkages following the ASTM D5104-02 Standard Test Method for Shrinkage of Textile Fibers (Single-Fiber Test), where the individual fibers were cut and attached on the upper and lower sides of the specimen template under standard testing condition at 88°C for 5 min., the 10 random specimens were tested. The shrinkage percentages of their values were calculated using the following equation (equation 1).

$$\% \text{ Shrinkage} = \frac{L_0 - L_1}{L_0} \times 100 \quad (1)$$

where

L_0 = fiber length before test (mm)

L_1 = fiber length after test (mm)

Moisture content test: The fibers were tested to measure their capability to contain moisture using common procedure by putting them into oven at 105°C for 30 min. The fibers were conditioned in standard testing environment of controlled relative

humidity and temperature for 6 hours before the tests. The percentage of the moisture content of each fiber was calculated using the following equation (2).

$$\% \text{ Moisture content} = \frac{W_0 - W_1}{W_0} \times 100 \quad (2)$$

where

W_0 = Conditioned weight of the specimen (g)

W_1 = Oven dry weight of the specimen (g)

Differential Scanning Calorimeter (DSC): The thermal properties of the fibers were tested using the DSC 200 F3: NETZSCH system with heating and cooling mechanism at 10°C/min started from 30 °C to 200 °C and vice versa. The thermal history of the tests were diminished at 200 °C for 5 min. Crystallinity of studied samples was also calculated using the following equation. (equation 3)

$$x = \left(\frac{\Delta H}{(1 - W_f) \Delta H^*} \right) \times 100 \quad (3)$$

where W_f is the weight fractions of nanocomposite filler, ΔH refers to the measured melting enthalpy and ΔH^* denotes 100 % crystalline polypropylene that equals 209 J/g. [13]

Electrical surface resistivity: The electrical surface resistivity (SR) of the compound fibers were conducted using the Surface resistivity detector: OHM-STAT® RT-1000, Hudson (USA).

3. Results and Discussion

The ash contents of the carbon black polypropylene conductive compound are presented in **Table 2**.

Table 2 Ash contents of the polypropylene conductive compound

Number of Sample	Crucible (g)	PP Compound+ crucible (g)	Carbon Black powder (after burning) (g)	% Ash Content
1	39.44	41.22	1.78	17.80
2	45.53	47.33	1.80	18.00
3	35.87	37.68	1.81	18.10
average			1.79	17.97

It has been successfully proved that mixing carbon black with polypropylene to produce conductive fibers using single screw melt spinning system was achievable. The amount of the carbon black particles and its dispersing pattern are primary considering factors because the unbroken conductive network will be formed only when the matrix has enough conductive particles. The carbon black content used in their experiments were varied but when it reached 8 wt% the single screw fiber spinning become unattainable. [14] The spinning of immiscible polymer blends in single screw system would face difficulties because of weak interactions of the two phases which made their mechanical properties too weak to be stretched out. The bicomponent fiber spinning would strengthen the fibers with strong pure polymer as its core and desirable property polymer on its sheath. [15] The melt spinning into sheath-core bicomponent fibers with low take-up mechanism induced crystallization during the fibers being stretched with made them stronger comparing to the single screw spinning.

[16] Therefore, in this experiment, the ash content of the conductive carbon powder-polypropylene compound chips was approximately 18 wt%. The eleven lots of sheath-core bicomponent fibers with the different material ratios between sheath sections and core sections were successfully produced with the assigned machine setting using the melt pump speed at 12 rpm and winding speed at 300 m/min. The fiber drawing mechanism will distance the carbon black particles apart which lesser their conductive property. [14]

The extruded bicomponent fibers were examined using optical microscope for cross-section configuration to analyze the correlation of the pressure at the screw ends before spinpack (A=core, B=sheath) as shown in **Table 3**. The designated eleven experimental bicomponent fiber productions were conducted using the Hills' spinning machine. The produced fibers were examined on their cross-sections with an optical microscope to study characteristic and the proportion of sheath and core sections in the fibers. When the compound materials were melted in their extruder barrels on each side of the machine - the sheath section (conductive carbon black polypropylene compound) in extruder barrel B, and the core section (virgin polypropylene) in extruder barrel A – the pressures, measured at the end of the screws before enter the melt pumps, were considerably different. The pressure in the extruder barrel B was higher than the pressure in the extruder A, indicating that carbon black particles in the compound affected

the extrusion pressures. The pressure at the end of the screws become higher when the compound contain higher percentage of the carbon black, as an example of the pressures in each side of the screws from one of the experiments showed that the pressure of the screw contain virgin polypropylene was 810 psi while the pressure of the screw contain carbon black polypropylene compound was 1,455 psi.

Table 3 Monitoring pressures at screw ends before the spinpacks

No.	Ratio (S/C)	Pressure extruder A (psi)	Pressure extruder B (psi)
1	100/0	0	1455
2	90/10	442	1397
3	80/20	499	1335
4	70/30	534	1156
5	60/40	603	1190
6	50/50	651	1124
7	40/60	688	1030
8	30/70	720	937
9	20/80	756	826
10	10/90	783	650
11	0/100	810	0

Remark: extruder A=core side, extruder B=sheath side

The images in **Fig. 2** show the cross-section of the sheath-core bicomponent extruded fibers with free-fall finishing up mechanism. The microtome cutting technique was used for the specimen preparations. The cross-section images of the sheath-core bicomponent fiber of conductive carbon black/polypropylene in which the fibers' cores are polypropylene and the fibers' sheaths are conductive carbon-black polypropylene compounds. The images clearly reveal the boundaries of the sheath and core of the fibers, except the image a. which is carbon black polypropylene compound and the image k which is sole polypropylene. The

specimens were prepared according to their ratios of the sheath and core polymers in the melt pump settings. The cross-section images of the fibers with the free-fall mechanism show deviation diameters, as a result of the stretching by its own weight. However, the melt pump setting would be able to efficiently appoint the core and sheath ratios of the fibers.

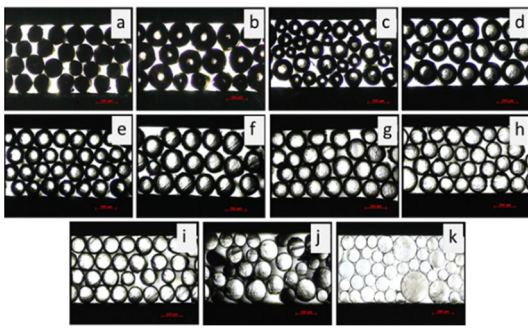


Fig. 2 The 4X magnification cross-section images of Sheath (CB-PP compound)/Core (PP) bicomponent fibers: a) 100/0 b) 90/10, c) 80/20, d) 70/30, e) 60/40, f) 50/50, g) 40/60, h) 30/70, i) 20/80, j) 10/90, k) 0/100

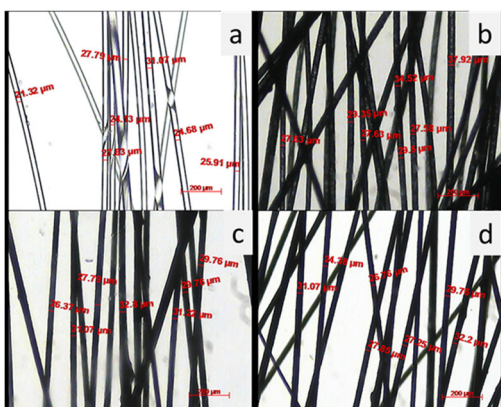


Fig. 3 The 4X magnification longitudinal images of Sheath (CB-PP compound)/Core (PP) bicomponent fibers: a) 0/100, b) 20/80, c) 50/50, d) 80/20

The longitudinal view of the selected fibers is illustrated in **Fig. 3** in which, a) is the microscopic image of sheath-core 0/100 bicomponent fibers, b) is the microscopic image of sheath-core 20/80 bicomponent fibers, c) is the microscopic image of sheath-core 50/50 bicomponent fibers, and d) is the microscopic image of sheath-core 80/20 bicomponent fibers.

The images reveal that the average diameter of the fibers is approximately 30 micrometers. They also show that the bicomponent fibers without conductive carbon black in the sheath section (image k in **Fig. 2**) have markedly higher light transmittance than the fibers with conductive carbon black. The fibers in images b), c) and d) in **Fig. 3** appear as black fibers with very low degree of light transmittance and the surfaces of the fibers are not as smooth as the fibers without the conductive carbon black, some particle of the conductive carbon black randomly emerges on the outer surface of the fibers.

The SEM images in **Fig. 4** and **Fig. 5**, clearly show the smooth surfaces of the fiber which no conductive carbon black powder added. On the other hand, the images b), c), and d), taken from the fibers with conductive carbon black additive, have rough and uneven surfaces which affirm that the conductive carbon black powder particles appear on the fiber surfaces. The surfaces with higher ratio of sheath appear to have denser particles on the surfaces.

The test results of the fiber strength display in **Fig. 7** which clearly indicate the

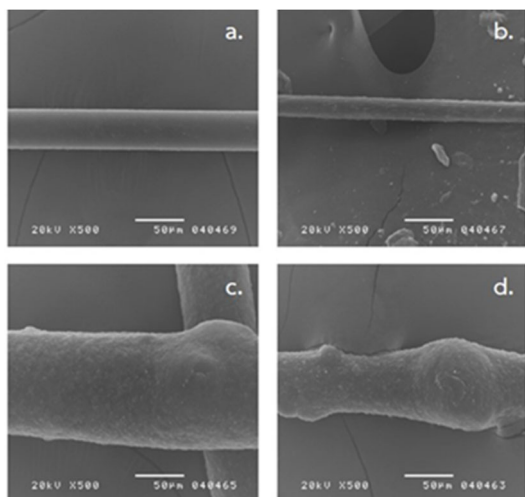


Fig. 4 SEM magnification (500X) images of Sheath (CB-PP compound)/Core (PP) bicomponent fibers at four different S/C ratios: a. 0/100, b. 20/80, c. 50/50, d. 80/20

descending tendency of the fibers' strengths as the sheath ratio of the conductive polypropylene compound increase. The fiber strength become higher when the sheath ratio were increased until it reach sheath ratio at 20 then the fiber strength become lesser. This affirmed by Bosak's experiments which indicated that the thinner sheath resulted higher fiber spinnability. [15] The specimen with highest stress scale is the sheath-core component fiber with ratio of 20/80 between the carbon black polypropylene compound and polypropylene virgin. The elongation at break of the fibers had also taken into the consideration. The fibers' elongations increase as the core section of polypropylene virgin increase, which the highest value when the core section reach ratio of 20/80 between the carbon black polypropylene compound and polypropylene virgin. The fiber elongation become higher when the sheath ratio were increased until it reach sheath ratio at 20 then the fiber elongation

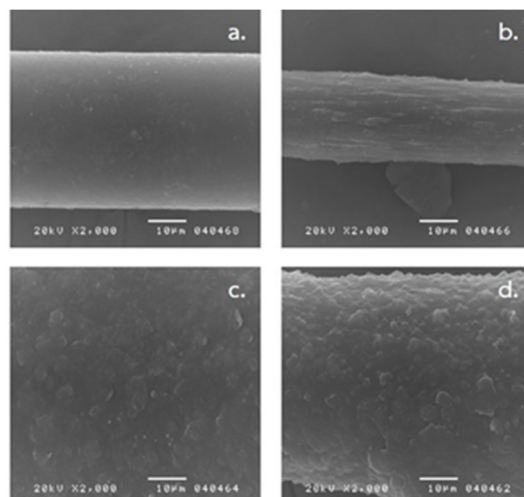


Fig. 5 SEM magnification (2000X) of Sheath (CB-PP compound)/Core (PP) bicomponent fibers at four different S/C ratios: a. 0/100, b. 20/80, c. 50/50, d. 80/20

become lesser. The elongations at break of the sheath-core bicomponent fibers are illustrated in **Fig. 8**. The results correspond to I. Islam et al. [17] that the tensile properties of the compound materials become higher when adding carbon black in the matrix, until it reach 15 wt% and their strength and elongation would drop as soon as the content of carbon black exceeded 15 wt%. The depreciated strengths were correlated with the crystalline region in the fibers as shown in **Table 5**.

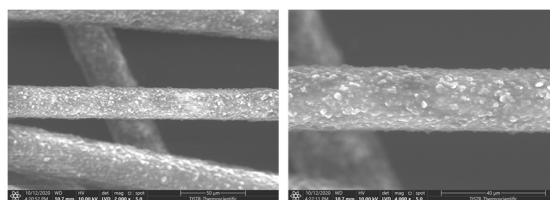


Fig. 6 SEM image of Sheath (CB-PP compound)/Core (PP) bicomponent fibers at S/C ratios: 40/60 (scale bar: 50 and 40 micron from Thermo scientific Prisma E – low vacuum mode)

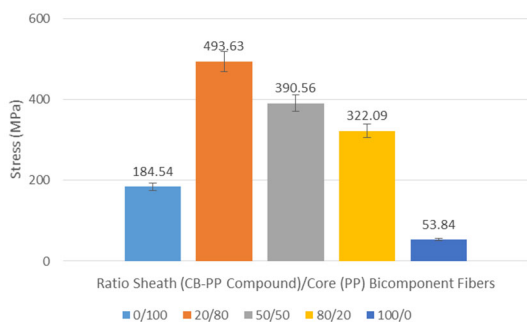


Fig. 7 Tensile strengths of the Sheath (CB-PP compound)/Core (PP) bicomponent fibers

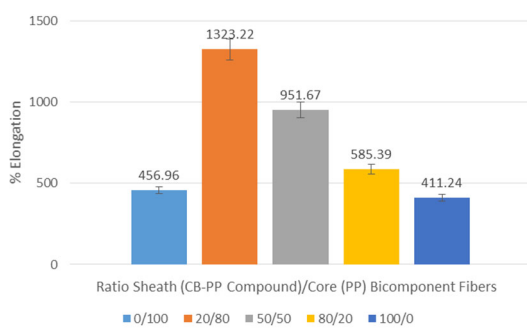


Fig. 8 Elongation at break of the Sheath (CB-PP compound)/Core (PP) bicomponent fibers

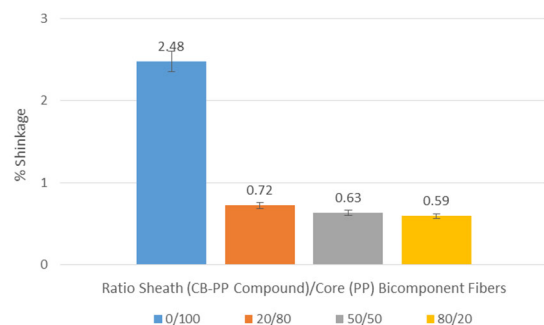


Fig. 9 Fiber shrinkages of the Sheath (CB-PP compound)/Core (PP) bicomponent fibers

The averages of shrinkage percentages of the tested samples display in **Fig. 9**. The fiber shrinkage test results indicate that the

ratios between the conductive polypropylene compound as sheath material and virgin polypropylene as core material influence their shrinkage values. The highest degree of fiber shrinkage is the 0/100 S/C which the domination of the material is polypropylene virgin. On the other hand, the lowest degree of fiber shrinkage is the 80/20 S/C which the conductive polypropylene compound as fiber sheath thickening its outer layer made it more rigid and stable, the higher ratio of sheath section of conductive polypropylene compound the lower degree of the fiber shrinkages.

Table 4 Moisture content of the Sheath (CB - PP compound) / Core (PP) bicomponent fibers

Ratio S/C	Moisture content (%)
0/100	1.05
10/90	0.47
20/80	0.38
30/70	0.31
40/60	0.27
50/50	1.09
60/40	0.97
70/30	0.56
80/20	0.38
90/10	0.56
100/0	0.62

Table 5 Thermal properties of the Sheath (CB-PP compound)/Core (PP) bicomponent fibers

Ratio S/C	T _m (°C)	T _c (°C)	% Crystallinity
0/100	170.2	117.1	35.57
20/80	168.3	118.0	31.80
50/50	166.9	118.2	28.00
80/20	168.3	120.0	26.60

The results of moisture contents (**Table 4**) the sheath-core conductive bicomponent fibers at different S/C ratio

indicate that each fiber contain moisture less than 1.0 wt%. The moisture contents of the fibers show insignificant differences because the conductive carbon black and polypropylene are considered as hydrophobic materials.

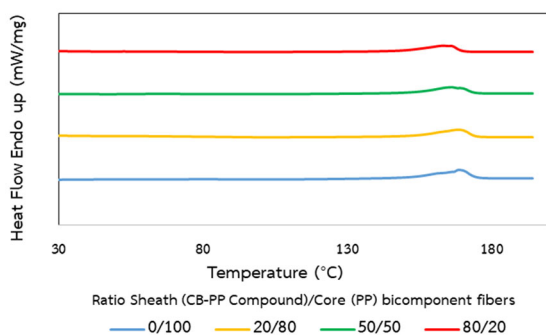


Fig. 10 Thermal properties of the Sheath (CB-PP compound)/Core (PP) bicomponent fibers

By adding carbon black particles into the polypropylene matrix to form fibers, the crystallization were deterred which altered their thermal properties such as melting temperature and supramolecular crystalline structure, so the mechanical and electrical properties were also shifted. [18] The DSC test results, shown in **Table 5** and **Fig. 10**, indicate that melting temperature (T_m) of the bicomponent samples with different compound ratios are between 168.3 - 170.2 °C. The higher conductive carbon black powder in the compounds is the lesser percentage of their crystallinities, this is because the carbon black powder absorbed energy from the core section, (Polypropylene Virgin), which activates the crystallization of the compound earlier, comparing with the crystallization of the pure polypropylene. The

crystallization temperatures (T_c) of the compounds also developed the similar outcomes. These outcomes of isothermal and non-isothermal crystallization occur while the molten polymer matrix was cooling down and carbon black particles become nucleation centers which generate crystal growth. The nucleation modify polymer morphology which lead to collapse of polymer spherulitic structure. Besides, the nucleation increases polymer crystallization temperature yet heighten the crystals' melting temperature. [19] It is also found that by lessening surface free energy of nucleating additives, the crystallization temperature will be increased. [20]

To make polypropylene compound matrix become conductive, there must have enough carbon black particles dispersed throughout that it reach the percolation threshold. [14] The percolation threshold is the point that conductive particles in the materials congregate and touch one another or be close enough for electrons to tunneling hop and become conductive path or network. [21] The surface resistivity meter is the device to measure the leakage of current along an insulating material surface which can be applied to rate their conductive properties. The experimental results showed that the surface resistance of the sheath-core conductive bicomponent fibers increased if the fiber samples had higher ratio of conductive sheath section comparing with the ones with lesser ratio of the section. The surface resistivity of the samples at 2×10^{12} ohm/sq, the material is considered as

insulative material. The results of surface resistance are shown in **Table 6**. The results conform to Y. Li et al. [21] that the percolation threshold was reached when there were enough carbon black particles in the composite that sharply lowered the volume resistivity when the insulating materials become conductive materials. Despite the percolation threshold, the over excessive amount of carbon black in the matrix would not further decrease the volume resistivity because the conductive network has already exist.

Table 6 Surface resistance of the Sheath (CB-PP compound)/Core (PP) bicomponent fibers

Ratio S/C	Surface resistance (ohm/sq)
100/0	8.14×10^5
90/10	3.65×10^5
80/20	2.70×10^5
70/30	3.09×10^6
60/40	1.66×10^6
50/50	1.72×10^6
40/60	5.80×10^7
30/70	9.47×10^{12}
20/80	1.50×10^{11}
10/90	2.00×10^{12}
0/100	2.00×10^{12}

The surface resistivity test results, in **Table 6**, show that when the sheath section of the bicomponent fibers becomes thicker, the conductive property of the fiber becomes higher accordingly. Therefore, when the sheath section of the fibers reach 40%, the fibers turned into dissipative material according to the conductive in **Table 6**. This is because the compound materials has denser conductive carbon black particles on their surfaces which correlated with microscopic images and SEM images of the fibers as show in **Fig. 6**.

4. Conclusion

The conductive property of the fibers was gained by adding conductive carbon black powder in the sheath section of the experimented bicomponent fibers and the fiber forming processes were eased with the virgin polypropylene as their core section. The different proportions of the sheath and core sections in the bicomponent fibers presented different amount of conductivity. The proportions that produced adequate conductive property when sheath section were 40% and above. However, when the conductive sheath sections become higher the strength of the fibers were diminished.

Though, there are many alternative methods to produce conductive fibers, the fibers with carbon black compound as conductive material is considered longer-lasting than other methods. The fibers with conductive property require substantial amount of carbon black particles, therefore, sheath-core bicomponent technique allows the fibers to be steadily formed with adequate strength. These fibers have high potential to be further formed into nonwoven fabric with spunbond and meltblown techniques. There are several potential applications of the conducting fibres such as occupational work wears (e.g. antistatic mechanic working dress and glove), industrial uses (e.g. antistatic place mat for fuel-combustion machine and equipment), weather shields (e.g. weather shield glove), and packaging (e.g. antistatic bag for storing electronic components).

5. Acknowledgement

The authors would like to acknowledge Rajamangala University of Technology Thanyaburi for RMUTT financial budget in fiscal year 2019 and Salee Colour PLC for conductive compounds.

6. References

- [1] J.W.S. Hearle, *High Performance Fibres*, New York: CRC Press, 2001.
- [2] T. A. Skotheim and J. R. Reynolds, *Handbook of Conducting Polymers*, 3rd ed. Conjugated Polymers (Processing and Application), CRC Press, Taylor & Francis Group, 2007.
- [3] Firstcon Services Co.,Ltd. (2020, May 28). Anti-Static & Conductive Floor. [Online] Available: <https://www.firstconservices.com/anti-staticconductivefloor>
- [4] PREMIX. (2019, Feb. 10) Electrically conductive and static dissipative compounds. [Online]. Available: <https://www.premixgroup.com/electrically-conductive-plastics/pre-elec-product-family/>
- [5] K. Chatterjee, J. Tabor and T. K. Ghosh, "Electrically Conductive Coatings for Fiber-Based E-Textiles," *Fibers*, vol. 7, no. 6, p. 51, Jun. 2019.
- [6] R. Neelakandan and M. Madhusoothanan, "Electrical Resistivity Studies on Polyaniline Coated Polyester Fabrics," *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, vol. 5, no. 3, Sep. 2010.
- [7] C. Prahsarn. (2019, Feb. 10). Conductive Textiles. [Online] Available: https://www2.mtec.or.th/th/e-magazine/countfavor_column.asp?a=load&fileid=409&Run_no=dlkejlhdl
- [8] A. Marcincin, M. Hricova and A. Ujhelyiova, "Spinning Structure and Properties of PP/CNTs and PP/carbon Black Composite Fibers," in *Proceeding of 2nd International Conference on Structural Nano Composites (NANOSTRUC 2014)*, 2014.
- [9] J. C. Kearns and R. L. Shambaugh, "Polypropylene fibers reinforced with carbon nanotubes," *Applied Polymer Science*, vol. 86, no. 8, pp. 2079-2084, Nov. 2002.
- [10] B. Kim, V. Koncar and E. Devaux, "Electrical Properties of Conductive Polymers: PET-Nanocomposites' Fibres," *AUTEX Research Journal*, vol. 4, no. 1, pp. 9-13, 2004.
- [11] M. Maqsood and G. Seide, "Novel Bicomponent Functional Fibers with Sheath/Core Configuration Containing Intumescent Flame-Retardants for Textile Applications," *Materials*, vol. 12, no. 19, p. 3095, Sep. 2019.
- [12] J. Boonlertsamut, S. Thumsorn, T. Umemura, H. Hamada and A. Sakuma, "Spinnability and characteristics of polyoxymethylene-based core-sheath bicomponent fibers," *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, vol. 14, pp. 1-7, Jan. 2019.

- [13] W. G. F. Sengers, O. Berg, M. Wübbenhorst, A. D. Gotsis and S. J. Picken, "Dielectric spectroscopy using dielectric probes: a new approach to study glass transition dynamics in immiscible apolar polymer blends," *Polymer*, vol. 46, pp. 6064-6074, Jul. 2005.
- [14] A. Nelvig and B. Hagström. (2020, June 18). Melt Spinning of Conductive Textile Fibers, [Online] Available: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:870577/FULLTEXT01.pdf>
- [15] D. Bosak, A. Ogale and J. Dun, "Bicomponent Fibers Derived from Immiscible Polymer Blends," *Textile Research Journal*, vol. 75, pp. 50-56, Jan. 2005.
- [16] T. Kikutani, S. Arikawa, A. Takaku and N. Okui, "Fiber Structure Formation in High-speed Melt Spinning of Sheath-Core Type Bicomponent Fibers," *Seni Gakkaishi*, vol. 51, no. 9, pp. 408-415, 1995.
- [17] I. Islam, S. Sultana, S. Kumer Ray, H. Parvin Nur, M. T. Hossain and W. Md. Ajmotgir, "Electrical and Tensile Properties of Carbon Black Reinforced Polyvinyl Chloride Conductive Composites," *Journal of Carbon Research*, vol. 4, no. 1, Mar. 2018.
- [18] M. Mucha, J. Marszałek and A. Fidrych, "Crystallization of Isotactic Polypropylene Containing Carbon Black as a Filler," *Polymer*, vol. 41, pp. 4137-4142, May 2000.
- [19] T. Sterzynski, M. Lambla, F. Georgi and M. Thomas, "Studies of the Trans-Quinacridone Nucleation of Poly(ethylene-b-propylene)," *International Polymer Processing*, vol. 12, no. 1, pp. 64-71, Mar. 1997.
- [20] A. Yim and L. Pierre, "The effect of interfacial energy on heterogeneous nucleation in the crystallization of polydimethylsiloxane," *J. Polym. Sci. [B]*, vol. 8, pp. 241-245, Mar. 2003.
- [21] Y. Li, S. Wang, Y. Zhang and Y. Zhang, "Electrical Properties and Morphology of Polypropylene/Epoxy/Glass Fiber Composite Filled with Carbon Black," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 98, no. 3, pp. 1142-1149, Nov. 2005.

<http://journal.rmutp.ac.th/>

แบบจำลองพื้นผิวดตอบสนองและการหาสูตรอาหารที่เหมาะสมสำหรับการเพิ่มการผลิตกรดแกมมา-ไลโนเลนิกในมอส *Physcomitrella patens* โดยใช้วิธีพื้นผิวดตอบสนอง

พิชิต โชตค*

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา

96 ถนนปรีดิพนมยงค์ ตำบลประตูลี้ อำเภอเมืองพระนครศรีอยุธยา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา 13000

รับบทความ 14 เมษายน 2563 แก้ไขบทความ 10 พฤศจิกายน 2563 ตอรับบทความ 17 ธันวาคม 2563

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้เพื่อสร้างแบบจำลองสำหรับการผลิตกรดแกมมา-ไลโนเลนิก (GLA) สูงสุดโดยมอส *Physcomitrella patens* ด้วยวิธีพื้นผิวดตอบสนอง (RSM) การทดลองด้วยวิธี RSM ร่วมกับการวางแผนการทดลองแบบเซ็นทรัลคอมโพสิต 3 ปัจจัย (ความเข้มข้นของซูโครส โพลีแซคคาไรด์ในเทรต และกลูตาเมต) และ 5 ระดับ (-2, -1, 0, +1 และ +2) ประกอบด้วย 20 การทดลองเพื่อใช้หาสูตรอาหารที่เหมาะสม ผลจากการทดลอง พบว่าข้อมูลจากการทดลองสามารถนำไปใช้สร้างแบบจำลองพหุนามกำลังสองด้วยสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) มากกว่า 0.95 สำหรับการผลิต GLA การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.0001$) และความเข้มข้นของซูโครส (20-100 กรัมต่อลิตร) และกลูตาเมต (0.5-2.5 กรัมต่อลิตร) มีผลต่อการผลิต GLA อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ซึ่งการผลิต GLA เพิ่มขึ้น 4.61 เท่า ในสูตรอาหารที่ปรับปรุงให้เหมาะสมด้วยวิธี RSM (ซูโครส 62.92 กรัมต่อลิตร โพลีแซคคาไรด์ในเทรต 0.80 กรัมต่อลิตร และกลูตาเมต 1.42 กรัมต่อลิตร) เมื่อเปรียบเทียบกับสูตรอาหารพื้นฐาน BCD ซึ่งค่าที่ได้จากการทดลองนี้ (16.37 มิลลิกรัม GLA ต่อลิตร) ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทำนาย (16.20 มิลลิกรัม GLA ต่อลิตร)

คำสำคัญ : มอส *Physcomitrella patens*; กรดแกมมา-ไลโนเลนิก; พื้นผิวดตอบสนอง; การวางแผนการทดลองแบบเซ็นทรัลคอมโพสิต

<http://journal.rmutp.ac.th/>

Response Surface Modeling and Optimization of Media Nutrients for Enhanced Production of γ -linolenic Acid in the Moss *Physcomitrella patens* Using Response Surface Methodology

Pichit Chodok*

Faculty of Science and Technology, Phranakorn Si Ayutthaya Rajabhat University

96 Pridi Banomyong, Pratu chai, Phranakhon Si Ayutthaya, Phranakhon Si Ayutthaya 13000

Received 14 April 2020; Revised 10 November 2020; Accepted 17 December 2020

Abstract

The objective of this study is to obtain a model that maximize production of γ -linolenic acid (GLA) by the moss *Physcomitrella patens*, employing response surface methodology (RSM). The RSM with a three-variables (sucrose, potassium nitrate and glutamate concentrations) and five-level (-2, -1, 0, 1 and 2) central composite design (CCD) including 20 experimental runs was employed to optimize the medium composition. Results showed that the experimental data could be appropriately fitted into a second-order polynomial model with a coefficient of determination (R^2) more than 0.95 for GLA production. Analysis of variance (ANOVA) revealed that the model was highly significant ($p < 0.0001$) and the effects of the sucrose (20-100 g/L) and glutamate (0.5-2.5 g/L) concentrations on GLA production were significant ($p < 0.05$). The GLA production with the optimized culture medium (sucrose concentration of 62.92 g/L, potassium nitrate of 0.80 g/L and glutamate concentration of 1.42 g/L) by RSM increased 4.61 folds when compared with the standard BCD medium. This experimental value (16.37 mg GLA/L) fit well with the predicted values (16.20 mg GLA/L).

Keywords : Moss *Physcomitrella Patens*; γ -linolenic Acid; Response Surface Methodology; Central Composite Design

* Corresponding Author. Tel.: +668 1578 9980, E-mail Address: pichit_chodok@yahoo.com

1. บทนำ

กรดแกมมา-ไลโนเลนิก (γ -linolenic Acid, GLA) เป็นกรดไขมันไม่อิ่มตัวสายยาวในกลุ่มโอเมก้า-6 (Omega-6 Polyunsaturated Fatty Acid) ที่มีจำนวนคาร์บอน 18 อะตอม และ 3 พันธะคู่ในตำแหน่งคาร์บอนที่ 6, 9 และ 12 เมื่อนับจากปลายคาร์บอกซิล (Carboxyl End) พบในน้ำมันของมนุษย์ และพืชชั้นสูงบางชนิด ได้แก่ อีฟนิ่งพริมโรส (Evening Primrose) โบราจ (Borage) และแบล็คเคอร์แรนท์ (Blackcurrant) มีปริมาณ GLA เท่ากับร้อยละ 9, 21 และ 17 ตามลำดับ [1] ในปัจจุบันมีผลิตภัณฑ์โภชนเภสัช (Nutraceutical) จาก GLA ออกมาจำหน่ายในท้องตลาดหลากหลายชนิด จึงทำให้ GLA เป็นกรดไขมันสายยาวกลุ่มโอเมก้า-6 ที่ได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ประกอบกับมีรายงานการวิจัยทางเภสัชวิทยาของ GLA เป็นที่ประจักษ์แล้วว่า มีประโยชน์ เนื่องจาก GLA จัดเป็นสารตั้งต้นในกระบวนการสังเคราะห์เอโคซานอยด์ (Eicosanoid Precursors) ซึ่งได้แก่ Prostaglandins E1 และ 15-hydroxyeicosatrienoic Acid (15HETE) [1] ดังนั้นการรับประทาน GLA มีผลป้องกันการเกิดโรคอัลไซเมอร์ [2], [3] มีฤทธิ์ต่อต้านเชื้อวัณโรค *Mycobacterium tuberculosis* (Anti-tubercular Activity) [4] ช่วยป้องกันโรคข้ออักเสบรูมาตอยด์ [5] ป้องกันโรคผื่นภูมิแพ้ผิวหนัง [6], [7] ลดความเสี่ยงของการเกิดโรคเมรังเด้านม [8] และป้องกันโรคเบาหวาน [9] จากประโยชน์และความสำคัญของ GLA ส่งผลให้มียานวิจัยมากมายต่างมุ่งเน้นในการหาแหล่งผลิต GLA ชนิดใหม่ ๆ จากพืช ได้แก่ *Aizoon canariense* [10] พืชในวงศ์ Boraginaceae เช่น *Borago morisiana*, *B. pygmaea*, *B. trabutii* และ *B. longifolia* [11], [12] แบล็คเคอร์แรนท์ (*Ribes nigrum* L.) เรดเคอร์แรนท์ (Redcurrant) เช่น *Ribes rubrum* L. กุสเบอร์รี่ (Gooseberry) เช่น *Ribes uva-crispa* L., Jostaberry (*Ribes nidrigolaria* Bauer) [13] พืชในสปีชีส์ *Echium* เช่น *Echium sericeum*

และ *Echium parviflorum* [14] และพืชในวงศ์ Grossulariaceae เช่น *Ribes pallidiflorum*, *R. glabellum* และ *R. pubescens* [15] รวมทั้งงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสกัด GLA จากสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ ตัวอย่างเช่น การสกัด GLA จากเชื้อรา *Mucor zychoe* MTCC 5420 [16] และสาหร่ายเกลียวทอง *Spirulina platensis* [17] รวมทั้งการปรับปรุงพันธุ์ด้วยกระบวนการทางเทคโนโลยีพันธุวิศวกรรม และการพัฒนาวิธีและสูตรอาหารสำหรับการเพาะเลี้ยงเชื้อรา ได้แก่ *Yarrowia lipolytica* [18] *M. circinelloides* [19] และ *Aspergillus oryzae* [20] ดังนั้นการผลิต GLA ด้วยวิธีทางเทคโนโลยีชีวภาพเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง ที่ได้รับความสนใจ และมีการศึกษากันอย่างต่อเนื่อง

มอส *Physcomitrella patens* (Hedw.) Bruch & Schimp. เป็นพืชชั้นต่ำ (Lower Plant) ที่สามารถผลิต GLA ได้ เนื่องจากมีวิถีของการสังเคราะห์กรดไขมันไม่อิ่มตัวสายยาวทั้งในกลุ่มโอเมก้า-3 และโอเมก้า-6 [21], [22] แต่อย่างไรก็ตามการเพาะเลี้ยงเซลล์ *P. patens* ในสูตรอาหารพื้นฐาน BCD ยังมีการผลิตกรดไขมันชนิดนี้ในปริมาณน้อยมาก ซึ่งผลิตได้เพียง 3.55 มิลลิกรัม GLA ต่อลิตร การปรับปรุงสูตรอาหารเพื่อเพิ่มปริมาณการผลิต GLA ด้วยกระบวนการทางเทคโนโลยีชีวภาพจึงเป็นเรื่องที่น่าสนใจ สอดคล้องกับงานวิจัยของ P. Chodok [23] ได้ศึกษาผลของสารอาหาร 3 ชนิด ได้แก่ น้ำตาลซูโครส โพแทสเซียมไนเตรต และกลูตาเมตต่อการเพิ่มการผลิต กรดไดโฮโม-แกมมา-ไลโนเลนิก (Dihomo- γ -linolenic Acid, DHGLA) ในเซลล์ *P. patens* ด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM) พบว่าการเพาะเลี้ยงเซลล์ *P. patens* ในสูตรอาหารที่เหมาะสมสามารถผลิต DHGLA ได้เพิ่มขึ้น 8.67 เท่า หรือเพิ่มขึ้นจาก 1.27 เป็น 11.01 มิลลิกรัม DHGLA ต่อลิตร จากข้อมูลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าสารอาหารทั้ง 3 ชนิดนี้มีส่วนช่วยให้เซลล์ *P. patens* ผลิตกรดไขมัน DHGLA ได้เพิ่มขึ้น จึงมีความเป็นไปได้ที่จะช่วยเพิ่มการผลิต

GLA ด้วยเช่นกัน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของสารอาหารทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ น้ำตาล ซูโครส โพแทสเซียมไนเตรต และกลูตาเมตที่เหมาะสมสำหรับการเพิ่มการผลิต GLA ในเซลล์ *P. patens* ด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง และวางแผนการทดลองแบบ เซ็นทรัลคอมโพสิต (Central Composite Design, CCD) โดยมีปัจจัยที่ศึกษาจำนวน 3 ปัจจัย และ 5 ระดับ (-2, -1, 0, +1, +2) ประกอบด้วย 20 ชุดการทดลอง ซึ่งองค์ความรู้และข้อมูลพื้นฐานที่ได้สามารถนำไปประยุกต์สู่การพัฒนากระบวนการผลิต GLA ในระดับอุตสาหกรรมเชิงพาณิชย์ รวมทั้งการใช้ประโยชน์ในทาง แพทย์ เภสัชกรรม เครื่องสำอาง ผลิตภัณฑ์อาหาร และผลิตภัณฑ์โภชนาภัณฑ์ต่อไปในอนาคต

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 สายพันธุ์มอส *Physcomitrella patens*

อาหาร สภาวะของการเพาะเลี้ยง และการเตรียมเซลล์

สายพันธุ์มอสที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ คือ *Physcomitrella patens* (Gransden Strain) ได้รับมาจาก Prof. Ralph S. Quatrano (Washington University, St. Louis, USA) ทำการเพาะเลี้ยงบนอาหารแข็งสูตร BCD ภายใต้แสงจากหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์สีขาว ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส [23] การเตรียมเซลล์เริ่มต้นโดยการนำเซลล์ *P. patens* ในระยะโปรโตนีมา (Protonema) ที่มีอายุ 14 วัน ปริมาณ 1 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer Flask) ขนาด 250 มิลลิลิตร ที่บรรจุอาหารเหลว BCD ปริมาตร 100 มิลลิลิตร บั่นให้ละเอียดด้วยเครื่อง Homogenizer (OMNI THQ, USA) ที่ความเร็ว 25,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 นาที หลังจากนั้นดูดสารละลายเซลล์แขวนตะกอน (Cell Suspension) ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ใส่ในอาหารเหลว BCD ปริมาตร 90 มิลลิลิตร ที่ประกอบด้วยซูโครส 30 กรัมต่อลิตร ซึ่งบรรจุอยู่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250

มิลลิลิตร หลังจากนั้นนำไปเพาะเลี้ยงด้วยเครื่องเขย่า (New Brunswick Scientific Innova 2 1 0 0 , Champaign, IL, USA) ที่ความเร็ว 125 รอบต่อนาที ในระหว่างการเพาะเลี้ยงมีการให้แสงด้วยหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ รวมทั้งควบคุมอุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียส เมื่อเพาะเลี้ยงครบ 7 วัน นำเซลล์ *P. patens* ที่ได้ไปใช้ในการทดลองต่อไป [23]

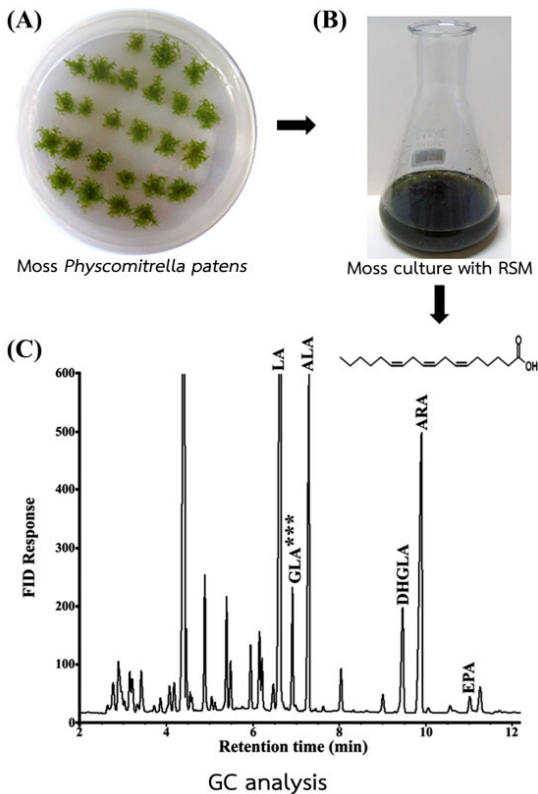
2.2 การศึกษาผลของซูโครส โพแทสเซียมไนเตรต และกลูตาเมตที่เหมาะสมต่อการเพิ่มการผลิต GLA ในเซลล์ *P. patens* ด้วยวิธี RSM และวางแผนการทดลองแบบ CCD

นำเซลล์ *P. patens* ที่เตรียมได้จากข้อ 2.1 มาศึกษาผลของความเข้มข้นของซูโครส (20, 40, 60, 80 และ 100 กรัมต่อลิตร) โพแทสเซียมไนเตรต (0.4, 0.6, 0.8, 1.0 และ 1.2 กรัมต่อลิตร) และกลูตาเมต (0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และ 2.5 กรัมต่อลิตร) ที่เหมาะสมต่อการเพิ่มการผลิต GLA ด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (RSM) และวางแผนการทดลองแบบ CCD แสดงดังรูปที่ 1 โดยแบ่งระดับของปัจจัยออกเป็น 5 ระดับ คือ -2, -1, 0, +1 และ +2 และมีจำนวนของการทดลองรวมทั้งหมด 20 ชุดการทดลอง (ตารางที่ 1) และในแต่ละชุดการทดลองเพาะเลี้ยงจำนวน 3 ข้าง [23]

จากนั้นทำการทดลองโดยการเพาะเลี้ยงเซลล์ *P. patens* ภายใต้สภาวะของการเขย่าที่ความเร็ว 125 รอบต่อนาที ให้แสงจากหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ และควบคุมอุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14 วัน เมื่อทำการทดลองเสร็จตามที่ได้ออกแบบการทดลองไว้ ทั้ง 20 ชุดการทดลอง ทำการเก็บตัวอย่างเซลล์ *P. patens* จากขวดรูปชมพู่โดยการกรอง และล้างด้วยน้ำกลั่นที่ผ่านการนึ่งฆ่าเชื้อจำนวน 2 ครั้ง และนำไปทำให้แห้งด้วยเครื่องแช่เยือกแข็ง (Freeze Dry) หลังจากนั้นนำตัวอย่างเซลล์ *P. patens* ไปบดให้ละเอียด

2.3 การวิเคราะห์ปริมาณ GLA ด้วยเครื่อง Gas chromatography (GC)

นำเซลล์ *P. patens* ที่บดละเอียดปริมาณ 200 มิลลิกรัม นำไปสกัดกรดไขมัน และทำปฏิกิริยานุพันธ์ของกรดไขมันในรูปของเมทิลเอสเทอร์ (Fatty Acid Methyl Ester, FAME) ตามวิธีของ P. Chodok และคณะ [22] จากนั้นนำตัวอย่างที่เตรียมไว้ ซึ่งมีปริมาตร 2 ไมโครลิตร มาทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Gas Chromatography-Flame Ionization Detector (GC-FID) รุ่น HP-6890 (Agilent, California, USA) และเปรียบเทียบชนิดของอนุพันธ์เมทิลเอสเทอร์ของ GLA จากค่า Retention Time และคำนวณหาปริมาณของ GLA (หน่วยเป็นมิลลิกรัม GLA ต่อลิตร) โดยใช้พื้นที่ใต้กราฟเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐาน [22]



รูปที่ 1 การหาสูตรอาหารที่เหมาะสมสำหรับการเพิ่มการผลิต GLA โดยการเพาะเลี้ยงเซลล์มอส *P. patens* ด้วยวิธีพื้นผิวดอกสอง

2.4 การวิเคราะห์ทางสถิติ

นำค่าการผลิต GLA จากการเพาะเลี้ยงเซลล์ *P. patens* ทั้ง 20 ชุดการทดลองไปวิเคราะห์ผลทางสถิติด้วยโปรแกรม Design-Expert Version 8.0.3 Trial (State Ease, Minneapolis, MN, USA) โดยแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 5 ส่วน ดังต่อไปนี้ (1) การตรวจสอบคุณภาพ และความเหมาะสมของข้อมูล ได้แก่ (1.1) ส่วนตกค้างของข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ (1.2) ความแปรปรวนของข้อมูลมีเสถียรภาพ และ (1.3) ข้อมูลมีความเป็นอิสระ (2) การพิจารณารูปแบบ และการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายค่าการผลิต GLA ซึ่งพิจารณาจากผลสรุปทางสถิติของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Model Summary Statistics) และการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ทำนายค่าการผลิต GLA ในรูปแบบสมการที่ (1)

$$Y = \beta_0 + \beta_1A + \beta_2B + \beta_3C + \beta_{12}AB + \beta_{13}AC + \beta_{23}BC + \beta_{11}A^2 + \beta_{22}B^2 + \beta_{33}C^2 \quad (1)$$

เมื่อ Y คือ การผลิต GLA ในขณะที่ A, B และ C คือ ปัจจัยที่ศึกษา, β_0 คือ ค่าคงที่สมการ, β_1 , β_2 และ β_3 คือ สัมประสิทธิ์ของสมการเส้นตรง, β_{12} , β_{13} และ β_{23} คือ สัมประสิทธิ์ของสมการปฏิสัมพันธ์ และ β_{11} , β_{22} และ β_{33} คือ สัมประสิทธิ์ของสมการกำลังสอง

(3) การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) โดยกำหนดระดับความเชื่อมั่นมากกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 95 (4) การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R^2) ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจปรับแก้ (Adjusted R^2) และค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (Coefficient of Variation (%), C.V. %) และ (5) การสร้างพื้นผิวดอกสอง 2 และ 3 มิติ (2D-contour and 3D Surface Plots) โดยการสร้างกราฟโครงร่างของการผลิต GLA จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

2.5 การศึกษาความถูกต้องของแบบจำลองทาง

คณิตศาสตร์เพื่อใช้ทำนายค่าการผลิต GLA

นำเซลล์ *P. patens* ที่เตรียมได้จากข้อ 2.1 มาเพาะเลี้ยงในสูตรอาหารที่เหมาะสมตามที่ได้ทำนายด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการผลิต GLA (สมการที่ (2)) โดยการเพาะเลี้ยงเซลล์ด้วยการเขย่าที่ความเร็ว 125 รอบต่อนาที ภายใต้แสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส นาน 14 วัน หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์ปริมาณการผลิต GLA ด้วยเครื่อง GC-FID และเปรียบเทียบการผลิต GLA ที่ได้จากการทำนาย (Predicted Value) กับผลที่ได้จากการทดลองจริง (Experimental Value) รวมทั้งคำนวณร้อยละความผิดพลาด (% Error)

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 ผลการศึกษาความเข้มข้นของซูโครส โพรแทสเซียมไนเตรต และกลูตาเมตที่เหมาะสมต่อการเพิ่มการผลิต GLA ในเซลล์ *P. patens*

ผลของการศึกษาความเข้มข้นของซูโครส โพรแทสเซียมไนเตรต และกลูตาเมตที่เหมาะสมสำหรับการเพิ่มการผลิต GLA ในการเพาะเลี้ยงเซลล์ *P. patens* เมื่อออกแบบการทดลองด้วยวิธี RSM และวางแผนการทดลองแบบ CCD แสดงดังตารางที่ 1 พบว่าการผลิต GLA ในแต่ละชุดการทดลองมีค่าแตกต่างกันอยู่ในช่วง 6.18-16.36 มิลลิกรัม GLA ต่อลิตร โดยชุดการทดลองที่ผลิต GLA ได้สูงสุด คือ การทดลองที่ 17 เท่ากับ 16.36 มิลลิกรัม GLA ต่อลิตร เมื่อเพาะเลี้ยงเซลล์ *P. patens* ในอาหารเหลวสูตร BCD ร่วมกับการเติมซูโครส 60 กรัมต่อลิตร โพรแทสเซียมไนเตรต 0.8 กรัมต่อลิตร และกลูตาเมต 1.5 กรัมต่อลิตร (ตารางที่ 1) และในขณะที่การทดลองที่ 12 เซลล์ *P. patens* ผลิต GLA ได้น้อยที่สุดเท่ากับ 6.18

มิลลิกรัม GLA ต่อลิตร เมื่อเพาะเลี้ยงในอาหารที่ประกอบด้วย ซูโครส โพรแทสเซียมไนเตรต และกลูตาเมต 60, 1.2 และ 1.5 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ (ตารางที่ 1) และเมื่อเปรียบเทียบการผลิต GLA ระหว่างการทดลองครั้งนี้กับรายงานการวิจัยของ P. Chodok และคณะ [22] พบว่าการเพาะเลี้ยงเซลล์ *P. patens* รวมกับการออกแบบการทดลองด้วยวิธี RSM และ CCD มีการผลิต GLA (6.18-16.36 มิลลิกรัม GLA ต่อลิตร) ได้สูงกว่าการเพาะเลี้ยงเซลล์ *P. patens* ในอาหารเหลวสูตรพื้นฐาน BCD ซึ่งสามารถผลิต GLA ได้เพียง 3.55 มิลลิกรัม GLA ต่อลิตร ดังนั้นจากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าปัจจัยทั้ง 3 ได้แก่ ความเข้มข้นของซูโครส โพรแทสเซียมไนเตรต และกลูตาเมตเป็นสารอาหารที่ช่วยส่งเสริมให้เซลล์ *P. patens* ผลิต GLA ได้เพิ่มมากขึ้น 1.74-4.61 เท่า

3.2 ผลการวิเคราะห์คุณภาพ และความเหมาะสมของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) และสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่มีการปรับแก้ (adjusted R^2) และสัมประสิทธิ์ของความผันแปร (Coefficient of variation, C.V.(%)) รวมทั้งการวิเคราะห์สมการถดถอยพหุคูณจำเป็นต้องมีการตรวจสอบคุณภาพ และความเหมาะสมของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ได้แก่ (1) การตรวจสอบส่วนตกค้างของข้อมูลว่ามีการแจกแจงปกติหรือไม่ แสดงดังรูปที่ 2A พบว่าข้อมูลของการผลิต GLA โดยเซลล์ *P. patens* มีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรงซึ่งแสดงให้เห็นว่าส่วนตกค้างของข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ (2) การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวนโดยใช้แผนภูมิการกระจายของส่วนตกค้างต่อค่าที่ถูกทำนาย แสดงดังรูปที่ 2B พบว่าส่วนตกค้างของข้อมูลการผลิตกรดไขมัน GLA มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั้งในทางบวกและทางลบ แสดงว่าข้อมูลที่ได้มีความ

เสถียรภาพของความแปรปรวน และ (3) การตรวจสอบ
ความเป็นอิสระของข้อมูลโดยใช้กราฟของค่าส่วนตกค้าง
ต่อลำดับการทดลอง แสดงดังรูปที่ 2C พบว่าส่วนตกค้าง
ของข้อมูลการผลิตกรดไขมัน GLA มีการกระจายตัว
แบบไร้รูปแบบ แสดงว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองมี

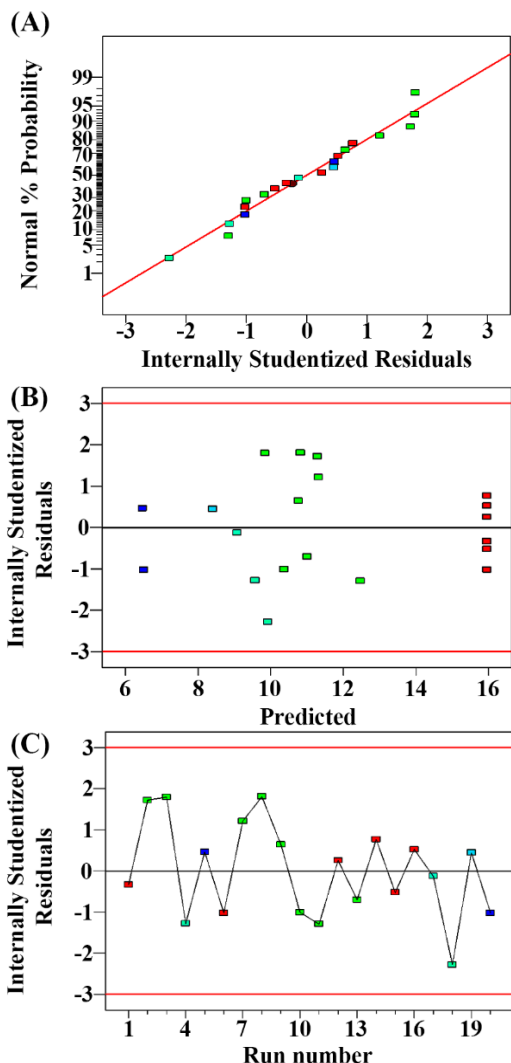
ความเป็นอิสระ จากผลการวิเคราะห์คุณภาพ และความ
เหมาะสมของข้อมูลที่ได้จากการทดลองเป็นไปตาม
สมมติฐานที่ตั้งไว้ 3 ข้อ จึงสรุปได้ว่าข้อมูลที่ได้จากการ
ทดลองทั้งหมดมีคุณภาพ และมีความเหมาะสม

ตารางที่ 1 ผลของความเข้มข้นของซูโครส (A) โพแทสเซียมไนเตรต (B) และกลูตาเมต (C) ต่อการเพิ่มการผลิต GLA
ในมอส *P. patens* ด้วยวิธีพินผิวตอบสนอง และการวางแผนการทดลองแบบ CCD

Factors	Unit	Level				
		-2	-1	0	+1	+2
Sucrose (A)	g/L	20	40	60	80	100
Potassium nitrate (B)	g/L	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2
Glutamate (C)	g/L	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5

Runs	Sucrose (A)	Potassium nitrate (B)	Glutamate (C)	GLA production (mg/L)	
				Experimental	Predicted
1	40(-1)	0.6(-1)	1.0(-1)	10.48	9.85
2	80(+1)	0.6(-1)	1.0(-1)	12.01	12.47
3	40(-1)	1.0(+1)	1.0(-1)	11.75	11.32
4	80(+1)	1.0(+1)	1.0(-1)	10.99	10.76
5	40(-1)	0.6(-1)	2.0(+1)	9.03	9.08
6	80(+1)	0.6(-1)	2.0(+1)	10.76	11.01
7	40(-1)	1.0(+1)	2.0(+1)	11.46	10.82
8	80(+1)	1.0(+1)	2.0(+1)	9.12	9.57
9	20(-2)	0.8(0)	1.5(0)	9.18	9.92
10	100(+2)	0.8(0)	1.5(0)	11.85	11.29
11	60(0)	0.4(-2)	1.5(0)	6.62	6.47
12	60(0)	1.2(+2)	1.5(0)	6.18	6.51
13	60(0)	0.8(0)	0.5(-2)	10.04	10.37
14	60(0)	0.8(0)	2.5(+2)	8.55	8.41
15	60(0)	0.8(0)	1.5(0)	16.23	15.96
16	60(0)	0.8(0)	1.5(0)	15.78	15.96
17	60(0)	0.8(0)	1.5(0)	16.36	15.96
18	60(0)	0.8(0)	1.5(0)	15.68	15.96
19	60(0)	0.8(0)	1.5(0)	16.09	15.96
20	60(0)	0.8(0)	1.5(0)	15.42	15.96

GLA คือ กรดแกมมา-ไลโนเลนิก (γ -linolenic Acid)



รูปที่ 2 กราฟของตกค้างของข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ (A) แผนภูมิการกระจายของส่วนตกค้างต่อค่าที่ถูกทำนาย (B) และกราฟของค่าส่วนตกค้างต่อลำดับการทดลอง (C)

3.3 การพิจารณารูปแบบและการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ทำนายการผลิตกรดไขมัน GLA

นำข้อมูลของการผลิต GLA ที่ได้จากตารางที่ 1 มาวิเคราะห์เพื่อหารูปแบบของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับทำนายค่าการผลิต GLA โดยเซลล์ *P. patens* โดยพิจารณาผลสรุปทางสถิติของ

แบบจำลอง (Model Summary Statistics) แสดงดังตารางที่ 2 พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กำลังสาม (Cubic Model) ได้รับการยอมรับให้เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทำนายค่าการผลิต GLA เนื่องจากมีค่า R^2 สูงสุดเท่ากับ 0.9962 แต่อย่างไรก็ตามมีข้อความเตือนเกี่ยวกับการเป็นคู่แฝด (Aliased) เนื่องจากการทดลองไม่เพียงพอที่ทำให้เกิดแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กำลังสามได้ จึงต้องเลือกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีค่า R^2 รองลงมา คือ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์กำลังสอง (Quadratic Model) มาใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวแปรต่าง ๆ (ความเข้มข้นของซูโครส โพแทสเซียมไนเตรต และกลูตาเมต) กับค่าการผลิต GLA แทน เนื่องจากมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9835 และมีข้อความเตือนเกี่ยวกับการแนะนำ (Suggested) เพื่อให้ใช้แบบจำลองนี้ รวมทั้งมีค่า $p < 0.0001$ (ตารางที่ 2) ดังนั้นจากข้อมูลของการทดลองสามารถนำมาเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Coded Equation) ได้ดังสมการที่ (2)

$$\text{GLA production (mg/L)} = 15.96 + 0.34A + 0.01B - 0.49C - 0.79AB - 0.17AC + 0.068BC - 1.34A^2 - 2.37B^2 - 1.64C^2 \quad (2)$$

เมื่อ GLA production (mg GLA/L) คือ การผลิต GLA (มิลลิกรัม GLA ต่อลิตร) ในขณะที่ A, B และ C คือ ความเข้มข้นของซูโครส โพแทสเซียมไนเตรต และกลูตาเมต ตามลำดับ มีหน่วยเป็นกรัมต่อลิตร

3.4 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน

ผลจากการวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อตรวจสอบความเหมาะสม และคุณภาพของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (2) การตรวจสอบความเหมาะสมใช้ค่าโมเดล (Model) และค่าความสมรูป (Lack of Fit) แสดงดังตารางที่ 3 พบว่าค่าโมเดลของการผลิต GLA โดยเซลล์ *P. patens* มีนัยสำคัญยิ่งทาง

สถิติ ($p < 0.0001$) และเมื่อตรวจสอบความสมรูปพบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (2) ไม่ขาดความเหมาะสมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p = 0.0739$) จึงสรุปได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (2) สามารถใช้ทำนายค่าการผลิต GLA ได้อย่างถูกต้อง

ส่วนคุณภาพของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการผลิต GLA (สมการที่ (2)) สามารถประเมินได้จากค่า R^2 มีค่าเท่ากับ 0.9835 (ตารางที่ 3) แสดงว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองจริง (Experimental Data) เข้ากันได้กับข้อมูลที่ได้จากการทำนาย (Predicted Data) ถึงร้อยละ 98.35 แสดงดังรูปที่ 3 ซึ่งได้รับอิทธิพลจากปัจจัยทั้ง 3 ได้แก่ ความเข้มข้นของซูโครส

โพแทสเซียมไนเตรต และกลูตามาตสูงถึงร้อยละ 98.35 ส่วนที่เหลืออีกร้อยละ 1.65 เป็นผลจากปัจจัยอื่นที่ไม่สามารถควบคุมได้ ในขณะที่ค่า Adjusted R^2 เป็นค่าที่ใช้ตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (2) แสดงดังตารางที่ 2 พบว่าการผลิต GLA มีค่า Adjusted R^2 เท่ากับ 0.9687 (ตารางที่ 3) อธิบายได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (2) มีความแม่นยำในการทำนายค่าการผลิต GLA สูงถึงร้อยละ 96.87 ส่วนค่า C.V. (%) พบว่ามีเท่ากับร้อยละ 4.91 (ตารางที่ 3) สามารถอธิบายได้ว่าค่าที่ได้จากการทดลองจริง และค่าที่ได้จากการทำนายมีความแตกต่างกันน้อยมาก (รูปที่ 3)

ตารางที่ 2 ผลสรุปทางสถิติของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการผลิต GLA โดยเซลล์ *P. patens*

Source	Sum of squares	df	Mean square	F-value	p-value Prob > F	Remark
Sequential model sum of squares for GLA production						
Mean	2727.98	1	2727.98			
Linear	5.73	3	1.91	0.16	0.9233	
2FI	5.33	3	1.78	0.12	0.9453	
Quadratic	185.62	3	61.87	188.07	<0.0001	Suggested
Cubic	2.52	4	0.63	4.95	0.0416	Aliased
Residual	0.77	6	0.13			
Total	2927.95	20	146.40			
Source	Std. Dev.	R^2	Adjusted R^2	Predicted R^2	Press	Remark
Model summary statistics for GLA production						
Linear	3.48	0.0287	-0.1535	-0.4511	290.18	
2FI	3.81	0.0553	-0.3807	-0.6307	326.10	
Quadratic	0.57	0.9835	0.9687	0.8878	22.44	Suggested
Cubic	0.36	0.9962	0.9879	0.8722	25.56	Aliased

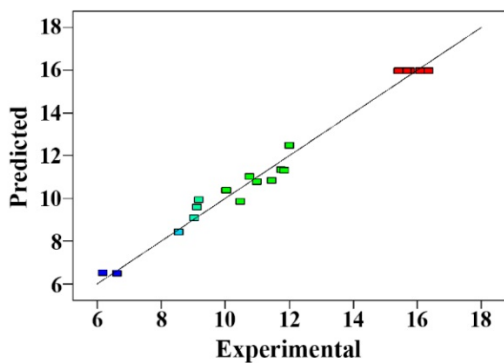
ตารางที่ 3 การวิเคราะห์ความแปรปรวน ค่าสัมประสิทธิ์สมการการถดถอย และค่าสถิติของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการผลิต GLA โดยเซลล์ *P. patens*

Source	Regression coefficients	Standard error	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value Prob > F
Model	15.96	0.23	196.68	9	21.85	66.43	<0.0001
A-Sucrose	0.34	0.14	1.89	1	1.89	5.75	0.0375

ตารางที่ 3 การวิเคราะห์ความแปรปรวน ค่าสัมประสิทธิ์สมการการถดถอย และค่าสถิติของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการผลิต GLA โดยเซลล์ *P. patens* (ต่อ)

Source	Regression coefficients	Standard error	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value Prob > F
B-Potassium nitrate	0.01	0.14	0.0016	1	0.0016	0.004863	0.9458
C-Glutamate	-0.49	0.14	3.84	1	3.84	11.68	0.0066
AB	-0.79	0.20	5.06	1	5.06	15.37	0.0029
AC	-0.17	0.20	0.24	1	0.24	0.72	0.4149
BC	0.068	0.20	0.036	1	0.036	0.11	0.7461
A ²	-1.34	0.11	45.00	1	45.00	136.79	<0.0001
B ²	-2.37	0.11	140.82	1	140.82	428.03	<0.0001
C ²	-1.64	0.11	67.86	1	67.86	206.26	<0.0001
Residual			3.29	10	0.33		
Lack of Fit			2.64	5	0.53	4.10	0.0739
Pure Error			0.65	5	0.13		
Corrected Total			199.97	19			

$R^2 = 0.9835$
Adjusted $R^2 = 0.9687$
C.V.% = 4.91



รูปที่ 3 การเปรียบเทียบค่าการผลิต GLA ที่ได้จากการทดลองจริง (Experimental Value) กับค่าที่ได้จากการทำนาย (Predicted Value)

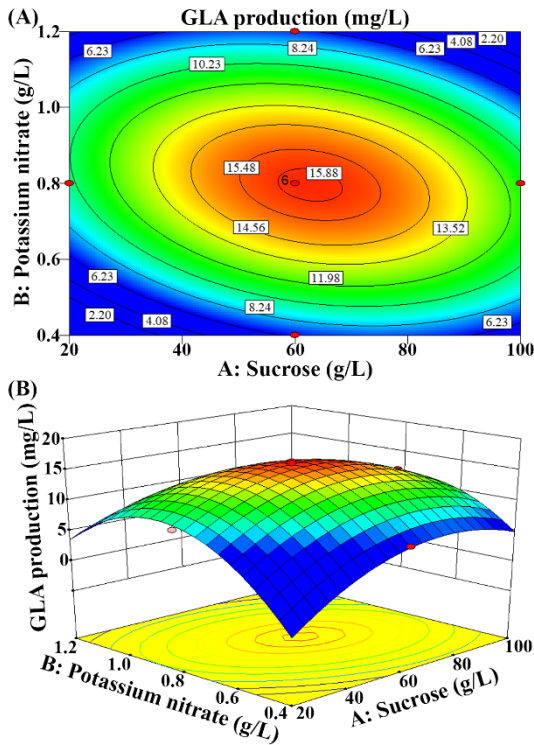
ส่วนการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์สมการการถดถอย พหุคูณของปัจจัยทั้ง 3 ได้แก่ ความเข้มข้นของซูโครส (A) โพแทสเซียมไนเตรต (B) และกลูตามेट (C) ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (2) ว่ามีอิทธิพลต่อการผลิต GLA โดยเซลล์ *P. patens* หรือไม่

โดยพิจารณาจากพจน์เชิงเส้น (Linear Terms) พจน์อิทธิพลร่วม (Interaction Terms) และพจน์กำลังสอง (Square Terms) แสดงดังตารางที่ 3 เมื่อพิจารณาพจน์ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการผลิต GLA พบว่าพจน์ A, C, AB, A², B² และ C² เป็นพจน์ที่มีผลต่อการผลิต GLA อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ในเซลล์ *P. patens* ส่วนพจน์อื่น ๆ ได้แก่ B, AC และ BC เป็นพจน์ที่ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ต่อแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายค่าการผลิต GLA (ตารางที่ 3)

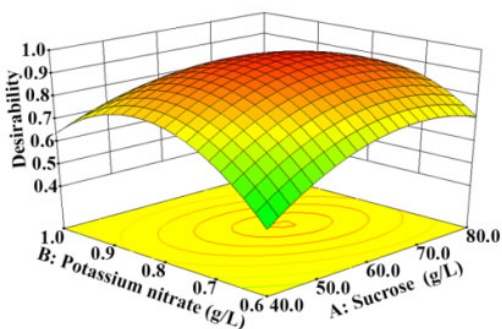
3.5 การสร้างกราฟพื้นผิวตอบสนองของการผลิต GLA ในการเพาะเลี้ยงเซลล์ *P. patens*

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (2) นำมาสร้างกราฟพื้นผิว 2 มิติ (รูปที่ 4A) และ 3 มิติ (รูปที่ 4B) เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของซูโครสและโพแทสเซียมไนเตรต (AB) ต่อการเพิ่มการผลิต GLA

ในการเพาะเลี้ยงเซลล์ *P. patens* โดยที่ความเข้มข้นของกลูตามาต (C) อยู่ในระดับกลาง (1.5 กรัมต่อลิตร) โดยซูโครสเมื่อถูกย่อยด้วยการเร่งปฏิกิริยาของเอนไซม์-



รูปที่ 4 กราฟพื้นผิวดูตอบสอง 2 มิติ (A) และ 3 มิติ (B) ที่แสดงผลของความเข้มข้นของซูโครส โพแทสเซียมไนเตรด และกลูตามาตต่อการเพิ่มการผลิต GLA ในเซลล์ *P. patens*



รูปที่ 5 กราฟความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบสองแบบ 3 มิติ

อินเวอร์เทส (Invertase) ได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำตาลกลูโคส และฟรักโตส เมื่อผ่านวิถีไกลโคไลซิส (Glycolysis Pathway) หรือวิถีเพนโทสฟอสเฟต (Pentose Phosphate Pathway) จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นสาร Acetyl-CoA และ Nicotinamide Adenine Dinucleotide Phosphate (NADPH) ซึ่งสารทั้งสองชนิดนี้จำเป็นสำหรับการเร่งปฏิกิริยาของเอนไซม์กลุ่ม Fatty Acid Desaturases และ Fatty Acid Elongase และการสังเคราะห์กรดไขมันไม่อิ่มตัวสายยาว [24], [25] ในขณะที่โพแทสเซียมไนเตรดเป็นสารที่ช่วยกระตุ้นการทำงานของมาลิกเอนไซม์ (Malic Enzyme) และการสังเคราะห์ NADPH [26] จากผลการทดลอง พบว่าการเพิ่มความเข้มข้นของซูโครสในอาหารเหลว BCD จาก 20 เป็น 62 กรัมต่อลิตร (รูปที่ 4A และ 4B) ร่วมกับการเพิ่มความเข้มข้นของโพแทสเซียมไนเตรดจาก 0.4 เป็น 0.8 กรัมต่อลิตร มีผลทำให้เซลล์ *P. patens* ผลิต GLA ได้เพิ่มมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และผลิต GLA ได้สูงสุดเท่ากับ 15.88 มิลลิกรัม GLA ต่อลิตร สอดคล้องกับงานวิจัยของ P. Chodok [23] พบว่าน้ำตาลซูโครส และโพแทสเซียมไนเตรดเป็น 2 ปัจจัยที่มีผลต่อการเพิ่มการผลิต DHGLA ในเซลล์ *P. patens* อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อความเข้มข้นของซูโครสในอาหารเพาะเลี้ยงเซลล์ *P. patens* เพิ่มขึ้นจาก 20 เป็น 60 กรัมต่อลิตร ร่วมกับการเพิ่มความเข้มข้นของโพแทสเซียมไนเตรดจาก 0.4 เป็น 0.75 กรัมต่อลิตร และผลิต DHGLA ได้เท่ากับ 11.11 มิลลิกรัม DHGLA ต่อลิตร แต่อย่างไรก็ตามเมื่อระดับความเข้มข้นของซูโครส และโพแทสเซียมไนเตรดในอาหารเพาะเลี้ยงสูงกว่า 62 และ 0.8 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ ส่งผลให้เซลล์ *P. patens* ผลิต GLA ลดลงเหลือเพียง 2.20 มิลลิกรัม GLA ต่อลิตร (รูปที่ 4A และ 4B) เนื่องจากซูโครส และโพแทสเซียมไนเตรดที่ความเข้มข้นสูง ๆ มีผลในการยับยั้งการเจริญ และลดการผลิต GLA ในเซลล์ *P. patens* [23]

3.6 ผลการศึกษาความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับใช้ทำนายการผลิต GLA ในเซลล์ *P. patens*

การวิเคราะห์ระดับความเข้มข้นของแต่ละปัจจัย ได้แก่ ความเข้มข้นของซูโครส โพลแซ็กเคอไรด์ และกลูตาเมตที่มีผลต่อการเพิ่มการผลิต GLA สูงสุดโดยเซลล์ *P. patens* โดยการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองจริง และค่าที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (2) พบว่าเมื่อเพาะเลี้ยงเซลล์ *P. patens* ในอาหารเหลวสูตร BCD ที่ประกอบด้วยซูโครส 62.92 กรัมต่อลิตร โพลแซ็กเคอไรด์ 0.80 กรัมต่อลิตร และกลูตาเมต 1.42 กรัมต่อลิตร เซลล์ *P. patens* ผลิตกรดไขมัน GLA ได้เท่ากับ 16.37 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าการผลิต GLA ที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (2) เท่ากับ 16.20 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อพิจารณาค่าร้อยละของความผิดพลาด (% Error) พบว่ามีค่าเท่ากับร้อยละ 1.05 และมีค่าความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบสนอง (Composite Desirability, D) เท่ากับ 0.967 (รูปที่ 5) ซึ่งค่าความพึงพอใจของผลตอบสนองมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ถ้าค่า D เท่ากับ 1 แสดงว่าผลตอบสนองนั้นได้รับความพึงพอใจอย่างสมบูรณ์

4. สรุป

การศึกษาผลของความเข้มข้นของซูโครส โพลแซ็กเคอไรด์ และกลูตาเมตที่เหมาะสมต่อการเพิ่มการผลิตกรดไขมัน GLA ในการเพาะเลี้ยงเซลล์ *P. patens* ด้วยวิธี RSM ร่วมกับการวางแผนการทดลองแบบ CCD พบว่าซูโครส และกลูตาเมตเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการเพิ่มการผลิต GLA ในเซลล์ *P. patens* อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ซึ่งสามารถแสดงในรูปแบบของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กำลังสองสำหรับทำนายค่าการผลิต GLA ด้วยค่า R^2 เท่ากับ 0.9835

โดยสูตรอาหารที่เหมาะสมต่อการเพิ่มการผลิต GLA ประกอบด้วยน้ำตาลซูโครส 62.92 กรัมต่อลิตร โพลแซ็กเคอไรด์ 0.80 กรัมต่อลิตร และกลูตาเมต 1.42 กรัมต่อลิตร เซลล์ *P. patens* ผลิต GLA ได้เท่ากับ 16.37 มิลลิกรัม GLA ต่อลิตร ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าการผลิต GLA ที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เท่ากับ 16.20 มิลลิกรัม GLA ต่อลิตร รวมทั้งมีค่าความผิดพลาด และมีค่าความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบสนองเท่ากับร้อยละ 1.05 และ 0.967 ตามลำดับ ดังนั้นจากข้อมูลที่ได้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการเพาะเลี้ยงในระดับอุตสาหกรรมต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

การทำวิจัยในครั้งนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่ได้สนับสนุนทุนวิจัยประจำปีงบประมาณ 2560 และขอขอบคุณสาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิตพืช คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยาที่ได้อำนวยความสะดวกและอุปกรณ์ต่าง ๆ สำหรับการดำเนินการวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Sergeant, E. Rahbar and F.H. Chilton, "Gamma-linolenic acid, dihommo-gamma linolenic, eicosanoids and inflammatory processes," *European Journal of Pharmacology*, vol. 785, pp. 77-86, Aug. 2016.
- [2] K. Youn, J. Lee, E.-Y. Yun, C.-T. Ho, M.V. Karwe, W.-S. Jeong and M. Jun, "Biological evaluation and in silico docking study of γ -linolenic acid as a potential BACE1 inhibitor," *Journal of Functional Foods*, vol. 10, pp. 187-191, Sep. 2014.

- [3] K. Youn, S. Lee and M. Jun, "Gamma-linolenic acid ameliorates A β -induced neuroinflammation through NF- κ B and MAPK signalling pathways," *Journal of Functional Foods*, vol. 42, pp. 30-37, Mar. 2018.
- [4] W.H. Choi, "Evaluation of anti-tubercular activity of linolenic acid and conjugated-linoleic acid as effective inhibitors against *Mycobacterium tuberculosis*," *Asian Pacific Journal of Tropical Medicine*, vol. 9, no. 2, pp. 125-129, Feb. 2016.
- [5] G.J. Macfarlane, A. El-Metwally, V. De Silva, E. Ernst, G.L. Dowds and R.J. Moots, "Evidence for the efficacy of complementary and alternative medicines in the management of rheumatoid arthritis: a systematic review," *Rheumatology*, vol. 50, pp. 1672-1683, Sep. 2011.
- [6] A. Kawamura, K. Ooyama, K. Kojima, H. Kachi, T. Abe, K. Amano and T. Aoyama, "Dietary supplementation of gamma-linolenic acid improves skin parameters in subjects with dry skin and mild atopic dermatitis," *Journal of Oleo Science*, vol. 60, no. 12, pp. 597-607, 2011.
- [7] D. Simon, P.A. Eng, S. Borelli, R. Kägi, C. Zimmermann, C. Zahner, J. Drewe, L. Hess, G. Ferrari, S. Lautenschlager, B. Wüthrich and P. Schmid-Grendelmeier, "Gamma-linolenic acid levels correlate with clinical efficacy of evening primrose oil in patients with atopic dermatitis," *Advances in Therapy*, vol. 31, pp. 180-188, Jan. 2014.
- [8] M. Chas, C. Goupille, F. Arbion, P. Bougnoux, M. Pinault, M.L. Jourdan, S. Chevalier and L. Ouldamer, "Low eicosapentaenoic acid and gamma-linolenic acid levels in breast adipose tissue are associated with inflammatory breast cancer," *The Breast*, vol. 45, pp. 113-117, Jun. 2019.
- [9] K. Kavanagh, D.M. Flynn, K.A. Jenkins, M.D. Wilson and F.H. Chilton, "Stearidonic and γ -linolenic acids in echium oil improves glucose disposal in insulin resistant monkeys," *Prostaglandins, Leukotrienes and Essential Fatty Acids*, vol. 89, no. 1, pp. 39-45, Jul. 2013.
- [10] A. Freije, J. Alkhuzai and A.A. Al-Laith, "Fatty acid composition of three medicinal plants from Bahrain: New potential sources of γ -linolenic acid and dihomogamma-linolenic," *Industrial Crops and Products*, vol. 43, pp. 218-224, May 2013.
- [11] J.L. Guil-Guerrero, F. Gómez-Mercado, R.P. Ramos-Bueno, M.J. González-Fernández, M. Urrestarazu and M.A. Rincón-Cervera, "Sardinian Boraginaceae are new potential sources of gamma-linolenic acid," *Food Chemistry*, vol. 218, pp. 435-439, Mar. 2017.
- [12] J.L. Guil-Guerrero, F. Gómez-Mercado, R.P. Ramos-Bueno, M.J. González-Fernández, M. Urrestarazu, S. Jiménez-Becker and G. de Bélair, "Fatty acid

- profiles and sn-2 fatty acid distribution of γ -linolenic acid-rich *Borago species*,” *Journal of Food Composition and Analysis*, Anal, vol. 66, pp. 74-80, Mar. 2018.
- [13] S. Piskernik, R. Vidrih, L. Demšar, D. Koron, M. Rogelj and T.P. Žontar, “Fatty acid profiles of seeds from different *Ribes* species,” *LWT*, vol. 98, pp. 424-427, Dec. 2018.
- [14] J.L. Guil-Guerrero, M.A. Rincon-Cervera, F. Gomez-Mercado, R.P. Ramos-Bueno and E. Venegas-Venegas, “New seed oils of Boraginaceae rich in stearidonic and gamma-linolenic acids from the Maghreb region,” *Journal of Food Composition and Analysis*, vol. 31, no. 1, pp. 20-23, Aug. 2013.
- [15] S. Lyashenko, M.J. González-Fernández, F. Gómez-Mercado, S. Yunusova, O. Denisenko and J.L. Guil-Guerrero, “*Ribes* taxa: A promising source of γ -linolenic acid-rich functional oils,” *Food Chemistry*, vol. 301, pp. 125309, Dec. 2019.
- [16] S.U. Ahmed, K.K. Reddy, S.L. Swathy, S.K. Singh, S. Kanjilal, R.B.N. Prasad and A. Pandey, “Enrichment of γ -linolenic acid in the lipid extracted from *Mucor zycharae* MTCC 5420,” *Food Research International*, vol. 42, no. 4, pp. 449-453, May. 2009.
- [17] M.G. Sajilata, R.S. Singhal and M.Y. Kamat, “Fractionation of lipids and purification of γ -linolenic acid (GLA) from *Spirulina platensis*,” *Food Chemistry*, vol. 109, no. 3, pp. 580-586, Aug. 2008.
- [18] M.L. Sun, C. Madzak, H.H. Liu, P. Song, L.J. Ren, H. Huang and X.J. Ji, “Engineering *Yarrowia lipolytica* for efficient γ -linolenic acid production,” *Biochemical Engineering Journal*, vol. 117, pp. 172-180, Jan. 2017.
- [19] Y. Zhang, X. Luan, H. Zhang, V. Garre, Y. Song and C. Ratledge, “Improved γ -linolenic acid production in *Mucor circinelloides* by homologous overexpressing of delta-12 and delta-6 desaturases,” *Microbial Cell Factories*, vol. 16, pp. 113, Jun. 2017.
- [20] S. Jeennor, J. Anantayanon, S. Panchanawaporn, S., Khoomrung, C. Chutrakul and K. Laoteng, “Reengineering lipid biosynthetic pathways of *Aspergillus oryzae* for enhanced production of γ -linolenic acid and dihomogamma-linolenic acid,” *Gene*, vol. 706, pp. 106-114, Jul. 2019.
- [21] S. Kaewsuwan, N. Bunyaphrathasara, D.J. Cove, R.S. Quatrano and P. Chodok, “High level production of adrenic acid in *Physcomitrella patens* using the algae *Pavlova* sp. $\Delta 5$ -elongase gene,” *Bioresource Technology*, vol. 101, no. 11, pp. 4081-4088, Jun. 2010.
- [22] P. Chodok, A. Kanjana-Opas and S. Kaewsuwan, “The plackett-burman design for evaluating the production of polyunsaturated fatty acids by *Physcomitrella patens*,” *Journal of the*

- American Oil Chemists' Society*, vol. 87, pp. 521-529, Jan. 2010.
- [23] P. Chodok, "Optimization of culture media for enhanced production of dihomono- γ -linolenic acid and eicosatetraenoic acid in *Physcomitrella patens* using multi-response surface methodology," *Songklanakarin Journal of Plant Science*, vol. 5, no. 4, pp. 48-61, Oct.-Dec. 2018.
- [24] O. Tehlivets, K. Scheuringer and S.D. Kohlwein, "Fatty acid synthesis and elongation in yeast," *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Molecular and Cell Biology of Lipids*, vol. 1771, no. 3, pp. 255-270, Mar. 2007.
- [25] M.-J. Jin, H. Huang, A.-H. Xiao, Z. Gao, X. Liu, and C. Peng, "Enhancing arachidonic acid production by *Mortierella alpina* ME-1 using improved mycelium aging technology," *Bioprocess and Biosystems Engineering*, vol. 32, pp. 117-122, May 2008.
- [26] J.P. Wynn, A.A. Hamid and C. Ratledge, "The role of malic enzyme in the regulation of lipid accumulation in filamentous fungi," *Microbiology*, vol. 145, no. 8, pp. 1911-1917, Aug. 1999.

<http://journal.rmutp.ac.th/>

การต้านรังสียูวีและการยับยั้งแบคทีเรียของด้ายที่เคลือบด้วยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ด้วยเครื่องกรอด้าย

วรวิทย์ ศรีวิทยากุล¹ * มาหามะสุไฮมี มะแซ¹ พงศ์พัฒน์ ศิริธรรม¹ วงศกร อ่อนเกตุพล¹
และ พีรวัส คงสง²

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

² คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

¹ 1 ถนนราชดำเนินนอก ตำบลบ่อยาง อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา 90000

² 744 ถนนสุนทราราม ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

รับบทความ 12 มิถุนายน 2563 แก้ไขบทความ 3 พฤศจิกายน 2563 ตอรับบทความ 25 ธันวาคม 2563

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของการศึกษาในครั้งนี้เพื่อพัฒนาสมบัติการต้านรังสียูวีและยับยั้งแบคทีเรียของด้ายเพื่อให้ได้สิ่งทอที่มีคุณภาพ โดยนำด้ายมาเคลือบด้วย โซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต แมกนีเซียมคลอไรด์ น้ำยาปรับผ้านุ่ม และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ปริมาณตั้งแต่ 0 ถึง 0.54 โมลาร์ ด้วยเครื่องกรอด้าย ศึกษาลักษณะเส้นด้ายเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลต์อิมิสชัน วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี และวัดค่าการส่องผ่านแสงด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง ซึ่งผลการป้องกันรังสียูวีของการเคลือบได้ผลดีมาก ผลของการยับยั้งแบคทีเรียของด้ายเคลือบพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ความเข้มข้น 0.45 โมลาร์ สามารถยับยั้งแบคทีเรีย *สแตปฟีโลคอคคัส ออเรียส* และ *เอสเชอริเชีย โคไล* ได้สูงถึงร้อยละ 87 และ 91 ตามลำดับ ซึ่งคาดว่าผลการวิจัยสามารถที่จะพัฒนาไปในทางที่เกิดการประยุกต์ใช้ทางด้านการเพิ่มประสิทธิภาพของผ้าและนวัตกรรมด้านอุตสาหกรรมสิ่งทอ

คำสำคัญ : แพกเตอร์การป้องกันรังสียูวี; การป้องกันรังสียูวี; การยับยั้งแบคทีเรีย; พอลิไวนิลแอลกอฮอล์; เครื่องกรอด้าย; สิ่งทอ

<http://journal.rmutp.ac.th/>

UV Protection and Antibacterial Properties of Yarn Coated with Polyvinyl Alcohol by Nip-rollers Process

Worawit Sriwittayakul^{1*} Mahamasuhaimi Masae¹ Pongpat Keereetham¹
Wongsakon Onketpon¹ and Peerawas Kongsong²

¹ Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya

² Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Isan

¹ 1, Ratchadamnoennok Rd., Bo Yang, Muang Songkhla, Songkhla 90000

² 744, Suranarai Rd., Nai Muang, Muang, Nakhon Ratchasima 30000

Received 12 June 2020; Revised 3 November 2020; Accepted 25 December 2020

Abstract

The objective of this study is to explore a method to improve UV protection and antibacterial properties of the cotton yarn surface to produce high-quality textile products. Cotton yarns were coated with sodium hydrogen phosphate, magnesium chloride, softener solution and 0 to 0.54 M of polyvinyl alcohol to hold surface yarns to the yarn body using the winding machine. The coated yarns were analyzed using Field emission scanning electron microscope, Fourier transform infrared spectroscopy and UV-Vis spectrophotometer. Optimal results were achieved when coating with 0.45 M PVA exhibited UV protection was excellent protection. The cotton yarn coated 0.45 M polyvinyl alcohol displayed the antibacterial activity in the presence of *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli* was 87 and 91%, respectively. The expected overall properties may open the way towards new applications of high performance fabrics, leading to an innovative product development in the textile industry

Keywords : UPF; UV Protection; Antibacterial; Polyvinyl Alcohol; Winding Machine; Textiles

* Corresponding Author. Tel.: +668 6597 5702, E-mail Address: Chan_worawit@hotmail.com

1. บทนำ

เสื้อผ้า เครื่องนุ่งห่ม นอกจากจะสวมใส่เพื่อความสวยงามแล้ว ยังมีหน้าที่ปกป้องร่างกายผู้สวมใส่จากสิ่งแวดล้อมต่างๆ เช่น รังสียูวี (Ultraviolet Light, UV) เนื่องจากจะทำอันตรายต่อผิวได้ เป็นสาเหตุของผิวหนังไหม้เกรียม และอาจทำให้เกิดเป็นมะเร็งของผิวหนังได้ เพราะรังสีชนิดนี้จะทำให้เกิดความผิดปกติของกลไกการควบคุมการเจริญเติบโตของเซลล์ ความยาวคลื่นของแสงยูวีนั้นอยู่ในช่วง 200-400 นาโนเมตร และแบ่งย่อยออกได้ดังนี้ คือ UV-A อยู่ในช่วง 315-400 นาโนเมตร UV-B อยู่ในช่วง 280-315 นาโนเมตร และ UV-C อยู่ในช่วง 200-280 นาโนเมตร UV-C ได้ถูกดูดกลืนโดยโอโซนในชั้นบรรยากาศ UV-B เป็นสาเหตุให้เกิดการเกรียมแดด เป็นฝ้า แห้งกร้าน และทำให้เกิดมะเร็งผิวหนังได้ UV-A สามารถส่องผ่านกระจก และเมฆเข้าถึงชั้นบรรยากาศ รังสีนี้ทำให้ผิวคล้ำแดดเพราะกระตุ้นให้เกิดการสร้างเมลานิน และเป็นสาเหตุให้เกิดรอยเหี่ยวย่น ปัจจัยที่ทำให้ผ้ามีสมบัติต้านรังสียูวี ได้แก่ องค์ประกอบของผ้า โครงสร้างของผ้า การบิดของเส้นใย ความหนา น้ำหนัก การเปียก ความชื้น การคลายตัว สารเคมีและสารเติมรวมทั้งสีของผ้า [1] อิทธิพลสารตัวเติมในระหว่างขั้นตอนการปั่นเส้นด้ายหรือเคลือบบนเส้นด้ายโดยตรง สารตัวเติม เช่น สีย้อม รงควัตถุ (Pigment) สารปรับสภาพ (Delusterant) สารเพิ่มความสว่าง (Optical Brighteners) และสารดูดซับรังสียูวี (UV Absorbers) ซึ่งเป็นการช่วยปรับปรุงสมบัติป้องกันรังสียูวีแก่ผ้าที่มีความป้องกันต่ำ เช่น ผ้าฝ้าย ไหม เรย่อน ผ้าขนสัตว์ เส้นใยไนลอน และผ้าที่ยังไม่ย้อมสีได้ สารตัวเติมพวกไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) และสังกะสีออกไซด์ (ZnO) ทำให้เส้นด้ายมีความสว่างขึ้น และสะท้อนรังสียูวีในช่วงความยาวคลื่น 360-430 นาโนเมตร อนุภาคนาโนของเงิน (Ag) ที่เคลือบบนผ้าฝ้าย แสดงสมบัติป้องกันรังสียูวีที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับผ้าฝ้ายฟอก สารดูดซับรังสียูวีที่ประกอบไปด้วยสารอินทรีย์ที่ไม่

มีสี เรียกว่า โครมอฟอร์ (Chromophore) จะมีหมู่ฟังก์ชันหรือส่วนของโครงสร้างที่ทำหน้าที่ดูดกลืนรังสีได้ [2], [3] นอกจากการป้องกันดังกล่าวสมบัติในการยับยั้งแบคทีเรียยังเป็นสิ่งที่น่าสนใจอย่างยิ่ง เพราะเสื้อผ้าหลังจากมีการใช้งานในช่วงระยะเวลาหนึ่ง ความชื้นและอุณหภูมิที่บนร่างกายมนุษย์ เหมาะสมอย่างยิ่งในการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย และเมื่อแบคทีเรียย่อยสลายเหงื่อที่อยู่บนร่างกายเราและทำให้เกิดกลิ่นอันไม่พึง สारเคลือบที่มีสมบัติในการยับยั้งแบคทีเรียที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย ได้แก่ พอลิไดเมทิลซิลลอกเซนที่มีหมู่ปลายสายโซ่เป็นหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxy End-functionalized Polydimethyl siloxane, HOPDMS) และพอลิไดเอทอกซีซิลลอกเซน (Poly diethoxysiloxane, PDES) รวมทั้งพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ งานวิจัยผ้าไหมเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (Reduced Graphene Oxide, RGO) [4] ผ้าฝ้ายเคลือบไคโตซาน ไทเทเนียมไดออกไซด์ และซิลิกา (SiO_2) สามารถยับยั้งแบคทีเรีย *เอสเชอริเชีย โคไล* (*E. coli*) และ *สแตปฟีโลคอคคัส ออเรียส* (*S. aureus*) [5] ในเส้นใยสังเคราะห์ได้เป็นอย่างดี สารยับยั้งแบคทีเรียที่เติมลงในกระบวนการสังเคราะห์เส้นด้ายพอลิเมอร์โดยตรง เช่น สารประกอบ ควอเทอนารีแอมโมเนียม (Quaternary Ammonium Compounds; QACs) มีการยับยั้งแบคทีเรียค่อนข้างต่ำ เมื่อเทียบกับกลุ่มอื่น [6] กระบวนการเคลือบสารเพิ่มสมบัติต่าง ๆ บนเส้นด้ายจะใช้การกรอด้วยจุ่มลงในอ่างที่มีสารเคลือบ ทำให้แห้งแล้วม้วนเก็บ จากการศึกษาพบว่าความเร็วในการดึง ม้วนเป็นปัจจัยที่ผลต่อการเสื่อมของความแข็งแรง การยืดออก (Elongation) ความเป็นขน (Hairiness) ในเส้นด้าย ซึ่งความเร็วตั้งแต่ 1,000 ถึง 1,400 เมตรต่อนาที สามารถกำจัดเส้นด้ายที่มีขนาดสั้น ขนบนเส้นด้าย และสิ่งแปลกปลอมในเส้นใยเส้นด้ายหวี (Combed Counts) และเส้นด้ายสาาง (Carded Counts) ออกไปสูงถึงร้อยละ 40-60 และ 65-85 แต่หากใช้ความเร็วสูง

1,500 เมตรต่อนาที จะทำให้เส้นด้ายขาด [7] การปรับปรุงผิวเส้นด้ายของฝ้ายด้วยการจุ่มเคลือบด้วยเมทิลเมทาคริเลต (Methyl Methacrylate) ด้วยกระบวนการบิวด-ทำให้แห้ง-ทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีด้วยความร้อน (Pad-Dry-Cure) แล้วอบแห้งที่ 120 องศาเซลเซียส ทำให้ความเป็นขนของเส้นด้ายฝ้ายลดลง แต่สมบัติความต้านทานแรงดึงและค่าการยืดตัวลดลง [8] การศึกษาการปรับปรุงสมบัติทางไฟฟ้าของเส้นด้ายฝ้ายด้วยเฟอร์ริกคลอไรด์ (FeCl_3) และวิธีโอะระเหยของพอลิไพโรล (Polypyrrole) เส้นด้ายถูกดึงด้วยอัตราเร็ว 2 เมตรต่อนาที ผ่านอ่างสารละลายที่มีส่วนผสมของสารตั้งต้นเฟอร์ริกคลอไรด์และเมทานอล เมื่ออบแห้งด้วยอากาศร้อนแล้วดึงผ่านห้องพอลิเมอไรเซชันที่มีไอของพอลิไพโรลมอนอเมอร์ ทำให้เกิดเป็นชั้นฟิล์มพอลิไพโรลและเหล็กบนผิวด้าย ชั้นเคลือบมีความหนาประมาณ 1-2 ไมโครเมตร ค่าความเหนียวและค่าการยืดตัวของเส้นด้ายลดลงตามปริมาณสารตั้งต้นที่เพิ่มขึ้น และแสดงสมบัติความต้านทานไฟฟ้าลดลง [9]

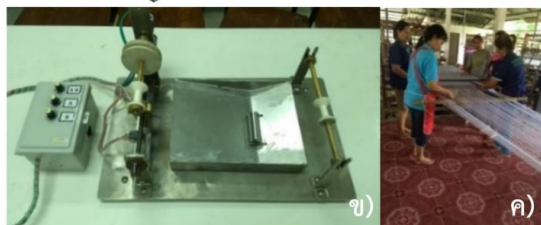
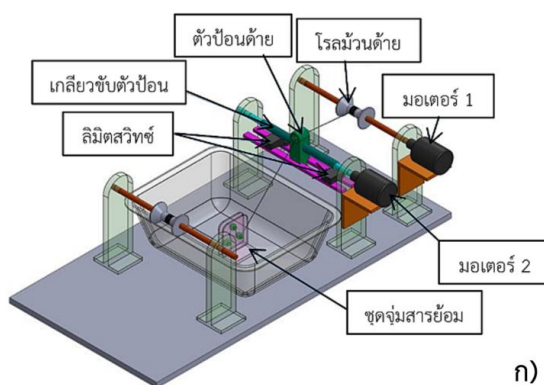
ดังนั้นงานวิจัยนี้มุ่งพัฒนาการเคลือบเส้นด้ายด้วยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ โซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต และแมกนีเซียมคลอไรด์ ด้วยเครื่องกรอด้วย แล้วทดสอบสมบัติการป้องกันรังสียูวีและสมบัติการยับยั้งแบคทีเรีย

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 การเตรียมสารละลายสำหรับเคลือบด้วยและการทดสอบ

สารละลาย ก คือ สารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA, Ajax Finechem) ในน้ำ 400 มิลลิลิตร โดยแปรผันปริมาณ 0.35, 0.45 และ 0.54 โมลาร์ (ในน้ำทั้งหมด 1,300 มิลลิลิตร) กวนนาน 30 นาที และใช้ความร้อนช่วยในการทำละลาย สารละลาย ข คือ สารละลายโซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (NaH_2PO_4 , Ajax Finechem) ปริมาณ 30 กรัม ในน้ำ 500 มิลลิลิตร

กวนเป็นเวลา 30 นาที สารเคลือบเตรียมได้โดยเติมแมกนีเซียมคลอไรด์ ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, Ajax Finechem) ปริมาณ 6 กรัม และน้ำยาปรับผ้านุ่ม 4 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ที่มีน้ำ 400 มิลลิลิตร แล้วใส่สารละลาย ก และ ข ผสมกันในบีกเกอร์ที่ได้เตรียมไว้ กวนให้เข้ากันเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นใส่สารเคมีดังกล่าวลงไปในชุดจุ่มสารเคลือบของเครื่องกรอด้วยนำด้ายที่เป็นเส้นใยฝ้ายเมอร์เซอร์ไรซ์ 60 (Mercerizing Cotton No. 60) เข้าเครื่องกรอด้วยผ่านชุดจุ่มสารเคลือบด้วยความเร็วเชิงเส้นที่ 4.6 เมตรต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง ดังรูปที่ 1 ก) และ ข)



รูปที่ 1 ก) แบบร่างของเครื่องกรอด้วย ข) เครื่องกรอด้วย และ ค) การเข้าด้ายที่เคลือบด้วยฝืนหวิเพื่อทอผืนด้วยก็

2.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติและการทดสอบสมบัติต่าง ๆ

นำด้ายที่ผ่านการจุ่มเคลือบไปให้แห้งสนิท และทดสอบสมบัติต่างๆ คือ โครงสร้างจุลภาคด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิสชัน (Field Emission Scanning Electron Microscope,

FESEM, FEI, Apreo) และวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุบนเส้นด้ายด้วย (Energy Dispersive X-ray Spectrometer, EDS) วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีของชั้นเคลือบที่ด้ายดูดซับด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (FTIR, Bruker, VERTEX 70) เทคนิคโพแทสเซียมโบรไมด์เพตเลต (KBr Pellet) นำด้ายที่ผ่านการเคลือบแล้วทอมือให้เป็นผืนด้ายที่กระตุก ลายผ้าทอยกดอก หน้ากว้าง 40 นิ้ว ใช้ด้ายทั้งหมด 2540 เส้น ดังรูปที่ 1 ค) แล้วทดสอบการป้องกันรังสียูวีของผ้าด้วยมาตรฐาน AATCC Test Method 183-2004 ด้วยเครื่องวัดค่าการส่องผ่านแสง (UV-Vis Spectro Photometer, GENESYS 10s) ตั้งแต่ความยาวคลื่น 200-400 นาโนเมตร และคำนวณค่าแฟกเตอร์การป้องกันรังสียูวี (Ultraviolet Protection Factor, UPF) ดังสมการที่ (1)

$$UPF = \frac{\sum_{280}^{400} E_\lambda S_\lambda A_\lambda}{\sum_{280}^{400} E_\lambda T_\lambda S_\lambda A_\lambda} \quad (1)$$

เมื่อ E_λ คือ ค่าความเข้มรังสีที่มีผลกระทบต่อผิวหนังมนุษย์ S_λ คือ ความเข้มแสงเชิงสเปกตรัมของรังสีดวงอาทิตย์ T_λ คือ ค่าการส่องผ่านของแสงผ่านชิ้นตัวอย่างที่สามารถวิเคราะห์ได้ A_λ คือ ความยาวคลื่นที่ใช้ทดสอบ (นาโนเมตร)

ตารางที่ 1 ระดับ UPF ในการป้องกันรังสียูวี [10], [11]

ช่วง UPF	ระดับการป้องกันรังสียูวี	ร้อยละการส่องผ่านรังสี UV-B (%)
<15	ป้องกันรังสียูวีได้น้อย (≤93.3%)	<6.7
15-24	ป้องกันรังสียูวีได้ดี (93.3-95.9%)	6.7-4.2
25-39	ป้องกันรังสียูวีได้ดีมาก (96.0-97.4%)	4.1-2.6
40-50, 50+	การป้องกันรังสียูวีได้สูงสุด	≤2.5

ค่าการต้านรังสียูวีจะบ่งบอกถึงความสามารถในการป้องกันรังสียูวีของสิ่งทอ ซึ่งตามมาตรฐานจะกำหนดค่าความสามารถในการป้องกันรังสียูวีดังตารางที่ 1 สำหรับผลการทดสอบการต้านรังสียูวีได้ใช้ตัวอย่างทั้งหมด 5 ตัวอย่าง

2.3 การทดสอบการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย

การทดสอบการยับยั้งแบคทีเรีย จะทดสอบกับแบคทีเรีย 2 ชนิด โดยชนิดแกรมบวก คือ *S. aureus* และชนิดแกรมลบ คือ *E. coli* โดยเริ่มต้นจากนำเชื้อแบคทีเรียใส่ในหลอดทดลองที่มีอาหารเหลว (Trypticase Soy Broth) ปริมาตร 4 มิลลิลิตร แล้วนำไปบ่มที่ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นเติมเชื้อแบคทีเรียปริมาตร 1 มิลลิลิตร ลงในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ร้อยละ 0.85 ปริมาตร 9 มิลลิลิตร โดยใช้วิธีการเจือจางตัวอย่างเชื้อเริ่มต้นเพื่อการนับจำนวนจุลินทรีย์ (Serial Dilution Method) แล้วนำ 0.1 มิลลิลิตร ไปหยดบนอาหารแข็งสำหรับเชื้อ *E. coli* ซึ่งเป็นแบคทีเรียแกรมลบ และ *S. aureus* เป็นแบคทีเรียแกรมบวกใช้อาหารวุ้นเลี้ยงเชื้อ (Nutrient Agar, NA) โดยใช้เทคนิคการทำให้เชื้อกระจายในจานเพาะเชื้อ (Spread Plate) แล้วเจือจางจำนวนเชื้อให้อยู่ในช่วง 30-300 โคโลนี หลังจากที่อยู่ความเข้มข้นของเชื้อตั้งต้นแล้ว ก็นำเชื้อที่ได้ไปเตรียมให้มีความเข้มข้นเชื้อประมาณ 10^3 โคโลนีต่อมิลลิลิตร แล้วนำไปทดสอบตามมาตรฐานทดสอบการยับยั้งแบคทีเรียของสิ่งทอ คือ AATCC Test Method 100-2004 การคำนวณอัตราการลดลงของแบคทีเรีย (% Disinfection) โดยใช้สมการที่ (2)

$$\%Disinfection = \frac{N_0 - N}{N_0} \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ N_0 คือ จำนวนเชื้อเริ่มต้น 10^3 โคโลนีต่อมิลลิลิตร และ N คือ จำนวนเชื้อ ณ เวลาทดสอบต่าง ๆ (โคโลนีต่อมิลลิลิตร)

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 พื้นผิวของด้ายเคลือบจากการวิเคราะห์

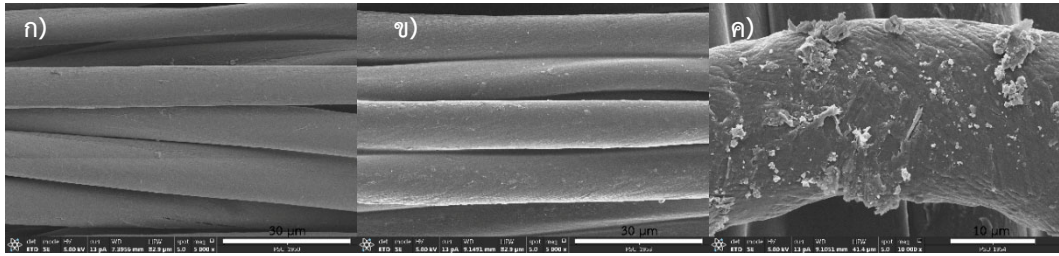
FESEM และ EDS

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคลักษณะผิวของเส้นด้ายเมื่อทำการเคลือบด้วย โซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต แมกนีเซียมคลอไรด์ น้ำยาปรับผ้านุ่ม และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ที่มีความเหมาะสมที่ความเข้มข้น 0.45 โมลาร์ ดังรูปที่ 2 โดยใช้กำลังขยายต่างกัน คือ 5,000 และ 10,000 เท่า ตามลำดับ ลักษณะพื้นผิวของเส้นด้ายที่ไม่มีผ่านการเคลือบ (รูปที่ 2 ก) จะมีลักษณะค่อนข้างเรียบ ในขณะที่ลักษณะพื้นผิวของเส้นด้ายที่ผ่านการเคลือบที่ความเร็ว 4.6 เมตรต่อนาที (รูปที่ 2 ข และ ค) จะเห็นได้ว่ามีสารเคลือบติดที่ผิวด้าย ลักษณะผิวมีความขรุขระ ไม่เรียบ ผลการวิเคราะห์การกระจายของธาตุบนผิวด้ายเคลือบด้วยเทคนิค EDS รูปที่ 3 ผลการทดลองผ้าที่เคลือบด้วย โซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต แมกนีเซียมคลอไรด์ น้ำยาปรับผ้านุ่มและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ พบธาตุคาร์บอน (C) ออกซิเจน (O) ฟอสฟอรัส (P) โซเดียม (Na) คลอไรด์ (Cl) และแมกนีเซียม (Mg) รูปที่ 3 ข) กระจายตัวอยู่ทั่วเส้นด้าย และมีปริมาณร้อยละ 48.4, 48.1, 1.6, 1.2, 0.4 และ 0.1 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ในขณะที่เส้นด้ายไม่เคลือบจะพบเพียงธาตุคาร์บอนและออกซิเจนมีปริมาณร้อยละ 50.2 และ 49.8 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ รูปที่ 3 ก) ดังนั้นจึงบ่งบอกได้ว่าสารเคลือบที่ใช้ในการทดลองนั้นได้ติดบนผ้าและเส้นใย

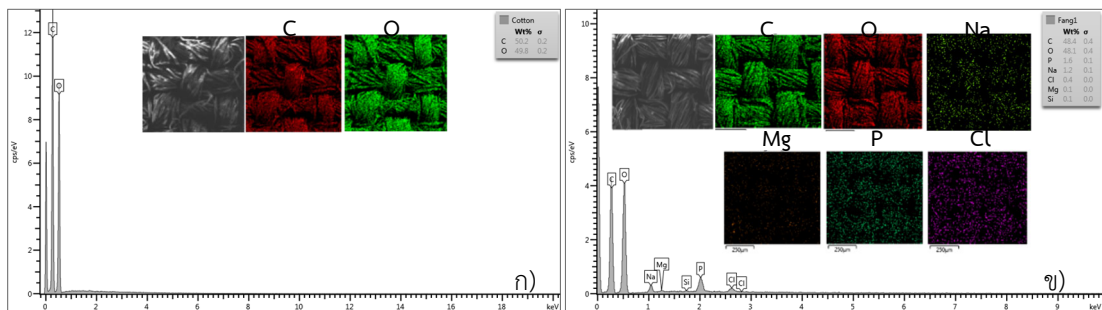
3.2 สมบัติการต้านรังสียูวีของด้ายเคลือบ

ผลการทดลองพบว่าเส้นด้ายที่เคลือบด้วย โซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต และแมกนีเซียมคลอไรด์ และน้ำยาปรับผ้านุ่มปริมาตร 4 มิลลิลิตร โดยแปรผันปริมาณ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ที่ความเข้มข้น 0.35,

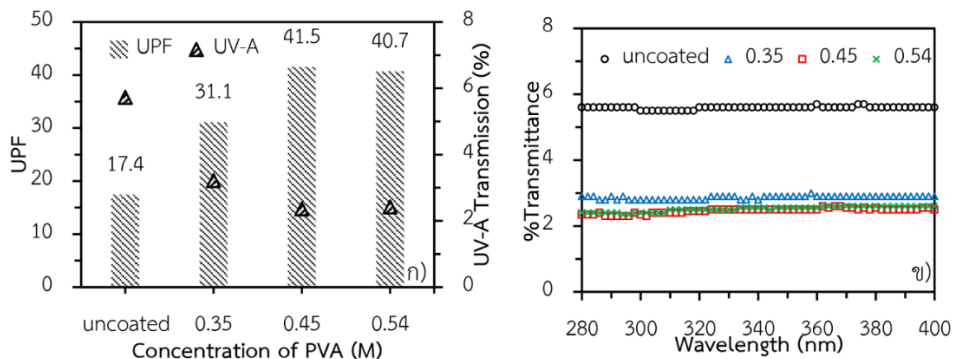
0.45 และ 0.54 โมลาร์ นำมาทอให้เป็นผืน ทดสอบค่าการส่องผ่านแสงและการต้านรังสียูวี ผลการทดสอบดังรูปที่ 3 ก) แสดงให้เห็นค่าการส่องผ่านแสงเปรียบเทียบที่ความยาวคลื่น 350 นาโนเมตร ของผ้าลดลงเมื่อเส้นใยถูกเคลือบด้วยสารตัวเติมปริมาณเพิ่มขึ้น โดยค่าการส่องผ่านแสงของผ้าที่เคลือบด้วยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เข้มข้น 0.45 โมลาร์ เพียงร้อยละ 2.5 แต่ถ้าหากผ้าไม่เคลือบจะมีร้อยละค่าการส่องผ่านแสงถึงร้อยละ 5.6 เมื่อคำนวณค่า UPF ดังรูปที่ 3 ข) จะเห็นแนวโน้มการเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณสารตัวเติมเพิ่มขึ้น และผ้าเคลือบจะมี UPF สูงกว่าด้ายที่ไม่ได้เคลือบ (Uncoated) อีกด้วย โดยเมื่อการเติมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์มากขึ้นที่ความเข้มข้น 0.45 โมลาร์ จะมี UPF สูงสุด คือ 41 ส่วนค่าร้อยละการส่องผ่านแสงผ่านเนื้อผ้าของ UV-A จะแปรผกผันกับระดับการป้องกันรังสียูวี คือ ถ้าหากผ้ามี UPF สูง UV-A ส่องผ่านเนื้อผ้าลดลงตามมาตรฐานจะต้องต่ำกว่าร้อยละ 5 ตามมาตรฐานยุโรปและจีน [6], [7] ดังนั้นจากการทดลองพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ความเข้มข้น 0.45 โมลาร์ เป็นปริมาณที่เหมาะสมต่อการต้านรังสียูวี คือ อยู่ระดับช่วง 40-50 แสดงถึงความสามารถในการป้องกันรังสียูวีได้สูงสุด ซึ่งแม้ผ้าทอที่ด้ายเคลือบด้วยสารดังกล่าวไม่สามารถอธิบายสมบัติต้านรังสียูวีอย่างเห็นได้ชัด แต่คาดว่าในการเคลือบสาร สารเคลือบจะทำให้เส้นด้ายเกิดการพันธะเชื่อมโยงกัน เกิดเส้นด้ายขยายตัวและบิดงอหรือทำให้รูละหว่างเส้นใยเล็กลง ซึ่งพบว่าผ้าเคลือบมีความหนาและน้ำหนักผ้าเพิ่มขึ้น และผลการคำนวณความหนาแน่นของผ้าทอเคลือบสารดังกล่าวมีค่าลดลงจาก 4.37 เหลือ 3.89 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เมื่อเปรียบเทียบกับผ้าไม่เคลือบ ซึ่งการส่องผ่านแสงผ่านเนื้อผ้ายังขึ้นกับปัจจัยอื่นๆ ประกอบอีกด้วย เช่น ลักษณะการทอเป็นต้น ดังรูปที่ 5 ก) - ง) นอกจากนี้



รูปที่ 2 ภาพ FESEM ก) ผ้าไม่เคลือบ และผ้าเคลือบด้วยความเร็ว 4.6 เมตรต่อนาที ที่กำลังขยาย ข) 5,000 เท่า และ ค) 10,000 เท่า

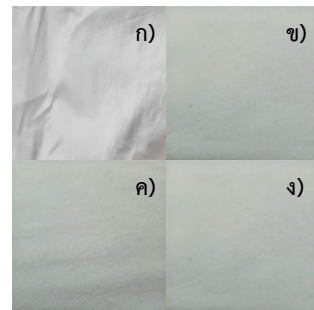


รูปที่ 3 EDS ก) ผ้าไม่เคลือบ ข) ผ้าเคลือบ ด้วยโซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต แมกนีเซียมคลอไรด์ โพลิไวนิลแอลกอฮอล์ และน้ำยาปรับผ้านุ่ม



รูปที่ 4 ก) UPF (กราฟแท่ง) และค่า UV-A (▲) และ ข) ค่าการส่องผ่านแสงของผ้าฝ้ายเปรียบเทียบกับที่ไม่เคลือบ

สีผ้าก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลให้ผ้ามีความต้านทานรังสียูวีสูงกว่าผ้าที่ยังไม่เคลือบ เนื่องจากผ้าเคลือบจะดูดกลืนแสงในช่วงที่มองเห็นได้ (Visible Light) และรังสียูวี ซึ่งเกิดจากเม็ดสีและลิกนินเป็นตัวดูดซับยูวี [2] โดยเมื่อผ้าหรือเส้นใยถูกฟอกขาว เช่น กระบวนการเมอร์เซอร์ไรซ์ที่เป็นกระบวนการปรับปรุงผิวผ้าฝ้ายด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ทำให้ผ้าฝ้ายมีความเงาวาวมากขึ้น ซึ่งกระบวนการนี้จะทำให้สารสี หรือลิกนินถูกกำจัดทำให้สูญเสียสมบัติดังกล่าว จากการศึกษพบว่าการใช้สาร



รูปที่ 5 ภาพถ่ายผ้า ก) ผ้าไม่เคลือบ และผ้าเคลือบด้วย ข) PVA40 ค) PVA50 และ ง) PVA60

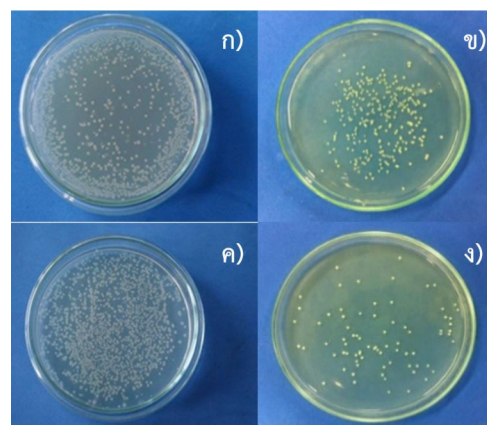
เคลือบผ้าชนิดเดียวกันและความเข้มข้นต่างกันแสดงให้เห็นว่าค่า UPF มีค่าแตกต่างกันด้วย ในขณะที่ผ้าที่ความสว่างกว่าจึงดูดกลืนแสงได้น้อยกว่า ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบค่าการส่องผ่านแสง รูปที่ 4 ข) อย่างไรก็ตามความเข้มข้นสีเคลือบที่เพิ่มขึ้นหรือโชนสีที่เข้มกว่าจะมีค่า UPF ที่สูงกว่าผ้าสีขาว [2] โดยมีค่าการส่องผ่านน้อยกว่าร้อยละ 20 ในขณะเดียวกัน ความลึกของสีมีอิทธิพลต่อความป้องกันรังสียูวีได้เช่นกัน

3.3 การยับยั้งแบคทีเรีย

การทดลองยับยั้งแบคทีเรียตามมาตรฐาน AATCC Test Method 100-2004 ผลการทดลองเส้นด้ายผ่านการเคลือบด้วยโซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต แมกนีเซียมคลอไรด์ น้ำยาปรับผ้านุ่ม และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ดังรูปที่ 6 ก) - ง) พบว่าเส้นด้ายเคลือบสามารถยับยั้งแบคทีเรีย *S. aureus* ได้ถึงร้อยละ 87 ในเวลา 24 ชั่วโมง ดังรูปที่ 6 ข) ผลการทดสอบการยับยั้งแบคทีเรียชนิด *E. coli* ที่เวลา 24 ชั่วโมง เส้นด้ายเคลือบสามารถยับยั้งแบคทีเรียได้ถึงร้อยละ 91 ดังรูปที่ 6 ง) เพราะว่าในสารเคลือบยังมีกลุ่มไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxyl Radical, OH) ในหมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl Groups) ของสารเคลือบ มีฤทธิ์รุนแรงต่อเซลล์ของแบคทีเรีย โดยเยื่อหุ้มเซลล์จะถูกออกซิไดซ์ ทำให้เกิดการเสียสภาพของโปรตีนและไขมันในเยื่อหุ้มเซลล์ โดยทำให้เกิดภาวะความผิดปกติของระบบควบคุมการแพร่ของสารต่างๆ เข้า-ออกเซลล์ เซลล์หยุดการเจริญเติบโตหรือทำลายเยื่อหุ้ม โครงสร้างโมเลกุล และโปรตีนภายในเซลล์

นอกจากนี้กลไกการยับยั้งแบคทีเรียของสารกระตุ้นที่เติมลงไปไนสีย้อม เนื่องจากเมื่อไอออนของโลหะจะสัมผัสกับผนังเซลล์ ซึ่งสามารถแพร่กระจายประจุไปเกาะตามผนังและแทรกเข้าไปภายในเซลล์ ทำให้เกิดภาวะรวมตัวของดีเอ็นเอ (DNA Condensation) ภายในเซลล์ ประจุของโลหะเข้าไปจับเอนไซม์โปรตีนเนส

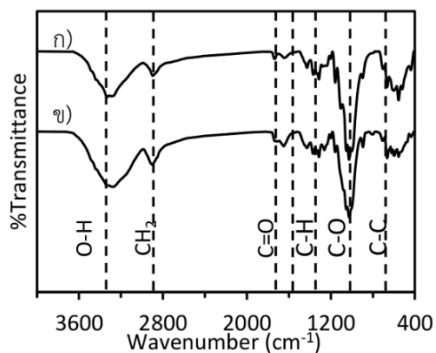
(Proteinase) ที่ทำหน้าที่เกี่ยวกับระบบเมตาบอลิซึมของเซลล์ ซึ่งจะจับกับหมู่ซัลฟิไดรล (-SH) ที่มีอะตอมของซัลเฟอร์ (S) เป็นองค์ประกอบ ซึ่งมีประจุเป็นลบ (S^{2-}) และทำให้เกิดกระบวนการทำงานของเอนไซม์หยุดการทำงานเซลล์แบบที่เรียกว่าหยุดการเจริญเติบโตเสื่อมสภาพ และตายในที่สุด และการที่แบคทีเรีย *E. coli* สามารถยับยั้งได้สูงกว่า *S. aureus* นั้น เนื่องจาก *S. aureus* มีผนังเซลล์ที่หนากว่า *E. coli* [11]-[13] สมบัติยับยั้งแบคทีเรียของแมกนีเซียมคลอไรด์และธาตุกลุ่มคลอไรด์ อธิบายได้ด้วยการจับกันทางชีวภาพของแมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+}) ซึ่งมีรัศมีไอออน (Ionic Radius) น้อย และมีความหนาแน่นประจุ (Charge Density) สูง กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เนื่องจากความหนาแน่นประจุสูงของแมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+}) ทำให้ไอออนบวกเป็นตัวให้โปรตอนโมเลกุลของน้ำมากขึ้น ไอออนนี้ทำให้เกิดการยับยั้งแบคทีเรีย ซึ่งเกี่ยวกับปฏิกิริยาออสโมซิส การขนส่งสารระหว่างเซลล์ ปฏิกิริยาระหว่างไอออนกับโปรตีนและลิพิด ทำให้เกิดความผิดปกติของการยอมให้สารผ่านเข้าเซลล์ (Membrane Permeability) และศักย์เยื่อหุ้มเซลล์ (Membrane Potential) ทำให้เซลล์หยุดการเจริญเติบโตในที่สุด [14], [15]



รูปที่ 6 การกระจายตัวแบคทีเรียของ *S. aureus* ก) เวลาเริ่มต้น ข) ที่เวลา 24 ชม. และการกระจายตัวแบคทีเรียของ *E. coli* ค) เวลาเริ่มต้น ง) ที่เวลา 24 ชม.

3.4 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วย FTIR

ผลการศึกษาโครงสร้างทางเคมีของสารเคลือบที่ติดบนเส้นด้ายเคลือบด้วยเทคนิค FTIR ช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 400-4,000 ต่อเซนติเมตร ดังรูปที่ 7 พบว่าตำแหน่งเลขคลื่นหลักของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ตำแหน่ง 3280, 2917, 1730, 1425, 1324, 1024 และ 839 ต่อเซนติเมตร ซึ่งเกิดการสั่นของโครงสร้างต่าง ๆ คือ การยืดออกของ O-H ของหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl Group) การยืดแบบไม่สมมาตรของหมู่ CH_2 การสั่นของ C=O ที่พบได้ในโครงสร้างของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และเซลลูโลสในฝ้าย การสั่นแบบเบี่ยงเบนของ C-H ของ CH_2 โครงสร้าง C-H การสั่นของ C-O ของหมู่อะซีทิล (Acetyl Groups) และการสั่นของโครงสร้าง C-C ตามลำดับ [16] สำหรับที่ตำแหน่งเลขคลื่นที่แสดงถึงโครงสร้างเซลลูโลสของเส้นด้ายฝ้าย จะเกิดการสั่นของ C-H, การงอของ C-H การสั่นของโครงสร้าง C-OH และการสั่นออกนอกระนาบของ C-C ของโครงสร้างวงแหวนเบนซีน (Benzene Rings) ที่ตำแหน่งเลขคลื่นที่ 2900, 1420, 1150, 1024 และ 891 ต่อเซนติเมตร ตามลำดับ ส่วนที่ตำแหน่งเลขคลื่นที่ 3431, 1725 และ 1014 ต่อเซนติเมตร จะเป็นการสั่นของ O-H, C=O และการสั่นออกนอกระนาบของ O-H ในโครงสร้างหมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl Groups) [17] จากผลการวิเคราะห์พบองค์ประกอบทางเคมีที่มีอิทธิพลต่อการ



รูปที่ 7 FTIR ก) ฝ้ายฝ้าย และ ข) เส้นด้ายเคลือบด้วยสารเคลือบ

ยับยั้งแบคทีเรีย คือ หมู่ไฮดรอกซิล และหมู่คาร์บอกซิลิกในเซลลูโลสและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ตามลำดับ ซึ่งหมู่ทั้ง 2 ก็สามารถยับยั้งแบคทีเรียได้เช่นกัน

ในขณะที่ไม่สามารถตรวจพบองค์ประกอบของน้ำยาปรับผ้านุ่มที่ขายตามท้องตลาดนั้น มักเป็นสารประกอบ ควอเตอร์นารี แอมโมเนียม (Quaternary Ammonium Compounds) ที่มีตำแหน่งเลขคลื่นหลักที่ 2925 และ 2850 ต่อเซนติเมตร [18]

4. สรุป

ด้ายที่เคลือบด้วยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีความเข้มข้น 0.45 โมลาร์ โซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตแมกนีเซียมคลอไรด์ ด้วยเครื่องกรอด้วย ซึ่งพบธาตุดังกล่าวติดบนพื้นผิวของด้ายที่เคลือบด้วยความเร็ว 4.6 เมตรต่อนาที แล้วนำไปทอหม้อด้วยที่กระตุก นำไปศึกษาการป้องกันรังสียูวีของด้ายเคลือบอยู่ในระดับมีความสามารถในการป้องกันรังสีอัลตราไวโอเลตได้สูงสุด ผลการทดสอบการยับยั้งแบคทีเรีย *S. aureus* และ *E. coli* เป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่าสามารถยับยั้งแบคทีเรียได้ถึงร้อยละ 87 และ 91 ตามลำดับ เนื่องจากการยับยั้งแบคทีเรียนั้นเพราะมีโครงสร้างทางเคมีของธาตุที่เคลือบติดบนเส้นด้ายเคลือบซึ่งได้จากผลการวิเคราะห์ด้วย FTIR พบว่าตำแหน่งเลขคลื่นหลักของเซลลูโลสและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ซึ่งเกิดการสั่นของโครงสร้างในกลุ่มไฮดรอกซิลและหมู่คาร์บอกซิลิก ตามลำดับ ที่สามารถยับยั้งแบคทีเรียได้

5. กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยงบรายได้ปี 2562 จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] C. W. Kan, "A Study on Ultraviolet protection of 100% cotton knitted fabric:

- Effect of fabric parameters,” *The Scientific World Journal*, vol. 2014, pp. 1-10, 2014.
- [2] P. D. Dubrovski, *Woven fabric engineering: Woven fabrics and ultraviolet protection*, 1 st ed. BoD–Books on Demand, 2010.
- [3] A.Sivakumar, R. Murugan, K. Sundaresan and S. Periyasamy, “UV protection and self-cleaning finish for cotton fabric using metal oxide nanoparticles,” *Indian journal of Fibre and Textile Research*, vol. 38, no. 3, pp. 285-292, 2013.
- [4] M. Masae, L. Wanapong, L. Sikong, P. Choopool and P. Kongsong, “Hydrophobic and antibacterial activity of silk textile surfaces using reduced graphene oxide (rGO) and TiO_2 coating,” *Journal of Materials Science and Applied Energy*, vol. 7, no. 3, pp. 307-316, 2018.
- [5] M. Masae, P. Pitsuwan, T. Sriwang, S. Sukwisut and P. Choopool, “Hydrophobicity and antibacterial activity of coated cotton fabrics with chitosan, TiO_2 and SiO_2 ,” *Journal of Science and Technology*, vol. 11, no. 21, pp. 165-178, 2019.
- [6] M. Periolatto, F. Ferrero, C. Vineis, A. Varesano and G. Gozzelino, “Novel Anti microbial Agents and Processes for Textile Applications,” *Antibacterial Agents*, vol. 17, 2017.
- [7] M. D. Zahidul Islam, “Effect of Winding Speed on Yarn Properties,” *Journal of Engineering Research and Application*, vol. 9, no. 3, pp. 28-34, 2019.
- [8] M. Shanbeh, B. Baghaei, S. Alidadi and A. Tabibi, “Coating of Core Yarn. An Alternative Method of Decreasing the Strip-back Phenomenon of Core-spun Yarns,” *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, vol. 19, no. 5, pp. 28-32, 2011.
- [9] Z. Yildiz, I. Usta and A. Gungor, “Investigation of the electrical properties and electromagnetic shielding effectiveness of polypyrrole coated cotton yarns,” *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, vol. 2, no. 98, pp. 32-37, 2013.
- [10] G. Daniele, B. Laura, D. L. Sara, P. Patrizia, S. Arianna, C. Francesca, S. Francesco, Z. Gaetano and R. Annalisa, “UV protective properties of cotton and flax fabrics dyed with multifunctional plant extracts,” *Dyes and Pigments*, vol. 105, pp. 89-96, 2014.
- [11] W. Sriwittayakul, T. Rungrudejanarueti, T. Srimuni, M. Masae and P. Choopool, “Antibacterial activity and solar UV-protective properties of cotton dyed with natural dye compared with commercial yellow robe,” *RMUTI JOURNAL Science and Technology*, vol. 12, no. 1, pp. 27-41, 2019.
- [12] F. Ruipérez, J. I. Mujika, J. M. Ugalde, C. Exley and X. Lopez, “Pro-oxidant activity of aluminum: promoting the Fenton reaction by reducing Fe (III) to Fe (II),” *Journal of Inorganic Biochemistry*, vol. 117, pp. 118-123, 2012.
- [13] F. S. Ghaheh, S. M. Mortazavi, F. Alihosseini, A. Fassihi, A. S. Nateri and D. Abedi,

- “Assessment of antibacterial activity of wool fabrics dyed with natural dyes,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 72, pp. 139-45, 2014.
- [14] R. J. Lambert and M. Stratford, “Weak-acid preservatives: modelling microbial inhibition and response,” *Journal of Applied Microbiology*, vol. 86, no. 1, pp. 157-164, 1999.
- [15] P. O. Alarcón, K. Sossa, D. Contreras, H. Urrutia and A. Nocker, “Antimicrobial properties of magnesium chloride at low pH in the presence of anionic bases,” *Magnesium Research*, vol. 27, no. 2, pp. 57-68, 2014.
- [16] P. Garside and P. Wyeth, “Identification of cellulosic fibres by FTIR spectroscopy-thread and single fibre analysis by attenuated total reflectance,” *Studies in conservation*, vol. 48, no. 4, pp. 269-275, 2003.
- [17] A. Kharazmi, N. Faraji, R. M. Hussin, E. Saion, W. M. Yunus and K. Behzad, “Structural, optical, opto-thermal and thermal properties of ZnS-PVA nanofluids synthesized through a radiolytic approach,” *Beilstein Journal of Nanotechnology*, vol. 6, no. 1, pp. 529-536, 2015.
- [18] Y. Liu, C. Xiao, X. Li, L. Li, X. Ren, J. Liang and T. S. Huang, “Antibacterial efficacy of functionalized silk fabrics by radical copolymerization with quaternary ammonium salts,” *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 133, no. 21, pp. 43450, 2016.

<http://journal.rmutp.ac.th/>

สมบัติการดูดซับน้ำมันทอดอาหารของนอนูฟเวนจากเส้นใยเซลลูโลส ฟางข้าว

จิตต์โสภา เกลียวศักดิ์*

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

114 ซอยสุขุมวิท 23 เขตวัฒนา กรุงเทพมหานคร 10110

รับบทความ 24 กรกฎาคม 2563 แก้ไขบทความ 6 พฤศจิกายน 2563 ตอรับบทความ 25 ธันวาคม 2563

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการสกัดเส้นใยเซลลูโลสฟางข้าวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในภาวะที่ต่างกัน (ความเข้มข้นร้อยละ 5 10 และ 15 ที่อุณหภูมิห้อง 60 และ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0.5 1 2 และ 3 ชั่วโมง) และศึกษาการเตรียมนอนูฟเวนฟางข้าวด้วยวิธีการผลิตแผ่นเส้นใยแบบเปียก แล้วทดสอบความสามารถในการดูดน้ำมันในแนวตั้ง การดูดซึมไขมัน การซึมผ่านของอากาศ และลักษณะทางกายภาพของนอนูฟเวนที่เตรียมได้พบว่า ภาวะที่เหมาะสมในการสกัดเส้นใยเซลลูโลสฟางข้าว คือ สกัดด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 5 ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยจะให้ปริมาณเส้นใยเซลลูโลสฟางข้าวร้อยละ 22 ความยาวเส้นใย 1.96 เซนติเมตร จากการทดสอบความสามารถในการดูดน้ำมัน และการดูดซึมไขมันของนอนูฟเวนฟางข้าว พบว่า ความสามารถในการดูดน้ำมัน และการดูดซึมไขมันของนอนูฟเวนฟางข้าวจะเพิ่มขึ้น เมื่อน้ำหนักเส้นใยต่อพื้นที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากน้ำมันจะซึมผ่านเข้าไปในนอนูฟเวนโดยอาศัยช่องว่างระหว่างเส้นใยของนอนูฟเวนด้วยปรากฏการณ์การซึมตามรูเล็ก และนอนูฟเวนฟางข้าวสามารถดูดน้ำมันและดูดซึมไขมันปาล์มก่อนทอดอาหารได้ดีกว่าน้ำมันปาล์มหลังทอดอาหาร เนื่องจากน้ำมันปาล์มก่อนทอดอาหารมีความหนืดน้อยกว่าน้ำมันปาล์มหลังทอดอาหาร โดยความหนืดเพิ่มขึ้นจากอนุพันธ์ของลิพิด และสารอื่น ๆ ที่ละลายหรือแขวนลอยในน้ำมันมากขึ้นหลังทอดอาหาร ทำให้การเคลื่อนที่ซึมผ่านของน้ำมันปาล์มหลังทอดอาหารทำได้ยากกว่าน้ำมันปาล์มก่อนทอดอาหาร จากผลการทดลองชี้ให้เห็นว่านอนูฟเวนฟางข้าวมีสมบัติดูดซึมไขมันได้

คำสำคัญ : ฟางข้าว; นอนูฟเวน; ดูดซึมไขมัน; การสกัด; เซลลูโลส

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +666 2493 6689, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: jitsopa@g.swu.ac.th

<http://journal.rmutp.ac.th/>

Fried Oil Absorption Property of Nonwoven from Rice Straw Cellulose Fiber

Jitsopa Chaliewsak*

Faculty of Science, Srinakharinwirot University
114 Sukhumvit 23, Wattana, Bangkok 10110

Received 24 July 2020; Revised 6 November 2020; Accepted 25 December 2020

Abstract

The objectives of this research were to study cellulose fiber extraction from rice straw with sodium hydroxide in various conditions (with 5, 10 and 10% of sodium hydroxide at room temperature, 60°C and 90 °C for 0.5, 1, 2 and 3 hours) and to study rice straw nonwovens preparation by the wet-laid process. Oil wicking ability, oil absorption ability, air permeability, morphology and physical properties of prepared nonwovens were investigated. It was found that the optimal condition for cellulose fiber extraction from rice straw was 5% of sodium hydroxide at 90 °C for 2 hours. At this condition, the cellulose fiber yield of 22% and the fiber length of 1.96 cm were obtained. The oil wicking ability and oil absorption ability of rice straw nonwovens increased when weight per unit area increased. Therefore, oil absorbed into gaps between fibers of the nonwovens by capillary effect. Moreover, the nonwovens could wick and absorb virgin palm oil better than fried palm oil because virgin palm oil has a lower viscosity than fried palm oil. The viscosity increased from derived lipid and other substances which dissolve and disperse increasing after frying food. The results indicated that the rice straw nonwovens had oil absorption ability.

Keywords : Rice Straw; Nonwoven; Oil Absorption; Extraction; Cellulose

* Corresponding Author. Tel.: +666 2493 6689, E-mail Address: jitsopa@g.swu.ac.th

1. บทนำ

ฟางข้าวเป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่มีปริมาณมากในประเทศไทย เนื่องจากข้าวเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย ทั้งเป็นอาหารหลักของประชาชนในประเทศและเป็นสินค้าทางการเกษตรที่มีการส่งออกมากเป็นอันดับต้นๆ ของประเทศ [1] ปัจจุบันนิยมนำฟางข้าวมาใช้ประโยชน์ด้านการเกษตร เช่น อาหารสัตว์ ปุ๋ย และวัสดุคลุมดิน และการนำฟางข้าวมาประยุกต์เป็นเครื่องจักสาน อัดแข็งเป็นวัสดุทดแทนไม้ และขึ้นรูปเป็นภาชนะต่างๆ แต่ยังไม่ได้มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย และยังไม่ได้รับความนิยมในระดับอุตสาหกรรม [2] ฟางข้าวเป็นวัสดุประเภทลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulose) ซึ่งมีเซลลูโลส (Cellulose ร้อยละ 32–47) เฮมิเซลลูโลส (Hemicelluloses ร้อยละ 19–27) และลิกนิน (Lignin ร้อยละ 5–24) เป็นองค์ประกอบ [3] การสกัดแยกเส้นใยเซลลูโลสด้วยตัวทำละลายเป็นวิธีที่นิยมและมีประสิทธิภาพในการแยกเซลลูโลสจากวัสดุลิกโนเซลลูโลส เนื่องจากทำได้ง่ายและได้เส้นใยเซลลูโลสปริมาณมาก [4]–[6] N. Johar และ I. Ahmad [7] ได้สกัดแยกเซลลูโลสจากเปลือกข้าวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง สำหรับเตรียมเซลลูโลสนาโนคริสตัลจากเปลือกข้าว เพื่อใช้เป็นสารเสริมแรงในฟิล์มคอมโพสิตแป้งมันสำปะหลัง M. Boontorn และคณะ [8] ได้สกัดเส้นใยเซลลูโลสฟางข้าวด้วยวิธีทางเคมี และวิธี Thermal Steam Explosion เพื่อใช้ในการเตรียมฉนวนความร้อน พบว่า การสกัดด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 30 นาที เป็นภาวะที่เหมาะสมในการสกัด เนื่องจากได้เส้นใยเซลลูโลสที่มีค่า Aspect Ratio สูงที่สุด แต่จะได้ปริมาณเส้นใยน้อยและได้เส้นใยสั้น

เส้นใยเซลลูโลสฟางข้าวสามารถนำไปใช้งานด้านสิ่งทอโดยสามารถขึ้นรูปเป็นนอนวูฟเวน (Nonwoven) ที่มีลักษณะเป็นแผ่นเส้นใยที่มีการยึด

โครงสร้างให้ติดกันเพื่อทำเป็นผืนผ้า แต่ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นด้ายและผืนผ้าได้ เนื่องจากเส้นใยฟางข้าวมีขนาดสั้น และค่อนข้างหยาบกระด้าง จึงเหมาะในการใช้งานด้านสิ่งทอเป็นนอนวูฟเวนที่มีสมบัติเฉพาะมากกว่าใช้เป็นเครื่องนุ่งห่ม V. G. Yachmenev และคณะ [9] ได้เตรียมนอนวูฟเวนคอมพอสิตระหว่างเส้นใยเซลลูโลสที่แตกต่างกัน คือ ปอแก้ว จูด แพลกซ์ และเศษฝ้าย ร่วมกับพอลิเอสเตอร์รีไซเคิล และพอลิโพรพิลีน ด้วยวิธีเข็มเจาะ (Needle Punched) นอนวูฟเวนที่ได้จะมีความคงรูปดี มีสมบัติความคงทนต่อแรงดึงและการโค้งงอดี สมบัติความเป็นฉนวนความร้อนขึ้นกับชนิดของเส้นใยเซลลูโลส อัตราส่วนของเส้นใยเซลลูโลสต่อเส้นใยสังเคราะห์ และความหนาแน่นของนอนวูฟเวน

วัสดุเซลลูโลสดูดซับน้ำมันนิยมใช้ในการดูดซับน้ำมันปิโตรเลียมที่เกิดการรั่วไหลในทะเลจากเรือเดินสมุทร X. SUN และคณะ [10] ได้ศึกษาปฏิกิริยาอะซิทธิลเลชันของฟางข้าว เพื่อเตรียมวัสดุธรรมชาติที่สามารถดูดซับน้ำมันรั่วในทะเล พบว่า ฟางข้าวที่ผ่านการทำปฏิกิริยาอะซิทธิลเลชัน มีสมบัติไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) จึงเป็นการเตรียมวัสดุดูดซับน้ำมันจากวัสดุเหลือทิ้งได้ D. Li และคณะ [11] ได้ศึกษาการอะซิทธิลเลชันเส้นใยเซลลูโลสจากลำต้นข้าวโพดด้วยโซเดียมคลอไรด์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ เพื่อใช้เป็นวัสดุดูดซับน้ำมันดีเซลรั่วไหล พบว่า เส้นใยเซลลูโลสสามารถดูดซับน้ำมันดีเซลได้มากถึงร้อยละ 90 ภายใน 5 นาที ดังนั้นการอะซิทธิลเลชันเส้นใยเซลลูโลสจะทำให้เส้นใยมีสมบัติชอบน้ำมัน (Oleophilic) และไม่เปียกน้ำ Hu และคณะ [12] ได้เตรียมแผ่นกรองนอนวูฟเวนผสมของเส้นใยขนสัตว์ เส้นใยแก้ว และเส้นใยเซลลูโลส ในอัตราส่วน 2:1:1 ด้วยวิธีการเตรียมแผ่นเส้นใยแบบเปียก สำหรับกรองน้ำมันจากน้ำเสีย พบว่า นอนวูฟเวนมีทั้งสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilic) และสมบัติชอบน้ำมัน (Super Oleophilic) และมีประสิทธิภาพในการกรองสูงถึงร้อยละ 99.61 ในการกรอง 1 ครั้ง นอกจากนี้หลังจากผ่านการกรอง 1 ครั้ง นอนวูฟเวนยังคงมีประสิทธิภาพในการกรองและการไหลผ่านสูง

ในปัจจุบันผู้บริโภคมีความใส่ใจในสุขภาพมากขึ้น การบริโภคอาหารทอดซึ่งมีปริมาณน้ำมันส่วนเกินในอาหารทอดเป็นจำนวนมากอาจทำให้เกิดปัญหาด้านสุขภาพ การพัฒนาวัสดุดูดซับน้ำมันทอดอาหารที่มีประสิทธิภาพจึงเป็นแนวทางในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่น่าสนใจ และจากปัญหาขยะบรรจุภัณฑ์อาหารจากพลาสติกที่ย่อยสลายได้ยาก ทำให้มีการใช้บรรจุภัณฑ์จากวัสดุธรรมชาติที่สามารถย่อยสลายได้ง่ายมากขึ้น เช่น บรรจุภัณฑ์จากขานอ้อย กาบหมาก หรือพลาสติกชีวภาพที่สามารถย่อยสลายได้ง่าย งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเตรียมนอนูฟเวเนดดูดซับน้ำมันทอดอาหารจากเส้นใยเซลลูโลสฟางข้าว และศึกษาลักษณะทางกายภาพและสมบัติการดูดซับน้ำมันทอดอาหารของนอนูฟเวเนดเซลลูโลสฟางข้าวที่เตรียมได้ เพื่อเพิ่มมูลค่าและประโยชน์ใช้สอยของฟางข้าวซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่หาได้ง่าย มีราคาถูก และมีปริมาณมากในประเทศไทย เพื่อใช้เป็นแผ่นวัสดุดูดซับน้ำมันในครัวเรือนแทนการใช้วัสดุดูดซับจากกระดาษเยื่อไม้ ทำให้สามารถลดการลดต้นทุนในการผลิตเยื่อกระดาษได้ นอกจากนี้ยังสามารถต่อยอดเพื่อใช้เป็นบรรจุภัณฑ์เซลลูโลสดูดซับน้ำมันทอดอาหารจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรได้อีกด้วย

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 วัสดุและสารเคมี

ฟางข้าวที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นฟางข้าวสายพันธุ์ข้าวหอมปทุมจากแหล่งเพาะปลูกจังหวัดปทุมธานี ประเทศไทย โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการสกัดเป็นเกรดคุณภาพเชิงวิเคราะห์ จากบริษัท Fisher Chemical น้ำมันทอดอาหารที่ใช้ในการทดสอบมี 2 ชนิด คือ น้ำมันปาล์มก่อนทอดอาหาร (น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์) เป็นน้ำมันปาล์มโอเลอินจากเนื้อปาล์มผ่านกรรมวิธี จากบริษัท น้ำมันพืชปทุม จำกัด และน้ำมันปาล์มหลังทอดอาหาร เป็นน้ำมันปาล์มโอเลอินจากเนื้อ

ปาล์มผ่านกรรมวิธี จากบริษัท น้ำมันพืชปทุม จำกัด ที่ผ่านการทอดอาหารประเภทโปรตีน จากร้านอาหารในกรุงเทพมหานคร ประเทศไทย

2.2 ขอบเขตการวิจัย

งานวิจัยนี้แบ่งการทดลองเป็น 2 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1 การสกัดเส้นใยเซลลูโลสฟางข้าวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ภาวะต่าง ๆ และวิเคราะห์ทดสอบเพื่อหาภาวะที่เหมาะสมที่สุดทั้งเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพในการสกัดเส้นใยเซลลูโลสฟางข้าว

ส่วนที่ 2 การเตรียมนอนูฟเวเนดฟางข้าว ด้วยวิธีการเตรียมแผ่นเส้นใยแบบเปียก (Wet-laid) ที่น้ำหนักเส้นใยเซลลูโลสต่อพื้นที่ต่าง ๆ แล้ววิเคราะห์ทดสอบเพื่อประเมินคุณภาพและสมบัติการดูดซับน้ำมันของนอนูฟเวเนดฟางข้าวที่เตรียมได้

2.3 การสกัดเส้นใยเซลลูโลสจากฟางข้าว

เตรียมฟางข้าวสำหรับการสกัด โดยตัดให้มีความยาวประมาณ 10 เซนติเมตร จากนั้นล้างทำความสะอาด แล้วอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำฟางข้าวที่เตรียมได้มาสกัดเส้นใยเซลลูโลสด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 5 10 และ 15 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิห้อง 60 และ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0.5 1 1.5 และ 2 ชั่วโมง [7]-[8] หลังจากนั้นทิ้งของผสมไว้ให้มีอุณหภูมิลดลงมาที่อุณหภูมิห้อง นำของผสมที่ได้ไปกรองแยกเส้นใยเซลลูโลสออกจากตัวทำละลายด้วยกระชอนโลหะ จากนั้นล้างทำความสะอาดเส้นใยเซลลูโลสด้วยน้ำเปล่า จนน้ำล้างมีค่า pH เท่ากับ 7 นำเส้นใยเซลลูโลสฟางข้าวที่ได้ไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้นให้พร้อมสำหรับการขึ้นรูปนอนูฟเวเนดต่อไป นำเส้นใยที่ได้ไปวิเคราะห์และทดสอบสมบัติต่าง ๆ เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการสกัดเส้นใยเซลลูโลสจากฟางข้าว

2.4 การเตรียมนอนูฟเวนจากฟางข้าว

เตรียมเส้นใยเซลลูโลสฟางข้าวเพื่อนำมาขึ้นรูปนอนูฟเวน โดยมีน้ำหนักควบคุม 3.5 4.0 4.5 5.0 และ 5.5 กรัมต่อพื้นที่ 8x10 ตารางนิ้ว ตามลำดับ (67.81 77.50 87.19 96.87 และ 106.56 กรัมต่อตารางเมตร ตามลำดับ) นำเส้นใยเซลลูโลสฟางข้าวมากระจายตัวในน้ำ เพื่อทำลายพันธะไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นระหว่างเส้นใยเซลลูโลสฟางข้าวขณะแห้ง ให้เส้นใยมีการกระจายตัวพร้อมสำหรับการนำไปขึ้นรูปอีกครั้งเป็นนอนูฟเวน โดยมีอัตราของของแข็งต่อของเหลว (Liquor Ratio L:R) เท่ากับ 20:1 พร้อมทั้งปั่นกวนของผสมด้วยอัตราเร็วสม่ำเสมอ ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง นำเส้นใยเซลลูโลสฟางข้าวที่กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในน้ำไปเตรียมขึ้นรูปนอนูฟเวน โดยการเตรียมแผ่นเส้นใยแบบเปียก นำเส้นใยเซลลูโลสฟางข้าวกระจายบนเฟรมสำหรับการขึ้นรูปแผ่นเส้นใย และใช้การฉีดน้ำช่วยในการกระจายตัวของเส้นใยให้มีความสม่ำเสมอ นำนอนูฟเวนฟางข้าวที่ได้ไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เพื่อให้นอนูฟเวนแห้งและคงรูป เกิดพันธะไฮโดรเจนขึ้นระหว่างเส้นใยเซลลูโลสฟางข้าวอีกครั้ง เพื่อความแข็งแรงของนอนูฟเวนฟางข้าว จากนั้นนำนอนูฟเวนฟางข้าวที่ได้ไปวิเคราะห์และทดสอบสมบัติต่าง ๆ เพื่อประเมินคุณภาพและสมบัติการดูดซับน้ำมันของนอนูฟเวนฟางข้าวที่เตรียมได้

2.5 การวิเคราะห์และทดสอบ

2.5.1 การหาปริมาณร้อยละที่ได้ของเส้นใยเซลลูโลสฟางข้าวและนอนูฟเวนฟางข้าวด้วยวิธีการหาน้ำหนักแห้ง

ปริมาณร้อยละที่ได้ (% Yield) ของเส้นใยเซลลูโลสฟางข้าวและนอนูฟเวนฟางข้าวด้วยวิธีการหาน้ำหนักแห้ง หาได้จากสัดส่วนระหว่างน้ำหนักแห้งหลังการสกัดหรือการเตรียมนอนูฟเวน ต่อน้ำหนักแห้งก่อนการสกัดหรือการเตรียมนอนูฟเวนในหน่วยร้อยละน้ำหนัก

2.5.2 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของเส้นใยเซลลูโลสฟางข้าว

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ ของ PERKIN ELMER Spectrum One ใช้โหมด ATR ในช่วงเลขคลื่น 4,000-400 ต่อเซนติเมตร

2.5.3 การวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนของเส้นใยเซลลูโลสฟางข้าว

การวิเคราะห์หาอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกแอนนาไลซิส ของ Mettler Toledo รุ่น TGA/SDTA851e โดยมีอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 20 มิลลิลิตรต่อนาที เริ่มการวิเคราะห์ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ถึง 800 องศาเซลเซียส และมีอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเท่ากับ 20 องศาเซลเซียสต่อนาที

2.5.4 การตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาเส้นใยเซลลูโลสฟางข้าวและนอนูฟเวนฟางข้าวด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาพื้นผิวและลักษณะการกระจายตัว โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของ JEOL รุ่น JSM 6400 LV เตรียมตัวอย่างโดยการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างไปเคลือบทองผ่านเครื่อง Sputter-coater ใช้ศักย์ไฟฟ้า 5 กิโลโวลต์ และ Spot Size 20 ในการวิเคราะห์ สำหรับงานวิจัยนี้ใช้กำลังขยาย 500 เท่า

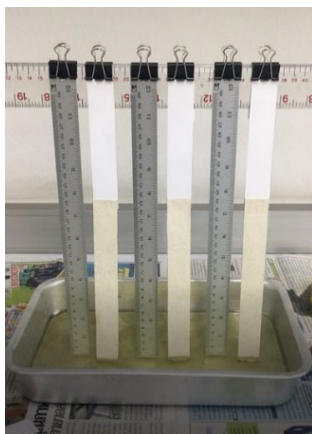
2.5.5 การวัดค่าสีของเส้นใยเซลลูโลสฟางข้าวและนอนูฟเวนฟางข้าว

การวัดค่าสีด้วยเครื่องวัดสี UltraScan VIS ของ HunterLab โดยใช้โหมดในการวัดสีดังนี้ ไม่รวมความมันเงา (Specular Exclude SPE) รวมแสง UV (UV

Include) Illuminant D 65 และ 10° Standard Observer ทำการทดสอบโดยนำตัวอย่างมาวัดสีทั้งหมด 3 ตำแหน่ง มีการวัดสีตำแหน่งละ 2 ครั้ง โดยเครื่องวัดสีคำนวณหาค่าความสว่าง (L^*) ค่าความแตกต่างของสี (DE^*) จาก CIE Lab และค่าเฉลี่ยดัชนีความเหลือง (Yellowness Index ASTM Method E313)

2.5.6 การทดสอบการดูดซึมไขมันในแนวตั้งของนอนูฟเวนฟางข้าว (Vertical Wicking Test)

การทดสอบการดูดซึมไขมันในแนวตั้งในงานวิจัยนี้ เป็นการเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซึมไขมันปาล์มบริสุทธิ์และน้ำมันปาล์มที่ผ่านการทอดอาหารประเภทโปรตีนของนอนูฟเวนฟางข้าว การทดสอบได้ดัดแปลงจากมาตรฐาน JIS L 1907:2010 - Testing Methods for Water Absorbency of Textiles ซึ่งเป็นการทดสอบความสามารถในการดูดน้ำในแนวตั้งของสิ่งทอ โดยเตรียมตัวอย่างขนาด 200 x 25 มิลลิเมตร เตรียมชุดอุปกรณ์ในการทดสอบการดูดไขมันในแนวตั้งประกอบด้วย ขาตั้งพร้อมแคลมป์จับ วัสดุแกนสำหรับหนีบชิ้นตัวอย่างในแนวตั้ง ตัวหนีบไม้บรรทัด และอ่างน้ำมัน ดังรูปที่ 1



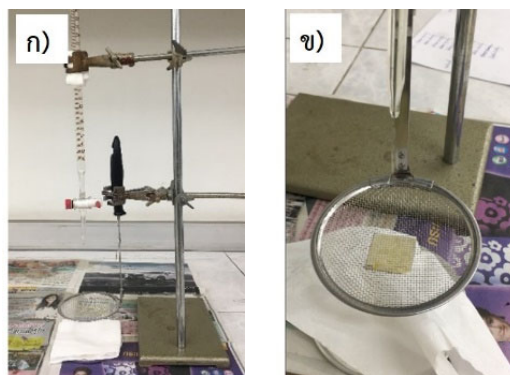
รูปที่ 1 การทดสอบการดูดไขมันในแนวตั้ง

การทดสอบให้ชิ้นตัวอย่างจุ่มลงในอ่างน้ำมันเป็นระยะ 5 มิลลิเมตร เป็นเวลา 10 นาที ทดสอบซ้ำ 3 ครั้ง หาค่าเฉลี่ยของระยะทางที่นอนูฟเวนสามารถดูดไขมัน

ในแนวตั้งจะได้ค่าอัตราดูดไขมันในแนวตั้ง (Oil Absorption Rate (มิลลิเมตร/10 นาที)) ของนอนูฟเวนฟางข้าว

2.5.7 การทดสอบการดูดซึมไขมันของนอนูฟเวนฟางข้าว (Oil Absorption Test)

การทดสอบการดูดซึมไขมันในงานวิจัยนี้ เป็นการเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซึมไขมันปาล์มบริสุทธิ์และน้ำมันปาล์มที่ผ่านการทอดอาหารประเภทโปรตีนของนอนูฟเวนฟางข้าว การทดสอบได้ดัดแปลงจากมาตรฐาน AATCC Test Method 79 - Absorbency of Textiles ซึ่งเป็นการทดสอบความสามารถในการดูดซึมน้ำของสิ่งทอ โดยเตรียมตัวอย่างขนาด 25 x 25 มิลลิเมตร เตรียมชุดอุปกรณ์ในการทดสอบการดูดไขมันประกอบด้วย ขาตั้งพร้อมแคลมป์จับ บิวเรต กระชอนขนาดเล็กสำหรับรองรับตัวอย่าง วัสดุรองรับน้ำมัน ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ก) การเตรียมชุดอุปกรณ์ในการทดสอบการดูดไขมัน น้ำมัน ข) การทดสอบการดูดไขมัน น้ำมัน

การทดสอบให้ติดตั้งบิวเรตใส่น้ำมันให้มีระยะห่างกับกระชอน 9 เซนติเมตร วางชิ้นตัวอย่างบนกระชอน ค่อยๆปล่อยน้ำมันจากบิวเรต สังเกตการดูดซึมไขมันของตัวอย่างจนมีหยดน้ำมันหยดจากกระชอนลงสู่วัสดุรองรับจึงหยุดการปล่อยน้ำมันจากบิวเรต ทดสอบซ้ำ 3 ครั้ง หาค่าเฉลี่ยปริมาตรน้ำมันที่หยดจากบิวเรต

ลงบนนอนวูฟเวนจนหยดสู่ตัวรองรับ จะได้ค่าการดูดซับน้ำมัน (Oil Absorption (มิลลิลิตร)) ของนอนวูฟเวน ฟางข้าว

2.5.8 การทดสอบการซึมผ่านของอากาศของนอนวูฟเวน ฟางข้าว (Air Permeability Test)

การทดสอบการซึมผ่านของอากาศในงานวิจัยนี้ได้อ้างอิงจากมาตรฐาน ASTM D 737-96 - Standard Test Method for Air Permeability of Textile Fabrics ซึ่งเป็นการทดสอบความสามารถในการซึมผ่านของอากาศของสิ่งทอ โดยมีแรงดันอากาศในการทดสอบเท่ากับ 125 ปาสคาล (Pa) และบันทึกปริมาณอากาศที่ซึมผ่านในหน่วยลูกบาศก์ฟุตต่อนาที (Cubic Foot per Minute CFM) ทดสอบซ้ำ 3 ครั้ง หาค่าเฉลี่ยของปริมาณอากาศที่ซึมผ่านนอนวูฟเวนจะได้ค่าการซึมผ่านของอากาศ (Air Permeability (CFM)) ของนอนวูฟเวน ฟางข้าว

2.5.9 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

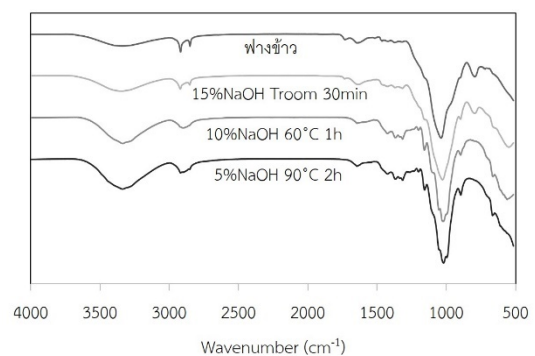
นำเสนอข้อมูลที่ได้ในรูปของค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลองอย่างน้อย 3 ครั้ง ที่เป็นอิสระต่อกัน และนำข้อมูลที่ได้มาทดสอบความแปรปรวนโดยใช้ One-way ANOVA ($p \leq 0.05$)

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 ภาวะที่เหมาะสมในการสกัดเซลลูโลสจากฟางข้าว

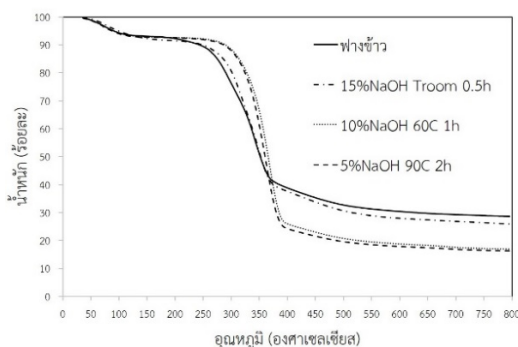
งานวิจัยนี้ได้ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการในการสกัดเซลลูโลสจากฟางข้าว โดยเปรียบเทียบผลของความเข้มข้นของตัวทำละลาย และอุณหภูมิในการสกัดเส้นใยเซลลูโลสฟางข้าว จากการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของเส้นใยเซลลูโลสฟางข้าวที่สกัดที่ภาวะต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 3 พบว่า เส้นใยเซลลูโลสฟางข้าวที่สกัดด้วยตัวทำละลายความเข้มข้นต่ำลง แต่อุณหภูมิสูงขึ้น

และเวลานานขึ้นจะแสดงความเข้มพีคของหมู่ฟังก์ชันที่แสดงลักษณะทางเคมีของเซลลูโลสที่ชัดเจนขึ้น คือ -OH ($3400-3200\text{ cm}^{-1}$), $-\text{CH}_2$ ($2970-2860\text{ cm}^{-1}$), C-H ($1431-1315\text{ cm}^{-1}$), C-O-C (1160 cm^{-1}) และ C-O (1060 cm^{-1}) ในขณะที่ความเข้มพีคของหมู่ฟังก์ชันที่แสดงลักษณะทางเคมีของลิกนินลดลง คือ C=O (1735 cm^{-1}) และ -CH ของหมู่อะโรมาติก (792 cm^{-1}) [13]-[14] แสดงว่าที่ภาวะการสกัดนี้สามารถสกัดแยกเส้นใยเซลลูโลสได้ดีที่สุด เนื่องจากสามารถแสดงหมู่ฟังก์ชันที่แสดงลักษณะเฉพาะของเซลลูโลสได้ชัดเจน



รูปที่ 3 โครงสร้างทางเคมีของเส้นใยเซลลูโลสฟางข้าวที่สกัดที่ภาวะต่าง ๆ

จากการวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของเส้นใยเซลลูโลสฟางข้าวที่สกัดที่ภาวะต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4 พบว่า เส้นใยเซลลูโลสที่สกัดด้วยตัวทำละลายความเข้มข้นต่ำ ที่อุณหภูมิสูงและเวลานาน มีการสลายตัวที่อุณหภูมิสูงขึ้นแต่มีปริมาณขาร์น้อยลง แสดงถึงการลดลงของลิกนิน เนื่องจากลิกนินเริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิต่ำกว่าเซลลูโลส แต่มีปริมาณขาร์สูง (ลิกนินสลายตัวที่ 160-900 องศาเซลเซียส มีขาร์มาก เซลลูโลสสลายตัวที่ 315-400 องศาเซลเซียส มีขาร์น้อย [14]) การสกัดที่ภาวะนี้จึงได้เส้นใยเซลลูโลสที่มีปริมาณลิกนินหลงเหลืออยู่น้อยที่สุด ในขณะที่ฟางข้าวซึ่งยังมีลิกนินอยู่ในปริมาณมาก เริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิต่ำและมีปริมาณขาร์มากที่สุด



รูปที่ 4 เปรียบเทียบการสลายตัวทางความร้อนของเส้นใยเซลลูโลสฟางข้าวที่สกัดที่ภาวะต่าง ๆ

ตารางที่ 1 ปริมาณ ความยาว และสีของเส้นใยเซลลูโลสฟางข้าวที่สกัดด้วยตัวทำละลายความเข้มข้นร้อยละ 5 ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ที่เวลาต่าง ๆ

เวลา สกัด	ปริมาณที่ได้ (% yield)	ความยาว (cm)	YI E313
1h	22.75±0.37	2.80±0.99*	36.65
2h	21.87±1.53	1.96±0.79	31.54
3h	20.26±0.72	1.72±0.67	26.03

YI-E313 คือ ค่าดัชนีความเหลือง (Yellowness index ASTM Method E313)

* แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

เมื่อศึกษาผลของเวลาในการสกัดเส้นใยเซลลูโลสฟางข้าว ดังตารางที่ 1 พบว่า เมื่อใช้เวลากัดแยกเส้นใยเพิ่มขึ้น (การกำจัดลิกนิน) ปริมาณเส้นใยที่ได้มีแนวโน้มลดลงอย่างไม่มีนัยสำคัญ ความยาวของเส้นใยที่สกัดที่เวลา 1 ชั่วโมง มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ และสีของเส้นใยที่ได้มีแนวโน้มมีความเหลืองลดลง ดังนั้น ภาวะที่เหมาะสมในการสกัดเส้นใยเซลลูโลสฟางข้าวเพื่อเตรียมนอนูฟเวินในงานวิจัย คือ การสกัดด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 5 ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ได้ปริมาณเส้นใยเซลลูโลสประมาณร้อยละ 22 เนื่องจากเป็นภาวะที่ใช้เวลากัดสั้นที่สุดที่ให้เซลลูโลสฟางข้าวที่มีลักษณะทางกายภาพเหมาะสมในการขึ้นรูปนอนูฟเวิน

และมีปริมาณลิกนินหลงเหลือในเส้นใยเซลลูโลสน้อย สอดคล้องกับงานวิจัยของ N. Johar และ I. Ahmad [7] ที่มีภาวะสกัดเซลลูโลสเปลือกข้าวด้วยตัวทำละลายความเข้มข้นต่ำ ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

3.2 ลักษณะทางกายภาพของนอนูฟเวินฟางข้าวที่เตรียมได้

การเตรียมนอนูฟเวินด้วยวิธีการผลิตแผ่นเส้นใยแบบเปียก โดยการกระจายเส้นใยแบบเปียกให้เกิดพันธะเคมีระหว่างเส้นใยเพื่อความแข็งแรง โดยไม่มีการเพิ่มความแข็งแรงด้วยการยึดติดโครงสร้าง ที่น้ำหนักเส้นใยต่อพื้นที่ต่างกัน และปริมาณนอนูฟเวินฟางข้าวที่เตรียมได้เมื่อเทียบเป็นหน่วยกรัมต่อตารางเมตร (gsm) แสดงในตารางที่ 2 พบว่า เมื่อเตรียมนอนูฟเวินตามน้ำหนักเส้นใยที่กำหนด นอนูฟเวินที่เตรียมได้จะมีการสูญเสียน้ำหนักเส้นใยไปประมาณร้อยละ 16 เนื่องจากในกระบวนการขึ้นรูปต้องมีการทำลายพันธะไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นระหว่างเส้นใยฟางข้าวที่เตรียมได้ด้วยการแช่น้ำ และมีการใช้น้ำแรงดันสูงฉีดเพื่อกระจายเส้นใยบนตะแกรง ทำให้เส้นใยที่มีขนาดเล็กบางส่วนสูญเสียไปในขั้นตอนนี้ โดยน้ำหนักของนอนูฟเวินเบอร์ 1 4 และ 5 มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 2 น้ำหนักนอนูฟเวินฟางข้าวที่เตรียมได้

No.	wt. (g/8x10in ²)	wt. (gsm)	% yield
1	2.95±0.19*	57.20±3.70*	83.26±4.80
2	3.36±0.18	65.92±1.91	82.74±4.45
3	3.75±0.21	72.70±4.04	82.60±5.25
4	4.28±0.17*	81.91±2.64*	84.75±3.19
5	4.90±0.18*	94.99±3.52*	88.55±4.57

* แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ผลการวัดสีของนอนูฟเวินฟางข้าวที่เตรียมได้ แสดงในตารางที่ 3 พบว่า ค่าความแตกต่างของสี (DE^*) ของนอนูฟเวินฟางข้าวที่เตรียมได้ที่น้ำหนักเส้น

ใยตอพื้นที่ต่าง ๆ จะมีค่ามากขึ้นเมื่อเทียบกับเส้นใยเซลลูโลสฟางข้าวก่อนการขึ้นรูป และนอนูฟเวนที่เตรียมได้ทุกสูตรจะมีสีขาวสว่างขึ้นกว่าเส้นใยเซลลูโลสฟางข้าวก่อนการขึ้นรูป เนื่องจากค่า YI E313 ซึ่งเป็นค่าดัชนีความเหลืองมีแนวโน้มลดลง และมีค่า +L* ซึ่งเป็นค่าความสว่างแสดงถึงความขาวเพิ่มขึ้นกว่าเส้นใยเซลลูโลสฟางข้าวก่อนการขึ้นรูป เนื่องจากในกระบวนการขึ้นรูปนอนูฟเวนต้องมีการกระจายตัวของเส้นใยเซลลูโลสฟางข้าวอีกครั้งในน้ำเปล่า และมีการให้ความร้อนเพื่อช่วยในการทำลายพันธะไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นระหว่างเส้นใย ทำให้มีการละลายของลิกนินที่ยังตกค้างอยู่ในเส้นใยเซลลูโลสฟางข้าวออกมาด้วยนอนูฟเวนฟางข้าวที่เตรียมได้จึงมีสีขาวสว่างขึ้นกว่าเส้นใยเซลลูโลสฟางข้าวก่อนการขึ้นรูป นอกจากนี้นอนูฟเวนฟางข้าวที่เตรียมได้ที่น้ำหนักเส้นใยต่อพื้นที่ต่าง ๆ ทุกสูตรจะมีสีและความขาวใกล้เคียงกันเนื่องจากค่าความแตกต่างของสี (DE*) และค่า +L* ซึ่งเป็นค่าความสว่างแสดงถึงสีขาว มีค่าใกล้เคียงกันทุกสูตรแสดงถึงกระบวนการขึ้นรูปนอนูฟเวนทำให้สีของเส้นใยเซลลูโลสฟางข้าวเปลี่ยนไปในลักษณะเดียวกันอย่างสม่ำเสมอทุกครั้งในการขึ้นรูปนอนูฟเวน

ตารางที่ 3 สีของนอนูฟเวนฟางข้าวที่เตรียมได้

No.	L*	dE*	YI E313
เส้นใย	80.10	0	31.54
1	83.30	3.12	29.84
2	84.84	5.04	33.43
3	84.43	4.15	28.05
4	83.02	3.00	31.42
5	83.43	3.40	31.32

L* คือ ค่าความสว่าง โดยค่า +L* แสดงถึงสีขาว จนถึง -L* แสดงถึงสีดำ จาก CIE Lab

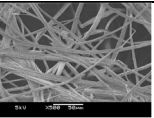
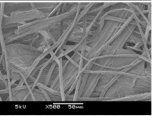
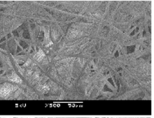
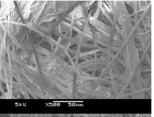
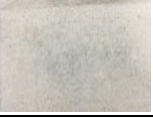
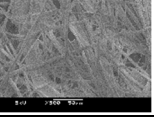
DE* คือ ค่าความแตกต่างของสี จาก CIE Lab

YI-E313 คือ ค่าดัชนีความเหลือง (Yellowness index ASTM Method E313)

ความหนา ลักษณะทางกายภาพและสัณฐานวิทยาของนอนูฟเวนฟางข้าวที่เตรียมได้ แสดงในตารางที่ 4 พบว่า ความหนาของนอนูฟเวนฟางข้าวจะเพิ่มขึ้นเมื่อน้ำหนักเส้นใยต่อพื้นที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อมีปริมาณเส้นใยเซลลูโลสฟางข้าวเพิ่มขึ้นจะทำให้ความหนาของนอนูฟเวนเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่การกระจายตัวของนอนูฟเวนขณะขึ้นรูปมีความสม่ำเสมอต่ำ ทำให้ความหนาของนอนูฟเวนไม่สม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น เนื่องจากการกระจายตัวของเส้นใยเซลลูโลสฟางข้าวในน้ำอีกครั้ง มีเส้นใยบางส่วนกระจายตัวออกจากกันได้ไม่ดี ทำให้มีการจับตัวกันของเส้นใยเป็นก้อนหรือเกิดการพันกันของเส้นใยบางส่วน และการใช้น้ำแรงดันสูงฉีดเพื่อกระจายเส้นใยบนตะแกรงยังไม่สามารถช่วยควบคุมการกระจายตัวของเส้นใยเซลลูโลสฟางข้าวให้สม่ำเสมอทั่วทั้งตะแกรงได้ ความหนาของนอนูฟเวนเบอร์ 5 มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ จากการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและสัณฐานวิทยาของนอนูฟเวนฟางข้าวที่เตรียมได้ที่น้ำหนักเส้นใยต่อพื้นที่ต่าง ๆ พบว่านอนูฟเวนที่เตรียมได้จะมีลักษณะการกระจายตัวของเส้นใยเซลลูโลสอย่างไม่มีระเบียบ มีการกระจายตัวแบบสุ่ม และไม่มีทิศทางการจัดเรียงตัวของเส้นใย เนื่องจากนอนูฟเวนฟางข้าวที่ได้มีกระบวนการขึ้นรูปด้วยวิธีการผลิตแผ่นเส้นใยแบบเปียก โดยการกระจายเส้นใยในน้ำแล้วขึ้นรูปนอนูฟเวนบนตะแกรง และมีการใช้น้ำแรงดันสูงฉีดเพื่อช่วยกระจายเส้นใยให้มีความสม่ำเสมอ แต่ไม่มีการกำหนดทิศทางการจัดเรียงตัวของเส้นใยในการขึ้นรูปนอนูฟเวนเหมือนการใช้เครื่องจักรในการขึ้นรูป ซึ่งสามารถกำหนดทิศทางการจัดเรียงตัวของเส้นใยให้มีความสมดุลในทิศทางตามขวางแนวเครื่องจักรและตามแนวเครื่องจักร (Transverse และ Machine Direction TD และ MD) นอนูฟเวนฟางข้าวที่ได้จึงมีการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอและมีการกระจายตัวแบบสุ่มไร้ทิศทาง นอกจากนี้ นอนูฟเวนฟางข้าวที่ได้จะมีความหนาแน่นของเส้นใยมากขึ้นเมื่อน้ำหนักเส้นใยต่อพื้นที่เพิ่มขึ้น

โดยจะสังเกตได้จากช่องว่างระหว่างเส้นใยที่ลดลงเมื่อมีปริมาณเส้นใยมากขึ้น ขนาดของเส้นใยของนอนูฟเวนฟางข้าวทุกแผ่นมีขนาดอยู่ในช่วง 5.5-10 ไมโครเมตร (7.39 ± 1.55 ไมโครเมตร) การที่ขนาดของเส้นใยมีความแตกต่างกันถึงแม้ว่าจะมาจากการสกัดที่ภาวะเดียวกันเนื่องจากวัตถุดิบเป็นวัสดุธรรมชาติไม่สามารถควบคุมขนาดของเส้นใยได้ โดยลักษณะทางกายภาพและสมบัติต่าง ๆ ของนอนูฟเวนขึ้นอยู่กับความหนาของนอนูฟเวน

ตารางที่ 4 ความหนา ลักษณะทางกายภาพและสัณฐานวิทยาของนอนูฟเวนฟางข้าวที่เตรียมได้

No.	ความหนา (10^{-2} mm)	นอนูฟเวนที่ เตรียมได้	SEM (x500)
1	45.53 ± 4.34		
2	56.20 ± 7.32		
3	64.40 ± 4.03		
4	75.20 ± 5.43		
5	89.00* ± 4.95		

* แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

3.3 การซึมผ่านของอากาศของนอนูฟเวนฟางข้าวที่เตรียมได้

การซึมผ่านของอากาศของนอนูฟเวนฟางข้าวที่เตรียมได้ แสดงในตารางที่ 5 พบว่า การซึมผ่านของอากาศจะลดลงเมื่อน้ำหนักเส้นใยต่อพื้นที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อมีปริมาณเส้นใยเซลลูโลสฟางข้าวเพิ่มขึ้นจะทำให้ความหนาแน่นของเส้นใยที่กระจายตัวของ

นอนูฟเวนเพิ่มขึ้น และมีช่องว่างระหว่างเส้นใยน้อย ทำให้อากาศสามารถซึมผ่านช่องว่างระหว่างเส้นใยของนอนูฟเวนได้น้อยลง การซึมผ่านของอากาศของนอนูฟเวนจึงลดลง โดยการซึมผ่านของอากาศในแต่ละตำแหน่งของนอนูฟเวนมีค่าที่ค่อนข้างแตกต่างกัน เนื่องจากการกระจายตัวของนอนูฟเวนขณะขึ้นรูปมีความสม่ำเสมอต่ำ ทำให้ความหนาแน่นของนอนูฟเวนไม่สม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น แต่การซึมผ่านของอากาศของนอนูฟเวนค่อนข้างมีค่าที่สม่ำเสมอขึ้นเมื่อน้ำหนักเส้นใยต่อพื้นที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการกระจายตัวของเส้นใยในนอนูฟเวนที่มีน้ำหนักเส้นใยต่อพื้นที่เพิ่มขึ้นค่อนข้างมีความสม่ำเสมอมากขึ้น

นอกจากนี้ ความคงทนต่อแรงดึงของนอนูฟเวนมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อน้ำหนักเส้นใยต่อพื้นที่เพิ่มขึ้น แต่ยังคงมีความแข็งแรงเชิงกลต่ำ (นอนูฟเวนเบอร์ 5 มีความคงทนต่อแรงดึง 0.16 เมกะปาสคาล (MPa)) เนื่องจากนอนูฟเวนที่ได้จากการเตรียมแผ่นเส้นใยแบบเปียกไม่ได้มีการเพิ่มความแข็งแรงของแผ่นใยเชิงกลและเชิงเคมี มีเพียงความแข็งแรงจากพันธะไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นระหว่างเส้นใยเท่านั้น

ตารางที่ 5 การซึมผ่านของอากาศของนอนูฟเวนฟางข้าวที่เตรียมได้

No.	การซึมผ่านของอากาศ (cfm)
1	183.13 $\pm$ 31.13
2	152.33 $\pm$ 30.61
3	73.21 $\pm$ 7.65
4	66.04 $\pm$ 7.84
5	44.60 $\pm$ 5.15

* แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

3.4 การดูดน้ำมันตามแนวตั้งของนอนูฟเวนฟางข้าวที่เตรียมได้

การดูดน้ำมันตามแนวตั้งของนอนูฟเวนฟางข้าวที่เตรียมได้ แสดงในตารางที่ 6 พบว่า ความสามารถ

ในการดูดน้ำมันปาล์มทั้งก่อนและหลังทอดอาหารของ นอนูฟเวเนฟางข้าวจะเพิ่มขึ้น เมื่อน้ำมันเส้นใยต่อ พื้นที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากน้ำมันจะซึมผ่านเข้าไปในนอนูฟเวเนโดยอาศัยช่องว่างระหว่างเส้นใยของนอนูฟเวเนด้วย ปรากฏการณ์การซึมตามรูเล็ก (Capillary Effect) การที่เส้นใยมีการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอ และมีช่องว่างระหว่างเส้นใยขนาดใหญ่ของนอนูฟเวเนที่มีน้ำหนักเส้นใยต่อพื้นที่น้อย ทำให้การดูดน้ำมันหรือการเคลื่อนที่ซึมผ่านของน้ำมันในแนวดิ่งของนอนูฟเวเนที่มีน้ำหนักเส้นใยต่อพื้นที่น้อยมีระยะทางน้อยกว่าการดูดน้ำมันในแนวดิ่งของนอนูฟเวเนที่มีน้ำหนักเส้นใยต่อพื้นที่มาก สอดคล้องกับงานวิจัยของ L.-P. Xu และคณะ [15] ที่พบว่าเชือกเกลียวคู่ที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยการแชะ ร่องด้วยพลาสติกและอนุภาคนาโนซิลิกาสามารถดูดซึมน้ำและน้ำมันได้เอง ด้วยแรงซึมตามรูเล็ก (Capillary Force) ที่เกิดจากช่องว่างขนาดเล็กและร่องขนาดเล็กบนเชือกเกลียวคู่ และเมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการดูดน้ำมันปาล์มก่อนและหลังทอดอาหาร พบว่านอนูฟเวเนฟางข้าวมีความสามารถในการดูดน้ำมันปาล์มก่อนทอดอาหาร (น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์) ได้ดีกว่า น้ำมันปาล์มหลังทอดอาหาร เนื่องจากน้ำมันปาล์มก่อนทอดอาหารมีความหนืดน้อยกว่าน้ำมันปาล์มหลังทอดอาหาร ซึ่งมีความหนืดเพิ่มขึ้นจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation)

ตารางที่ 6 การดูดน้ำมันตามแนวดิ่งของนอนูฟเวเนฟางข้าวที่เตรียมได้

No.	อัตราดูดน้ำมันในแนวดิ่ง (mm/10 min)	
	น้ำมันปาล์ม ก่อนทอด	น้ำมันปาล์ม หลังทอด
1	30.33±1.53	31.33±4.16
2	32.67±0.58	32.67±3.06
3	37.33±5.03	32.67±0.58
4	38.33±1.53	34.00±4.00
5	43.00±1.00	36.00±1.73

* แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ขณะทอดอาหาร ทำให้สารต่าง ๆ ได้แก่ ไตรกลีเซอไรด์ กรดไขมัน อนุพันธ์ของลิพิด และสารอื่น ๆ ละลายหรือ แขนวลอยในน้ำมันมากขึ้น นอกจากนี้ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน (Polymerization) ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโมเลกุลเป็นสารชนิดใหม่ และเกิดการสลายตัวจากการไหม้ น้ำมันจึงมีความหนืดเพิ่มขึ้นและมีสีเข้มขึ้น [16] การเคลื่อนที่ซึมผ่านของน้ำมันปาล์มหลังทอดอาหารในแนวดิ่งจึงเคลื่อนที่ได้ยากกว่าน้ำมันปาล์มก่อนทอดอาหาร

3.5 การดูดซึมน้ำมันของนอนูฟเวเนฟางข้าวที่เตรียมได้

การดูดซึมน้ำมันของนอนูฟเวเนฟางข้าวที่เตรียมได้ แสดงในตารางที่ 7 พบว่า ปริมาณน้ำมันปาล์มก่อนและหลังทอดอาหารที่ดูดซึมได้ และเวลาในการดูดซึมและรองรับน้ำมันปาล์มก่อนและหลังทอดอาหารของนอนูฟเวเนฟางข้าวจะเพิ่มขึ้น เมื่อน้ำหนักเส้นใยต่อพื้นที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากน้ำมันจะดูดซึมผ่านเข้าไปในนอนูฟเวเนโดยอาศัยช่องว่างระหว่างเส้นใยของนอนูฟเวเนด้วยปรากฏการณ์การซึมตามรูเล็ก น้ำมันจะค่อยๆ ถูกดูดซึมเข้าไปจนเต็มความสามารถในการดูดซึมของนอนูฟเวเนจากนั้นจะหยดลงมาบนวัสดุรองรับ การที่เส้นใยมีช่องว่างระหว่างเส้นใยน้อย และมีความหนาแน่นของเส้นใยสูงของนอนูฟเวเนที่มีน้ำหนักเส้นใยต่อพื้นที่มาก ทำให้สามารถดูดซึมน้ำมันได้ในปริมาณมาก สามารถดูดซึมและรองรับน้ำมันไว้ได้เป็นเวลานานกว่านอนูฟเวเนที่มีน้ำหนักเส้นใยต่อพื้นที่น้อย สอดคล้องกับงานวิจัยของ L.-P. Xu และคณะ [15] ที่พบว่าน้ำและน้ำมันสามารถดูดซึมเข้าไปในเชือกเกลียวคู่ได้ด้วยแรงซึมตามรูเล็กที่เกิดจากช่องว่างขนาดเล็กและร่องขนาดเล็ก และงานวิจัยของ K. C. M. de Lima และคณะ [17] ที่พบว่ากระดาษรองกระดาษเช็ดมือ (Paper Towel) ซึ่งเป็นเส้นใยเซลลูโลสบนภาชนะ สามารถดูดซับน้ำมันพืชประเภทต่าง ๆ จากอาหารทอดได้ดีกว่าการ

วางบนภาชนะอย่างเดียว และเมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซึมน้ำมันปาล์มก่อนและหลังทอดอาหาร พบว่า นอนวูฟเวนฟางข้าวมีความสามารถในการดูดซึมน้ำมันปาล์มก่อนทอดอาหาร (น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์) ได้ดีกว่าน้ำมันปาล์มหลังทอดอาหาร เนื่องจากน้ำมันปาล์มก่อนทอดอาหารมีความหนืดน้อยกว่าน้ำมันปาล์มหลังทอดอาหาร ซึ่งมีความหนืดเพิ่มขึ้นจากอนุพันธ์ของลิพิด และสารอื่น ๆ ที่ละลายหรือแขวนลอยในน้ำมันมากขึ้นหลังทอดอาหาร [16] การดูดซึมน้ำมันปาล์มหลังทอดอาหารจึงมีปริมาณน้อยกว่าน้ำมันปาล์มก่อนทอดอาหาร มีเวลาในการดูดซึมและรองรับน้ำมันปาล์มหลังทอดน้อยกว่า เนื่องจากน้ำมันปาล์มหลังทอดอาหารมีความหนืดเพิ่มขึ้นจากอนุพันธ์ไขมันและสารต่าง ๆ ที่แขวนลอยในน้ำมัน น้ำมันปาล์มหลังทอดอาหารจึงมีน้ำหนักมากกว่าน้ำมันปาล์มก่อนทอด ทำให้นอนวูฟเวนสามารถรองรับน้ำหนักได้ในเวลาสั้นกว่า

ตารางที่ 7 การดูดซึมน้ำมันของนอนวูฟเวนฟางข้าวที่เตรียมได้

No.	น้ำมันปาล์มก่อนทอด		น้ำมันปาล์มหลังทอด	
	ปริมาณที่ดูดซึม (ml)	เวลาดูดซึมและรองรับ (s)	ปริมาณที่ดูดซึม (ml)	เวลาดูดซึมและรองรับ (s)
1	1.47 ±0.21	32.33 ±3.06	1.33 ±0.12	24.00 ±6.56
2	1.57 ±0.15	33.67 ±6.03	1.43 ±0.05	25.33 ±4.93
3	1.60 ±0.10	40.67 ±5.51	1.67 ±0.06	31.00 ±5.29
4	1.83 ±0.12	43.33 ±7.37	1.70 ±0.20	34.67 ±6.66
5	1.93 ±0.15	44.33 ±4.16	1.87 ±0.12	35.67 ±3.51

* แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

4. สรุป

ภาวะที่เหมาะสมในการสกัดเส้นใยเซลลูโลสฟางข้าวในงานวิจัยนี้ คือ สกัดด้วยสารละลายโซเดียมไฮ-

ดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 5 ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ได้ปริมาณเส้นใยเซลลูโลสประมาณร้อยละ 22 เนื่องจากเป็นภาวะที่ใช้เวลาสกัดสั้นที่สุดที่ให้เส้นใยเซลลูโลสฟางข้าวที่มีลักษณะทางกายภาพเหมาะสมในการขึ้นรูปนอนวูฟเวน และมีปริมาณลิกนินหลงเหลือในเส้นใยเซลลูโลสน้อย นอนวูฟเวนที่เตรียมได้มีลักษณะการกระจายตัวที่สม่ำเสมอขึ้นเมื่อน้ำหนักเส้นใยต่อพื้นที่เพิ่มขึ้น แต่ยังคงมีการจับตัวกันของเส้นใยเป็นก้อนหรือเกิดการพันกันของเส้นใยบางส่วนที่ไม่สามารถกระจายตัวด้วยการใช้น้ำแรงดันสูงได้ ความสามารถในการดูดน้ำมัน (Oil Wicking) และการดูดซึมน้ำมัน (Oil Absorption) ของนอนวูฟเวนฟางข้าวจะเพิ่มขึ้น เมื่อน้ำหนักเส้นใยต่อพื้นที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากน้ำมันจะซึมผ่านเข้าไปในนอนวูฟเวนโดยอาศัยช่องว่างระหว่างเส้นใยของนอนวูฟเวนด้วยปรากฏการณ์การซึมตามรูเล็ก (Capillary Effect) และนอนวูฟเวนฟางข้าวสามารถดูดน้ำมันและดูดซึมน้ำมันปาล์มก่อนทอดอาหาร (น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์) ได้ดีกว่าน้ำมันปาล์มหลังทอดอาหาร เนื่องจากน้ำมันปาล์มหลังทอดอาหารมีความหนืดเพิ่มขึ้นจากอนุพันธ์ของลิพิด และสารอื่น ๆ ที่ละลายหรือแขวนลอยในน้ำมันมากขึ้นหลังทอดอาหาร ทำให้การเคลื่อนที่ซึมผ่านของน้ำมันปาล์มหลังทอดอาหารทำได้ยากกว่าน้ำมันปาล์มก่อนทอดอาหาร

5. กิตติกรรมประกาศ

ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากเงินรายได้มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประจำปีงบประมาณ 2560 เลขที่สัญญา 545/2560

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Center of Agricultural Information, Office of Agricultural Economics, "Thailand foreign agricultural trade statistics 2019," *Agricultural Statistics*, vol. 403, pp. 27-30, 2019.

- [2] P. Wangbon, "The story of rice straw," *Green Globe*, vol. 10, pp. 4, Apr.-Jun. 2008.
- [3] P. Binod, R. Sindhu, R. R. Singhanian, S. V., L. Devi, S. Nagalakshmi, N. Kurien, R. K. Sukumaran and A. Pandey, "Bioethanol production from rice straw: An overview," *Bioresource Technology*, vol. 101, no. 3, pp. 4767-4774, Jul. 2010.
- [4] P. Bajpai, *Structure and Properties of Cellulose and Nanocellulose, in Pulp and Paper Industry Nanotechnology in Forest Industry*, Elsevier, 2016, pp. 27-40.
- [5] V. K. Thakur and M. K. Thakur, "Processing and characterization of natural cellulose fibers/thermoset polymer composites," *Carbohydrate Polymers*, vol. 109, pp. 102-117, Aug. 2014.
- [6] R. Pawongrat, "Pretreatment processes for enhancing the efficiency of ethanol production from lignocellulosic agricultural wastes," *Veridian E-Journal, Science and Technology Silpakorn University*, vol. 1, no. 1, pp. 143-157, Jan.-Jun. 2015.
- [7] N. Johar and I. Ahmad, "Morphological, thermal, and mechanical properties of starch biocomposite films reinforced by cellulose nanocrystals from rice husk," *BioResources*, vol. 7, no. 4, pp. 5469-5477, Sep. 2012.
- [8] M. Boonterm, S. Sunyadeth, S. Dedpakdee, P. Athichalinthorn, S. Patcharaphun, R. Mungkung and R. Techapiesancharoenkij, "Characterization and comparison of cellulose fiber extraction from rice straw by chemical treatment and thermal steam explosion," *Journal of Cleaner Production*, vol. 134, pp. 592-599, Oct. 2016.
- [9] V. G. Yachmenev, D. V. Parikh and T. A. Calamari, "Thermal Insulation Properties of Biodegradable, Cellulosic-Based Nonwoven Composites for Automotive Application," *Journal of Industrial Textiles*, vol. 31, no. 4, pp. 283-296, Apr. 2002.
- [10] X.-F. Sun, R. Sun and J.-X. Sun, "Acetylation of Rice Straw with or without Catalysts and Its Characterization as a Natural Sorbent in Oil Spill Cleanup," *Journal of agricultural and food chemistry*, vol. 50, pp. 6428-33, Nov. 2002.
- [11] D. Li, F. Z. Zhu, J. Y. Li, P. Na and N. Wang, "Preparation and Characterization of Cellulose Fibers from Corn Straw as Natural Oil Sorbents," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 52, pp. 516-524, Dec. 2012.
- [12] D. Hu, X. Li, L. Li and C. Yang, "Designing high-caliber nonwoven filter mats for coalescence filtration of oil/water emulsions," *Separation and Purification Technology*, vol. 149, pp. 65-73, Jul. 2015.
- [13] Y. He, Y. Pang, Y. Liu, X. Li and K. Wang, "Physicochemical characterization of rice straw pretreated with sodium hydroxide in the solid state for enhancing biogas

- production,” *Energy & Fuels - ENERG FUEL*, vol. 22, pp. 2775–2781, Jul. 2008.
- [14] H. Yang, R. Yan, H. Chen, D. H. Lee and C. Zheng, “Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis,” *Fuel*, vol. 86, pp. 1781–1788, Aug. 2007.
- [15] L.-P. Xu, B. Dai, J. Fan, Y. Wen, X. Zhang and S. Wang, “Capillary-driven Spontaneous oil/water Separation by Superwetable Twine,” *Nanoscale*, vol. 7, no. 31, pp. 13164–13167, Jul. 2015.
- [16] K. Bordin, M. T. Kunitake, K. K. Aracava and C. S. F. Trindade, “Changes in food caused by deep fat frying – A review,” *Archivos latinoamericanos de nutrición*, vol. 63, no. 1, pp. 5–13, Mar. 2013.
- [17] K. C. M. de Lima, H. D. de F. Barros, T. S. Passos, and B. L. L. Maciel, “The effect of using different oils and paper towel in vegetable oil absorption of fried recipes,” *Journal of Culinary Science & Technology*, vol. 17, no. 4, pp. 373–384, Jul. 2019

<http://journal.rmutp.ac.th/>

การดูดซับสารละลายโครเมียม (III) ด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์อะพาไทต์

ชญญะ พรหมศร* อภิสสิฏฐ์ ศงสะเสน และ บุญธนา วรรณเลิศ

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

50 ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

รับบทความ 20 พฤษภาคม 2563 แก้ไขบทความ 7 พฤศจิกายน 2563 ตอรับบทความ 25 ธันวาคม 2563

บทคัดย่อ

โครเมียม (III) ในธรรมชาติเป็นเกลืออนินทรีย์ ใช้เป็นสารยับยั้งการกัดกร่อน ชุบโลหะ รักษาพื้นผิว เฟอร์นิเจอร์ ของตกแต่ง และการพิมพ์สิ่งทอ เป็นต้น การปล่อยน้ำเสียอุตสาหกรรมที่มีโครเมียม (III) ลงสู่แหล่งน้ำทำให้เกิดพิษต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ และบางส่วนสะสมอยู่ในดิน โครเมียม (III) มีผลลดการเจริญเติบโตของพืช การสังเคราะห์แสงลดลง ยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ พืชเกิดภาวะไม่สมดุล และผลผลิตลดลง เป็นต้น ด้วยเหตุนี้จึงต้องมีวิธีกำจัดก่อนปล่อยน้ำทิ้งลงแหล่งน้ำ การใช้วัสดุอะพาไทต์สำหรับการดูดซับ และการตรึงสารมลพิษต่างๆเป็นเทคนิคที่มีแนวโน้มถูกนำมาใช้มากขึ้น เนื่องจากมีความสามารถในการดูดซับสูงใช้งานง่ายและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาการเตรียมแคลเซียมไฮดรอกไซด์อะพาไทต์ การอธิบายลักษณะโครงสร้างของแคลเซียมไฮดรอกไซด์อะพาไทต์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ การศึกษาการดูดซับสารละลายโครเมียม (III) ด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์อะพาไทต์ในสถานะต่างๆ และการหาไอโซเทอมของการดูดซับ ผลการวิจัยพบว่าเวลาสัมผัสที่เหมาะสมของแคลเซียมไฮดรอกไซด์อะพาไทต์กับสารละลายโครเมียม (III) อยู่ที่ 3 ชั่วโมง การดูดซับส่วนใหญ่ได้ผลดีที่ค่า pH ประมาณ 6.76 เมื่อพิจารณาจากค่าปริมาณของโครเมียม (III) ที่ถูกดูดซับ ณ สถานะสมดุล (q) พบว่า แคลเซียมไฮดรอกไซด์อะพาไทต์ที่เติมสังกะสีร้อยละ 10 ที่ถูกทำให้ร้อนที่ 400 องศาเซลเซียส แคลเซียมไฮดรอกไซด์อะพาไทต์ที่เติมสังกะสีร้อยละ 15 ที่ถูกทำให้ร้อนที่ 800 องศาเซลเซียสดูดซับโครเมียม (III) ได้มากกว่าตัวดูดซับชนิดอื่น การหาไอโซเทอมของการดูดซับพบว่าเหมาะสมทั้งฟรุนดลิช และ แลงเมียร์ แคลเซียมไฮดรอกไซด์อะพาไทต์ที่เติมสังกะสีร้อยละ 10 และ 15 ที่ถูกทำให้ร้อนที่ 400 องศาเซลเซียส มีความสามารถดูดซับมวลของตัวถูกดูดซับได้มากที่สุด (q_m) ได้มากถึง 178.57 และ 181.82 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าแคลเซียมไฮดรอกไซด์อะพาไทต์ที่ถูกทำให้ร้อนถึงอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสสามารถสลายตัวได้ไตรแคลเซียมฟอสเฟตออกมาด้วย

คำสำคัญ : โครเมียม (III); แคลเซียมไฮดรอกไซด์อะพาไทต์; ไอโซเทอมของการดูดซับ

<http://journal.rmutp.ac.th/>

Adsorption of Chromium (III) Solution Using Calcium Hydroxyapatite

Thanya Promsorn* Apisit Songsasen and Boontana Wannalerse

Faculty of Science, Kasetsart University

50 Ngam Wong Wan Rd, Lat Yao, Chatuchak, Bangkok 10900

Received 20 May 2020; Revised 7 November 2020; Accepted 25 December 2020

Abstract

Chromium (III) is an inorganic salt being used as corrosion inhibitor, plating agents, surface treating agents, furniture, furnishings, and textile printing, and etc. The discharge of industrial waste water containing chromium (III) into the water source was toxic to the aquatic lives, and some parts accumulate in the soil, chromium (III) reduces the growth of plants, reduced photosynthesis, inhibit the enzyme activity, imbalanced in plants, and reduced productivity, and etc. For this reason, method to remove it before discharge the effluent into the water source is necessary. The use of apatite materials for adsorption, and immobilization of various pollutants was a technique that was more likely to be used. Due to its high adsorbency, easy to use, and environmentally friendly. The purpose of this research was to study the preparation of calcium hydroxyapatite, structural characterization of calcium hydroxyapatite by X-ray diffraction technique, adsorption study of chromium solution with calcium hydroxyapatite in various conditions, and the determination of adsorption isotherm. The results showed that the optimum contact time of calcium hydroxyapatite and chromium solution was 3 hours. Most adsorption works well at a pH of around 6.76. Considering the amount of chromium (III) adsorbed at equilibrium (q), it was found that the calcium hydroxyapatite with 10 % zinc added that has been calcined to 400 °C, and the calcium hydroxyapatite with 15 % zinc added that has been calcined to 800 °C were to adsorb chromium (III) more than other sorbents. The adsorption isotherm was suited with Freundlich and Langmuir. The calcium hydroxyapatite with 10 %, and 15 % zinc added that has been calcined to 400 °C had the highest adsorption capacity (q_m) up to 178.57, and 181.82 mg/g respectively. In addition, it was found that calcium hydroxyapatite, which heated to 800 degrees Celsius, can decompose tricalciumphosphate.

Keywords : Chromium (III); Calcium Hydroxyapatite; Adsorption Isotherm

* Corresponding Author. Tel.: +669 1797 4242, E-mail Address: thanya.pr@ssru.ac.th

1. บทนำ

สารประกอบโครเมียม (III) ที่พบได้บ่อยๆ เช่น โครเมียม (III) ออกไซด์ และโครเมียม (III) ไนเตรท โครเมียม (III) ออกไซด์ใช้ทำให้เกิดสีเขียวในซีเมนต์ ยาง กระเบื้อง เซรามิกส์ และอื่นๆ โครเมียม (III) ไนเตรทใช้เป็นสีย้อม และ เคลือบวัสดุ เป็นต้น [1] การปล่อยน้ำเสียอุตสาหกรรมที่มีโครเมียมลงสู่แหล่งน้ำทำให้เกิดพิษต่อสัตว์น้ำ และบางส่วนสะสมอยู่ในดิน โครเมียมมีผลต่อการเจริญเติบโตของพืช ยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ การสังเคราะห์แสงลดลง พืชเกิดภาวะไม่สมดุล ผลผลิตลดลง เป็นต้น [2] ด้วยเหตุนี้จึงต้องมีวิธีกำจัดก่อนปล่อยน้ำทิ้งลงแหล่งน้ำ มีการพัฒนาและใช้วิธีการหลายวิธีกำจัดไอออนของโลหะออกจากน้ำเสีย เช่น ใช้ถ่านกัมมันต์ ถักลอย ฟิท ตะกอนสารส้ม ไรโซเคล เพื่อกำจัดลิซเรซิน คาโอไลน์ท์ แมงกานีสออกไซด์ ซีโอไลท์ และวัสดุชีวภาพ เป็นต้น อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพการกำจัดไอออนโลหะของตัวดูดซับเหล่านี้อยู่ในระดับต่ำ [3] ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาตัวดูดซับชนิดใหม่ที่มีนิยมนำมาใช้ในการจัดการมลพิษสิ่งแวดล้อมทางด้าน อากาศ น้ำ และ ดิน เนื่องจากมีความสามารถในการดูดซับได้ดี ทนต่อสภาพ กรด-เบส และเสถียรต่อความร้อน [4] ซึ่งก็คือไฮดรอกไซด์อะพาไทต์ งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาเปรียบเทียบการดูดซับสารละลายโครเมียม (III) ด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์อะพาไทต์ที่ถูกทำให้ร้อน (Calcination) ที่ 400 600 800 องศาเซลเซียส และ แคลเซียมไฮดรอกไซด์อะพาไทต์ที่เจือสังกะสีร้อยละ 5 10 และ 15 ที่ทำให้ร้อนที่ 400 600 800 องศาเซลเซียส

2. ระเบียบวิธีวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง ประกอบด้วย การเตรียมแคลเซียมไฮดรอกไซด์อะพาไทต์ การอธิบายลักษณะโครงสร้างของแคลเซียมไฮดรอกไซด์อะพาไทต์ ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction) ใช้เครื่องยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance

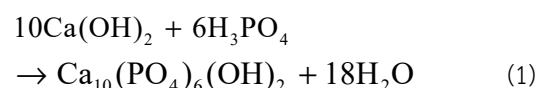
การสร้างกราฟมาตรฐานของสารละลายโครเมียม (III) การศึกษาการดูดซับสารละลายโครเมียม (III) และการหาไอโซเทอม (Isotherm) ของการดูดซับ

2.1 ขั้นตอนการเตรียมแคลเซียมไฮดรอกไซด์อะพาไทต์

การเตรียมแคลเซียมไฮดรอกไซด์อะพาไทต์ มีดังนี้

2.1.1 การเตรียมแคลเซียมไฮดรอกไซด์อะพาไทต์ด้วยวิธีตกตะกอนทางเคมีแบบเปียก

เตรียมแคลเซียมไฮดรอกไซด์อะพาไทต์ด้วยวิธีตกตะกอนทางเคมีแบบเปียก (Wet Chemical Precipitation) ดัดแปลงวิธีจาก [5], [6] และ [7] ใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$, Sigma-Aldrich, ACS reagent, $\geq 95\%$) เป็นแหล่งแคลเซียม และใช้กรดออร์โธฟอสฟอริก (H_3PO_4 , Sigma-Aldrich, ACS reagent, $\geq 85\%$ wt. in H_2O) เป็นแหล่งฟอสฟอรัส การตกตะกอนทางเคมีเริ่มจากชั่งแคลเซียมไฮดรอกไซด์ 74.093 กรัม ใส่ขวดวัดปริมาตร เติมน้ำกลั่นลงไปให้ครบ 1 ลิตร เขย่าให้เกิดเป็นสารแขวนลอย (Suspension) แล้วเทใส่บีกเกอร์ขนาด 2 ลิตร วางบนเครื่องกวนแม่เหล็ก เตรียมกรดออร์โธฟอสฟอริกเข้มข้น 0.6 M ปริมาตร 1 ลิตร ด้วยขวดวัดปริมาตร แล้วนำไปใส่ลงในกรวยสกัดขนาด 1 ลิตร คนสารแขวนลอยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ตลอดเวลาด้วยความเร็ว 700 รอบต่อนาทีพร้อมกับหยดสารละลายกรดออร์โธฟอสฟอริกที่ละลายลงในสารแขวนลอยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ด้วยอัตรา 500 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง วัดค่าพีเอช (pH) ตลอดเวลา และรักษาระดับค่าพีเอชไม่ให้ต่ำกว่า 11 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังนี้



เมื่อหยดสารละลายกรดออร์โธฟอสฟอริกจนครบตามจำนวน ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นจะได้สารแคลเซียม

ไฮดรอกซีอะพาไทต์สีขาว ตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง สารจะแยกชั้น รินน้ำใส่ทิ้งไป เติมน้ำกลั่นลงไปเท่ากับปริมาตรที่ทิ้งไป แล้วกวนสารเป็นเวลา 30 นาที ตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง สารจะแยกชั้นรินน้ำใส่ทิ้งไป นำสารที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แบ่งสารออกเป็น 3 ส่วนใส่ลงในถ้วยระเหย นำถ้วยที่ 1 ไปทำให้ร้อน (Calcination) ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง นำถ้วยที่ 2 ไปทำให้ร้อนที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง นำถ้วยที่ 3 ไปทำให้ร้อนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ตามลำดับ เมื่อครบเวลา และอุณหภูมิเย็นลง นำสารมาบดให้ละเอียด แล้วร่อนด้วยตะแกรงร่อนขนาด 70 ช่องตารางนิ้ว

2.1.2 การเตรียมแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์เจือด้วยสังกะสี

เตรียมแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์เจือด้วยสังกะสี (Zinc-doped) ร้อยละ 5 10 และ 15 ด้วยวิธีตกตะกอนทางเคมีแบบเปียก ดัดแปลงวิธีจาก [8] ใช้สังกะสีไนเตรท ($\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) (Sigma-Aldrich, ACS reagent, $\geq 98\%$) เป็นแหล่งสังกะสี การตกตะกอนทางเคมีเริ่มจากซึ่งแคลเซียมไฮดรอกไซด์เหมือนการเตรียมในตอนต้นที่ 2.1.1 แล้วเทใส่โหลแก้วขนาด 4 ลิตรวางบนเครื่องกวนแม่เหล็ก เตรียมกรดออร์โธฟอสฟอริกเหมือนการเตรียมในตอนต้นที่ 2.1.1 เตรียมสารละลายสังกะสีไนเตรทความเข้มข้นร้อยละตามที่กำหนดปริมาตร 1 ลิตร ด้วยขวดวัดปริมาตร แล้วนำไปใส่ลงในกรวยสกัดขนาด 1 ลิตร คนสาร และหยดสารเหมือนการเตรียมในตอนต้นที่ 2.1.1 ขณะเดียวกันก็หยดสารละลายสังกะสีไนเตรทที่ละลายลงในสารแขวนลอยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ด้วยอัตรา 500 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง วัดค่าพีเอช (pH) ตลอดเวลา และรักษาระดับค่าพีเอชไม่ให้ต่ำกว่า 11 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

เมื่อหยดสารละลายทั้ง 2 ชนิด จนครบตามจำนวน ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นจะได้สารแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์เจือด้วยสังกะสี ตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นปฏิบัติเหมือนขั้นตอนที่ 2.1.1

2.2 การอธิบายลักษณะโครงสร้างของแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์

จากการเตรียมทั้ง 4 ตัวอย่างในหัวข้อ 2.1 ทำให้ได้ผงแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ถูกทำให้ร้อนที่อุณหภูมิ 400 600 และ 800 องศาเซลเซียส (CaHap400 CaHap600 และ CaHap800) ผงแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์เจือด้วยสังกะสีร้อยละ 5 10 และ 15 ที่ถูกทำให้ร้อนที่อุณหภูมิ 400 600 และ 800 องศาเซลเซียส (CaHap400 Zn5, Zn10, Zn15; CaHap600 Zn5, Zn10, Zn15; และ CaHap800 Zn5, Zn10, Zn15) ตามลำดับ ใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction) อธิบายลักษณะโครงสร้างของแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ [7] ซึ่งแบบแผน (Pattern) ของการเลี้ยวเบน เกิดจากการแผ่รังสีของ $\text{Cu K}\alpha$ ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$) ซึ่งบันทึกที่มุม 2θ ในช่วง 20-80 องศา ค่าเฉลี่ยของขนาดผลึก (T) ของอนุภาคคำนวณโดยใช้สมการของ Debye-Scherrer [9] ดังสมการที่ (2)

$$T = \frac{\kappa\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (2)$$

โดยที่

T = ค่าเฉลี่ยของขนาดผลึก (นาโนเมตร)

λ = ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ $\text{Cu K}\alpha$ (อังสตรอม)

β = ความกว้างของพีคตรงระดับครึ่งหนึ่งของความสูงของพีค (องศา)

θ = มุมของการเลี้ยวเบน (องศา)

เปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนของแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์กับการกำหนดหมายเลข 09-0432 ตามมาตรฐาน ICDD [5]

2.3 การสร้างกราฟมาตรฐานของสารละลาย

โครเมียม (III)

เตรียมสารละลายโครเมียม (III) จากขวดสารละลายมาตรฐาน $\text{Cr}(\text{NO}_3)_3$ (Certipur) เข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร สร้างกราฟมาตรฐานของสารละลายโครเมียม (III) โดยเจือจางจากขวดสารละลายมาตรฐานให้ได้ 4 ความเข้มข้น คือ 50 100 200 และ 400 มิลลิกรัมต่อลิตรด้วยฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 7 นำค่าความเข้มข้นไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 408 นาโนเมตร เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างวัดค่าการดูดกลืนแสงกับค่าความเข้มข้น

2.4 การศึกษาการดูดซับสารละลายโครเมียม

(III) ของแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์

การศึกษาการดูดซับสารละลายโครเมียม (III) แบ่งเป็น 4 ขั้นตอน ดังนี้

2.4.1 การศึกษาผลของมวลของแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่มีต่อการดูดซับสารละลายโครเมียม (III)

ซึ่งแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ถูกทำให้ร้อนที่ 400, 600, 800 องศาเซลเซียส ซึ่งแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่เจือจางจะสรี้อยละ 5, 10 และ 15 ที่ทำให้ร้อนที่ 400, 600, 800 องศาเซลเซียส อย่างละ 12.50 25.00, 50.00 และ 100.00 มิลลิกรัม ใส่ลงในขวดพลาสติกขนาด 60 มิลลิลิตร เติมน้ำโครเมียม (III) ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ลงไปในขวด ปิดฝาขวด ทุกรายการเตรียมทั้งหมด 3 ซ้ำ นำไปแช่ที่ 120 รอบต่อนาที ด้วยเครื่องเขย่าเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เมื่อครบตามเวลา วัดค่า pH และวัดค่าการดูดกลืนแสงของของเหลวในขวด นำผลที่ได้ไปเทียบกับกราฟมาตรฐาน แล้วอ่านค่าออกมาเป็นความเข้มข้นของสารละลายโครเมียม (III) ที่เหลืออยู่ ปริมาณของ

โครเมียมที่ถูกดูดซับ ณ สภาวะสมดุลคำนวณได้จากสมการที่ 3

$$q = \frac{v(C_0 - C)}{W} \quad (3)$$

โดยที่

q = ปริมาณของโครเมียม (III) ที่ถูกดูดซับ ณ สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

C_0 = ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโครเมียม (III) (มิลลิกรัมต่อลิตร)

C = ความเข้มข้นสุดท้ายของสารละลายโครเมียม (III) (มิลลิกรัมต่อลิตร)

v = ปริมาตรของสารละลายโครเมียม (III) (ลิตร)

W = มวลของแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ (กรัม)

2.4.2 การศึกษาผลของเวลาเขย่าที่มีต่อการดูดซับสารละลายโครเมียม (III) ด้วยแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์

จากหัวข้อ 2.4.1 ทำให้ทราบมวลแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ดูดซับสารละลายโครเมียม (III) ได้มากที่สุดเมื่อเขย่าเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ซึ่งแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ปริมาณดังกล่าวใส่ลงในขวดพลาสติกแล้วทดลองเหมือนหัวข้อ 2.4.1 อีก 5 การทดลอง โดยเปลี่ยนเวลาเขย่าเป็น 1, 2, 4, 5 และ 6 ชั่วโมง ตามลำดับ

2.4.3 การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายโครเมียม (III) ที่มีต่อการดูดซับด้วยแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์

จากหัวข้อ 2.4.1 และ 2.4.2 ทำให้ทราบมวลของแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์และเวลาเขย่าที่ดูดซับสารละลายโครเมียม (III) ได้มากที่สุด ซึ่งแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์เหมือนหัวข้อ 2.4.2 ใส่ลงในขวดพลาสติก เติมน้ำโครเมียม (III) ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 10 มิลลิลิตร แล้วเขย่าตาม

เวลาที่เหมาะสมจากหัวข้อ 2.4.2 ทดลองแบบเดียวกัน อีก 2 การทดลอง โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของ สารละลายโครเมียม (III) เป็น 200 และ 400 มิลลิกรัม ต่อลิตร ตามลำดับ

2.4.4 การศึกษาผลของค่า pH ของสารละลายโครเมียม (III) ที่มีต่อการดูดซับด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ อะพาไทต์

จากหัวข้อ 2.4.1 2.4.2 และ 2.4.3 ทำให้ทราบ มวลของแคลเซียมไฮดรอกไซด์อะพาไทต์ เวลาเขย่า และ ความเข้มข้นของสารละลายโครเมียม (III) ที่ถูกดูดซับได้ มากที่สุด นำฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 7 มาปรับค่า pH ให้ ได้ 6 ด้วยกรดไฮโดรคลอริก แล้วใช้เตรียมสารละลาย โครเมียม (III) เข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่ง แคลเซียมไฮดรอกไซด์อะพาไทต์เหมือนหัวข้อ 2.4.2 ใส่ลงในขวดพลาสติก เติมสารละลายโครเมียม (III) ความ เข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร pH 6 ปริมาตร 10 มิลลิตร แล้วเขย่าตามเวลาที่เหมาะสมตามหัวข้อ 2.4.2 นำฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 7 มาปรับค่า pH ให้ได้ 8 ด้วย สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ แล้วใช้เตรียม สารละลายโครเมียม (III) เข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร แล้วทดลองเช่นเดียวกับ pH 6

2.5 การหาไอโซเทอมของการดูดซับ

วิธีที่ใช้โดยทั่วไปสำหรับการทดลองเพื่อหา ความสามารถในการดูดซับ คือการหาไอโซเทอมของ การดูดซับ ซึ่งเป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาณตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับต่อมวลของ ตัวดูดซับ (q) กับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่ เหลืออยู่ในสารละลาย (C) ที่สภาวะสมดุล ณ อุณหภูมิ คงที่ ในการศึกษานี้ก็กล่าวถึง 2 สมการที่นิยมใช้กันดังนี้

- 1) สมการการดูดซับของฟรอนดิช อธิบายไอโซเทอมของ การดูดซับภายใต้สมมติฐานที่ว่าพื้นผิวของตัวดูดซับเป็น แบบวิวิธพันธ์ พื้นผิวไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด มีรูปแบบ ของสมการเส้นตรงเป็นดังนี้

$$\log q = \log K + \frac{1}{n} \cdot \log C \quad (4)$$

โดยที่

q = มวลของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับต่อ มวลของตัวดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

K = ค่าคงที่ของฟรอนดิช (ลิตรต่อมิลลิกรัม)

n = ค่าแสดงการดูดซับ (กรัมต่อลิตร)

C = ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ใน สารละลายที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\log q$ (แกน Y) กับ $\log C$ (แกน X) จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ $1/n$ และมีจุดตัดแกน Y เท่ากับ $\log K$ ซึ่งจะทำให้ หาค่า K และ n ได้ ถ้าค่า $n < 1$ แสดงถึงการดูดซับที่ไม่ดี และถ้าค่า $n > 1$ แสดงถึงการดูดซับที่ดี 2) สมการการดูดซับของแลงเมียร์ อธิบายไอโซเทอมของ การดูดซับภายใต้สมมติฐานที่ว่าพื้นผิวบนตัวดูดซับเป็น แบบเดียวกันหมด มีกลไกของการดูดซับเหมือนกัน การ ดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบ ชั้นเดียว ตัวถูกดูดซับจะจัดเรียงตัวเพียงชั้นเดียวบน พื้นผิวตัวดูดซับ โดยที่โมเลกุลตัวถูกดูดซับไม่เกิดการ ซ้อนทับกัน พื้นผิวบนตัวดูดซับจะมีจำนวนจำกัด และ เมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับไว้แล้วจะไม่มีการเคลื่อนย้าย หรือเปลี่ยนตำแหน่งกันกับตัวถูกดูดซับอื่นบนพื้นผิวตัว ดูดซับ พื้นผิวตัวดูดซับจะถูกปกคลุมด้วยตัวถูกดูดซับ มากขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น จนมีตัว ถูกดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว (ถูกดูดซับได้มากที่สุด) มี รูปแบบของสมการเส้นตรงเป็นดังนี้

$$\frac{c}{q} = \frac{1}{q_m \cdot K} + \frac{1}{q_m} \cdot C \quad (5)$$

โดยที่

C = ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ใน สารละลายที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

q = มวลของตัวดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับต่อ
มวลของตัวดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

q_m = ความสามารถของตัวดูดซับในการดูดซับมวล
ของตัวดูดซับได้มากที่สุด (มิลลิกรัมต่อกรัม)

K = ค่าคงที่ของแลงเมียร์ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง c/q (แกน Y) กับ C
(แกน X) จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ $1/q_m$
และมีจุดตัดแกน Y เท่ากับ $1/q_m \cdot K$ ซึ่งจะทำให้หา
ค่า q_m และค่า K ได้

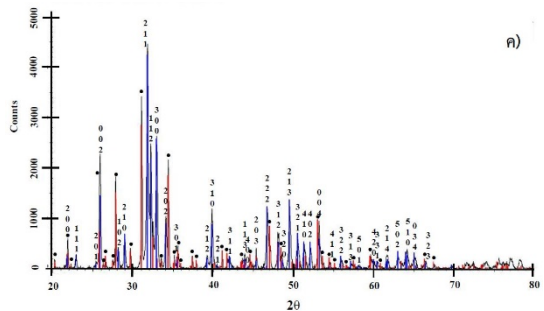
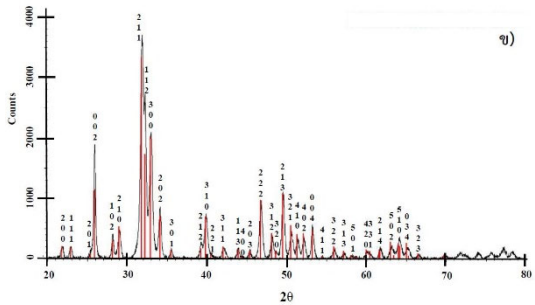
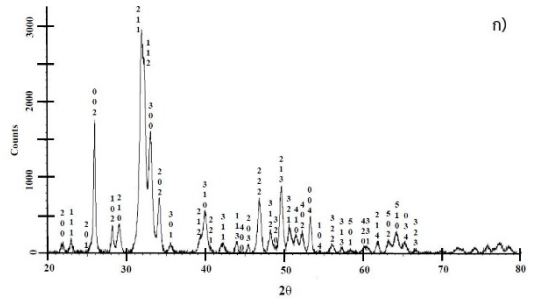
การหาไอโซเทอมของการดูดซับประกอบด้วย
การเตรียมพารามิเตอร์สำหรับการสร้างกราฟไอโซเทอ-
รม สร้างกราฟไอโซเทอรัมของฟรุณดิซ สร้างกราฟไอโซ
เทอรัมของแลงเมียร์ และหาค่าการวิเคราะห์การถดถอย
(Regression Analysis, R^2) หลังจากที่ได้ไอโซเทอม
ของการดูดซับจะสามารถพิจารณาเลือกแคลเซียมไฮ-
ดรอกซีอะพาไทต์ที่มีความเหมาะสมต่อการดูดซับ
สารละลายโครเมียม (III)

3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

3.1 ลักษณะโครงสร้างของแคลเซียมไฮดรอก

ซีอะพาไทต์

ใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ศึกษา
ลักษณะโครงสร้างของแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์
และแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์เจือด้วยสังกะสี รูปที่
1 ก) ข) และ ค) เป็นตัวแทนของแบบแผนการเลี้ยวเบน
ของรังสีเอกซ์ของผลึกแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่
ถูกทำให้ร้อนที่อุณหภูมิ 400 600 และ 800 องศา
เซลเซียส ตามลำดับ พบว่าสารที่ถูกทำให้ร้อนที่อุณหภูมิ
400 และ 600 องศาเซลเซียสคือแคลเซียมไฮดรอกซีอะ
พาไทต์ สารที่ถูกทำให้ร้อนที่อุณหภูมิ 800 องศา
เซลเซียสคือสารผสมของแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์
กับไตรแคลเซียมฟอสเฟต ($Ca_3(PO_4)_2$) ขนาดของ
อนุภาค (T) แคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ทั้งเจือและไม่
เจือสังกะสี แสดงดังตารางที่ 1



รูปที่ 1 แบบแผนการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผลึก
แคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ ก) 400 ข) 600 และ ค)
800 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 1 ขนาดของอนุภาค (T) แคลเซียมไฮดรอก
ซีอะพาไทต์ทั้งเจือและไม่เจือสังกะสี
คำนวณจากสมการของ Debye-Scherrer

รายการ	ขนาดอนุภาค (nm)
CaHap400	12.45
CaHap400 Zn5	13.34
CaHap400 Zn10	5.49
CaHap400 Zn15	12.44
CaHap600	16.99
CaHap600 Zn5	13.35
CaHap600 Zn10	4.55

ตารางที่ 1 ขนาดของอนุภาค (T) แคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ทั้งเจ็ดและไม่เจ็ดสังกะสี คำนวณจากสมการของ Debye-Scherrer (ต่อ)

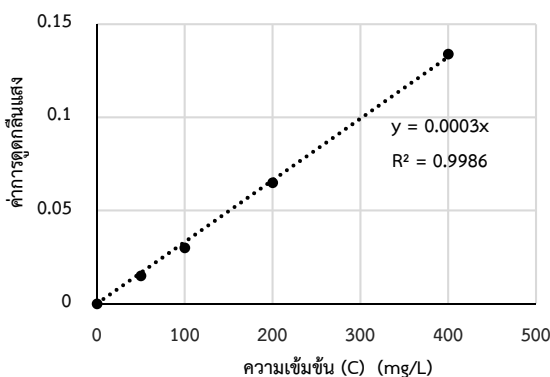
รายการ	ขนาดอนุภาค (nm)
CaHap600 Zn15	14.37
CaHap800	31.13
CaHap800 Zn5	32.48
CaHap800 Zn10	31.14
CaHap800 Zn15	37.37

จากตารางที่ 1 พบว่า แคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่เติมสังกะสีร้อยละ 15 ที่ถูกทำให้ร้อนที่ 800 องศาเซลเซียสมีขนาดอนุภาคใหญ่ที่สุด โดยขนาดของอนุภาคโดยรวมอยู่ในช่วง 5-37 นาโนเมตร

3.2 กราฟมาตรฐานของสารละลายโครเมียม

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับค่าความเข้มข้นของสารละลายโครเมียมใช้เป็นกราฟมาตรฐานเทียบกับผลการทดลอง แสดงดังรูปที่ 2

กราฟมาตรฐานของสารละลายโครเมียม (III)



รูปที่ 2 กราฟมาตรฐานของสารละลายโครเมียม (III)

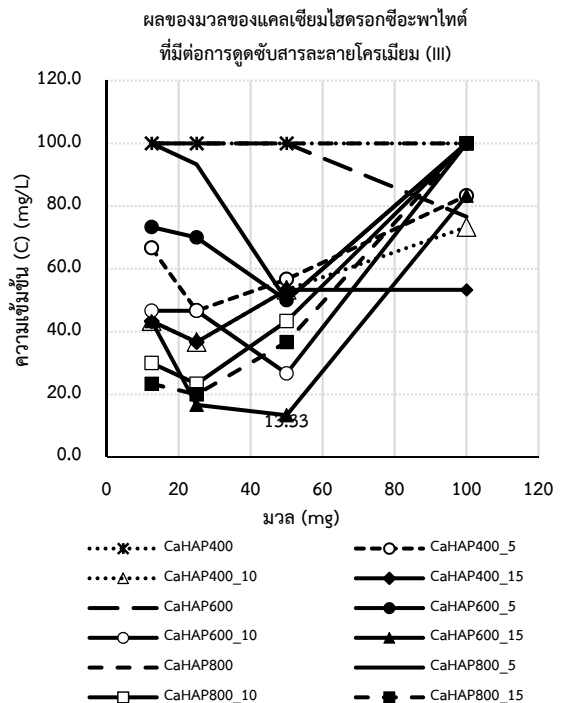
3.3 การดูดซับสารละลายโครเมียม (III) ของ

แคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ (CaHap)

ผลของการศึกษาการดูดซับสารละลายโครเมียม (III) มี 4 ขั้นตอน ดังนี้

3.3.1 ผลของมวลของแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่มีต่อการดูดซับสารละลายโครเมียม (III)

ความเข้มข้นที่เหลืออยู่ (C) ของสารละลายโครเมียม (III) เมื่อถูกดูดซับด้วยแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ 12.50, 25.00, 50.00, และ 100.00 มิลลิกรัมแช่ 120 รอบต่อนาฬิกาเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ความเข้มข้นเริ่มต้น (C_0) ของสารละลายโครเมียม (III) เท่ากับ 100.00 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงดังรูปที่ 3

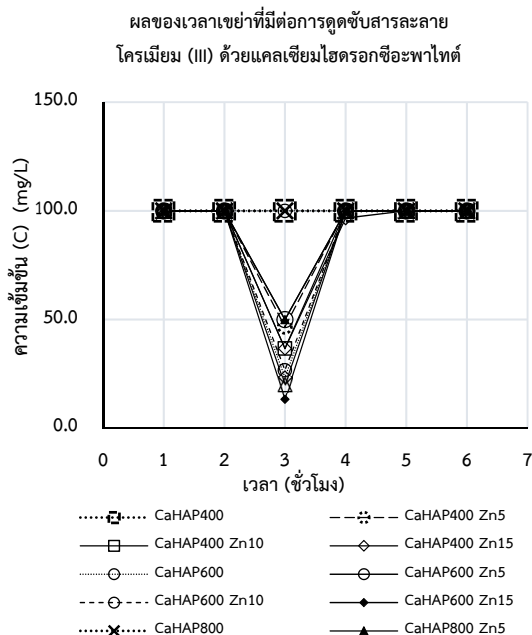


รูปที่ 3 ผลของมวลของแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่มีต่อการดูดซับสารละลายโครเมียม (III)

จากรูปที่ 3 โดยภาพรวมพบว่ามวล 25.00 และ 50.00 มิลลิกรัมดูดซับสารละลายโครเมียม (III) ได้ดีกว่ามวล 12.50 และ 100.00 มิลลิกรัม แคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่เติมสังกะสีร้อยละ 15 ที่ถูกทำให้ร้อนที่ 600 องศาเซลเซียส (CaHap600 Zn15) ดูดซับสารละลายโครเมียมได้ดีที่สุดโดยมีความเข้มข้นที่เหลืออยู่ (C) น้อยที่สุดคือ 13.33 มิลลิกรัมต่อลิตร

3.3.2 ผลของเวลาเขย่าที่มีต่อการดูดซับสารละลายโครเมียม (III) ด้วยแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์

กำหนดความเข้มข้นเริ่มต้น (C_0) ของสารละลายโครเมียม (III) เท่ากับ 100.00 มิลลิกรัมต่อลิตร เขย่า 120 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 1 2 3 4 5 และ 6 ชั่วโมง ความเข้มข้นที่เหลืออยู่ (C) ของสารละลายโครเมียม (III) แสดงดังรูปที่ 4



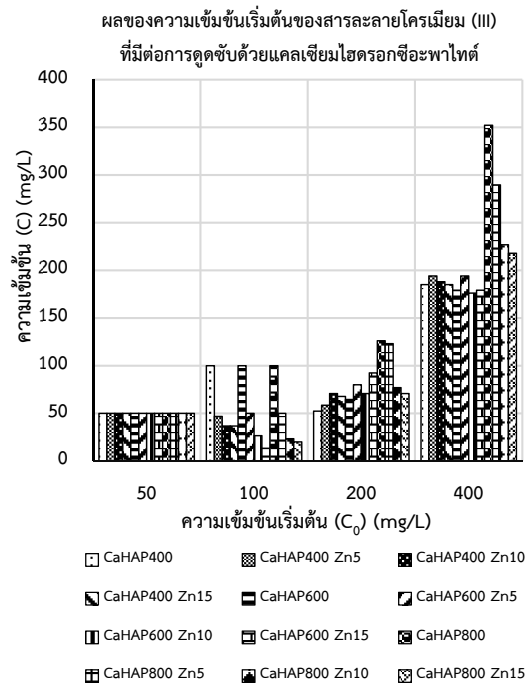
รูปที่ 4 ผลของเวลาเขย่าที่มีต่อการดูดซับสารละลายโครเมียม (III) ด้วยแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์

จากรูปที่ 4 เมื่อพิจารณาจากความเข้มข้นที่เหลืออยู่ (C) ของสารละลายโครเมียม (III) พบว่าเวลาเขย่าที่เหมาะสมคือ 3 ชั่วโมง เวลาเขย่าที่มากกว่า 3 ชั่วโมงเป็นเวลานานเกินไปเป็นผลให้อาจเกิดการคายการดูดซับ (Desorption)

3.3.3 ผลของความเข้มข้นของสารละลายโครเมียม (III) ที่มีต่อการดูดซับด้วยแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์

ความเข้มข้นที่เหลืออยู่ (C) ของสารละลายโครเมียม (III) เมื่อเขย่า 120 รอบต่อนาทีตามเวลาที่

เหมาะสม เทียบกับความเข้มข้นเริ่มต้น (C_0) ของสารละลายโครเมียม (III) แสดงดังรูปที่ 5



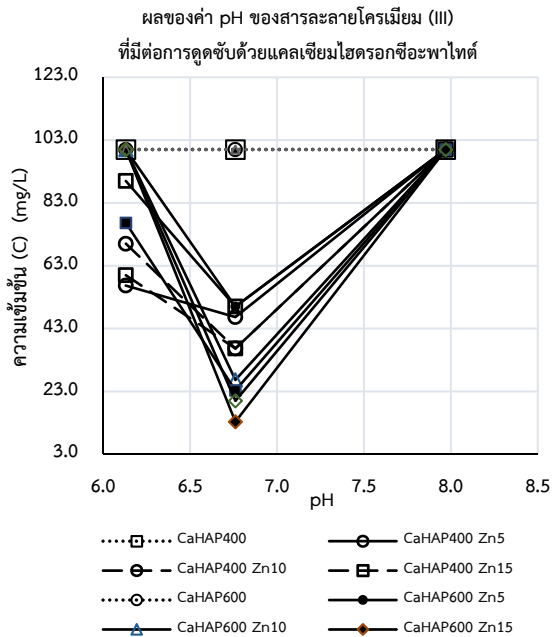
รูปที่ 5 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโครเมียม (III) ที่มีต่อการดูดซับด้วยแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์

จากรูปที่ 5 พบว่าแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ทุกชนิดไม่ดูดซับสารละลายโครเมียม (III) ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น (C_0) 50.00 มิลลิกรัมต่อลิตร อาจเกิดจากสารละลายมีความเข้มข้นน้อย แคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่เติมสังกะสีร้อยละ 15 ที่ถูกทำให้ร้อนที่ 600 องศาเซลเซียส (CaHAP600 Zn15) ให้ผลการดูดซับสารละลายโครเมียม (III) จากเริ่มต้น 100.00 มิลลิกรัมต่อลิตรจนเหลือ 13.33 มิลลิกรัมต่อลิตรซึ่งให้ผลการดูดซับได้มากที่สุดถึงร้อยละ 86.67

3.3.4 ผลของค่า pH ของสารละลายโครเมียม (III) ที่มีต่อการดูดซับด้วยแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์

กำหนดความเข้มข้นเริ่มต้น (C_0) ของสารละลายโครเมียม (III) เท่ากับ 100.00 มิลลิกรัมต่อ

ลิตร เมื่อเขย่า 120 รอบต่อนาทีตามเวลาที่กำหนด ความเข้มข้นที่เหลืออยู่ (C) ของสารละลายโครเมียม (III) ที่ค่า pH 6.7 และ 8 ซึ่งใช้เป็นตัวแทนของการดูดซับในสภาวะเป็น กรด กลาง และ เบส แสดงดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 ผลของค่า pH ของสารละลายโครเมียม (III) ที่มีต่อการดูดซับด้วยแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์

จากรูปที่ 6 พบว่าพบว่าการดูดซับส่วนใหญ่ได้ผลดีที่ค่า pH ประมาณ 6.76

3.4 พารามิเตอร์สำหรับการสร้างกราฟไอโซเทอรัม

ข้อมูล $\log C$ และ $\log q$ ข้อมูล C/q และ C แสดงเฉพาะตัวแทนของแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์แต่ละชนิดที่เมื่อสร้างกราฟแล้วให้ค่า R^2 มากที่สุด ซึ่งได้แก่แคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่เติมสังกะสีร้อยละ 10 ที่ถูกทำให้ร้อนที่ 400 องศาเซลเซียส แคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่เติมสังกะสีร้อยละ 10 ที่ถูกทำให้ร้อนที่ 600 องศาเซลเซียส แคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่เติมสังกะสีร้อยละ 15 ที่ถูกทำให้ร้อนที่ 800 องศาเซลเซียส ดังตารางที่ 2-4

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์สำหรับหาไอโซเทอรัมของแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่เติมสังกะสีร้อยละ 10 ที่ถูกทำให้ร้อนที่ 400 องศาเซลเซียส

C (mg/L)	q (mg/g)	C/q (g/L)	$\log C$	$\log q$
50.00	0.00	-	1.70	-
36.67	25.32	1.45	1.56	1.40
70.77	51.68	1.37	1.85	1.71
188.06	84.76	2.22	2.27	1.93

ตารางที่ 3 พารามิเตอร์สำหรับหาไอโซเทอรัมของแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่เติมสังกะสีร้อยละ 10 ที่ถูกทำให้ร้อนที่ 600 องศาเซลเซียส

C (mg/L)	q (mg/g)	C/q (g/L)	$\log C$	$\log q$
50.00	0.00	-	1.70	-
26.67	14.66	1.82	1.43	1.17
70.77	25.84	2.74	1.85	1.41
176.12	44.78	3.93	2.25	1.65

ตารางที่ 4 พารามิเตอร์สำหรับหาไอโซเทอรัมของแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่เติมสังกะสีร้อยละ 15 ที่ถูกทำให้ร้อนที่ 800 องศาเซลเซียส

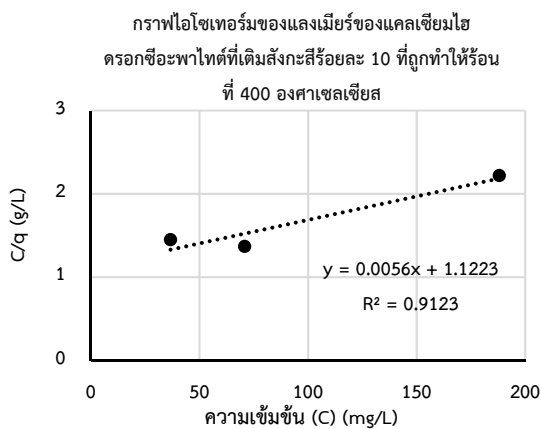
C (mg/L)	q (mg/g)	C/q (g/L)	$\log C$	$\log q$
50.00	0.00	-	1.70	-
20.00	32.00	0.62	1.30	1.50
70.77	51.68	1.37	1.85	1.71
217.91	72.84	2.99	2.34	1.86

จากตารางที่ 2-4 เมื่อพิจารณาจากค่า q พบว่าแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่เติมสังกะสีร้อยละ 10 ที่ถูกทำให้ร้อนที่ 600 องศาเซลเซียส ดูดซับโครเมียม (III) ได้น้อยกว่าสารดูดซับอีก 2 ชนิดในทุกความเข้มข้น และแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่เติมสังกะสีร้อยละ 10 ที่

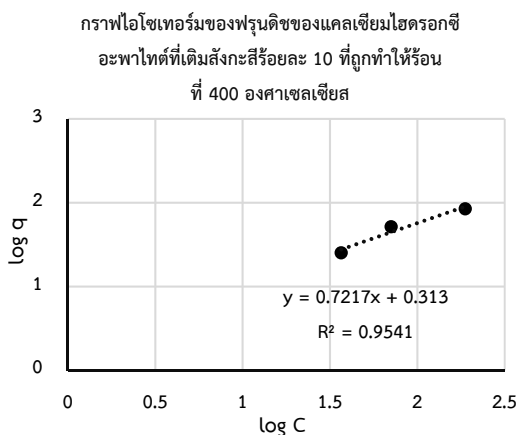
ถูกทำให้ร้อนที่ 400 องศาเซลเซียส ดูดซับสารละลายโครเมียม (III) ความเข้มข้น 400 มิลลิกรัมต่อลิตรได้มากที่สุด รองลงมาได้แก่แคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เติมสังกะสีร้อยละ 15 ที่ถูกทำให้ร้อนที่ 800 องศาเซลเซียส

3.5 กราฟไอโซเทอร์มของฟรูดิช และแลงเมียร์

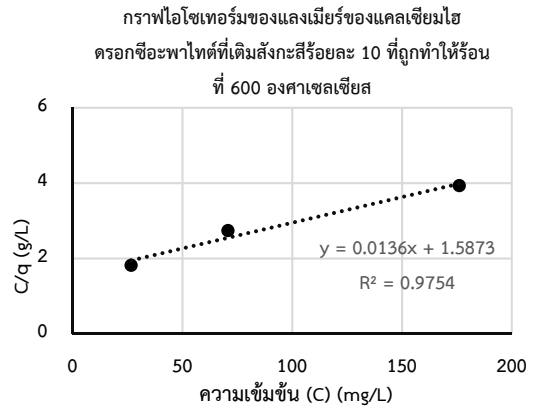
ใช้พารามิเตอร์จากตารางที่ 2-4 สร้างกราฟไอโซเทอร์มของฟรูดิช และ แลงเมียร์ ดังรูปที่ 7-12



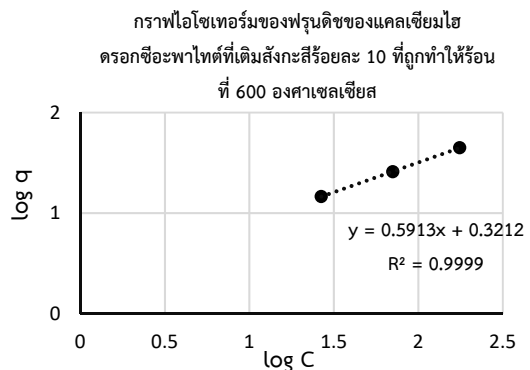
รูปที่ 7 แลงเมียร์ไอโซเทอร์มของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เติมสังกะสีร้อยละ 10 ถูกทำให้ร้อนที่ 400 องศาเซลเซียส



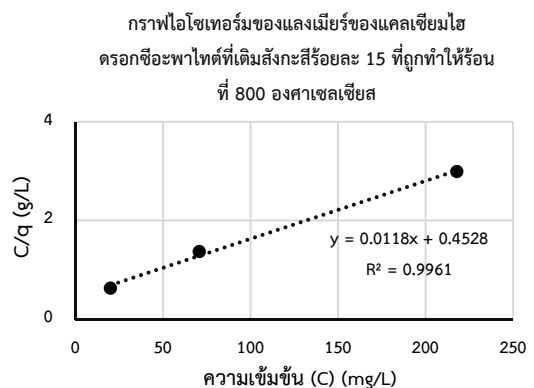
รูปที่ 8 ฟรูดิชไอโซเทอร์มของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เติมสังกะสีร้อยละ 10 ที่ถูกทำให้ร้อนที่ 400 องศาเซลเซียส



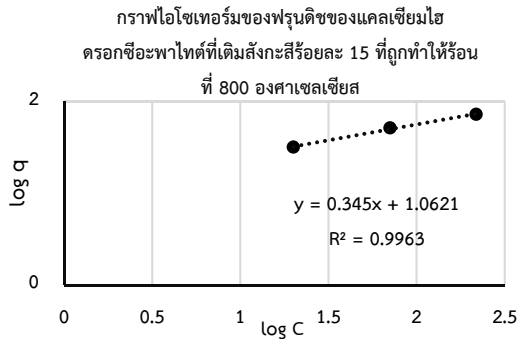
รูปที่ 9 แลงเมียร์ไอโซเทอร์มของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เติมสังกะสีร้อยละ 10 ที่ถูกทำให้ร้อนที่ 600 องศาเซลเซียส



รูปที่ 10 ฟรูดิชไอโซเทอร์มของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เติมสังกะสีร้อยละ 10 ที่ถูกทำให้ร้อนที่ 600 องศาเซลเซียส



รูปที่ 11 แลงเมียร์ไอโซเทอร์มของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เติมสังกะสีร้อยละ 15 ที่ถูกทำให้ร้อนที่ 800 องศาเซลเซียส



รูปที่ 12 ฟรอนดิชไอโซเทอรั่มของแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่เติมสังกะสีร้อยละ 15 ที่ถูกทำให้ร้อนที่ 800 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 5 พารามิเตอร์ของฟรอนดิช และ แลงเมียร์ที่คำนวณได้จากกราฟไอโซเทอรั่ม

	ฟรอนดิช			แลงเมียร์		
	R^2	n	K	R^2	q_m	K
CaHap 400 Zn10	0.9541	1.386	2.056	0.9123	178.57	0.005
CaHap 400 Zn15	0.9326	1.384	2.100	0.8605	181.82	0.005
CaHap 600 Zn10	0.9999	1.691	2.095	0.9754	73.53	0.009
CaHap 800 Zn5	0.9987	2.217	1.726	0.9948	30.03	0.009
CaHap 800 Zn10	0.9958	2.794	10.086	0.9963	81.97	0.023
CaHap 800 Zn15	0.9963	2.899	11.537	0.9961	84.75	0.026

จากรูปที่ 7-12 นำมาคำนวณค่า K n และ q_m แสดงเฉพาะการทดลองที่ค่า $R^2 > 0.8$ ดังตารางที่ 5

จากตารางที่ 5 พบว่าในภาพรวมแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่เติมสังกะสีร้อยละ 10 และ 15 ดูดซับโครเมียมได้ดี ค่า R^2 ส่วนใหญ่มีค่า > 0.9 ในภาพรวมค่า ค่า R^2 ของฟรอนดิชมีค่ามากกว่าแลงเมียร์เล็กน้อย ค่า n ของฟรอนดิชมีค่า > 1 แสดงถึงการดูดซับได้ดี การที่อะตอมของ Zn (รัศมีไอออน 0.074 นาโน

เมตร) เข้าไปแทนที่ตรงตำแหน่งอะตอมของ Ca (รัศมีไอออน 0.099 นาโนเมตร) ในแลตทิซมากขึ้นมีผลทำให้ขนาดของแลตทิซขลิกลึก [9] ซึ่งเป็นไปตามผลการทดลองในหัวข้อขนาดของอนุภาคดังที่แสดงในตารางที่ 1 ทำให้เกิดการดูดซับได้มากขึ้น แคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่เติมสังกะสีร้อยละ 10 และ 15 ที่ถูกทำให้ร้อนที่ 800 องศาเซลเซียส ให้ค่า n มากกว่าตัวดูดซับชนิดอื่น นั่นคือทั้งสองสารนี้มีความเหมาะสมสำหรับใช้ดูดซับสารละลายโครเมียม (III) เมื่อพิจารณาทางด้านการแลงเมียร์พบว่าแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่เติมสังกะสีร้อยละ 10 และ 15 ที่ถูกทำให้ร้อนที่ 400 องศาเซลเซียส มีความสามารถดูดซับมวลของโครเมียม (III) ได้มากที่สุด (q_m) ถึง 178.57 และ 181.82 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ซึ่งดูดซับได้มากกว่าตัวดูดซับชนิดอื่น

มีการศึกษาการดูดซับโครเมียม (III) โดยใช้เรซิน พบว่าการดูดซับเป็นไปตามแลงเมียร์ไอโซเทอรั่มโดยดูดซับโครเมียม (III) ได้มากที่สุดเท่ากับ 0.341 มิลลิโมลต่อกรัม [10] มีการศึกษาการกำจัดสารละลายโครเมียม (III) โดยใช้ซีลี้อย พบว่าการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของซีลี้อย เพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโครเมียม (III) และเพิ่มอุณหภูมิ การดูดซับเป็นไปตามแลงเมียร์ไอโซเทอรั่มโดยดูดซับได้มากที่สุดเท่ากับ 38.878 มิลลิกรัมต่อกรัม [11] อีกตัวอย่างหนึ่งคือการศึกษาการดูดซับโครเมียม (III) ด้วยสาหร่ายสีน้ำตาล การดูดซับเป็นไปตามแลงเมียร์ไอโซเทอรั่ม มีความสามารถในการดูดซับได้มากที่สุดคือ 102.7 มิลลิกรัมต่อกรัม [12] เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยนี้พบว่ามีความสามารถดูดซับมวลของโครเมียม (III) ได้มากที่สุดถึง 178.57 และ 181.82 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ซึ่งดูดซับได้มากกว่าตัวดูดซับชนิดอื่น

4. สรุป

แคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ถูกทำให้ร้อนถึงอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส สามารถสลายตัวได้ แคลเซียมฟอสเฟตออกมาด้วย เวลาสัมผัสที่เหมาะสม

ของแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์กับสารละลายโครเมียม (III) คือ 3 ชั่วโมง การดูดซับส่วนใหญ่ได้ผลดีที่ค่า pH ประมาณ 6.76 เมื่อพิจารณาจากค่าปริมาณของโครเมียม (III) ที่ถูกดูดซับ ณ สภาวะสมดุล (q) พบว่าแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่เติมสังกะสีร้อยละ 10 ที่ถูกทำให้ร้อนที่ 400 องศาเซลเซียส ดูดซับสารละลายโครเมียม (III) ความเข้มข้น 400 มิลลิกรัมต่อลิตร ได้มากที่สุด รองลงมาได้แก่ แคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่เติมสังกะสีร้อยละ 15 ที่ถูกทำให้ร้อนที่ 800 องศาเซลเซียส กรณีของไอโซเทอร์มพบว่าเหมาะสมกับฟรุนดลิช และ แลงเมียร์ การวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์มีความเหมาะสมสำหรับการดูดซับสารละลายโครเมียม (III)

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สำหรับสถานที่และสิ่งอำนวยความสะดวกในการทำวิจัยครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Ministry of the environment of Japan, "Trivalent chromium compound," Profiles of the initial environmental risk assessment of chemical, vol. 8, pp. 1-3, 2009.
- [2] H. Oliveira, "Chromium as an environmental pollutant: Insight on induced plant toxicity," *Journal of Botany*, vol. 2012, pp. 1-8, May 2012.
- [3] M. A. Atieh *et al.*, "Removal of Chromium (III) from water by using modified and non-modified carbon nanotubes," *Journal of Nanomaterials*, vol. 2010, pp. 1-9, Jan. 2010.
- [4] M. Ibrahim, M. Labaki, J.-M. Giraudon, and J.-F. Lamonnier, "Hydroxyapatite, a multifunctional material for air, water and soil pollution control: A review," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 383, p. 121139, Feb. 2020.
- [5] N. Angelescu, D.N. Ungureanu and F.V. Anghelina, "Synthesis and characterization of hydroxyapatite obtained in different experimental conditions," *The Scientific Bulletin of Valahia University – Materials and Mechanics*, vol. 9, pp. 15–18, 2011.
- [6] R. Sahlil Miraz Mohamed and N. Darman, "Synthesis and characterization of hydroxyapatite nanoparticle," *Malaysian Journal of Analytical Sciences*, vol. 21, no. 1, pp. 136–148, Feb. 2017.
- [7] S. S. A. Abidi and Q. Murtaza, "Synthesis and Characterization of Nano-hydroxyapatite Powder Using Wet Chemical Precipitation Reaction," *Journal of Materials Sciences and Technology*, vol. 30, no. 4, p. 307, Apr. 2014.
- [8] G. D. Venkatasubbu, S. Ramasamy, V. Ramakrishnan and J. Kumar, "Nanocrystalline hydroxyapatite and zinc-doped hydroxyapatite as carrier material for controlled delivery of ciprofloxacin," *3 Biotech*, vol. 1, no. 3, pp. 173–186, Oct. 2011.
- [9] J.S.J. Hargreaves, "Some considerations, related to the use of the Scherrer equation in powder X-ray diffraction as applied to heterogeneous catalysts,"

- Catalysis Structure & Reactivity*, vol. 2, no. 1-4, pp. 33–37, Oct. 2016.
- [10] F. Gode and E. Pehlivan, “A comparative study of two, chelating ion-exchange resins for the removal of chromium (III) from aqueous solution,” *Journal of Hazardous Materials*, vol. B100, no. 1-3, pp. 231–243, Jun. 2003.
- [11] M. Rafatullah, O. Sulaiman, R. Hashim, and A. Ahmad, “Adsorption of copper (II), chromium (III), nickel (II) and lead (II) ions from aqueous solutions by meranti sawdust,” *Journal of hazardous materials*, vol. 170, pp. 969–977, Jun. 2009.
- [12] J.R. Guarán-Romero, P. Rodríguez-Estupiñán, L. Giraldo and J. C. Moreno-Piraján, “Simple and competitive adsorption study of nickel (II) and chromium (III) on the surface of the brown algae *Durvillaea antarctica* biomass,” *American Chemical Society Omega*, vol. 4 pp. 18147–18158, Oct. 2019.

<http://journal.rmutp.ac.th/>

ฤทธิ์ต้านแบคทีเรียของผ้าย้อมคราม

แก้วกัลยา โสติดิสวัสดิ์*

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร
680 ถนนนิตโย ตำบลธาตุเชิงชุม อำเภอเมือง จังหวัดสกลนคร 47000

รับบทความ 19 มิถุนายน 2563 แก้ไขบทความ 10 พฤศจิกายน 2563 ตอบรับบทความ 25 ธันวาคม 2563

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของการวิจัยครั้งนี้เพื่อศึกษาฤทธิ์ต้านแบคทีเรียของผ้าย้อมครามที่ผลิตและจำหน่ายในจังหวัดสกลนคร จำนวน 16 ตัวอย่าง และผลของความชื้นและค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ของผ้าย้อมครามที่มีต่อการเจริญของแบคทีเรีย จากผลการศึกษาฤทธิ์ต้าน *Staphylococcus aureus* TISTR 746 และ *Escherichia coli* TISTR 073 ด้วยวิธี Agar Diffusion Plate Test พบว่าผ้าย้อมครามทุกตัวอย่างสามารถยับยั้งการเจริญของ *S. aureus* TISTR 746 ได้ (คิดเป็นร้อยละ 100) และมีเพียง 9 ตัวอย่างเท่านั้นที่สามารถยับยั้ง *E. coli* TISTR 073 ได้ (คิดเป็นร้อยละ 56.25) ในขณะที่ผลการทดสอบฤทธิ์ต้านแบคทีเรียของผ้าย้อมครามตามมาตรฐาน AATCC Test Method 100-2004 ที่ 24 ชั่วโมง พบว่าผ้าย้อมครามธรรมชาติรหัส A3-1 สามารถยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียทั้งสองสายพันธุ์ได้สูงที่สุด สำหรับการศึกษาผลของความชื้น และค่า pH ของผ้าย้อมครามที่มีผลต่อการเจริญของแบคทีเรียพบว่า ที่ระดับความชื้นที่เพิ่มสูงขึ้นในผ้าย้อมครามมีผลทำให้ประสิทธิภาพการยับยั้งแบคทีเรียทั้งสองสายพันธุ์ลดลง ในขณะที่ผ้าย้อมครามที่มีค่า pH 3.0 พบว่าสามารถยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียทั้งสองสายพันธุ์สูงที่สุด นอกจากนี้ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) สามารถยืนยันคุณสมบัติการต้าน *S. aureus* TISTR 746 และ *E. coli* TISTR 073 ของผ้าย้อมครามได้อย่างชัดเจน

คำสำคัญ : ฤทธิ์ต้านแบคทีเรีย; ผ้าย้อมคราม; สีคราม; ต้นคราม (*Indigofera tinctorial* L.)

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +668 1872 0919, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: kaewkanlaya@snru.ac.th

<http://journal.rmutp.ac.th/>

Antibacterial Activity of Indigo Dyed Fabrics

Kaewkanlaya Sotthisawad*

Faculty of Science and Technology, Sakon Nakhon Rajabhat University

680 Nitayo Road, That Choeng Chum Sub-district, Muang District, Sakon Nakhon 47000

Received 19 June 2020; Revised 10 November 2020; Accepted 25 December 2020

Abstract

The objective of this research was to study the antibacterial activity of 16 samples of indigo dyed fabrics that are produced and sold in Sakon Nakhon Province. Effect of moisture and pH of indigo dyed fabrics on bacterial growth were also determined. The result of the study shows inhibition of *S. aureus* TISTR 746 and *E. coli* TISTR 073 by agar diffusion plate test, all samples could inhibit *S. aureus* TISTR 746 (accounted as 100%), and only 9 samples could inhibit *E. coli* TISTR 073 (accounted as 56.25%). Whereas, the study of antibacterial activity by AATCC test method 100-2004 at 24 hours was found that the natural indigo dyed fabrics code A3-1 could inhibit both bacterial strains in the highest level. The result also shows the effect of moisture and pH of indigo dyed fabrics on bacterial growth, it was found that the increased humidity levels of indigo dyed fabrics have effect on the reduction of the inhibition efficacy of both strains. While indigo dyed fabric with pH 3.0 was found to inhibit most of the growth of both strains. In addition, images obtained using a scanning electron microscope (SEM) could clearly confirm the property of indigo dyed fabric on inhibition of *S. aureus* TISTR 746 and *E. coli* TISTR 073.

Keywords : Antibacterial Activity; Indigo Dyed Fabrics; Indigo Blue; *Indigofera tinctorial* L.

* Corresponding Author. Tel.: +668 1872 0919, E-mail Address: kaewkanlaya@snru.ac.th

1. บทนำ

ผ้าย้อมคราม (Indigo Dyed Fabrics) เป็นผลิตภัณฑ์ผ้าพื้นเมืองย้อมด้วยสีครามธรรมชาติ ผ่านวิถีภูมิปัญญาชาวบ้านที่มีนำต้นคราม (*Indigofera tinctorial* L.) มาทำการสกัดสีและย้อมเส้นใยผ้าด้วยการหมักเนื้อคราม จนได้ผลิตภัณฑ์ผ้าย้อมครามที่มีช่วงเฉดสีฟ้าถึงสีน้ำเงินเข้ม (Indigo Blue) ซึ่งเป็นเอกลักษณ์เฉพาะของคราม สีครามจัดเป็นสีย้อมผ้าประเภทสีวัต (Vat Dyes) เป็นสีที่มีความคงทนและติดสีเส้นใยเซลลูโลส โดยโมเลกุลสีอยู่ในรูปไม่ละลายน้ำและถูกขังภายในเส้นใยภายหลังการย้อม [1] สำหรับวัตถุดิบธรรมชาติที่นำมาใช้ในการผลิตผ้าย้อมคราม ส่วนใหญ่นิยมใช้เส้นใยฝ้าย หรืออาจใช้เส้นใยไหม หรือใยกล้วยบ้างเล็กน้อย การผลิตผ้าย้อมครามในอดีตนั้น เกิดขึ้นเพื่อตอบสนองความต้องการในการดำเนินชีวิต แต่ในปัจจุบันได้มีการรื้อฟื้นและฟื้นฟูภูมิปัญญาในการผลิตผ้าย้อมคราม ทำให้ผ้าย้อมครามกลายเป็นสินค้าทางวัฒนธรรมที่สำคัญของจังหวัดสกลนคร [2] และสร้างยอดขายจำหน่ายสูงมากที่สุดในจังหวัด โดยมีราคาจำหน่ายที่สูงใกล้เคียงกับผ้าไหม และเป็นที่ต้องการจำนวนมากในตลาดผ้าผลิตภัณฑ์ธรรมชาติในประเทศญี่ปุ่น ฝรั่งเศส และอิตาลี [3]

สำหรับคุณภาพของผ้าย้อมครามที่ผลิตขึ้นในแต่ละแหล่งผลิตพบว่ามีความแตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความบริสุทธิ์ของใยฝ้าย สีคราม และความชำนาญของผู้เตรียมน้ำย้อม มีงานวิจัยที่ระบุว่าผ้าฝ้ายย้อมครามสามารถดูดกลืนทั้งแสงแดดและรังสียูวี (Ultraviolet, UV) ได้ดี จึงทำให้ผ้าย้อมครามมีคุณสมบัติปกป้องผิวหนังจากแสงแดดและรังสียูวีได้ [4] นอกจากนี้ยังพบว่าสีครามจากสารสกัดหยาบ (น้ำคราม) เนื้อคราม (สีครามเกาะปูนขาว) และน้ำย้อมครามด้วยวิธี Zinc Lime Vat (สีครามในน้ำย้อม) สามารถยับยั้งเชื้อ *Bacillus subtilis* ได้ [5]

การยืนยันผลทางวิทยาศาสตร์เกี่ยวกับคุณสมบัติการต้านแบคทีเรียของผลิตภัณฑ์ผ้าย้อมครามจึงเป็นอีกประเด็นที่น่าสนใจ ซึ่งอาจส่งผลต่อการสร้างความมั่นใจ

ให้แก่ผู้บริโภค งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ของเพื่อศึกษาการต้านแบคทีเรียทั้งชนิดแกรมลบและแกรมบวกของผ้าย้อมครามที่ผลิตและจำหน่ายในจังหวัดสกลนคร โดยใช้แบคทีเรียทดสอบ 2 สายพันธุ์ คือ *S. aureus* TISTR 746 และ *E. coli* TISTR 073 ที่มีรายงานพบการปนเปื้อนบนผิวหนังมนุษย์ [6] องค์ความรู้ใหม่ที่ได้จากศึกษานี้จะเป็นแหล่งข้อมูลทางวิชาการที่มีความน่าเชื่อถือในการเผยแพร่ประชาสัมพันธ์ และนำองค์ความรู้ที่ได้ไปพัฒนาต่อยอดเป็นผลิตภัณฑ์ หรือนวัตกรรมที่เกี่ยวข้องกับการชี้วัดคุณภาพการผลิตผ้าย้อมครามในจังหวัดสกลนครต่อไป

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 การเตรียมตัวอย่าง

ลงพื้นที่สำรวจแหล่งผลิตและจำหน่ายผ้าย้อมครามในพื้นที่จังหวัดสกลนครจำนวน 7 แหล่ง เพื่อดำเนินการเก็บตัวอย่าง โดยใช้วิธีการสุ่มเก็บตัวอย่างแบบเจาะจง (Purposive Sampling) แล้วทำการกำหนดรหัสตัวอย่างก่อนนำผ้าย้อมครามมาตัดให้เป็นวงกลม โดยมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.0 เซนติเมตร แล้วนำมานิ่งฆ่าเชื้อด้วยหม้อนึ่งความดันไอน้ำที่ 121 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที อบผ้าย้อมครามให้แห้งในตู้อบลมร้อนที่ 60 องศาเซลเซียส นาน 4 ชั่วโมง สำหรับเชื้อทดสอบที่ใช้ในการศึกษานี้ มีจำนวน 2 สายพันธุ์ คือ *S. aureus* TISTR 746 และ *E. coli* TISTR 073 ที่ได้รับมาจากสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

2.2 การศึกษาฤทธิ์ต้านแบคทีเรีย

2.2.1 ทดสอบด้วยวิธี Agar Diffusion Plate Test

เพาะเลี้ยงเชื้อทดสอบในอาหารเหลว Nutrient Broth (NB) ที่ 37 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง ก่อนนำมาเจือจางใน Normal Saline (0.85% (w/v) NaCl) แล้วปรับความเข้มข้นของเชื้อเริ่มต้นให้เท่ากับค่า No.0.5 McFarland Standard (1.5×10^8 เซลล์ /

มิลลิลิตร) หลังจากนั้นทำการกวาดเชื้อทดสอบแต่ละสายพันธุ์ โดยใช้ไม้พันสำลีปลอดเชื้อจุ่มลงในสารละลายเชื้อแล้วป้ายเชื้อให้ทั่วผิวน้ำอาหารแข็ง Nutrient Agar (NA) ก่อนใช้คีบปากคีบ (Forceps) ปลอดเชื้อคีบผ้าย้อมครามที่เตรียมไว้ วางทับลงบนผิวน้ำอาหาร NA ก่อนนำไปบ่มที่ 37 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง โดยใช้ผ้าฝ้ายที่ไม่ได้ย้อมสีใด ๆ เป็นตัวควบคุมการทดลอง (ดัดแปลงวิธีของ S. Li และคณะ [7]) ประเมินฤทธิ์ต้านแบคทีเรียโดยพิจารณาจากขนาดของบริเวณยับยั้ง (Inhibition Zone) หรือวงใส (Clear Zone) ที่เกิดขึ้นภายหลังการบ่ม

2.2.2 ทดสอบด้วยวิธีมาตรฐาน AATCC Test Method 100-2004

เตรียมเชื้อทดสอบแต่ละสายพันธุ์ โดยทำการเจือจางใน Normal Saline ด้วยวิธี Serial Dilution เพื่อปรับความเข้มข้นของเชื้อเริ่มต้นให้เท่ากับ 10^3 เซลล์/มิลลิลิตร แล้วใช้คีบปากคีบปลอดเชื้อคีบผ้าย้อมครามแต่ละตัวอย่างใส่ลงในสารละลายเชื้อ (โดยมีสารละลายเชื้อหลอดที่ไม่มีการแช่ผ้าย้อมครามเป็นตัวควบคุมการทดลอง) ก่อนนำไปบ่มที่ 37 องศาเซลเซียส ภายหลังการบ่มครบ 24 ชั่วโมง ปิเปตสารละลายเชื้อ 0.1 มิลลิลิตร ลงบนผิวน้ำอาหาร NA แล้วใช้ Spreader ปลอดเชื้อกวาดเชื้อให้กระจายทั่วผิวน้ำอาหาร ด้วยเทคนิค Spread Plate ก่อนนำไปบ่มที่ 37 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นจึงทำการตรวจนับจำนวนโคโลนีทั้งหมด แล้วนำมาคำนวณหาร้อยละการลดลงของแบคทีเรีย (Percent of Reduction; %R) ดังสมการนี้ (ดัดแปลงวิธีจาก G. Pook-In และคณะ [8] กับ S. Jayapriya และ G. Bagyalakshmi [9])

$$\%R = \frac{100 \times (B - A)}{B} \quad (1)$$

โดยที่

A = จำนวนโคโลนีที่นับได้ ณ เวลาทดสอบ

B = จำนวนโคโลนีที่นับได้ ณ เวลาเริ่มต้น

2.3 การศึกษาผลของความชื้นและค่า pH ของผ้าย้อมครามที่มีผลต่อการเจริญของแบคทีเรีย

นำผ้าย้อมครามรหัสที่ให้ผลทดสอบฤทธิ์ต้านแบคทีเรียดี (สองอันดับสูงสุด) มาทำการศึกษา โดยดัดแปลงวิธีการทดสอบจากวิธี Agar Diffusion Plate Test โดยการเตรียมเชื้อทดสอบในรูปของสารละลายเชื้อใน Normal Saline แล้วปรับความเข้มข้นของเชื้อเริ่มต้นให้เท่ากับ ค่า No.0.5 McFarland Standard หลังจากนั้นทำการกวาดเชื้อทดสอบแต่ละสายพันธุ์ให้ทั่วผิวน้ำอาหารแข็ง NA ก่อนใช้คีบปากคีบปลอดเชื้อคีบผ้าย้อมครามวางทับลงบนผิวน้ำอาหาร NA (ปฏิบัติเช่นเดียวกันกับข้อ 2.2.1) เพื่อทำการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

2.3.1 ผลของความชื้นของผ้าย้อมคราม

หลังจากคีบผ้าย้อมครามวางทับลงบนผิวน้ำอาหาร NA แล้ว ทำการปรับร้อยละความชื้นของผ้าย้อมครามด้วยการเติมน้ำกลั่นในปริมาณที่แตกต่างกัน 3 ระดับ ลงในตำแหน่งตรงกลางของชิ้นผ้าดังนี้ 30 ไมโครลิตร (คิดเป็นความชื้นร้อยละ 60), 60 ไมโครลิตร (คิดเป็นความชื้นร้อยละ 65) และ 90 ไมโครลิตร (คิดเป็นความชื้นร้อยละ 70) โดยมีผ้าที่ไม่มีการเติมน้ำกลั่น (มีความชื้นร้อยละ 5) เป็นตัวควบคุมการทดลอง (Control) หลังจากนั้นจึงนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง แล้วทำการประเมินฤทธิ์ต้านแบคทีเรียโดยพิจารณาจากขนาดของบริเวณยับยั้งหรือวงใสที่เกิดขึ้นภายหลังการบ่ม สำหรับการปรับค่าร้อยละความชื้นของผ้าย้อมครามนั้นได้มีการศึกษาและคำนวณหาร้อยละความชื้นเฉลี่ยของตัวอย่างผ้าย้อมครามแต่ละชนิดก่อนนำมาใช้ทดสอบ

2.3.2 ผลของความเป็นกรดต่างในผ้าย้อมคราม

หลังจากคีบผ้าย้อมครามวางทับลงบนผิวน้ำอาหาร NA แล้ว ปิเปตน้ำกลั่นที่มีค่า pH ที่แตกต่างกัน 4 ระดับ คือ pH 3.0 5.0 7.0 และ 9.0 ปริมาตร 30 ไมโครลิตร (คิดเป็นความชื้นร้อยละ 60) ลงบนผ้าย้อม

ครามในตำแหน่งตรงกลางของชิ้นผ้า แล้วนำไปบ่มที่ 37 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง ก่อนทำการประเมินฤทธิ์ต้านแบคทีเรียโดยพิจารณาจากขนาดของบริเวณยับยั้งหรือวงใสที่เกิดขึ้นภายหลังจากการบ่ม

2.4 ศึกษาการต้านแบคทีเรียของผ้าย้อมครามด้วย SEM

ภายหลังการทดสอบการต้านแบคทีเรียของผ้าย้อมครามด้วยวิธี Agar Diffusion Plate Test ตรวจสอบการเจริญและการคงอยู่ของแบคทีเรียบนผ้าย้อมครามด้วย SEM (ดัดแปลงวิธีจาก H. Cui และคณะ [10] กับ A. K. Tyagi และ A. Malik [11]) โดยใช้ตัวอย่างผ้าย้อมครามที่มีผลการทดสอบฤทธิ์ต้านแบคทีเรียสูงมากที่สุด เปรียบเทียบกับผ้าฝ้ายธรรมชาติที่ไม่มีการย้อมสีใด ๆ โดยหลังจากการบ่มที่ 37 องศาเซลเซียส ครบ 24 ชั่วโมง นำตัวอย่างผ้าย้อมครามแช่ในสารละลายร้อยละ 2.5 Glutaraldehyde ที่ละลายใน Phosphate Buffer Saline (pH 7.2) ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นานข้ามคืน เพื่อตรึงเซลล์แบคทีเรีย (Bacterial Cell Fixation) แล้วล้างตัวอย่างด้วย Phosphate Buffer Saline 2 ครั้ง ๆ ละ 15 นาที ทำการดึงน้ำออกจากเซลล์ (Dehydration) ด้วยสารละลายเอทานอลที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 30, 50, 70, 100 และ 100 (โดยปริมาตร) โดยแช่ตามระดับความเข้มข้นละ 15 นาที ก่อนทำให้เซลล์แห้ง ณ จุดวิกฤต ด้วยเครื่อง Critical Point Dryer (CPD) (ยี่ห้อ Quorum รุ่น K850, ประเทศอังกฤษ) และนำตัวอย่างติดลงบนแท่นวางตัวอย่าง (Stub) ก่อนทำการฉาบเคลือบตัวอย่างด้วยทองคำด้วยเครื่อง Ion Sputtering Coater (ยี่ห้อ Hitachi รุ่น MC1000, ประเทศญี่ปุ่น) โดยใช้ค่ากระแสไฟฟ้า 15 มิลลิแอมป์ นาน 30 วินาที หลังจากนั้นจึงการตรวจวิเคราะห์ตัวอย่างเพื่อยืนยันผลการศึกษาการต้านแบคทีเรียของผ้าย้อมครามด้วยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

(ยี่ห้อ Hitachi รุ่น TM4000 Plus, ประเทศญี่ปุ่น) ที่ระดับความต่างศักย์เร่ง (Accelerating Voltage) 10 กิโลโวลต์ และใช้ Back Scattered Electron (BSE) Detector เป็นตัวตรวจจับสัญญาณภาพ

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

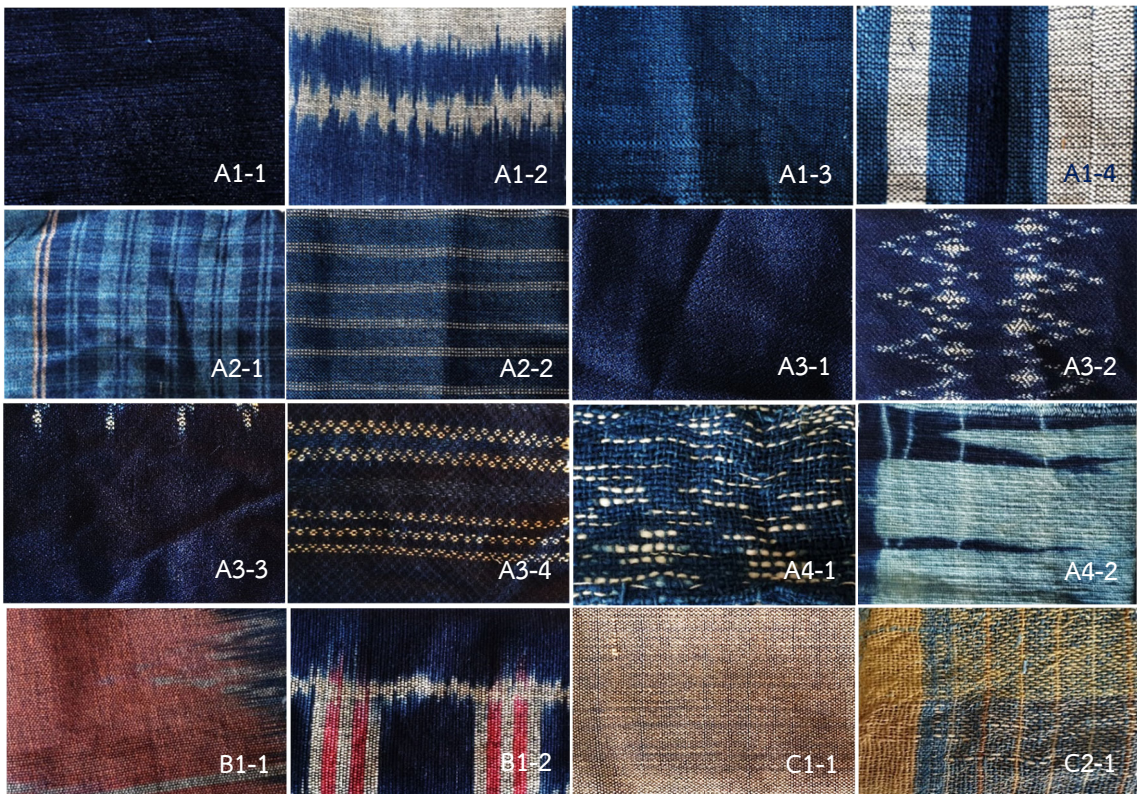
ตัวอย่างผ้าย้อมครามที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ มีจำนวนทั้งหมด 16 ตัวอย่าง ซึ่งได้จากการลงพื้นที่เพื่อสำรวจแหล่งผลิตและจำหน่ายผ้าย้อมครามในพื้นที่จังหวัดสกลนคร จำนวน 7 แหล่ง (รูปที่ 1) และจากการสอบถามทำให้ทราบถึงข้อมูลของชนิดหรือประเภทของผ้าย้อมครามซึ่งสัมพันธ์กับรูปแบบของการทอ และวิธีการย้อมสีคราม (ตารางที่ 1) โดยงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีการย้อมสีครามมาเป็นเกณฑ์ในการแบ่งประเภทผ้าย้อมครามเพื่อกำหนดรหัสตัวอย่างดังนี้คือ การย้อมครามธรรมชาติ การย้อมครามเคมีหรือครามสังเคราะห์ และการย้อมครามผสม (การย้อมสีครามผสมกับพืชสีชนิดอื่น)

3.1 ผลการศึกษาฤทธิ์ต้านแบคทีเรียของผ้าย้อมคราม

ผลการศึกษาคุณสมบัติการต้านแบคทีเรียของผ้าย้อมครามด้วยวิธี Agar Diffusion Plate Test พบว่าตัวอย่างผ้าย้อมครามทุกรหัส (16 รหัส) สามารถยับยั้งการเจริญของ *S. aureus* TISTR 746 ได้ หรือคิดเป็นร้อยละ 100 (รูปที่ 2ก) ในขณะที่มีตัวอย่างผ้าย้อมครามเพียง 9 รหัสเท่านั้นที่สามารถยับยั้ง *E. coli* TISTR 073 ได้ หรือคิดเป็นร้อยละ 56.25 (รูปที่ 2ข) นอกจากนี้ยังพบว่า ตัวอย่างผ้าย้อมครามรหัส A3-1 ซึ่งเป็นผ้าย้อมครามธรรมชาติให้ผลการยับยั้งทั้ง *S. aureus* TISTR 746 และ *E. coli* TISTR 073 สูงที่สุด และรองลงมาคือรหัส A2-2 (รูปที่ 3) ในขณะที่ผลการศึกษาฤทธิ์ต้านแบคทีเรียของผ้าย้อมครามด้วยวิธีมาตรฐาน AATCC Test Method 100-2004 พบว่าตัวอย่างผ้าย้อมครามทุกรหัส สามารถยับยั้งการเจริญของ

S. aureus TISTR 746 และ *E. coli* TISTR 073 ได้ (รูปที่ 4ก และ 4ข ตามลำดับ) โดยที่ผ้าอ้อมक्रमธรรมชาติรหัส A3-1 มีค่าร้อยละการลดลงของแบคทีเรียทั้ง 2 สายพันธุ์ที่ 24 ชั่วโมง สูงที่สุด มีงานวิจัยที่ได้อธิบายถึงข้อแตกต่างระหว่างผ้าक्रमธรรมชาติ และผ้าอ้อมक्रमสังเคราะห์ว่า ในผ้าอ้อมक्रमธรรมชาติจะมีอินดิโกบลู (Indigo Blue) ที่ให้สีน้ำเงิน และอินดิรูบิน (Indirubin) ที่ให้สีแดง สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า มีค่า Rf เท่ากับ 0.42 และ 0.26 ตามลำดับ โดยใช้ไดคลอโรมีเทน (Dichloromethane, CH_2Cl_2) เป็นเฟสเคลื่อนที่ในการศึกษาด้วยเทคนิคคอลัมน์โครมาโทกราฟี ในขณะที่ผ้าอ้อมक्रमสังเคราะห์ พบเพียง

อินดิโกบลูสีเดียว [12] ซึ่งสัมพันธ์กับงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่พบว่าสารสกัดจากใบक्रमสดมีสารอินดิโกบลูและอินดิรูบิน [13] และมีหลายงานวิจัยที่ระบุว่าทั้งสารอินดิโกบลูและอินดิรูบินจากक्रमชาติมีฤทธิ์ยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ได้ (Antimicrobial Activity) [14]-[16] ด้วยเหตุนี้จากผลการศึกษาฤทธิ์ต้านแบคทีเรียของผ้าอ้อมक्रमด้วยวิธี Agar Diffusion Plate Test และ AATCC Test Method 100-2004 จึงพบว่าตัวอย่างรหัส A3-1 ซึ่งเป็นผ้าอ้อมक्रमธรรมชาตินั้นสามารถยับยั้งทั้ง *S. aureus* TISTR 746 และ *E. coli* TISTR 073 ได้สูงมากที่สุด



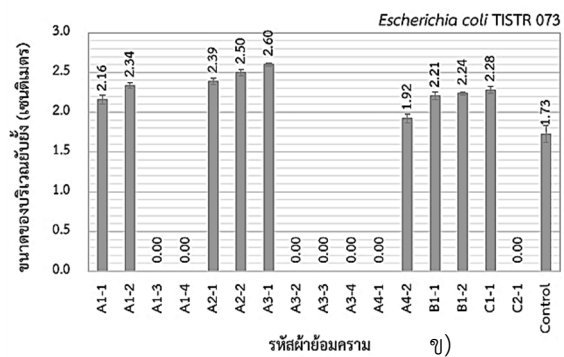
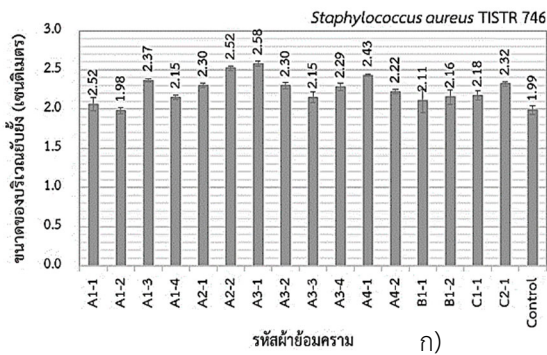
รูปที่ 1 ลักษณะผ้าอ้อมक्रमแต่ละรหัสที่ใช้ในการศึกษา โดยที่รหัสขึ้นต้นด้วย A คือ ผ้าอ้อมक्रमธรรมชาติ B คือ ผ้าอ้อมक्रमเคมี และ C คือ ผ้าอ้อมक्रमผสม

ตารางที่ 1 ข้อมูลและรายละเอียดของตัวอย่างผ้าอ้อมक्रमที่ใช้ในการศึกษา

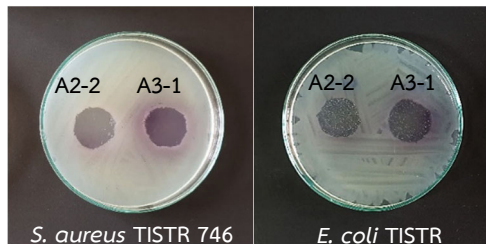
รหัสผ้า	ชนิดผ้าฝ้าย	รูปแบบการทอ	รหัสผ้า	ชนิดผ้าฝ้าย	รูปแบบการทอ
A1-1	ฝ้ายเส้นโรงงาน	2 ตะกอ	A3-3	ฝ้ายเรยอน (ชีกวง)	4 ตะกอ
A1-2	ฝ้ายเส้นโรงงาน	2 ตะกอ	A3-4	ฝ้ายเรยอน (ชีกวง)	4 ตะกอ

ตารางที่ 1 ข้อมูลและรายละเอียดของตัวอย่างผ้าเยื่อกรองที่ใช้ในการศึกษา (ต่อ)

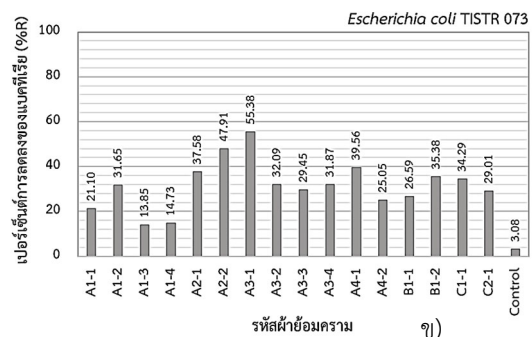
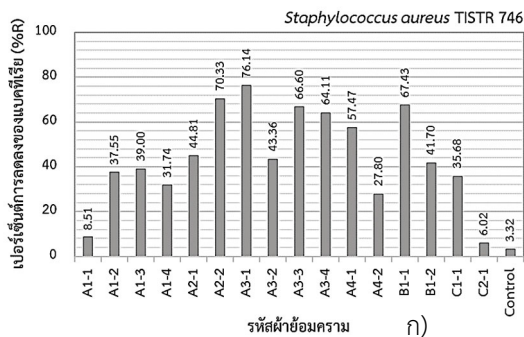
รหัสผ้า	ชนิดผ้าฝ้าย	รูปแบบการทอ	รหัสผ้า	ชนิดผ้าฝ้าย	รูปแบบการทอ
A1-3	ฝ้ายเส้นโรงงาน	2 ตะกอ	A4-1	ฝ้ายเส้นมือ	2 ตะกอ
A1-4	ฝ้ายเส้นโรงงาน	2 ตะกอ	A4-2	ฝ้ายเส้นมือ	2 ตะกอ
A2-1	ฝ้ายเรย่อน (ชีกงว)	2 ตะกอ	B1-1	ฝ้ายเส้นโรงงาน	2 ตะกอ
A2-2	ฝ้ายเรย่อน (ชีกงว)	2 ตะกอ	B1-2	ฝ้ายเส้นโรงงาน	2 ตะกอ
A3-1	ฝ้ายเรย่อน (ชีกงว)	4 ตะกอ	C1-1	ฝ้ายเส้นโรงงาน	2 ตะกอ
A3-2	ฝ้ายเรย่อน (ชีกงว)	4 ตะกอ	C2-1	ฝ้ายเส้นมือ	2 ตะกอ



รูปที่ 2 กิจกรรมการยับยั้งหรือต้าน ก) *S. aureus* TISTR 746 และ ข) *E. coli* TISTR 073 ของผ้าเยื่อกรอง โดยการศึกษาด้วยวิธี Agar Diffusion Plate Test



รูปที่ 3 ลักษณะการเกิดบริเวณยับยั้ง *S. aureus* TISTR 746 และ *E. coli* TISTR 073 โดยผ้าเยื่อกรองรหัส A2-2 และ A3-1



รูปที่ 4 ผลการทดสอบฤทธิ์ต้าน ก) *S. aureus* TISTR 746 และ ข) *E. coli* TISTR 073 ของผ้าเยื่อกรอง ตามมาตรฐาน AATCC Test Method 100-2004

3.2 ผลของของความเป็นกรดและค่า pH ของผ้า ย้อมครามที่มีผลต่อการเจริญของ แบคทีเรีย

จากการศึกษาผลของความเป็นกรด และค่า pH ของผ้าย้อมครามที่มีผลต่อการเจริญของ *S. aureus* TISTR 746 และ *E. coli* TISTR 073 พบว่า ที่ระดับความชื้นที่เพิ่มสูงขึ้นในผ้าย้อมครามมีผลทำให้ประสิทธิภาพการยับยั้งแบคทีเรียทั้งสองสายพันธุ์ลดลง (ตารางที่ 2) ในขณะที่ผ้าย้อมครามที่มีค่า pH 3.0 พบว่ามีผลต่อการยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียทั้งสองสายพันธุ์มากที่สุด รองลงมาคือ pH 9.0, 5.0 และ 7.0 ตามลำดับ (ตารางที่ 3) จากการศึกษาค้นคว้าผลของความเป็นกรด และค่า pH ของผ้าย้อมครามที่มีผลต่อการเจริญของแบคทีเรีย ชี้ให้เห็นว่าปัจจัยทั้งสองต่างมีผลต่อคุณสมบัติการยับยั้ง *S. aureus* TISTR 746 และ *E. coli* TISTR 073 ของผ้าย้อมครามได้อย่างชัดเจน ระดับความชื้นที่เพิ่มสูงขึ้นถึงร้อยละ 70 ในผ้าย้อมคราม พบว่ามีผลทำให้แบคทีเรียทั้งสองสายพันธุ์เจริญได้ดีกว่าในสภาวะที่มีความชื้นต่ำกว่า เนื่องจากปริมาณความชื้นมีความเกี่ยวข้องกับแรงดันออสโมติก ซึ่งมีผลต่อการเจริญของแบคทีเรียโดยตรง นั่นคือ

ความชื้นซึ่งเป็นค่าที่บ่งชี้ปริมาณน้ำที่มีอยู่ได้ส่งผลต่อค่าความเข้มข้นของสารละลายภายนอกเซลล์ของแบคทีเรีย โดยเมื่อเซลล์เจริญในสภาวะที่มีแรงดันออสโมซิสในภาวะสมดุล เซลล์จะเจริญเป็นปกติ แต่ในทางตรงกันข้ามเมื่อเซลล์เจริญในสภาวะที่มีความเข้มข้นของสารละลายภายนอกเซลล์สูง (สารละลายไฮเปอร์โทนิก) หรือต่ำกว่า (สารละลายไฮโปโทนิก) ภายในเซลล์ ส่งผลให้เซลล์เกิดภาวะพลาสโมไลซิส (Plasmolysis) และพลาสโมพโทซิส (Plasmoptysis) ตามลำดับ ในขณะที่ผ้าย้อมครามที่มีค่า pH 3.0 สามารถยับยั้งแบคทีเรียทั้งสองสายพันธุ์ได้ดีที่สุดเนื่องจากแบคทีเรียส่วนใหญ่ไม่เจริญได้ดีในช่วง pH กลาง (6.5-7.5) และพบน้อยมากที่เจริญได้ในค่า pH ต่ำกว่า 4.0 [17] โดยจุลินทรีย์แต่ละชนิดสามารถปรับตัวให้เจริญได้ในช่วงความชื้นหรือค่า pH ที่ต่างกัน ถ้าหากแบคทีเรียเจริญในสภาวะที่ปัจจัยเหล่านี้อยู่นอกช่วงที่จุลินทรีย์สามารถเจริญได้ อาจเกิดผลเสียต่อการดำเนินกิจกรรมต่าง ๆ ของเซลล์ เช่น ความผิดปกติที่มีต่อการทำงานของเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการเจริญ การดูดซึมสารอาหารและแร่ธาตุ และกลไกการสร้าง ATP ในเซลล์บริเวณผนังเซลล์ [17], [18]

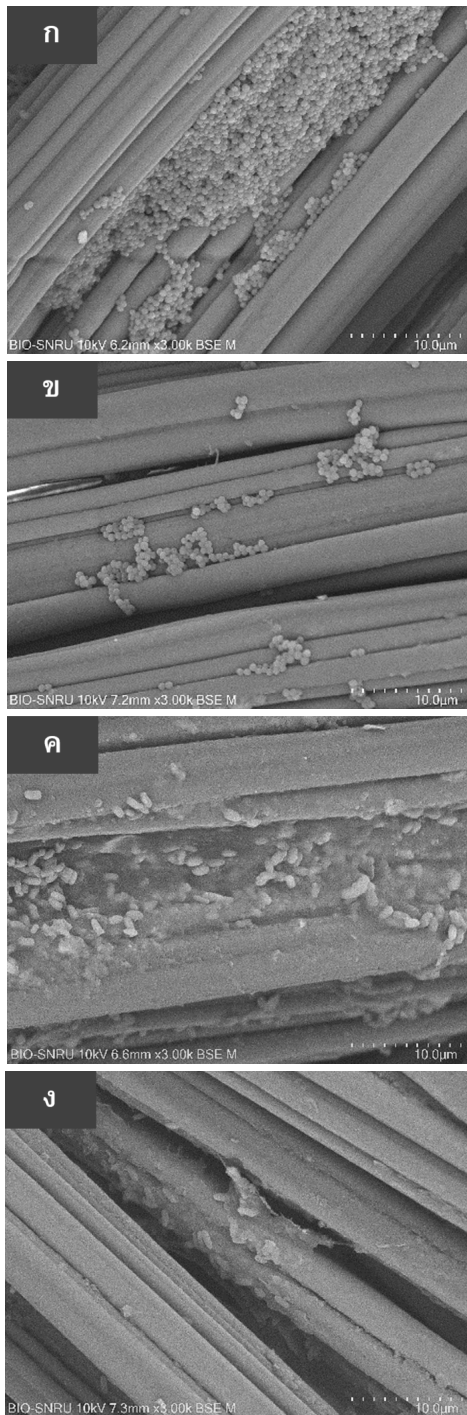
ตารางที่ 2 ผลของความเป็นกรดของผ้าย้อมครามที่มีผลต่อการเจริญของแบคทีเรีย

แบคทีเรีย	ขนาดของบริเวณยับยั้งที่ระดับความชื้นต่าง ๆ (เซนติเมตร)			
	N	60%	65%	70%
<i>S. aureus</i> TISTR 746	2.48±0.03	2.30±0.00	2.13±0.04	2.06±0.03
<i>E. coli</i> TISTR 073	2.45±0.01	2.34±0.06	2.27±0.04	2.21±0.01

*N คือ ผ้าที่ไม่มีการเติมน้ำกลั่นเพื่อเพิ่มความชื้น เป็นตัวควบคุมการทดลอง (Control)

ตารางที่ 3 ผลของค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ของผ้าย้อมครามที่มีผลต่อการเจริญของแบคทีเรีย

แบคทีเรีย	ขนาดของบริเวณยับยั้งที่ระดับ pH ต่าง ๆ (เซนติเมตร)			
	3.0	5.0	7.0	9.0
<i>S. aureus</i> TISTR 746	2.43±0.04	2.24±0.03	2.17±0.01	2.31±0.04
<i>E. coli</i> TISTR 073	2.40±0.06	2.19±0.01	2.10±0.04	2.29±0.01



รูปที่ 5 ภาพถ่าย SEM ยืนยันผลการทดสอบฤทธิ์ต้าน *S. aureus* TISTR 746 ของผ้าฝ้ายที่ไม่ผ่านการย้อมสี (ก) และผ้าย้อมครามรหัส A3-1 (ข) และการต้าน *E. coli* TISTR 073 ของผ้าฝ้ายที่ไม่ผ่านการย้อมสี (ค) และผ้าย้อมครามรหัส A3-1 (ง) ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า

3.3 ผลการศึกษาฤทธิ์ต้านแบคทีเรียของผ้า ย้อมครามด้วย SEM

ผลการตรวจสอบการเจริญและการคงอยู่ของ แบคทีเรียบนตัวอย่างผ้าย้อมครามรหัส A3-1 (รหัสที่ ให้ผลทดสอบฤทธิ์ต้านแบคทีเรียสูงมากที่สุด) เปรียบเทียบกับผ้าฝ้ายธรรมชาติที่ไม่มีการย้อมสีใด ๆ ด้วย SEM พบว่าภาพถ่ายจาก SEM สามารถยืนยัน ลักษณะการเจริญ การเรียงตัว และจำนวนของเซลล์ แบคทีเรียที่ลดลงในทั้ง *S. aureus* TISTR 746 และ *E. coli* TISTR 073 ได้อย่างชัดเจน (รูปที่ 5) โดยเมื่อ พิจารณาลักษณะการเจริญของแบคทีเรียทั้งสองสาย พันธุ์ พบว่าผ้าย้อมครามมีผลต่อการเพิ่มจำนวน รวมถึง การจัดเรียงตัวของเซลล์แบคทีเรีย นอกจากนี้ยังพบการ สร้างไบโอฟิล์ม (Biofilm) ของ *E. coli* TISTR 073 บน ผ้าย้อมครามและผ้าฝ้ายที่ไม่ผ่านการย้อมสี ซึ่งไบโอฟิล์ม เป็นคอมเพล็กซ์ของจุลินทรีย์ที่ยึดติดกับพื้นผิวและ ห่อหุ้มด้วยสารโพลีเมอร์ที่จุลินทรีย์สร้างขึ้นและขับ ออกมาภายนอกเซลล์ (Extracellular Polymeric Substances, EPS) มีบทบาทหน้าที่ในการป้องกันเซลล์ จากสภาวะแวดล้อมที่ไม่เอื้ออำนวยต่อการเจริญ [19] การก่อตัวของไบโอฟิล์มโดยจุลินทรีย์ ก่อโรคมีส่วนช่วย เพิ่มความอยู่รอดในโฮสต์ และทำให้เกิดการติดเชื้อ เรื้อรังที่ทำให้เกิดการอักเสบถาวรและเนื้อเยื่อเสียหายได้ [20] ซึ่งลักษณะการสร้างไบโอฟิล์มบนผ้าย้อมครามของ *E. coli* TISTR 073 นั้นสอดคล้องกับรายงานก่อนหน้านี้ ที่ระบุว่าสารอินทรีย์รูปที่พบในต้นครามนั้นมีผลต่อการ สร้างไบโอฟิล์มของจุลินทรีย์หลายชนิด รวมถึงสารสกัด จากพืชหลายชนิดที่พบว่ามีความสามารถในการสร้างไบโอฟิล์ม ของแบคทีเรียแกรมลบเช่นกัน [14]

4. สรุป

จากการศึกษาฤทธิ์ต้านแบคทีเรียของผ้าย้อม ครามที่ผลิตและจำหน่ายในจังหวัดสกลนครครั้งนี้ สามารถยืนยันถึงคุณสมบัติของผ้าย้อมครามในการ

ยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียทั้งแกรมบวกและแกรมลบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการยับยั้งการเจริญของ *S. aureus* TISTR 746 (แกรมบวก) พบว่าทุกตัวอย่างผ้าย้อมครามที่ผ่านกระบวนการย้อมด้วยครามธรรมชาติครามเคมี และครามผสม (16 ตัวอย่าง) สามารถยับยั้ง *S. aureus* TISTR 746 ได้ หรือคิดเป็นร้อยละ 100 องค์กรความรู้ใหม่ที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้สามารถนำไปพัฒนาต่อยอดสู่การผลิตผ้าย้อมครามและผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพ รวมถึงการขยายผลสู่การสร้างมาตรฐานผ้าย้อมครามในด้านการยับยั้งแบคทีเรียและจุลินทรีย์กลุ่มอื่น ๆ ต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนด้านทุนวิจัยจากทุนสนับสนุนสำหรับบุคลากรมหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร จากงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2562

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] M. Khati, F. Ahmed, I. Shaikh, D. N. Phan, K. Kham, Z. Khati, H. Lee and I. S. Kim, "Dyeing and Characterization of Regenerated cellulose nanofibers with vat dyes," *Carbohydrate Polymers*, vol. 174, pp. 443-449, Oct. 2017.
- [2] D. Chathiphot, "Indigo Dye Fabric: Commodization of Culture in the Tide of Globalization," *Journal of Thai Studies*, vol. 10, no. 2, pp. 87-153, Aug. 2014-Jan. 2015.
- [3] A. Saithong, T. Wanruengrong and U. Sunaprom, "The Development of Indigo - Dyed Cloths' Pattern for the New Generation People", *Sakon Nakhon Rajabhat University Journal*, vol. 7, no. 13, pp. 11-20, Jan. – Jun. 2015.
- [4] O. Pupatana, "Intensity of Natural Indigo Dyed Cotton Fabrics with UV Protection," *RMUTI JOURNAL Science and Technology*, vol. 11, no. 2, pp. 129-141, May – Aug. 2018.
- [5] P. Chuysoodsakulchai, A. Saithong and A. Phothikanith, "The Study of Underarm Bacterial Inhibition Properties of Indigo Dyed Textiles," *Sakon Nakhon Graduate Studies Journal*, vol. 7, no. 29, pp. 57-66, Mar.- Apr. 2010.
- [6] J. Tapaopong, S. Suwanmanee and N. Luplertlop, "Evaluation of Pathogenic Microorganisms Contaminated in Dermatology Outpatient Clinic During the Midst of Rainy Season," *Journal of Medicine and Health Sciences*, vol. 22, no. 2, pp. 8-14, Aug. 2015.
- [7] S. Li, T. Zhu, J. Huang, Q. Guo, G. Chen and Y. Lai, "Durable Antibacterial and UV-Protective Ag/TiO₂ @ Fabrics for Sustainable Biomedical Application," *International Journal of Nanomedicine*, vol. 12, pp. 2593-2606, 2017.
- [8] G. Pook-In, K. Seansupa and S. Upakut, "Inhibition of *Staphylococcus aureus* by the Cotton Fabrics Treated with the Crude Finish Produced from *Streptomyces* sp. strain AC4," *Journal of Food Health and Bioenvironmental Science*, vol. 12, no. 1, pp. 44-53, 2019.
- [9] S. Jayapriya and G. Bagyalakshmi, "Textile Antimicrobial Testing and Standards,"

- Journal of Textile and Fashion Technology*, vol. 4, no. 1, pp. 1-10, 2013.
- [10] H. Cui, X. Zhang, H. Zhou, C. Zhao and L. Lin, "Antimicrobial Activity and Mechanisms of *Salvia sclarea* Essential Oil," *Botanical Studies*, vol. 56, pp. 16, 2015.
- [11] A.K. Tyagi and A. Malik, "Morphostructural Damage in Food-Spoiling Bacteria due to the Lemon Grass Oil and Its Vapour: SEM, TEM, and AFM Investigations," *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, vol. 2012, pp. 1-12, 2012.
- [12] O. Sangwong, T. Pawong, P. Pudtumma and S. Arthan, "The Simple Natural Indigo fabric test kit by Column Chromato-graphy," *KKU Science Journal*, vol. 47, no. 1, pp. 117-126, 2019.
- [13] N. Chanayath, S. Lhieochaiphant and S. Phutrakul, "Pigment Extraction Techniques from the Leaves of *Indigofera tinctorial* Linn. and *Baphicacanthus cusia* Brem. and Chemical Structure Analysis of Their Major Components," *Chiang Mai University Journal*, vol. 1, no. 2, pp. 149-160, 2002.
- [14] N. A. Al-Dhabi, C. Balachandran, M. K. Raj, V. Duraipandiyan, C. Muthukumar, S. Ignacimuthu, I. A. Khan and V. S. Rajput "Antimicrobial, Antimycobacterial and Antibiofilm Properties of *Couroupita guianensis* Aubl. Fruit Extract. In *Biofilm Control and Antimicrobial Agent*, S. M. A. Sayem, editor. Oakville, Apple Academic Press, 2014, pp. 223-238.
- [15] Y.-R. Chiang, A. Li, Y.-L. Leu, J.-Y. Fang and Y.-K. Lin, "An In Vitro Study of the Antimicrobial Effects of Indigo Naturalis Prepared from *Strobilanthes formosanus* Moore," *Molecules*, vol. 18, no. 11, pp. 14381-14396, 2013.
- [16] K. P. Renukadevi and S. S. Sultana, "Detection of Antibacterial, Antioxidant and Cytotoxicity Effect of *Indigofera tinctorial* on Lung Cancer Cell Line NCI-h69," *International Journal of Pharmacology*, vol. 7, no. 3, pp. 356-362, 2011.
- [17] G. J. Tortora, B. R. Funke and C. L. Case, *Microbiology: An Introduction*, 8th ed. San Francisco: Pearson Benjamin Cummings, 2004.
- [18] L. M. Wheelis, *Principle of Modern Microbiology*. Massachusetts: Jones and Bartlett Publishers, 2008.
- [19] G. Sharma, S. Sharma, P. Sharma, D. Chandola, S. Dang, S. Gupta and R. Gabrani, "*Escherichia coli* Biofilm: Development and Therapeutic Strategies," *Journal of Applied Microbiology*, vol. 121, pp. 309-319, 2016.
- [20] X.-H. Li and J.-H. Lee, "Antibiofilm Agents: A New Perspective for Antimicrobial Strategy," *Journal of Microbiology*, vol. 55, pp. 753-766, 2017.

<http://journal.rmutp.ac.th/>

การพัฒนาผลิตภัณฑ์อัดเม็ดจากข้าวหักไรซ์เบอร์รี่

น้ำฝน สามสาลี* และ เสกสรร มังคลานันท์

คณะวิทยาศาสตร์และศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

744 ถนนสุรนารายณ์ อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

รับบทความ 5 มิถุนายน 2563 แก้ไขบทความ 13 พฤศจิกายน 2563 ตอรับบทความ 25 ธันวาคม 2563

บทคัดย่อ

ข้าวไรซ์เบอร์รี่เป็นข้าวเมล็ดสีม่วงเข้ม เป็นหนึ่งในข้าวที่ผู้บริโภคนิยมรับประทาน ซึ่งมีคุณค่าทางโภชนาการและ มีสารต้านอนุมูลอิสระสูง ข้าวหักไรซ์เบอร์รี่เป็นผลพลอยได้จากการสีข้าวและเป็นส่วนที่มีมูลค่าต่ำ สามารถนำมา แปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้มากมาย งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาส่วนผสมและอัตราส่วนสำหรับการพัฒนาสูตร ผลิตภัณฑ์อัดเม็ดจากข้าวหักไรซ์เบอร์รี่ ได้แก่ ผงข้าวหักไรซ์เบอร์รี่ นมผง เวียโปรตีน น้ำตาลไอซิ่ง ผงสตอเบอร์รี่ สารเพิ่มปริมาณ สารป้องกันการจับตัวเป็นก้อน และสารหล่อลื่น การอัดเม็ดขึ้นรูปโดยใช้เครื่องตอกเม็ดชนิดโรตารี ผลการศึกษาพบว่าส่วนผสมของผลิตภัณฑ์มีสมบัติการไหลอยู่ในระดับที่ไหลได้ โดยมีค่า Carr Index เท่ากับร้อยละ 24.57-32.10 และ Hausner Ratio มีค่าเท่ากับ 1.33-1.47 ปริมาณน้ำอิสระของผลิตภัณฑ์อัดเม็ดมีค่าอยู่ในช่วง 0.36-0.45 ผลิตภัณฑ์อัดเม็ดที่ได้มีความหนา 3.86-4.38 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13.07-13.35 มิลลิเมตร และมี น้ำหนัก 0.62-0.71 กรัมต่อเม็ด เมื่อปริมาณของผงข้าวหักไรซ์เบอร์รี่เพิ่มขึ้น (ร้อยละ 10 ถึง ร้อยละ 40) ส่งผลให้ค่า ความแข็ง (hardness) ของผลิตภัณฑ์ลดลงประมาณ 5 เท่า (จาก 64 นิวตัน เป็น 12 นิวตัน) การทดสอบทางประสาทสัมผัสด้านลักษณะปรากฏ สี เนื้อสัมผัส กลิ่น รสชาติ ความแข็ง การละลายในปาก และความชอบโดยรวม ใช้วิธีการ ให้คะแนนความชอบ 9 ระดับ โดยผู้ทดสอบชิมที่ไม่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 30 คน ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าสูตรของ ผลิตภัณฑ์อัดเม็ดที่เหมาะสมประกอบด้วย ผงข้าวหักไรซ์เบอร์รี่ร้อยละ 30 น้ำตาลไอซิ่งร้อยละ 30 นมผงร้อยละ 18 สารป้องกันการจับตัวเป็นก้อนร้อยละ 1 สารหล่อลื่นร้อยละ 1 และสารเพิ่มปริมาณหรือผงสตอเบอร์รี่ร้อยละ 20 โดยผลิตภัณฑ์มีคะแนนความชอบโดยรวมสูงที่สุด อยู่ในระดับชอบเล็กน้อยถึงชอบปานกลาง

คำสำคัญ : ผลิตภัณฑ์อัดเม็ด; ข้าวหัก; นมผง; ข้าวไรซ์เบอร์รี่

<http://journal.rmutp.ac.th/>

Development of Tablet Product from Riceberry Broken Rice

Namfon Samsalee* and Seksan Mangklanan

Faculty of Sciences and Liberal Arts, Rajamangala University of Technology Isan

744 Sura Narai Road, Muang District, Nakhon Ratchasima 30000

Received 5 June 2020; Revised 13 November 2020; Accepted 25 December 2020

Abstract

Riceberry rice is dark purple coloured grains. It is one of the most famous rice for consumers. There are nutrients and high antioxidant properties. Riceberry broken rice (RBR) is a by-product from the rice milling process and has a low value. It can be processed into various products. The purpose of this research was to study the ingredients and the ratios for tablet formulations, including RBR powder, milk powder, whey protein, icing sugar, strawberry powder, bulking agent, anticaking agent and lubricant agent. Tableting of powders was performed using a rotary tablet press machine. It was found that the powder products exhibited passable flow with the Carr Index of 24.57-32.10% and the Hausner Ratio value of 1.33-1.47. The water activity value of product was in the range 0.36-0.45. The tablets had thickness 3.86-4.38 mm, diameter 13.07-13.35 mm and weight 0.62-0.71 g/tablet. The increase of RBR powder content (10% - 40%) decreased hardness value of tablet products about 5 times (from 64 N to 12 N). Sensory evaluation of products in appearance, color, texture, odor, flavor, hardness, dissolution in the mouth and overall liking were conducted using 9-point hedonic scale with 30 untrained panelists. The results showed that the optimal tablet formulation consisted of 30% RBR powder, 30% icing sugar, 18% milk powder, 1% anticaking agent, 1% lubricant agent and 20% bulking agent or strawberry powder. They showed the highest overall liking scores in ranges of “like slightly” to “like moderately”

Keywords : Tablet product; Broken rice; Milk powder; Riceberry rice

* Corresponding Author. Tel.: +669 3416 3541, E-mail Address: namfon.sm@rmuti.ac.th

1. บทนำ

ข้าว เป็นอาหารหลักสำคัญของประชากรในภูมิภาคเอเชีย โดยเฉพาะประเทศไทยนิยมรับประทานข้าวเป็นอาหารหลัก จนเป็นอาหารประจำชาติที่คู่กับประวัติศาสตร์ไทยมายาวนาน [1] อีกทั้งข้าวยังเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของไทย โดยไทยเป็นผู้ส่งออกข้าวอันดับ 1 ของโลก โดยมีส่วนแบ่งทางการตลาดถึงร้อยละ 30 ซึ่งนารายได้เข้าประเทศหลายแสนล้านบาท ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันมีการวิจัยสายพันธุ์ข้าวหลากหลายสายพันธุ์ ที่มีคุณลักษณะและคุณค่าทางอาหารแตกต่างกัน ในปี พ.ศ. 2548 ศูนย์วิทยาศาสตร์ข้าวและหน่วยปฏิบัติการค้นหาและใช้ประโยชน์ยีนข้าว มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จ. นครปฐม ได้รายงานข้าวเจ้าสายพันธุ์ใหม่ พันธุ์ไรซ์เบอร์รี่ (Riceberry) เป็นสายพันธุ์ผสมระหว่าง ข้าวเจ้าหอมนิล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (พันธุ์พ่อ) กับ ข้าวขาวดอกมะลิ 105 (ข้าวหอมมะลิ) จากสถาบันวิจัยข้าว (พันธุ์แม่) ข้าวไรซ์เบอร์รี่มีลักษณะสีม่วงเข้ม เมล็ดเรียวยาว มีสารต้านอนุมูลอิสระและคุณค่าทางโภชนาการสูง มีการสนับสนุนให้ประชาชนบริโภคโดยทั่วไป ทำให้เป็นสายพันธุ์ข้าวที่นิยมอีกสายพันธุ์หนึ่ง [2]

การขัดสีข้าวถือเป็นกระบวนการสำคัญในการผลิตข้าว โดยมีขั้นตอนตั้งแต่การกะเทาะเปลือกได้ข้าวกล้องเป็นผลิตภัณฑ์ การแยกแกลบได้แกลบหรือเปลือกข้าวเป็นผลิตภัณฑ์ การขัดขาวจะได้ข้าวสาร ปลายข้าว หรือข้าวหัก และรำข้าวเป็นผลิตภัณฑ์ และทำการคัดขนาดแยกข้าวสารออกจากข้าวหัก ซึ่งข้าวหักที่เป็นผลพลอยได้จากขั้นตอนการผลิตข้าวที่มีมูลค่าน้อยไม่นิยมบริโภค นอกจากนั้นแล้วพบว่าข้าวไรซ์เบอร์รี่เต็มเมล็ดมีราคาค่อนข้างสูง ข้าวไรซ์เบอร์รี่เป็นข้าวที่มีคุณค่าทางโภชนาการอย่างครบถ้วนและมีคุณสมบัติเด่นในด้านของสารต้านอนุมูลอิสระสูง ได้แก่ แอนโทไซยานิน แกมมาโอไรซานอล วิตามินอี แทนนิน สังกะสี และโฟเลตสูง ที่สำคัญมีดัชนีน้ำตาลในข้าวอยู่ในระดับที่ต่ำและระดับ

ปานกลาง [3], [4] ในระหว่างกระบวนการผลิตข้าวไรซ์เบอร์รี่พบว่าจะมีข้าวหักเกิดขึ้นอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ถึงร้อยละ 20-30 ของผลผลิตข้าวไรซ์เบอร์รี่ทั้งหมด (ประมาณ 1,200-1,800 ตันต่อฤดูกาลเก็บเกี่ยว) ข้าวหักจากข้าวไรซ์เบอร์รี่และน้ำมันข้าวไรซ์เบอร์รี่จำนวนมากจะถูกขาย เพื่อเป็นวัตถุดิบสำหรับอาหารสัตว์ ขนหม ขบเคี้ยว เส้นก๋วยเตี๋ยว และเป็นส่วนประกอบในการทำเซิร์มบำรุงผม เป็นต้น ซึ่งข้าวหักดังกล่าวมีมูลค่าทางการตลาดที่ต่ำ [3]

งานวิจัยนี้มีแนวคิดในการพัฒนาผลิตภัณฑ์จากข้าวหักไรซ์เบอร์รี่ เพื่อเพิ่มมูลค่าและสร้างความแตกต่างให้กับผลิตภัณฑ์ โดยใช้เป็นส่วนผสมของผลิตภัณฑ์นมอัดเม็ด เนื่องจากนมอัดเม็ดเป็นผลิตภัณฑ์อาหารที่สามารถรับประทานได้ง่ายเป็นที่นิยมของผู้บริโภค โดยทั่วไปโดยเฉพาะกลุ่มเยาวชน เพื่อให้เป็นผลิตภัณฑ์ทางเลือกของผู้ที่นิยมบริโภคนมอัดเม็ดให้มีคุณค่าทางอาหารมากขึ้น ดังนั้นการเพิ่มข้าวหักไรซ์เบอร์รี่เป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์อัดเม็ดจึงเป็นการเพิ่มคุณค่าทางอาหารให้กับผลิตภัณฑ์และทำให้ผลิตภัณฑ์มีเนื้อสัมผัสที่แตกต่างออกไปจากเดิม

ในกระบวนการตอกเม็ดผลิตภัณฑ์นอกจากวัตถุดิบหลักที่ใช้ในการตอกเม็ด พบว่ายังมีการเติมสารช่วยในการตอกเม็ด ได้แก่ สารช่วยลื่น (Lubricant) เช่น แมกนีเซียม สเตียเรท (Magnesium Stearate) สารในกลุ่มนี้จะช่วยลดแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในการตอกและช่วยลดการเกิดการกะเทาะหรือการแยกตัวบางส่วน (Capping) ของผลิตภัณฑ์หลังการตอกเม็ด และสารช่วยให้อนุภาคของวัตถุดิบหลักแยกกันเป็นอิสระทำให้การไหลเกิดขึ้นได้ดีเมื่อผ่านกระบวนการผสม เช่น แคปซิล (Cab-o-sil) [5] อัตราส่วนของแต่ละองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์นมอัดเม็ดจะส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ การออกแบบส่วนผสมและการวิเคราะห์คุณสมบัติจึงมีความสำคัญในการพัฒนาและปรับปรุงผลิตภัณฑ์อาหาร ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์การปรับสูตรที่เหมาะสมส่งผล

ต่อคุณลักษณะและความชอบโดยรวมของผู้บริโภค โดยจุดมุ่งหมายของการปรับปรุงสูตรอาหารคือการศึกษาสูตรที่ได้รับการยอมรับทางประสาทสัมผัสมากที่สุด โดยประเมินจากความชอบในคุณลักษณะด้านต่าง ๆ ของผลิตภัณฑ์ [6] ดังนั้นการพัฒนาอัตราส่วนขององค์ประกอบที่เหมาะสมของผลิตภัณฑ์อัดเม็ดจากข้าวหักไรซ์เบอร์รี่ มีความสำคัญต่อสมบัติทางกายภาพ ปริมาณน้ำอิสระ และลักษณะทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาศึกษาอัตราส่วนขององค์ประกอบที่เหมาะสมในการผลิตผลิตภัณฑ์อัดเม็ดจากข้าวหักไรซ์เบอร์รี่ที่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 การเตรียมผงข้าวหักไรซ์เบอร์รี่

วัตถุดิบที่ใช้ในการวิจัย คือ ผงข้าวหักไรซ์เบอร์รี่ จากกลุ่มวิสาหกิจชุมชนข้าวหอมมะลินครคง อำเภอกง จังหวัดนครราชสีมา ผงข้าวหักไรซ์เบอร์รี่เป็นส่วนปลายข้าวที่มีส่วนของจมูกข้าวปน ผ่านการคั่วในกระทะไฟฟ้าด้วยความร้อน 240 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที จากนั้นปล่อยให้เย็นลงและนำไปบดละเอียด ด้วยเครื่องบดแห้งแบบ Pin Mill (บริษัทซัพพอร์ต แพค จำกัด) ให้มีผงละเอียดขนาด 50-100 ไมโครเมตร โดยผงข้าวหักไรซ์เบอร์รี่มีปริมาณความชื้นร้อยละ 6

2.2 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้

น้ำตาลไอซิ่ง (ตราลิน) มอลโตเด็คทรีน (Maltodextrin) เกรตอาหาร ใช้เป็นสารเพิ่มปริมาณของแข็ง และ แมกนีเซียมสเตียเรท (Magnesium Stearate) เกรตอาหาร ใช้เป็นสารหล่อลื่น ช่วยในการตอกเม็ด (บริษัทเคมีภัณฑ์คอร์ปอเรชั่น จำกัด) แคบโอซิล (Cab-o-sil) เกรตอาหาร ใช้เพื่อเป็นสารป้องกันการจับตัวเป็นก้อน (บริษัท กรุงเทพเคมี จำกัด) นมผง (ตราสเปเชียล เบเกอร์) เวย์โปรตีน (ตราคาเธย์ แดรี่) และผงสตรอเบอร์รี่ (ตราควีนเบเกอร์) เครื่องตอกเม็ด (Tableting Machine) ชนิดโรตารี 16 สาก (บริษัท ซัพพอร์ต แพค จำกัด) และเครื่องผสม (Dry Blender; บริษัท ซัพพอร์ต แพค จำกัด)

2.3 กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์อัดเม็ด

ศึกษาอัตราส่วนขององค์ประกอบที่เหมาะสมในการอัดเม็ดผลิตภัณฑ์จากข้าวหักไรซ์เบอร์รี่ โดยการพัฒนารูปแบบในการผลิตแสดงดังตารางที่ 1 โดยในการผลิตแต่ละรอบ (Batch) จะเตรียมส่วนผสมสูตรละ 5 กิโลกรัม ผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องผสม (Dry Blender) ที่ความเร็ว 50 รอบต่อนาที เป็นเวลา 25 นาที สุ่มผงส่วนผสมเพื่อนำไปวิเคราะห์สมบัติการไหลต่อไป จากนั้นนำส่วนผสมแต่ละสูตรไปเข้าเครื่องตอกเม็ดอัตโนมัติเพื่อผลิตเป็นผลิตภัณฑ์อัดเม็ด บรรจุผลิตภัณฑ์อัดเม็ดที่ได้ลงซองอลูมิเนียมฟอยล์เพื่อนำไปทดสอบคุณสมบัติผลิตภัณฑ์อัดเม็ดจากข้าวหักไรซ์เบอร์รี่ต่อไป

ตารางที่ 1 สูตรในการพัฒนาผลิตภัณฑ์อัดเม็ดจากข้าวหักไรซ์เบอร์รี่

สูตรที่	ผงข้าวหักไรซ์เบอร์รี่ (ร้อยละ)	น้ำตาลไอซิ่ง (ร้อยละ)	นมผง (ร้อยละ)	เวย์โปรตีน (ร้อยละ)	MD (ร้อยละ)	ผงสตรอเบอร์รี่ (ร้อยละ)
1	78	20	-	-	-	-
2	10	50	-	38	-	-
3	20	50	-	28	-	-
4	30	50	-	18	-	-
5	40	50	-	8	-	-

ตารางที่ 1 สูตรในการพัฒนาผลิตภัณฑ์อัดเม็ดจากข้าวหักไรซ์เบอร์รี่ (ต่อ)

สูตรที่	ผงข้าวหักไรซ์เบอร์รี่ (ร้อยละ)	น้ำตาลไอซิ่ง (ร้อยละ)	นมผง (ร้อยละ)	เวย์โปรตีน (ร้อยละ)	MD (ร้อยละ)	ผงสตรอเบอร์รี่ (ร้อยละ)
6	30	30	-	18	20	-
7	30	30	-	18	-	20
8	10	30	38	-	20	-
9	10	30	38	-	-	20
10	30	30	18	-	20	-
11	30	30	18	-	-	20

หมายเหตุ MD คือ มอลโตเด็คทรีน (Maltodextrin); ทุกสูตรเติมสารป้องกันการจับตัวเป็นก้อน (Cab-o-sil) ที่ปริมาณร้อยละ 1 และสารหล่อลื่น (Magnesium Stearate) ที่ปริมาณร้อยละ 1

ผงส่วนผสมแต่ละสูตรที่พัฒนาได้จะถูกนำมาวิเคราะห์ความหนาแน่นรวม (Bulk Density) และความหนาแน่นของผงที่มีการเคาะ (Tapped Density) เพื่อใช้ในการคำนวณหาสมบัติการไหลของผง (Flow Property) โดยใช้ Carr Index และ Hausner Ratio โดยลักษณะสมบัติการไหลแสดงดังตารางที่ 2 การคำนวณค่า Carr Index และ Hausner Ratio แสดงดังสมการที่ (1) และ (2) ตามลำดับ [7]

Carr Index(%)

$$= \frac{\text{Tapped Density} - \text{Bulk Density}}{\text{Tapped Density}} \times 100 \% \quad (1)$$

$$\text{Hausner Ratio} = \frac{\text{Tapped Density}}{\text{Bulk Density}} \quad (2)$$

โดยการวิเคราะห์ความหนาแน่นรวม (Bulk Density) และความหนาแน่นของผงที่มีการเคาะ (Tapped Density) วิเคราะห์โดยซึ่งส่วนผสมผลิตภัณฑ์อัดเม็ดจากข้าวหักไรซ์เบอร์รี่แต่ละสูตรปริมาณ 2 กรัม (m) เทใส่ในกระบอกตวงขนาด 25 มิลลิเมตร เคาะ 5 ครั้ง บันทึกค่าปริมาตรที่อ่านได้ (V_1) โดยพิจารณาจากพื้นผิวบนสุดของผงในกระบอกตวง จากนั้นคำนวณ Bulk Density (m/V_1) โดยการเคาะกระบอกตวงที่มีตัวอย่างต่ออีก 100 ครั้ง โดยการเคาะจะยกสูงจากพื้น 15 เซนติเมตร บันทึกค่าปริมาตร (V_2) และคำนวณค่า Tapped Density (m/V_2)

ตารางที่ 2 สมบัติการไหลกับค่า Carr Index และ Hausner Ratio [7]

สมบัติการไหล	Carr Index (%)	Hausner Ratio
Excellent	0-10	1.00-1.11
Good	11-15	1.12-1.18
Fair	16-20	1.19-1.25
Passable	21-25	1.26-1.34
Poor	26-31	1.35-1.45
Very poor	32-37	1.46-1.59
Very, very poor	>38	>1.60

2.4 การศึกษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์อัดเม็ดจากข้าวหักไรซ์เบอร์รี่

ศึกษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์อัดเม็ดจากข้าวหักไรซ์เบอร์รี่ ได้แก่ ค่าสีในระบบ CIE (L^* , a^* , b^*) ด้วยเครื่องวัดสี Chroma Meter (ยี่ห้อ Minolta, รุ่น CR400, ประเทศญี่ปุ่น) ความหนาและเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดด้วยเครื่องเวอร์เนียร์ดิจิตอล (ยี่ห้อ Starnic, รุ่น 0-150 mm, ประเทศจีน) น้ำหนักต่อเม็ดด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักทศนิยม 4 ตำแหน่ง (ยี่ห้อ Sartorius, รุ่น BP210S, ประเทศเยอรมัน) วัดค่าความแข็งของผลิตภัณฑ์อัดเม็ด (Hardness) โดยการสุมผลิตภัณฑ์สูตรละ 15 เม็ด วัดด้วยเครื่อง Texture Analyzer (ยี่ห้อ Lloyd, รุ่น LR5K, ประเทศอังกฤษ) ใช้หัววัดชนิดทรงกลมสแตนเลส (Stainless steel ball) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3

มิลลิเมตร ความเร็วในการทดสอบที่ 10 มิลลิเมตรต่อ นาที รายงานผลเป็นค่าแรงสูงสุดที่ทำให้ตัวอย่างแตก วัดค่าปริมาณน้ำอิสระด้วยเครื่องวัดปริมาณน้ำอิสระ (ยี่ห้อ AQUA LAB, รุ่น 4TE, ประเทศสหรัฐอเมริกา) และคุณภาพทางประสาทสัมผัสโดยวิธีให้คะแนน ความชอบ 1 ถึง 9 คะแนน (9-point Hedonic Scale) โดยคะแนน 1 หมายถึง ไม่ชอบมากที่สุด 2 หมายถึง ไม่ชอบมาก 3 หมายถึง ไม่ชอบปานกลาง 4 หมายถึง ไม่ชอบเล็กน้อย 5 หมายถึง เฉย ๆ 6 หมายถึง ชอบเล็กน้อย 7 หมายถึง ชอบปานกลาง 8 หมายถึง ชอบมาก และ 9 หมายถึง ชอบมากที่สุด โดยกลุ่มผู้ทดสอบเป็นนักศึกษาปริญญาตรีที่ไม่ได้ผ่านการฝึกฝนจำนวน 30 คน [8], [9] งานวิจัยนี้วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design, CRD) ยกเว้นการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสที่วางแผนการทดลองแบบสุ่มบล็อกสมบูรณ์ (Randomized Completely Block Design: RCBD) ทำการทดลอง 3 ซ้ำ ข้อมูลการศึกษาทั้งหมดจะถูกนำมาวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และทดสอบความแตกต่างค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test โดยใช้โปรแกรม SPSS version 17.0

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

สมบัติการไหล (Flow Property) ของผง ส่วนผสมสำหรับผลิตภัณฑ์อัดเม็ดจากข้าวหักไรซ์เบอร์รี่ (ตารางที่ 3) ซึ่งแสดงในรูปของค่า Carr Index (%) หรือเรียกว่า Compressibility Index (%) ที่จะบ่งบอกถึง ร้อยละที่กดอัดได้ของผง และค่า Hausner Ratio ซึ่งได้มาจากข้อมูลจากการทดสอบความหนาแน่นรวม (Bulk Density) และความหนาแน่นของผงที่มีการเคาะ (Tapped Density) โดยสมบัติการไหลจะมีความสำคัญต่อกระบวนการตอกเม็ด เนื่องจากวัตถุดิบที่จะตอกอัดเม็ดจะไหลลงสู่เบ้าตอก หากมีสมบัติการไหลที่ดีจะ

ทำให้ผลิตภัณฑ์อัดเม็ดที่ได้มีความสมบูรณ์และน้ำหนักที่สม่ำเสมอ อย่างไรก็ตามในทุกสูตรที่พัฒนาจะมีการเติมแมกนีเซียมสเตียเรตที่เป็นสารหล่อลื่นช่วยในการตอกเม็ด และแคปโอสิล (Cab-o-sil) หรือแอโรซิล (Aerosil) ที่เป็นสารป้องกันการจับตัวเป็นก้อนรวมถึงช่วยในการไหลของผง ที่ปริมาณอย่างละร้อยละ 1 จากการศึกษาพบว่าค่า Carr Index และ Hausner Ratio ของสูตรที่ศึกษาทั้งหมดมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 24.57 ถึง 32.10 และ 1.33 ถึง 1.47 ตามลำดับ (ตารางที่ 3) โดยพบว่า ส่วนผสมของสูตรสำหรับผลิตภัณฑ์อัดเม็ดจากข้าวหักไรซ์เบอร์รี่ โดยส่วนใหญ่ในรูปแบบผงมีลักษณะสมบัติการไหลแบบไหลน้อย (Poor) ทำให้ต้องมีการสั่นหรือเขย่าช่วยเพื่อให้ผงมีการไหลได้ในระหว่างการตอก แม้ว่าทุกสูตรที่พัฒนาจะมีการเติมแมกนีเซียมสเตียเรตที่เป็นสารหล่อลื่นช่วยในการไหลได้ของผงก็ตาม ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์อัดเม็ดจากข้าวหักไรซ์เบอร์รี่ พบว่า ส่วนผสมในรูปแบบผงสูตรที่ 5 มีสมบัติการไหลที่ไหลได้น้อยมาก (Very Poor) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากในสูตรมีปริมาณของผงข้าวหักไรซ์เบอร์รี่เป็นส่วนผสมในปริมาณจำนวนมาก (ร้อยละ 40) เมื่อเทียบกับสูตรอื่นๆ รวมถึงมีปริมาณของผงเวย์โปรตีนในปริมาณที่น้อยเพียงร้อยละ 8 อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาค่า Carr Index และ Hausner Ratio ของผลิตภัณฑ์สูตรที่ 5 พบว่ามีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) กับสูตรที่ 4, สูตรที่ 10 และสูตรที่ 11 ผงสำหรับผลิตภัณฑ์อัดเม็ดจากข้าวหักไรซ์เบอร์รี่สูตรที่ 9 ที่มีส่วนผสมของผงข้าวหักไรซ์เบอร์รี่ร้อยละ 10 นมผงร้อยละ 38 น้ำตาลไอซิ่งร้อยละ 30 ผงสตอเบอร์รี่ร้อยละ 20 สารป้องกันการจับตัวเป็นก้อนร้อยละ 1 และสารหล่อลื่นร้อยละ 1 พบว่ามีสมบัติการไหลที่ดีที่สุด โดยมีลักษณะที่ไหลได้ (Passable) แต่อาจมีผงตกค้างบ้างเล็กน้อยที่บริเวณเบ้าตอก T. Intarasuk et al. [10] พบว่าผงเห็ดที่ไม่ได้เติมสารช่วยในการอัดเม็ดมีสมบัติการไหลไม่ดี โดยมีค่า Carr Index เท่ากับร้อยละ 21.69-34.29 สามารถตอกอัดเม็ดได้ด้วย

วิธีการตอกลง แต่พบว่าเห็ดมีความสามารถในการดูดความชื้นที่สูง จึงเติมแอสซอร์ซีซึ่งเป็นสารช่วยในการดูดซับความชื้นและยังสามารถเพิ่มสมบัติการไหลได้ของผงเห็ดด้วย [10] L. P. Zea et al. [11] ได้ทำการศึกษาผลิตภัณฑ์ผลไม้ผงอัดเม็ดจากฝรั่งและแก้วมังกร พบว่าค่า Hausner Ratio ของผงฝรั่งและแก้วมังกร มีค่า 1.37 และ 1.53 ตามลำดับ ซึ่งจากค่าดังกล่าวชี้ให้เห็นว่ามี

ลักษณะการไหลที่ไหลได้ยาก ซึ่งอนุภาคของผงที่เล็กมากๆ อาจเป็นเหตุผลหลักที่ทำให้เกิดการไหลยากในกระบวนการอัดเม็ด โดยทั่วไปอนุภาคของผงผลิตภัณฑ์จะส่งผลต่อการอัดตัว (Compaction) การไหล (Flowability) และการแยกตัว (Segregation) รวมถึงปัจจัยอื่นๆ ด้วย [11]

ตารางที่ 3 สมบัติการไหล (Flow Property) และปริมาณน้ำอิสระ (Water Activity) ของผงผลิตภัณฑ์อัดเม็ดจากข้าวหักไรซ์เบอร์รี่

สูตรที่	Carr Index (%)	Hausner Ratio	สมบัติการไหล	ปริมาณน้ำอิสระ
1	28.46±1.72 ^{bc}	1.40±0.03 ^{bc}	Poor	0.36±0.01 ^a
2	27.45±1.57 ^b	1.38±0.03 ^b	Poor	0.37±0.01 ^{ab}
3	26.88±4.16 ^{ab}	1.37±0.08 ^{ab}	Poor	0.36±0.01 ^a
4	30.85±2.42 ^{cd}	1.45±0.05 ^{cd}	Poor	0.38±0.01 ^{bc}
5	32.10±1.91 ^d	1.47±0.04 ^d	Very poor	0.38±0.01 ^{bc}
6	28.83±2.54 ^{bc}	1.41±0.05 ^{bc}	Poor	0.36±0.03 ^a
7	27.90±1.21 ^{bc}	1.39±0.02 ^b	Poor	0.41±0.01 ^d
8	29.02±1.59 ^{bc}	1.41±0.03 ^{bc}	Poor	0.41±0.01 ^d
9	24.57±0.60 ^a	1.33±0.01 ^a	Passable	0.44±0.01 ^e
10	29.38±0.99 ^{bcd}	1.42±0.02 ^{bcd}	Poor	0.40±0.02 ^c
11	30.65±1.21 ^{cd}	1.44±0.03 ^{cd}	Poor	0.45±0.02 ^e

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในคอลัมน์เดียวกันที่มีตัวอักษรต่างกัน (a-e) หมายถึงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

จากการศึกษาปริมาณน้ำอิสระของผงผลิตภัณฑ์อัดเม็ดจากข้าวหักไรซ์เบอร์รี่ พบว่า อยู่ในช่วง 0.36-0.45 (ตารางที่ 3) ซึ่งมีค่าปริมาณน้ำอิสระน้อยกว่า 0.60 ทำให้ป้องกันการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในระหว่างการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ได้ [12] ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์สามารถเก็บไว้ได้นาน นอกจากนั้นแล้วปริมาณน้ำอิสระในผลิตภัณฑ์เป็นตัวแปรที่สำคัญในการควบคุมและป้องกันการเสื่อมเสียของผลิตภัณฑ์อาหาร อย่างไรก็ตาม ผลิตภัณฑ์อัดเม็ดเป็นการนำวัตถุดิบผงแห้ง เช่น นมผง เวียโปรตีน ผงข้าวหักไรซ์เบอร์รี่ น้ำตาลไอซิ่ง เป็นต้น มาทำการตอกลง ซึ่งผลิตภัณฑ์ผงแห้งมีความไวต่อ

ความชื้นและการดูดความชื้นกลับ (Hygroscopicity) สู่ผลิตภัณฑ์ได้สูง ดังนั้นในการเก็บรักษาสารผลิตภัณฑ์อัดเม็ดจึงควรใส่ในภาชนะบรรจุที่แห้งและปิดสนิท เช่น ในถุงอลูมิเนียมฟอยล์ลามิเนต เป็นต้น เพื่อคงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ในระหว่างการเก็บ

จากการศึกษาพัฒนาสูตรผลิตภัณฑ์อัดเม็ดจากข้าวหักไรซ์เบอร์รี่แสดงดังตารางที่ 1 พบว่าองค์ประกอบในการผลิตผลิตภัณฑ์อัดเม็ดที่ใช้ปริมาณน้ำตาลไอซิ่งในปริมาณที่มากถึงร้อยละ 50 ทำให้ลักษณะปรากฏของผลิตภัณฑ์อัดเม็ดที่ได้มีลักษณะเม็ดกลม สมบูรณ์ แข็งและไม่แตก รวมถึงขอบของเม็ดมีความคมและเงา ทั้งนี้

การใช้น้ำตาลไอซิ่งในปริมาณมากทำให้ส่วนผสมต่างๆ สามารถยึดเกาะกันได้ดีขึ้นส่งผลให้ผลิตภัณฑ์อัดเม็ดที่ได้มีลักษณะเม็ดที่สมบูรณ์ดี [8] แต่การใช้น้ำตาลไอซิ่งที่ระดับร้อยละ 50 เป็นปริมาณที่มากและทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีรสชาติที่หวาน ซึ่งผู้บริโภคอาจไม่ยอมรับ สูตรในการพัฒนาผลิตภัณฑ์อัดเม็ดสูตรที่ 1 ซึ่งมีองค์ประกอบของผงข้าวหักไรซ์เบอร์รี่ปริมาณร้อยละ 78 และน้ำตาลไอซิ่งปริมาณร้อยละ 20 พบว่าไม่สามารถขึ้นรูปอัดเป็นเม็ดได้ โดยผลิตภัณฑ์มีลักษณะร่วนและแตกง่าย จึงไม่สามารถนำไปวิเคราะห์สมบัติของผลิตภัณฑ์อัดเม็ดได้ ซึ่งผลดังกล่าวเนื่องมาจากในสูตรมีปริมาณแป้งจากผงข้าวหักไรซ์เบอร์รี่ในปริมาณที่มาก โดยทั่วไปแป้งส่วนใหญ่จะไม่สามารถนำมาตอกเม็ดได้เนื่องจากปราศจากแรงยึดเกาะกันระหว่างอนุภาค [13] อย่างไรก็ตามเมื่อสูตรในการพัฒนามีปริมาณผงข้าวหักไรซ์เบอร์รี่มากกว่า

ร้อยละ 50 จะไม่สามารถขึ้นรูปอัดเม็ดได้ ดังนั้นสูตรที่สามารถอัดเม็ดได้ คือ สูตรที่ 2-11 จะถูกนำมาวัดความหนา เส้นผ่านศูนย์กลาง และน้ำหนักต่อเม็ดของผลิตภัณฑ์ (ตารางที่ 4) โดยผลิตภัณฑ์อัดเม็ดที่พัฒนาขึ้นมีค่าความหนาอยู่ในช่วง 3.86-4.38 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางมีค่าอยู่ในช่วง 13.07-13.35 มิลลิเมตร และน้ำหนักต่อเม็ดมีค่าอยู่ในช่วง 0.62-0.71 กรัมต่อเม็ด อย่างไรก็ตามในกระบวนการตอกเม็ดจะใช้แป้งดอกที่มีขนาดเท่ากันทุกสูตร แต่พบว่าค่าความหนา เส้นผ่านศูนย์กลาง และน้ำหนักต่อเม็ดของผลิตภัณฑ์มีค่าแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากสมบัติการไหลของผงผลิตภัณฑ์เริ่มต้นในการตอกเม็ดที่มีการไหลได้น้อย ส่งผลต่อปริมาณผงที่ไหลลงสู่เบ้าตอกรวมถึงมีผงบางส่วนที่ต้องตอกเม็ดมีการค้างในเบ้าตอก

ตารางที่ 4 ความหนา เส้นผ่านศูนย์กลาง และน้ำหนักต่อเม็ดของผลิตภัณฑ์อัดเม็ดจากข้าวหักไรซ์เบอร์รี่

สูตรที่	ความหนา (มิลลิเมตร)	เส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	น้ำหนักต่อเม็ด (กรัม)
1	ND	ND	ND
2	4.29 ± 0.05^{cd}	13.19 ± 0.01^c	0.70 ± 0.04^{bc}
3	4.22 ± 0.13^c	13.22 ± 0.02^d	0.67 ± 0.07^b
4	4.25 ± 0.17^c	13.07 ± 0.03^a	0.71 ± 0.07^c
5	4.38 ± 0.07^{cd}	13.35 ± 0.05^f	0.69 ± 0.03^{bc}
6	4.29 ± 0.13^{cd}	13.31 ± 0.04^e	0.67 ± 0.05^b
7	4.05 ± 0.08^b	13.30 ± 0.02^e	0.66 ± 0.02^b
8	3.86 ± 0.17^a	13.31 ± 0.03^e	0.62 ± 0.03^a
9	4.32 ± 0.05^{cd}	13.33 ± 0.03^{ef}	0.69 ± 0.01^{bc}
10	4.31 ± 0.12^{cd}	13.34 ± 0.03^f	0.66 ± 0.01^b
11	3.99 ± 0.04^b	13.15 ± 0.04^b	0.67 ± 0.01^{bc}

หมายเหตุ ND คือผลิตภัณฑ์ไม่สมบูรณ์ไม่สามารถตรวจวัดได้; ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในคอลัมน์เดียวกันที่มีตัวอักษรต่างกัน (a-f) หมายถึงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

จากตารางที่ 5 แสดงค่าสี L^* , a^* และ b^* ของผลิตภัณฑ์อัดเม็ดจากข้าวหักไรซ์เบอร์รี่ โดยค่า L^* หมายถึง ค่าความสว่าง (0 สีดำ, 100 สีขาว) a^* หมายถึง + ค่าสีแดง, - ค่าสีเขียว และ b^* หมายถึง + ค่าสีเหลือง

, - สีน้ำเงิน โดยพบว่าค่าสีของผลิตภัณฑ์อัดเม็ดทั้ง 10 สูตร มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ผลิตภัณฑ์สูตรที่ 2, 3, 4 และ 5 พบว่าเมื่อปริมาณผงข้าวหักไรซ์เบอร์รี่มีค่าเพิ่มขึ้น (ร้อยละ 10 ถึง

ร้อยละ 40) ปริมาณของผงเวย์โปรตีนลดลง (จากร้อยละ 38 เป็นร้อยละ 8) และปริมาณน้ำตาลไอซิ่งที่ร้อยละ 50 เท่ากันทั้ง 4 สูตร พบว่าผลิตภัณฑ์จะมีค่าสี L^* และ b^* ลดลง ส่วนค่าสี a^* มีค่าเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับค่าสีของผลิตภัณฑ์สูตร 8 และ 10 เมื่อปริมาณผงข้าวหักไรซ์เบอร์รี่เพิ่มขึ้น (เปลี่ยนจากเดิมผงเวย์โปรตีนเป็นนมผง) เมื่อพิจารณาผลิตภัณฑ์สูตรที่ 4 และ 6 ซึ่งมีปริมาณผงข้าวหักไรซ์เบอร์รี่และปริมาณเวย์โปรตีนเท่ากัน (ร้อยละ 30 และ ร้อยละ 18 ตามลำดับ) แต่ปริมาณน้ำตาลไอซิ่งในสูตรที่ 4 มีปริมาณร้อยละ 50 ส่วนผลิตภัณฑ์สูตรที่ 6 มีปริมาณน้ำตาลไอซิ่งร้อยละ 30 และมอลโตเด็คทรีน ซึ่งเป็นสารเพิ่มปริมาณอีกร้อยละ 20 พบว่าค่าสี L^* a^* และ b^* ของผลิตภัณฑ์มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) นอกจากนั้น การเติมผงสตรอเบอร์รี่แทนสารเพิ่มปริมาณมีผลทำให้ค่าสี L^* และ b^* ของผลิตภัณฑ์มีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าสี a^* ของผลิตภัณฑ์มีค่าลดลง (ผลิตภัณฑ์สูตรที่ 8-11) ดังนั้นจะเห็นได้ว่าค่าสีของผลิตภัณฑ์อัดเม็ดขึ้นอยู่กับองค์ประกอบที่เป็นส่วนผสมของผลิตภัณฑ์และปริมาณที่เติมในกระบวนการผลิต

จากการทดสอบค่าความแข็งของผลิตภัณฑ์อัดเม็ดจากข้าวหักไรซ์เบอร์รี่ พบว่าสูตรที่ 2- 5 ปริมาณของผงข้าวหักไรซ์เบอร์รี่เพิ่มขึ้น (ร้อยละ 10 ถึง ร้อยละ 40) ส่งผลให้ความแข็งของผลิตภัณฑ์ลดลง (ตารางที่ 5) โดยเมื่อใช้ปริมาณผงข้าวหักไรซ์เบอร์รี่ในสูตรมากถึงร้อยละ 40 ลักษณะของผลิตภัณฑ์จะไม่ค่อยแข็ง ซึ่งจากการทดสอบค่าความแข็งก็บ่งบอกได้ว่ามีค่าน้อย มีค่าความแข็งเพียง 12.49 นิวตัน เท่านั้น เมื่อเทียบกับสูตรอื่นที่ศึกษา เนื่องจากปริมาณแป้งจากผงข้าวหักไรซ์เบอร์รี่มีปริมาณที่มากทำให้อนุภาคของส่วนผสมยึดเกาะกันไม่ได้ดี โดยองค์ประกอบหลักของสูตรดังกล่าวคือ ผงข้าวหักไรซ์เบอร์รี่ปริมาณร้อยละ 40 เวย์โปรตีนปริมาณร้อยละ 8 และน้ำตาลไอซิ่งปริมาณร้อยละ 50 ผลิตภัณฑ์สูตรที่ 4 และ 6 มีองค์ประกอบที่มีปริมาณเท่ากันคือผงข้าวหักไรซ์เบอร์รี่ที่ปริมาณร้อยละ 30 แต่ปริมาณน้ำตาลไอซิ่งและมอลโตเด็คทรีนแตกต่างกัน โดยพบว่าผลิตภัณฑ์

อัดเม็ดสูตรที่ 6 ที่มีปริมาณน้ำตาลไอซิ่งลดลงเมื่อเทียบกับสูตรที่ 4 และมีการเติมมอลโตเด็คทรีนเพิ่มเข้ามา ทำให้ผลิตภัณฑ์มีค่าความแข็งเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 5 ค่าสี (L^* , a^* , b^*) และค่าความแข็ง(Hardness) ของผลิตภัณฑ์อัดเม็ดจากข้าวหักไรซ์เบอร์รี่

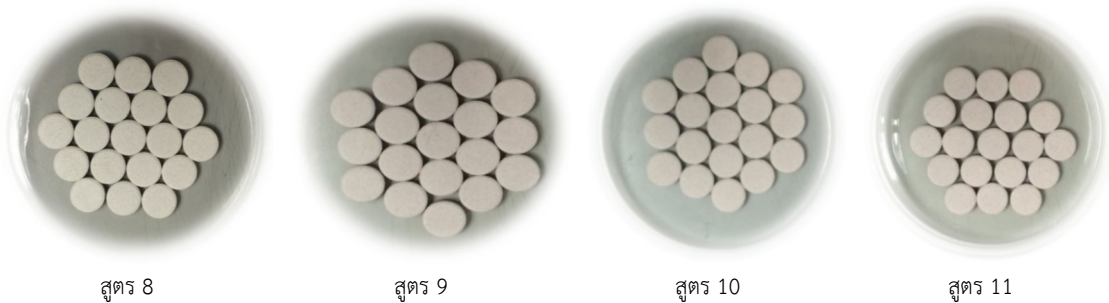
สูตร ที่	สี			ความแข็ง (นิวตัน)
	L^*	a^*	b^*	
1	ND	ND	ND	ND
2	82.31 ± 0.13 ^h	4.92 ± 0.01 ^a	1.29 ± 0.01 ^h	64.68 ± 7.24 ^e
3	80.14 ± 0.04 ^f	5.22 ± 0.01 ^b	0.12 ± 0.01 ^f	39.61 ± 2.94 ^d
4	77.27 ± 0.05 ^d	5.79 ± 0.01 ^e	-1.18 ± 0.01 ^b	24.77 ± 2.41 ^b
5	73.28 ± 0.10 ^a	6.81 ± 0.04 ^g	-1.44 ± 0.02 ^a	12.49 ± 2.29 ^a
6	74.76 ± 0.01 ^c	6.60 ± 0.01 ^f	-0.87 ± 0.01 ^d	29.18 ± 1.29 ^c
7	73.88 ± 0.21 ^b	8.03 ± 0.05 ^h	-0.95 ± 0.07 ^c	24.76 ± 2.49 ^b
8	74.85 ± 0.04 ^c	6.84 ± 0.01 ^g	-1.24 ± 0.01 ^b	101.31 ± 13.03 ^f
9	82.07 ± 0.23 ^g	5.39 ± 0.01 ^d	0.61 ±0.05 ^g	69.12 ± 6.95 ^e
10	73.78 ± 0.07 ^b	8.61 ± 0.04 ⁱ	-0.66 ± 0.03 ^e	16.36 ± 1.70 ^a
11	78.52 ± 0.12 ^e	5.33 ± 0.01 ^c	4.15 ± 0.08 ⁱ	26.04 ± 1.80 ^{bc}

หมายเหตุ ND คือผลิตภัณฑ์ไม่สมบูรณ์ไม่สามารถตรวจวัดได้; ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในคอลัมน์เดียวกันที่มีตัวอักษรต่างกัน (a-i) หมายถึงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ผลิตภัณฑ์สูตรที่ 8-11 ซึ่งมีองค์ประกอบหลักคือ ผงข้าวหักไรซ์เบอร์รี่ นมผง และน้ำตาลไอซิ่ง โดยพบว่าเมื่อปริมาณผงข้าวหักไรซ์เบอร์รี่เพิ่มขึ้น ผลิตภัณฑ์อัดเม็ดที่ได้มีค่าความแข็งลดลง จากการศึกษาพบว่าผลิตภัณฑ์สูตรที่ 8 มีค่าความแข็งสูงสุด คือเท่ากับ

101.31 นิวตัน เมื่อเปรียบเทียบกับสูตรอื่น ๆ ซึ่งค่าความแข็งแรงบ่งบอกถึงการอัดเม็ดที่ได้เม็ดที่แข็ง สมบูรณ์ สามารถจะคงรูปร่างไม่แตกหักง่ายในระหว่างการขนส่งหรือเคลื่อนย้ายเมื่อบรรจุในของบรรจุภัณฑ์ แต่เมื่อมีการพัฒนาสูตรโดยการเติมผงผลไม้สตรอเบอร์รี่แทนการเติมมอลโตเด็กตริน พบว่าค่าความแข็งแรงลดลง (สูตรที่ 9 และสูตรที่ 11) สูตรผลิตภัณฑ์อัดเม็ดที่มีปริมาณผงข้าวหักไรซ์เบอร์รี่ร้อยละ 30 สูตรที่ 10 และ 11 พบว่าสูตรที่ 10 มีค่าความแข็งแรงน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรที่ 8-11 ที่มีการเติมผงสตรอเบอร์รี่ (แทนการเติมมอลโตเด็ก

ตริน) ดังนั้นจะเห็นได้ว่าค่าความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์อัดเม็ดขึ้นอยู่กับปริมาณผงข้าวหักไรซ์เบอร์รี่ รวมทั้งองค์ประกอบอื่นๆ ด้วย จากงานวิจัยของ A. Azfar และ M. A. Azhar [14] รายงานว่าความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์อัดเม็ดที่เด็กประถมศึกษาชั้นปีที่ 1 ถึง 6 ชอบคือมีค่าอยู่ในช่วง 29-69 นิวตัน อย่างไรก็ตามค่าความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของการนำไปใช้ เช่น ผลิตภัณฑ์เม็ดกลืน ผลิตภัณฑ์เม็ดคอม หรือผลิตภัณฑ์เม็ดเคี้ยว รวมถึงเพื่อให้ผลิตภัณฑ์อัดเม็ดไม่หักบิ่นในระหว่างกระบวนการผลิตและการขนส่ง



รูปที่ 1 ลักษณะของผลิตภัณฑ์อัดเม็ดจากข้าวหักไรซ์เบอร์รี่ (สูตร 8-11)

ตารางที่ 6 คะแนนความชอบของผู้บริโภคต่อผลิตภัณฑ์อัดเม็ดจากข้าวหักไรซ์เบอร์รี่

คุณลักษณะ	คะแนนความชอบของแต่ละสูตร			
	สูตร 8	สูตร 9	สูตร 10	สูตร 11
ลักษณะปรากฏ ^{ns}	5.52 ± 1.30	5.79 ± 1.35	5.93 ± 1.49	6.00 ± 1.39
สี ^{ns}	5.52 ± 1.30	5.79 ± 1.35	5.93 ± 1.49	6.00 ± 1.39
เนื้อสัมผัส	3.83 ± 1.67 ^a	4.97 ± 1.70 ^b	5.83 ± 1.39 ^c	5.97 ± 1.43 ^c
กลิ่น	3.90 ± 1.93 ^a	4.59 ± 1.84 ^{ab}	5.15 ± 1.57 ^b	5.50 ± 1.26 ^b
รสชาติ	3.86 ± 1.75 ^a	4.49 ± .55 ^a	5.52 ± 1.22 ^b	5.89 ± 1.45 ^b
ความแข็ง	4.00 ± 1.56 ^a	4.38 ± 1.40 ^a	5.76 ± 1.57 ^b	5.79 ± 1.54 ^b
การละลายในปาก ^{ns}	5.21 ± 1.52	5.18 ± 1.83	5.78 ± 1.66	5.93 ± 1.59
ความชอบโดยรวม	4.19 ± 1.73 ^a	5.56 ± 1.55 ^b	6.24 ± 0.97 ^{bc}	6.63 ± 0.82 ^c

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในแถวเดียวกันที่มีตัวอักษรต่างกัน (a-c) หมายถึงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95; ^{ns} หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

จากการพัฒนาผลิตภัณฑ์อัดเม็ดจากข้าวหักไรซ์เบอร์รี่ทั้ง 11 สูตร ซึ่งได้ทำการประเมินความชอบโดยรวมเบื้องต้นจากผู้บริโภค พบว่า ผลิตภัณฑ์สูตรที่ 2-

5 มีรสชาติที่หวานมาก (มีปริมาณน้ำตาลไอซิ่งที่ระดับร้อยละ 50) และผลิตภัณฑ์อัดเม็ดที่ได้มีกลิ่นเฉพาะตัวของเวย์โปรตีน ทำให้ไม่เป็นที่นิยมของผู้บริโภค อย่างไรก็ตาม

ก็ตาม ผลผลิตพันธุ์อัดเม็ดจากข้าวหักไรซ์เบอร์รี่สูตรที่ 8-11 พบว่า จากการประเมินเบื้องต้นมีความชอบโดยรวมจากผู้บริโภคสูงกว่าผลผลิตพันธุ์สูตรที่ 2-7 ดังนั้นผลผลิตพันธุ์สูตรที่ 8-11 (รูปที่ 1) จึงถูกเลือกนำมาทำการทดสอบทางด้านการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส ทั้ง 8 คุณลักษณะ แสดงดังตารางที่ 6 โดยจากการศึกษาพบว่า คุณลักษณะด้านลักษณะปรากฏ สี และการละลายในปากของผลผลิตพันธุ์มีระดับคะแนนความชอบที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) อย่างไรก็ตาม จากการศึกษพบว่าผลผลิตพันธุ์สูตรที่ 10 และ 11 มีระดับคะแนนความชอบด้านเนื้อสัมผัส กลิ่น รส ความแข็ง และความชอบโดยรวมของผลผลิตพันธุ์สูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq 0.05$) เมื่อเทียบกับผลผลิตพันธุ์สูตรที่ 8 และ 9 โดยผลผลิตพันธุ์สูตรที่ 10 มีส่วนผสมของผงข้าวหักไรซ์เบอร์รี่ที่ปริมาณร้อยละ 30 น้ำตาลไอซิ่งที่ปริมาณร้อยละ 30 นมผงที่ปริมาณร้อยละ 18 และมอลโตเด็กตรินที่ปริมาณร้อยละ 20 ส่วนผลผลิตพันธุ์สูตรที่ 11 มีส่วนผสมของผงข้าวหักไรซ์เบอร์รี่ที่ปริมาณร้อยละ 30 น้ำตาลไอซิ่งที่ปริมาณร้อยละ 30 นมผงที่ปริมาณร้อยละ 18 และผงสตรอปเบอร์รี่ที่ปริมาณร้อยละ 20 จากการศึกษาพบว่าองค์ประกอบของผลผลิตพันธุ์สูตรที่ 10 และ 11 มีปริมาณผงข้าวหักไรซ์เบอร์รี่ที่ปริมาณร้อยละ 30 ส่งผลทำให้ผลผลิตพันธุ์ที่ได้มีกลิ่นเฉพาะตัวที่เด่นชัดและมีรสชาติเข้มข้นของผงข้าวหักไรซ์เบอร์รี่ เนื่องจากผงข้าวหักไรซ์เบอร์รี่มีส่วนของจมูกข้าวปน ซึ่งจมูกข้าวมีส่วนของไขมันเป็นองค์ประกอบอยู่ด้วย ดังนั้นนอกจากผลผลิตพันธุ์ที่ได้จะสามารถช่วยเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการได้แล้ว ผลผลิตพันธุ์ดังกล่าวอาจจะเกิดกลิ่นหืนได้ง่ายกว่าการใช้ปริมาณผงข้าวหักไรซ์เบอร์รี่ร้อยละ 10 อย่างไรก็ตาม การเติมผงสตรอปเบอร์รี่ทำให้ผลผลิตพันธุ์ที่ได้มีรสชาติของผลไม้ที่น่าทานขึ้น นอกจากนั้นแล้วพบว่าผลผลิตพันธุ์สูตรที่ 10 และ 11 มีระดับคะแนนความชอบโดยรวมที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$)

4. สรุป

การพัฒนาผลผลิตพันธุ์อัดเม็ดที่ผลิตจากข้าวหักไรซ์เบอร์รี่ พบว่า สูตรที่เหมาะสมคือผลผลิตพันธุ์สูตรที่ 10 และ 11 โดยมีค่าคะแนนความชอบโดยรวมจากการประเมินทางประสาทสัมผัสสูงสุดระดับชอบเล็กน้อยถึงชอบปานกลาง ด้วยคะแนน 6.24 และ 6.63 ตามลำดับ ซึ่งผลผลิตพันธุ์ทั้งสองสูตรมีองค์ประกอบของข้าวหักไรซ์เบอร์รี่ร้อยละ 30 นมผงร้อยละ 18 แมกนีเซียมสเตียเรทที่ร้อยละ 1 และแคปโซซิลร้อยละ 1 ที่เหมือนกัน แตกต่างกันที่ผลผลิตพันธุ์สูตรที่ 10 มีมอลโตเด็กตรินเป็นสารเพิ่มปริมาณอีกร้อยละ 20 ส่วนผลผลิตพันธุ์สูตรที่ 11 มีการเติมผงสตรอปเบอร์รี่ที่ร้อยละ 20 จากการศึกษาพบว่าองค์ประกอบและปริมาณของวัตถุดิบในการตอกเม็ดผลผลิตพันธุ์ส่งผลต่อสมบัติการไหล ความแข็ง ความหนา เส้นผ่านศูนย์กลาง น้ำหนัก สี และลักษณะทางประสาทสัมผัสของผลผลิตพันธุ์อัดเม็ด การเพิ่มปริมาณผงข้าวหักไรซ์เบอร์รี่ทำให้ผลผลิตพันธุ์มีสมบัติการไหลที่ไหลได้ยาก การปิดอัดและการยึดเกาะของอนุภาคของส่วนผสมภายในเม็ดเกิดขึ้นได้น้อยในระหว่างการตอกเม็ด และการเติมผงสตรอปเบอร์รี่ส่งผลต่อสีของผลผลิตพันธุ์ โดยทำให้ค่า L^* และ b^* เพิ่มขึ้น ส่วนค่า a^* ลดลง งานวิจัยนี้มีประโยชน์ต่อเกษตรกรผู้ปลูกข้าวไรซ์เบอร์รี่ และยังสามารถเป็นแนวทางในการพัฒนาผลผลิตจากข้าวหักได้อีกต่อไป นอกจากนี้ยังเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับข้าวหักและสร้างผลผลิตพันธุ์ที่มีคุณค่าทางโภชนาการ ที่ส่งผลดีต่อสุขภาพผู้บริโภค

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยในครั้งนี้ ขอขอบคุณศูนย์ส่งเสริมอุตสาหกรรมภาคที่ 6 กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม อำเภอสูงเนิน จังหวัดนครราชสีมา ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือในการตอกเม็ดและเครื่องผสมในการทำวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Thai Rice Exporters Association. (2020, May 26). *History of rice in the world*. [Online]. Available: http://www.thairiceexporters.or.th/rice_profile.htm
- [2] Rice Science Center and Rice Gene Discovery. (2020, May 26). *Riceberry*. [Online]. Available: <http://dna.kps.ku.ac.th/index.php/news-articles-rice-rsc-rgdu-knowledge/rice-breeding-lab/riceberry-variety>
- [3] V. Luang-In, M. Yotchaisarn, I. Somboonwatthanakul and S. Deeseenthum, "Bioactivities of organic riceberry broken rice and crude riceberry rice oil," *Thai Journal of Pharmaceutical Sciences*, vol. 42, no. 3, pp. 161-168, 2018.
- [4] A. Halee, N. Navech and S. Voraaroon, "Development of broken rice berry jelly fortified with *Stevia rebaudiana* Bertoni," *The Science Journal of Phetchaburi Rajabhat University*, vol. 14, no. 2, pp. 29-37, 2018.
- [5] M. Natvaratat, "Development of supplementary protein milk tablet for rural school children," Ph.D. dissertation, Dept. Product Development, Kasetsart Univ., Bangkok, Thailand, 2007.
- [6] C. Yackinous, C. Wee and J. X. Guinard, "Internal preference mapping of hedonic ratings for ranch salad dressings varying in fat and garlic flavor," *Food quality and preference*, vol. 10, no. 4-5, pp. 401-409, 1999.
- [7] M. Saifullah, Y. A. Yusof, N. L. Chin, M. G. Aziz, M. A. P. Mohammed and N. A. Aziz, "Tableting and dissolution characteristics of mixed fruit powder," *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, vol. 2, pp. 18-25, 2014.
- [8] W. Yuenyongputtakal and K. Limroongreungrat, "Formulation development of longan tablet product," *Agricultural Science Journal*, vol. 43, no. 2 (Suppl.), pp. 353-356, 2012.
- [9] C. Somalee and A. Thummasri, "Formula and consumer acceptance of fish cracker product from low-value fish," *Journal of Fisheries Technology Research*, vol. 9, no. 1, pp. 96-104, 2015.
- [10] T. Intarasuk, S. Satthapongsakul, W. Sila-on, P. Sritananuwat, T. Kumlung and U. Puapermpoonsiri, "Development of mushroom tablets from *Lentinus edodes*, *Pleurotus ostreatus* and *Pleurotus pulmonarius*," *Isan Journal of Pharmaceutical Sciences*, vol. 11 (Suppl.), pp. 14-24, 2016.
- [11] L. P. Zea, Y. A. Yusof, M. G. Aziz, C. N. Ling and N. A. M. Amin, "Compressibility and dissolution characteristics of mixed fruit tablets made from guava and pitaya fruit powders," *Powder technology*, vol. 247, pp. 112-119, 2013.
- [12] N. Samsalee and R. Sothornvit, "Native and modified porcine plasma protein as wall materials for microencapsulation of natural essential oils," *International Journal of*

- Food Science & Technology*, vol. 54, no. 9, pp. 2745-2753, 2019.
- [13] N. Bunnag, K. Jangchud and A. Jangchud, "Development of red kidney bean tablet for children and adolescents," in *Proceedings of 41th Kasetsart University Annual Conference: Agro-Industry*, Kasetsart University, Thailand, 2003, pp. 1-10.
- [14] A. Azfar and M. A. Azhar, "Development and evaluation of goat milk tablet using dry granulation techniques for nutraceutical purposes," *International Journal of Engineering Technology and Sciences*, vol. 7, no. 1, pp. 1-7, 2017.

<http://journal.rmutp.ac.th/>

ลักษณะวัสดุผสมซีเมนต์เพสต์กับเส้นใยผลตาลโตนดใส่ท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวชนิดสั้นผ่านการปรับปรุงผิวภายนอกด้วยกระบวนการชุบผิวโดยไม่ใช้ไฟฟ้า

สุชาติ จันทรมณีย์^{1*} นันทชัย ชูศิลป์¹ ชาตรี หอมเขียว^{1, 2} และ ดนุพล ตันนโยภาส³

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

² หน่วยวิจัยเทคโนโลยีการแปรรูปวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

³ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

^{1, 2} 1 ถนนราชดำเนินนอก ตำบลบ่อยาง อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา 90000

³ 15 ถนนกาญจนวนิชย์ ตำบลคอหงส์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90110

รับบทความ 6 กรกฎาคม 2563 แก้ไขบทความ 15 พฤศจิกายน 2563 ตอรับบทความ 25 ธันวาคม 2563

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาวัสดุผสมซีเมนต์เพสต์จากเส้นใยผลตาลโตนดและท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวชนิดสั้นผ่านการปรับปรุงผิวภายนอกด้วยกระบวนการชุบผิวโดยไม่ใช้ไฟฟ้า ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เส้นใยผลตาลโตนดบดละเอียด 270 เมช และท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวชนิดสั้น ออกแบบการทดลอง 3 ระดับ คือ ไม่บ่ม บ่มในน้ำกลั่น 28 วัน และ 56 วัน แล้ววิเคราะห์สมบัติทางเคมี กลายภาพ ทางกล วัฏภาคแร่ โครงสร้างจุลภาค และวิเคราะห์ทางสถิติของวัสดุผสมซีเมนต์เพสต์ พบว่า องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยผลตาลโตนดมีปริมาณซิลิกอนออกไซด์ อะลูมิเนียมออกไซด์ และเฟอร์ริกออกไซด์ ร้อยละ 51.53 อยู่ในชนิด C สำหรับค่าความหนาแน่นรวมบ่มน้ำกลั่น 56 วัน ระหว่าง PFA10 (C) กับ PFA5AgSWNT0.01 (G) มีค่าความหนาแน่นรวมเพิ่มขึ้นร้อยละ 38 ค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของวัสดุผสมซีเมนต์เพสต์บ่มน้ำกลั่น 56 วัน ของ PFA5OSWNT0.03 (F) มีค่าสูงสุดเท่ากับ 1.14 ± 0.31 เมกกะโอห์มมิลลิเมตร ค่าความแข็งแรงอัดวัสดุผสมซีเมนต์เพสต์ PFA5AgSWNT0.01 (G) ที่บ่มน้ำกลั่น 28 วัน มีค่าความแข็งแรงอัดสูงสุดเฉลี่ย 25.45 ± 2.00 เมกกะปาสคาล มากกว่าตัวอย่างควบคุมร้อยละ 5 และการวิเคราะห์ทางสถิติค่าความหนาแน่นรวมระหว่าง PFA10 (C) กับ PFA5AgSWNT0.01 (G) ที่ระยะเวลาการบ่มต่าง ๆ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 นอกจากนี้ วัสดุซีเมนต์ผสมพบวัฏภาคแร่แคลไซต์ พอร์ตแลนด์ต์ ควอตซ์ โดโลไมต์ และเอิร์ทรินไกต์ ทำให้ความแข็งแรงอัดเพิ่มขึ้นและโครงสร้างจุลภาคของวัสดุซีเมนต์ผสมพบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต พอร์ตแลนด์ต์ และเอิร์ทรินไกต์ ดังนั้น เส้นใยผลตาลโตนดสามารถนำไปทำวัสดุ پوشโซลานของวัสดุซีเมนต์ผสมสำหรับงานซีเมนต์มวลเบาได้

คำสำคัญ : ท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวชนิดสั้น; วัสดุผสมซีเมนต์; เส้นใยผลตาลโตนด; การชุบผิวโดยไม่ใช้ไฟฟ้า

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +668 4632 0709, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: suchart.c@rmutsv.ac.th

<http://journal.rmutp.ac.th/>

Characterization of Cement Paste Composites Blended with Palmyra Fiber Ash and Surface-treated on Short SWNT Prepared by an Electroless Plating Process

Suchart Chantaramanee^{1*} Nuntachai Chusilp¹ Chatree Homkhiew^{1, 2} and Danupon Tonnayopas³

¹ Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya

² Materials Processing Technology Research Unit, Rajamangala University of Technology Srivijaya

³ Faculty of Engineering, Prince of Songkla University

^{1, 2} 1 Ratchadamnoennok Rd. Boyang Sub-district, Muang District, Songkhla 90000

³ 15 Karnjanavanich Rd., Hat Yai, Songkhla 90112

Received 6 July 2020; Revised 15 November 2020; Accepted 25 December 2020

Abstract

This research was resulted of the characterization of cement paste composites (CPC) blended with palmyra fiber ash and surface-treated on short SWNT prepared by an electroless plating process. The cement paste composites included cement, 270 meshes of palmyra fiber ash and short SWNT. The design of experiment was divided into 3 conditions namely uncuring, 28 and 56 days in distilled water. The properties of CPC were carried out in chemical composition, physical, mechanical, mineral phase, microstructure and statistical analysis. It was found that in the chemical compositions an amount of silicon dioxide, aluminium oxide and ferric oxide were 51.53%, which was rated in class C. The bulk densities of CPC series between PFA10 (C) and PFA5AgSWNT0.01 (G) cured 56-day distilled water were an increased 38%. Then, the highest specific electrical resistivity of CPC series PFA5OSWNT0.03 (F) cured 56-day distilled water was 1.14 ± 0.31 mega-ohm.mm. The highest compressive strength of CPC series PFA5AgSWNT0.01 (G) cured at 28-day distilled water was 25.45 ± 2.00 MPa compared with the OPC (A) was an increased 5%. Which, the bulk densities of CPC series between PFA10 (C) and PFA5AgSWNT0.01 (G) were statistical analyzed the mostly cured at significant difference, $\alpha = 0.05$. In addition, CPC series PFA5AgSWNT0.01 (G) mainly contained calcite, portlandite, quartz dolomite and ettringite were caused increasing compressive strength. And the SEM microphotograph were also displayed the calcium silicate hydrate, portlandite and ettringite. Consequently, the PFA was used to ability pozzolanic material using for lightweight concrete of CPC.

Keywords : Short SWNT; Cement Paste Composites; Palmyra Fiber Ash; Electroless Plating

* Corresponding Author. Tel.: +668 4632 0709, E-mail Address: suchart.c@rmutsv.ac.th

1. บทนำ

ปูนซีเมนต์ (Cement) ได้ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมก่อสร้างจนถึงปัจจุบัน ซึ่งประเทศไทยได้ผลิตปูนซีเมนต์เพื่อการส่งออกและใช้ภายในประเทศมีรายงานการผลิตปูนซีเมนต์โดยรวมในเดือนมกราคม ปีพุทธศักราช 2563 จำนวน 6.76 ล้านตัน ซึ่งได้มีการผลิตเพิ่มขึ้นจากเดือนเดียวกันในปีที่ผ่านมาร้อยละ 1.21 [1] ซึ่งการผลิตและการจำหน่ายปูนซีเมนต์นั้นคาดว่าจะขยายตัวเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในปีถัดไป [2] ผลจากความต้องการใช้ปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นจึงจำเป็นต้องหาแหล่งวัตถุดิบที่เพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งทราบว่าปูนซีเมนต์มีส่วนผสมของออกไซด์ต่าง ๆ ประกอบด้วย แคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide, CaO) ซิลิคอนไดออกไซด์ (Silicon Dioxide, SiO₂) อะลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminium Oxide, Al₂O₃) และ เฟอริกออกไซด์ (Ferric Oxide, Fe₂O₃) [3] จากการค้นคว้าข้อมูลงานวิจัยเราสามารถนำเอาจากการเผาเศษเหลือทิ้งจากผลิตผลทางการเกษตรใช้แทนปูนซีเมนต์ได้ เช่น เถ้าขานอ้อย [4] เถ้าลอย [4], [5] เถ้าแกลบขาว [6], [7] เถ้าปาล์มน้ำมัน [8] และได้นำเอาเส้นใยผลตาลโดนด (Palmyra Fiber Ash, PFA) มาใช้ในงานวิจัยนี้ โดยข้อมูลในปีพุทธศักราช 2560 ประเทศไทยมีเนื้อที่ปลูกตาลโดนดใน 7 จังหวัด รวมทั้งหมด 10,417 ไร่ ได้ผลผลิต 4,469 ตัน และผลผลิตต่อไร่เท่ากับ 668 กิโลกรัม ในจังหวัดสงขลามีสวนที่ปลูกมากที่สุด 8,246 ไร่ รองลงมาเป็นจังหวัดเพชรบุรี 1,214 ไร่ [9] มีส่วนผสมของออกไซด์หลักเช่นเดียวกับปูนซีเมนต์ ซึ่งเป็นของเหลือใช้จากภาคการเกษตรเพื่อลดการทำลายสิ่งแวดล้อมจากการผลิตปูนซีเมนต์ การเกิดมลภาวะจากเถ้า และสามารถนำของเหลือใช้มาสร้างมูลค่าเพิ่มด้วยการนำมาปรับปรุงสมบัติต่าง ๆ ของซีเมนต์เพสต์ที่ต้องการความแข็งแรงอัด (Compressive Strength) สูง มีน้ำหนักเบา และนำไฟฟ้าที่ดี จึงได้มีแนวความคิดที่จะลดต้นทุนในการผลิตคอนกรีตมวลรวม และเพิ่ม

สมบัติดังกล่าวที่ยังด้อยอยู่ โดยมีผลงานวิจัยก่อนหน้านี้ประเด็นเหล่านี้ เช่น W. Saiwarin, C. Napia และ T. Sinsiri [10] ศึกษาสมบัติของกากก้อนหล่อแข็งตะกอนโรงชุบโลหะเดิมเถ้าขานอ้อยโดยใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก และเดิมกากตะกอนโลหะร้อยละ 0, 10, 30 และ 50 โดยน้ำหนัก ของวัสดุประสาน พบว่า ความแข็งแรงอัดมีค่าลดลงเมื่อเติมกากตะกอนโลหะหนักร้อยละ 10, 30 และ 50 โดยน้ำหนัก ในขณะที่ก้อนหล่อแข็งที่นำแทนที่ปูนซีเมนต์เดิมเถ้าขานอ้อยร้อยละ 20 มีค่าความแข็งแรงอัดมากกว่าร้อยละ 10 และ 30 ต่อมา W. Kroehong และคณะ [11] ศึกษาสมบัติทางกล โครงสร้างจุลภาค และการนำความร้อน ของคอนกรีตบล็อกผสมเถ้าลอยในปริมาณร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก และใช้อัตราส่วนน้ำเท่ากับ 0.70, 0.80 และ 0.90 ต่อวัสดุประสาน พบว่า คอนกรีตบล็อกผสมเถ้าลอยร้อยละ 30 มีความแข็งแรงอัดต่ำ การดูดซึมน้ำ (Water Absorption, D) และความพรุนมีค่าเพิ่มขึ้นแต่ค่าการนำความร้อนมีค่าต่ำเมื่อผสมเถ้าลอยเพิ่มขึ้นเปรียบเทียบกับคอนกรีตบล็อกควบคุม และต่อมา P. Kejaroen และ S. Sethabouppha [12] ศึกษาความเหมาะสมการเติมเถ้าปาล์มเป็นส่วนผสมในคอนกรีต พบว่า ความหนาแน่น ความแข็งแรงอัด การดูดซึมน้ำ การนำความร้อนมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 766 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร 90 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และ 0.194 วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน ตามลำดับ สมบัติต่าง ๆ อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานสามารถประยุกต์นำไปใช้งานได้

นอกจากนี้ได้มีการปรับปรุงสมบัติของซีเมนต์เพสต์ โดยเติมตัวเสริมแรง (Reinforcement) เช่น ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon Nanotubes) [13], [7] ซึ่งเป็นวัสดุหนึ่งที่โดดเด่นมากด้านความแข็งแรงและมีน้ำหนักเบา แต่ด้วยคุณลักษณะผิวของท่อนาโนคาร์บอนมีปฏิกิริยาทางเคมีต่ำ (Low Chemical Reactivity) กับเนื้อพื้น (Matrix) ของวัสดุ [14] จึงต้องปรับปรุงผิวให้มี

การเปลี่ยนแปลงทางเคมีก่อนโดยการนำสารละลายและอะตอมของโลหะทำปฏิกิริยากับผิวท่อนาโนคาร์บอน ดังเช่น Y. Hu และคณะ [15] ศึกษาความแข็งแรงอัดและกำลังตัดโดยเติมท่อนาโนคาร์บอนชนิด MWCNTs และ MWCNTs-COOH ผสมลงในซีเมนต์ปริมาณร้อยละ 0 ถึง 0.1 โดยน้ำหนัก พบว่า กำลังตัดมีค่าเพิ่มขึ้นและความแข็งแรงอัดเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้นเมื่อเติม MWCNTs สำหรับโครงสร้างจุลภาค สังเกตเห็นรูพรุนในโครงสร้างมีขนาดลดลงอยู่ระหว่าง 25 ไมครอน ถึง 50 ไมครอน เมื่อเติมด้วยท่อนาโนคาร์บอนทั้ง MWCNTs และ MWCNTs-COOH นอกจากนี้ สมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์เพสต์ที่เติมท่อนาโนคาร์บอนชนิด MWCNTs ในช่วงร้อยละ 0 ถึง 0.2 โดยน้ำหนัก พบว่า เมื่อเติมท่อนาโนคาร์บอนร้อยละ 0.1 บ่มที่ 7 วัน และ 28 วัน ค่าความแข็งแรงอัดเพิ่มขึ้นร้อยละ 22 และ 15 ตามลำดับ ต่อมา M. Elkashef, K. Wang และ M. N. Abou-Zeid [16] ได้ปรับปรุงผิวท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นด้วยสารละลายของกรดไนตริกและกรดซัลฟิวริกเป็นเวลา 100 นาที และ 180 นาที พบว่า ผิวของท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นมีนัยสำคัญต่อการปรับปรุงค่าความแข็งแรงอัดเพิ่มขึ้นเมื่อเติมท่อนาโนคาร์บอนที่ปรับปรุงผิวด้วยสารละลายดังกล่าว ในปีถัดมา K. M. Liew, M. F. Kai และ L. W. Zhang [17] ศึกษาการนำท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น MWCNT-OH เติมลงในซีเมนต์ พบว่า ค่าความแข็งแรงอัดและความแข็งแรงต่อการโค้งงอมีค่าร้อยละ 17.3 และ 16.3 ตามลำดับ ต่อมา S. Chantaramanee และคณะ [7] ศึกษาสมบัติของวัสดุผสมซีเมนต์ผลิตจากเถ้าแกลบขาวผสมร่วมกับท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวชนิดสั้น พบว่า ความแข็งแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าแกลบขาวร้อยละ 10 เติมท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวชนิดสั้นร้อยละ 0.20 และบ่ม 28 วัน มีค่าสูงสุด คือ 36.45 เมกกะปาสกาล ต่อมา M. A. Mousavi และ A. Bahari [18] ศึกษาการเติมท่อ

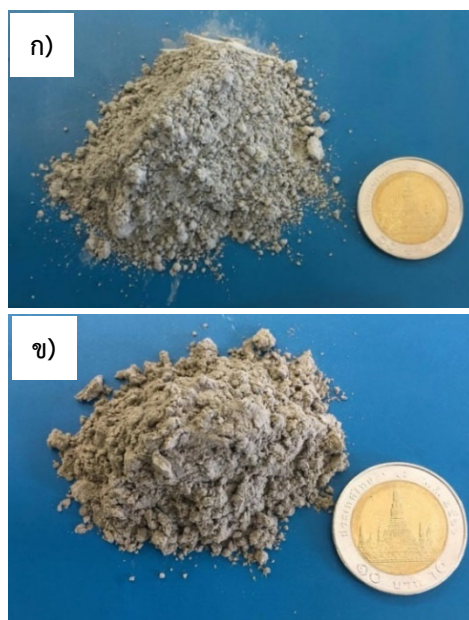
นาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น MWCNT-COOHs ร้อยละ 0, 0.025, 0.05, 0.1 และ 0.2 ลงในปูนซีเมนต์เพสต์วิเคราะห์สมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาค พบว่า การแทนที่ของ MWCNT-COOHs ร้อยละ 0.05 ดีที่สุดสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคมีการปรับปรุงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับซีเมนต์ควบคุม ต่อมา R. Kaur, N. C. Kothiyal และ H. Arora [19] ศึกษาวัสดุซีเมนต์ผสมด้วยท่อนาโนคาร์บอนผ่านการปรับปรุงผิว (Functionalized Carbon Nanotubes, FCNT), แกรฟีนออกไซด์ (Graphene Oxide, GO) และ เถ้าลอย (Fly Ash, FA) ผสมในซีเมนต์ผสมอัตราส่วน 30:70 แล้ววิเคราะห์สมบัติทางกล พบว่า เมื่อเติม GO ร้อยละ 0.02 และ FCNT ร้อยละ 0.02 ความแข็งแรงอัดเพิ่มขึ้นร้อยละ 35.6 และร้อยละ 24.5 ตามลำดับ และยังพบว่าความแข็งแรงดึงแยกเมื่อเติม FCNT, GO และ ไฮบริดท่อนาโนคาร์บอน (Hybrid Carbon Nanomaterials, HCNs) มีค่าร้อยละ 16.0, 53.6 และ 74.0 ตามลำดับทั้งความแข็งแรงอัดและความแข็งแรงดึงแยกสูงสุดที่ตัวอย่าง mHCN-FCNT เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม ดังนั้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการพัฒนาวัสดุผสมซีเมนต์เพสต์จากเถ้าเส้นใยผลตาลโตนดและท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวชนิดสั้นผ่านการปรับปรุงผิวภายนอกด้วยกระบวนการชุบผิวโดยไม่ใช้ไฟฟ้า ซึ่งมีความต้องการนำไปพัฒนาต่อเป็นวัสดุผสมซีเมนต์เพสต์สู่การประยุกต์ใช้ในงานก่อสร้างที่มีความแข็งแรงอัดสูง มีน้ำหนักเบา และสามารถนำไฟฟ้าได้ สิ่งที่สำคัญที่สุดใช้เป็นแนวทางในการเลือกวัสดุใช้แทนที่ซีเมนต์ จากสิ่งเหลือใช้ทางการเกษตรและสามารถช่วยประหยัดพลังงานจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์

2. วิธีการศึกษา

2.1 วัสดุในงานวิจัย

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Ordinary Portland

Cement Type 1, OPC) ตามมาตรฐาน ASTM C150 [20] และมาตรฐานอุตสาหกรรม 15 เล่ม 1-2555 ประเภท 1 [21] ดังแสดงในรูปที่ 1 ก) เป็นปูนซีเมนต์ที่ใช้ทั่วไปที่ไม่ต้องการคุณภาพพิเศษ ถ้าเส้นใยผลตาลโตนดซึ่งเป็นเศษของเหลือใช้จากผลิตผลทางการเกษตรในพื้นที่อำเภอสังขละบุรี จังหวัดสงขลา โดยการเลือกเฉพาะเส้นใยผลตาลโตนดแห้งมาเผาไหม้สมบูรณ์ ได้เส้นใยผลตาลโตนดมีลักษณะเป็นผงละเอียดขนาดสีน้ำตาลอ่อน ซึ่งรวมกันทั้งผงละเอียดและสิ่งเจือปนอื่น ๆ ผสมอยู่ด้วย แล้วนำมาบดลดขนาดด้วยหม้อบดขนาดเล็ก รุ่น Planetary Mono Mill PULVERISETTE 6 Classic Line ปริมาตร 250 มิลลิลิตร เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และนำไปคัดขนาดด้วยตะแกรงร่อนขนาด 270 เมช ได้ผงละเอียดขนาด 53 ไมโครเมตร ดังแสดงในรูปที่ 1 ข) แล้วนำมาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-Ray Fluorescence Spectrometer, XRF) ยี่ห้อ PANalytical รุ่น Zetium ดังแสดงในตารางที่ 1 ท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวชนิดสั้น (Short Single-Walled Carbon Nanotubes, Short SWNT) จัดซื้อจาก Chengdu Organic Chemicals Company Limited, China Academy of Sciences ประเทศสาธารณรัฐประชาชนจีน รหัสผลิตภัณฑ์ SS1240 มีความบริสุทธิ์ของธาตุคาร์บอนมากกว่าร้อยละ 90 มีลักษณะทอกลวงเป็นเส้นโค้งและมัดรวมกัน ความยาวของท่อระหว่าง 0.5 ไมโครเมตร ถึง 2.0 ไมโครเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อระหว่าง 1.0 นาโนเมตร ถึง 2.0 นาโนเมตร มีรายละเอียดข้อมูลจำเพาะวัสดุดังแสดงในตารางที่ 2 เมื่อวิเคราะห์ธาตุด้วยวิธีสเปกโตรเมตรีรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy, EDS) พบว่า ประกอบด้วยธาตุคาร์บอน อะลูมิเนียม คลอรีน โคบอลต์ และซิลเฟอร์ ปริมาณร้อยละ 96.30, 0.08, 0.41, 2.91 และ 2.09 ตามลำดับ [22] และน้ำกลั่น (Distilled Water) ใช้ในการหล่อตัวอย่างวัสดุผสมซีเมนต์เพสต์



รูปที่ 1 ก) ปูนซีเมนต์ ข) เส้นใยผลตาลโตนด

2.2 การปรับปรุงผิวท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวชนิดสั้นโดยไม่ใช้ไฟฟ้า

ท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวชนิดสั้นสภาวะผิวของท่อนาโนคาร์บอนมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่ผิวหน้าของวัสดุจึงจำเป็นต้องนำมาปรับปรุงผิวภายนอกเพื่อให้ผิวสามารถทำปฏิกิริยาดีขึ้นด้วยกระบวนการชุบผิวโดยไม่ใช้ไฟฟ้า (Electroless Plating) มีขั้นตอนดังนี้

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยผลตาลโตนดและปูนซีเมนต์ด้วยวิธี XRF

Chemical Composition	Content, wt%	
	PFA	OPC [23]
ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO ₂)	40.25	21.20
อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al ₂ O ₃)	7.82	1.04
เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe ₂ O ₃)	3.46	5.22
ฟอสฟอรัสไดออกไซด์ (P ₂ O ₅)	5.21	0.00
โพแทสเซียมออกไซด์ (K ₂ O)	19.08	0.42
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	2.89	64.73
แมงกานีสออกไซด์ (MnO)	0.12	0.00
ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO ₂)	1.87	2.44
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	4.27	3.08
น้ำหนักสูญหายหลังเผา (LOI)	6.33	1.45

ตารางที่ 2 ข้อมูลจำเพาะของ Short SWNTs 90s [22]

Specifications	Values
SWNTs Outer Diameter	1.0-2.0 nm
SWNTs Inside Diameter	0.8-1.6 nm
SWNTs Ash	<1.5 wt%
SWNTs Purity	>90 wt%
Additional MWNTs Content	>5 wt%
Amorphous Carbon Content	<3 wt%
SWNTs Length	0.5-2.0 μm
SWNTs Specific Surface Area	407 m^2/g
SWNTs Electrical Conductivity	> 10^{-2} S/cm

เริ่มขั้นตอนแรกโดยการ Pre-treatment ท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวชนิดสั้นที่ผ่านการสังเคราะห์ขึ้นด้วยวิธีการสะสมไอทางเคมีผนังเย็น (Cold Wall Chemical Vapor Deposition, CCVD) มา แ่ ซ ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ความเข้มข้น 2 โมลต่อลิตร โดยกวนที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 ชั่วโมง ล้างทำความสะอาดด้วยน้ำกลั่น ทำการกรองแล้วทำให้แห้งโดยอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะสุญญากาศเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ต่อมาทำการออกซิเดชัน (Oxidation) นำท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวชนิดสั้นที่ผ่านการเตรียมผิวเบื้องต้น Pre-treatment แล้วต้มในสารละลาย HNO_3 และ H_2SO_4 ในอัตราส่วน 3:1 ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ล้างทำความสะอาดด้วยน้ำกลั่น ทำการกรองแล้วปล่อยให้แห้งในบรรยากาศที่อุณหภูมิห้อง ต่อมาทำการ Sensitization นำท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวชนิดสั้นที่ผ่านการออกซิเดชัน แล้วแช่ในสารละลายที่มีความเข้มข้นระหว่าง 0.1M SnCl_2 กับ 0.1M HCl (เป็นเวลา 72 ชั่วโมง ก่อนการนำมาใช้งาน) กวนที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที ล้างทำความสะอาดด้วยน้ำกลั่น ทำการกรองแล้วทำให้แห้งในอากาศที่อุณหภูมิห้อง ต่อมาทำการกระตุ้นผิว (Activation) ของท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวชนิดสั้นที่ผ่านการ Sensitization แล้วแช่ในสารละลายความเข้มข้น

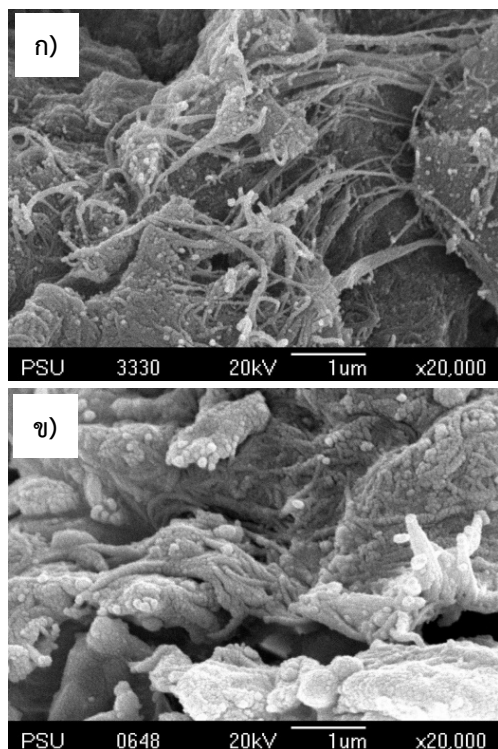
ตารางที่ 3 ส่วนผสมของสารเคมีและสภาวะของการชุบผิวโดยไม่ใช้ไฟฟ้า [14]

Chemical	Concentration
AgNO_3	10.0 kg/m^3
$\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	1.5 (vol%)
HCHO (added later)	3.0 (vol%)
pH : 8.5 $\pm$ 0.5;	
Temperature : 20°C	

ระหว่าง 0.0014M PdCl_2 กับ 0.25M HCl กวนที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที ล้างทำความสะอาดด้วยน้ำกลั่น ทำการกรองแล้วทำให้แห้งในอากาศที่อุณหภูมิห้อง และขั้นตอนสุดท้ายทำการชุบผิวโดยไม่ใช้ไฟฟ้า ดังแสดงในตารางที่ 3

กระบวนการชุบผิวโดยไม่ใช้ไฟฟ้าโดยการนำสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต (AgNO_3) ในปริมาณ 10 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เติมด้วยสารละลายแอมโมเนียไฮดรอกไซด์ ($\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) ปริมาตรร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนัก แล้วนำท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวชนิดสั้นที่ผ่านการกระตุ้นผิวแล้ว เติมลงไปกวนด้วยเครื่องกวนกับแท่งแม่เหล็กกวนสารแล้วเติมสารละลายฟอร์มัลดีไฮด์ (HCHO) ปริมาตรร้อยละ 3.0 โดยน้ำหนัก กวนที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ล้างทำความสะอาดด้วยน้ำกลั่น ทำการกรองทำให้แห้งในอากาศที่อุณหภูมิห้อง สำหรับการกวนด้วยเครื่องกวนกับแท่งแม่เหล็กกวนสารและกรองด้วยแผ่นกรองเมมเบรนชนิดไนลอนขนาด 0.2 ไมโครเมตร ภายใต้สภาวะสุญญากาศ นำวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) รุ่น Model JSM-5800LV แสดงดังในรูปที่ 2 และวิเคราะห์ปริมาณธาตุแบบกระจายพลังงาน (EDS) รูปที่ 2 ก) ท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวชนิดสั้นที่ผ่านการออกซิเดชัน ประกอบด้วยธาตุ C, O, Si, S, Cl, Cr, Fe, Co, Cu และ Zn ซึ่งมีธาตุหลักคือ

C นอกนั้นเป็นธาตุเจือปนของวัสดุฐานจากการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน และรูปที่ 2 ข) ท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวชนิดสั้นผ่านการชุบผิวโดยไม่ใช้ไฟฟ้าได้อนุภาคเงิน AgSWNT ที่ผิวโดยประกอบด้วยธาตุหลักคือ Ag และ C [24]



รูปที่ 2 ลักษณะท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวชนิดสั้น ก) ผ่านการออกซิเดชัน ข) ผ่านการชุบผิวด้วยอนุภาคเงิน

2.3 การเตรียมตัวอย่างและอัตราส่วนผสม

ตัวอย่างในการวิจัยนี้ได้เตรียมจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ผสมเส้นใยผลตาลโดนดในปริมาณ 3 ระดับ คือ ร้อยละ 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ และเติมท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวชนิดสั้น 2 ชนิด คือ ท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวชนิดสั้นที่ผ่านการออกซิเดชันปริมาณร้อยละ 0.01 (OSWNT0.01) และ 0.03 (OSWNT0.03) ตามลำดับ และท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวชนิดสั้นผ่านการชุบ

ผิวด้วยอนุภาคเงินโดยไม่ใช้ไฟฟ้าปริมาณร้อยละ 0.01 (AgSWNT0.01) และ 0.03 (AgSWNT0.03) ตามลำดับ และอัตราส่วนน้ำกลั่นต่อวัสดุประสาน (w/b) 0.40 คงที่ตลอดการวิจัย ซึ่งการกำหนดสัญลักษณ์และอัตราส่วนของตัวอย่าง ดังแสดงในตารางที่ 4 และโดยเฉพาะอย่างยิ่ง ได้เลือกใช้สูตรเส้นใยผลตาลโดนดที่ปริมาณร้อยละ 5 (สูตร E, F, G และ H ใช้ PFA 5%) เนื่องจากปริมาตรของเส้นใยแทนที่ปูนซีเมนต์ปริมาณเพิ่มขึ้น ความพรุนและช่องว่างที่เกิดขึ้นในโครงสร้างจุลภาคของชิ้นตัวอย่าง ส่งผลให้ความหนาแน่นลดลง [7], [11]

ตารางที่ 4 สัญลักษณ์และส่วนผสมของตัวอย่างงานวิจัย

Code	OPC	PFA	SWNT
OPC (A)	100.00	-	-
PFA5 (B)	95.00	5.00	-
PFA10 (C)	90.00	10.00	-
PFA15 (D)	85.00	15.00	-
PFA5OSWNT0.01 (E)	94.99	5.00	0.01
PFA5OSWNT0.03 (F)	94.97	5.00	0.03
PFA5AgSWNT0.01 (G)	94.99	5.00	0.01
PFA5AgSWNT0.03 (H)	94.97	5.00	0.03

ในขั้นตอนการหล่อชิ้นตัวอย่างโดยใช้น้ำหนักวัสดุหลักและน้ำกลั่นตามปริมาณของอัตราส่วนที่กำหนดไว้ ดังแสดงในตารางที่ 4 เริ่มจากการนำน้ำกลั่นเทลงในบีกเกอร์ เติमत่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวชนิดสั้นที่ผ่านการชุบผิวโดยไม่ใช้ไฟฟ้า เติมเส้นใยผลตาลโดนดและเติมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามลำดับ ในขั้นตอนการเติมวัสดุแต่ละชนิดใช้แท่งแก้วคนให้ส่วนผสมกระจายตัวเข้ากันก่อนเบื้องต้นแล้วกวนผสมด้วยคลื่นเหนือเสียงอีกครั้งโดยใช้พลังงานช่วงกว้างของคลื่นร้อยละ 60 เวลาที่ใช้ในการผสมสั้นด้วยคลื่นเหนือเสียงเป็นเวลา 3 นาที ด้วยเครื่องผสมชนิดใช้แท่งกระจายคลื่น (Probe-Type Ultrasonic Processor) ยี่ห้อ Sonics Model VC 750 เพื่อให้ส่วนผสมกระจายตัวละเป็นเนื้อเดียวกันมากที่สุด เมื่อวัสดุผสมซีเมนต์

เรียบร้อยแล้วนำเทใส่ลงในแบบหล่อรูปทรงกระบอกที่ทำด้วยพอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) ขนาดความสูง 32 มิลลิเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร มีอัตราส่วนความสูงต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ($L/D = 2.0$) ตามมาตรฐาน ASTM C39/C39M [25] ซึ่งภายในแบบหล่อทาเคลือบผิวด้วยวาสลีนเพื่อป้องกันการติดกันระหว่างชิ้นตัวอย่างกับแบบหล่อ เมื่อเทลงในแบบหล่อเรียบร้อยห่อหุ้มตัวอย่างด้วยแผ่นพลาสติกชนิดบางที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วถอดตัวอย่างออกจากแบบหล่อ แบ่งกลุ่มตัวอย่างออกเป็น 3 กลุ่ม คือ ตัวอย่างที่ไม่บ่ม บ่มในน้ำกลั่นอุณหภูมิห้องเป็นเวลา 28 วัน และ 56 วัน ได้ใช้ตัวอย่างในการทดสอบสมบัติของวัสดุแต่ละสมบัติเป็นจำนวน 5 ตัวอย่าง (จำนวน 4 ซ้ำ) มีชิ้นตัวอย่างกลุ่มละ 40 ตัวอย่าง โดยรวมตัวอย่างจำนวนทั้งหมด 120 ตัวอย่าง และเมื่อครบเวลากำหนด นำตัวอย่างดังกล่าววิเคราะห์สมบัติทางเคมี ภายภาพทางกล ทั้งแบบไม่ทำลายและทำลายตามที่จัดเตรียมไว้ในวิธีการทดลอง

2.4 วิธีการทดลอง

ตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่าง แก๊สไลน์ผลตาลโตนดด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ สำหรับตัวอย่างที่ไม่บ่ม ที่บ่มน้ำกลั่นครบกำหนด 28 วัน และ 56 วัน ทดสอบสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ความหนาแน่นรวม (Bulk Density, ρ) และการดูดซึมน้ำตามมาตรฐาน ASTM C642 [26] ทดสอบความเร็วคลื่นเหนือเสียง (Ultrasonic Pulse Velocity, UPV) เพื่อวัดความสมบูรณ์หรือความต่อเนื่องของวัสดุ ใช้ตรวจสอบจุดบกพร่อง เช่น ช่องว่าง รูพรุน หรือความเสียหายภายในชิ้นตัวอย่าง โดยวัดจากความเร็วของคลื่นเหนือเสียงระหว่างหัวส่งสัญญาณและหัวรับสัญญาณ เป็นการทดสอบแบบไม่ทำลาย สามารถนำใช้งานในการตรวจสอบชิ้นงานที่ต้องการความแข็งแรงอัดสูง ทดสอบด้วยเครื่อง Proceq Pundit Lab+UPV Instrument Model:CT-133 ตามมาตรฐาน ASTM C597 [27]

ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (Specific Electrical Resistivity, $\rho_{\text{จำเพาะ}}$) สำหรับสมบัติทางกล ได้แก่ ความแข็งแรงอัด (Compressive Strength, σ_c) ตามมาตรฐาน ASTM C39/C39M [25] และความแข็งแรงดึงแยกโดยวิธีผ่าซีก (Splitting Tensile Strength, σ_T) ตามมาตรฐาน ASTM C496 [28] โดยสรุปเปรียบเทียบผลสมบัติต่าง ๆ ของทุกสูตรที่ทำการวิจัยดังแสดงในตารางที่ 5 และนำผลการทดลองจากจำนวน 5 ตัวอย่างต่อสูตรที่สนใจวิเคราะห์ทางสถิติด้วย Two-sample t-test ว่ามีนัยสำคัญต่อสมบัติที่ศึกษาของวัสดุผสมซีเมนต์หรือไม่ นอกจากนี้ นำวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และวิเคราะห์วัฏภาคแร่ (Mineral Phases) ที่เกิดขึ้นในตัวอย่างมีความแข็งแรงอัดสูงสุดด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction, XRD)

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน

ผลการตรวจองค์ประกอบทางเคมีของแก๊สไลน์ผลตาลโตนดของอำเภอสทิงพระ จังหวัดสงขลาด้วยวิธีการร้าวแสงรังสีเอกซ์ (XRF) แบบกึ่งปริมาณ ดังแสดงในตารางที่ 1 พบว่า มีปริมาณของซิลิคอนไดออกไซด์ร้อยละ 40.25 อะลูมิเนียมออกไซด์ร้อยละ 7.82 และเฟอร์ริกออกไซด์ร้อยละ 3.46 รวมกันเท่ากับร้อยละ 51.53 โดยน้ำหนัก น้ำหนักสูญหายหลังเผาร้อยละ 6.33 ซึ่งมีผลรวมของซิลิคอนไดออกไซด์ อะลูมิเนียมออกไซด์ และเฟอร์ริกออกไซด์ รวมกันมีค่ามากกว่าร้อยละ 50 ตามที่กำหนดในมาตรฐาน ASTM C618 [29] ดังนั้น แก๊สไลน์ผลตาลโตนดที่นำมาใช้แทนปูนซีเมนต์มีสมบัติเทียบเคียงได้กับวัสดุปอซโซลาน (Pozzolan) ชนิด C ซึ่งมีปริมาณอยู่ระหว่างร้อยละ 50.2-58.6 ของแก๊สปาล์ม น้ำมัน [8], [30] และมีค่าปอซโซลานต่ำกว่างานวิจัยเก่าแก่ [8] คาดว่าสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานผสมกับปูนซีเมนต์ได้

3.2 ความหนาแน่นรวม

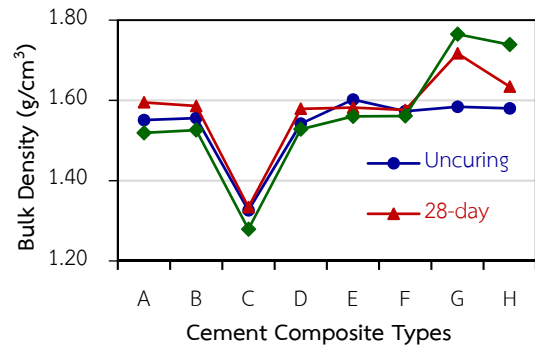
ในบรรดาความหนาแน่นรวมของตัวอย่างทั้งหมด พบว่าสูตร PFA10 (C) มีความหนาแน่นรวมต่ำที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 3 และตัวอย่างสูตร PFA5AgSWNT0.01 (G) มีแนวโน้มความหนาแน่นรวมเพิ่มขึ้นสูงสุด และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างสูตร C กับ G ที่บ่ม 56 วัน มีค่าความหนาแน่นรวมเพิ่มขึ้นร้อยละ 38 ซึ่งค่าความหนาแน่นรวมของสูตร G มีค่าสูงขึ้นเนื่องจากเส้นใยผลตาลโตนดมีปริมาณต่ำและท่อานโนคาร์บอนได้แทรกตัวเข้าแทนที่ในช่องว่าง (Voids) และรูพรุนขนาดเล็ก (Microvoids) สอดคล้องกับงานวิจัย G. Y. Li, P. M. Wang และ X. Zhao [31] ทำให้ความหนาแน่นเพิ่มขึ้น โดยเกิดจากช่องว่างของซีเมนต์ลดลง ทำให้ปริมาตรช่องว่างทั้งหมดลดลงด้วย

3.3 การดูดซึมน้ำ

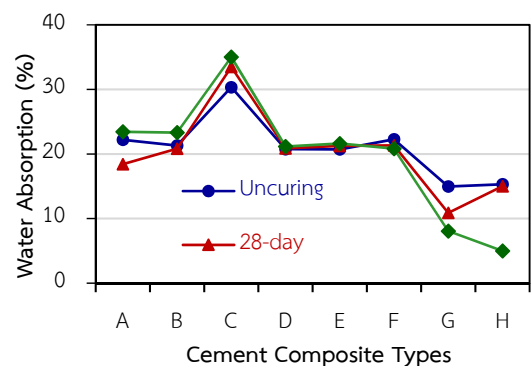
ผลการดูดซึมน้ำของวัสดุซีเมนต์ผสมดังแสดงในรูปที่ 4 มีค่ามากที่สุดอยู่ที่ตัวอย่างสูตร PFA10 (C) ทั้งสามอายุบ่ม มีค่าเท่ากับร้อยละ 30.34 ± 2.87 , 33.48 ± 1.81 และ 35.01 ± 0.96 ตามลำดับ ซึ่งค่าการดูดซึมน้ำแปรผกผันกับค่าความหนาแน่นรวมอย่างมีนัยสำคัญ (รูปที่ 3)

3.4 ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ

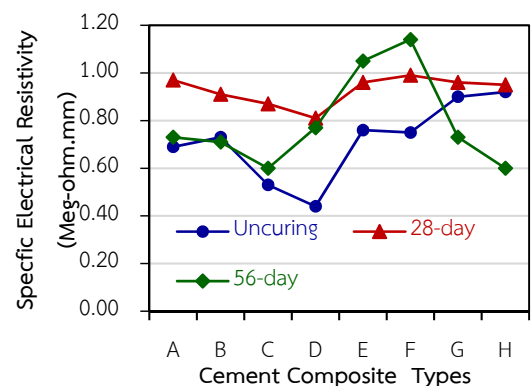
ตัวอย่างวัสดุซีเมนต์ผสมที่อายุบ่มต่างกันของสูตรผสมเส้นใยผลตาลโตนด พบว่า การเพิ่มปริมาณเส้นใ้นั้นมากขึ้นทำให้แนวโน้มความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะลดลง เช่นตัวอย่างของสูตร C ไม่บ่ม และยังพบว่า การใส่ท่อานโนคาร์บอนผนังขึ้นเดียวชนิดสั้นช่วยให้ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะมากขึ้น เช่นตัวอย่างสูตร PFA5OSWNT0.03 (F) บ่ม 56 วัน มีค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะสูงสุดเท่ากับ 1.14 ± 0.31 เมกกะโอห์ม มิลลิเมตร



รูปที่ 3 ความหนาแน่นรวมของวัสดุซีเมนต์ผสมที่อายุบ่มต่างกัน



รูปที่ 4 การดูดซึมน้ำของวัสดุซีเมนต์ผสมที่อายุบ่มต่างกัน



รูปที่ 5 ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของวัสดุซีเมนต์ผสมที่อายุบ่มต่างกัน

3.5 ความเร็วคลื่นเหนือเสียง

ความเร็วคลื่นเหนือเสียงของวัสดุซีเมนต์ผสมสูตร PFA5OSWNT0.01 (E) ที่อายุบ่มเพิ่มขึ้นมีค่า $3,170 \pm 84.90$, $3,232 \pm 0.00$ และ $3,170 \pm 84.90$ เมตรต่อวินาที ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 6 และบรรดาตัวอย่างที่ใส่ท่อนาโนคาร์บอนผงชั้นเดียวชนิดสั้น (E, F, G, H) มีส่วนช่วยให้ความเร็วคลื่นเหนือเสียงค่อนข้างสูงขึ้น แนวโน้มสอดคล้องกับค่าความหนาแน่นรวม (รูปที่ 3) แต่ค่อนข้างแปรผกผันกับปริมาณเส้นใยผลตาลโดนดเพิ่มขึ้น

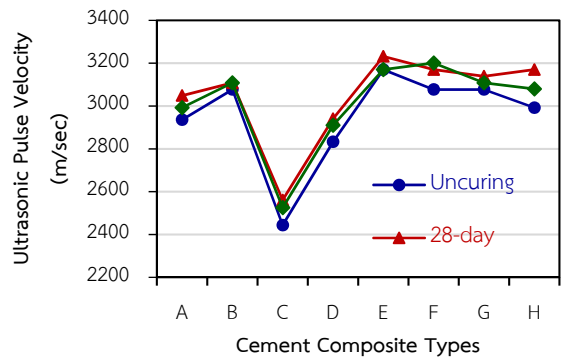
3.6 ความแข็งแรงอัด

ความแข็งแรงอัดของวัสดุซีเมนต์ผสมสูตร B ที่อายุบ่ม 28 วัน มีค่าความแข็งแรงอัดสูงสุด 28.61 ± 3.67 เมกกะปาสกาล สอดคล้องกับมาตรฐาน [21] อาทิเช่น ตัวอย่างสูตร PFA5AgSWNT0.01 (G) มีค่าความแข็งแรงอัด 25.45 ± 2.00 เมกกะปาสกาล ขณะที่ตัวอย่างควบคุม (A) ได้ 19.57 ± 7.36 เมกกะปาสกาล มีค่ามากกว่าร้อยละ 5 และยังพบว่ามีแนวโน้มสอดคล้องกับค่าความหนาแน่นและความเร็วคลื่นเหนือเสียงพบว่า ค่าความแข็งแรงอัดของตัวอย่างทุกสูตรที่บ่ม 28 วัน ยังให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะสูงกว่าเกือบทุกสูตร ยกเว้นสูตร E และ F (รูปที่ 7) สันนิษฐานว่าจากทิศทางการเรียงตัวของท่อนาโนคาร์บอนที่เติมเข้าไปแบบไม่จัดเรียงแนว

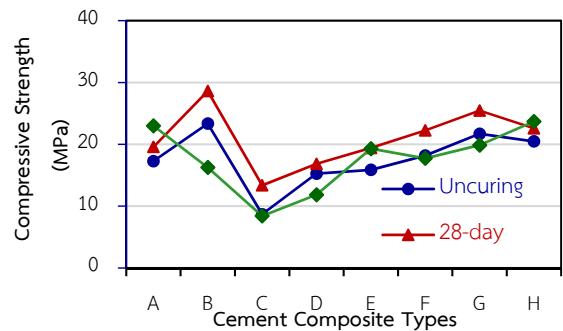
3.7 ความแข็งแรงดึงแยก

ความแข็งแรงดึงแยกที่ไม่บ่ม (รูปที่ 8) ของตัวอย่างวัสดุซีเมนต์ผสมทุกสูตร (A-H) มีค่าเท่ากับ 1.42 ± 0.00 , 2.87 ± 1.16 , 1.11 ± 0.00 , 2.32 ± 0.03 , 2.20 ± 0.59 , 2.07 ± 0.22 , 2.47 ± 0.47 และ 2.55 ± 0.14 เมกกะปาสกาล ตามลำดับ ซึ่งค่าความแข็งแรงดึงแยกสูงสุดของตัวอย่างควบคุม (A) บ่ม 28 วัน มีค่า 4.18 ± 0.33 เมกกะปาสกาล

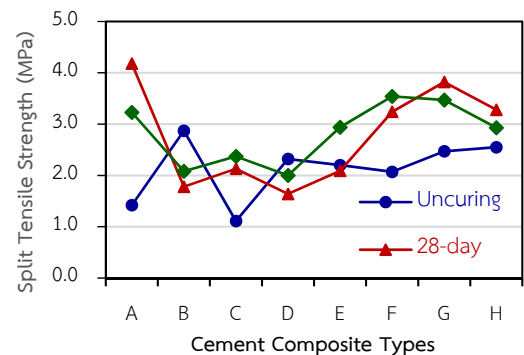
นอกจากนี้ยังพบว่า ค่าความแข็งแรงดึงแยกแนวโน้มแปรผันตามอายุบ่ม บางสูตรต่างออกไปน่าจะผลจากเสริมด้วยท่อนาโนคาร์บอนไปรบกวนการพัฒนากำลัง อย่างไรก็ตามค่าความแข็งแรงดึงแยกได้แปรผกผันกับค่าความแข็งแรงอัดอย่างชัดเจนโดยเฉพาะตัวอย่างที่ได้ผ่านการบ่ม (รูปที่ 7)



รูปที่ 6 ความเร็วคลื่นเหนือเสียงของวัสดุซีเมนต์ผสมที่อายุบ่มต่างกัน



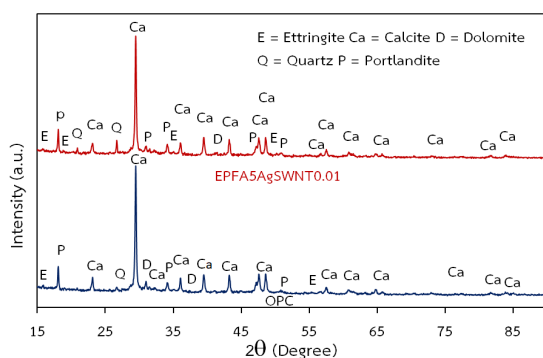
รูปที่ 7 ความแข็งแรงอัดของวัสดุซีเมนต์ผสมที่อายุบ่มต่างกัน



รูปที่ 8 ความแข็งแรงดึงแยกของวัสดุซีเมนต์ผสมที่อายุบ่มต่างกัน

ตารางที่ 5 สรุปเปรียบเทียบผลสมบัติต่าง ๆ ของแต่ละสูตรที่ทำการวิจัย

Code	Curing (Day)	ρ (g/cm ³)	D (%)	ρ (จำเพาะ) (mega-ohm.mm)	UPV (m/sec)	σ_c (MPa)	σ_T (MPa)
(A)	0	1.55±0.0	22.20±0.33	0.69±0.10	2936.00±0.00	17.27±3.67	1.42±0.00
	28	1.60±0.04	18.41±2.02	0.97±0.17	3048.80±63.06	19.57±7.36	4.18±0.33
	56	1.52±0.01	23.44±0.57	0.73±0.06	2992.40±77.23	23.00±1.80	3.23±0.59
(B)	0	1.56±0.04	21.31±0.51	0.73±0.09	3077.00±0.00	23.35±2.59	2.87±1.16
	28	1.56±0.02	20.81±0.67	0.91±0.38	3108.00±69.32	28.61±3.67	1.78±0.04
	56	1.53±0.04	23.32±2.93	0.71±0.12	3108.00±69.32	16.26±6.37	2.08±0.61
(C)	0	1.33±0.03	30.34±2.87	0.53±0.20	2443.80±50.94	8.69±2.43	1.11±0.00
	28	1.33±0.04	33.48±1.81	0.87±0.29	2561.00±44.72	13.36±1.88	2.13±0.73
	56	1.28±0.02	35.01±0.96	0.60±0.14	2525.40±132.95	8.41±0.61	2.37±0.07
(D)	0	1.55±0.02	20.76±1.31	0.44±0.10	2832.80±57.69	15.26±0.72	2.32±0.03
	28	1.58±0.03	20.87±1.11	0.81±0.21	2940.80±135.03	16.84±1.88	1.64±1.17
	56	1.53±0.02	21.17±0.89	0.77±0.06	2910.20±57.69	11.84±3.38	2.00±0.02
(E)	0	1.60±0.01	20.72±0.44	0.76±0.16	3170.00±84.90	15.86±1.71	2.20±0.59
	28	1.58±0.01	21.25±0.38	0.96±0.17	3232.00±0.00	19.40±2.84	2.09±0.75
	56	1.56±0.01	21.62±0.41	1.05±0.16	3170.00±84.90	19.30±1.72	2.94±0.42
(F)	0	1.57±0.01	22.28±0.41	0.75±0.10	3077.00±0.00	18.18±3.50	2.07±0.22
	28	1.58±0.01	21.34±0.17	0.99±0.24	3170.00±84.90	22.24±1.55	3.24±0.77
	56	1.56±0.02	20.82±0.27	1.14±0.31	3201.00±69.32	17.73±5.68	3.54±0.24
(G)	0	1.58±0.01	14.96±4.53	0.90±0.28	3077.00±0.00	21.70±2.25	2.47±0.47
	28	1.72±0.07	10.88±4.80	0.96±0.14	3139.00±84.90	25.45±2.00	3.82±0.69
	56	1.77±0.05	8.06±2.71	0.73±0.32	3108.00±69.32	19.86±3.34	3.47±1.47
(H)	0	1.58±0.01	15.32±4.58	0.92±0.27	2992.40±77.23	20.47±5.56	2.55±0.14
	28	1.63±0.06	15.01±5.20	0.95±0.38	3170.00±84.90	22.58±0.46	3.28±0.58
	56	1.74±0.08	5.00±5.75	0.60±0.16	3079.80±104.72	23.69±1.23	2.93±0.09



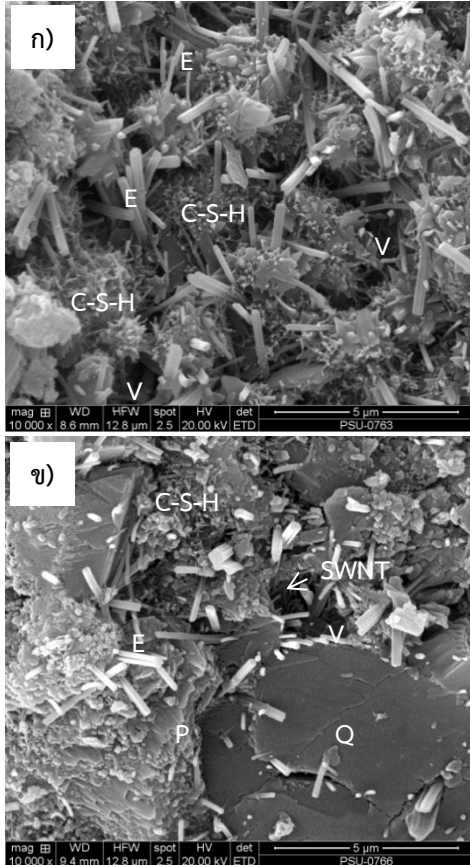
รูปที่ 9 กราฟแผนภาพ XRD ซ้อนกันของวัสดุซีเมนต์
ควบคุมกับวัสดุซีเมนต์ผสมเส้นใยผลตาลโตนดเสริม
ด้วยท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวชนิดสั้น

3.8 วิเคราะห์สารประกอบ

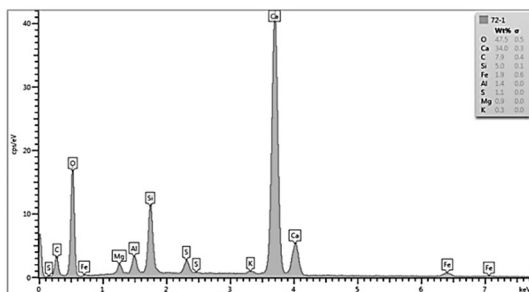
ตัวอย่างวัสดุซีเมนต์ควบคุม สูตร A กับตัวอย่าง
ที่มี ค่า ความ แข็ง แรงอัด ที่ สุด คือ สูตร
PFA5AgSWNT0.01 (G) ได้นำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค
ตัวอย่างด้วยวิธี XRD ดังแสดงในรูปที่ 9

ผลการวิเคราะห์พบแร่ ได้แก่ แคลไซต์ (Calcite,
 $\text{Ca}(\text{CO}_3)$), พอร์ตแลนด์ (Portlandite, $\text{Ca}(\text{OH})_2$),
ควอตซ์ (Quartz, SiO_2), โดโลไมต์ (Dolomite,
 $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) และ เอตtringite ($\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}-26\text{H}_2\text{O}$) ซึ่งปริมาณแร่แต่ละชนิด
เหล่านี้ในตัวอย่างสูตร G มีมากกว่าในตัวอย่างควบคุม

(สูตร A) เป็นผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชันและปอซโซลานของปูนซีเมนต์กับเส้นใยผลตาลโตนดมีพฤติกรรมในการทำวัสดุปอซโซลานที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน ASTM C618 [29]



รูปที่ 10 ภาพถ่าย SEM ของ ก) วัสดุซีเมนต์ควมคุม (A) และ ข) วัสดุซีเมนต์ผสมเส้นใยผลตาลโตนดเสริมแรงด้วยท่อคาร์บอนผนังชั้นเดียวชนิดสั้น (G)



รูปที่ 11 กราฟ EDS ของวัสดุซีเมนต์ผสมเส้นใยผลตาลโตนดเสริมแรงด้วยท่อคาร์บอนผนังชั้นเดียวชนิดสั้น (G)

3.9 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

ผลของภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของวัสดุซีเมนต์ผสมด้วยเทคนิค SEM พบว่า โครงสร้างจุลภาคตัวอย่างควบคุม (รูปที่ 10 ก) มีปริมาณช่องว่าง (V) ในโครงสร้างมากกว่าในตัวอย่างสูตร G ที่ผสมเส้นใยผลตาลโตนดและแท่งท่อคาร์บอนกระจายในเนื้อพื้นรูปที่ 10 ข) และผลวิเคราะห์ EDS ยืนยันว่ามีธาตุประกอบด้วย O, Ca, C, Si, Fe, Al, S, Mg และ K ดังแสดงในรูปที่ 11 ผลสืบเนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดวัฏภาคแร่เอตทริไนท์ (E) ดังรูปที่ 10 (ก) ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นรวมลดลง (รูปที่ 3) และค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น (รูปที่ 4) และจากผลวิเคราะห์ภาพถ่าย SEM พบลักษณะวัฏภาคสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate, C-S-H) พอร์ตแลนด์และควอตซ์ (รูปที่ 10 ข) ได้ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงอัดอย่างยิ่ง ขณะที่การเสริมด้วยท่อคาร์บอนผนังชั้นเดียวชนิดสั้นแบบไม่จัดเรียงแถว (Random) ได้ส่งผลกระทบต่อสมบัติหลายประการ เช่น การนำไฟฟ้าจำเพาะ ความเร็วคลื่นเหนือเสียง และความแข็งแรงอัด

3.10 การวิเคราะห์ด้วยสถิติ

ผลการวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างสูตรที่มีค่าสูงสุดด้วยสถิติ Two-sample t-test ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ($\alpha = 0.05$) โดยวิเคราะห์สมบัติสำคัญ เช่น ความหนาแน่นรวม ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ และความแข็งแรงอัด ดังนั้น ในตารางที่ 6 พบว่าค่าความหนาแน่นรวมระหว่าง PFA10 (C) กับ PFA5AgSWNT0.01 (G) ที่ระยะเวลาการบ่มต่าง ๆ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยค่า P-value น้อยกว่า 0.05 สำหรับค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะระหว่าง PFA10 (C) กับ PFA5OSWNT0.03 (F) มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ ยกเว้นที่ระยะเวลาการบ่ม 56 วัน ที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยมี

ค่า P -value น้อยกว่า 0.05 และค่าความแข็งแรงอัดระหว่าง OPC (A) กับ PFA5AgSWNT0.01 (G) ที่ระยะเวลาการบ่มต่าง ๆ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ P -value มากกว่า 0.05

ตารางที่ 6 ค่าสถิติ Two-sample t-test ของสมบัติซีเมนต์ผสม

Code	ρ (g/cm ³)		
	ที่ระยะเวลาการบ่มต่าง ๆ		
	0	28	56
PFA10 (C)	1.33a	1.33a	1.28a
PFA5AgSWNT0.01(G)	1.58b	1.72b	1.77b
P -value	0.000*	0.000*	0.000*

Code	ρ (จำเพาะ) (mega-ohm.mm)		
	ที่ระยะเวลาการบ่มต่าง ๆ		
	0	28	56
PFA10 (C)	0.53a	0.87a	0.60a
PFA5OSWNT0.03(F)	0.75a	0.99a	1.14b
P -value	0.079	0.499	0.016*

Code	σ_c (MPa)		
	ที่ระยะเวลาการบ่มต่าง ๆ		
	0	28	56
OPC (A)	17.27a	19.57a	23.00a
PFA5AgSWNT0.01(G)	21.70a	25.45a	19.86a
P -value	0.061	0.160	0.114

หมายเหตุ: * หมายถึง แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 และสำหรับสัญลักษณ์ a, b หากในสดมภ์เดียวกันมีสัญลักษณ์เหมือนกัน หมายถึง แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ

4. สรุป

เส้นใยผลตาลโตนดมีองค์ประกอบทางเคมีของซิลิกอนออกไซด์ อะลูมิเนียมออกไซด์ และเฟอร์ริกออกไซด์ ร้อยละ 51.53 เทียบเคียงกับวัสดุพอลิโพรพิลีนคุณภาพในระดับ C ความหนาแน่นรวมและการดูดซึมน้ำของวัสดุซีเมนต์ผสม ไม่บ่ม บ่มน้ำกลั่น 28 วัน และ 56 วัน ของสูตร PFA10 (C) มีความหนาแน่นรวมต่ำกว่าค่าความหนาแน่นรวมของวัสดุซีเมนต์ผสมของสูตรอื่น ๆ และแปรผกผันกับการดูดซึมน้ำของ

PFA10 (C) เช่นเดียวกัน นอกจากนี้ ค่าความหนาแน่นรวมมีผลสอดคล้องกับความแข็งแรงอัดต่ำกว่าสูตรอื่น ๆ ด้วย แต่อย่างไรก็ตาม ยังมีวัสดุซีเมนต์ผสมของสูตร PFA5AgSWNT0.01 (G) ที่บ่มในน้ำกลั่น 28 วัน มีค่าความแข็งแรงอัดสูงสุด 25.45 ± 2.00 เมกะปาสคาล เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความแข็งแรงอัด OPC (A) มีค่าเท่ากับ 19.57 ± 7.36 เมกะปาสคาล ซึ่งค่าความแข็งแรงอัดเพิ่มขึ้นร้อยละ 5 ความเร็วคลื่นเหนือเสียงของวัสดุซีเมนต์ผสมของสูตรที่เติมท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวชนิดสั้น ในทุกเงื่อนไขการบ่มทั้งหมด มีค่าความเร็วคลื่นเหนือเสียงมากกว่าตัวอย่างควบคุม OPC (A) ที่บ่ม 28 วัน โดยตัวอย่างสูตร PFA5OSWNT0.01 (E) มีค่าความเร็วคลื่นเสียงสูงสุดเท่ากับ $3,232.00 \pm 0.00$ เมตรต่อวินาที เมื่อเปรียบเทียบกับความเร็วคลื่นเหนือเสียงของ OPC (A) ซึ่งมีค่า $3,048.80 \pm 63.06$ เมตรต่อวินาที ได้เพิ่มขึ้นร้อยละ 9.8 สอดคล้องกับความหนาแน่นรวมในสูตรเดียวกัน ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของวัสดุซีเมนต์ผสม ที่บ่มน้ำกลั่น 56 วัน ของสูตร PFA5OSWNT0.03 (F) มีความสามารถในการต้านทานไฟฟ้าจำเพาะสูงสุดเท่ากับ 1.14 ± 0.31 เมกะโอห์มมิลลิเมตร สำหรับโครงสร้างจุลภาคของวัสดุซีเมนต์ผสมมีการเกิดช่องว่างมากขึ้นในโครงสร้างจุลภาค การบ่มทำให้ค่าความหนาแน่นรวมและค่าการดูดซึมน้ำส่งผลต่อค่าความแข็งแรงอัดและความแข็งแรงดึงแยกเป็นอย่างมาก สำหรับการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความหนาแน่นรวมระหว่าง PFA10 (C) กับ PFA5AgSWNT0.01 (G) ที่ระยะเวลาการบ่มต่าง ๆ พบว่า มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยค่า P -value น้อยกว่า 0.05 และด้วยวัสดุซีเมนต์ผสมสูตร PFA5AgSWNT0.01 (G) พบวัฏภาคแร่ แคลไซต์ พอร์ตแลนด์ คิวตซ์ โดโลไมต์ เอ็ดทรินไกต์ ในโครงสร้างจุลภาคพบสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และเอ็ดทรินไกต์ ซึ่งมีบทบาทอย่างมากสำหรับความแข็งแรงอัดในเนื้อวัสดุซีเมนต์ผสมและเหมาะสมสำหรับงานซีเมนต์มวลเบาได้

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมอุตสาหการ และหน่วยวิจัยการป้องกันและควบคุมภัยพิบัติธรรมชาติ เพื่อสิ่งแวดล้อมที่ยั่งยืน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ภาควิชา วิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ ศูนย์วิจัยความเป็นเลิศด้าน โลหะและวิศวกรรมวัสดุ และหน่วยวิจัยธรณีเทคนิคและ นวัตกรรมวัสดุก่อสร้าง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่อนุเคราะห์และ สนับสนุนอุปกรณ์ เครื่องมือ สถานที่ในการดำเนินการ ขอขอบคุณ นายเกาศัย หมาดเต๊ะ นายเมธี จันทรทอง และ นายกรวิษฐ์ ขุนกาญจน์ ในการเตรียมชิ้นตัวอย่าง งานวิจัยในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Office of Industrial Economics Ministry of Industry. (2020, June 1) . Industrial Economic Conditions in January 2020. [Online]. Available: <https://www.ryt9.com/s/oie/3107077>
- [2] Thailand Fellowship of Cement Manufacturers. (2020, June 1). Export of Cement Industry. [Online]. Available: <http://thaicma.or.th/cms/scale-of-cement-industry/export-of-cement-industry/>
- [3] The Concrete Products and Aggregate Co., Ltd. (2020, June 4) . Cement. [Online]. Available: https://cpacademy.com/download/cpacacademy_com/e-contech%20u2.pdf
- [4] S. Dumrongsil and S. Sujjavanich, "Effect of cement containing binary blended bagasse ash-fly ash on physical and mechanical properties of concrete," *KMUTT Research and Development Journal*, vol. 30, no. 3, pp. 489-499, Jul.-Sep. 2007.
- [5] S. Dumrongsil, "Effect of rice husk ash blended with fly ash on mechanical properties of concrete," *RMUTP Research Journal*, vol. 9, no. 1, pp. 125-133, Mar. 2015.
- [6] B. Chatveera and N. Makul, "Effect of curing temperature on mechanical properties of cement mixed with white rice husk ash paste," *KMUTT Research and Development Journal*, vol. 27, no. 1, pp. 49-61, Jan.-Mar. 2004.
- [7] S. Chantaramanee, W. Keanthongdang, P. I-suwan and D. Tonnayopas, "Properties of cement composite fabricated from white rice husk ash incorporated with short single-walled carbon nanotubes," *Engineering Journal Chiang Mai University*, vol. 25, no. 3, pp. 113-121, Sep.-Dec. 2018.
- [8] W. Kroehong, T. Sinsiri, C. Jaturapitakkul and P. Chindaprasirt, "A study microstructure of blended cement paste containing palm oil fuel ash," *KMUTT Research and Development Journal*, vol. 35, no. 2, pp. 187-200, Apr.-Jun. 2012.
- [9] Department of Agricultural Extension Ministry of Agriculture and Cooperatives. (2017, July 12). Tantanode. [Online]. Available: <https://production.doae.go.th/service/>
- [10] W. Saiwarin, C. Napia and T. Sinsiri, "The study of leaching of heavy metals contaminant in cement pastes containing

- bagasse ashes,” *KKU Engineering Journal*, vol. 41, no. 2, pp. 181-190, Apr.-Jun. 2014.
- [11] W. Kroehong, S. Sangpaen, P. Sitkanarak and J. Wilairat, “Mechanical properties microstructure and thermal conductivity of concrete block containing fly ash,” *KMUTT Research and Development Journal*, vol. 39, no. 3, pp. 407-425, Jul.-Sep. 2016.
- [12] P. Kejaroen and S. Sethabouppha, “Development of lightweight concrete masonry units with oil palm ash,” *RMUTP Research Journal*, vol. 1, no. 1, pp. 33-40, May. 2007.
- [13] S. Iijima, “Helical microtubules of graphitic carbon,” *Letters to Nature*, vol. 354, pp. 56-58, Nov. 1991.
- [14] Y. Feng and H. Yuan, “Electroless plating of carbon nanotubes with silver,” *Journal of Materials Science*, vol. 39, pp. 3241-3243, 2004.
- [15] Y. Hu, D. Luo, P. Li, Q. Li and G. Sun, “Fracture toughness enhancement of cement paste with multi-wall carbon nanotubes,” *Construction and Building Materials*, vol. 70, pp. 332-338, 2014.
- [16] M. Elkashef, K. Wang and M. N. Abou-Zeid, “Acid treated carbon nanotubes and their effects on mortar strength,” *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, vol. 10, no. 2, pp. 180-188, 2016.
- [17] K. M. Liew, M. F. Kai and L. W. Zhang, “Mechanical and damping properties of CNT-reinforced cementitious composites,” *Composite Structures*, vol. 160, 15, pp. 81-88, 2017.
- [18] M. A. Mousavi and A. Bahari, “Influence of functionalized MWCNT on microstructure and mechanical properties of cement paste,” *Indian Academy of Sciences*, vol. 44, 103, pp. 1-13, 2019.
- [19] R. Kaur, N. C. Kothiyal, and H. Arora, “Studies on combined effect of superplasticizer modified graphene oxide and carbon nanotubes on the physico-mechanical strength and electrical resistivity of fly ash blended cement mortar,” *Journal of Building Engineering*, vol. 30, 101234, 2020.
- [20] *Standard Specification for Portland Cement*, ASTM Standard C150-07, 2007.
- [21] *Portland Cement*, Thai Industrial Standard Institute TISI. 15, 2004.
- [22] Cheap Tubes Inc. (2020, June 9). Single walled carbon nanotubes, SWNTs, specifications and properties. [Online]. Available: <https://www.azonano.com/article.aspx?ArticleID=2180>
- [23] The Concrete Products and Aggregate Co.,Ltd. (2020, June 9). Chapter 2 Cement. [Online]. Available: <https://www.cpacacademy.com/index.php?tpid=0063>
- [24] S. Chantaramanee, S. Wisutmethangoon, L. Sikong and T. Plookphol, “Development of a lead-free composite solder from Sn-Ag-Cu and Ag-coated carbon nanotubes,” *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, vol. 24, pp. 3707–3715, 2013.
- [25] *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete*

- Specimens*, ASTM Standard C39/C39M-05, 2005.
- [26] *Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*, ASTM Standard C642-97, 1997.
- [27] *Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete*, ASTM Standard C597-16, 2016.
- [28] *Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens*, ASTM Standard C496-96, 1996.
- [29] *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*, ASTM Standard C618-12a, 2012.
- [30] W. Sanawung, W. Tangchirapat and C. Jaturapitakkul, "Strength, abrasion resistance, and chloride ion penetration of concrete containing palm oil fuel ash," *KMUTT Research and Development Journal*, vol. 44, no. 1, pp. 83-96, Jan.-Mar. 2018.
- [31] G. Y. Li, P. M. Wang and X. Zhao, "Mechanical behavior and microstructure of cement composites incorporating surface-treated multi-walled carbon nanotubes," *Carbon*, vol. 43 pp. 1239-1245, 2005.

<http://journal.rmutp.ac.th/>

การพัฒนาไอศกรีมนมเสริมอกไก่

สุธิดา กิจจาวรเสถียร* วรธร ป้อมเย็น และ วรลักษณ์ ป้อมน้อย

สาขาวิชาอาหารโภชนาการ คณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
168 ถนนศรีอยุธยา แขวงวรขิงยาบาล เขตดุสิต กรุงเทพฯ 10300

รับบทความ 14 พฤษภาคม 2563 แก้ไขบทความ 13 ตุลาคม 2563 ตอบรับบทความ 28 ธันวาคม 2563

บทคัดย่อ

ไอศกรีมนมเป็นหนึ่งในอาหารหวานที่ได้รับความนิยมกันอย่างแพร่หลายในหลายประเทศ แต่ไอศกรีมนมส่วนใหญ่ประกอบด้วยน้ำตาลและไขมันสูง จึงเป็นเหตุผลที่ทำให้ผู้บริโภคที่ออกกำลังกายเป็นประจำจนถึงผลกระทบของการบริโภคไอศกรีมต่อปัญหาสุขภาพ และนำไปสู่ความต้องการในการพัฒนาไอศกรีมที่ให้โปรตีนสูงสำหรับผู้บริโภคกลุ่มนี้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อการพัฒนาไอศกรีมนมโปรตีนสูงจากอกไก่ โดยศึกษาปริมาณอกไก่ที่ระดับร้อยละ 5 10 และ 15 โดยน้ำหนักทั้งหมด ผลการศึกษา พบว่าไอศกรีมเสริมอกไก่ที่ระดับร้อยละ 10 เป็นระดับที่ให้คุณภาพทางกายภาพและคุณภาพทางประสาทสัมผัสที่ดีที่สุด โดยน้ำไอศกรีมมีค่าความหนืด 89.05 CSP มีค่าโอเวอร์รันร้อยละ 108.05 ค่าเนื้อสัมผัส 34,584 g force และอัตราการละลายร้อยละ 23 ส่วนค่าสีพบว่าความสว่าง (L^*) ค่าความเป็นสีแดง (a^*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) มีค่า 87.10, 5.08, 20.54 ตามลำดับ

คำสำคัญ : การพัฒนา; ไอศกรีมนม; อกไก่

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +666 4240 9666, อีเมล: suthida.k@rmutp.ac.th

<http://journal.rmutp.ac.th/>

Development Milk Ice-cream Supplemented of Chicken Breast

Suthida Kitjavorasatien* Vorathon Pomyen and Woralak Pomnoi

Department of Food and Nutrition's Lecture, Faculty of Home Economics Technology, Rajamangala University of Phra Nakhon

168 Thanon Sri Ayuthaya, Wachira Phayaban, Dusit District, Bangkok 10300

Received 14 May 2020; Revised 13 October 2020; Accepted 28 December 2020

Abstract

Milk ice cream is the one of most popular dessert in many countries. But the most milk ice cream contains high amounts of sugar and fat. It is for this reason that consumers who exercise regularly concern about the impact of ice cream consumption on health and have led to a considerable rise in high protein ice cream demand for this consumer group. Therefore, the objective of this study was to develop the milk ice cream with high protein from chicken breast by varying chicken breast in milk ice cream at 5, 10 and 15% by total weight. The result showed that 10 % chicken breast ice cream had the best physical and sensory properties. The viscosity, overrun, texture and melting rate of the developed formula were 89.05 cps, 108.05%, 34,584 g force and 23%, respectively. The lightness (L*), redness (a*) and yellowness (b*) value were 87.10, 5.08 and 20.54 respectively.

Keywords : Development; Milk Ice Cream; Chicken Breast

* Corresponding Author. Tel.: +666 4240 9666, E-mail Address: suthida.k@rmutp.ac.th

1. บทนำ

ไอศกรีมเป็นขนมหวานที่ได้รับความนิยมจากผู้บริโภคทั่วโลกทุกเพศทุกวัยมาเป็นเวลานาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศที่เป็นเขตร้อนอย่างประเทศไทย โดยส่วนใหญ่แล้วไอศกรีมมีทั้งพลังงาน ไขมัน และน้ำตาลในปริมาณที่สูงอาจมีผลทำให้ผู้บริโภคเกิดความเสี่ยงต่อการเกิดโรคไม่ติดต่อเรื้อรังได้ ธุรกิจไอศกรีมจึงมีการแข่งขันพัฒนาขึ้นมาอย่างต่อเนื่องทั้งด้านรสชาติและเนื้อสัมผัสที่หลากหลาย [1] ทั้งทางด้านสุขภาพเพื่อตอบสนองต่อความต้องการของผู้บริโภค รวมไปถึงผู้ที่ออกกำลังกาย การเสริมโปรตีนเพื่อการสร้างกล้ามเนื้อเป็นสิ่งสำคัญเช่นเดียวกัน โดยผู้ที่ออกกำลังกายควรได้รับโปรตีนในปริมาณที่สูงกว่าบุคคลทั่วไปและอาหารประเภทโปรตีนที่ผู้ออกกำลังนิยมบริโภคคือ ออกไก่

ไก่เป็นโปรตีนชั้นดีในโปรตีนมีกรดอะมิโนหลายชนิดมีวิตามิน เกลือแร่ มีแคลอรีต่ำ กล้ามเนื้อไก่มีขนาดเส้น จึงทำให้ย่อยง่ายเหมาะสำหรับผู้ที่ต้องการลดน้ำหนัก ผู้ป่วย ผู้พักฟื้น ผู้สูงอายุ ตลอดจนเด็ก ๆ และหนุ่มสาว สารอาหารในเนื้อไก่มีโปรตีนและกรดอะมิโนสูงกว่าเนื้อสัตว์อื่นๆ โปรตีนของไก่มีร้อยละ 25-35 เนื้อวุ้นร้อยละ 21-27 เนื้อหนังร้อยละ 23-24 ไขมันของไก่มีค่าไอโอดีนต่ำกว่าเป็ดและห่าน แสดงว่ามีกรดไขมันอิ่มตัวน้อยกว่าและเนื้อไก่อังมีกรดไขมันไม่อิ่มตัวสูงกว่าด้วย ไขมันไก่มีอยู่ตามหนังเป็นส่วนใหญ่ ถ้าไม่ต้องการเพียงแค่ลอกหนังออกไป ก็จะได้โปรตีนล้วน ๆ ส่วนเกลือแร่ต่างๆ ในเนื้อไก่ ประกอบด้วยโซเดียม แมกนีเซียม แคลเซียม เหล็ก ฟอสฟอรัส กำมะถัน คลอรีน และไอโอดีน ซึ่งล้วนแต่เป็นประโยชน์ต่อร่างกาย [2] ซึ่งในส่วนของเนื้อออกไก่อมีปริมาณโปรตีนสูงถึง 25 กรัมต่อ 100 กรัม และปริมาณไขมันต่ำเพียง 1 กรัมต่อ 100 กรัม จึงมีการนำเนื้อออกไก่มาพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์พร้อมบริโภคหลากหลายรูปแบบ [3]

ดังนั้นวัตถุประสงค์งานวิจัยในครั้งนี้ เพื่อศึกษาสูตรพื้นฐานของไอศกรีมนม และศึกษาปริมาณออกไก่ที่เสริมในไอศกรีมนม รวมถึงศึกษาคุณภาพทางกายภาพเคมี ของไอศกรีมนมสูตรพื้นฐาน และสูตรพัฒนาเสริมออกไก่

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 ขั้นตอนการวิจัย

การศึกษาสูตรพื้นฐานไอศกรีมนม ขั้นตอนการทำไอศกรีมนมสูตรพื้นฐาน 3 สูตร (ตารางที่ 1) เพื่อคัดเลือกสูตรที่เหมาะสมที่สุดนำมาใช้ในการพัฒนาไอศกรีมนมเสริมออกไก่

ตารางที่ 1 ส่วนผสมที่ใช้ในการทำไอศกรีมนมสูตรพื้นฐานจำนวน 3 สูตร

วัตถุดิบ	ปริมาณ (ร้อยละ)		
	สูตร 1	สูตร 2	สูตร 3
นมสดพาสเจอร์ไรซ์	67.12	56.65	56.60
วิปปิ้งครีม	22.37	29.30	17.85
น้ำตาลทรายขาว	10.29	7.27	14.00
ไข่แดง	-	6.40	11.15
กลั่นวานิลลา	-	0.38	0.40
เกลือ	0.22	-	-

2.1.1 ขั้นตอนการเตรียมไอศกรีม

เทนมใส่หม้อ ตั้งไฟกลาง ต้มนมพอเดือด พักไว้ให้เย็นและใส่หม้อตั้งไฟให้เดือดที่ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ตีไข่แดงและน้ำตาลด้วยตะกร้อมือในอ่างผสมเป็นเวลา 3 นาที ให้ส่วนผสมขึ้นฟูเล็กน้อย ใส่เนยที่พักไว้คนให้เข้ากัน ยกขึ้นตั้งบนหม้อน้ำเดือด คนด้วยพายไม้ตลอดเป็นเวลา 10 นาที จนเนื้อเนียน พักไว้ให้เย็น ใส่วิปปิ้งครีมและกลั่นวานิลลา คนให้เข้ากัน ปั่นด้วยเครื่องปั่นผสมอาหารยี่ห้อ Vitamix รุ่น VTM-10011-AFCB ขนาด 1.4 ลิตร เป็นเวลา 3 นาที จากนั้นกรองด้วยผ้าขาวบาง บ่มที่อุณหภูมิ 4±1 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง นำ

ส่วนผสมใส่ในเครื่องปั่นไอศกรีมยี่ห้อ HARD SERVE ICE CREAM MACHINE รุ่น IBQ12T กำลังไฟ 1,200 วัตต์ ขนาดถังบรรจุ 5.1 ลิตร อุณหภูมิ -6 องศาเซลเซียส เมื่อได้บรรจุลงในถ้วยพลาสติกและปิดฝา นำแช่แข็งที่อุณหภูมิ -20 ถึง -25 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง [4]

2.1.2 ขั้นตอนการเตรียมอกโก

ล้างอกโกให้สะอาด ลอกเอาหนังและไขมันออกจนหมด หั่นอกโกเป็นชิ้นเล็กขนาดกว้าง×ยาว×สูง เท่ากับ 1×1×1 เซนติเมตร อัตราส่วนอกโก 1,000 กรัม ต้มในน้ำเดือดปริมาตร 1 ลิตร ที่ใส่น้ำส้มสายชู 200 มิลลิลิตร และเกลือ 10 กรัม ต้มนาน 15 นาที ตักอกโกขึ้นจากน้ำและนำไปใส่ในน้ำเย็น เมื่อกโกเย็นตักพักไว้ในกระชอนเพื่อให้สะเด็ดน้ำ นำอกโกไปบดให้ละเอียดด้วยเครื่องบด ล้างอกโกที่บดละเอียดด้วยน้ำเปล่า และขยำนํ้าสีขาวซึ่งเป็นส่วนที่มีกลิ่นคาวโกออก กรองด้วยผ้าขาวบางหนา 4 ชั้น เพื่อเอานํ้าสีขาวทิ้ง จากนั้นนำอกโกไปล้างน้ำและเทนํ้าสีขาวทิ้งอีก 3 ครั้ง หรือจนน้ำเปลี่ยนจากสีขาวเป็นสีใส เมื่อย่างจนหมดนํ้าสีขาวแล้วให้บีบอกโกจนหมดนํ้า นำอกโกที่ได้ใส่ถุงบรรจุสุญญากาศ เข้าเครื่องบรรจุสุญญากาศ จากนั้นห่อด้วยกระดาษฟอยล์ นำเก็บเข้าตู้แช่แข็งสำหรับใช้งาน

2.1.3 ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีในอกโกต้ม

นำอกโกต้มที่เตรียมเสร็จแล้วไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ความชื้น ไขมัน โปรตีน คาร์โบไฮเดรต กากใย และเถ้า [5] เพื่อศึกษาองค์ประกอบทางเคมีที่คงเหลือในอกโกต้มปั่น โดยเปรียบเทียบเทียบกับอกโกต้มทั้งชิ้น

2.1.4 ศึกษาปริมาณที่เหมาะสมของอกโกต้มที่ใช้เสริมในไอศกรีมนม

นำสูตรพื้นฐานที่ได้รับการคัดเลือกมาศึกษาปริมาณอกโกที่เหมาะสมสำหรับเสริมในไอศกรีมนม โดยใช้ปริมาณอกโก 3 ระดับ คือ ร้อยละ 5 10 และ 15 ของ

น้ำหนักส่วนผสมทั้งหมด โดยมีสูตรพื้นฐานเป็นสูตรควบคุม จากนั้นนำไปประเมินคุณภาพทางกายภาพ และทางประสาทสัมผัส

2.1.5 ศึกษาคุณภาพทางกายภาพและคุณภาพทางประสาทสัมผัสของไอศกรีมนมสูตรพื้นฐานที่ได้รับคัดเลือกจำนวน 1 สูตร มาเป็นสูตรควบคุม และสูตรที่พัฒนาเสริมอกโก 3 ระดับ

1) การวัดค่าสีด้วยเครื่องวัดสี Hunter Lab color meter (L^* , a^* , และ b^*)

2) การวัดค่าความข้นหนืด นำตัวอย่างไอศกรีมมิกซ์ที่ผ่านการบ่มแล้ว ปริมาณ 500 มิลลิลิตร มาวัดค่าความหนืดด้วยเครื่อง Brookfield Viscometer ที่อุณหภูมิ 25 ± 1 องศาเซลเซียส โดยใช้หัววัดเบอร์ 01 และความเร็วรอบที่ 50 รอบต่อนาที

3) การวัดค่าโอเวอร์รัน (overrun) ของไอศกรีม โดยชั่งน้ำหนักไอศกรีมมิกซ์ก่อนปั่นและไอศกรีมที่ปั่นจนแข็งตัวแล้วจากนั้นนำไปคำนวณค่าโอเวอร์รัน ตามสมการที่ (1) [6]

ค่า Overrun (%)

$$= \frac{(\text{น้ำหนักไอศกรีมมิกซ์} - \text{น้ำหนักไอศกรีม})}{\text{น้ำหนักไอศกรีม}} \times 100 \quad (1)$$

4) วัดอัตราการละลาย โดยชั่งตัวอย่างไอศกรีม 50 กรัม วางบนตะแกรงร่อนแบ่งขนาด 80 เมช ที่มีถ้วยสแตนเลส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว รองรับนํ้าไอศกรีมอยู่ด้านล่าง วางไอศกรีมทิ้งไว้ 60 นาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ชั่งน้ำหนักของนํ้าไอศกรีมที่ละลายทุกๆ 10 นาที 60 นาที จากนั้นนำไปคำนวณค่าการละลายและสร้างกราฟอัตราการละลาย ดังสมการที่ (2) [6]

$$\text{ละลาย (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักของไอศกรีมที่ละลาย}}{\text{น้ำหนักของไอศกรีมเริ่มต้น}} \times 100 \quad (2)$$

5) การวัดค่าเนื้อสัมผัส วัดลักษณะเนื้อสัมผัสของไอศกรีม ใช้ตัวอย่างไอศกรีมบรรจุถ้วยวัดค่าความแข็งด้วยเครื่อง Texture Analyzer สภาวะในการทดสอบมีดังนี้

1. หัว probe P/36R
2. Pre-test speed 1 mm/s
3. Test speed 2 mm/s
4. Post-test speed 2 mm/s
5. Distance 10 mm

6) การประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส โดยนำ

สูตรไอศกรีมที่ได้รับการคัดเลือกเป็นสูตรพื้นฐานมาพัฒนาต่อโดยเสริมอกไก่ในไอศกรีมวางแผนการทดลองแบบสุ่มในบล็อกสมบูรณ์ Randomized Complete Block Design, RCB ประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสประสาทสัมผัสในด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม ด้วยวิธีการชิมแบบให้คะแนนความชอบ 9 ระดับ (9–Point Hedonic Scale) ใช้ผู้ชิมที่เป็นอาจารย์และนักศึกษาศาขาวิชาอาหารและโภชนาการจำนวน 80 คน

2.1.6 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ การทดลองใช้แผนการทดลองแบบ CRD (Completely Randomized Design) และ RCBD (Randomized Complete Block) วิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (Analysis of Variance; ANOVA) และความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างทรีทเมนต์โดยวิธี Duncan's Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 ผลการศึกษาสูตรพื้นฐานไอศกรีมนม

ศึกษาสูตรพื้นฐานของไอศกรีมนมที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นสูตรเริ่มต้นในการพัฒนาไอศกรีมนมเสริมอกไก่ โดยใช้สูตรพื้นฐานจำนวน 3 สูตร และศึกษาคุณภาพทางประสาทสัมผัสในด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส (ความเรียบเนียน) และความชอบโดยรวม ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าเฉลี่ยคุณภาพทางประสาทสัมผัสและค่าความแตกต่างของสูตรพื้นฐานของไอศกรีมนมจำนวน 3 สูตร

คุณภาพทางประสาทสัมผัส	ค่าเฉลี่ยคุณภาพทางประสาทสัมผัส		
	สูตร 1	สูตร 2	สูตร 3
ลักษณะปรากฏ	7.96 ± 1.54 ^b	7.70 ± 0.76 ^a	7.50 ± 1.24 ^a
สี ^{ns}	7.15 ± 1.78 ^{ns}	7.67 ± 0.83 ^{ns}	7.50 ± 1.01 ^{ns}
กลิ่น	6.92 ± 1.33 ^b	7.62 ± 0.77 ^a	7.72 ± 1.22 ^a
รสชาติ	7.15 ± 1.23 ^b	7.92 ± 0.80 ^a	7.75 ± 1.51 ^a
เนื้อสัมผัส	6.40 ± 1.37 ^b	8.12 ± 0.82 ^a	7.80 ± 1.45 ^a
ความชอบโดยรวม	6.87 ± 1.13 ^b	8.02 ± 0.69 ^a	7.67 ± 1.37 ^a

หมายเหตุ : ตัวอักษรในแนวนอนที่ต่างกัน หมายถึง ค่าที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

ns หมายถึง ค่าที่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระดับ 0.05

จากตารางที่ 2 ผลการศึกษาสูตรพื้นฐานไอศกรีมนม 3 สูตร พบว่า คะแนนความชอบด้านสีของไอศกรีมทั้ง 3 สูตร ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทาง

สถิติระดับ 0.05 และผู้ชิมให้การยอมรับสูตรที่ 2 ในด้านลักษณะปรากฏ สี รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมสูงที่สุด มีค่าเฉลี่ยคือ 7.70 7.67 7.92 8.12

และ 8.02 ตามลำดับ อยู่ในระดับความชอบปานกลาง และชอบมาก ส่วนสูตรที่ 3 ผู้ชิมให้การยอมรับในด้านกลิ่นสูงที่สุด มีค่าเฉลี่ย 7.72 อยู่ในระดับความชอบปานกลาง โดยสูตรที่ 2 และสูตรที่ 3 ความชอบในด้านลักษณะปรากฏ รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม ไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 ดังนั้นผู้ทดลองจึงเลือกสูตรที่ 2 เป็นสูตรพื้นฐานสำหรับพัฒนาไอศกรีมต่อไป เนื่องจากไอศกรีมมีเนื้อสัมผัสที่เนียนนุ่ม รสหวานกำลังดี ทำให้ผู้ชิมให้คะแนนโดยรวมสูงที่สุด

3.2 ผลศึกษาองค์ประกอบทางเคมีในอกไก่ต้ม

นำอกไก่ต้มขึ้นและอกไก่ต้มปั่นวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ความชื้น ไขมัน โปรตีน คาร์โบไฮเดรต กากใย และเถ้า ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางเคมีในอกไก่ขึ้นและอกไก่ปั่น

องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณในหน่วยบริโภค 100 กรัม	
	อกไก่ขึ้น	อกไก่ปั่นใสไอศกรีม
ความชื้น	68.74±0.20 ^a	67.91±0.41 ^b
ไขมัน	1.72±0.27 ^a	0.66±0.07 ^b
โปรตีน ^{ns}	27.41±0.10	27.42±0.36
คาร์โบไฮเดรต	0.01±0.12 ^b	2.61±0.79 ^a
กากใย ^{ns}	1.24±0.14	1.19±0.24
เถ้า	0.88±0.00 ^a	0.20±0.00 ^b

หมายเหตุ : ตัวอักษรในแนวนอนที่ต่างกัน หมายถึง ค่าที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 และ ns หมายถึง ค่าที่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

จากตารางที่ 3 พบว่า ปริมาณโปรตีนและกากใยของอกไก่ทั้ง 2 ประเภทไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 แต่ปริมาณความชื้น ไขมัน และเถ้ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 โดยอกไก่ขึ้นมีปริมาณความชื้น ไขมัน

และเถ้าสูงกว่าอกไก่ปั่นที่เตรียมไว้สำหรับทำไอศกรีม มีค่าร้อยละ 68.74, 1.72 และ 0.88 ตามลำดับ ในขณะที่ปริมาณคาร์โบไฮเดรตของอกไก่ปั่นสูงกว่าอกไก่ขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากการบีบเอาน้ำในอกไก่ปั่นที่เตรียมไว้สำหรับทำไอศกรีมออกเพื่อลดกลิ่นคาว ทำให้ปริมาณความชื้นในอกไก่ปั่นมีปริมาณลดลง ซึ่งจะส่งผลถึงปริมาณคาร์โบไฮเดรตที่เพิ่มขึ้นด้วย เห็นได้ว่าการบดและช่อกไก่ด้วยน้ำทั้งหมด 4 ครั้ง เพื่อนำกลิ่นความของไก่อกไม่ส่งผลต่อปริมาณโปรตีนซึ่งเป็นสารอาหารที่สำคัญสำหรับผู้ออกกำลังกาย ด้วยเหตุนี้อกไก่บดที่ช่อกด้วยน้ำ จึงเหมาะสมสำหรับเสริมในไอศกรีมในขั้นตอนต่อไป

3.3 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพ

3.3.1 ค่าความหนืดของน้ำไอศกรีมมิกซ์

นำน้ำไอศกรีมมิกซ์ที่บ่มนาน 24 ชั่วโมง มาวัดค่าความหนืดเพื่อศึกษาผลของปริมาณอกไก่ต่อค่าความหนืดของน้ำไอศกรีมมิกซ์ ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ค่าความหนืดของน้ำไอศกรีมมิกซ์

ตัวอย่าง	ค่าความหนืด (CPS)
น้ำไอศกรีมมิกซ์สูตรควบคุม	62.65±0.35 ^d
น้ำไอศกรีมมิกซ์เสริมอกไก่ร้อยละ 5	84.70±0.71 ^c
น้ำไอศกรีมมิกซ์เสริมอกไก่ร้อยละ 10	89.05±1.34 ^b
น้ำไอศกรีมมิกซ์เสริมอกไก่ร้อยละ 15	136.50±0.71 ^a

หมายเหตุ: ตัวอักษรในแนวตั้งที่ต่างกัน หมายถึง ค่าที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

จากตารางที่ 4 พบว่า ค่าความหนืดของน้ำไอศกรีมมิกซ์เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 เมื่อเปรียบเทียบกับสูตรควบคุม ปริมาณอกไก่ที่เพิ่มขึ้นค่าความหนืดของน้ำไอศกรีมมิกซ์เพิ่มขึ้นด้วย

ตัวอย่าง	ค่าโอเวอร์รัน (ร้อยละ)	ค่าเนื้อสัมผัส (g force)
ไอศกรีมสูตรควบคุม	38.16±5.20 ^d	18,685±2,003.23 ^c
เสริมอกไก่ร้อยละ 5	59.53±3.88 ^c	40,257±64.35 ^a
เสริมอกไก่ร้อยละ 10	108.05 ±3.07 ^b	34,584±878.93 ^b
เสริมอกไก่ร้อยละ 15	118.49±0.14 ^a	31,750±33870 ^b

โดยน้ำไอศกรีมมิกซ์เสริมอกไก่ที่ระดับร้อยละ 15 มีความหนืดสูงที่สุดคือ 136.50 CPS และน้ำไอศกรีมมิกซ์สูตรควบคุม (ไม่เสริมอกไก่) มีความหนืดน้อยที่สุดคือ 62.65 CPS ซึ่งเห็นได้ว่าปริมาณอกไก่ส่งผลต่อค่าความหนืดของน้ำไอศกรีมมิกซ์ ปริมาณอกไก่ที่เพิ่มขึ้นค่าความหนืดของไอศกรีมจึงเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากอกไก่ที่เสริมในน้ำไอศกรีมส่งผลให้น้ำไอศกรีมมีคุณสมบัติคล้ายกับเจล ส่งผลให้ความหนืดของไอศกรีมเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ [7] ที่ศึกษาอิทธิพลของ Soy Protein Isolate ต่อลักษณะทางกายภาพและประสาทสัมผัสของไอศกรีม พบว่าความหนืดของน้ำไอศกรีมเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ Soy Protein Isolate เพิ่มขึ้น และ [8] ที่ศึกษาปริมาณน้อยหน่าที่เหมาะสมในผลิตภัณฑ์ไอศกรีม พบว่าปริมาณน้อยหน่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความหนืดของน้ำไอศกรีมเพิ่มขึ้นเช่นกัน ซึ่งค่าความหนืดที่เพิ่มขึ้นอาจจะเกิดจากองค์ประกอบของน้อยหน่ามีสารจำพวกแป้งและน้ำตาลเป็นองค์ประกอบอยู่จำนวนมาก ซึ่งมีผลต่อความหนืดของส่วนผสมไอศกรีม และเมื่อเพิ่มปริมาณของน้อยหน่ามากขึ้นจะต้องใช้แรงมากยิ่งขึ้นในการทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ จึงทำให้ความหนืดของส่วนผสมไอศกรีมเพิ่มขึ้นด้วย

3.3.2 ค่าโอเวอร์รันและลักษณะเนื้อสัมผัสของไอศกรีม

นำไอศกรีมที่ปั่นแข็งและแช่ในช่องแช่แข็งนาน 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปวัดค่าโอเวอร์รันและเนื้อสัมผัสเพื่อศึกษาปริมาณอกไก่ต่อค่าโอเวอร์รันและเนื้อสัมผัสของไอศกรีม ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ค่าโอเวอร์รันและลักษณะเนื้อสัมผัสของไอศกรีมนม

หมายเหตุ: ตัวอักษรในแนวดังที่ต่างกัน หมายถึง ค่าที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

จากตารางที่ 5 พบว่า ค่าโอเวอร์รันของไอศกรีมเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 เมื่อเปรียบเทียบกับสูตรควบคุม ปริมาณอกไก่ที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่าโอเวอร์รันของไอศกรีมเพิ่มขึ้นด้วย โดยไอศกรีมเสริมอกไก่ที่ระดับร้อยละ 15 มีค่าโอเวอร์รันสูงที่สุดเท่ากับร้อยละ 118.49 และไอศกรีมสูตรควบคุม (ไม่เสริมอกไก่) มีค่าโอเวอร์รันน้อยที่สุดคือ ร้อยละ 38.16 เนื่องจากการเพิ่มปริมาณอกไก่เป็นการเพิ่มปริมาณของแข็งทั้งหมด (total solids) แก่ไอศกรีม ซึ่งของแข็งทั้งหมด (total solids) นี้จะไปแทนที่น้ำในไอศกรีม ส่งผลต่อค่าโอเวอร์รันเพิ่มขึ้น [9] ตามปริมาณของอกไก่ที่เพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของค่าโอเวอร์รันนี้ ทำให้ไอศกรีมมีเนื้อสัมผัสเนียนนุ่มและมีผลึกน้ำแข็งที่เล็กลง [10]

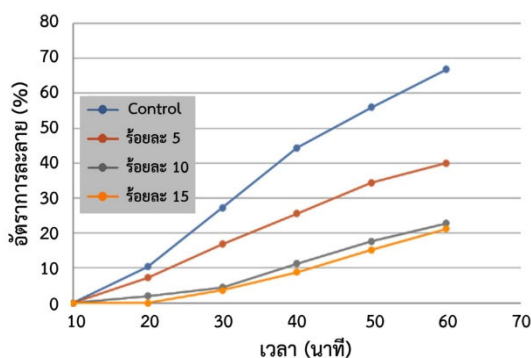
ค่าเนื้อสัมผัสของไอศกรีมเสริมอกไก่ที่ศึกษานั้นคือ ค่าความแน่นแข็งของเนื้อไอศกรีม ซึ่งค่าเนื้อสัมผัสของไอศกรีมมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 โดยไอศกรีมเสริมอกไก่ที่ระดับ ร้อยละ 5 มีค่าเนื้อสัมผัสสูงที่สุดคือ 40,257 g force ส่วนที่ระดับร้อยละ 10 และ 15 มีค่าเนื้อสัมผัสที่ไม่แตกต่างกันมีค่าอยู่ที่ 34,584 g force และ 31,750 g force ตามลำดับ และไอศกรีมสูตรควบคุม (ไม่เสริมอกไก่) มีค่าเนื้อสัมผัสที่น้อยที่สุดคือ 18,685 g force

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างไอศกรีมสูตรควบคุม (ไม่เสริมอกไก่) และไอศกรีมเสริมอกไก่ทั้ง 3 ระดับพบว่า ไอศกรีมเสริมอกไก่มีค่าความแน่นแข็งสูงกว่าไอศกรีมสูตรควบคุม เนื่องจากการเพิ่มปริมาณอกไก่เป็นการเพิ่มปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total Solids) แก่ไอศกรีม ซึ่งของแข็งทั้งหมดนี้ส่งผลให้เนื้อไอศกรีมเหนียวและหนักเพิ่มขึ้นมากถึงร้อยละ 40-42 [9]

เมื่อเปรียบเทียบค่าความแน่นแข็งของไอศกรีมเสริมอกไก่ทั้ง 3 ระดับ พบว่า ไอศกรีมเสริมอกไก่ที่ระดับร้อยละ 5 มีค่าความแน่นแข็งสูงสุดและมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณอกไก่เพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณอกไก่ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ไอศกรีมมีค่าโอเวอร์รันเพิ่มขึ้น ซึ่งค่าโอเวอร์รัน คือ การเพิ่มของปริมาตรเนื่องจากขณะปั่น ไอศกรีมมีการผสมเอาอากาศเข้าไปในเนื้อไอศกรีม การผสมอากาศมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของส่วนผสม หากอากาศมากเกินไปเนื้อไอศกรีมจะเบาโปร่งไม่น่ารับประทาน แต่ถ้ามีอากาศน้อยไปเนื้อจะแน่นหรือหนัก [11] ด้วยเหตุนี้ค่าโอเวอร์รันที่เพิ่มขึ้นนี้จึงมีผลให้ไอศกรีมมีค่าความแน่นแข็งลดลง [9] ทำให้ไอศกรีมเสริมอกไก่ที่ระดับร้อยละ 15 จึงมีค่าความแน่นแข็งน้อยที่สุด

3.3.3 อัตราการละลายของไอศกรีม

วัดอัตราการละลายของไอศกรีม โดยวางไอศกรีมที่อุณหภูมิห้องนาน 60 นาที จากนั้นชั่งน้ำหนักของไอศกรีมที่ละลายทุก ๆ 10 นาที แล้วนำมาคำนวณอัตราการละลายและสร้างแผนภูมิเปรียบเทียบเพื่อศึกษาระดับของอกไก่ที่ส่งผลต่ออัตราการละลายของไอศกรีม ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 อัตราการละลายของไอศกรีมสูตรควบคุมและเสริมอกไก่ที่ระดับร้อยละ 5 10 และ 15

จากรูปที่ 1 พบว่า เมื่อวางไอศกรีมจนครบ 60 นาที ไอศกรีมควบคุม มีอัตราการละลายสูงที่สุดคือร้อยละ 67 ที่เวลา 60 นาที จากนั้นไอศกรีมเสริมอกไก่จะมี

อัตราการละลายที่ลดลงเมื่อปริมาณอกไก่เพิ่มขึ้น ซึ่งไอศกรีมเสริมอกไก่ที่ระดับร้อยละ 15 มีอัตราการละลายที่น้อยที่สุดคือร้อยละ 21 ที่เวลา 60 นาที เห็นได้ว่าปริมาณอกไก่ส่งผลให้อัตราการละลายของไอศกรีมลดลง ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณอกไก่ที่เพิ่มขึ้น ทำให้ไอศกรีมมีค่าโอเวอร์รันเพิ่มขึ้น ซึ่งค่าโอเวอร์รันเพิ่มขึ้นนี้ทำให้จุดหลอมเหลวของไอศกรีมลดลง [9] ไอศกรีมเสริมอกไก่ที่ระดับร้อยละ 15 จึงมีอัตราการละลายน้อยที่สุด

3.3.4 ค่าสีของไอศกรีม

วัดค่าสีของไอศกรีมโดยนำไอศกรีมที่ผ่านการแช่แข็งแล้วมาวัดค่าสีด้วยเครื่อง Hunter Lab วัดค่าความสว่าง (L^*) ค่าความเป็นสีแดง-เขียว (a^*) และค่าความเป็นสีเหลือง-น้ำเงิน (b^*) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสีไอศกรีมเมื่อปริมาณอกไก่เพิ่มขึ้น ผลการวัดค่าสีดังแสดงในตารางที่ 6

จากตารางที่ 6 พบว่า เมื่อปริมาณอกไก่เพิ่มมากขึ้น ค่า L^* a^* และ b^* ของไอศกรีมมีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 พบว่า ไอศกรีมสูตรควบคุม มีค่าความสว่าง (L^*) สูงที่สุด คือ 87.63 ไอศกรีมเสริมอกไก่ที่ระดับร้อยละ 5 และ 10 มีค่าความสว่างไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 มีค่าอยู่ที่ 87.09 และ 87.10 และไอศกรีมเสริมอกไก่ที่ระดับร้อยละ 15 มีค่าความสว่าง (L^*) น้อยที่สุด คือ 86.24 ไอศกรีมสูตรควบคุม มีค่าความเป็นสีแดง (a^*) สูงที่สุด คือ 5.66 ส่วน ไอศกรีมเสริมอกไก่ทั้ง 3 ระดับ คือ ร้อยละ 5, 10 และ 15 มีค่าความเป็นสีแดง (a^*) ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 โดยมีค่าอยู่ที่ 5.20, 5.08 และ 4.79 ตามลำดับ ส่วนค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) ของไอศกรีมสูตรควบคุม สูตรเสริมอกไก่ที่ระดับร้อยละ 5 และ 10 ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 อยู่ที่ 20.72, 20.53 และ 20.54 ตามลำดับ ส่วนไอศกรีมเสริมอกไก่ที่ระดับร้อยละ 15 มีค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) น้อยที่สุดคือ 19.91 ทั้งนี้เนื่องจากอกไก่ที่ใช้เสริมในไอศกรีมเป็นอกไก่ต้ม ซึ่งมีสีขาวขุ่นออกไปทางเหลืองหม่น

ส่วนไอศกรีมที่ใช้ทดลองเป็นไอศกรีมนมกลิ่นวนิลา ซึ่งมีสีเหลืองอ่อนที่สว่างจากไข่แดง สีของกลิ่นวนิลา และนมสด ด้วยเหตุนี้เมื่อเสริมอวก์ลงในไอศกรีมทำให้ค่าความ

สว่าง (L^*) ค่าความเป็นสีแดง (a^*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) ของไอศกรีมลดลง

ตารางที่ 6 ค่าสีของไอศกรีมนมเสริมอวก์

ตัวอย่าง	L^*	a^*	b^*
สูตรควบคุม	87.63±0.21 ^a	5.66±0.50 ^a	20.72±0.24 ^a
เสริมอวก์ร้อยละ 5	87.09±0.10 ^b	5.20±0.70 ^b	20.53±0.21 ^a
เสริมอวก์ร้อยละ 10	87.10±0.10 ^b	5.08±0.14 ^b	20.54±0.08 ^a
เสริมอวก์ร้อยละ 15	86.24±0.07 ^c	4.79±1.55 ^b	19.91±0.28 ^b

หมายเหตุ: ตัวอักษรในแนวตั้งที่ต่างกัน หมายถึง ค่าที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

ตารางที่ 7 ค่าเฉลี่ยคุณภาพทางประสาทสัมผัสและค่าความแตกต่างของไอศกรีมนมเสริมอวก์ทั้ง 3 ระดับ

คุณภาพทางประสาทสัมผัส	ค่าเฉลี่ยคุณภาพทางประสาทสัมผัส			
	สูตรควบคุม	ร้อยละ 5	ร้อยละ 10	ร้อยละ 15
ลักษณะปรากฏ	7.45±0.99 ^b	7.70±0.88 ^{ab}	7.93±0.89 ^a	7.30±1.29 ^b
สี	7.85±0.98 ^{ab}	7.95±0.93 ^a	8.05±0.82 ^a	7.60±1.28 ^a
กลิ่น	7.68 ±1.00 ^{ab}	7.88±0.85 ^a	7.95±0.95 ^a	7.35±1.21 ^b
รสชาติ	7.40±1.17 ^{ab}	7.83±0.87 ^a	7.75±0.95 ^a	7.08±1.16 ^b
เนื้อสัมผัส (ความเรียบเนียน)	7.32± 1.39 ^{ab}	7.58±1.11 ^a	7.67±1.11 ^a	6.95±1.48 ^b
ความชอบโดยรวม	7.53±0.99 ^{ab}	7.73±0.85 ^a	7.85±0.92 ^a	6.98±1.20 ^b

หมายเหตุ: ตัวอักษรในแนวนอนที่ต่างกันหมายถึง ค่าที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

3.3.5 ผลการศึกษาคุณภาพทางประสาทสัมผัสของไอศกรีม

ศึกษาคุณภาพทางประสาทสัมผัสของไอศกรีมเสริมอวก์ 3 ระดับ คือ ร้อยละ 5, 10 และ 15 เปรียบเทียบกับสูตรควบคุม โดยศึกษาด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส (ความเรียบเนียน) และความชอบโดยรวม เพื่อคัดเลือกไอศกรีมเสริมอวก์ในปริมาณผู้ชิมให้การยอมรับมากที่สุด ผลการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส ดังแสดงในตารางที่ 7

จากตารางที่ 7 แสดงผลการศึกษาคุณภาพทางประสาทสัมผัสของไอศกรีมเสริมอวก์ 3 ระดับ พบว่าคุณภาพทางประสาทสัมผัสของไอศกรีมเสริมอวก์ทั้ง 3 ระดับมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 เมื่อเปรียบเทียบกับสูตรควบคุม โดยผู้ชิมให้

คะแนนความชอบของไอศกรีมเสริมอวก์ที่ระดับร้อยละ 10 สูงที่สุดในด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น เนื้อสัมผัส (ความเรียบเนียน) และความชอบโดยรวม โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 7.93, 8.05, 7.95, 7.67 และ 7.85 ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในระดับความชอบปานกลางและชอบมาก ไอศกรีมเสริมอวก์ที่ระดับร้อยละ 5 ผู้ชิมในคะแนนความชอบสูงที่สุดในด้านรสชาติมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 7.83 อยู่ในระดับชอบปานกลาง ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณอวก์ที่เสริมลงในไอศกรีมส่งผลต่อเนื้อของไอศกรีม โดยเมื่อปริมาณอวก์เพิ่มขึ้นไอศกรีมก็จะมีเนื้อที่หยาบและแข็งมากขึ้น มีสี กลิ่น และรสชาติที่ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรควบคุม ทำให้ไอศกรีมเสริมอวก์ที่ระดับร้อยละ 15 มีเนื้อสัมผัสหยาบและแข็งที่สุด มีสี กลิ่น และรสชาติที่อ่อนที่สุด ผู้ชิมจึงให้คะแนนความชอบน้อยที่สุด คืออยู่

ในระดับที่ขอบปานกลางถึงขอบเล็กน้อย ไอศกรีมเสริมอกไก่ที่ระดับร้อยละ 5 และ 10 เนื้อสัมผัสมีความหนาแน่น ความแข็ง สี กลิ่น และรสชาติที่ใกล้เคียงกับสูตรควบคุม แต่การเสริมอกไก่ช่วยให้ไอศกรีมมีรสชาติที่เข้มข้นกว่า สูตรควบคุมทำให้ผู้ชิมจึงให้ผลการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสในทุกด้านที่สูงกว่าสูตรควบคุม ส่วนไอศกรีมเสริมอกไก่ที่ระดับร้อยละ 5 และ 10 มีคุณภาพทางประสาทสัมผัสที่ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 โดยผู้ชิมให้คะแนนความชอบในด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น เนื้อสัมผัส (ความเรียบเนียน) และความชอบโดยรวมในระดับความชอบปานกลาง แต่ไอศกรีมเสริมอกไก่ที่ระดับร้อยละ 10 ผู้ชิมให้คะแนนความชอบด้านสีในระดับชอบมาก เนื่องจากไอศกรีมเสริมอกไก่ที่ระดับร้อยละ 10 เป็นระดับที่ให้ค่าความหนืด (89.05 CPS) ค่าเนื้อสัมผัส (34,584 g force) อัตราการละลาย (ร้อยละ 23) และค่าโอเวอร์รัน (ร้อยละ 108) อยู่ในช่วงที่เหมาะสมที่สุด และไม่เกินมาตรฐานตามของ Standard Ice Cream ที่กำหนดค่าโอเวอร์รันของไอศกรีมประเภทนี้ให้ไม่เกินร้อยละ 120 [12] หากไอศกรีมมีค่าโอเวอร์รันน้อยเกินไปจะแน่นหรือหนัก มีจุดหลอมเหลวสูง ไอศกรีมจึงละลายเร็ว แต่หากค่าโอเวอร์รันมากเกินไปเนื้อไอศกรีมจะโปร่งเบาไม่น่ารับประทาน ซึ่งสอดคล้องกับการประเมินผลทางประสาทสัมผัสที่พบว่า ไอศกรีมเสริมอกไก่ที่ระดับร้อยละ 10 ได้รับคะแนนความชอบในด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น เนื้อสัมผัส (ความเรียบเนียน) เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมสูงที่สุด

4. สรุป

4.1 ผลการศึกษาสูตรพื้นฐานไอศกรีมนม 3 สูตรพบว่าผู้ชิมให้การยอมรับสูตรที่ 2 ในด้านลักษณะปรากฏ สี รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมสูงที่สุด มีค่าเฉลี่ยคือ 7.70 7.67 7.92 8.12 และ 8.02 ตามลำดับ อยู่ในระดับความชอบปานกลางถึงชอบมาก ส่วนสูตรที่

3 ผู้ชิมให้การยอมรับในด้านกลิ่นสูงที่สุดมีค่าเฉลี่ย 7.72 อยู่ในระดับความชอบปานกลาง เมื่อนำมาวิเคราะห์ความแปรปรวน เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยพบว่าด้านลักษณะปรากฏ กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ ระดับ 0.05 ด้วยเหตุนี้จึงเลือกไอศกรีมนมสูตรที่ 2 สำหรับศึกษาปริมาณที่เหมาะสมของอกไก่ต่อไป

4.2 ผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีในอกไก่ต้มปั่นสำหรับเสริมในไอศกรีม พบว่าอกไก่ต้มปั่นมีปริมาณความชื้น ไขมัน และเถ้าน้อยกว่าอกไก่ต้มชิ้น ส่วนปริมาณโปรตีนไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 และผลการศึกษาปริมาณที่เหมาะสมของอกไก่ที่เสริมในไอศกรีมนม 3 ระดับ คือ ร้อยละ 5, 10 และ 15 ของน้ำหนักส่วนผสมทั้งหมด เปรียบเทียบกับสูตรควบคุมพบว่า เมื่อปริมาณอกไก่เพิ่มขึ้นส่งผลให้น้ำไอศกรีมมีกัมขมิ้นมีความหนืดและค่าโอเวอร์รันของไอศกรีมเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ส่วนค่าเนื้อสัมผัส อัตราการละลายค่าความสว่าง (L^*) ค่าความเป็นสีแดง (a^*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 เมื่อปริมาณอกไก่เพิ่มขึ้น เมื่อทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัสพบว่าผู้ชิมให้การยอมรับไอศกรีมเสริมอกไก่ระดับร้อยละ 10 ในด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมมีค่าเฉลี่ย 7.93 8.05 7.95 7.67 และ 7.85 ตามลำดับ อยู่ในระดับความชอบปานกลางถึงชอบมาก เมื่อนำมาวิเคราะห์ความแปรปรวน และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยพบว่าด้าน สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมสูงที่สุด

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากงบประมาณ
เงินรายได้ปี 2562 จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] D. P. Donhowe and R. W. Hartel, "Recrystallization of ice during bulk storage of ice cream," *International Dairy Journal*, pp.1209-1221, Feb. 2017.
- [2] J. Saengmanee, *Value of Thai Chicken Meat*. 1st ed. Bangkok: Office of Research Fund, 2009.
- [3] J. Burakarakorn, P. Pinthong, M. Rueangdit and P. Dangsungnoen, "Crispy low-fat chicken breast food products, ready to consume," *Journal of Department of Science Service*, vol. 68, no. 211, pp. 24-25, 2019.
- [4] O. Chairod, *Milk production technology Department of Food*, 1st ed. Bangkok: Ramkhamhaeng University, 2001.
- [5] The Association of Official Analytical Chemists, 17th ed., *Official Method of Analysis of AOAC International*, 2000.
- [6] K. Chanaasit, P. Mongkhon, and N. Daengsangwan, "The development of alovera ice cream yogurt Research report," *Research report. Phra Nakhon Si Ayutthaya*, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon, Thailand, 2014.
- [7] A. Akesowan, "Influence of Soy Protein Isolate on Physical and Sensory Properties of Ice Cream," *Thai Journal of Agricultural*, vol. 101, pp. 713-727, Feb. 2017.
- [8] P. Noiduang and R. Wongwan, "Development of ice cream form from apple custard using powder. The mucus from the basil seeds is a stabilizer," *Journal of Food Technology Siam University*, vol. 5, no. 1, pp. 36-46, 2010.
- [9] Q. A, Syed, S. Anwar, R. Shukat and T. Zahoor, "Effects of different ingredients on texture of ice cream," *Journal of Nutritional Health & Food Engineering*, vol. 8, no. 6, pp. 422-435, 2018.
- [10] V. Tomer and A. Kumar, "Development of High Protein Ice-Cream Using Milk Protein Concentrate," *Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology*, vol. 6, no. 5, pp. 71-74, 2013.
- [11] N. Chaviwan, "Development of Dok Sesan ice cream products," *Research report. Phranakhon Si Ayutthaya*, Phranakhon Si Ayutthaya: Rajabhat University, Thailand, 2013.
- [12] P. Suphawitphatthana. (2019, February 20). Defense College of Milk and Products Technology. [Online]. Available: <http://www.eLearning.psu.ac.th>

<http://journal.rmutp.ac.th/>

การพัฒนาผลิตภัณฑ์ผักไทยกรอบชนิดแห้ง

จินตนา เชื้อนพรัตน์¹ วรายศ เจริญยิ่ง¹ ดวงกมล แสงธีรกิจ¹ ปาริสุทธิ์ เฉลิมชัยวัฒน์^{1*}
และ พรราวตา จันทโร²

¹ สาขาอาหารและโภชนาการ ภาควิชาคหกรรมศาสตร์ คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

² สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี

¹ 50 ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร จังหวัดกรุงเทพฯ 10900

² 272 ตำบลขุนทะเล อำเภอเมือง จังหวัดสุราษฎร์ธานี 84100

รับบทความ 27 กรกฎาคม 2563 แก้ไขบทความ 1 พฤศจิกายน 2563 ตอรับบทความ 28 ธันวาคม 2563

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์ผักไทยกรอบชนิดแห้ง ซึ่งผลิตจากเส้นจันท์นุ่น เค้าหู้เหลือง กุ้งแห้ง กุ้งแช่ ถั่วลิสง ที่ผ่านการปรุงสุกและอบแห้ง ผสมกับซอสผักไทย นำไปขึ้นรูปแห้ง แล้วอบแห้ง การศึกษาเริ่มจากผลิตผักไทยกรอบชนิดแห้งที่มีซอสผักไทยแตกต่างกัน 3 สูตร (A, B และ C) ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัส โดยวิธี 9-Point Hedonic Scale พบว่าผักไทยกรอบชนิดแห้งที่ผลิตจากซอสผักไทยสูตร A ได้รับคะแนนความชอบสูงสุดในด้านลักษณะปรากฏ (7.36) รสชาติ (7.56) และความชอบโดยรวม (7.68) จากนั้นออกแบบการทดลองแบบผสม (Mixture Design) เพื่อศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของวัตถุดิบหลัก 3 ชนิด ได้แก่ เค้าหู้เหลือง (ร้อยละ 70-90) กุ้งแห้ง (ร้อยละ 10-15) และกุ้งแช่ (ร้อยละ 13-25) ต่อคุณภาพทางกายภาพ เคมี และประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ พบว่าการเพิ่มปริมาณเค้าหู้เหลืองส่งผลให้ค่าความสว่าง (L^*) และค่าความแข็งของผลิตภัณฑ์ลดลง การเพิ่มปริมาณของกุ้งแห้งส่งผลให้คะแนนความชอบโดยรวมลดลง อัตราส่วนที่เหมาะสมของเค้าหู้เหลือง กุ้งแห้ง และกุ้งแช่ คือ ร้อยละ 72, 13 และ 15 ตามลำดับ ซึ่งในสูตรนี้มีคะแนนความชอบทางด้านประสาทสัมผัสในทุกคุณลักษณะสูงที่สุด อยู่ในช่วง 6.86-7.24 (ชอบเล็กน้อยถึงชอบปานกลาง) ผักไทยกรอบชนิดแห้งที่พัฒนาได้ มีค่าปริมาณน้ำอิสระ และค่าความแข็งเท่ากับ 0.24 และ 7.00 นิวตัน ตามลำดับ นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์ผักไทยกรอบชนิดแห้งประกอบด้วยความชื้นร้อยละ 9.17 (ความชื้นฐานเปียก) ปริมาณคาร์โบไฮเดรต ไขมัน เกลือ และเส้นใยหยาบ เท่ากับ ร้อยละ 50.04, 30.80, 15.82, 3.34 และ 1.98 (ความชื้นฐานแห้ง) ตามลำดับ ค่าพลังงานที่วิเคราะห์จากเครื่อง Bomb Calorimeter เท่ากับ 582.10 กิโลแคลอรีต่อ 1 กรัม (10 ชิ้น) และมีราคาต้นทุน เท่ากับ 21.60 บาทต่อ 1 กรัม (80 กรัม)

คำสำคัญ : ผักไทยกรอบชนิดแห้ง; เค้าหู้เหลือง; กุ้งแห้ง; กุ้งแช่; การออกแบบการทดลองแบบผสม

<http://journal.rmutp.ac.th/>

Development of Pad Thai Crispy Bar

Jintana Chueanopparat¹ Varayos Charoenying¹ Duangkamon Sangteerakij¹
Parisut Chalermchaiwat^{1*} and Prawta Chantaro²

¹ Food and Nutrition Program, Department of Home Economics, Faculty of Agriculture, Kasetsart University

² Food Science and Technology, Faculty of Science and Technology, Suratthani Rajabhat University

¹ 50 Ngam Wong Wan Road, Lat Yao, Chatuchak, Bangkok 10900

² 272 Khun Taleay, Muang, Surat Thani 84100

Received 27 July 2020; Revised 1 November 2020; Accepted 28 December 2020

Abstract

The aim of this research was to develop Pad Thai crispy bar, which is made from rice noodle (Chanthaburi's noodle), tofu, dried shrimp, garlic chives and peanut that have been cooked and dried. Mixed with Pad Thai sauce, then forming into a bar and dried. The study started with produced Pad Thai crispy bar made from three formula of Pad Thai sauce (A, B and C). Sensory evaluation by using 9-point hedonic scale showed that the highest liking score of appearance (7.36), taste (7.56) and overall liking (7.68) were obtained from formula A. Mixture design was used to optimize the formula of the Pad Thai crispy bar. The effect of three variables: tofu (70-90%) dried shrimp (10-15%) and garlic chives (13-25%) on the physical, chemical and sensory qualities of the product were investigated. The results showed that increasing the tofu decreased the lightness (L^*) and hardness values of the product. Increasing the dried shrimp decreased the overall liking score. Optimum formula of tofu, dried shrimp and garlic chives was 72%, 13% and 15%, respectively. At this formula had the highest score of all sensory attributes were in the range of 6.86-7.24 (like slightly – like moderately). The developed Pad Thai crispy bar had the value of a_w and hardness value 0.24 and 7.00 N, respectively. In addition, the developed product consisted of 9.17% moisture (wet weight basis), total carbohydrate, fat, ash and crude fiber which were 50.04%, 30.80%, 15.82%, 3.34% and 1.98% (dry weight basis), respectively. The energy value determined by Bomb calorimeter which were 582.10 Kcal per serving (10 pieces) and the cost of Pad Thai crispy bar was 21.60 bath per serving (80 g).

Keywords : Pad Thai Crispy bar; Tofu; Dried shrimp; Garlic chives; Mixture design

** Corresponding Author. Tel.: +668 1448 4577, E-mail Address: fagrpsch@ku.ac.th*

1. บทนำ

“ผัดไทย” หรือ “ก๋วยเตี๋ยวผัดไทย” เป็นอาหารจานเดียวประเภทเส้นเป็นที่รู้จักและได้รับความนิยมเป็นอันดับหนึ่งจากชาวต่างชาติที่นักท่องเที่ยวและร้านอาหารไทยในต่างประเทศอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน [1]-[3] ผัดไทยเป็นก๋วยเตี๋ยวผัดที่มีรสชาติเป็นเอกลักษณ์เฉพาะตัว เป็นสัญลักษณ์แสดงความเป็นไทยที่นักท่องเที่ยวต้องแสวงหาเพื่อบริโภคเมื่อมาประเทศไทย ด้วยรสชาติกลมกล่อมที่ได้จากน้ำซอสผัดไทย ซึ่งมีการผสมผสานกันอย่างลงตัวระหว่างรสเปรี้ยว เค็ม หวาน และเนื้อสัมผัสที่แตกต่างกันของวัตถุดิบที่นำมาใช้ทำให้เป็นหนึ่งในอาหารจานเส้นที่ครองใจทั้งชาวไทยและชาวต่างชาติได้ไม่ยากนัก [2]-[5]

ผัดไทย มีต้นกำเนิดในสมัยจอมพล ป. พิบูลสงคราม เป็นหนึ่งในการรณรงค์ให้คนไทยหันมาบริโภคก๋วยเตี๋ยวแทนข้าวซึ่งมีราคาแพงในช่วงสงคราม แต่เนื่องจากก๋วยเติวนั้นเป็นอาหารจีน จึงมีการดัดแปลงรสชาติและวัตถุดิบให้สอดคล้องกับอาหารไทยมากขึ้น โดยมีวัตถุดิบหลัก คือ เส้นจันท์ มีลักษณะเหนียวนุ่มและผลิตมาจากจังหวัดจันทบุรีใช้แทนเส้นก๋วยเตี๋ยวปรุงรสชาติให้มีรสเปรี้ยว เค็ม หวาน กลมกล่อมด้วยน้ำซอสผัดไทยที่มีการเคี่ยวรวมกันระหว่างน้ำมะขามเปียก น้ำปลา และ น้ำตาลปี๊ป นอกจากนั้นยังมีส่วนผสมอื่นซึ่งเป็นวัตถุดิบที่หาได้ง่ายภายในประเทศ ได้แก่ ถั่วงอก เต้าหู้เหลือง กุ้งแห้ง ไข่ ไก่กุนเชียง และห้วปลี ซึ่งแต่เดิมจะใช้เนื้อสัตว์เพียงแค่กุ้งแห้งเท่านั้น ไม่มีการใช้เนื้อหมูซึ่งเป็นเนื้อสัตว์ที่นิยมใช้ในอาหารจีน [2], [5] และนิยมนำมารับประทานคู่กับผักเคียง เช่น ห้วปลี ถั่วงอก และ ไก่กุนเชียง เป็นต้น การผลิตผัดไทยนั้นมักจะปรุงสดใหม่พร้อมรับประทานทันที ทำให้มีอายุการเก็บรักษาสั้น ปัจจุบันจึงมีการพัฒนาผลิตภัณฑ์ผัดไทยเพื่อให้ปรุงประกอบง่ายขึ้น และยืดอายุการเก็บรักษา เช่น น้ำซอสผัดไทยปรุงสำเร็จ เครื่องปรุงผัดไทยผัดไทย เส้นผัดไทยแห้ง และก๋วยเตี๋ยวผัดไทยสำเร็จรูป วางจำหน่ายในท้องตลาด เป็นต้น [6], [7] แต่อย่างไรก็ตามผลิตภัณฑ์เหล่านี้ยังจำเป็นต้องมีขั้นตอนการนำมาปรุงประกอบ

อาหารก่อนยังไม่สามารถรับประทานได้ทันที วิธีการที่สามารถพัฒนาผลิตภัณฑ์ผัดไทยให้เก็บรักษาได้นานขึ้นพกพาได้สะดวก และพร้อมรับประทาน คือการพัฒนาผลิตภัณฑ์ให้อยู่ในรูปอาหารว่างและขนมขบเคี้ยว (Snack) ซึ่งเป็นอาหารกลุ่มที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก ผู้บริโภคทุกกลุ่มอายุมักนิยมรับประทานอาหารประเภทนี้ รวมถึงพฤติกรรมการบริโภคอาหารว่าง และขนมขบเคี้ยวเพื่อทดแทนอาหารหลัก (Snackification) ที่พบมากถึงขึ้นร้อยละ 45 และมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นทั่วโลกอย่างเห็นได้ชัด [8] เนื่องจากรับประทานได้ง่าย ลดระยะเวลาที่ใช้ในการรับประทานอาหารแต่ละมื้อลงและหาซื้อได้ง่าย ในปัจจุบันจึงมีการพัฒนาอาหารว่างและขนมขบเคี้ยวให้มีคุณค่าทางโภชนาการ ตลอดจนมีพลังงานเพียงพอที่จะทดแทนมื้อหลักได้ ซึ่งจะได้จากการสำรวจของสถาบันพัฒนาผู้ประกอบการการค้ายุคใหม่ [9] รายงานว่าในปี พ.ศ. 2562 ขนมขบเคี้ยวในรูปแบบของอาหารจานหลักจะได้รับความนิยมและมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น และจะมีการพัฒนาให้มีพลังงานเทียบเท่าอาหารจานหลักและมีประโยชน์ต่อสุขภาพซึ่งเป็นอีกหนึ่งในธุรกิจอาหารที่น่าสนใจ

ดังนั้นในการศึกษารั้วนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์ผัดไทยในรูปแบบของอาหารอบกรอบชนิดแท่งที่มีความสะดวกต่อการบริโภค และสามารถรับประทานทดแทนอาหารมื้อหลักได้ เป็นการสร้างความหลากหลายให้กับผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยว อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับผัดไทย และเป็นแนวทางในการผลิตและส่งออกผลิตภัณฑ์ผัดไทยที่มีรสชาติไทยแท้ให้กับชาวต่างชาติได้เข้าถึงง่ายขึ้นอีกด้วย

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 การศึกษาสูตรมาตรฐานในการผลิตผัดไทยกรอบชนิดแท่ง

2.1.1 การเตรียมวัตถุดิบ

2.1.1.1 เส้นจันท์ การเตรียมดัดแปลงตามวิธีการของ ดวงกมล [10] โดยนำเส้นจันท์ลวกทอดในน้ำมันที่ร้อนจัดจนเส้นจันท์พองตัว หลังจากนั้นดักขึ้นแล้วพักไว้

ให้สะเก็ดน้ำมัน เทลงภาตเกลี่ยให้กระจายแล้วนำไปเข้าตู้อบลมร้อนแบบภาตที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

2.1.1.2 เตาหู่เหลือง นำมาหั่นเป็นลูกเต๋ารูปร่าง 0.5x0.5 นิ้ว จากนั้นนำไปทอดที่ระดับไฟกลางจนมีสีเหลืองทองแล้วตักขึ้นพักไว้ให้สะเก็ดน้ำมัน เทลงภาตเกลี่ยให้กระจายแล้วนำไปเข้าตู้อบลมร้อนแบบภาตที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

2.1.1.3 กุยช่าย นำไปล้างน้ำสะอาดแล้วนำมาหั่นเป็นท่อนขนาด 1 นิ้ว หลังจากนั้นนำไปกระจายลงบนภาตแล้วอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนแบบภาตที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง

2.1.1.4 กุ้งแห้ง นำไปล้างด้วยน้ำสะอาด 4 ครั้ง หลังจากนั้นนำไปต้มด้วยน้ำเดือดจัดเป็นเวลา 2 นาที แล้วจึงนำมาสะเด็ดน้ำจนแห้งจากนั้นนำไปคั่วบนกระทะจนกุ้งแห้งขึ้นเงาแล้วจึงเทลงบนภาตเกลี่ยให้กระจายแล้วนำไปอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนแบบภาตที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

2.1.1.5 ถั่วลิสง นำไปล้างน้ำสะอาดแล้วนำไปคั่วเป็นเวลา 15 นาทีจนกระทั่งถั่วลิสงสุกดี จากนั้นนำไปตำหยาบด้วยครก

2.1.1.6 ขอสผัดไทย เตรียมขอสผัดไทยที่แตกต่างกัน 3 สูตร คือ ขอสสำเร็จรูปในท้องตลาด 2 ยี่ห้อ (A และ B) และสูตรขอสที่ผลิตเอง (C) ตามวิธีการของ นิรนาม [11] นำขอสผัดไทยแต่ละสูตร (A, B และ C) จำนวน 100 กรัม เติมน้ำมันและไข่ลงไป 20 กรัม คนส่วนผสมให้เข้ากัน เคี่ยวขอสด้วยไฟอ่อนจนงวดและทำการทดสอบด้วยวิธี Spoon Test เพื่อดูความเหนียวของขอสผัดไทยโดยการนำขอสผัดไทยหยดลงในน้ำเย็นจัด ขอสผัดไทยจะจับตัวกันดีไม่กระจายออกแล้วพักให้น้ำเย็นลงจะได้ขอสผัดไทยที่แตกต่างกัน 3 สูตรเพื่อนำไปผลิตผัดไทยกรอบชนิดแห้งในขั้นต่อไป

2.1.2 ขั้นตอนการผลิตผัดไทยกรอบชนิดแห้ง

ทำการแบ่งส่วนผสมออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นของแห้ง คือ เส้นจันท์ เตาหู่เหลือง กุยช่าย กุ้งแห้ง

และถั่วลิสง ส่วนที่เป็นของเหลว ได้แก่ ขอสผัดไทยชนิด A, B และ C โดยมีส่วนผสมผัดไทยกรอบชนิดแห้งแสดงดังตารางที่ 1

การผลิตผัดไทยกรอบชนิดแห้งเริ่มด้วยการนำน้ำขอสผัดไทยเทลงในอ่างผสมครึ่งละ 1/3 ของทั้งหมด หลังจากนั้นเทส่วนผสมของแห้งลงไปอ่างผสมที่ละ 1/3 เช่นกัน คลุกเคล้าส่วนผสมให้เข้ากันแล้วจึงค่อย ๆ เติมน้ำมันลงไปจนหมด นำไปขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดแท่งขนาด 4x2x2 ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยใช้น้ำหนักแท่งละ 8 กรัม นำไปอบต่อด้วยตู้อบลมร้อนแบบภาตที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วจึงนำมาพักให้คลายความร้อนจากนั้นนำไปเก็บรักษาในถุงพลาสติกใสชนิดโพลีเอทิลีน ที่อุณหภูมิห้อง (25±2 องศาเซลเซียส) ก่อนนำไปทดสอบทางประสาทสัมผัส

ตารางที่ 1 ปริมาณส่วนผสมของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตผัดไทยกรอบชนิดแห้ง

วัตถุดิบ	ปริมาณ (กรัม)
เส้นจันท์	50
ขอสผัดไทย	100
กุ้งแห้ง	5
กุยช่าย	5
เตาหู่เหลือง	20
ถั่วลิสง	60
เบะแซ	20
น้ำมันปาล์ม (สำหรับทอด)	200

2.1.3 การทดสอบทางประสาทสัมผัส

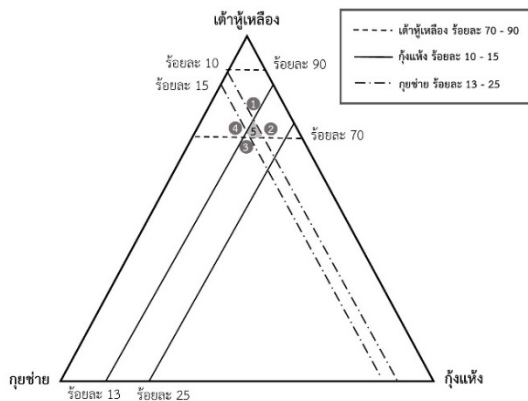
นำผัดไทยกรอบชนิดแห้งที่ผลิตได้จากข้อ 2.1.2 มาประเมินทางประสาทสัมผัส โดยวางแผนการทดลองแบบสุ่มในบล็อกสมบูรณ์ (Randomized Complete Block Design : RCBD) ด้วยวิธี 9-point Hedonic Scale กับผู้ทดสอบชิมที่ไม่ได้ผ่านการฝึกฝน (Block) จำนวน 50 คน ซึ่งเป็นผู้ทดสอบที่มีความชื่นชอบในการรับประทานผัดไทย และไม่มีอาการแพ้ส่วนผสมที่ใช้ใน

การผลิต คุณลักษณะที่ทำการทดสอบ ได้แก่ ลักษณะปรากฏ กลิ่นรส (ผัดไทย) ความกรอบ ความหนา รสชาติ และความชอบโดยรวม

2.2 ศึกษาอัตราส่วนของเต้าหู้เหลือง กุ้งแห้ง และกุยช่าย

2.2.1 ศึกษาอัตราส่วนของเต้าหู้เหลือง กุ้งแห้ง และกุยช่ายที่เหมาะสม

ศึกษาอัตราส่วนของเต้าหู้เหลือง กุ้งแห้ง และกุยช่ายที่เหมาะสมของผลิตภัณฑ์ผัดไทยกรอบชนิดแห้ง โดยจัดสิ่งทดลองแบบผสม (Mixture Design) ศึกษา 3 ปัจจัย คือ ปริมาณเต้าหู้เหลืองร้อยละ 70-90 ปริมาณกุ้งแห้งร้อยละ 13-25 และปริมาณกุยช่ายร้อยละ 10-15 (รูปที่ 1) ได้สูตรการทดลองแตกต่างกันทั้งหมด 5 สูตร แสดงดังตารางที่ 2 และนำไปขึ้นรูปแท่งตามวิธีการข้อ 2.1.2



รูปที่ 1 Mixture Design แสดงการทับซ้อนกันของสัดส่วนเต้าหู้เหลือง กุ้งแห้ง และกุยช่าย

ตารางที่ 2 สูตรทดลองที่มีอัตราส่วนของเต้าหู้เหลือง กุ้งแห้ง และกุยช่ายที่แตกต่างกัน

สูตรทดลองที่	เต้าหู้เหลือง (ร้อยละ)	กุ้งแห้ง (ร้อยละ)	กุยช่าย (ร้อยละ)
1	77	13	10
2	70	20	10
3	72	13	15
4	72	25	15
5	72.5	12.5	15

2.2.2 การวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพ

นำผัดไทยกรอบชนิดแห้งที่ผลิตได้มาวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพ ดังนี้

2.2.2.1 วัดค่าสี ในระบบ CIE LAB โดยใช้เครื่องวัดค่าสี ยี่ห้อ Hunter Lab รุ่น Colourflex ประเทศสหรัฐอเมริกา โดยค่าสี L^* (ค่าความสว่างมีค่า 0-100 โดย 0 หมายถึง วัตถุที่มีความสว่างสีดำ ค่า 100 หมายถึง วัตถุที่มีค่าความสว่างสีขาว) ค่าสี a^* (+ หมายถึง วัตถุที่มีสีแดง, - หมายถึง วัตถุที่มีสีเขียว) ค่าสี b^* (+ หมายถึง วัตถุที่มีสีเหลือง, - หมายถึง วัตถุที่มีสีน้ำเงิน) ทำการทดลอง 3 ซ้ำ

2.2.2.2 วัดค่าเนื้อสัมผัสโดยใช้เครื่อง Texture Analyzer ยี่ห้อ Stable Micro System รุ่น TA.XT Plus ประเทศอังกฤษโดยใช้หัววัดแบบ Three – point Bending ด้วยความเร็วในการทดสอบ (Test Speed) 5 มิลลิเมตรต่อวินาที Pre-test Speed 5 มิลลิเมตรต่อวินาที Post-test Speed 10 มิลลิเมตรต่อวินาที ทำการทดลองจำนวน 10 ซ้ำ รายงานผลเป็นหน่วยนิวตัน

2.2.3 วิเคราะห์คุณภาพทางเคมี

วัดค่าปริมาณน้ำอิสระ (a_w) ด้วยเครื่องวัดวอเตอร์แอกทิวิตี (Water Activity) ยี่ห้อ AQUA Lab รุ่น 4TE ประเทศสหรัฐอเมริกา ทำการทดลอง จำนวน 3 ซ้ำ

2.2.4 การทดสอบทางประสาทสัมผัส

นำผัดไทยกรอบชนิดแห้งที่ผลิตได้จากข้อ 2.2.1 มาประเมินทางด้านประสาทสัมผัส ตามวิธีการข้อ 2.1.3

2.3 ศึกษาคุณภาพทางเคมีของผลิตภัณฑ์ที่พัฒนาได้

นำผลิตภัณฑ์ผัดไทยกรอบชนิดแห้งที่ได้รับคะแนนความชอบสูงที่สุดจากข้อ 2.2 มาศึกษาคุณภาพทางเคมี ดังนี้

2.3.1 ปริมาณความชื้น ปริมาณเถ้า ปริมาณไขมัน ปริมาณโปรตีน ปริมาณเส้นใยหยาบ และปริมาณคาร์โบไฮเดรต ตามวิธีการของ AOAC [12]

2.3.2 ค่าพลังงานสะสมของผลิตภัณฑ์ด้วยเครื่อง Bomb Calorimeter ยี่ห้อ PARR รุ่น 6100 ประเทศสหรัฐอเมริกา ทำการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ รายงานหน่วยเป็นกิโลแคลอรี

2.4 ศึกษาต้นทุนการผลิตของผลิตภัณฑ์

คำนวณต้นทุนการผลิตของผลิตภัณฑ์ ทั้งนี้ยังไม่รวม ค่าแรงงาน ค่าไฟฟ้า และโซหุ้ย ตามวิธีการของ นิภาพร (N. Kunna [13])

2.5 วิเคราะห์ผลทางสถิติ

นำข้อมูลที่ได้จากกลุ่มตัวอย่างและผลการประเมินทางประสาทสัมผัสมาวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างสิ่งทดลองด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 วิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ

3. ผลและวิจารณ์ผล

3.1 ผลการศึกษาสูตรมาตรฐานในการผลิตผัดไทยกรอบชนิดแห้ง

ผลการประเมินทางประสาทสัมผัสของผัดไทยกรอบชนิดแห้งที่ใช้ซอสผัดไทยที่มีความแตกต่างกัน

3 สูตรด้วยวิธี 9-point Hedonic Scale แสดงดังตารางที่ 3 ผลการศึกษาพบว่าผัดไทยกรอบชนิดแห้งที่ใช้ซอสผัดไทยชนิด A ได้รับคะแนนความชอบจากผู้ทดสอบชิมสูงที่สุดในทุกคุณลักษณะอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยมีคะแนนความชอบโดยรวมอยู่ในระดับความชอบปานกลาง (7.68) เนื่องจากมีรสชาติที่กลมกล่อมมากกว่าสูตรอื่น ๆ ไม่มีรสเปรี้ยวโดดจนเกินไป ซึ่งรสชาติเปรี้ยว เค็ม หวานที่กลมกล่อมพอดีเป็นคุณลักษณะที่ดีของน้ำซอสผัดไทยที่ทำให้ผู้บริโภคชื่นชอบ [14] และลักษณะปรากฏมีสีที่ใกล้เคียงกับผัดไทยแบบปรุงสดมากที่สุด นอกจากนั้นยังพบว่าผัดไทยกรอบชนิดแห้งที่ใช้ซอสผัดไทยชนิด C มีสีของผลิตภัณฑ์ที่อ่อนกว่าเมื่อสังเกตด้วยตาเปล่า จึงส่งผลให้คะแนนความชอบด้านลักษณะปรากฏได้รับคะแนนต่ำที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) สอดคล้องกับผลการศึกษาของวันดี [1] พบว่าสีของผัดไทยที่ดีจะต้องมีสีสวยตามธรรมชาติของน้ำมะขามเปียก ในขณะที่ค่าคะแนนความชอบด้านกลิ่นรส ความกรอบ และความหนา ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) จึงคัดเลือกผัดไทยกรอบชนิดแห้งที่ใช้ซอสผัดไทยสูตร A มาเป็นสูตรมาตรฐานในการวางแผนการทดลองแบบผสมในขั้นตอนต่อไป

ตารางที่ 3 คะแนนความชอบทางประสาทสัมผัสของผัดไทยกรอบชนิดแห้งที่ผลิตจากสูตรซอสผัดไทยที่แตกต่างกัน

คุณลักษณะ	สูตรซอสผัดไทย		
	A	B	C
ลักษณะปรากฏ	7.36±1.19 ^a	7.26±0.97 ^{ab}	6.90±1.06 ^b
ความหนา ^{ns}	6.56±1.45	6.44±1.31	6.40±1.37
กลิ่นรสผัดไทย ^{ns}	7.04±1.40	6.86±2.58	7.16±1.27
ความกรอบ ^{ns}	6.72±1.34	7.10±1.33	6.60±1.41
รสชาติ	7.56±1.26 ^a	6.48±1.43 ^b	6.52±1.52 ^b
ความชอบโดยรวม	7.68±1.38 ^a	6.82±1.44 ^b	6.88±1.15 ^b

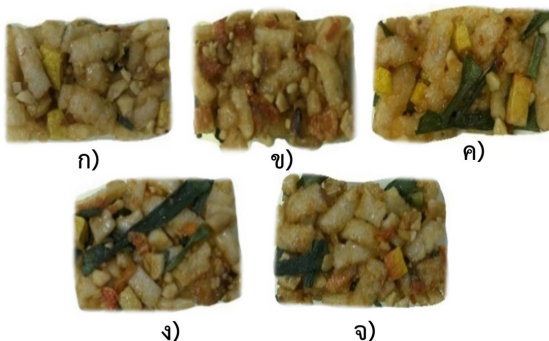
^{a-b} คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในแนวนอนเดียวกัน ที่มีตัวอักษรต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

^{ns} คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

3.2 ผลการศึกษาอัตราส่วนของเต้าหู้เหลือง กึ่งแห้ง และกุยช่ายที่เหมาะสม

3.2.1 อัตราส่วนของเต้าหู้เหลือง กึ่งแห้ง และกุยช่าย

ผลิตภัณฑ์ผัดไทยกรอบชนิดแห้งที่มีอัตราส่วนของเต้าหู้เหลือง กึ่งแห้ง และกุยช่ายที่แตกต่างกัน ดังรูปที่ 2 ผลการศึกษพบว่าในสูตรทดลองที่ 1 (รูปที่ 2 ก) มีสัดส่วนปริมาณของเต้าหู้เหลืองมากที่สุดทำให้เห็นเต้าหู้เหลืองได้อย่างชัดเจนแต่มีสัดส่วนของใบกุยช่ายที่น้อยที่สุดเช่นเดียวกับในสูตรทดลองที่ 2 (รูปที่ 2 ข) ทำให้เห็นสัดส่วนของใบกุยช่ายได้น้อย ในขณะที่สูตรทดลองที่ 2 มีสัดส่วนของกึ่งแห้งที่มากที่สุดทำให้เห็นกึ่งแห้งได้อย่างชัดเจน และทำให้มีรสชาติเค็มจนเกินไป ส่วนสูตรทดลองที่ 3 และ 4 (รูปที่ 2 ค และ ง) มีสัดส่วนของกุยช่ายมากที่สุดทำให้สามารถเห็นกุยช่ายได้อย่างชัดเจน และสูตรทดลองที่ 5 (รูปที่ 2 จ) สามารถเห็นส่วนผสมต่างๆ ทั้งเต้าหู้เหลือง กุยช่าย และกึ่งแห้งได้ชัดเจนมากกว่าสูตรอื่น จากการสังเกตและสัมผัสผลิตภัณฑ์ พบว่าสูตรการทดลองที่ 1 ที่มีส่วนผสมของเต้าหู้เหลืองในปริมาณมากกว่าสูตรอื่นนั้นมีการเกาะตัวกันได้น้อยที่สุดในขณะที่ สูตรการทดลองที่ 5 มีการเกาะตัวกันแน่นที่สุด



รูปที่ 2 ผลิตภัณฑ์ผัดไทยกรอบชนิดแห้งที่มีอัตราส่วนของ เต้าหู้เหลือง กึ่งแห้ง และกุยช่ายที่แตกต่างกัน
ก) สูตรทดลองที่ 1 ข) สูตรทดลองที่ 2 ค) สูตรทดลองที่ 3
ง) สูตรทดลองที่ 4 และ จ) สูตรทดลองที่ 5

3.2.2 ผลการวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพ

จากผลการศึกษาพบว่าสัดส่วนของวัตถุดิบส่งผลต่อค่าสีของผลิตภัณฑ์ เมื่อเพิ่มปริมาณกุยช่ายอบแห้งส่งผลให้ค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) เพิ่มขึ้น อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) นอกจากนั้นสูตรทดลองที่ 1 ซึ่งมีสัดส่วนของเต้าหู้เหลืองที่มากที่สุด มีค่าความสว่าง (L^*) ต่ำที่สุด เนื่องจากในขั้นตอนการเตรียมเต้าหู้เหลืองนั้นจำเป็นต้องนำเต้าหู้ไปทอดและผ่านการอบแห้งซึ่งเป็นกระบวนการที่ผ่านความร้อนสูงทำให้สีของเต้าหู้เหลืองเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard Reaction) ทำให้เกิดสีคล้ำ [15] สอดคล้องกับรายงานการศึกษาของ O. Baik และ G. Mittal [15] พบว่าการทอดเต้าหู้ด้วยอุณหภูมิสูง (147–172 องศาเซลเซียส) ทำให้ค่าความสว่าง (L^*) ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อปริมาณเต้าหู้ในส่วนผสมมีปริมาณมากจึงส่งผลให้ค่าความสว่างในผลิตภัณฑ์ลดลงไปด้วยเช่นกัน

ผลการวัดค่าความแข็ง (Hardness) ด้วยเครื่องวัดคุณภาพเนื้อสัมผัส พบว่าสูตรทดลองที่ 5 มีความแข็งสูงสุด (54.57 นิวตัน) ซึ่งการวัดแบบ Three-point Bending เป็นการวัดค่าความแข็งที่เกิดจากการเกาะตัวกันของผลิตภัณฑ์ ดังนั้น แสดงให้เห็นว่าวัตถุดิบมีการยึดเกาะกันที่ดี [16] แต่อย่างไรก็ตามพบว่าเมื่อสัดส่วนของเต้าหู้เหลืองเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความแข็งลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยสูตรทดลองที่ 1 นั้นมีค่าความแข็งต่ำที่สุด (41.92 นิวตัน) เนื่องจากปริมาณเต้าหู้เหลืองที่มากกว่าสูตรทดลองอื่นทำให้มีพื้นที่ผิวในการสัมผัสกับข้อสับผัดไทยได้น้อย จึงทำให้ความสามารถในการยึดเกาะกันของวัตถุดิบลดลง [16] สอดคล้องกับรายงานการศึกษาดวงกลม และคณะ [10] พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของโปรตีนเกษตรในผลิตภัณฑ์อาหารขบเคี้ยวชนิดแห้งรสหมี่กรอบ ทำให้ผลิตภัณฑ์มีค่าความแข็งลดลง แสดงให้เห็นว่าการเกาะตัวของผลิตภัณฑ์ลดลง

ตารางที่ 4 คุณภาพทางกายภาพและเคมีของผัดไทยกรอบชนิดแห้งที่อัตราส่วนของเต้าหู้เหลือง กุ้งแห้ง และกุยช่ายแตกต่างกัน

คุณภาพทางกายภาพและเคมี	เต้าหู้เหลือง : กุ้งแห้ง : กุยช่าย				
	สูตรที่ 1 77:13:10	สูตรที่ 2 70:20:10	สูตรที่ 3 72:13:15	สูตรที่ 4 72:25:15	สูตรที่ 5 72.5:12.5:15
คุณภาพทางกายภาพ					
ค่าความสว่าง (L*)	32.02±2.66 ^b	41.00±4.70 ^a	39.92±2.58 ^a	39.07±1.70 ^a	33.19±2.07 ^b
ค่าสีแดง-สีเขียว (a*) ^{ns}	11.70±1.44	12.70±1.70	13.00±1.86	12.62±1.70	12.23±0.97
ค่าสีเหลือง-น้ำเงิน (b*)	20.79±2.07 ^b	22.44 ±2.46 ^b	29.09 ±2.16 ^a	28.60±1.52 ^a	21.63±1.41 ^b
ค่าความแข็ง (N)	41.92±2.26 ^c	49.67±8.89 ^{ab}	48.01±6.49 ^{bc}	44.75±5.94 ^{bc}	54.57±8.25 ^a
คุณภาพทางเคมี					
ค่าปริมาณน้ำอิสระ (a _w)	0.26±0.01 ^a	0.23±0.01 ^b	0.23±0.02 ^b	0.26±0.02 ^a	0.22±0.01 ^b

^{a-b} คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในแนวนอนเดียวกัน ที่มีตัวอักษรต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

^{ns} คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

3.2.3 ผลการวิเคราะห์คุณภาพทางเคมี

ผลของการวัดค่าปริมาณน้ำอิสระ (a_w) ของสูตรทดลองทั้ง 5 สูตรอยู่ในช่วง 0.22-0.26 ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำกว่า 0.60 เป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนของหมีกรอบ (มพข.153/2559) [17] และเป็นช่วงที่ผลิตภัณฑ์ยังคงความกรอบ [18] ซึ่งเป็นคุณลักษณะที่ต้องการของผลิตภัณฑ์ เป็นปัจจัยสำคัญในการควบคุมและป้องกันการเสื่อมเสียของผลิตภัณฑ์อาหาร มีผลโดยตรงต่อการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ [10]

3.3 ผลการศึกษาคุณภาพทางเคมีของผลิตภัณฑ์ที่พัฒนาได้

ผลิตภัณฑ์ผัดไทยกรอบชนิดแห้งที่พัฒนาได้มีลักษณะปรากฏแสดงดังรูปที่ 3 ซึ่งมีเนื้อสัมผัสที่กรอบ น้ำหนักเบา มีกลิ่นรสของผัดไทยที่ชัดเจน ขนาด 4x2x2 ลูกบาศก์เซนติเมตร มีน้ำหนักต่อ 1 ชิ้น เท่ากับ 8 กรัม โดยผลิตจากเส้นจันท์ร้อยละ 18.78 ซอสผัดไทยร้อยละ 45.08 ถั่วลิสงร้อยละ 22.54 เต้าหู้เหลืองร้อยละ 9.80 กุยช่ายร้อยละ 2.03 และกุ้งแห้งร้อยละ 1.77

ผลการศึกษาคุณภาพทางเคมีโดยประมาณพบว่าผลิตภัณฑ์ผัดไทยกรอบชนิดแห้งที่พัฒนาได้มี

ปริมาณ ความชื้นร้อยละ 9.17±0.35 (ความชื้นฐานเปียก) ปริมาณคาร์โบไฮเดรต ไขมัน โปรตีน เถ้า และเส้นใยหยาบ เท่ากับร้อยละ 50.04±0.50, 30.80±1.18, 15.82±0.63, 3.39±0.10 และ 1.98±1.13 (ความชื้นฐานแห้ง) ตามลำดับ จะสังเกตได้ว่าผัดไทยกรอบชนิดแห้งมีส่วนผสมของเต้าหู้เหลืองและกุ้งแห้ง จึงมีปริมาณโปรตีนที่มากกว่าหากเปรียบเทียบกับขนมขบเคี้ยวชนิดแห้งที่ผลิตจากธัญพืชโดยทั่วไป จากรายงานการศึกษาธัญพืชอัดแห้งของสุธิดา [19] พบว่าผลิตภัณฑ์ธัญพืชผสมใบชะพลูมีปริมาณโปรตีน ร้อยละ 13.24 และ A. Ahmad [20] พัฒนาขนมขบเคี้ยวชนิดแห้งจากธัญพืชและถั่ว มีปริมาณโปรตีน ร้อยละ 12.51



รูปที่ 3 ผลิตภัณฑ์ผัดไทยกรอบชนิดแห้งที่พัฒนาได้

ตารางที่ 5 คะแนนความชอบทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ทอดไทยกรอบชนิดแห้งที่มีอัตราส่วนของเต้าหู้เหลือง กุ้งแห้ง และกุยช่ายแตกต่างกัน

คุณลักษณะ	เต้าหู้เหลือง : กุ้งแห้ง : กุยช่าย				
	สูตรที่ 1 77:13:10	สูตรที่ 2 70:20:10	สูตรที่ 3 72:13:15	สูตรที่ 4 72:25:15	สูตรที่ 5 72.5:12.5:15
ลักษณะปรากฏ ^{ns}	7.26±1.01	7.12±0.99	7.24±1.03	7.17±1.19	7.43±1.09
ความหนา	7.02±0.17 ^a	6.52±0.17 ^b	6.95±0.17 ^{ab}	6.50±0.17 ^b	7.24±0.17 ^a
กลิ่นรสผัดไทย ^{ns}	6.71±0.17	6.57±0.17	6.86±0.17	6.52±0.18	6.60±0.17
ความกรอบ	6.76±0.20 ^{ab}	6.62±0.20 ^{ab}	7.20±0.20 ^a	7.12±0.20 ^a	6.50±0.20 ^b
รสชาติ	6.86±0.18 ^{ab}	6.64±0.18 ^{ab}	7.00±0.18 ^a	6.62±0.18 ^{ab}	6.45±0.18 ^b
ความชอบโดยรวม	6.62±0.16 ^{ab}	6.43±0.16 ^b	6.95±0.16 ^a	7.05±0.16 ^a	6.43±0.16 ^b

^{a-b} คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในแนวนอนเดียวกัน ที่มีตัวอักษรต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

^{ns} คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

จากผลการศึกษาค่าพลังงานด้วยเครื่อง Bomb Calorimeter พบว่าผลิตภัณฑ์ผัดไทยกรอบชนิดแห้ง 1 ชิ้น มีพลังงานเท่ากับ 58.21 กิโลแคลอรี ดังนั้น ปริมาณต่อ 1 เสิร์ฟ จากการวิเคราะห์พลังงานด้วยเครื่อง Bomb Calorimeter จะมีจำนวนเท่ากับ 10 ชิ้น มีพลังงานเท่ากับ 582.10 กิโลแคลอรี เป็นค่าพลังงานเฉลี่ยที่เหมาะสมสำหรับ 1 มื้ออาหารจากปริมาณพลังงานที่ควรได้รับประจำวันสำหรับคนไทยในช่วงอายุ 19-30 ปี อยู่ที่ประมาณ 500-600 กิโลแคลอรี [21] แสดงให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์ผัดไทยกรอบชนิดแห้งนี้มีสัดส่วนของสารอาหารสอดคล้องกับแนวทางปริมาณสารอาหารอ้างอิงที่ควรได้รับประจำวันสำหรับคนไทย [21] และมีสัดส่วนการกระจายพลังงานของคาร์โบไฮเดรตที่เหมาะสมคิดเป็นร้อยละ 45-65 สัดส่วนของโปรตีนคิดเป็นร้อยละ 10-15 และสัดส่วนของไขมันคิดเป็นร้อยละ 20-35 ของความต้องการพลังงานที่ร่างกายควรได้รับใน 1 วัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์ผัดไทยกรอบชนิดแห้งสามารถรับประทานเป็นขนมขบเคี้ยวทดแทนมื้ออาหารหลัก หรือ Snackification ได้

3.4 ผลการศึกษาดัชนีต้นทุนของผลิตภัณฑ์

การคำนวณต้นทุนของผลิตภัณฑ์ที่พัฒนาได้จากต้นทุนของวัตถุดิบ โดยไม่รวมต้นทุนด้านแรงงาน ค่าน้ำ ค่าไฟฟ้า วัสดุอุปกรณ์ และค่าสึกหรอของเครื่องมือต่างๆ

พบว่าผลิตภัณฑ์มีราคาต้นทุนเท่ากับ 2.16 บาทต่อชิ้น แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ต้นทุนในการผลิตผัดไทยกรอบชนิดแห้ง

วัตถุดิบ	หน่วย (กรัม)	ราคาต่อ หน่วย (บาท/กรัม)	ปริมาณที่ ใช้ (กรัม)	ราคา ต่อชิ้น (บาท)
เส้นจันท์	150	0.07	1.66	0.12
ซอสผัดไทย	120	0.31	3.33	1.03
กุ้งแห้ง	50	0.50	0.16	0.08
กุยช่าย	15	0.67	0.18	0.12
เต้าหู้เหลือง	25	0.38	0.87	0.33
ถั่วลิสง	200	0.05	2	0.10
แบะแซ	500	0.05	0.67	0.03
น้ำมันปาล์ม	1000	10.50	200	0.35
รวม (บาท/ชิ้น)	-	-	8.87	2.16

4. สรุป

ผลิตภัณฑ์ผัดไทยกรอบชนิดแห้งที่พัฒนาได้ ประกอบด้วยส่วนผสมของซอสผัดไทยร้อยละ 45.08 ถั่วลิสงร้อยละ 22.54 เส้นจันท์ร้อยละ 18.78 เต้าหู้เหลืองร้อยละ 9.80 กุยช่ายร้อยละ 2.03 และกุ้งแห้งร้อยละ 1.77 โดยผัดไทยกรอบชนิดแห้งที่พัฒนาได้

1 ส่วนของการบริโภค เท่ากับ 10 ชิ้น มีปริมาณคาร์โบไฮเดรต ไขมัน โปรตีน และพลังงาน เพียงพอต่อความต้องการในหนึ่งมื้ออาหาร และมีราคาต้นทุนเท่ากับ 2.16 บาทต่อชิ้น

งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงแนวทางการพัฒนาผลิตภัณฑ์ผัดไทยกรอบชนิดแห้งที่สะดวกต่อการบริโภค มีรสชาติเฉพาะตัวอันเป็นเอกลักษณ์ของอาหารไทย แตกต่างจากขนมขบเคี้ยวที่วางจำหน่ายตามท้องตลาด เป็นการสร้างความหลากหลายให้กับผลิตภัณฑ์ อีกทั้งยังเป็นการเผยแพร่อาหารไทยในรูปแบบที่แตกต่างอีกด้วย

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ สาขาอาหารและโภชนาการ ภาควิชาคหกรรมศาสตร์ คณะเกษตรมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ เครื่องมือ และอุปกรณ์ในการทำวิจัยนี้จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] W. Kaewsuan, "The finished sauce for Pad Thai from tamarind paste juice," *Wichcha Journal Nakhon Si Thammarat Rajabhat University*, vol. 32, no.1, pp. 55-62, Jan.-Jun. 2013.
- [2] P. Khowiboonchai, "Power negotiation and the changing meaning of Pad-Thai: from nationalist menu to popular Thai national dish," *journal of language and culture*, vol. 32, no. 2, pp. 75-94, Jul.-Dec. 2013.
- [3] Travizgo. (2019, July 10). Top 10 Thai Food for Foreigners. [Online]. Available: <https://blog.travizgo.com/education/10favoritefood/>
- [4] Atlas Media Company. (2020, June 15). Most popular Thai noodle dishes. [Online]. Available: <https://www.tasteatlas.com/most-popular-noodles-in-thailand>
- [5] P. Kaysabutra, "The campaign for noodles consumption and vacation in relation to the nation-building policy during field marshal P. Pibulsonggram's regime (1992-1944)," *Bu Academic Review*, vol. 10, no. 1, pp.136-149, Jan.-Jun. 2011.
- [6] C. Rintawong, "Development of completely freezing Pad Thai," M.S. thesis, Dept. Home Ec., Rajamangala Univ., Bangkok, Thailand, 2008.
- [7] C. Auppathak, "The Study of Instant Pad Thai Powder Processing," in *Proceeding of The First RMUTP International Conference*, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon, Bangkok, 2010.
- [8] Asia Food Beverage. (n.d.). World Current trend of Snackification. [Online]. Available: <http://asiafoodbeverage.com/old/fbm-blog/world-current-trend-of-snackification/2/>
- [9] Smart SME Chanel. (2019, April 1). 9 food and beverage trends that SMEs should know to the needs of consumers in 2019. [Online]. Available: <https://www.smart sme.co.th/content/218719>
- [10] D. Chayasiripan, K. Jangchard, A. Jangchard, S. Chariyachotiler and S. Kongcharoenkiat, "The effect of main ingredients on qualities of snack bar flavored mee-krob," in *Proceeding of 51th Kasetsart University*

- Annual Conference*, Kasetsart University, Thailand, 2013, pp. 392-399.
- [11] Anonymous. (2019, December 1). 6 Pad-Thai recipes east and delicious around the world. [Online]. Available: <https://cooking.kapook.com/view132305.html>
- [12] AOAC, *Official Methods of Analysis of Association of Official Analytical Chemists*, 18th ed. Washington DC: Gaithersburg, 2010.
- [13] N. Kunna, "Utilization of Sinlek Rice and Sorghum for Producing High Fiber Puffed Snack by Extrusion Process," M.S. thesis, Dept. Home Ec., Kasetsart Univ., Bangkok, Thailand, 2019.
- [14] A. Greeley, "Finding Pad Thai," *Gastronomica*, vol. 9, no. 1, pp. 78-82, Feb. 2009.
- [15] O. Baik and G. Mittal, "Kinetics of tofu color changes during deep-fat frying," *Lwt-Food Science and Technology*, vol. 36, pp. 43-48, 2003.
- [16] S. Chanaram, K. Jangchud and A. Jangchud, "The effects if ingredients on qualities of snack bar from cereal and mixed fruit and vegetable," in *Proceeding of 46th Kasetsart University Annual Conference: Agro Industry*, Kasetsart University, Thailand, 2008, pp. 579-587.
- [17] Thai Industry Standard Institute. (2016, sep. 29) . Thai community product standard (Mee krop) 153/2559. [Online]. Available: http://tcps.tisi.go.th/pub/tcps0153_59.pdf
- [18] F. Sauvageot and G. Blond, "Effect of water activities on crispness of breakfast cereals," *Journal of Texture Studies*, vol. 22, pp. 423-442, 1991.
- [19] S. Kijaworasatien, "Chapoo leaves added cereal bar product," M.S. thesis, Dept. Home Ec., Rajamangala Univ. Bangkok, Thailand, 2010.
- [20] A. Ahmad, "Development of High Energy Cereal and Nut Granola Bar," *International Journal of Agriculture and Biological Sciences*, vol. 1, pp. 13-20, Nov. 2017.
- [21] *Dietary Reference Intake for Thais 2020*, 4th ed., Ministry of Public Health, TH, 2020, pp. 39-130.

<http://journal.rmutp.ac.th/>

การดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูบนถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกากน้ำตาลโดยวิธีการกระตุ้นด้วยสารเคมีและไมโครเวฟ

อดิศักดิ์ จตุรพิริย์* ตฤณ ปฐมนิธิวิญญู เอกราชนันท์ ไชยชนะ และ ธนัญญา เสาวภาคย์

ศูนย์วิจัยวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรและวัสดุชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม
85 ถนนมาลัยแมน อำเภอเมือง จังหวัดนครปฐม 73000

รับบทความ 13 สิงหาคม 2563 แก้ไขบทความ 2 พฤศจิกายน 2563 ตอรับบทความ 28 ธันวาคม 2563

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากกากน้ำตาลโดยวิธีการกระตุ้นด้วย KOH และการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ ซึ่งใช้พลังงานต่ำกว่ารวมทั้งความร้อนที่เกิดขึ้นยังเกิดอย่างรวดเร็วและสม่ำเสมอว่าการให้ความร้อนแบบดั้งเดิม จากการวิเคราะห์คุณลักษณะของถ่านกัมมันต์ที่ได้ด้วยเทคนิค BET, SEM และ FTIR พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้จะมีพื้นที่ผิวที่มีรูพรุนสูงโดยมีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 1,631 ตารางเมตรต่อกรัม และมีปริมาตรรูพรุนรวม 1.124 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม โดยมีทั้งรูพรุนขนาดใหญ่และรูพรุนขนาดเล็กกระจายอยู่ด้วยกัน นอกจากนี้ยังพบว่าพื้นผิวของถ่านกัมมันต์มีหมู่ฟังก์ชันเหลืออยู่ หลังจากนั้นจึงนำถ่านกัมมันต์ที่ได้ไปดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูพบว่า การดูดซับเพิ่มขึ้นตามเวลาและเข้าสู่สมดุลที่เวลา 8 ชั่วโมง ไอโซเทอมการดูดซับสอดคล้องกับแบบจำลองของแลงเมียร์ ที่มีการดูดซับสูงสุด 370.37 มิลลิกรัมต่อกรัม จลนพลศาสตร์การดูดซับสอดคล้องกับปฏิกิริยาอันดับสองเทียม ซึ่งชี้ให้เห็นว่าเป็นการดูดซับทางเคมี และจากอุณหพลศาสตร์การดูดซับพบว่าปฏิกิริยาการดูดซับเป็นแบบปฏิกิริยาดูดความร้อนที่สามารถเกิดขึ้นได้เอง

คำสำคัญ : ถ่านกัมมันต์; กากน้ำตาล; เมทิลีนบลู; การกระตุ้นด้วยไมโครเวฟ

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +668 6541 9105, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: adisak_ja@hotmail.com

<http://journal.rmutp.ac.th/>

The Adsorption of Methylene Blue Dye on Activated Carbon Prepared from Molasses by Using Chemical and Microwave Activation

Adisak Jaturapiree* Trin Pathomnithipinyo Ekrachan Chaichana and
Thanunya Saowapark

Research Center of Agriculture Residue Products and Biomaterials, Faculty of science and
technology, Nakhon Pathom Rajabhat
85 Malaiman Road, Muang, Nakhon Pathom 73000

Received 13 August 2020; Revised 2 November 2020; Accepted 28 December 2020

Abstract

This research aims to produce activated carbon from molasses via a chemical activation process with potassium hydroxide (KOH) and a microwave heating process, which consumes less energy and provides more rapid and uniform heat distribution than a conventional heating. The obtained activated carbon was then characterized with BET, SEM and FTIR. It exhibited a large specific surface area of 1,631 m²/g, and a total pore volume of 1.124 cm³/g consisting of mesopore and micropore. In addition, the active functional groups were also found on the surface of the activated carbon. Thus, it was brought for the adsorption test with methylene blue. It was found that the adsorption capacity of the activated carbon increased with time and reached the equilibrium within 8 hours. The adsorption data of the activated carbon were corresponded to Langmuir isotherm with the highest adsorption capacity of 370.37 mg/g. The adsorption kinetic of the activated carbon exhibited pseudo-second order reaction suggesting to the chemisorption phenomenon. From the thermodynamic study, it revealed that the adsorption process were endothermic and spontaneous reactions.

Keywords : Activated Carbon; Molasses; Methylene Blue; Microwave Activation

* Corresponding Author. Tel.: +668 6541 9105, E-mail Address: adisak_ja@hotmail.com

1. บทนำ

ในปัจจุบันมีปัญหาด้านน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมเป็นจำนวนมากซึ่งจำเป็นต้องได้รับการแก้ไข เทคนิคการดูดซับเป็นเทคนิคหนึ่งที่น่าสนใจสำหรับการบำบัดสินน้ำทิ้งเนื่องจากเป็นเทคโนโลยีที่ง่ายและประหยัดโดยวัสดุที่ใช้ดูดซับได้ดี ได้แก่ ถ่านกัมมันต์ ถ่านกัมมันต์เป็นผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งสีดำ มีรูพรุนและพื้นผิวสูง โดยในปัจจุบันนักวิจัยหันมาให้ความสนใจในการนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรและในอุตสาหกรรมมาทำเป็นถ่านกัมมันต์ ยกตัวอย่างเช่น ชานอ้อย ชี้อยู่ แกลบ เป็นต้น [1]-[3] เนื่องจากวัสดุดังกล่าวราคาถูก หาได้ง่ายในประเทศ ในการผลิตถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือทิ้งนั้นจำเป็นต้องมีการกระตุ้นเพื่อให้ได้พื้นที่ผิวและจำนวนรูพรุนสูง โดยการกระตุ้นที่สำคัญจะเป็นการกระตุ้นด้วยสารเคมี กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยสารเคมีนั้นจะเริ่มจากการนำวัตถุดิบมาคลุกเคล้ากับสารเคมีที่อยู่ในสภาวะสารละลายตั้งทิ้งไว้ระยะเวลาหนึ่ง หลังจากนั้นนำไปอบเพื่อให้แห้ง ต่อจากนั้นจะถูกนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 500-900 องศาเซลเซียส สารเคมีที่นิยมใช้ได้แก่ KOH, $ZnCl_2$, H_3PO_4 เป็นต้น [4], [5]

นอกจากนี้ในปัจจุบันเทคนิคการให้ความร้อนเพื่อผลิตถ่านกัมมันต์นั้นได้มีการพยายามที่จะใช้คลื่นไมโครเวฟ มาให้ความร้อนแทนกระบวนการให้ความร้อนแบบดั้งเดิมซึ่งเป็นการให้ความร้อนด้วยเตาอบ เนื่องจากการใช้พลังงานไมโครเวฟในการให้ความร้อนนั้นจะใช้พลังงานต่ำกว่า ความร้อนเกิดขึ้นจะเกิดจากด้านในและอุณหภูมิสม่ำเสมอมากกว่าแบบดั้งเดิมที่ให้ความร้อนจากภายนอกแพร่เข้าสู่ด้านในเนื้อวัสดุ ซึ่งจะทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างความร้อนภายนอกและภายในเนื้อวัสดุ การให้ความร้อนแบบไมโครเวฟนี้ส่งผลให้เกิดพื้นที่ผิวที่สูงและปริมาตรรูพรุนสูง [6]

งานวิจัยนี้ได้นำกากน้ำตาลซึ่งเป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมการผลิตน้ำตาลทราย มีลักษณะเป็น

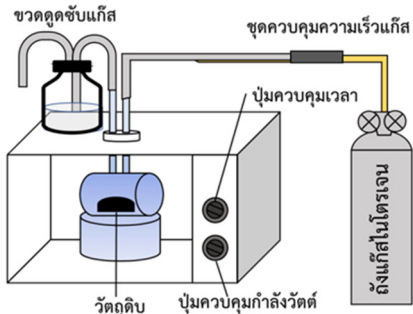
ของเหลวที่มีสีน้ำตาลดำ มีความหนืด เข้มข้นสูงสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หลาย ใช้ผลิตเป็นปุ๋ย และใช้เป็นอาหารสัตว์แต่อย่างไรก็ตามในองค์ประกอบของกากน้ำตาลจะประกอบด้วยน้ำตาลเป็นส่วนใหญ่ โดยน้ำตาลในโครงสร้างทางเคมีจะมีธาตุคาร์บอนองค์ประกอบ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการเปลี่ยนสภาพกากน้ำตาลให้เป็นถ่านกัมมันต์โดยการกระตุ้นด้วย KOH ร่วมกับการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ หลังจากนั้นถ่านกัมมันต์จะถูกนำไปวิเคราะห์คุณลักษณะเบื้องต้นพร้อมทั้งถูกนำไปประยุกต์ในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู ซึ่งข้อมูลจากการวิจัยจะเป็นข้อมูลเบื้องต้นแก่ทางอุตสาหกรรมในการนำผลพลอยได้จากการผลิตมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์และการนำถ่านกัมมันต์ที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในการดูดซับสีย้อม

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 การเตรียมถ่านกัมมันต์

นำกากน้ำตาลที่ซื้อมาจากชุมชนปฐมมโศก อ.เมือง จ.นครปฐม ไปเตรียมให้เป็นผงกากน้ำตาล โดยการอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำผงกากน้ำตาลมาเปลี่ยนเป็นผงคาร์บอนโดยการนำมาเผาภายใต้สภาวะไนโตรเจนที่มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 98 ที่ 400 องศาเซลเซียส และเวลาที่ใช้ในการเผา 4 ชั่วโมง ปล่องทิ้งให้เย็นในเตาเผา หลังจากนั้นนำผงคาร์บอนที่ได้มาผสมกับ KOH ในอัตราส่วนระหว่างผงคาร์บอนกับสารเคมีเป็นหนึ่งต่อสาม โดยนำถ่าน 4 กรัม มาผสมกับกับสารเคมีจำนวน 12 กรัม แล้วเติมน้ำ 20 มิลลิลิตร จากนั้นนำสารทั้งหมดมาควนที่ 750 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำไปให้ความร้อนด้วยเครื่องไมโครเวฟในสภาวะไนโตรเจนดังแสดงในรูปที่ 1 โดยใช้กำลังไมโครเวฟ 600 วัตต์ เป็นเวลา 12 นาที รอจนกระทั่งเย็น หลังจากนั้นล้างด้วย สารละลาย 0.1 M HCl ตามด้วยน้ำปราศจากไอออน จนกระทั่ง pH ของสารละลาย

เป็นกลาง จากนั้นนำไปอบจนแห้งแล้วนำไปเก็บในโถดูดความชื้นเพื่อทำการทดลองดูดซับต่อไป



รูปที่ 1 ชุดอุปกรณ์สำหรับการทดลองกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟ

2.2 การวิเคราะห์คุณลักษณะของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ที่ได้จะถูกนำมาวิเคราะห์หุ้ฟงักซันบนพื้นผิวด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Nicolet iS5 FTIR Spectrometer, Thermo Scientific, USA) ซึ่งจะทำการวิเคราะห์ในโหมด transmittance ที่อุณหภูมิห้องในช่วงคลื่นตั้งแต่ 4,000-400 cm^{-1} ที่ความละเอียด (Resolution) เท่ากับ 1 cm^{-1} วิเคราะห์พื้นที่ผิวและรูพรุนบนพื้นผิวโดยใช้หลักการการดูดซับแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 77K ด้วยเครื่อง Surface Area and Pore Size Analyzer (Autosorb-1, Quantachrome Instruments, USA) สมบัติรูพรุนที่พิจารณา ได้แก่ พื้นที่ผิวจำเพาะ (BET Surface Area) คำนวณโดยใช้สมการของ Brunauer-Emmett-Teller (BET) พื้นที่ของรูพรุนขนาดเล็ก (Micropore Surface Area) และ ปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก (Micropore Volume) คำนวณจาก t-plot method พื้นที่ผิวภายนอก (External Surface Area) คำนวณจากผลต่างระหว่างพื้นที่ผิวจำเพาะกับพื้นที่ผิวภายในรูพรุนขนาดเล็ก ปริมาตรรูพรุนรวม (Total Pore Volume) คำนวณจากปริมาณการดูดซับไนโตรเจนที่ $p/p_0 = 0.996$ ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (Average Pore Diameter) คำนวณจากสมการ $[(4 \times \text{ปริมาตรรูพรุน} \times \text{พื้นที่ผิวจำเพาะ}) / \text{พื้นที่ผิวจำเพาะ}]^{1/3}$

รวม)/พื้นที่ผิวจำเพาะ] ส่วนการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยานั้นจะเริ่มจากนำโดยนำชิ้นงานไปเคลือบด้วยแพลตินัมผสมทอง หลังจากนั้นจึงนำไปศึกษาด้วยเครื่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Mira 3, Tescan Orsay Holding, a.s., Czech Republic)

2.3 การศึกษาการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยถ่านกัมมันต์

2.3.1 เวลาที่สมดุลในการดูดซับ

เตรียมสารละลายสีย้อมที่ล้นบลูที่มีความเข้มข้น 250 และ 450 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังจากนั้นชั่งถ่านกัมมันต์น้ำหนัก 0.05 กรัม ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 100 มิลลิลิตร แล้วเติมสารละลายสีย้อมที่ล้นบลูปริมาตร 50 มิลลิลิตรลงไป นำมาเขย่าด้วยเครื่องเขย่า (Shaking Incubator) ด้วยความเร็ว 120 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา ตั้งแต่ 1-24 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดเวลานำสารละลายสีย้อมที่ได้มาแยกออกจากถ่านกัมมันต์ด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuge) ด้วยความเร็วรอบ 3,600 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที นำส่วนของสารละลายใสที่ได้มาวัดค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) โดยใช้เครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ (T80 UV-Vis Spectrophotometer, PG Instruments, United Kingdom) เพื่อหาความเข้มข้นที่เหลือ ต่อจากนั้นนำความเข้มข้นที่ได้มาค่าความสามารถในการดูดซับ (Adsorption Capacity) ที่เวลาต่าง ๆ จากสมการที่ (1)

$$q_t = \frac{(C_0 - C_t)}{C_0} \times \frac{V}{m} \quad (1)$$

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)}{C_0} \times \frac{V}{m} \quad (2)$$

โดยที่

q_t คือ ความสามารถในการดูดซับสีย้อมที่เวลาต่าง ๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

q_e คือ ความสามารถในการดูดซับสีย้อมที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม (มิลลิกรัมต่อลิตร)

C_e คือ ความเข้มข้นสมดุลของสีย้อม (มิลลิกรัมต่อลิตร)

C_t คือ ความเข้มข้นของสีย้อมที่เวลาต่างๆ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

V คือ ปริมาตรของสีย้อม (มิลลิลิตร)

m คือ ปริมาณถ่านกัมมันต์ (กรัม)

2.3.2 การศึกษาไอโซเทอมในการดูดซับ

การทดลองเพื่อศึกษาไอโซเทอมในการดูดซับของเมทิลีนบลูบนถ่านกัมมันต์ทำเช่นเดียวกับการทดลองหาเวลาที่สมดุลในการดูดซับ แต่เปลี่ยนเวลาในการดูดซับครั้งที่ 8 ชั่วโมง ซึ่งเป็นเวลาที่สมดุล และเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายสีเมทิลีนเริ่มต้น (C_0) เป็น 100-500 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังจากนั้นนำความเข้มข้นที่เหลือ (C_e) และ ค่าความสามารถดูดซับที่สมดุลซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2) มาพลอตกราฟเส้นตรงเพื่อหาค่าคงที่ต่างๆตามสมการแบบจำลองของแลงเมียร์และสมการแบบจำลองของฟรอนดิช ดังสมการ (3) และสมการ (4) ตามลำดับ

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{K_L q_m} \frac{1}{C_e} + \frac{1}{q_m} \quad (3)$$

$$\log q_e = \log K_f + \frac{1}{n} \log C_e \quad (4)$$

โดยที่

q_e คือ ความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

q_m คือ ความสามารถในการดูดซับสูงสุด (มิลลิกรัมต่อกรัม)

K_L คือ ค่าคงที่สมดุลของแลงเมียร์ (ลิตรต่อมิลลิกรัม)

C_e คือ ความเข้มข้นสมดุลของสีย้อม (มิลลิกรัมต่อลิตร)

K_f คือ ค่าคงที่สมดุลของฟรอนดิช (มิลลิกรัมต่อกรัม)

n คือ ค่าคงที่ของฟรอนดิช

2.3.3 การศึกษาจลนพลศาสตร์ในการดูดซับ

การศึกษาจลนพลศาสตร์ในการดูดซับของสีย้อมเมทิลีนบลูบนถ่านกัมมันต์ทำเช่นเดียวกับการทดลองหาเวลาที่สมดุลในการดูดซับ แต่เปลี่ยนเวลาที่ใช้ในการดูดซับเป็น 10-100 นาที หลังจากนั้นนำค่าความเข้มข้นที่เหลือ (C_e) และ ค่าความสามารถดูดซับที่สมดุลที่เวลาต่างๆ (q_e) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1) มาพลอตกราฟเส้นตรงเพื่อหาค่าคงที่ต่างๆ ตามสมการแบบจำลองของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo First-order) สมการแบบจำลองของปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo Second-order) ดังสมการ (5) และสมการ (6) ตามลำดับ

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \left(\frac{k_1}{2.303} \right) t \quad (5)$$

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (6)$$

โดยที่

q_e คือ ความสามารถในการดูดซับสีย้อมในสภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

q_t คือ ความสามารถในการดูดซับสีย้อมที่เวลาต่างๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

k_1 คือ ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่งเทียม (นาที⁻¹)

k_2 คือ ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่สองเทียม (กรัมต่อมิลลิกรัม-นาที)

t คือ เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาที)

2.3.4 การศึกษาอุณหพลศาสตร์การดูดซับ

การศึกษาจลนพลศาสตร์ในการดูดซับของสีย้อมเมทิลีนบลูบนถ่านกัมมันต์ทำเช่นเดียวกับการทดลองหาเวลาที่สมดุล แต่เปลี่ยนเวลาในการดูดซับครั้งที่ 8

ชั่วโมง และเปลี่ยนอุณหภูมิในการดูดซับเป็น 25-55 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นนำค่าความเข้มข้นที่เหลือ (C_e) และค่าความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุล (q_e) ที่ได้ที่อุณหภูมิต่าง ๆ มาพลอตกราฟเส้นตรงเพื่อหาค่าคงที่ต่างๆจากสมการเส้นตรง ดังแสดงในสมการที่ (7) หลังจากนั้นนำค่าที่ได้จากสมการเส้นตรงได้แก่ การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของการดูดซับ (ΔH^0) และการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของการดูดซับ (ΔS^0) มาหาค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์ (ΔG^0) จากสมการที่ (8)

$$\log \frac{q_e}{C_e} = \frac{\Delta S^0}{2.303} - \frac{\Delta H^0}{2.303RT} \quad (7)$$

$$\Delta G^0 = \Delta H^0 - T\Delta S^0 \quad (8)$$

โดยที่

q_e คือ ความสามารถในการดูดซับสีย้อมในสภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

C_e คือ ความเข้มข้นสมดุลของสีย้อม (มิลลิกรัมต่อลิตร)

ΔS^0 คือ การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของการดูดซับ (จูลต่อโมล-เคลวิน)

ΔH^0 คือ การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของการดูดซับ (กิโลจูลต่อโมล)

ΔG^0 คือ การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์ (กิโลจูลต่อโมล)

R คือ ค่าคงที่ของก๊าซ (8.314 จูลต่อโมล-เคลวิน)

T คือ อุณหภูมิ (เคลวิน)

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 คุณลักษณะของถ่านกัมมันต์

3.1.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์

ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

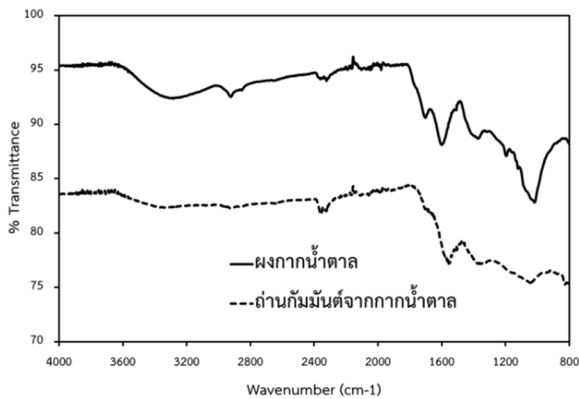
ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของผงถ่านกัมมันต์และถ่านกัมมันต์ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม

อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (FTIR) แสดงดังรูปที่ 2 จากรูปจะเห็นได้ว่าผงถ่านกัมมันต์จะพบการสั่นแบบยืดของหมู่ -OH ที่ตำแหน่ง $3300-3400 \text{ cm}^{-1}$ การสั่นแบบยืดของหมู่ -C=O ที่ตำแหน่ง 1700 cm^{-1} การสั่นแบบงอของหมู่ C-O และการยืดของหมู่ C-OH ที่ตำแหน่ง 1010 และ 1370 cm^{-1} ตามลำดับ พิกที่ปรากฏดังกล่าวน่าจะเป็นพิกของน้ำตาลซูโครสที่เป็นองค์ประกอบในถ่านกัมมันต์ซึ่งจะสอดคล้องกับหลายๆงานวิจัย [7], [8] แต่หลังจากนำผงถ่านกัมมันต์ไปผลิตเป็นถ่านกัมมันต์แล้วพบว่าความเข้มของพิกบางพิกลดลงเช่น พิกการสั่นของหมู่ -OH หมู่ -C=O หมู่ C-O ซึ่งอาจเนื่องมาจากการสลายตัวของสารอินทรีย์ที่อยู่ในถ่านกัมมันต์เมื่อได้รับความร้อนและกระตุ้นด้วยสารเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างในกระบวนการเปลี่ยนผงถ่านกัมมันต์ให้กลายเป็นถ่านกัมมันต์ ซึ่งการลดลงดังกล่าวสามารถเกิดขึ้นทั้งในกระบวนการให้ความร้อนแบบไมโครเวฟและการให้ความร้อนแบบดั้งเดิม [9], [10] แต่อย่างไรก็ตามพิกที่ปรากฏอยู่ทำให้ทราบว่ายังมีหมู่ฟังก์ชันปรากฏบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ ซึ่งหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้อาจจะช่วยส่งเสริมให้เกิดการดูดซับของสีย้อมได้ โดยการเกิดอันตรกิริยาระหว่างหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์กับหมู่ฟังก์ชันของสีย้อมเมทิลีนบลู [11]

3.1.2 การวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวและลักษณะของรูพรุน

ในการทดลองนี้จะวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวและลักษณะของรูพรุนของถ่านกัมมันต์โดยการนำไปวิเคราะห์การดูดซับแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 77 K โดยใช้เครื่องวัดพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุน (BET) ซึ่งผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 1 พบว่าพื้นที่ของจำเพาะ (BET Surface Area) ของถ่านกัมมันต์ที่ได้มีค่าประมาณ 1,631 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งสูงมากกว่าถ่านกัมมันต์ทางการค้าที่มีพื้นที่ผิวตั้งแต่ 400–1,500 ตารางเมตรต่อกรัม [12] ส่วนเมื่อพิจารณารูพรุนพบว่าบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ จะมีทั้งรูพรุนขนาดใหญ่ที่ปริมาตรรูพรุนเท่ากับ 0.472 และขนาดเล็กปริมาตรรู

พรุนเท่ากับ 0.652 โดยพบว่าขนาดรูพรุนเฉลี่ย (The Average Pore Diameter) มีค่าเท่ากับ 2.757 นาโนเมตร ซึ่งจัดเป็นขนาดระดับ Mesopore ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนเป็น 2-50 นาโนเมตร [13]



รูปที่ 2 สเปกตรัมของผงกากคาร์บอนและถ่านกัมมันต์

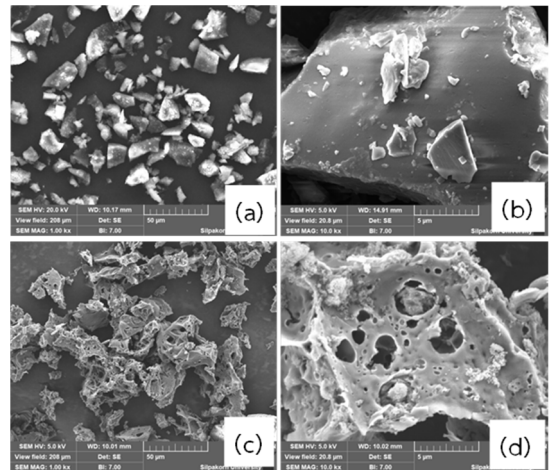
ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวและลักษณะรูพรุนของถ่านกัมมันต์

ตัวแปร	ค่าตัวแปร
พื้นที่ผิวจำเพาะ (m^2/g)	1631
พื้นที่ผิวภายในรูพรุนขนาดเล็ก(m^2/g)	1321
พื้นที่ผิวภายนอก (m^2/g)	310
ปริมาตรรวมของรูพรุน(cm^3/g)	1.124
ปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก(cm^3/g)	0.652
ปริมาตรรูพรุนภายนอก(cm^3/g)	0.472
ขนาดรูพรุนเฉลี่ย(nm)	2.757

3.1.3 การวิเคราะห์โครงสร้างทางสัณฐานวิทยา

ในการทดลองนี้จะวิเคราะห์โครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของผงคาร์บอนและถ่านกัมมันต์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ซึ่งผลการทดลองแสดงเป็นภาพถ่ายตามรูปที่ 3 จากรูปเมื่อเปรียบเทียบระหว่างผงกากน้ำตาล (รูป a, b) กับถ่านกัมมันต์ (รูป c, d) จะเห็นได้ว่าเมื่อนำผงกากน้ำตาลไปผลิตเป็นถ่านกัมมันต์แล้ว รูปร่างลักษณะของผงกากน้ำตาลจะเปลี่ยนวัสดุที่ไม่มีรูพรุนกลายเป็นวัสดุที่มีความพรุนสูงขึ้น โดยบนพื้นผิวจะมีรูพรุนที่มีทั้งขนาด

ใหญ่และขนาดเล็กกระจายทั่วพื้นผิว ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้จากเครื่อง BET ซึ่งจากรูป SEM และผลการวิเคราะห์ BET ทำให้ทราบว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้น่าจะมีสมบัติที่ดีในการประยุกต์เป็นสารดูดซับได้



รูปที่ 3 ภาพถ่าย SEM ของ a) ผงกากน้ำตาลที่

กำลังขยาย 1000 เท่า b) ผงกากน้ำตาลที่กำลังขยาย 10,000 เท่า c) ถ่านกัมมันต์ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า d) ถ่านกัมมันต์ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า

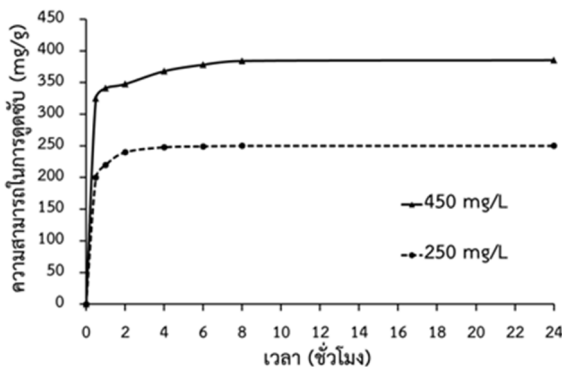
3.2 การดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู

ในการทดลองนี้จะนำถ่านกัมมันต์ที่ได้มาทดลองการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู โดยจะศึกษาปัจจัยของเวลาในการดูดซับ รวมทั้งศึกษากลไกในการดูดซับได้แก่การศึกษาไอโซเทอม จลนพลศาสตร์ อุณหพลศาสตร์ในการดูดซับ แสดงดังรายละเอียดต่อไปนี้

3.2.1 เวลาที่เหมาะสมในการดูดซับ

ในการทดลองนี้จะนำถ่านกัมมันต์ที่ได้มาดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู โดยความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับสีย้อมกับเวลาที่ใช้ในการดูดซับแสดงดังรูป 4 ซึ่งความเข้มข้นของสีย้อมเมทิลีนบลูเริ่มต้นที่ใช้ได้แก่ 250 และ 450 มิลลิกรัมต่อลิตร จากการทดลองพบว่าเมื่อเวลาในการดูดซับเพิ่มขึ้นทำให้ความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์จะเพิ่มขึ้นอย่าง

ต่อเนื่อง หลังจากนั้นเมื่อเวลาผ่านไประยะหนึ่งการดูดซับจะเข้าสู่ภาวะสมดุลหรือความสามารถในการดูดซับสีย้อมจะคงที่ พบว่าเวลาสมดุล (Equilibrium Time) ของทั้งสองความเข้มข้นจะใกล้เคียงประมาณ 8 ชั่วโมง โดยในช่วงแรกจะเกิดการดูดซับได้รวดเร็วเนื่องจากในช่วงแรกถ่านกัมมันต์ที่พื้นผิวที่ว่างมากในการดูดซับแต่หลังจากเกิดการดูดซับขึ้นพื้นที่ว่างที่ใช้ในการดูดซับจะลดน้อยลงจึงทำให้การดูดซับลดลง จนกระทั่งไม่เหลือพื้นที่ให้เกิดการดูดซับ การดูดซับจึงคงที่ซึ่งก็คือการดูดซับเข้าสู่สมดุลนั่นเอง [14]



รูปที่ 4 ผลของเวลาที่มีต่อความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์

3.2.2 ไอโซเทอมการดูดซับ

ไอโซเทอมของการดูดซับนั้นเป็นการศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับกับความเข้มข้นของสารละลายที่สถานะสมดุล ในสถานะที่อุณหภูมิคงที่ ไอโซเทอมนี้จะใช้ในการอธิบายพฤติกรรมการดูดซับรวมทั้งสามารถคำนวณหาปริมาณการดูดซับสูงสุดที่สามารถเกิดขึ้นได้ ซึ่งไอโซเทอมที่ศึกษาในการทดลองนี้มี 2 แบบคือ ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์และไอโซเทอมแบบฟรุนดิช โดยไอโซเทอมแบบแลงเมียร์จะมีสมมติฐานว่าโมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะเกิดบนพื้นผิวของตัวดูดซับในตำแหน่งที่แน่นอนเพียงชั้นเดียว (Monolayer Sorption) บนพื้นผิวของตัวดูดซับที่มีลักษณะสม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียว

และระหว่างการดูดซับตัวถูกดูดซับจะไม่มีอันตรกิริยาต่อกัน ส่วนไอโซเทอมแบบฟรุนดิชจะมีสมมติฐานว่าโมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะเกิดบนพื้นผิวของตัวดูดซับที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันและการดูดซับจะเกิดเป็นแบบหลายชั้น (Multilayer Sorption) [15]

ค่าคงที่ต่าง ๆ ของไอโซเทอมทั้งสองแบบที่เกิดจากการถูกดูดซับของสีย้อมเมทิลีนบลูบนถ่านกัมมันต์แสดงดังตารางที่ 2 เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ของทั้งสองไอโซเทอมพบว่าไอโซเทอมแบบแลงเมียร์มีค่าใกล้เคียง 1 มากกว่าไอโซเทอมแบบฟรุนดิช แสดงให้เห็นว่าพฤติกรรมการดูดซับเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์จะเป็นแบบชั้นเดียว และความสามารถในการดูดซับสูงสุด (q_m) ของสีย้อมเมทิลีนบลูมีค่าเท่ากับ 370.37 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งสูงมากเมื่อเทียบกับการทดลองอื่น ๆ ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 2 ค่าคงที่ที่ได้จากไอโซเทอมของการดูดซับ

ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์		
q_m (mg/g)	K_L (min ⁻¹)	R^2
370.37	27	0.966
ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดิช		
K_F (mg/g)	n	R^2
290.80	16.03	0.743

3.2.3 จลนพลศาสตร์การดูดซับ

จลนพลศาสตร์การดูดซับเป็นการทดลองหาความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ เพื่อศึกษาพฤติกรรมการดูดซับของสีย้อมบนผิวของถ่านกัมมันต์ ในการทดลองนี้จะศึกษาจากแบบจำลองแบบหนึ่งเทียม (Pseudo-first Order) และแบบสองเทียม (Pseudo-second Order) สมมติฐานแบบหนึ่งเทียมเป็นแบบจำลองที่อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่พื้นที่ผิวของตัวดูดซับเป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนของพื้นที่ผิวของตัวดูดซับที่ยังไม่ได้ถูกครอบครองจากตัวถูกดูดซับและขั้นตอนการซึมผ่าน

ของตัวถูกดูดซับผ่านชั้น Boundary Layer ที่ห่อหุ้มตัวดูดซับ เป็นขั้นตอนกำหนดอัตรา (Rate of Limiting Step) ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากลไกการดูดซับระหว่างตัวถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับมีแนวโน้มที่จะเป็นแบบแรงดึงดูดทางกายภาพมากกว่าแรงดึงดูดทางเคมี ส่วนสมมติฐานแบบจำลองแบบสองเทียมนั้นเป็นแบบจำลองที่อัตราการดูดซับเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกำลังสองของพื้นที่ผิวของของตัวดูดซับที่ยังไม่ได้ถูกครอบครองจากตัวถูกดูดซับ และขั้นตอนการสร้างแรงยึดเหนี่ยวระหว่างตัวถูกดูดซับและพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ เป็นขั้นตอนกำหนดอัตรา (Rate of Limiting Step) ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากลไกการดูดซับระหว่างตัวถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับมีแนวโน้มที่จะเป็นแบบแรงดึงดูดทางเคมีมากกว่าทางกายภาพ

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูสูงสุด (q_m) ของถ่านกัมมันต์ชนิดต่างๆ

วัตถุดิบ	วิธีการให้ความร้อน ขณะ กระตุ้น	ความสามารถ ในการดูดซับ สูงสุด (mg/g)	ที่มา
กากน้ำตาล	ไมโครเวฟ	370.37	งานวิจัยนี้
เปลือกมังคุด	ดั้งเดิม	99.00	[16]
แกลบ	ดั้งเดิม	111.48	[17]
กากตะกอน น้ำเสีย	ดั้งเดิม	131.8	[18]
เปลือกทุเรียน	ดั้งเดิม	289.26	[19]
ก้านฝ้าย	ไมโครเวฟ	315.45	[20]
เส้นใยจากผล ปาล์มน้ำมัน	ไมโครเวฟ	382.32	[21]
ซีลื้อย	ไมโครเวฟ	462.10	[10]

ผลการทดลองแสดงค่าคงที่ต่างๆ ของจลนพลศาสตร์ทั้งสองแบบที่เกิดจากการถูกดูดซับของสีย้อมบนถ่านกัมมันต์ ดังตารางที่ 4 เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์สหสัมพันธ์ (R^2) ของทั้งแบบจำลอง

จลนพลศาสตร์ทั้งสองแบบพบว่าจลนพลศาสตร์แบบสองเทียมนั้นมีค่าใกล้เคียง 1 มากกว่าจลนพลศาสตร์แบบหนึ่งเทียมนอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบค่าการดูดซับที่ได้มาจากการคำนวณตามสมการแบบจำลองต่างๆ (q_{cal}) กับค่าการดูดซับจากการทดลอง (q_{exp}) พบว่าค่าการดูดซับจากการคำนวณด้วยแบบจำลองแบบสองเทียมนั้นมีค่าใกล้เคียงกับค่าการดูดซับจากการทดลองมากกว่าค่าที่ได้จากแบบหนึ่งเทียมนั้น แสดงให้เห็นว่าจลนพลศาสตร์การดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์จะเป็นแบบสองเทียมนั้นซึ่งชี้ให้เห็นว่ากลไกการดูดซับน่าจะเป็นการดูดซับทางเคมี

ตารางที่ 4 ค่าคงที่จากจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ

ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม				
C_0 mg/L	$q_e(\text{exp})$ (mg/g)	$q_e(\text{cal})$ (mg/g)	k_1 (min ⁻¹)	R^2
250	246.28	57.56	0.011	0.976
450	357.30	72.62	0.012	0.985
ปฏิกิริยาอันดับสองเทียม				
C_0 mg/L	$q_e(\text{exp})$ (mg/g)	$q_e(\text{cal})$ (mg/g)	k_2 (g/mg.min)	R^2
250	246.28	233.34	0.0010	0.997
450	357.30	416.60	0.0005	0.995

3.2.4 อุณหพลศาสตร์การดูดซับ

ในการทดลองนี้สามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ทางอุณหพลศาสตร์ ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของการดูดซับ (ΔH^0) การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของการดูดซับ (ΔS^0) และการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์ (ΔG^0) ได้ ซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ค่าคงที่จากอุณหพลศาสตร์ของการดูดซับ

ΔH^0 (kJ/mol)	ΔS^0 J/(mol. K)	ΔG^0 (kJ/mol)			
		298K	308K	318K	320K
23.74	0.091	-3.38	-4.28	-5.20	-6.11

เมื่อนำผลของการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 450 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ในช่วง 25 ถึง 55 องศาเซลเซียส หรือ 298 ถึง 328 เคลวิน พบว่าการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของการดูดซับมีค่าเป็นบวกแสดงว่าการดูดซับเป็นแบบปฏิกิริยาดูดความร้อน การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของการดูดซับมีค่าเป็นบวกชี้ให้เห็นว่า กระบวนการดูดซับบริเวณผิวของตัวดูดซับ การสลายตัวของสีย้อมที่เกิดขึ้นเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นแบบสุ่ม มีความไม่เป็นระเบียบ ส่วนการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์ มีค่าเป็นลบ แสดงให้เห็นว่า ปฏิกิริยาการดูดซับสามารถเกิดได้เอง

4. สรุป

จากงานวิจัยพบว่ากากน้ำตาลสามารถนำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ได้ด้วยกระบวนการกระตุ้นด้วย KOH และให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ โดยผิวของถ่านกัมมันต์ที่ได้ยังมีหมู่ฟังก์ชันเหลืออยู่ มีพื้นที่ผิวที่สูง มีรูพรุนทั้งขนาดใหญ่และขนาดเล็กกระจาย จากข้อมูลดังกล่าวทำให้ทราบว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้เหมาะสำหรับประยุกต์เป็นตัวดูดซับได้ ดังนั้นต่อมาจึงได้นำถ่านกัมมันต์ที่ได้ไปศึกษาการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูพบว่าการดูดซับสอดคล้องกับแบบจำลองของแลงเมียร์ที่มีความสามารถในการดูดซับสูงสุด 370.37 มิลลิกรัมต่อกรัม จลนพลศาสตร์การดูดซับสอดคล้องกับปฏิกิริยาแบบสองเทียมน ปฏิกิริยาการดูดซับเป็นแบบดูดความร้อนและสามารถเกิดขึ้นได้เอง จากผลการทดลองทั้งหมดจึงสรุปได้ว่าการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยไมโครเวฟจะเป็นทางเลือกวิธีในการผลิตถ่านกัมมันต์ซึ่งวิธีการนี้จะใช้พลังงานน้อยกว่า ทำให้มีคุ่มค่าทางการลงทุนมากกว่าวิธีการแบบดั้งเดิม

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณสำนักงานวิจัยแห่งชาติ (วช.) และสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏ

นครปฐมในการสนับสนุนงบประมาณในการวิจัย สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม ในการสนับสนุนเครื่องมือในการวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] K. P. Singh, D. Mohan, S. Sinha, G. S. Tondon and D. Gosh, "Color removal from wastewater using low-cost activated carbon derived from agricultural waste material," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 49, pp. 1965–1976, 2003.
- [2] K. Kadirvelu, M. Kavipriya, C. Karthika, M. Radhika, N. Vennilamani and S. Patabhi, "Utilization of various agricultural wastes for activated carbon preparation and application for the removal of dyes and metal ions from aqueous solutions," *Bioresource Technology*, vol. 87, pp. 129–132, 2003.
- [3] A. Demirbas, "Agricultural based activated carbons for the removal of dyes from aqueous solutions: A review," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 167, pp. 1-9, 2009.
- [4] P. González-García, "Activated carbon from lignocellulosics precursors: A review of the synthesis methods, characterization techniques and applications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, pp. 1393-1414, 2018
- [5] M. A. Tadda, A. Ahsan, A. Shitu, M. ElSergany, T. Arunkumar, B. Jose, M. A. Razzaque and N. N. NikDaud, "A review on

- activated carbon: process, application and prospects,” *Journal of Advanced Civil Engineering Practice and Research*, vol. 2, pp. 7-13, 2016.
- [6] M. J. Ahmed, “Application of agricultural based activated carbons by microwave and conventional activations for basic dye adsorption: Review,” *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 4, pp. 89-99, 2016.
- [7] K. Legrouri, E. Khouya, M. Oumam, H. Hannache, M. Ezzine, S. Fakhi and N. Hanafi, “Preparation and characterization of activated carbons obtained from molasses by phosphoric acid activation,” *Applied Journal of Environmental Engineering Science*, vol. 4, pp. 352-366, 2018.
- [8] M. Moosavi-Nasab, M. Gavahian, A. R. Yousefi and H. Askari, “Fermentative production of dextran using food industry wastes,” *World Academy of Science, Engineering and Technology*, vol. 68, pp. 875-877, 2010.
- [9] E. Pehlivan, “Production and characterization of activated carbon from pomegranate pulp by phosphoric acid,” *Journal of the Turkish Chemical Society Section A*, vol. 5, pp. 1-8, 2018.
- [10] K. Y. Foo and B. H. Hameed, “Mesoporous activated carbon from wood sawdust by K_2CO_3 activation using microwave heating,” *Bioresource Technology*, vol. 111, pp. 425-432, 2012.
- [11] S. Joshi and B. P. Pokharel, “Preparation and characterization of activated carbon from Lapsi (*Choerospondias axillaris*) seed stone by chemical activation with potassium hydroxide,” *Journal of the Institute of Engineering*, vol. 9, pp. 79-88, 2014.
- [12] S. Choojit and C. Sangwichien, “preparation of activated carbon production from oil palm empty fruit bunch and its application,” *Kasem Bundit Engineering Journal*, vol. 8, pp. 48-67, 2018.
- [13] X. Wang, X. Liang, Y. Wang, X. Wang, M. Liu, D. Yin, S. Xia, J. Zhao and Y. Zhang, “Adsorption of copper (II) onto activated carbons from sewage sludge by microwave-induced phosphoric acid and zinc chloride activation,” *Desalination*, vol. 278, pp. 231-237, 2011.
- [14] M. J. Ahmed and S. K. Dhedan, “Equilibrium isotherms and kinetics modeling of methylene blue adsorption on agricultural wastes-based activated carbons,” *Fluid Phase Equilibria*, vol. 317, pp. 9-14, 2012.
- [15] B. H. Hameed, A. L. Ahmad and K. N. A. Latiff, “Adsorption of basic dye (methylene blue) onto activated carbon prepared from rattan sawdust,” *Dyes and Pigments*, vol. 75, pp. 143-149, 2007.
- [16] Y. Chen, B. Huang, M. Huang and B. Cai, “On the preparation and characterization of activated carbon from mangosteen shell,” *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, vol. 42, pp. 837-842, 2011.

- [17] V. Fierro, G. Mūniza, A. H. Basta, H. El-Saied and A. Celzard, "Rice straw as precursor of activated carbons: activation with ortho-phosphoric acid," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 181, pp. 27-34, 2010.
- [18] T. C. Chandra, M. M. Mirna, Y. Sudaryanto and S. Ismadji, "Adsorption of basic dye onto activated carbon prepared from durian shell: Studies of adsorption equilibrium and kinetics," *Chemical Engineering Journal*, vol. 127, pp. 121-129, 2007.
- [19] L. Liu, Y. Lin, Y. Liu, H. Zhu and Q. He, "Removal of methylene blue from aqueous solutions by sewage sludge based granular activated carbon: adsorption equilibrium, kinetics, and thermodynamics," *The Journal of Chemical & Engineering Data*, vol. 58, pp. 2248-2253, 2013.
- [20] H. Deng, L. Yang, G. Tao and J. Dai, "Preparation and characterization of activated carbon from cotton stalk by microwave assisted chemical activation—application in methylene blue adsorption from aqueous solution," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 166, pp. 1514-1521, 2009.
- [21] K. Y. Foo and B. H. Hameed, "Adsorption characteristics of industrial solid waste derived activated carbon prepared by microwave heating for methylene blue," *Fuel Processing Technology*, vol. 99, pp. 103-109, 2012.
- [22] S. Lagergren and B. K. Svenska, "For the so-called theory of adsorption of dissolved substances," *Kung. Svenska Vetenskapsakad Handlingar*, vol. 24, pp. 1-39, 1898.
- [23] Y. S. Ho, "Review of second-order models for adsorption systems," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 136, pp. 681-689, 2006.
- [24] T. A. Khana, E. A. Khanb and S. Shahjahan, "Adsorptive uptake of basic dyes from aqueous solution by novel brown linseed deoiled cake activated carbon: Equilibrium isotherms and dynamics," *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 4, pp. 3084-3095, 2016.

<http://journal.rmutp.ac.th/>

การพัฒนาและประเมินผลเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนขนาดเล็กสำหรับกล้วยน้ำว้าสไลด์

ไพโรจน์ จันทรแก้ว*

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก
41/1 หมู่ 7 ถนนพหลโยธิน อำเภอเมือง จังหวัดตาก 63000

รับบทความ 29 พฤษภาคม 2563 แก้ไขบทความ 8 ธันวาคม 2563 ตอรับบทความ 28 ธันวาคม 2563

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและทดสอบสมรรถนะเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนขนาดเล็กสำหรับกล้วยน้ำว้าสไลด์ ห้องอบขนาด $0.48 \times 0.47 \times 0.39$ ลูกบาศก์เมตร ลูกออกแบบ สามารถบรรจุถาดขนาด 0.33×0.409 ตารางเมตร จำนวน 3 ถาด คัดแปลงโบเวอร์ของเครื่องปรับอากาศ ขนาดมอเตอร์ 174.6 วัตต์ สามารถปรับอัตราการไหลได้สามระดับ สำหรับให้ระบบหมุนเวียนของอากาศในเครื่องอบแห้ง มีวาล์วปรับอากาศไหลข้ามเครื่องทำระเหย ส่วนระบบปั๊มความร้อนใช้สารทำงาน R-134a ประกอบด้วยสี่อุปกรณ์หลัก คือเครื่องอัดแบบหุ้มปิดขนาด 497 วัตต์ เครื่องควบแน่น 1,800 วัตต์ วาล์วลดความดัน และเครื่องทำระเหย 1,300 วัตต์ ในการทดสอบสมรรถนะเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนขนาดเล็กใช้อากาศแบบปิด อากาศไหลข้ามเครื่องทำระเหยร้อยละ 60 อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 60 องศาเซลเซียส โดยปรับเปลี่ยนอัตราการไหล 0.117 0.128 และ 0.140 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ใช้กล้วยน้ำว้าสไลด์จำนวน 400-500 กรัม มีความชื้นเริ่มต้น 244-281% dry basis อบแห้งกล้วยน้ำว้าสไลด์มีความชื้นสุดท้ายต่ำกว่า 6.35 % dry basis พบว่าทั้งสามอัตราการไหลใช้เวลาในการอบแห้ง 180 นาที ได้สัมประสิทธิ์สมรรถนะปั๊มความร้อน 3.32 ± 0.066 3.88 ± 0.031 และ 4.24 ± 0.08 และได้อัตราการดึงน้ำออกจำเพาะ 184.5 ± 11.85 186.2 ± 8.17 และ 200.1 ± 21.34 กรัมต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง ตามลำดับ ที่อัตราการไหล 0.140 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที เป็นสถานะที่ดีที่สุดเนื่องจากให้ค่าอัตราการดึงน้ำออกจำเพาะสูง

คำสำคัญ : สมรรถนะการอบแห้ง; เครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนขนาดเล็ก; กล้วยสไลด์

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +668 6732 4742, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: phairoac@rmutl.ac.th

<http://journal.rmutp.ac.th/>

Development and Evaluation of Mini Heat Pump Dryer for Slice Banana

Phairoach Chunkaew*

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna Tak
41/1 Moo 7 Paholayothin road, Muang, Tak 63000

Received 29 May 2020; Revised 8 December 2020; Accepted 28 December 2020

Abstract

The purposes of this research were to develop and to test performance of mini heat pump dryer for slice banana. Drying chamber of $0.48 \times 0.47 \times 0.39 \text{ m}^3$ was designed and it could contain three trays. The three trays had dimension of $0.33 \times 0.409 \text{ m}^2$. A blower with 174.6 W motor of air condition was modify and could adjust flow rates of three levels for air cycle system in dryer. The air system had bypass air at evaporator. The refrigerant of R-134a and four main parts were used in the heat pump system. The four main parts were a 497 W hermetic compressor, a 1,800 W condenser, an expansion valve and a 1,300 W evaporator. Experiments for test performance of the mini heat pump dryer used close loop air system, an evaporator bypass air of 60 %, a temperature of 60°C and various flow rates of 0.117, 0.128 and $0.140 \text{ m}^3/\text{s}$. Slide bananas of 400-500 g had an initial moisture content of 244-281 %dry basis and were dried until final moisture content lower than 6.24 ± 0.007 %dry basis. It was found that the flow rates of 0.117, 0.128 and $0.140 \text{ m}^3/\text{s}$ had coefficients of performance (COP_h) of 3.32 ± 0.066 , 3.88 ± 0.031 and 4.24 ± 0.08 , respectively and had specific moisture extraction rates (SMER) of 184.5 ± 11.85 , 186.2 ± 8.17 and $200.1 \pm 21.34 \text{ g/kWh}$, respectively. The flow rate at $0.140 \text{ m}^3/\text{s}$ was the best condition because it had high specific moisture extraction rate.

Keywords : Drying Performance; Mini Heat Pump Dryer; Slide Bananas

* Corresponding Author. Tel.: +668 6732 4742, E-mail Address: phairoac@rmutl.ac.th

1. บทนำ

เครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนมีการใช้งานมาเป็นเวลานาน และถูกพัฒนามาจนถึงปัจจุบันมีข้อดีคือสามารถอบแห้งในสถานะที่มีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ ใช้ระบบอากาศแบบปิดเนื่องจากมีเครื่องทำระเหยดึงน้ำออกจากอากาศขณะเดียวกันสามารถนำความร้อนคืนกลับเข้ามาในระบบปั๊มความร้อน ข้อเสียคือไม่สามารถใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้งสูง มีการนำไปใช้ออบแห้งผลไม้และผัก เช่น มะนาว [1] กากอุ่น [2] และ แครอท [3] เป็นต้น เครื่องอบแห้งที่คิดค้นแรก ๆ ใช้วิธีระบายความร้อนส่วนเกินด้วยการทำบายพาสสารทำงานไปยังเครื่องควบแน่นตัวนอก [4] ระยะต่อมาได้มีการพัฒนาเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนที่ใช้เครื่องอัดไอที่มีความเร็วรอบแปรผัน [5] โดยเครื่องอัดมีหน้าที่ปรับเปลี่ยนความเร็วรอบให้เหมาะสมกับภาระโหลดโดยไม่มีการระบายความร้อนทิ้งเหมือนเครื่องอบแห้งก่อนหน้านี้เป็นการใช้พลังงานอย่างคุ้มค่า และพบว่าเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนใช้อินเวอร์เตอร์ควบคุม นั้นให้สมรรถนะการอบแห้งที่สูงกว่าเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนประเภทบายพาสสารทำงานไปยังเครื่องควบแน่นตัวนอก [5], [6] จากหลักการดังกล่าวมีงานวิจัยหลายงานระบุถึงสีและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งชนิดนี้ว่าจัดอยู่ในเกณฑ์ดี [7] การอบแห้งโดยใช้ปั๊มความร้อนมีสมรรถนะสูงเมื่อใช้อุณหภูมิสูง ซึ่ง [8] สามารถควบคุมอุณหภูมิอากาศร้อนก่อนเข้าห้องอบแห้งสูงถึง 60 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ [9] ศึกษาผลของอากาศแวดล้อมที่มีผลกับสัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อนที่ใช้จริงในห้องอบแห้ง (Coefficient of Performance, COP_h) ของโหมดการใช้งานโหมดแบบวงจรเดียวมีขนาด 10.5 กิโลวัตต์ และโหมดแบบวงจรแบบสองขั้นตอน (Cascade Cycle Mode) ซึ่งวงจรอุณหภูมิด้านต่ำมีขนาด 9.1 กิโลวัตต์ และวงจรอุณหภูมิด้านสูงมีขนาด 10.5 กิโลวัตต์ พบว่าโหมดแบบวงจรเดียว มีค่า COP_h สูงกว่าโหมดแบบวงจรแบบสองขั้นตอน (Cascade Cycle Mode) เมื่ออุณหภูมิสิ่งแวดล้อมมากกว่า 2 องศาเซลเซียส [2] ได้ใช้เครื่องอบ

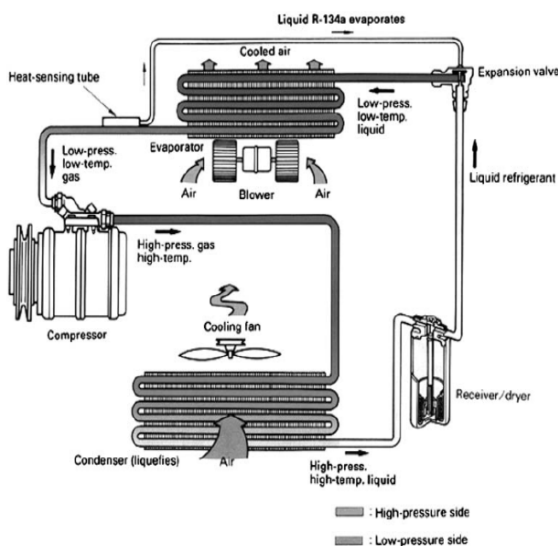
แห้งแบบปั๊มความร้อนขนาด 3.5 กิโลวัตต์ โดยใช้สารทำงาน R410A อบแห้งกากอุ่นที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส โดยใช้ความเร็ว 1.5 2 และ 2.5 เมตรต่อวินาที พบว่าเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้นใช้เวลาในการอบแห้งน้อยลง [10] ศึกษาโหมดการควบคุมอุณหภูมิห้องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนแบบความเร็วรอบเครื่องอัดแบบแปรผันมี 2 วัฏจักรทดสอบโหมดการทำงานของอินเวอร์เตอร์แบบปิด-เปิด และแบบ พี ไอ ดี พบว่าโหมดการควบคุมอินเวอร์เตอร์แบบปิด-เปิด มีอัตราการดึงน้ำออกจำเพาะสูงกว่าโหมดการควบคุมอินเวอร์เตอร์แบบ พี ไอ ดี แต่อย่างไรก็ตามเครื่องอบแห้งที่มีอยู่ดังกล่าวยังคงมีขนาดตัวโครงสร้างที่ใหญ่ที่รองรับอุปกรณ์ของระบบปั๊มความร้อนและระบบอากาศที่ใช้งาน ปัจจุบันวัตถุดิบทางการเกษตรที่ใช้อบแห้งต่อครัวเรือนบางครั้งผลผลิตออกมามีไม่มากซึ่งเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนที่มีใช้อยู่มีขนาดใหญ่ไม่เหมาะสม ดังนั้นจึงพัฒนาเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนขนาดเล็กสำหรับใช้อบแห้งวัตถุดิบทางการเกษตรคือ แป้งกล้วย ซึ่งมาตรฐานเลขที่ มผช.1375/2550 กองบริหารมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (2550) [11] ได้กำหนดคุณภาพไว้ดังนี้ ลักษณะทั่วไปต้องเป็นผงละเอียด แห้ง ไม่จับตัวเป็นก้อน สีต้องมีสีที่ดีตามธรรมชาติของแป้งกล้วย กลิ่น ต้องมีกลิ่นที่ดีตามธรรมชาติของแป้งกล้วย ปราศจากกลิ่นอื่นที่ไม่พึงประสงค์ เช่น กลิ่นอับ กลิ่นหืน สิ่งแปลกปลอม ต้องไม่พบสิ่งแปลกปลอมที่ไม่ใช่ส่วนประกอบที่ใช้ เช่น เส้นผม ดิน ทราย กรวด ชิ้นส่วนหรือสิ่งปฏิกูลจากสัตว์ ความชื้น ต้องไม่เกินร้อยละ 12 โดยน้ำหนัก และจุลินทรีย์ ยีสต์ และรา ต้องไม่เกิน 500 โคโลนีต่อตัวอย่าง 1 กรัม สำหรับขั้นตอนการทำให้กล้วยน้ำว้าสไลด์อบแห้งสำหรับทำแป้งกล้วยใช้อุณหภูมิอบแห้งที่ 60 องศาเซลเซียส [12] ดังนั้นจุดเด่นของงานวิจัยที่แตกต่างจากงานวิจัยก่อนหน้านี้คือ เครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนมีขนาดเล็ก อุปกรณ์ที่ใช้ในระบบปั๊มความร้อนมีขนาดเล็กและมีขายในท้องตลาด ส่วนระบบการควบคุมอุณหภูมิในการอบแห้งใช้วิธีการควบคุมการทำงานของเครื่องอัดแบบปิด-เปิดร่วมกับการทำงานของวาล์วไฟฟ้าที่ติดตั้งก่อน

ลดความดันซึ่งปิดไม่ให้สารทำงานไหลผ่านไปยังลดความดันในช่วงเครื่องอัดหยุดการทำงานเมื่ออุณหภูมิอากาศร้อนถึงจุดที่ใช้งาน

2. รูปแบบหลักการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนที่มีการศึกษาวิจัย

2.1 เครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนใช้วิธีระบายความร้อนส่วนเกินด้วยการทำบายพาสสารทำงานไปยังเครื่องควบแน่นตัวนอก

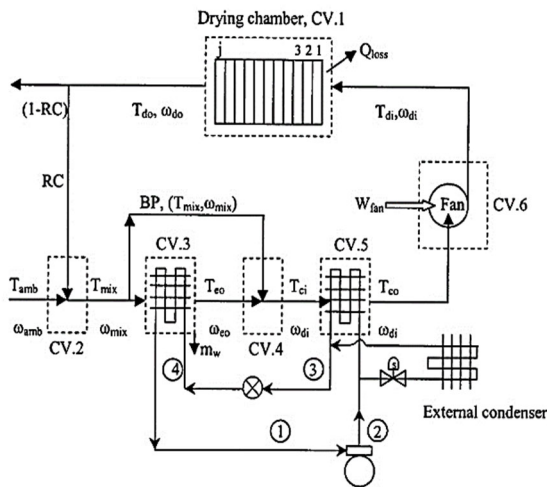
ระบบปั๊มความร้อนที่นิยมใช้กันมากที่สุดซึ่งออกแบบให้ทำงานในช่วงอุณหภูมิไม่สูงมาก ระบบปั๊มความร้อนจะมีอุปกรณ์หลัก ๆ เช่นเดียวกับระบบปรับอากาศหรือระบบทำความเย็น ที่มุ่งเน้นใช้ประโยชน์จากด้านร้อนของฝั่งเครื่องควบแน่นสำหรับเพิ่มอุณหภูมิของอากาศมีส่วนประกอบหลักดังนี้ เครื่องอัดหรือคอมเพรสเซอร์ (Compressor, W_{comp}) เครื่องควบแน่นหรือคอนเดนเซอร์ (Condenser, Q_{rc}) เครื่องทำระเหยหรืออีวาพอเรเตอร์ (Evaporator, Q_{re}) และลิ้นลดความดัน หรือเอ็กซ์แพนชันวาล์ว (Expansion Valve) ดังรูปที่ 1



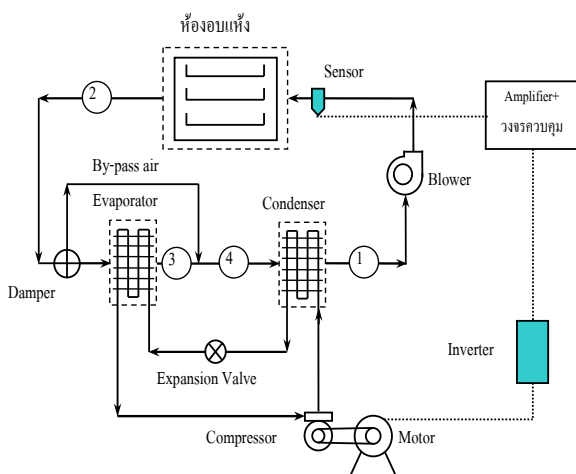
รูปที่ 1 ส่วนประกอบของระบบปั๊มความร้อน [13]

เครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนมีการดึงความชื้นออกจากอากาศก่อนอบแห้ง (Dehumidifying Heat Pump Dryer) จากทฤษฎีการอบแห้งเป็นที่ทราบกันว่า เมื่ออากาศที่ใช้ออบแห้งมีความชื้นต่ำ เป็นการเพิ่มความต่างศักย์ของความเข้มข้นไอน้ำที่ผิววัสดุอบแห้งกับไอน้ำในอากาศ ซึ่งเป็นการเพิ่มศักยภาพในการอบแห้ง เครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนจึงถูกออกแบบมาเพื่อจุดประสงค์นี้และสามารถอบแห้งได้ทั้งในระบบปิด (Closed System) และระบบเปิดบางส่วน (Partially Open System) ระบบปิดสามารถทำได้โดยปิดบานปรับลม ในระบบเปิดบางส่วนจะมีการนำอากาศภายนอกเข้ามาใช้ในระบบ และทิ้งอากาศร้อนขึ้นหลังอบแห้งสู่บรรยากาศไปในปริมาณที่เท่า ๆ กัน ความร้อนที่อากาศได้รับจากเครื่องควบแน่น เพื่อใช้ไปในการระเหยน้ำจากวัสดุอบแห้งจะถูกปรับคืน (Recovery) โดยผ่านทางเครื่องทำระเหยซึ่งความชื้นในอากาศจะถูกควบแน่นดึงออกมาในปริมาณที่เท่ากับปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุอบแห้งสู่อากาศ อากาศหลังอบแห้งที่หมุนเวียนกลับไปใช้ในระบบจะมีบางส่วนที่ไหลข้ามเครื่องทำระเหย (By Pass Air) และไปผสมกับอากาศที่ออกจากเครื่องทำระเหยก่อนจะถูกส่งไปเพิ่มอุณหภูมิที่เครื่องควบแน่น เหตุผลที่บายพาสอากาศบางส่วนไหลข้ามเครื่องทำระเหย เนื่องจากในกระบวนการอบแห้ง ปริมาณลมที่ใช้มักจะมีเป็นจำนวนมาก ดังนั้นขนาดการทำทำความเย็นของเครื่องทำระเหยไม่อยู่ในวิสัยที่จะรับภาระจากอากาศร้อนได้ทั้งหมดในกรณีของระบบปิด สำหรับระบบควบคุมอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งไม่ให้สูงเกินความต้องการ สภาวะภายในห้องอบแห้งจะต้องอยู่ในสภาวะสมดุลทางความร้อน ซึ่งตามกฎหมายพลังงานไม่สามารถที่จะทำได้ เนื่องจากมีงานภายนอกซึ่งเป็นงานที่ป้อนให้กับเครื่องอัดไอและพัดลมใส่ให้กับระบบตลอดเวลาโดยเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของความร้อน รวมทั้งเมื่อวัสดุอบแห้งมีความชื้นต่ำลงส่งผลให้อัตราแลกเปลี่ยนความร้อนที่เครื่องควบแน่นตัวในให้กับ

อากาศมีความต้องการลดลงด้วยแต่เครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนชนิดนี้เครื่องอัดทำงานตลอดเวลา ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องมีชุดเครื่องควบแน่นตัวนอกเพื่อระบายความร้อนส่วนเกินสำหรับควบคุมอุณหภูมิอากาศให้คงที่ วงจรการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนชนิดนี้ตามรูปที่ 2



รูปที่ 2 วงจรการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนที่ใช้วิธีระบายความร้อนส่วนเกินด้วยการทำบายพาสสารทำงานไปยังเครื่องควบแน่นตัวนอก [4]



รูปที่ 3 วงจรการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนความเร็วรอบแปรผัน [5]

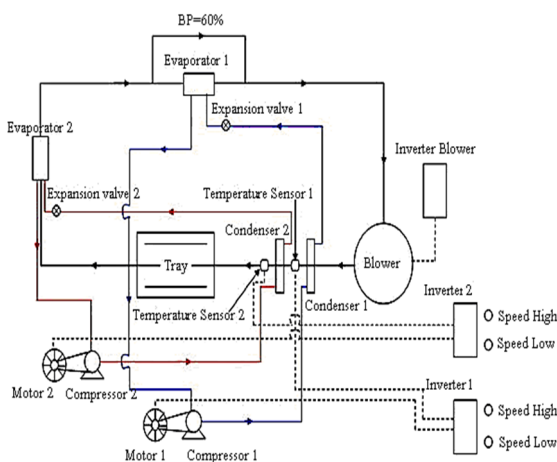
2.2 เครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนใช้อินเวอร์เตอร์มาใช้ในการปรับความเร็วรอบมอเตอร์ขับเคลื่อนของเครื่องอัดไอของปั๊มความร้อน

เครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนชนิดนี้ใช้หลักการแปรเปลี่ยนอัตราการไหลของสารทำงานโดยไม่ใช้เครื่องควบแน่นตัวนอกในการควบคุมอุณหภูมิห้องอบแห้งแต่ใช้การปรับความเร็วรอบมอเตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อนเครื่องอัดไอ ดังรูปที่ 3 [5] ได้ออกแบบเครื่องอบแห้งมีขนาดห้องอบแห้งขนาด 0.4x0.5x0.4 ลูกบาศก์เมตร บรรจุลำไยเฉพาะเนื้อได้จำนวน 10 ถาด (น้ำหนักลำไยเฉพาะเนื้อ 7.7-9 กิโลกรัม) ใช้ปั๊มความร้อนขนาด 1 ตัน ความเย็น และสารทำงานคือ R-134a การประเมินสมรรถนะใช้วิธีการทดลอง กำหนดระบบลมร้อนเป็นระบบปิด มีเงื่อนไขในการอบแห้งคือใช้อุณหภูมิในการอบแห้งและความเร็วลมที่ 55 องศาเซลเซียส และ 0.7 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ สัดส่วนอากาศข้ามเครื่องทำระเหยจะอยู่ในช่วงระหว่างร้อยละ 60-80 ลำไยเฉพาะเนื้อมีความชื้นเริ่มต้น 551-658 %dry basis อบแห้งจนมีความชื้นสุดท้าย 18 %dry basis พบว่าสัดส่วนอากาศข้ามเครื่องทำระเหยร้อยละ 60 ให้สมรรถนะดีที่สุด ใช้เวลาอบแห้ง 24 ชั่วโมง อัตราการอบแห้งเฉลี่ย 0.263 กิโลกรัม(น้ำ)ต่อชั่วโมง อัตราการดึงน้ำออกจำเพาะเฉลี่ย 0.302 กิโลกรัม(น้ำ)ต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบปั๊มความร้อนเฉลี่ยที่คำนวณจากวงจรสารทำงาน 7.096 ในการศึกษาคุณภาพของเนื้อลำไยหลังการอบแห้งโดยใช้สีเป็นบรรทัดฐานพบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสีเหลืองทอง และเมื่อใช้ผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถใช้ทำนายได้ดี สอดคล้องกับผลของการทดลอง

ไพโรจน์ จันทรแก้ว และคณะ [8] ได้ทดสอบสมรรถนะเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน 2 วัฏจักร ดังรูปที่ 4 โดยควบคุมอุณหภูมิอากาศก่อนเข้าห้องอบแห้งแบบใช้ความเร็วรอบเครื่องอัดแบบสูง-ต่ำ ซึ่งห้องอบแห้งมีขนาด 0.7x1.2x0.6 ลูกบาศก์เมตร ระบบหมุนเวียนของ

อากาศใช้พัดลมแบบแรงเหวี่ยง ชุดปั๊มความร้อนใช้ขนาด 1 ตันความเย็น โดยใช้สารทำงาน R-134a เป็นสารทำงานจำนวน 2 ชุด การทดสอบเพื่อหาสมรรถนะใช้กล้วยน้ำว้าจำนวน 40 กิโลกรัม ซึ่งมีความชื้นเริ่มต้น 266.6 % dry basis ใช้วงจรอากาศแบบปิด อุณหภูมิและความเร็วอากาศก่อนเข้าห้องอบแห้ง 60 ± 2 องศาเซลเซียส และ 0.65 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ อบแห้งจนความชื้นลดลงเหลือ 65.8 % dry basis สัดส่วนอากาศไหลข้ามเครื่องทำระเหยวัฏจักรที่ 1 ร้อยละ 60 พบว่า ใช้เวลาการอบแห้ง 27 ชั่วโมง อัตราการอบแห้ง 0.81 กิโลกรัม(น้ำ)ต่อชั่วโมง ได้ค่า $COP_h = 3.627$ $SMER_{ave} = 0.38$ กิโลกรัม(น้ำ)ต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง และ ความสิ้นเปลืองพลังงานทั้งหมด 56.79 กิโลวัตต์ชั่วโมง

จากการศึกษางานวิจัยที่ศึกษาพอสรุปได้ว่า เครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนสามารถใช้อุปกรณ์จากระบบทำความเย็นหรือระบบปรับอากาศ อัตราการอบแห้งสูงเมื่อมีการใช้ความเร็ว และอุณหภูมิในการอบแห้งสูงแต่ระบบปั๊มความร้อนมีข้อจำกัด จากรายงานวิจัยสามารถใช้อุณหภูมิได้สูงสุดที่ 60 องศาเซลเซียส ซึ่งสามารถประยุกต์ในการอบแห้งกล้วยสไลด์ได้พอดีที่อุณหภูมิอบแห้ง 60 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4 ไดอะแกรมวงจรระบบควบคุมระบบปั๊มความร้อน 2 วัฏจักรโดยใช้ความเร็วรอบเครื่องอัดแบบสูง-ต่ำ [8]

3. ระเบียบวิธีวิจัย

3.1 วัสดุและวิธีการ

3.1.1 การพัฒนาเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนขนาดเล็ก

โดยการเลือกอุปกรณ์และจัดซื้อจัดหาอุปกรณ์ ทำการสร้างเครื่องอบแห้งโดยผนังปูด้วยฉนวนใยแก้ว และติดตั้งอุปกรณ์ ระบบปั๊มความร้อน ติดตั้งโบลเวอร์ พร้อมติดตั้งระบบไฟฟ้า ระบบควบคุมการทำงานของระบบปั๊มความร้อน เมื่อนำกล้วยสไลด์ใส่ในห้องอบแห้ง เปิดให้ระบบปั๊มความร้อนทำงาน เครื่องควบแน่นถ่ายเทความร้อนให้กับอากาศตามที่ตั้งอุณหภูมิไว้ ความร้อนในอากาศถ่ายเทความร้อนให้กับกล้วยสไลด์ระเหยเป็นไอน้ำในอากาศมีค่าเพิ่มขึ้น อากาศที่ออกจากห้องอบแห้งผ่านเครื่องทำระเหยทำให้อากาศที่ผ่านเครื่องทำระเหยมีอุณหภูมิลดลง ทำให้อากาศที่ปนมากระทบท่อเย็นของเครื่องทำระเหยควบแน่นกลายเป็นของเหลว เมื่อน้ำที่ผิวกล้วยสไลด์แห้งลง น้ำที่อยู่ด้านในกล้วยสไลด์จะซึมออกมาสู่ผิวกล้วยสไลด์ ขนาดของโครงสร้างของเครื่องอบแห้ง มีขนาด $0.510 \times 1.06 \times 0.85 = 0.459$ ลูกบาศก์เมตร ขนาดของถาดใส่กล้วยมีขนาด $0.330 \times 0.409 = 0.134$ ตารางเมตร ตู้อบแห้งมีปริมาตรภายใน $0.48 \times 0.47 \times 0.39 = 0.088$ ลูกบาศก์เมตร วัสดุที่นำมาใช้ทำผนังเลือกใช้เป็นสังกะสีแผ่นเรียบเป็นผนัง ใช้ฉนวนใยแก้วเป็นฉนวนกันความร้อน ใช้เครื่องอัดแบบหุ้มปียี่ห้อ Kultorn AE1360Y ขนาด 497 วัตต์ เครื่องควบแน่นสามารถถ่ายเทความร้อนได้ 1,800 วัตต์ และเครื่องทำระเหยสามารถถ่ายเทความร้อนได้ 1,300 วัตต์ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ของรถยนต์ โบลเวอร์ที่ใช้เป็นโบลเวอร์ของระบบปรับอากาศแบบแยกส่วนยี่ห้อ IC รุ่น SCM4110357 ขนาดมอเตอร์ 174.6 วัตต์ โดยดัดแปลงใช้โบลเวอร์ด้านเดียวซึ่งมีขนาดเล็กพอเหมาะกับการดัดแปลงสำหรับผลักดันอากาศให้ไหลในระบบอากาศของเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนขนาดเล็กดังนั้นจึงมี

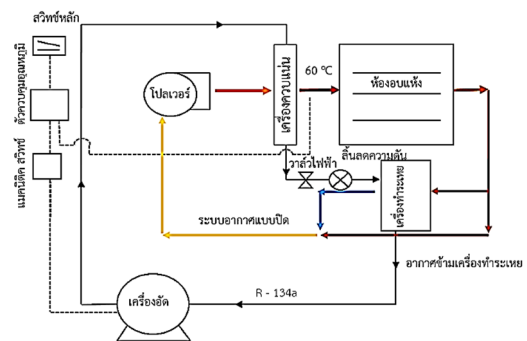
ขีดจำกัดความสามารถในการผลักดันอากาศดังนี้ สามารถปรับอัตราการไหล (Flow Rate, $\dot{V}$) ได้สามระดับคือ 0.117 0.128 และ 0.140 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที โดยใช้ตัวปรับอัตราการไหลของพัดลมตั้งโต๊ะ เกจวัดความดันที่ใช้ยี่ห้อ Honsgsen และอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิใช้ตัวควบคุมอุณหภูมิ ยี่ห้อ TOHO รุ่น TTM-004 เพื่อควบคุมการทำงานของเครื่องอัดให้หยุดการทำงานที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และต่อการทำงานที่อุณหภูมิ 58 องศาเซลเซียส ซึ่งแตกต่างจากเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนที่เคยพัฒนามาก่อนหน้า เช่น ควบคุมอุณหภูมิโดยบายพาสสารทำงานบางส่วนไปยังเครื่องควบแน่นตัวนอกแต่เครื่องอัดยังทำงานอยู่ [4], [6] และอีกวิธีคือการควบคุมอุณหภูมิโดยใช้ความเร็วรอบเครื่องอัดแบบแปรผัน [10] วงจรการทำงานดังรูปที่ 5 และรูปที่ 6 แสดงรูปแบบเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนขนาดเล็ก

3.1.2 วัตถุประสงค์สำหรับการทดสอบ

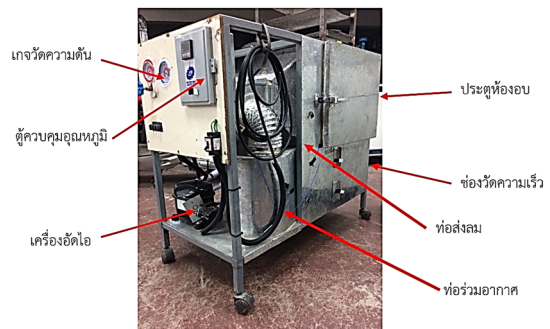
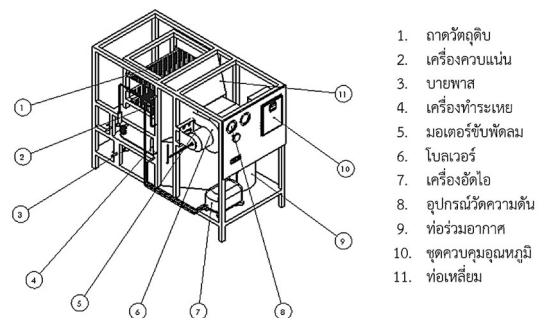
กล้วยน้ำว้าดิบถูกนำมาใช้เป็นวัสดุที่ใช้ในการอบแห้งโดยกระบวนการนำมาปอกเปลือก และสไลด์ในแนวขวางซึ่งจะเป็นแผ่นกลมหนาประมาณ 2 มิลลิเมตร จากนั้นนำไปจัดเรียงบนถาดจำนวน 3 ถาด มีน้ำหนักประมาณ 400-500 กรัม ดังรูปที่ 7

3.1.3 ตัวแปรที่ศึกษาสำหรับใช้ทดสอบหาสมรรถนะ

การทดสอบสมรรถนะโดยใช้อากาศแบบปิด อุณหภูมิก่อนเข้าห้องอบแห้ง 60 องศาเซลเซียส โดยแปรเปลี่ยนอัตราการไหล 0.117 0.128 และ 0.140 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ซึ่งวัสดุอบแห้งกล้วยน้ำว้าดิบสไลด์มีความชื้นเริ่มต้น 244-281% dry basis และปรับสัดส่วนอากาศไหลเข้าเครื่องทำระเหยร้อยละ 60 เนื่องจากงานวิจัยก่อนหน้า [5] ให้สมรรถนะดีที่สุดดังนั้นจึงนำมากำหนดใช้ในการทดสอบหาสมรรถนะโดยทำการอบแห้งจนมีความชื้นสุดท้ายต่ำกว่า 6.35 % dry basis และทำการทดสอบจำนวน 3 ซ้ำ



รูปที่ 5 การออกแบบวงจรเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนขนาดเล็ก



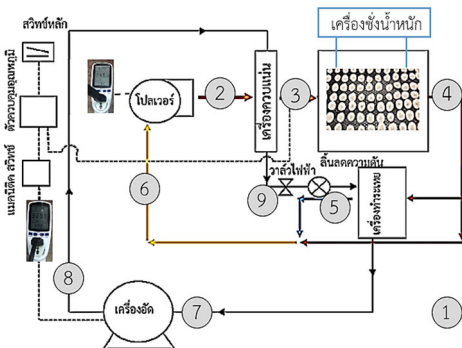
รูปที่ 6 เครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนขนาดเล็ก



รูปที่ 7 กล้วยน้ำว้าดิบสไลด์สำหรับใช้ทดสอบ

3.1.4 ขั้นตอนการทดสอบ

ในการหาสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนขนาดเล็ก โดยวิเคราะห์จากวงจรอากาศในห้องอบแห้ง ซึ่งทดสอบแบบระบบปิด โดยใช้กล้วยน้ำว้าดิบสไลด์จำนวน 400-500 กรัม จากนั้นทำการอบแห้งจนมีความชื้นสุดท้าย โดยทดสอบที่อุณหภูมิอากาศก่อนเข้าห้องอบแห้ง 60 องศาเซลเซียส สัดส่วนของอากาศไหลเข้าเครื่องทำระเหย (BP) ร้อยละ 60 อัตราการไหลก่อนเข้าห้องอบแห้งตามเงื่อนไข จากนั้นทำการเก็บข้อมูลระหว่างการอบแห้ง คือ น้ำหนักของกล้วยที่อบแห้ง ความสิ้นเปลืองพลังงานของโบลเวอร์และเครื่องอัดไอ อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อม อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศก่อนเข้าเครื่องควบแน่น อุณหภูมิอากาศออกจากห้องอบแห้ง อุณหภูมิอากาศออกจากเครื่องทำระเหย อุณหภูมิอากาศก่อนเข้าโบลเวอร์ อุณหภูมิและความดันสารทำงานก่อนเข้าเครื่องอัด อุณหภูมิและความดันสารทำงานออกจากเครื่องอัด และอุณหภูมิสารทำงานออกจากเครื่องควบแน่นดังรูปที่ 8 โดยบันทึกผลทุก ๆ 15 นาที และนำข้อมูลที่เก็บมาวิเคราะห์หาสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนขนาดเล็ก



- ① อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อม
- ② อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศก่อนเข้าเครื่องควบแน่น
- ③ อุณหภูมิอากาศออกจากเครื่องควบแน่น
- ④ อุณหภูมิอากาศออกจากห้องอบแห้ง
- ⑤ อุณหภูมิอากาศออกจากเครื่องทำระเหย
- ⑥ อุณหภูมิอากาศก่อนเข้าโบลเวอร์
- ⑦ อุณหภูมิและความดันสารทำงานก่อนเข้าเครื่องอัด
- ⑧ อุณหภูมิและความดันสารทำงานออกจากเครื่องอัด
- ⑨ อุณหภูมิสารทำงานออกจากเครื่องควบแน่น

รูปที่ 8 ตำแหน่งตรวจวัดในช่วงทดสอบเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนขนาดเล็ก

3.1.5 การประเมินสมรรถนะ

สมรรถนะของเครื่องอบแห้งส่วนใหญ่ใช้ค่าอัตราการดึงน้ำออกจำเพาะ (Specific Moisture Extraction Rate, SMER) ซึ่งใช้ในการเลือกสภาวะที่ให้สมรรถนะที่สูง ในการตรวจสอบพฤติกรรมของระบบอบแห้งแบบปั๊มความร้อนให้ได้ละเอียดมากขึ้น จึงได้ทำการวิเคราะห์ผลอื่น ๆ เช่น อัตราการอบแห้ง การคำนวณอัตราความร้อนที่เครื่องควบแน่น และค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อนที่ใช้จริงในห้องอบแห้งดังต่อไปนี้

- อัตราการอบแห้ง (Drying Rate, DR) คือปริมาณน้ำที่ออกจากกล้วยสไลด์ต่อเวลาที่ใช้ดังสมการที่ (1)

$$DR = \frac{\text{Water}}{\text{Drying time}}, \quad (\text{g} / \text{min}) \quad (1)$$

- การคำนวณอัตราความร้อนที่เครื่องควบแน่นดังสมการที่ (2)

$$\dot{Q}_{ac} = \dot{m}_a C_a (T_{co} - T_{ci}) + \dot{m}_a W_d C_v (T_{co} - T_{ci}) \quad (2)$$

โดยที่

$\dot{Q}_{ac}$ = อัตราความร้อนของเครื่องควบแน่น, kW

T_{ci} = อุณหภูมิอากาศก่อนเข้าเครื่องควบแน่น, °C

T_{co} = อุณหภูมิอากาศออกจากเครื่องควบแน่น, °C

W_d = อัตราส่วนความชื้นของอากาศก่อนเข้าเครื่องควบแน่น, $\text{kg}_{\text{water}} / \text{kg}_{\text{dry air}}$

C_a = ค่าความร้อนจำเพาะของอากาศแห้ง, $\text{kJ} / \text{kg} \text{ } ^\circ\text{C}$

C_v = ค่าความร้อนจำเพาะของอากาศชื้น, $\text{kJ} / \text{kg} \text{ } ^\circ\text{C}$

$\dot{m}_a$ = อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศแห้งผ่านเครื่องควบแน่น, kg / s

- ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อนที่ใช้จริงในห้องอบแห้ง (Coefficient of Performance, COP_h)

$$\text{COP}_h = \frac{\dot{Q}_{ac}}{W_{comp}} \quad (3)$$

โดยที่ W_{comp} = อัตราความร้อนเครื่องอัด, kW และ W_{comp} ใช้ กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อวันที่ความสิ้นเปลืองของไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์ที่ขับเคลื่อนเครื่องอัดอากาศด้วยเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง

- อัตราการดึงน้ำออกจำเพาะ (Specific Moisture Extraction Rate, SMER) คือ ปริมาณน้ำที่ออกจากกลั่นสไลด์ต่อพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ดังสมการที่ (6)

$$SMER = \frac{\text{Water}}{\text{Total electric}}, \left(\frac{\text{g}}{\text{kW} \cdot \text{h}} \right) \quad (6)$$

หมายเหตุ ค่าที่แสดงในผลการทดสอบเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดสอบ 3 ชั่วโมง

3.1.6 สถิติสำหรับการวิเคราะห์ข้อมูล

จากการทำการทดสอบซ้ำดังนั้นผลการทดสอบใช้ค่าเฉลี่ย และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานในการนำเสนอในส่วนของผลการทดสอบ และใช้การทดสอบเปรียบเทียบเชิงซ้อนสำหรับทดสอบว่ามีค่าเฉลี่ยคู่ใดบ้างที่ไม่เท่ากัน โดยเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยหลาย ๆ คู่ในเวลาเดียวกันที่ระดับนัยสำคัญที่ 0.05

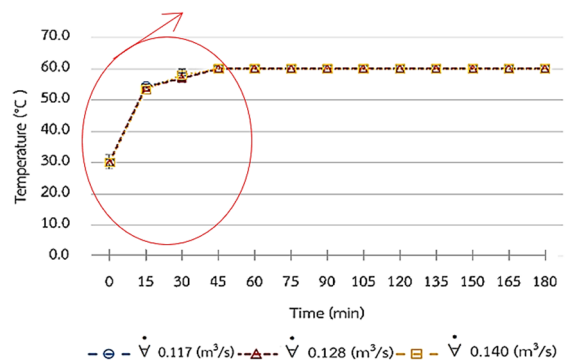
4. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

4.1 ผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิก่อนเข้าห้องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนขนาดเล็ก

จากการทดสอบเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนขนาดเล็ก ที่ 0-45 นาที พบว่าเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้นที่เวลาเดียวกันอุณหภูมิก่อนเข้าห้องอบแห้งลดลงเนื่องจากเมื่ออัตราการไหลของอากาศต่ำส่งผลให้อุณหภูมิอากาศที่ออกจากเครื่องควบแน่นสูง เป็นไปตามสมการที่ (2) เมื่อสมดุลสมการอัตราความร้อนที่ส่งมาจากสารทำงาน R-134a ที่ส่งมาแลกเปลี่ยนให้กับอากาศซึ่งเห็นได้ชัดเช่น ที่ 15 นาที ที่อัตราการไหล 0.117

0.128 และ 0.140 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ได้อุณหภูมิ 56.6 ± 0.5 54.1 ± 0.4 และ 51.9 ± 2.3 องศาเซลเซียสตามลำดับ ที่เวลาหลัง 45 นาที ตัวควบคุมอุณหภูมิควบคุมให้อากาศอยู่ที่ 60 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 9

เวลา (min)	$\dot{V} = 0.117 \text{ m}^3/\text{s}$	$\dot{V} = 0.128 \text{ m}^3/\text{s}$	$\dot{V} = 0.140 \text{ m}^3/\text{s}$
0	30.2 ± 2.3	29.9 ± 1.2	30.1 ± 1.1
15	56.6 ± 0.5	54.1 ± 0.4	51.9 ± 2.3
30	57.0 ± 0.6	57.0 ± 1.6	56.1 ± 2.0
45	60.0 ± 0.0	60.0 ± 0.0	57.7 ± 2.7

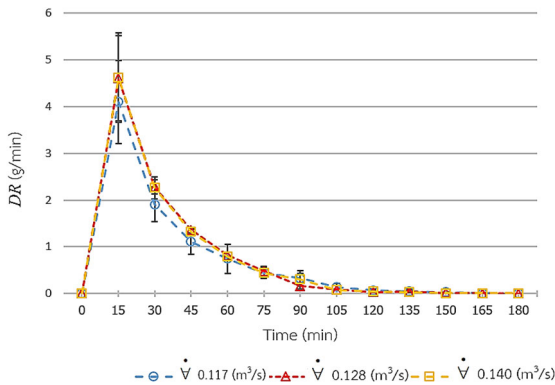


รูปที่ 9 ผลการควบคุมอุณหภูมิเฉลี่ยก่อนเข้าห้องอบแห้ง 60 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหล 0.117 0.128 และ 0.140 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที

4.2 ผลการเปลี่ยนแปลงอัตราการอบแห้ง (Drying Rate, DR)

การอบแห้งของเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนขนาดเล็ก เมื่ออบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส อัตราการไหล 0.117 0.128 และ 0.140 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ในช่วงแรกโดยเฉพาะที่ 15 นาที ได้ค่าอัตราการอบแห้งสูงกว่าช่วงเวลาอื่นและที่อัตราการไหล 0.140 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที อัตราการอบแห้งสูงรองลงมาที่อัตราการไหล 0.128 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที และน้อยสุดที่อัตราการไหล 0.117 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที เนื่องจากช่วง 15 นาที มีปริมาณน้ำที่อยู่ผิวกลั่นสไลด์จึงง่ายต่อการเปลี่ยนเฟสเป็นไอส่งผลให้อัตรา

การอบแห้งสูงส่วนตั้งแต่เวลา 30 นาที เป็นต้นไปอัตราการอบแห้งมีค่าลดลงตามระยะเวลาการอบแห้งเนื่องจากน้ำที่อยู่ในกล้วยสไลด์ที่อยู่ในเนื้อกล้วยจะซึมออกมาถึงผิวกล้วยได้ช้า ส่งผลให้อัตราการอบแห้งลดลงตามระยะเวลาการอบแห้งเนื่องจากน้ำที่อยู่ในกล้วยสไลด์เริ่มลดลงตามเวลาอบแห้ง ที่อัตราการไหล 0.128 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที และอัตราการไหล 0.140 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที อัตราการอบแห้งไม่แตกต่างกันเนื่องจากความชื้นเริ่มต้นของอัตราการไหล 0.140 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที มีค่ามากกว่าอัตราการไหล 0.128 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที เล็กน้อยถึงแม้ว่าอัตราการไหล 0.140 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที มีอุณหภูมิอากาศต่ำกว่าอัตราการไหล 0.128 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที เล็กน้อยส่งผลให้ปริมาณน้ำที่ออกมีค่าไม่แตกต่างกันกับอัตราการไหล 0.128 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที แสดงดังรูปที่ 10

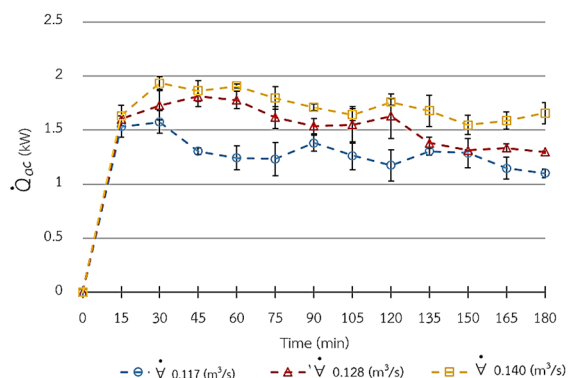


รูปที่ 10 การเปลี่ยนแปลงอัตราการอบแห้งกับเวลาอุณหภูมิเฉลี่ย 60 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหล 0.117 0.128 และ 0.140 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที

4.3 อัตราความร้อนที่เครื่องควบแน่น

การอบแห้งของเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนขนาดเล็กอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส อัตราการไหล 0.117 0.128 และ 0.140 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที พบว่าอัตราความร้อนเริ่มสูงขึ้น 15 ถึง 30 นาที

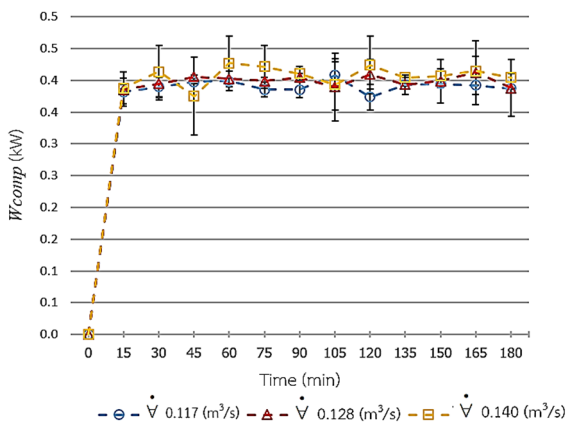
เนื่องจากความร้อนเข้าไปสะสมในโครงสร้างถาดและกล้วยสไลด์รวมถึงอัตราความร้อนของการดึงน้ำออกจากกล้วยสไลด์ จากนั้นอัตราความร้อนลดลงตามระยะเวลาที่มากขึ้นเนื่องจากปริมาณน้ำในกล้วยสไลด์เริ่มน้อยลงเมื่อเปรียบเทียบอัตราการไหลพบว่าเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้นอัตราความร้อนที่เครื่องควบแน่นมากขึ้นเนื่องจากอัตราการไหลเชิงมวล ($\dot{m}_a$) เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้อัตราความร้อนที่เครื่องควบแน่นเพิ่มขึ้นตามสมการที่ (2) แสดงดังรูปที่ 11 เมื่อเปรียบเทียบรูปที่ 10 กับรูปที่ 11 ในช่วงท้ายของการอบแห้งน้ำออกจากกล้วยน้อยมากแต่อัตราความร้อนมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยตามระยะเวลาอบแห้งเนื่องจากส่วนหนึ่งคือความร้อนสูญเสียให้กับสิ่งแวดล้อม และอีกส่วนหนึ่งสำหรับให้เกิดสมดุลความร้อนในวงจรกระแสอากาศในเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน ซึ่งในการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนระบบอากาศเมื่ออากาศร้อนที่ออกจากห้องอบแห้งส่วนหนึ่งต้องเข้าเครื่องทำระเหยส่งผลให้อากาศส่วนนี้มีอุณหภูมิต่ำลงและไหลผสมกับอากาศที่ไหลเข้าเครื่องทำระเหยจากนั้นอากาศผสมถูกโบลเวอร์ผลักดันให้ไหลผ่านเครื่องควบแน่นสำหรับเพิ่มอุณหภูมิอากาศ ดังนั้นในการสมดุลทำความร้อนการเปลี่ยนแปลงของอัตราความร้อนจึงปรากฏผลดังกล่าว



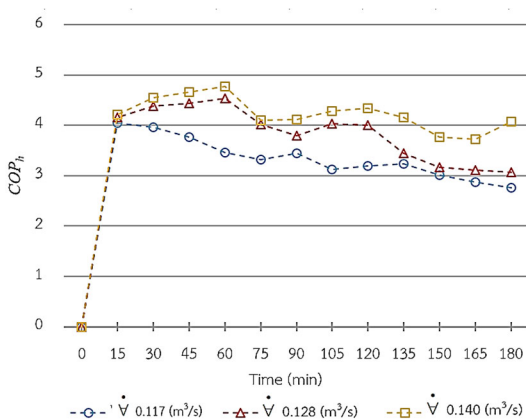
รูปที่ 11 การเปลี่ยนแปลงของอัตราความร้อนที่เครื่องควบแน่นกับเวลาอุณหภูมิเฉลี่ย 60 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหล 0.117 0.128 และ 0.140 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที

4.4 งานที่ใส่ให้เครื่องอัดไอ (W_{comp})

เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง ส่งผลให้ความดันและอุณหภูมิของสารทำงานด้านส่งของเครื่องอัดไอมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้งานของเครื่องอัดไอเพิ่มขึ้น และเมื่ออัตราการไหลของอากาศที่ใช้ในการอบแห้งเพิ่มขึ้นงานของเครื่องอัดไอมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศมีค่าเพิ่มขึ้น ผลของงานที่ใส่ให้เครื่องอัดไอ แสดงดังรูปที่ 12



รูปที่ 12 งานที่ใส่ให้เครื่องอัดไอ (W_{comp}) กับเวลาอุณหภูมิเฉลี่ย 60 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหล 0.117 0.128 และ 0.140 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที



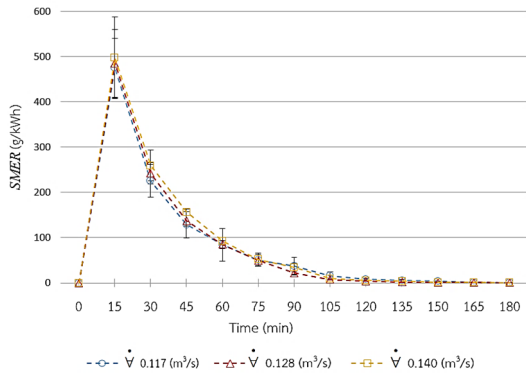
รูปที่ 13 การเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อนกับเวลาอุณหภูมิเฉลี่ย 60 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหล 0.117 0.128 และ 0.140 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที

4.5 ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อน (COP_h)

สัมประสิทธิ์สมรรถนะปั๊มความร้อน (COP_h) สามารถคำนวณได้โดยการเปรียบเทียบอัตราความร้อนที่ออกมาจากเครื่องควบแน่น กับงานที่ใช้ในการขับเคลื่อนเครื่องอัดไอ เนื่องจากความสัมพันธ์ของระบบปั๊มความร้อนนั้นเมื่องานของเครื่องอัดไอเพิ่มขึ้นทำให้อัตราความร้อนที่เครื่องควบแน่นเพิ่มขึ้นด้วย พบว่า เมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้นสัมประสิทธิ์สมรรถนะปั๊มความร้อน (COP_h) เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเนื่องจากระบบปั๊มความร้อนทำงานได้เต็มประสิทธิภาพ แสดงดังรูปที่ 13 เมื่อพิจารณาใช้เวลามากขึ้นค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะปั๊มความร้อนมีแนวโน้มลดลงทั้งสามอัตราการไหลเนื่องจากอัตราการอบแห้งลดลง ซึ่งเกิดจากปริมาณน้ำที่ออกจากกล้วยน้ำว้าดิบสไลด์มีปริมาณน้อยดังนั้นความต้องการความร้อนจากกระแสอากาศที่รับการถ่ายเทความร้อนจากเครื่องควบแน่นลดลงตาม แต่งานที่ใส่ให้เครื่องอัดจากรูปที่ 12 เปลี่ยนแปลงน้อยมาก

4.6 การเปลี่ยนแปลงอัตราการดึงน้ำออกจำเพาะ (Specific Moisture Extraction Rate, SMER)

การเปลี่ยนแปลงอัตราการดึงน้ำออกจำเพาะเป็นอัตราน้ำที่ออกจากกล้วยน้ำว้าสไลด์ต่อการใช้พลังงานไฟฟ้าในเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนขนาดเล็ก จากการทดสอบสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนขนาดเล็กอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส อัตราการไหล 0.117 0.128 และ 0.140 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที พบว่าประสิทธิภาพในการดึงน้ำออกจำเพาะในช่วงเวลาที่ 0-15 นาที สูงและลดลงตามเวลาการอบแห้งทั้งสามอัตราการไหล และมีแนวโน้มเดียวกันกับการเปลี่ยนแปลงของอัตราการอบแห้ง และเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้นอัตราการดึงน้ำออกจำเพาะเพิ่มขึ้นเนื่องจากอัตราความร้อนของอากาศมากขึ้นส่งผลให้น้ำออกจากกล้วยสไลด์ได้มากขึ้น ดังรูปที่ 14



รูปที่ 14 การเปลี่ยนแปลงอัตราการดึงน้ำออกจำเพาะกับเวลาอุณหภูมิเฉลี่ย 60 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหล 0.117 0.128 และ 0.140 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบความสามารถของเครื่องอบแห้งกล้วยน้ำว้าสไลด์ของเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนขนาดเล็ก

รายการ	$\dot{V} = 0.117 \text{ m}^3/\text{s}$	$\dot{V} = 0.128 \text{ m}^3/\text{s}$	$\dot{V} = 0.140 \text{ m}^3/\text{s}$	หน่วย
T	180	180	180	min
SMER	184.5 ± 11.85^s	186.2 ± 8.17^s	200.1 ± 21.34^s	(g/kWh)
W_{com}	0.392 ± 0.0032^h	0.398 ± 0.007^{hi}	0.407 ± 0.0072^i	(kW)
COP_h	3.32 ± 0.066^a	3.88 ± 0.031^b	4.24 ± 0.08^c	-
DR	1.730 ± 0.105^d	1.774 ± 0.068^d	1.816 ± 0.018^d	(g/min)
M_f	6.35 ± 0.001^e	6.12 ± 0.397^e	6.27 ± 0.073^e	(%dry basis)
$\dot{Q}_{ac}$	1.29 ± 0.014^f	1.54 ± 0.033^f	1.72 ± 0.055^f	(kW)

หมายเหตุ อักษรต่างกันในแถวเดียวกันให้ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

จากตารางที่ 1 จากเงื่อนไขอบแห้งให้กล้วยน้ำว้าสไลด์จนมีความชื้นสุดท้าย (M_f) ต่ำกว่า 6.35 %dry basis ซึ่งทั้งสามอัตราการไหลได้ค่า M_f ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเพิ่มอัตราการไหล ค่า SMER DR และ $\dot{Q}_{ac}$ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่เนื่องจากทั้งสามอัตราการไหลที่ใช้แตกต่างกันไม่มากนักเนื่องจากผลมาจากขีดจำกัดในอุปกรณ์ที่เลือกใช้และใช้เวลาการอบแห้งเท่ากันดังนั้น ค่า SMER DR และ $\dot{Q}_{ac}$ จึงไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

ส่วนค่า W_{comp} มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการไหล 0.117 และ 0.140 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนที่อัตราการไหล 0.128 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญกับอัตราการไหลทั้งสอง เนื่องจากค่าอัตราการไหลใช้งานระหว่าง 0.117 กับ 0.128 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที และ 0.128 กับ 0.140 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที แตกต่างกันน้อยเกินไป

ส่วนค่า COP_h มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตาม $\dot{Q}_{ac}$ และมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเพิ่มอัตราการไหล สภาวะที่เหมาะสมจากขอบเขตที่ศึกษา คือที่อัตราการไหล 0.140 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที เนื่องจากให้ ค่า SMER DR และค่า COP_h สูงกว่าอัตราการไหล 0.117 และ 0.128 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที



กล้วยสไลด์ดิบ



กล้วยสไลด์อบแห้ง



กล้วยอบแห้งปั่นละเอียด



แป้งกล้วย

รูปที่ 15 ตัวอย่างลักษณะสีกล้วยของแป้งกล้วยที่ขั้นตอนต่าง ๆ อุณหภูมิเฉลี่ย 60 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหล 0.140 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที โดยเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนขนาดเล็ก

ผลทางด้านคุณภาพพิจารณาจากความชื้นสุดท้ายอยู่ในเกณฑ์ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน แป้งกล้วย [9] สีของแป้งกล้วยมีลักษณะสีใกล้เคียงกับกล้วยสไลด์ดิบ สีของแป้งกล้วยทั้งสามอัตราการไหลไม่

แตกต่างกันเนื่องจากใช้อุณหภูมิเฉลี่ยที่ 60 องศาเซลเซียส ตัวอย่างสีของกล้วยสไลด์อบแห้งตั้งแต่กล้วยสไลด์ดิบจนผลิตเป็นแป้งกล้วยที่อัตราการ 0.140 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที จากการบดละเอียดและคัดแยกแป้ง ดังรูปที่ 15

5. สรุป

เครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนขนาดเล็กสำหรับกล้วยน้ำว้าสไลด์ที่พัฒนามีขนาดห้องอบแห้ง $0.48 \times 0.47 \times 0.39$ ลูกบาศก์เมตร สามารถบรรจุขนาด 0.330×0.409 ตารางเมตร จำนวน 3 ถาด ใช้โบลเวอร์ขับเคลื่อนมอเตอร์ 174.6 วัตต์ สำหรับระบบหมุนเวียนของอากาศที่ปรับอัตราการไหลได้สามระดับ คือที่ 0.117 0.128 และ 0.140 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ระบบปั๊มความร้อนใช้สารทำงาน R-134a และสี่อุปกรณ์หลัก คือเครื่องอัดแบบหุ้มปิดขนาด 497 วัตต์ ส่วนเครื่องทำระเหย 1,300 วัตต์ วาล์วลดความดัน และเครื่องควบแน่น 1,800 วัตต์ สามารถใช้อุณหภูมิสูงสุด 60 องศาเซลเซียส การควบคุมอุณหภูมิใช้วิธีการควบคุมการทำงานของเครื่องอัดแบบปิด-เปิดร่วมกับการทำงานของวาล์วไฟฟ้าที่ติดตั้งก่อนล้นลดความดัน ซึ่งปิดไม่ให้สารทำงานไหลผ่านไปยังล้นลดความดันในช่วงเครื่องอัดหยุดการทำงาน

ผลการทดสอบสมรรถนะเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนขนาดเล็กใช้กล้วยน้ำว้าดิบสไลด์ ที่อุณหภูมิในการอบ 60 องศาเซลเซียส และอัตราการไหล 0.117 0.128 และ 0.140 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ใช้วงจรอากาศแบบปิด และสัดส่วนอากาศไหลข้ามเครื่องทำระเหยร้อยละ 60 โดยความชื้นเริ่มต้นประมาณ 244-281% dry basis อบแห้งให้กล้วยน้ำว้าดิบสไลด์จนมีความชื้นสุดท้ายต่ำกว่า 6.35 % dry basis พบว่าอัตราการไหล 0.117 0.128 และ 0.140 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที มีอัตราการอบแห้งเฉลี่ย (DR) 1.730 ± 0.105 1.774 ± 0.068 และ 1.816 ± 0.018 กรัม(น้ำ)ต่อนาที

ตามลำดับ ค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์สมรรถนะปั๊มความร้อนเฉลี่ย (COP_p) 3.32 ± 0.066 3.88 ± 0.031 และ 4.24 ± 0.08 ตามลำดับ และมีค่าประสิทธิภาพในการใช้พลังงานของระบบอบแห้ง (SMER) 184.5 ± 11.85 186.2 ± 8.17 และ 200.1 ± 21.34 กรัมตอกิโลวัตต์ชั่วโมง ตามลำดับ ดังนั้นที่อัตราการไหล 0.140 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที เป็นสถานะที่ดีที่สุดเนื่องจากให้ค่า SMER สูง

ผลทางด้านคุณภาพด้านความชื้นสุดท้ายอยู่ในเกณฑ์ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน และคุณภาพด้านสีของแป้งกล้วยทั้งสามอัตราการไหลมีลักษณะใกล้เคียงกับสีของกล้วยสไลด์ดิบ

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก ที่เอื้ออำนวยสถานที่ในการจัดเก็บข้อมูล

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] W. Hao, H. Zhang, Sh. Liu, B. Mi and Y. Lai, "Mathematical modeling and performance analysis of direct expansion heat pump assisted solar drying system," *Renewable Energy*, vol. 165, pp. 77-87, Mar. 2021.
- [2] L. Taşeri, M. Aktaş, S. Şevik, M. Gülcü, G. Uysal Seçkin and B. Aktekel, "Determination of drying kinetics and quality parameters of grape pomace dried with a heat pump dryer," *Food Chemistry*, vol. 260, no. 15, pp. 152-159, Sep. 2018.
- [3] S. Liu, X. Li, M. Song, H. Li and Z. Sun, "Experimental investigation on drying performance of an existed enclosed fixed frequency air source heat pump drying

- system,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 130, no. 5, pp. 735–744, Feb. 2018.
- [4] U. Teeboonma, J. Tiansuwan and S. Soponronnarit, “Optimization of heat pump fruit dryers,” *Journal of Food Engineering*, vol. 59, no. 4, pp. 369–377, Oct. 2003.
- [5] A. Achariyaviriya, S. Achariyaviriya, Y. Namsanguan and P. Chunkaew, “Modified heat pump dryer for longan flesh drying,” in *Proceedings of IADC 2005 3rd Inter-American Drying Conference*, 2005, pp. C-6.
- [6] M. Chotswasd, “Effects of temperature control methods and drying conditions on heat pump dryer performance,” M. ENG. thesis, Dept. Energy ENG., Chiang Mai Univ., Chiang Mai, Thailand, 2007.
- [7] P. Chunkaew, “Design of Longan Flesh Heat Pump Dryer,” M. ENG. thesis, Dept. Mechanical ENG., Chiang Mai Univ., Chiang Mai, Thailand, 2005.
- [8] P. Chunkaew, A. Khadwilard, A. Tavata, Y. Sriudom, J. Visadmanee and P. Chorbamrung, “Performance of two-cycle heat pump dryer by max-min compressor round speed,” in *Proceeding of 10th Heat and Mass Energy Transfer in Thermal Equipment*, Chiang Mai Grand View Hotel, 2011, pp. 30-35.
- [9] J. Shen, T. Guo, Y. Tian and Z. Xing, “Design and experimental study of an air source heat pump for drying with dual modes of single stage and cascade cycle,” *Applied thermal engineering*, vol. 129, no. 25, pp. 280-289, Jan. 2018.
- [10] P. Chunkaew, Ch. Sritavorn, J. Visedmanee and Ch. Thawongamyingsakul, “Effect of Using Temperature Controller Modes with Variable Compressor Speed by Inverter on Heat Pump Dryer Performance,” in *Proceeding of the 8th Rajamagala University of Technology International Conference*, 2016, pp. 296-303.
- [11] *Banana Flour*, Community Product Standard number 1375/2550, 2007.
- [12] *Banana Product Processing Manual*, Nakhon Si Thammarat Rajabhat University, Nakhon Si Thammarat, NC, 2015, pp. 33–42.
- [13] S. Dayly, “Air-conditioning components,” in *Automotive Air-conditioning and Climate Control Systems*, First edition, Oxford, UK, 2006, pp. 91.

<http://journal.rmutp.ac.th/>

Real-time Travel Time Prediction Algorithm Using Spatiotemporal Speed Interval Patterns Matching

Krit Jedwanna* and Weerathep Chanintornthep

Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon
1381 Pracharat 1 Road, Wong Sawang, Bang Sue, Bangkok 10800

Received 28 October 2020; Revised 30 December 2020; Accepted 6 January 2021

Abstract

Accurate, efficient and robust travel time prediction is crucial to the development of advanced traveler information systems for providing route guidance information. To achieve this goal, this paper proposed a travel time prediction through the matching of the current speed interval pattern to that in a historical database. Speed intervals, instead of speeds, are considered in this study to simplify the structure of matching patterns for improving matching efficiency. In this study, speed interval patterns are defined by sets of link speed intervals that are either spatially or temporarily correlated with the link considered. With the speed interval patterns, the algorithm is developed for searching the historical pattern(s) that is/are the closest match with the current one. Then, link speeds from these matched patterns are combined for travel time prediction. By using the GPS probe taxi data, which the collected speeds are aggregated in every 5 minutes, the proposed travel time prediction system is implemented in Bangkok. With the speed data from probe taxi, this paper has chosen four links/paths with different geometric and flow characteristics for testing the performance of the proposed travel time prediction system. From these tests, it is found that the optimal speed interval pattern should include: 1) speeds of the studied link within three preceding time intervals and; 2) speeds of links in the first connection level of the studied link. Also, while the computational time is capable of real-time application, the proposed prediction algorithm is more accurate under uninterrupted flow conditions.

Keywords: Traffic Pattern Matching; Travel Time Prediction; Time-dependent Network; Spatiotemporal Correlation

* Corresponding Author. Tel.: +662 665 3777, E-mail Address: krit.j@rmutp.ac.th

1. Introduction

In the Development of the Intelligent Transportation System (ITS), Advanced Travelers Information System (ATIS) plays an important role in providing real-time traffic conditions and/or traffic management measures to travelers for avoiding unnecessary delay and ensuring the reliability of road network. Among all the information provided by ATIS, travel time is one of the key information used by the route guidance system to evaluate real-time shortest paths that help in the trip planning of drivers. As route guidance system is usually used before the trip is made, an accurate prediction of future link/path travel times is necessary to ensure good performance of the system. Travel time prediction is a challenging problem as the prediction will be affected by i) complex and non-linear interactions of heterogeneous groups of vehicles/drivers; ii) infrastructures and/or traffic management schemes that interrupt the traffic flows, and; iii) availability and types of information for travel time prediction. Owing to the complexity of the travel time prediction problem, various methods/models have been proposed in the literature and could be classified into two categories: parametric and non-parametric prediction models (H.-E. Lin et al.). [1]

Table 1 summarized some of the travel time prediction studies, with the corresponding data sources and prediction method, in the literature.

N. K. Chowdhury et al. [2] have proposed a modified moving average approach, which is another category of time series model, for travel time prediction. By

eliminating unwanted fluctuations in the data set, the model proposed in N. K. Chowdhury et al. [2] outperforms the conventional moving average methods. Owing to its nature, the time series model could only provide an accurate prediction for a short forecast period (i.e., 5 ~ 10 minutes) or under stable traffic conditions. Apart from the parametric models, W.H.K. Lam et al. [3] have adopted a traffic flow simulator (TFS), in which the original-destination demands are calibrated based on the historical link counts and prior demands by an upper-level model, for travel time predictions.

Table 1 Comparison of required data and prediction methods for travel time prediction

Studies	Application	Data	Prediction Method	Properties
N.K.Chowdhury et al. (2009) [2]	Short-term prediction	GPS	Moving average	Specific route
W.H.K.Lam et al. (2005) [3]	Short-term prediction	AVI	Traffic simulation	Urban road network
S.I.Bajwa et al. (2004) [4]	Short-term prediction	Point sensor	Pattern matching By Genetic Algorithms	Expressway
T. Kim et al. (2005) [5]	Short-term prediction	Point sensor	Traffic pattern recognition	Highway
Z.-P. Li et al. (2008) [6]	Short-term prediction	AVI	Exponential Smoothing	Urban road network
W.-H. Lee et al. (2009) [7]	Traffic Classification	GPS	Fuzzy C-mean	Specific route
Y. Zhang and Y. Liu (2009) [8]	Traffic state prediction	Point sensor	Non-linear least square	Freeway
A. Khosravi et al. (2011) [9]	Accuracy interval	GPS	Bayesian updated Neural network	Specific route
A. Simroth and H. Zahle (2011) [10]	Long-term prediction	GPS	Nonparametric Distribution-free Regression model	Nationwide Road network
W. Qiao et al. (2013) [11]	Short-term prediction	Bluetooth data	- Historical average - Auto regressive integrated moving average - Kalman filter - K-nearest neighbors	Freeway
Y. Zou et al. (2014) [12]	Short-term prediction	Point sensor	Space-time diurnal	Freeway
H. Jiang et al. (2016) [13]	Short-term prediction	Point sensor	- Neural Network - Multilinear Regression - Statistical Model	Highway
Our Proposed method	Short/ medium Term prediction	GPS	Pattern matching	Urban road network

For many cases in actual implementation, the relationships between travel time and traffic conditions are too complicated to be represented by any type of model. Thus, non-parametric models are becoming more attractive, especially for the application in a large and complex urban road network. In the literature, non-parametric travel time prediction models could be categorized into k-nearest neighbor (k-NN) algorithm (T. Kim et al. [5], W.H.K. Lam et al. [14]), expert system (W.-H. Lee et al. [7]) and artificial neural network (J.W.C. Van Lint et al. [15], A. Khosravi et al. [9]). T. Kim et al. [5]) developed pattern recognition algorithm, which based on link volumes in current and preceding time intervals, for short-term link volume/travel time prediction of a section of expressway in Washington DC. compare to the other k-NN approaches that use only current link flows, pattern recognition algorithm proposed in T. Kim et al. [5] gives a smaller prediction error in different neighborhood sizes. Apart from the prediction of traffic conditions, W.H.K. Lam et al [14] put a step forward in adopting the k-NN-based travel time prediction in incident detection. In their study, a modified k-NN approach, which depends on the estimated travel times and the corresponding temporal variance-covariance relationships, is adopted in travel time prediction. By comparing the predicted travel times and the corresponding estimated travel times from automatic vehicle identification (AVI) data, the incident could be detected if the difference exceeds the certain threshold value. In addition to the data mining

approaches, expert systems improve the accuracy of predictions by the introduction of prior-knowledge rules. W.-H. Lee et al. [7] have proposed an expert system for travel time prediction in Taipei urban road network. In their study, travel times are predicted based on a weighted sum of the current (based on current speeds and flows) and historical (based on traffic patterns in the historical database) travel time predictions. Rules, which are responsive to real-time events, are introduced by the expert of the test area for the automatic determination of weights. W.-H. Lee et al. [7] show that such an expert system in travel time prediction could achieve a root mean square error (RMSE) as low as 11%. J.W.C. Van Lint et al. [15], on the other hand, has adopted a state-space neural network (SSNN) to ensure the accuracy and robustness of travel time predictions in the presence of missing data. In their study, missing data (e.g., speeds from loop detectors) are estimated using simple imputation (i.e., exponential moving average and/or spatial interpolation) and the proposed method is tested on a simulated model with different patterns of missing data. J.W.C. Van Lint et al. [15] shows that even with 40% of data are missing, their SSNN could achieve a prediction error similar to the case with no missing data. Apart from the aforementioned models, there are other non-parametric models, such as the least square support vector machines discussed in Y. Zhang and Y. Liu [8] and the nonparametric distribution-free regression model introduced in A. Simroth and H. Zähle [10]), for travel time

prediction. In developing the aforementioned parametric and non-parametric models, traffic data plays a crucial role in model calibration/training that affects their performance. In practices, traffic data are commonly collected by global-positioning system (GPS), automatic vehicle identification (AVI) system and point sensor (e.g., loop detectors), while each of these methods will have their pros and cons under different types of implementation (e.g., freeway, arterial, etc). **Table 1**, summarized some of the travel time prediction studies and their required types of data. From the reviewed studies, the majority of data is collected using GPS (**Table 1**). It is because GPS data, which could be collected by inexpensive onboard GPS sensors, does not require a substantial investment in infrastructure and maintenance as in the other two methods (point sensors and AVI). Apart from the inexpensiveness, GPS data could be used to provide the precise locations of the tracked vehicle (e.g., location for every 30 seconds) for further use in the path-related analysis. Despite the high implementation and maintenance cost, point sensors are still the most common data collection method in practices for its continuous collection of relatively reliable traffic data (e.g., speeds and flows). Also, unlike the GPS data that passively depend on the installed vehicles, point sensors could be strategically placed for maximizing the coverage of the monitored network. AVI data, as another data source, provides travel time between two points through the identification and match of vehicles. Unlike the GPS data, AVI data is not able to provide the chosen

path of the matched vehicles and, thus, models/algorithms should be developed to estimate the path choice from the AVI data (T. Siripirote et al. [16]). Owing to the different characteristics of data sources, data fusion techniques have recently be considered for providing an accurate and robust travel time prediction (K.P. Hwang et al. [17])

Considering the problems of parametric travel time prediction models for long-term prediction under unstable traffic conditions and the computational efficiency of various data mining approaches, this study proposed a travel time prediction algorithm through the matching of link speed interval patterns, which consist of spatiotemporally correlated link speed intervals. In this study, speed intervals, instead of speeds, are considered to simplify the structure of matching patterns for improving matching efficiency. This paper is organized as follows. Section 2 will describe the variables used in this study. The formulation and solution algorithm of the proposed travel time prediction model will also be given in Section 2. Section 3 will then carried out various empirical tests based on the data and models introduced in the previous section. Lastly, the paper will be concluded in Section 4.

2. Travel time prediction through speed intervals matching

In this study, link travel times are predicted by the corresponding historical value(s) with speed interval pattern(s) that is/are the most similar to the current one. In defining speed interval patterns, this

study will not only consider the speed interval of the link under concern, instead, speed intervals of the surrounding links (spatial) and previous time intervals (temporal) will also be considered. In this section, the collection and processing of speed data used in this study will be discussed in Section 2.1. Then, Section 2.2 will define the speed interval patterns used in the travel time prediction. With the speed interval patterns, Section 2.3 introduces a matching algorithm for finding the most similar speed interval pattern in the historical database. Finally, Section 2.4 will give the architecture of travel time prediction in Bangkok road network based on the collected data and developed algorithm in Section 2.1~2.3.

2.1 Collection and processing of speed data

In Bangkok, taxi companies will usually set up an IP wireless communication (Taxi radio) for normal voice-based communication with their taxi drivers. Even though taxis in Bangkok are not mandatory to equip with GPS devices, these established communication channels could also be used to transmit GPS data to enhance real-time taxi dispatching. In this research, traffic data is obtained from around 10,000 taxis, which are equipped with GPS devices, in Bangkok. The GPS devices will wirelessly transmit the latitude, longitude, altitude, traveling speed, heading, and timestamp of the equipped taxi to a designated computer server for every 45 seconds.

In this study, the urban and suburban road networks in Bangkok, which consist of

3,000 links and cover more than 3,500 origin-destination (O-D) pairs, are considered and the corresponding GPS data is collected. In the Bangkok network model, new links are usually defined wherever there is a change of road geometry (e.g., increase in several lanes), intersection with other roads (e.g., signalized junction, priority junction), and land use pattern (e.g. exit of a parking lot). The increasing detail of the modeled network (e.g., number of parking lot exits included) will substantially decrease the length of each link and, thus, cause the same network to have a larger number of links. As the number of links increases, there will be a higher chance that the real-time GPS data, especially the speed data, from probe taxi is not available for a certain link at a certain time period. With insufficient, or missing, link speed data at different traffic conditions, it is not possible to provide a reliable travel time prediction for the Bangkok network due to its highly varied traffic conditions. On the other hand, if unreasonably long links are defined, the average of collected speeds could not precisely represent the actual speed profile of the links. With such inaccurate average speeds for long links, it is not possible to achieve a reliable prediction of travel time. Thus, in this study, data availability and data accuracy are traded off in choosing the length of the links in the network. Apart from longitude and latitude, the altitude from GPS data will also be used in this study to separate speeds collected from links that are vertically overlapped. With this consideration, traffic links in this study will be categorized into three types: road (at grade), elevated (flyover), and toll road.

These link types and the other link characteristics (e.g., location of U-turn and road junction) will be stored as the local parameters of traffic link in the database.

Table 2 Samples of GPS data obtained from probe taxi

GPS ID	Latitude	Longitude	Timestamp	Speed (km/hr)
1311042	13.581726	100.867721	2011-12-15 10:00:13	84
1310992	13.581680	100.867248	2011-12-15 10:00:14	114
1311751	13.581893	100.867095	2011-12-15 10:00:22	85
65679	13.582565	100.861358	2011-12-15 10:00:26	77
1311401	13.583236	100.860351	2011-12-15 10:01:07	93

For each set of GPS data collected from probe taxis, which some samples are shown in **Table 2**, the map-matching algorithm is adopted to check whether the GPS device (i.e. taxi) is located on road segments and screen out those data that are not on the road segment (e.g., in the parking lot). The location information will also be used to locate the collected GPS data into different links for determining the average speeds that are used for travel time prediction. Apart from the location information, the collected vehicle speeds will also be used in this study and will be considered as the spot speeds of the vehicles at the corresponding location (link) and time. Before these spot speeds could be used to estimate the historical link speeds for travel time prediction, filtering procedure will be adopted to filter out outlying and/or erroneous speed data. For instance, if a GPS device transmitted back a zero vehicle speed while most of the other speed data on the same link and in the time period are greater than 80 kph, this speed data will be considered as erroneous and filtered out.

After filtering out the outlying and erroneous spot speeds, a stratified

sampling technique is applied to the remaining spot speeds for sampling a balanced number of spot speeds from each speed interval within each time period. Such stratified sampling of spot speeds is crucial for this study as the spot speeds within Bangkok network usually have a large variation (even they are from the same link and in the same time period) due to the frequent interruptions of traffic flows. For example, considering a link with a signalized intersection located at its downstream end, vehicles will queue up in front of the stop line of the intersection (i.e. at the downstream end of the link) during the red times. As the queue is building up, the number of vehicles (probed taxis) within the queues will increase and become larger than those that have not joined the queue. As a result, there will be a large proportion of spot speeds collected from the probed taxis that are in the queue as compared to those that are not. Thus, if a simple average of spot speeds is used to define the speed of that link, this estimated speed will be underestimated. To overcome such an issue, the stratified sampling technique divides the spot speeds into several speed intervals and randomly chooses the same number of data from each interval for estimating the average speed of the link (**Table 3**).

Table 3 Probe vehicle data stratified by speed intervals

Speed interval	Number of spot speed data	Randomly chosen spot speeds
0 – 12	12	1, 6, 11
13 – 25	3	15, 22, 25
26 – 38	6	28, 30, 33

The average link speed will be estimated for every 5 minutes and classified by different day of the week for further uses in travel time prediction.

2.2 Definition of speed interval pattern

In this study, a traffic pattern, which is used to match the current traffic condition with the historical database for travel time prediction, is defined by speed interval pattern. For each of the spot speeds and historical average speeds, the corresponding speed interval is defined as:

$$\tilde{v}_{ab,t}^k = \left\lfloor v_{ab,t}^k / s \right\rfloor \quad (1)$$

where $\tilde{v}_{ab,t}^k$ is the speed interval of link ab (or the link from a to b) in time interval t and day k , $v_{ab,t}^k$ is the spot speed (historical average speed) of link ab in time interval t , s is the width of speed interval, and x denotes the largest integer that is less than x . For example, if the spot speed of link ab ($v_{ab,t}^k$) equals to 21 kph and the width of speed interval (s) is taken as 5 kph, the speed interval ($\tilde{v}_{ab,t}^k$) for this spot speed will be equal to 4. In this study, for each of the time interval (say 5 minutes duration), the speed interval of the average speed, which is determined by the stratified sampling technique described in the previous section, is determined for each of the links (**Fig 1a**).

In this study, the speed interval pattern is defined by the speed intervals of a set of links that are spatially and/or temporally correlated to the link under concern (i.e., the link for travel time

prediction). In defining the spatial correlation between links, this study has adopted the idea of connection level. **Fig.1b** shows the connection level of the surrounding links to the link ab . In this figure, link bc , bd , and be are the links with connection level (i) equals to 1 as they are directly connected to node b , which is the end node of the link ab . Other links in **Fig. 1b** (e.g., cg , cf , etc) have the connection level equals to 2 as they are connected to the end nodes of links in the previous connection level (i.e., $i = 1$). Under such a definition, the connection level of all links within the network concerning link ab could be established. Compare to the spatial correlation, the definition of temporal correlation of link speed intervals is simpler. In this study, link speed intervals are assumed to be temporally correlated in time interval.

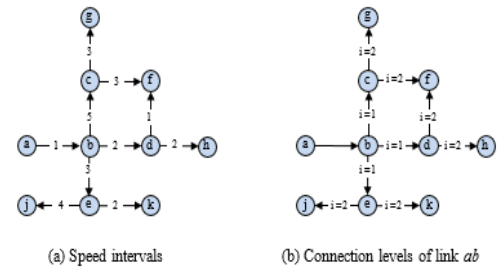


Fig. 1 Speed Intervals and Spatial Connections

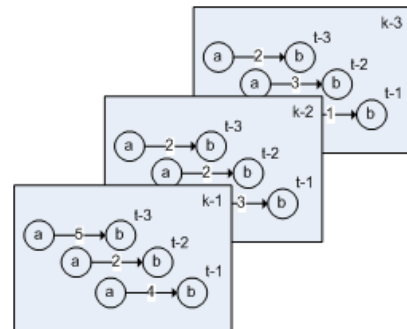


Fig. 2 Temporally correlated speed intervals for link ab at day k and time interval t

Fig. 2 shows the examples of temporally correlated speed intervals on different days and time intervals for the speed interval measured on link ab at day k and time interval t .

In this study, the speed interval pattern is defined by the speed interval of the set of links that are spatially and/or temporally correlated to the link under concern.

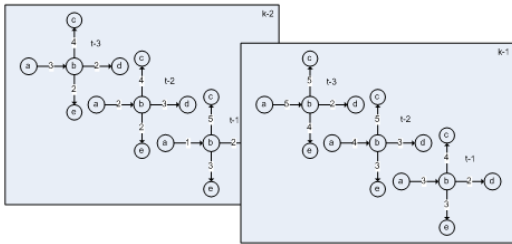


Fig. 3 Spatially and temporally correlated speed interval pattern in different days

Fig. 3 shows the example of speed interval pattern on day $k-1$ and $k-2$ for speed interval measured on link ab at day k and time interval t . In the speed interval patterns given in **Fig. 3**, it is assumed that: 1) speed interval of links with a connection-level equals to 1 (i.e. $i = 1$) is spatially correlated to the speed interval of link ab and, 2) the current speed intervals are temporally correlated to the 3 preceding time intervals (i.e. $t-1$, $t-2$ and $t-3$).

2.3 Speed interval pattern matching (SIPM) for travel time prediction

Based on the definition of speed interval pattern (Section 2.2), speed interval pattern for the current time interval is established and the historical database, which is built based on the data

collection/processing method introduced in section 2.1, is searched for finding the most similar pattern (i.e., matching of speed interval pattern). Due to the large number of links in the Bangkok road network, an efficient and effective pattern matching algorithm should be proposed to ensure a fast matching process for real-time applications. In this study, the similarity of two-speed interval pattern (e.g., the current and historical speed interval pattern) is measured by a mismatch value, m_l^k , defined as:

$$m_l^k = \sum_{p=1}^P \sum_{i=1}^I \sum_{l' \in L_i^l} |\tilde{v}_{l',t-p}^k - \tilde{v}_{l',t-p}^n|, \quad \forall k \in K \quad (2)$$

where m_l^k is the mismatch of speed interval pattern derived from link l at current time t and day n as compare to the corresponding speed interval on day, P is the number of preceding time intervals that are considered to have temporal correlation with the current time interval, I is the connection levels that are considered to have spatial correlation, L_i^l is the set of links with connection-level i concerning link l , and K is the set of days in the database to be compared for determining the mismatch value. Typically, two different sets of K will be considered: 1) set of specific days on a week, $K = \{n-7, n-14, n-21, \dots, n-\tilde{K}\}$, and 2) set of unclassified days,

$K = \{n-1, n-2, n-3, \dots, n-\tilde{K}\}$. Based on the above definition of mismatch value (m_l^k), the SIPM for travel time prediction of link l could be formulated as following constrained minimization problem:

$$\text{Minimize}_{\delta} Z_l(\delta) = \sum_{k \in K} \delta_l^k m_l^k \quad (3a)$$

$$\text{Subject to} \quad \sum_{k \in K} \delta_l^k = 1 \quad (3b)$$

where $\delta_l^k = 1$ if speed interval pattern of day k is chosen as the match of current pattern (i.e. the corresponding speed interval pattern of day k is used to evaluate the mismatch value, m_l^k , through **equation (2)**), otherwise equal to zero. Minimizing equation (3a) guarantees that the chosen speed interval pattern, which is determined by the variable, δ_l^k , gives the smallest mismatch value (i.e. most similar pattern). Constraint (3b) is to ensure that only one historical speed interval pattern is used to match with the current one. The above minimization problem will be set up and solved for all links within the transportation network that need a speed interval matching for travel time prediction. Note that the formulation of speed interval matching problem (**equation (3)**) is general optimization framework of which additional constraint could be easily added to refine the feasible solution set. For instance, an additional constraint,

$$1 \leq \tilde{v}_{l',l-p}^k \leq 3 \quad \forall k \in K, l' \in L_l^l, p \in [1, 2, \dots, P], i \in [1, 2, \dots, I]$$

, could be added to limit the number of speed intervals, or the search space, in the database for speeding up the searching process.

As the mismatch value m_l^k is defined by speed intervals, which are integer variables, the above minimization problem (**equation (3)**) likely has multiple

solutions (i.e., multiple days in the history with the speed interval patterns that give the same mismatch value as compared with the current pattern).

Thus, to handle cases with multiple matches, the procedure in **Fig. 4** is adopted to match/estimate the speed pattern that is used for travel time prediction.

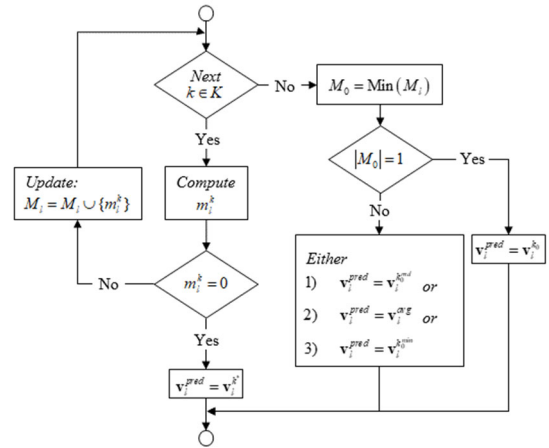


Fig. 4 Speed interval pattern search for travel time prediction

For the iterative loop on the left-hand side of **Fig. 4**, the algorithm will compute the mismatch value (m_l^k) of link l for each day $k \in K$ in a reverse chronological order (i.e., starting from the most recent day and then evaluate back in time). Within these iterative steps, the procedure will terminate whenever a speed interval pattern in the historical database ($k = k^*$) is completely matched with the current pattern (i.e., $m_l^{k^*} = 0$). Then, speeds on that day will be taken as the speed pattern used in travel time prediction (v_i^{pred}), which is defined as:

$$\mathbf{v}_l^{pred} = \left(v_{l,t+1}^{pred}, v_{l,t+2}^{pred}, \dots, v_{l,t+t^p}^{pred} \right)^T$$

$$= \left(v_{l,t+1}^{k^*}, v_{l,t+2}^{k^*}, \dots, v_{l,t+t^p}^{k^*} \right)^T = \mathbf{v}_l^{k^*} \quad (4)$$

where t^p is the number of future time intervals that travel time prediction is required. If the speed interval pattern is not a complete match with the current pattern (i.e., $m_l^{k^*} \neq 0$), the estimated mismatch value will be included in a set M_l and the mismatch value of next day (or k) will be calculated.

After the mismatch value of all days in the set, K is evaluated and none of these days has a speed interval pattern that is completely matched with the current pattern, the procedure in the right part of **Fig. 4** will carry out to estimate the speed pattern used for travel time prediction ($\mathbf{v}_l^{pred}$). M_0 defines a set that contains the smallest element(s) of M_l , which is the set of mismatch values for all days within K . If the size of M_0 (i.e., $|M_0|$) is equal to 1, which indicates that there is only one solution for the matching problem (3), the speeds of that day (k_0), which is

$$\mathbf{v}_l^{k_0} = \left(v_{l,t+1}^{k_0}, v_{l,t+2}^{k_0}, \dots, v_{l,t+t^p}^{k_0} \right)^T,$$

will be taken as the speed pattern used in travel time prediction ($\mathbf{v}_l^{pred}$). The size of M_0 is larger than unity, which indicates that there exists multiple solutions for the matching problem (3), $\mathbf{v}_l^{pred}$ will be estimated by three different methods: random sample, average value, and closest speed pattern. For random sample, a day (k_0^{rnd}) is randomly chosen from the

set K_0 , which is the set of days within K with minimum mismatch values, for providing the speeds

$$\mathbf{v}_l^{k_0^{rnd}} = \left(v_{l,t+1}^{k_0^{rnd}}, v_{l,t+2}^{k_0^{rnd}}, \dots, v_{l,t+t^p}^{k_0^{rnd}} \right)^T$$

used in travel time prediction. For average value, each element of $\mathbf{v}_l^{pred}$ will be taken as the average of the corresponding element of all the speed patterns within K_0 (i.e.

$$v_{l,t'}^{pred} = v_{l,t'}^{avg} = \frac{1}{|M_0|} \sum_{i \in K_0} v_{l,t'}^i, \quad \forall t' \in [t+1, t+t^p].$$

For closest speed pattern, the day (k_0^{min}) is chosen such that the speed pattern, not speed interval pattern, is the most similar (or the closest) to the current speed pattern

$$(i.e., k_0^{min} = \arg \min_{k \in K} \sum_{p=1}^P \sum_{i=1}^I \sum_{l' \in L_i} |v_{l',t-p}^k - v_{l',t-p}^n|).$$

Then the speeds on that day (i.e.,

$$\mathbf{v}_l^{k_0^{min}} = \left(v_{l,t+1}^{k_0^{min}}, v_{l,t+2}^{k_0^{min}}, \dots, v_{l,t+t^p}^{k_0^{min}} \right)^T,$$

will be used for travel time prediction. With the speed vector, $\mathbf{v}_l^{pred}$, estimated by various methods in this procedure, the travel time for link l in the future time intervals (i.e., $t+1, t+2, \dots$, etc) could be predicted by dividing the link length with the corresponding speed in $\mathbf{v}_l^{pred}$.

2.4 Architecture for travel time prediction system in Bangkok

In this study, as the travel time prediction system will be implemented to the large-scale Bangkok network that consists of 3,000 links, the feasibility of real-time application will not only rely on the efficiency of prediction algorithm (Section 2.3) but also depend on the

efficient flow of data between all related large-scale databases.

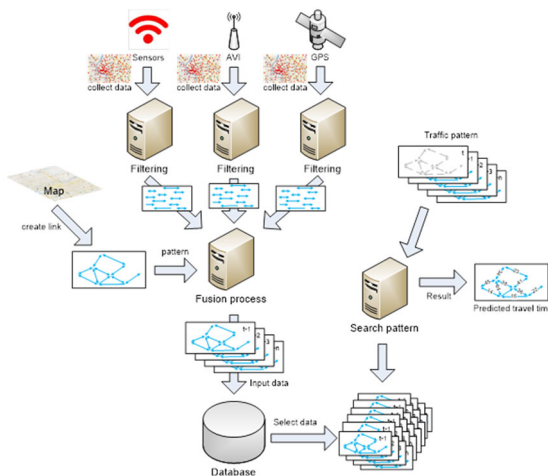


Fig. 5 Architecture for travel time prediction system in Bangkok

Fig. 5 shows the architecture of the real-time travel time prediction system for the implementation in Bangkok. In this study, data collected from GPS, AVI and various point sensors (e.g., Autoscope, loop detector, microwave sensors) are used to provide the necessary link travel time and/or link speed data (**Fig. 5**). Before these data could be used for travel time prediction, they are filtered by using the filtering procedure described in Section 2.1 to provide link speeds (link travel times) for different time intervals. Based on the transportation network extracted from the map, the link speeds (link travel times) from different data sources are combined to provide the network-wide speed pattern for each time interval and day. These filtering and combining processes will be carried out in real-time and the created speed patterns will then be stored in the database as historical speed patterns for travel time

prediction. To carry out travel time prediction, speed patterns of the current and preceding time intervals are taken from the database for forming the speed interval patterns as described in Section 2.2. With the speed interval patterns, pattern search is carried out on the chosen set of speed interval patterns in the database for travel time prediction (Section 2.3).

3. Empirical studies

The proposed SIPM algorithm and the corresponding system architecture are implemented in the Bangkok road network for travel time prediction based on the collected/estimated speed data. In this section, the performance of the proposed model is evaluated in link travel time prediction (Section 3.1) and path travel time prediction (Section 3.2).

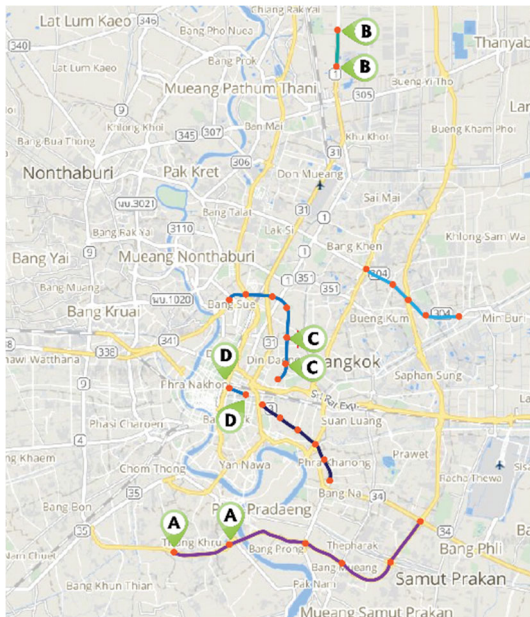
3.1 Link travel time prediction

To test the performance of the proposed model in the prediction of link travel time, four different types of links are considered: 1) link with free-flow condition on a multi-lane road without weaving, on- and off-ramp (Link A); 2) link with free-flow condition on a local side road connected to community areas (Link B); 3) main road connected to business areas with traffic signals (Link C), and; 4) link in central business district with traffic signals and U-turns (Link D). The characteristics of these links are shown in **Table 4** and their corresponding geographical locations are shown in **Fig. 6**.

Table 4 Links for travel time prediction

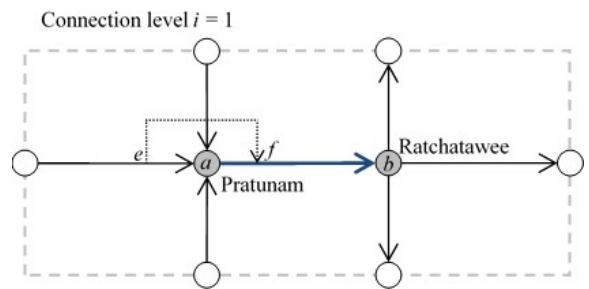
Link	From /To	Direction*	Distance (km)
A	Bang Khun Thian – Bang Khru	Inbound	5.7
B	Bangkok University Station – Tollway Rangsit	Inbound	2.9
C	MRT Ratchada – The Emerald Hotel	Inbound	2.6
D	Pratumnam – Ratchatawee	Outbound	1.1

*Inbound (outbound) refers to traffic travelling towards (out of) the centre of Bangkok city

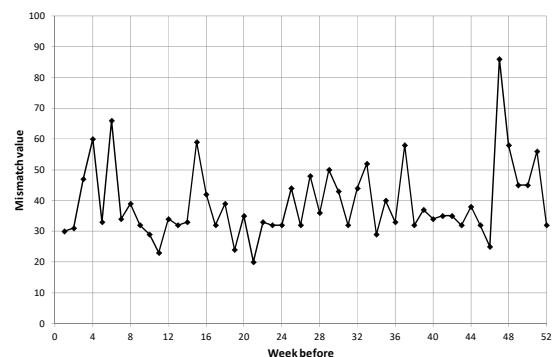
**Fig. 6** Links and paths adopted in travel time prediction

The Road network in Bangkok is relatively complex as the upstream and downstream ends of links may connect to various types of roads, for example, elevated roads, toll-way ramps, and community streets. **Fig. 7** shows the set of

links that are correlated to Pratumnam – Ratchatawee link (Link D) at connection level $i = 1$. Among these correlated links, which the traffic flow directions are marked by the arrow in **Fig. 7**, Link ef represents the flyover at the intersection of Ram Inthra Road and Ramintra-At narong Expressway (Intersection a).

**Fig. 7** Spatially correlated links of Link D (Connection level $i = 1$)

To demonstrate the variation of speed interval pattern over time, the speed interval pattern ($s = 5$ kph, $I = 1$, $P = 1$) of Link D during time interval 09:20 ~ 09:25 is compared with the corresponding speed interval patterns in the past 52 weeks and the mismatch values are evaluated (**Fig. 8**).

**Fig. 8** Variation of mismatch values for the speed interval pattern of Link D during 09:20 ~ 09:25

In Fig. 8, while the majority of the mismatch values are between 30 and 50, the minimum mismatch value (i.e., 20) is found when the speed interval pattern of 21 weeks ago is considered. This indicates that traffic pattern on that day (21 weeks ago) is the most similar to the current pattern and, thus, could potentially be used in travel time prediction.

Table 5 Testing of pattern search parameters for travel time prediction on Link D

Set	P (No. of time intervals)			$\tilde{K}$ (No. of day)			I (Correlation level)		MAPE (%)	CPU time (seconds)
	1	3	5	12	24	48	1	2		
1	•			•			•		21.71	20.3
2		•		•			•		20.06	22.4
3			•	•			•		22.18	25.7
4		•			•		•		19.26	31.4
5		•				•	•		17.13	41.3
6		•				•		•	17.40	56.4

$$MAPE = \sum_{t=1}^n \frac{|Y_t - \hat{Y}_t|}{Y_t} \times 100$$

where Y_t is the actual travel time at time t , $\hat{Y}_t$ is the predicted travel time at time t , and

n is the number of dataset.

Table 5 shows the impact of different pattern search parameters (P , I and $\tilde{K}$) on the performance of travel time prediction on Link D. In this table, the mean absolute percentage error (MAPE) is estimated by comparing the predicted and observed travel times in time interval 09:00 ~ 09:05 on 10 different Monday mornings. The algorithm was developed in Java and executed on a Linux operating system with 3.2 GHz quad-core processor. The CPU time in **Table 5** records the required time (in seconds) for carrying out the proposed algorithm in finding the predicted travel time. Comparing Set 1 and 2 in **Table 5**, it could be seen that the MAPE decreases as the number of

temporally correlated time intervals (P) is increased from 1 to 3. Such a decrease suggests that the speed interval patterns of Link D are temporally correlated with the preceding 15 minutes (3-time intervals). Thus, setting $P = 3$ could better describe (i.e., more information) the current traffic condition for finding a closer (more similar) pattern in the historical database and, thus, resulted in a reduction in MAPE. For case $P = 5$ (i.e., Set 3), despite more preceding time intervals are used in forming the speed interval patterns, the MAPE is larger than that of the case $P = 3$. The reason for having such an increase in MAPE comes from the low correlation of the speed intervals in the two additional time intervals (i.e., $t-4$ and $t-5$) with the current one. Thus, including these two-time intervals in the speed interval pattern may result in an incorrect match that gives an inaccurate prediction of travel time. Comparing the CPU time of Set 1, 2 and 3, it could be seen that CPU time increases as the speed interval pattern are becoming more complex (i.e., a more preceding time interval is considered).

Considering the MAPE of Set 2, 4 and 5, it could be seen that as the search space increases (i.e., $\tilde{K}$ increases), prediction error reduces and CPU time increases. It is because, as the search space increases, the number of historical speed interval patterns will increase and, thus, there will be a higher chance to have a historical pattern that is similar to the current pattern (i.e., small or zero mismatch value) for improving the accuracy of travel time prediction (i.e., reduction in MAPE). Considering Set 5

and 6 in **Table 5**, despite the increase in computation time, the increase in the spatial connection level (i.e., I) could not improve the accuracy of travel time prediction on Link D (i.e., MAPE increases as I is increased from 1 to 2). Similar to the explanation for the impact of P , such the increase in MAPE could be explained by the non-correlation of speed intervals between the second-level links (L_2^D) and Link D.

Sum up, the proposed algorithm gives the best prediction of travel time for Link D when $P = 3$, $I = 1$ and $\tilde{K} = 48$. Thus, this set of searching parameters will be adopted in the remaining empirical studies of this paper. In this initial experiment, apart from the fact that $|M_0|$ is usually very small (mostly equal to 1), it is also found that speed interval patterns that give the minimum mismatch value (i.e., $m_l^k \in M_0$) will have similar accuracy on the travel time prediction. Thus, unless otherwise stated, the speed used for travel time prediction ($v_{l,t'}^{pred}$) will be taken as the average of speed patterns with minimum mismatch value (i.e., $v_{l,t'}^{pred} = v_{l,t'}^{avg}$) for remaining empirical studies. With the above set up, the proposed SIPM algorithm (Section 2.3) is adopted to predict travel times of the 4 links (Link A, B, C, and D) during 09:05 ~ 09:30 (5 intervals) on 10 different Monday mornings. Note that the travel time predictions are made during the time interval 09:00 ~ 09:05.

Table 6 shows the MAPE of the proposed SIPM algorithm and 3-interval moving average of speed (MA) for travel

time prediction of Link A ~ D during 09:05 ~ 09:30. In **Table 6**, it could be seen that the performance of MA in travel time prediction decrease (i.e., MAPE increase) as the predicted time interval increases. It is because MA approach is directly depended on the speeds of the preceding time intervals for travel time predictions.

Table 6 Errors (MAPE) of link travel time predictions for 5 future time intervals (09:05 ~ 09:30)

Link	SIPM					MA *				
	Future time interval					Future time interval				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
A	13.21	12.10	13.85	14.61	14.20	12.85	14.55	16.03	21.20	22.45
B	14.50	15.22	13.92	14.68	15.32	12.90	12.17	15.46	19.25	21.10
C	16.18	16.39	16.45	17.46	15.84	15.41	20.94	23.88	25.42	29.57
D	18.20	19.23	18.69	21.40	20.22	22.45	26.40	32.10	30.56	34.20

*MA = moving average of speed

Thus, error in the first few future time intervals (e.g., 09:05 ~ 09:10 in this test) will propagate to the subsequent predictions and cause a substantial increase in MAPE. For the SIPM algorithm, the MAPEs are in general smaller than that for the MA approach and they are not necessarily increased with the number of predicted future time intervals (**Table 6**). It is because in SIPM algorithm, speeds from preceding time intervals are only used in searching the historical database but not directly be used in predicting speeds and travel times. Thus, error in the first few predicted future time intervals will not directly propagate to the subsequent intervals to cause an increase in MAPE. Also, as the SIPM algorithm will independently search the historical database for travel time prediction in each of the future time intervals, it is possible to have a decrease in MAPE even when the number of future time interval increases (e.g., Link A 1st and 2nd future time interval).

Comparing the MAPEs of SIPM algorithm for travel time predictions of Link A to Link D, it could be seen that Link A has the smallest MAPEs among the four predicted links. It is because, as traffic on Link A is not interrupted (i.e., no weaving sections, on-ramp and off-ramp), the speeds along Link A will relatively stable and could be closely represented by the speeds collected at certain location on Link A. Thus, speed interval patterns that are similar to the current traffic condition could be found in the database to provide a more accurate prediction of future travel times. On the other hand, the MAPEs for Link C and D are higher than that of Link A and B. It is because the traffic

Signals on Link C and D cause extra delays (i.e., deceleration of vehicles and waiting at the stop lines) that could not be reflected by the collected speeds on that link. Thus, the speed interval pattern on that link may not truly reflect their actual traffic conditions and causes an increase in MAPE of the travel time predicted by SIPM algorithm.

Fig. 9 shows the variation of actual and predicted link travel times, which are calculated from the collected and predicted speeds for every 5 minutes, of the four links (Link A ~ D) on Monday, 26th December 2014, 06:00 – 24:00. In Fig. 9, it could be seen that the travel time predictions are relatively accurate in the morning and evening periods (i.e., 06:00 ~ 12:00 and 18:00 ~ 24:00), while most of the discrepancies (i.e., the differences between grey squares and black crosses) appear between 12:00 and 18:00. It is because during the morning and evening periods, as

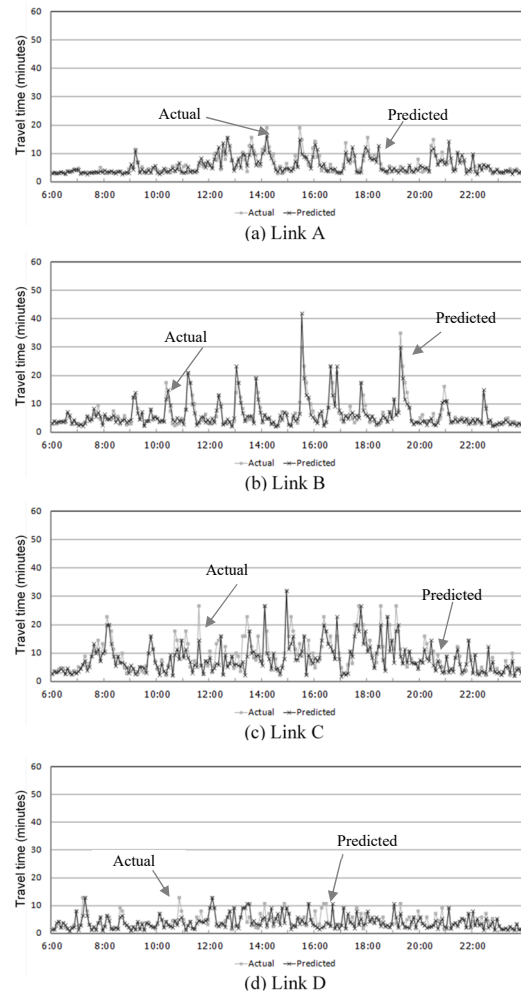
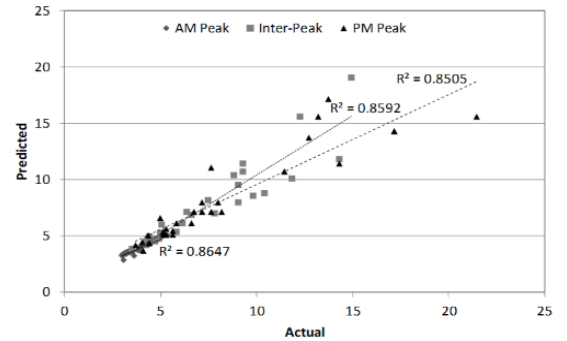


Fig. 9 Actual and predicted link (Link A ~ D) travel times on Monday, 26th December 2014, 06:00 ~ 24:00

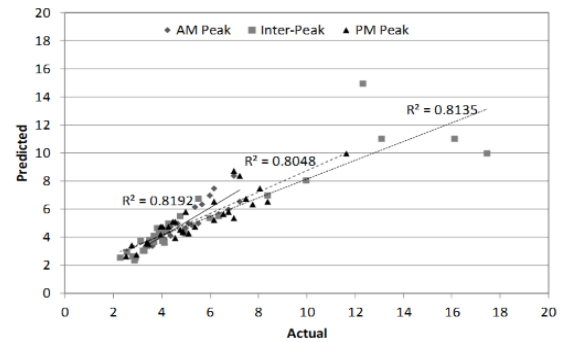
the links are highly congested with the peak period traffics, the traffic patterns (i.e., the spatial and temporal variation of flows) and the corresponding traffic characteristics (e.g., speed) are relatively stable. With such stable traffic characteristics, highly matched speed interval patterns could be found in the database for accurate prediction of travel times. On the other hand, as the travel patterns and traffic characteristics are largely varied during 12:00 ~ 18:00, prediction accuracies reduce in this period. Comparing

the prediction errors in Link A/Link B with that in Link C/Link D, it could be seen that the errors are much larger for the predictions in Link C and D. It is because Link C and D are located in the central business district (CBD) with lots of disturbances to the traffic (e.g., pedestrian crossings, bus stops, on-street parking, etc). These disturbances will cause a large variety of speeds on these links and resulted in reduction in prediction accuracies.

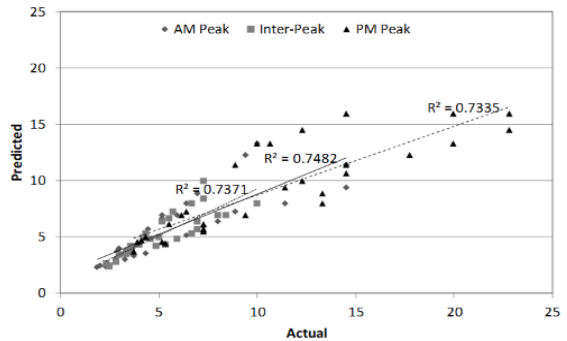
In Fig. 10, predicted travel times of the four links (Link A ~ D), which are predicted by the proposed SIPM algorithm, are plotted against their corresponding actual travel time. Based on the typical travel pattern in Bangkok, three representative peak periods: AM peak (09:00 ~ 09:05), inter-peak (14:00 ~ 14:05) and PM peak (18:00 ~ 18:05) are considered in this empirical study. In this figure, 30 sets of data are predicted for (collected from) each period as AM peak, inter-peak and PM peak, and the corresponding coefficient of determination (R^2) is estimated. In this study, a large R^2 value between the predicted and actual travel times indicates a high forecasting accuracy of the proposed SIPM algorithm. Considering the R^2 's in Fig. 10, it could be seen that links with stable flow conditions (i.e., Link A and Link B with R^2 between 0.80 and 0.86) have a higher forecasting accuracy than links under interrupted flow conditions (i.e., Link C and Link D with R^2 between 0.64 and 0.75). Comparing among the AM peak and PM peak, it could be seen that the forecasting accuracy for PM peak is, in general, slightly lower than that for the AM peak.



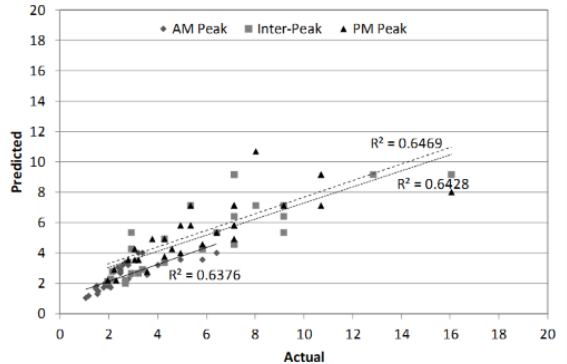
(a) Link A



(b) Link B



(c) Link C



(d) Link D

Fig. 10 Performance of link (Link A ~ D, respectively), travel time prediction by SIPM algorithm

As the start time of work is quite similar (e.g., 09:00) for all travellers, the link volumes in AM peak, which are mainly home-based work trips, are relatively stable and give a better forecasting accuracy. On the other hand, as the PM travel demands are spread out for a longer period of time (e.g., people try to avoid the traffic by shifting their time to go home or go to other places first), the link volumes in PM peak is less stable than that in the AM peak and causes a reduction in forecasting accuracy. For the inter-peak, as the travel demand is mainly based on the non-recurrent daily events (e.g., delivery of packages by courier), the link volumes and, thus, forecasting accuracies for this period are substantially varied. To sum up, the proposed SIPM algorithm gives a high forecasting accuracy on link travel time under stable traffic conditions that could either be achieved by uninterrupted traffic flow and/or congested travel conditions.

3.2 Path travel time prediction

With the testing of SIPM algorithm in travel time prediction on single links (Section 3.1), this section focuses on the more practical use of the algorithm on path travel time prediction. In this study, four different paths, which are all formed by a series of links, are tested: 1) Path E is a path with free-flow condition on a multi-lane road without weaving, on- and off-ramp (similar to Link A); 2) Path F is a path with free-flow condition on a local side road connected to community areas (similar to Link B); 3) Path G, which contains Link C, is arterial connected to business areas, and; 4) Path H is path in

CBD with traffic signals and U-turns (similar to Link D). The characteristics of these paths are shown in **Table 7** and their geographical locations are shown in **Fig. 6**.

Table 7 Paths for travel time prediction

Path	From / To	Direction*	Links	Distance (km)
E	Bang Khru – Bang Pli	Inbound	4	19.7
F	Minburi – Watcharaphol	Inbound	4	9.8
G	Ratchada 4 – Wongsawang	Outbound	6	12.0
H	BTS Nana – Udom Suk	Outbound	5	9.4

*Inbound (outbound) refers to traffic travelling towards (out of) the centre of Bangkok city

To predict path travel times, the proposed algorithm will first predict the link travel time of each of the links within the network for the next time interval (e.g., 09:05 ~ 09:10). Then, based on the predicted departure time of the first links of the considered path, the speed interval pattern that is used for travel time prediction of the second link is generated. For example, if the predicted departure time of the first link is 09:11, the speed interval pattern for travel time prediction in the second link will be generated by taking 09:05 ~ 09:10 as the current time interval, t . The above steps will be repeated for all links within the considered paths and path travel times could be calculated by summing up the predicted travel time of all constituent links.

Fig. 11 shows the variation of actual and predicted path travel times, which are calculated from the collected/predicted speeds for every 5 minutes, of the four paths (Path E ~ H) on Monday, 26th December 2014, 06:00 – 24:00. Owing to the same reasons discussed for link travel time prediction, the majority of discrepancies between actual and predicted

path travel times are concentrated in the period 12:00 ~ 18:00. Similarly, Path G and H, which are within CBD, tend to have lower prediction accuracies due to the frequent disturbances of traffic flows along these paths.

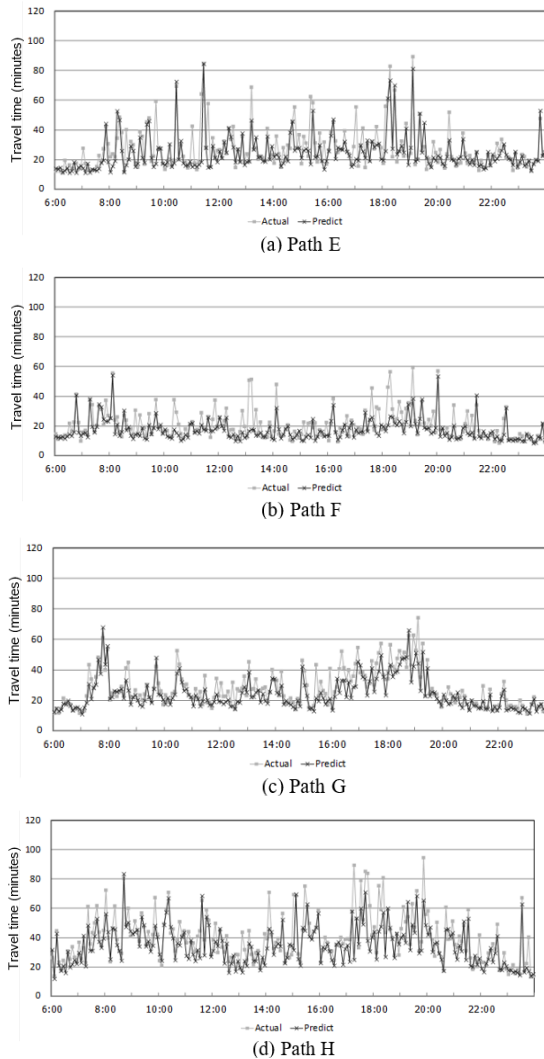


Fig. 11 Actual and predicted path (Path E~ H) travel times on Monday, 26th December 2014, 06:00 ~ 24:00

Comparing the prediction errors of link and path travel time (i.e., the difference between the actual and predicted travel times in **Fig. 9** and **11**), it

could be seen that the prediction of path travel time is less accurate and start to have significant errors in morning/evening period. The main reason for having such reductions in accuracy comes from accumulation of errors in link travel time prediction for each of the links within the path considered.

In order to have a more detailed analysis of errors in path travel time predictions, **Table 8** shows the mean absolute error (MAE) and MAPE of the four paths in AM period (07:00 ~ 09:00), Midday period (13:00 ~ 15:00) and PM period (17:00 ~ 19:00). Comparing the MAPE of each of the paths for different periods, it could be seen that the AM periods have the smallest error while the midday periods have the highest.

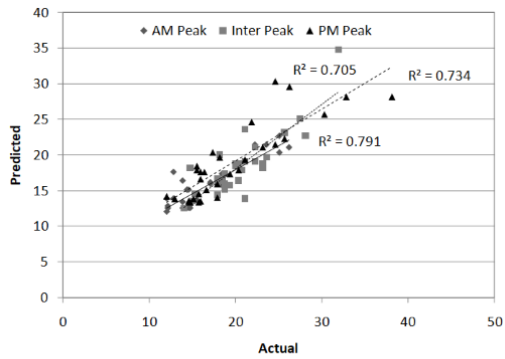
Table 8 Errors of path travel time prediction

Path	Period*	Time	MAE	MAPE
E	AM period	16.26	1.75	10.53
	Midday period	20.52	2.76	13.33
	PM period	19.77	2.63	12.62
F	AM period	13.87	1.74	12.02
	Midday period	14.02	2.47	16.81
	PM period	17.06	2.45	13.63
G	AM period	19.96	3.18	15.88
	Midday period	23.17	5.31	23.51
	PM period	40.62	8.00	19.35
H	AM period	44.48	11.06	21.56
	Midday period	34.48	10.51	30.91
	PM period	53.65	16.85	29.43

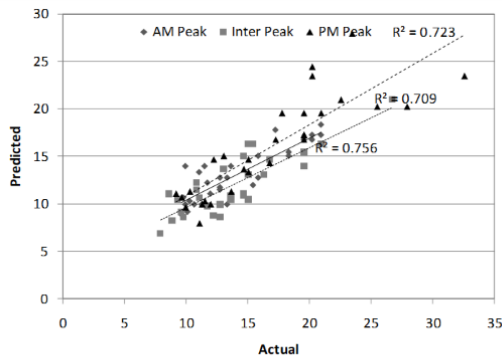
*AM period: 07:00~09:00; Midday period: 13:00~15:00; PM period: 17:00~19:00

$$MAPE = \sum_{t=1}^n \frac{|Y_t - \hat{Y}_t|}{Y_t} \times 100$$

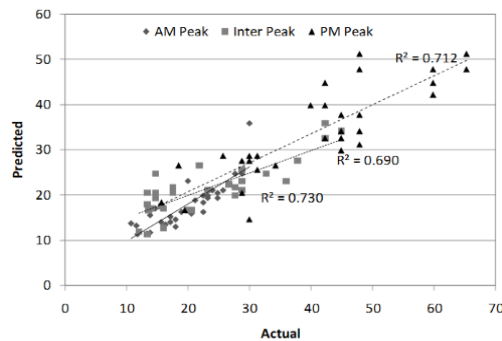
As discussed in Section 3.1, the low MAPE in AM period could be explained by the stable flows, which comes from the concentration of demand during the AM



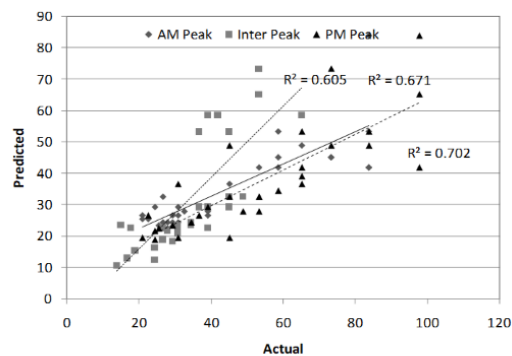
(a) Path E



(b) Path F



(c) Path G



(d) Path H

Fig. 12 Performance of path (Path E~H) travel time prediction by SIPM algorithm

period, of the predicted path. For the PM periods, as the demand is spread out for a longer period of time, path flows are less stable than the AM periods and, thus, give a slightly higher MAPE. Lastly, the high MAPEs in midday periods are resulted from the unpredictable path volumes (e.g., business trips) at this time of the day. Thirty sets of path travel time data (predicted and actual) from each of the period (AM peak, inter-peak and PM peak) are plotted in **Fig. 12** with the corresponding R^2 estimated. Comparing the R^2 s for different time of the day and paths, it could be seen that performance of the proposed SIPM algorithm in path travel time prediction is similar to that in link travel time prediction (Section 3.1).

4. Conclusions

In this paper, the proposed system is an extension of the real-time travel time estimation system in BAL-Labs. [18] and K. Sringeri et al. [19] to path travel time predictions for effective route planning in Bangkok. For predicting path travel times, this paper has proposed an algorithm for the matching of speed interval pattern (i.e., SIPM algorithm), which has included speeds (or speed intervals) that are spatially and temporally correlated to the current link speed, of the current traffic conditions with those in the historical database. Historical speed interval pattern with the minimum mismatch value, which is determined by the sum of absolute difference of the speed intervals as compared to the current pattern, is considered to be the matched traffic condition and the speeds in the subsequent

time intervals of that time and day will be used for travel time prediction. For cases with multiple historical speed interval patterns that have achieved the same minimum mismatch value, this paper has proposed three different methods (i.e., random sample, average value, and closest speed pattern) in determining the speed pattern used for travel time prediction.

To demonstrate the efficiency of the SIPM algorithm and the performance of corresponding travel time prediction system, empirical tests are carried out on four different links and paths in Bangkok. In these tests, it is found that the optimal speed interval pattern, which gives the minimum MAPE in link travel time prediction, should include 3 preceding time intervals (P) and links in the 1st connection level (I). Apart from the optimal speed interval pattern, these tests also show that the proposed algorithm for travel time predictions under uninterrupted flow conditions (MAPE: 12% ~ 15% for links and 11% ~ 17% for paths) are more accurate than under the interrupted flow conditions in central business areas (MAPE: 16% ~ 21% for links and 16% ~ 31% for paths).

Concerning the proposed real-time path travel time prediction algorithm, there are four directions of future work. First, the development of multi-threaded processing of the proposed algorithm should be completed to further reduce the computational time for practical implementation in real-time route planning system in Bangkok. Second, an adaptive traffic data fusion algorithm should be developed to make use of other potential

sources of data (e.g., cell phone probes, GPS, traffic flow data, etc) for improving the accuracy of travel time prediction. Third, location-dependent speed interval pattern should be considered to improve the performance of travel time prediction on arterials and/or in congested areas. Lastly, this study aimed to capture parameters under uninterrupted flow conditions. The main effective variable is speed. The study of other variables and methods would make the prediction more accurate and would be included in the future study.

5. Acknowledgements

This research was supported by the Rajamangala University of Technology Phra Nakhon (RMUTP).

6. Reference

- [1] H.-E. Lin, R. Zito and M. Taylor, "A review of travel-time prediction in transport and logistica," in *Proceedings of the Eastern Asia Society For Transportation Studies*, 2005, vol. 5, pp. 1433 – 1448.
- [2] N. K. Chowdhury, R. P. D. Nath, H. Lee and J. Chang, "Development of an Effective Travel Time Prediction Method Using Modified Moving Average Approach," in *Knowledge-Based and Intelligent Information and Engineering Systems*, Berlin, Heidelberg, 2009, pp. 130–138.
- [3] W.H.K. Lam, K.S. Chan, M.L. Tam and J.W.Z. Shi, "Short-term travel time forecasts for transport information system in Hong Kong," *Journal of Advanced Transportation*, vol. 39, no. 3, pp. 289-306, 2005.

- [4] S. I. Bajwa, E. Chung and M. Kuwahara, "An Adaptive Travel Time Prediction Model Based on Pattern Matching," *11th Intelligent Transportation Systems World Congress*, Nagoya, Japan, 2004.
- [5] T. Kim, H. Kim and D. J. Lovell, "Traffic flow forecasting: overcoming memoryless property in nearest neighbor non-parametric regression," in *Proceedings. 2005 IEEE Intelligent Transportation Systems, 2005*, Sep. 2005, pp. 965–969.
- [6] Z.-P. Li, H. Yu, Y.-C. Liu and F.-Q. Liu, "An Improved Adaptive Exponential Smoothing Model for Short-term Travel Time Forecasting of Urban Arterial Street," *Acta Automatica Sinica*, vol. 34, no. 11, pp. 1404–1409, Nov. 2008.
- [7] W.-H. Lee, S.-S. Tseng and S.-H. Tsai, "A knowledge based real-time travel time prediction system for urban network," *Expert Syst. Appl.*, vol. 36, pp. 4239–4247, Apr. 2009.
- [8] Y. Zhang and Y. Liu, "Comparison of Parametric and Non-Parametric Techniques for Non-Peak Traffic Forecasting," *International Journal of Mathematical and Computational Sciences*, vol. 3, no. 3, pp. 8-14, 2009.
- [9] A. Khosravi, E. Mazloumi, S. Nahavandi, D. Creighton and J. W. C. Van Lint, "Prediction Intervals to Account for Uncertainties in Travel Time Prediction," in *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 12, no. 2, 2011, pp. 537-547.
- [10] A. Simroth and H. Zähle, "Travel Time Prediction Using Floating Car Data Applied to Logistics Planning," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 12, no. 1, pp. 243–253, Mar. 2011.
- [11] W. Qiao, A. Haghani and M. Hamed, "A Nonparametric Model for Short-Term Travel Time Prediction Using Bluetooth Data," *Journal of Intelligent Transportation Systems*, vol. 17, no. 2, pp. 165–175, Apr. 2013.
- [12] Y. Zou, X. Zhu, Y. Zhang and X. Zeng, "A space-time diurnal method for short-term freeway travel time prediction," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 43, pp. 33–49, Jun. 2014.
- [13] H. Jiang, Y. Zou, S. Zhang, J. Tang and Y. Wang, "Short-Term Speed Prediction Using Remote Microwave Sensor Data: Machine Learning versus Statistical Model," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2016, p. e9236156, Feb. 2016.
- [14] W.H.K. Lam, M.L. Tam, A. Sumalee, C.L. Li, W. Chen, S.K. Kwok, Z. Li and E.W.T. Ngai, "Incident detection based on short-term travel time forecasting," in *Proceedings of the 13th International Conference of Hong Kong Society for Transportation Studies: Transportation and Management Science*, 2008, p. 83-92.
- [15] J.W.C. Van Lint, S. P. Hoogendoorn and H.J. van Zuylen, "Accurate Travel time Prediction with State-Space Neural Networks under Missing Data,"

- Transportation Research. Part C*, vol. 13, pp. 347-369, 2005.
- [16] T. Siripirote, A. Sumalee, D. P. Watling and H. Shao, "Updating of Travel Behavior Model Parameters and Estimation of Vehicle Trip Chain Based on Plate Scanning," *Journal of Intelligent Transportation Systems*, vol. 18, no. 4, pp. 393-409, Oct. 2014.
- [17] K. P. Hwang, W.-H. Lee and W.-B. Wu, "Travel time prediction by weighted fusion of probing vehicles and vehicle detectors data sources," in *2012 12th International Conference on ITS Telecommunications*, Nov. 2012, pp. 476-481.
- [18] BAL-Labs. (2010). "Siamtraffic1.0: Real-Time Travel Time Estimation." BAL-Labs. [Online]. Available: <http://bal.buu.ac.th/bal2010/?q=siamtraffic1.0>
- [19] K. Sringeri, N. Indra-Payoong and A. Sumalee, "RFID-based travel time estimation: development case in Bangkok," in *Proceeding of International Conference of Hong Kong Socieity for Transportation Studies*, 2010, pp. 139-146.

วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร

RMUTP RESEARCH JOURNAL

วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร เป็นวารสารสาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มีวัตถุประสงค์เพื่อเผยแพร่และถ่ายทอดผลงานวิจัยและผลงานวิชาการทั้งภายในและภายนอกมหาวิทยาลัย ซึ่งอยู่ในฐานข้อมูลของศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (Thai Journal Citation Index Centre, TCI Centre) กำหนดการตีพิมพ์เผยแพร่ ปีละ 2 ฉบับ (ราย 6 เดือน) ฉบับที่ 1 มกราคม-มิถุนายน และฉบับที่ 2 กรกฎาคม-ธันวาคม โดยรับพิจารณาบทความทั้งที่เป็นภาษาไทยและภาษาอังกฤษ โดยมีกรอบของวารสารที่ครอบคลุมในสาขาวิชาต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี วิทยาศาสตร์ประยุกต์ และวิศวกรรมศาสตร์ ทั้งนี้บทความดังกล่าวผู้เขียนต้องไม่เสนอบทความฉบับเดียวกันกับที่เคยตีพิมพ์ในวารสารอื่นมาก่อน เว้นแต่ผ่านการเรียบเรียงและเพิ่มเนื้อหาใหม่ บทความแต่ละบทความต้องผ่านการพิจารณาจากผู้ทรงคุณวุฒิที่ตรงตามสาขาของบทความนั้นอย่างน้อย 2 ท่าน และผู้ทรงคุณวุฒิต้องมาจากหน่วยงานที่ต่างกันกับผู้เขียน อีกทั้งผู้ทรงคุณวุฒิที่ประเมินบทความเดียวกันนั้นจะต้องมาจากหน่วยงานที่ต่างกันด้วย ซึ่งจัดประเภทของการ Peer Review เป็นแบบ Double Blinded หมายถึง ผู้ทรงคุณวุฒิจะไม่ทราบชื่อผู้เขียน และผู้เขียนจะไม่ทราบชื่อผู้ทรงคุณวุฒิ

1. ประเภทของบทความที่ตีพิมพ์

1.1 บทความวิจัย (Research article) เป็นบทความที่ได้จากงานวิจัย มีเนื้อหาสำคัญที่อธิบายถึงระเบียบวิธีวิจัย ผลการทดลอง การวิเคราะห์ผล และการสรุปผลที่ชัดเจน

1.2 บทความวิชาการ (Academic article) เป็นบทความที่มีลักษณะดังนี้

1. Literature review เป็นบทความจากการทบทวนเอกสาร ซึ่งเป็นผลมาจากการวิจัยหลายๆ ครั้ง ถือเป็นบทความที่มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง
2. Technical paper เป็นบทความนำเสนอกระบวนการในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ การทดสอบภาคสนาม รวมไปถึงเทคนิคการวิเคราะห์ใหม่ๆ
3. Professional practice เป็นบทความที่มาจากประสบการณ์ หรือความชำนาญของผู้เขียน
4. Policy paper เป็นบทความเกี่ยวกับนโยบายด้านต่างๆ ของหน่วยงาน

2. ส่วนประกอบของบทความแต่ละประเภท

2.1 บทความวิจัย

ก. ส่วนปก ให้แยกออกเป็น 2 หน้า โดยปกหน้าแรกเป็นภาษาไทย และปกหน้าที่สองเป็นภาษาอังกฤษ โดยแต่ละปกหน้าต้องจบในหน้าหนึ่งของตัวเอง ประกอบด้วย

1. ชื่อบทความ (Title) ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ควรสั้นกะทัดรัด ชี้ถึงเป้าหมายหลักของการวิจัย
2. ชื่อผู้เขียนทุกท่าน (Authors) ให้ระบุเฉพาะชื่อ และ นามสกุล โดยไม่ต้องมีคำนำหน้านาม
3. หน่วยงาน/สังกัด และที่อยู่ สำหรับการติดต่อทางไปรษณีย์ ของผู้เขียนทุกท่าน
4. ตัวเลขยก ให้เขียนไว้บนนามสกุล เพื่อระบุว่าเป็นตำแหน่งทางวิชาการและที่อยู่ของผู้เขียนท่านใด

5. **บทคัดย่อ (Abstract) ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ** ควรสั้นตรงประเด็น ครอบคลุมสาระสำคัญของการศึกษา ได้แก่ วัตถุประสงค์ วิธีการ ผลและการวิจารณ์ เป็นต้น
6. **คำสำคัญ (Keywords) ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ** เป็นการกำหนดคำสำคัญที่สามารถนำไปใช้เป็นคำสืบค้นในระบบฐานข้อมูล ประมาณ 3-5 คำ
7. **ผู้พิมพ์ประสานงาน (Corresponding Author)** ให้ทำเครื่องหมาย * ไว้บนนามสกุล และระบุหมายเลขโทรศัพท์ และไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (E-mail)

ข. ส่วนเนื้อหา ประกอบด้วย

1. **บทนำ (Introduction)** เป็นส่วนของความสำคัญและมูลเหตุที่นำไปสู่การวิจัย พร้อมวัตถุประสงค์และการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง
2. **ระเบียบวิธีวิจัย (Research Methodology) หรือ วิธีการทดลอง (Experimental Methods)** เป็นการอธิบายวิธีการดำเนินการวิจัย การทดลอง อุปกรณ์ เครื่องมือ การติดตั้งและการวัดค่าต่างๆ
3. **ผลการทดลองและวิจารณ์ผล หรือ ผลการศึกษาและอภิปรายผล (Results and Discussion)** ควรเสนอผลอย่างชัดเจน ตรงประเด็น เป็นผลที่ค้นพบโดยลำดับตามหัวข้อที่ศึกษาพร้อมการวิจารณ์ผล
4. **สรุป (Conclusion)** สรุปสาระสำคัญที่ได้จากการศึกษา
5. **กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgements)** เป็นการระบุแหล่งทุนสนับสนุนการวิจัย (ถ้ามี) และการระบุหน่วยงานหรือบุคคลที่ให้การสนับสนุน ช่วยเหลือการทำวิจัย
6. **เอกสารอ้างอิง (References)** ต้องใช้ตามแบบที่วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร กำหนดอย่างเคร่งครัดและเขียนเอกสารอ้างอิง เฉพาะเอกสารที่นำมาอ้างอิงในเนื้อหาเท่านั้น

2.2 บทความวิชาการ

ก. ส่วนปก มีส่วนประกอบเหมือนบทความวิจัย

ข. ส่วนเนื้อหา ประกอบด้วย

1. **บทนำ (Introduction)** เป็นส่วนของที่มาและมูลเหตุของการเขียนบทความ
2. **ผลการศึกษา/ผลการดำเนินการ (Results)** เป็นการเสนอผลอย่างชัดเจน ตามประเด็นโดยลำดับตามหัวข้อที่ศึกษาหรือดำเนินการ
3. **สรุป (Conclusion)** สรุปสาระสำคัญที่ได้จากการศึกษา
4. **กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgements)** เป็นการระบุแหล่งทุนสนับสนุนการวิจัย (ถ้ามี) และการระบุหน่วยงานหรือบุคคลที่ให้การสนับสนุน ช่วยเหลือการทำวิจัย
5. **เอกสารอ้างอิง (References)** ใช้รูปแบบที่วารสารฯ กำหนดอย่างเคร่งครัดและเขียนอ้างอิงเฉพาะเอกสารที่ปรากฏในบทความเท่านั้น

3. รูปแบบการพิมพ์บทความ

ให้ใช้ไฟล์รูปแบบบทความ (Template Form) ซึ่งสามารถดาวน์โหลดได้จาก <http://journal.rmutp.ac.th/> โดยไฟล์รูปแบบบทความมีการตั้งค่าหน้ากระดาษแล้ว ดังนี้

รายการ	บทความภาษาไทย	บทความภาษาอังกฤษ
ระยะขอบ	ขอบบน (Top Margin) 2.50 ซม. ขอบล่าง (Bottom Margin) 2.00 ซม. ขอบซ้าย (Left Margin) 2.00 ซม. ขอบขวา (Right Margin) 2.00 ซม.	ขอบบน (Top Margin) 2.50 ซม. ขอบล่าง (Bottom Margin) 2.00 ซม. ขอบซ้าย (Left Margin) 2.00 ซม. ขอบขวา (Right Margin) 2.00 ซม.
ขนาดกระดาษ	ขนาดกระดาษ A4 (กำหนดเอง) ความกว้าง 19 ซม. ความสูง 27 ซม.	ขนาดกระดาษ A4 (กำหนดเอง) ความกว้าง 19 ซม. ความสูง 27 ซม.
เค้าโครง	หัวกระดาษและท้ายกระดาษ เลือกหน้าคู่และหน้าคี่ต่างกัน หน้าแรกต่างกัน จากขอบหัวกระดาษ และ ท้ายกระดาษ ตั้งค่า 1.25	หัวกระดาษและท้ายกระดาษ เลือกหน้าคู่และหน้าคี่ต่างกัน หน้าแรกต่างกัน จากขอบหัวกระดาษ และ ท้ายกระดาษ ตั้งค่า 1.25
รูปแบบตัวอักษร	TH SarabunPSK	Times New Roman
หมายเลขหน้า	ตำแหน่ง ด้านบน ไม่แสดงหมายเลขหน้าในหน้าแรก หน้าคี่ ใส่หมายเลขหน้า ตำแหน่งบนขวา หน้าคู่ ใส่หมายเลขหน้า ตำแหน่งบนซ้าย ขนาดตัวอักษร 14	ตำแหน่ง ด้านบน ไม่แสดงหมายเลขหน้าในหน้าแรก หน้าคี่ ใส่หมายเลขหน้า ตำแหน่งบนขวา หน้าคู่ ใส่หมายเลขหน้า ตำแหน่งบนซ้าย ขนาดตัวอักษร 14
การย่อหน้า	ส่วนปก ย่อ 1.00 ซม. ส่วนเนื้อหา ย่อ 1.00 ซม.	ส่วนปก ย่อ 1.00 ซม. ส่วนเนื้อหา ย่อ 1.00 ซม.
จำนวนหน้าทั้งหมด	8-12 หน้า	8-12 หน้า
ชื่อวารสาร (ภาษาไทย)	อยู่ตำแหน่งกึ่งกลางของหัวกระดาษ หน้าคู่ ขนาดตัวอักษร 14 (ตัวหนา เอียง) “วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร ปีที่ x ฉบับที่ x...xxxx-xxxx,xxx”	อยู่ตำแหน่งกึ่งกลางของหัวกระดาษ หน้าคู่ ขนาดตัวอักษร 14 (ตัวหนา เอียง) “วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร ปีที่ x ฉบับที่ x...xxxx-xxxx,xxx”
ชื่อวารสาร (ภาษาอังกฤษ)	อยู่ตำแหน่งกึ่งกลางของหัวกระดาษ หน้าคี่ ขนาด ตัวอักษร 14 (ตัวหนา) “RMUTP Research Journal, Vol., No.,xxxx-xxxx,xxx”	อยู่ตำแหน่งกึ่งกลางของหัวกระดาษ หน้าคี่ ขนาด ตัวอักษร 14 (ตัวหนา) “RMUTP Research Journal, Vol., No.,xxxx-xxxx,xxx”
การพิมพ์ส่วนปก	พิมพ์เต็มหน้ากระดาษ (พิมพ์ 1 คอลัมน์)	พิมพ์เต็มหน้ากระดาษ (พิมพ์ 1 คอลัมน์)
การพิมพ์ส่วนเนื้อหา	พิมพ์ 2 คอลัมน์ แต่ละคอลัมน์กว้าง 7.1 ซม. ระยะห่างระหว่างคอลัมน์ 0.8 ซม.	พิมพ์ 2 คอลัมน์ แต่ละคอลัมน์กว้าง 7.1 ซม. ระยะห่างระหว่างคอลัมน์ 0.8 ซม.
ชื่อบทความ	ทั้งชื่อภาษาไทยและภาษาอังกฤษพิมพ์ด้วย TH SarabunPSK ขนาด 22 ตัวตรงหนา จัดชิดขอบ ซ้ายหน้ากระดาษ	ชื่อภาษาอังกฤษ พิมพ์ด้วย Times New Roman ขนาด 16 ตัวตรงหนา จัดชิดขอบซ้าย หน้ากระดาษ
ชื่อผู้เขียน	ทั้งชื่อภาษาไทยและภาษาอังกฤษ พิมพ์ด้วย TH SarabunPSK ขนาด 18 ตัวตรงไม่หนา จัดชิด ขอบซ้ายหน้ากระดาษ	ชื่อภาษาอังกฤษ พิมพ์ด้วย Times New Roman ขนาด 12 ตัวตรง ไม่หนา จัดชิดขอบซ้าย หน้ากระดาษ
ตัวเลขยกบนนามสกุล	ขนาดตัวอักษรเท่ากับชื่อและนามสกุล แต่ทำเป็น ตัวยก	ขนาดตัวอักษรเท่ากับชื่อและนามสกุล แต่ทำเป็น ตัวยก
หน่วยงาน/สังกัด และที่อยู่	ทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ พิมพ์ด้วย TH SarabunPSK ขนาดตัวอักษร 14	พิมพ์ด้วย Times New Roman ขนาดตัวอักษร 11

รายการ	บทความภาษาไทย	บทความภาษาอังกฤษ
ชื่อบทคัดย่อภาษาไทยและภาษาอังกฤษ	พิมพ์ด้วย TH SarabunPSK ขนาด 20 (ตัวตรง หนา) จัดชิดขอบซ้ายหน้ากระดาษ	พิมพ์ด้วย Times New Roman ขนาด 14 (ตัวตรง หนา) จัดชิดขอบซ้ายหน้ากระดาษ
เนื้อหาบทคัดย่อภาษาไทยและภาษาอังกฤษ	พิมพ์ด้วย TH SarabunPSK ขนาดตัวอักษร 14	พิมพ์ด้วย Times New Roman ขนาดตัวอักษร 12
ชื่อคำสำคัญ	ทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ด้วย TH SarabunPSK ขนาด 14 (ตัวหนา)	ภาษาอังกฤษ ด้วย Times New Roman ขนาด 12 (ตัวหนา)
คำสำคัญ	ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ขนาดตัวอักษร 14 ตัวตรง บาง ใส่เครื่องหมาย Semicolon (;) ระหว่างคำ	ด้วย Times New Roman ขนาด 12 ตัวตรง บาง ใส่เครื่องหมาย Semicolon (;) ระหว่างคำ
ชื่อผู้สนับสนุนประสานงาน หมายเลขโทรศัพท์ และไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์	ทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ด้วย TH SarabunPSK ขนาด 13 (ตัวเอียง หนา)	ด้วย Times New Roman ขนาด 10 (ตัวเอียง หนา)
ชื่อหัวเรื่องใหญ่	พิมพ์ด้วย TH SarabunPSK ขนาด 18 (ตัวตรง หนา) จัดชิดซ้าย ประกอบด้วย 1.บทนำ 2.วิธีการทดลอง หรือ วิธีการศึกษา 3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลหรือ ผลการศึกษาและอภิปรายผล 4. สรุป 5. กิตติกรรมประกาศ และ 6. เอกสารอ้างอิง	พิมพ์ด้วย Times New Roman ขนาด 14 (ตัวตรง หนา) จัดชิดซ้าย ประกอบด้วย 1.Introduction 2. Research Methodology 3. Results and Discussion 4. Conclusion 5. Acknowledgement and 6. References
ชื่อหัวเรื่องรอง	TH SarabunPSK ขนาด 16 (ตัวตรง หนา) จัดชิดซ้าย	Times New Roman ขนาด 12 (ตัวตรง หนา) จัดชิดซ้าย
ชื่อหัวเรื่องย่อย	TH SarabunPSK ขนาด 14 (ตัวตรง หนา) จัดชิดซ้าย	Times New Roman ขนาด 12 (ตัวตรง หนา) จัดชิดซ้าย
เนื้อหาบทความ	TH SarabunPSK ขนาด 14	Times New Roman ขนาด 12
ชื่อตาราง	TH SarabunPSK 14 ตัวบาง แต่เฉพาะคำว่า “ตารางที่” ต้องเป็นตัวหนา จัดชิดขอบซ้าย	Times New Roman 12 ตัวบาง แต่เฉพาะคำว่า “Table 1” ต้องเป็นตัวหนา จัดชิดขอบซ้าย
ชื่อรูป	TH SarabunPSK 14 ตัวบาง แต่เฉพาะคำว่า “รูปที่” ต้องเป็นตัวหนา จัดกึ่งกลางคอลัมน์	Times New Roman 12 ตัวบาง แต่เฉพาะคำว่า “Fig.1.” ต้องเป็นตัวหนา จัดกึ่งกลางคอลัมน์
สมการ	ใช้โปรแกรม MathType ด้วยรูปแบบอักษร Times New Roman ขนาด 12 สัญลักษณ์หรือตัวแปรที่เขียนในสมการ จะต้องมีรูปแบบเดียวกันกับสัญลักษณ์หรือตัวแปรที่อยู่ในคำอธิบายหรือในเนื้อหา และให้จัดชิดขอบซ้ายสุดเสมอ ส่วนเลขบอกลำดับสมการ ให้เขียนลำดับเลขไว้ในวงเล็บ และจัดชิดขวาสุด	ใช้โปรแกรม MathType ด้วยรูปแบบอักษร Times New Roman ขนาด 12 สัญลักษณ์หรือตัวแปรที่เขียนในสมการ จะต้องมีรูปแบบเดียวกันกับสัญลักษณ์หรือตัวแปรที่อยู่ในคำอธิบายหรือในเนื้อหา และให้จัดชิดขอบซ้ายสุดเสมอ ส่วนเลขบอกลำดับสมการ ให้เขียนลำดับเลขไว้ในวงเล็บ และจัดชิดขวาสุด
คำอธิบายตัวแปรจากสมการ	ใช้โปรแกรม MathType ด้วยรูปแบบอักษร Times New Roman ขนาด 12 จัดชิดขอบซ้ายสุด เครื่องหมาย “=” ของตัวแปรในแต่ละบรรทัด ต้องตรงกันในแนวดิ่ง	ใช้โปรแกรม MathType ด้วยรูปแบบอักษร Times New Roman ขนาด 12 จัดชิดขอบซ้ายสุด เครื่องหมาย “=” ของตัวแปรในแต่ละบรรทัด ต้องตรงกันในแนวดิ่ง

รายการ	บทความภาษาไทย	บทความภาษาอังกฤษ
เนื้อหาในตาราง / แผนภูมิ	TH SarabunPSK 12 ตัวบาง	Times New Roman 10 ตัวบาง
การอ้างอิงในเนื้อเรื่องและการอ้างอิงท้ายเรื่อง	ให้ดูจากข้อที่ 5. การอ้างอิง	ให้ดูจากข้อที่ 5. การอ้างอิง

4. การส่งต้นฉบับบทความ

การส่งต้นฉบับบทความ ผู้เขียนสามารถส่งบทความออนไลน์ ได้ที่ <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/RMUTP/index> หรือสอบถามข้อมูลได้ที่ กองบรรณาธิการวารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร 399 ถนนสามเสน แขวงวชิรพยาบาล เขตดุสิต กรุงเทพฯ 10300 โทรศัพท์ 0 2665 3777 ต่อ 6645 โทรสาร 0 2665 3860

5. จริยธรรม บทบาท และหน้าที่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จัดทำวารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ภายใต้หลักธรรมาภิบาลและเคร่งครัดในด้านจริยธรรม บทบาท และหน้าที่ต่อสังคมอย่างแท้จริง มีการ แต่งตั้งกองบรรณาธิการภายในและภายนอกโดยผู้บริหารสูงสุดของมหาวิทยาลัย กำหนดหน้าที่และความรับผิดชอบอย่างชัดเจน สามารถปฏิบัติงานได้อย่างโปร่งใสและมีความเป็นอิสระในการพัฒนาวารสารให้ก้าวหน้าและมีคุณภาพ การจัดทำวารสารเป็นการเชื่อมต่อบุคคลหรือกลุ่มบุคคล 3 ส่วน ประกอบด้วย 1) ผู้เขียน 2) บรรณาธิการและกองบรรณาธิการวารสาร และ 3) ผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ ภายใต้การตรวจสอบ คุณภาพวารสารโดยศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (TCI) ทั้งนี้เพื่อให้วารสารมีคุณภาพเป็นไปตามหลักสากล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จึงได้กำหนดจริยธรรม บทบาท และหน้าที่ของผู้เขียน บรรณาธิการ และกองบรรณาธิการวารสาร และผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ ไว้ดังต่อไปนี้

5.1 จริยธรรม บทบาท และหน้าที่ของผู้เขียน

5.1.1 บทความที่ผู้เขียนยื่นเข้ามายังวารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร เพื่อให้พิจารณานั้น จะต้องไม่ไปยื่นต่อวารสารอื่นใดในคราวหรือเวลาเดียวกัน เว้นแต่ไม่ผ่านการพิจารณาและได้รับเอกสารยืนยันผลการพิจารณาจากกองบรรณาธิการแล้ว จึงจะสามารถดำเนินการยื่นต่อวารสารอื่นใดได้

5.1.2 ผู้เขียนต้องไม่ทำการคัดลอกผลงานทางวิชาการของผู้เขียนอื่น และไม่ตีพิมพ์ซ้ำผลงานของตนเอง (Self-Plagiarism) ไม่ลักลอกผลงานของตนเอง สำหรับข้อมูลอื่นใดของผู้เขียนอื่นที่ผู้เขียนนำมาใช้ในบทความจะต้องทำการเขียนอ้างอิงในส่วนเนื้อหาของเนื้อหาและอ้างอิงส่วนท้ายให้ถูกต้องตามหลักวิชาการ

5.1.3 ผู้เขียนจะต้องนำเสนอผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลอง การวิเคราะห์ หรือการคำนวณอย่างตรงไปตรงมา ไม่บิดเบือนข้อมูล (Fabrication or Misrepresentation) จากความเป็นจริงและไม่สร้างหลักฐานเท็จเพื่อรองรับผลลัพธ์ของตนเอง

5.1.4 ผู้เขียนจำเป็นต้องกล่าวคำขอบคุณบุคคลหรือหน่วยงานไว้ในกิตติกรรมประกาศ หากผู้เขียนได้รับทุนวิจัยความอนุเคราะห์ด้านเครื่องมือ เครื่องจักร อุปกรณ์ หรือช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ เพื่อให้ได้มาซึ่งความสำเร็จของบทความฉบับนั้น ๆ

5.1.5 วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร ไม่อนุญาตให้เพิ่มเติมบุคคลอื่นใดที่ไม่มีส่วนเกี่ยวข้อง เข้ามา

ชื่ออยู่ในบทความ เช่น ไม่มีส่วนร่วมในการทำวิจัย หรือไม่มีส่วนร่วมในการเขียนบทความนั้น ๆ โดยผู้เขียนทุกท่านที่มีชื่อในบทความจะต้องมีส่วนร่วมรับผิดชอบ

5.2 จริยธรรม บทบาท และหน้าที่ของบรรณาธิการและกองบรรณาธิการวารสาร

5.2.1 บรรณาธิการและกองบรรณาธิการวารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร มีบทบาทและหน้าที่ในการพิจารณาบทความเบื้องต้นก่อนรับเข้าสู่กระบวนการของวารสาร ประกอบด้วย การพิจารณาเนื้อหาบทความกับกรอบของวารสาร การพิจารณารูปแบบการเขียนบทความ การพิจารณาความเข้มข้นของบทความ การลบลอกผลงานทางวิชาการ การเลือกและกำหนดผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ และพิจารณาคุณภาพโดยรวมของบทความ ก่อนเข้าสู่กระบวนการประเมินบทความต่อไป

5.2.2 บรรณาธิการและกองบรรณาธิการวารสารต้องพิจารณาบทความเบื้องต้นบนพื้นฐานคุณธรรมและจริยธรรม โดยไม่เอนเอียงหรือใช้ความรู้สึกส่วนตัวพิจารณาบทความนั้น ต้องไม่มีอคติต่อผู้เขียนหรือต่อหน่วยงาน ของผู้เขียน

5.2.3 บรรณาธิการและกองบรรณาธิการวารสารต้องกำหนดหรือเลือกผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความที่มีความเชี่ยวชาญตรงตามสาขาของบทความนั้น ๆ โดยผู้ทรงคุณวุฒิที่กำหนดนั้นจะต้องไม่มาจากหน่วยงานเดียวกันกับผู้เขียนและผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความทุกท่านที่ประเมินบทความเดียวกันจะต้องไม่มาจากหน่วยงานเดียวกันด้วย ทั้งนี้เพื่อป้องกันผลประโยชน์ทับซ้อนที่อาจเกิดขึ้น

5.2.4 บรรณาธิการและกองบรรณาธิการวารสารต้องเก็บรักษาความลับเกี่ยวกับผู้เขียนและผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ ไม่ให้ทราบข้อมูลซึ่งกันและกัน หมายความว่า ผู้ทรงคุณวุฒิที่เป็นผู้ประเมินบทความจะต้องไม่ทราบชื่อผู้เขียนและชื่อหน่วยงาน และผู้เขียนจะต้องไม่ทราบชื่อและหน่วยงานผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ (ประเภทของ Peer Review เป็นแบบ Double Blinded) เพื่อป้องกันปัญหาความขัดแย้งที่อาจเกิดขึ้นได้

5.2.5 บรรณาธิการและกองบรรณาธิการวารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ต้องไม่ตีพิมพ์บทความของตนเองลงในวารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร ที่กำกับดูแลอยู่โดยไม่มีข้อยกเว้น

5.2.6 บรรณาธิการและกองบรรณาธิการวารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ต้องไม่มีผลประโยชน์ทับซ้อนใด ๆ อันไม่ชอบธรรมและผิดหลักจริยธรรมกับผู้เขียน และกับผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ โดยต้องไม่มีการเรียกรับผลประโยชน์ใด ๆ ทั้งสิ้น

5.2.7 บรรณาธิการและกองบรรณาธิการวารสารต้องควบคุมและกำกับกระบวนการต่าง ๆ ของวารสารอย่างตรงไปตรงมา ไม่เข้าข้างผู้เขียนใด หรือให้ความช่วยเหลือที่ไม่ถูกต้อง ผิดหลักคุณธรรม จริยธรรมและขาดธรรมาภิบาล

5.2.8 บรรณาธิการและกองบรรณาธิการวารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มีหน้าที่ต้องให้ความร่วมมือ ควบคุมและกำกับให้วารสารมีความถูกต้องและมีคุณภาพเป็นไปตามที่ศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทยกำหนดตามมาตรฐาน

5.3 จริยธรรม บทบาท และหน้าที่ของผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ

5.3.1 ผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความมีหน้าที่ประเมินบทความในด้านต่าง ๆ ตามรูปแบบที่วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร กำหนดด้วยความเข้มข้นและให้ข้อเสนอแนะหรือเหตุผลเชิงวิชาการอันเป็นประโยชน์ต่อผู้เขียน

5.3.2 ผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความต้องประเมินบทความที่ได้รับมอบหมายจากบรรณาธิการและกองบรรณาธิการวารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร ให้แล้วเสร็จในช่วงระยะเวลาที่กำหนด เพื่อประโยชน์สูงสุดของผู้เขียนบทความ

5.3.3 ผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความต้องพิจารณาบทความที่ได้รับจากบรรณาธิการหรือกองบรรณาธิการถึงความเชี่ยวชาญของตนเองกับเนื้อหาในบทความ หากเห็นว่าบทความที่ได้รับมีเนื้อหาไม่ตรงตามความเชี่ยวชาญที่แท้จริงจะต้องแจ้งกองบรรณาธิการวารสารให้รับทราบโดยเร็วและปฏิเสธการประเมิน

5.3.4 ผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความต้องมีหลักจริยธรรมในการประเมินบทความ ไม่เอนเอียงหรือมีอคติต่อเนื้อหาบทความ ต้องไม่ใช้ความคิดเห็นส่วนตัวที่ไม่เป็นไปตามหลักทฤษฎีเชิงวิชาการ ปราศจากหลักฐานที่น่าเชื่อถือได้มาเป็นเกณฑ์ในการตัดสินบทความนั้น ๆ

5.3.5 ผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความต้องเก็บรักษาความลับ ด้วยการไม่เปิดเผยข้อมูลเนื้อหาในบทความของผู้เขียนแก่บุคคลอื่นใดในช่วงระยะเวลาของการประเมินบทความนั้น

6. การอ้างอิง

การอ้างอิงในบทความวิจัยและบทความวิชาการสำหรับวารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กำหนดการอ้างอิงให้เป็นไปตามรูปแบบ IEEE (อ้างอิงจาก <https://www.ieee.org/documents/ieeecitationref.pdf> หรือที่ http://www.ieee.org/documents/style_manual.pdf) โดยต้องเขียนเป็นภาษาอังกฤษเท่านั้น หากบทความที่อ้างอิงมาจากบทความภาษาไทย ต้องแปลเป็นภาษาอังกฤษให้ถูกต้อง สำหรับการใส่อ้างอิงในเนื้อเรื่อง (In-text citations) ให้ใช้เครื่องหมาย [] โดยมีตัวอย่างการเขียน เช่น [1] หรือ [2] หรือ [1], [2] หรือ [1]-[3] หรือ [1], [3]-[8] หรือ [9], [10], [15], [16] หากมีการอ้างอิงซ้ำบทความเดิมให้ใช้หมายเลขเดิม

ในกรณีมีการอ้างอิงในเนื้อหาด้วยการกำหนดชื่อผู้แต่งบทความให้เขียนตามตัวอย่าง ดังนี้ K. S. Karukanan [1] หรือ L. A. Hoi and S. D. Woo [2] หรือ P. A. Abarwale et al. [3]

ในส่วนของการอ้างอิงส่วนท้าย (Reference List) จะต้องเรียงตามลำดับบทความที่เขียนอ้างอิงในเนื้อเรื่อง ซึ่งจำแนกรูปแบบการเขียนอ้างอิงส่วนท้ายได้ดังต่อไปนี้

1) การอ้างอิงจากบทความในวารสาร (Journal Articles)

รูปแบบ: [1] Author, "Title of Article," *Title of Journal*, Volume, Issue, Pages. Year.

ตัวอย่าง:

- [1] H. Li, Z. Huang, L. Cheng, S. Kong and S. Liu, "Structure and dielectric properties of novel low temperature co-fired Bi₂O₃-RE₂O₃-MoO₃ (RE=Pr, Nd, Sm, and Yb) based microwave ceramics," *Ceramics International Journal*, vol. 43, no. 5, pp. 4570-4575, Apr. 2017.

2) การอ้างอิงจากการนำเสนอผลงานในการประชุมทางวิชาการ (Conference Technical Articles)

รูปแบบ: [1] Author, "Title of paper," in *Title of Conference*, Conference date, Editor, Ed.

Location: Publisher, Year, Pages.

ตัวอย่าง:

- [2] T. Fedushchak, M. Uimin, S. Zhuravkov and A. Vosmerikov, "Nanopowder hydrogenation catalysts of diesel fraction components," in *Proceeding of 7th International Forum on Strategic Technology (IFOST)*, Tomsk Polytechnic University Tomsk, Russia, 2012, pp. 1–4.
- [3] W. Herz, M. Süßer, A. Ulbricht and F. Wüchner, "The operation experience with the dual cooling system of the polo coil (two phase-supercritical He)," in *Proceedings of the Sixteenth International Cryogenic Engineering Conference/International Cryogenic Materials Conference*, Germany, 1997, pp. 469–472.

3) การอ้างอิงจากหนังสือ (Books)

รูปแบบ: [1] Author. *Title of Book*, Editor, ed. Location: Publisher, Year, Pages.

ตัวอย่าง:

- [4] R. C. Hibbeler, *Mechanics of Materials*, 9th ed. Boston: Pearson, 2013.
- [5] R. M. Burton, B. Obel and G. DeSanctis, *Organizational Design: A Step-by-Step Approach*, 2nd ed. New York: Cambridge University Press, 2011.

4) การอ้างอิงจากบทในหนังสือ

รูปแบบ: [1] J. K. Author, "Title of chapter in the book," in *Title of His Published Book*, xth ed. City of Publisher, Country if not USA: Abbrev. of Publisher, year, ch. x, sec. x, pp. xxx–xxx.

ตัวอย่าง:

- [6] L. Stein, "Random patterns," in *Computers and You*, J. S. Brake, Ed. New York: Wiley, 1994, pp. 55-70.
- [7] R. L. Myer, "Parametric oscillators and nonlinear materials," in *Nonlinear Optics*, vol. 4, P. G. Harper and B. S. Wherret, 1st ed. San Francisco, CA: Academic, 1977, pp. 47-160.

5) การอ้างอิงจากวิทยานิพนธ์ (Theses and Dissertations)

รูปแบบ:

- [1] J. K. Author, "Title of dissertation," Ph.D. dissertation, Abbrev. Dept., Abbrev. Univ., City of Univ., Abbrev. State, year.
- [2] J. K. Author, "Title of thesis," M.S. thesis, Abbrev. Dept., Abbrev. Univ., City of Univ., Abbrev. State, year.

ตัวอย่าง:

- [8] J. O. Williams, "Narrow-band analyzer," Ph.D. dissertation, Dept. Elect. Eng., Harvard Univ., Cambridge, MA, 1993.
- [9] N. Kawasaki, "Parametric study of thermal and chemical nonequilibrium nozzle flow," M.S. thesis, Dept. Electron. Eng., Osaka Univ., Osaka, Japan, 1993.

6) การอ้างอิงจากสิทธิบัตร (Patents)

รูปแบบ: [1] J. K. Author, "Title of patent," U.S. Patent x xxx xxx, Abbrev. Month, day, year.

ตัวอย่าง:

[10] J. P. Wilkinson, "Nonlinear resonant circuit devices," U.S. Patent 3 624 125, July 16, 1990.

7) การอ้างอิงจากมาตรฐาน (Standards)

รูปแบบ: [1] *Title of Standard*, Standard number, date.

ตัวอย่าง:

[11] *IEEE Criteria for Class IE Electric Systems*, IEEE Standard 308, 1969.

[12] *Letter Symbols for Quantities*, ANSI Standard Y10.5-1968.

8) การอ้างอิงจากคู่มือ (Handbooks)

รูปแบบ: [1] *Name of Manual/Handbook*, x Ed., Abbrev. Name of Co., City of Co., Abbrev.
State, year, pp. xx-xx.

ตัวอย่าง:

[13] *Transmission Systems for Communications*, 3rd Ed., Western Electric Co., Winston-Salem, NC, 1985, pp. 44–60.

[14] *Motorola Semiconductor Data Manual*, Motorola Semiconductor Products Inc., Phoenix, AZ, 1989.

Research Articles

- ◆ **Effect of Cavendish Banana Flour Content as Replacement for Wheat Flour on Bread Quality**
Wijitra Liaotrakoon Vachiraya Liaotrakoon Wanpa Wongsangtham Rattana Hongboonrueng and Soravit Singhtoum
- ◆ **Use of Humectants in Mulberry Paste Product**
Gannigar Onsamlee
- ◆ **Assessment of Label, Physical, pH and Microbiological Qualities of Bottled Drinking Water Distributed in City Municipality of Ubon Ratchathani, Thailand**
Subuntith Nimrat Siriporn Jirarattanakunchai and Verapong Vuthiphandchai
- ◆ **Properties of Polypropylene Conductive Fiber from Sheath-Core Bicomponent Fiber**
Natee Srisawat and Piyanut Jingit
- ◆ **Response Surface Modeling and Optimization of Media Nutrients for Enhanced Production of γ -linolenic Acid in the Moss *Physcomitrella patens* using Response Surface Methodology**
Pichit Chodok
- ◆ **UV Protection and Antibacterial Properties of Yarn Coated with Polyvinyl Alcohol by Nip-rollers Process**
Worawit Sriwittayakul Mahamasuhaimi Masae Pongpat Keereetham Wongsakon Onketpon and Peerawas Kongsong
- ◆ **Fried Oil Absorption Property of Nonwoven from Rice Straw Cellulose Fiber**
Jitsopa Chaliewsak
- ◆ **Adsorption of Chromium (III) Solution Using Calcium Hydroxyapatite**
Thanya Promsorn Apisit Songsasen and Boontana Wannalerse
- ◆ **Antibacterial Activity of Indigo Dyed Fabrics**
Kaewkanlaya Sotthisawad
- ◆ **Development of Tablet Product from Riceberry Broken Rice**
Namfon Samsalee and Seksan Mangkalan
- ◆ **Characterization of Cement Paste Composites Blended with Palmyra Fiber Ash and Surface-treated on Short SWNT Prepared by an Electroless Plating Process**
Suchart Chantaramanee Nuntachai Chusilp Chatree Homkhiew and Danupon Tonnayopas
- ◆ **Development Milk Ice-cream Supplemented of Chicken Breast**
Suthida Kitjavorasatien Vorathon Pomyen and Woralak Pomnoi
- ◆ **Development of Pad Thai Crispy Bar**
Jintana Chueanopparat Varayos Charoenying Duangkamon Sangteerakij Parisut Chalermchaiwat and Prawta Chantaro
- ◆ **The Adsorption of Methylene Blue Dye on Activated Carbon Prepared from Molasses by Using Chemical and Microwave Activation**
Adisak Jaturapiree Trin Pathomnithipinyo Ekrachan Chaichana and Thanunya Saowapark
- ◆ **Development and Evaluation of Mini Heat Pump Dryer for Slice Banana**
Phairoach Chunkaew
- ◆ **Real-time Travel Time Prediction Algorithm Using Spatiotemporal Speed Interval Patterns Matching**
Krit Jedwanna and Weerathep Chanintornthep