

บทความวิจัย

- ◆ ผลของการใช้กากถั่วดาวอินคาทดแทนถั่วอัลมอนต์ป็นต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ฟามาการอง
วนิดา บุรีภักดิ์ อัญพร สายทอง นรินทร์ภพ ช่วยการ และ ศิริวัลย์ พฤตวิสัย
- ◆ ผลของแขนแทนกัมและกัวร์กัมต่อคุณภาพของเม็ดไข่มุกจากการใช้แป้งข้าวกล้องงอกและแป้งข้าวเหนียวต่างทดแทน
แป้งมันสำปะหลัง
ดวงรัตน์ สมนาค วริศรา ชื่นประไพ ดวงกมล แสงธีรกิจ และ ปาริสุทธิ์ เฉลิมชัยวัฒน์
- ◆ ความหลากหลายของยีสต์และราที่คัดแยกได้จากลูกแป้ง
กุสุมาวดี ฐานเจริญ และ อรรถพร มลาศรี
- ◆ การเพิ่มการพาความร้อนแบบธรรมชาติของแผ่นเรียบแนวดิ่งโดยการใช้ลมโคลน
เจษฎาภรณ์ ปริญด่างกล วีรชัย ชัยวรพฤกษ์ และ เสาวนิตย์ เลขวัต
- ◆ การลดอัตราของเสียในกระบวนการผลิตสุก๊าก่อน
ธเนศ รัตนวิไล สลิมมี บาราเฮง และ สุริยา จิรสติสิน
- ◆ ผลของแป้งข้าวกล้องงอกและอินูลินต่อคุณภาพของแป้งต็อกโบกี
มนัสนันท์ อีระเกียรติกิจาร จิรวิทย์ กาญจนลักษณ์ ปาริสุทธิ์ เฉลิมชัยวัฒน์ และ พรพวตา จันทโร
- ◆ Antibacterial Potential of Combined Thai Herb Extracts against Methicillin-Resistant *Staphylococcus aureus*, *Edwardsiella tarda* and *Pseudomonas aeruginosa* in Dried, Seasoned, and Crushed Squid
Subuntith Nimrat Pornpimon Soodsawaeng Sangsuriya Sukhapat Phodchamarn Noiaresar Traimat Boonthai and Verapong Vuthiphandchai
- ◆ การออกแบบและพัฒนารถสามล้อไฟฟ้าระบบมอเตอร์ขับเคลื่อน
จักรมาส เลาหวนิช นุชิตา สุวแพทย์ และ ชลธิ์ โพธิ์ทอง
- ◆ หุ่นยนต์เคลื่อนที่อัตโนมัติโดยการใช้กล้องระบุตำแหน่ง
นภัสดล สิงหะตา
- ◆ กำลังอัดและการดูดซึมน้ำจีโอพอลิเมอร์จากเก้าอี้พลาสติกน้ำมันผสมผงอะลูมินา
อาบีเต็ง ฮาวา ปรีชา สะแลแม และ วรพจน์ ประชาเสรี
- ◆ การออกแบบปรับปรุงพื้นที่หน่วยทะเบียนของงานเวชระเบียนโดยใช้แบบจำลองแถวคอย กรณีศึกษา โรงพยาบาล
สงขลาครินทร์
นิติพัฒน์ เหล่ามงคลชัยศรี ปาลิดา สุทธิชัย ปิยะกุล ขุนละพัน และ ภาสกร แสงศุภวานิช
- ◆ การศึกษาลักษณะขอบตัดโลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงชนิดเฟสคู่เกรด DP590 ในการบีบอัดที่อุณหภูมิแบบอุณหภูมิ
ณัฐศักดิ์ พรพณศิริ และ พงศกร หลีตระกูล
- ◆ ผลของการใช้ตัวถูกละลายทางเลือกและอัลตราซาวด์ต่อการถ่ายโอนมวลสารของสับประรดพันธุ์ทองระยองใน
กระบวนการอินฟิวชันแบบแห้ง
วิชมนี นีนยงพุทธรากล ศนิ จิระสถิตย์ และ อพัชชา สวัสดิ์ผล
- ◆ การลดของเสียที่เกิดจากการเชื่อมด้วยหุ่นยนต์ในกระบวนการประกอบชิ้นส่วนตัวถังรถชุด-ตก
อภิชาติ เสมศรี อนุชา กาเล็ก และ ธนิตศักดิ์ พุดพัฒนาเมษิต
- ◆ ผลของปริมาณเมือกกระเจี๊ยบเขียวและวุ้นแมลต์แมงลักต่อคุณภาพเยลลี่กระเจี๊ยบแดงพร้อมดื่ม
วรลักษณ์ แสงธราทิพย์ อนุวัตร แจ่มชัด และ กมลวรรณ แจ่มชัด

บทความวิชาการ

- ◆ Two Chain-Type Exponential Estimators for the Estimation of the Population Mean
Napattchan Dansawad

วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร

RMUTP RESEARCH JOURNAL

ที่ปรึกษา

ดร.ณัฐวรพล รัชสิริวัชรบุล

อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ดร.ปริญญ์ บุญกนิษฐ

รองอธิการบดีฝ่ายบริหาร วิจัยและพัฒนานวัตกรรม

บรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ว่าที่เรือตรี ดร.ทรงวุฒิ มงคลเลิศมณี

กองบรรณาธิการ จากหน่วยงานภายนอก

ศาสตราจารย์ ดร.ทงเกียรติ	เกียรติศิริโรจน์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ศาสตราจารย์ ดร.สมชาย	วงศ์วิเศษ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
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.ธงชัย	พองสมุทร	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

กองบรรณาธิการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รุ่งอรุณ พรเจริญ	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กัลทิมา เชาวชาญชัยกุล
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัตนพล มงคลรัตนาสี	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรลักษณ์ ปัญญาธิพิงศ์
ดร.ชลากร อุดมรักษาสกุล	ดร.สิงห์แก้ว ปือกเพ็ง
ดร.วราพร ทองจีน	นางสาวเจนจิรา บ.ป.สูงเนิน
นางสาวพัชรนันท์ ยังวรวิเชียร	นายปิยวัฒน์ เจริญทรัพย์

รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิผู้ประเมินบทความ (Peer Review)
ประจำปี 17 ฉบับที่ 1 มกราคม - มิถุนายน 2566

ศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล นาผล	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ศาสตราจารย์ ดร.ระพีพันธ์ ปิตาคะโส	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
รองศาสตราจารย์ ดร.เกรียงไกร ราชกิจ	มหาวิทยาลัยแม่โจ้
รองศาสตราจารย์ ดร.จิระพล ศรีเสริมผล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รองศาสตราจารย์ ดร.ขวลิต กิตติชัยการ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.ธรา อังสกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รองศาสตราจารย์ ดร.ธีระพงษ์ ว่องรัตน์ไพศาล	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.นฤมล มาแทน	มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์
รองศาสตราจารย์ ดร.นันทวัน เทิดไทย	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.นิติ ชูเชิด	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.บุรฉัตร ฉัตรวีระ	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.วิเชียร ซาลี	มหาวิทยาลัยบูรพา
รองศาสตราจารย์ ดร.วิวัฒน์ หวังเจริญ	มหาวิทยาลัยแม่โจ้
รองศาสตราจารย์ ดร.วีระเชษฐ์ จิตตานิษฐ์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริระ สายสร	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร.สุพรรณิ อึ้งปัญสดวงศ์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.อภิวัฒน์ มุตตามระ	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.อุษณีย์ สิริวัฒน์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จุฑามาศ นิวัฒน์	มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชูศักดิ์ พรสิงห์	มหาวิทยาลัยศิลปากร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนกฤต โชติถาวรวิศ	มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมมาธิราช
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนจันทร์ มหาวนิช	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนสาร อินทรกำธรชัย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธิดาพร ศุภภากร	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นภสรพี เหลืองสกุล	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิยาภรณ์ เชื้อมชัยตระกูล	มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิไลรัก อินธิปัญญา	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มุกดา มีนุ่น	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วัชรินทร์ ดงบัง	มหาวิทยาลัยบูรพา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิษณุพล พักแก้ว	มหาวิทยาลัยพะเยา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิมล จันทร์แจ่ม	มหาวิทยาลัยรามคำแหง

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริมา พ่วงประพันธ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สงบ คำค้อ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สวามินี นวลแขกกุล

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุจินดา ศรีวัฒนะ

ดร.ณัฐชานันท์ อังสุเศรษฐี

ดร.ดวงฤทัย นิคมรัฐ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

สารบัญ
วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร
ปีที่ 17 ฉบับที่ 1 มกราคม - มิถุนายน 2566 ISSN 2651-1096 (Online)

หน้า

บทความวิจัย:

ผลของการใช้กากถั่วดาวอินคาทดแทนถั่วอัลมอนต์ป่นต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ฝามาการอง	1
วนิดา บุรีภักดี ฉันทพร สายทอง นรินทร์ภพ ช่วยการ และ ศิริวัลย์ พฤตวิสัย	
ผลของแซนแทนกัมและกัวร์กัมต่อคุณภาพของเมตชี่มูกจากการใช้แป้งข้าวกล้องงอก และแป้งข้าวเหนียวต่างออกทดแทนแป้งมันสำปะหลัง	14
ดวงรัตน์ สอนาค รวิศรา ชื่นประไพ ดวงกมล แสงธีรกิจ และ ปาริสุทธิ์ เฉลิมชัยวัฒน์	
ความหลากหลายของยีสต์และราที่คัดแยกได้จากลูกแป้ง	27
กุสุมาวดี ฐานเจริญ และ อรรถพร มลาศรี	
การเพิ่มการพาความร้อนแบบธรรมชาติของแผ่นเรียบแนวดิ่งโดยการใช้ลมโคลนา	40
เจษฎาภรณ์ ปรีดากุล วีรชัย ชัยวรพฤษ และ เสาวนิตย์ เลขวัต	
การลดอัตราของเสียในกระบวนการผลิตสบู่ก้อน	52
ธเนศ รัตนวิไล สลิม บาราเฮง และ สุริยา จิรสิตสิน	
ผลของแป้งข้าวกล้องงอกและอินลินต่อคุณภาพของแป้งต็อกโบกี	67
มนัสนันท์ ธีระเกียรติกำจร จิรวิทย์ กาญจนลักษณ์ ปาริสุทธิ์ เฉลิมชัยวัฒน์ และ พรราวตา จันทโร	
Antibacterial Potential of Combined Thai Herb Extracts against Methicillin-Resistant <i>Staphylococcus aureus</i> , <i>Edwardsiella tarda</i> and <i>Pseudomonas aeruginosa</i> in Dried, Seasoned, and Crushed Squid	77
Subuntith Nimrat Pornpimon Soodsawaeng Sangsuriya Sukhapat Phodchamarn Noiaresar Traimat Boonthai and Verapong Vuthiphandchai	

สารบัญ

วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร

ปีที่ 17 ฉบับที่ 1 มกราคม - มิถุนายน 2566 ISSN 2651-1096 (Online)

หน้า

บทความวิจัย:

การออกแบบและพัฒนารถสามล้อไฟฟ้าระบบมอเตอร์ขับเคลื่อน	89
จักรมาส เลาหวณิช นุชิตา สุวแพทย์ และ ชลธิ์ โพธิ์ทอง	
หุ่นยนต์เคลื่อนที่อัตโนมัติโดยการใช้กล้องระบุตำแหน่ง	102
นภัสดล สิงหะตา	
กำลังอัดและการดูดซึมน้ำจีโอพอลิเมอร์จากเถาปาล์มน้ำมันผสมผงอะลูมินา	116
อาปีเต็ง ฮาวา ปรีชา สะแลแม และ วรพจน์ ประชาเสรี	
การออกแบบปรับปรุงพื้นที่หน่วยทะเบียนของงานเวชระเบียนโดยใช้แบบจำลองแถวคอย	129
กรณีศึกษา โรงพยาบาลสงขลานครินทร์	
นิติพัฒน์ เหล่ามงคลชัยศรี ปาลิดา สุทธิชัย ปิยะกุล ขุนละพั่น และ ภาสุรี แสงสุขวานิช	
การศึกษาลักษณะขอบตัดโลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงชนิดเฟสคู่เกรด DP590	142
ในการบีบอัดที่อุณหภูมิแบบอุ่น	
ณัฐศักดิ์ พรพุดศิริ และ พงศกร หลีตระกูล	
ผลของการใช้ตัวถูกละลายทางเลือกและอัลตราซาวด์ต่อการถ่ายโอนมวลสารของ	155
สับประรดพันธุ์ทองระยองในกระบวนการอินฟิวชันแบบแห้ง	
วิชมณี ยืนยงพุทธกาล ศนิ จิระสถิตย์ และ อพัชชา สวัสดิ์ผล	
การลดของเสียที่เกิดจากการเชื่อมด้วยหุ่นยนต์ในกระบวนการประกอบชิ้นส่วน	167
ตัวถังรถชุด-ตก	
อภิชิต เสมศรี อนุชา กาเล็ก และ ธนิตศักดิ์ พุดพัฒน์โมษิต	

สารบัญ

วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร

ปีที่ 17 ฉบับที่ 1 มกราคม - มิถุนายน 2566 ISSN 2651-1096 (Online)

หน้า

บทความวิจัย:

ผลของปริมาณเมื่อกระเจียบเขียวและวุ้นเมล็ดแมงลักต่อคุณภาพเยลลี่กระเจียบแดง
พร้อมดื่ม 182

วรลักษณ์ แสงธาราทิพย์ อนุวัตร แจ้จ้งค์ด และ กมลวรรณ แจ้จ้งค์ด

บทความวิชาการ:

Two Chain-Type Exponential Estimators for the Estimation of the
Population Mean 194

Napattchan Dansawad

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

ผลของการใช้กากถั่วดาวอินคาทดแทนถั่วอัลมอนต์ป่นต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ฟามาการอง

วนิดา บุรีภักดี ฉันทพร บุญศิริ นรินทร์ภพ ช่วยการ* และ ศิริวัลย์ พฤตวิสัย

คณะศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

2/5 ถนนราชดำเนินนอก ตำบลบ่อยาง อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา 90000

รับบทความ 26 กรกฎาคม 2564 แก้ไขบทความ 3 ธันวาคม 2564 ตอรับบทความ 29 ธันวาคม 2564

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปริมาณกากถั่วดาวอินคาที่เหมาะสมทดแทนถั่วอัลมอนต์ป่นในผลิตภัณฑ์ฟามาการอง โดยนำมาทดแทนในปริมาณที่ต่างกัน 4 ระดับคือ ร้อยละ 0 40 60 และ 80 โดยน้ำหนักถั่วอัลมอนต์ป่น ผลพบว่า ปริมาณกากถั่วดาวอินคาสามารถทดแทนถั่วอัลมอนต์ป่นได้ที่ระดับร้อยละ 60 โดยมีคะแนนความชอบทางประสาทสัมผัสทุกคุณลักษณะอยู่ในเกณฑ์ชอบปานกลาง ทั้งนี้เมื่อทดแทนด้วยกากถั่วดาวอินคาในปริมาณเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่า L^* และปริมาณความชื้นลดลง ($p \leq 0.05$) ส่วนค่า a^* มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ($p \leq 0.05$) ทั้งนี้ ค่าความกรอบค่า b^* และปริมาณน้ำอิสระมีค่าไม่แตกต่างกัน ($p > 0.05$) ผลิตภัณฑ์ฟามาการองที่มีกากถั่วดาวอินคาร้อยละ 60 พบว่ามีปริมาณเถ้า ใยอาหาร โปรตีนและกรดอะมิโนชนิดจำเป็นทั้ง 9 ชนิด (ฮีสติดีน ไอโซลิวซีน ลูซีน ไลซีน เมไทโอนีน ฟีนิลอะลานีน ทรีโอนีน วาลีน และทรีโพรไทเฟน) และกรดอะมิโนชนิดไม่จำเป็นจำนวน 5 ชนิด (ซีสตีล ไกลซีน โพรลีน เซรีน และไทโรซีน) มีปริมาณเพิ่มขึ้นประมาณ 1 เท่า นอกจากนี้ ต้นทุนวัตถุดิบของผลิตภัณฑ์ฟามาการองจากกากถั่วดาวอินคาต่อ 1 ชิ้น น้ำหนัก 3 กรัม มีต้นทุนประมาณ 1.3 บาท

คำสำคัญ : ผลิตภัณฑ์ฟามาการอง; กากถั่วดาวอินคา; ถั่วอัลมอนต์ป่น; กรดอะมิโน

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

Effect of Using Sacha Inchi Pressed-Cake as a Substitute for Almond Powder on the Quality of Macaron Shell Product

Wanida Bureepakdee Thanyaporn Bunsiri Narinphop Chuaykarn* and
Siriwan Pruettiwilai

Faculty of Liberal Arts, Rajamangala University of Technology Srivijaya
2/5 Ratchadamnoen Nok, Bo Yang, Muang, Songkhla 90000

Received 26 July 2021; Revised 3 December 2021; Accepted 29 December 2021

Abstract

This research aimed to study the suitable content of sacha inchi pressed-cake instead of using almond powder in macaron shells. They were substituted in flour different levels; 0%, 40%, 60%, and 80% by almond powder weight. The results showed that sacha inchi press-cake was substituted for almond powder at 60% with a moderate score for all measured sensory traits. The L^* value and moisture were decreased ($p \leq 0.05$) but the a^* value trend was increased ($p \leq 0.05$) with a higher amount of sacha inchi pressed-cake. The fracturability, b^* value, and water activity (a_w) values were not significantly different ($p > 0.05$). The content of ash, crude fiber, protein, nine essential amino acids (Histidine, Isoleucine, Leucine, Lysine, Methionine, Phenylalanine, Threonine, Valine, and Tryptophan), and five non-essential amino acids (Arginine, Glycine, Proline, Serine, and Tyrosine) were increased about one time. Moreover, the cost of macaron shell with Sacha Inchi pressed-cake weighing 3 grams was approximately 1.3 baht per piece.

Keywords : Macaron Shell Product; Sacha Inchi Pressed-Cake; Almond Powder; Amino Acid

* Corresponding Author. Tel.: +669 7140 5193, E-mail Address: narinphop.c@rmuts.ac.th

1. บทนำ

มาการอง (Macarons) เป็นขนมหวานที่มีรูปร่างกลมเหมือนแซนด์วิชสองชิ้นประกบกัน มักเรียกว่าฝามาการอง (Macaron Shells) เป็นขนมที่มีต้นกำเนิดจากประเทศฝรั่งเศส มีลักษณะด้านนอกกรอบด้านในเหนียวนุ่ม และมักสอดไส้ชนิดต่าง ๆ ระหว่างฝามาการอง ด้วยรสชาติที่หอมหวาน มาการองจึงได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย มาการองเป็นผลิตภัณฑ์ที่จัดอยู่ในกลุ่มของเมอแรงค์ (Meringue) มีส่วนประกอบหลัก 4 ส่วนคือ ถั่วอัลมอนด์ป่น น้ำตาลทราย ไข่ขาว น้ำตาลไอซิ่ง และส่วนผสมอาหาร [1] จากรายงานการวิจัยที่ผ่านมาได้นำพืชตระกูลถั่วหลายชนิดมาทดแทนถั่วอัลมอนด์ป่นในฝามาการอง เพื่อลดต้นทุนการผลิต เช่น เม็ดมะม่วงหิมพานต์ [2] ถั่วลิสง [3] เป็นต้น จากผลการศึกษาพบว่า คุณภาพทางกายภาพและทางประสาทสัมผัสของมาการองคล้ายคลึงกันกับสูตรที่ใช้ถั่วอัลมอนด์ป่น 100% จึงเป็นแนวทางในการนำถั่วชนิดอื่นหรือผลิตภัณฑ์จากถั่วชนิดต่าง ๆ ที่มีต้นทุนต่ำกว่าถั่วอัลมอนด์ป่นและอุดมไปด้วยสารอาหารซึ่งมีประโยชน์ในเชิงโภชนาการมาพัฒนาต่อไป ถั่วที่ได้รับความนิยมทั้งทั่วโลกและในประเทศไทยมากที่สุดชนิดหนึ่งคือ ถั่วดาวอินคา (Sacha Inchi) โดยมีชื่อวิทยาศาสตร์คือ *Plukenetia volubilis* L. เนื่องจากเป็นพืชที่มีกรดไขมันชนิดต่าง ๆ วิตามินอีชนิดโทโคฟีรอล และที่สำคัญคือมีปริมาณโปรตีนและกรดอะมิโนที่จำเป็นในปริมาณสูง รวมทั้งถั่วดาวอินคามีส่วนช่วยควบคุมระดับน้ำตาลในเลือด ลดความเสี่ยงในการเกิดโรคหลอดเลือดและหัวใจ และด้านการแข็งตัวของเลือด [4] จึงมีรายงานการศึกษาในการนำถั่วดาวอินคา มาพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์มาการอง ได้แก่ ถั่วดาวอินคาทั้งที่ไม่ผ่านกระบวนการบีบน้ำมัน พบว่าการใช้เมล็ดถั่วดาวอินคาที่ไม่ผ่านกระบวนการบีบน้ำมันทำให้มีกลิ่นรสเหม็นเขียวค่อนข้างแรง และมีผลต่อคุณภาพทางประสาทสัมผัสของฝามาการอง ทำให้ผู้บริโภคไม่ยอมรับส่งผลให้ทดแทนผงอัลมอนด์ป่นได้ในปริมาณน้อย [5] และจากข้อมูลวิทยานิพนธ์ของ [6] ได้พัฒนาผลิตภัณฑ์มาการองโดยใช้ผง

โปรตีนถั่วดาวอินคาที่สกัดน้ำมันออกบางส่วน พบว่าสามารถใช้ในการทดแทนถั่วอัลมอนด์ในฝามาการองได้ในปริมาณที่มากขึ้น แต่ยังไม่มีความชัดเจนในเชิงคุณค่าทางโภชนาการที่ชัดเจนว่า เมื่อนำกากถั่วอินคาที่ผ่านกระบวนการบีบน้ำมันออกทั้งหมดมาทดแทนถั่วอัลมอนด์ป่นในผลิตภัณฑ์ฝามาการองจะทำให้มีสารอาหารประเภทใดบ้างที่มีปริมาณหลงเหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ดังกล่าว ซึ่งอาจทำให้ข้อมูลด้านโภชนาการไม่แน่ชัดเมื่อหากผู้บริโภคตัดสินใจเลือกบริโภค เนื่องจากมีผลในเชิงสุขภาพ

พฤติกรรมการบริโภคของคนในสมัยปัจจุบันที่ได้ให้ความสนใจอาหารทางเลือกที่เป็นประโยชน์ในเชิงสุขภาพกันมาก ดังนั้นข้อมูลทางโภชนาการหรือสารอาหารต่าง ๆ ย่อมเป็นปัจจัยสำคัญในการตัดสินใจเลือกบริโภคอาหารแต่ละชนิด โดยเฉพาะมาการองซึ่งจัดเป็นอาหารว่างประเภทขนมหวานที่มักรับประทานได้ทุกวัย เพื่อเป็นการยืนยันถึงผลการศึกษาปัจจัยในเรื่องคุณภาพของผลิตภัณฑ์มาการอง โดยเฉพาะในแง่ข้อมูลคุณค่าทางโภชนาการ และคุณภาพอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับผลิตภัณฑ์ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ฝามาการองที่ใช้กากถั่วดาวอินคาทดแทนถั่วอัลมอนด์ป่น ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์อาหารว่างประเภทขนมหวานที่อาจมีราคาต้นทุนลดลง และมีคุณค่าทางโภชนาการโดยเฉพาะปริมาณโปรตีน และกรดอะมิโน ซึ่งเป็นสารอาหารหลักที่สำคัญต่อร่างกาย โดยอาจใช้เป็นแหล่งโปรตีนทางเลือกจากพืชได้ ตลอดจนอาจทำให้ผลิตภัณฑ์มีส่วนของปริมาณพลังงานและปริมาณไขมันที่ลดลง ตลอดจนเป็นแนวทางในการนำไปพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ขนมหวาน เพื่อให้มีลักษณะเป็นอาหารว่างประเภทอื่น ๆ ที่มีประโยชน์ในเชิงสุขภาพต่อไปได้

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 การศึกษาปริมาณการใช้กากถั่วดาวอินคาทดแทนถั่วอัลมอนด์ป่นต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ฝามาการอง

คัดเลือกผลิตภัณฑ์ฝามาการองโดยดัดแปลงจาก [5] นำกากถั่วดาวอินคา ทราย ฟาร์มฟีน มาแปรปริมาณที่

ใช้ทดแทนออกเป็น 3 ระดับ คือ ร้อยละ 40 60 และ 80 โดยน้ำหนักกล้วยอัลมอนต์ป่น ซึ่งกำหนดให้ผลิตภัณฑ์ฝามาการองที่ไม่มีกากกล้วยดาวอินคา (ร้อยละ 0) เป็นสูตรควบคุม (ตารางที่ 1) โดยมีน้ำหนักทั้งหมดต่อสูตร 260 กรัม และกำหนดให้ส่วนผสมอื่นมีปริมาณคงที่ คือ น้ำตาลทรายร้อยละ 23 น้ำตาลไอซิ่งร้อยละ 35 และไข่ขาวร้อยละ 19 มีปริมาณเท่ากันทั้ง 4 สูตร จากนั้นนำไปผลิตโดยนำกล้วยอัลมอนต์ป่น กากกล้วยดาวอินคา และน้ำตาลไอซิ่ง ปั่นให้เข้ากันในเครื่องปั่นอเนกประสงค์ ยี่ห้อ Sharp รุ่น EM-ICE POWER นำไปร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานขนาดความละเอียด 60 เมช จำนวน 2 ครั้ง จากนั้นตีไข่ขาว น้ำตาลทราย ให้เข้ากันเป็นเวลา 20 นาที เติมน้ำมันที่ร้อนไว้แล้วลงไป ตระล่อมจนเป็นเนื้อเดียวกันนำส่วนผสมใส่ถุงบีบ แล้วบีบเนื้อมาการอง น้ำหนักประมาณ 5 กรัม ใส่แผ่นรองอบซิลิโคนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 3 เซนติเมตร นำไปอบด้วยเตาอบไฟฟ้า รุ่น EOT56MXC ยี่ห้อ ELECTROLUX ที่อุณหภูมิ 145 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25 นาที แกะออกจากพิมพ์ และพักให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง

ตารางที่ 1 ปริมาณกากกล้วยดาวอินคาที่ทดแทนกล้วยอัลมอนต์ป่นในผลิตภัณฑ์ฝามาการอง

ส่วนผสม (กรัม)	ปริมาณกากกล้วยดาวอินคา (ร้อยละ)			
	0	40	60	80
กากกล้วยดาวอินคา	0	24	36	48
กล้วยอัลมอนต์ป่น	60	36	24	12

2.2 การศึกษาคุณภาพทางกายภาพและเคมี

2.2.1 การวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพ วิเคราะห์เนื้อสัมผัส ด้วยเครื่อง Texture Analyzer ยี่ห้อ Stable Micro Systems รุ่น TA-XT Plus โดยใช้หัวกดเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 2 มิลลิเมตร (P/2) โดยวัดตัวอย่างหลังจากการผลิตไม่เกิน 24 ชั่วโมง รายงานเป็นค่าความแข็ง (Hardness) ในหน่วยนิวตัน (N) และค่าความกรอบ (Fracturability) ในหน่วยมิลลิเมตร (mm) วัดค่าสีด้วยเครื่องวัดสี ยี่ห้อ Hunter Lab รุ่น NH310

รายงานเป็นค่า L* (ความสว่าง) ค่า a* (สีเขียว-แดง) และค่า b* (สีน้ำเงิน-เหลือง)

2.2.2 การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น (Moisture) โดยวิธีการให้ความร้อนโดยตรง (Direct Method) ด้วยเครื่องวัดวิเคราะห์ความชื้น (Moisture Analyzer) ยี่ห้อ Sartorius รุ่น MA 150 และวิเคราะห์ปริมาณน้ำอิสระ (a_w) ด้วยเครื่องวัดปริมาณน้ำอิสระ (Water Activity Meter) ยี่ห้อ Aqua Lab รุ่น 4TE ตามวิธีการ AOAC [7]

ทำการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ นำผลที่ได้มาวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's Multiple Range Test (DMRT)

2.3 การทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัส

การทดสอบการยอมรับทางประสาทสัมผัส โดยวิธีการให้คะแนนความชอบ 9 ระดับ (9-point Hedonic Scale) โดยทดสอบคุณลักษณะด้านสี กลิ่นรส รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม ใช้ผู้ทดสอบชิมที่ไม่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 60 คน นำผลที่ได้มาวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's Multiple Range Test (DMRT) โดยคัดเลือกผลิตภัณฑ์ฝามาการองที่ทดแทนด้วยกากกล้วยดาวอินคาที่ดีที่สุด ไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีเพื่อเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ฝามาการองสูตรที่ไม่มีกากกล้วยดาวอินคาในขั้นตอนต่อไป

2.4 การศึกษาองค์ประกอบทางเคมี

2.4.1 การวิเคราะห์ปริมาณ คาร์โบไฮเดรต ไขมัน โปรตีน พลังงาน ความชื้น และใยอาหาร ตามวิธีการของ In-house Method TE-CH-042 [7] วิเคราะห์ปริมาณวิตามินอี อัลฟาโทโคฟีรอล (Vitamin E α -tocopherol) โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ High Performance Liquid Chromatography; HPLC [8]

2.4.2 การวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันทั้งหมด (Total Saturated Fatty Acid) กรดไขมันอิ่มตัว (Saturated Fatty Acid) กรดไขมันไม่อิ่มตัวหนึ่ง

ตำแหน่ง (Monounsaturated Fatty Acid) กรดไขมันไม่อิ่มตัวหลายตำแหน่ง (Polyunsaturated Fatty Acid) ปริมาณกรดไขมันชนิดโอเมกา-3 (Omega-3) โอเมกา-6 (Omega-6) และโอเมกา-9 (Omega-9) ตามวิธีการ In-house Method TE-CH-208 โดยเทคนิค Gas Chromatography; GC [7]

2.4.3 การวิเคราะห์ปริมาณกรดอะมิโนชนิดที่จำเป็นและกรดอะมิโนชนิดไม่จำเป็นตามวิธีการ In-house Method [7]

ทำการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ นำผลที่ได้มาวิเคราะห์แปรปรวนและเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี T-test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

2.5 คำนวณต้นทุนวัตถุดิบของผลิตภัณฑ์ฟามาการอง

ต้นทุนวัตถุดิบของผลิตภัณฑ์ฟามาการองคำนวณจากปริมาณของวัตถุดิบที่ใช้จริงในการผลิตต่อ 1 สูตรได้จากปริมาณวัตถุดิบแต่ละตัวที่ใช้คูณกับราคาวัตถุดิบต่อหน่วยหารด้วยปริมาณวัตถุดิบต่อหน่วย

$$\text{Material Cost (Bath)} = \frac{\text{Dosage (g)} \times \text{Price per Unit (bath)}}{\text{Quantity per Unit (g)}}$$

รายงานผลการคำนวณราคาต้นทุนวัตถุดิบต่อหน่วยรวมทั้งหมดและปริมาณร้อยละของต้นทุนที่ลดลงเปรียบเทียบสูตรควบคุมกับสูตรที่พัฒนาแล้ว

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 ผลการศึกษาปริมาณกากถั่วดาวอินคาที่ใช้ทดแทนถั่วอัลมอนต์ป่นในผลิตภัณฑ์ฟามาการอง

3.1.1 ผลการศึกษาคุณภาพทางกายภาพ

ผลการศึกษาคุณภาพทางกายภาพ พบว่าเมื่อทดแทนถั่วอัลมอนต์ป่นด้วยกากถั่วดาวอินคาในปริมาณที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า a^* มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ในขณะที่ค่า L^* มีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับสูตรควบคุม (ตารางที่ 2) โดยผลิตภัณฑ์

ฟามาการองที่มีปริมาณกากถั่วดาวอินคา มีลักษณะปรากฏของสีที่มีแนวโน้มที่เข้มขึ้นดังจะเห็นได้จากรูปที่ 1 โดยมีลักษณะเป็นสีน้ำตาล ทั้งนี้การเกิดสีน้ำตาลในผลิตภัณฑ์ฟามาการองนั้นมีผลมาจากการทำปฏิกิริยาของน้ำตาลรีดิวซ์กับกรดอะมิโนที่มีในกากถั่วดาวอินคาเมื่อได้รับความร้อนจากการอบ เป็นผลให้เกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Mallard Reaction) [9] จากผลการทดลองมีความคล้ายคลึงกันกับการศึกษาของ S. Manisa et al. [10] พบว่าการใช้กากถั่วอัลมอนต์ป่นทดแทนอัลมอนต์ป่นในผลิตภัณฑ์ฟามาการองส่งผลให้ค่า L^* ลดลง ค่า a^* มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ส่วนค่า b^* มีค่าแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) สำหรับผลการวิเคราะห์เนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ฟามาการองจากกากถั่วดาวอินคา พบว่า เมื่อทดแทนถั่วอัลมอนต์ป่นด้วยกากถั่วดาวอินคาในปริมาณที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความแข็ง ของผลิตภัณฑ์ฟามาการองทั้ง 3 สูตร มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อเทียบกับสูตรควบคุม (ตารางที่ 2) โดยมีค่าความแข็งที่ใกล้เคียงกัน ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากปริมาณไขมันในกากถั่วดาวอินคาที่มีน้อยกว่าถั่วอัลมอนต์ป่น โดยปกติไขมันที่พบในวัตถุดิบอาหารมีคุณสมบัติช่วยให้เนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์อาหารมีความนุ่มขึ้น การที่ผลิตภัณฑ์ฟามาการองจากกากถั่วดาวอินคา มีปริมาณไขมันน้อยกว่าทำให้โครงสร้างภายในยึดเกาะกันแน่นหนาขึ้น [11] ประกอบกับพบปริมาณใยอาหารในกากถั่วดาวอินคาในปริมาณสูง จากส่วนประกอบของเซลล์ลูโลสที่มีการจัดเรียงตัวทั้งแบบแนวเดียวกันและแนวสวนทางกัน จึงทำให้มีโครงสร้างที่ค่อนข้างแข็งแรง [9] เป็นผลให้ผลิตภัณฑ์ฟามาการองมีความแข็งเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ S.C. Young [12] พบว่าการใช้ผงแก่นตะวันส่งผลกระทบต่อคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของมาการองโดยด้านความแข็งของมาการองมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ส่วนค่าความกรอบมีค่าแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) เมื่อ

พิจารณาจากลักษณะภายนอกดังแสดงในรูปที่ 1 โดยเฉพาะจากโครงสร้างบริเวณด้านข้างของขอบผลิตภัณฑ์ฟามาการองซึ่งมีลักษณะยกตัวสูงขึ้นมัก

เรียกว่า ขามาการอง (Foot) และมีบริเวณผิวหน้าด้านบนที่เรียบเนียน ซึ่งเป็นลักษณะและคุณภาพที่ดี [1]

ตารางที่ 2 คุณภาพทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ฟามาการองที่ทดแทนถั่วอัลมอนด์ป่นด้วยกากถั่วดาวอินคา

กากถั่วดาวอินคา ร้อยละ	ค่าความแข็ง (N)	ค่าความกรอบ (mm) ^{ns}	ค่าสี		
			ค่า L*	ค่า a*	ค่า b* ^{ns}
0 (สูตรควบคุม)	797.52±50.95 ^c	8.03±0.02	75.69±0.78 ^a	5.56±0.02 ^b	22.29±0.07
40	817.64±51.60 ^c	8.13±0.05	71.64±0.56 ^b	5.62±0.05 ^b	22.65±0.98
60	833.15±44.57 ^b	8.29±0.06	70.25±0.64 ^c	5.77±0.18 ^{ab}	22.76±0.10
80	922.31±62.00 ^a	8.35±0.02	70.00±0.82 ^c	6.56±0.02 ^a	22.95±0.27

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันตามแนวตั้ง หมายถึง ค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)
ns หมายถึง ค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)



รูปที่ 1 ลักษณะภายนอกด้านบนและด้านข้างของผลิตภัณฑ์ฟามาการองที่ทดแทนถั่วอัลมอนด์ป่นด้วยกากถั่วดาวอินคา

3.2 ผลการศึกษาคุณภาพทางประสาทสัมผัส

ผลการศึกษาคุณภาพทางด้านประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ฟามาการองที่ทดแทนด้วยกากถั่วดาวอินคา โดยการทดสอบการยอมรับของผู้บริโภคในคุณลักษณะต่าง ๆ จากตารางที่ 3 พบว่าผลิตภัณฑ์ฟามาการองที่ทดแทนถั่วอัลมอนด์ป่นด้วยกากถั่วดาวอินคาในปริมาณที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้คะแนนความชอบในทุกคุณลักษณะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นที่ระดับร้อยละ 40 และร้อยละ 60 แต่ในขณะเดียวกันมีคะแนนความชอบลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อทดแทนไปที่ระดับร้อยละ 80 ทั้งนี้เนื่องจากกากถั่วดาวอินคามีกลิ่นเฉพาะตัวคือ กลิ่นถั่ว (Beany Odor) หรือ กลิ่นหญ้า

(Grassy Odor) โดยกลิ่นดังกล่าวเกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของกรดไขมันไม่อิ่มตัวจากการทำงานของเอนไซม์ไลพอกซิจีเนส (Lipoxygenase) [13], [14] ซึ่งลักษณะกลิ่นดังกล่าวเป็นกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์ส่งผลให้มีคะแนนความชอบลดลง โดยผลการศึกษาสอดคล้องกับงานวิจัยของ B. Athip and S. Napat [3] พบว่า การใช้ถั่วลิสงทดแทนถั่วอัลมอนด์ป่นในผลิตภัณฑ์ฟามาการองทำให้มีกลิ่นรสเฉพาะตัวจากถั่วลิสงในปริมาณมาก ส่งผลให้ผู้บริโภคแยกความแตกต่างของผลิตภัณฑ์ได้อย่างชัดเจน และงานวิจัยของ N. Chuaykarn et al. [5] รายงานว่าเมื่อใช้เมล็ดถั่วดาวอินคาป่นทดแทนถั่วอัลมอนด์ป่นในปริมาณที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้มีกลิ่นรสที่ไม่พึงประสงค์ทำให้

ผู้ทดสอบชิมไม่ยอมรับ แม้ว่าในการทดลองนี้จะนำกากถั่วดาวอินคาที่ผ่านกระบวนการบีบน้ำมันออกแล้วมาทดแทนในผลิตภัณฑ์ฝามาการองยังคงทำให้มีกลิ่นที่รับรู้ได้จากการทดสอบทางประสาทสัมผัส ดังนั้นผลิตภัณฑ์ฝามาการองที่ใช้กากถั่วดาวอินคาทดแทนที่ระดับร้อยละ 40 และร้อยละ 60 มีคะแนนการยอมรับทางประสาทสัมผัสไม่ต่างจากสูตรควบคุม (ร้อยละ 0) แต่

วัตถุประสงค์ในการวิจัยครั้งนี้ คือต้องการพัฒนาผลิตภัณฑ์ฝามาการองให้มีการทดแทนได้ในปริมาณมากที่สุดโดยมุ่งผลในแง่คุณค่าทางโภชนาการที่เพิ่มขึ้นอีกทั้งยังมีสัดส่วนต้นทุนลดลง จึงคัดเลือกผลิตภัณฑ์ฝามาการองสูตรที่ 2 คือการใช้กากถั่วดาวอินคาที่ระดับร้อยละ 60 ไปวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและคุณค่าทางโภชนาการในขั้นตอนต่อไป

ตารางที่ 3 คุณภาพทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ฝามาการองที่ทดแทนถั่วอัลมอนต์ป่นด้วยกากถั่วดาวอินคา

กากถั่วดาวอินคา ร้อยละ	คุณลักษณะ				
	สี	กลิ่นรส	รสชาติ	เนื้อสัมผัส	ความชอบโดยรวม
0 (สูตรควบคุม)	7.15±0.86 ^a	6.58±0.88 ^a	7.02±0.75 ^a	6.76±0.72 ^a	6.98±0.89 ^a
40	7.08±0.80 ^a	6.65±0.87 ^a	7.10±0.87 ^a	6.88±0.90 ^a	7.04±0.94 ^a
60	7.38±0.95 ^a	6.85±0.75 ^a	7.15±0.73 ^a	6.94±0.81 ^a	7.13±0.85 ^a
80	5.56±0.81 ^b	5.01±0.99 ^b	4.93±0.93 ^b	5.20±0.81 ^b	5.83±0.61 ^b

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันตามแนวตั้ง หมายถึง ค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

3.3 ผลการศึกษาปริมาณความชื้นและปริมาณน้ำอิสระ (a_w) ของผลิตภัณฑ์ฝามาการอง

เมื่อทดแทนถั่วอัลมอนต์ป่นด้วยกากถั่วดาวอินคาของผลิตภัณฑ์ฝามาการองในปริมาณที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความชื้นมีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) (ตารางที่ 4) เนื่องจากผลิตภัณฑ์ฝามาการองที่ทดแทนด้วยกากถั่วดาวอินคาได้ผ่านกระบวนการแปรรูปโดยการสกัดหรือบีบน้ำมันจึงเป็นผลให้มีปริมาณความชื้นของกากถั่วดาวอินคาน้อยกว่าถั่วอัลมอนต์ป่นเมื่อทดแทนในปริมาณที่เพิ่มขึ้นเป็นผลให้ปริมาณความชื้นลดลง ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ S.C. Young [12] พบว่าการเติมผงแกล่นตะวันทดแทนในผลิตภัณฑ์ฝามาการองเป็นผลให้ความชื้นมีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยปริมาณความชื้นเป็นไปตามข้อกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อาหารชุมชน (มผช. 118/2555) ซึ่งได้ระบุไว้ว่าผลิตภัณฑ์กลุ่มขนมอบประเภทคุกกี้ควรมีปริมาณความชื้นไม่เกินร้อยละ 7 โดยน้ำหนัก [15] ทั้งนี้ ปริมาณน้ำอิสระ (a_w) ของผลิตภัณฑ์

ฝามาการองที่ทดแทนกากถั่วดาวอินคาทั้ง 3 สูตร มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.40 - 0.46 เป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อาหารชุมชนซึ่งต้องมีปริมาณน้ำอิสระไม่เกิน 0.60 ซึ่งไม่สามารถทำให้เชื้อจุลินทรีย์สามารถเจริญเติบโตจนทำให้อาหารเน่าเสียได้

ตารางที่ 4 ความชื้นและน้ำอิสระของผลิตภัณฑ์ฝามาการองที่ทดแทนถั่วอัลมอนต์ป่นด้วยกากถั่วดาวอินคา

กากถั่วดาวอินคา ร้อยละ	ความชื้น (%)	น้ำอิสระ ^{ns} (a_w)
0 (สูตรควบคุม)	2.30±0.01 ^a	0.42±0.07
40	1.80±0.00 ^{ab}	0.41±0.02
60	1.62±0.00 ^b	0.42±0.05
80	1.49±0.03 ^b	0.41±0.03

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันตามแนวตั้ง หมายถึง ค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ns หมายถึง ค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

3.4 ผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์ฟามาการอง

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์ฟามาการองทั้ง 2 สูตร คือ สูตรที่ไม่ใช้กากถั่วดาวอินคาร้อยละ 0 และสูตรที่ทดแทนด้วยกากถั่วดาวอินคาที่ร้อยละ 60 จากตารางที่ 5 พบว่า เมื่อเปรียบเทียบผลิตภัณฑ์ฟามาการองทั้ง 2 สูตร ปริมาณโปรตีน เถ้า และใยอาหาร ของผลิตภัณฑ์ฟามาการองสูตรที่ใช้กากถั่วดาวอินคาร้อยละ 60 มีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เนื่องจากกากถั่วอินคามีปริมาณโปรตีน ใยอาหาร และแร่ธาตุต่าง ๆ ในปริมาณสูง [16] ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ R. Kultida et al. [17] พบว่า เมื่อทดแทนแป้งสาลีด้วยกากถั่วดาวอินคาในขนมตุเล (Tuiles) เป็นผลให้มีปริมาณโปรตีนเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เมื่อนำมาทดแทนถั่วอัลมอนต์ป่นเป็นผลให้ผลิตภัณฑ์ฟามาการองมีปริมาณสารอาหารดังกล่าวเพิ่มขึ้น ในขณะที่วิตามินอีและไขมันมีปริมาณลดลง จึงทำให้ผลิตภัณฑ์ฟามาการองมีปริมาณพลังงานส่วนหนึ่งมาจากแหล่งของไขมันมีปริมาณลดลง

อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เนื่องจากกากถั่วดาวอินคาที่นำมาใช้พัฒนาผลิตภัณฑ์ฟามาการองในครั้งนี้ได้ผ่านการสกัดน้ำมันออกไปทำให้มีน้ำมันคงเหลือ (Oil Residue) อยู่ในปริมาณน้อย ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาก่อนหน้านี้ของ S. Rawdkean et al. [16] ได้ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของกากถั่วดาวอินคา พบว่ามีปริมาณไขมันอยู่ร้อยละ 4.13 และจากรายงานของ L. A. Follegatti-Romero et al. [18] พบว่า มีปริมาณน้ำมันคงเหลือในกากถั่วดาวอินคาที่ผ่านกระบวนการสกัดไขมันเพียงร้อยละ 7.2 จึงมีปริมาณไขมันอยู่น้อยและเมื่อเปรียบเทียบกับรายงานของ S. Manisa et al. [10] พบว่า ไขมันในถั่วอัลมอนต์ป่นมีปริมาณไขมันประมาณร้อยละ 54.53 จะเห็นได้ว่ากากถั่วดาวอินคามีปริมาณไขมันน้อยกว่าถั่วอัลมอนต์ป่น จึงเป็นผลให้องค์ประกอบดังกล่าวสูญเสียไป เมื่อนำกากถั่วดาวอินคา มาทดแทนอัลมอนต์ป่นจึงส่งผลให้ปริมาณไขมันและวิตามินอีในผลิตภัณฑ์ฟามาการองมีปริมาณลดลง ทั้งนี้ ปริมาณความชื้น คาร์โบไฮเดรต ของผลิตภัณฑ์ฟามาการองทั้ง 2 สูตรมีปริมาณแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

ตารางที่ 5 องค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์ฟามาการองที่ทดแทนถั่วอัลมอนต์ป่นด้วยกากถั่วดาวอินคา

องค์ประกอบทางเคมี	กากถั่วดาวอินคาร้อยละ 0	กากถั่วดาวอินคาร้อยละ 60
ความชื้น (Moisture) ^{ns}	5.71±0.03	5.74±0.02
โปรตีน (Protein)	9.42±0.02 ^b	12.69±0.06 ^a
ไขมัน (Fat)	11.34±0.04 ^a	7.28±0.04 ^b
เถ้า (Ash)	1.02±0.02 ^b	1.49±0.09 ^a
คาร์โบไฮเดรต (Carbohydrate) ^{ns}	72.51±0.04	72.80±0.07
พลังงาน (Kcal/100g)	429.78±0.37 ^a	407.48±0.13 ^b
เส้นใย (Fiber)	1.20±0.07 ^b	1.91±0.05 ^a
วิตามินอี อัลฟาโทโคเฟอรอล (Vitamin E α -Tocopherol)	3.51±0.03 ^a	2.07±0.04 ^b

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันตามแนวนอน หมายถึง ค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ns หมายถึง ค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

3.5 ผลการศึกษาปริมาณกรดไขมันของผลิตภัณฑ์ฟามาการอง

ผลการศึกษาองค์ประกอบของกรดไขมันในผลิตภัณฑ์ฟามาการองทั้ง 2 สูตร (ตารางที่ 6) พบว่า

ผลิตภัณฑ์ฟามาการองที่ทดแทนด้วยกากถั่วดาวอินคาที่ร้อยละ 60 มีปริมาณองค์ประกอบของกรดไขมันทุกชนิดน้อยกว่าผลิตภัณฑ์ฟามาการองสูตรที่ไม่ใช้กากถั่วดาวอินคา (ร้อยละ 0) อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยพบ

กรดไขมันไม่อิ่มตัว กรดไขมันไม่อิ่มตัวหนึ่งตำแหน่ง กรดไขมันไม่อิ่มตัวหลายตำแหน่ง กรดไขมันชนิดโอเมกา-6 และกรดไขมันโอเมกา-9 ในปริมาณน้อยกว่าประมาณ 1.4 - 1.6 เท่า และไม่พบปริมาณกรดไขมันโอเมกา-3 ในผลิตภัณฑ์ฟามาการองทั้ง 2 สูตร การพบกรดไขมันในปริมาณลดลงนั้น อาจเป็นผลมาจากการนำเมล็ดถั่วดาวอินคาที่ผ่านการบีบหรือสกัดน้ำมันออก จึงทำให้องค์ประกอบของกรดไขมันสูญเสียออกไปจากกระบวนการดังกล่าว โดยจากรายงานการวิจัยของ S. Rawdkuen et al. [16] ได้รายงานผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของกรดไขมันโดยเปรียบเทียบระหว่างกากเมล็ดชาและกากถั่วอินคา พบว่า กากถั่วดาวอินคา มีปริมาณกรดไขมันอิ่มตัว 0.59 และกรดไขมันไม่อิ่มตัว

5.68 น้อยกว่ากากเมล็ดชาซึ่งมีปริมาณ 1.57 และ 9.67 ตามลำดับ ยกเว้นกรดไขมันไม่อิ่มตัวหลายตำแหน่งซึ่งมีปริมาณมากกว่าโดยมีค่าเฉลี่ย 5.11 และ 1.33 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับการศึกษาของ P. Anamaria et al. [19] พบว่า การใช้กากถั่ววอลนัททดแทนถั่วอัลมอนต์ในการอบเป็นผลให้มีส่วนของกรดไขมันอิ่มตัว กรดไขมันไม่อิ่มตัว และกรดไขมันชนิดโอเมกา-3 และ โอเมกา-6 ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า การพัฒนาผลิตภัณฑ์ฟามาการองที่ใช้กากถั่วดาวอินคา มีปริมาณกรดไขมันที่จำเป็น ซึ่งมีประโยชน์กับร่างกาย และมีประโยชน์เชิงสุขภาพโดยเฉพาะการลดความเสี่ยงในการเกิดโรคหลอดเลือดหัวใจและโรคเรื้อรังชนิดต่าง ๆ [20]

ตารางที่ 6 ปริมาณกรดไขมันของผลิตภัณฑ์ฟามาการองที่ทดแทนถั่วอัลมอนต์ป่นด้วยกากถั่วดาวอินคา

องค์ประกอบ (g/100g)	กากถั่วดาวอินคาร้อยละ 0	กากถั่วดาวอินคาร้อยละ 60
ปริมาณกรดไขมันทั้งหมด (Total saturated fatty acid)	0.87 ± 0.05^a	0.59 ± 0.06^b
ปริมาณกรดไขมันไม่อิ่มตัว (Total unsaturated fatty acid)	9.93 ± 0.04^a	6.36 ± 0.15^b
กรดไขมันไม่อิ่มตัวเชิงเดี่ยว (Monounsaturated fatty acid)	7.62 ± 0.09^a	4.74 ± 0.07^b
กรดไขมันไม่อิ่มตัวเชิงซ้อน (Polyunsaturated fatty acid)	2.31 ± 0.05^a	1.62 ± 0.08^b
กรดไขมันโอเมกา-3 (Omega-3)	ND	ND
กรดไขมันโอเมกา-6 (Omega-6)	2.31 ± 0.02^a	1.44 ± 0.07^b
กรดไขมันโอเมกา-9 (Omega-9)	7.54 ± 0.04^a	4.67 ± 0.08^b

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันตามแนวนอน หมายถึง ค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ND หมายถึง ตรวจไม่พบ

3.6 ผลการศึกษาปริมาณกรดอะมิโนของผลิตภัณฑ์ฟามาการอง

ผลการศึกษาองค์ประกอบของกรดอะมิโนในผลิตภัณฑ์ฟามาการองทั้ง 2 สูตร (ตารางที่ 7) พบว่า เมื่อทดแทนถั่วอัลมอนต์ป่นด้วยกากถั่วดาวอินคาที่ร้อยละ 60 ในผลิตภัณฑ์ฟามาการอง ส่งผลให้มีปริมาณกรดอะมิโนชนิดที่จำเป็นทั้ง 9 ชนิด โดยพบ โกลซีน ในปริมาณมากที่สุด ตามด้วย ลูซีน ฟีนิลอะลานีน วาลีน ไอโซลิวซีน เมไทโอนีน ทรีโอนีน ทริптоเฟน และฮีสติดีน

ตามลำดับ และยังพบปริมาณกรดอะมิโนชนิดไม่จำเป็น คือ ไทโรซีน โกลซีน เซรีน โพรลีน และซิสตีน สูงกว่าผลิตภัณฑ์ฟามาการองที่ไม่ใช้กากถั่วดาวอินคา (ร้อยละ 0) อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ซึ่งพบในปริมาณสูงกว่าประมาณ 1 เท่า ส่วนปริมาณกรดอะมิโนชนิดที่ไม่จำเป็นชนิดอื่นได้แก่ อาร์จินีน กรดกลูตามิก กรดแอสพาร์ติก ซีสเตอีน มีปริมาณลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ซึ่งพบในปริมาณน้อยกว่าประมาณ 1 เท่าเช่นเดียวกัน ซึ่งสอดคล้องกับรายงานการศึกษาที่มีการนำเสนอโดย

S. Rawdkean et al. [16] ได้มีการศึกษาปริมาณกรดอะมิโนของกากถั่วดาวอินคา พบว่า ไลซีนเป็นกรดอะมิโนที่มีปริมาณมากที่สุด (17789.00 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง) และกรดอะมิโนชนิดที่จำเป็นอีก 8 ชนิด ซึ่งมีปริมาณเฉลี่ยตั้งแต่ 9334 - 624.21 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง และกรดอะมิโนชนิดไม่จำเป็น 1288 - 10025 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง ทั้งนี้ปริมาณกลูตามีนและอะลานีน มีค่าแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) และผลิตภัณฑ์ฟามาการองทั้ง 2 สูตร ไม่พบแอสพาราจีน ซึ่ง C. Raiz et al. [21] รายงานว่า เมล็ดของถั่วอินคามีกรดอะมิโนจำเป็นทุกตัว

ที่เพียงพอต่อความต้องการของร่างกาย ตามคำแนะนำขององค์การอนามัยโลก (FAO/WHO) จากผลการทดลอง เห็นได้ว่าการนำกากถั่วอินคาซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้จากกระบวนการสกัดน้ำมันมาประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์ฟามาการอง ทำให้มีประโยชน์ในเชิงคุณค่าทางโภชนาการ สามารถเป็นผลิตภัณฑ์อาหารว่างทางเลือกสำหรับผู้บริโภคที่ใส่ใจในสุขภาพโดยเฉพาะกลุ่มเป้าหมายที่ต้องการปริมาณโปรตีนและกรดอะมิโนที่ชนิดจำเป็นซึ่งร่างกายไม่สามารถสังเคราะห์เองได้ จำเป็นต้องได้รับจากอาหารเพิ่มเติมเท่านั้น

ตารางที่ 7 ปริมาณกรดอะมิโนของผลิตภัณฑ์ฟามาการองที่ทดแทนถั่วอัลมอนต์ป่นด้วยกากถั่วดาวอินคา

องค์ประกอบ (mg/100g)	กากถั่วดาวอินคาร้อยละ 0	กากถั่วดาวอินคาร้อยละ 60
กรดอะมิโนชนิดจำเป็น (Essential amino acid)		
ฮิสติดีน (Histidine)	170.60±6.22 ^b	210.00±5.60 ^a
ไอโซลิวซีน (Isoleucine)	310.00±2.12 ^b	411.80±7.71 ^a
ลูซีน (Leucine)	440.00±1.41 ^b	560.00±9.76 ^a
ไลซีน (Lysine)	540.50±4.95 ^b	640.75±6.43 ^a
เมไทโอนีน (Methionine)	370.00±2.83 ^b	410.25±8.13 ^a
ฟีนิลอะลานีน (Phenylalanine)	500.25±3.18 ^b	540.10±7.91 ^a
ทรีโอนีน (Threonine)	280.00±7.07 ^b	370.12±6.54 ^a
วาลีน (Valine)	450.50±3.53 ^b	540.73±8.73 ^a
ทริптоเฟน (Tryptophan)	180.55±1.34 ^b	240.40±8.41 ^a
กรดอะมิโนชนิดไม่จำเป็น (Nonessential amino acid)		
อะลานีน (Alanine) ^{ns}	380.25±3.18	380.25±3.18
อาร์จินีน (Arginine)	1750.50±12.02 ^a	1390.88±20.75 ^b
กรดแอสพาร์ติก (Aspartic acid)	1120.00±15.55 ^a	881.20±14.50 ^b
ซิสทีน (Cystine)	420.00±5.66 ^b	460.83±8.31 ^a
กรดกลูตามิก (Glutamic acid)	1170.00± 8.38 ^a	970.70±16.05 ^b
ไกลซีน (Glycine)	317.00±4.24 ^b	520.00±4.60 ^a
โพรลีน (Proline)	300.00±5.66 ^b	410.40±6.51 ^a
เซรีน (Serine)	391.00±4.24 ^b	510.68±6.61 ^a
ไทโรซีน (Tyrosine)	440.50±9.19 ^b	539.75±8.76 ^a
แอสพาราจีน (Asparagine)	ND	ND
ซิสเทอีน (Cysteine)	423.50±7.78 ^a	129.60±8.63 ^b
กลูตามีน (Glutamine) ^{ns}	640.00±5.66	630.18±7.81

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันตามแนวนอน หมายถึง ค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq 0.05$) ns หมายถึง ค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ND หมายถึง ตรวจไม่พบ

3.7 ผลการคำนวณต้นทุนวัตถุดิบของผลิตภัณฑ์ฝามาการองทั้ง 2 สูตร

ผลการคำนวณต้นทุนการผลิตผลิตภัณฑ์ฝามาการองสูตรควบคุม (ร้อยละ 0) และผลิตภัณฑ์ฝามาการองสูตรที่ทดแทนด้วยกากถั่วดาวอินคา (ร้อยละ 60) โดยอ้างอิงราคาต้นทุน ณ เดือนมีนาคม 2564 พบว่าราคาต้นทุนวัตถุดิบในการผลิตผลิตภัณฑ์ฝามาการองสูตรควบคุม มีราคาต้นทุนประมาณ 40 บาทต่อสูตร และสูตรที่พัฒนาแล้ว พบว่า มีราคาต้นทุนประมาณ 34 บาท ดังนั้น เมื่อเปรียบเทียบราคาต้นทุนวัตถุดิบของผลิตภัณฑ์ฝามาการองที่พัฒนาแล้วทำให้มีราคาต้นทุนลดลงจากสูตรควบคุมคิดเป็นร้อยละ 15 ทั้งนี้ สามารถผลิตฝามาการองต่อ 1 สูตรได้จำนวน 30 ชิ้น ซึ่งมีน้ำหนักต่อชิ้นเท่ากับ 3 กรัม เมื่อพิจารณาจากราคาต้นทุนวัตถุดิบซึ่งต่ำกว่าสูตรที่จำหน่ายทั่วไปในท้องตลาด อีกทั้งผลิตภัณฑ์ฝามาการองที่ทดแทนด้วยกากถั่วอินคาปริมาณของโปรตีนและกรดอะมิโนที่จำเป็นจึงเป็นแนวทางในการผลิตเพื่อจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ได้

4. สรุป

การใช้กากถั่วดาวอินคาทดแทนถั่วอัลมอนต์ป่นที่ระดับร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก เป็นปริมาณที่มีความเหมาะสมในการทดแทนถั่วอัลมอนต์ป่นในผลิตภัณฑ์ฝามาการอง โดยมีคุณภาพทางประสาทสัมผัสอยู่ในเกณฑ์ชอบปานกลาง ทั้งนี้การใช้กากถั่วดาวอินคาในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ส่งผลต่อคุณภาพทางกายภาพ โดยค่า L^* (ความสว่าง) และปริมาณความชื้นมีค่าลดลง ในขณะที่ค่า a^* (ค่าสีแดง) ค่าความแข็ง (Hardness) มีค่าเพิ่มขึ้น แต่ไม่ส่งผลต่อค่าความกรอบ (Fracturability) ค่าสีเหลือง (b^*) และปริมาณน้ำอิสระ (a^*) เมื่อเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ฝามาการองสูตรที่ไม่ใช้กากถั่วดาวอินคา ข้อมูลเชิงโภชนาการของผลิตภัณฑ์ฝามาการองที่พัฒนาในครั้งนี้ มีคุณประโยชน์ ซึ่งยังคงพบปริมาณสารอาหารที่เป็นประโยชน์แก่ร่างกาย โดยเฉพาะปริมาณโปรตีน

และกรดอะมิโนที่จำเป็นทั้ง 9 ชนิดสูงกว่าผลิตภัณฑ์ฝามาการองสูตรปกติประมาณ 1 เท่า อีกทั้งยังมีสัดส่วนของราคาต้นทุนวัตถุดิบต่อสูตรลดลง

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ที่สนับสนุนงบประมาณในการทำวิจัยจากเงินรายได้ประจำปีงบประมาณ 2563 ขอขอบคุณนางสาวจิตรา บุญฤทธิ์ นางสาวนริศา บัวกิ่ง และนายณนทร์ศักดิ์ พึ่งโพธิ์สพ ผู้ช่วยนักวิจัย ตลอดจนบุคลากรและนักศึกษาหลักสูตรสาขาวิชาอาหารและโภชนาการ สาขาเกษตรกรรมศาสตร์ ทุกคนที่มีส่วนช่วยให้งานวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วง

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Wu, "Optimizing sugar ratios for macaroon taste and structure," *Food Science*, vol. 1, pp. 1-12, 2012.
- [2] P. Chunkamol and K. Vassana, "Development of almond powder substitute macaron from cashew nut powder," *Srinakharinwirot University, Journal of Science and Technology*, vol. 10, no.19, pp. 14-30, 2018.
- [3] B. Athip and S. Napat, "Processing of egg white pastries (macaroon) by using peanut and cashew nut powder as almond powder replacement," *Dusit Thani College Journal*, vol. 12, no. 2, pp. 182-192, 2018.
- [4] G. Sethuraman, N. M. M. Nizar, F. N. Muhamad, P. J. Gregory, E. Jahanshiri and S. Azam-Ali, "Nutrition composition of sachinchi (*Plukenetia Volubilis* L.)," *International Journal of Research and Scientific Innovation*, vol. 7, no. 9, pp. 271-277, 2020.

- [5] N. Chuaykarn, S. Pruettiwilai and W. Bureepukdee, "The application of legumes using in macaroon product," *Agricultural Science Journal (supplement)*, vol. 50, no. 2, pp. 1-4, 2019.
- [6] K. Tanisorn, "Product development of macarons from sachu inchi (*Plukenetia Volubilis* L.)," M.H.E. thesis, Dept. Food. Nutr., RMUTP Univ., Bangkok, Thailand, 2018.
- [7] AOAC, Official Methods of Analysis of AOAC International, 21st ed. USA: Gaithersburg, MD. 2019.
- [8] G. Charalambous, "Chromatographic analysis of food and beverages," in *Proceedings of a Symposium on the Analysis of Foods and Beverages by HPLC*, U.S.A., 1979, pp. 1-12.
- [9] R. Nithiya, "Carbohydrate," in *Food chemistry*, 5th ed. Bangkok, Thailand: Odeon Store Publisher, pp. 137-188, 2014.
- [10] S. Manisa, T. Taweesak and S. Nongnuch, "Preparation and application of dried almond residue for substitution of almond flour in macaron," *Thai Science and Technology Journal*, vol. 28, no. 9, pp. 1572-1584, 2020.
- [11] E. Bakkalbasi, R. R. Meral and I. S. Dogan, "Bioactive compounds physical and sensory properties of cake made with walnut press-cake," *Journal of Food Quality*, vol. 38, no. 6, pp. 422-430, 2015.
- [12] S. C. Young, "The quality characteristics of macaroon added with *Helianthus Tuberosus* L. powder," *Culinary Science & Hospitality Research*, vol. 23, no. 1, pp. 28-36, 2017.
- [13] T. G. Kudre and S. Benjakul, "Effects of binary organic solvents and heating on lipid removal and the reduction of beany odour in Bambara groundnut (*Vigna subterranean*) flour," *Food Chemistry*, vol. 141, no. 1, pp. 517-523, 2013.
- [14] Y. Wichamanee, C. Sirima and K. Nisanart, "Effect of roasting conditions on beany odor retention and chemical properties of sachu inchi flour," *The journal of KMUTNB*, vol. 29, no. 1, pp. 135-144, 2019.
- [15] *Thai Community Product Standard*, 118, 2012.
- [16] S. Rawdkuen, D. Murdayanti, S. Ketnawa and S. Phongthai, "Chemical properties and nutritional factors of pressed-cake from tea and sachu inchi seeds," *Food Bioscience*, vol. 15, pp. 64-71, 2016.
- [17] R. Kultida, H. Chatrapa and S. Promluck, "Effect of sachu inchi pressed-cake (*Plukenetia volubilis* L.) on the physical chemical and sensory properties of tuiles," *Chiang Mai University Journal of Natural Sciences*, vol. 20, no. 2, pp. 1-10, 2021.
- [18] L. A. Follegatti-Romero, C. R. Piantino, R. Grimaldi and F. A. Cabral, "Supercritical CO₂ extraction of omega-3 rich oil from sachu inchi (*Plukenetia volubilis* L.) seeds," *Journal of Supercritical Fluids*, vol. 49, pp. 323-329, 2009.
- [19] P. Anamaria, A. Paucean, S. Ancut, S. Ersilia, A. Simona, M. Maria, S. Liana, P. Luliana, B. Adina and M. Sevastita, "Quality characteristics and volatile profile of

- macarons modified with walnut oilcake by-product,” *Molecules*, vol. 25, no. 2214, pp. 1-19, 2020.
- [20] P. C. Calder, “Functional roles of fatty acids and their effects on human health,” *Journal of Parenteral and Enteral Nutrition*, vol. 39, no. 1, pp. 18-32, 2015.
- [21] C. Ruiz, C. Diaz, J. Anaya and R. Rojas, “Proximate analysis, antinutrients, fatty acids and amino acids profiles of seeds and cakes from 2 species of sacha inchi (*Plukenetia volubilis* y *Plukenetia huayllabambana*),” *Revista de la Sociedad Química del Perú*, vol. 79, no. 1, pp. 29-36, 2013.

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

ผลของแซนแทนกัมและกัวร์กัมต่อคุณภาพของเม็ดไข่มุกจากการใช้แป้งข้าวกล้องงอกและแป้งข้าวเหนียวด่างอกทดแทนแป้งมันสำปะหลัง

ดวงรัตน์ สนนาค¹ รวิศรา ชื่นประไพ¹ ดวงกมล แสงธีรกิจ² และ ปาริสุทธิ์ เฉลิมชัยวัฒน์^{1*}

¹ สาขาอาหารและโภชนาการ ภาควิชาคหกรรมศาสตร์ คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

² สาขาวิชาการจัดการอาหาร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม

¹ 50 ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

² 85 ถนนมาลัยแมน อำเภอเมือง จังหวัดนครปฐม 73000

รับบทความ 18 พฤษภาคม 2564 แก้ไขบทความ 6 ธันวาคม 2564 ตอรับบทความ 29 ธันวาคม 2564

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์เม็ดไข่มุกด้วยการใช้แป้งข้าวกล้องงอกและแป้งข้าวเหนียวด่างอก โดยมีสูตรพื้นฐานการผลิตเม็ดไข่มุกจากแป้งมันสำปะหลังล้วน ออกแบบการทดลองแบบผสม (Mixture Design) เพื่อศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการผลิตเม็ดไข่มุก จาก 3 ตัวแปร ได้แก่ แป้งมันสำปะหลัง (ร้อยละ 45-85) แป้งข้าวกล้องงอก (ร้อยละ 5-35) และแป้งข้าวเหนียวด่างอก (ร้อยละ 10-50) ต่อคุณภาพทางกายภาพ และประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ ผลการทดลองพบว่าปริมาณแป้งมันสำปะหลังที่ลดลง ส่งผลให้ค่าความสว่าง ค่าความแข็ง และค่าความเหนียวของเม็ดไข่มุกลดลง ปริมาณแป้งข้าวกล้องงอกที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ผลค่าความแข็ง และค่าความเหนียวลดลง ในขณะที่การเพิ่มขึ้นของปริมาณแป้งข้าวเหนียวด่างอกในเม็ดไข่มุกส่งผลให้ค่าความแข็ง และค่าความเหนียวสูงกว่าเม็ดไข่มุกที่ผลิตด้วยแป้งข้าวกล้องงอก เม็ดไข่มุกที่ผลิตจากแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 85 แป้งข้าวกล้องงอกร้อยละ 5 และแป้งข้าวเหนียวด่างอกร้อยละ 10 มีคะแนนความชอบใกล้เคียงสูตรพื้นฐานมากที่สุด จากนั้นศึกษาปริมาณแซนแทนกัมต่อกัวร์กัมที่ 0:1, 1:0, 0.75:0.25, 0.25:0.75 และ 0.5:0.5 โดยมีสูตรที่ไม่ใส่แซนแทนกัมและกัวร์กัมเป็นสูตรควบคุม พบว่าการใส่แซนแทนกัมและกัวร์กัมส่งผลให้ค่าความสว่าง ค่าความเป็นสีเหลือง ค่าความแข็ง และค่าความเหนียวของเม็ดไข่มุกเพิ่มขึ้น ปริมาณแซนแทนกัมต่อกัวร์กัมที่ดีที่สุดคือ ร้อยละ 0.25:0.75 เนื่องจากช่วยปรับปรุงคุณภาพเนื้อสัมผัสและได้รับคะแนนความชอบสูงสุด เม็ดไข่มุกที่พัฒนาได้มีปริมาณความชื้น คาร์โบไฮเดรต ไขมัน โปรตีน เถ้า และเส้นใยหยาบเท่ากับร้อยละ 71.58, 99.51, 0.20, 0.11, 0.18 และ 0.0029 ตามลำดับ ค่าพลังงานทั้งหมดเท่ากับ 173.08 กิโลแคลอรี ต่อ 1 เสิร์ฟ (43 กรัม)

คำสำคัญ : เม็ดไข่มุก; แป้งข้าวกล้องงอก; แป้งข้าวเหนียวด่างอก; แซนแทนกัม; กัวร์กัม

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

Effect of Xanthan Gum and Guar Gum on the Qualities of Boba from Germinated Brown Rice Flour and Germinated Black Glutinous Rice Flour Substituted Cassava Flour

Tuangrat Sonnak¹ Rawisara Chuenprapai¹ Duangkamon Sangteerakij² and Parisut Chalermchaiwat^{1*}

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

² Food management program, Faculty of Science and Technology, Nakhon Pathom Rajabhat University

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

² 85 Malaiman Road, Muang, Nakhon Pathom 73000

Received 18 May 2021; Revised 6 December 2021; Accepted 29 December 2021

Abstract

The aim of this research was to develop boba products by using germinated brown rice flour and germinated black glutinous rice flour. The basic formula of boba is made with cassava flour. Mixture design was used to optimize the formula of the boba production from three variables: cassava flour (45-85%), germinated brown rice flour (5-35%), and germinated black glutinous rice flour (10-50%) on the physical and sensory qualities of the product. The results showed that decreasing cassava flour content decreased the lightness, hardness and gumminess of boba. Increasing of germinated brown rice flour decreased the hardness and gumminess of boba. An increasing in amount of germinated black glutinous rice flour in boba resulted in higher values of hardness and stickiness than boba with germinated rice flour. Boba made with 85% cassava flour, 5 % germinated brown rice flour and 10% black germinated glutinous rice flour had liking score closest to the basic formula. The effects of the xanthan gum to guar gum ratio at 0:1, 1:0, 0.75:0.25, 0.25:0.75 and 0.5:0.5 on the physical and sensory qualities of the product were investigated. The formula without xanthan gum and guar gum served as control. Results showed that, compared to the control, the addition of xanthan gum and guar gum increased lightness, yellowness, hardness and gumminess. The most desirable level of xanthan-guar gum was at 0.25:0.74%, as it improved textural quality and had the highest liking score of the boba. The developed boba had moisture, carbohydrates, fats, proteins, ash and crude fibers which were 71.58, 99.51, 0.20, 0.11, 0.18 and 0.0029, respectively. The energy value determined by Bomb calorimeter which was 173.08 kcal per 1 serving (43 g).

Keywords : Boba; Germinated Brown Rice Flour; Black Germinated Glutinous Rice Flour; Xanthan Gum; Guar Gum

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

1. บทนำ

ขานมไข่มุก เป็นเครื่องดื่มที่มีต้นกำเนิดจากประเทศไต้หวัน [1] ตัวเม็ดไข่มุกผลิตมาจากแป้งมันสำปะหลังผสมกับน้ำร้อน สีของเม็ดไข่มุกจะมีความแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับวัตถุดิบที่ใช้ เช่น สีเหลืองทองที่ได้มาจากน้ำตาลทรายแดง หรือสีดำที่ได้มาจากน้ำตาลทรายแดงผสมกับผงโกโก้ คาราเมล หรือสีผสมอาหาร [2] ผลวิจัยของบริษัท Allied Analytics เปิดเผยมูลค่าตลาดขานมไข่มุกทั่วโลกอยู่ที่ 65,000 ล้านบาท และคาดว่าจะเติบโตถึง 1 แสนล้านบาทภายในปีพ.ศ. 2566 [3] ข้อมูลของ Grab food ในปี พ.ศ. 2561 รายงานว่าประเทศไทยเป็นประเทศที่มีการบริโภคขานมไข่มุกมากที่สุดในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ โดยบริโภคเฉลี่ยเดือนละ 6 แก้วต่อคน [4] และอาจเป็นเครื่องดื่มที่สามารถบริโภคได้ทุกวันในอนาคต ด้วยปริมาณการบริโภคที่มากเกินไปจนก่อให้เกิดปัญหาสุขภาพ เช่น โรคอ้วน โรคเบาหวาน โรคหัวใจ และโรคไต [5]

ปัจจุบันมีการพัฒนาขานมไข่มุกเพื่อเป็นทางเลือกให้กับผู้บริโภคที่รักสุขภาพมากขึ้น เช่น การพัฒนาผลิตภัณฑ์ขานมไข่มุกที่มีค่าดัชนีน้ำตาลต่ำ [6] การพัฒนาเม็ดไข่มุกจากมันม่วงกิ่งสำเร็จรูป [7] และการพัฒนาเม็ดไข่มุกจากแป้งข้าวเจ้า [2] เป็นต้น ซึ่งหนึ่งในวัตถุดิบแป้งที่น่าสนใจของไทยที่นิยมนำมาใช้มากขึ้นก็คือแป้งข้าวกล้องงอก

แป้งข้าวกล้องงอก สามารถผลิตได้จากข้าวกล้องทั้งจากข้าวเจ้าและข้าวเหนียว โดยการนำข้าวกล้องไปแช่น้ำเพื่อให้เกิดกระบวนการงอกของรากยาว 1-2 มิลลิเมตร [8] ข้าวกล้องที่ผ่านกระบวนการงอกจะมีสารสำคัญ ชื่อ กาบยา (Gamma Aminobutyric Acid; GABA) ที่ทำหน้าที่ช่วยบำรุงสมอง ป้องกันการเกิดโรคอัลไซเมอร์ ลดความดันโลหิต แก้ไขอาการนอนไม่หลับ และป้องกันเส้นเลือดในสมองแตกได้ [9]

ในการบริโภคเม็ดไข่มุก ลักษณะเนื้อสัมผัสที่ผู้บริโภคยอมรับก็คือ เหนียว นุ่ม หนึบ และเคี้ยวเพลิน [10] แต่การนำแป้งข้าวกล้องงอกมาทดแทนแป้งมันสำปะหลังอาจส่งผลให้เนื้อสัมผัสของเม็ดไข่มุกเปลี่ยนแปลงไปด้วย ซึ่งจากงานวิจัย พบว่า สารไฮโดรคอลลอยด์ ได้แก่ แขนแทนกัม และกัวร์กัม สามารถช่วยปรับปรุงเนื้อสัมผัสของเม็ดไข่มุกให้ดีขึ้นได้ [11] เนื่องจากแขนแทนกัม และกัวร์กัมมีคุณสมบัติเป็นสารเพิ่มความข้นหนืด ช่วยเพิ่มความคงตัวให้กับอาหาร [12] เมื่อใช้ร่วมกันจะยิ่งช่วยเพิ่มความหนืดให้กับผลิตภัณฑ์อาหารได้ [13] ซึ่งในปัจจุบัน พบว่า มีหลายงานวิจัยที่นำสารไฮโดรคอลลอยด์มาใช้ปรับปรุงเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ เช่น งานวิจัยของจิตรา [14] ที่ศึกษาการพัฒนาผลิตภัณฑ์ขนมปังเพื่อสุขภาพจากแป้งแกลนเตวัน และการเติมแขนแทนกัม งานวิจัยของกรรณิการ์และพนารัตน์ [15] ที่ศึกษาผลของกัวร์กัมต่อคุณภาพของวาฟเฟิลชนิดกรอบปราศจากกลูเตนจากแป้งมันเทศสีม่วง และงานวิจัยของพงศ์พิพัฒน์และกมลวรรณ [16] ที่ศึกษาผลของจิงหรีดผง โปรตีนถั่วเหลืองสกัด และแขนแทนกัมที่มีต่อคุณภาพคุกกี้แป้งข้าวเจ้า เป็นต้น

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการนำแป้งข้าวกล้องงอกและแป้งข้าวเหนียวต่างออกมาทดแทนแป้งมันสำปะหลังในการพัฒนาเม็ดไข่มุก และปรับปรุงเนื้อสัมผัสให้เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค และสร้างความหลากหลายให้กับผลิตภัณฑ์เม็ดไข่มุก เพื่อเป็นอีกหนึ่งทางเลือกสำหรับคนที่รักสุขภาพ

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 วัตถุดิบและการผลิตเม็ดไข่มุก

2.1.1 วัตถุดิบ

แป้งมันสำปะหลังตราปลามังกร น้ำตาลทรายแดงตราวังขนาย น้ำเชื่อมตรามิตรผล แขนแทนกัม และกัวร์กัมจากบริษัทกรุงเทพเคมี จำกัด แป้งข้าวกล้องงอกและแป้งข้าวเหนียวต่างอกได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทเมดิฟูดส์ (ประเทศไทย) จำกัด

2.1.2 ขั้นตอนการผลิตเม็ดไข่มุกสูตรพื้นฐาน

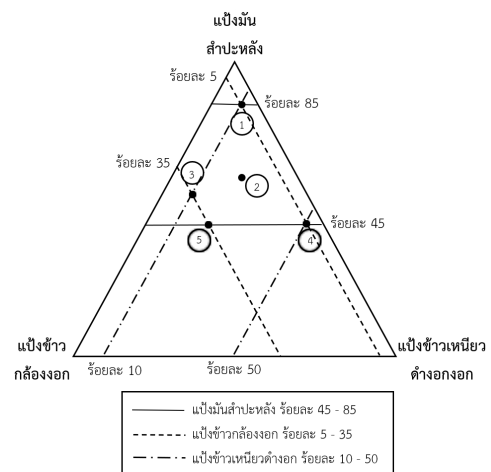
สูตรพื้นฐานเม็ดไข่มุกได้จากแป้งมันสำปะหลัง ล้วน ตัดแปลงมาจากการวิจัยของบุศราภาและคณะ [2] โดยนำน้ำตาลทรายแดง 15 กรัมผสมในน้ำเปล่า 43 กรัมและนำมาละลายที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส จากนั้นเทผสมลงในแป้งมันสำปะหลัง 60 กรัม แล้วนวดให้เป็นก้อนเดียวกันภายใน 3 นาที นำพิมพ์ทองเหลือง กดบัวลอยขนาด 2.5 นิ้ว กดลงบนก้อนแป้งจนเต็มช่อง นำออกมาจากพิมพ์ วัดความยาวของแป้งให้ได้ 4 มิลลิเมตร แล้วปั้นเป็นก้อนกลม จะได้ขนาดเม็ดไข่มุกที่มีความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ที่ 6 มิลลิเมตร นำไข่มุก ลงต้มในน้ำเดือดอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จนเม็ด ไข่มุกลอยน้ำแล้วจับเวลา 20 นาที จากนั้นปิดไฟพร้อม ปิดฝาหม้ออีก 20 นาที นำเม็ดไข่มุกมาล้างผ่านน้ำแล้ว แช่ในน้ำเชื่อมปริมาณ 10 กรัม

2.2 การศึกษาการทดแทนแป้งมันสำปะหลัง ด้วยแป้งข้าวกล้องงอกและแป้งข้าวเหนียวดำ อกต่อคุณภาพทางกายภาพและประสาท สัมผัสของเม็ดไข่มุก

ศึกษาปริมาณการทดแทนแป้งมันสำปะหลังด้วย แป้งข้าวกล้องงอกและแป้งข้าวเหนียวดำออกต่อคุณภาพ ของเม็ดไข่มุก โดยมีปริมาณน้ำ และน้ำตาลคงที่ตาม วิธีการผลิต ข้อ 2.1.2 วางแผนการทดลองแบบผสม (Mixture Design) และกำหนดปัจจัยที่ทำการศึกษ แบบกำหนดช่วง (Constrained Simplex Lattice Mixture Design) โดยมีช่วงปัจจัยที่ศึกษา ดังนี้ แป้งมัน สำปะหลังร้อยละ 45-85 แป้งข้าวกล้องงอกร้อยละ 5- 35 และแป้งข้าวเหนียวดำอกร้อยละ 10-50 ได้ทั้งหมด 6 สิ่งทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 1 ภาพ Mixture Design แสดงการซ้อนทับกันดังแสดงในรูปที่ 1 โดยมี เม็ดไข่มุกที่ผลิตจากแป้งมันสำปะหลังล้วนเป็นสูตร พื้นฐาน

ตารางที่ 1 สิ่งทดลองที่มีปริมาณของแป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวกล้องงอก และแป้งข้าวเหนียวดำออกที่แตกต่างกัน

สิ่ง ทดลอง	แป้งมัน สำปะหลัง (ร้อยละ)	แป้งข้าว กล้องงอก (ร้อยละ)	แป้งข้าว เหนียวดำออก (ร้อยละ)
1	85	5	10
2	65	20	15
3	55	35	10
4	45	5	50
5	45	35	20



รูปที่ 1 Mixture Design แสดงการทับซ้อนกันของ ปริมาณแป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวกล้องงอก และแป้ง ข้าวเหนียวดำออกที่แตกต่างกัน

2.2.1 คุณภาพทางกายภาพ

นำเม็ดไข่มุกมาวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพ ดังนี้

2.2.1.1 วัดค่าสี ในระบบ CIE Lab โดยใช้เครื่อง Hunter Lab รุ่น ColorFlex โดยค่าสี L* (ค่าความสว่าง มีค่า 0-100 โดย 0 หมายถึง วัตถุที่มีความมืดสนิทสีดำ และค่า 100 หมายถึง วัตถุที่มีความสว่างมีสีขาว) ค่าสี a* (+ หมายถึง วัตถุที่มีสีแดง, - หมายถึง วัตถุที่มีสีเขียว) ค่าสี b* (+ หมายถึง วัตถุที่มีสีเหลือง, - หมายถึง วัตถุที่มีสีน้ำเงิน) วัดตัวอย่างละ 3 ซ้ำ

2.2.1.2 วัดค่าเนื้อสัมผัส โดยใช้เครื่อง Texture Analyzer ยี่ห้อ Stable Micro Systems รุ่น TA.XT plus ประเทศอังกฤษ วัดแบบ Texture Profile Analysis (TPA) ใช้หัววัด Cylinder Probe P/50 ภายใต้สภาวะการวัด ดังนี้ Pre-test Speed 1.00 มิลลิเมตรต่อวินาที Post-test Speed 5.00 มิลลิเมตรต่อวินาที Test Speed 5.00 มิลลิเมตรต่อวินาที Trigger Force 5 กรัม และ Strain ร้อยละ 75 รายงานผลเป็นค่าความแข็ง (Hardness) ค่าการติดฟัน (Adhesiveness) ค่าความยืดหยุ่น (Springiness) ค่าความเหนียว (Gumminess) และค่าความทนทานต่อการเคี้ยว (Chewiness)

2.2.2 การประเมินทางประสาทสัมผัส

ทำการประเมินทางประสาทสัมผัสด้วยวิธีการให้คะแนนความชอบแบบ 9-point Hedonic Scale ทดสอบชิมเม็ดไข่มุกพร้อมกับขนม ประเมินความชอบในคุณลักษณะด้านสี กลิ่นรส ความนุ่ม ความเหนียว รสชาติ และความชอบโดยรวม โดยใช้ผู้ทดสอบที่ไม่ได้ผ่านการฝึกฝนจำนวน 50 คน

2.3 การศึกษาอิทธิพลการใช้แซนแทนกัมและกัวร์กัมต่อคุณภาพของเม็ดไข่มุก

นำสูตรที่ได้รับค่าเฉลี่ยคะแนนความชอบมากที่สุดจากข้อที่ 2.2 มาศึกษาปริมาณแซนแทนกัมและกัวร์กัม โดยวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design, CRD) ศึกษาอัตราส่วนของแซนแทนกัมต่อกัวร์กัมทั้งหมด 5 ระดับ คือ 0 : 1 , 1 : 0 , 0.5 : 0.5 , 0.75 : 0.25 และ 0.25 : 0.75 ของปริมาณแป้งทั้งหมด โดยผสมลงไปพร้อมกับแป้ง มีปริมาณน้ำและน้ำตาลคงที่ตามวิธีการผลิต ข้อ 2.1.2 แล้วนำมาวิเคราะห์คุณลักษณะทางกายภาพและประเมินการยอมรับทางประสาทสัมผัสตามวิธีการข้อ 2.2.1 และ 2.2.2

2.4 การศึกษาคุณภาพทางเคมีของผลิตภัณฑ์เม็ดไข่มุกที่พัฒนาได้เปรียบเทียบกับสูตรพื้นฐาน

นำสูตรเม็ดไข่มุกที่ได้รับค่าเฉลี่ยคะแนนความชอบมากที่สุดจากข้อ 2.3 มาวิเคราะห์คุณภาพทางเคมี ดังนี้

2.4.1 วัดปริมาณความชื้น ปริมาณเถ้า ปริมาณโปรตีน ปริมาณไขมัน ปริมาณเส้นใยหยาบ และปริมาณคาร์โบไฮเดรต ตามวิธีการของ AOAC [17] วัดตัวอย่างละ 3 ซ้ำ

2.4.2 วัดค่าพลังงานสะสม โดยใช้เครื่อง Bomb Calorimeter ยี่ห้อ PARR รุ่น 6100 ประเทศสหรัฐอเมริกา รายงานเป็นหน่วยกิโลแคลอรี วัดตัวอย่างละ 3 ซ้ำ

2.5 ศึกษาต้นทุนการผลิตเม็ดไข่มุก

คำนวณต้นทุนการผลิตของเม็ดไข่มุกต่อ 1 เสิร์ฟ โดยไม่รวมค่าไฟฟ้า ค่าแรงงาน ค่าเสื่อมสภาพของอุปกรณ์ และค่าเสียหุ้ย ตามวิธีการของอินทราและคณะ [18]

2.6 วิเคราะห์ผลทางสถิติ

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

3. ผลและวิจารณ์การทดลอง

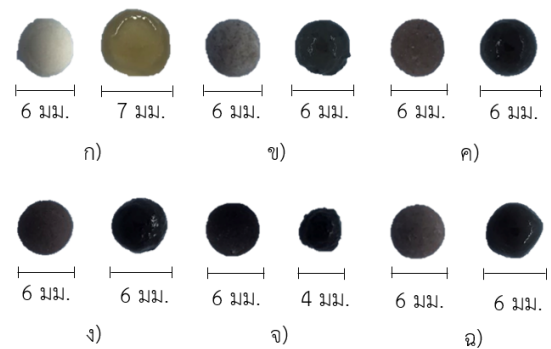
3.1 ผลการศึกษาการทดแทนแป้งมันสำปะหลังด้วยข้าวกล้องงอกและแป้งข้าวเหนียวต่างออกต่อคุณภาพของเม็ดไข่มุก

ลักษณะของเม็ดไข่มุกที่ได้จากการทดแทนแป้งมันสำปะหลัง แสดงดังรูปที่ 2 พบว่า เม็ดไข่มุกก่อนต้มมี

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตรเท่ากันทุกสูตร แต่หลังจากต้ม พบว่า เม็ดไข่มุกสูตรที่ 2 ก) ซึ่งเป็นสูตรแป้งมันสำปะหลังล้วน มีขนาดเพิ่มขึ้น 1 มิลลิเมตร เกิดจากโครงสร้างร่างแหของเม็ดแป้งมันสำปะหลังที่ไม่แข็งแรงมาก เนื่องจากมีปริมาณอะไมโลเพกตินสูงถึง ร้อยละ 81 [19] ทำให้เม็ดแป้งเกิดการพองตัวได้ดีในระหว่างกระบวนการต้ม ในขณะที่แป้งข้าวมีโครงสร้างร่างแหที่มีความแข็งแรงมากกว่าแป้งมันสำปะหลัง เนื่องจากมีปริมาณอะไมโลเพกตินน้อยกว่า (ร้อยละ 0.59) [20] ทำให้ในระหว่างกระบวนการต้ม แป้งจะเกิดการพองตัวน้อยกว่าแป้งมันสำปะหลัง [20] และเม็ดไข่มุกสูตรที่ 2 จ) เป็นสูตรที่มีปริมาณแป้งข้าวเหนียวต่างออกมากที่สุด พบว่า มีเส้นผ่านศูนย์กลางหลังต้มลดลงเหลือ 4 มิลลิเมตร อาจมีสาเหตุมาจากแป้งข้าวเหนียวต่างออกมีปริมาณอะไมโลเพกตินเป็นส่วนใหญ่ ถูกทำลายได้ง่ายเมื่อโดนความร้อน [2] ส่งผลให้แป้งบางส่วนหลุดหายไป ในระหว่างกระบวนการต้ม นอกจากนั้นโครงสร้างของแป้งมีผลต่อคุณสมบัติการบวมในขั้นตอนการต้ม แป้งจากข้าวมีโครงสร้างผลึกแบบ A มีการจัดเรียงตัวของพันธะที่หนาแน่น และปริมาณพันธะไฮโดรเจนสูง จึงมีระดับการบวมและการละลายต่ำ ส่วนแป้งจากมันสำปะหลังมีโครงสร้างผลึกทั้งแบบ A และแบบ C ปริมาณพันธะไฮโดรเจนน้อยกว่า มีกำลังการบวมและการละลายสูงกว่า [21], [22]

การวัดค่าสีของผลิตภัณฑ์เม็ดไข่มุก ดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่า เม็ดไข่มุกสูตรที่ 4 ก่อนต้ม ที่มีสัดส่วนของแป้งข้าวเหนียวต่างออกมากที่สุด มีค่าความเป็นสีแดง (a^*) สูงที่สุด ในขณะที่ค่าความสว่าง (L^*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) มีค่าต่ำที่สุด อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) เนื่องจากสีของแป้งข้าวเหนียวต่างออกมีสีม่วงดำจากรงควัตถุของสารแอนโทไซยานิน [23] ทำให้เมื่อใส่ในปริมาณมาก สีของเม็ดไข่มุกจะเปลี่ยนแปลงไป สอดคล้องกับงานวิจัยของปัทมิตาและคณะ [24] ที่ศึกษาการพัฒนาขนมเทียนจากแป้งข้าวเหนียวดำสดใส่ัญพืชและพืชหัวสีม่วงที่พบว่า เมื่อมีสัดส่วนแป้งข้าว

เหนียวต่ำมาก ก็ส่งผลให้ค่าความเป็นสีแดง (a^*) เพิ่มขึ้น และค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) ลดลงเช่นเดียวกัน



รูปที่ 2 ผลิตภัณฑ์เม็ดไข่มุกจากแป้งข้าวกล้องงอก และแป้งข้าวเหนียวต่างออกก่อนต้ม (ซ้าย) และหลังต้ม (ขวา) ที่มีสัดส่วนแตกต่างกัน ก) สูตรพื้นฐาน ข) สูตรทดลองที่ 1 ค) สูตรทดลองที่ 2 ง) สูตรทดลองที่ 3 จ) สูตรทดลองที่ 4 และ ฉ) สูตรทดลองที่ 5

ในส่วนของเม็ดไข่มุกหลังต้ม พบว่า เม็ดไข่มุกทุกสูตรมีค่าความสว่าง (L^*) ค่าความเป็นสีแดง (a^*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) น้อยกว่าสูตรพื้นฐานอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยในระหว่างกระบวนการต้ม โมเลกุลของน้ำจะเข้าไปแทรกซึมในเม็ดแป้งทำให้เมื่อเม็ดแป้งสุกจะมีความใสขึ้น [13] แต่เนื่องจากสูตรพื้นฐานผลิตจากแป้งมันสำปะหลังล้วนทำให้เม็ดไข่มุกที่สุกแล้วมีความใสสว่างกว่าสูตรอื่นที่มีแป้งข้าวกล้องงอกและแป้งข้าวเหนียวต่างออกเป็นส่วนผสม ผลการวัดค่าเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์เม็ดไข่มุก ดังแสดงในตารางที่ 3 พบว่า เม็ดไข่มุกสูตรพื้นฐานมีค่าความแข็ง (Hardness) สูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อพิจารณาค่าการติดฟัน (Adhesiveness) ค่าความยืดหยุ่น (Springiness) ค่าความเหนียว (Gumminess) และค่าความทนทานต่อการเคี้ยว (Chewiness) พบว่า เม็ดไข่มุกสูตรที่ 5 มีค่าน้อยที่สุด เนื่องจากสูตรนี้มีสัดส่วนของแป้งข้าวกล้องงอกใกล้เคียงกับแป้งมันสำปะหลัง เมื่อแป้งข้าวกล้องงอกผ่านกระบวนการงอกจะทำให้แป้งมีความหนืดลดลง สาเหตุมาจากการทำงานของเอนไซม์

อะไมเลสที่ไปทำการย่อยคาร์โบไฮเดรตให้มีโมเลกุลเล็กลง [25] ทำให้เม็ดไข่มุกมีเนื้อสัมผัสนุ่มและมากกว่าเม็ดไข่มุกที่ทำจากแป้งมันสำปะหลังล้วน นอกจากนี้ในแป้งข้าวมีสลายอะไมเลสสั้นกว่าแป้งมันสำปะหลัง เมื่อเกิดเจลจะทำให้แป้งเกิดรีโทรเกรเดชันได้เร็วกว่า และเจลแป้งมี

ความสามารถในการอุ้มน้ำได้น้อยกว่า [26] ส่งผลให้เนื้อสัมผัสของเม็ดไข่มุกมีความนุ่มเหนียว และติดฟันน้อยลง ในขณะที่เม็ดไข่มุกสูตรที่ 1 นั้นมีค่าเนื้อสัมผัสใกล้เคียงกับสูตรพื้นฐานมากที่สุด เนื่องจากมีปริมาณแป้งมันสำปะหลังมากที่สูตรนั่นเอง

ตารางที่ 2 ค่าสีของเม็ดไข่มุกที่มีปริมาณแป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวกล้องงอก และแป้งข้าวเหนียวต่างอกที่แตกต่างกัน

สิ่งทดลอง	ค่าความสว่าง (L*)		ค่าความเป็นสีแดง (a*)		ค่าความเป็นสีเหลือง (b*)	
	ก่อนต้ม	หลังต้ม	ก่อนต้ม	หลังต้ม	ก่อนต้ม	หลังต้ม
สูตรพื้นฐาน	49.89±0.04 ^a	34.87±0.27 ^a	2.64±0.04 ^d	3.50±0.07 ^a	15.67±0.10 ^a	16.78±0.27 ^a
1	29.37±0.07 ^b	18.48±0.10 ^e	2.42±0.21 ^d	-0.35±0.22 ^c	4.99±0.15 ^b	-0.21±0.12 ^c
2	20.84±0.20 ^d	21.23±0.11 ^d	4.25±0.21 ^c	0.01±0.21 ^c	3.46±0.56 ^c	-0.33±0.40 ^c
3	23.56±0.10 ^c	25.16±0.11 ^b	4.19±0.26 ^c	-0.08±0.23 ^c	5.37±0.51 ^b	1.53±0.40 ^b
4	6.50±0.19 ^f	13.72±0.85 ^f	7.25±0.31 ^a	1.31±0.27 ^b	0.21±0.49 ^e	-1.01±0.28 ^d
5	19.47±0.02 ^e	24.36±0.14 ^c	4.61±0.14 ^b	1.54±0.22 ^b	2.60±0.03 ^d	-0.08±0.21 ^c

หมายเหตุ a-f คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในแนวตั้งเดียวกัน ที่มีตัวอักษรต่างกัน มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ 3 ค่าเนื้อสัมผัสของเม็ดไข่มุกที่มีปริมาณแป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวกล้องงอก และแป้งข้าวเหนียวต่างอกที่แตกต่างกัน

สิ่งทดลอง	ค่าความแข็ง	ค่าการติดฟัน	ค่าความยืดหยุ่น	ค่าความเหนียว	ค่าความทนทานต่อการเคี้ยว
สูตรพื้นฐาน	468.18±19.39 ^a	-0.93±0.74 ^a	0.93±0.03 ^{ab}	371.79±12.97 ^a	346.60±18.34 ^a
1	400.99±13.98 ^b	-1.07±0.47 ^a	0.97±0.05 ^a	274.85±9.42 ^b	266.47±17.43 ^b
2	259.92±20.93 ^d	-1.28±0.66 ^{ab}	0.89±0.49 ^b	151.30±11.30 ^e	135.05±12.72 ^e
3	313.18±19.15 ^c	-1.17±0.60 ^{ab}	0.90±0.04 ^b	178.09±13.17 ^d	159.83±16.48 ^d
4	402.44±49.65 ^b	-1.74±0.81 ^{ab}	0.82±0.09 ^c	238.20±30.47 ^c	195.71±31.90 ^c
5	293.54±18.85 ^c	-2.03±0.73 ^b	0.69±0.04 ^d	127.97±8.83 ^f	88.40±8.52 ^f

หมายเหตุ a-f คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในแนวตั้งเดียวกัน ที่มีตัวอักษรต่างกัน มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ผลการยอมรับทางประสาทสัมผัส ดังแสดงในตารางที่ 4 พบว่า เม็ดไข่มุกที่มีการทดแทนด้วยแป้งข้าวกล้องงอกและแป้งข้าวเหนียวต่างอกมีค่าเฉลี่ยคะแนนความชอบทุกด้านน้อยกว่าสูตรที่มีแป้งมันสำปะหลังเพียงอย่างเดียวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) จาก

ผลการทดลองเห็นได้ชัดเจนว่า การทดแทนแป้งมันสำปะหลังด้วยแป้งข้าวกล้องงอกและแป้งข้าวเหนียวต่างอกในปริมาณมาก (สูตรที่ 4 และ 5) ส่งผลให้ค่าเฉลี่ยคะแนนความชอบด้านกลิ่นรส และรสชาติมีคะแนนน้อยที่สุด เนื่องจากแป้งข้าวกล้องงอกและแป้ง

ข้าวเหนียวต่างอวกมิกลิ้นรสที่เฉพาะตัว เมื่อใช้ในปริมาณมากทำให้กลิ่นรสของเม้ดไข่มุกแรงขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของสุนันและจตุรงค์ [9] ที่รายงานว่ากระบวนการงอกของข้าวจะส่งผลให้เกิดกลิ่นหมักที่ไม่พึงประสงค์ จึงส่งผลให้ค่าเฉลี่ยคะแนนความชอบด้านกลิ่นรสและรสชาติน้อยลง ค่าเฉลี่ยคะแนนความชอบด้านความนุ่ม และความเหนียวของเม้ดไข่มุกมีค่าลดลงตามปริมาณของแป้งมันสำปะหลังที่ลดลงด้วย เนื่องจาก

เม้ดไข่มุกที่ทำจากแป้งมันสำปะหลังมีอัตราการละลายน้ำและการบวมน้ำสูงกว่าแป้งข้าว การต้มทำให้โมเลกุลของน้ำจะเข้ามาจับกับหมู่ไฮดรอกซิลที่อยู่อย่างอิสระ เม้ดแป้งจึงเกิดการบวมน้ำ เมื่อแป้งเกิดการเจลาติไนซ์ ลักษณะเนื้อสัมผัสของแป้งข้าวจะมีความนุ่ม และหนึ่ก แต่แป้งมันสำปะหลังจะมีลักษณะเหนียวและยืดหยุ่นได้ ซึ่งเป็นคุณลักษณะของเม้ดไข่มุก [19]

ตารางที่ 4 ผลการประเมินการยอมรับด้านประสาทสัมผัสของเม้ดไข่มุกที่มีปริมาณแป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวกล้องงอก และแป้งข้าวเหนียวต่างอวกที่แตกต่างกัน

สิ่งทดลอง	สี	กลิ่นรส	ความนุ่ม	ความเหนียว	รสชาติ	ความชอบโดยรวม
สูตรพื้นฐาน	7.66±0.92 ^a	7.20±1.11 ^a	7.86±0.97 ^a	7.98±1.08 ^a	7.62±1.07 ^a	7.93±0.77 ^a
1	7.18±0.87 ^b	6.58±1.47 ^b	6.96±1.60 ^b	7.22±1.31 ^b	6.94±1.52 ^b	7.12±1.36 ^b
2	6.90±1.58 ^{bc}	5.90±1.18 ^b	6.34±1.53 ^c	5.98±1.57 ^c	6.64±1.56 ^b	6.86±1.21 ^b
3	6.74±1.26 ^{cd}	6.24±1.42 ^{bc}	5.96±1.51 ^c	5.72±1.57 ^c	5.90±1.61 ^c	6.18±1.45 ^d
4	6.64±1.16 ^{cd}	4.52±1.54 ^{cd}	5.02±1.44 ^d	4.68±1.28 ^d	5.50±1.39 ^{cd}	5.40±1.23 ^e
5	6.42±1.42 ^d	5.50±1.49 ^d	4.98±1.27 ^d	4.58±1.27 ^d	5.36±1.52 ^d	5.28±1.34 ^d

หมายเหตุ a-e คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในแนวตั้งเดียวกัน ที่มีตัวอักษรต่างกัน มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสูตรที่ 1 มีค่าเฉลี่ยคะแนนความชอบในทุกคุณลักษณะ อีกทั้งยังมีคุณภาพทางกายภาพ ได้แก่ ค่าเนื้อสัมผัส ดังแสดงในตารางที่ 3 ใกล้เคียงกับสูตรพื้นฐานมากที่สุด นอกจากนี้ยังมีข้อเสนอแนะจากผู้ทดสอบกล่าวว่าตัวอย่างเม้ดไข่มุกที่ชิม มีเนื้อสัมผัสที่นุ่มและเหนียวไม่เหมือนเม้ดไข่มุกทางการค้าทั่วไป ดังนั้น จึงคัดเลือกสูตรที่ 1 เพื่อใช้เป็นสูตรควบคุมในการปรับปรุงเนื้อสัมผัสด้วยการใช้ไฮโดรคอลลอยด์ ได้แก่ แขนแทนกัมและกัวร์กัม เพื่อให้มีเนื้อสัมผัสใกล้เคียงกับไข่มุกทางการค้าต่อไป

3.2 ผลการศึกษาอิทธิพลการใช้แขนแทนกัมและกัวร์กัมต่อคุณภาพของเม้ดไข่มุก

ผลการวัดค่าสีของผลิตภัณฑ์เม้ดไข่มุก ดังแสดงในตารางที่ 5 พบว่า สูตรที่มีแขนแทนกัมและกัวร์

กัมเพียงอย่างเดียวทั้งก่อนต้มและหลังต้มมีค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) มากกว่าสูตรควบคุม (0 : 0) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เนื่องจากสีของแขนแทนกัมและกัวร์กัมมีสีขาวนวลและสีเหลืองตามลำดับ ในขณะที่ค่าความสว่าง (L^*) หลังจากต้มมีค่าลดลง สอดคล้องกับงานวิจัยของจิตรา [13] ที่ศึกษาการใช้แขนแทนกัมในเส้นก๋วยจั๊บลายงานว่า เมื่อเติมแขนแทนกัม ทำให้ค่าความสว่าง (L^*) หลังจากต้มเส้นก๋วยจั๊บลดลง เมื่อเส้นผ่านการทำให้สุก โมเลกุลของน้ำจะเข้าไปแทรกในเม้ดแป้ง ทำให้เกิดเจลที่มีความสว่างลดลง อาจเกิดจากการที่แขนแทนกัมมีสีขาวนวล ในขณะที่ค่าความเป็นสีแดง (a^*) หลังต้มไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) ผลการวัดค่าเนื้อสัมผัสของเม้ดไข่มุก ดังแสดงในตารางที่ 6 พบว่า สูตรที่ใส่แขนแทนกัมและกัวร์กัมส่งผลให้มีค่าความแข็ง (Hardness) และค่าความเหนียว

(Gumminess) มากกว่าสูตรควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) อาจเกิดจากโมเลกุลของไฮโดรคอลลอยด์เข้าไปแทรกอยู่ในแป้งและสามารถเกิดอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลในโครงสร้าง [27] ปริมาณแซนแทนกัมที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ค่าความแข็งและความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์เพิ่มมากขึ้น [28] ทำให้ค่าความแข็ง (Hardness) และค่าความเหนียว (Gumminess) มีค่าเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับผลงานวิจัยของกรณิการ์และ

พนารัตน์ [15] ที่ศึกษาการใช้กัวร์กัมในผลิตภัณฑ์วาฟเฟิลชนิดกรอบ พบว่า เมื่อปริมาณกัวร์กัมเพิ่มขึ้น มีผลทำให้ค่าความแข็ง (Hardness) เพิ่มขึ้นด้วย แต่เมื่อเปรียบเทียบระหว่างสูตรที่ใส่แซนแทนกัมกับกัวร์กัมพบว่า สูตรที่มีแซนแทนกัมมากกว่ากัวร์กัม ได้แก่ สูตรแซนแทนกัมต่อกัวร์กัมร้อยละ 1:0 และ 0.75:0.25 มีค่าความแข็ง (Hardness) มากกว่าสูตรแซนแทนกัมต่อกัวร์กัมร้อยละ 0:1 และ 0.25:0.75

ตารางที่ 5 ค่าสี่ของเม็ดไข่มุกที่เติมแซนแทนกัมและกัวร์กัมในปริมาณที่แตกต่างกัน

แซนแทนกัมต่อกัวร์กัม	ค่าความสว่าง (L*)		ค่าความเป็นสีแดง (a*)		ค่าความเป็นสีเหลือง (b*)	
	ก่อนต้ม	หลังต้ม	ก่อนต้ม	หลังต้ม ^{ns}	ก่อนต้ม	หลังต้ม
0 : 0 (สูตรควบคุม)	27.98±0.04 ^f	6.51±0.18 ^d	3.20±0.09 ^b	-0.88±1.05	6.03±0.08 ^b	-0.58±1.98 ^b
0 : 1	28.58±0.05 ^c	7.29±0.21 ^c	3.70±0.21 ^a	-1.41±1.30	6.68±0.22 ^a	1.14±0.70 ^{ab}
1 : 0	29.81±0.17 ^b	5.28±0.24 ^f	3.50±0.13 ^{ab}	-1.55±0.68	6.84±0.10 ^a	1.68±0.66 ^a
0.5 : 0.5	28.22±0.02 ^d	5.98±0.12 ^e	3.80±0.08 ^a	-1.45±0.19	6.72±0.09 ^a	0.86±0.36 ^{ab}
0.75 : 0.25	28.70±0.03 ^c	9.01±0.19 ^b	3.60±0.07 ^a	-1.47±0.63	7.00±0.07 ^a	1.97±0.58 ^{ab}
0.25 : 0.75	32.06±0.06 ^a	9.97±0.51 ^a	3.18±0.36 ^b	-0.94±0.29	6.70±0.30 ^a	1.31±0.30 ^a

หมายเหตุ a-f คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในแนวตั้งเดียวกัน ที่มีตัวอักษรต่างกัน มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ns คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในแนวตั้ง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

ผลการศึกษาค่าความเหนียว (Gumminess) และค่าความทนทานต่อการเคี้ยว (Chewiness) พบว่า สูตรที่ใส่แซนแทนกัมและกัวร์กัมในปริมาณที่เท่ากันมีค่ามากที่สุด เนื่องจากเมื่อใช้แซนแทนกัมคู่กับกัวร์กัมทำให้เกิดสารละลายที่มีความหนืดสูง [13] จึงทำให้เม็ดไข่มุก

สูตรแซนแทนกัมต่อกัวร์กัมร้อยละ 0.5 : 0.5 มีลักษณะเหนียวและทนต่อการเคี้ยวที่สุด ในส่วนของค่าความยืดหยุ่น (Springiness) พบว่าไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$)

ตารางที่ 6 ค่าเนื้อสัมผัสของเม็ดไข่มุกที่เติมแซนแทนกัมและกัวร์กัมในปริมาณที่แตกต่างกัน

แซนแทนกัมต่อกัวร์กัม (ร้อยละ)	ค่าความแข็ง	ค่าการติดฟัน	ค่าความยืดหยุ่น ^{ns}	ค่าความเหนียว	ค่าความทนทานต่อการเคี้ยว
0 : 0 (สูตรควบคุม)	407.84±51.31 ^d	-1.50±1.31 ^{ab}	0.95±0.06	303.76±50.07 ^c	289.15±58.96 ^b
0 : 1	472.59±54.44 ^c	-0.96±0.53 ^a	0.94±0.04	339.87±43.43 ^b	320.02±48.13 ^b
1 : 0	538.19±55.11 ^b	-1.32±0.57 ^a	0.94±0.06	344.43±36.11 ^b	313.55±52.49 ^b
0.5 : 0.5	596.46±51.61 ^a	-1.40±1.22 ^a	0.94±0.04	393.60±36.08 ^a	369.17±46.59 ^a
0.75 : 0.25	518.77±18.73 ^b	-3.31±1.35 ^c	0.98±0.02	322.28±18.30 ^{bc}	289.89±20.11 ^b
0.25 : 0.75	472.43±26.83 ^c	-2.60±1.52 ^{bc}	0.94±0.05	321.38±21.21 ^{bc}	306.41±29.28 ^b

หมายเหตุ a-d คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในแนวตั้งเดียวกัน ที่มีตัวอักษรต่างกัน มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ns คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในแนวตั้ง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

ตารางที่ 7 ผลการประเมินการยอมรับด้านประสาทสัมผัสของเม็ดไข่มุกที่เติมแซนแทนกัมและกัวร์กัมในปริมาณที่ต่างกัน

แซนแทนกัมต่อกัวร์กัม (ร้อยละ)	สี ^{ns}	กลิ่นรส ^{ns}	ความนุ่ม	ความเหนียว	รสชาติ	ความชอบโดยรวม
0 : 0 (สูตรควบคุม)	7.80±1.47	7.68±1.27	7.54±1.46 ^b	6.70±1.49 ^c	7.50±1.52 ^c	7.24±1.42 ^c
0 : 1	7.70±1.64	7.68±1.33	7.50±1.42 ^b	6.90±1.62 ^{bc}	7.38±1.64 ^c	7.34±1.38 ^{bc}
1 : 0	7.80±1.50	7.78±1.33	7.66±1.84 ^{ab}	7.06±1.97 ^{abc}	6.58±1.83 ^c	7.47±1.65 ^{abc}
0.5 : 0.5	7.80±1.53	7.92±1.16	6.04±1.07 ^c	7.60±1.44 ^a	8.00±1.28 ^{ab}	7.88±1.38 ^a
0.75 : 0.25	7.82±1.59	7.92±1.28	7.98±1.13 ^a	7.28±1.39 ^{ab}	7.78±1.50 ^{bc}	7.80±1.03 ^a
0.25 : 0.75	7.72±1.59	7.86±1.57	7.80±1.47 ^{ab}	7.06±1.87 ^{abc}	8.32±1.35 ^a	7.72±1.54 ^{ab}

หมายเหตุ a-c คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในแนวตั้งเดียวกัน ที่มีตัวอักษรต่างกัน มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ns คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในแนวตั้ง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

ตารางที่ 8 คุณภาพทางเคมีของเม็ดไข่มุกสูตรพื้นฐานและสูตรที่พัฒนาได้

การวิเคราะห์คุณภาพทางเคมี	สูตรพื้นฐาน	สูตรที่พัฒนาได้
ความชื้น ^{ns} (ร้อยละความชื้นฐานเปียก)	74.86±0.41	71.58±1.56
คาร์โบไฮเดรต ^{ns} (ร้อยละความชื้นฐานแห้ง)	99.79	99.51
ไขมัน ^{ns} (ร้อยละความชื้นฐานแห้ง)	0.14±0.01	0.20±0.07
โปรตีน (ร้อยละความชื้นฐานแห้ง)	0.02±0.01 ^b	0.11±0.02 ^a
เถ้า ^{ns} (ร้อยละความชื้นฐานแห้ง)	0.05±0.01	0.18±0.09
เส้นใยหยาบ (ร้อยละความชื้นฐานแห้ง)	0.0006±0.00 ^b	0.0029±0.00 ^a
พลังงาน ^{ns} (กิโลแคลอรี ต่อ 1 หน่วยบริโภค)	173.54±1.39	173.11±3.52

หมายเหตุ a-b คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในแนวนอนเดียวกัน ที่มีตัวอักษรต่างกัน มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ns คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในแนวนอน ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

ผลการยอมรับทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์เม็ดไข่มุก ดังแสดงในตารางที่ 7 พบว่า การใส่แซนแทนกัมและกัวร์กัมไม่ได้ส่งผลต่อค่าเฉลี่ยคะแนนความชอบด้านสีและกลิ่นรส แต่มีผลต่อค่าเฉลี่ยคะแนนความชอบด้านความนุ่ม ความเหนียว รสชาติ และความชอบโดยรวม การใส่แซนแทนกัม (1 : 0) หรือกัวร์กัม (0 : 1) เพียงอย่างเดียวให้ผลไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ในด้านความนุ่ม ความเหนียว รสชาติ และความชอบโดยรวมกับสูตรควบคุม แต่เมื่อนำแซนแทนกัมและกัวร์กัมมาผสมกันในอัตราส่วน 0.75 : 0.25 และ 0.25 : 0.75 ทำให้ค่าเฉลี่ยคะแนนความชอบด้านเนื้อสัมผัสดังกล่าวสูงขึ้น โดยสูตรที่ใช้แซนแทนกัมต่อกัวร์กัมร้อยละ 0.25 : 0.75 ได้รับค่าเฉลี่ยคะแนนความชอบในด้านรสชาติสูงที่สุด โดยมี

ค่าเฉลี่ยคะแนนความชอบในทุกคุณลักษณะอยู่ในระดับชอบปานกลางถึงชอบมาก เมื่อสังเกตคะแนนด้านความชอบโดยรวมจะเห็นว่าผลของการเติมแซนแทนกัมและกัวร์กัมทุกระดับสามารถช่วยเพิ่มคะแนนการยอมรับได้ดีกว่าสูตรควบคุม

3.3 ผลการศึกษาคุณภาพทางเคมีของผลิตภัณฑ์เม็ดไข่มุกที่พัฒนาได้เปรียบเทียบกับสูตรพื้นฐาน

หลังจากพัฒนาผลิตภัณฑ์เม็ดไข่มุกพบว่าเม็ดไข่มุกที่พัฒนาได้มีปริมาณโปรตีน และเส้นใยหยาบมากกว่าสูตรพื้นฐานดังแสดงในตารางที่ 8 เนื่องจากแป้งข้าวกล้องงอกมีปริมาณโปรตีน และเส้นใยมากกว่าแป้งมันสำปะหลัง ดังที่มณฑานติและคณะ [29] ได้รายงานว่าแป้งมันสำปะหลังมีปริมาณโปรตีนและเส้นใยน้อย

ที่สุดเมื่อเทียบกับแป้งอื่นๆ แต่เนื่องจากการใช้แป้งข้าวกล้องงอกและแป้งข้าวเหนียวต่างออกทดแทนได้ในปริมาณน้อย จึงทำให้ค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยสำหรับค่าพลังงานของสูตรที่พัฒนาได้ และสูตรพื้นฐานพบว่าไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

3.4 ต้นทุนในการผลิตเม็ดไข่มุกที่พัฒนาได้

จากการคำนวณต้นทุนของผลิตภัณฑ์ที่พัฒนาได้จากต้นทุนวัตถุดิบ โดยไม่รวมต้นทุนด้านแรงงาน ค่าน้ำ ค่าไฟ และค่าเครื่องมือต่างๆ พบว่าผลิตภัณฑ์มีราคาดันทุนต่อ 1 หน่วยบริโภค (43 กรัม) เท่ากับ 1.12 บาท ซึ่งต้นทุนของสูตรมาตรฐาน ต่อ 1 หน่วยบริโภค (43 กรัม) เท่ากับ 1.10 บาท ซึ่งราคาเม็ดไข่มุกสูตรที่พัฒนาได้ไม่ได้แตกต่างจากสูตรพื้นฐาน จึงเป็นแนวทางให้ผู้ประกอบการในการสร้างความหลากหลายให้ผลิตภัณฑ์เม็ดไข่มุกได้

4. สรุป

สูตรเม็ดไข่มุกที่พัฒนาได้ ประกอบไปด้วยแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 85 แป้งข้าวกล้องงอกร้อยละ 5 แป้งข้าวเหนียวต่างอกร้อยละ 10 แชนแทนกัมร้อยละ 0.25 และกัวร์กัมร้อยละ 0.75 ซึ่งเป็นสูตรที่ผู้บริโภคให้คะแนนความชอบอยู่ในระดับชอบชอบปานกลางถึงชอบมาก มีปริมาณคาร์โบไฮเดรต ไขมัน โปรตีน เถ้า และเส้นใยหยาบ ร้อยละ 99.51 0.20 0.11 0.18 และ 0.0029 (ความชื้นฐานแห้ง) ตามลำดับ หนึ่งหน่วยบริโภค (43กรัม) มีพลังงาน 173.08 กิโลแคลอรี และมีราคาดันทุน 1.12 บาท งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าสามารถนำแป้งข้าวกล้องงอกและแป้งข้าวเหนียวต่างอกมาใช้ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์เม็ดไข่มุกให้เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภคได้

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ บริษัทเมดิฟูดส์ (ประเทศไทย) จำกัด ที่อนุเคราะห์แป้งข้าวกล้องงอก และแป้ง

ข้าวเหนียวต่างอกในงานวิจัยนี้ และขอขอบคุณสาขาอาหารและโภชนาการ ภาควิชาคหกรรมศาสตร์ คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ และอุปกรณ์ในงานวิจัยนี้จนเสร็จลุล่วงด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] B. Benjaploy, "Factor affecting consumer pearl milk tea a case study tea more," M.S. thesis, Dept. Market., RMUTP Univer., Bangkok, Thailand, 2016.
- [2] B. Leelawat, "Development of Kaimook from Purple Rice," *Thai Science and Technology Journal*, vol. 28, no. 3, pp. 455-465, Mar. 2020.
- [3] S. Pijitchumpho. "Marketing mix factors and consumer behavior influencing the decision to buy Bubble tea drink of KAMU brand for consumer in CentralPlaza WestGate," in *The 7th RMUTT Global Business and Economics National Conference Business Challenges 2020*, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Thailand, 2020, pp. 246-258.
- [4] The standard. (2019, October 10). Look at Pearl Milk Tea Market in Thailand through The Alley, who sells 100,000 cups a month and wants to be an Iconic Brand. [Online]. Available: <https://thestandard.co/the-alley-bubble-tea-market/>
- [5] K. Makynen. (2020, January 15). Disadvantages of Pearl Milk Tea. [Online]. Available: <https://www.chula.ac.th/cuinside/26351>
- [6] E. Upshall. (2019, October 20). Holista team up with Fruit Hub to develop healthy bubble tea. [Online]. Available: <https://www.foodbev.com/news/holista-te>

- am-up-with-fruit-hub-to-develop-healthy-bubble-tea/
- [7] ThaiPRnet. (2020, April 25). Songkhla Vocational College's students invented the recipes of boba pearl from instant purple sweet potato. [Online]. Available: <https://www.ryt9.com/s/prg/3117215>.
- [8] W. Watchara-r-parpaiboon, "Development of High Nutritional Product of Germinated Brown Rice," M.S. thesis, Dept. Biochem. Tech., KMUTT Univ., Bangkok, Thailand, 2007.
- [9] S. Parnsakhorn and J. Lungkapin. *Brown rice is easy to made and high benefits*, Bangkok: Triple Group, 2013.
- [10] N. Ratasrisomboon, "The Effect of Modified Starch onto the Quality of Tapioca Pearl under Low Temperature Storage in Sucrose Syrup," Ph.D. dissertation, Dept. Agro-industry., Assumption Univ., Bangkok, Thailand, 2016.
- [11] W. Paphonyanyong, K. Srikaeo and C. Lerdluksamee, "Effects of hydrocolloids on texture and starch digestibility of cooked waxy rice," *Khon Kaen Agriculture Journal*, vol. 47, no. 1, pp. 643-650, 2019.
- [12] Y. Khuntiwattanakul, "Effect of Xanthan Gum and Guar Gum on Physical Properties of Rice Starches," M.S. thesis, Dept. Product Development., Kasetsart Univ., Bangkok, Thailand, 2007.
- [13] J. Singthong, "Effect of Hydrocolloids on Quality Improvement of Ubon Noodles," *Ubon Ratchathani University Portal site for E-Thesis & E-Research*, 2012.
- [14] J. Singthong. "Development of Healthy Bread Product from Sunchoke (*Helianthus tuberosus* L.) Flour," *Journal of Science & Technology*, vol. 21, no. 1, pp. 76-89, Jan. - Apr. 2019.
- [15] K. Kanyanee and P. Sungin, "The Effect of Gur Gum on the Qualities of Gluten Free Crispy Waffle from Sweet Purple Potato Flour," *Dusit Thani College Journal*, vol. 13, no. 1, pp. 315-329, Jan. - Apr. 2019.
- [16] P. Sanom and K. Jangchud, "Effect of Cricket (*Acheta Domesticus*) Powder, Soy Protein Isolate and Xanthan Gum on the Qualities of Rice Flour based Cookies," *RMUTP Research Journal*, vol. 14, no.2, pp. 72-84, Jul. - Dec. 2020.
- [17] AOAC, Official Methods of Analysis of Association of Official Analytical Chemists, 18th ed. Washington DC: Gaithersburg, 2010.
- [18] I. Suwandee, P. Pimgotha, P. Thmtha, S. Amatsombat, A. Butphakdi and H. Wiangluang, "Cost and returns analysis of processing pickle fish production: case study of fermented fish sauce Nong Kae, Sriboonrung district, Nong Bua Lamphu province", Bachelor of Business Administration, Udon Thani Rajabhat University, 2020, pp.31
- [19] N. Klanarong, "Preparation of oxidized cassava starch using solution plasma process for biodegradable film wrap application," M.S. thesis, Dept. Chemical Engineering., Naresuan Univ., Phitsanulok, Thailand, 2019.
- [20] N. Rattanapanone. Food Chemistry, 5th ed. Bangkok: Odeon Store, 2014.
- [21] S. Sisang, "Starch Properties for Fisheries Products," *Fisheries Industrial Technology*

- Research and Development Division*, Mar. 2020.
- [22] K. Sriroth and K. Piyachomkwan, *Starch Technology*, 4th ed. Bangkok: Kasetsart University, 2007.
- [23] S. Dounghong, "Cultivation, quality change of Black Glutinous Rice Varieties and Strategic Marketing Planning in klonghoykhong and Singhanakorn district, Songkhla Province," *Institute of Research and Development - SKRU*, 2013.
- [24] P. Thanthong, T. Pakdam, S. Rueangthanatkul, P. Phugan, S. Inket, S. Singsom and P. Pramai, "The Development of Kanom-Tian from Black Glutinous Rice Flour stuffed with Cereal and Purple Tubers," *PSRU Journal of Science and Technology*, vol. 4, no. 3, pp. 109-122, Sep.-Dec. 2019.
- [25] S. Kongwan, K. Jangchud and P. Tungtrakul, "Effect of germination condition on pasting properties and GABA content of germinated brown rice flour produced from brown rice," In *Proceeding of 49th Kasetsart University Annual Conference: Agro-Industry*, Kasetsart University, Thailand, 2011, pp. 210-217.
- [26] N. Chevanuntapornchai, T. Suwonsichon and P. Ritthiruangdej, "Mechanically texture properties measurement of rice starch gel and tapioca starch gel," In *Proceeding of 40th Kasetsart University Annual Conference: Agro-Industry*, Kasetsart University, Thailand, 2003, pp. 471-478.
- [27] J. Muadklay and S. Charoenrein, "Effect of xanthan gum on properties of frozen tapioca starch gels," In *Proceeding of 44th Kasetsart University Annual Conference: Agro-Industry*, Kasetsart University, Thailand, 2008, pp. 72-80.
- [28] N. Mahachairachan, K. Jangchud and A. Jangchud, "Effect of hydrocolloid and moisture content of ingredients on the breakfast flake from germinated brown rice flour," in *Proceedings of 49th Kasetsart University Annual Conference: Agro-Industry*, Thailand, 2011, pp. 398-405.
- [29] M. Tamtin S. Thongrod and S. Luchai Chaikyakul. *Starches as Carbohydrate Sources and Their Optimum Level in Feed on Growth of Black Tiger Shrimp (Penaeus monodon Fabricius, 1798)*. Bangkok: Department of Fisheries, 2008, pp. 6-8.

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

ความหลากหลายของยีสต์และราที่คัดแยกได้จากลูกแป้ง

กุสุมาวดี ฐานเจริญ ^{1*} และ อรรถพร มลาศรี ²

¹ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม

² คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม

^{1,2} 80 ถนนนครสวรรค์ ตำบลตลาด อำเภอเมือง จังหวัดมหาสารคาม 44000

รับบทความ 22 พฤษภาคม 2564 แก้ไขบทความ 16 ธันวาคม 2564 ตอรับบทความ 14 มีนาคม 2565

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อคัดแยกยีสต์และราจากลูกแป้งในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย ผลการศึกษาสามารถคัดแยกยีสต์จำนวน 68 ไอโซเลต ยีสต์ที่พบมีรูปร่างกลม 11 ไอโซเลต รี 22 ไอโซเลต ทรงกระบอก 18 ไอโซเลต และทรงกลมปลายมนคล้ายมะนาวฝรั่ง 16 ไอโซเลต และราจำนวน 32 ไอโซเลต ราที่พบมี 5 สายพันธุ์ ได้แก่ สกุล *Alternaria* 7 ไอโซเลต *Aspergillus* 16 ไอโซเลต *Amylomyces* 4 ไอโซเลต *Penicillium* 4 ไอโซเลต และ *Rhizopus* 1 ไอโซเลต โดยยีสต์ 4 ไอโซเลตมีความสามารถในการย่อยแป้งสูง (ดัชนีวงใส 1.25–1.50) คือ รหัส STYC 05, STYN 02, STYN 07, STYS 03 และมีความสามารถในการผลิตแอลกอฮอล์ได้ร้อยละ 1.19–7.24 (ปริมาตร/ปริมาตร) ในอาหารเหลว Yeast extract-Peptone-Dextrose (YPD) ที่มีกลูโคสร้อยละ 2 ที่อุณหภูมิห้อง (30±2 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 48 ชั่วโมง รา 3 ไอโซเลตมีความสามารถในการย่อยแป้งได้สูง (ดัชนีวงใส 11.0–13.0) คือ รหัส STMD 04, STNR 01, STMR 05

คำสำคัญ : การคัดแยก; การย่อยแป้ง; ลูกแป้ง; สาโท; แอลกอฮอล์

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +668 5771 1631, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: Kusumawadee.than14@gmail.com

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

Diversity of Yeasts and Molds Isolated from Look-pang

Kusumawadee Thancharoen^{1*} and Authaporn Malasri²

¹ Faculty of Science and Technology, Rajabhat MahaSarakham University

² Faculty of Education, Rajabhat MahaSarakham University

^{1,2} 80 Nakronsawan Road, Talad, Muang, Maha Sarakham 44000

Received 22 May 2021; Revised 16 December 2021; Accepted 14 March 2022

Abstract

This research was studied to isolated yeasts and molds from Look-Pang in Northeastern Thailand. The results indicated that sixty-eight isolates of yeast, classified from cell shape including spherical 11 isolates, oval 22 isolates, cylindrical 18 isolates and apiculate 16 isolates and thirty-two isolates of mold were obtained as *Alternaria* 7 isolates, *Aspergillus* 16 isolates, *Amylomyces* 4 isolates, *Penicillium* 4 isolates and *Rhizopus* 1 isolate. There from sixty-eight isolates of yeast strong amylolytic activity (clear zone index 1.25-1.50) were STYC 05, STYN 02, STYN 07, STYS 03 and gave alcohol 1.19 – 7.24 % (v/v) on yeast extract-Peptone-Dextrose (YPD) with glucose 2 % (W/V) at room temperature (30±2 °C) for 48 hour. Three from thirty-two isolates of mold strong amylolytic activity (clear zone index 11.0-13.0) were STMD 04, STNR 01, STMR 05.

Keywords : Isolation, Starch Hydrolysis, Look-pang, Sato, Alcohol

* Corresponding Author. Tel.: +668 5771 1631, E-mail Address: Kusumawadee.than14@gmail.com

1. บทนำ

ลูกแป้ง หรือที่ชาวตะวันตกรู้จักกันในชื่อ “Chinese yeast cake” คือ ก๋าล้าเชื้อจุลินทรีย์ที่เก็บในรูปเชื้อแห้ง เพื่อใช้ในการหมักเหล้าหลายชนิดในประเทศแถบเอเชีย เข้าใจว่าลูกแป้งมีแหล่งกำเนิดมาจากประเทศจีนและได้ถ่ายทอดไปยังประเทศเพื่อนบ้านรวมทั้งประเทศไทย โดยมีชื่อเรียกแตกต่างกันไปในแต่ละประเทศ ลูกแป้งมีหลายชนิดคือ ลูกแป้งสาโท ลูกแป้งข้าวหมาก ลูกแป้งน้ำส้มสายชู และลูกแป้งขนมถ้วยฟู การใช้ประโยชน์จากลูกแป้งจะคล้ายคลึงกันเป็นส่วนใหญ่ คือ ใช้ในการหมักที่มีกิจกรรมการเปลี่ยนแป้งในวัตถุดิบประเภทธัญพืชและพืชหัวให้เป็นน้ำตาล เพื่อผลิตอาหารหมักประเภทข้าวหมาก น้ำส้มสายชู สุรา และเมรัย (เช่น กระแช่ สาโท หรืออุ) ยกเว้นราจิเทมเป้ที่ใช้ในการผลิตเทมเป้ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากถั่วเหลือง [1] ปัจจุบันลูกแป้งในประเทศไทยเป็นสิ่งหายาก โดยเฉพาะลูกแป้งน้ำส้มสายชู และลูกแป้งขนมถ้วยฟู คงเหลือแต่ลูกแป้งข้าวสาโท และลูกแป้งเหล้าเท่านั้นที่ยังพอจะหาได้ตามท้องถิ่นต่างๆ ทั้งนี้เนื่องจากปัจจัยหลายประการคือ ความยุ่งยากและสลับซับซ้อนในการผลิต ไม่มีการถ่ายทอดความรู้ให้ผู้อื่นยกเว้นคนสนิทและลูกหลานเท่านั้น มีผู้เห็นความสำคัญและต้องการรู้เรื่องนี้น้อยลง มีเทคโนโลยีดีขึ้นจึงทำให้ผู้ผลิตสุรารายใหญ่หันมาใช้เชื้อบริสุทธิ์แทน และข้อจำกัดทางภาครัฐที่ห้ามมีการครอบครองและจำหน่ายลูกแป้งโดยไม่ได้รับอนุญาต นอกจากนี้ยังมีการจำกัดจำนวนของผู้ผลิตและจำหน่ายลูกแป้งตามพระราชบัญญัติสุรา พ.ศ. 2493 และระเบียบกรมสรรพสามิตว่าด้วยการกระทำและขายแป้งข้าวสาโท พ.ศ. 2524 อีกด้วย [2]

จุลินทรีย์ที่พบในลูกแป้งมีหลายชนิด แต่จากการศึกษาพบจุลินทรีย์เพียงไม่กี่ชนิดเท่านั้นที่มีบทบาทเด่นๆ ในกระบวนการหมักผลิตภัณฑ์ สำหรับลูกแป้งสาโทจุลินทรีย์ที่มีบทบาทสำคัญ คือ จุลินทรีย์มีประสิทธิภาพในการย่อยแป้งให้เป็นน้ำตาลและพวกที่

ผลิตสารให้กลิ่นหอมบางชนิดเท่านั้น ส่วนลูกแป้งสาโทนอกจากจะต้องประกอบด้วยจุลินทรีย์ย่อยแป้งได้ดีแล้วยังต้องมีจุลินทรีย์ที่สามารถทำหน้าที่เปลี่ยนน้ำตาลให้เป็นเอทิลแอลกอฮอล์ได้อย่างมีประสิทธิภาพด้วย ลูกแป้งสาโทเป็นแหล่งของยีสต์และราที่มีบทบาทในการผลิตสาโท โดยเป็นสายพันธุ์ที่มีการคัดเลือกตามธรรมชาติมาเป็นเวลายาวนาน จึงทำให้เป็นสายพันธุ์ที่มีคุณลักษณะต่างๆที่เหมาะสม จากรายงานพบ *Saccharomyces fibuligera* ในลูกแป้งข้าวหมากและลูกแป้งเหล้า อีกทั้งยังพบ *Pichia anomala*, *Issatchenkia orientalis*, *P. burtonii*, *P. fabianii*, *Candida rhagii*, *C. glabrata*, *Torulaspora globosa*, *P. Mexicana*, *P. heimii*, *Rhodotorula philyla*, *Saccharomyces cerevisiae*, *T. delbrueckii* และ *Trichosporon asahii* ในลูกแป้งข้าวหมากและลูกแป้งเหล้า [3] นอกจากนี้ยังมีรายงานว่า พบยีสต์ที่มีสมบัติคล้ายกับ *Saccharomyces cerevisiae* จากก๋าล้าเชื้อไวน์ข้าวของเวียดนามด้วย [4, 5] สำหรับราที่พบในลูกแป้ง ได้แก่ *Amylomyces rouxii* และ *Rhizopus* spp. [6] ลูกแป้งสาโตนับวันจะหายากขึ้นและอาจสูญหายไปในที่สุดทำให้ยีสต์และราที่ถูกเก็บอยู่ในลูกแป้งจึงอาจสูญหายไป ถ้าหากไม่มีการรวบรวมไว้ก่อน และถึงแม้ว่าลูกแป้งจะยังคงอยู่แต่การเก็บยีสต์และราในรูปแป้งอาจจะไม่มีประสิทธิภาพพอ ยีสต์และราที่มีอยู่อาจจะมีการเปลี่ยนแปลงทางพันธุกรรมทำให้สายพันธุ์เปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำการคัดแยกยีสต์และราจากลูกแป้ง รวมถึงการรวบรวมและเก็บรักษาสายพันธุ์ของยีสต์และราเหล่านั้นไว้ด้วยวิธีการที่ถูกต้องและเหมาะสม เพื่อเป็นการอนุรักษ์สายพันธุ์ของจุลินทรีย์ที่มีความสำคัญสำหรับผลิตภัณฑ์พื้นบ้าน นอกจากนี้ยังอาจนำยีสต์และราเหล่านั้นไปใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์สาโทในรูปเชื้อบริสุทธิ์ โดยอาจมีการปรับปรุงสายพันธุ์ให้เหมาะสมยิ่งขึ้น รวมทั้งอาจนำไปปรับใช้สำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์อื่นๆ ด้วย

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 ขั้นตอนการวิจัย

2.1.1 การเก็บตัวอย่างลูกแป้งสาโท

สุ่มเก็บตัวอย่างลูกแป้งสาโทพื้นบ้านจากบางจังหวัดในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ตั้งแต่เดือนพฤษภาคม พ.ศ 2563 - เดือนสิงหาคม พ.ศ 2563 โดยเก็บลูกแป้งสาโทแหล่งละ 10 ลูก และเก็บรักษาในถุงพลาสติกซิปล็อคไม่ให้ปะปนกัน หลังจากนั้นนำลูกแป้งสาโทมาทำหน้าพรหส์และเก็บที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

2.1.2 การคัดแยกยีสต์และราจากลูกแป้งสาโท

2.1.2.1 การคัดแยกยีสต์

ซังลูกแป้งสาโท 10 กรัม ใส่ลงในอาหารเลี้ยงเชื้อเหลว Yeast Extract-Peptone-Dextrose (YPD) บ่มที่อุณหภูมิ 30 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง ปิเปิดตัวอย่างระดับความเจือจางที่เหมาะสม เพาะเลี้ยงบนอาหารเลี้ยงเชื้อ YPD agar ด้วยวิธี Spread Plate บ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง คัดเลือกโคโลนีที่แตกต่างกัน และตรวจสอบรูปร่างเซลล์ภายใต้กล้องจุลทรรศน์และจัดกลุ่มตามรูปร่างเซลล์ เก็บยีสต์ที่คัดแยกได้ในอาหารเลี้ยงเชื้อเยื่อ YPD Slant ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

2.1.2.2 การคัดแยกรา

ซังลูกแป้งสาโท 10 กรัม ใส่ลงในอาหารเลี้ยงเชื้อเหลว Potato Dextrose Broth (PDB) บ่มที่อุณหภูมิ 30 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 168 ชั่วโมง ปิเปิดตัวอย่างระดับความเจือจางที่เหมาะสม เพาะเลี้ยงบนอาหารเลี้ยงเชื้อ PDA ด้วยวิธี Spread Plate บ่มที่อุณหภูมิ 30 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 168 ชั่วโมง ตรวจสอบโครงสร้างของเส้นใยภายใต้กล้องจุลทรรศน์และจัดจำแนกสกุลโดยเทียบกับ Taxonomic Key ของรา เก็บราที่คัดแยกได้ในอาหารเลี้ยงเชื้อ PDA Slant ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

2.1.3 การศึกษาคุณสมบัติของยีสต์

2.1.3.1 การย้อยแบ่ง

เพาะเลี้ยงยีสต์แต่ละไอโซเลตบนอาหาร Yeast Extract-Peptone-Dextrose (YPD) Agar Slant ที่อุณหภูมิ 30 ± 2 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง จากนั้นถ่ายเชื้อแบบ Point Inoculation ลงบนอาหาร YPD Agar ที่มี Starch Soluble ร้อยละ 1 (น้ำหนักโดยปริมาตร) บ่มที่อุณหภูมิ 30 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง แล้วเททับด้วยสารละลาย Lugals' iodine ให้ท่วมผิวหน้าอาหาร ทิ้งไว้ประมาณ 1 นาที เทสารละลายออก สังเกตบริเวณใส (Clear Zone) ที่เกิดขึ้น ทำการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของบริเวณใสที่เกิดขึ้นของเชื้อแต่ละไอโซเลต [7]

2.1.3.2 การผลิตแอลกอฮอล์

เพาะเลี้ยงยีสต์ 1 ลูป (Loop) ลงในอาหารเหลว YPD ที่เติมหลอดดักแก๊ส บ่มที่อุณหภูมิ 30 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง บันทึกผลแก๊สที่เกิดขึ้นในหลอดดักแก๊ส คัดเลือกสายพันธุ์ยีสต์ที่มีความสามารถในการสร้างแก๊สในอาหารเหลว ทดสอบการผลิตแอลกอฮอล์ในอาหารเหลว YPD ที่มีกลูโคสร้อยละ 2 (น้ำหนักโดยปริมาตร) โดยเชื้อยีสต์ลงในอาหารเหลว YPD บ่มที่อุณหภูมิ 30 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง วัดค่าการดูดกลืนแสง (OD 600 nm) เท่ากับ 1.0 ด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (Spectrophotometer) เติมหิวเชื้อยีสต์ตั้งต้นร้อยละ 5 (ปริมาตรโดยปริมาตร) บ่มที่อุณหภูมิ 30 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง วิเคราะห์ปริมาณแอลกอฮอล์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography) [8]

2.1.4 การศึกษาความสามารถในการย้อยแบ่งของรา

เพาะเลี้ยงราบนอาหาร Potato Dextrose Agar (PDA) slant ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 168 ชั่วโมง จากนั้นถ่ายเชื้อแบบ Point Inoculation 1 จุด ลงบนจุดกึ่งกลางของ PDA ในจาน

เพาะเชื้อที่มี Starch Soluble ร้อยละ 1 (น้ำหนักโดยปริมาตร) บ่มที่อุณหภูมิ 30 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 168 ชั่วโมง แล้วเททับด้วยสารละลาย Lugals' iodine ให้ท่วมผิวหน้าอาหาร ทิ้งไว้ประมาณ 1 นาที เทสารละลายออก สังเกตบริเวณใส (Clear Zone) ที่เกิดขึ้น ทำการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของบริเวณใส [7]

2.1.5 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design) ทำการทดลอง 3 ซ้ำ วิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าเฉลี่ย (Analysis of Variance ; ANOVA) และทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยรายคู่ด้วยวิธี Duncan's multiple range test ด้วยโปรแกรม SPSS version 17.0

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 ลักษณะของลูกแป้งสาโท

จากการเก็บตัวอย่างลูกแป้งสาโทตั้งแต่เดือนพฤษภาคมถึงเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2563 จากพื้นที่บางแห่งในจังหวัดภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จำนวน 10 ตัวอย่าง ตัวอย่างลูกแป้งส่วนใหญ่มีลักษณะคล้ายกัน คือ ลูกแป้งมีขนาดใหญ่และกลมแบน สีขาวนวล แต่มีตัวอย่างลูกแป้งบางตัวอย่างที่มีลักษณะแตกต่างออกไป คือ ลูกแป้งของจังหวัดอุบลราชธานี จะมีขนาดเล็ก ตรงกลางบวม มีจุดเชื้อราสีเขียวน้อย และมีสีขาวอมเหลือง ซึ่งอาจเป็นเพราะสมุนไพรที่เติมลงไปเป็นส่วนประกอบของลูกแป้งมีความแตกต่างกัน และอาจเป็นสูตรของบางพื้นที่ที่มีเอกลักษณ์เฉพาะตัวในการสืบทอดภูมิปัญญาการผลิตลูกแป้งสาโท (แสดงดังตารางที่ 1)

3.2 การคัดเลือกยีสต์และราจากลูกแป้ง

3.2.1 การคัดเลือกยีสต์

การคัดเลือกยีสต์จากลูกแป้ง จำนวน 10 แหล่งศึกษาสิรินธรวิทยานอาหารแข็ง YPD และรูปร่างเซลล์ภายใต้กล้องจุลทรรศน์ พบว่า สามารถคัดเลือกยีสต์ได้จำนวน 68 ไอโซเลต มีความแตกต่างของโคโลนีทั้งหมด 6 ลักษณะ (แสดงดังตารางที่ 2)

ตารางที่ 1 ลักษณะของลูกแป้งจากแหล่งต่างๆ

ลำดับ	แหล่ง	ลักษณะของลูกแป้ง
1	หนองบัวลำภู	ลูกแป้งขนาดใหญ่ รื่นนวลขรุขระ สีขาวนวล
2	ชัยภูมิ	ลูกแป้งขนาดใหญ่ กลมมน สีขาวนวล
3	อุดรธานี	ลูกแป้งขนาดใหญ่ รื่นนวล สีขาวนวล
4	ศรีสะเกษ	ลูกแป้งขนาดใหญ่ รื่นนวลขรุขระ สีขาวนวล
5	ขอนแก่น	ลูกแป้งขนาดใหญ่ กลมมน สีขาวนวล
6	นครราชสีมา	ลูกแป้งขนาดใหญ่ กลมมน สีขาวนวล
7	มหาสารคาม	ลูกแป้งขนาดใหญ่ กลมมน สีขาวนวล
8	ร้อยเอ็ด	ลูกแป้งขนาดใหญ่ กลมมน สีขาวนวล
9	สกลนคร	ลูกแป้งขนาดใหญ่ กลมมน สีขาวอมน้ำตาล
10	อุบลราชธานี	ลูกแป้งขนาดเล็ก ตรงกลางบวมมีจุดเชื้อราสีเขียวน้อย สีขาวอมเหลือง

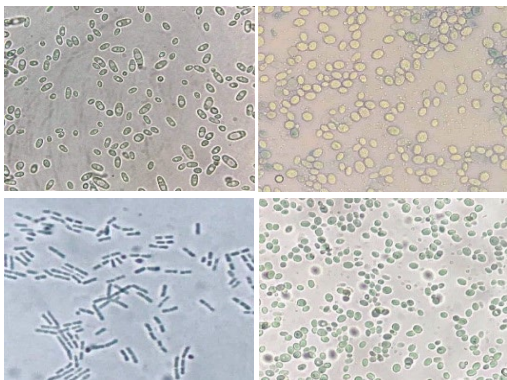
ตารางที่ 2 รูปแบบโคโลนียีสต์ที่คัดแยกได้จากลูกแป้ง

แบบที่	รูปแบบโคโลนี	จำนวน (ไอโซเลต)	รหัส
1	สีขาว ขอบเรียบ ผิวหน้าเรียบ วาว	17	STYB03, STYB06, STYC 08, STYD 01, STYD 02, STYG 01, STYG 02, STYM02, STYN01, STYN 02, STYN 06, STYS 01, STYS 03, STYS 04, STYS 06, STYS 07, STYS 09
2	สีขาวด้าน ขอบหยัก ผิวหน้าขรุขระ	8	STYB 05, STYD 03, STYM 04, STYM 05, STYN 05, STYR 02, STYR 05, STYU 06
3	สีขาว ขอบหยัก เส้นสาย ผิวหน้าขรุขระ	9	STYC 02, STYK 02, STYN 09, STYR 03, STYR 04, STYR 06, STYR 07, STYR 08, STYU 07
4	สีครีม ขอบเรียบ ผิวหน้าเรียบ วาว	16	STYB 01, STYB 07, STYC 06, STYC 07, STYG 03, STYG 04, STYG 05, STYK 01, STYK 03, STYM 03, STYM 06, STYN 04, STYR 01, STYU 02, STYU 03, STYU 05
5	สีครีม ขอบหยัก ผิวหน้าเรียบ ผิวหน้าขรุขระ	8	STYC 01, STYM 01, STYN 03, STYN 10, STYS 02, STYS 05, STYU 01, STYU 04
6	สีครีม ขอบหยัก ผิวหน้าเรียบ วาว	10	STYB 02, STYB 04, STYC 03, STYC 04, STYC 05, STYD 04, STYK 04, STYN 07, STYN 08, STYS 08

เมื่อนำมาศึกษารูปร่างเซลล์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ โดยวิธี Wet Mount พบว่า มีรูปร่างเซลล์ 4 แบบ (แสดงดังตารางที่ 3)

ตารางที่ 3 รูปร่างเซลล์ของยีสต์ที่คัดแยกได้จากลูกแป้ง

แบบที่	รูปร่าง	จำนวน (ไอโซเลต)	รหัส
1	ทรงกลม	11	STYK 02, STYM 02, STYN 01, STYN 02, STYN 08, STYN 09, STYN 10, STYS 01, STYS 02, STYS 03, STYS 05
2	รี/ไข่	23	STYB 02, STYB 06, STYB 07, STYD 01, STYD 02, STYD 03, STYG 04, STYK 04, STYM 01, STYM 03, STYM 05, STYN 03, STYN 04, STYN 05, STYN 07, STYNR 02, STYR 03, STYR 05, STYR 08, STYS 06, STYS 09, STYU 03, STYU 07
3	ทรง กระบอก	18	STYB 01, STYB 05, STYC 01, STYC 02, STYC 03, STYC 04, STYC 05, STYC 07, STYG 01, STYG 05, STYK 01, STYM 04, STYM 06, STYN 06, STYR 04, STYU 04, STYU 05, STYU 06
4	กลมปลาย มนคล้าย มะนาวฝรั่ง	16	STYB 03, STYB 04, STYC 06, STYC 08, STYD 04, STYG 02, STYG 03, STYK 03, STYR 01, STYR 06, STYR 07, STYS 04, STYS 07, STYS 08, STYU 01, STYU 02



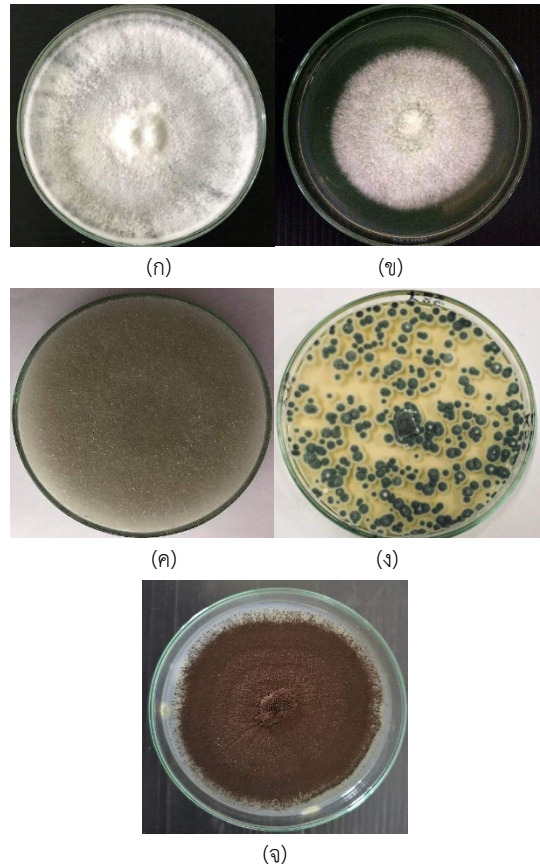
รูปที่ 1 รูปร่างเซลล์แบบต่างๆ ของยีสต์ที่คัดแยกจากลูกแป้ง (ก) รี/ไข่ (ข) ทรงกลม (ค) ทรงกระบอก และ (ง) ทรงกลมปลายมนคล้ายผลมะนาวฝรั่ง

ลูกแป้งในแต่ละแหล่งมีการผลิตที่แตกต่างกัน ทำให้มีความหลากหลายของจุลินทรีย์ พบว่าลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยีสต์ที่คัดแยกได้ส่วนใหญ่ มีโคโลนีสีขาวครีม มันวาว ขอบเรียบ เมื่อศึกษาภายใต้กล้องจุลทรรศน์เซลล์ส่วนใหญ่มีรูปร่างสอดคล้องกับงานวิจัยของ Techavasonyoo [9] พบว่ายีสต์ที่คัดแยกจากลูกแป้งสาโท มีโคโลนีสีขาว ขาวครีม หรือขาวนวลเซลล์ภายใต้กล้องจุลทรรศน์ส่วนใหญ่กลมรี ขนาดเล็ก เช่นเดียวกับงานวิจัยของอรรถพล กลบุตร และคณะ [10] ซึ่งคัดแยกยีสต์จากลูกแป้งสาโท 5 แหล่ง ได้ยีสต์ทั้งหมด 64 ไอโซเลตและคัดแยกยีสต์ที่สามารถผลิตเอทานอล 22 ไอโซเลต พบว่าสัณฐานวิทยาส่วนใหญ่โคโลนี มีสีขาว ครีมนันวาว ขอบเรียบ ผิวหน้าแห้ง (11 ไอโซเลต) ผิวหน่มัน (11 ไอโซเลต) รูปแบบโคโลนีกลมและเซลล์กลมรีทั้งหมด

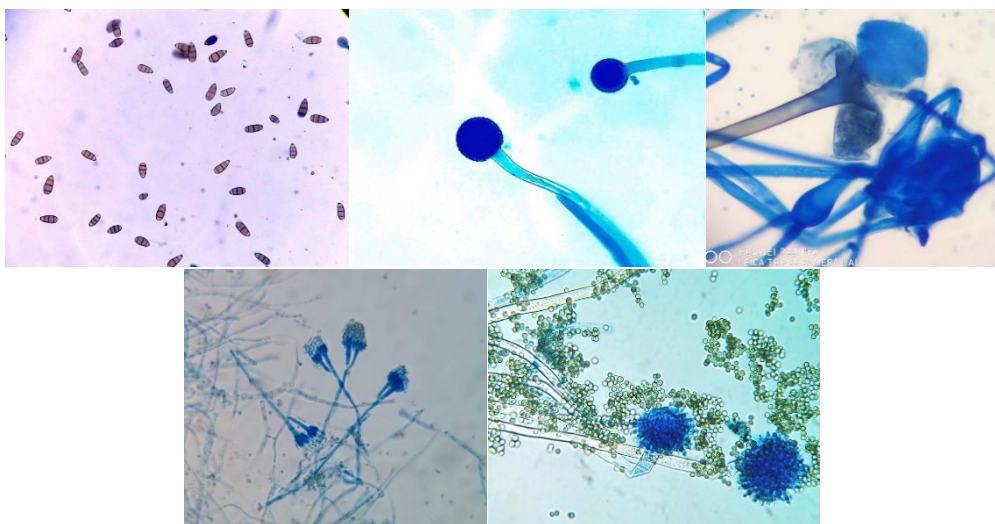
3.2.2 การคัดแยกกรา

การคัดแยกกราจากลูกแป้ง จำนวน 10 แหล่ง ศึกษาสัณฐานวิทยาบนอาหารแข็ง PDA และรูปร่างเซลล์ภายใต้กล้องจุลทรรศน์ สามารถคัดแยกได้จำนวน 32 ไอโซเลต จัดจำแนกสกุลโดยอาศัยสัณฐานวิทยาบนอาหารแข็ง PDA และโครงสร้างของเส้นใยภายใต้กล้องจุลทรรศน์ (แสดงดังรูปที่ 2 และ 3) นำผลจากการศึกษาเทียบกับ Taxonomic Key [11]-[15] พบว่าราที่คัดแยกได้ส่วนใหญ่ จำนวน 16 ไอโซเลต ได้แก่ รหัส STMC 02, STMC 03, STMD 01, STMD 02, STMG 01, STMG 02, STMG 03, STMK 02, STMK 04, STMN 01, STMN 02, STMM 02, STMR 01, STMR 03 STMS 02, STMU 03 มีเส้นใหญ่สีขาวสั้น สปอร์มีสีเขียวอมเหลือง เมื่ออายุมากขึ้นจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลจนถึงสีดำ โครงสร้างภายใต้กล้องจุลทรรศน์โคนิเดียมีลักษณะเป็นแฉกรัศมีสีเขียวอมเหลือง โคนิเดียโอเฟอร์ม่งหนา ผิวขรุขระ ส่วนปลายเป็นเวลิเคลทรงกลม โคนิเดียเป็นรูปทรงกลมหรือรี มีผนังขรุขระ จากลักษณะที่กล่าวมาจัดเป็นราในสกุล *Aspergillus* ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของวิลลัทธิ รตนปรีดากุล [8] คัดแยกกรา

สกุลนี้จากรูปแบ่งเหล่าของจังหวัดนครราชสีมา และงานวิจัยของสมพร สันธรา [16] พบว่าราที่คัดแยกได้จากลูกแป้งและข้าวหมากในประเทศไทยจำนวน 9 ไอโซเลต ที่จำแนกเป็น *Aspergillus* รองลงมาคือ ราในสกุล *Alternaria* จำนวน 7 ไอโซเลต ได้แก่ รหัส STMB 03, STMD 03, STMK 01, STMK 03, STMR 02, STMS 01, STMU 01 มีเส้นใหญ่บางละเอียด เมื่ออ่อนมีสีขาวครีมและแก่เป็นสีเทาหรือเทาเข้มเกือบดำ โคนิดีโอเฟอร์เกิดทั้งแบบ Gelcilate มีสีน้ำตาลทอง ผงเรียบและมีผงกัน ลักษณะของโคนิเดียมีขนาดใหญ่อาจเรียงต่อกันมีผงกันทั้งแบบตามยาวและตามขวาง รูปร่างของโคนิเดียมีลักษณะเป็นกระบอกและมีสีเข้ม ผิวขรุขระ โคนิเดียอันแรกเกิดที่ปลายก้านโคนิดีโอเฟอร์ และสามารถทำหน้าที่เป็นโคนิดีโอเฟอร์ จากลักษณะที่กล่าวมาจัดเป็นรากลุ่ม *Alternaria* นอกจากนี้ยังพบราจำนวน 4 ไอโซเลต ได้แก่ รหัส STMB 02, STMC 01, STMR 04, STMS 03 มีเส้นใหญ่สีขาวยาวแต่ไม่ฟูมาก เส้นใหญ่ภายใต้กล้องจุลทรรศน์ไม่มีผงกัน สร้างคล้ามัยโตสปอร์จำนวนมากบนเส้นใย และพบการสร้างสปอร์แรนเจียมน้อยมากและไม่สมบูรณ์ อาจมีหรือไม่มีไรซอยด์



รูปที่ 2 ลักษณะวิทยาของราสกุลต่างๆ บนอาหารแข็ง PDA (ก) *Alternaria* (ข) *Amylomyces* (ค) *Rhizopus* (ง) *Penicillium* และ (จ) *Aspergillus*



รูปที่ 3 โครงสร้างเส้นใยภายใต้กล้องจุลทรรศน์ของราสกุลต่างๆ (ก) *Alternaria* (ข) *Amylomyces* (ค) *Rhizopus* (ง) *Penicillium* และ (จ) *Aspergillus*

จากลักษณะที่กล่าวมาจัดเป็นราในสกุล *Amylomyces* ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของวิลลัคฆ์รัตน์ปรีดากุล [4] พบราสกุลนี้จากลูกแป้งเหล้าจังหวัดอุบลราชธานี และงานวิจัยของสมพร สีนธรา [12] คัดแยกราจากลูกแป้งเหล้าและลูกแป้งข้าวหมากพบราจำนวน 43 ไอโซเลตเป็นราในสกุลนี้ รวมทั้งงานวิจัยของมนชัย เดชสงกรานต์ [17] ที่พบราสกุลนี้ในลูกแป้งเหล้าและลูกแป้งข้าวหมากจำนวน 4 ไอโซเลต ราที่คัดแยกได้จำนวน 4 ไอโซเลต ได้แก่ รหัส STMB 01, STMM 01, STMR 05, STMU 02 เส้นใยสีเขียวเข้ม มีผนังกันตามขวาง ตรงปลายมีลักษณะเป็นกระຈกเขียวคล้ายไม้กวาด ก้านของโคนิโอฟอร์แตกแขนง โคนิไดโอสปอร์รูปร่างกลมหรือไข่เกิดต่อกันเป็นลูกโซ่มีสีน้ำเงินจากลักษณะที่กล่าวมาจัดเป็นราในสกุล *Penicillium* สอดคล้องกับงานวิจัยของชัยวัฒน์ จาติกเสถียร [18] ที่พบ *Penicillium* และ *Aspergillus* ในลูกแป้งข้าวหมากและลูกแป้งเหล้า ราที่คัดแยกได้จำนวน 1 ไอโซเลต ได้แก่รหัส STMD 04 เส้นใยมีสีขาวฟู สปอร์มีสีดำเส้นใยภายในกล้องจุลทรรศน์เป็นแบบไม่มีผนังกัน สร้างสปอแรงจิโอฟอร์ ตรงส่วนที่จะสร้างไรซอยด์ สปอแรนเจียมเป็นอันเดี่ยวรูปร่างกลมหรือเกือบกลม สปอแรนจิโอสปอร์มีลักษณะกลมหรือกลมรี ผิวขรุขระเป็นเส้นจากลักษณะที่กล่าวมาจัดเป็นราในสกุล *Rhizopus* สอดคล้องกับงานวิจัยของอภิญา เตชะวรัญญู [19] พบราสกุล *Mucor* และ *Rhizopus* ในลูกแป้งสาโทภาคเหนือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และภาคกลางของประเทศไทย และมนชัย เดชสงกรานต์ [17] ได้คัดแยกราสกุล *Rhizopus* จากลูกแป้งข้าวหมากและลูกแป้งเหล้า โดยพบว่า *Rhizopus* ที่คัดแยกได้มีความสามารถในการย่อยแป้งเป็นน้ำตาลได้ จากรายงานวิจัยที่ผ่านมาอธิบายถึงจุลินทรีย์ที่พบในหัวเชื้อแต่ละแหล่งประกอบด้วยจุลินทรีย์หลากหลายชนิดที่แตกต่างกันและสามารถจัดจำแนกได้ 3 กลุ่ม ได้แก่ รา ประกอบด้วยสกุล *Amylomyces*, *Rhizopus*, *Mucor* และ *Aspergillus* ส่วนยีสต์เป็นกลุ่ม *Ascomycetes* ยกตัวอย่างเช่น *saccharomyces* spp. , *Endomycopsis* spp.

, *Hansenula* spp. , *candida* spp. , *Wickerhamomyces* spp และแบคทีเรียในกลุ่ม *Acetobacter* spp. *Gluconobacter* spp; *Lactobacillus* spp. และ *Bacillus* spp. [20]-[24]

3.3 การศึกษาคุณสมบัติของยีสต์

3.3.1 การย่อยแป้ง

การทดสอบความสามารถในการย่อยแป้งของยีสต์ที่คัดแยกได้ พบว่ามียีสต์จำนวน 14 ไอโซเลตที่สามารถย่อยแป้งบนอาหาร YPD ที่เติม starch soluble ร้อยละ 1 (น้ำหนักโดยปริมาตร) มีดัชนีวงใสของการย่อยแป้งที่เกิดขึ้น ตั้งแต่ 0.3 – 2.5 เซนติเมตร (แสดงดังตารางที่ 4) ยีสต์ที่มีดัชนีวงใสของการย่อยแป้งสูงสุด คือ STYS03 เท่ากับ 1.5 รองลงมาคือรหัส STYN 02 เท่ากับ 1.30 และยีสต์ที่มีดัชนีวงใสที่น้อยที่สุด คือ STYM 05 เท่ากับ 0.05 เมื่อวิเคราะห์ทางสถิติยีสต์ทุกรหัสไม่มีความแตกต่างกัน

ตารางที่ 4 ความสามารถในการย่อยแป้งของยีสต์ที่คัดแยกได้จากลูกแป้ง

ลำดับ	รหัส	แหล่ง	ดัชนีวงใส
1	STYB 06	หนองบัวลำภู	1.05 ^a ±0.06
2	STYC 05	ชัยภูมิ	1.25 ^a ±0.78
3	STYM 04	มหาสารคาม	0.90 ^a ±0.71
4	STYM 05	มหาสารคาม	0.50 ^a ±0.28
5	STYN 02	นครราชสีมา	1.30 ^a ±0.99
6	STYN 05	นครราชสีมา	0.80 ^a ±0.42
7	STYN 06	นครราชสีมา	0.75 ^a ±0.35
8	STYN 07	นครราชสีมา	1.25 ^a ±0.35
9	STYN 10	นครราชสีมา	0.65 ^a ±0.50
10	STYS 01	สกลนคร	0.80 ^a ±0.28
11	STYS 03	สกลนคร	1.50 ^a ±1.41
12	STYU 03	อุบลราชธานี	1.00 ^a ±0.99
13	STYU 04	อุบลราชธานี	0.90 ^a ±0.42
14	STYU 07	อุบลราชธานี	1.10 ^a ±1.27

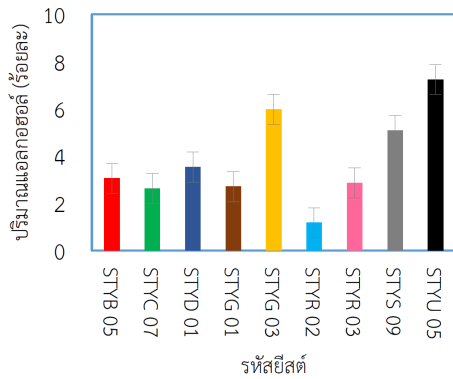
หมายเหตุ : ค่าที่มีอักษรต่างกันในแนวตั้งไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (p<0.05)

ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับการรายงานของ ชัยวัฒน์ จาติกเสถียร [15] ที่คัดแยกและจัดจำแนกราก และยีสต์จากลูกแป้ง โดยนำลูกแป้งมาเพาะเลี้ยงลงในอาหารเลี้ยงเชื้อ ลูกแป้งที่มีเชื้อ *Sacharomyces* sp. อยู่ มาก และเนื่องจากในระหว่างการทำลูกแป้งยีสต์สกุล *Sacharomyces* sp. จะเปลี่ยนน้ำตาลให้เป็น แอลกอฮอล์และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ งานวิจัยของ มนตรี เชาวน์สังเกตุ [25] ที่คัดแยกรากและยีสต์จาก ตัวอย่างลูกแป้งสุรา ข้าวหมาก น้ำข้าว อก และลูกแป้งอุ จำนวน 76 ตัวอย่าง สามารถคัดแยกรากสกุล *Rhizopus* ได้ 59 ไอโซเลต, *Amylomyces* 28 ไอโซเลต, *Mucor* 61 ไอโซเลต ยีสต์สกุล *Saccharomyces* ได้ 79 ไอโซ เลต และยีสต์ที่สร้างเส้นใย (Fillamentous yeast) 55 ไอโซเลต เมื่อใช้รากสกุล *Amylomycea* MM – 136 กับ ยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* MS50 ในการหมัก สาโทจะทำให้สาโทที่ได้มีปริมาณเอทานอลสูงร้อยละ 15 มีปริมาณกรดต่ำเท่ากับร้อยละ 4.6 และใช้เวลาใน การหมักน้อยกว่าการใช้ลูกแป้งสุราหมักสาโท งานวิจัย ของสิรินทรเทพ ภักดีสุภผล [26] ศึกษาการหมักข้าว หมากด้วยเชื้อ อบริสุทธิ พบว่า จะมียีสต์สกุล *Saccharomyces* sp. ซึ่งสามารถเปลี่ยนน้ำตาลในข้าว หมากเป็นแอลกอฮอล์ สอดคล้องกับวิจัยของเบญจพร บัวบาน [27] ที่ได้ทำการศึกษายีสต์ในลูกแป้งข้าวหมาก ในประเทศไทย จากการศึกษาพบเชื้อยีสต์สกุล *Saccharomycopsis* sp. ซึ่งเมื่อเพาะเลี้ยงในอาหาร เหลว พบว่า การผลิตเอาน้ำสูงสุดเมื่อเจริญอยู่ในระยะ คงที่ การควบคุมพีเอชของน้ำหมักให้คงที่ในสภาพที่เป็น กรดอ่อน ทำให้เชื้อยีสต์สามารถเจริญได้ดี ผลิตเอาน้ำ ได้สูง และ sukhumvasi et al. [28] ได้รายงานว่ายีสต์ *S. fibuligera* ที่แยกจากลูกแป้งมีความสามารถในการ ผลิตเอาน้ำแอลกอฮอล์นอกเซลล์มาย่อยแป้งได้และ สอดคล้องกับการทดลองสมพร สนิธรา [16] ที่ใช้ยีสต์ เหล่านี้ในการทดสอบการสร้างสารย่อยแป้งและพบว่ามี ลักษณะการย่อยแป้งที่ดี อย่างไรก็ตามอัตราส่วน

ระหว่างเส้นผ่าศูนย์กลางของบริเวณวงใสและเส้นผ่าน ศูนย์กลางของโคโลนีอาจแตกต่างกันบ้าง ขึ้นอยู่กับ อาหารที่ใช้ในการเลี้ยงยีสต์

3.3.2 การผลิตแอลกอฮอล์

การทดสอบความสามารถในการผลิตแอลกอฮอล์ เบื้องต้นพิจารณาจากความสามารถในการสร้างแก๊สใน อาหารเหลว YPD ที่มีกลูโคสร้อยละ 2 (น้ำหนักโดย ปริมาตร) ที่อุณหภูมิห้อง (30 ± 2 องศาเซลเซียส) เวลา 48 ชั่วโมง พบว่า ยีสต์จำนวน 25 ไอโซเลต ได้แก่ รหัส STYB 01, STYB 05, STYC 01, STYC 03, STYC 07, STYD 01, STYD 03, STYD 04, STYG 01, STYG 03, STYG 05, STYK 01, STYM 02, STYN 02, STYN 03, STYN 09, STYR 02, STYR 03, STYS 01, STYS 02, STYS 03, STYS 04, STYS 05, STYS 09, STYU 05 มีความสามารถในการสร้างแก๊ส ได้ตั้งแต่ 0.2–5.0 เซนติเมตร จึงคัดเลือกยีสต์ที่ให้ปริมาณแก๊สสูงสุด 9 ไอโซเลต ได้แก่ รหัส STYB 05, STYC 07, STYD 01, STYG 01, STYG 03, STYR 02, STYR 03, STYS 09, STYU 05 โดยมีปริมาณแก๊ส 3.95–5.0 เซนติเมตร (ไม่ แสดงข้อมูล) เมื่อวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่า ไม่มีความ แตกต่างกัน จึงทดสอบความสามารถในการสร้าง แอลกอฮอล์ในอาหารเหลว YPD ในขั้นตอนต่อไป การ ผลิตแอลกอฮอล์ในอาหารเหลว YPD ที่มีกลูโคสร้อยละ 2 (น้ำหนักโดยปริมาตร) ที่อุณหภูมิห้อง (30 ± 2 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ผลการทดลอง พบว่า ยีสต์ทั้ง 9 ไอโซเลต สามารถผลิตแอลกอฮอล์ตั้งแต่ ร้อย ละ 1.19–7.24 โดยยีสต์รหัส STYU 05 สามารถผลิต แอลกอฮอล์ได้มากที่สุด เท่ากับร้อยละ 7.24 รองลงมา คือ รหัส STYG 03 เท่ากับร้อยละ 5.98 และยีสต์รหัส STYR 02 มีความสามารถในการผลิตแอลกอฮอล์น้อย ที่สุด เท่ากับร้อยละ 1.18 เมื่อวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า มี ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ที่ ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (แสดงดังรูปที่ 4)



รูปที่ 4 ปริมาณแอลกอฮอล์ของยีสต์ที่คัดแยกได้จาก
ลูกแป้ง

การทดสอบความสามารถในการสร้างเอทิลแอลกอฮอล์ของยีสต์มีค่าตั้งแต่ร้อยละ 1.19–7.24 ยีสต์รหัส STYU 05 สามารถผลิตแอลกอฮอล์ได้มากที่สุด เนื่องจาก เป็นยีสต์ที่สามารถเปลี่ยนแปลงน้ำตาลกลูโคสในอาหารเลี้ยงเชื้อเป็นเอทิลแอลกอฮอล์ได้ดีที่สุดจากกระบวนการหมักแบบมีออกซิเจนน้อย จากผลการทดลองถึงแม้ว่าร้อยละของเอทิลแอลกอฮอล์ที่ได้จะไม่สูงมากนักที่เวลาการหมัก 48 ชั่วโมง อาจเนื่องจากปฏิกิริยาการหมักของยีสต์ทั้ง 9 ไอโซเลตยังไม่หยุด โดยสังเกตได้จากฟองแก๊สที่ยังผุดขึ้นจากน้ำหมักตลอดเวลา แต่เนื่องจากการทดลองนี้เป็นเพียงการศึกษาเบื้องต้นถึงความสามารถในการหมักเอทิลแอลกอฮอล์ของยีสต์ดังที่กล่าวมาแล้ว จึงหยุดปฏิกิริยาการหมักโดยการแยกเซลล์ออกจากน้ำหมักที่ 48 ชั่วโมงเท่านั้น แต่หากมีการเพิ่มเวลาของการหมักมากขึ้นและจัดสภาวะการหมักให้เหมาะสมกับยีสต์แต่ละไอโซเลตแล้ว คาดว่าร้อยละของเอทิลแอลกอฮอล์อาจจะสูงกว่าที่ได้จากการทดลองนี้ ซึ่งในอนาคตหากมีการศึกษาทดลองต่อไปโดยจัดสภาวะให้เหมาะสมกับแต่ละไอโซเลตแล้วคาดว่ายีสต์เหล่านี้อาจมีความสามารถในการหมัก เอทิลแอลกอฮอล์ได้สูงขึ้น ซึ่งน่าจะเป็นการดีต่อการพัฒนาอุตสาหกรรมการหมักแอลกอฮอล์เพื่อเป็นเชื้อเพลิงที่ไม่ต้องคำนึงถึงกลิ่นและรสของเอทิลแอลกอฮอล์เหมือนกับการหมักเอทิลแอลกอฮอล์เพื่อนำไปผลิตสุรา

3.4 การศึกษาคุณสมบัติของราในการย่อยแป้ง

ทดสอบความสามารถในการสร้างเอนไซม์ย่อยแป้งของราบนอาหาร PDA ที่มี Starch Soluble ร้อยละ 1 (น้ำหนักโดยปริมาตร) ประสิทธิภาพในการย่อยแป้งเปรียบเทียบได้จากบริเวณที่แป้งถูกย่อย โดยการเทปกับราด้วยสารละลายไอโอดีนในบริเวณที่มีแป้งจะถูกย่อยจะเห็นเป็นบริเวณใส (แสดงดังตารางที่ 5)

ตารางที่ 5 ความสามารถในการย่อยแป้งของราที่คัดแยกได้จากลูกแป้ง

ลำดับ	รหัส	แหล่ง	ดัชนีวงใส
1	STMB 01	หนองบัวลำภู	9.0 ^{de} ±1.41
2	STMC 02	ชัยภูมิ	2.5 ^{ab} ±0.78
3	STMC 03	ชัยภูมิ	5.0 ^{ab} ±1.41
4	STMG 02	ศรีสะเกษ	5.0 ^{abc} ±1.41
5	STMD 03	อุดรธานี	3.5 ^{ab} ±2.12
6	STMD 04	อุดรธานี	11.0 ^{ef} ±1.41
7	STMK 02	ขอนแก่น	1.5 ^a ±0.78
8	STMK 03	ขอนแก่น	2.5 ^{ab} ±0.78
9	STMN 02	นครราชสีมา	3.0 ^{ab} ±1.41
10	STMM 01	มหาสารคาม	6.0 ^{bcd} ±1.41
11	STMR 01	ร้อยเอ็ด	11.5 ^{ef} ±2.12
12	STMR 03	ร้อยเอ็ด	4.5 ^{ab} ±0.78
13	STMR 05	ร้อยเอ็ด	13.0 ^f ±2.83
14	STMU 02	อุบลราชธานี	8.5 ^{cde} ±2.12
15	STMU 03	อุบลราชธานี	5.5 ^{abc} ±2.12

หมายเหตุ : ค่าที่มีอักษรต่างกันในแนวตั้งไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p < 0.05$)

สอดคล้องกับงานวิจัยของอัจฉริยา ชมเชย และ พสุ ปรามอกซ์ชน [29] คัดแยกได้จำนวน 66 ไอโซเลตจากลูกแป้ง 13 แห่ง พบว่า มีราเกิดวงใสการย่อยแป้งบนอาหารเลี้ยงเชื้อ 19 ไอโซเลต (ขนาดวงใส 5.16-0.90 เซนติเมตร) โดยราที่พบส่วนใหญ่มีสกุล คือ *Rhizopus* และ *Amylomyces* และงานวิจัยของอรุณี ทรัพย์เจริญเลิศ [30] พบราที่มีความสามารถในการย่อยแป้งจำนวน 15 ไอโซเลต โดยมี 2 รหัสคือ CMW-M5 และ CMW-M5

ย่อยแบ่งเป็นน้ำตาลได้ความเข้มข้นสูง และเหมาะสมในการย่อยแบ่งเพื่อผลิตเอทานอล ซึ่งการย่อยแบ่งของรามีความแตกต่างจากยีสต์ ทั้งนี้เนื่องจากราใช้อัตราการเจริญสูงกว่ายีสต์ ในขณะที่ราแต่ละกลุ่มมีอัตราการเจริญไม่เท่ากัน ดังนั้นจึงมีความสามารถสร้างเอนไซม์ต่างกันด้วย

4. สรุป

จากผลการทดลองสามารถคัดแยกยีสต์จากลูกแบ่งจำนวน 68 ไอโซเลต โดยเป็นยีสต์ที่มีรูปร่างกลมจำนวน 11 ไอโซเลต รูปร่างรีจำนวน 22 ไอโซเลต รูปร่างทรงกระบอกจำนวน 18 ไอโซเลต รูปร่างมะนาวฝรั่งจำนวน 16 ไอโซเลต และราจำนวน 32 ไอโซเลต จัดจำแนกเป็น 6 สกุล ได้แก่ *Alternaria* จำนวน 7 ไอโซเลต *Aspergillus* จำนวน 16 ไอโซเลต *Amylomyces* จำนวน 4 ไอโซเลต *Penicillium* จำนวน 4 ไอโซเลต และ *Rhizopus* จำนวน 1 ไอโซเลต ราส่วนใหญ่อยู่ในสกุล *Aspergillus* จำนวน 16 ไอโซเลต รองลงมา คือ *Alternaria* จำนวน 7 ไอโซเลต *Amylomyces* จำนวน 4 ไอโซเลต *Penicillium* จำนวน 4 ไอโซเลต และ *Rhizopus* จำนวน 1 ไอโซเลต ผลการจัดจำแนกรากจากตัวอย่างลูกแบ่งแสดงให้เห็นว่า ร้อยละของสกุลราที่พบมากที่สุดคือ *Aspergillus* เท่ากับร้อยละ 50 รองลงมาคือ *Alternaria* เท่ากับร้อยละ 21.88, *Amylomyces* เท่ากับร้อยละ 12.5, *Penicillium* เท่ากับร้อยละ 12.5 และ *Rhizopus* เท่ากับร้อยละ 3.12 โดยสกุล *Aspergillus* พบในลูกแบ่งจากจังหวัดชัยภูมิ อุตรธานี ศรีสะเกษ ขอนแก่น นครราชสีมา และมหาสารคาม สกุล *Alternaria* พบในลูกแบ่งจังหวัดหนองบัวลำภู อุตรธานี ขอนแก่น ร้อยเอ็ด สกลนคร และอุบลราชธานี สกุล *Amylomyces* พบในลูกแบ่งจังหวัดหนองบัวลำภู ชัยภูมิ ร้อยเอ็ด และสกลนคร และสกุล *Penicillium* พบในลูกแบ่งจังหวัดหนองบัวลำภู ร้อยเอ็ด มหาสารคาม และอุบลราชธานี สกุล *Rhizopus* ในลูกแบ่งจังหวัดอุตรธานี

ยีสต์ที่คัดแยกจากลูกแบ่ง รหัส STYB 06, STYC 05, STYN 02, STYN 07, STYS 03, STYU 03, STYU 07 มีความสามารถสร้างเอนไซม์ย่อยแบ่งได้ค่าสูง ขณะที่ยีสต์รหัสอื่นสร้างเอนไซม์ย่อยแบ่งได้น้อย (ดัชนีวงใส 0.50–0.90) และยีสต์ 54 ไอโซเลต ไม่สร้างเอนไซม์ย่อยแบ่ง การผลิตแอลกอฮอล์ในอาหารเหลว YPD ที่มีกลูโคสร้อยละ 2 (น้ำหนักโดยปริมาตร) ที่อุณหภูมิห้อง (30±2 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 48 ชั่วโมง พบว่า ยีสต์ทั้ง 9 ไอโซเลตสามารถผลิตแอลกอฮอล์ตั้งแต่ ร้อยละ 1.19–7.24 โดยยีสต์รหัส STYU 05 สามารถผลิตแอลกอฮอล์ได้มากที่สุดเท่ากับร้อยละ 7.24 รองลงมาคือ รหัส STYG 03 เท่ากับร้อยละ 5.98 และยีสต์รหัส STYR 02 มีความสามารถในการผลิตแอลกอฮอล์น้อยที่สุด เท่ากับร้อยละ 1.18

ราที่แยกจากลูกแบ่งสาโทที่มีความสามารถสร้างเอนไซม์ย่อยแบ่งได้สูงในอาหารแข็งมีแบ่งที่ละลายน้ำได้ ได้แก่ ราสกุล *Rhizopus* รหัส STMD 04 รองลงมา คือ *Penicillium* รหัส STMR 05, STYMB 01, STYMM 01, STYMU 02 สร้างเอนไซม์ย่อยแบ่งได้น้อย ได้แก่ ราสกุล *Alternaria* รหัส STYMK 03, STMD 03 และไม่สร้างเอนไซม์ย่อยแบ่ง ได้แก่ สกุล *Aspergillus* รหัส STMB 02, STMB 03, STMC 01, STMD 01, STMD 02, STMG 01, STMG 03, STK 01, STMN 01, STMM 02, STMR 02, STYR 04, STMS 01, STMS 02, STMS 03, STMU 01

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] N. Lotong, *Seed Culture of Food Fermentation and Technology Production*, Bangkok: Kasetsart University Press, 1994.
- [2] Department of Excise, *Department of Excise Regulation 1981 concerning Making and Selling Khomak*, Bangkok: Department of Excise, Ministry of Finance, 1981.
- [3] S. Limtong, S. Sintara, P. Suwannarit and N. Lotong, "Yeast Diversity in Thai Traditional

- Fermentation Starter (Loog-pang),” *Kasetsart Journal (Natural Sciences)*, vol. 36, pp. 149-158, 2002.
- [4] N.T.P. Dung, F.M. Rombouts and M.J.R. Nout, “Functionality of selected strains of moulds and yeasts from Vietnamese rice wine starters,” *Food Microbiology*, vol. 23, pp. 331-340, 2006.
- [5] N.T.P. Dung, F.M. Rombouts and M.J.R. Nout, “Development of defined mixed-culture fungal fermentation starter granulate for controlled production of rice wine,” *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, vol. 6, pp. 429-441, 2005.
- [6] N. Lotong, “Starter of Food Fermentation and Technology Production,” Bangkok: Kasetsart University Press, 1994.
- [7] J. Yodtheon, W. Chantarapanont and H. Rimkeeree, “Screening Pure Cultures by Testing Starch Hydrolysis and Alcohol Fermentation for Developing Sweeten Rice (Khaomak) Beverage,” in *Proceeding of Kasetsart University Academic Conferene*, Kasetsart University, Bangkok, 2011, pp. 1-8.
- [8] W. rattanapreedakul, “*Study of Fungi and Yeast Isolated from Look-pang in Comparison with Pure Culture of Sato Production*,” Master of Science Thesis, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, 2006.
- [9] A. Techavasonyoo, “*Isolation, Classification and Characterization of Yeasts and Molds Isolated from Loog Pang for Sato Production*,” Master of Science (Industrial Microbiology) Thesis, Chulalongkorn University, Bangkok, 2007.
- [10] A. Kunlabut, S. Porntraai and J. Sangswan, “Ethanol Production from Loog-Pang-Sato Yeast Cultivation with Molasses,” *J. Res. Unit Sci. Technol. Environ. Learning*, vol. 11, pp. 53-65, 2020.
- [11] ARx, *Taxnomic key: Microbial Root Endophytes*, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1978.
- [12] C.T. Ingold, “*The Biology of fungi*,” London: Wm Brendon & Son Ltd., 1987.
- [13] M. Watanabe, C.Y. Chen and D.E. Levin, “*Saccharomyces cerevisiae* PKC1 encodes a protein kinase C (PKC) homolog with a substrate specificity similar to that of mammalian PKC,” *J Biol Chem*, vol. 269, pp. 16829-16836, 1994.
- [14] C.J. Alexopoulos, C.W. Mims and M. Blackwell, “*Introductory Mycology*,” 4th. New York: John Wiley and Sons, Inc, 1996.
- [15] R.J. Hanin, “*Illustrated genera of Ascomycetes*,” Minnesota: The American Phytopathological Society St. Poul, 1996.
- [16] S. sinthara, “*Isolation identification and presservation of yeasts and molds from lookpang-khaomak and loopang-lao in Thailand*,” Master of Science Thesis, Kasetsart University, Bangkok, 2001.
- [17] M. Techasangkranon, “*Properties of yeasts and moulds involed in Khaomak and Satho fermentation*,” Master of Science Thesis, Kasetsart University, Bangkok, 2003.

- [18] C. Jaticasataen, "Isolation of Mold and Yeast in Look-pang Khomak," Master of Science Thesis, Kasetsart University, Bangkok, 1977.
- [19] A. Techavasonyoo, "Isolation, classification and characterization of yeasts and molds isolated from Loog Pang for Sato production," Master of Science Thesis, Chulalongkorn University, Bangkok, 2007.
- [20] A. Chanchaichaovivat and A. Utiansut, "Inhibitory efficacies of lactic acid bacteria isolated from Loog Pang KaoMark against enteropathogenic bacteria," *Journal of Research Unit on Science, Technology and Environment for Learning*, vol. 4, pp. 124–131, 2013.
- [21] W. Kanlayakrit, W. Changpha, M. Rodprapakorn and P. Sirirote, "The study of mixed culture for Thai traditional fermentation starter (Loog-Pang) production," in *Proceeding of 49th Kasetsart University Annual Conference*. Kasetsart University, Bangkok, 2012, pp. 523–531.
- [22] S. Limtong, S. Sintara, P. Suwanarit and N. Lotong, "Yeast diversity in Thai traditional fermentation starter (Loog-pang)," *Kasetsart Journal*, vol. 36, pp. 149-158, 2002.
- [23] T. Thanh, K. Willcox and O. Ghattas, "Model Reduction for Large-Scale Systems with High-Dimensional Parametric Input Space," *SIAM Journal on Scientific Computing*, vol. 30, pp. 3270-3288, 2008.
- [24] J. Sangswan and S. Looorroengsil, "Isolation of yeast from starter of wine (Sato) in Surin Province," in *Proceeding of 12th Ubon Ratchathani University National Research Conference*, Ubon Ratchathani University, Ubon Ratchathani, 2018, pp. 393–404.
- [25] M. Chosangket, "Screening of Yeast and Mold for Wine Production," Master of Science Thesis, Kasetsart University, Bangkok, 1979.
- [26] S. Pakdeesupaphon, "Khomak Production by Pure Culture," Master of Science Thesis, Kasetsart University, Bangkok, 1980.
- [27] B. Buaban, "Production and characterization of raw starch digesting amylase from *Saccharomycopsis* sp.," Master of Science Thesis, Kasetsart University, Bangkok, 2019.
- [28] J. Sukhumavasi, K. Kato and T. Harada, "Glucoamylase of a strain of *Endomycopsis fibulifera* isolated from Mold Bran (Loog-Pang) of Thailand," *J. Ferment. Technol.*, vol. 53, pp. 559-565, 1975.
- [29] A. Chomchoe and P. Pramokchon, "Screening of Microbial in Lookpang for Pure-inoculum Development in Rice Fermented Products," Master of Science Thesis, Chiang Mai Rajabhat University, Chiang Mai, 2005.
- [30] A. Sapcharoenlert, "Isolation of Mold and Yeast Isolated from Look-pang Lao," Master of Engineer Thesis, King Mongkut's Institute of Technology Thonburee, Bangkok, 2010.

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

การเพิ่มการพาความร้อนแบบธรรมชาติของแผ่นเรียบแนวดิ่งโดยการใช้ลมโคลไनों

เจษฎาภรณ์ ปริญดํากล^{1*} วีรชัย ชัยวรพฤษ² และ เสาวนิตย์ เลขวัต³

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

² คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

³ คณะโลจิสติกส์ มหาวิทยาลัยบูรพา

¹ 25/25 ถนนพุทธมณฑลสาย 4 ตำบลศาลายา อำเภอพุทธมณฑล จังหวัดนครปฐม 73170

² 50 ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร 10900

³ 169 ถนนลงหาดบางแสน ตำบลแสนสุข อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี 20131

รับบทความ 8 มิถุนายน 2564 แก้ไขบทความ 23 ธันวาคม 2564 ตอบรับบทความ 14 มีนาคม 2565

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบของการพาความร้อนแบบธรรมชาติของแผ่นเรียบแนวดิ่งจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรงขนาด 5, 6, 7, 8, 9 และ 10 กิโลโวลต์ โดยทำการทดสอบบนผิวของอุปกรณ์กำเนิดความร้อนที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนคงที่ ภายในส่วนทดลองขนาดกว้าง 1 เมตร x ยาว 1 เมตร x สูง 1.5 เมตร ขั้วอิเล็กโทรดถูกติดตั้งด้านในส่วนทดลอง โดยทำมุมตั้งฉากกับแผ่นเรียบแนวดิ่ง มีระยะห่าง 1 เซนติเมตร พิจารณาที่ความสูงแผ่นเรียบ 2 ตำแหน่ง คือ ตำแหน่งกึ่งกลางแผ่นเรียบซึ่งตรงกับขั้วอิเล็กโทรด (ตำแหน่ง A) และตำแหน่งเหนือตำแหน่งแรก 2 เซนติเมตร (ตำแหน่ง B) เพื่อศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงความดันไฟฟ้าแรงดันสูงและระยะห่างระหว่างตำแหน่งในแนวดิ่งบนแผ่นเรียบต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าแรงดันไฟฟ้าที่ 10 กิโลโวลต์ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนได้สูงสุดโดยมีอัตราส่วนการถ่ายเทความร้อนมีค่าสูงสุด 1.06 และ 1.03 ที่ตำแหน่ง A และ B ตามลำดับ และพบว่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนจะลดลงเมื่อลดค่าแรงดันไฟฟ้าน้อยลง นอกจากนี้ยังสมการทำนายค่าสัมประสิทธิ์ซึ่งแสดงประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนภายใต้อิทธิพลของแรงดันไฟฟ้าขนาด 5-10 กิโลโวลต์ ที่มีความแม่นยำได้ถูกนำเสนอในงานวิจัยนี้ด้วย ดังนั้นผลการทดลองที่ได้จากงานวิจัยนี้จะเป็นข้อมูลสำคัญในการพัฒนาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นได้ในอนาคต

คำสำคัญ : การพาความร้อนแบบธรรมชาติ; การเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน; อิเล็กโตรไฮโดรไดนามิกส์; ลมโคลไनों

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +669 6441 5459, อีเมล: jetsadaporn.pri@mahidol.edu

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

Augmentation of Natural Convection of Vertical Plate using Corona Wind

Jetsadaporn Priyadumkol^{1*} Weerachai Chaiworapuek² and Saowanit Lekhavat³

¹ Faculty of Engineering, Mahidol University

² Faculty of Engineering, Kasetsart University

³ Faculty of Logistics, Burapha University

¹ 25/25 Salaya, Phuttamonthon, Nakhon Pathom 73170

² 50 Ngamwongwan Road Ladyao, Chatuchak District Bangkok 10900

³ 169 Long Hard-Bangsaen Road Tambon Saensuk Amphoe Muang Chonburi 20131

Received 8 June 2021; Revised 23 December 2021; Accepted 14 March 2022

Abstract

This research investigated the high voltage on natural convection of a vertical flat plate from 5, 6, 7, 8, 9 and 10 kV. The experiment was carried out on a constant heat flux surface in the test section of 1 m width x 1 m length x 1.5 m height. The discharge electrode was installed inside the test section. The discharge electrode is perpendicular to the vertical plate with a distance of 1 cm. Two positions are considered: the center of plate, which corresponds to discharge electrode (position A) and the position above the first position of 2 cm (position B). The effect of high voltage and positions on the plate are considered to enhance heat transfer efficiency. The results show that high voltage of 10 kV can increase the heat transfer enhancement ratio up to 1.06 and 1.03 at position A and B, respectively. The heat transfer efficiency decreases with the decrease of the high voltage. In addition, an accurately predictive formula for the Nusselt number under 5-10 kV is also proposed in this paper. Therefore, the obtained experimental results will be important information in order to develop the higher efficiency heat exchangers in the future.

Keywords : Natural Convection; Heat Transfer Enhancement; Electrohydrodynamics; Corona Wind

** Corresponding Author. Tel.: +669 6441 5459, E-mail Address: jetsadaporn.pri@mahidol.edu*

1. บทนำ

การเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจทำให้ความต้องการใช้ไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น โดยในปี 2562 พบว่าแนวโน้มความต้องการการใช้พลังงานมีปริมาณเพิ่มขึ้นแปรผันตรงกับรายได้ประชาชาติ โดยปริมาณการใช้พลังงานในภาคขนส่ง มีความต้องการมากที่สุดร้อยละ 39 รองลงมาคือภาคอุตสาหกรรมการผลิตร้อยละ 36 สำหรับบ้านอยู่อาศัยและธุรกิจการค้ามีสัดส่วนคือร้อยละ 13 และ 8 ตามลำดับ [1] อย่างไรก็ตามแหล่งพลังงานเชื้อเพลิงที่นำมาใช้ผลิตพลังงานไฟฟ้าสำหรับภาคอุตสาหกรรม เช่น น้ำมันดิบ ก๊าซธรรมชาติ และถ่านหิน เป็นพลังงานที่ใช้แล้วหมดไปเพราะมีจำนวนจำกัด จึงจำเป็นต้องใช้พลังงานอย่างประหยัดและทำให้เกิดประสิทธิภาพมากที่สุด

การผลักดันนโยบายไทยแลนด์ 4.0 (Thailand 4.0) ที่มุ่งเน้นพัฒนาภาคอุตสาหกรรมที่มีอยู่โดยการเพิ่มมูลค่าด้วยเทคโนโลยีขั้นสูง หรือเรียกว่าอุตสาหกรรมแห่งอนาคตนั้น พบว่าอุตสาหกรรมกลุ่มเป้าหมายหลายประเภทเชื่อมโยงกับกระบวนการถ่ายเทความร้อน เช่น อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์อัจฉริยะ (Smart Electronics) การเกษตรและเทคโนโลยีชีวภาพ (Agriculture and Biotechnology) และอุตสาหกรรมหุ่นยนต์ (Robotics) เพื่อการอุตสาหกรรม เป็นต้น [2] การเพิ่มประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนหรือการถ่ายเทความร้อนของอุปกรณ์ให้มีค่าสูงขึ้นนั้น เป็นหนึ่งในวิธีที่สำคัญอย่างยิ่งที่สามารถช่วยประหยัดการใช้พลังงานได้

การเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนแบ่งออกเป็น 2 วิธี คือวิธีพาสซีฟ (Passive Method) และวิธีแอคทีฟ (Active Method) โดยหลักการของวิธีพาสซีฟคือการปรับปรุงพื้นผิวหรือโครงสร้างภายใน โดยไม่จำเป็นต้องใช้พลังงานจากภายนอก เช่น การทำให้พื้นผิวมีความขรุขระ (Rough Surfaces) ขณะที่วิธีแอคทีฟ คือการนำแหล่งพลังงานจากภายนอกเข้าไปเพิ่มการถ่ายเทความร้อน เช่น อุปกรณ์ทางกล และอุปกรณ์ทางไฟฟ้า

ทำให้ความต้านทานทางความร้อน (Thermal Resistance) ลดลง ส่งผลให้เพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้มากขึ้น [3]

ปัจจุบันสนามไฟฟ้า (Electric Field) ถูกนำมาประยุกต์ใช้กับระบบถ่ายเทความร้อน (Electrohydrodynamic, EHD) ในงานอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากทำให้เกิดลมโคโลน่า (Corona Wind) ที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อน จุดเด่นของระบบนี้คือ ไม่มีชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่, ใช้พลังงานขับเคลื่อนต่ำ และทำงานได้เงียบมากกว่าการติดตั้งพัดลมแบบหมุน นอกจากนี้การระบายความร้อนในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีแนวโน้มพัฒนาให้มีขนาดเล็กลงแต่มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น ส่งผลให้เกิดฟลักซ์ความร้อนมากขึ้น เช่น หลอดไฟ LED และคอมพิวเตอร์ เป็นต้น การจัดการความร้อนในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จึงมีความสำคัญเพราะส่งผลต่อความปลอดภัยและเสถียรภาพในการใช้งานของอุปกรณ์ [4]-[6]

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาพฤติกรรมการแลกเปลี่ยนความร้อนของตำแหน่งต่างๆบนแผ่นเรียบที่ช่วงแรงดันไฟฟ้าต่างกัน นอกจากนี้ได้สร้างสมการทำนายค่าสัมประสิทธิ์เมื่อใช้อิเล็กโทรดทำมุมตั้งฉากกับแผ่นร้อนแนวดิ่งที่ฟลักซ์ความร้อนคงที่

1.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสนามไฟฟ้าต่อการถ่ายเทความร้อน

การเคลื่อนที่ของอากาศที่เกิดจากแรงดันโคโลน่าได้รับความสนใจในการศึกษาอิทธิพลของแรงดันโคโลน่าต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน [7] ในปี 1995 Owsenek et al. [8] ได้ศึกษาการพาความร้อนแบบธรรมชาติของแผ่นเรียบแนวนอนภายใต้สนามไฟฟ้าของขั้วอิเล็กโทรด พบว่าการเกิดโคโลน่าดีสชาร์จสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนได้เพิ่มขึ้น 25 เท่า และประสิทธิภาพลดลงเมื่อระยะห่างของขั้วอิเล็กโทรดและแผ่นเรียบแนวนอนลดลง ปี 2016 Shin et al. [9] ศึกษาลมโคโลน่าเพื่อระบายความร้อน

ออกจากแผ่น LED โดยสอบเทียบการทดลองจริงและการจำลองโดย Computational Fluid Dynamics (CFD) แรงดันไฟฟ้าประจุบวกขนาด 30 kV ถูกใช้เพื่อสร้างความเข้มสนามไฟฟ้า ผลการทดลองพบว่าเครื่องต้นแบบมีประสิทธิภาพระบายความร้อนเพิ่มขึ้นร้อยละ 150 เมื่อเทียบกับการพาความร้อนตามธรรมชาติที่ขนาดเดียวกัน ปี 2017 Tsui et al. [10] ได้ทำการทดลองผลการถ่ายเทความร้อนของลมโคลโน่า ที่แรงดันไฟฟ้าระหว่าง 6-19 kV ผลการศึกษาพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น 2.6-4.8 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับการพาความร้อนแบบธรรมชาติ โดยประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นเมื่อแรงดันโคลโน่ามีค่าสูงขึ้น นอกจากนั้นได้ศึกษาการดิสชาร์จของแผ่นบาง พบว่าโคลโน่าดิสชาร์จจะเกิดขึ้นที่มุมข้างของแผ่นบางอย่างชัดเจน ขณะบริเวณกลางแผ่นเกิดเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ในปีเดียวกัน Lee and Lau [11] แสดงประสิทธิภาพการระบายความร้อนบนพื้นผิวแนวนอนเมื่อช่วงแรงดันไฟฟ้า 9-12 kV โดยใช้ประจุบวกและประจุลบที่ค่าความชื้นต่างๆ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงสุดเกิดขึ้นที่แรงดันไฟฟ้าที่ 12 kV และพบว่าเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้นสูงขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะลดลงทั้งประจุบวกและประจุลบ ต่อมาในปี 2020 Tsui et al. [12] ออกแบบให้มีการสั่นของขั้วอิเล็กโทรดเพื่อศึกษาการถ่ายเทความร้อน พบว่า การสั่นของขั้วอิเล็กโทรดมีผลเมื่อใช้กับแรงดันไฟฟ้าปริมาณไม่สูงมากนัก จะทำให้การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นได้

การศึกษาการใช้เข็มอิเล็กโทรดที่วางเรียงกันหลายเข็มบนแผงระบายความร้อน [13], [14] อาทิ ปี 1997 Owsenek et al. [13] ศึกษาการแลกเปลี่ยนความร้อนของแผ่นแนวนอน เปรียบเทียบระหว่างอิเล็กโทรดตัวเดียวกับอิเล็กโทรดหลายตัว พบว่า ผลของการแลกเปลี่ยนความร้อนเมื่อใช้อิเล็กโทรดหลายตัวของอิเล็กโทรดตัวเดียว มีการแลกเปลี่ยนความร้อนที่น้อย

กว่าเมื่อติดตั้งอิเล็กโทรดตัวเดียว ในปี 2009 Huang et al. [14] ทำการทดลองการถ่ายเทความร้อนร่วมกับสนามไฟฟ้า (Electrohydrodynamics, EHD) ของแผงระบายความร้อน โดยได้ศึกษาการจัดเรียงเข็มอิเล็กโทรดจำนวน 4 แบบคือติดตั้ง 4, 6, 16 และ 60 เข็ม ประสิทธิภาพมีค่าลดลงเมื่อแผงระบายความร้อนมีปริมาณความร้อนเพิ่มขึ้น

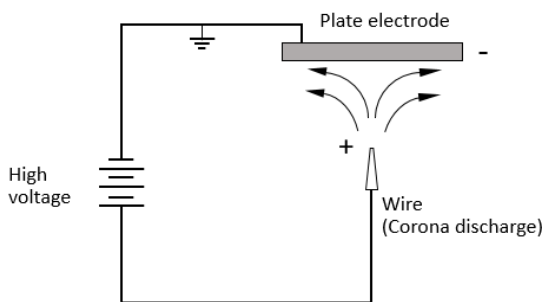
นอกจากนั้นได้มีการศึกษาการพาความร้อนแบบบังคับ Molki and Bhamidipati [15] ทดสอบค่าเรย์โนลด์ระหว่าง 2,500 ถึง 13,000 ภายในติดตั้งขั้วอิเล็กโทรดแบบบาง ระบบสร้างแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 0-10.5 kV พบว่าที่แรงดันไฟฟ้า 10.5 kV มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงที่สุดโดยเพิ่มจากไม่มีแรงดันไฟฟ้าร้อยละ 23 สำหรับค่าเรย์โนลด์ 2,500 และร้อยละ 14 สำหรับค่าเรย์โนลด์ระหว่าง 13,000 พบว่าการถ่ายเทความร้อนลดลง เมื่อค่าเรย์โนลด์เพิ่มสูงขึ้น ในปี 2008 Go et. al [16] ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของการพาความร้อนแบบบังคับโดยใช้โคลโน่าดิสชาร์จ ปัจจัยที่มีผลได้แก่ขนาดของกระแสโคลโน่า ฟลักซ์ความร้อน การจัดเรียงอิเล็กโทรด และระยะห่างอิเล็กโทรด พบว่าเมื่อชั้นของไหลเปลี่ยนแปลงที่ผิวความร้อนมากขึ้นจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นร้อยละ 200

งานวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่เป็นการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนภายใต้อิทธิพลของโคลโน่าดิสชาร์จที่ช่วงแรงดันไฟฟ้าค่าต่างๆ อย่างไรก็ตามความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าและการระบายความร้อนในตำแหน่งข้างเคียงขั้วอิเล็กโทรดยังมีข้อมูลน้อยมาก เมื่อเปรียบเทียบกับผลกระทบของตำแหน่งตรงขั้วอิเล็กโทรดพอดี

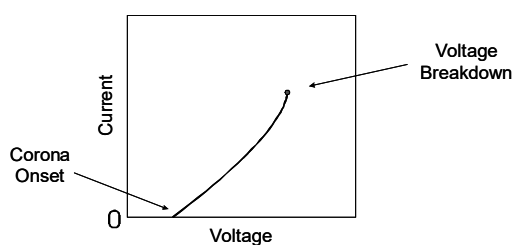
1.2 กลไกการเกิดโคลโน่าดิสชาร์จ

สำหรับการเกิดโคลโน่าดิสชาร์จ (Corona Discharge) ในอิเล็กโทรดแบบเข็มและแผ่นราบ

(Needle- Plate Electrodes) เริ่มจากการดิสชาร์จที่ปลายเข็ม (Corona Electrode) มีหัวอิเล็กโทรดที่มีศักย์ไฟฟ้าสูงกว่า ไหลผ่านอากาศที่มีศักย์ไฟฟ้าเป็นกลาง และเกิดการแตกตัวของไอออนอากาศที่สร้างขึ้นรอบๆ หัวอิเล็กโทรด แล้วเคลื่อนไปยังแผ่นราบ (Plate Electrode) ระหว่างทางไอออนหนักจะกระทบกับโมเลกุลของอากาศเพื่อถ่ายเทแรงเฉื่อย (Inertia Force) ไอออนนี้จะถูกเร่งภายในสนามไฟฟ้าและถ่ายโอนพลังงานไปยังอนุภาคโดยรอบ และผลที่เกิดขึ้นทำให้เกิดการไหลลักษณะหมุนวนระหว่างหัวไฟฟ้าสองหัว เรียกว่าลมโคโลน่า (Colona Wind) ดังแสดงในรูปที่ 1 [4], [16]-[18]



รูปที่ 1 ลักษณะการเคลื่อนที่ของลมโคโลน่า



รูปที่ 2 คุณลักษณะกระแสกับแรงดันของโคโลน่า ดิสชาร์จ [20]

โคโลน่าดิสชาร์จจะแสดงในรูปของคุณลักษณะกระแสกับแรงดัน (Voltage-Current Characteristics) ดังแสดงในรูปที่ 2 เมื่อแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าแรงดันตั้งต้นโคโลน่า (Corona Onset Voltage) กระแสโคโลน่า

(Corona Current) อยู่ในระดับระดับไมโครแอมป์ (μA) จะค่อยๆ เพิ่มขึ้นตามแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น และเกิดสปาร์ก (Spark) เมื่อแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหัวอิเล็กโทรดเข็มมีค่าสูงสุด (Voltage Breakdown) สามารถเห็นเป็นประกายโคโลน่า [19]

โคโลน่าดิสชาร์จแบบเข็มและแผ่นราบอยู่ภายใต้สมการอนุพันธ์พื้นฐานของไฟฟ้าสถิต, การไหลของของไหลและการถ่ายเทความร้อน แรงระหว่างของไหลและสนามไฟฟ้า หรือ Corona Wind หรือ Electrohydrodynamic (EHD) ปรากฏในสมการอนุกรมโมเมนต์

$$\vec{F} = q\vec{E} - \frac{1}{2}|\vec{E}|^2 \nabla \epsilon + \frac{1}{2} \nabla \left(\rho \frac{\partial \epsilon}{\partial \rho} |\vec{E}|^2 \right) \quad (1)$$

เทอมแรกคือแรงเนื่องจากประจุ (Coulomb Force) เป็นผลจากประจุอิสระในของไหลกับสนามไฟฟ้า และมีผลอย่างมากในกรณีการเกิด Corona Wind เทอมสองคือแรงที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของไดอิเล็กตริก (ϵ) และเทอมสามคือแรงจากความไม่สม่ำเสมอของสนามไฟฟ้า [13]

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 การออกแบบการทดลอง

ส่วนการทดลองขนาดกว้าง 1 เมตร × ยาว 1 เมตร × สูง 1.5 เมตร ทำมาจากพลาสติกใส ด้านล่างสูงจากพื้น 15 เซนติเมตร เพื่ออากาศสามารถเคลื่อนที่จากด้านล่างไหลขึ้นด้านบนตามหลักการพาความร้อนแบบธรรมชาติ สำหรับห้องที่ทำการทดลองติดตั้งเครื่องปรับอากาศควบคุมอุณหภูมิเท่ากับ 25 ± 1 องศาเซลเซียส และมีความชื้นสัมพัทธ์ 50 ± 3 %RH ขณะที่ด้านในเป็นส่วนการทดลองได้ติดตั้งแผ่นอลูมิเนียมขนาด กว้าง 0.2 เมตร × สูง 0.9 เมตร กระแสไฟฟ้าที่เข้าแผ่นกำเนิดความร้อนถูกควบคุมด้วยอุปกรณ์ควบคุมกระแสไฟฟ้าให้มีค่า 1.2 แอมแปร์ โดยค่ากระแสจะถูกวัดค่าโดยอุปกรณ์วัดกระแสไฟฟ้า เพื่อคำนวณ

กำลังไฟฟ้าของแผ่นกำเนิดความร้อนที่มีค่าต่างศักย์ไฟฟ้าตกคร่อม สมมติให้มีค่าคงที่เท่ากับ 220 โวลต์ตลอดทุกกรณีในการทดลอง

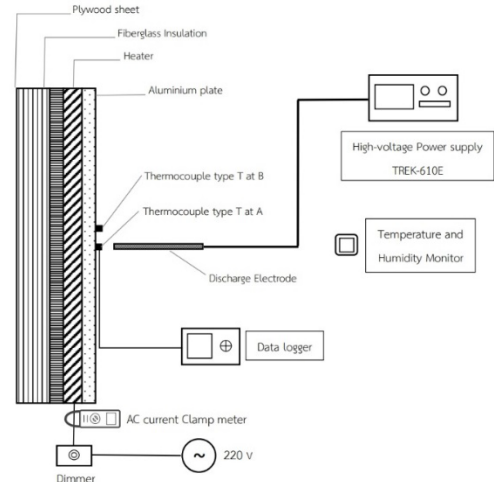
การทดลองนี้ได้ติดตั้งฉนวนกันความร้อนหรือไฟเบอร์กลาสขนาดเท่ากับแผ่นกำเนิดความร้อนวางที่ด้านหลังเพื่อลดการสูญเสียความร้อน โดยใช้อุปกรณ์วัดอุณหภูมิแบบหัวเปลี่ยน ชนิด k จำนวน 1 ตัว มีค่าความไม่แน่นอนของการวัดอยู่ที่ร้อยละ ± 1 ติดที่ด้านหลังตำแหน่งกึ่งกลาง เพื่อใช้ในการคำนวณความร้อนสูญเสีย

อุณหภูมิผิวของแผ่นอลูมิเนียมถูกวัดโดยอุปกรณ์วัดอุณหภูมิแบบบาง ชนิด T จำนวน 2 ตัว มีค่าความไม่แน่นอนของการวัดอยู่ที่ร้อยละ ± 0.75 โดยตัวแรกติดตั้งที่ความสูงจากขอบด้านล่าง 45 เซนติเมตร (ความสูงครึ่งหนึ่งของแผ่นอลูมิเนียม) ซึ่งตรงกับความสูงของขั้วอิเล็กทรอนิกส์ จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรง (ตำแหน่ง A) ขณะที่ตัวที่สองติดตั้งเหนือตัวแรก 2 เซนติเมตร (ตำแหน่ง B) ข้อมูลอุณหภูมิของผิวถูกบันทึกโดยเครื่องบันทึกข้อมูล (Data logger ยี่ห้อ Graphtec รุ่น Midi LOGGER GL240) ซึ่งสามารถเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรง (Trek รุ่น 610E High-Voltage) มีช่วงความดันที่ปรับได้ 1-10 กิโลโวลต์

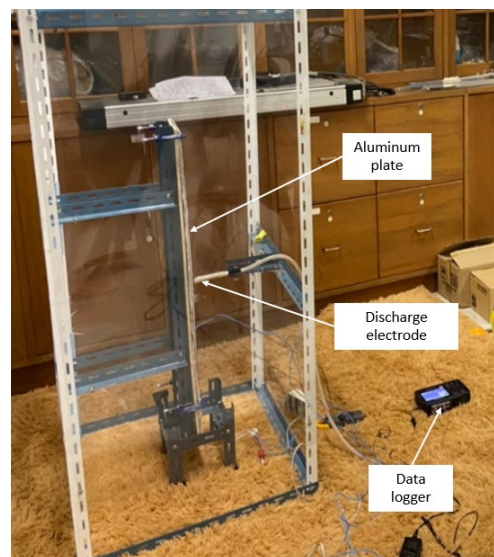
ขั้วอิเล็กทรอนิกส์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรงถูกติดตั้งโดยห่างจากผิวแผ่นอลูมิเนียมในแนวตั้งฉาก มีระยะ 1 เซนติเมตร โดยแผ่นอลูมิเนียมวางสูงจากพื้นด้านล่างระยะ 15 เซนติเมตร บริเวณด้านหลังแผ่นอลูมิเนียมติดกับแผ่นกำเนิดความร้อน แผ่นฉนวนกันความร้อน และแผ่นยึด ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3 และ 4

การทดลองแบ่งเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นการถ่ายเทความร้อนแบบธรรมชาติที่ไม่มีอิทธิพลของสนามไฟฟ้ารบกวน เริ่มต้นเปิดแผ่นกำเนิดความร้อนเพื่อสร้างสภาวะอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่คงที่ และรอให้อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆภายในส่วน

ทดลองเข้าสู่สมดุล จากนั้นทำการบันทึกข้อมูลอุณหภูมิเป็นเวลา 10 นาที ที่อัตราการบันทึกข้อมูลของเครื่องบันทึกข้อมูล 0.5 วินาทีต่อข้อมูล และส่วนที่สองของการทดลองเป็นการถ่ายเทความร้อนแบบธรรมชาติที่มีอิทธิพลของสนามไฟฟ้า โดยทำการเปิดใช้แรงดันไฟฟ้ารูปแบบต่อเนื่อง โดยควบคุมสภาวะต่างๆให้เหมือนส่วนแรก และบันทึกข้อมูลต่ออีก 10 นาที ทำการทดลองซ้ำ 3 รอบในแต่ละกรณีเพื่อยืนยันความถูกต้องของการทดลอง



รูปที่ 3 แผนภาพส่วนทดลองจากมุมมองด้านข้าง



รูปที่ 4 ส่วนทดลองจากมุมมองด้านข้าง

2.2 การประมวลผลข้อมูล

กำลังไฟฟ้าที่เข้าสู่อุปกรณ์กำเนิดความร้อน, Q สามารถคำนวณได้จากกระแสไฟฟ้า, I และความต่างศักย์ไฟฟ้า, V ดังแสดงในสมการดังนี้

$$Q = IV = qA_s \quad (2)$$

เมื่อ q และ A_s คืออัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ และพื้นที่ผิวการถ่ายเทความร้อน

อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ หรือฟลักส์ความร้อนสุทธิ (q_{eff}) มีค่าน้อยกว่าฟลักส์ความร้อนที่เตรียมจากแผ่นทำความร้อนเนื่องจากมีความร้อนสูญเสียความร้อนด้านหลังแผ่นทำความร้อน โดยสามารถหาฟลักส์ความร้อนที่สุทธิ

$$q_{eff} = q - q_{loss} \quad (3)$$

ความร้อนสูญเสียด้านหลังแผ่นทำความร้อนสามารถหาได้จาก [12]

$$q_{loss} = k\Delta T / \Delta x \quad (4)$$

เมื่อ k สัมประสิทธิ์การนำความร้อนแผ่นของฉนวนไฟเบอร์กลาสและไม้อัด ΔT ผลต่างของอุณหภูมิ และ Δx คือ ระยะห่างของตำแหน่งทั้งสอง โดยกำหนดให้ ขอบด้านข้างมีการสูญเสียความร้อนและผลการแผ่รังสีความร้อนน้อยมากจึงไม่ถูกนำมาพิจารณาในที่นี้

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน, h หาได้จากอัตราการถ่ายเทความร้อนสุทธิต่อหน่วยพื้นที่ อุณหภูมิผิวของอุปกรณ์กำเนิดความร้อน, T_s และอุณหภูมิอากาศโดยรอบส่วนทดลอง, T_∞

$$h = q_{eff} / (T_s - T_\infty) \quad (5)$$

สำหรับคุณสมบัติของอากาศที่ใช้ในสมการต่างๆ สามารถหาได้จากอุณหภูมิจากฟิล์ม, T_f ซึ่งคำนวณจากการ

เฉลี่ยอุณหภูมิผิวของอุปกรณ์และอุณหภูมิอากาศโดยรอบส่วนทดลอง [21]

$$T_f = \frac{T_s - T_\infty}{2} \quad (6)$$

เลขนัสเซลล์, Nu สามารถคำนวณได้จากสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ความยาวสำคัญของอุปกรณ์กำเนิดความร้อน, L_c และสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของลูมิเนียม, k [21]

$$Nu = \frac{hL_c}{k} \quad (7)$$

เมื่อระบบเกิดสนามไฟฟ้าที่ชั่วอเล็กโตรด จะมีการนิยามตัวแปรไร้หน่วยแสดงการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเมื่อมีแรงดันไฟฟ้ารบกวน, h_{ec} และไม่มีแรงดันไฟฟ้ารบกวน, h_{nc} ตัวแปรไร้หน่วยนี้จะถูกเรียกว่าอัตราส่วนการถ่ายเทความร้อน, η [22]

$$\eta = \frac{h_{ec}}{h_{nc}} \quad (8)$$

2.3 การตรวจสอบความน่าเชื่อถือในการทดลอง

งานวิจัยนี้แสดงค่าตัวเลขที่กรณีไม่มีแรงดันไฟฟ้ารบกวนในกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน เทียบกับทฤษฎีของการพาความร้อนแบบธรรมชาติของ Churchill and Chu [24] ความสัมพันธ์ระหว่างเลขนัสเซลล์, เลขพรีน့်เทิล, Pr และเลขเรย์ลี, Ra คือ

$$Nu = \left\{ 0.825 + \frac{0.387Ra_L^{1/6}}{[1 + (0.492 / Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \quad (9)$$

เลขเรย์ลีเป็นตัวแปรที่ใช้ในการอธิบายอัตราส่วนของแรงลอยตัว แรงหนืดและเลขพรีน့်เทิล

$$Ra_L = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L_c^3 \text{Pr}}{\nu^2} \quad (10)$$

เมื่อ g คือ ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก, β คือ สัมประสิทธิ์การขยายตัวของปริมาตรของของไหล, L_c คือความยาวสำคัญของอุปกรณ์กำเนิดความร้อน และ ν คือ ความหนืดจลน์

ร้อยละของความคลาดเคลื่อนของผลการทดลองเทียบกับทฤษฎีสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (11)

$$\%Error = \frac{Nu_{exp} - Nu_{theory}}{Nu_{theory}} \times 100 \quad (11)$$

โดย Nu_{exp} คือเลขนัสเซลท์ที่ได้จากการทดลอง และ Nu_{theory} คือเลขนัสเซลท์ที่ได้จากการทฤษฎี

จากตารางที่ 1 พบว่าค่าร้อยละของความคลาดเคลื่อนของเลขนัสเซลท์จากการทดลองเทียบกับทฤษฎีของ Churchill and Chu [24] มีค่าเท่ากับ 9.15 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสอดคล้องกับการสอบเทียบกับงานวิจัยของ Tsui et al [12] จากผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าการติดตั้งอุปกรณ์ทดลองในงานวิจัยนี้มีความน่าเชื่อถือที่จะทำการทดลองเกี่ยวกับแรงดันโคโลนาต่อไป

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบค่า Nu จากการทดลองและคำนวณจากทฤษฎี Churchill and Chu

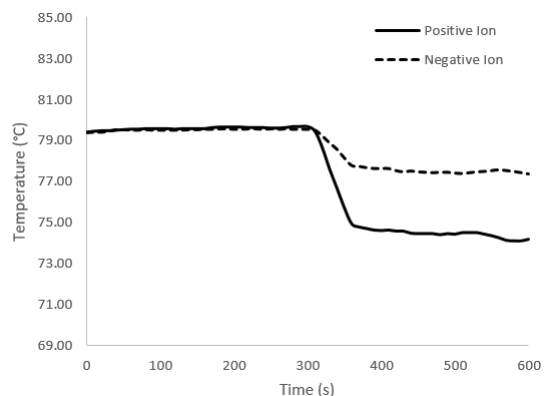
Theory	Nu	%error
Churchill Chu's correlation	159.49	9.15
Average experimental result without corona wind	144.89	-

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 การถ่ายเทความร้อนเมื่อใช้แรงดันไฟฟ้าชนิดประจุบวกและประจุลบ

พฤติกรรมของการปล่อยประจุที่ขั้วอิเล็กโทรดเมื่อใช้ชนิดประจุบวกและประจุลบ ที่กระทำต่อการถ่ายเท

ความร้อนบนแผ่นอลูมิเนียม โดยเริ่มต้นยังไม่มีการใช้แรงดันไฟฟ้าปล่อยไอออน มีอุณหภูมิเท่ากับ 79.54 องศาเซลเซียส จนกระทั่งวินาทีที่ 300 ได้ทำการปล่อยประจุ พบว่าอุณหภูมิของแผ่นอลูมิเนียมลดลงเรื่อยๆ โดยอุณหภูมิเริ่มคงที่ที่วินาที 360 โดยตั้งแต่วินาทีที่ 360 ถึง วินาทีที่ 600 มีอุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 77.49 องศาเซลเซียส และ 74.46 องศาเซลเซียส เมื่อปล่อยประจุไอออนลบและไอออนบวก ตามลำดับ สังเกตได้ว่าเมื่อใช้ประจุไอออนบวกอุณหภูมิแผ่นอลูมิเนียมลดลงต่ำว่าเมื่อใช้ประจุไอออนลบอย่างชัดเจน เนื่องจากประจุไอออนบวกมีน้ำหนักมากกว่าทำให้เมื่อประจุเคลื่อนที่ปะทะแผ่นเรียบและสามารถทำลายชั้นขีดผิวของแผ่นเรียบส่งผลให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนได้ดีขึ้น

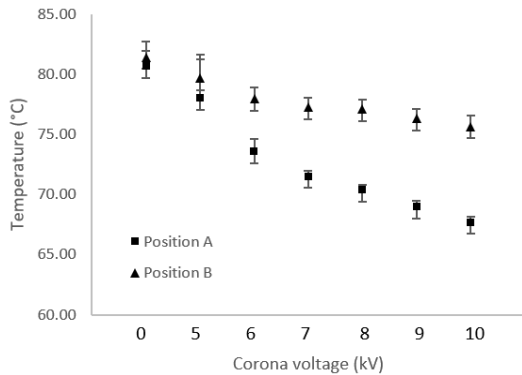


รูปที่ 5 การเปรียบเทียบอุณหภูมิของแผ่นร้อนเมื่อใช้แรงดันไฟฟ้าชนิดไอออนบวกและไอออนลบ

3.2 การถ่ายเทความร้อนเมื่อใช้แรงดันไฟฟ้าขนาด 5-10 กิโลโวลต์

จากหลักการการพาความร้อนแบบธรรมชาติ เมื่อพลั๊กความร้อนของแผ่นเรียบแนวดิ่งมีค่าคงที่ โดยที่ตำแหน่ง A และ B มีอุณหภูมิเริ่มต้นคือ 80.65 และ 81.42 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เมื่อยังไม่เปิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงประจุบวก ภายหลังเมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าประจุ บวก 5, 6, 7, 8, 9 และ 10 กิโลโวลต์ ที่ตำแหน่ง A มีอุณหภูมิ 78.05, 73.55, 71.52,

70.38, 69.01 และ 67.71 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ขณะที่ตำแหน่ง B มีอุณหภูมิ 79.68, 77.95, 77.25, 77.12, 76.32 และ 75.65 องศาเซลเซียส ตามลำดับ พบว่าตำแหน่ง B ที่อยู่สูงกว่าตำแหน่ง A จะมีอุณหภูมิที่สูงกว่า และอุณหภูมิของทั้งตำแหน่ง A และ B มีแนวโน้มลดลงเมื่อแรงดันไฟฟ้าสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 6

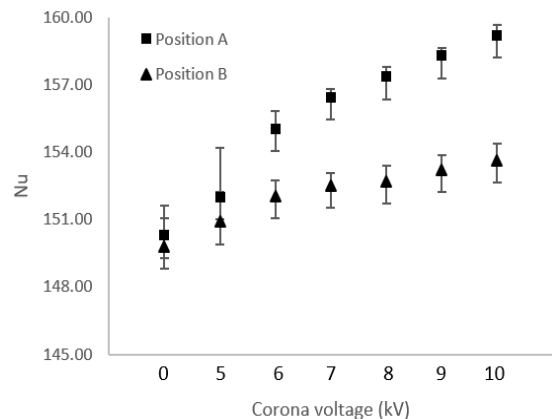


รูปที่ 6 ค่าอุณหภูมิของแผ่นร้อนที่ตำแหน่ง A และ B เมื่อมีและไม่มีแรงดันไฟฟ้าประจุบวก

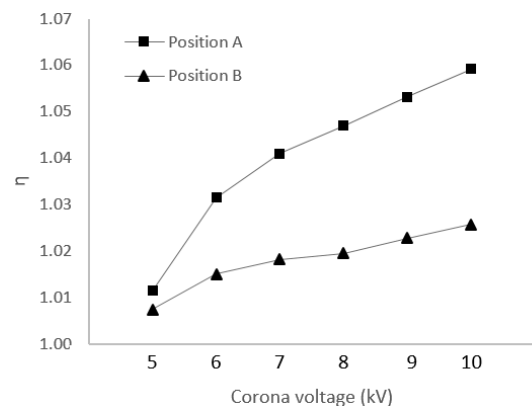
จากรูปที่ 7 การคำนวณเลขนัสเซลล์ท์จากอุณหภูมิที่ตำแหน่ง A และตำแหน่ง B เมื่อยังไม่เปิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงประจุบวก มีค่าเท่ากับ 150.29 และ 149.79 ตามลำดับ ภายหลังเมื่อปรับแรงดันไฟฟ้าจำนวน 6 ค่า คือ 5, 6, 7, 8, 9 และ 10 กิโลโวลต์ พบว่า ที่ตำแหน่ง A มีเลขนัสเซลล์ท์ คือ 152.01, 155.03, 156.44, 157.35, 158.29 และ 159.18 ขณะที่ตำแหน่ง B มีเลขนัสเซลล์ท์ คือ 150.91, 152.04, 152.52, 152.71, 153.21 และ 153.64 ตามลำดับ เห็นได้ชัดว่าเมื่อแรงดันไฟฟ้ามากขึ้นค่าเซลล์ท์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบค่าเซลล์ท์ของตำแหน่ง A กับ B เห็นได้ชัดว่าค่าเซลล์ท์ของตำแหน่ง A มีค่าสูงกว่าที่ตำแหน่ง B ทำให้ตำแหน่ง A มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนความร้อนได้ดีกว่าตำแหน่ง B

รูปที่ 8 แสดงอัตราส่วนของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเมื่อมีลมโคลนารบกววน และไม่มีลม

โคลนารบกววน ที่ตำแหน่ง A และ B จากผลการทดลอง พบว่าการใช้ลมโคลนาร์ที่แรงดันไฟฟ้า 5-10 กิโลโวลต์ ทำให้อัตราส่วนการถ่ายเทความร้อนดีขึ้นในทุกกรณี โดยที่ตำแหน่ง A เมื่อใช้แรงดันไฟฟ้า 10 กิโลโวลต์ อัตราส่วนการถ่ายเทความร้อนมีค่าสูงสุด เท่ากับ 1.06 ขณะที่ตำแหน่ง B เมื่อใช้แรงดันไฟฟ้า 10 กิโลโวลต์ มีอัตราส่วนการถ่ายเทความร้อนสูงสุดเช่นกัน โดยมีค่าเท่ากับ 1.03



รูปที่ 7 ค่านัสเซลล์ท์ของแผ่นร้อนที่ตำแหน่ง A และ B เมื่อมีและไม่มีแรงดันไฟฟ้าประจุบวก



รูปที่ 8 อัตราส่วนการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนที่แรงดันไฟฟ้า 5 -10 กิโลโวลต์

จากผลการศึกษาพบว่าค่าอุณหภูมิและค่าเซลล์ท์แปรผกผันกัน โดยเมื่อแรงดันไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นจะ

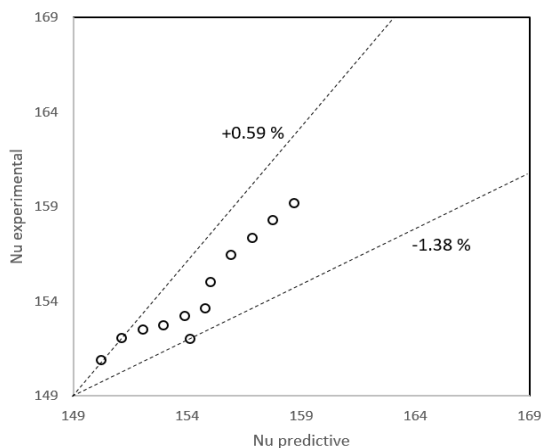
ทำให้อุณหภูมิลดลงขณะที่ค่าสเกลจะสูงขึ้น ซึ่งผลการศึกษาพบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อการระบายความร้อนคือปริมาณแรงดันไฟฟ้าที่จ่าย และตำแหน่งของหัวอิเล็กทรอนิกส์กับตำแหน่งบนแผ่นอลูมิเนียม ซึ่งตำแหน่งที่ตรงกับหัวอิเล็กทรอนิกส์จะสามารถถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าตำแหน่งที่อยู่เยื้องหัวอิเล็กทรอนิกส์

งานวิจัยนี้ได้สร้างสมการการทำนายค่าสเกลที่เมื่อหัวอิเล็กทรอนิกส์ทำมุมตั้งฉากกับแผ่นร้อนแนวดิ่ง มีระยะห่าง 1 เซนติเมตร ซึ่งสัมพันธ์กับแรงดันไฟฟ้าและตำแหน่งของแผ่นร้อนแนวดิ่งดังนี้

$$y = 149.538 + 0.913x_1 - 1.939x_2 \quad (12)$$

เมื่อ y คือ นัสเซลน์เบอร์ (Nu), x_1 คือ แรงดันไฟฟ้าที่ 5, 6, 7, 8, 9 และ 10 kV, x_2 คือ ตำแหน่งของแผ่นร้อนในแนวดิ่ง ตำแหน่ง A และ B

จากสมการที่ได้พบว่าค่าสเกลจากสมการทำนายมีร้อยละของความคลาดเคลื่อนเมื่อเทียบกับการทดลองอยู่ในช่วงระหว่างร้อยละ -1.38 ถึง 0.59 ดังนั้นสมการนี้จึงเป็นสมการสำคัญที่จะสามารถนำมาใช้ทำนายการเพิ่มขึ้นของการแลกเปลี่ยนความร้อนในช่วงแรงดันไฟฟ้าชนิดบวก 5-10 กิโลโวลต์ และความสูงจากหัวกำเนิดโคโลนาในแนวดิ่ง 0-2 เซนติเมตร ได้ต่อไป



รูปที่ 9 ร้อยละของ Nu จากการทดลองเทียบสมการทำนาย Nu ที่ได้งานวิจัยนี้

4. สรุป

การถ่ายเทความร้อนของแผ่นอลูมิเนียมเมื่อใช้ประจุไอออนบวกมีประสิทธิภาพดีกว่าการใช้ประจุไอออนลบ โดยประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มค่าแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้น และพบว่าเครื่องกำเนิดความดันไฟฟ้าแรงดันสูงที่ 10 กิโลโวลต์สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนได้สูงสุด 1.06 และ 1.03 ที่ตำแหน่ง A และ B ตามลำดับ เทียบกับการไม่ใช้เครื่องกำเนิดความดันไฟฟ้า นอกจากนั้นสมการทำนายความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรงชนิดบวก 5 ถึง 10 กิโลโวลต์ ที่ความสูงจากหัวกำเนิดโคโลนาบนแผ่นร้อนแนวดิ่งระยะ 0 ถึง 2 เซนติเมตร มีความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงระหว่างร้อยละ -1.38 ถึง 0.59 เมื่อเทียบกับการทดลองจริง ทำให้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการถ่ายเทความร้อนโดยใช้แรงดันไฟฟ้าได้ต่อไปนอกจากนั้นอนาคตควรมีการศึกษาปัจจัยของระยะห่างของหัวอิเล็กทรอนิกส์จากแผ่นอลูมิเนียมเปรียบเทียบกับตำแหน่งอื่นๆที่สนใจบนแผ่นอลูมิเนียมทำให้การหาสมการการทำนายค่าสเกลที่มีความครอบคลุมมากยิ่งขึ้น

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ที่สนับสนุนเครื่องมือและสถานที่ทดสอบ และขอขอบคุณณัฐรี วรจินดา, ศตพล ทองมี, ชญาดา งามดี และ อาทิตยา มนูญโย ที่ช่วยเก็บรวบรวมข้อมูลงานวิจัยครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Energy Policy and Planning Office Ministry of Energy, 2562
- [2] The Achievement in Implement of the Government Policy and Industrial Strategy Fiscal Year 2016, Ministry of Industry, 2016.

- [3] A. E. Bergles, “ The Implications and Challenges of Enhanced Heat Transfer for the Chemical Process Industries,” *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 79, no. 4, pp. 437–444, 2001.
- [4] D. H. Shin, S. H. Baek and H. S. Ko, “Development of Heat Sink with Ionic Wind for LED Cooling,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 93, pp. 516–528, 2016.
- [5] N. E. Jewell-Larsen, H. Ran, Y. Zhang, M. Schwiebert and K. A. Honer, “ Electrohydrodynamic (EHD) Cooled Laptop,” in *Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium* · April 2009.
- [6] I. Y. Chen, M. Z. Guo, K. S. Yang, and C. C. Wang, “Enhanced Cooling for LED Lighting using Ionic Wind,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol.57, pp. 285–291, 2013.
- [7] M. Molki and K. L. Bhamidipati, “ Enhancement of Convective Heat Transfer in the Developing Region of Circular Tubes using Corona Wind,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 47, pp. 4301–4314, 2004.
- [8] B. L. Owsenek, J. S. Yagoobi and R. H. Page, “ Experimental Investigation of Corona Wind Heat Transfer Enhancement with a Heated Horizontal Flat Plate,” *Journal of Heat Transfer*, vol. 117, pp. 309–315, 1995.
- [9] D. H. Shin, S. H. Baek and H. S. Ko, “ Development of Heat Sink with Ionic Wind for LED Cooling,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 93, pp. 516–528, 2016.
- [10] L. Léger, E. Moreau and G. G. Touchard, “ Effect of a DC Corona Electrical Discharge on the Airflow Along a Flat Plate,” *IEEE Transactions on industry applications*, vol. 38, no. 6, 2002.
- [11] J. R. Lee and E. V. Lau, “Effects of Relative Humidity in the Convective Heat Transfer over Flat Surface using Ionic Wind,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 114, pp. 554–560, 2017.
- [12] Y. Y. Tsui, T. K. Wei and C. C. Wang, “A Novel Means Combining Corona Discharge and Electrostatic Force-Induced Vibration for Convective Heat Transfer,” *Journal of Heat Transfer*, Transactions of the ASME 142, 2020.
- [13] B. L. Owsenek and J. S. Yagoobi, “ Theoretical and Experimental Study of Electrohydrodynamic Heat Transfer Enhancement Through Wire-Plate Corona Discharge,” *Journal of Heat Transfer*, vol. 119, pp. 604–610, 1997.
- [14] R. T. Huang, W. J. Sheu and C. C. Wang, “ Heat Transfer Enhancement by Needle-Arrayed Electrodes – An EHD Integrated Cooling System,” *Energy Conversion and Management*, vol. 50, pp. 1789–1796, 2009.

- [15] M. Molki and K. L. Bhamidipati, "Enhancement of Convective Heat Transfer in the Developing Region of Circular Tubes using Corona Wind," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 47, pp. 4301–4314, 2004.
- [16] D. B. Go, R. A. Maturana, T. S. Fisher and S. V. Garimella, "Enhancement of External Forced Convection by Ionic Wind," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 51, pp. 6047–6053, 2008.
- [17] T. Stegmaier, A. Dinkelmann, V. V. Arnim and A. Rau, "Corona and Dielectric Barrier Discharge Plasma Treatment of Textiles for Technical Applications," *Plasma technologies for textiles*, pp. 129-157, 2007.
- [18] A. Yabe, Y. Mori and K. Hijikata, "Active Heat Transfer Enhancement by Utilizing Electric Fields," *Annual Reviews of Heat Transfer*, vol. 7, pp. 193-244, 1996.
- [19] P. Intra, *Aerosol Charging Technology by Electric Field: Theory and Innovation*, 2nd Edition, 2560.
- [20] F. Yang, "Corona-Driven Air Propulsion for Cooling of Microelectronics," Thesis, University of Washington, 2002.
- [21] Y. A. Cengel and A. J. Ghajar, *Heat and Mass Transfer – Fundamentals & Applications*. New York: McGraw-Hill, 2015.
- [22] R. T. Huang, W. J. Sheu and C. C. Wang, "Heat Transfer Enhancement by Needle-Arrayed Electrodes – An EHD Integrated Cooling System," *Energy Conversion and Management*, vol. 50, pp. 1789–1796, 2009.
- [23] J.P. Holman, *Heat Transfer*, 10th ed. New York: McGraw-Hill, 2010.
- [24] Y. A. Cengel, *Heat and Mass transfer: A practical approach*. 3rd ed, McGraw Hill, 2006.

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

การลดอัตราของเสียในกระบวนการผลิตสบู่อ่อน

ธเนศ รัตนวิไล* สลัม บาราเฮง และ สุรียา จิรสิตสิน

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

15 ถนนกาญจนวนิชย์ ตำบลคอหงส์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90110

รับบทความ 2 กรกฎาคม 2564 แก้ไขบทความ 21 กุมภาพันธ์ 2565 ตอรับบทความ 30 มีนาคม 2565

บทคัดย่อ

จากการขยายตัวของอุตสาหกรรมสบู่ก้อน ทำให้ผู้ประกอบการต้องหันมาควบคุมประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตเพื่อลดอัตราของเสียที่เกิดขึ้นให้ลดน้อยลง การเลือกใช้เครื่องมือควบคุมคุณภาพในการค้นหาสาเหตุ เช่น ผังก้างปลาและ Why-Why Analysis ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการค้นหาสาเหตุของปัญหาผ่านกระบวนการระดมสมองร่วมกับผู้เชี่ยวชาญ เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์หลักของงานวิจัย ได้แก่ การลดอัตราของเสียในกระบวนการผลิตสบู่ก้อน ผลการศึกษาลักษณะปัจจุบันของกระบวนการผลิตพบว่า อุปกรณ์สายพานลำเลียงเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดอัตราของเสียสูงสุด จึงถูกเลือกนำมาพิจารณาเพื่อวิเคราะห์ปัญหาและกำหนดแนวทางปรับปรุงคุณภาพของอุปกรณ์สายพานลำเลียงในกระบวนการผลิต จัดเก็บรวบรวมข้อมูลจำนวนของเสียจากกระบวนการผลิตโดยใช้แผนภาพพาเรโต ทำให้พบว่าสาเหตุ 2 อันดับแรกทำให้เกิดของเสียรวม 8,837 กิโลกรัม (ร้อยละ 65.35) เกิดจากเนื้อสบู่อุดตันบริเวณพื้นผิวลูกกลิ้งและเกิดจากไคด์หลังแผ่นสายพานหลุดจากร่องนำทางตามลำดับ จึงนำปัญหาทั้งสองดังกล่าวมาทำการวิเคราะห์หาสาเหตุของการเกิดของเสีย จัดทำแผนการแก้ไข ดำเนินการแก้ไขปัญหาดังกล่าวตามแผน สรุปผลการทดลอง ตรวจสอบผลแล้วจัดทำมาตรฐานขั้นตอนกระบวนการผลิต ผลที่ได้จากการศึกษาและดำเนินการแก้ไข พบว่า การปรับปรุงช่วยลดการเกิดของเสียจากกระบวนการผลิตสบู่ก้อนลงอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) เฉลี่ยร้อยละ 8.8 จากเดิมร้อยละ 12.6 เป็นร้อยละ 3.7 ต่อเดือน ในขณะที่ค่าเฉลี่ยก่อนปรับปรุงและหลังปรับปรุงของอัตราคุณภาพเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) เช่นกัน โดยก่อนปรับปรุงมีอัตราคุณภาพร้อยละ 87.4 และหลังการปรับปรุงมีอัตราคุณภาพร้อยละ 96.3 ตามลำดับ ทำให้ผลการศึกษابรรลุวัตถุประสงค์ที่วางไว้

คำสำคัญ : สบู่ก้อน; กระบวนการผลิต; อัตราของเสีย; อัตราคุณภาพ

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +66 7428 7151, ไลน์อีเมลล์: thanate.r@psu.ac.th

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

Reduction of Defect Rate in Bar Soap Manufacturing Process

Thanate Ratanawilai* Salmee Baraheng and Suriya Jirasatitsin

Department of Industrial and Manufacturing Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University

15 Karnjanavanich Rd., Kho Hong, Hat Yai, Songkhla, 90110

Received 2 July 2021; Revised 21 February 2022; Accepted 30 March 2022

Abstract

The growth of bar soap industry leads to an increasing productivity improvement of bar soap manufacturing process to reduce the defect rate. The appropriated quality tools such as fish bone diagram and why-why analysis were adopted to find the cause of defect and to improve the manufacturing process associated with the brain-storming technique. The research objective is therefore to reduce the defect rate in the bar soap manufacturing process. Based on the current manufacturing process, it was found that the defect rate was caused by the belt conveyor. The data collection was conducted and analyzed to find the route cause using pareto diagram and found that the highest defect rates are caused by the clogging soap on the roller surface and the slipping guide behind the conveyor belt, respectively with the total defect of 8,837 kg (65.35 percent). Those two major causes were subsequently analyzed and created the plans to solve the problems, implement the plans, conclude the results, and finally set the standard procedures. After implementation, the result shows that the defect rate of bar soap manufacturing process is significantly reduce 8.8% from 12.5% to 3.7% per month ($P < 0.05$) whereas the quality rate is also significantly increased from 87.4% to 96.3% per month. The decreasing defect rate is achieved the target of the research purpose.

Keywords : Bar Soap; Manufacturing Process; Defect Rate; Quality Rate

* Corresponding Author. Tel.: +66 7428 7151, E-mail Address: thanate.r@psu.ac.th

1. บทนำ

อุตสาหกรรมด้านเครื่องสำอางโดยเฉพาะประเภทสบู่มาก่อน นับเป็นอุตสาหกรรมอีกประเภทหนึ่งที่มีการขยายตัวอย่างรวดเร็ว จากช่องทางการจัดจำหน่ายที่หลากหลาย ทำให้เข้าถึงกลุ่มลูกค้าได้ง่าย เป็นโอกาสที่จะทำตลาดเพิ่มสูงขึ้นจากปัจจุบันได้ นอกจากนี้สถานการณ์การแพร่ระบาดของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 (covid-19) ส่งผลให้ผู้บริโภคเห็นความสำคัญของการรักษาความสะอาด ทำให้ตลาดสินค้าสบู่มิแนวโน้มขยายตัวเพิ่มมากขึ้นทั้งภายในและต่างประเทศ ตลาดส่งออกเครื่องสำอาง สบู่ และผลิตภัณฑ์รักษาผิวของไทยมีมูลค่ารวม 3,764 ล้านดอลลาร์สหรัฐ ในปี 2563 โดยสินค้าสองรายการที่มีอัตราการเติบโตสูงขึ้นในช่วงปีที่ผ่านมา ได้แก่ ผลิตภัณฑ์สบู่และผลิตภัณฑ์ดูแลช่องปากที่มีมูลค่าตลาดขยายตัวเพิ่มขึ้นจากปี 2562 ที่ร้อยละ 19.26 และ 3.95 ตามลำดับ [1] ตลาดหลักในการส่งออกได้แก่ ตลาดอาเซียน มีสัดส่วนการส่งออกร้อยละ 48 ของการส่งออกสบู่และผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดผิวทั้งหมด โดยมีสินค้าส่งออกที่สำคัญ ได้แก่ ครีมหาบหน้าและสบู่มาก่อน ในอัตราการส่งออกที่ใกล้เคียงกัน คือ ร้อยละ 35 และ 33 [2]

อย่างไรก็ตาม ในท่ามกลางความต้องการของผลิตภัณฑ์ที่มีค่าสูง ย่อมส่งผลให้เกิดการแข่งขันในตลาดสูงเช่นเดียวกัน จึงจำเป็นต้องหาจุดแข็งและสร้างจุดเด่นให้แตกต่างจากคู่แข่งในท้องตลาด ทำให้การแข่งขันด้านคุณภาพและราคามีแนวโน้มที่สูงมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกลุ่มอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับผลิตภัณฑ์สบู่กลุ่มสมุนไพร รวมถึงกลุ่มสินค้าธรรมชาติอื่น ๆ มีความต้องการและขยายตัวอย่างต่อเนื่อง สบู่จึงจัดเป็นอีกกลุ่มหนึ่งที่ช่วยกระตุ้นตลาดให้ผู้บริโภคหันมาสนใจนำมาใช้มากขึ้น โดยเฉพาะกับดูแลผิวหน้า นอกจากนี้ยังมีสบู่สำหรับสัตว์ที่มีแนวโน้มเติบโตขึ้นจากความใส่ใจและการดูแลสัตว์เลี้ยงจากเจ้าของสัตว์เลี้ยงในปัจจุบัน ส่วนกลุ่มสบู่หอมหรือสบู่โรงแรมมีความต้องการเพิ่มมากขึ้นจาก

ผู้บริโภคพิเศษเฉพาะกลุ่ม ซึ่งทางผู้ผลิตเครื่องสำอางประเภทสบู่มาก่อนถือเป็นส่วนหนึ่งในธุรกิจต่อเนื่อง โดยปัจจุบันมีผู้ผลิตมากขึ้นและขยายตัวอย่างรวดเร็ว ดังนั้นทางผู้ผลิตจึงต้องมีการปรับตัวและพัฒนากระบวนการผลิตด้วยการใช้เทคโนโลยีใหม่หรือการปรับปรุงสายการผลิตให้ทันสมัย [3] เพื่อตอบสนองต่อการแข่งขันทั้งในด้านการลดต้นทุนการผลิต การใช้ทรัพยากรที่มีอยู่ให้เกิดประโยชน์สูงสุด อีกทั้งยังต้องรักษามาตรฐานให้ยังคงเป็นที่ยอมรับของลูกค้า ทั้งในด้านตัวผลิตภัณฑ์ การบริการ ราคาและคุณภาพ เป็นต้น ซึ่งการกำหนดแนวทางการแก้ปัญหาสามารถทำได้หลายวิธี เช่น ใช้หลักการศึกษาการทำงาน การวางแผนขั้นตอนการทำงานเพื่อวิเคราะห์หาความสูญเสียและปรับปรุง [4]-[6] การใช้วิธีการจัดทำตัวบ่งชี้ โดยมุ่งเน้นการแก้ไขปัญหาและศึกษาเครื่องจักรในการดำเนินการเพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์กับหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง [7] การใช้หลักการทางสถิติ การทดลอง แผนภูมิควบคุมเพื่อหากระบวนการหรือขั้นตอนที่ทำให้เกิดของเสียและหาสมการจุดเหมาะสมในการปรับค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการผลิต [8]-[10] เป็นต้น

การประยุกต์ใช้หลักการซิกซ์ซิกม่า 5 ขั้นตอนและเครื่องมือคุณภาพ 7 ประการ ถูกนำไปใช้ในการแก้ปัญหาในอีกหลากหลายอุตสาหกรรม ทั้งในชิ้นส่วนเครื่องจักรกล อุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ อุตสาหกรรมพลาสติกและอุตสาหกรรมการผลิตยางแท่ง โดยการคัดเลือกปัญหาผ่านแผนภูมิพาเรโตพร้อมกับวัดสภาพปัญหาจากการเก็บรวบรวมข้อมูลของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิต เช่น ในกระบวนการผลิตซีลวดของโรงงานผลิตชิ้นส่วนมอเตอร์ไซด์ โดยสามารถลดของเสียประเภทหัวซีลวดไม่ได้ขนาดให้ลงได้ร้อยละ 71.92 และลดของเสียประเภทซีลวดเป็นรอยให้ลดลงได้ร้อยละ 84.74 [11] การลดจำนวนของเสียในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนเครื่องจักร โดยใช้ใบตรวจสอบ แผนภูมิพาเรโตและแผนภาพสาเหตุและผล ในการเก็บข้อมูลและ

วิเคราะห์ปัญหาแล้ว และการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้หลักการควบคุมคุณภาพการผลิต และการจัดลำดับความสำคัญแบบ 2 ปัจจัย ซึ่งช่วยให้สามารถลดของเสียลงได้ถึงร้อยละ 52.17 [12] การประยุกต์ใช้เครื่องมือเพื่อวิเคราะห์ปัญหาโดยใช้ Why-Why Analysis การออกแบบอุปกรณ์ตรวจสอบ เทคนิคการควบคุมด้วยสายตา และการหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรด้วยการวิเคราะห์การถดถอย มาประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงวิธีการทำงานเพิ่มเติมจากเครื่องมือที่กล่าวมาแล้ว เพื่อลดปริมาณของเสียในกระบวนการผลิตตลอดทั้งชิ้นรูปสำหรับเบาะรถยนต์ ซึ่งสามารถลดปริมาณของเสียในขั้นตอนตั้งลวดตรงและขั้นตอนตั้งชิ้นงานลดลงร้อยละ 43.13 [13] สำหรับในกลุ่มอุตสาหกรรมพลาสติก ได้มีการใช้แนวคิดซิกซ์ ซิกมา เพื่อนำไปสู่การลดของเสียในกระบวนการ เป้าฟิล์มสำหรับถุงพลาสติกชนิดโพลิโพรพิลีน (PP) โดยเริ่มจากการนิยามปัญหา เช่น เจล ยับ และหนา บางมีสัดส่วนสูง ถัดมาเป็นระยะการวัดและทำการประเมิน แล้วทำการหาสาเหตุของปัญหา โดยผ่านกระบวนการระดมสมองโดยใช้แผนผังก้างปลา ทำการคัดกรองปัญหาด้วยแผนผังแสดงสาเหตุและผล เพื่อนำไปเข้าสู่กระบวนการปรับปรุงต่อไป โดยผลดำเนินการสามารถลดของเสียในกระบวนการเป่าฟิล์มสำหรับข้อบกพร่องประเภทเจล ยับ และหนบบาง คิดเป็นสัดส่วนของเสียที่ลดลงถึงร้อยละ 99 [14] สำหรับอุตสาหกรรมในกลุ่มเดียวกันได้มีการศึกษาเพื่อแก้ไขปัญหาด้านการผลิตแผ่นฟิล์มที่ไม่เป็นไปตามข้อกำหนดของลูกค้า โดยการประยุกต์ใช้เครื่องมือคุณภาพ 7 ประการ วิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาด้วยการระดมสมองจากแผนผังก้างปลา พร้อมกำหนดมาตรการป้องกัน ทำให้สามารถลดปริมาณของเสียลงได้ร้อยละ 38.30 [15] สำหรับอีกกลุ่มอุตสาหกรรมที่สำคัญได้อุตสาหกรรมยางพารา ได้มีการศึกษากระบวนการผลิตยางแท่ง ซึ่งพบว่าภาชนะบรรจุยางก้อนของขั้นตอนการอบ มีเศษยางเกาะติดและมีระยะห่างระหว่างแผ่นกันไม่เท่ากัน ทำให้ความร้อน

กระจายได้ไม่ทั่วถึง ส่งผลให้การแห้งของยางก้อนไม่สม่ำเสมอทั่วทั้งก้อน หลังทำการปรับปรุงโดยใช้แผนผังก้างปลาและ Why-Why Analysis เพื่อค้นหาสาเหตุและปรับปรุงแก้ไข ทำให้สามารถแก้ปัญหาปริมาณยางแท่งไม่สมบูรณ์ลดลงได้ร้อยละ 72.25 [16]

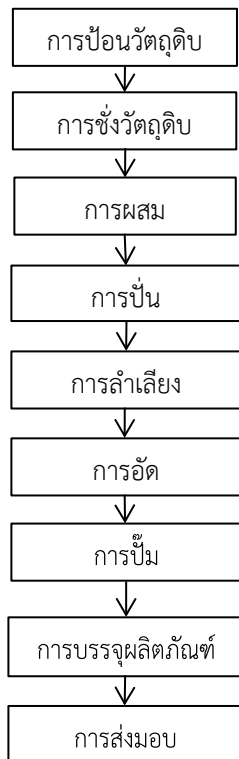
สำหรับอุตสาหกรรมการผลิตสบู่ เครื่องจักรที่ใช้ในกระบวนการผลิตถือเป็นหัวใจสำคัญที่จะทำให้สบู่ที่ผลิตออกมามีคุณภาพและหากเครื่องจักรไม่สามารถรองรับความต้องการในการผลิตหรือมีประสิทธิภาพเพียงพอ ย่อมส่งผลต่อคุณภาพของเครื่องจักรในการผลิตสบู่ โดยเฉพาะกระบวนการผลิตทำให้เกิดเครื่องจักรในการผลิตหยุดเครื่องบ่อยอันส่งผลให้เกิดของเสียระหว่างการผลิตและต้องใช้เวลาตรวจสอบการบำรุงรักษาเครื่องจักร เข้ามาตัดสินใจว่าประสิทธิภาพเครื่องจักรที่เกิดขึ้นนั้นมีการควบคุม หากเครื่องจักรที่ทำงานผลิตไม่ผ่านเกณฑ์ที่ควบคุมจะทำให้เกิดปริมาณของเสีย การลดต้นทุนในการผลิตเพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขัน โดยลดของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตจึงเป็นวัตถุประสงค์หลักในงานวิจัยนี้ โดยในปัจจุบันอัตราของเสียที่เกิดขึ้นสูงถึงร้อยละ 12.5 (ตารางที่ 1) ดังนั้นงานวิจัยนี้จะทำการปรับปรุงเพื่อเพิ่มอัตราคุณภาพในการผลิตสบู่ก่อนด้วยการลดของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิต และลดอัตราของเสียที่เกิดจากเครื่องจักรในกระบวนการผลิต เพื่อช่วยให้สามารถเพิ่มศักยภาพในการแข่งขันกับคู่แข่งในตลาดของผลิตภัณฑ์สบู่ได้มากยิ่งขึ้น ด้วยการประยุกต์ใช้แผนผังก้างปลาและ Why-Why Analysis เป็นเครื่องมือในการค้นหาสาเหตุของปัญหา หาวิธีแก้ไขปัญหที่เหมาะสม และกำหนดแนวทางการทำงานเพื่อให้เกิดการแก้ไขปัญหาที่ยั่งยืน

2. สภาพปัจจุบันของโรงงานกรณีศึกษา

โรงงานผลิตสบู่ก้อน มีผลิตภัณฑ์ 5 กลุ่ม ได้แก่

(1) สบู่หอม (2) สบู่โรงแรม (3) สบู่สมุนไพร (4) สบู่สัตว์

และ (5) สบู่ใส โดยคิดเป็นสัดส่วนกำลังการผลิตของสบู่หอมและสบู่โรงแรม ร้อยละ 5.4 กำลังการผลิตสบู่สมุนไพร ร้อยละ 4.5 และกำลังการผลิตสบู่สั้วและสบู่ใส ร้อยละ 90.1 ในกระบวนการผลิตมีการควบคุมสูตรสบู่และกระบวนการผลิตเพื่อให้ได้สบู่ตามมาตรฐานที่กำหนด โดยกระบวนการผลิตสบู่ก่อน แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 กระบวนการผลิตสบู่ก่อน

กระบวนการผลิตสบู่ก่อน เริ่มจากการลำเลียงวัตถุดิบจากคลังวัตถุดิบ ได้แก่ เม็ดสบู่ น้ำหอม แป้งขาว กลีเซอริน สีผง มายังฝ่ายผลิต ผ่านกระบวนการผสมเพื่อคลุกเคล้าวัตถุดิบให้เข้ากัน ทำการปั่นเพื่อให้เม็ดสบู่และส่วนผสมต่าง ๆ คลุกเคล้าเป็นเนื้อเดียวกันเป็นเนื้อสบู่ จากนั้นจะถูกส่งผ่านสายพานลำเลียงเพื่อเข้าสู่กระบวนการอัดให้เป็นแท่งยาวประมาณ 22-24 เซนติเมตร ทำการปั๊มขึ้นรูปสบู่ตามรูปแบบที่กำหนด นำสบู่ที่ได้ไปพักเพื่อการเซ็ตตัวหรือเป็นการระบายความร้อนออกจากสบู่ สุดท้ายนำไปบรรจุผลิตภัณฑ์ที่พร้อมส่ง

มอบให้แก่ลูกค้า จะเห็นได้ว่ากระบวนการผลิตจะมีการใช้เครื่องจักรในการผลิตแบบต่อเนื่องและมีพนักงานคอยควบคุมและบำรุงรักษาเครื่องจักรให้พร้อมใช้งานอยู่เสมอ ผลจากการสำรวจข้อมูลการผลิตสบู่ของโรงงานโรงงานกรณีศึกษาในช่วงระยะเวลาหนึ่งปี พบว่า ผลผลิตที่ได้ในแต่ละเดือนเทียบกับวัตถุดิบนำเข้ามีอัตราของเสียที่เกิดระหว่างกระบวนการผลิตอยู่ในช่วง ร้อยละ 10-15 ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ข้อมูลการผลิตสบู่ก่อนในช่วงเวลาหนึ่งปี

เดือน ที่	วัตถุดิบเข้า (กิโลกรัม)	ผลผลิต (กิโลกรัม)		อัตรา ของเสีย (%)	อัตรา คุณภาพ (%)
		ของดี	ของเสีย		
1	20,136	17,470	2,666	13.2	86.8
2	22,169	19,651	2,518	11.4	88.6
3	24,770	22,197	2,573	10.4	89.6
4	15,144	12,973	2,171	14.3	85.7
5	24,705	21,507	3,198	12.9	87.1
6	17,529	14,858	2,671	15.2	84.8
7	17,803	15,784	2,019	11.3	88.7
8	20,669	18,079	2,590	12.5	87.5
9	16,778	14,804	1,974	11.8	88.2
10	20,043	17,259	2,784	13.9	86.1
11	18,623	16,181	2,442	13.1	86.9
12	13,695	12,191	1,504	11.0	89.0
เฉลี่ย	19,339	16,913	2,426	12.6	87.4

หมายเหตุ : ของเสีย = วัตถุดิบเข้า - ผลผลิต (ของดี)

อัตราของเสีย = $\frac{\text{ของเสีย}}{\text{วัตถุดิบเข้า}} \times 100$

อัตราคุณภาพ = $\frac{\text{ผลผลิต (ของดี)}}{\text{วัตถุดิบเข้า}} \times 100$

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

จากข้อมูลเบื้องต้นของโรงงานกรณีศึกษา พบว่ามีอัตราของเสียเกิดขึ้นสูงสุดถึงร้อยละ 15.2 (ตารางที่ 1) ดังนั้นเพื่อลดปริมาณของเสียหรือเพิ่มอัตราคุณภาพในกระบวนการผลิตสบู่ก่อน จึงกำหนดแนวทางการดำเนินงานวิจัย โดยเริ่มจากการศึกษากระบวนการผสม ปั่น ลำเลียงสบู่ด้วยสายพาน กระบวนการอัดและปั๊มขึ้นรูป โดยทำการเก็บรวบรวมข้อมูลเป็นระยะเวลา 12

เดือนเพื่อให้มีจำนวนข้อมูลที่มากพอต่อการวิเคราะห์ ซึ่งเครื่องมือที่ใช้ ได้แก่ (1) แผนภาพพาเรโต (Pareto Analysis) (2) การหาสาเหตุที่แท้จริงของปัญหาด้วย Why-Why Analysis (3) แผนผังก้างปลา (Fishbone Diagram) และ (4) การศึกษาการทำงาน (Work Study) ซึ่งเป็นเครื่องมือพื้นฐานและมีการใช้อย่างกว้างขวางในงานทางด้านการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต เนื่องจากได้มีส่วนร่วมจากผู้ใช้งานจริงมารวบรวมระดมสมองในการค้นหารากเหง้าของปัญหา บันทึกรายละเอียดต่าง ๆ ของการทำงาน เพื่อวิเคราะห์การเกิดของเสียระหว่างการทำงานในขั้นตอนการผลิต กำหนดแนวทางการแก้ปัญหาพร้อมกันเพื่อพิจารณาความเป็นไปได้ ทดลองใช้จริง แล้วปรับปรุงเพื่อจัดเป็นมาตรฐานการทำงานต่อไป [17] ทั้งนี้จะทำการคำนวณประสิทธิภาพที่มีผลกระทบจากเครื่องจักรหรือกระบวนการผลิตที่แสดงในรูปของการสูญเสียในผลิตภัณฑ์ ซึ่งเรียกว่า อัตราของผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพ (Quality Rate) [18] ดังสมการที่ (1)

$$QR = \frac{GC}{TC} \quad (1)$$

โดยที่

QR คือ อัตราของผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพ

GC คือ จำนวนของผลิตภัณฑ์

TC คือ จำนวนของผลิตภัณฑ์ทั้งหมด

4. การวิเคราะห์และดำเนินการแก้ไข

ตารางที่ 2 แสดงข้อมูลปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตสบู่อ่อน ตั้งแต่กระบวนการผสมจนถึงการปั๊มรูปก้อน จะเห็นได้ว่าของเสียที่เกิดขึ้นจากเครื่องจักรและอุปกรณ์ในกระบวนการผลิต ได้แก่ อุปกรณ์สายพานลำเลียง เครื่องอัด เครื่องปั่น และเครื่องบีบ โดยมีปริมาณของเสียแตกต่างกันไปตามลำดับจากตารางที่ 2 จะเห็นได้ว่า ของเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตในช่วงระยะเวลาหนึ่งปี มีจำนวน 29,110 กิโลกรัม โดยเกิดจากการทำงานของอุปกรณ์

สายพานลำเลียงทำให้เกิดของเสียสูงสุด 13,523 กิโลกรัม (ร้อยละ 46.5) ในขณะที่สาเหตุอื่น ๆ ได้แก่ เครื่องอัด เครื่องปั่น และเครื่องบีบทำให้เกิดเสียร้อยละ 25.5 16.6 และ 11.4 ตามลำดับ

ตารางที่ 2 ปริมาณของเสียจากเครื่องจักรและอุปกรณ์ในช่วงระยะเวลาหนึ่งปีก่อนการปรับปรุง (หน่วย: กิโลกรัม)

เดือนที่	อุปกรณ์สายพานลำเลียง	เครื่องอัด	เครื่องปั่น	เครื่องบีบ	รวม
1	1,231	653	408	374	2,666
2	1,012	672	558	276	2,518
3	985	582	535	471	2,573
4	836	520	439	376	2,171
5	2,119	539	283	257	3,198
6	1,362	666	420	223	2,671
7	1,088	771	113	47	2,019
8	972	660	540	418	2,590
9	819	530	433	192	1,974
10	1,369	637	417	361	2,784
11	938	729	529	246	2,442
12	792	470	171	71	1,504
รวม	13,523	7,429	4,846	3,312	29,110
ร้อยละ	46.5	25.5	16.6	11.4	100

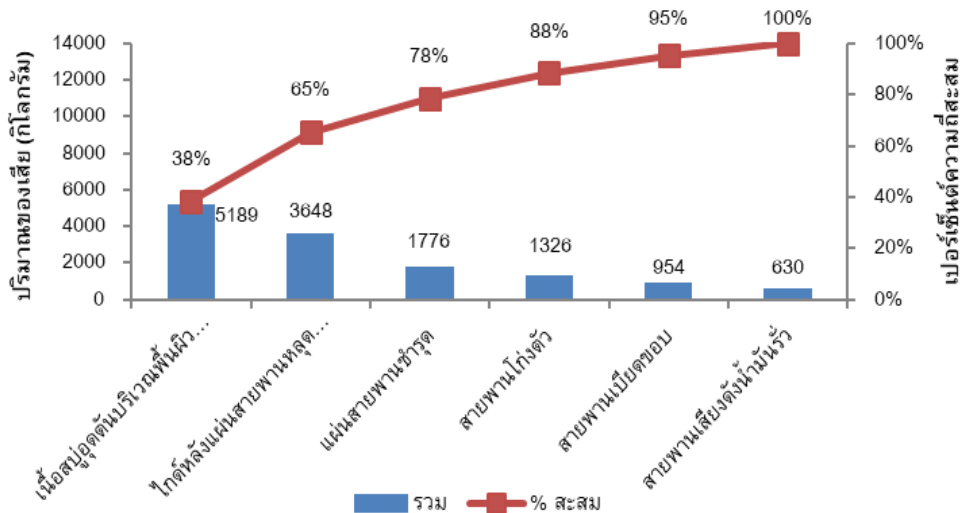
จะเห็นว่าอุปกรณ์สายพานลำเลียงเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดของเสียมากที่สุด นับเป็นปริมาณเกือบครึ่งหนึ่งของการเกิดของเสียทั้งหมด จึงได้ดำเนินการเลือกศึกษาเฉพาะกลุ่มอุปกรณ์สายพานลำเลียงเท่านั้น

4.1 การวิเคราะห์ปัญหาอุปกรณ์สายพานลำเลียง

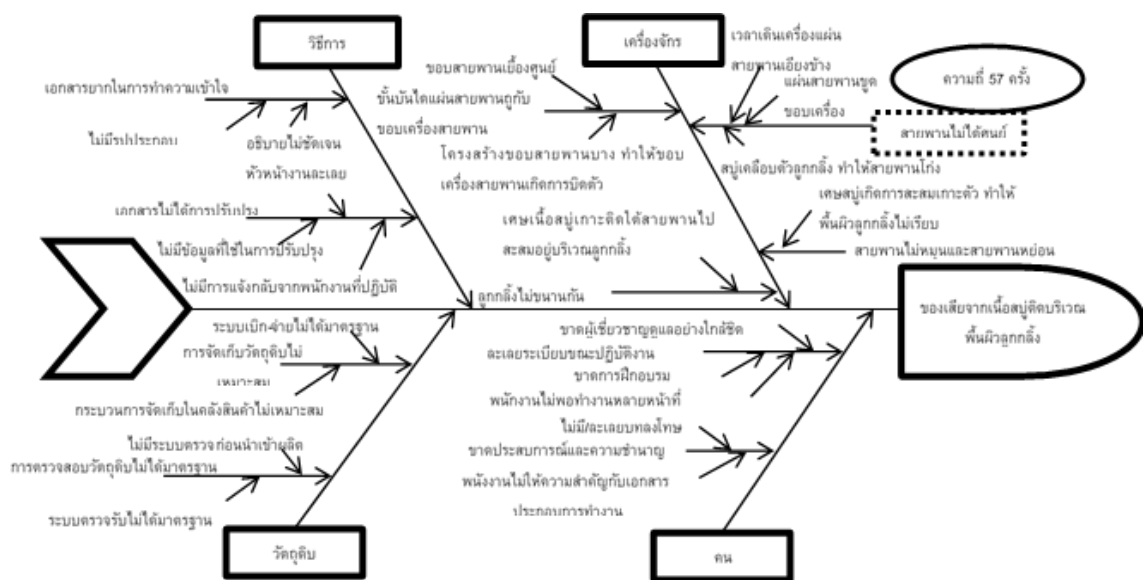
สายพานลำเลียงทำหน้าที่ในการลำเลียงเนื้อสบู่อ่อนที่ได้จากการปั่นผสมเม็ดสบู่อ่อนและส่วนผสมต่าง ๆ เข้าสู่กระบวนการอัด ปัญหาหลักที่พบในกลุ่มอุปกรณ์สายพานลำเลียงคือ สบู่ตกจากสายพาน ทำให้ไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ จากการศึกษาสาเหตุของการเกิดสบู่ตกจากสายพานมี 6 ลักษณะได้แก่ เนื้อสบู่

อุดตันบริเวณพื้นผิวลูกกลิ้งขับสายพาน ไกด์หลังแผ่นสายพานหลุดจากร่องนำทาง แผ่นสายพานชำรุด สายพานโก่งตัว สายพานเบี้ยวคอบ และสายพานมีน้ำมันรั่ว ดังแสดงในรูปที่ 2 จะเห็นได้ว่าผลกระทบจากสายพานลำเลียงส่งผลให้เกิดของเสียในปริมาณสูงถึง 13,523 กิโลกรัม โดยสาเหตุ 2 อันดับแรกทำให้เกิดของ

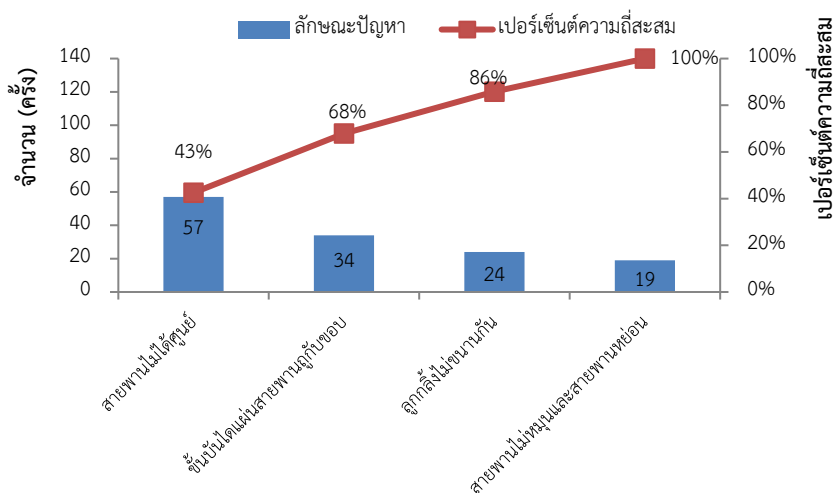
เสียรวม 8,837 กิโลกรัม (ร้อยละ 65.35) ซึ่งเกิดจากเนื้อสุบุดตันบริเวณพื้นผิวลูกกลิ้งจำนวน 5,189 กิโลกรัม และเกิดจากไกด์หลังแผ่นสายพานหลุดจากร่องนำทางจำนวน 3,648 กิโลกรัม ดังนั้นจึงนำปัญหาทั้งสองดังกล่าวมาทำการวิเคราะห์ เพื่อหาสาเหตุของปัญหาต่อไป



รูปที่ 2 ปัญหาหลักจากสายพานลำเลียง



รูปที่ 3 สาเหตุที่ทำให้เกิดของเสียในเรื่องการปรับแต่งศูนย์ชุดลูกกลิ้งขับสายพาน



รูปที่ 4 ลักษณะปัญหาเมื่อสับจุดตันบริเวณพื้นผิวลูกกลิ้งขับสายพาน

(1) เมื่อสับจุดตันบริเวณพื้นผิวลูกกลิ้ง แผ่นผึง ก้างปลาได้ถูกนำมาใช้เป็นเครื่องมือ เพื่อวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหา [15]–[17] ในที่นี้คือการอุดตันของเนื้อสับบริเวณพื้นผิวลูกกลิ้ง ผลการระดมสมองพนักงานฝ่ายผลิตและวิศวกรรม ทำให้ได้แผ่นผึงก้างปลา แสดงดังรูปที่ 3 โดยมีปัญหาสำคัญ 4 ลักษณะที่ได้ถูกคัดเลือกออกมาแสดงไว้ในรูปที่ 4 ตามรูปแบบของแผนภูมิพาเรโต จะเห็นได้ว่าสาเหตุของสับจุดตันเกิดจากปัจจัย 3 อันดับแรกรวมกันสูงถึงร้อยละ 86 ได้แก่ ปัญหาสายพานไม่ได้หมุน มีค่าเฉลี่ยสูงสุด 57 ครั้ง (ร้อยละ 43) รองลงมาคือชั้นบันไดแผ่นสายพานลื่นกับขอบ 34 ครั้ง (ร้อยละ 25) และปัญหาลูกกลิ้งไม่หมุนนาน 24 ครั้ง (ร้อยละ 18) ตามลำดับ ดังนั้นจึงนำประเด็นสาเหตุสายพานไม่ได้หมุนที่มีความถี่สูงสุดลำดับแรก มาทำการวิเคราะห์ด้วย Why-Why Analysis ดังตารางที่ 3 เพื่อหารากเหง้าของปัญหาและกำหนดแนวทางการแก้ไข

ผลการศึกษาพบว่า สาเหตุของสายพานไม่ได้หมุน ดังแสดงในรูปที่ 5 เกิดจากการที่เนื้อสับเกิดการเกาะตัวสะสมเป็นกลุ่มก้อนบริเวณลูกกลิ้ง ทำให้แผ่นสายพานลำเลียงสับมีลักษณะเป็นคลื่นไม่เรียบ ขณะที่มีการใช้งาน แผ่นสายพานจะไม่อยู่บริเวณกึ่งกลาง ทำให้เคลื่อนตัวบิดเบี้ยวและทำให้ขอบแผ่นสายพานชำรุด



รูปที่ 5 สายพานไม่ได้หมุน

ส่งผลต่อการสูญเสียที่เพิ่มขึ้น จากการสำรวจแผ่นสายพานพบว่ามีการเอียงออกทางด้านข้าง จึงทำให้แผ่นสายพานชูดกับขอบเครื่องเสียหายและทำให้ขอบแผ่นสายพานชำรุดส่งผลให้อัตราการยึดของขอบทั้ง 2 ด้านไม่เท่ากัน เมื่อสายพานทำงานไปนาน ๆ ทำให้เกิดการเคลื่อนตัวบิดเบี้ยวและเกิดการรั่วของสับในปริมาณมาก

แนวทางในการแก้ไขปัญหาสายพานไม่ได้ศูนย์ของสายพานลำเลียงสับ จากผลการวิเคราะห์หาสาเหตุด้วย Why-Why Analysis (ตารางที่ 3) คือการออกแบบรางสกรูคอนเวเยอร์ทดแทนสายพานและลูกกลิ้ง หลังจากได้มีการทดลองเบื้องต้นในหลายรูปแบบ พบว่า

การแก้ปัญหาในส่วนนี้สามารถทำได้โดยปรับปรุงบริเวณแผ่นสายพานโดยเปลี่ยนอุปกรณ์สายพานลำเลียงเดิมให้เป็นชุดขับเคลื่อนเกียร์สกรู จะช่วยแก้ปัญหาสายพานไม่ได้ศูนย์และลดการสูญเสียของเนื้อสับได้

ตารางที่ 3 การวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาสายพานไม่ได้ศูนย์ด้วย Why-Why Analysis

สภาพปัญหา	หัวข้อสำรวจ	ทำไม 1	ทำไม 2	ทำไม 3	พิจารณา	การแก้ไขและมาตรการป้องกัน
การไม่ได้ศูนย์ของสายพาน	มีเสียงของการเสียด	แผ่นสายพานเวลา	แผ่นสายพาน	ขอบแผ่นสายพาน	OK	ติดไคต์ด้านหลังแผ่นสายพาน
	สักระหว่างแผ่น	เดินเครื่องชูดขอบกับ	ขยับออกข้าง	ชำรุด ทำให้อัตราการยึดของขอบทั้ง 2 ด้านไม่เท่ากัน		เพื่อช่วยให้แผ่นสายพานเดินตำแหน่งตรงป้องกันการเยื้อง
	สายพานกับขอบเครื่องสายพาน	เครื่องสายพาน				โดนขอบเครื่อง
ลูกกลิ้งและสายพาน	ลูกกลิ้งและสายพาน	แผ่นสายพานเวลาเดินเครื่องเยื้องข้าง	สับติดตรงลูกกลิ้งสายพาน	เนื้อสับของตีรว้งออกจากสายพาน	OK	ใช้เหล็กเชื่อมเป็นขอบด้านหัว-ท้าย ลูกกลิ้ง ทั้งด้านบนและด้านล่างเพื่อลดการหมุนของแผ่นสายพานหลุดออกจากขอบลูกกลิ้ง
	ลูกกลิ้งและสายพาน	เศษสับเก่าๆเคลือบบริเวณลูกกลิ้ง ทำให้ตัวลูกกลิ้งกับแผ่นสายพานไถ่	พื้นผิวของลูกกลิ้งกับแผ่นสายพานไม่เรียบ	แผ่นสายพานขยับออกด้านข้าง	NG	ออกแบบสกรูคอนเวเยอร์ทดแทนสายพานและลูกกลิ้ง

(2) ไคต์หลังแผ่นสายพานหลุดจากร่องนำทาง

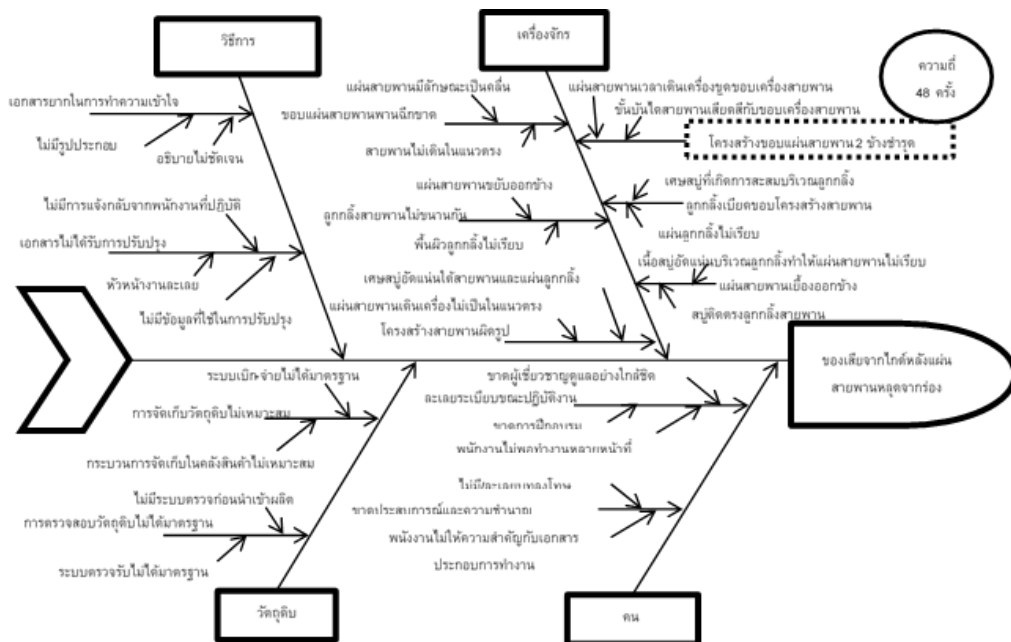
รูปที่ 6 แสดงการติดไคต์หลังแผ่นสายพานของลูกกลิ้งสายพานและร่องการเคลื่อนที่ของขอบใต้สายพานก่อนการปรับปรุง จากการวิเคราะห์หาสาเหตุที่ไคต์หลังแผ่นของสายพานหลุดจากร่องนำทางด้วยแผนผังก้างปลาแสดงในรูปที่ 7 และได้ผลการวิเคราะห์หาสาเหตุต่าง ๆ ในรูปของพาเรโต ดังแสดงไว้ในรูปที่ 8 จะเห็นได้ว่าสาเหตุหลัก 3 อันดับแรกมีค่าสูงถึงร้อยละ 72 โดยเกิดจากปัญหาโครงสร้างขอบแผ่นสายพาน 2 ข้างชำรุด 48 ครั้ง (ร้อยละ 28) แผ่นสายพานเยื้องออกทางด้านข้าง 43 ครั้ง (ร้อยละ 25) และปัญหาลูกกลิ้งเบียดขอบโครงสร้างสายพาน 31 ครั้ง (ร้อยละ 18) ตามลำดับ ดังนั้นจึงนำประเด็นสาเหตุโครงสร้างขอบแผ่นสายพาน 2 ข้างชำรุดที่มีปัญหาของการเกิดความถี่สูงสุดลำดับแรกมาวิเคราะห์ดำเนินการ

แก้ไขด้วย Why-Why Analysis ดังแสดงในตารางที่ 4 ผลการศึกษาโครงสร้างขอบแผ่นสายพาน 2 ข้าง เกิดการชำรุดจากแผ่นสายพานมีการเยื้องออกทางด้านข้างทำให้แผ่นสายพานชูดกับขอบเครื่องจักร เมื่อมีการติดไคต์หลังสายพานเพื่อให้แผ่นสายพานเคลื่อนที่แนวตรงไม่บิดเบี้ยว ทำให้เนื้อสับติดบริเวณใต้ไคต์สายพานและส่งผลให้ไคต์สายพานหลุดออกจากร่อง เกิดการไถ่ตัวของแผ่นสายพานและเกิดการขยับเยื้องศูนย์อีกครั้ง เป็นสาเหตุให้เนื้อสับตกลงพื้นเป็นจำนวนมาก

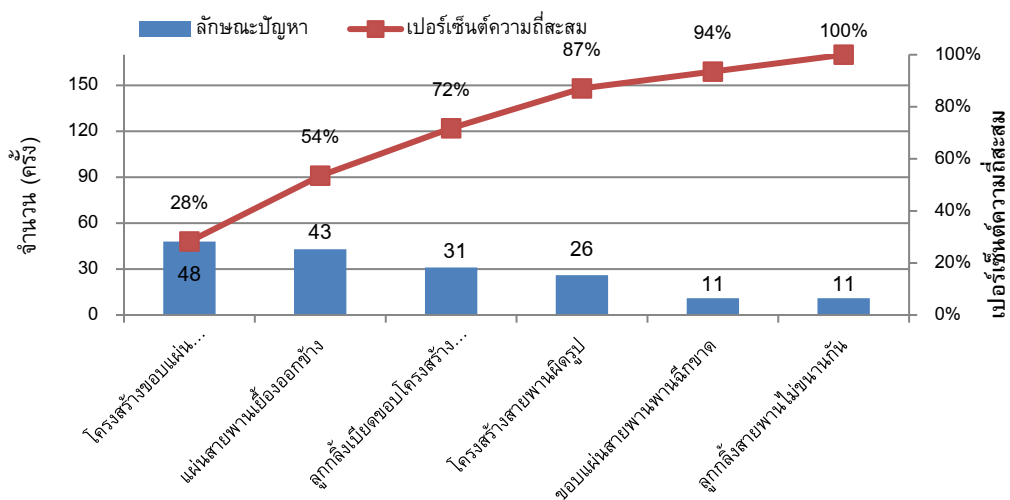
แนวทางในการแก้ไขไคต์หลังแผ่นสายพานหลุดจากร่องนำทางทำได้โดยการออกแบบปรับปรุงเครื่องจักรในส่วนของการรางสกรูลำเลียง (Screw Chute Conveyor) และท่อสกรูขนถ่าย (Screw Pipe Conveyor) จัดทำเป็นโครงสร้างสแตนเลสโค้งครึ่งวงกลม ติดตั้งสกรูด้านในเพื่อลำเลียงสับและมีฝาเปิดปิดด้านบนสำหรับทำความสะอาด



รูปที่ 6 การติดโกดไว้ที่หลังแผ่นสายพานของลูกกลิ้งสายพานและร่องการเคลื่อนที่ของขอบใต้สายพาน



รูปที่ 7 สาเหตุที่ทำให้เกิดของเสียในเรืองการติดโกดไว้ที่หลังแผ่นสายพาน



รูปที่ 8 ลักษณะปัญหาโกดหลังแผ่นสายพานหลุดจากร่องนำทาง

ตารางที่ 4 การวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาโครงสร้างขอบสายพาน 2 ข้างชำรุด โดยอุปกรณ์สายพานลำเลียงสับด้วย Why-Why Analysis

สภาพ ปัญหา	หัวข้อสำรวจ	ทำไม 1	ทำไม 2	ทำไม 3	พิจารณา	การแก้ไขและมาตรการ ป้องกัน
โครงสร้าง ขอบ สายพาน 2 ข้างชำรุด	ลูกกลิ้งและ สายพาน	แผ่นสายพานมี การเยื้องออก ข้าง	แผ่นสายพานชำรุด เชือกสายพาน เสียหาย	ขอบแผ่น สายพานขาด	OK	ติดไคต์ด้านหลังแผ่น สายพานเพื่อช่วยให้แผ่น สายพานเดินตำแหน่งตรง ป้องกันการเยื้องโดนขอบ เครื่อง
	มีเสียงของการ เสียดสีระหว่าง แผ่นสายพาน กับของ เครื่องสาย พาน	แผ่นสายพาน เวลาเดินเครื่อง ชำรุดขอบกับ เครื่องสายพาน	แผ่นสายพาน ขยับออกข้าง	ขอบแผ่น สายพานชำรุด ทำให้อัตราการ ยัดของขอบทั้ง 2 ด้านไม่เท่ากัน	OK	มีการสั่งทำแผ่นสายพาน ใหม่ และลดขนาดแผ่นให้ เล็กลงมาเพื่อป้องกันการชำรุด ทำให้แผ่นสายพานยัดตัว

4.2 ผลการปรับปรุงอุปกรณ์สายพานลำเลียง

(1) การปรับปรุงสายพานไม่ได้ศูนย์

การปรับปรุงชุดขับใบเกลียวสกรูหรือรางสกรูคอนเวเยอร์ใหม่ทดแทนแผ่นสายพานที่มีหน้าที่ในการลำเลียงหรือป้อนวัสดุ ที่มีลักษณะเป็นผงแป้งหรือเป็นเม็ดได้ และสามารถทำหน้าที่ในการผสมวัสดุให้เป็นเนื้อเดียวกันในขณะลำเลียงควบคู่กันไปในแนวลาดเอียง ลักษณะการสร้างรางสกรูคอนเวเยอร์เป็นได้ทั้งแผ่นเกลียวสกรูหรือแกนทวน ทำให้สกรูลำเลียงชนิดนี้เหมาะกับการใช้งานที่ต้องหลีกเลี่ยงการปนเปื้อนของวัสดุและงานที่ต้องการความสะอาด ทนต่อความสึกหรอสูง โดยทำการติดตั้งระบบชุดขับใบเกลียวรางสกรูลำเลียงใหม่ ดังแสดงในรูปที่ 9 โดยเปลี่ยนรูปแบบการขับใบเกลียวสกรูใหม่ที่ขับด้วยมอเตอร์เกียร์ ขนาด 5HP อัตราทด 50 รอบต่อนาที ช่วยเป็นตัวขับเคลื่อนชุดขับใบเกลียวสกรูลำเลียงสับที่มีอัตราการไหลของเนื้อสับประมาณ 800–1,000 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ซึ่งมีปริมาณที่มากกว่าการรองรับแผ่นสายพานเดิม โดยใบเกลียวสกรูใหม่มีการติดตั้งตามแนวเอียงที่เหมาะสมกับเครื่องจักรในการใช้งาน เพื่อให้สอดคล้องกันกับกระบวนการอัด ดังนั้นการ

ปรับปรุงระบบชุดขับใบเกลียวสกรูเป็นการลำเลียงโดยใช้ใบเกลียวเป็นตัวขับเคลื่อน เพื่อเพิ่มอัตราการไหลของเนื้อสับและสามารถลดการเกิดของเสียจากสายพานไม่ได้ศูนย์ อีกทั้งยังช่วยลดปัญหาการเปลี่ยนแผ่นสายพานที่ชำรุดจากการใช้งานได้อีกด้วย



รูปที่ 9 ชุดขับใบเกลียวสกรูลำเลียงใหม่

(2) การปรับปรุงโครงสร้างขอบสายพาน 2 ข้างชำรุด

จากปัญหาของอุปกรณ์สายพานลำเลียงที่กล่าวมา จึงได้ทำการออกแบบรางสกรูลำเลียงหรือท่อสกรูขนถ่ายแบบใหม่มาทดแทนการใช้สายพานและชุดลูกกลิ้ง

โดยทำโครงสร้างโค้งรูปตัวยู (U) ติดตั้งสกรูด้านในสำหรับลำเลียงสับและมีฝาเปิดปิดด้านบน ใช้วัสดุอะคริลิกใส ความหนา 0.004 ม. ติดบานพับ เพื่อป้องกันสิ่งสกปรกขนาดเล็กและการปนเปื้อนต่างๆ และใช้เป็นช่องทางในการทำความสะอาดรางสกรูลำเลียง ดังแสดงในรูปที่ 10 สำหรับการทำความสะอาด การปรับโครงสร้างของชุดสายพานลำเลียง ป้องกันแผ่นสายพานเยื้องศูนย์ ลดการเสียดสีระหว่างแผ่นสายพานกับขอบที่สำคัญป้องกันการสะสมเศษสับได้ห้องสายพาน ที่ทำให้โครงสร้างขอบสายพาน 2 ข้างชำรุด นอกจากนี้ยังช่วยลดขั้นตอนการทำความสะอาดสายพานจากการสะสมเศษสับได้ห้องสายพานได้อีกด้วย



รูปที่ 10 โครงสร้างรางสกรูลำเลียงและท่อสกรูขนถ่ายลำเลียงสับและมีฝาเปิดปิดด้านบน

ผลจากการแก้ไขปัญหสายพานไม่ได้ศูนย์และโครงสร้างขอบสายพานชำรุด โดยทำการเก็บข้อมูลก่อนปรับปรุง 12 เดือน และเก็บข้อมูลหลังการปรับปรุงอีก 2 เดือน ดังแสดงในตารางที่ 5 ซึ่งจากการแก้ไขปัญหาดังกล่าวทำให้ลดการเกิดของเสียในกระบวนการผลิต และยังทำให้เครื่องจักรส่วนอื่นๆ ดีขึ้นตามลำดับ ส่งผลให้อัตราของเสียมีแนวโน้มลดลงตามการปรับปรุงและ

อัตราคุณภาพมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น สามารถลดอัตราของเสียจากทุกกระบวนการทั้งหมดคิดเป็นค่าเฉลี่ยร้อยละ 12.6 (ตารางที่ 1) ลดลงเหลือร้อยละ 3.7 (ตารางที่ 5) ในขณะที่อัตราคุณภาพจากทุกกระบวนการเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 87.4 (ตารางที่ 1) เป็นร้อยละ 96.3 (ตารางที่ 5) ส่งผลให้อัตราของเสียลดลงร้อยละ 8.8 และทำให้ค่าอัตราคุณภาพเพิ่มขึ้นร้อยละ 8.8

ตารางที่ 5 ข้อมูลการผลิตสับก่อนหลังการปรับปรุง

เดือนที่	วัตถุดิบเข้า (กิโลกรัม)	ผลผลิต (กิโลกรัม)		อัตราของเสีย (%)	อัตราคุณภาพ (%)
		ของดี	ของเสีย		
1	16,489	15,544	945	5.7	94.3
2	16,399	16,122	276	1.7	98.3
เฉลี่ย	16,444	15,833	610.5	3.7	96.3

4.3 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติก่อนปรับปรุงและหลังปรับปรุงอัตราของเสียและอัตราคุณภาพ

จากการวิเคราะห์ผลการทดลองด้วย t-Test เพื่อหาความแตกต่างของค่าเฉลี่ยก่อนปรับปรุงและหลังปรับปรุงของอัตราของเสียและอัตราคุณภาพในกระบวนการผลิตสับก่อน ดังแสดงในตารางที่ 6 จากผลการทดลอง พบว่า ค่าเฉลี่ยก่อนปรับปรุงและหลังปรับปรุงของอัตราของเสียและอัตราคุณภาพมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) ซึ่งอัตราของเสียลดลง โดยก่อนปรับปรุงมีอัตราของเสียร้อยละ 12.6 และหลังการปรับปรุงมีอัตราของเสียร้อยละ 3.7 ตามลำดับ

นอกจากนี้ จากข้อมูลในตารางที่ 6 พบว่า ค่าเฉลี่ยก่อนปรับปรุงและหลังปรับปรุงของอัตราคุณภาพเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) ซึ่งเป็นข้อมูลที่สอดคล้องกันกับอัตราของเสีย คือ เมื่ออัตราของเสียลดลงส่งผลให้อัตราคุณภาพมีค่าเพิ่มขึ้น โดยก่อนปรับปรุงมีอัตราคุณภาพร้อยละ 87.4 และหลังการปรับปรุงมีอัตราคุณภาพร้อยละ 96.3 ตามลำดับ

ตารางที่ 6 การวิเคราะห์ค่าทางสถิติก่อนปรับปรุงและหลังปรับปรุงอัตราของเสีย

รายการ	ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง	P-value
อัตราของเสีย (ร้อยละ)	12.6 (1.40)	3.7 (2.02)	0.000*
อัตราคุณภาพ (ร้อยละ)	87.4 (1.40)	96.3 (2.01)	0.000*

หมายเหตุ: * คือ มีนัยสำคัญ, ค่าในวงเล็บ คือ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

5. สรุปผล

سبقก่อนเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีความต้องการเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงสถานการณ์การแพร่ระบาดของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 (covid-19) การเพิ่มอัตราคุณภาพของกระบวนการผลิต จำเป็นต้องหาสาเหตุของปัญหาและกำหนดแนวทางแก้ไขเพื่อทำให้เกิดของเสียให้ลดน้อยลงซึ่งจะช่วยให้สามารถเพิ่มศักยภาพในการแข่งขันกับคู่แข่งในตลาดได้มากยิ่งขึ้นจากการเลือกใช้เครื่องมือควบคุมคุณภาพที่เหมาะสมในงานวิจัยนี้ ได้แก่ (1) แผนภาพพาเรโต (Pareto Analysis) (2) การหาสาเหตุที่แท้จริงของปัญหาด้วย Why-Why Analysis (3) แผนผังก้างปลา (Fishbone Diagram) และ (4) การศึกษาการทำงาน (Work Study) ผ่านกระบวนการระดมสมองจากผู้เชี่ยวชาญ ทำให้สามารถค้นหาสาเหตุหลักของปัญหาและกำหนดแนวทางแก้ไข ส่งผลให้ปริมาณของเสียที่เกิดมากที่สุดจากสายพานไม่ได้ศูนย์และโครงสร้างขอบสายพานชำรุดอันเนื่องจากแผ่นสายพานเดินบิดเบี้ยวลดน้อยลง โดยก่อนการปรับปรุงมีปริมาณของเสียเฉลี่ย 2,426 กิโลกรัมต่อเดือน เมื่อทำการปรับปรุงโดยการออกแบบเครื่องจักรและอุปกรณ์ ทำการติดตั้งชุดสกรูลำเลียงสปู และเก็บผลการแก้ไขพบว่าสามารถลดอัตราของเสียจากทุกกระบวนการทั้งหมดคิดเป็นค่าเฉลี่ยร้อยละ 12.5 ลดลง

เหลือร้อยละ 3.7 ในขณะที่อัตราคุณภาพจากทุกกระบวนการเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 87.5 เป็นร้อยละ 96.3 ส่งผลให้อัตราของเสียลดลงร้อยละ 8.8 จะเห็นได้ว่าผลการปรับปรุงสามารถลดอัตราการเกิดของเสียได้ตามที่วัตถุประสงค์กำหนดไว้ โดยใช้เครื่องมือ QC Tools ในการแก้ปัญหาการเกิดของเสียจากอุปกรณ์สายพานลำเลียงและสามารถควบคุมกระบวนการผลิตให้อยู่ในข้อกำหนดที่ทำการตรวจสอบได้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Department of Trade Negotiations. (2021, March). Cosmetics, soaps and skin care products. [Online]. Available: https://www.ditp.go.th/contents_attach/732611/732611.pdf
- [2] Department of Trade Negotiations. (2020, April). Expanding the soap market with FTA: Opportunities for the Thai soap industry during the Coronavirus Disease 2019 crisis. [Online]. Available: <https://api.dtn.go.th/files/v3/5ea141c6ef4140efbb1e54f4/download>
- [3] L. Spitz, *Soap Manufacturing Technology*, 2nd ed. Academic Press and AOCS Press, 2016.
- [4] P. Pornprasert, A. Pornprasert and D. Utarapong, "Defects rate reduction in the engine liquid pipelines manufacturing by dimension inspector jig improvement: a case study of automotive part manufacturing," *Journal of Industrial Technology Ubon Ratchathani Rajabhet*

- University, vol. 6, no. 1, pp. 163-176, July 2016.
- [5] P. Pukasorn, S. Srichaluai and P. Pougchampul, "Study and reducing waste in the injection molding process," in *Proceedings of the Conference of Industrial Engineering Network 2012*, Sripatum University, Petchaburi, 2012, pp. 859-866.
- [6] S. Saewong, "Reduction of defect rate in shrimp feed process," M.Eng. minor thesis, Dept. Ind. Eng., Prince of Songkla Univ., Songkhla, Thailand, 2011.
- [7] T. Sunseang, "Waste reduction in injection process," M. Eng. thesis, Dept. Eng Mgt., Dhurakij Pundit Univ., Bangkok, Thailand, 2014.
- [8] G. Olmi, "Statistical tools applied for the reduction of the defect rate of coffee degassing valves" *Case Studies in Engineering Failure Analysis*, vol. 3, pp. 17-24, 2015.
- [9] A. Joshi and L.M. Jugulkar, "Investigation and analysis of metal casting defects and defect reduction by using quality control tools" in *Proceedings of IRF International Conference*, Goa, 2014, pp. 86-91. March 2014.
- [10] P. Hormsri and J. Khongthana, "Defects reduction in the process of automotive injection plastic part by using design of experiment (DOE)," *Journal of Engineering*, vol. 2, pp. 11-28, Dec. 2014.
- [11] K. Athikulrat and S. Yindeemorh, "Application of Six Sigma to reduce waste from wire spokes production process: A case study on motorcycle parts factory," *KMUTT Research and Development Journal*, vol. 43, no. 3, pp. 277-296, Jul. 2020.
- [12] Amnaht Amaluk, "Defect reduction in machine parts production processes: A case study of Supreme Precision Manufacturing Co.,Ltd.," *Thai Industrial Engineering Network Journal*, vol. 5, no. 1, pp. 36-48, Jan. 2019.
- [13] Ch. Thavornwat, R. Kanchana, S. Jarupinyo and V. Wattanajitsiri, "The defect reduction in wire parts process for car seat," *Thai Industrial Engineering Network Journal*, vol. 3, no. 1, pp. 25-33, Jan. 2017.
- [14] K. Kitpongnikorn and N. Osothsilp, "Defect reduction in film blowing process by Six Sigma approach," *Srinakharinwirot University Engineering Journal*, vol. 13, no. 1, pp. 187-201, Jan. 2018.
- [15] K. Athikulrat and K. Dolpanya, "Defective reduction in the production process of plastic films," *Science and Technology Nakhon Sawan Rajabhat University Journal*, vol. 11, no. 13, pp. 41-50, Jan. 2019.

- [16] N. Maneechot and Ph. Pijitbanjong, "Defect reduction in standard thai rubber production process," *Thai Industrial Engineering Network Journal*, vol. 5, no. 1, pp. 66-74, Jan. 2019.
- [17] T. Ratanawilai and V. Srisuk, "Improvement of overall equipment effectiveness on the process of wood plank," *Naresuan University Journal: Science and Technology*, vol. 23, no. 1, pp. 133-141, Jan. 2015.
- [18] P. Klomjit, *Productivity Improvement: Principle and Practice*, Bangkok, Se-Education, 2014.

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

ผลของแป้งข้าวกล้องงอกและอินูลินต่อคุณภาพของแป้งต็อกโบกิ

มนัสนันท์ ธีระเกียรติกำจร¹ จิรวิทย์ กาญจนลักษณ์¹ ปาริสุทธิ์ เฉลิมชัยวัฒน์^{1*}

และ พรราวตา จันทโร²

¹ สาขาอาหารและโภชนาการ ภาควิชาคหกรรมศาสตร์ คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

² สาขานวัตกรรมการอาหารและโภชนาการ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี

¹ 50 ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

² 272 ถนนสุราษฎร์-นาสาร ตำบลขุนทะเล อำเภอเมือง สุราษฎร์ธานี 84100

รับบทความ 4 กรกฎาคม 2564 แก้ไขบทความ 8 มีนาคม 2565 ตอรับบทความ 4 เมษายน 2565

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาผลิตภัณฑ์ต็อกจากแป้งข้าวกล้องงอกเสริมอินูลิน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการใช้แป้งข้าวกล้องงอกทดแทนแป้งข้าวเหนียวและแป้งข้าวเจ้า และการเสริมอินูลินต่อคุณลักษณะทางกายภาพ เคมี และประสาทสัมผัสของต็อก การใช้แป้งข้าวกล้องงอกทดแทนแป้งข้าวเหนียว และแป้งข้าวเจ้าในต็อกที่อัตราส่วนแป้งข้าวเหนียวต่อแป้งข้าวเจ้า 2:1 แป้งข้าวเหนียวต่อแป้งข้าวกล้องงอก 2:1, 1:2 และ 1.5:1.5 พบว่าปริมาณแป้งข้าวกล้องงอกที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ต็อกมีความเป็นสีแดง (a^*) และความเป็นสีเหลือง (b^*) เพิ่มขึ้น แต่ความสว่าง (L^*) ความสามารถเกาะรวมตัวกัน ความเหนียวเป็นยางหรือกาว ความทนต่อการเคี้ยว และคะแนนความชอบลดลง ศึกษาการเสริมอินูลินที่ร้อยละ 0, 20, 30 และ 40 พบว่าการเสริมอินูลินส่งผลให้ต็อกมีความเป็นสีแดง (a^*) และความเป็นสีเหลือง (b^*) ลดลง แต่ค่าความสว่าง (L^*) ค่าความแข็ง และความสามารถเกาะรวมตัวกันเพิ่มขึ้น การเสริมอินูลินในต็อกที่ร้อยละ 30 ได้รับคะแนนความชอบมากที่สุดในด้านสี เนื้อสัมผัส รสชาติ และความชอบโดยรวม องค์ประกอบทางเคมีของต็อกจากแป้งข้าวกล้องงอกเสริมอินูลินมีปริมาณความชื้นร้อยละ 44.78 โปรตีนร้อยละ 3.36 ไขมันร้อยละ 0.19 เถ้าร้อยละ 0.47 เส้นใยหยาบร้อยละ 0.48 คาร์โบไฮเดรตร้อยละ 51 และให้พลังงาน 84 กิโลแคลอรี/หน่วยบริโภค (40 กรัม)

คำสำคัญ : ต็อก; แป้งข้าวกล้องงอก; อินูลิน

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

Effects of Germinated Brown Rice Flour and Inulin on the Quality of Tteokbokki Flour

Manusanun Dheerakiatkumchorn¹ Jirawit Kanjanalux¹ Parisut Chalermchaiwat^{1*}
and Prawta Chantaro²

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

² Food Innovation and Nutrition Program, Faculty of Science and Technology, Suratthani Rajabhat University

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

² 272 Surat-Nasarn Road, Khun Talae, Muang, Surat Thani 84100

Received 4 July 2021; Revised 8 March 2022; Accepted 4 April 2022

Abstract

This research is the development of Tteok products from germinated brown rice flour supplemented with inulin. The objectives were to study the use of germinated brown rice flour as a substitute for glutinous rice flour and rice flour and inulin supplementation on physical, chemical and sensory qualities of Tteok. The germinated brown rice flour was substituted glutinous rice flour and rice flour in Tteok at different ratios; glutinous rice flour to rice flour 2:1, glutinous rice flour to germinated brown rice flour 2:1, 1:2, and 1.5:1.5. Increasing the germinated brown rice flour resulted in increased redness (a^*) and yellowness (b^*), but decreased lightness (L^*), cohesiveness, gumminess, chewiness and liking score. Inulin supplementation was studied at 0%, 20%, 30% and 40%. Supplementation with inulin caused a decrease in redness (a^*) and yellowness (b^*) of Tteok, whereas the lightness (L^*), hardness and adhesiveness increased. Tteok with 30% inulin obtained the highest liking score in color, texture, taste and overall liking. The chemical composition of germinated brown rice flour Tteok with inulin supplement contains 44.78% moisture content, 3.36% protein, 0.19% fat, 0.47% ash, 0.48% fiber, 51.00% carbohydrate and 84 kcal/serving (40 g).

Keywords : Tteok; Germinated Brown Rice Flour; Inulin

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

1. บทนำ

ต็อกโบกี (Tteokbokki) เป็นอาหารเกาหลีที่ได้รับความนิยมในประเทศไทย [1] ตัวแป้งต็อก (Tteok) ผลิตจากแป้งข้าวเจ้า และแป้งข้าวเหนียวขึ้นรูปเป็นทรงกระบอก ทำให้สุกด้วยการต้มหรือหนึ่ง และนำไปปรุงรสด้วยซอสแบบเผ็ดที่ทำจากโคชูจัง (น้ำพริก) หรือซอสแบบไม่เผ็ดที่ทำจากคันจัง (ซอสถั่วเหลือง) ก็ได้ คุณค่าทางโภชนาการหลักคือคาร์โบไฮเดรต ปัจจุบันพฤติกรรมการบริโภคของคนไทยเน้นการบริโภคอาหารเพื่อสุขภาพ ดังนั้นการใช้แป้งเพื่อสุขภาพ เช่น แป้งจากข้าวกล้องงอก (Germinated Brown Rice Flour) จึงเป็นทางเลือกที่ดีต่อสุขภาพ และได้คุณค่าทางโภชนาการมากยิ่งขึ้น

ข้าวกล้องงอก (Germinated Brown Rice) คือการนำข้าวเปลือกหรือข้าวกล้องมาเพาะงอก และทำให้แห้งเพื่อลดความชื้น ข้าวกล้องงอกมีคุณค่าทางโภชนาการสูง เนื่องจากข้าวกล้องงอกอุดมไปด้วยสารอาหารที่มีประโยชน์ต่อร่างกาย เช่น อินโนซิทอล (Inositol) กรดเฟอร์รูริก (Ferulic Acid) กรดแกมมาอะมิโนบิวไทริก (Gamma-aminobutyric Acid, GABA) โทโคไตรอีนอล (Tocotrienols) และแกมมาออริซานอล (Gamma Oryzanol) เป็นต้น การรับประทานข้าวกล้องงอกอย่างต่อเนื่องมีผลต่อการป้องกันการปวดศีรษะ รักษาระดับน้ำตาลในเส้นเลือด ป้องกันโรคหัวใจ ช่วยลดความดันโลหิต และป้องกันโรคความจำเสื่อม [2] ในปัจจุบันมีการนำข้าวกล้องงอกมาผลิตเป็นแป้งข้าวกล้องงอกเพื่อให้นำไปใช้ได้ง่ายและผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีความหลากหลาย เช่น มัฟฟิน [3] และโดฟูกุ [4] เป็นต้น งานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าเมื่อนำแป้งข้าวกล้องงอกไปทดแทนในผลิตภัณฑ์อาหารมักเกิดปัญหาทางด้านเนื้อสัมผัส เนื่องจากเมื่อข้าวผ่านการงอกทำให้แป้งบางส่วนย่อยไปเป็นน้ำตาลส่งผลให้ค่าความหนืดลดลง [5] ซึ่งมีผลต่อค่าความแข็งและความเหนียวในผลิตภัณฑ์ จึง

มีการใช้สารต่าง ๆ มาช่วยในการปรับปรุงลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ ซึ่งอินูลินนิยมนำมาใช้ในการปรับปรุงเนื้อสัมผัส โดยจะให้โยอาหารและมีรสหวานตามธรรมชาติ

อินูลินคือโยอาหารที่สกัดจากพืชและสามารถละลายน้ำได้ประกอบด้วยพอลิเมอร์ของฟรุคโตสอาจมีน้ำตาลกลูโคสอยู่ด้วยหรือไม่ก็ได้ ถ้ามีน้ำตาลกลูโคสจะมีเพียง 1 โมเลกุล อยู่ที่ปลายด้านใดด้านหนึ่ง มีระดับการเกิดพอลิเมอร์ (Degree of Polymerization, DP) เท่ากับ 2-60 ซึ่งยึดเกาะกันด้วยพันธะ β -2,1 ที่ไม่สามารถย่อยได้ด้วยเอนไซม์ในกระเพาะอาหาร แต่สามารถถูกย่อยได้โดยแบคทีเรียในลำไส้ใหญ่ [6] จึงมีประโยชน์ช่วยในการขับถ่าย ช่วยควบคุมระดับน้ำตาลและไขมันในเลือด ลดจุลินทรีย์ที่ก่อโรค และเพิ่มภูมิคุ้มกันให้กับร่างกายได้อีกด้วย [7] อินูลินถูกนำมาใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารเพื่อปรับปรุงเนื้อสัมผัส เช่น การใช้อินูลินเป็นสารทดแทนไขมันในคุกกี้ [8] บิสกิต [9] และไส้กรอกไก่ไขมันต่ำ [6] ซึ่งพบว่าการเพิ่มอินูลินทำให้ค่าความแข็งของคุกกี้ บิสกิต และไส้กรอกไก่ไขมันต่ำเพิ่มขึ้นด้วย

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการใช้แป้งข้าวกล้องงอกทดแทนแป้งข้าวเหนียวและแป้งข้าวเจ้าและการเสริมอินูลินต่อลักษณะทางกายภาพ เคมี และประสาทสัมผัสของต็อก เพื่อเป็นแนวทางในการใช้ประโยชน์จากแป้งข้าวกล้องงอก และเพิ่มมูลค่าให้กับวัตถุดิบของไทยมากยิ่งขึ้น

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 วัตถุดิบ

แป้งข้าวเจ้าและแป้งข้าวเหนียว (นิเวศ, ไทย) แป้งข้าวกล้องงอกได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท เมดิฟูดส์ (ประเทศไทย) จำกัด อินูลิน (SL inulin 101) ซอสต็อกโบกีสำเร็จรูป (Mom's Mam, เกาหลี)

2.2 การใช้แป้งข้าวกล้องงอกทดแทนแป้งข้าวเหนียวและแป้งข้าวเจ้าต่อคุณภาพทางกายภาพและทางประสาทสัมผัสของต็อก

การผลิตต็อกสูตรพื้นฐาน (สูตร A) โดยมีอัตราส่วนของแป้งข้าวเหนียวและแป้งข้าวเจ้าเท่ากับ 2:1 ซึ่งดัดแปลงมาจากสูตรของ Jinny [10] แล้วทำการทดแทนแป้งข้าวเหนียวและแป้งข้าวเจ้าด้วยแป้งข้าวกล้องงอก ในอัตราส่วนแป้งข้าวเหนียวและแป้งข้าวกล้องงอกเท่ากับ 2:1 (สูตร B), 1:2 (สูตร C) และ 1.5:1.5 (สูตร D) มีวิธีการผลิตคือ นำแป้ง 30 กรัม มาผสมให้เข้ากัน เติมน้ำร้อน (80 องศาเซลเซียส) 28 กรัม นวดให้ส่วนผสมเข้ากันด้วยมือ จากนั้นนำไปนึ่งในลังถึง นาน 150 วินาที เติมน้ำมันงา 1 กรัม ลงในแป้งที่นึ่งแล้ว และนวดให้เข้ากัน คลึงแป้งให้เป็นเส้นยาวมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร ตัดเป็นท่อนยาว 3 เซนติเมตร โดยให้แต่ละชิ้นหนัก 2 กรัม บรรจุต็อกในถุงพลาสติก โพลีเอทิลีนและเก็บที่อุณหภูมิห้อง (27 ± 2 องศาเซลเซียส) นาน 1 ชั่วโมง ก่อนนำมาวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพและประเมินทางประสาทสัมผัส

2.2.1 การวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพ

นำต็อกที่ผลิตได้มาวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพ ดังนี้

1) ค่าสี ในระบบ CIE LAB โดยใช้เครื่องวัดค่าสี (Colourflex, Hunter Lab, สหรัฐอเมริกา) โดยค่าสี L^* (ค่าความสว่างมีค่า 0-100, 0 หมายถึงวัตถุที่มีความสว่างสีดำ และค่า 100 หมายถึงวัตถุที่มีความสว่างสีขาว) ค่าสี a^* (+ หมายถึง วัตถุที่มีสีแดง, - หมายถึง วัตถุที่มีสีเขียว) ค่าสี b^* (+ หมายถึง วัตถุที่มีสีเหลือง, - หมายถึงวัตถุที่มีสีน้ำเงิน) วัดค่าจำนวน 3 ซ้ำ

2) ลักษณะเนื้อสัมผัสด้วยวิธี Texture Profile Analysis โดยใช้เครื่อง Texture analyzer (TA.XT plus, Stable Micro System, อังกฤษ) ใช้หัววัด P/35 กดลงบนตัวอย่างที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร และยาว 3 เซนติเมตร โดยวางตัวอย่างใน

แนวนอนและกดลงไปเป็นระยะทางร้อยละ 75 ของความสูงชิ้นตัวอย่าง ด้วยความเร็วในการทดสอบ 5 มิลลิเมตรต่อวินาที วัดค่าจำนวน 10 ซ้ำในการทดลอง 1 ซ้ำ รายงานผลออกมาเป็นค่าความแข็ง (Hardness) ความสามารถในการเกาะติดผิววัสดุ (Adhesiveness) ความยืดหยุ่น (Springiness) ความสามารถเกาะรวมตัวกัน (Cohesiveness) และความเหนียวเป็นยางหรือกาว (Gumminess)

2.2.2 ประเมินทางประสาทสัมผัส

นำต็อกที่ผลิตได้มาประเมินความชอบด้วยวิธีการให้คะแนนความชอบ 9 ระดับ (9 - Points Hedonic Scale) กับผู้ทดสอบชิมที่ไม่ได้ผ่านการฝึกฝน จำนวน 50 คน โดยทำการประเมิน 2 แบบ คือ (1) ตอกประเมินคุณลักษณะด้าน สี กลิ่นรส รสชาติ เนื้อสัมผัส และ (2) ตอกพร้อมซอส ประเมินคุณลักษณะด้าน รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม

2.3 การศึกษาปริมาณอินูลินต่อคุณภาพทางกายภาพเคมี และประสาทสัมผัสของต็อก

นำตอกสูตรที่ผ่านการคัดเลือกโดยใช้เกณฑ์คะแนนความชอบด้านรสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมสูงที่สุดในข้อ 2.2 มาศึกษาการเสริมอินูลิน 4 ระดับ คือ ร้อยละ 0 (B1) ร้อยละ 20 (B2) ร้อยละ 30 (B3) และร้อยละ 40 (B4) ตามลำดับ ซึ่งปริมาณอินูลินที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้คำนึงถึงปริมาณอินูลินที่สามารถบริโภคได้ใน 1 วัน เนื่องจากหากร่างกายได้รับอินูลินมากเกินไปวันละ 15-40 กรัมต่อวัน จะทำให้เกิดอาการท้องเสียได้ [7] โดยผลิต ตอกตามวิธีการผลิตในข้อ 2.2 จากนั้นนำมาวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพตามข้อ 2.2.1 และประเมินทางประสาทสัมผัสตามข้อ 2.2.2

2.3.1 การวิเคราะห์คุณภาพทางเคมี

นำตอกที่ได้รับคะแนนความชอบโดยรวมสูงที่สุดจากข้อ 2.3 มาวิเคราะห์คุณภาพทางเคมีดังนี้

1) ปริมาณความชื้น เถ้า ไขมัน โปรตีน เส้นใย หยาด และคาร์โบไฮเดรต ตามวิธีการของ AOAC (2016)

2) ค่าพลังงานของต็อก โดยใช้เครื่อง Bomb Calorimeter (6100, PARR, สหรัฐอเมริกา) รายงานผลเป็นหน่วยกิโลแคลอรี (kcal)

2.4 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

ดำเนินการวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design, CRD) และวางแผนการทดลองแบบสุ่มในบล็อกสมบูรณ์ (Randomized Complete Block Design, RCBD) สำหรับการประเมินทางประสาทสัมผัส วิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA) ของข้อมูล และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างสิ่งทดลองด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 วิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้โปรแกรม SPSS version 21 (IBM, สหรัฐอเมริกา)

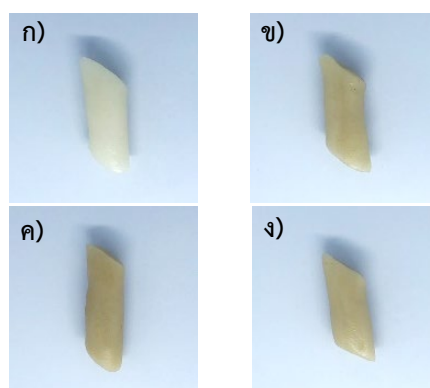
3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 ผลของการใช้แป้งข้าวกล้องงอกทดแทนแป้งข้าวเหนียวและแป้งข้าวเจ้าต่อคุณภาพทางกายภาพและทางประสาทสัมผัสของต็อก

ลักษณะของต็อกที่ได้จากการทดแทนแป้งข้าวเจ้าและแป้งข้าวเหนียวด้วยแป้งข้าวกล้องงอกแตกต่างกันทั้ง 4 สูตร ดังแสดงในรูปที่ 1 พบว่า ต็อกสูตร A มีสีข้าวที่สุกเพราะไม่มีการทดแทนด้วยแป้งข้าวกล้องงอก ส่วนต็อกสูตร C มีสีน้ำตาลที่สุดเนื่องจากมีการทดแทนแป้งข้าวกล้องงอกปริมาณมากที่สุด

ค่าสีของต็อกแสดงในตารางที่ 1 พบว่า ค่าสี L^* , a^* และ b^* ของต็อกทั้ง 4 สูตรนั้น มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) พิจารณาค่าความสว่าง (L^*) พบว่าต็อกสูตรพื้นฐาน (สูตร A) มีค่า L^* มาก

ที่สุด ความเป็นสีแดง (a^*) และความเป็นสีเหลือง (b^*) น้อยที่สุดเนื่องจากแป้งข้าวเจ้ามีลักษณะเป็นผงสีขาว ปริมาณแป้งข้าวกล้องงอกเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า L^* ลดลง โดยต็อกสูตร C ค่า L^* น้อยที่สุด มีค่า a^* และ ค่า b^* มากที่สุด สอดคล้องกับงานวิจัยของอภิญา [3] ที่ศึกษาการทดแทนแป้งข้าวสาลีด้วยแป้งข้าวกล้องงอกในมัฟฟินแล้วพบว่า ค่า L^* ลดลง ส่วนค่า a^* และ ค่า b^* เพิ่มขึ้น เนื่องจากแป้งข้าวกล้องงอกมีสีเข้มกว่าแป้งข้าวสาลี



รูปที่ 1 ต็อกที่ได้จากการทดแทนแป้งข้าวเหนียวและแป้งข้าวเจ้าด้วยแป้งข้าวกล้องงอกที่ต่างกัน
ก) สูตร A ข) สูตร B ค) สูตร C และ ง) สูตร D

ลักษณะเนื้อสัมผัสของต็อกแสดงในตารางที่ 2 พบว่า การทดแทนแป้งข้าวเจ้า (สูตร A) ด้วยแป้งข้าวกล้องงอก (สูตร B) ในปริมาณที่เท่ากัน ส่งผลให้ ค่าความแข็ง (Hardness) และความเหนียวเป็นยางหรือกาว (Gumminess) ลดลง ในขณะที่การเพิ่มปริมาณแป้งข้าวกล้องงอกและลดแป้งข้าวเหนียว (สูตร C) เมื่อเปรียบเทียบกับสูตร B พบว่าทำให้ค่าความแข็ง (Hardness) เพิ่มขึ้น ความยืดหยุ่น (Springiness) ความสามารถเกาะรวมตัวกัน (Cohesiveness) และความเหนียวเป็นยางหรือกาว (Gumminess) ลดลง เนื่องจากข้าวที่ผ่านการงอกทำให้แป้งบางส่วนย่อยไปเป็นน้ำตาลค่าความหนืดจึงมีค่าลดลง [5] ส่งผลให้

ผลิตภัณฑ์มีความแข็งและเหนียวลดลง เมื่ออัตราส่วน แป้งข้าวเหนียวและแป้งข้าวกล้องงอกเท่ากันคือ 1.5:1.5 (สูตร D) เปรียบเทียบกับสูตร C พบว่าปริมาณแป้งข้าวเหนียวที่เพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความสามารถเกาะรวมตัวกัน (Cohesiveness) เพิ่มขึ้น

การประเมินทางประสาทสัมผัสโดยวิธีการให้ คะแนนความชอบของต็อก แสดงดังตารางที่ 3 และ

คะแนนความชอบของต็อกกับซอส แสดงดังตารางที่ 4 พบว่า การบริโภคต็อกร่วมกับซอสส่งผลให้ค่าคะแนนความชอบด้านรสชาติ และเนื้อสัมผัสเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ต็อกสูตร B และสูตร D ทั้งแบบไม่มีซอสและมีซอส ได้คะแนนความชอบในคุณลักษณะด้านรสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมจากผู้ทดสอบไม่แตกต่างจากสูตรพื้นฐาน

ตารางที่ 1 ค่าสีของต็อกที่ได้จากการทดแทนแป้งข้าวเหนียวและแป้งข้าวเจ้าด้วยแป้งข้าวกล้องงอกที่แตกต่างกัน

Treatment	Color		
	L*	a*	b*
A (Basic formula)	52.49 $\pm$ 0.02 ^a	-0.77 $\pm$ 0.01 ^d	10.37 $\pm$ 0.07 ^d
B	47.69 $\pm$ 0.07 ^b	1.22 $\pm$ 0.06 ^c	16.46 $\pm$ 0.13 ^c
C	45.48 $\pm$ 0.02 ^d	2.21 $\pm$ 0.03 ^a	18.74 $\pm$ 0.05 ^a
D	45.77 $\pm$ 0.01 ^c	1.78 $\pm$ 0.05 ^b	18.13 $\pm$ 0.03 ^b

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

ตารางที่ 2 ค่าเนื้อสัมผัสของต็อกที่ได้จากการทดแทนแป้งข้าวเจ้าและแป้งข้าวเหนียวด้วยแป้งข้าวกล้องงอกที่แตกต่างกัน

Texture	Treatment			
	A (Basic formula)	B	C	D
Hardness (N)	3651.00 $\pm$ 261.34 ^a	3027.56 $\pm$ 148.47 ^b	3740.26 $\pm$ 197.51 ^a	3071.88 $\pm$ 172.12 ^b
Adhesiveness	-712.43 $\pm$ 289.78 ^b	-519.93 $\pm$ 147.76 ^{ab}	-644.27 $\pm$ 214.11 ^{ab}	-480.83 $\pm$ 164.89 ^a
Springiness	0.66 $\pm$ 0.18 ^{ab}	0.75 $\pm$ 0.06 ^a	0.53 $\pm$ 0.15 ^b	0.61 $\pm$ 0.15 ^b
Cohesiveness	0.74 $\pm$ 0.07 ^a	0.78 $\pm$ 0.03 ^a	0.57 $\pm$ 0.07 ^c	0.66 $\pm$ 0.07 ^b
Gumminess	2702.17 $\pm$ 237.79 ^a	2360.23 $\pm$ 126.87 ^b	2128.45 $\pm$ 240.78 ^c	1993.61 $\pm$ 209.96 ^c

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

ตารางที่ 3 คะแนนความชอบของต็อกที่ได้จากการทดแทนแป้งข้าวเหนียวและแป้งข้าวเจ้าด้วยแป้งข้าวกล้องงอก

Treatment	Tteok			
	Color	Flavor	Taste	Texture
A (Basic formula)	7.78 $\pm$ 1.28 ^a	6.88 $\pm$ 1.06 ^a	6.64 $\pm$ 1.06 ^a	6.69 $\pm$ 1.21 ^a
B	6.72 $\pm$ 1.33 ^b	6.78 $\pm$ 1.38 ^{ab}	6.74 $\pm$ 1.28 ^a	7.02 $\pm$ 1.55 ^a
C	5.56 $\pm$ 1.43 ^c	5.92 $\pm$ 1.60 ^c	5.68 $\pm$ 1.20 ^b	6.06 $\pm$ 1.36 ^b
D	5.92 $\pm$ 1.50 ^c	6.28 $\pm$ 1.47 ^{bc}	6.52 $\pm$ 1.33 ^a	6.96 $\pm$ 1.59 ^a

หมายเหตุ ^{a-c} ที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันหมายถึงสิ่งทดลองมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ 4 คะแนนความชอบของต็อกกับซอสที่ได้จากการทดแทนแป้งข้าวเหนียวและแป้งข้าวเจ้าด้วยแป้งข้าวกล้องงอก

Treatment	Tteok with sauce		
	Taste	Texture	Overall liking
A (Basic formula)	7.40 ± 0.78 ^a	7.20 ± 1.03 ^a	7.40 ± 0.83 ^a
B	7.20 ± 1.34 ^a	7.30 ± 1.43 ^a	7.42 ± 1.23 ^a
C	6.46 ± 1.40 ^b	6.24 ± 1.21 ^b	6.42 ± 1.23 ^b
D	7.04 ± 1.36 ^a	7.10 ± 1.54 ^a	7.28 ± 1.26 ^a

หมายเหตุ ^{a-b} ที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันหมายถึงสิ่งทดลองมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ 5 ค่าสีของต็อกที่เสริมปริมาณอินูลินที่แตกต่างกัน

Treatment	Color		
	L*	a*	b*
B1	47.69 ± 0.07 ^d	1.22 ± 0.06 ^a	16.46 ± 0.13 ^a
B2	48.21 ± 0.02 ^c	0.71 ± 0.13 ^b	15.73 ± 0.05 ^b
B3	49.34 ± 0.02 ^b	0.67 ± 0.06 ^b	14.99 ± 0.11 ^c
B4	50.57 ± 0.02 ^a	-0.09 ± 0.03 ^c	13.86 ± 0.08 ^d

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

ตารางที่ 6 ค่าเนื้อสัมผัสของต็อกที่เสริมปริมาณอินูลินแตกต่างกัน

Texture	Treatment			
	B1	B2	B3	B4
Hardness (N)	3027.56 ± 148.47 ^b	4032.24 ± 272.61 ^a	4113.27 ± 408.24 ^a	4259.80 ± 501.39 ^a
Adhesiveness	-519.93 ± 147.76 ^b	-279.71 ± 119.09 ^a	-329.02 ± 65.70 ^a	-249.70 ± 78.16 ^a
Springiness ^{ns}	0.75 ± 0.06	0.67 ± 0.10	0.77 ± 0.40	0.68 ± 0.07
Cohesiveness	0.78 ± 0.03 ^a	0.64 ± 0.03 ^b	0.66 ± 0.04 ^b	0.60 ± 0.02 ^c
Gumminess	2360.23 ± 126.87 ^b	2580.14 ± 228.54 ^{ab}	2727.65 ± 264.29 ^a	2561.70 ± 319.75 ^{ab}

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

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

ตารางที่ 7 คะแนนความชอบของต็อกที่เสริมอินูลินแตกต่างกัน

Treatment	Tteok			
	Color	Flavor ^{ns}	Taste	Texture
B1	6.42 ± 1.11 ^b	6.82 ± 1.27	6.44 ± 1.31 ^b	6.96 ± 1.20 ^{bc}
B2	6.78 ± 1.28 ^b	6.48 ± 1.27	6.70 ± 1.33 ^{ab}	7.04 ± 0.86 ^{ab}
B3	7.36 ± 1.01 ^a	6.98 ± 1.19	7.20 ± 1.46 ^a	7.46 ± 1.16 ^a
B4	7.70 ± 1.30 ^a	6.78 ± 1.15	6.80 ± 1.18 ^{ab}	6.54 ± 1.09 ^c

หมายเหตุ ^{a-c} ที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันหมายถึงสิ่งทดลองมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

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

3.2 ผลของการเสริมอินูลินต่อคุณภาพทางกายภาพ เคมี และประสาทสัมผัสของดอก

ค่าสีของดอกที่มีการเสริมอินูลินในปริมาณที่แตกต่างกัน แสดงในตารางที่ 5 พบว่า ค่าสี L^* , a^* และ b^* ของดอกมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ดอกสูตรควบคุม (B1 : ไม่เสริมอินูลิน) มีค่า L^* น้อยที่สุด ในขณะที่ค่า a^* และค่า b^* มากที่สุด การเสริมอินูลินในดอกที่ใช้แบ่งข้าวกล้องงอกทดแทนแบ่งข้าวเหนียวและแบ่งข้าวเจ้า พบว่า ปริมาณอินูลินที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า L^* ของดอกเพิ่มขึ้น ลักษณะเนื้อสัมผัสของดอกสูตร B ใกล้เคียงกับสูตรพื้นฐาน (ตารางที่ 2) จึงเลือกสูตร B เพื่อไปศึกษาการเสริมอินูลินต่อไป โดยดอกที่เสริมอินูลินร้อยละ 40 มีค่า L^* มากที่สุด มีค่า a^* และค่า b^* น้อยที่สุด สำหรับดอกที่มีการเสริมอินูลินร้อยละ 20 มีค่า L^* น้อยที่สุด มีค่า a^* และค่า b^* มากที่สุด สอดคล้องกับการใช้อินูลินเป็นสารทดแทนไขมันในคุกกี้ [8] เนื่องจากอินูลินมีลักษณะเป็นผงสีขาว ส่งผลให้มีค่า L^* เพิ่มขึ้น ค่า a^* และ ค่า b^* ลดลง

ลักษณะเนื้อสัมผัสของดอกเสริมอินูลินในปริมาณที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 6 พบว่า การเสริมอินูลินในดอก ทำให้ค่า Hardness, Adhesiveness และ Gumminess เพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่า Cohesiveness ลดลง แต่ไม่ส่งผลต่อค่า Springiness

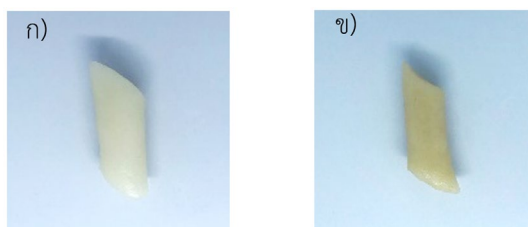
การเพิ่มปริมาณอินูลินส่งผลให้ค่า Hardness ของดอกมากขึ้นสอดคล้องกับการเสริมอินูลินในไส้กรอกไก่ไขมันต่ำ [6] ที่รายงานว่าอินูลินทำให้ค่า Hardness ของไส้กรอกไก่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเกิดเจลของอินูลินส่งผลให้ความแน่นเนื้อของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น

ผลการประเมินทางประสาทสัมผัสแสดงในตารางที่ 7 และ 8 พบว่า ดอกสูตร B3 เสริมอินูลินร้อยละ 30 มีคะแนนความชอบจากผู้ทดสอบมากที่สุดในทุกคุณลักษณะโดยอยู่ในระดับชอบปานกลางถึงชอบมาก

ดอกที่เสริมอินูลินได้คะแนนความชอบเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะด้านสี เนื้อสัมผัส และรสชาติ เนื่องจาก

การเติมอินูลินทำให้ค่าความสว่างของดอกมากขึ้น เนื่องจากผงอินูลินมีสีขาว นอกจากนี้ยังช่วยให้เนื้อสัมผัสของดอกในด้านความแข็งและความเหนียวดีขึ้น

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของดอกที่มีการทดแทนแบ่งข้าวเจ้าด้วยแบ่งข้าวกล้องงอกเสริมอินูลินที่ระดับร้อยละ 30 เปรียบเทียบกับสูตรควบคุม (รูปที่ 2) แสดงในตารางที่ 9 สอดคล้องกับการพัฒนาผลิตภัณฑ์ขนมปังจากแบ่งแค้นตะวัน [13] พบว่าการเพิ่มปริมาณแบ่งแค้นตะวันส่งผลต่อโครงสร้างของขนมปังโดยเนื้อขนมปังจะแน่นขึ้นและค่าความแข็งเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ อินูลินเป็นสารทดแทนความหวานจึงทำให้ดอกมีรสชาติที่ดียิ่งขึ้นสังเกตได้จากค่าคะแนนความชอบโดยการเสริมอินูลินที่ระดับร้อยละ 30 จะทำให้ได้คะแนนความชอบด้านรสชาติและความชอบโดยรวมจากผู้ทดสอบมากที่สุด



รูปที่ 2 ดอก ก) สูตรพื้นฐาน) ข) สูตรที่พัฒนาได้

การทดแทนแบ่งข้าวเจ้าด้วยแบ่งข้าวกล้องงอกและการเสริมอินูลินที่ระดับร้อยละ 30 ส่งผลให้ปริมาณโปรตีนในดอกลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรพื้นฐาน ปริมาณเส้นใยหยาบในดอกที่พัฒนาได้มีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากข้าวกล้องงอกและอินูลินมีใยอาหารสูง ทั้งนี้ดอกที่มีการใช้แบ่งข้าวกล้องงอกทดแทนแบ่งข้าวเจ้าและแบ่งข้าวเหนียวคาดว่าจะมีปริมาณสาร GABA สูงกว่าสูตรพื้นฐาน เช่นเดียวกับการใช้ข้าวกล้องงอกในผลิตภัณฑ์โดพูกและคุกกี้ พบว่าผลิตภัณฑ์มีค่า GABA เพิ่มขึ้นจากเดิม [4], [14]

ตารางที่ 8 คะแนนความชอบทางประสาทสัมผัสของต็อกบกกับซอสที่เสริมอินูลินแตกต่างกัน

Treatment	Tteok with sauce		
	Taste	Texture	Overall liking
B1	6.98 ± 1.17 ^b	7.08 ± 1.26 ^a	7.10 ± 1.07 ^b
B2	7.22 ± 1.18 ^{ab}	7.16 ± 0.79 ^a	7.12 ± 0.94 ^b
B3	7.64 ± 1.16 ^a	7.50 ± 1.22 ^a	7.84 ± 1.04 ^a
B4	7.28 ± 0.99 ^{ab}	6.56 ± 1.15 ^b	7.00 ± 0.99 ^b

หมายเหตุ ^{a-b} ที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันหมายถึงสิ่งทดลองมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ 9 ผลการวิเคราะห์คุณภาพทางเคมีของต็อกสูตรพื้นฐานและสูตรที่พัฒนาได้

Chemical quality	Treatment	
	A (Basic formula)	B3 (Developed formula)
Moisture (% wb)	50.38 ± 0.26 ^a	44.78 ± 0.17 ^b
Protein (% wb)	4.03 ± 0.05 ^a	3.36 ± 0.03 ^b
Fat (% wb)	0.16 ± 0.01 ^b	0.19 ± 0.01 ^a
Ash (% wb)	0.19 ± 0.09 ^b	0.47 ± 0.08 ^a
Crude fiber (% wb)	0.22 ± 0.03 ^b	0.48 ± 0.02 ^a
Carbohydrate (% wb)	44.87 ± 0.56 ^b	51.00 ± 0.13 ^a
Energy ^{ns} (kcal/40 g)	85.40 ± 0.01 ^a	84.40 ± 0.00 ^b

หมายเหตุ ^{a-b} ที่แตกต่างกันในแนวนอนหมายถึงสิ่งทดลองมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

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

4. สรุป

ต็อกที่พัฒนาได้ประกอบไปด้วยแป้งข้าวเหนียวและแป้งข้าวกล้องงอกในอัตราส่วน 2:1 และเสริมอินูลินร้อยละ 30 โดยน้ำหนักแป้ง ผลิตภัณฑ์ที่พัฒนาได้มีคุณค่าทางโภชนาการด้านใยอาหารเพิ่มขึ้น และเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค โดยมีคะแนนความชอบโดยรวมอยู่ในระดับชอบปานกลาง งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของการนำแป้งข้าวกล้องงอกมาใช้ร่วมกับอินูลินเพื่อปรับปรุงเนื้อสัมผัส ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ต็อกได้ ซึ่งเป็นแนวทางการเพิ่มมูลค่า สร้างความหลากหลายให้กับผลิตภัณฑ์ และส่งผลต่อสุขภาพของผู้บริโภค

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ สาขาอาหารและโภชนาการ ภาควิชาคหกรรมศาสตร์ คณะเกษตรมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ เครื่องมือ และอุปกรณ์ในการทำวิจัยจนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] C. Lampao, "The study of attitude, perception and behavior on Korean trends," Ph.D. dissertation, Dept. Applied Statistics, National Institute of Development Administration Univ., Bangkok, Thailand, 2013.

- [2] U. Wattanakul, W. Wattanakul, N. Mahae and P. Jarunrat, "Effect of harvesting maturity and storage time on nutritional properties of Sung Yod Phatthalung brown rice and germinated brown rice," *Thaksin University Journal*, vol. 14, pp. 50-58, 2011.
- [3] A. Charoenkul, "Effect of wheat flour substitution with germinated brown rice flour on qualities of muffin," *Agricultural Science Journal*, vol. 44 (Suppl.), pp. 237-240, 2013.
- [4] C. Wongbasg and K. Jangchud, "Effect of ingredients on the quality of Daifuku from germinated glutinous brown rice flour," in *Proceedings of 49th Kasetsart University Annual Conference: Agro-Industry*, Kasetsart University, Thailand, 2011, pp. 173-181.
- [5] C. Sovaphan, K. Jangchud and P. Tungtrakul, "Effect of germination conditions on pasting properties and gaba content of germinated brown rice flour produced from paddy rice," in *Proceedings of 49th Kasetsart University Annual Conference: Agro-Industry*, Kasetsart University, Thailand, 2011, pp. 250-257.
- [6] R. Srisamran, C. Phunchaisri, T. Keokamnerd and W. Daengprok, "Effect of inulin addition on physical quality and sensory property of low-fat chicken sausage," M.S. thesis, Dept. Faculty of Engineering and AgroIndustry, Maejo Univ., Chiang Mai, Thailand, 2012.
- [7] S. Tanjor, K. Judprasong, C. Chaito and S. Jogloy, "Inulin and fructooligosaccharides in different varieties of Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.)," *Khon Kaen University Research Journal*, vol. 17, pp. 25-34, 2012.
- [8] Hala S. Sayed and Soha R. Khalil, "Effect of chicory inulin extract as a fat replacer on texture and sensory properties of cookies," *Middle East Journal of Applied Sciences*, vol. 07, pp. 168-177, 2017.
- [9] M. Krystyjan, D. Gumul, R. Ziobro and M. Sikora, "The effect of inulin as a fat replacement on dough and biscuit properties," *Journal of food*, vol. 38, pp. 305-315, 2015.
- [10] J. Teoh. (2020, April 15). Ttoek poki (1st ed.). [Online]. Available: <https://cookpad.com>
- [11] J. Othong, L. Klinmalai and A. Chareonchai, "The using of inulin replaced with sugar in milk Ice cream supplemented with chicken breast," *Research Journal Rajamangala University of Technology Thanyaburi*, vol 19, pp. 39-50, 2020.
- [12] H. Sriprapai, C. Boonchai and Y. Huadong, "Development of fresh pasta from brown rice flour," *Thai Journal of Science and Technology*, vol. 7, pp. 58-69, 2018.
- [13] J. Singthong, "Development of healthy bread product from sunchoke (*Helianthus tuberosus* L.) flour," *Journal of Science and Technology Ubonratchathani University*, vol. 21, pp. 76-89, 2019.
- [14] R. Jiamjariyatam, "Development of a cookie-type snack from geminated brown rice flour and selected herb fillings," M.S. thesis, Dept. Agro-Industrial Product Development, Kasetsart Univ., Bangkok, Thailand, 2008.

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

Antibacterial Potential of Combined Thai Herb Extracts against Methicillin-Resistant *Staphylococcus aureus*, *Edwardsiella tarda* and *Pseudomonas aeruginosa* in Dried, Seasoned, and Crushed Squid

Subuntith Nimrat^{1*}, Pornpimon Soodsawaeng², Sangsuriya Sukhapat¹, Phodchamarn Noiaresar¹, Traimat Boonthai², and Verapong Vuthiphandchai³

¹ Department of Microbiology, Faculty of Science, Burapha University

² Biological Science Program, Faculty of Science, Burapha University

³ Department of Aquatic Science, Faculty of Science, Burapha University

^{1,2,3} 169 Long Had Bangsaen Road, Saensuk Subdistrict, Mueang District, Chon Buri 20131, Thailand

Received 16 September 2021; Revised 8 March 2022; Accepted 4 April 2022.

Abstract

Food-borne diseases have become a serious public health issue. Due to the occurrence of multi-antibiotic resistant bacteria in seafood-based products, there is a need for novel tools to control the growth of pathogens. In this study, two herb-extract combinations (80 mg/mL), namely lemongrass (*Cymbopogon citratus* (DC.) Stapf) and black pepper (*Piper nigrum* Linn.) extracts, and lemongrass and chili spur pepper (*Capsicum frutescens* Linn.) extracts, were supplemented into dried, seasoned, and crushed squid to investigate their inhibitory activity against pathogenic methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* (MRSA) and *Edwardsiella tarda*, and food-spoilage *Pseudomonas aeruginosa*. Combined addition of lemongrass and chili spur pepper extracts resulted in a significant ($p < 0.05$) decrease in MRSA and *E. tarda* numbers, compared to the control during 28-day refrigerated storage. *P. aeruginosa* appeared to be vulnerable to the both herb-extract blends supported by a significant ($p < 0.05$) 1-log reduction in the dried squid during chilled storage. This study suggests that a mixture of lemongrass and chili spur pepper extract had the potential use as natural preservative to reduce the risk of diseases associated with the consumption of contaminated dried seafood products.

Keywords : Chon Buri; Pepper; Chili; Lemongrass; Dried squid; Food safety

* Corresponding Author. Tel.: +66 3810 3120, E-mail Address: subunti@buu.ac.th

1. Introduction

Seafood is a healthful diet containing a variety of essential nutrients such as proteins, vitamins, minerals, unsaturated fatty acids, and taurine [1]. Demand of seafood-based products in Thailand increases every year with an annual per capita consumption of 33 kg in 2016. Due to the perishable nature of seafood and its improper storage environment, food-borne diseases caused by pathogen contamination have been an important food-safety issue. In Thailand, traditional dried seafood, a popular processed seafood product, is reported to contaminate with several pathogenic bacteria, e.g., *Bacillus cereus*, *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*, *Edwardsiella tarda*, and *Salmonella* [2]-[4].

Food poisoning caused by enterotoxigenic strains of *S. aureus* has become a public health concern in Thailand. In 2014, 207.52 food poisoning cases per 100,000 populations were reported by Bureau of Epidemiology, Thailand by which *S. aureus* was one of the most frequently isolated pathogenic bacteria identified from 22.2% of the patients [5]. Unfortunately, the misuse of antibiotics in medical treatments and animal farm practices has resulted in the emergence and dissemination of methicillin-resistant *S. aureus* (MRSA) in food chain, thereby harming a food safety. MRSA has been reported to be resistant to common used antimicrobial agents leading to more complicated treatments of patients with severe infections. Aside from causing infections in both healthcare facilities, and communities ranging from mild skin infections to life-threatening diseases, viz. pneumonia, septicemia, endocarditis, and nosocomial infection, MRSA also causes food-poisoning. Human infections

caused by food-borne MRSA strains have been documented worldwide. For example, there was the incidence of food poisoning caused by a staphylococcal enterotoxin C producing MRSA following ingestion of roasted pork contaminated by food handlers [6]. Currently, the occurrence of MRSA in fresh seafood, ready-to-eat seafood, and seafood-derived products has been increasingly reported in many countries [7]-[8]. In Thailand, MRSA strains were recently isolated from a multi-recipe of traditional dried seafood products sold in Chon Buri province in our laboratory.

E. tarda, a causative agent of hemorrhagic septicemia in fish, has been isolated from a number of fresh water and marine life. The pathogen can rarely cause infections in human following consumption of contaminated fish or seafood, and accidental ingestion of contaminated water. Most clinical symptoms (approximately 80%) of *E. tarda* infection include gastroenteritis, and other diarrheal syndromes, e.g., dysentery, chronic diarrhea, and enteric fever [9]. *Pseudomonas* sp., in particular *P. aeruginosa*, is one of the most dominant spoilage bacteria frequently isolated from dried ready-to-eat seafood products in Chon Buri province. This bacterium is degenerative to product quality through slime formation, discoloration, and generation of off-flavors and odors due to production of volatile substances, such as alcohols, aldehydes, esters, and sulphur compounds [10]. *P. aeruginosa* is also considered as an opportunistic human pathogen frequently implicated in nosocomial infections, and gastrointestinal syndromes, particularly in immunocompromised individual [10]. Infections caused by *P. aeruginosa* are generally complicated to cure owing to the limited susceptibility to

antimicrobial agents and the high frequency of an emergence of antibiotic resistance during remedy [11]. This situation indicates that Thai traditional seafood products pose a serious risk of food-borne diseases. As such, an effective technology based on preservative is required to improve the safety and extend the shelf-life of such products.

Chemical preservatives are commonly applied in several recipes of seafood-based products in Thailand. However, their safety issues have been questioned by consumers in terms of the potentially life-threatening side effects on human health. For example, sulphites are implicated in allergic and asthma reactions in sensitive people, and chronic skin symptoms [12]. Nitrites are toxic at high concentrations and can react with proteins to form carcinogenic nitrosamines, when exposed to certain heats or acid environments. A positive correlation has been reported between increased levels of nitrates in food and increased deaths from Alzheimer's, Parkinson's, and type 2 diabetes [13]. In this sense, alternative practices using natural substances have been drawn much attention. In Thai cuisine, several gastronomical and traditional herbs commonly used as flavoring ingredient, such as ginger, lemongrass, garlic, clove, chili pepper, kaffir lime, cumin, shallot, and galangal, have been claimed to represent antibacterial activity against food-borne pathogens. Until now, a study focused on antimicrobial efficacy of Thai herb extracts/essential oils on pathogenic bacteria has received very little interest in a food-model condition. Therefore, this study aimed to investigate antibacterial activity of two herb extract mixtures (lemongrass-black pepper extract and lemongrass-chili spur pepper extract) against MRSA, *E. tarda*, and *P.*

aeruginosa in dried, seasoned, and crushed squid used as a seafood model.

2. Research Methodology

2.1 Herb extraction

In our preliminary study, unsatisfactory inhibitory activity against MRSA, *E. tarda*, and *P. aeruginosa* was observed in individual herb extract of lemongrass (*Cymbopogon citratus* (DC.) Stapf), chili spur pepper (*Capsicum frutescens* Linn.), and black pepper (*Piper nigrum* Linn.). In contrast, their combined extracts (lemongrass and chili spur pepper or lemongrass and black pepper) were *in vitro* effective in inhibiting the tested pathogens. Lemongrass (stems), chili spur pepper (fruits), and black pepper (fruits) were purchased from a local spice store in Chon Buri province, Thailand. Herb preparation and extraction were performed according to P. Soodsawaeng et al. [14] method. After rinsing with running water, all herb materials were shade-dried, and chopped using a table knife. Then, the herbs were dried at 35 °C for 72 h, and ground using an electronic blender. The herb powders were extracted with denatured 95% ethanol at a ratio of 1:10 of material to extractant in a shaking incubator at 120 rpm, 30 °C for 72 h. Supernatants were passed through a Whatman filter membrane No.1 prior to evaporation at 40 °C and 175 mbar using a rotary evaporator (Buchi R-215, Flawil, Switzerland). Ethanolic extracts were diluted with 10% dimethyl sulfoxide to produce stock solution (80 mg/mL) and sterilized using a 0.45 µm syringe filter prior to storage at -20 °C until use.

2.2 Pathogen preparation

Two pathogenic bacteria (MRSA T18 and *E. tarda* DS 002), and one strain

of food-spoilage bacteria (*P. aeruginosa* DS001) isolated from dried seafood products sold in Chon Buri, province Thailand in our laboratory were used in this study. The stock cultures were frozen at -80 °C in Trypticase Soy Broth (BD Difco, Sparks, Maryland, USA) containing 20% glycerol. The culture was propagated on Trypticase Soy Agar (TSA; Becton BD) at 35 °C for 24 h with two consecutive transfers to produce active sub-cultures. Then, the bacterial isolate was cultured in a tube containing TSB, and incubated at 35 °C for 24 h. Cell concentration was adjusted to 10^4 CFU/mL using the McFarland turbidity standard before being used.

2.3 Synergistic study of the mixed herb extracts against pathogenic and spoilage bacteria in dried, seasoned, and crushed squid

Antibacterial potential of the mixed herb extracts against food-borne and food-spoilage bacteria was investigated following N. Butkhot et al. [3] method. Briefly, dried, seasoned, and crushed squid was purchased from a retail store in Chon Buri province, Thailand. The squid samples were cut using a sterile scissors to obtain a 2 x 2 cm piece. Experimental design in this study consisted of three treatments including addition of tested bacterial suspension in the squid samples together with sterile distilled water (control), lemongrass-black pepper supplement, and lemongrass-chili spur pepper supplement. A square piece sample was experimentally inoculated with the suspension of MRSA T18, *E. tarda* DS 002 or *P. aeruginosa* DS001 at concentration of 10^4 CFU/mL. After air-drying in a biosafety cabinet for 15 min, a minute volume (0.1 mL) of either the combined herb supplement (80 mg/mL)

or distilled water was introduced onto entire surface of a 4 cm² piece of the pathogen-inoculated squid. The squid samples were then air-dried for 15 min, packed in a sterile plastic bag (3 x 5 inches; 1 sample: 1 bag) to prevent cross contamination, and stored in a 4 °C refrigerator. During 28 days of storage, the squid samples were retrieved at 15-min, 2, 4, 7, 14, 21 and 28 day post-inoculation to monitor change in the pathogen numbers (see below). An additional treatment of squid exposed to sterile distilled water without the addition of pathogen suspension was included in this study to obtain background data of pathogen contamination in dried, seasoned, and crushed squid.

2.4 Enumeration of the tested pathogens

Enumeration of tested pathogenic bacteria was carried out using a spread plate method. The sample (2 g) at each defined interval was mixed with 0.1% (w/v) peptone water (18 mL), and vigorously homogenized using a stomacher for 2 min. A 10-fold dilution was made, and then a 0.1-mL aliquot was spread-plated onto Baird-Parker agar (BD Difco) supplemented with egg yolk tellurite enrichment, Hektoen Enteric Agar (BD Difco), and Pseudomonas Isolation Agar (Himedia, Mumbai, India) for enumeration of MRSA, *E. tarda*, and *P. aeruginosa*, respectively [7], [15]-[16]. All petri dishes were incubated at 35 °C for 48 h. Suspicious colony grown on the media was streaked onto TSA to gain pure culture prior to being characterized by Gram staining, and selected biochemical tests, as described elsewhere [17]. Typical isolates were compared with physical and biochemical characteristics of the original strains experimentally inoculated onto the dried

squid. All confirmed typical colonies were counted and calculated as colony forming unit (CFU) per g of sample. All experiments were conducted in triplicate. Reference strains, namely MRSA ATCC 43300, *E. tarda* ATCC 15947, and *P. aeruginosa* ATCC 15442 were used during enumeration and confirmation of the pathogen.

2.5 Data analysis

Data are expressed as mean $\pm$ standard deviation (S.D.). The numbers of bacteria were normalized by 10-log transformation, when needed prior to statistical analyses. Data were analyzed using a Two-way ANOVA, and followed by the Tukey's multiple comparison test to identify any difference among treatments. All statistical analyses were conducted at a significant level of $p < 0.05$ using a GraphPad Prism version 7.0

(GraphPad software, San Diego, California, USA).

3. Results

3.1 Antibacterial activity against MRSA

Antistaphylococcal activities of the two herb-extract combinations were significantly ($p < 0.05$) greater than that of the control (Fig. 1). The strongest inhibitory activity against MRSA in dried squid was present following addition of the herb extract blend of lemongrass and chili spur pepper due to a significantly ($p < 0.05$) reduced MRSA number, compared to the control during 28-day storage. MRSA number in squid added with lemongrass-chili spur pepper extracts significantly ($p < 0.05$) reduced from $1.43 \pm 0.95 \times 10^3$ CFU/g at beginning of experiment to undetectable level at 28-day storage (Fig. 1).

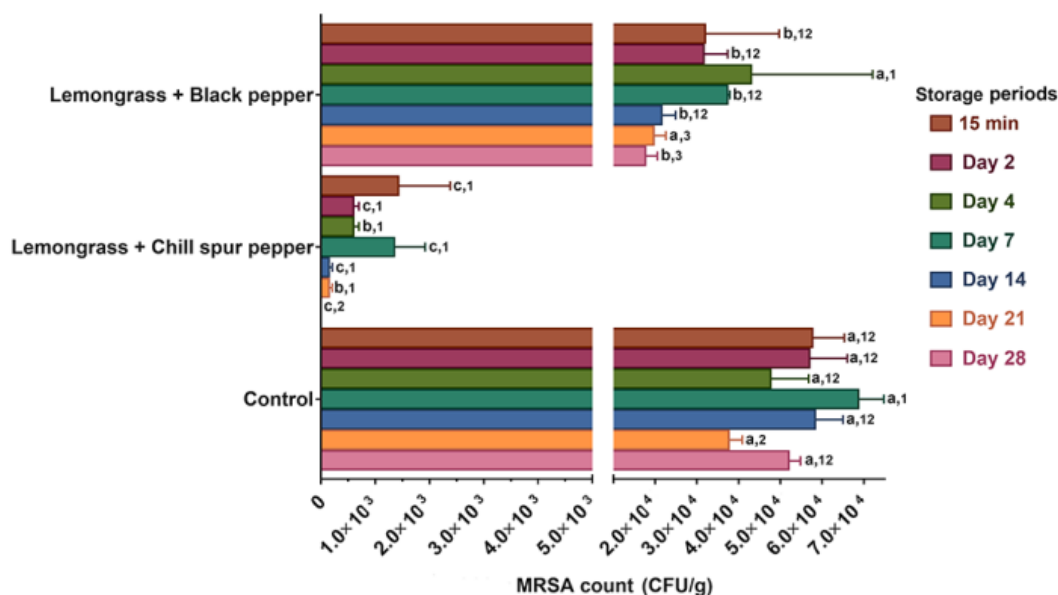


Fig. 1 Antibacterial potential of the combined herb extracts on growth of MRSA in dried squid during 28-day refrigerated storage. MRSA was absent in the squid samples exposed to sterile distilled water without inoculation of the pathogen suspension. Bars with different letters at each sampling period denote significant difference ($p < 0.05$) among treatments. Bars with different numbers within the same treatments denote significant difference ($p < 0.05$) over the time.

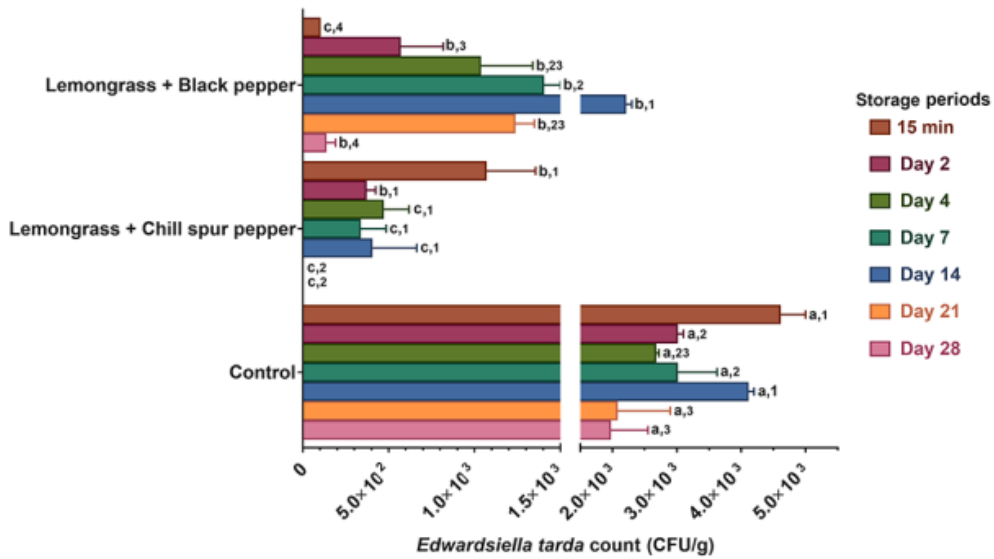


Fig. 2 Change in *E. tarda* in dried squid treated with the mixed herb extracts during 28 days of refrigerated storage. No *E. tarda* was isolated from the squid samples added with sterile distilled water without inoculation of the pathogen suspension. Bars with different letters at each sampling period denote significant difference ($p < 0.05$) among treatments. Bars with different numbers within the same treatments denote significant difference ($p < 0.05$) over the time.

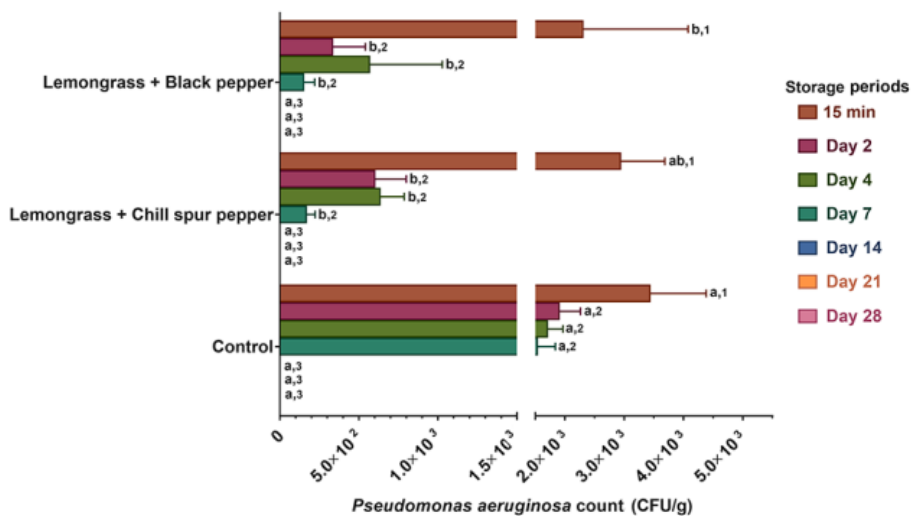


Fig. 3 Antibacterial efficacy of the combined herb extracts on *P. aeruginosa* count in dried squid during 28-day refrigerated storage. *P. aeruginosa* was absent in the squid samples exposed to sterile distilled water without inoculation of the pathogen suspension. Bars with different letters at each sampling period denote significant difference ($p < 0.05$) among treatments. Bars with different numbers within the same treatments denote significant difference ($p < 0.05$) over the time.

3.2 Antibacterial activity against *E. tarda*

Similar to MRSA vulnerability, the combined extracts from lemongrass and chili spur pepper had the strongest bacterial activity in dried squid by which *E. tarda* number significantly ($p < 0.05$) decreased from $1.07 \pm 0.28 \times 10^3$ CFU/g at 15-min post-storage to undetectable level at day 21 of refrigerated storage, compared to those of the control and lemongrass-black pepper added samples (Fig. 2).

3.3 Antibacterial activity against *P. aeruginosa*

Number of *P. aeruginosa* in the control was $3.43 \pm 0.95 \times 10^3$ CFU/g at beginning of experiment, and progressively decreased until vanishing at day 14 of storage (Fig. 3). Addition of either lemongrass extract in conjunction with chili spur pepper or a mixture of lemongrass and black pepper extracts in the dried squid resulted in a significant ($p < 0.05$) 1-log reduction of *P. aeruginosa* numbers during first 7 days of storage. The absence of *P. aeruginosa* in the control, and the two treated groups was observed at day 14 of storage.

4. Discussion

Growth of pathogenic and spoilage bacteria in dried ready-to-eat seafood products causes a serious harmful effects on consumer health and has highlighted the need of an effective novel technology to control the pathogen proliferation. In this study, the two combined extracts could effectively inhibit the growths of pathogenic MRSA and *E. tarda*, and

food-spoilage *P. aeruginosa* in dried squid. However, the strongest inhibitory activity against all tested bacteria was observed in the extracts from lemongrass in combination with chili spur pepper. Despite inhibitory effect of the two herb-extract combinations on food-borne pathogens never reported, chili pepper extract acted synergistically with ginger extract against *E. coli*, *S. aureus*, and *P. aeruginosa* in culture medium [18]. A mixture of lemongrass and turmeric essential oils was effective in retarding growth of mesophilic and psychrophilic bacteria in chilled-stored green mussel (*Perna viridis*) during storage [19]. Antibacterial activities of the two herb-extract blends used in this study are expected perhaps due to active phytochemical constitutes in herb extracts. The inhibitory phenolic components, e.g., cinnamic acid, and *m*-coumaric acid, have been found in chili pepper extract, and contribute to exerting antibacterial action against food-borne pathogens [20]. Citral chemotype: geranial, and neral has been reported to be the major active component in lemongrass essential oil/extract responsible for bactericidal action against multi-strains of methicillin-susceptible *S. aureus* and MRSA [21]-[22] while piperine, terpenes, and flavones are the predominant chemicals in black pepper extract and play a role in inhibiting *E. coli* and *S. aureus* [23]. In our preliminary *in vitro* study, degree of bacterial inhibition of individual herb extract: lemongrass, chili spur pepper, and black pepper, was lower than those of the

combinations of herb extracts (unpublished data). The results in this study revealed synergistic action among the components in the combined herb extracts that may exert antibacterial activities through binding the bacterial cell surface, penetrating into the cell membrane causing cytoplasmic membrane damage, allowing the efflux of DNA materials, amino acids and ions, changing in the proton motive force, destroying bacterial respiratory metabolism, and ultimately leading to pyknosis and cell death [21], [23]-[24]. Mode of action of the blended herb extracts remains unknown. Therefore, identification of the active compounds present in the two novel combinations should be further performed which may help to explain their synergistic mode of mechanisms.

Our results provided evidence that addition of the extract from lemongrass in conjunction with chili spur pepper was more effective in controlling the growth of MRSA and *E. tarda* than those of a mixture of lemongrass and black pepper extracts. The results were accordant with previous study [25]. A combined essential oil of basil and thyme produced a greater *in vitro* antibacterial activity against *Bacillus cereus*, *S. aureus*, *P. aeruginosa*, and *E. coli* than those of a mixture of basil-parsley, thyme-parsley, basil-lovage, thyme-lovage, and parsley-lovage essential oils. Similarly, bacteriostatic activity of various mixtures among clove, rosemary, cassia bark, and liquorice extracts was studied against

bacteria, e.g., *Listeria monocytogenes*, *E. coli*, *P. fluorescens*, and *Lactobacillus sake*. A combination of rosemary and liquorice extracts represented the best inhibitory potential towards all tested bacteria in culture medium [26]. In a food model study, B. Kong et al. [27] added either the mixed herb extract (honeysuckle, *Scutellaria* and *Forsythia suspense* Thunb) or mixed spice extract (cinnamon, rosemary, and clove oil) as food natural preservative into vacuum-packaged fresh pork. The authors claimed that despite a significantly reduced bacterial count observed in the extract-added pork in comparison with the control, the spice mixture had a stronger antibacterial effect in chilled pork during storage. Such phenomenon may be explained by herb extracts/essential oils generally containing a wide divergence of active constituents whose antibacterial activities are largely dependent on chemical composition, configuration, amount, and interactions (additive, synergistic, and antagonist) among the components [28]. It might be also possible that the minor compounds present in each herb extract may act in a synergistic manner, thereby exhibiting a greater inhibitory activity. G. O. Onawunmi et al. [29] demonstrated that myrcene, a chemical composition in lemongrass essential oil, showed no antibacterial activity, but appeared to enhance the activity, when the presence of citral (geranial, and neral). Likewise, the interaction between two components in tea tree (*Melaleuca alternifolia*) essential oil, 1,8-cineole and terpinene,

was reported by C. F. Carson et al. [30]. 1,8-cineole exhibited marginal antibacterial activity inherently, but it was capable of improving the lethal action of terpinene. The authors postulated that 1,8-cineole may permeabilize bacterial membranes and facilitate the entry of other more active components into the cells. These results suggested that chemical components in essential oil/extract blends may act synergistically against target organism and the presence of a small amount of the components could improve antibacterial activity.

This study demonstrated that food-spoilage *P. aeruginosa* seemed to be inhibited by the both herb-extract blends supported by a significantly reduced population during first 7 days of refrigerated storage. In contrast, pathogenic MRSA and *E. tarda* were more vulnerable to blended extracts from lemongrass and chili spur pepper. The variation in sensitivity to antibacterial activity may mainly due to difference in structural organization of lipid bilayer (types, and arrangement of hydrophobic molecule chains) of the membrane and cell wall as well as metabolism machinery among the bacteria [31].

5. Conclusion

This study indicates that herb combination of lemongrass and chili spur pepper extracts (80 mg/mL) was effectively active against MRSA, *E. tarda*, and *P. aeruginosa* in dried, seasoned, and crushed squid. Such

synergistic combination of lemongrass and chili spur pepper extracts would have a great implication to reduce the risk of diseases related to pathogenic MRSA and *E. tarda* as well as to improve product quality caused by food-spoilage *P. aeruginosa*. The use of the blended herb extracts as natural preservative provides a more acceptable way to satisfy a current consumer trend of “green”, “natural” or “no chemical added” labels in seafood industry. However, an additional study associated with organoleptic impact of the herb extract mixture should be conducted in the future to ensure sensorial acceptability in food products by consumers.

6. Acknowledgement

This study was supported by the Research Grant of Burapha University through National Research Council of Thailand with grant no. 65/2558. We acknowledge the staff of Department of Microbiology, Faculty of Science, Burapha University, Thailand for providing experimental equipment and facilities.

7. References

- [1] M. F. Pilet and F. Leroi, “Applications of protective cultures, bacteriocins and bacteriophages in fresh seafood and seafood products,” in *Protective Cultures, Antimicrobial Metabolites and Bacteriophages for Food and Beverage Biopreservation*, C. Lacroix, Ed. Zurich: Woodhead Publishing, 2010, pp. 1-21.

- [2] S. Thungkao and S. Muangharm, "Prevalence of *Bacillus* spp. and *Bacillus cereus* in dried seasoned squid products," in *Proceedings of 46th Kasetsart University Annual Conference: Agro-industry*, Kasetsart University, Bangkok, Thailand, 2008, pp. 138-146.
- [3] N. Butkhot, P. Soodsawaeng, S. Samutsan, K. Chotmongcol, V. Vuthiphandchai and S. Nimrat, "New perspectives for surveying and improving Thai dried seafood qualities using antimicrobials produced by *Bacillus velezensis* BUU004 against foodborne pathogens," *ScienceAsia*, vol. 45, no. 2, pp. 116-126, Apr. 2019.
- [4] S. Nimrat, N. Butkhot, S. Samutsan, K. Chotmongcol, T. Boonthai and V. Vuthiphandchai, "A survey in bacteriological quality of traditional dried seafood products distributed in Chon Buri, Thailand," *Science & Technology Asia*, vol. 24, no. 4, pp. 102-114, Oct.-Dec. 2019.
- [5] C. Kobkoonthon, N. Saritapiruk and K. Mhanpungteam, *Situation of Food Poisoning in Thailand, 2014*, Bangkok: Department of Disease Control, Ministry of Public Health, 2016.
- [6] T. F. Jones, M. E. Kellum, S. S. Porter, M. Bell and W. Schaffner, "An outbreak of community-acquired foodborne illness caused by methicillin-resistant *Staphylococcus aureus*," *Emergent Infectious Diseases*, vol. 8, no. 1, pp. 82-84. Jan. 2002.
- [7] L. R. G. Kumar, A. K. Kasim, M. Lekshmi, B. B. Nayak and S. Kumar, "Incidence of methicillin-resistant staphylococci in fresh seafood," *Advances in Microbiology*, vol. 6, no. 6, pp. 399-406. May 2016.
- [8] T. K. Aung, L. Y. Hsu, T. H. Koh, H. C. Hapuarachchi, M. L. Chau, R. A. Gutiérrez and L. C. Ng, "Prevalence of methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* (MRSA) in retail food in Singapore," *Antimicrobial Resistance and Infection Control*, vol. 6, pp. 94, Sep. 2017.
- [9] J. M. Janda and S. L. Abbott, "Infections associated with the genus *Edwardsiella*: the role of *Edwardsiella tarda* in human disease," *Clinical Infectious Diseases*, vol. 17, no. 4, pp. 742-748, Oct. 1993.
- [10] C. K. D. Benie, A. Dadié, N. Guessennd, N. A. N'gbesso-Kouadio, N. D. Kouame, D. C. N'golo, S. Aka, E. Dako, K. M. Dje and M. Dosso, "Characterization of virulence potential of *Pseudomonas aeruginosa* isolated from bovine meat, fresh fish, and smoked fish," *European Journal of Microbiology and Immunology*, vol. 7, no. 1, pp. 55-64, Mar. 2017.
- [11] Y. Carmeli, N. Troillet, G. Eliopoulos and M. H. Samore, "Emergence of antibiotic-resistant *Pseudomonas aeruginosa*: comparison of risks associated with different antipseudomonal agents," *Antimicrobial Agents and*

- Chemotherapy*, vol. 43, no. 6, pp. 1379-1382, Jun. 1999.
- [12] H. Vally, V. Madan and N. L. A. Misso, "Clinical effects of sulphite additives," *Clinical and Experimental Allergy*, vol. 39, no. 11, pp. 1643-1651, Nov. 2009.
- [13] S. P. Anand and N. Sati, "Artificial preservatives and their harmful effects: Looking toward nature for safer alternatives," *International Journal of Pharmaceutical Sciences and Research*, vol. 4, no. 7, pp. 2496-2501, Jul. 2013.
- [14] P. Soodsawaeng, N. Butkhot, T. Boonthai, V. Vuthiphandchai and S. Nimrat, "Synergistic antibacterial effects of bacteriocin produced by *Bacillus velezensis* BUU004 and medicinal plant extracts against *Escherichia coli* and *Salmonella* Typhimurium in dried, crushed and seasoned squid," *International Food Research Journal*, vol. 28, no. 4, pp. 654-663, Aug. 2021.
- [15] F. C. Herrera, J. A. Santos, A. Otero and M. L. García-López, "Occurrence of foodborne pathogenic bacteria in retail prepackaged portions of marine fish in Spain," *Journal of Applied Microbiology*, vol. 100, no. 3, pp. 527-536, Mar. 2006.
- [16] D. Keskin and S. Ekmekçi, "Investigation of the incidence of *Pseudomonas* sp. in foods," *Hacettepe Journal of Biology and Chemistry*, vol. 35, no. 3, pp. 181-186, Aug. 2007.
- [17] W. Winn, S. Allen, W. Janda, E. Koneman, G. Procop, P. Schreckenberger and G. Woods, *Koneman's Color Atlas and Textbook of Diagnostic Microbiology*, 6th ed. New York: Lippincott Williams and Wilkins, 2006.
- [18] E. M. Masila and J. N. Kimutu, "Antibacterial potency and differential synergistic effects of *Zingiber officinale* and *Capsicum annum* extracts against *E. coli*, *Staphylococcus aureus* and *Pseudomonas aeruginosa*," *American Journal of Research Communication*, vol. 5, no. 2, pp. 66-76, Feb. 2017.
- [19] P. Masniyom, O. Benjama and J. Maneesri, "Effect of turmeric and lemongrass essential oils and their mixture on quality changes of refrigerated green mussel (*Perna viridis*)," *International Journal of Food Science and Technology*, vol. 47, no. 5, pp. 1079-1085, May. 2012.
- [20] L. Dorantes, R. Colmenero, H. Hernández, L. Mota, M. E. Jaramillo, E. Fernández and C. Solano, "Inhibition of growth of some foodborne pathogenic bacteria by *Capsicum annum* extracts," *International Journal of Food Microbiology*, vol. 57, no. 1-2, pp. 125-128, Jun. 2000.
- [21] J. Aiemsraad, S. Aiumlamai, C. Aromdee, S. Taweechaisupapong and W. Khunkitti, "The effect of lemongrass oil and its major components on clinical isolate mastitis pathogens and their

- mechanisms of action on *Staphylococcus aureus* DMST 4745,” *Research in Veterinary Science*, vol. 91, no. 3, pp. 31-37, Dec. 2011.
- [22] E. C. Adukwu, S. C. H. Allen and C. A. Phillips, “The anti-biofilm activity of lemongrass (*Cymbopogon flexuosus*) and grapefruit (*Citrus paradisi*) essential oils against five strains of *Staphylococcus aureus*,” *Journal of Applied Microbiology*, vol. 113, no. 5, pp. 1217-1227, Nov. 2012.
- [23] L. Zou, Y. Y. Hu and W. X. Chen, “Antibacterial mechanism and activities of black pepper chloroform extract,” *Journal of Food Science and Technology*, vol. 52, no. 12, pp. 8196-8203, Dec. 2015.
- [24] S. Burt, “Essential oils: their antibacterial properties and potential applications in foods-a review,” *International Journal of Food Microbiology*, vol. 94, no. 3, pp. 223-253, Aug. 2004.
- [25] C. A. Semeniuc, C. R. Pop and A. M. Rotar, “Antibacterial activity and interactions of plant essential oil combinations against Gram-positive and Gram-negative bacteria,” *Journal of Food and Drug Analysis*, vol. 25, no. 2, pp. 403-408, Apr. 2017.
- [26] H. Zhang, B. Kong, Y. L. Xiong and Z. Sun, “Antimicrobial activities of spice extracts against pathogenic and spoilage bacteria in modified atmosphere packaged fresh pork and vacuum packaged ham slices stored at 4 °C,” *Meat Science*, vol. 81, no. 4, pp. 686-692, Apr. 2009.
- [27] B. Kong, J. Wang and Y. L. Xiong, “Antimicrobial activity of several herb and spice extracts in culture medium and in vacuum-packaged pork,” *Journal of Food Protection*, vol. 70, no. 3, pp. 641-647, Mar. 2007.
- [28] M. Moghaddam, P. Taheri, A. G. Pirbalouti and L. Mehdizadeh, “Chemical composition and antifungal activity of essential oil from the seed of *Echinophora platyloba* DC. against phytopathogens fungi by two different screening methods,” *LWT - Food Science and Technology*, vol. 61, no. 2, pp. 536-542, Dec. 2015.
- [29] G. O. Onawunmi, W. A. Yisak and E. O. Ogunlana, “Antibacterial constituents in the essential oil of *Cymbopogon citratus* (DC.) Stapf,” *Journal of Ethnopharmacology*, vol. 12, no. 3, pp. 279-286, Dec. 1984.
- [30] C. F. Carson, B. J. Mee and T. V. Riley, “Mechanism of action of *Melaleuca alternifolia* (tea tree) oil on *Staphylococcus aureus* determined by time-kill, lysis, leakage, and salt tolerance assays and electron microscopy,” *Antimicrobial Agents and Chemotherapy*, vol. 46, no. 6, pp. 1914-1920, Jun. 2002.
- [31] T. Abee, F. M. Rombouts, J. Hugenholtz, G. Guihard and L. Letellier, “Mode of action of nisin Z against *Listeria monocytogenes* Scott A grown at high and low temperatures,” *Applied and Environmental Microbiology*, vol. 60, no. 6, pp. 1962-1968, Jun. 1994.

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

การออกแบบและพัฒนารถสามล้อไฟฟ้าระบบมอเตอร์ขับเคลื่อน

จักรมาส เลหาวิช* นุชิตา สุวแพทย์ และ ชลธิ์ โพธิ์ทอง

หน่วยวิจัยเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวและวิศวกรรมเครื่องจักรกลเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
41/20 ตำบลขามเรียง อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150

รับบทความ 25 มิถุนายน 2564 แก้ไขบทความ 16 มีนาคม 2565 ตอรับบทความ 4 เมษายน 2565

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบและพัฒนารถสามล้อสกายแลป เป็นรถดัดสามล้อดัดแปลงติดตั้งเครื่องยนต์ของรถมอเตอร์ไซด์ รถประเภทนี้มีใช้งานทั่วไปในเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย ใช้สำหรับการขนผลผลิตทางการเกษตรจากฟาร์มไปจำหน่ายที่ตลาด นอกไปจากนั้นยังใช้ในการรับจ้างทั่วไปในระยะทางที่ใกล้ๆ การดำเนินนี้เป็นการพัฒนาให้เป็นรถไฟฟ้าต้นแบบที่มีมอเตอร์ไฟฟ้าเป็นต้นกำลังแทนการใช้เครื่องยนต์ รถไฟฟ้าต้นแบบที่ได้ออกแบบมีขนาดความกว้าง 1.25 เมตร ความยาว 3.00 เมตร และความสูง 1.94 เมตร มุมแคสเตอร์ล้อหน้าเท่ากับ 20 องศา ระบบต้นกำลังประกอบไปด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ขนาด 4 กิโลวัตต์ 48 โวลต์ จำนวน 2 ตัว แบตเตอรี่ขนาด 80 แอมป์ชั่วโมง แรงดัน 12 โวลต์ แบ่งออกเป็น 2 ชุด ชุดละ 4 ลูก ต่ออนุกรมขนาด 48 โวลต์ สำหรับมอเตอร์ไฟฟ้าแต่ละตัว มอเตอร์ไฟฟ้าทั้ง 2 ตัว สามารถสลับการทำงานและทำงานร่วมกันได้ ขึ้นอยู่กับภาระโหลดใช้งาน ระบบส่งกำลังมีอัตราทดเท่ากับ 6.5 : 1 จากการทดสอบสมรรถนะ พบว่าในสภาวะบรรทุกน้ำหนัก สามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้สูงสุด 500 กิโลกรัม ระยะทางสูงสุดต่อการชาร์จแบตเตอรี่ 1 ครั้ง คือ 40 กิโลเมตร ความเร็วสูงสุดเท่ากับ 50 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และสามารถออกตัวบนทางชันได้ 15 องศา โดยมีอัตราสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าประมาณ 1.03 บาทต่อกิโลเมตรเมื่อบรรทุกเต็มพิกัด

คำสำคัญ : รถสามล้อไฟฟ้า; สกายแลป; ระบบมอเตอร์ไฟฟ้าขับเคลื่อน

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +668 1544 4408, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: juckamas.l@msu.ac.th

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

Design and Development of Electric Tricycle with Dual Motor Drive System

Juckamas Laohavanich* Nuchida Suwapaet² and Chonlatee Photong

Post-Harvest Technology and Agricultural Machinery Engineering Research Unit

Faculty of Engineering, Mahasarakham University

41/20 Khamriang Sub-District, Kantarawichai District, Maha Sarakham 44150

Received 25 June 2021; Revised 16 March 2022; Accepted 4 April 2022

Abstract

This research is the design and development of Skylab tricycles. It is a modified tricycle equipped with a motorbike engine. This type of vehicle is generally used in the northeastern region of Thailand, used for transporting agricultural products from the farm to the market. In addition, it is also used for general contracting in a short distance. This study was to develop a prototype electric vehicle with an electric motor as a power source instead of an engine. An electric motor was used as driving power instead of an engine. The prototype is 1.25 m wide, 3 m long, and 1.94 m high. The front wheel caster angle is 20°. The driving power system consists of two 4kW-48V-DC electric motors, two sets of four 12V-80Ah batteries connected in series (48V) for each motor and one 12V-68Ah battery for powering other electrical equipment. Two electric motors could work alternately or work together depending on load. The transmission system has a 6.5 gear ratio. In performance tests with loads, it could carry up to 500 kg, traveled 40 km on a single charge at a maximum speed of 50 km/h and could start on a 15° slope. The electricity consumption rate is about 1.03 baht per kilometer when fully loaded.

Keywords : Electric Tricycle; Skylab; Dual Motor Drive System

* Corresponding Author. Tel.: +668 1544 4408, E-mail Address: juckamas.l@msu.ac.th

1. บทนำ

ยานยนต์ไฟฟ้า (Electric Vehicles, EVs) ได้รับความคาดหวังว่าจะมีปริมาณการใช้งานเพิ่มขึ้นอย่างมากในอนาคต [1] ด้วยข้อได้เปรียบด้านประสิทธิภาพการใช้พลังงานที่ดีกว่ารถเครื่องยนต์สันดาปภายในถึง 3 เท่า [2] ทั้งยังช่วยลดการปล่อยมลพิษทางอากาศในภาคขนส่งได้ จึงทำให้รถยนต์ไฟฟ้าถูกคาดการณ์ว่าจะมีการใช้งานเพิ่มขึ้นอย่างมากในอนาคต ซึ่งพบว่าส่วนหนึ่งเกิดจากการนำยานยนต์ที่ใช้น้ำมันเป็นเชื้อเพลิงมาดัดแปลงใช้ไฟฟ้าเป็นแหล่งพลังงานทดแทน โดยเฉพาะยานยนต์ขนาดเล็ก เช่น มอเตอร์ไซด์ และรถสามล้อเครื่อง ที่ได้มีการดัดแปลงสร้างเป็นรถจักรยานไฟฟ้า รถจักรยานยนต์ไฟฟ้า และรถซาเล้งไฟฟ้า ออกมาใช้งานในหลายรูปแบบและมีใช้งานในหลายประเทศ รวมถึงในประเทศไทย ซึ่งมีการนำรถดัดแปลงมาใช้งานแพร่หลายมากขึ้น [3] ซึ่งการใช้งานรถมอเตอร์ไซด์ไฟฟ้าไม่ต้องใช้น้ำมันเชื้อเพลิงในการขับเคลื่อน จึงช่วยให้ประหยัดค่าใช้จ่ายจากการใช้งาน [4], [5]

ตัวอย่างผลการศึกษาในประเทศเยอรมัน [6] เกี่ยวกับความเป็นไปได้ของการพัฒนาด้านการตลาดของยานยนต์ไฟฟ้าพบว่ายานยนต์ไฟฟ้ามีศักยภาพในการแทนที่ได้ถึง 1 ใน 3 ของยานยนต์น้ำมัน โดยยานยนต์ที่จะถูกแทนที่ได้แก่ รถยนต์ขนาดกลางที่ใช้ทั่วไป ทั้งแบบส่วนตัวและแบบธุรกิจ นอกจากนี้ ยานยนต์ไฟฟ้ายังมีศักยภาพในการแทนที่ได้ทั้งรถยนต์ใช้น้ำมัน ดีเซลและน้ำมันเบนซิน ซึ่งหลังจากปี 2025 น้ำมันเชื้อเพลิงแบบเบนซินจะถูกแทนที่ในวงกว้างก่อน แล้วจึงตามด้วยแบบดีเซล สำหรับในเชิงนโยบาย ผู้วิจัยได้ให้ข้อเสนอแนะว่า ไม่ควรมุ่งเป้าไปที่การส่งเสริมยานยนต์ไฟฟ้าในเขตเมืองเท่านั้น ในชนบทหรือแม้แต่ท้องที่ห่างไกล ล้วนมีศักยภาพเช่นกัน การสร้างโครงสร้างพื้นฐานให้ครอบคลุมทุกพื้นที่จะส่งเสริมให้เกิดการใช้งาน นอกจากนี้ นโยบายด้านภาษีก็เป็นสิ่งจำเป็น ทั้งในมิติของผู้ผลิตและผู้บริโภค

สำหรับในประเทศไทย มาตรการผลักดัน “ยานยนต์ไฟฟ้า (Electric Vehicle)” ของรัฐบาลถือเป็นหนึ่งใน “วาระแห่งชาติ” ที่จะปฏิวัติวงการยานยนต์ไทย [7] โดยประเทศไทยมีแผนจะลดก๊าซเรือนกระจกลงร้อยละ 20-25 ภายในปี พ.ศ. 2573 โดยจะหันมาส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทนที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม แทนน้ำมันเชื้อเพลิงในระบบขนส่งของประเทศ รวมทั้ง “นวัตกรรมยานยนต์ไฟฟ้า” หรืออุตสาหกรรมยานยนต์สมัยใหม่ (Next-generation Automotive) เป็น 1 ใน 10 อุตสาหกรรมเป้าหมายที่รัฐบาลให้การส่งเสริมอย่างจริงจัง ยานยนต์ไฟฟ้าจะเป็นคลื่นลูกแรกในการปฏิวัติอุตสาหกรรมรถยนต์ คลื่นลูกที่สองคือ ยานยนต์ไร้คนขับที่ขับเคลื่อนอัตโนมัติ

ในปี พ.ศ. 2560 สมาคมยานยนต์ไฟฟ้าไทย โดย ชนะ เยี่ยงกมลสิงห์ และคณะ [8] ร่วมกับ บริษัท ดั๊กดัก 1999 จำกัด ได้พัฒนารถดั๊กดักไฟฟ้าดัดแปลง เพื่อเป็นทางเลือกในการใช้งานเป็นรถขนส่งสาธารณะ โดยทำการพัฒนาให้เป็นไปตามประกาศกรมการขนส่งทางบก ที่กำหนดกำลังของมอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ขับเคลื่อนรถ ตามกฎหมายว่าด้วยรถยนต์ พ.ศ. 2560 โดยมีรายละเอียดของมอเตอร์ไฟฟ้าซึ่งจะต้องมีกำลังพิกัด (Rated Power) ไม่น้อยกว่า 4 กิโลวัตต์ และสามารถขับเคลื่อนรถให้มีความเร็วสูงสุดได้ไม่น้อยกว่า 45 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ในขณะที่มีน้ำหนักรวมน้ำหนักบรรทุก (Gross Vehicle Weight) ได้ต่อเนื่องเป็นเวลาไม่น้อยกว่า 30 นาที ปัจจุบันสามารถจดทะเบียนกับกรมการขนส่งทางบก และใช้งานจริงได้แล้ว ซึ่งเหมาะสมสำหรับใช้งานในเขตเมืองเป็นหลัก

ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย รถสามล้อเครื่องหรือที่นิยมเรียก “รถสกายแลป” เป็นชื่อเรียกของรถจักรยานยนต์ดัดแปลงประเภทหนึ่งที่ใช้ประชาชนในชนบทหรือจังหวัดหัวเมืองนิยมมีความใช้ในชีวิตประจำวัน [9] รถสามล้อสกายแลป ถูกสร้างขึ้นครั้งแรกในปี พ.ศ. 2519 สามล้อเครื่องแบบใหม่เริ่มเป็นที่

นิยมอย่างรวดเร็วในเขตพื้นที่จังหวัดอุดรธานี และจังหวัดอื่นๆ เนื่องจากราคาไม่สูงมาก สามารถนำมาใช้งานในชีวิตประจำวันได้ โดยเฉพาะผู้ที่ประกอบอาชีพเกษตรกรรม พ่อค้าแม่ค้า หรืออาชีพรับจ้างทั่วไป โดยใช้ในการขนส่งของไปรษณีย์ หรือใช้เพื่อขนส่งสินค้าไปขายที่ตลาด รวมถึงใช้ในการรับจ้างทั่วไป โดยรถสามล้อสกยาแลปนั้นได้นำเครื่องยนต์มาดัดแปลงติดตั้งในรถสามล้อถีบ เพื่อใช้เป็นต้นกำลังแทนการปั่นด้วยแรงคน และต่อมาได้พัฒนารูปแบบโครงสร้างของรถด้านหลังเป็นกระบะทำให้สามารถรับผู้โดยสารหรือบรรทุกสิ่งของได้ปริมาณมากขึ้น โดยขนาดของเครื่องยนต์รถสกยาแลปจะอยู่ระหว่าง 90 -150 cc.

รถสกยาแลปที่พัฒนาใช้งานกันในปัจจุบันนั้นมีความกำลังในการขับเคลื่อนด้วยเครื่องยนต์เบนซิน มีรูปแบบการส่งกำลังระบบโซ่และเฟืองไปยังเพลาขับที่ล้อหลังโดยตรง ต่อมามีการนำชุดเฟืองท้ายมาติดตั้งทำให้สามารถขับเคลื่อนได้ดีขึ้นอย่างไรก็ตามระบบดังกล่าวยังพบปัญหาในการใช้งานเกี่ยวกับ เสียงดังจากเครื่องยนต์และระบบไอเสีย ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง โดยเฉพาะที่หากราคาน้ำมันเพิ่มสูงขึ้น รวมไปถึงมลพิษจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์สันดาปภายใน ดังนั้นจึงมีความพยายามที่จะพัฒนาระบบมอเตอร์ไฟฟ้าเพื่อใช้เป็นต้นกำลังทดแทน งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อ ออกแบบและพัฒนารถสกยาแลปไฟฟ้าต้นแบบ รวมทั้งทดสอบสมรรถนะ เพื่อให้ได้รถสกยาแลปไฟฟ้าที่ประหยัดพลังงาน สามารถนำมาทดแทน รถสกยาแลปที่ใช้เครื่องยนต์ได้ต่อไปในอนาคต

2. ระเบียบวิธีวิจัย

การศึกษาครั้งนี้เป็นการออกแบบและพัฒนา รถสามล้อสกยาแลปขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้า โดยเลือกรถสามล้อสกยาแลปของบริษัท อธิพงษ์มอเตอร์ จำกัด ซึ่งเป็นผู้ผลิตและจัดจำหน่ายรายใหญ่ของประเทศมา

เป็นรถต้นแบบในการพัฒนา โดยมีมิติของตัวรถมีขนาด 1190x3050x1950 มิลลิเมตร (กว้างxยาวxสูง) (รูปที่ 1)

การออกแบบและพัฒนารถสามล้อสกยาแลปจากพื้นฐานรถสามล้อสกยาแลปของบริษัท อธิพงษ์มอเตอร์ จำกัด มีขั้นตอนและวิธีการทางวิศวกรรม [10] , [11] รวมถึงนำข้อกำหนดของ กรมการขนส่งทางบกที่ประกาศในราชกิจจานุเบกษา [12] ประกาศกรมการขนส่งทางบก เรื่อง กำหนดกำลังของมอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ขับเคลื่อนรถตามกฎหมายว่าด้วยรถยนต์ พ.ศ. 2563 โดยมีสาระสำคัญเกี่ยวกับรถประเภทสามล้อ ตาม ข้อ 5 “รถยนต์รับจ้างสามล้อและรถยนต์สามล้อส่วนบุคคลที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าต้องมีกำลังของมอเตอร์ไฟฟ้าไม่น้อยกว่า 4 กิโลวัตต์ และสามารถขับเคลื่อนรถให้มีความเร็วสูงสุดได้ไม่น้อยกว่า 45 กิโลเมตรต่อชั่วโมง” และข้อ 7 “มอเตอร์ไฟฟ้าของรถตามข้อ 3 ข้อ 4 ข้อ 5 และข้อ 6 ต้องสามารถขับเคลื่อนรถในขณะที่มีน้ำหนักบรรทุกรวม น้ำหนักบรรทุก (Gross Vehicle Weight) ตามที่ผู้ผลิตกำหนดด้วยความเร็วสูงสุด ตามที่กำหนดในประกาศนี้ ได้ต่อเนื่องเป็นเวลาไม่น้อยกว่า 30 นาที” มาเป็นเกณฑ์ในการออกแบบซึ่งมีการดำเนินการประกอบด้วย การออกแบบโครงสร้างตัวถังและวิเคราะห์วิเคราะห์ความแข็งแรง การออกแบบระบบไฟฟ้าและระบบส่งกำลัง สร้างรถต้นแบบ ก่อนทำการทดสอบสมรรถนะการขับขี่

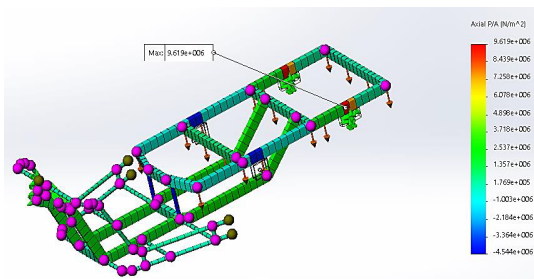


รูปที่ 1 รถสามล้อสกยาแลปรุ่นเพชรอุดรของบริษัท อธิพงษ์มอเตอร์ จำกัด

2.1 การออกแบบโครงสร้างตัวถังและวิเคราะห์ความแข็งแรง

ในการออกแบบโครงสร้างการรองรับน้ำหนัก ผู้วิจัยนำโครงสร้างของรถสามล้อสกายแลปได้ใช้ซอฟต์แวร์ SolidWorks Simulation เพื่อทดสอบค่าความปลอดภัย การใช้งานในแบบภาระงานสถิตย์ (Static Load) ดังแสดงตัวอย่างการวิเคราะห์ตามรูปที่ 2 ผลลัพธ์ Stress ที่จะแสดงออกมาเป็นค่า Von Mises Stress เพื่อหาว่าชิ้นงานได้รับความเค้นรวมเท่าใด โดยปกติจะใช้ค่านี้มาเปรียบเทียบกับค่า Yield Stress ของวัสดุเพื่อดูว่าชิ้นงานเสียหายหรือไม่ โดยถ้าค่า Maximum Von Mises Stress มากกว่า Yield ก็ถือว่าชิ้นงานเกิดความเสียหายต้องทำการแก้ไขการออกแบบ [16] โดยวัสดุที่เลือกใช้คือ เหล็ก AISI 1020 ที่มีค่า โดยมีค่าความเค้นที่เกิดจากแรงแนวแกน ความเค้นที่เกิดจากแรงเฉือน และความเค้นที่เกิดจากแรงบิดกระทำกับโครงสร้าง คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ประกอบโครงสร้างมีการกำหนดค่าการทดสอบด้วยรูปแบบการทดสอบแบบ Linear Elastic Isotropic กำหนดค่า

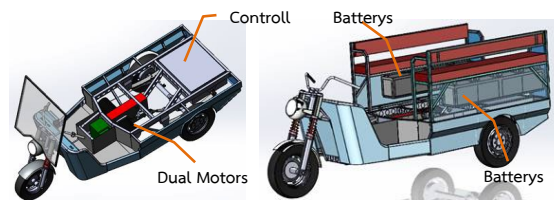
- Yield Strength 282.69 เมกะปาสคาล
- Tensile strength 585.00 เมกะปาสคาล
- โมดูลัสของยัง 204.90 จิกะปาสคาล
- อัตราส่วนปัวซอง 0.29
- โมดูลัสของแรงเฉือน 79.99 จิกะปาสคาล
- สปส.การขยายตัว 1.1×10^{-5} เคลวิน⁻¹



รูปที่ 2 แสดงการออกแบบเพื่อทดสอบหาค่าความปลอดภัยแบบภาระงานสถิตย์

2.2 การออกแบบโครงสร้างตัวถังตัวถังและระบบส่งกำลัง

ในส่วนการกระจายน้ำหนัก เนื่องจากผู้วิจัยได้ออกแบบให้รถไฟฟ้าต้นแบบสามารถรับผู้โดยสารได้ 6 คน และด้านหลังของผู้ขับรถจะเป็นพื้นที่ว่างไว้สำหรับเก็บสัมภาระ มีทางขึ้นทางด้านหลังของตัวรถ ดังนั้นเพื่อให้มีตำแหน่งของจุดศูนย์ถ่วงรถที่เหมาะสมกับรูปลักษณะภายนอก ผู้วิจัยจึงได้ออกแบบจัดวางแบตเตอรี่จำนวน 4 ลูกติดตั้งไว้ที่ด้านซ้ายของรถ และอีก 4 ลูกติดตั้งทางด้านขวาของรถ ตรงกลางระหว่างแบตเตอรี่ทั้งสองด้านจะติดตั้งมอเตอร์ไฟฟ้า 2 ชุดคู่กัน และปรับตั้งมุมแคสเตอร์ใหม่ เพื่อให้ผู้ขับสามารถบังคับทิศทางรถได้ง่ายขึ้น และลดปัญหาการสับตัวของล้อหน้า ดังแสดงในรูปที่ 3

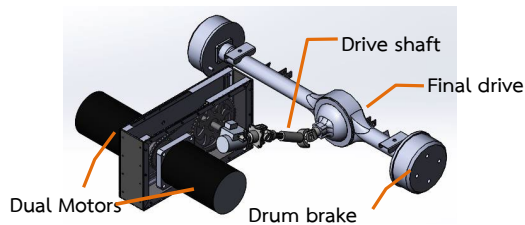


รูปที่ 3 รูปแบบการติดตั้งกล่องควบคุมระบบมอเตอร์ขับเคลื่อนและการจัดวางแบตเตอรี่

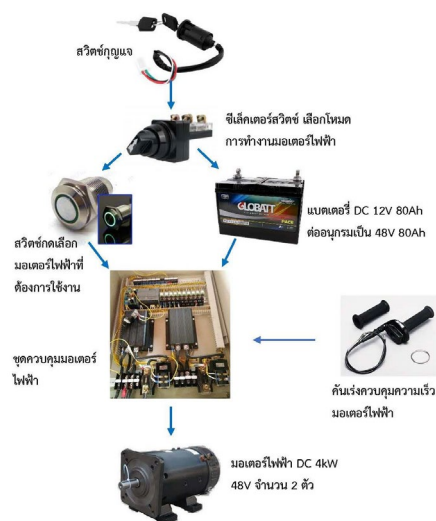
ในการออกแบบระบบส่งกำลัง จะติดตั้งมอเตอร์ไฟฟ้าหนึ่งตัวอยู่ทางด้านซ้ายและอีกหนึ่งตัวอยู่ทางด้านขวา เพื่อกระจายน้ำหนักแต่ละด้านให้เท่า ๆ กัน โดยต้นกำลังมอเตอร์ไฟฟ้าทั้งสองตัว จะมีลักษณะการทำงานอยู่ 2 แบบ คือ มอเตอร์ไฟฟ้าทั้ง 2 ตัว ทำงานร่วมกัน เพื่อเสริมกำลัง เมื่ออยู่ในสถานะที่มีน้ำหนักบรรทุก และสามารถสลับการทำงานได้ ซึ่งใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเพียงหนึ่งตัวทำงาน ในขณะที่อีกหนึ่งตัวถูกปิดใช้งาน โดยใช้ลูกปืนวันเวย์เข้ามาช่วยให้มอเตอร์ไฟฟ้าสามารถสลับการทำงานได้ โดยที่ไม่เกิดการหน่วงของมอเตอร์ไฟฟ้าที่ถูกปิดใช้งาน กำลังที่ถูกส่งจากมอเตอร์

ไฟฟ้าผ่านโซ่สูกียร์บ็อก แล้วส่งไปที่เพลากลาง เพลาท้ายไปจนถึงล้อ ดังแสดงในรูปที่ 4

การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า เมื่อเปิดสวิตช์จะสามารถเลือกโหมดการทำงานของมอเตอร์ได้ 2 โหมด คือ ควบคุมการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเองโดยสามารถเลือกให้มอเตอร์ชุดใดชุดหนึ่งทำงานหรือให้ทำงานพร้อมกันจากการกดปุ่ม และโหมดมอเตอร์ไฟฟ้าทำงานอัตโนมัติโดยเลือกมอเตอร์ชุดใดชุดหนึ่ง เป็นตัวหลักแล้วเมื่อรถมีกำลังไม่พอหรือมีการป้อนกระแสไฟเข้ามอเตอร์เกินค่าที่ตั้งไว้ มอเตอร์อีกชุดจะทำงานร่วมกันโดยอัตโนมัติเพื่อเสริมกำลังขับเคลื่อน การทำงานเริ่มจากบิดคันเร่ง โดยส่งสัญญาณไฟฟ้าไปยังชุดควบคุมความเร็วเพื่อป้อนกระแสจากแบตเตอรี่ไปยังมอเตอร์ไฟฟ้า [3] , [13] ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 4 ระบบส่งกำลังแบบมอเตอร์คู่โดยใช้ลูกปืนวันเวย์เข้ามาช่วยให้มอเตอร์ไฟฟ้าสามารถสลับการทำงานได้



รูปที่ 5 ระบบส่งกำลังแบบมอเตอร์คู่โดยใช้ลูกปืนวันเวย์เข้ามาช่วยให้มอเตอร์ไฟฟ้าสามารถสลับการทำงานได้

ในการออกแบบระบบต้นกำลังได้คำนวณหา กำลังมอเตอร์ไฟฟ้าสำหรับการขับเคลื่อนโดยรถไฟฟ้า จะต้องสามารถเอาชนะแรงต้านอากาศ แรงต้านจากแรงโน้มถ่วงของโลก และแรงต้านการหมุนของล้อขับเคลื่อนได้ โดยได้มีการคำนวณขนาดของต้นกำลังในกรณีเมื่อมีการบรรทุกได้ ซึ่งมีตัวแปรที่กำหนดสำหรับการคำนวณ แรงต้านทานการเคลื่อนที่ แรงบิดและกำลังที่ต้องการในการเคลื่อนที่ได้ดังนี้ [3], [14]

F_R = แรงต้านการหมุนกลิ้ง (นิวตัน)

F_L = แรงต้านทานจากลม (นิวตัน)

F_S = แรงไถทางลาดชัน (นิวตัน)

F_W = แรงต้านการเคลื่อนที่รวม (นิวตัน)

P_W = กำลังงานรวมจากการต้านทานการเคลื่อนที่ (วัตต์)

P_m = กำลังของมอเตอร์ต้นกำลังรวม (วัตต์)

T_W = แรงบิดจากการต้านทานการเคลื่อนที่รวม (นิวตัน-เมตร)

G_R = อัตราทดรวมของระบบขับเคลื่อน

v = ความเร็วของของรถ (เมตรต่อวินาที)

m = น้ำหนักของรถ (กิโลกรัม)

g = แรงโน้มถ่วงของโลก 9.81 (เมตรต่อวินาที²)

r = รัศมีของล้อรถ (เมตร)

μ_R = สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ล้อ

(ยางทั่วไปเลือกใช้ค่า 0.02 [10])

C_w = ความต้านทานอากาศตามรูปร่างรถ

(หน้าตัดรถแบบรถเอนกประสงค์ใช้ค่า 0.6)

A = พื้นที่หน้าตัดรถ (ตารางเมตร)

($0.8 \times$ ความสูงรถ $\times$ ความกว้างรถ)

α = ความลาดชันของถนน (องศา)

กำหนดให้ในสภาวะที่รถมีน้ำหนักบรรทุก รวมกับน้ำหนักตัวรถ 1,000 กิโลกรัม ทดสอบขับขึ้นทางลาดชัน 15 องศา รัศมีวงล้อของรถต้นแบบ 0.27 เมตร ที่ความเร็ว 50 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

(13.89 เมตรต่อวินาที) ในการขับเคลื่อน เพื่อคำนวณหาแรงบิดและกำลังของมอเตอร์ขับเคลื่อนที่ใช้ในการเคลื่อนที่

คำนวณแรงต้านทานการหมุนกลิ้ง (F_R) แรงต้านทานจากลม (F_L) และแรงไถ่ทางลาดชัน (F_S) ได้จากสมการที่ (1), (2) และ (3) ตามลำดับ

$$F_R = mg\mu_R \quad (1)$$

$$F_L = 0.615C_wAv^2 \quad (2)$$

$$F_S = mg \sin \alpha \quad (3)$$

คำนวณแรงต้านการเคลื่อนที่ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} F_R &= 1000 \times 9.81 \times 0.02 \\ &= 192.60 \quad \text{นิวตัน} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_L &= 0.615 \times 0.6 \times (0.8 \times 1.94 \times 1.25) \times 13.89 \\ &= 138.61 \quad \text{นิวตัน} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_S &= 1000 \times 9.81 \times \sin(15^\circ) \\ &= 2539.01 \quad \text{นิวตัน} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_W &= 192.60 + 138.61 + 2539 \\ &= 2870.22 \quad \text{นิวตัน} \end{aligned}$$

คำนวณกำลังงานรวมจากการต้านทานการเคลื่อนที่และแรงบิดจากการต้านทานการเคลื่อนที่รวมได้จากสมการ (4) และ (5) ดังนี้

$$P_W = F_W \times v \quad (4)$$

$$T_W = F_W \times r \quad (5)$$

กรณีที่ใช้ในการประเมินค่ากำลังงานและแรงบิดสูงสุดในการศึกษานี้คือ กรณีขับขึ้นทางชันประมาณ 15 องศาตามข้อกำหนดในการออกแบบที่ตั้งไว้ และให้เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงสุด 50 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ซึ่งสูงกว่าข้อกำหนดของกรมการขนส่งทางบก โดยกำหนดน้ำหนักบรรทุกผู้โดยสารอยู่ที่ 1,000 กิโลกรัม ดังนั้นจะสามารถคำนวณค่า กำลังงานรวมจากการต้านทานการ

เคลื่อนที่และแรงบิดจากการต้านทานการเคลื่อนที่รวมได้ดังนี้

$$\begin{aligned} P_W &= 2870.22 \times 13.89 \\ &= 39867.36 \quad \text{วัตต์} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_W &= 2870.22 \times 0.27 \\ &= 774.96 \quad \text{นิวตัน-เมตร} \end{aligned}$$

คำนวณกำลังมอเตอร์ อัตราทดเกียร์ที่ทำให้รถสามารถขึ้นทางลาดชัน หากำลังมอเตอร์ไฟฟ้าที่ต้องการไฟฟ้า เมื่อออกแบบอัตราทดรวมของระบบขับเคลื่อนจากล้อขับไปที่มอเตอร์เท่ากับ 6.5:1 ดังนั้นจะได้กำลังมอเตอร์ที่ต้องการจากสมการที่

$$P_m = \frac{P_W}{G_R} \quad (6)$$

ดังนั้นจะสามารถคำนวณกำลังมอเตอร์ที่ต้องการได้เท่ากับ

$$P_m = \frac{39867.36}{6.5} = 6133.44 \text{ วัตต์ หรือ } 6.13 \text{ กิโลวัตต์}$$

ซึ่งคำแนะนำในการเลือกใช้มอเตอร์ ควรเลือกใช้ช่วงร้อยละ 65 ถึง 100 ของกำลังมอเตอร์ จึงเลือกใช้มอเตอร์ขับเคลื่อนที่มีกำลังรวม 8 กิโลวัตต์ ที่ความเร็วรอบ 2,800 รอบต่อนาที เป็นต้นกำลังของรถต้นแบบ

2.3 การทดสอบสมรรถนะการขับขึ้น

การทดสอบสมรรถนะ เมื่อทำการออกแบบและพัฒนาารถต้นแบบเสร็จ จะเริ่มทำการทดสอบสมรรถนะของรถ โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้ [14], [15]

2.3.1 ทดสอบระยะทางที่วิ่งได้จากการชาร์จประจุแต่ละครั้ง

เริ่มต้นการทดสอบโดยชาร์จประจุแบตเตอรี่ให้เต็ม แล้วนำรถไปวิ่งตามสภาพจราจรปกติ จนกว่าแบตเตอรี่จะหมด แล้วบันทึกระยะทางในการวิ่งของรถ

จากการชาร์จประจุ 1 ครั้งโดยทำการทดสอบจำนวน 3 ครั้งเพื่อหาค่าเฉลี่ย ใน 2 กรณีคือ กรณีการขับขึ้นในสถานะที่ไม่มีน้ำหนักบรรทุกทุกและกรณีมีน้ำหนักบรรทุกทุกเพื่อทราบถึงอัตราการสิ้นเปลืองพลังงาน โดยการออกแบบได้เลือกใช้แบตเตอรี่ขนาด 12 โวลต์ 80 แอมป์-ต่อวงจรแบบอนุกรมจำนวน 4 ลูกเพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับมอเตอร์ต้นกำลัง 1 ตัว ติดตั้งชุดแบตเตอรี่ 2 ชุดบริเวณใต้เบาะที่นั่งด้านซ้ายและขวาเพื่อให้รถมีความสมดุล

2.3.2 ทดสอบความเร็วสูงสุดของรถ

ซึ่งจะทำการทดสอบบนถนน ในแนวราบ เพื่อให้ได้ความเร็วสูงสุดที่เกิดขึ้นจริงโดยทำการทดสอบจำนวน 3 ครั้งเพื่อหาค่าเฉลี่ยซึ่งมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

- 1) ชาร์จแบตเตอรี่ให้เต็มก่อนการทดสอบ
- 2) เตรียมอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบ ได้แก่ นาฬิกาจับเวลา ตลับเมตร และอุปกรณ์บันทึก
- 3) ทดสอบขีดความสามารถความเร็วสูงสุดของรถ ที่สภาวะรถเปล่า และบรรทุกผู้โดยสารพร้อมสัมภาระ

2.3.3 ทดสอบขึ้นทางชัน

โดยการเลือกสถานที่ที่มีความชันใกล้เคียงกับขอบเขตในการทดสอบ ใน 2 กรณีคือ กรณีการขับขึ้นในสถานะที่ไม่มีน้ำหนักบรรทุกทุกและกรณีมีน้ำหนักบรรทุกทุกซึ่งกำหนดความชันไว้ไม่เกิน 15 องศาโดยประมาณ โดยมีขั้นตอนทดสอบดังนี้

- 1) บรรทุกน้ำหนักผู้โดยสารพร้อมสัมภาระ ที่น้ำหนักบรรทุก 500 กิโลกรัม ตามการออกแบบ
- 2) ทดสอบโดยเริ่มออกตัวจากถนนที่มีความชัน
- 3) กรณีที่รถไม่สามารถขึ้นได้ จะทำการทดสอบหาน้ำหนักบรรทุกที่รถสามารถขึ้นทางชันได้

2.3.4 การหาอัตราการสิ้นเปลืองพลังงาน

จากข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้า ผู้วิจัยได้คำนวณอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าโดยใช้สูตรค่าไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ในอัตราการใช้ไม่เกิน

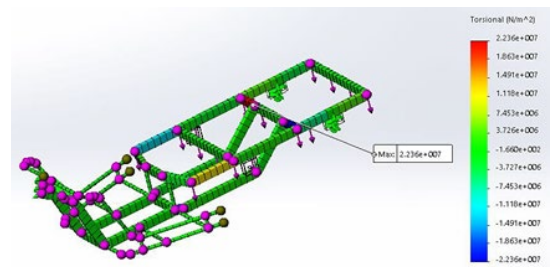
100 หน่วย ที่ใช้อัตราค่าไฟฟ้าหน่วยละ 3.6237 บาทต่อหน่วย (ค่าไฟฟ้าเฉลี่ย 2565) จากนั้นคำนวณหาค่าไฟฟ้าในสภาวะมีการบรรทุกทุกและไม่บรรทุกน้ำหนัก โดยจากการทดสอบพบว่า ในการชาร์จแบตเตอรี่ 1 ครั้งใช้เวลา 6 ชั่วโมง โดยใช้กระแสไฟฟ้า 20 แอมป์ พบว่าคิดเป็นค่าไฟฟ้าประมาณ 41.74 บาทต่อครั้งสำหรับการชาร์จแบตเตอรี่ 2 ชุด (ชุดละ 4 ลูก)

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 ผลการออกแบบโครงสร้างตัวถังและ

วิเคราะห์ความแข็งแรง

ในการออกแบบโครงสร้างการรองรับน้ำหนัก ผู้วิจัยได้ใช้ซอฟต์แวร์ SolidWorks Simulation เพื่อทดสอบค่าความปลอดภัย การใช้งานในแบบภาระงานสถิตย์ (Static Load) โดยมีค่าความเค้นที่เกิดจากแรงแนวแกน ความเค้นที่เกิดจากแรงเฉือน และความเค้นที่เกิดจากแรงบิดกระทำกับโครงสร้าง ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 การวิเคราะห์โครงสร้างเพื่อหาจุดที่เกิดความเค้นจากแรงในแนวแกนสูงสุดความเค้นจากแรงเฉือนสูงสุด และความเค้นแรงบิดสูงสุด

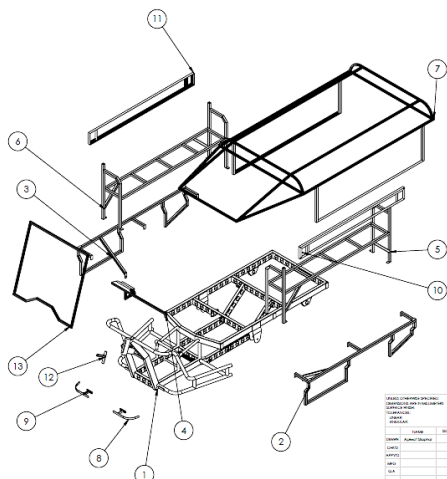
จากการวิเคราะห์โครงสร้างพบว่า

- จุดที่เกิดความเค้นจากแรงในแนวแกนสูงสุดคือจุดต่อระหว่างทุ่นด้านหลังกับโครงรถ
- จุดที่เกิดความเค้นจากแรงเฉือนสูงสุดคือจุดข้อต่อตรงกลาง
- จุดที่เกิดความเค้นแรงบิดสูงสุดคือจุดเดียวกับจุดที่เกิดความเค้นเฉือนสูงสุด

ในการออกแบบและสร้างจึงมีการเสริมความแข็งแรงและทำการเชื่อมเพิ่มเติมให้เกิดความแข็งแรงเพิ่มขึ้นตามความต้องการ

3.2 ผลการออกแบบโครงสร้างตัวถังตัวถังและระบบส่งกำลัง

เมื่อทำการออกแบบโครงสร้างหลักแล้วจึงดำเนินการออกแบบตัวถังรถสามล้อไฟฟ้าโดยยึดรูปแบบของรถ สกายแล็บ ที่ประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลักคือ ส่วนผู้ขับขี่ที่บริเวณส่วนหน้าและส่วนโดยสารที่ตอนหลัง ลักษณะเป็นที่นั่งแบบสองแถวเช่นเดียวกับรถต้นแบบ (รูปที่ 7)



ITEM NO.	PART NUMBER	DESCRIPTION	QTY
1	001-001	Main frame	1
2	001-002	frame rearL	1
3	001-002-1	frame rear R	1
4	001-003	Console	1
5	001-004 -1	Passenger seat frame L	1
6	001-004 -2	Passenger seat frame R	1
7	001-005	Roof frame	1
8	001-006-1	Frame front body L	1
9	001-006-2	Frame front body R	1
10	001-007-1	Backrest passenger fame L	1
11	001-007-2	Backrest passenger fameR	1
12	001-007	mirror base frame	1
13	001-008	mirror frame	1

รูปที่ 7 โครงสร้างหลักของรถสามล้อไฟฟ้าระบบมอเตอร์คู่ที่พัฒนาขึ้นตามต้นแบบรถสกายแล็บ

ออกแบบให้ด้านล่างสามารถบรรจุแบตเตอรี่เรียงกันได้อย่างน้อย 4 ก้อน บริเวณพื้นที่ห้องโดยสาร

ส่วนท้าย ติดตั้งกล่องควบคุมระบบการขับเคลื่อนหลัก และที่บริเวณส่วนกลางของตัวรถติดตั้งชุดมอเตอร์คู่ สำหรับเป็นต้นกำลังขับเคลื่อน ซึ่งการติดตั้งบริเวณกึ่งกลางรถจะช่วยให้เรื่องของจุดศูนย์กลางมวลของรถได้ (Center of Gravity, CG) ทำให้การขับขี่ทำได้ดีขึ้น โดยจัดสร้างรถสามล้อไฟฟ้าต้นแบบดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 แสดงรถสามล้อไฟฟ้าส่งกำลังด้วยระบบมอเตอร์ไฟฟ้าคู่ต้นแบบที่สร้างขึ้น

คุณลักษณะและคุณสมบัติทางเทคนิคของรถไฟฟ้าต้นแบบนั้นจะมีโครงสร้างโดยรวมดังต่อไปนี้

- รถมีความกว้าง 1.25 เมตร มีความยาว 3 เมตร และมีความสูง 1.94 เมตร
- มีน้ำหนักกรโดยรวม 593 กิโลกรัม น้ำหนักบรรทุกสูงสุด 500 กิโลกรัม
- ตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วง จุดศูนย์กลางมวล มีระยะห่างจากล้อหลังขวาไปทางล้อหลังซ้าย 53 เซนติเมตร มีระยะห่างจากล้อหลังไปล้อหน้า 49 เซนติเมตร
- มุมแคสเตอร์ล้อหน้า 20 องศา และมีรีซีมีมุมเลี้ยว จากจุดศูนย์กลางถึงจุดกึ่งกลางของล้อหลังทั้งสองข้าง เท่ากับ 3.1 เมตร
- ระยะห่างจากล้อหน้าถึงล้อหลัง 2.15 เมตร ความกว้างของล้อหลัง จากจุดศูนย์กลางล้อ 1.15 เมตร
- ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางล้อหน้าและล้อหลัง 54 เซนติเมตร ความกว้างของยาง 11.43 เซนติเมตร
- ระบบเบรกล้อหน้าเป็นดิสก์เบรก ล้อหลังเป็นดรัมเบรก

• ระบบกันสะเทือนและระบบรองรับน้ำหนักล้อหน้าเป็น โช้คอัพสปริง ล้อหลังเป็นแหนบและโช้คอัพ

• ชุดควบคุมมอเตอร์ ยี่ห้อ Curtis โมเดล 1204M-5203 36V/48V 275A

• ขับเคลื่อนด้วยกำลังมอเตอร์ชนิด DC ขนาด 4 กิโลวัตต์ 48 โวลต์ มีกระแสโหลดพิค 104 A แรงบิด 12.7 นิวตันเมตร ที่ความเร็วรอบ 2800 rpm Class H ที่อุณหภูมิทำงาน 25-40 องศาเซลเซียส ยี่ห้อ SUPEMOTO รุ่น ZC4-48B จำนวน 2 ตัว จ่ายไฟโดยแบตเตอรี่ขนาด 12 โวลต์ 80 แอมป์ชั่วโมง 2 ชุด ชุดละ 4 ลูก

• อัตราทดรวมเท่ากับ 6.51:1 โดยมีอัตราทดที่เกี่ยวข้อง 1.25:1 ที่สเตอร์โซ่ 1.86:1 และที่เฟืองท้าย 2.80:1

• บรรทุกผู้โดยสารรวมคนขับ 7 คน ทั้งนี้ยึดตามจำนวนการบรรทุกของรถสายแล็บแบบเดิมที่ใช้งานจริงก่อนนำมาดัดแปลง

3.3 ผลการทดสอบสมรรถนะการขับขึ้น

การทดสอบสมรรถนะ เมื่อทำการออกแบบและพัฒนาารถไฟฟ้าต้นแบบเสร็จแล้วจะเริ่มทำการทดสอบสมรรถนะของรถ โดยมีผลการทดสอบดังนี้

3.3.1 ผลการทดสอบทดสอบระยะทางที่รถวิ่งได้จากการชาร์จประจุแต่ละครั้ง

ทำการทดสอบโดยชาร์จประจุแบตเตอรี่ให้เต็มแล้วนำรถไปทดสอบตามสภาพการจราจรปกติ จนกว่าแบตเตอรี่จะหมด แล้วบันทึกระยะทางในการวิ่งของรถจากการชาร์จประจุ 1 ครั้ง เพื่อทราบถึงอัตราการสิ้นเปลืองพลังงาน กับการคำนวณทางทฤษฎี (ตารางที่ 1) โดยจากผลการทดสอบ พบว่ามีระยะทางใกล้เคียงกันกับค่าที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี โดยที่มีระยะทางในสถานะที่ไม่มีน้ำหนักบรรทุก 46.21 กิโลเมตร และมีระยะทางในสถานะที่มีน้ำหนักบรรทุก 40.68 กิโลเมตร ซึ่งมากกว่าที่กรมการขนส่งทางบกกำหนดไว้

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบระยะทางที่ได้จากการชาร์ตประจุในหนึ่งครั้ง

การทดสอบครั้งที่	สถานะที่ไม่มีน้ำหนักบรรทุก		สถานะที่มีน้ำหนักบรรทุก	
	ความเร็วเฉลี่ย (กิโลเมตร/ชั่วโมง)	ระยะทางรวม (กิโลเมตร)	ความเร็วเฉลี่ย (กิโลเมตร/ชั่วโมง)	ระยะทางรวม (กิโลเมตร)
1	26	41.43	21	42.21
2	25	45.22	22	41.29
3	21	51.98	21	38.54
ค่าเฉลี่ยผลการทดสอบ	24	46.21	21	40.68

3.3.2 ผลการทดสอบความเร็วสูงสุดของรถ ซึ่งจะทำให้การทดสอบบนถนนในแนวราบ

ทำการทดสอบโดยชาร์จประจุแบตเตอรี่ให้เต็มแล้วนำรถไปทดสอบเพื่อให้ได้ความเร็วสูงสุดที่เกิดขึ้นจริง โดยมีผลการทดสอบดังแสดงใน ตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบความเร็วที่วิ่งได้สูงสุดของรถ

การทดสอบครั้งที่	สถานะที่ไม่มีน้ำหนักบรรทุก (กิโลเมตร/ชั่วโมง)	สถานะที่มีน้ำหนักบรรทุก (กิโลเมตร/ชั่วโมง)
1	55.10	49.25
2	55.30	50.08
3	54.76	50.10
ค่าเฉลี่ยผลการทดสอบ	55.05	49.81

จากการทดสอบ พบว่าความเร็วสูงสุดที่ได้จากสถานะที่รถไม่มีน้ำหนักบรรทุกคือ 55.05 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และมีความเร็วสูงสุดในสถานะที่มีน้ำหนักบรรทุกคือ 49.81 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ซึ่งจากผลการทดสอบ พบว่ารถไฟฟ้าต้นแบบ สามารถวิ่งได้ที่ความเร็วสูงสุด เป็นไปตามผลการคำนวณในการออกแบบจาก ระบบส่งกำลัง และคุณสมบัติของมอเตอร์ต้นกำลังที่เลือก (มอเตอร์มีแรงบิดสูงสุดคือ 11.5-25.5 นิวตันเมตร ทำงานที่ 1500-3300 รอบต่อนาที)

3.3.3 ผลการทดสอบขึ้นทางชัน

โดยการเลือกสถานที่ที่มีความชันใกล้เคียงกับขอบเขตในการทดสอบซึ่งกำหนดความชันไว้ไม่เกิน 15 องศาโดยประมาณ (รูปที่ 9) ทั้งรูปแบบการขับขึ้นแบบรถเปล่าและแบบมีการบรรทุกผู้โดยสารพร้อมสัมภาระ ที่น้ำหนักบรรทุก 500 กิโลกรัม ตามการออกแบบ โดยมีผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 3 ดังนี้

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบความเร็วที่วิ่งได้สูงสุดของรถ

การทดสอบครั้งที่	สภาวะการขับขี่	ผลการทดสอบขับขี่ขึ้นทางชัน 15 องศา
1	รถเปล่า	ได้
2	รถ และ สัมภาระ 300 กิโลกรัม	ได้
3	รถ และ สัมภาระ 400 กิโลกรัม	ได้
4	รถ และ สัมภาระ 500 กิโลกรัม	ได้
5	รถ และ สัมภาระ 600 กิโลกรัม	ได้ (ค่อนข้างช้า)
6	รถ และ สัมภาระ 700 กิโลกรัม	ไม่ได้



รูปที่ 9 การทดสอบการขับขี่รถขึ้นทางชันที่ระดับความเอียง 15 องศา

จากการทดสอบขึ้นทางชันจะเห็นว่า ที่สภาวะรถไม่มีน้ำหนักบรรทุกนั้น สามารถออกตัวบนทางชันได้ด้วยมอเตอร์เพียงตัวเดียว และสภาวะที่มีน้ำหนักบรรทุกจะสามารถออกตัวบนทางชันได้ ด้วยการใช้อัตรา 2 ตัว ทำงานร่วมกัน โดยสามารถรับน้ำหนักได้ สูงสุดไม่เกิน 500 กิโลกรัมตามที่ออกแบบ อย่างไรก็ตามการบรรทุกน้ำหนักมากเกินไปอาจส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของรถ เนื่องจากอาจทำให้รถพลิกคว่ำได้ง่ายจึงไม่แนะนำให้บรรทุกมากเกินไปตามที่ออกแบบไว้

3.3.4 ผลการหาอัตราการสิ้นเปลืองพลังงาน

จากการทดสอบ พบว่าในการชาร์จแบตเตอรี่ 1 ครั้งใช้ค่าใช้จ่าย 42 บาท ดังนั้นในการทดสอบขั้นตอนการชาร์จ 1 ครั้ง กรณีไม่มีน้ำหนักบรรทุกซึ่งวิ่งได้ระยะทาง 46.21 กิโลเมตร และมีระยะทางในสภาวะที่มีน้ำหนักบรรทุก 40.68 กิโลเมตร จะสามารถคำนวณค่าพลังงานต่อการเคลื่อนที่ได้จาก

$$E = \text{อัตราการสิ้นเปลืองพลังงาน (บาท/กม.)}$$

$$D_n = \text{ระยะทางที่เคลื่อนที่ได้ในสภาวะที่ไม่มีน้ำหนักบรรทุก (km)}$$

D_t = ระยะทางที่เคลื่อนที่ได้ในสภาวะที่มีน้ำหนักบรรทุก (km)

C = ค่าใช้จ่ายในการชาร์จแบตเตอรี่ 1 ครั้ง (บาท)

กรณีไม่มีน้ำหนักบรรทุก

$$E_m = \frac{41.745}{46.21} \quad E = 0.90 \text{ บาท/กม}$$

กรณีมีน้ำหนักบรรทุก

$$E_m = \frac{41.745}{40.68} \quad E = 1.03 \text{ บาท/กม}$$

เมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานของรถสามล้อสกยาแล็บต้นแบบ [9] มีอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานที่ 35 กิโลเมตรต่อลิตร (ราคาน้ำมันปี พ.ศ. 2565 น้ำมันแก๊สโซฮอล์ 91 ลิตรละ 35-40 บาท) พบว่ามีอัตราค่าใช้จ่ายพลังงานที่ใกล้เคียงกัน

รถสามล้อไฟฟ้าต้นแบบสามารถทำงานได้ตามวัตถุประสงค์ที่ออกแบบ โดยการวิเคราะห์โครงสร้าง ความแข็งแรงของเฟรมรถก่อนดำเนินการสร้าง ทำให้เมื่อจัดสร้างเสร็จไม่พบปัญหาที่เกี่ยวกับโครงสร้างรถเลย ในระหว่างการทดสอบ สำหรับผลการทดสอบสมรรถนะรถต้นแบบสามารถทำความเร็วสูงสุดได้ตามที่ออกแบบคือมากกว่า 50 กิโลเมตรต่อชั่วโมง อย่างไรก็ตามแนะนำให้ใช้ความเร็วดังกล่าวในการขับขี่ทั่วไปเพื่อความปลอดภัย และมีสมรรถนะที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นเช่น รถสามล้อเนกประสงค์พลังงานแสงอาทิตย์ [5] ซึ่งเป็นรถดัดแปลงที่มีขนาดและลักษณะใกล้เคียงกันที่พบว่า สามารถทำความเร็วสูงสุดได้ที่ 32 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เมื่อบรรทุกน้ำหนัก 350 กิโลกรัม ในขณะที่รถสามล้อสกยาแล็บไฟฟ้าต้นแบบสามารถบรรทุกน้ำหนักได้ 500 กิโลกรัม รวมถึงในการทดสอบวิ่งได้ทางชันยังสามารถขึ้นทางชันได้ถึง 15 องศา

งานวิจัยนี้สามารถออกแบบรถได้เป็นไปตามข้อกำหนดของ กรมการขนส่งทางบกที่ประกาศในราชกิจจานุเบกษา [12] เรื่อง ประกาศกรมการขนส่งทางบก

เรื่อง กำหนดกำลังของมอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ขับเคลื่อนรถ ตามกฎหมายว่าด้วยรถยนต์ พ.ศ. 2563 โดยมีสาระสำคัญเกี่ยวกับรถประเภทสามล้อ ตามข้อ “5 ข้อ ซึ่งระบุว่ารถยนต์รับจ้างสามล้อและรถยนต์สามล้อส่วนบุคคลที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าต้องมีกำลังของมอเตอร์ไฟฟ้าไม่น้อยกว่า 4 กิโลวัตต์ และสามารถขับเคลื่อนรถให้มีความเร็วสูงสุดได้ไม่น้อยกว่า 45 กิโลเมตรต่อชั่วโมง” และ “ข้อ 7 มอเตอร์ไฟฟ้าของรถตามข้อ 3 ข้อ 4 ข้อ 5 และข้อ 6 ต้องสามารถขับเคลื่อนรถในขณะที่มีน้ำหนักบรรทุกรวมน้ำหนักบรรทุก (Gross Vehicle Weight) ตามที่ผู้ผลิตกำหนดด้วยความเร็วสูงสุดตามที่กำหนดในประกาศนี้ ได้ต่อเนื่องเป็นเวลาไม่น้อยกว่า 30 นาที” จึงเป็นรถต้นแบบที่มีความเหมาะสมในการนำไปพัฒนาต่อยอดต่อไป เพื่อใช้ประโยชน์จริงในอนาคต

4. สรุป

รถสามล้อไฟฟ้าต้นแบบ ได้รับการออกแบบและพัฒนาจากรถสามล้อสกายแลป โดยมีต้นกำลังคือมอเตอร์ไฟฟ้า ขนาด 4 กิโลวัตต์ จำนวน 2 ตัว รวมกำลังขับ 8 กิโลวัตต์ ซึ่งสามารถทำงานร่วมกัน หรือแยกการทำงานได้อย่างอิสระ ขึ้นอยู่กับภาระโหลดใช้งาน รถไฟฟ้าต้นแบบนี้มีขนาดมิติตัวถัง กว้าง 1.25 เมตร ยาว 3 เมตร และสูง 1.94 เมตร แชนด์บังคับเลี้ยวออกแบบให้มีมุมแคสเตอร์ล้อหน้า 20 องศาสามารถบรรทุกน้ำหนักได้ 500 กิโลกรัม และสามารถไต่ทางชันได้ 15 องศา จากการทดสอบสมรรถนะ ในสภาวะที่ไม่มีน้ำหนักบรรทุก และสภาวะที่มีน้ำหนักบรรทุก พบว่าสามารถทำความเร็วได้สูงสุด 55.05 และ 49.81 กิโลเมตรต่อชั่วโมง รวมถึงสามารถขับเคลื่อนได้ 46.20 40.68 กิโลเมตรต่อการ ชาร์จประจุ 1 รอบ โดยมีอัตราสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าประมาณ 1.03 บาทต่อ กิโลเมตรเมื่อบรรทุกเต็มพิกัด

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ประจำปีงบประมาณ 2560 และจากศูนย์ความร่วมมือกับภาคอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] T. Samsri and E. Phaisangittisagul, “Optimal real-time PEVs charging scheduling for enhancing energy management by maintaining power system peak demand,” *UBU Engineering Journal*, vol. 8, no. 1, pp. 77-90, Jan-Jun. 2015.
- [2] N. Coovattanachai, “Hybrid and electric cars,” in *Research Community*, Bangkok, Thailand Research Fund, vol. 14, no. 12, 2008.
- [3] K. Meukdang and A. Khampinit, “Electric Tricycle by Double Brushless DC Motor” (Bachelors dissertation) Bangkok. King Mongkut's University of Technology North Bangkok, 2014.
- [4] C. Yiangkamolsing, “Cheapest powered personal electric bike,” *Thailand Engineering Journal*, vol. 65, no. 2, Mar-Apr. 2012.
- [5] T. Ruangrunchaikul and S. Aumkratum, “Multipurpose three-wheel solar mini truck,” *Thai Journal of Science and Technology*, vol. 8, no. 2, pp. 200-211, Mar-Apr. 2019.

- [6] H. Mazumder, M.M.Al Emran Hassan, M.Ektesabi and A.Kapoor, "Performance analysis of EV for different mass distributions to ensure safe handling," *Energy Procedia*, vol. 14, pp. 949 – 954, 2012.
- [7] Energy Policy and Planning office. "Electric infrastructure development plan report to support electric vehicles in Thailand" (Final report) Bangkok. Ministry of Energy, 2017.
- [8] C. Yiangkamolsing, S. Channarong, B. Yaothani, P. Sasawat and V. Katikawong, 2019, "Developing a prototype of a modified electric tuk-tuk by the Thai Electric Vehicle Association," *Bangkok, Thai Electric Vehicle Association*, 2019.
- [9] Piyapat Panmuanga, Taweesak Thongsan, Nuchida Suwapaet, Juckamas Laohavanich and Chonlatee Photong, "A Novel Dual Motor Drive System for Three Wheel Electric Vehicles." in *Proceedings of the 6th Engineering International Conference on Education, Concept, and Application of Green Technology*, Semarang, Indonesia, 2017, pp. 020019-1 -020019-8.
- [10] A. Sripaphakorn and K. Theachakittirojna, "Electric vehicles: Basic and Design," 2nd ed, Bangkok, Chulalongkorn University Press, 2013.
- [11] P. Sankasem, "Automotive Engineering," 2nd ed. Bangkok, Top press, 2014.
- [12] Announcement of the Department of Land Transport, "Subject: Determining the power of electric motors used to drive a vehicle according to the law on automobiles B.E. 2563," *The Government Gazette*, vol. 138, Special Part 25, Feb. 2021.
- [13] K. Areerak, "Speed Control of Separately Excited DC Motors For Electric Vehicles," (Final Report) Nakhon Ratchasima, Suranaree University of Technology, 2013.
- [14] T. Suwanprateep, "Automotive Engineering," 8th ed. Bangkok, Vitpat press, 2008.
- [15] W. Manotrakul, W. Theansuwan, P. Hemaratmonatrakul. "Designing of prototype electric utility vehicle." in *Proceedings of the 28th Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand*, 15-17 Oct 2014; Khonkaen, Thailand 2014, pp. 485 - 492.
- [16] Polwat Praipaisankit. (2021). "The result from Simulation", [Online]. Available: <http://thai-solidworks-simulation.blogspot.com/2016/03/simulation-part-25.html>

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

หุ่นยนต์เคลื่อนที่อัตโนมัติโดยการใช้กล้องระบุตำแหน่ง

นภัสดล สิงหะตา*

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

2 ถนนนางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพมหานคร 10120

รับบทความ 12 กรกฎาคม 2564 แก้ไขบทความ 17 มีนาคม 2565 ตอรับบทความ 20 เมษายน 2565

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการระบุตำแหน่ง ซึ่งเป็นวิธีที่เชื่อถือได้ในการระบุตำแหน่งปัจจุบันของหุ่นยนต์โดยใช้การประมวลผลภาพ ซึ่งสามารถปรับปรุงการหลีกเลี่ยงการชนของสิ่งกีดขวางได้อย่างมีประสิทธิภาพด้วยเซ็นเซอร์ตรวจจับแสงและวัดระยะ (LiDAR) สำหรับหุ่นยนต์เคลื่อนที่อัตโนมัติ หุ่นยนต์พิจารณาหาประการ ประการแรก เพื่อลดปัญหาที่เกิดจากการเลี้ยวเมื่อหุ่นยนต์ต้องการเปลี่ยนทิศทางเคลื่อนที่ ได้มีการออกแบบหุ่นยนต์เคลื่อนที่โดยให้หุ่นยนต์สามารถเปลี่ยนทิศทางโดยไม่ต้องตีวงเลี้ยวการเคลื่อนที่ ประการที่สอง มีการใช้เซ็นเซอร์ตรวจจับแสงและวัดระยะในการตรวจจับวัตถุที่อยู่ด้านหน้าหุ่นยนต์เคลื่อนที่ เพื่อให้หุ่นยนต์มีความสามารถในการหลีกเลี่ยงสิ่งกีดขวางได้ ประการที่สาม เสนอให้มีการวางแผนเส้นทางโดยใช้อัลกอริธึมในการเดินทางหลบหลีกสิ่งกีดขวางจากท่าเริ่มต้นไปยังปลายทางในสภาพแวดล้อมที่ไม่รู้จักได้ ประการที่สี่ เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการเคลื่อนที่ระบบสามารถประมวลผลแบบทันที โดยใช้การสื่อสารแบบไร้สายมีความยืดหยุ่นหุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระมากกว่าใช้สาย สุดท้ายการปรับปรุงที่เป็นไปได้คือการเพิ่มกล้องมากกว่าหนึ่งตัว ซึ่งจะสามารถครอบคลุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ได้กว้างมากขึ้น

คำสำคัญ : การประมวลผลภาพ; ระบุตำแหน่ง; หุ่นยนต์เคลื่อนที่

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +669 5424 6615, ไลน์ไอดีเล็คทอร์นิคส์: napassadol.s@mail.rmutk.ac.th

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

Automatic Mobile Robot Indoor with Position Identification by Vision System

Napassadol Singhata*

Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Krungthep
2 Nang Linchi Rd., Thung Maha Mek, Bangkok 10120

Received 12 July 2021; Revised 17 March 2022; Accepted 20 April 2022

Abstract

This paper presents position identification, a reliable way to identify the current location of the robot using image processing, which can effectively improve the avoid collisions of obstruction with a Light Detection And Ranging (LiDAR) sensor for an autonomous mobile robot. In order to further improve positioning accuracy. The robot under consideration has five functions. Firstly, to overcome the insufficient accuracy of posture when a robot turns, a mobile robot integrated scheme has been investigated for the mobile robots with omni-wheels which can make fixed point turning, so that the robot position remains fixed in the process of changing the direction of motion. Secondly, an additional sensor has been used to detect the object in front of the mobile robot to improve the system that will have the ability to move obstacle avoidance. Thirdly, an algorithm is proposed to feasibly plan the travelling path and avoid obstructing from its initial posture to the destination in an unknown environment. Fourthly, in order to improve the real time performance, a wireless network is more flexible than a cable that allows mobile robots to move freely without any failure. Finally, a possible improvement is to additionally more than one camera, which usually covers a larger area around the robot.

Keywords : Image Processing, Position Identification, Mobile Robot

* Corresponding Author. Tel.: +669 5424 6615, E-mail Address: napassadol.s@mail.rmutk.ac.th

1. บทนำ

ระบบการนำทางของหุ่นยนต์เคลื่อนที่อัตโนมัติ (AMR) มีปัจจัยสำคัญที่ต้องคำนึงถึง ได้แก่ 1) หุ่นยนต์สามารถระบุตำแหน่งและท่าทางของตนเองจากจุดเริ่มต้นไปยังปลายทางที่ต้องการ [1] 2) อัลกอริธึมที่ใช้ในการวางแผนให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปยังจุดหมาย 3) อุปสรรคสิ่งกีดขวางทางเดินของหุ่นยนต์

หุ่นยนต์จะสามารถเคลื่อนที่อัตโนมัติจำเป็นต้องระบุตำแหน่งของหุ่นยนต์ตลอดเส้นทางและรายงานสถานะการณ์สิ่งแวดล้อมในขณะที่เดินทางได้จึงจะสามารถถึงจุดหมายได้อย่างปลอดภัย [2] การสร้างแผนที่จำลองเพื่อให้หุ่นยนต์ทราบตำแหน่งที่ตนเองและสิ่งกีดขวาง อยู่ในขณะเดินทาง จึงเป็นสิ่งสำคัญที่จะสามารถทำให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปยังจุดที่ต้องการแม้อันสภาพแวดล้อมที่ไม่คงที่ [3] การควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ให้เคลื่อนที่อัตโนมัติไปยังปลายทางจำเป็นต้องออกแบบวิธีการเดินและทราบท่าทางของหุ่นยนต์ในขณะนั้น ข้อจำกัดเรื่องเวลาและอุปสรรคเส้นทางโดยรอบที่ไม่สามารถคาดเดาได้เป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงเพื่อให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ค้นหาเส้นทางที่ดีที่สุดและถึงจุดหมายได้อย่างปลอดภัย หุ่นยนต์ควรสามารถรับรู้เพื่อเตรียมพร้อมสำหรับภัยคุกคามที่อาจเกิดขึ้น ดังนั้นการพัฒนาอัลกอริธึมเพื่อวางแผนเส้นทางการเดินทางของหุ่นยนต์ จึงเป็นสิ่งที่ท้าทายสำหรับนักพัฒนาหุ่นยนต์เคลื่อนที่อัตโนมัติ [4] โดยตัวแปรทั้งหมดที่ต้องส่งไปให้หุ่นยนต์เป็นข้อมูลสำคัญที่หุ่นยนต์ต้องรับทราบพร้อมกัน [5] โดยเซ็นเซอร์จะทำหน้าที่ตรวจสอบและส่งข้อมูลให้หุ่นยนต์ต้องการทราบเพื่อนำไปประมวลผล และควบคุมหุ่นยนต์ให้ทำงาน การเลือกใช้เซ็นเซอร์จึงเป็นสิ่งที่ควรคำนึงถึงและเลือกใช้ให้เหมาะสมกับความต้องการของผู้ใช้งาน [6] ในระบบนำทางของหุ่นยนต์เคลื่อนที่อัตโนมัติ เซ็นเซอร์ภาพมีข้อดีได้แก่ น้ำหนักเบา ใช้พลังงานต่ำ และต้นทุนต่ำ นอกจากนี้ยังสามารถให้คุณสมบัติและข้อมูลด้านสิ่งแวดล้อมมากมาย [7] ในการสร้างระบบหุ่นยนต์เคลื่อนที่อัตโนมัติต้องทราบสถานการณ์บรรยากาศรอบๆ ที่

เปลี่ยนไปตลอดเวลา [8] การประมวลผลภาพสามารถทราบข้อมูลสภาพแวดล้อมโดยใช้เซ็นเซอร์เพียงตัวเดียว โดยผู้สร้างสามารถใช้หลักการประมวลผลภาพประมวลผลเป็นข้อมูลต่างๆสามารถนำภาพไปพัฒนาประมวลผลได้อย่างหลากหลายตามวัตถุประสงค์ของผู้ใช้งาน นอกจากนี้ หุ่นยนต์ต้องสามารถระบุสิ่งกีดขวางบริเวณหุ่นยนต์สัญญาณโดยเซ็นเซอร์จำเป็นต้องมีความความละเอียดและมีความแม่นยำสูง [9] บอกระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์และอุปสรรคที่ขวางทางเดิน ดังนั้นบทความนี้จะนำเสนอการใช้กล้องเว็บแคมราคาถูกเพื่อเป็นเซ็นเซอร์ในการระบุตำแหน่งของหุ่นยนต์สำหรับเคลื่อนที่ภายในอาคาร ติดไว้บริเวณมุมสูงนอกตัวหุ่นยนต์และส่งสัญญาณไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ และสามารถหลบหลีกสิ่งกีดขวางจากการตรวจสอบด้วย LiDAR เนื่องจากระบุสิ่งกีดขวางโดยรูปร่างลักษณะไม่ได้เป็นข้อจำกัดในการตรวจสอบ เซ็นเซอร์สามารถบอกระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์และอุปสรรคได้อย่างแม่นยำ หลักการทำงานของระบบกล้องมุมสูงใช้หลักประมวลผลภาพ วิเคราะห์ตำแหน่งหุ่นยนต์ในทันที โดยสามารถใช้กล้องเว็บแคมราคาถูก มาประมวลผลภายนอกตัวหุ่นยนต์ และส่งสัญญาณผ่านระบบไร้สายด้วย Wi-Fi ไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ที่เป็นสมองส่วนกลางในตัวหุ่นยนต์ได้รับทราบ ทำให้ลดการใช้งานทรัพยากรหน่วยประมวลผลกลางของไมโครคอนโทรลเลอร์ และการประมวลผลภาพสามารถบอกระบุตำแหน่งได้รวดเร็ว เพื่อนำภาพที่ได้ไปวิเคราะห์ตำแหน่งของหุ่นยนต์ตลอดการเดินทาง

2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการวิจัย

เครื่องมือที่ใช้ในระบบหุ่นยนต์เคลื่อนที่อัตโนมัติเคลื่อนที่บนผิวเรียบ โครงสร้างของระบบจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ 1. ระบบประมวลผลภาพระบบถูกยึดอยู่กับที่เพื่อทำการระบุตำแหน่งของหุ่นยนต์ 2. ระบบหุ่นยนต์เคลื่อนที่ จะเป็นส่วนของหุ่นยนต์ที่สามารถเคลื่อนที่ไปยังจุดหมายปลายทางที่กำหนดได้ภายในระบบจะมีอุปกรณ์ และหน้าที่ ดังนี้

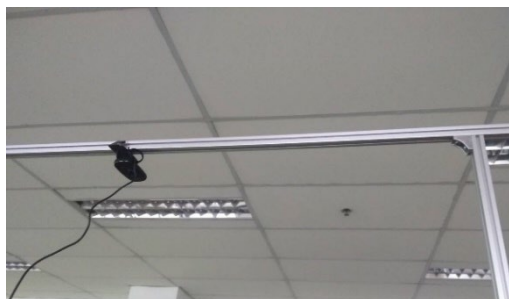
2.1 ระบบประมวลผลภาพ

การประมวลผลภาพโดยจะใช้กล้องถ่ายภาพจากมุมสูง พื้นที่ที่กล้องมองเห็น จะถูกถ่ายออกมาเป็นรูปภาพโดยระบุขอบเขต และขนาดพื้นที่เป็นข้อมูลพิกเซล เพื่อกำหนดตำแหน่งพิกัดของหุ่นยนต์เป็นค่าพิกัด 2 มิติ อุปกรณ์ของระบบประมวลผลภาพจะประกอบด้วย 3 ส่วน ได้แก่ 1.กล้องเว็บแคม 2.ฐานกล้อง และ 3.คอมพิวเตอร์ โดยกล้องเว็บแคม LOGITECH HD C525 1600x890 RGB24 จำนวนเฟรม 30 fps มีหน้าที่บันทึกภาพการเคลื่อนที่ของรถ และนำภาพส่งไปให้คอมพิวเตอร์ประมวลผลเพื่อระบุตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถ โดยกล้องจะถูกติดตั้งไว้ด้านบนที่มีความสูง 1.8 เมตร ความสูงจะมีผลต่อความละเอียดขนาดพิกเซลของภาพ ระบบจะสามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ ให้อยู่บริเวณตำแหน่งที่กำหนดไม่เกิน 10 เซนติเมตร โดยติดกล้องไว้ ดังรูปที่ 1 เพื่อมองเห็นสภาพแวดล้อมโดยรอบที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ โดยกล้อง 1 ตัว จะครอบคลุมพื้นที่ขนาด 216x122 เซนติเมตร

ในการประมวลผลภาพ หุ่นยนต์เคลื่อนที่ควรมีเอกลักษณ์เฉพาะเพื่อให้สามารถแยกออกจากสภาพแวดล้อมได้โดย หุ่นยนต์มีพื้นหลังคาสีดำที่มีขนาด 15x30 เซนติเมตร ติดไว้ด้านบนตัวรถ ดังรูปที่ 2

2.2 การระบุพิกัดหุ่นยนต์

เพื่อให้ทราบตำแหน่งของตนเองในระหว่างเคลื่อนที่ การระบุตำแหน่งเป็นงานที่สำคัญสำหรับการนำทางด้วยหุ่นยนต์เคลื่อนที่ด้วยระบบอัตโนมัติในสภาพแวดล้อมที่ไม่รู้จัก [11] การใช้ภาพเพื่อทำหน้าที่ให้ข้อมูลสำหรับการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์จะทำให้การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์สมบูรณ์ยิ่งขึ้น [12] ในสถานะแสงที่เหมาะสมระบบสามารถรับรู้ข้อมูลภาพต่อเนื่องในสภาพแวดล้อมเพื่อระบุตำแหน่งเป้าหมายได้อย่างแม่นยำ [13] การทำงานของระบบการประมวลผล



รูปที่ 1 กล้องระบุตำแหน่ง



รูปที่ 2 หุ่นยนต์เคลื่อนที่

ภาพ จำเป็นต้องเขียนโปรแกรมเพื่อประมวลผลจากภาพวิเคราะห์ระบุตำแหน่งหุ่นยนต์ โดยระบบจะมีขั้นตอนการทำงาน ดังนี้ อินพุต : กล้องเว็บแคมจะเชื่อมต่อส่งข้อมูลภาพที่ถ่ายได้เข้าคอมพิวเตอร์ผ่านสาย USB เพื่อทำการประมวลผลภาพถ่ายของหุ่นยนต์และระบุตำแหน่งการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ การประมวลผลภาพจะใช้โปรแกรม LabVIEW

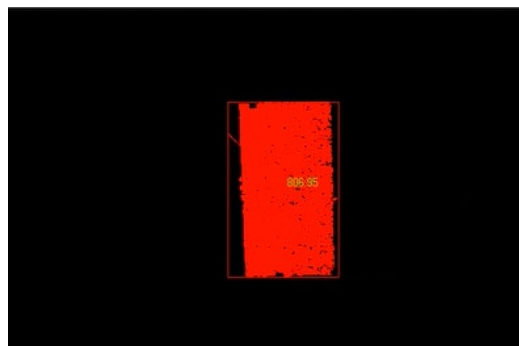
หน่วยประมวลผลกลาง : คอมพิวเตอร์จะรับภาพจากกล้องเว็บแคมและจะทำการประมวลผลภาพเพื่อระบุตำแหน่งของหุ่นยนต์ในภาพโดยขั้นตอนการประมวลผลภาพจะมี 5 ขั้นตอน ดังนี้

1. ปรับความสว่างของภาพให้เหมาะสมตามสภาพแสงบริเวณโดยรอบโดยปรับค่า ความสว่าง ความคมชัด และแกมมา (Gamma) เพื่อให้ภาพมองเห็นหุ่นยนต์ได้คมชัดขึ้น
2. Threshold ปรับสภาพสีขึ้นงานแยกหุ่นยนต์ออกจากสิ่งแวดล้อมโดยรอบ โดยปรับขอบเขตค่าระบบสีของแสง

(RGB R: min, max: 0-255, G: min, max: 0-255, B: min, max: 0 – 122) ให้มีขนาด 32 บิต หลังจากนั้นปรับภาพให้มีขนาด 2 บิต เพื่อปรับภาพให้อยู่โทนสีขาวดำ

3. กำจัดสิ่งรบกวนขนาดเล็กที่ยังเหลือออกจากชิ้นงาน
4. ทำการระบุชิ้นงานโดยนำภาพต้นแบบมาเปรียบเทียบกับภาพที่ได้จากกล้อง โดยทำการเปรียบเทียบค่าความคล้ายกันของภาพต้นแบบและภาพจากที่กล้องถ่ายได้ โดยอ้างอิงรูปทรง สีและขนาดของชิ้นงาน แสดงจำนวนชิ้นงานและประมวลผลระบุพิกัดเป็นตำแหน่ง 2 มิติ (X,Y) หุ่นยนต์เพื่อนำค่าระบุตำแหน่งไปควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เคลื่อนที่โดยส่งข้อมูลไปให้ไมโครคอนโทรลเลอร์
5. การแสดงผลบนหน้าจอคอมพิวเตอร์แสดงกรอบสี่เหลี่ยมสีแดงรอบรูปวัตถุที่จับได้ และแสดงค่าและระบุค่าตำแหน่งจุดศูนย์กลางของชิ้นงานในรูปตัวเลขพิกเซลแสดงดังรูปที่ 3

เอาท์พุต : การแสดงผลระบุตำแหน่งของหุ่นยนต์ได้จากการประมวลผลภาพจากคอมพิวเตอร์จะถูกส่งไปยังบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ที่เป็นตัวประมวลผลกลางของระบบหุ่นยนต์เคลื่อนที่ และผู้ใช้งานจะสามารถสังเกตเห็นพฤติกรรมเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ผ่านจอมอนิเตอร์ในคอมพิวเตอร์แบบประมวลผลให้ทราบทันที เมื่อต้องการเริ่มต้นหรือหยุดการทำงานของหุ่นยนต์สามารถสั่งผ่านโปรแกรมจากคอมพิวเตอร์ได้

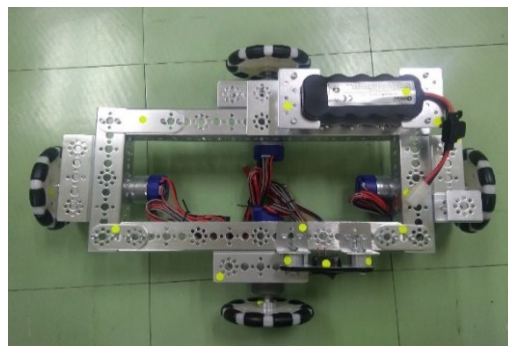


รูปที่ 3 การประมวลผลภาพ

2.3 ระบบหุ่นยนต์เคลื่อนที่

การออกแบบโครงหุ่นยนต์ที่ต้องคำนึงถึง ทำทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ตลอดการเดินทาง การเปลี่ยนทิศทางเคลื่อนที่โดยการเลี้ยวอาจทำให้ทิศทางการควบคุมหุ่นยนต์เปลี่ยนไปจากเดิม ล้อที่มีลักษณะพิเศษสามารถทำให้หุ่นยนต์เปลี่ยนทิศทางได้อย่างราบรื่นจากการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าและทำการเปลี่ยนทิศทางเป็นด้านซ้ายหรือขวาได้อิสระ โดยไม่ต้องทำการเลี้ยว การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ดังกล่าวจะทำให้หุ่นยนต์สามารถเปลี่ยนทิศทางโดยมีตำแหน่งคงที่ ลดปัญหาการทำการเลี้ยวบริเวณหัวมุม ซึ่งอาจจะมีความถี่ที่จำกัดไม่สามารถให้ตัววงในการเลี้ยวหุ่นยนต์ได้ ทำให้ทิศในการควบคุมไม่เปลี่ยน และเป็นข้อได้เปรียบมากกว่าการเลี้ยวเพราะการเลี้ยวจะทำให้เสียเวลา และทำให้ตำแหน่งก่อนการเลี้ยวและหลังการเลี้ยวของหุ่นยนต์คลาดเคลื่อนไปจากเดิม โดยโครงสร้างหุ่นยนต์เคลื่อนที่ ประกอบด้วยโครงแผ่นอลูมิเนียมมีความกว้าง x ความยาว x ความสูง เท่ากับ 32x48x18 เซนติเมตร

การขับเคลื่อนของหุ่นยนต์โดยใช้แบตเตอรี่ 12 โวลต์ เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ให้กับอุปกรณ์ดังนี้ บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ เซนเซอร์ TF02-Pro LiDAR บอร์ดขับมอเตอร์ และมอเตอร์ โดยมอเตอร์จะมีทั้งหมด 4 ตัว แต่ละตัวจะเชื่อมติดกับ ล้อของหุ่นยนต์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 เซนติเมตร



รูปที่ 4 โครงหุ่นยนต์

2.4 การทำงานในระบบหุ่นยนต์เคลื่อนที่

หุ่นยนต์เคลื่อนที่อัตโนมัติ เป็นหุ่นยนต์ที่รับสัญญาณจากเซนเซอร์ เพื่อตรวจสอบสภาพแวดล้อมในรูปแบบต่างๆ และนำค่าที่ได้จากเซนเซอร์สร้างเงื่อนไขในการเคลื่อนที่ หุ่นยนต์เคลื่อนที่แบบอัตโนมัติ มีส่วนประกอบที่สำคัญ 3 ส่วน คือ หน่วยรับข้อมูลเข้า (Input Unit) หน่วยประมวลผล (Process Unit) และหน่วยแสดงผล (Output Unit) และหุ่นยนต์จะเคลื่อนที่ไปตามเป้าหมาย จำเป็นต้องตรวจสอบตำแหน่งเพื่อระบุพิกัดของหุ่นยนต์ขณะเคลื่อนที่ไปยังจุดต่างๆ และหุ่นยนต์รับข้อมูลจากระบบประมวลผลภาพ และทราบตำแหน่งของตนเองตลอดเส้นทางเคลื่อนที่จนถึงเป้าหมายที่กำหนด

2.4.1 หน่วยรับข้อมูล

หน่วยรับข้อมูลของระบบหุ่นยนต์เคลื่อนที่ ตรวจสอบสภาพแวดล้อมเพื่อเป็นข้อมูลในการควบคุมระบบ หุ่นยนต์เคลื่อนที่ที่ได้รับสัญญาณจาก ระบบและอุปกรณ์ดังนี้ 1.ระบบประมวลผลภาพ 2.เซนเซอร์ไลด้า

2.4.1.1 การหลบหลีกสิ่งกีดขวาง

จำเป็นอย่างยิ่งที่ หุ่นยนต์เคลื่อนที่ จะต้องสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระในสภาพแวดล้อมที่มีสิ่งกีดขวาง การตรวจจับและหลบหลีกอุปสรรคเป็นปัญหาที่สำคัญและท้าทายที่ต้องพิจารณาในระบบการนำทางให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่อย่างปลอดภัย มีการนำเสนอวิธีการต่างๆ เพื่อแก้ปัญหการหลบหลีกสิ่งกีดขวางเซนเซอร์ไลด้าสามารถบอกระยะห่างระหว่างวัตถุที่อยู่หน้าบริเวณด้านหน้าเซนเซอร์โดยปล่อยคลื่นใกล้เคียงรังสีอินฟราเรดเพื่อตรวจสอบวัตถุที่กีดขวางในบริเวณที่ทำการตรวจสอบเพื่อหลบหลีกสิ่งกีดขวางได้ กำหนดระยะในการหลบหลีกสิ่งกีดขวางกับระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์เมื่อเซนเซอร์ตรวจพบสิ่งกีดขวางที่มีระยะห่างน้อยกว่า 10 เซนติเมตร ให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่เปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ไปด้านหลังเป็นสไลด์ด้านข้างแทน

2.4.2 หน่วยประมวลผล

การวางแผนเส้นทางสำหรับหุ่นยนต์เคลื่อนที่จะดำเนินการเพื่อกำหนดเส้นทางเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงปลายทาง ด้วยอัลกอริธึมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ในรูปแบบต่างกัน อัลกอริธึมการเคลื่อนที่จะทำการวางแผนเส้นทางเพื่อกำหนดเส้นทางที่เหมาะสมให้กับหุ่นยนต์มุ่งสู่เป้าหมายอย่างปลอดภัย ข้อมูลตัวแปรสถานะอินพุตทำหน้าที่กำหนดค่าปัจจุบันของตัวแปรสถานะ (ตำแหน่ง ทิศทาง และอื่นๆ) เทียบกับเวลาในขณะนั้น จากนั้นค่าอินพุตเหล่านี้จะถูกส่งไปยังอัลกอริธึมการวางแผนเส้นทางเพื่อให้หุ่นยนต์ ตัดสินใจควบคุมกำหนดท่าทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์จากจุดเริ่มต้นที่กำหนดไปยังจุดหมายปลายทาง จุดประสงค์หลักของการวางแผนเส้นทางคือเพื่อนำทางหุ่นยนต์ไปสู่เป้าหมายโดยการตำแหน่งปัจจุบันของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ที่สัมพันธ์กับตำแหน่งปลายทาง ตำแหน่งปัจจุบันของหุ่นยนต์เคลื่อนที่โดยจะมีขั้นตอนการเขียนโปรแกรมควบคุมหุ่นยนต์เคลื่อนที่[14] ตำแหน่งของหุ่นยนต์เคลื่อนที่และตำแหน่งปลายทางโดยใช้พารามิเตอร์ดังนี้:

$$[(X_d - X_c), (Y_d - Y_c)] \leq \pm 100 \quad (1)$$

โดยที่

X_d = ตำแหน่งปลายทางที่กำหนด ตำแหน่ง X

X_c = ตำแหน่งขณะหุ่นยนต์วิ่งได้จริงตำแหน่ง X

Y_d = ตำแหน่งปลายทางที่กำหนด ตำแหน่ง Y

Y_c = ตำแหน่งขณะหุ่นยนต์วิ่งได้จริงตำแหน่ง Y

2.4.3 ระบบนำทางหุ่นยนต์

หุ่นยนต์จะสามารถเคลื่อนที่ไปยังจุดหมายได้ถ้าหุ่นยนต์สามารถระบุตำแหน่งของตนเอง รู้สภาพแวดล้อมโดยรอบ และระยะจุดหมายปลายทางที่กำหนด ดังนั้นการทำงานของระบบนำทางจำเป็นต้องทราบตำแหน่งในขณะหุ่นยนต์เคลื่อนที่ (X_c , Y_c) ตลอดเส้นทางเดินตำแหน่งปัจจุบัน และตำแหน่งจุดหมายปลายทางของ

หุ่นยนต์ (Xd, Yd) ที่ผู้ใช้งานต้องการให้หุ่นยนต์ไปถึงเป้าหมาย เพื่อสร้างแผนที่ในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์หลักการออกแบบการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ใช้สำหรับนำทางเส้นทางหุ่นยนต์ โดยประกอบด้วย 6 ข้อ ดังนี้

1) หุ่นยนต์เคลื่อนที่ตรงไปด้านหน้าในทิศทางแกน X เมื่อเป้าหมายและหุ่นยนต์เคลื่อนที่ ($X_d - X_c$) มีค่าเป็นบวก

2) หุ่นยนต์เคลื่อนที่ตรงไปด้านหลังในทิศทางแกน -X เมื่อเป้าหมายและหุ่นยนต์เคลื่อนที่ ($X_d - X_c$) มีค่าเป็นลบ

3) หุ่นยนต์เคลื่อนที่ในแนวแกน X จนกระทั่งระยะห่างระหว่างตำแหน่งของหุ่นยนต์เคลื่อนที่และตำแหน่งเป้าหมายน้อยกว่าหรือเท่ากับ ± 100 พิกเซล จากนั้นหุ่นยนต์จะหยุดการเคลื่อนที่ เพื่อเปลี่ยนทิศทาง

4) หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปทางด้านขวาเมื่อผลของระยะทางในทิศทางแกน Y ระหว่างเป้าหมายและหุ่นยนต์เคลื่อนที่ ($Y_d - Y_c$) มีค่าเป็นบวก

5) หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปทางด้านซ้ายเมื่อผลของระยะทางในทิศทางแกน -Y ระหว่างเป้าหมายและหุ่นยนต์เคลื่อนที่ ($Y_d - Y_c$) มีค่าเป็นลบ

6) หุ่นยนต์จะเคลื่อนที่ไปในแนวแกน Y จนกระทั่งระยะห่างระหว่างตำแหน่งของหุ่นยนต์เคลื่อนที่และตำแหน่งเป้าหมายน้อยกว่าหรือเท่ากับ ± 100 พิกเซล หลังจากนั้นหุ่นยนต์จะหยุดการเคลื่อนที่

หมายเหตุ: ถ้าหุ่นยนต์เจอสิ่งกีดขวางหุ่นยนต์จะทำการหลบสิ่งกีดขวางโดยเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ดังนี้

1) หุ่นยนต์จะเคลื่อนที่จากด้านหน้าเป็นด้านขวาเมื่อ ($Y_m - Y_c$) มีค่าเป็นบวก

2) หุ่นยนต์จะทำการเคลื่อนที่เปลี่ยนทิศจากด้านหน้าเป็นไปด้านซ้าย เมื่อ ($Y_m - Y_c$) มีค่าเป็นลบ

Y_m = ตำแหน่งค่า Y ที่กลางเฟรมกล้อง

เมื่อตรวจไม่พบสิ่งกีดขวางหุ่นยนต์จะเคลื่อนที่เปลี่ยนทิศไปด้านหน้าจนกว่าจะถึงจุดที่กำหนด

2.4.4 เอาท์พุต

การค้นหาเส้นทางให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่เดินทางจนถึงเป้าหมายอย่างปลอดภัยเป็นข้อกำหนดเบื้องต้นของการควบคุมหุ่นยนต์เคลื่อนที่อัตโนมัติการบังคับท่าทางเพื่อให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้อย่างถูกต้องมีความสัมพันธ์โดยตรงที่ทำให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปยังเป้าหมายที่ต้องการได้

ตารางที่ 1 การควบคุมทิศทางของหุ่นยนต์เคลื่อนที่

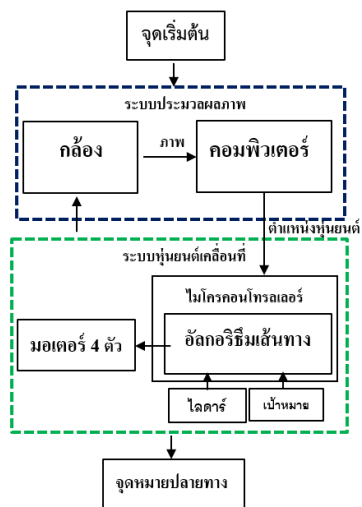
การทำงาน	มอเตอร์			
	หน้า	หลัง	ซ้าย	ขวา
เดินหน้า	Low	Low	High (CW)	High (CW)
ถอยหลัง	Low	Low	High (CCW)	High (CCW)
เดินซ้าย	High (CW)	High (CW)	Low	Low
เดินขวา	High (CCW)	High (CCW)	Low	Low
หยุด	Low	Low	Low	Low

จากตารางที่ 1 การควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เป็นฟังก์ชัน บังคับท่าทางการเคลื่อนที่ในรูปแบบต่างๆ โดยจะควบคุมการหมุนของมอเตอร์ 4 ตัว ที่ติดอยู่กับล้อ เพื่อให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปยังเป้าหมายได้ การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ประกอบด้วย 5 ฟังก์ชัน โดย High จะแสดงสถานะที่มอเตอร์ทำงาน Low คือมอเตอร์ไม่หมุน CW คือมอเตอร์หมุนตามเข็มนาฬิกา และ CCW มอเตอร์หมุนทวนเข็มนาฬิกา การทำงานได้แก่ เคลื่อนที่ไปด้านหน้า ถอยหลัง ด้านซ้าย และขวา และหยุด โดยจะมีการออกแบบควบคุมการหมุนของล้อ 4 ล้อ โดยเคลื่อนที่ด้วยความเร็วประมาณ 30 เซนติเมตรต่อวินาที

2.4.5 การทำงานระหว่างระบบการประมวลผลภาพและระบบหุ่นยนต์

การทำงานระหว่างระบบการประมวลผลภาพ และระบบหุ่นยนต์เคลื่อนที่จะสื่อสารผ่านระบบสัญญาณWi-Fi

แบบไร้สาย โดยมีการสื่อสารระหว่าง คอมพิวเตอร์ในระบบประมวลผลภาพ และบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ใช้เป็นหน่วยประมวลผลสำหรับหุ่นยนต์เคลื่อนที่ โดยมีหลักการทำงานดังนี้ 1. หุ่นยนต์จะสามารถเคลื่อนที่อัตโนมัติอยู่ภายในพื้นที่ที่กล้องสามารถมองเห็น 2. กล้องทำหน้าที่ถ่ายภาพส่งไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อให้คอมพิวเตอร์ทำการประมวลผลภาพและระบุตำแหน่งหุ่นยนต์เคลื่อนที่ 2 มิติ (X, Y) หลังจากคอมพิวเตอร์ทำการประมวลผลภาพเพื่อระบุตำแหน่งของหุ่นยนต์ 3. ข้อมูลจะถูกส่งให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ผ่านสัญญาณแบบไร้สาย เพื่อเป็นสัญญาณอินพุตของการออกแบบเส้นทางเดินของหุ่นยนต์ให้สามารถเคลื่อนที่ตามระบบเดินทางโดยควบคุมมอเตอร์ให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ตามอัลกอริทึมที่ผู้ใช้งานออกแบบ ในระหว่างการเดินทางของหุ่นยนต์ระบบประมวลผลภาพจะทำการประมวลผลตำแหน่งหุ่นยนต์อย่างต่อเนื่อง ทำให้ทราบพิกัดการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ตลอดเวลา และเมื่อหุ่นยนต์ตรวจพบสิ่งกีดขวางบริเวณด้านหน้า หุ่นยนต์จะทำการเคลื่อนที่หลบหลีกสิ่งกีดขวาง และเดินทางต่อไปจนกระทั่งหุ่นยนต์เคลื่อนที่ถึงเป้าหมายที่กำหนด

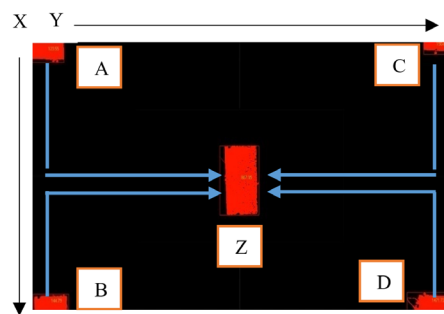


รูปที่ 5 ระบบการทำงาน

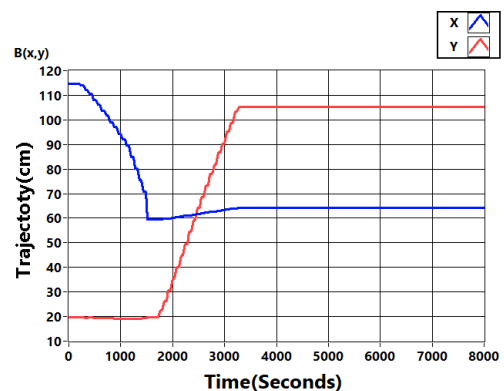
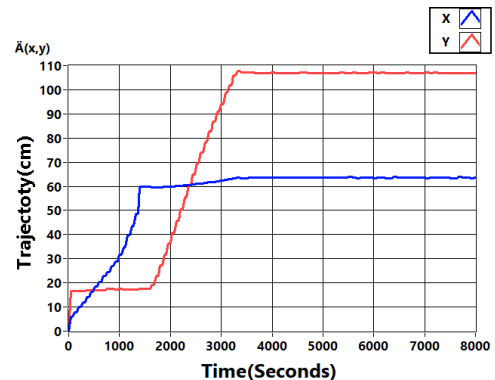
3. ผลการทดลอง

การทดสอบโดยเริ่มจากการระบบประมวลผลภาพ กำหนดจุดเริ่มต้นที่แตกต่างกัน 4 จุด คือ A(6, 17),

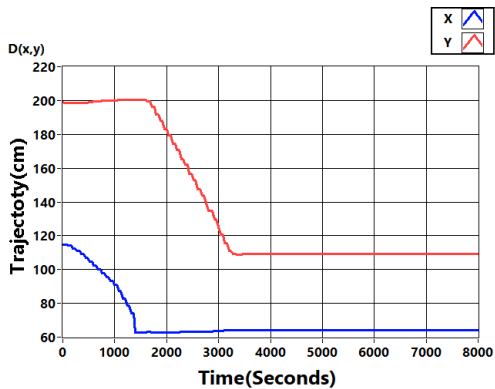
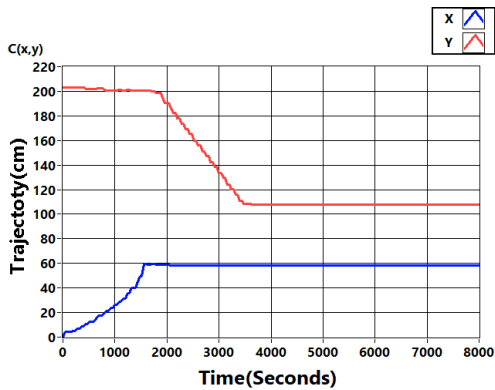
B(115, 20), C(4, 203), D(115, 199) โดยมีเป้าหมายให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปยังบริเวณกึ่งกลาง Z(60,108) รูปที่ 6 จากการทดสอบ เมื่อนำหุ่นยนต์ไปวางไว้ตำแหน่งหัวมุม ทั้ง 4 ด้าน ระบบประมวลผลภาพสามารถระบุตำแหน่งของหุ่นยนต์ตลอดเส้นทางเดินและส่งไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อบังคับให้หุ่นยนต์วิ่งไปยังจุดหมายที่กำหนดได้ ผลการทดสอบการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เมื่อให้จุดเริ่มต้นที่แตกต่างกัน แต่หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ถึงจุดหมายที่กำหนดได้แสดงดังรูปที่ 7



รูปที่ 6 ตำแหน่งการเคลื่อนที่รูปแบบที่ 1



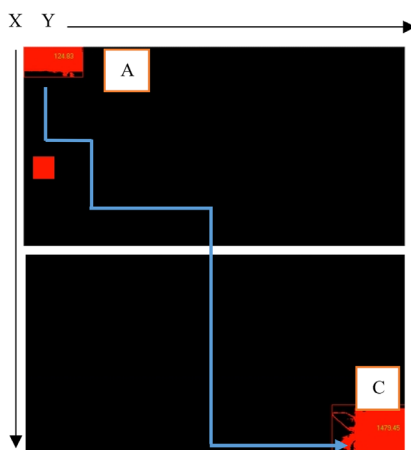
รูปที่ 7 วิธีการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์การทดลองที่ 1



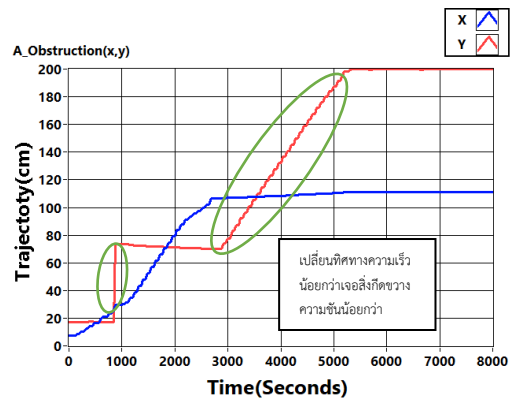
รูปที่ 7 วิธีการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์การทดลองที่ 1 (ต่อ)

3.2. การทดสอบที่ 2 การหลบหลีกสิ่งกีดขวาง

ทดสอบหุ่นยนต์เคลื่อนที่ทำการหลบหลีกสิ่งกีดขวางกำหนด จุดที่ 1 จุดเริ่มต้นตำแหน่ง A(8, 117) และจุดหมาย C(108, 203) ดังรูปที่ 8



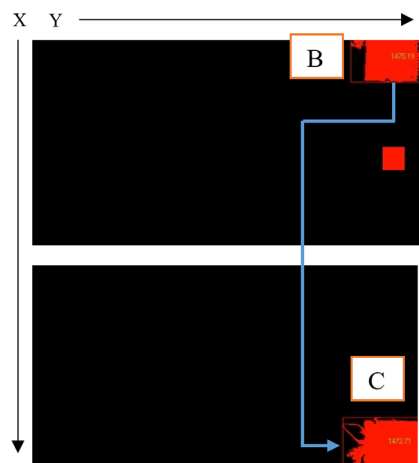
รูปที่ 8 ตำแหน่งการหลบหลีกรูปแบบที่ 1



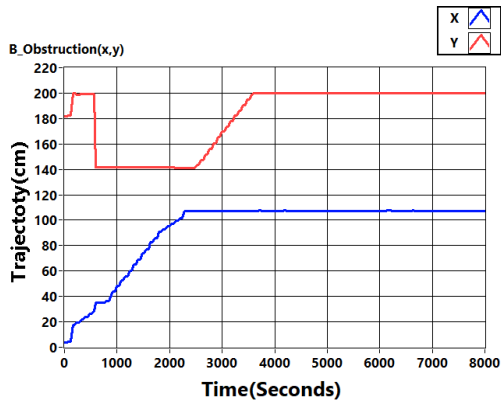
รูปที่ 9 การเคลื่อนที่หลบหลีกรูปแบบที่ 1

การทดสอบครั้งที่ 1 หุ่นยนต์ทำการเคลื่อนที่ตรงไปด้านหน้าเมื่อหุ่นยนต์ตรวจพบสิ่งกีดขวางอยู่บริเวณทางเดิน จากรูปที่ 9 ช่วงเวลาประมาณ 1-3 วินาที หุ่นยนต์สามารถหลบหลีกสิ่งกีดขวาง 20x20x20 เซนติเมตร มาทดสอบ กราฟค่า Y จะมีการเปลี่ยนค่าเพิ่มขึ้นจากเดิม เนื่องจากหุ่นยนต์เปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่จากการเคลื่อนที่ไปด้านหน้าเปลี่ยนทิศเป็นด้านซ้ายมือ เมื่อค่า X อยู่ในตำแหน่งที่กำหนด หุ่นยนต์จะเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ตามเงื่อนไขโปรแกรมการออกแบบ อัลกอริทึม

จุดที่ 2 จุดเริ่มต้นตำแหน่ง B(12, 200) และจุดหมายตำแหน่ง C(108, 203) ดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 ตำแหน่งการหลบหลีกรูปแบบที่ 2

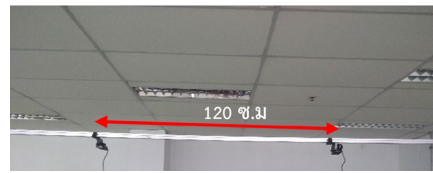


รูปที่ 11 การเคลื่อนที่หลบหลีกรูปแบบที่ 2

การทดสอบครั้งที่ 2 หุ่นยนต์ทำการเคลื่อนที่ตรงไปด้านหน้าเมื่อหุ่นยนต์ตรวจพบสิ่งกีดขวางอยู่บริเวณทางเดิน จากรูปที่ 11 ช่วงเวลาประมาณ 500 -2500 มิลลิวินาที หุ่นยนต์สามารถหลบหลีกสิ่งกีดขวาง กราฟ X จะมีการเปลี่ยนแปลงค่าลดลงจากเดิมเนื่องจากหุ่นยนต์เปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่จากการเคลื่อนที่ไปด้านหน้าเปลี่ยนทิศเป็นด้านขวามือ(ค่าลดลง) เมื่อค่า X อยู่ในตำแหน่งที่กำหนด หุ่นยนต์จะเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ตามเงื่อนไขโปรแกรมการออกแบบ เมื่อสังเกตกราฟค่า Y โดยหุ่นยนต์จะเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ไปด้านซ้าย(ค่าเพิ่มขึ้น) ช่วงเวลาประมาณ 2500 -3500 มิลลิวินาที เพื่อเคลื่อนตัวไปยังจุดหมายที่กำหนดตามการออกแบบระบบได้อย่างปลอดภัย

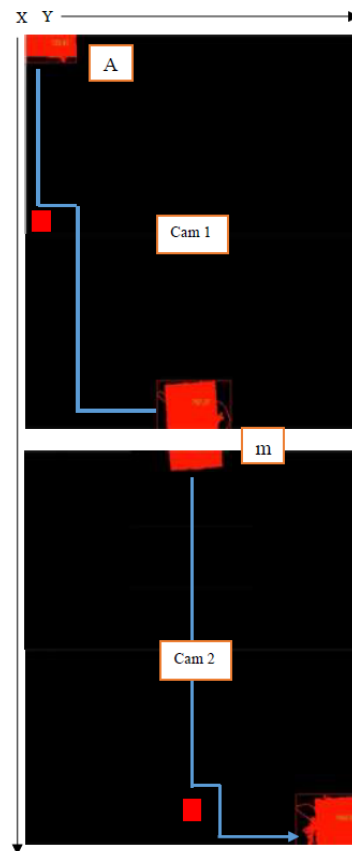
3.3 การขยายพื้นที่การเคลื่อนที่

เป็นการเพิ่มพื้นที่ของระบบการมองเห็นโดยเพิ่มจำนวนกล้องเป็น 2 ตัว อาณาเขตพื้นที่ในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์จะขึ้นอยู่กับ ระดับความสูงและความละเอียดของกล้อง โดยหุ่นยนต์จะสามารถเคลื่อนที่ภายในพื้นที่ที่กล้องถ่ายรูปได้ ซึ่งพื้นที่ในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์อาจไม่ครอบคลุมพื้นที่ทั้งหมดที่ต้องการ ดังนั้นการเพิ่มจำนวนกล้องจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถเพิ่มพื้นที่และทำให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ในพื้นที่ที่กว้างมากขึ้น

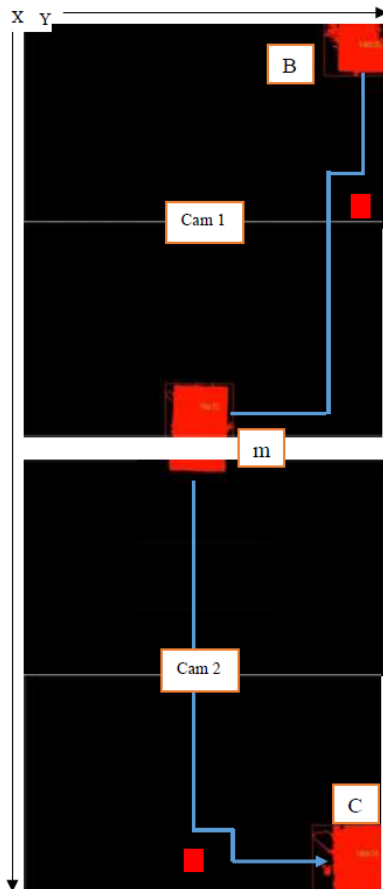


รูปที่ 12 ระยะห่างระหว่างกล้อง

กำหนดให้จุดเริ่มต้นเป็นจุดจากกล้องที่ 1 และจุดหมายปลายทางเป็นจุดจากกล้องที่ 2 ระหว่างทางเดินที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไป จะพบสิ่งกีดขวางขนาด 20x20x20 เซนติเมตร ในพื้นที่ กล้องตัวที่ 1 และกล้องตัวที่ 2 โดยกำหนดให้การทดลองที่ 1 จุดเริ่มต้นที่ 1 ตำแหน่ง (7, 16) (กล้องตัวที่ 1) และจุดหมาย (108, 203) (กล้องตัวที่ 2) โดยกล้องตัวที่ 1 และและกล้องตัวที่ 2 ภาพที่ได้จะมีช่องว่างห่างกันบริเวณรอยต่อ ดังรูปที่ 13



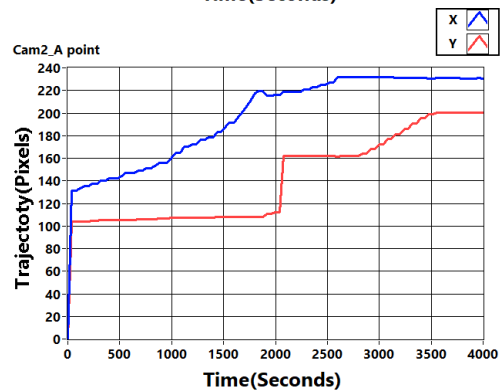
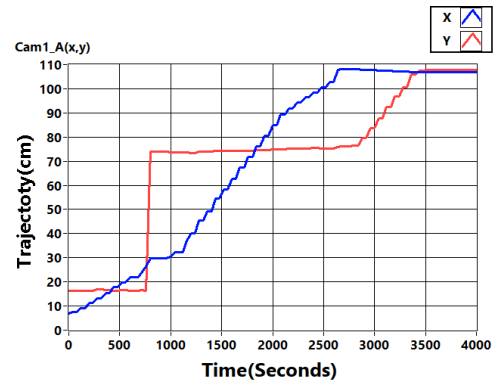
รูปที่ 13 การเคลื่อนที่กล้อง 2 ตัว รูปแบบที่ 1



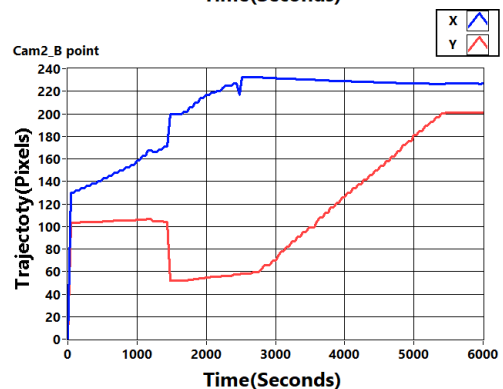
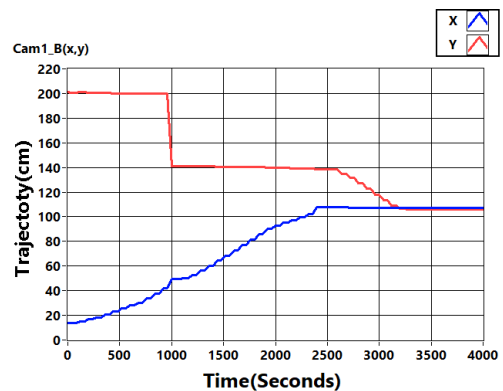
รูปที่ 14 การเคลื่อนที่กล้อง 2 ตัว รูปแบบที่ 2

การทดลองที่ 2 เปลี่ยนจุดเริ่มต้นในการเคลื่อนที่ แต่กำหนดจุดปลายทางไว้ตำแหน่งเดิม โดยระหว่างการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เคลื่อนที่จะพบสิ่งกีดขวาง 20x20x20 เซนติเมตร ในพื้นที่กล้องตัวที่ 1 และกล้องตัวที่ 2 โดยกำหนดให้การทดลองที่ 2 จุดเริ่มต้นที่ 1 ตำแหน่ง (14, 201) (กล้องตัวที่ 1) และจุดหมาย (108, 203) (กล้องตัวที่ 2) ดังรูปที่ 14

จากผลการทดลองดังรูปที่ 13 หุ่นยนต์เคลื่อนที่จากจุดเริ่มต้นเมื่อหุ่นยนต์ตรวจพบสิ่งกีดขวางหุ่นยนต์จะทำการเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ กราฟค่า Y จะมีค่าสูงขึ้น ในเวลาประมาณ 750 มิลลิวินาที หลังจากนั้นหุ่นยนต์จะทำการเดินหน้าต่อไป เมื่อได้ระยะทางในแนวแกน x ที่กำหนดหุ่นยนต์จะเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ ในเวลาประมาณ 3000 มิลลิวินาที กราฟ



รูปที่ 15 วิธีการเคลื่อนที่กล้อง 2 ตัว รูปแบบที่ 1



รูปที่ 16 วิธีการเคลื่อนที่กล้อง 2 ตัว รูปแบบที่ 2

ค่า Y จะมีค่าเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 15 ก) จนถึงค่าที่จุด m ซึ่งเป็นรอยต่อระหว่างกล่องตัวที่ 1 และกล่องตัวที่ 2 จากรูปที่ 15 ข) เป็นการแสดงการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ที่ได้จากกล่องตัวที่ 2 เมื่อหุ่นยนต์เจอสิ่งกีดขวางที่เวลาประมาณ 2000 วินาที หุ่นยนต์จะเคลื่อนที่หลบสิ่งกีดขวางเปลี่ยนทิศการเคลื่อนที่เป็นซ้าย หลังจากนั้น หุ่นยนต์จะทำการเดินหน้าต่อไป เมื่อได้ระยะทางในแนวแกน x ที่กำหนดหุ่นยนต์จะเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ ในช่วงเวลาประมาณ 2750 มิลลิวินาที กราฟค่า Y จะมีค่าเพิ่มขึ้น จนกระทั่งหุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปยังเป้าหมายอย่างปลอดภัย และเมื่อเปลี่ยนตำแหน่งจุดเริ่มต้นจากผลการทดลองดังรูปที่ 14 หุ่นยนต์เคลื่อนที่จากจุดเริ่มต้นเมื่อหุ่นยนต์ตรวจพบสิ่งกีดขวาง หุ่นยนต์จะทำการเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ กราฟค่า Y จะมีค่าลดลง ในช่วงเวลาประมาณ 1000 มิลลิวินาที หลังจากนั้นหุ่นยนต์จะทำการเดินหน้าต่อไป เมื่อได้ระยะทางในแนวแกน x ที่กำหนดหุ่นยนต์จะเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ ในช่วงเวลาประมาณ 2500 มิลลิวินาที กราฟค่า Y จะมีค่าลดลง ดังรูปที่ 16 ค) จนถึงค่าที่จุด m ซึ่งเป็นรอยต่อระหว่างกล่องตัวที่ 1 และกล่องตัวที่ 2 จากรูปที่ 16 ง) เป็นการแสดงการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ที่ได้จากกล่องตัวที่ 2 เมื่อหุ่นยนต์เจอสิ่งกีดขวางที่เวลาประมาณ 1500 มิลลิวินาที หุ่นยนต์จะเคลื่อนที่หลบสิ่งกีดขวางเปลี่ยนทิศการเคลื่อนที่เป็นซ้าย หลังจากนั้น หุ่นยนต์จะทำการเดินหน้าต่อไป เมื่อได้ระยะทางในแนวแกน x ที่กำหนดหุ่นยนต์จะเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ ในช่วงเวลาประมาณ 2750 มิลลิวินาที กราฟค่า Y จะมีค่าเพิ่มขึ้น จนกระทั่งหุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปยังเป้าหมายอย่างปลอดภัย จากผลการทดลองหุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่จากจุดเริ่มต้นกล่องตัวที่ 1 จับภาพไปยังจุดหมายปลายทางยังกล่องตัวที่ 2 ได้ เมื่อใช้กล่องเพิ่มขึ้นจะทำให้หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ได้ในบริเวณที่มีขนาดพื้นที่กว้างขึ้น โดยหุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่อัตโนมัติไปยังเป้าหมายที่กำหนด โดยสามารถกำหนด

จุดการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ภายในขอบเขตที่กล้องมองเห็นได้ นอกจากนี้เมื่อหุ่นยนต์ตรวจพบสิ่งกีดขวาง หุ่นยนต์ก็สามารถเคลื่อนที่หลบหลีกสิ่งกีดขวางและเดินไปยังเป้าหมายที่กำหนดได้อย่างปลอดภัย

จากการทดสอบทั้งหมดเมื่อนำมาเขียนเป็นตารางเพื่อดูระยะในการเคลื่อนที่ไปยังเป้าหมายที่กำหนด จะแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ตำแหน่งการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์

ทดลอง	จุด	เป้า (x, y)	X	Y
1	Start A	(61, 108)	64	107
	Start B		64	105
	Start C		58	108
	Start D		64	109
2	Obstruct A	(108,203)	111	200
	Obstruct B		107	200
3	2 Cam A	(230,203)	231	201
	2 Cam B		227	201

จากตารางที่ 2 การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เคลื่อนที่อยู่ในบริเวณที่กำหนด โดยมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 10 ซม. ตามกำหนด

4. อภิปรายผลและสรุป

จากการทดลองที่ให้จุดหมายปลายทางอยู่บริเวณกลาง โดยทำการเปลี่ยนจุดเริ่มต้นและการทดลองในการหลบหลีกสิ่งกีดขวางได้ทำการเปลี่ยนจุดหมายจากจุดกึ่งกลางให้มาอยู่บริเวณ ปลายมุมด้านซ้ายระบบสามารถเปลี่ยนจุดเริ่มต้น และจุดหมายปลายทาง หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่อัตโนมัติหลบหลีกสิ่งกีดขวางได้ ระบบสามารถระบุตำแหน่งของตนเอง และเมื่อพบเจอสิ่งกีดขวางบริเวณด้านหน้าหุ่นยนต์สามารถระบุตำแหน่งเคลื่อนที่เปลี่ยนทิศทางโดยไม่ต้องทำการเลี้ยวการสไลด์ไปด้านข้างเพื่อหลบหลีกสิ่งกีด

ขวางทำให้ไม่ต้องเสียเวลาในการเลี้ยว และทำให้กำหนดทิศทางการเคลื่อนที่ไม่เปลี่ยนแปลง ส่งผลให้การอัลกอริธึมของหุ่นยนต์ง่ายยิ่งขึ้น หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่โดยหุ่นยนต์จะเคลื่อนที่ไปในแนวตั้ง (X) ก่อนเมื่อได้ค่าตามที่กำหนดจึงเคลื่อนที่ไปในแนวนอน (Y) นอกจากนี้ระบบประมวลผลภาพสามารถระบุตำแหน่งหุ่นยนต์และเซนเซอร์สามารถระบุสิ่งกีดขวางที่อยู่บริเวณด้านหน้าของหุ่นยนต์เพื่อส่งสัญญาณไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อให้หุ่นยนต์หลบหลีกสิ่งกีดขวางและเดินทางไปถึงเป้าหมายได้อย่างปลอดภัย ถึงแม้ย้ายตำแหน่งจุดเริ่มต้น หรือเปลี่ยนตำแหน่งเป้าหมายในการเคลื่อนที่หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ไปยังเป้าหมายได้อย่างปลอดภัย ระยะความสูงของกล้องจะส่งผลต่อความละเอียดตำแหน่ง ถ้าติดตั้งบริเวณที่สูงขึ้นหุ่นยนต์จะมีบริเวณการเคลื่อนที่ที่มากขึ้นแต่ความละเอียดในการกำหนดพิกัดของหุ่นยนต์จะลดลง ในอนาคตจะศึกษาในการทดสอบสิ่งกีดขวางที่สามารถเคลื่อนที่ได้ และพัฒนาอัลกอริธึมให้หุ่นยนต์สามารถหาหนทางที่สั้นที่สุดในการเคลื่อนที่ และใช้ระบบการเรียนรู้การสอนให้ระบบคอมพิวเตอร์ทำการเรียนรู้ได้ด้วยตนเอง เข้ามาช่วยให้ระบบจดจำลักษณะของหุ่นยนต์เพื่อลดข้อจำกัดในเรื่องแสงที่ทำให้มีผลกับการระบุวัตถุของกล้อง และมีสิ่งกีดขวางมากกว่า 1 แบบ เพื่อพัฒนาระบบหุ่นยนต์เคลื่อนที่อัตโนมัติภายในอาคาร โดยสามารถส่งของจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งในสถานที่โรงพยาบาล ร้านอาหาร หรือภายในสำนักงาน และสามารถนำไปพัฒนาระบบหุ่นยนต์เคลื่อนที่ที่สามารถระบุตำแหน่งโดยใช้ภาพจากกล้องเว็บแคมแทนการสร้างแผนที่จำลองได้

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ สถาบันวิจัยและพัฒนามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ที่ให้การสนับสนุนทุนการวิจัย เครื่องมือและอุปกรณ์ต่าง ๆ

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] A.A. Aldair, A.L. Mayyahi and A. Maze, "Maneuvering and Colored Object Tracking for Differential Drive Mobile Robot," *Iraqi Journal for Electrical & Electronic Engineering*, vol. 15, no. 1, pp. 47-52, 2019.
- [2] J. Ping, C. Liang, G. Hang, Y. Min and X. Jian, "Novel indoor positioning algorithm based on Lidar/inertial measurement unit integrated system," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 18, no. 2, pp. 1-11, 2021.
- [3] M. Rivaï, D. Hutabarat and Z. M. Jauhar Nafis, "2D mapping using omni-directional mobile robot equipped with LiDAR," *Telkomnika*, vol. 18, no. 3, pp. 1467-1474, 2020.
- [4] L. Juncheng, R. Maopeng, W. Han and X. Lihua, "A Behavior-Based Mobile Robot Navigation Method with Deep Reinforcement Learning," *Unmanned Systems*, vol. 9, no. 3, pp. 201-209, 2021.
- [5] C. Wei, S. Jian, L. Weishuo and Z. Dapeng, "A real-time multi-constraints obstacle avoidance method using LiDAR," *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, vol. 39, no. 1, pp. 119-131, 2020.
- [6] S.A. Li, H.M. Feng, K.H. Chen and W.H. Huang, "Highly Autonomous Visualization Map-Generation Mobile Robot System Design Through the Robot Operating System Platform," *Journal of Imaging Science & Technology*, vol. 62, no. 3, pp. 1-9, 2020.

- [7] X. Yuan, L. Tongqian, S. Bin, Z. Yong, K. Siamak and S. Mingxu, "Indoor Vision/INS Integrated Mobile Robot Navigation Using Multimodel-Based Multifrequency Kalman Filter," *Mathematical Problems in Engineering*, pp. 1-8, 2021.
- [8] C. Peñaranda, J. Palanca, V. Julian and V. Botti, "A flexible and dynamic mobile robot localization approach," *Logic Journal of the IGPL*, vol. 28, no. 2, pp. 197-210, 2020.
- [9] C. Pang, X. Zhong, H. Hu, J. Tian, X. Peng and J. Zeng, "Adaptive Obstacle Detection for Mobile Robots in Urban Environments Using Downward-Looking 2D LiDAR," *Sensors*, vol. 18, no. 6, 2018.
- [10] C. Boris, "Use of Artificial Neural Networks for Fusion of Infrared and Vision Sensors in a Mobile Robot Navigation System," *Annals of DAAAM & Proceedings*, vol. 7, no. 1, pp. 80-87, 2020.
- [11] X. Li, S. Du, G. Li and H. Li, "Integrate Point-Cloud Segmentation with 3D LiDAR Scan-Matching for Mobile Robot Localization and Mapping," *Sensors*, vol. 20, no. 1, pp. 237-261, 2019.
- [12] K. Misu, and J. Miura, "Specific person tracking using 3D LIDAR and ESPAR antenna for mobile service robots," *Advanced Robotics*, vol. 29, no. 22, pp. 1483-1495, 2015.
- [13] B. Ali, Y. Ayaz, M. Jamil, S.O. Gilani and N Muhammad, "Improved method for stereo vision-based human detection for a mobile robot following a target person," *South African Journal of Industrial Engineering*, vol. 26, no. 1, pp. 102-119, 2015.
- [14] N. Singhata, "Autonomous Mobile Robot Using Vision System and ESP8266 NodeMCU Board," *Current Applied Science and Technology*, vol. 21, no. 3, pp. 467-480, 2021.

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

กำลังอัดและการดูดซึมน้ำจีโอพอลิเมอร์จากเถาปาล์มน้ำมันผสม ผงอะลูมินา

อาปีเต็ง ฮาวา^{1*} ปรีชา สะแลแม¹ และ วรพจน์ ประชาเสรี²

¹ สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์

² ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

¹ ตำบลโคกเคียน อำเภอเมือง จังหวัดนราธิวาส 96000

² ตำบลคอหงส์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90112

รับบทความ 13 สิงหาคม 2564 แก้ไขบทความ 10 เมษายน 2565 ตอรับบทความ 28 มิถุนายน 2565

บทคัดย่อ

ในการศึกษาครั้งนี้เป็นการศึกษากำลังอัดจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถาปาล์มน้ำมัน ซึ่งจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ถูกเตรียมจากเถาปาล์มน้ำมันและผงอะลูมินา ใช้สารอัลคาไลน์จากโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์ จีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมระหว่างเถาปาล์มน้ำมันและผงอะลูมินาในอัตราส่วน 100:0, 95:5, 90:10 และ 85:15 โดยน้ำหนัก และมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนวัสดุประสาน (เถาปาล์มน้ำมัน+ผงอะลูมินา) ต่อสารอัลคาไลน์ และอัตราส่วนวัสดุประสานต่อมวลรวมละเอียด ก่อนตัวอย่างใช้การบ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และบ่มต่อที่อุณหภูมิห้อง 1, 7 และ 28 วัน เพื่อทดสอบกำลังอัด ซึ่งผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่ากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถาปาล์มน้ำมันมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ผงอะลูมินาเข้ามาทดแทน ค่ากำลังอัดที่เด่นชัดในการศึกษาครั้งนี้เป็นจีโอพอลิเมอร์ที่ผสมผงอะลูมินาร้อยละ 10 ใช้มวลรวม 3.00 และสารอัลคาไลน์ 1.44 สามารถให้กำลังอัดที่ดีที่สุดและยังสามารถให้ความหนาแน่นน้อยที่สุด

คำสำคัญ : เถาปาล์มน้ำมัน; จีโอพอลิเมอร์; ผงอะลูมินา; วัสดุประสาน; อุณหภูมิห้อง

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

Compressive Strength and Water Absorption of Geopolymer from Palm Oil Fuel Ash Containing Alumina Powder

Abideng Hawa^{1*} Preecha Salaemae¹ and Woraphot Prachasaree²

¹ Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Princess of Naradhiwas University

² Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University

¹ Khok Kian, Amphur Muang, Narathiwat 96000

² Khohong, Hat Yai, Songkhla 90112

Received 13 August 2021; Revised 10 April 2022; Accepted 28 June 2022

Abstract

In this study, the compressive strength of palm oil fuel ash (POFA) based geopolymer mortars was studied. The geopolymer mortars were prepared using mixtures of POFA and alumina powder (AP). The alkaline activator was prepared from sodium silicate (Na_2SiO_3) and sodium hydroxide (NaOH). The geopolymer mortar mixtures were prepared with POFA to AP ratios 100:0, 95:5, 90:10, and 85:15 by weight, and varied different binder (POFA+AP) to the alkaline activator and binder to fine aggregate. The samples were cured at a temperature of 80°C for 24 hours, and compressive strength test were conducted at ambient temperature at 1, 7, and 28 days. The test results showed that the compressive strength of POFA based geopolymer mortar improved significantly when the source materials was substituted with AP. The evidence of compressive strength in this study that the geopolymer with 10% AP, 3.00 of fine aggregate, and 1.44 of alkaline activator gave the highest compressive strength, and the lowest bulk density.

Keywords : Palm oil Fuel Ash; Geopolymer; Alumina Powder; Binder; Ambient Temperature

1. บทนำ

ในประเทศไทยมีวัสดุเหลือทิ้งที่สามารถนำมาใช้เป็นส่วนผสมของคอนกรีต โดยที่ทำให้คอนกรีตมีสมบัติบางอย่างดีขึ้น เช่น กำลังอัด ความทนน้ำ วัสดุที่ได้รับความนิยมนำมาอย่างเถ้าลอย เถ้าแกลบ เนื่องจากมีองค์ประกอบทางเคมีที่เหมาะสมและมีปริมาณมาก อย่างไรก็ตามประเทศไทยนั้นยังมีวัสดุเหลือทิ้งอีกมากมายหลายชนิดเนื่องจากเป็นประเทศอุตสาหกรรมเกษตรหลากหลายอย่างเช่น เถ้าปาล์ม น้ำมัน เถ้าขานอ้อย และปัจจุบันยังมีเถ้าไม้ยางพารา ซึ่งทั้งหมดเป็นของเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมเกษตรที่เป็นของเหลือทิ้งจากเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าชีวมวล ทำให้ได้เถ้าเหล่านั้น โดยเถ้าเหล่านั้นจัดอยู่ในวัสดุปอซโซลาน ยกเว้นเถ้าไม้ยางพาราเนื่องจากเป็นวัสดุที่มี CaO สูงจัดว่าเป็นคาบอร์แรต [1] วัสดุปอซโซลานจะทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกของการผลิตคอนกรีตปกติเนื่องจากซิลิกา SiO_2 และ/หรืออะลูมินา Al_2O_3 ซึ่งจะส่งผลให้คอนกรีตสามารถรับแรงได้มากขึ้น ยิ่งไปกว่านั้นวัสดุปอซโซลานยังสามารถใช้เป็นวัสดุในการผลิตซีโพลิเมอร์คอนกรีต จากการผสมด้วยสารอัลคาไลน์เข้ากับวัสดุปอซโซลาน

ด้วยจำนวนและปริมาณของวัสดุเหลือทิ้งที่มีอยู่อย่างมากมายในประเทศไทย ความสามารถในการนำมาใช้ประโยชน์โดยเฉพาะในงานก่อสร้างนับว่ามีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง เพื่อช่วยลดปริมาณที่ต้องเป็นขยะการผสมเข้าเป็นส่วนหนึ่งในปูนซีเมนต์มีข้อจำกัดของปริมาณที่ผสม เถ้าลอยสามารถผสมได้สูงสุดร้อยละ 20 [2] เถ้าแกลบร้อยละ 20 [2], [3] เถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 10 [4] หรือร้อยละ 20 เมื่อบดละเอียดในการผสมในคอนกรีตกำลังสูง [5] แต่ในกรณีของซีโพลิเมอร์สามารถใช้เถ้าอย่างเดียวโดยไม่ผสมปูนซีเมนต์ เช่น การผลิตซีโพลิเมอร์จากเถ้าลอย [6]-[8] ซึ่งไม่จำเป็นต้องผสมกับวัสดุอื่น อย่างไรก็ตามในการผลิตซีโพลิเมอร์ต้องใช้วัสดุปอซโซลานที่มีทั้ง SiO_2 และ Al_2O_3

ในสัดส่วนที่เหมาะสมถึงสามารถให้สมบัติได้ดี นอกจากเถ้าลอยแล้ว ยังสามารถใช้ดินขาวเผาในการผลิตซีโพลิเมอร์ด้วยการบดละเอียด เนื่องจากดินขาวเผามีทั้ง SiO_2 และ Al_2O_3 ในปริมาณสูง [9] Liu และคณะ [10] ศึกษาซีโพลิเมอร์เถ้าลอยผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน ซึ่งผลการทดสอบพบว่าซีโพลิเมอร์สามารถให้กำลังอัดได้ดี แต่เมื่อพิจารณาตัวอย่างที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันเพียงอย่างเดียว พบว่ากำลังอัด 8-10 เมกะพาสคัล ที่อายุ 28 วัน มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ใช้เถ้าลอยผสมกับเถ้าปาล์มน้ำมัน Olivia และคณะ [11] ศึกษาการผลิตซีโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าปาล์มน้ำมันปรับปรุงกำลังอัดด้วยปูนซีเมนต์ ซึ่งจากการทดสอบพบว่าต้องใช้ปูนซีเมนต์ร้อยละ 35 ถึงสามารถให้กำลังอัดได้ดี ในขณะที่ส่วนผสมที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันเพียงอย่างเดียวกำลังอัดที่ 28 วัน มีค่า 11.73 เมกะพาสคัล ทั้งที่เถ้าปาล์มน้ำมันที่ใช้มี Al_2O_3 อยู่ร้อยละ 15.90 ด้วยเหตุดังกล่าวนี้ การใช้เถ้าปาล์มน้ำมันเป็นวัสดุหลักในการผลิตซีโพลิเมอร์ครั้งนี้ มีความจำเป็นต้องปรับปรุงด้วยวัสดุอื่นเข้ามาช่วย ในที่นี้ใช้ผงอะลูมินาเข้ามาผสม เนื่องจากเถ้าปาล์มน้ำมันจาก อำเภอบาเจาะ จังหวัดนราธิวาส มี SiO_2 เป็นหลักในขณะที่ Al_2O_3 มีเพียงเล็กน้อย

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 วัสดุ

2.1.1 เถ้าปาล์มน้ำมัน

เถ้าปาล์มน้ำมัน (POFA) จากนิคมอุตสาหกรรมบาเจาะ จังหวัดนราธิวาส เป็นผลพลอยได้จากกากผลปาล์มน้ำมัน ได้แก่ เศษกะลา เส้นใย และทลายผลปาล์มเผาเป็นเชื้อเพลิงให้กับหม้อกำเนิดไอน้ำเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า มีอุณหภูมิในการเผาไหม้ประมาณ 800-900 องศาเซลเซียส นำเถ้าปาล์มน้ำมันที่ได้จากการบวนการข้างต้นมาแยกโดยการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 50 เพื่อนำไปบดละเอียดด้วยเครื่องลอสแอนเจลิส (Los Angeles Abrasion) เป็นเวลา 5 ชั่วโมง แล้วนำไป

วิเคราะห์ขนาดอนุภาคดังรูปที่ 1 และเมื่อนำไปวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพเชิงลึกด้วยการส่องขยายด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนกำลังขยายสูงดังรูปที่ 2 พบว่าลักษณะเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นเหลี่ยมและมีหลากหลายขนาดปะปนกันอยู่ ด้านองค์ประกอบทางเคมีนั้นเถ้าปาล์มน้ำมันมีซิลิกา (SiO_2) เป็นองค์ประกอบหลักร้อยละ 56.84 ในขณะที่อะลูมินา (Al_2O_3) และเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) มีปริมาณน้อยดังตารางที่ 1 เมื่อพิจารณาถึงความสามารถในการนำมาใช้เป็นวัสดุตั้งต้นผลิตจีโอพอลิเมอร์ ที่ต้องการทั้งซิลิกาและอะลูมินาพร้อมกัน อย่างไรก็ตามผลรวมของ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ เท่ากับร้อยละ 60.36 ซึ่งสามารถจัดอยู่ใน Class C ตามมาตรฐาน ASTM C618 [12]

2.1.2 ผงอะลูมินา

ผงอะลูมินาที่ใช้ในการทดสอบครั้งนี้เป็นอะลูมินาที่ขายในท้องตลาด ซึ่งมีการกระจายขนาดอนุภาคดังรูปที่ 3 เมื่อพิจารณาแล้วพบว่าขนาดอนุภาคมีขนาดเล็กกว่า 45 ไมครอนทั้งหมด ลักษณะทางกายภาพแสดงดังรูปที่ 4 ให้เห็นอย่างชัดเจนว่าการกระจายขนาดมีความสม่ำเสมอและมีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับภาพขยายของเถ้าปาล์มน้ำมันดังรูปที่ 2 และเป็นที่น่าสังเกตว่าอนุภาคของผงอะลูมินามีลักษณะทรงมนไม่เป็นเหลี่ยม ในขณะที่องค์ประกอบทางเคมีจะมีอะลูมินามากถึงร้อยละ

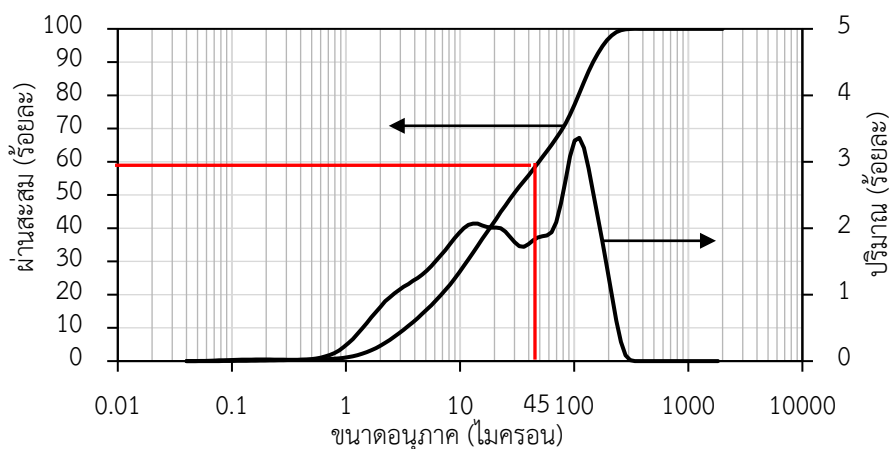
99.66 ดังตารางที่ 1 ด้วยเหตุนี้จึงนำมาใช้เป็นส่วนผสมกับเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีเพียงซิลิกา ซึ่งทำปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ได้หรือไม่

2.1.3 สารอัลคาไลน์

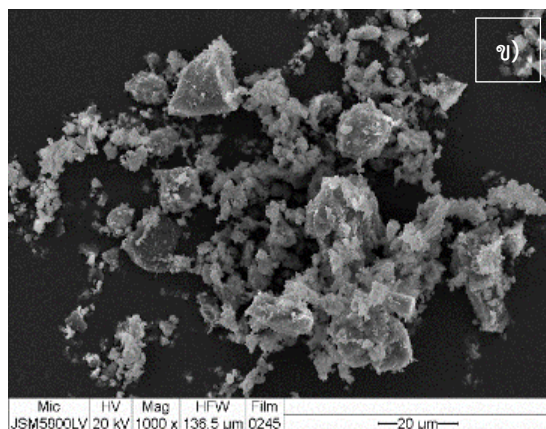
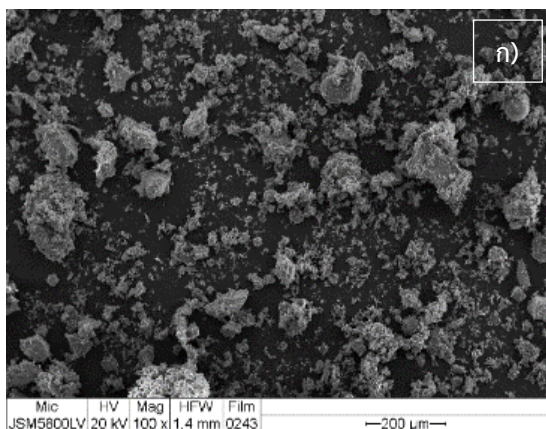
สารละลายอัลคาไลน์ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) แบบเกล็ดมีความบริสุทธิ์ร้อยละ 98 ผสมกับโซเดียมซิลิเกต และน้ำ โดยใช้อัตราส่วนผสมของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อโซเดียมซิลิเกต 1:2.5 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.1 เป็นอัตราส่วนผสมที่สามารถให้กำลังที่ดีและเนื้อจีโอพอลิเมอร์ไม่เหลวหรือเหนียวแห้งจนทำให้เทเข้าแบบหล่อได้ยาก [13] โดยที่โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) มีองค์ประกอบทางเคมีประกอบด้วยโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) ร้อยละ 14.85 ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ร้อยละ 29.45 และน้ำร้อยละ 55.70 โดยน้ำหนัก

2.1.4 มวลรวมละเอียด

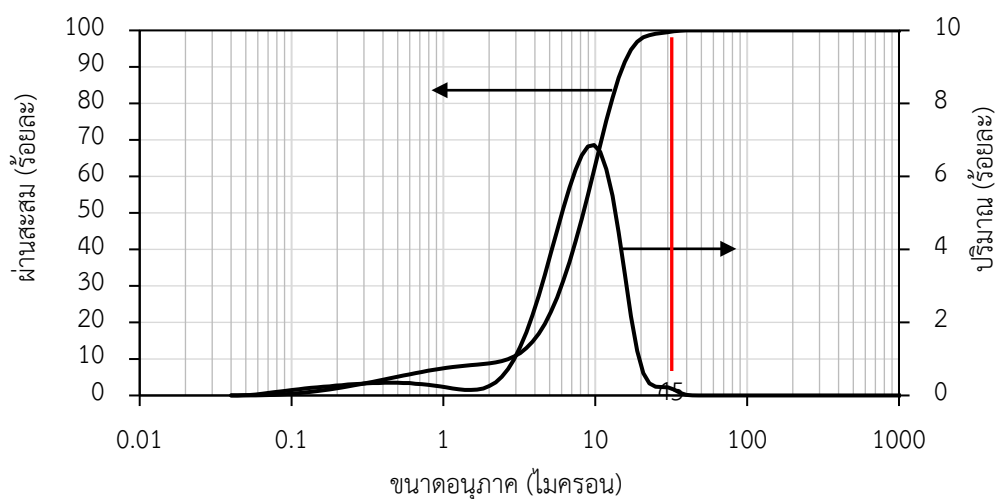
มวลรวมละเอียดที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้เป็นทรายแม่น้ำที่มีขนาดคละดังรูปที่ 5 โมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.59 อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C33/C33M [14] ค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.49 และการดูดซึมน้ำเท่ากับ 1.66 อ้างอิงการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C128 [15]



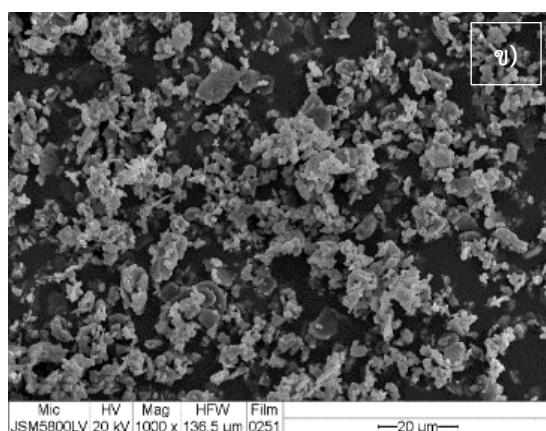
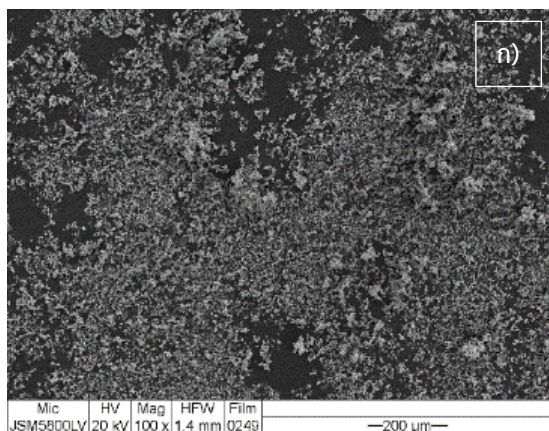
รูปที่ 1 การกระจายขนาดอนุภาคเถ้าปาล์มน้ำมัน



รูปที่ 2 รูปถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของอนุภาคเข้าปาล์มน้ำมัน ก) x100 ข) x1,000



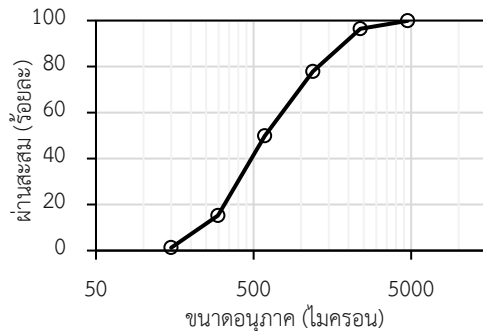
รูปที่ 3 การกระจายขนาดอนุภาคผงอะลูมินา



รูปที่ 4 ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของอนุภาคผงอะลูมินา ก) x100 ข) x1,000

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีเถ้าปาล์มน้ำมันและผงอะลูมินา

สารประกอบ	เถ้าปาล์มน้ำมัน (ร้อยละ)	ผงอะลูมินา (ร้อยละ)
MgO	6.54	-
Al ₂ O ₃	1.06	99.66
SiO ₂	56.84	0.11
Fe ₂ O ₃	2.46	-
P ₂ O ₅	6.96	-
SO ₃	1.92	-
K ₂ O	8.60	-
CaO	7.74	-
TiO ₃	-	0.10



รูปที่ 5 การกระจายขนาดอนุภาคทราย

2.2 อัตราส่วนผสมและการเตรียมตัวอย่าง

อัตราส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ดังตารางที่ 2 ในอัตราส่วนผสมของชุด A แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงวัสดุประสาน (เถ้าปาล์มน้ำมัน+ผงอะลูมินา) ต่อสารอัลคาไลน์ (โซเดียมซิลิเกต+โซเดียมไฮดรอกไซด์) เท่ากับ 0.96, 1.06, 1.20 และ 1.44 โดยน้ำหนัก ชุด B เปลี่ยนการใช้ทรายจาก 2.75 เป็น 3.00 และ 3.25 โดยน้ำหนัก ชุด C เป็นการใชผงอะลูมินาร้อยละ 10 และทราย 2.25, 2.50 2.75 และ 3.00 โดยน้ำหนัก และชุด D ใช้ผงอะลูมินาร้อยละ 15 และทราย 2.50, 2.75 และ 3.00 โดยน้ำหนัก ทุกอัตราส่วนผสมใช้ทรายสภาพแห้ง ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.1 โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นอัตราส่วนน้ำที่ทำให้เนื้อจีโอพอลิเมอร์ไม่เหลวหรือ

เหนียวแห้งจนทำให้เทเข้าแบบหล่อได้ยาก [13] ที่ก้อนตัวอย่างบ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส 24 ชม.

รูปที่ 6 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ เริ่มจากการผสมเถ้าปาล์มน้ำมันกับผงอะลูมินาให้เข้ากัน แล้วนำไปคลุกเคล้ากับทรายให้ทั่วถึงตั้งทิ้งไว้แล้วทำการผสมโซเดียมซิลิเกตกับโซเดียมไฮดรอกไซด์และน้ำโดยการคนให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกัน สังเกตจากโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้ละลายเป็นของเหลวทั้งหมด จากนั้นนำสารละลายไปผสมกับเถ้าปาล์มน้ำมัน ผงอะลูมินาและทรายที่เตรียมไว้ เมื่อส่วนผสมทั้งหมดเข้ากันเป็นเนื้อเดียวกันนำไปเทในแบบหล่อมอร์ตาร์ที่ทำจากอะคริลิกชุดละ 3 ก้อน กระทั่งตามมาตรฐาน ASTM C109/C109M [16] ท่อแบบหล่อด้วยฟิล์มพลาสติกก่อนนำเข้าตู้อบ บ่มร้อนตามระยะเวลาที่กล่าวมาข้างต้น

2.3 วิธีการทดสอบ

หลังจากบ่มร้อนก้อนตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์แล้วตัวอย่างจะถูกบ่มต่อที่อุณหภูมิห้องจนถึงอายุ 1, 7 และ 28 วัน เมื่อครบอายุบ่มนำไปทดสอบกำลังอัดตามมาตรฐาน ASTM C109/C109M [16] ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine

การทดสอบการดูดซึมน้ำใช้ตัวอย่างมอร์ตาร์ขนาด 5x5x5 ซม. ตัวอย่างที่อายุ 28 วัน เริ่มจากการนำตัวอย่างไปชั่งน้ำหนัก แล้วนำไปแช่น้ำ 1 ซม. จากนั้นยกก้อนตัวอย่างขึ้นมาเช็ดผิวให้แห้งแล้วนำไปชั่งน้ำหนัก แล้วนำตัวอย่างแช่น้ำต่ออีก 5 ซม. รวมเป็น 6 ซม. ทำต่อที่อายุ 12 และ 24 ซม. โดยรวมระยะเวลาแช่ก่อนหน้า แล้วนำค่าที่ได้มาคำนวณเปรียบเทียบกับการดูดซึมน้ำดังสมการ (1)

$$\frac{(W_f - W_i)}{W_i} \times 100 \quad (1)$$

โดย

W_i = น้ำหนักก่อนแช่น้ำ

W_f = น้ำหนักหลังแช่น้ำที่แต่ละอายุ

ตารางที่ 2 อัตราส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์

สัญลักษณ์	เถ้า ปาล์ม น้ำมัน (ร้อยละ)	ผงอะลูมินา (ร้อยละ)	วัสดุ ประสาน: ทราย	วัสดุ ประสาน/ สารอัล คาไลน์
CT	100	0	2.75	0.96
A1	95	5	2.75	0.96
A2	95	5	2.75	1.06
A3	95	5	2.75	1.20
A4	95	5	2.75	1.44
B1	95	5	3.00	1.44
B2	95	5	3.25	1.44
C1	90	10	2.75	1.20
C2	90	10	2.25	1.44
C3	90	10	2.50	1.44
C4	90	10	2.75	1.44
C5	90	10	3.00	1.44
D1	85	15	2.50	1.44
D2	85	15	2.75	1.44
D3	85	15	3.00	1.44



รูปที่ 6 การเตรียมตัวอย่าง

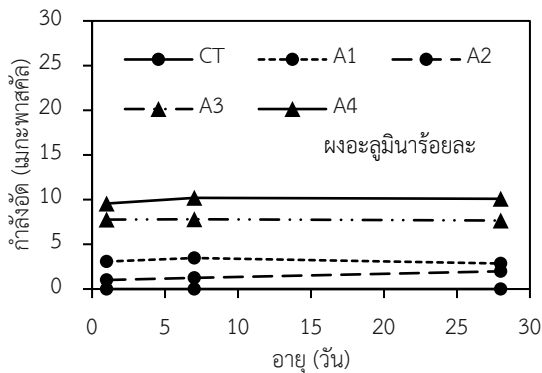
3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 กำลังอัด

3.1.1 อิทธิพลสารอัลคาไลน์

กำลังอัดตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันผสมผงอะลูมินาเป็นวัสดุประสาน ที่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนผสมวัสดุประสานต่อสารอัลคาไลน์เท่ากับ 0.96, 1.06, 1.20 และ 1.44 โดยน้ำหนัก ดังรูปที่ 7 ซึ่งใช้ผงอะลูมินาร้อยละ 5 แทนที่บางส่วนในเถ้าปาล์มน้ำมัน ส่วนตัวอย่าง CT ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันอย่างเดียว จากผลการทดสอบเป็นที่น่าสนใจว่าตัวอย่าง CT จีโอพอลิเมอร์ไม่มีการแข็งตัวถึงแม้จะผ่านการบ่มร้อน 24 ชม. แล้วก็ตาม เนื่องจากว่าเถ้าปาล์มน้ำมันที่ใช้มี SiO_2 เป็นองค์ประกอบหลักแต่มี Al_2O_3 ในปริมาณน้อยมาก (ตารางที่ 1) ในการผลิตจีโอพอลิเมอร์ต้องใช้วัสดุที่มีองค์ประกอบทางเคมีทั้ง SiO_2 และ Al_2O_3 ในอัตราส่วนที่เหมาะสมถึงสามารถทำปฏิกิริyajีโอพอลิเมอร์ไรเซชันได้ดี ดังเช่นจีโอพอลิเมอร์ที่เตรียมจากเถ้าลอยและดินขาวเผา เนื่องจากวัสดุทั้งสองมีทั้ง SiO_2 และ Al_2O_3 ในปริมาณมาก (อภิปรายเพิ่มเติมในหัวข้ออิทธิพลของอะลูมินา) ผลการทดสอบกำลังอัดดังรูปที่ 7 ที่แสดงถึงอิทธิพลของอัตราส่วนวัสดุประสานต่อสารอัลคาไลน์ จากผลการทดสอบพบว่าที่อัตราส่วน 1.44 (สารอัลคาไลน์ต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.69) สามารถให้กำลังอัดได้ดีที่สุด มีความเป็นไปได้ว่าการใช้สารอัลคาไลน์ในปริมาณมากทำให้จีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์มีความเหลวมากเกินไป ส่งผลให้ค่ากำลังอัดมีค่าน้อย เนื่องจากโซเดียมซิลิเกตที่ใช้เป็นแบบเหลวที่มีน้ำร้อยละ 55.70 ซึ่งการศึกษาของ สำเร็จ และคณะ [17] แสดงให้เห็นว่าการผลิตจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าปาล์มน้ำมัน โดยการใช้อัตราส่วนผสมของสารอัลคาไลน์ต่อเถ้าปาล์มน้ำมันเท่ากับ 0.65 โดยน้ำหนัก สามารถทำให้กำลังอัดจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์บางส่วนผสมมีค่าประมาณ 20 เมกะพาสคัล และเมื่อพิจารณาถึงระยะเวลาบ่มจนถึง 28 วัน พบว่ากำลังอัดที่ 28 วันมีค่าใกล้เคียงกับที่อายุ 1 วัน

แสดงให้เห็นว่าระยะเวลาบ่มในอากาศไม่มีผลกับกำลังอัด การบ่มอากาศต่อจากการบ่มร้อนในตู้อบไม่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาที่จะทำให้กำลังอัดเพิ่มขึ้นในทุกอัตราส่วนผสม ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นเป็นหลักในขณะที่ทำการบ่มร้อน



รูปที่ 7 กำลังอัดเมื่อเปลี่ยนแปลงสารอัลคาไลน์

3.1.2 อิทธิพลอัตราส่วนผสมมวลรวม

ซีโอพอลิเมอร์ที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณมวลรวม (ทราย) ดังรูปที่ 8 โดยรูปที่ 8 ก) มีการแทนที่ผงอะลูมินาร้อยละ 5 และรูปที่ 8 ข) อะลูมินาร้อยละ 10 ในการแทนที่ผงอะลูมินาร้อยละ 5 ที่ใช้ทราย 2.75, 3.00 และ 3.25 โดยน้ำหนัก พบว่าการใช้ผงอะลูมินาร้อยละ 5 ไม่ได้ส่งผลต่อกำลังอัดอย่างมีนัยสำคัญ ถึงแม้ว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณมวลรวม แต่ในขณะเดียวกันเมื่อเพิ่มปริมาณผงอะลูมินาเป็นร้อยละ 10 ผลการทดสอบกำลังอัดแสดงออกอย่างชัดเจนว่า อัตราส่วนผสมมวลรวม 3.00 ให้กำลังอัดได้ดีที่สุดในทุกอายุบ่มสูงถึงประมาณ 20 เมกะพาสคัล มีความเป็นไปได้ว่าการใช้อัตราส่วนผสมมวลรวม 3.00 มีความเหมาะสมต่อการเคลือบมวลรวม กล่าวคือ การที่เถ้าปาล์มน้ำมันมีความถ่วงจำเพาะประมาณ 2.2 จะมีปริมาตรมากเมื่อเทียบกับวัสดุที่มีความถ่วงจำเพาะสูง ที่น้ำหนักเท่ากัน ปริมาตรมากกว่าทำให้ต้องใช้ทรายมากขึ้นเพื่อให้เกิดการเคลือบมวลรวมมีความเหมาะสม พร้อมกันนั้นความเหมาะสมของปริมาณทรายส่งผลให้เกิดการอัดตัวของ

อนุภาคได้ดียิ่งขึ้นมีส่วนให้กำลังอัดซีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ดีขึ้น ในส่วนของระยะเวลาบ่มอากาศเป็นไปในลักษณะเดียวกันที่ระยะเวลาบ่มไม่มีผลต่อกำลังอัดก่อตัวอย่าง

3.1.3 อิทธิพลผงอะลูมินา

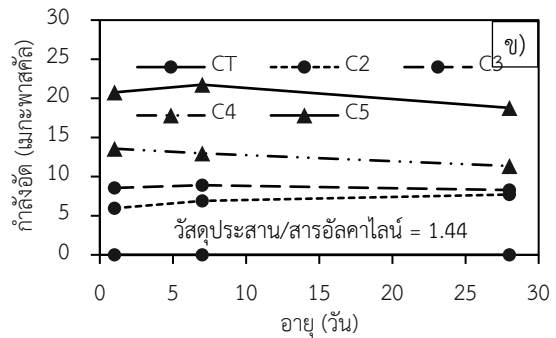
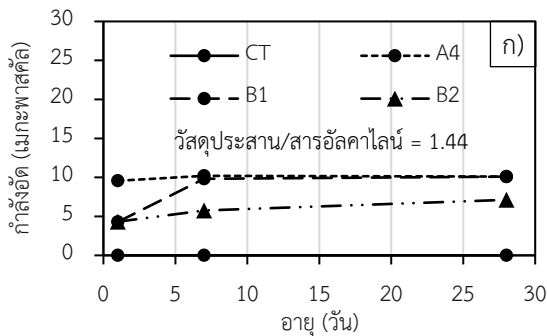
เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของผงอะลูมินาที่มีต่อกำลังอัดซีโอพอลิเมอร์ดังรูปที่ 9 ซึ่งเป็นการแทนที่บางส่วนในเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก พบว่าการใช้ผงอะลูมินาสามารถทำให้ตัวอย่างซีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์มีการแข็งตัวสามารถรับแรงกดได้พัฒนาจากก่อนตัวอย่างไม่สามารถรับแรงกดได้เลยเมื่อใช้เถ้าปาล์มน้ำมันอย่างเดียว แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าการเพิ่มผงอะลูมินาสามารถพัฒนากำลังอัดของซีโอพอลิเมอร์ที่เตรียมจากเถ้าปาล์ม โดยปกติทั่วไปการวิจัยส่วนใหญ่ที่ผ่านมาจะใช้เถ้าปาล์มน้ำมันเป็นเถ้าในการแทนที่ในเถ้าลอย [18], [19] และดินขาวเผา [20], [21] การแทนที่ผงอะลูมินาร้อยละ 5 ส่งผลให้ตัวอย่างสามารถรับแรงอัดได้ประมาณ 10 เมกะพาสคัล ทั้งอัตราส่วนผสมมวลรวม 2.75 และ 3.00 และเมื่อเพิ่มผง

อะลูมินาเป็นร้อยละ 15 (D2) ของตัวอย่างอัตราส่วนผสมมวลรวม 2.75 ให้กำลังอัดได้ถึงประมาณ 18 เมกะพาสคัล ซึ่งมีค่าสูงสุด อย่างไรก็ตามที่อัตราส่วนผสมมวลรวม 3.00 การใช้ผงอะลูมินาร้อยละ 10 (C5) มีค่ากำลังอัดสูงสุดประมาณ 19 เมกะพาสคัล เนื่องจากมีความเป็นไปได้ว่าการใช้ผงอะลูมินาร้อยละ 15 จะทำให้วัสดุประสานมีปริมาณน้อยลงเนื่องจากการที่ผงอะลูมินามีค่าความถ่วงจำเพาะสูง 3.4-4.0 ส่งผลให้มีปริมาตรน้อยไม่สามารถเคลือบมวลรวมได้ทั่วถึงทำให้มวลรวมไม่สามารถจับตัวเป็นก้อนอย่างเหนียวแน่นได้ ก่อนตัวอย่างจึงมีความร่วน

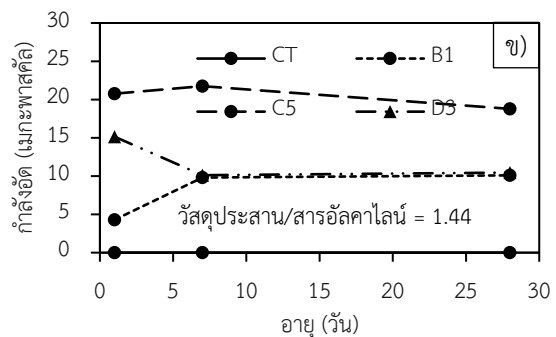
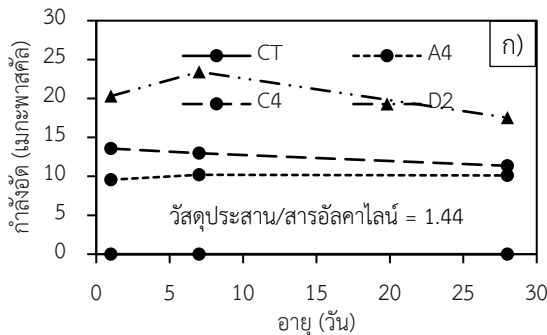
จากการผลการทดสอบพบว่ากำลังอัดส่วนใหญ่มีแนวโน้มไม่มีการเปลี่ยนแปลง หรือมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่ออายุบ่มมากขึ้น อาจจะเป็นไปได้ว่าในการศึกษาครั้งนี้เป็นการผสมสารละลายในทันที กล่าวคือ ในขั้นตอน

การผสมโซเดียมซิลิเกตกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้เป็นเนื้อเดียวกันนั้น เกิดปฏิกิริยากันเกิดความร้อน 74 ± 2 องศาเซลเซียส และเมื่อนำมาผสมเข้ากับวัสดุประสานและทราย ยังมีความร้อนเกิดขึ้น 48 ± 2 องศาเซลเซียส [9], [21], [22] ทำให้เป็นไปได้ว่ามีการเกิดปฏิกิริยาใน

ระหว่างการผสมวัสดุ ส่งผลให้เมื่อนำก้อนตัวอย่างบ่มร้อนในตู้อบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชม. เพิ่มเติมและเมื่อนำตัวอย่างมาทดสอบกำลังอัดมีค่าสูงในทันที (1 วัน) ทำให้เมื่ออายุบ่มเพิ่มมากขึ้นค่ากำลังอัดที่ได้มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย

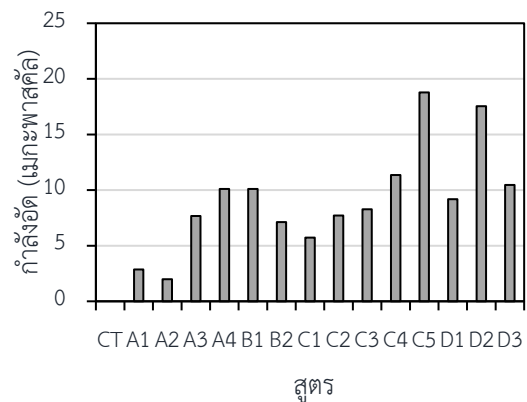


รูปที่ 8 ผลของปริมาณมวลรวมต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ ก) อะลูมินาร้อยละ 5 ข) อะลูมินาร้อยละ 10



รูปที่ 9 ผลของปริมาณผงอะลูมินาต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ ก) มวลรวม 2.75 ข) มวลรวม 3.00

เมื่อเปรียบเทียบค่ากำลังอัดของทุกส่วนผสมที่อายุ 28 วัน ดังรูปที่ 10 สามารถที่จะสรุปได้ว่าจีโอพอลิเมอร์ที่เตรียมจากเถ้าปาล์มน้ำมันครั้งนี้ที่มี SiO_2 เป็นองค์ประกอบหลังเพียงอย่างเดียวนั้น ไม่สามารถทำให้เกิดการแข็งตัวรับกำลังได้ ถ้าไม่มีผงอะลูมินาเข้ามาช่วย ซึ่งมีความเหมาะสมที่การใช้อัตราส่วนวัสดุประสานต่อสารอัลคาไลน์เท่ากับ 1.44 การใช้มวลรวมละเอียด (ทราย) ที่ 2.75 ถึง 3.00 และใช้ผงอะลูมินาเข้าไปแทนที่บางส่วนร้อยละ 10-15 โดยน้ำหนัก ถึงมีแนวโน้มให้กำลังอัดได้ดี

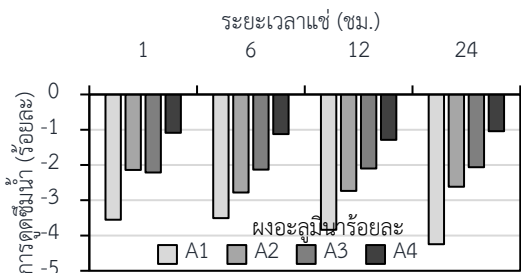


รูปที่ 10 กำลังอัดจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่อายุ 28 วัน

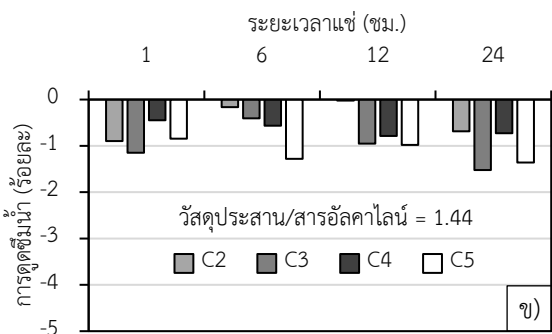
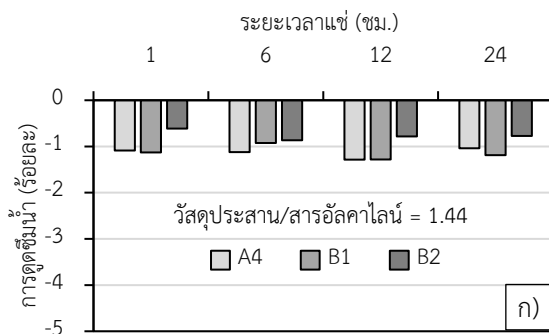
3.2 การดูดซึมน้ำ

การทดสอบการดูดซึมน้ำใช้ตัวอย่างมอร์ตาร์ที่อายุ 28 วัน จากผลการทดสอบดังรูปที่ 11-13 เป็นที่น่าสังเกตว่าจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ไม่มีการดูดซึมน้ำเนื่องจากเมื่อพิจารณาจากกายภาพของก้อนตัวอย่าง จะพบว่าตัวอย่างมีของเหลวหนืดอยู่ในเนื้อจีโอพอลิเมอร์ดังรูปที่ 14 ทำให้เมื่อนำไปแช่น้ำของเหลวที่อยู่ในเนื้อจีโอพอลิเมอร์เกิดการระบายออกทำให้มีน้ำหนักลดลง เมื่อพิจารณารูปที่ 11 พบว่ามอร์ตาร์มีอัตราการคายของเหลวอยู่ระหว่างร้อยละ 1.09-3.55 และ 1.04-4.25 ที่การแช่น้ำ 1 และ 24 ชม. ตามลำดับ สังเกตได้ว่าถึงแม้มีการแช่นานขึ้นการคายของเหลวก็ไม่ได้เปลี่ยนจากเดิมที่อายุ 1 ชม. มากนัก การคายของเหลวดังกล่าวเกิดขึ้นที่อายุ 1 ชม. การใช้อัตราส่วนวัสดุประสานต่อสารอัลคาไลน์มากขึ้นมีแนวโน้มให้การคายของเหลวลดลง การคายของเหลวที่ลดลงจะสอดคล้องกับกำลังอัดที่ดี อาจเป็นไปได้ว่าเมื่อก่อนตัวอย่างที่มีอัตราส่วนผสมที่

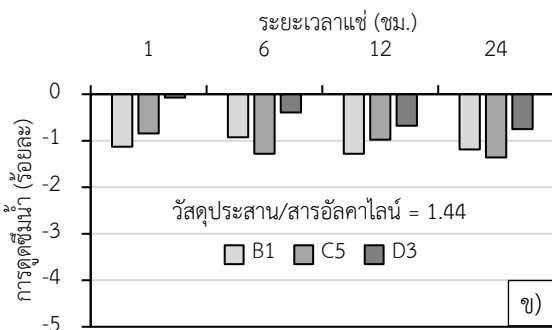
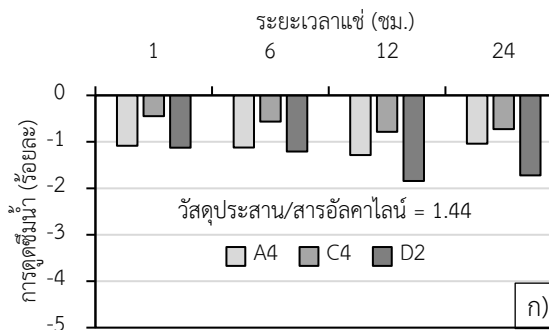
ดีของเหลวที่มีอยู่ในส่วนผสมจะถูกนำไปใช้ในการทำปฏิกิริยาได้เหมาะสม นั้นแสดงให้เห็นว่าจีโอพอลิเมอร์มีกำลังอัดสูง ผลจากการทำปฏิกิริยาของวัสดุประสานกับสารอัลคาไลน์ ทำให้ไม่มีของเหลวออกมาบริเวณผิวก้อนตัวอย่างแล้วเกิดการคายออก จากการทดสอบตัวอย่างที่มีอัตราส่วนวัสดุประสานต่อสารอัลคาไลน์ต่ำจะมีของเหลวคล้ายเมือกออกมาที่ผิวตัวอย่างจำนวนมาก เป็นไปได้ว่าของเหลวเหล่านี้เป็นส่วนที่เหลือจากการทำปฏิกิริยา



รูปที่ 11 การดูดซึมน้ำเมื่อเปลี่ยนแปลงสารอัลคาไลน์

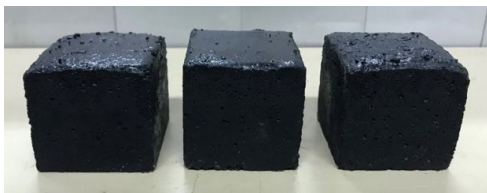


รูปที่ 12 การดูดซึมน้ำเมื่อเปลี่ยนแปลงมวลรวม ก) พงอะลูมินาร้อยละ 5 ข) พงอะลูมินาร้อยละ 10



รูปที่ 13 การดูดซึมน้ำเมื่อเปลี่ยนแปลงพงอะลูมินา ก) มวลรวม 2.75 ข) มวลรวม 3.00

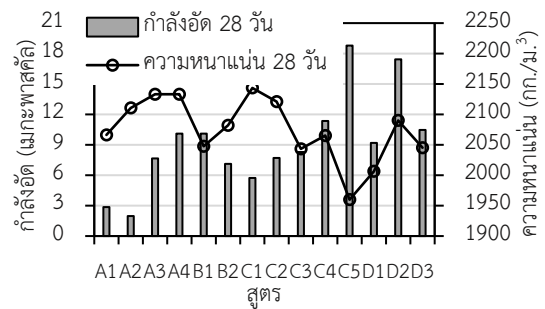
หลังจากการใช้อัตราส่วนผสมที่แตกต่างของวัสดุประสานต่อสารอัลคาไลน์ และเริ่มมีการใช้อัตราส่วนวัสดุประสานต่อสารอัลคาไลน์เท่ากับ 1.44 นั้น จากผลการทดสอบดังรูปที่ 12 และ 13 เป็นที่น่าสังเกตว่าอัตราการคายของเหลวของตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ที่ใช้อัตราส่วนวัสดุประสานต่อสารอัลคาไลน์เท่ากับ 1.44 ให้ค่าการคายของเหลวในช่วงร้อยละ 1 ± 0.5 แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงมวลรวมและผงอะลูมินาไม่มีแนวโน้มต่อการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน ผลกระทบหลักของการคายของเหลวอยู่ที่อัตราส่วนวัสดุประสานต่อสารอัลคาไลน์



รูปที่ 14 ลักษณะกายภาพก้อนตัวอย่าง

3.3 ความหนาแน่น

รูปที่ 15 แสดงผลการทดสอบความหนาแน่นจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่อายุ 28 วัน เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของอัตราส่วนวัสดุประสานต่อสารอัลคาไลน์ (A1-A4) พบว่าความหนาแน่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนวัสดุประสานต่อสารอัลคาไลน์เพิ่มขึ้น เป็นไปในลักษณะเดียวกันกับการศึกษาของ Heah และคณะ [23] ที่ศึกษาอัตราส่วนของแข็งต่อของเหลวโดยใช้ดินขาวเป็นวัสดุตั้งต้น ซึ่งพบว่าเมื่ออัตราส่วนของแข็งต่อของเหลวเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์เพิ่มขึ้นไปด้วย ในขณะที่อัตราส่วนมวลรวมนั้นพบว่าเมื่อใช้มวลรวมมากขึ้น (C2-C5) ความหนาแน่นมีแนวโน้มลดลง และเป็นข้อสังเกตเพิ่มเติมว่าตัวอย่างที่มีค่ากำลังอัดสูงความหนาแน่นมีแนวโน้มลดลง แนวโน้มของความหนาแน่นแปรผกผันกับกำลังอัดอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งเกี่ยวเนื่องจากการทำปฏิกิริยา ตัวอย่างที่มีการทำปฏิกิริยาได้ดีก่อนตัวอย่างมีลักษณะผิวแห้ง



รูปที่ 15 ความหนาแน่นและกำลังอัดจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์

4. สรุปผล

จากผลการทดสอบจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าปาล์มน้ำมันปรับปรุงสมบัติด้วยการแทนที่ด้วยผงอะลูมินาที่ได้ศึกษาครั้งนี้ สามารถสรุปได้ดังนี้

1. การใช้อัตราส่วนของวัสดุประสานต่อสารอัลคาไลน์ที่ 1.44 ให้ค่ากำลังอัดและการคายของเหลวน้อย
2. การใช้ผงอะลูมินาในการปรับปรุงกำลังอัดที่เหมาะสมควรอยู่ในช่วงร้อยละ 10-15 โดยน้ำหนัก
3. การใช้มวลรวมทรายแม่น้ำ 2.75-3.00 ต่อวัสดุประสาน โดยน้ำหนัก มีความเหมาะสมสามารถให้กำลังอัดที่ดี
4. ในการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนผสมต่าง ๆ ของตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์อัตราส่วนผสม C5 และ D2 สามารถให้ค่ากำลังอัดได้ดีที่สุด
5. การใช้ผงอะลูมินาสามารถช่วยให้ตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์สามารถรับแรงได้ เมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันเพียงอย่างเดียวที่ไม่มีการก่อตัวรับแรงไม่ได้ ซึ่งการใช้ผงอะลูมินาร้อยละ 10 สามารถให้กำลังอัดดีที่สุด
6. การเตรียมสารละลายในทันทีจะมีผลให้ค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นตั้งแต่อายุน้อย

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณหน่วยวิจัยโครงสร้างพื้นฐานและนวัตกรรมวัสดุ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์ ให้การสนับสนุนเครื่องมืออุปกรณ์ในการทำวิจัยครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Hawa, "Properties of pumice lightweight concrete containing rubber wood fly ash and rice husk ash" M.S. thesis, Dept. of Civil Eng. Prince of Songkla Univ., Songkhla, Thailand, 2008.
- [2] P. Chindaprasirt, S. Homwuttiwong and C. Jaturapitakul, "Strength and water permeability of concrete containing palm oil fuel ash and rice husk-bark ash," *Construction and Building Materials*, vol. 21, no. 7, pp. 1492-1499, Jul. 2007.
- [3] S. Ruhzon and P. Chindaprasirt, "Use of waste ash from agricultural by-products in concrete work," *RMUTP Research Journal*, vol. 2, no. 1, pp. 49-56, Mar. 2008.
- [4] W. Tangchirapat and C. Jaturapitakul, "Strength, drying shrinkage, and water permeability of concrete incorporating ground palm oil fuel ash," *Cement and Concrete Composites*, vol. 32, no. 10, pp. 767-774, Nov. 2010.
- [5] W. Tangchirapat, C. Jaturapitakul and P. Chindaprasirt, "Use of palm oil fuel ash as a supplementary cementitious material for producing high-strength concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 23, no. 7, pp. 2641-2646, Jul. 2009.
- [6] J. Temuujin, W. Rickard and A. van Riessen, "Characterization of various fly ashes for preparation of geopolymers with advanced applications," *Advanced Powder Technology*, vol. 24, no. 2, pp. 495-498, Mar. 2013.
- [7] G. Görhan and G. Kürklü, "The influence of the NaOH solution on the properties of the fly ash-based geopolymer mortar cured at different temperatures," *Composites: Part B*, vol. 58, pp. 371-377, Mar. 2014.
- [8] M. T. Junaid, O. Kayali, A. Khennane and J. Black, "A mix design procedure for low calcium alkali activated fly ash-based concretes," *Construction and Building Materials*, vol. 79, pp. 301-310, Mar. 2015.
- [9] A. Hawa, D. Tonnayopas, W. Prachasaree and P. Taneerananon, "Development and performance evaluation of very high early strength geopolymer for rapid road repair," *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2013, Aug. 2013.
- [10] M. Y. Liu, C. P. Chua, U. J. Alengaram and M. Z. Jumaat, "Utilization of palm oil fuel ash as binder in lightweight oil palm shell geopolymer concrete," *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2014, Jan. 2014.
- [11] M. Olivia, L. M. Tambunan and E. Saputra, "Properties of palm oil fuel ash (POFA) geopolymer mortar cured at ambient temperature," in *International Conference on Engineering Technology (ETIC 2016)*, Ho Chi Minh City, Vietnam, 2016, pp. 36-42.
- [12] *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*, ASTM C618-12a, 2012.

- [13] A. Mahama, F. Saleah and F. Soko, "A Study of Geopolymer Mortar from Oil Palm Ash with Alumina Powder," B. Eng project, Dept. Civil Eng., Princess of Naradhiwas Univ., Narathiwat, Thailand, 2017.
- [14] *Standard Specification for Concrete Aggregates*, ASTM C33/C33M-18, 2018.
- [15] *Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate*, ASTM C128-15, 2015.
- [16] *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)*, ASTM C109/C109M-16a, 2016.
- [17] S. Rukzon, T. Tansathit, P. Seesai and P. Chindaprasit, "Physical properties of geopolymer mortar palm oil fuel ash," *Engineering Journal of research and Development*, vol. 32, no. 1, pp. 89-103, Jan.-Mar. 2021.
- [18] N. Ranjbara, M. Mehralib, U. Johnson Alengarama, H. S. C. Metselaar and M. Z. Jumaat, "Compressive strength and microstructural analysis of fly ash/palm oil fuel ash based geopolymer mortar under elevated temperatures," *Construction and Building Materials*, vol. 65, pp. 114-121, Aug. 2014.
- [19] N. Ranjbara, M. Mehralib, U. Johnson Alengarama, H. S. C. Metselaar and M. Z. Jumaat, "Compressive strength and microstructural analysis of fly ash/palm oil fuel ash based geopolymer mortar," *Materials and Designs*, vol. 59, pp. 532-539, Aug. 2014.
- [20] A. Hawa, D. Tonnayopas and W. Prachasaree, "Performance Evaluation and Microstructure Characterization of Metakaolin-Based Geopolymer Containing Oil Palm Ash," *The Scientific World Journal*, vol. 2013, Oct. 2013.
- [21] A. Hawa, D. Tonnayopas and W. Prachasaree, "Performance evaluation of metakaolin based geopolymer containing parawood ash and oil palm ash blends," *Materials Science*, vol. 20, no. 3, pp. 339-344, Sep. 2014.
- [22] A. Hawa, W. Prachasaree and D. Tonnayopas, "Effect of water-to-powder ratios on the compressive strength and microstructure of metakaolin based geopolymers," *Indian Journal Engineering Materials Science*, vol. 24, no. 6, pp. 499-506, Dec. 2017.
- [23] C. Y. Heah, H. Kamarudin, A. M. Mustafa Al Bakri, M. Bnhussain, M. Luqman, I. K. Nizar, C. M. Ruzaidi and Y. M. Liew, "Study on solids-to-liquid and alkaline activator ratios on kaolin-based geopolymers," *Construction and Building Materials*, vol. 35, pp. 912-922, Oct. 2012.

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

การออกแบบปรับปรุงพื้นที่หน่วยทะเบียนของงานเวชระเบียนโดยใช้แบบจำลองแถวคอย กรณีศึกษา โรงพยาบาลสงขลานครินทร์

นิติพัฒน์ เหล่ามงคลชัยศรี^{1*} ปาลิดา สุทธิชี² ปิยะกุล ขุนละพันธ์³ และ ภาสุรี แสงศุภวานิช⁴

¹ งานนโยบายและแผน คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

² วิชาเอกการจัดการโลจิสติกส์และโซ่อุปทาน คณะวิทยาการจัดการ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

³ หน่วยทะเบียนเวชระเบียน งานเวชระเบียน คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

⁴ สาขาวิชากุมารเวชศาสตร์ คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

^{1, 2, 3, 4} 15 ถนนกาญจนาภิเษย ตำบลคอหงส์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90110

รับบทความ 8 กรกฎาคม 2564 แก้ไขบทความ 22 เมษายน 2565 ตอรับบทความ 28 มิถุนายน 2565

บทคัดย่อ

ปัจจุบันโรงพยาบาลสงขลานครินทร์ ตระหนักถึงคุณภาพและการเพิ่มขีดความสามารถในการให้บริการ เพื่อรองรับการเข้ามารับบริการของผู้ป่วยหรือญาติผู้ป่วยได้อย่างมีประสิทธิภาพ งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบปรับปรุงพื้นที่หน่วยทะเบียนของงานเวชระเบียนโดยใช้แบบจำลองแถวคอย กรณีศึกษา โรงพยาบาลสงขลานครินทร์ โดยประยุกต์ใช้การจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม Promodel[®] เพื่อวิเคราะห์และออกแบบรูปแบบการให้บริการของหน่วยทะเบียนในงานเวชระเบียน โดยการหาจำนวนช่องให้บริการที่มีความเหมาะสมกับปริมาณความต้องการในการรับบริการปัจจุบันและอนาคต และสามารถลดระยะเวลารอคอยของผู้รับบริการได้ โดยในช่วงเวลาที่มีผู้เข้ารับบริการมากที่สุด คือ 7:00–10:00 น. คิดเป็นร้อยละ 53 สามารถแบ่งงานออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ 1 คิดเป็นร้อยละ 80.27 ของจำนวนผู้รับบริการทั้งหมด มีเวลาในการให้บริการเฉลี่ย 4.00 นาทีต่องาน และกลุ่มที่ 2 คิดเป็นร้อยละ 19.73 ของจำนวนผู้รับบริการทั้งหมด มีเวลาในการให้บริการเฉลี่ย 1.30 นาทีต่องาน ผลการศึกษา พบว่า ทางเลือกแบบแถวคอยเดี่ยวและเปิดทุกช่องให้บริการ จะมีระยะเวลาเฉลี่ยที่อยู่ในแถวคอย จาก 11.57 นาทีต่อคน เหลือเพียง 1.10 นาทีต่อคน หรือลดลงร้อยละ 90.49 และเวลาเฉลี่ยที่ผู้รับบริการอยู่ในระบบจาก 22.33 นาทีต่อคน เหลือเพียง 5.30 นาทีต่อคน หรือลดลงร้อยละ 76.26

คำสำคัญ : โรงพยาบาล; งานเวชระเบียน; การจำลองสถานการณ์; แถวคอย

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +668 3190 3977, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: nitipat.l@psu.ac.th

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

Improvement of Medical Record Registration Unit Design of Songklanagarind Hospital Using Queueing Models

Nitipat Laomongkholsaisri^{1*} Palida Suttishe² Piyakun Kunlaplan³ and Pasuree Sangsupawanich⁴

¹ Policy and Planning Analysis Section, Faculty of Medicine, Prince of Songkla University

² Logistics and Supply Chain management, Faculty of Management Sciences, Prince of Songkla University

³ Medical Record Registration Unit, Medical Record Section, Faculty of Medicine, Prince of Songkla University

⁴ Department of Pediatrics, Faculty of Medicine, Prince of Songkla University

^{1, 2, 3, 4} 15 Kanchanawanich Road, Hat Yai, Songkhla 90110

Received 8 July 2021; Revised 22 April 2022; Accepted 28 June 2022

Abstract

Nowadays, hospitals have become conscious of the quality of their services in providing an efficient assistance to patients. The purpose of this research is to design an improve the Medical Record Registration Unit of Songklanagarind hospital using queueing models. In this research, the simulation approach via ProModel Simulation software is applied to design and analyze the service model of the medical record registration unit by finding the number of service channels that are suitable for the current and future service demand and to reduce the waiting time of service users. During the period with the most patients receiving services from 7:00 a.m. to 10:00 a.m., 53%, the work can be divided into two groups, the first group, accounting for 80.27 percent of the total number of patients. The average service time was 4.00 minutes per job and the second group accounted for 19.73 percent of the total number of patients. There is an average service time of 1.30 minutes per job. The results showed that a single queue which is opened to all service channels and divided by work group can reduce the average time spent in waiting by 90.49%, from 11.57 minutes to only 1.10 minutes. The average time spent by users is reduced by 76.26%, from 22.33 minutes to 5.30 minutes.

Keywords: Hospital; Medical Record; Simulation Model; Queueing

** Corresponding Author. Tel.: +668 3190 3977, E-mail Address: nitipat.l@psu.ac.th*

1. บทนำ

โรงพยาบาลสงขลานครินทร์เป็นโรงเรียนผลิตแพทย์ ที่ให้บริการรักษาพยาบาลผู้ป่วยนอก ผู้ป่วยใน ผู้ป่วยอุบัติเหตุและฉุกเฉินในสาขาต่าง ๆ ซึ่งเป็นสถานที่หนึ่งที่มีความสำคัญต่อการบริการด้านสุขภาพของประชาชน [1] โดยในปัจจุบันมีประชาชนจำนวนมากที่เข้ามารับการรักษาพยาบาลในแต่ละวัน ซึ่งเป็นผู้ป่วยนอกประมาณ 3,000 คนต่อวัน โดยผู้ป่วยนอกประมาณร้อยละ 25 จะต้องเข้ามารับบริการหน่วยทะเบียนของงานเวชระเบียน ซึ่งผู้ป่วยนอกกลุ่มนี้จะเข้ามารับบริการงานเวชระเบียนในการทำบัตรใหม่ บัตรหาย หรือตรวจสอบและรับรองสิทธิต่าง ๆ หน่วยทะเบียนของงานเวชระเบียน [2] จึงเป็นพื้นที่ให้บริการหนึ่งของโรงพยาบาล ที่มีความแออัดไปด้วยผู้ป่วยและญาติผู้ป่วยที่เข้ามาในพื้นที่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในวันจันทร์ของทุกสัปดาห์ ที่จะมีผู้ป่วยเข้ามารับบริการมากกว่าทุก ๆ วัน และช่วงเวลา 7:00 น.-10:00 น. ของทุกวันจะมีผู้รับบริการ คิดเป็นร้อยละ 53 ของผู้ป่วยทั้งหมดที่เข้ามารับบริการในแต่ละวัน ส่งผลให้ในช่วงเวลาดังกล่าวผู้ป่วยที่เข้ามารับบริการ จะมีระยะเวลาในการรอคอยมากกว่า 30 นาที ซึ่งจะทำให้ผู้ป่วยที่เข้ามารับบริการไม่ได้รับความสะดวกสบายในการเข้ามารับบริการในช่วงเวลาดังกล่าว

การจัดการที่จะช่วยลดความแออัดและการรอคอยในการรอรับบริการของผู้ป่วย คือ การจัดการแถวคอย โดยมีผู้นำวิธีการจัดการแถวคอยไปใช้ในการจัดการในด้านต่าง ๆ เช่น การศึกษาตัวแบบแถวคอย M/M/s เพื่อนำมาประยุกต์ใช้กับโรงพยาบาล [3] ซึ่งจากการศึกษา พบว่า การทำแบบจำลองระบบแบบแถวคอยสามารถนำมาปรับใช้ในบริการของแผนกเวชระเบียนเพื่อลดการรอคอยในการรับบริการ และช่วยวิเคราะห์ปัญหาความล่าช้าในการให้บริการ โดยการปรับตารางการทำงาน และจำนวนผู้ให้บริการของแผนกผู้ป่วยนอกคลินิกอายุรกรรม [4], [5] นอกจากจะสามารถ

ประยุกต์ใช้กับโรงพยาบาลแล้ว ยังสามารถประยุกต์ใช้กับที่ต่าง ๆ ได้ เช่น การจัดการแถวคอยเพื่อสร้างความพึงพอใจให้กับลูกค้าในจุดให้บริการชำระค่าบริการกระแสไฟฟ้าภาครัฐ [6] การจัดการแถวคอยสำหรับการให้บริการในธนาคาร [7] เป็นต้น

การทดสอบหลังจากที่ทำการออกแบบการจัดการแถวคอยกับบริเวณหน่วยงาน จะทำให้มีโอกาสที่จะเกิดปัญหาต่าง ๆ ตามมา แต่การสร้างแบบจำลองและการจำลองสถานการณ์ เป็นการวิเคราะห์สถานการณ์ก่อนเหตุการณ์จริงจะเกิดขึ้น โดยทำการจำลองสถานการณ์และวิเคราะห์ผลผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ จึงจะทำให้ทราบผลกระทบต่อระบบการทำงานที่เกิดขึ้นภายใต้สถานการณ์และเงื่อนไขที่แปรเปลี่ยนไปตามช่วงเวลาและระยะเวลาในการให้บริการ [8], [9] ได้โดยไม่กระทบต่อระบบงานจริง

ดังนั้น วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ จึงต้องการนำเสนอการออกแบบปรับปรุงพื้นที่หน่วยทะเบียนของงานเวชระเบียน โดยการหาจำนวนช่องให้บริการที่มีความเหมาะสมกับปริมาณความต้องการในการรับบริการปัจจุบันและในอนาคต และสามารถลดระยะเวลารอคอยของผู้รับบริการได้ และศึกษากระบวนการให้บริการของหน่วยทะเบียนของงานเวชระเบียน โดยการสร้างแบบจำลองและทดสอบแบบจำลองสถานการณ์ ปัญหาการรอคอยการเข้ารับบริการพื้นที่หน่วยทะเบียนของงานเวชระเบียนโรงพยาบาลสงขลานครินทร์ โดยใช้โปรแกรม Promodel® เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ผล

2. ระเบียบวิธีวิจัย

การวิจัยนี้ครอบคลุมการศึกษาการเข้ามารับบริการของประชาชนของโรงพยาบาลกรณีศึกษา โดยเลือกโรงพยาบาลสงขลานครินทร์ (กรณีศึกษา ปัจจุบันแผนกเวชระเบียนกำลังประสบปัญหาความแออัดของผู้เข้ามารับบริการ จากการเข้าสำรวจและสังเกตการณ์ในพื้นที่ (โดยผู้วิจัย) ซึ่งพื้นที่นี้จะถูกใช้งานปกติอยู่ในช่วง

วันทำการวันจันทร์ ถึงวันศุกร์ ช่วงเวลาตั้งแต่ 7:00 น. - 16:00 น. ส่วนช่วงวันหยุดเสาร์-อาทิตย์จะเป็นช่วงคลินิกนอกเวลาราชการ จึงทำให้จำนวนผู้เข้ารับบริการมีไม่มากนักจึงไม่ได้ใช้ข้อมูลในส่วนดังกล่าวมาใช้ในการวิจัยในครั้งนี้ โดยผู้วิจัยพบว่า วันจันทร์จะเป็นวันที่มีความแออัดของคนที่เข้ามาใช้บริการมากที่สุดวันสัปดาห์ ขอบเขตด้านสถานที่จะเป็นพื้นที่แผนกเวชระเบียน โรงพยาบาลสงขลานครินทร์ และขอบเขตด้านกลุ่มตัวอย่างจะเป็นผู้เข้ามาใช้พื้นที่แผนกเวชระเบียนได้แก่ ผู้ป่วยเดินมา ผู้ป่วยนั่งรถเข็น และญาติผู้ป่วย ขั้นตอนการวิจัยในงานวิจัยนี้ สามารถเขียนเป็นขั้นตอนได้ ดังนี้

1. ลงสำรวจพื้นที่ที่เวชระเบียนโรงพยาบาลสงขลานครินทร์ เพื่อพิจารณาสภาพปัจจุบันของการทำงานในส่วนของเวชระเบียน และปัญหาแฉกคอย
2. ศึกษาสภาพแผนผังพื้นที่และการใช้งานพื้นที่แผนกเวชระเบียนโรงพยาบาลสงขลานครินทร์ ในปัจจุบันแสดงดังรูปที่ 1 เพื่อออกแบบกรอบแนวคิดในการวิจัย



รูปที่ 1 สภาพการใช้งานพื้นที่แผนกเวชระเบียน
โรงพยาบาลสงขลานครินทร์ ในปัจจุบัน

3. เก็บรวบรวมข้อมูลปริมาณผู้ป่วยหรือญาติผู้ป่วยที่เข้ารับบริการในพื้นที่แผนกเวชระเบียน และระยะเวลาในการรอคอยช่วงวันทำการ จันทร์ - ศุกร์ ช่วงเวลา 7:00 น. - 16:00 น. อธิบายข้อมูลที่ไปรวบรวมมาให้เรียบร้อย

4. นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์หาการแจกแจงความถี่ (Distribution) อัตราการเข้ามา (Arrival Time) ในพื้นที่แผนกเวชระเบียนของผู้ป่วยหรือญาติผู้ป่วย โดยการแยกการเข้ามาใช้บริการเวชระเบียนออกเป็น 9 งาน คือ 1) ทำบัตรผู้ป่วยใหม่ 2) บัตรหาย/ปรับฐานข้อมูล 3) ตรวจสอบและรับรองสิทธิ UC Refer. 4) ตรวจสอบและรับรองสิทธิประกันสังคม Refer. 5) ตรวจสอบและรับรองสิทธินักศึกษา 6) ทำบัตรทาง App line 7) ติดต่อสอบถาม/รับโทรศัพท์ 8) ประสานงานภายนอก/ภายในเพื่อแก้ไขปัญหาเฉพาะหน้า และ 9) ตรวจสอบสุขภาพประจำปี/ตรวจสอบสุขภาพประกันสังคม เพื่อหาการแจกแจงเพื่อแก้ไขปัญหาเฉพาะหน้า และ 9) ตรวจสอบสุขภาพประจำปี/ตรวจสอบสุขภาพประกันสังคม เพื่อหาการแจกแจงความถี่ของเวลาในการให้บริการ (Service Time) ของเจ้าหน้าที่ในการให้บริการแต่ละคน (แต่ละช่องบริการ) ในการให้บริการในแต่ละวันที่เก็บข้อมูล จากนั้นนำมาหาค่าการแจกแจงความถี่

5. สร้างแบบจำลองสถานการณ์แฉกคอย สร้างทางเลือก และทำการตรวจสอบและทดสอบผลลัพธ์ของแบบจำลองที่สร้างขึ้นด้วยโปรแกรม Promodel®

6. ทำการประมวลผลแบบจำลองทางเลือกโดยการปรับเปลี่ยนระยะเวลาในการเปิดให้บริการในแต่ละช่องให้บริการ และเพิ่ม/ลดจำนวนช่องให้บริการของแบบจำลองในการบริการแต่ละประเภท เพื่อหาจำนวนช่องบริการที่เหมาะสม

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

1) ศึกษาสภาพปัจจุบันของการทำงานในส่วนของเวชระเบียน และขั้นตอนการให้บริการของส่วนเวชระเบียน

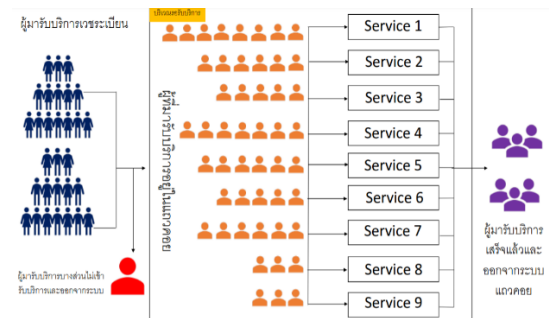
ในปัจจุบันขั้นตอนการให้บริการของหน่วยทะเบียนของงานเวชระเบียนเริ่มต้นโดยผู้ป่วยหรือญาติเข้ามาถึงพื้นที่ๆ จะต้องเดินไปที่เคาน์เตอร์เพื่อตรวจสอบสิทธิของผู้ป่วยหรือญาติ โดยการต่อแถวเพื่อรอรับบริการจากเจ้าหน้าที่ตามช่องบริการ ซึ่งสามารถเลือกเข้ารับบริการช่องใดก็ได้ หลังจากนั้นผู้ป่วยหรือญาติจะเดินต่อไปยังห้องตรวจแพทย์ต่าง ๆ ตามอาการป่วย รูป

ที่ 2 แสดงแผนของพื้นที่หน่วยทะเบียนของงานเวชระเบียนของโรงพยาบาลสงขลานครินทร์ เคาน์เตอร์ให้บริการ 9 ช่องบริการ

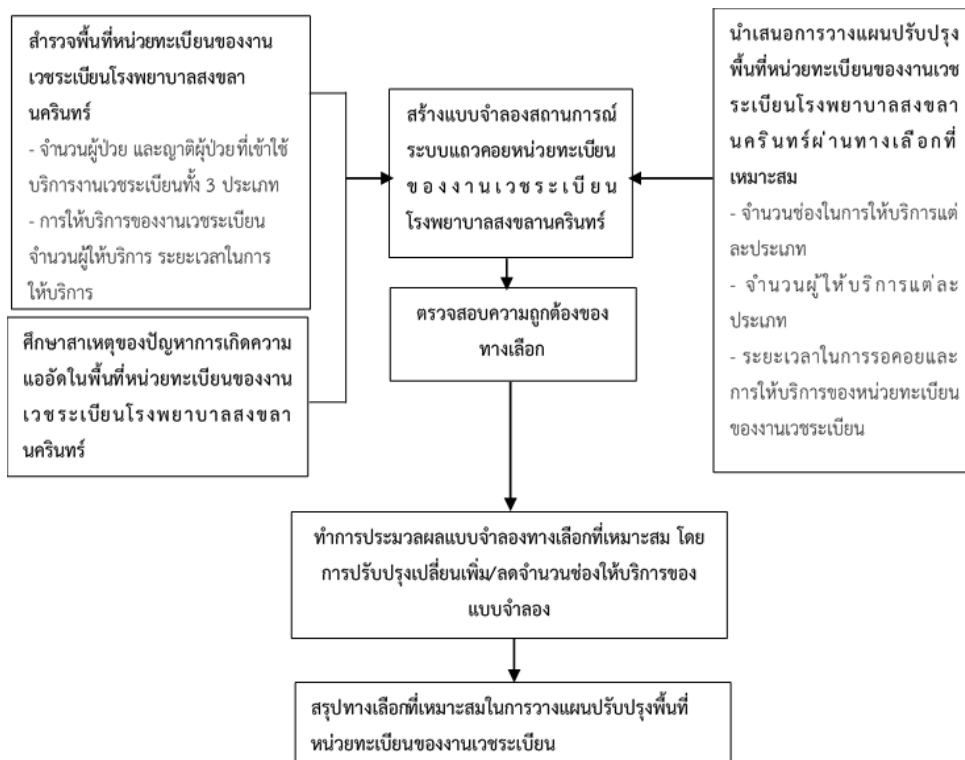
2) กรอบแนวคิดการวิจัย

ผู้วิจัยสนใจเกิดจากแนวคิด (Conceptual) ที่จะหาสาเหตุของปัญหาที่เกิดขึ้นทำให้เกิดความแออัด (Congestion) ขึ้นในพื้นที่แผนกเวชระเบียนจากการรวบรวมข้อมูลต่าง ๆ ทั้งจากการทบทวนวรรณกรรมและการสังเกตการณ์ลงสำรวจพื้นที่แผนกเวชระเบียนโรงพยาบาลสงขลานครินทร์ ผู้วิจัยได้สร้างกรอบงานวิจัย (Conceptual Research Framework) ขึ้น

เพื่อเป็นแนวทางในการดำเนินการวิจัยและแผนการดำเนินงาน ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 2 แผนพื้นที่เวชระเบียนของโรงพยาบาลสงขลานครินทร์



รูปที่ 3 กรอบแนวความคิดการวิจัย (Conceptual Research Framework)

3) การเก็บรวบรวมข้อมูล

การเก็บข้อมูลในงานวิจัยนี้ ทีมผู้วิจัยทำการบันทึกจำนวนและเวลาการเข้ามาของผู้ป่วยหรือญาติที่เข้ามาในพื้นที่แผนกเวชระเบียน การบันทึกข้อมูล

ดำเนินการโดยทีมผู้วิจัย ณ สถานที่แผนกเวชระเบียน ในวันทำการ จันทร์-ศุกร์ ตั้งแต่เวลา 7:00 น. - 16:00 น. เป็นเวลา 30 วัน โดยผู้ป่วยและญาติที่เข้ามาใช้บริการทั้งหมดสามารถแบ่งลักษณะของงานได้ทั้งหมด 9

งาน ประกอบด้วย (1) ทำบัตรผู้ป่วยใหม่ (2) บัตรหาย/
 ปรับฐานข้อมูล (3) ตรวจสอบและรับรองสิทธิ UC
 Refer. (4) ตรวจสอบและรับรองสิทธิประกันสังคม
 Refer. (5) ตรวจสอบและรับรองสิทธินักศึกษา (6) ทำ
 บัตรทาง App line (7) ติดต่อสอบถาม/รับโทรศัพท์ (8)
 ประสานงานภายนอก/ภายในเพื่อแก้ไขปัญหาเฉพาะหน้า
 (9) ตรวจสอบคุณภาพประจำปี/ตรวจสอบคุณภาพประกันสังคม
 เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บข้อมูลในงานวิจัยนี้ ประกอบด้วย
 เครื่องคอมพิวเตอร์ ซอฟต์แวร์โปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับ
 การประมวลผลข้อมูล นาฬิกาจับเวลา และแบบฟอร์มบันทึก
 เก็บรวบรวมข้อมูลปริมาณที่ออกแบบโดยผู้วิจัย ดังรูปที่ 4
 เพื่อเก็บข้อมูลของผู้ป่วยหรือญาติที่เข้ามาในพื้นที่แผนก
 เวชระเบียน และระยะเวลาในการให้บริการของเจ้าหน้าที่
 ช่างบริการสำหรับผู้ป่วยหรือญาติทุกราย ดังตัวอย่าง
 แสดงในตารางที่ 1

Bilanzsummenvergleich								
Jahr	Anlagevermögen	Umlaufvermögen	Gesamtvermögen	Gesamtvermögen		Eigenes Kapital	Fremdkapital	Gesamtvermögen
				Verbindlichkeiten	Umlaufvermögen			
2019/2020								
2020/21								
2021/22								
2022/23								
2023/24								
2024/25								
2025/26								
2026/27								
2027/28								
2028/29								
2029/30								

รูปที่ 4 แบบฟอร์มบันทึกเก็บรวบรวมข้อมูลปริมาณ

หลังจากได้ทำการเก็บข้อมูลแล้วนั้น ทีมผู้วิจัยทำการป้อนข้อมูลเพื่อทำการประมวลผลในการวิเคราะห์รูปแบบการกระจายตัวของอัตราการเข้ามาของผู้ป่วยหรือญาติ อัตราการให้บริการของเจ้าหน้าที่ที่ห้องให้บริการ การหาค่าความน่าจะเป็น (Probability) ของข้อมูล โดยรูปแบบการกระจายตัวของระยะเวลาในการเข้ามาผู้ป่วยหรือญาติ และระยะเวลาของการให้บริการของเจ้าหน้าที่ตามห้องให้บริการ จากจำนวนและเวลาของผู้ป่วยหรือญาติแต่ละคนที่เข้ามาพื้นที่แผนกเวชระเบียนเริ่มจากคนที่หนึ่งถึงคนสุดท้ายของวันที่เก็บ

ข้อมูล ถูกนำมาหาค่าการกระจายตัวความน่าจะเป็น (Probability Distribution) ของเวลาอัตราการเข้ามาของผู้ป่วย (Arrival Time) และเวลาการให้บริการ (Service Time) ของเจ้าหน้าที่เวชระเบียนที่ช่องให้บริการ จากการเก็บข้อมูลตามตารางที่ 1 พบว่าระยะเวลาในการให้บริการของเจ้าหน้าที่ในงานแต่ละประเภทมีระยะเวลาที่เป็นกลุ่มก้อน ทำให้ผู้วิจัยได้จับกลุ่มงานที่มีระยะเวลาในการให้บริการใกล้เคียง ออกเป็น 2 กลุ่ม เพื่อง่ายต่อการออกแบบการให้บริการของแผนกเวชระเบียน

จากการเก็บข้อมูลตามตารางที่ 1 พบว่าระยะเวลาในการให้บริการของเจ้าหน้าที่ในงานแต่ละประเภทมีระยะเวลาที่เป็นกลุ่มก้อน ทำให้ผู้วิจัยได้จับกลุ่มงานที่มีระยะเวลาในการให้บริการใกล้เคียง ออกเป็น 2 กลุ่ม เพื่อง่ายต่อการออกแบบการให้บริการของแผนกเวชระเบียน โดยแบ่งได้ดังนี้ กลุ่มที่ 1 เวลาในการให้บริการ 2 – 6 นาที ประกอบด้วยงาน (1) ทำบัตรผู้ป่วยใหม่ (2) บัตรหาย/ปรับฐานข้อมูล (3) ตรวจสอบและรับรองสิทธิ UC Refer. (4) ตรวจสอบและรับรองสิทธิประกันสังคม Refer. (5) ตรวจสอบและรับรองสิทธินักศึกษา คิดเป็นร้อยละ 80.27 ของจำนวนผู้รับบริการทั้งหมด กลุ่มที่ 2 เวลาในการให้บริการ 1 – 3 นาที ประกอบด้วยงาน (1) ทำบัตรทาง App line (2) ติดต่อสอบถาม/รับโทรศัพท์ (3) ประสานงานภายนอก/ภายในเพื่อแก้ไขปัญหาเฉพาะหน้า (4) ตรวจสอบสุขภาพประจำปี/ตรวจสอบสุขภาพประกันสังคม คิดเป็นร้อยละ 19.73 ของจำนวนผู้รับบริการทั้งหมด ซึ่งการกระจายตัวความน่าจะเป็นในการวิเคราะห์ เพื่อหาค่ารูปแบบของการกระจายตัวของข้อมูล ดังตารางที่ 2 และ 3

4) การสร้างแบบจำลอง

หลังจากทำการศึกษาสภาพปัจจุบันของการ
ทำงานของแผนกเวชระเบียนโรงพยาบาลสงขลาครินทร์
ที่มีช่องให้บริการ 9 ช่องบริการ ดังที่แสดงเป็นแผนผัง

บริเวณในรูปที่ 2 แล้ว จึงทำการเขียนเป็นแบบจำลองสถานการณ์แผนกเวชระเบียน โดยผู้ป่วยหรือญาติจะเข้ามาถึงพื้นที่ฯ เขาจะต้องเดินไปที่เคาน์เตอร์เพื่อตรวจสอบสิทธิ์ของผู้ป่วย ผู้ป่วยหรือญาติทำการต่อแถว เพื่อรอรับบริการจากเจ้าหน้าที่ตามช่องบริการการให้บริการ หลังจากนั้นผู้ป่วยหรือญาติจะเดินต่อไปยังห้องตรวจของแพทย์แผนกต่าง ๆ ตามอาการอาการป่วย โดยเจ้าหน้าที่ผู้ให้บริการจะมีอยู่ 9 คน (1 คนต่อ 1 ช่องให้บริการ) ซึ่งจะช่วยให้บริการผู้ป่วยทั้งหมด โดยมีหลักการที่ว่า ใครมาถึงก่อนจะได้รับการตรวจก่อน (first come first serve : FCFS) รวมทั้งการเก็บข้อมูลต่าง ๆ ที่จำเป็นต่อการสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ในการออกแบบ

ปรับปรุงพื้นที่แผนกเวชระเบียนของโรงพยาบาลสงขลา นครินทร์ เพื่อลดระยะเวลาการรอคอยของผู้ป่วยหรือญาติ โดยใช้โปรแกรม Promodel® ในการสร้างแบบจำลองสถานการณ์การทำงานของแผนกเวชระเบียนในปัจจุบัน เพื่อง่ายต่อการศึกษาปัญหาและการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้น ซึ่งการสร้างแบบจำลองของระบบเวชระเบียนแสดงดังรูปที่ 5 และนำข้อมูลด้านระยะเวลาการเข้ามาใช้บริการของผู้ป่วยหรือญาติผู้ป่วย และเวลาให้บริการของเจ้าหน้าที่เวชระเบียนในแต่ละประเภท มาทำการสร้างแบบจำลองสถานการณ์เริ่มต้นจากการพิจารณาแปลนพื้นที่แผนกเวชระเบียนในรูปที่ 2 ร่วมกับข้อมูลในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ตัวอย่างการเก็บข้อมูล

ผู้ป่วยลำดับที่	เวลาที่มาถึง	ใช้บริการช่องที่	ลักษณะงาน	เวลาการให้บริการ (MIN.)
1	07:40	1	ตรวจสอบและรับรองสิทธิ UC Refer.	4.30
2	07:45	2	ตรวจสอบและรับรองสิทธินักศึกษา	3.20
3	07:50	5	ทำบัตรใหม่	2.15
.	.	.	.	.
499	16:55	3	ตรวจสอบสุขภาพประกันสังคม	2.20
500	16:57	1	ตรวจสอบและรับรองสิทธิ UC Refer.	4.15

ตารางที่ 2 อัตราการเข้ามาของผู้ป่วยในแต่ละวัน

การกระจายตัว	อัตราการเข้ามาของผู้ป่วย (คนต่อวัน)		P-Value
	average	standard deviation	
ปกติ	628	167	0.212

ตารางที่ 3 เวลาการให้บริการ

กลุ่มที่	การกระจายตัว	เวลาการให้บริการ (นาที)		P-Value
		average	standard deviation	
1	ปกติ	3.08	1.17	0.092
2	ปกติ	5.84	1.08	0.113



รูปที่ 5 แบบจำลองสถานการณ์แผนกเวชระเบียน

5) ตรวจสอบความถูกต้อง และทวนสอบแบบจำลอง

จากการสร้างแบบจำลองสถานการณ์ทางคอมพิวเตอร์ของระบบงานแผนกเวชระเบียนก่อนการปรับปรุงแล้ว หลังจากนั้นให้ทำการตรวจสอบความ

ถูกต้องของแบบจำลอง (Verification) โดยทดสอบขั้นตอนการทำงานของแบบจำลองว่ามีลักษณะการทำงานเหมือนระบบงานจริงหรือไม่ โดยใช้คำสั่ง TRACE ของโปรแกรม Promodel® และในการทดสอบความสมเหตุสมผล (Validation) ของแบบจำลองเพื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมของตัวแบบให้มีความเหมาะสมกับพฤติกรรมของระบบจริง [10] โดยการกำหนดสมมติฐานและให้ค่า μ_1 คือ ค่าเฉลี่ยของจำนวนการเข้ารับบริการของคนไข้ของสถานการณ์ที่เกิดขึ้นจริง และ μ_2 คือ ค่าเฉลี่ยของจำนวนการเข้ารับบริการของคนไข้ของสถานการณ์จำลองจริง ด้วยการทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของสองกลุ่มประชากร (Two-sample t-test) มีสมมติฐานดังนี้

$$H_0 : \mu_1 - \mu_2 = 0$$

$$H_1 : \mu_1 - \mu_2 \neq 0$$

กำหนดค่าความเชื่อมั่นร้อยละ 95 แบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ส่วน คือ (1) การทดสอบความเพียงพอของตัวแบบ และ (2) การทดสอบเปรียบเทียบข้อมูล 2 ชุด (2 Sample-t) โดยจะดูผลที่ค่า P-Value หากมากกว่า 0.05 คือ การยอมรับว่าแบบจำลองสามารถใช้แทนระบบจริงได้ จากนั้นทำการเปรียบเทียบค่าระหว่างตัวแบบจำลองกับระบบจริง (Calibration) และเปรียบเทียบค่าเบี่ยงเบนของจำนวนคนที่ออกจากระบบจริง และแบบจำลองด้วยการทดสอบ t-test และผลการทวนสอบความสมเหตุสมผลทางสถิติของแบบจำลองแสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการทวนสอบความสมเหตุสมผลของแบบจำลอง

ข้อมูลทดสอบ	การแจกแจงแบบ	จำนวนข้อมูล (ครั้ง)	P-Value	2 Sample T-test
สถานการณ์ที่เกิดขึ้นจริง	ปกติ	10	0.212	
สถานการณ์จำลอง	ปกติ	10	0.214	P-Value = 0.129

จากตารางที่ 4 จากผลการทวนสอบความสมเหตุสมผลของแบบจำลอง พบว่าค่า P-Value จากการทดสอบ t (t-test) ของค่าเฉลี่ยของจำนวนการเข้ารับบริการของคนไข้ทั้งสถานการณ์ที่เกิดขึ้นจริงและสถานการณ์จำลอง มีค่าเท่ากับ 0.129 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05 จึงไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0) ได้ นั่นคือตัวแบบจำลองกับตัวแทนของระบบงานจริงไม่แตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ จากนั้นทำการวิเคราะห์จำนวนการทำซ้ำ (Run) ที่เหมาะสม หลังจากได้ตัวแบบจำลองของระบบงานจริงทำการคำนวณหาค่าขอบล่างของจำนวนรอบทำซ้ำ ดังแสดงในสมการที่ (1)

$$R \geq \left(\frac{Z_{\alpha/2} \cdot S_o}{\varepsilon} \right)^2 \quad (1)$$

โดยที่

R คือ จำนวนรอบการทำงานของโปรแกรมครั้งแรก

S_o คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของกลุ่มตัวอย่าง

ε คือ ค่าความคลาดเคลื่อน

จากสมการการคำนวณหาจำนวนรอบของการทำงานของโปรแกรมในสมการที่ 1 โดยแทนค่าจำนวนรอบการทำงานของโปรแกรมครั้งแรก (S_o) เท่ากับ 10 ครั้ง ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของกลุ่มตัวอย่าง (S_o) เท่ากับ 167.11 คนต่อนาที ค่าขอบเขตของความคลาดเคลื่อน 5% ของระยะเวลาเฉลี่ยในการรับบริการทั้งระบบของสถานการณ์จำลอง ($\varepsilon = 31.375$) และค่าความเชื่อมั่นที่ $1 - \alpha$ เท่ากับ 0.95 ($t_{0.025} = 2.042$) พบว่า ขอบล่างของจำนวนรอบทำซ้ำที่ต้องการเท่ากับ 108.98 ครั้ง จากนั้นทำการเพิ่มค่า R

จนกว่าจะได้จำนวนจริงบวกที่น้อยที่สุดที่ทำให้สมการในตารางที่ 5 เป็นจริง โดยเพิ่มค่า R ให้มีค่ามากกว่า 108.98 ในการทดสอบ แสดงดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 การคำนวณหาจำนวนครั้งในการทดลองรันที่เหมาะสม

R	111	112	113
$t_{0.025, R-1}$	1.98	1.98	1.98
$(t_{\frac{\alpha}{2}, R-1} S_o / \epsilon)^2$	111.42	111.39	111.37

จากตารางที่ 5 เมื่อทำการทำการตรวจสอบสมการด้วย R ที่ 111 112 และ 113 ตามลำดับพบว่า สมการที่ R เท่ากับ 112 มีค่าจริงน้อยที่สุดจึงเป็นจำนวนครั้งในการทดลองรันที่เหมาะสม และเนื่องจากได้มีการจำลองด้วยจำนวนรอบทำซ้ำครั้งแรกจำนวน 10 ครั้ง ดังนั้น จะมีการทดลองรันเพิ่มขึ้น ($R - R_o$) จำนวน 102 ครั้ง โดยผลของการทดลองรันจำนวน 19 ครั้ง 5) การเปรียบเทียบทางเลือก

การประยุกต์ใช้โปรแกรม Promodel® จะช่วยเพิ่มความสามารถในการตัดสินใจเลือกรูปแบบการปรับปรุงงาน ซึ่งงานวิจัยนี้จะใช้รรณประโยชน์จากการทำงานของเจ้าหน้าที่แผนกเวชระเบียน เวลาเฉลี่ยที่ผู้ป่วยหรือญาติอยู่ในระบบ และเวลาเฉลี่ยที่ผู้ป่วยหรือญาติอยู่ในแถวคอยของเวชระเบียนในแต่ละประเภทบริการ เป็นตัวชี้วัดของแนวทางในการปรับปรุงเปลี่ยนแปลง/ลดจำนวนช่องให้บริการของแบบจำลองในการบริการแต่ละประเภท เพื่อหาจำนวนช่องบริการที่เหมาะสม โดยมีทางเลือกที่เหมาะสมในการปรับปรุงผู้วิจัยได้ทำการออกแบบสถานการณ์จำลองออกเป็น 2 สถานการณ์ เพื่อศึกษาพฤติกรรมที่แตกต่างกันของจำนวนผู้ป่วยหรือญาติที่เข้ามาพื้นที่แผนกเวชระเบียนใน 2 รูปแบบ เนื่องจากการแบ่งกลุ่มงานผู้วิจัยจึงแบ่งจำนวนช่องการให้บริการออกเป็น 2 กลุ่ม เพื่อให้การบริการสามารถมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยแบ่งได้ดังนี้ งานกลุ่มที่ 1 มี

จำนวนงาน 5 งาน และระยะเวลาในการให้บริการเฉลี่ย 4 นาทีต่องาน ทำให้มีจำนวนช่องให้บริการ 6 ช่องบริการ ซึ่งมากกว่างานกลุ่มที่ 2 ที่มีงานจำนวน 4 งาน ระยะเวลาในการให้บริการเฉลี่ย 1.30 นาทีต่องาน มีจำนวนช่องให้บริการ 3 ช่องบริการ โดยสถานการณ์ทางเลือก ประกอบด้วย

รูปแบบที่ 1 ระบบแถวคอยแบบหลายช่องทาง-ขั้นตอนเดียว หลายแถวคอยที่มีความยาวแถวคอยและผู้มาใช้บริการที่เข้ามาใช้บริการไม่จำกัด(M/M/s : FCFS/ ∞/∞) ซึ่งผู้มาใช้บริการสามารถเลือกเข้าแถวหน้าช่องบริการใดก็ได้ที่ตรงลักษณะงานที่ต้องการใช้บริการ ซึ่งในรูปแบบที่ 1 จะแบ่งสถานการณ์ย่อย 3 สถานการณ์ตามปริมาณความต้องการเข้าใช้บริการของผู้ป่วยหรือญาติ เนื่องจากการเข้ามาใช้บริการส่วนใหญ่จะเข้ามาในช่วงช่วงเวลา 7:00 - 10:00 น. ของทุกวัน คิดเป็นร้อยละ 53 ของผู้เข้าใช้บริการในแต่ละวันดังนี้

รูปแบบที่ 1.1 หลายแถวคอย เปิดทุกช่องให้บริการ แบ่งตามกลุ่มงาน

รูปแบบที่ 1.2 หลายแถวคอย ปิดช่องให้บริการกลุ่มงานละ 1 ช่องบริการครึ่งวันบ่าย

รูปแบบที่ 1.3 หลายแถวคอย ปิดช่องให้บริการกลุ่มงานละ 1 ช่องบริการตลอดทั้งวัน

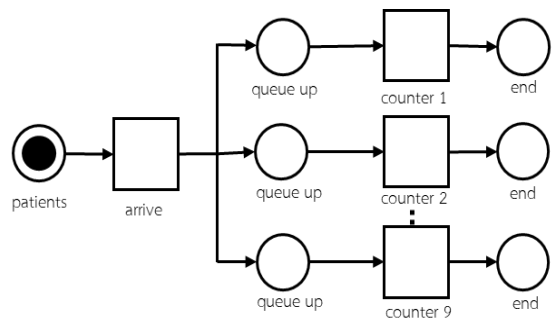
รูปแบบที่ 2 ระบบแถวคอยแบบหลายช่องทาง-ขั้นตอนเดียว มีความยาวแถวคอยและผู้มาใช้บริการที่เข้ามาใช้บริการไม่จำกัด (M/M/s : FCFS/ ∞/∞) ซึ่งผู้มาใช้บริการจะเข้าแถวคอย โดยมี 2 แถวคอยที่แบ่งตามกลุ่มงาน เมื่อช่องให้บริการว่างและถึงคิว จึงเดินไปหาเจ้าหน้าที่เพื่อใช้บริการ ซึ่งในรูปแบบที่ 2 จะแบ่งสถานการณ์ย่อย 3 สถานการณ์ตามปริมาณความต้องการเข้าใช้บริการของผู้ป่วยหรือญาติ เนื่องจากการเข้ามาใช้บริการส่วนใหญ่จะเข้ามาในช่วงเวลา 7:00 น.-10:00 น. ของทุกวัน คิดเป็นร้อยละ 53 ของผู้เข้าใช้บริการในแต่ละวัน ดังนี้

รูปแบบที่ 2.1 แแถวคอยเดียว เปิดทุกช่องให้บริการ แบ่งตามกลุ่มงาน

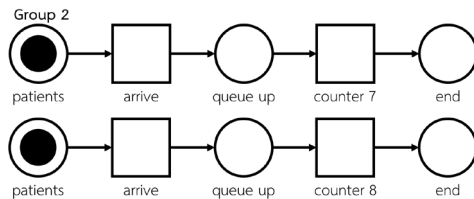
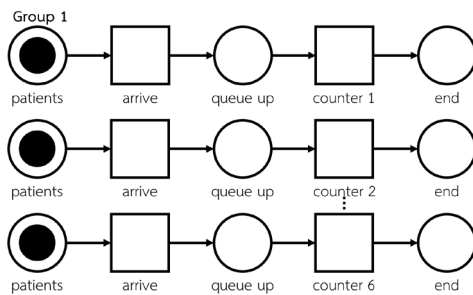
รูปแบบที่ 2.2 แแถวคอยเดียว ปิดช่องให้บริการ กลุ่มงานละ 1 ช่องบริการครึ่งวันบ่าย

รูปแบบที่ 2.3 แแถวคอยเดียว ปิดช่องให้บริการ กลุ่มงานละ 1 ช่องบริการตลอดทั้งวัน

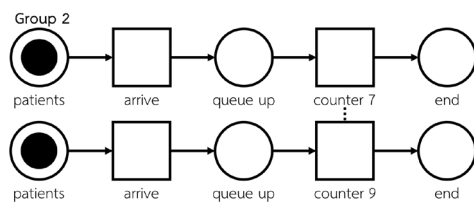
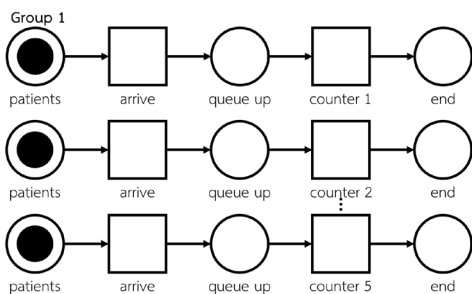
เหตุผลที่ทำการสร้างทางเลือกดังกล่าว คือ ผู้วิจัย ต้องการทราบจำนวนของช่องบริการ และรูปแบบที่เหมาะสมและประหยัดที่สามารถให้บริการที่หน่วยเวชระเบียนได้ ดังแสดงในรูปที่ 6-10



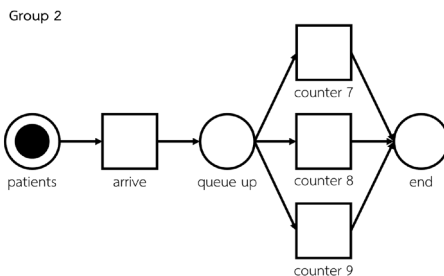
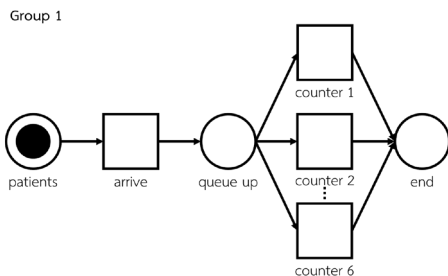
รูปที่ 6 สภาพปัจจุบัน เพื่อทดสอบการให้บริการในพื้นที่หน่วยเวชระเบียน



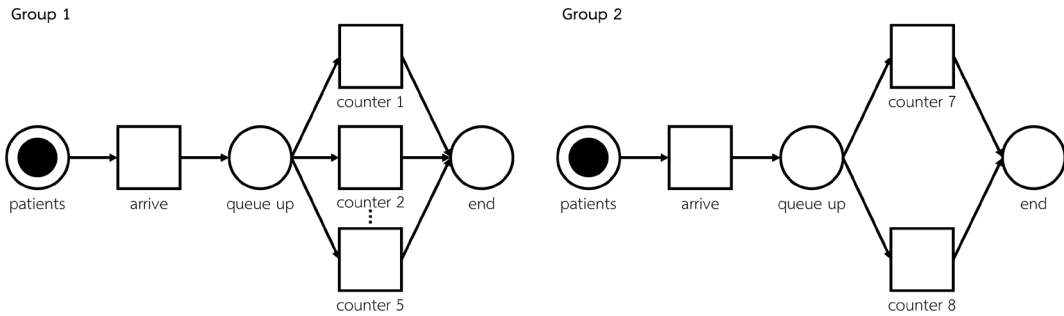
รูปที่ 7 ทางเลือก 1.1 เพื่อทดสอบการให้บริการในพื้นที่หน่วยเวชระเบียน



รูปที่ 8 ทางเลือก 1.2 และ ทางเลือก 1.3 เพื่อทดสอบการให้บริการในพื้นที่หน่วยเวชระเบียน



รูปที่ 9 ทางเลือก 2.1 เพื่อทดสอบการให้บริการในพื้นที่หน่วยเวชระเบียน



รูปที่ 10 ทางเลือก 2.2 และทางเลือก 2.3 เพื่อทดสอบการให้บริการในพื้นที่หน่วยเวชระเบียน

การประเมินผลและการเปรียบเทียบแบบจำลองของแนวทางในการปรับปรุงเพื่อลดเวลาเฉลี่ยที่อยู่ในแถวคอย ด้วยวิธี Bonferroni โดยกำหนดค่านัยสำคัญ $\alpha = 0.15$ และตั้งสมมติฐานดังนี้

$$H_0 : \mu_M = \mu_{M1} = \mu_{M2} \dots = \mu_{M6}$$

$$H_1 : \mu_M \neq \mu_{M1} \text{ หรือ } \mu_M \neq \mu_{M2} \dots \text{ หรือ } \mu_{M5} \neq \mu_{M6}$$

เมื่อประมวลผลการจำลองทั้งหมดแล้วจะได้เวลาเฉลี่ยที่อยู่ในแถวคอย และนำผลที่ได้ดังกล่าวมาเปรียบเทียบเวลาเฉลี่ยที่อยู่ในแถวคอยจากการจำลองสถานการณ์จริง ดังตารางที่ 6 พบว่า ช่วงความเชื่อมั่นของผลต่างของเวลาเฉลี่ยที่อยู่ในแถวคอยทั้งหมดไม่ครอบคลุมค่าศูนย์ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า ผลต่างของเวลาเฉลี่ยที่อยู่ในแถวคอยทั้งหมดมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.15$ โดยแบบจำลองทางเลือกที่ 2.1 มีเวลาเฉลี่ยที่อยู่ในแถวคอย จาก 11.57 นาทีต่อคน เหลือเพียง 1.10 นาทีต่อคน หรือลดลงร้อยละ 90.49 รองลงมาเป็นแบบจำลองทางเลือกที่ 1.1, 2.2, 1.2, 2.3 และ 1.3 มีเวลาเฉลี่ยที่อยู่ในแถวคอย (2.38), (2.43), (4.48), (5.06) และ (8.20) ตามลำดับ ลดลงจากสภาพปัจจุบันร้อยละ (79.43), (78.99), (61.28), (56.27) และ (29.13) ตามลำดับและเมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการประมวลผลการจำลองสถานการณ์มาเปรียบเทียบเพิ่มเติมอีก 1

ตัวชี้วัด พบว่า เวลาเฉลี่ยที่ผู้รับบริการอยู่ในระบบของแบบจำลองทางเลือกที่ 2.1 มีเวลาเฉลี่ยที่ผู้รับบริการอยู่ในระบบจาก 22.33 นาทีต่อคน เหลือเพียง 5.30 นาทีต่อคน หรือลดลงร้อยละ 76.26 รองลงมาเป็นแบบจำลองทางเลือกที่ 2.2, 1.1, 1.3, 1.2 และ 2.3 มีเวลาเฉลี่ยที่อยู่ในแถวคอย (5.65), (8.62), (8.62), (8.79) และ (9.55) ตามลำดับ ลดลงจากสภาพปัจจุบันร้อยละ (74.70), (61.40), (61.40), (60.64) และ (57.23) ตามลำดับ

ตารางที่ 6 ค่าเวลาเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่อยู่ในแถวคอยในแต่ละแบบจำลอง

	ค่าเวลาเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
สภาพปัจจุบัน (M)	11.57	1.72
ทางเลือกที่ 1.1 (M ₁)	2.38	1.52
ทางเลือกที่ 1.2 (M ₂)	4.48	1.27
ทางเลือกที่ 1.3 (M ₃)	8.20	1.85
ทางเลือกที่ 2.1 (M ₄)	1.10	0.53
ทางเลือกที่ 2.2 (M ₅)	2.43	0.78
ทางเลือกที่ 2.3 (M ₆)	5.06	1.52
ช่วงความเชื่อมั่น $\mu_{(M-M_1)} : 8.99 \leq \mu_M - \mu_{M1} \leq 9.39$		
ช่วงความเชื่อมั่น $\mu_{(M-M_2)} : 6.64 \leq \mu_M - \mu_{M2} \leq 7.54$		
ช่วงความเชื่อมั่น $\mu_{(M-M_3)} : 3.24 \leq \mu_M - \mu_{M3} \leq 3.50$		
ช่วงความเชื่อมั่น $\mu_{(M-M_4)} : 9.28 \leq \mu_M - \mu_{M4} \leq 11.66$		
ช่วงความเชื่อมั่น $\mu_{(M-M_5)} : 8.20 \leq \mu_M - \mu_{M5} \leq 10.08$		
⋮		

ตารางที่ 6 ค่าเวลาเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่อยู่ในแถวคอยในแต่ละแบบจำลอง (ต่อ)

	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
ช่วงความเชื่อมั่น $\mu_{(M3-M6)}$	$2.81 \leq \mu_{M5} - \mu_{M8} \leq 3.47$	
ช่วงความเชื่อมั่น $\mu_{(M4-M5)}$	$-1.58 \leq \mu_{M6} - \mu_{M7} \leq -1.08$	
ช่วงความเชื่อมั่น $\mu_{(M4-M6)}$	$-4.95 \leq \mu_{M6} - \mu_{M8} \leq -2.97$	
ช่วงความเชื่อมั่น $\mu_{(M5-M6)}$	$-3.37 \leq \mu_{M7} - \mu_{M8} \leq -1.89$	

4. สรุปผลการวิจัย

ผลการจำลองสถานการณ์การออกแบบการให้บริการหน่วยเวชระเบียน โรงพยาบาลสงขลา นครินทร์ เพื่อวิเคราะห์สภาพปัจจุบันของการให้บริการและจำลองสถานการณ์ทางเลือกในการปรับปรุง โดยใช้โปรแกรม Promodel® พบว่า สถานการณ์ในแต่ละทางเลือกสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพการให้บริการของหน่วยเวชระเบียนในเชิงการปฏิบัติงานจริงได้ดี และเมื่อพิจารณาทุกตัวชี้วัดในภาพรวมจากสถานการณ์ทางเลือกที่สร้างขึ้น ในช่วงช่วงเวลา 7:00 – 10:00 น. พบว่า สถานการณ์ทางเลือกที่เหมาะสมมากที่สุด คือ ทางเลือก 2.1 โดยมีแถวคอยเดียว เปิดทุกช่องให้บริการซึ่งแบ่งตามกลุ่มงาน คือ กลุ่มที่ 1 เวลาในการให้บริการเฉลี่ย 4 นาทีต่องาน ประกอบด้วยงาน 1) ทำบัตรผู้ป่วยใหม่ 2) บัตรหาย/ปรับฐานข้อมูล 3) ตรวจสอบและรับรองสิทธิ์ UC Refer. 4) ตรวจสอบและรับรองสิทธิ์ประกันสังคม Refer. และ 5) ตรวจสอบและรับรองสิทธิ์นักศึกษา กลุ่มที่ 2 เวลาในการให้บริการเฉลี่ย 1.30 นาทีต่องาน ประกอบด้วยงาน 1) ทำบัตรทาง App line 2) ติดต่อสอบถาม/รับโทรศัพท์ 3) ประสานงานภายนอก/ภายในเพื่อแก้ไขปัญหาเฉพาะหน้า และ 4) ตรวจสอบสุขภาพประจำปี/ตรวจสุขภาพประกันสังคม เนื่องจากมีเวลาเฉลี่ยที่อยู่ในแถวคอย จาก 11.57 นาทีต่อคน เหลือเพียง 1.10 นาทีต่อคน หรือลดลงร้อยละ 90.49 เวลาเฉลี่ยที่ผู้รับบริการอยู่ในระบบจาก 22.33 นาทีต่อคน เหลือเพียง 5.30

นาที หรือลดลงร้อยละ 76.26 ดังนั้น ผู้วิจัยจึงเสนอทางเลือก 2.1 เพื่อเป็นตัวแบบในการปรับปรุงพื้นที่หน่วยทะเบียนของงานเวชระเบียน และสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการให้บริการของหน่วยเวชระเบียน ภูมิศึกษา โรงพยาบาลสงขลา นครินทร์

5. ข้อเสนอแนะ

จากทางเลือก 2.1 ที่มีหนึ่งแถวคอย ผู้มาใช้บริการจะเข้าแถวคอยโดยมี 2 แถวคอยที่แบ่งตามกลุ่มงาน เมื่อช่องให้บริการว่างและถึงคิว จึงเดินไปหาเจ้าหน้าที่เพื่อใช้บริการทางโรงพยาบาลสามารถเพิ่มความสะดวก และรวดเร็วมากขึ้นด้วยการเพิ่มระบบบัตรคิวอัตโนมัติ เนื่องจากลักษณะการทำงานของทางเลือก 2.1 สามารถทำงานร่วมกับระบบบัตรคิวอัตโนมัติได้เป็นอย่างดี และการเพิ่มประสิทธิภาพในการปฏิบัติงานของหน่วยเวชระเบียน ทางหน่วยงานอาจจะเพิ่มป้าย/สัญลักษณ์ที่สร้างความชัดเจนให้กับทางผู้ป่วยหรือญาติผู้ป่วย เพื่อเข้ารับบริการตามช่องให้บริการที่ถูกต้อง

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.นิกร ศิริวงศ์ไพศาล อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลา นครินทร์ ที่ให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะอันเป็นประโยชน์จนทำให้บทความสำเร็จลงด้วยดี

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Songklanagarind Hospital, (30 January 2021). "Hospital History," [Online]. Available: <https://hospital.psu.ac.th/>
- [2] Medical Record Section, (30 January 2021). "Medical Record Data," [Online]. Available: http://medinfo2.psu.ac.th/medrec/63_data/op

- dall.htm?fbclid=IwAR2bmcnGF5eTORVEOEFcHTrvNF2OmcBB2f6_5EoOTL1zypp8u5tfHRJOJol
- [3] P. Chaichomphu, S. Pongsena and P. Seenoi, "Application of M/M/s Queuing Model to the hospital," M.S. thesis, Statistics, Khon Kaen University, Thailand, 2017.
- [4] P. Ruengpeng, "Simulation of queuing systems for outpatient service: a case study of the internal medicine at Phatthalung hospital," *Veridian E-Journal*, vol. 6, no. 3, pp. 834-845, 2013.
- [5] P. Vaenthaisong, "Reducing the time of service for psychiatric hospitals using simulation technique," M. S. thesis, Information Technology, Suranaree University of Technology, Thailand, 2012.
- [6] T. Rattnakool, K. Sukkrajang, P. Tucktern and P. Jantavee, "Queuing Analysis on The Payment Point for Electricity of Public Sector A Case Study: Chana District.," in *The 8th Hatyai National and International Conference*, Songkhla, 2017.
- [7] T. Chanapia and P. Putthasri, "The Queuing System by using the Queuing theory Case Study: Bank for Agriculture and Agricultural Co-operatives Khon Kaen Branch," M. S. thesis, Statistics, Khon Kaen University, Thailand, 2014.
- [8] P. Sittipong and N. Samattapapong, "An Improvement of Service Queue by Using Simulation in the Medical Records Department of the Medical Center at Suranaree University of Technology," *Thai Industrial Engineering Network Journal*, vol. 4, no. 1, pp. 10-16, 2018.
- [9] W. Chuncharoenkit, P. Sa-ngiamsunthorn, B. Chansawang, J. Thaithanan and T. Supapakorn, "Simulation of Queuing System for Outpatient Service: A Case Study of the Diabetic Clinic in Outpatient Department at Somdet Phra Phutthaloetla Hospital," *Thai Science and Technology Journal*, vol. 26, no. 1, pp. 71-79, 2018.
- [10] D. W. Kelton, R. P. Sadowski and D. T. Sturrock, *Simulation with Arena- 3rd ed. International Edition*, McGraw-Hill. The McGraw-Hill Company. Inc, 2003.

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

การศึกษาลักษณะขอบตัดโลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงชนิดเฟสคู่เกรด DP590 ในการบีบอัดที่อุณหภูมิแบบอุ่น

ณัฐศักดิ์ พรพุดศิริ* และ พงศกร หลีตระกูล

คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ถนนเพชรเกษม ตำบลหนองแขก อำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ 77110

รับบทความ 9 กันยายน 2564 แก้ไขบทความ 29 เมษายน 2565 ตอรับบทความ 28 มิถุนายน 2565

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิโลหะแผ่นและระยะช่องว่างคมตัดของแม่พิมพ์ที่ส่งผลต่อคุณภาพขอบตัดเนื่องขึ้นงานสำเร็จจากกระบวนการบีบอัดโลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงชนิดเฟสคู่เกรด DP590 การทดสอบการตัดเฉือนดำเนินการโดยใช้แม่พิมพ์ตัดแผ่นเปล่าที่มีระยะช่องว่างคมตัดแตกต่างกัน 3 ระดับ ก่อนการบีบอัดได้ทำการอบโลหะแผ่นในเตาอบไฟฟ้าให้มีอุณหภูมิแตกต่างกัน 4 ระดับ ทำการวิเคราะห์ผลลักษณะและคุณภาพขอบตัดขึ้นงานสำเร็จจากผลการตรวจสอบโดยใช้กล้องจุลทรรศน์กำลังขยายต่ำและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ส่วนพฤติกรรมด้านความเครียดเชิงบริเวณขอบตัดจะทำการประเมินและวิเคราะห์จากผลการทดสอบค่าความแข็งแรงระดับจุลภาคโดยใช้เครื่องทดสอบความแข็งแรงแบบวิกเกอร์ ผลการทดลองพบว่าการตัดเฉือนโลหะแผ่นที่อุณหภูมิห้องส่งผลให้ขอบตัดเกิดส่วนของรอยแตกสูง โดยรอยแตกขนาดเล็กจะเริ่มก่อตัวขึ้นในช่วงแรกของการกดตัดและขยายตัวใหญ่ขึ้นเมื่อระยะการกดตัดของพUNCHเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตาม ค่าความสูงของส่วนรอยแตกมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิของโลหะแผ่นเพิ่มสูงขึ้นและแม่พิมพ์มีระยะช่องว่างคมตัดน้อยลง ส่วนผลการตรวจสอบลักษณะของพื้นผิวรอยแตกและค่าความแข็งแรงระดับจุลภาค พบว่าเมื่ออุณหภูมิของโลหะแผ่นเพิ่มสูงขึ้นได้ส่งผลให้พื้นผิวรอยแตกมีลักษณะของการแตกแบบเหนียวเนื่องจากวัสดุมีค่าดัชนีความเครียดเชิงลดลง จากผลการวิจัยนี้สามารถนำข้อมูลผลการทดลองไปประยุกต์ใช้เพื่อกำหนดเงื่อนไขที่เหมาะสมในการบีบอัดโลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงโดยพิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและระยะช่องว่างคมตัดซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพขอบตัดขึ้นงานสำเร็จ

คำสำคัญ: กระบวนการบีบอัด; เหล็กกล้าชนิดเฟสคู่; คุณภาพขอบตัด; พื้นผิวรอยแตก; ดัชนีความเครียดเชิง

*ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +668 6667 6802, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: natthasak.por@rmutr.ac.th

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

The Sheared Edges Characterization of High Strength Steel Sheet Metal DP590 in Warm Blanking Process

Natthasak Pornputsiri* and Pongsakorn Leetrakul

Faculty of Industry and Technology Rajamangala University of Technology Rattanakosin
Phetchakaseam Road, Nhong-kea, Hua-Hin, prachuapkhirikhan 77110

Received 9 September 2021; Revised 29 April 2022; Accepted 28 June 2022

Abstract

This research aims to study the effect of metal sheets temperature and die-cutting clearance on the cutting edge quality of the finished product by the blanking operation of AHSS Dual Phase steel DP590 sheets. The shearing tests were carried out on an in blanking die by 3 size of punch–die clearance. Before the blanking test, the sheet metal is heated in an electric furnace at 4 temperature levels. To analyze finished product cutting edge quality were consider the examined results by the optical microscopy and scanning electron microscope. The strain hardening behavior on the cutting edge was evaluated and analyzed with the micro-hardness tested results by a Vickers hardness tester. The experiment results showed that the sheet metal shearing at room temperature resulted in a high fracture region on the cutting edge. The beginning of micro-cracks occurs in the early stages of press blanking and is larger as increased of the punch and die clearance. However, the height of the fracture region tends to decrease as the sheet metal temperature increases and the die clearance decreases. In the examination results of the fracture surface characteristics and micro-hardness values, it was found that when the sheet metal temperature increased, the fracture surface had the appearance of ductile fracture because the material had a low strain hardening index. The results of this research can be applied to determine the optimum conditions for sheet metal blanking of high-strength steel sheets. That is determined by the relationship between sheet metal temperature and die clearance, which directly affects the quality of the finished cutting edge.

Keywords: Blanking Process; Dual Phase Steel; Cutting Edge Quality; Strain Hardening Index

**Corresponding Author. Tel; +668 6667 6802, Email Address: natthasak.por@rmutr.ac.th*

1. บทนำ

การปั๊มตัดแผ่นเปล่า (Blanking Operations) เป็นกระบวนการตัดเฉือนโลหะแผ่นจากการกดตัดของ 펀ช์ (Punch) และตาย (Die) ซึ่งเกี่ยวข้องกับพฤติกรรม การเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่น การเปลี่ยนรูปแบบถาวรและการแตกหักของวัสดุ จากกระบวนการตัดเฉือนจะส่งผลทำให้เกิดเป็นรอยตัดเฉือนที่ขอบตัดชิ้นงานและเกิดพฤติกรรมความเครียดเชิงในบริเวณดังกล่าว ทั้งนี้ในกระบวนการปั๊มตัดแผ่นเปล่าโดยทั่วไปอาจส่งผลให้ชิ้นงานสำเร็จไม่ได้คุณภาพตามที่ต้องการ Konieczny และคณะ [1] ได้ประเมินและเปรียบเทียบผลกระทบของลักษณะและคุณภาพขอบตัดจากการการปั๊มตัดแผ่นเปล่าและจากการตัดด้วยเลเซอร์ ที่ส่งผลต่อความสามารถในการขึ้นรูปของโลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง ซึ่งพบว่า การตัดเจาะด้วยเลเซอร์ให้ค่าความสามารถในการขึ้นรูปต่ำกว่าการตัดเจาะด้วย 펀ช์ และตาย Golovashchenko และคณะ [2] ได้ทำการตรวจสอบผลกระทบของลักษณะขอบตัดที่ส่งผลต่อค่าความสามารถในการขึ้นรูป ด้วยวิธีการทดสอบแบบดึงยึดพบว่าชิ้นทดสอบที่มีลักษณะขอบตัดซึ่งมีส่วนเรียบตรงสูงและมีส่วนการเกิดครีบน้อยจะมีความสามารถในการขึ้นรูปสูงกว่า นอกจากนี้ Mingqing Zhu และคณะ [3] ได้รายงานถึงผลกระทบของข้อบกพร่องบนขอบตัดแผ่นเปล่า ที่นำไปสู่การแตกร้าวของขอบชิ้นงานเมื่อนำไปขึ้นรูปในกระบวนการขึ้นรูปถัดไป กล่าวคือส่วนเรียบตรงของชิ้นทดสอบที่มีค่าความหนาผิวสูงจะมีแนวโน้มเกิดการแตกร้าวได้ง่ายกว่าเมื่อนำไปทำการขึ้นรูปในกระบวนการต่อเนื่อง ดังนั้นเพื่อเป็นการปรับปรุงคุณภาพของชิ้นงานสำเร็จจึงควรต้องมีการปรับปรุงคุณภาพขอบตัดแผ่นเปล่าเพิ่มเติมก่อนนำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ [4] กล่าวคือควรต้องมีการลบคมหรือตกแต่งเพื่อกำจัดครีบบนขอบตัดก่อนการขึ้นรูป [5]

โลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง

เนื่องจากมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีในด้านความแข็งแรง ค่าความเครียดเชิงและค่าความเค้นครากสูง โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ ซึ่งจะช่วยให้ยานยนต์มีน้ำหนักเบา ส่งผลดีในด้านความปลอดภัยและเพิ่มประสิทธิภาพของการประหยัดน้ำมัน [6] อย่างไรก็ตาม ในกระบวนการขึ้นรูปหรือกระบวนการตัดแผ่นเปล่า เหล็กกล้าความแข็งแรงสูงที่อุณหภูมิปกติมักจะส่งผลให้เกิดการแตกร้าวได้ง่าย ส่งผลให้มีสัดส่วนของรอยแตกร้าวบริเวณขอบตัดสูงซึ่งจะเป็นปัญหาและข้อจำกัดต่อกระบวนการขึ้นรูปในกระบวนการถัดไป [7] พฤติกรรมเหล่านี้เกิดจากลักษณะทางโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงโดยเฉพาะเหล็กกล้าชนิดเฟสคู่ ซึ่งในโครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยเฟสมาร์เทนไซต์ซึ่งมีคุณสมบัติแข็งและเปราะกระจายตัวอยู่ในโครงสร้างพื้นของเฟอร์ไรท์ จึงทำให้เหล็กกล้าชนิดนี้มีค่าความแข็งแรงสูงแต่จะเกิดการแตกร้าวเสียหายได้ง่ายเมื่อนำไปขึ้นรูปที่อุณหภูมิปกติ [8] ทำให้เกิดข้อจำกัดด้านความสามารถในการขึ้นรูปเมื่อทำการขึ้นรูปหรือการเปลี่ยนรูปถาวรที่อุณหภูมิห้องโดยเฉพาะการพับและการตัดเฉือนทางกล [9] อย่างไรก็ตาม ในช่วงอุณหภูมิห้องถึง 600°C ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิการเกิดผลึกใหม่ของเหล็กกล้าชนิดนี้ การขึ้นรูปในช่วงอุณหภูมิดังกล่าวไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อสมบัติทางกลของชิ้นงานสำเร็จหลังการขึ้นรูป [10] Nürnberg และคณะ [11] ได้ตรวจสอบผลกระทบของระยะช่องว่างคมตัดในการตัดเฉือนโลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงและสังเกตคุณภาพของขอบตัดที่ได้ เพื่อการปรับปรุงคุณภาพพื้นผิวของขอบตัด พบว่าการตัดเฉือนด้วยแม่พิมพ์ที่มีระยะช่องว่างคมตัดน้อยจะได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพสูงกว่าในทำนองเดียวกัน Scintilla และคณะ [12] ได้ทำการตรวจสอบคุณภาพของตัดโลหะแผ่น AZ31 ที่ได้จากการตัดด้วยเลเซอร์และกระบวนการปั๊มตัดที่ทันสมัยเพื่อปรับปรุงคุณภาพของชิ้นงานสำเร็จ พบว่าการตัดด้วยกระบวนการปั๊มตัดได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพขอบตัดสูงกว่า

จากงานวิจัยที่ผ่านมายังได้แสดงให้เห็นถึงผลกระทบของกระบวนการตัดแผ่นเปล่าที่ส่งผลต่อพฤติกรรมด้านความเครียดเชิงบริเวณขอบตัดเฉือน (Shear Affected Zone; SAZ) ซึ่งขึ้นอยู่กับข้อกำหนดในกระบวนการตัด เช่น ความเร็วในการป้อนตัด ชนิดสารหล่อลื่น รูปแบบการหล่อลื่น และอุณหภูมิการตัดเฉือน [13] รวมไปถึงรายละเอียดในการออกแบบแม่พิมพ์ เช่น ระยะห่างช่องว่างคมตัด [14] มุมตัดเฉือน [15] และรัศมีคมตัดพินซ์และตาย [16] เป็นต้น ซึ่งค่าความเครียดเชิงบริเวณขอบตัดสามารถตรวจสอบได้ด้วยการวัดค่าความแข็งแบบจุลภาคผ่านชั้นความหนาของโลหะแผ่นบริเวณขอบตัด [17], [18] หรือทำการวัดเชิงเปรียบเทียบจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคและทิศทางการไหลตัวของเนื้อโลหะโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบแสง

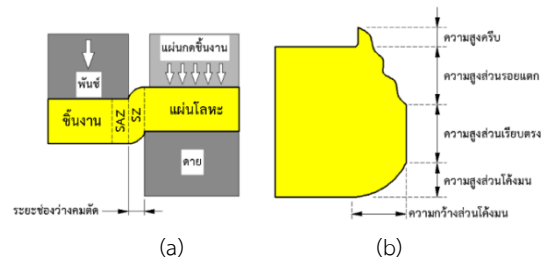
วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อคุณภาพขอบตัดชิ้นงานและให้ข้อเสนอแนะที่เหมาะสมเกี่ยวกับข้อกำหนดในการออกแบบแม่พิมพ์และเงื่อนไขของกระบวนการตัดแผ่นเปล่าโลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงชนิดเฟสคู่เกรด DP590 ในการลองได้ดำเนินการป้อนตัดโลหะแผ่นโดยใช้แม่พิมพ์ตัดและวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดขึ้นกับขอบตัดเฉือนชิ้นทดสอบ โดยได้จำแนกผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลตามรายละเอียดในหัวข้อที่ 2.1 การประเมินผลการทดลองได้พิจารณาจากผลกระทบของตัวแปรในกระบวนการป้อนตัดคือ ระยะห่างของช่องว่างคมตัดและอุณหภูมิของชิ้นทดสอบขณะตัดเฉือน ที่ส่งผลต่อคุณภาพขอบตัด รูปแบบการแตกหักและดัชนีค่าความเครียดเชิง

2. วัสดุและวิธีการทดลอง

2.1 การประเมินผลเกี่ยวกับคุณภาพขอบตัด

ลักษณะขอบตัดที่เกิดจากกระบวนการตัดเฉือนแต่ละส่วนมีความแตกต่างกันตามระยะความลึกในการกดตัดซึ่งประกอบด้วย ส่วนโค้งมน (Rollover zone)

ส่วนเรียบตรง (Burnish Zone) ส่วนรอยแตก (Fracture Zone) และส่วนของครีบ (Burr) ดังรูปที่ 1 ส่วนลักษณะและความสูงของส่วนต่าง ๆ บนขอบตัด จะทำการวัดขนาดจากภาพถ่ายด้านข้างของขอบตัดด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยายต่ำ (Optical Macro-scope; OM) ของ JENCO รุ่น GL E20 และภาพถ่ายในแนวภาคตัดขวางของชิ้นทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Light Optical Microscope; LOM) ของ Olympus รุ่น CX31 ส่วนลักษณะและรูปแบบของรอยแตกบนขอบตัดชิ้นงาน จะทำการตรวจสอบจากภาพด้านข้างโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) ของ JEOL รุ่น JSM6010LV



รูปที่ 1 (a) องค์ประกอบของกระบวนการตัดแผ่นเปล่า (b) ภาคตัดขวางของขอบตัด

ค่าความแข็งระดับจุลภาค (Micro-hardness) ที่บริเวณขอบตัด ได้ถูกนำไปประกอบการประเมินค่าความเครียดเชิงและผลกระทบจากอุณหภูมิบริเวณขอบตัดเฉือนของชิ้นทดสอบซึ่ง Chiriac และคณะ [19] ได้เสนอการคำนวณค่าดัชนีความเครียดเชิงบริเวณขอบตัดเฉือนดังสมการที่ (1)

$$ESH[\%] = \frac{H_v - H_{vbase}}{H_{vbase}} \quad (1)$$

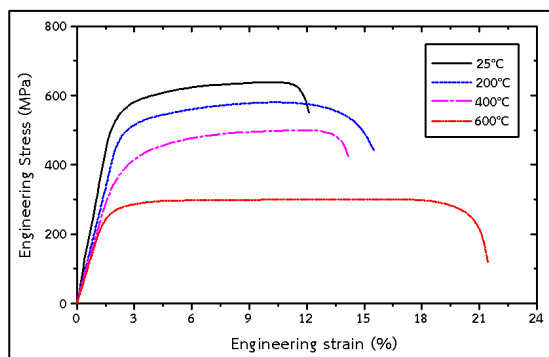
โดย ESH คือ ค่าดัชนีความเครียดเชิงของขอบตัดเฉือน H_v คือ ความแข็งระดับจุลภาคบนขอบตัดเฉือนและบริเวณใกล้กับขอบตัดซึ่งได้รับผลกระทบจากการตัดเฉือน ส่วน H_{vbase} คือความแข็งระดับจุลภาคของโลหะแผ่นก่อนการตัดเฉือน ซึ่งค่า H_v และ H_{vbase} ได้มาจากการวัดความแข็งแบบวิกเกอร์

2.2 ข้อกำหนดการทดลอง

โลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงชนิดเฟสคู่เกรด DP590 ขนาดความหนา 1 มม. ถูกตัดเตรียมในทิศทางขวางแนวการรีดเพื่อการบีมัดโดยใช้แม่พิมพ์ตัดแผ่นเปล่า (Blanking die) ซึ่งชิ้นงานสำเร็จมีรูปร่างเป็นแผ่นกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร โดยผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยสเปกโตรมิเตอร์ (Spectrometer) แสดงดังตารางที่ 1 ส่วนสมบัติทางกลของชิ้นงานได้จากการทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน DIN EN 10002-1 ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงอเนกประสงค์รุ่น Zwick /2020 ที่อุณหภูมิห้อง (25°C), 200°C, 400°C และ 600°C แสดงดังรูปที่ 2

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงชนิดเฟสคู่ เกรด DP590

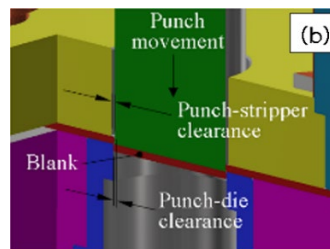
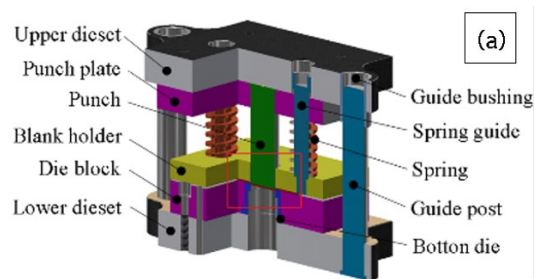
C (%)	Mn (%)	Si (%)	P (%)	Cr (%)
0.1766	1.3858	1.4262	0.0190	0.0306



รูปที่ 2 กราฟความเค้น-ความเครียดทางวิศวกรรมของชิ้นงานที่ได้จากการทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิแตกต่างกัน

ในการทดสอบการดัดเฉือนโลหะแผ่นจะดำเนินการโดยใช้แม่พิมพ์ตัดแผ่นเปล่า (Blanking die) ติดตั้งบนเครื่องบีบอัดโลหะชนิดเพลาคอเหวี่ยง (Crank press) ขนาด 50 kN ส่วนรายละเอียดของส่วนประกอบแม่พิมพ์ตัดแผ่นเปล่าที่ใช้ในการทดลองแสดงดังรูปที่ 3(a), (b) โดยพunchและดายจะทำจากเหล็กกล้า

เครื่องมืองานเย็น SKD 11 และทำการชุบแข็งที่ความแข็ง 65 ± 2 HRC เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบีมัดและทนทานต่อการสึกหรอ ส่วนแผ่นกดชิ้นงาน (Blank holder) จะถูกกดยึดด้วยสปริง สำหรับงานวิจัยนี้ได้กำหนดระยะช่องว่างคมตัดของแม่พิมพ์ (Clearance) ที่ 3 ระดับคือร้อยละ 5, 8 และ 10 ของความหนาแผ่นโลหะตามลำดับ โดยออกแบบให้ดายเป็นขนาดคงที่และออกแบบพunchให้มีขนาดความโตแตกต่างกันจำนวน 3 ขนาด เพื่อให้ได้ระยะช่องว่างคมตัดตามที่กำหนด



รูปที่ 3 (a) ภาพประกอบแม่พิมพ์ตัด (b) ภาพขยายของพunch-ดาย และระยะช่องว่างคมตัด

2.3 ขั้นตอนการทดลอง

ในการทดสอบการบีมัดแผ่นเปล่าด้วยแม่พิมพ์ตัด ชุดดายเซ็ทด้านบนและด้านล่างจะถูกยึดติดกับแผ่นยึดแม่พิมพ์ของเครื่องบีบอัดโลหะ ดังนั้น เมื่อแรม (Ram) ของเครื่องบีบโลหะเคลื่อนที่ลงจะเกิดแรงกระทำที่แม่พิมพ์ซึ่งแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ แรงที่ส่งถ่ายไปยังพunchเพื่อการบีมัดชิ้นงานและแรงที่ส่งถ่ายไปยังสปริงเพื่อกดและปลดแผ่นโลหะ ส่วนโลหะแผ่นชิ้นทดสอบจะถูกอบให้ความร้อนภายในเตาอบไฟฟ้าซึ่งจะติดตั้งไว้ในพื้นที่เดียวกับเครื่องบีบโลหะโดยจะทำการควบคุมอุณหภูมิให้

เที่ยงตรงและคงที่ตลอดการทดลองด้วยระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (Proportional Integral Derivative Control; PID) ซึ่งชิ้นงานจะถูกนำไปวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) ตรวจสอบขนาดความสูงส่วนต่าง ๆ ของขอบตัดเฉือนและรูปแบบการแตกหักด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยายต่ำ (OM) และกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (LOM)

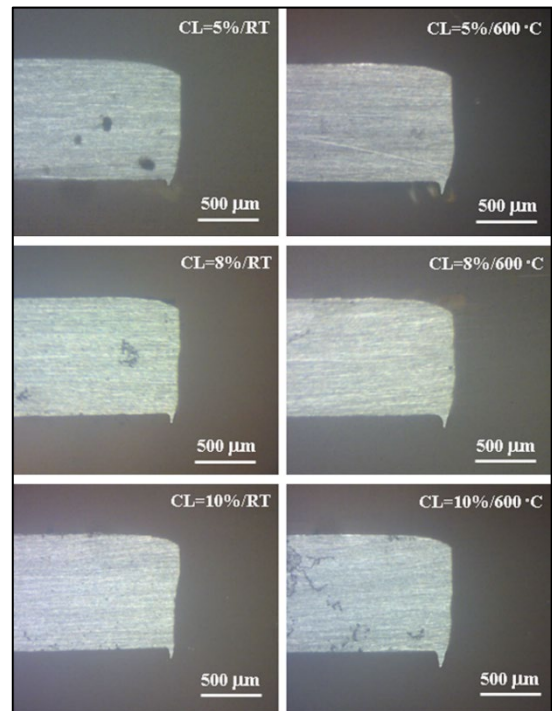
ชิ้นทดสอบที่ได้จากการบีบอัดจะแบ่งรูปแบบการตรวจสอบลักษณะและขนาดของขอบตัดเฉือนเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 จะนำชิ้นทดสอบไปถ่ายภาพด้านข้างของขอบตัดด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยายต่ำ (OM) และตรวจสอบลักษณะของพื้นผิวรอยแตกโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) ส่วนที่ 2 จะนำชิ้นทดสอบไปหล่อด้วยเรซินเพื่อวิเคราะห์ลักษณะขอบตัดในแนวภาคตัดขวาง โดยการขัดผิวเรียบด้วยกระดาษทรายเบอร์ 320–1,200 และทำการวิเคราะห์ลักษณะขอบตัดโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (LOM) ส่วนการวิเคราะห์ค่าความเครียดเชิงบริเวณขอบตัด ได้นำชิ้นงานไปวัดค่าความแข็งด้วยเครื่องวัดความแข็งแบบวิกเกอร์ในแนวขนานกับขอบตัดเฉือน (SZ) และในแนวตั้งฉากกับรอยตัดเฉือน (SAZ) ที่ระยะทางห่างกันทุกๆ 0.2 มม. ด้วยแรงกดขนาด 100 gf. และกดค้างไว้เป็นเวลา 5 วินาที และนำค่าความแข็งที่วัดได้ไปคำนวณหาค่าความเครียดแข็ง

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

3.1. ลักษณะและรูปร่างของขอบตัด

ลักษณะขอบตัดเฉือนชิ้นทดสอบที่ได้จากการบีบอัดโลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงที่มีอุณหภูมิและระยะช่องว่างคมตัดแตกต่างกัน โดยการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยายต่ำ (OM) และกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (LOM) แสดงให้เห็นถึงส่วนต่างๆ บนขอบตัดเฉือนซึ่งประกอบไปด้วย

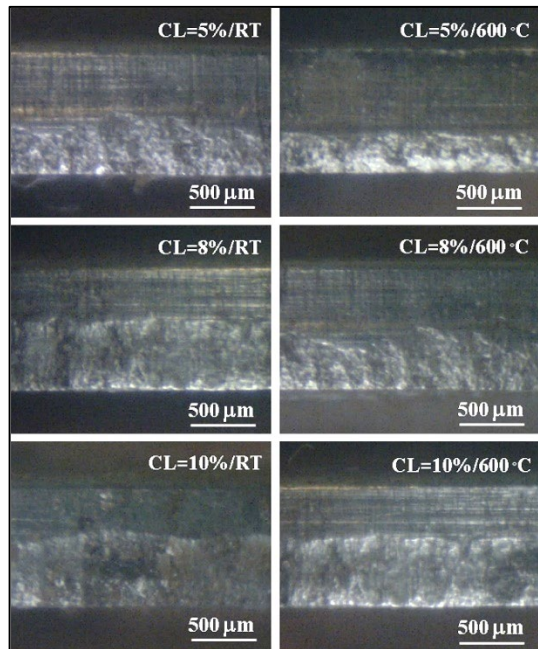
1. ความกว้างและความสูงของส่วนโค้งมนและความสูงครีบ สามารถตรวจสอบและวัดขนาดได้ชัดเจนจากมุมมองภาคตัดขวางของชิ้นทดสอบดังรูปที่ 4 เพื่อการวัดค่าความกว้างและความสูงของส่วนโค้งมนและความสูงครีบของชิ้นทดสอบที่ได้จากการบีบอัดโดยใช้แม่พิมพ์ที่มีระยะช่องว่างคมตัดและอุณหภูมิการตัดเฉือนที่แตกต่างกัน



รูปที่ 4 ลักษณะภาคตัดขวางชิ้นทดสอบจากการตัดเฉือนด้วยระยะช่องว่างคมตัดและอุณหภูมิที่แตกต่างกัน

2. ค่าความสูงของส่วนเรียบตรงและส่วนรอยแตก สามารถตรวจสอบได้ชัดเจนจากภาพด้านข้างของขอบตัดดังรูปที่ 5 ซึ่งแสดงภาพด้านข้างของขอบตัดที่ได้จากการบีบอัดด้วยแม่พิมพ์ที่มีระยะช่องว่างคมตัดและอุณหภูมิการตัดเฉือนที่แตกต่างกัน โดยค่าความสูงของส่วนเรียบตรงจะได้รับการวัดค่าความสูงโดยรวมของส่วนโค้งมนและส่วนเรียบตรงจากภาพด้านข้างและนำมัลด้วยค่าความสูงของส่วนโค้งมนที่ได้จากการวัดจาก

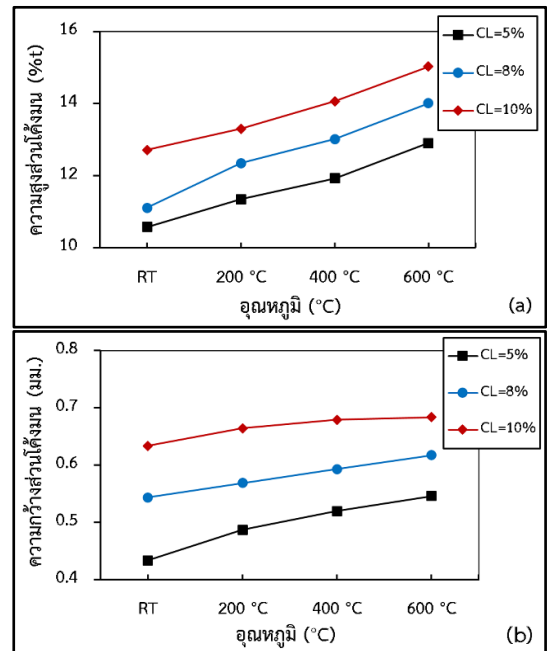
ภาพภาคตัดขวาง ส่วนค่าความสูงของส่วนรอยแตกจะใช้วิธีการนำเอาค่าความหนาของชิ้นทดสอบ (1 มม.) มาลบด้วยค่าความสูงของส่วนโค้งมนและส่วนเรียบตรง



รูปที่ 5 ภาพด้านข้างขอบตัดชิ้นทดสอบเพื่อการวัดค่าความสูงส่วนเรียบตรงและส่วนรอยแตก

3. รายละเอียดและรูปแบบของพื้นผิวรอยแตกสามารถตรวจสอบได้จากมุมมองภาพด้านข้างของชิ้นทดสอบโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เพื่อการวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบถึงรูปแบบการแตกหักบนขอบตัดชิ้นทดสอบที่ได้จากการตัดที่อุณหภูมิแตกต่างกัน

จากรายละเอียดผลการทดลองพบว่า ค่าความสูงของส่วนโค้งมนจะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิชิ้นทดสอบและระยะช่องว่างคมตัดเพิ่มมากขึ้นดังผลการทดลองรูปที่ 6(a) เช่นชิ้นทดสอบที่ได้จากการตัดเฉือนด้วยแม่พิมพ์ที่มีระยะช่องว่างคมตัด 5%t ที่อุณหภูมิห้อง (25 °C) ความสูงส่วนโค้งมนจะอยู่ที่ 10.58% ของความหนาโลหะแผ่นและความสูงส่วนโค้งมนจะเพิ่มขึ้นเป็น 12.91% เมื่อทำการตัดเฉือนที่อุณหภูมิ 600 °C และยัง



รูปที่ 6 (a) ความสัมพันธ์ของความสูงส่วนโค้งมนกับอุณหภูมิและช่องว่างคมตัด (b) ความสัมพันธ์ของความกว้างส่วนโค้งมนกับอุณหภูมิและช่องว่างคมตัด

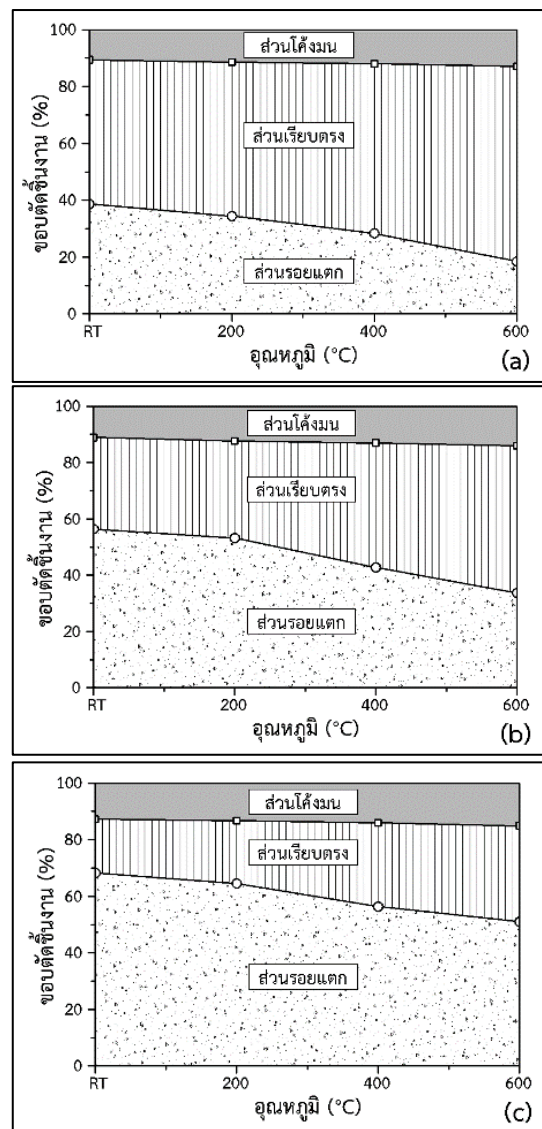
พบว่าความสูงของส่วนโค้งมนจะเพิ่มมากขึ้นหากทำการบีมัดด้วยแม่พิมพ์ที่มีระยะช่องว่างคมตัดเพิ่มมากขึ้น ดังเช่นการบีมัดที่อุณหภูมิ 600 °C ด้วยแม่พิมพ์ที่มีระยะช่องว่างคมตัด 5%t ได้ขนาดความสูงโค้งมน 12.91% เมื่อระยะช่องว่างคมตัดเพิ่มขึ้นเป็น 10%t จะพบว่าค่าความสูงของส่วนโค้งมนจะเพิ่มขึ้นเป็น 15.03% เป็นต้น ในส่วนความกว้างส่วนโค้งมนจะขึ้นอยู่กับระยะการตัดตัวของโลหะแผ่น ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างช่องว่างคมตัดของฟันซ์และตาย ซึ่งจะตรวจสอบโดยการวัดระยะในทิศทางแนวนอนระหว่างจุดเริ่มต้นของส่วนโค้งจนถึงจุดเริ่มต้นของส่วนเรียบตรง โดยรายละเอียดผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 6(b) ซึ่งพบว่าค่าความกว้างของส่วนโค้งมนจะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิชิ้นทดสอบและระยะห่างช่องว่างคมตัดเพิ่มมากขึ้น เช่นชิ้นทดสอบที่ได้จากการตัดด้วยแม่พิมพ์ที่มีระยะช่องว่างคมตัด 8%t ที่อุณหภูมิห้อง (25 °C) จะมีค่าความกว้างของ

ส่วนโค้งมน 0.544 มม. และจะเพิ่มเป็น 0.618 มม. เมื่อทำการบีบอัดที่อุณหภูมิ 600 °C ดังนั้น จึงเห็นได้ว่าค่าความสูงและความกว้างของส่วนโค้งมนจะแปรผันตามระยะช่องว่างคมตัดและอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากระยะช่องว่างคมตัดที่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้เกิดการกระจายตัวของค่าความเค้นมากกว่าทำให้ต้องใช้ระยะในการกดอัดมากขึ้นเพื่อเอาชนะความแข็งแรงของวัสดุ รวมทั้งอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลทำให้วัสดุมีค่าความเหนียวหรือมีคุณสมบัติด้านความยืดหยุ่นเพิ่มมากขึ้น จึงส่งผลทำให้การตัดเฉือนเกิดขึ้นช้าลง

ส่วนเรียบตรงบนขอบตัดเกิดขึ้นจากแรงอัดระหว่างพันธกับแผ่นขึ้นงาน ซึ่งพบว่าค่าความสูงของส่วนเรียบตรงจะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิขึ้นทดสอบเพิ่มมากขึ้นและเมื่อระยะช่องว่างคมตัดแคบลง ส่วนกลไกการเกิดรอยแตกกว้างที่ขอบตัดเมื่อพิจารณาลักษณะขอบตัดที่ได้จากการบีบอัดที่อุณหภูมิห้อง จะพบว่ารอยแตกกว้างจะเริ่มก่อตัวเป็นรอยแตกขนาดเล็กต่อเนื่องจากการเกิดส่วนเรียบตรงซึ่งมีทิศทางขนานไปกับระนาบการเฉือนของโลหะแผ่น เมื่อระยะการกดอัดเพิ่มมากขึ้นซึ่งจะส่งผลให้รอยแตกดังกล่าวขยายตัวผ่านชั้นความหนาของวัสดุเกิดเป็นรอยฉีกขาดขนาดใหญ่ ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของส่วนต่างๆ บนขอบตัดเมื่อเปรียบเทียบกับความสูงโดยรวมของขอบตัด ซึ่งได้จากการบีบอัดด้วยแม่พิมพ์ที่มีระยะช่องว่างคมตัด 5%t 8%t และ 10%t แสดงไว้ในรูปที่ 7(a), (b) และ (c) ตามลำดับ

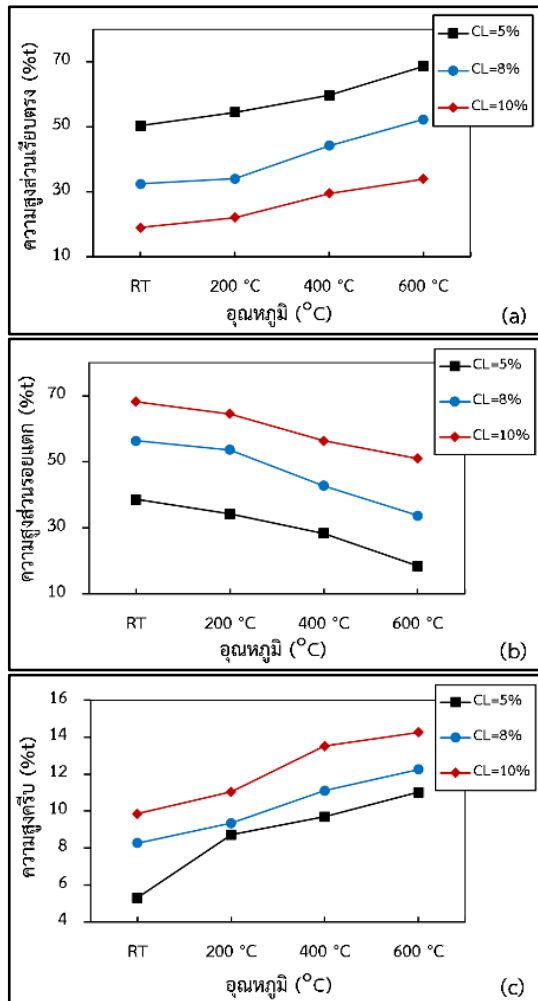
ผลการวัดค่าความสูงของส่วนเรียบตรงบนขอบตัด ที่ได้จากการบีบอัดด้วยแม่พิมพ์ที่มีระยะช่องว่างคมตัดและอุณหภูมิการตัดเฉือนที่แตกต่างกันแสดงดังรูปที่ 8(a) พบว่าค่าความสูงของส่วนเรียบตรงจะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มมากขึ้น เช่น ขึ้นทดสอบที่ได้จากการตัดเฉือนด้วยแม่พิมพ์ที่มีระยะช่องว่างคมตัด 10%t ที่อุณหภูมิห้อง (25 °C) มีค่าความสูงของส่วนเรียบตรง 19.05% ของความหนาโลหะแผ่น และความ

สูงของส่วนเรียบตรงจะเพิ่มขึ้นเป็น 33.95% เมื่อทำการตัดเฉือนที่อุณหภูมิ 600 °C แต่ทั้งนี้ยังพบว่าอัตราความสูงของส่วนเรียบตรงจะลดลงเมื่อแม่พิมพ์มีระยะช่องว่างคมตัดเพิ่มมากขึ้น เช่น การตัดเฉือนที่อุณหภูมิ 600 °C ด้วยแม่พิมพ์ที่มีระยะช่องว่างคมตัด 5%t ได้ค่าความสูงส่วนเรียบตรง 68.62% และเมื่อระยะช่องว่างคมตัดเพิ่มขึ้นเป็น 10%t จะส่งผลให้ความสูงของส่วนเรียบตรงจะลดลงเหลือ 33.95% เป็นต้น



รูปที่ 7 อัตราความสูงส่วนต่าง ๆ บนขอบตัด

(a) Cl=5%t (b) Cl=8%t และ (c) Cl=10%t



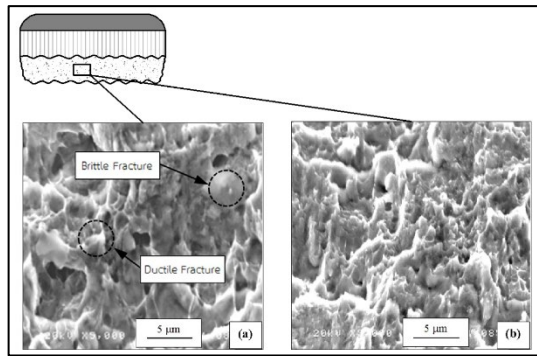
รูปที่ 8 อัตราส่วนความสูงส่วนต่าง ๆ บนขอบตัด (%t)
(a) ส่วนเรียบตรง (b) ส่วนรอยแตก และ (c) ส่วนครีบ

ส่วนการเกิดรอยแตกบนขอบตัดซึ่งมีลักษณะพื้นผิวที่ขรุขระจากการฉีกขาดของวัสดุที่เกิดขึ้นต่อเนื่องหลังจากการเกิดส่วนเรียบตรง ซึ่งการทดลองนี้ได้ทำการวัดค่าความสูงของส่วนรอยแตกจากภาพตัดขวางในทิศทางขนานกับแนวขอบตัด จากจุดสุดท้ายของส่วนเรียบตรงไปจนถึงระนาบผิวด้านล่างของโลหะแผ่น โดยผลการทดลองจะแสดงดังรูปที่ 8(b) ซึ่งพบว่าความสูงของส่วนรอยแตกมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิการตัดเฉือนเพิ่มสูงขึ้น เช่นการตัดเฉือนด้วยแม่พิมพ์ที่มีระยะช่องว่างคมตัด 8%t ที่อุณหภูมิห้อง (25 °C) ได้ค่าความ

สูงส่วนรอยแตก 56.4% ของความหนาโลหะแผ่นและความสูงของส่วนรอยแตกจะลดลงเหลือ 33.72% เมื่อทำการตัดเฉือนที่อุณหภูมิ 600 °C อย่างไรก็ตาม จากผลการทดลองยังพบว่าค่าความสูงของส่วนรอยแตกมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อระยะห่างของช่องว่างคมตัดเพิ่มมากขึ้น ดังตัวอย่างผลการทดสอบของแม่พิมพ์ที่มีระยะช่องว่างคมตัด 5%t ที่อุณหภูมิ 200 °C พบว่าส่วนรอยแตกจะอยู่ที่ 34.2% และความสูงของส่วนรอยแตกจะเพิ่มขึ้นเป็น 53.62% และ 64.55% เมื่อระยะช่องว่างคมตัดเพิ่มขึ้นที่ 8%t และ 10%t ตามลำดับ

นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่ออุณหภูมิการตัดเฉือนและระยะช่องว่างคมตัดเพิ่มสูงขึ้นยังส่งผลทำให้ชิ้นทดสอบมีค่าความสูงครีบเพิ่มมากขึ้นอีกด้วย ซึ่งผลการตรวจสอบค่าความสูงของครีบที่ขอบตัดชิ้นทดสอบแสดงรายละเอียดดังรูปที่ 8(c) ในการตรวจสอบค่าความสูงของครีบได้ดำเนินการด้วยวิธีการวัดค่าความสูงโดยรวมจากภาพด้านข้างของชิ้นทดสอบ โดยกำหนดจุดเริ่มต้นที่ระนาบผิวด้านบนของโลหะแผ่นจนถึงปลายสุดของครีบและลบด้วยค่าความหนาของแผ่นชิ้นทดสอบ (1 มม.) ซึ่งผลการตรวจสอบพบว่าค่าความสูงครีบมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิการตัดเฉือนและระยะช่องว่างคมตัดเพิ่มมากขึ้น ดังผลการตรวจสอบค่าความสูงครีบของชิ้นทดสอบที่ได้จากการตัดเฉือนด้วยแม่พิมพ์ที่มีระยะช่องว่างคมตัด 10%t ที่อุณหภูมิห้อง (25 °C) ความสูงครีบจะอยู่ที่ 9.86% ของความหนาโลหะแผ่น โดยความสูงครีบจะเพิ่มเป็น 14.27% เมื่อทำการตัดเฉือนที่อุณหภูมิ 600 °C ในทำนองเดียวกันจากตัวอย่างผลการตัดเฉือนที่อุณหภูมิ 400 °C ด้วยแม่พิมพ์ที่มีระยะช่องว่างคมตัด 5%t จะมีความสูงครีบ 9.69% และความสูงครีบเพิ่มขึ้นเป็น 13.52% เมื่อทำการตัดเฉือนด้วยแม่พิมพ์ที่มีระยะช่องว่างคมตัด 10%t

จากผลการทดลองพบว่าคุณภาพของขอบตัดมีความสัมพันธ์โดยตรงกับอุณหภูมิการตัดเฉือน เนื่องจากการตัดเฉือนที่อุณหภูมิห้องจะเกิดการขยายตัวของรอย



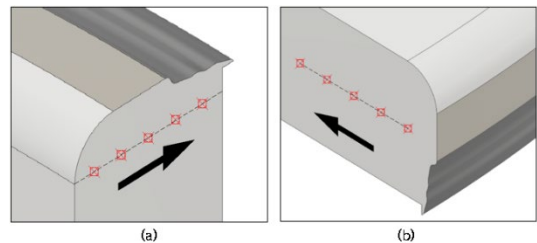
รูปที่ 9 ลักษณะพื้นผิวรอยแตก (a) การตัดเฉือนที่อุณหภูมิห้อง (b) การตัดเฉือนที่อุณหภูมิ 600 °C

แตกที่ไม่เสถียร โดยจะมีรอยแตกขนาดเล็กเกิดขึ้นในบริเวณของส่วนเรียบตรงบนขอบตัด ซึ่งจะทำให้เนื้อวัสดุซึ่งเป็นอนุภาคขนาดเล็กหลุดออกจากพื้นผิวส่วนเรียบตรง ซึ่งสังเกตได้ชัดเจนจากการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) นอกจากนี้ยังพบว่าระดับของอุณหภูมิการตัดเฉือนยังส่งผลต่อลักษณะของพื้นผิวรอยแตกดังรายละเอียดในรูปที่ 9 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงลักษณะของพื้นผิวรอยแตกด้วยภาพถ่ายที่กำลังขยายสูง เพื่อใช้เป็นข้อมูลเชิงลึกในการวิเคราะห์ผลเกี่ยวกับกลไกการแตกหักของโลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงชนิดเฟสคู่ จากรูปที่ 9(a) แสดงให้เห็นถึงลักษณะพื้นผิวรอยแตกของชิ้นทดสอบซึ่งได้จากการตัดด้วยแม่พิมพ์ที่มีระยะช่องว่างคมตัด 5%t จะเห็นได้ว่าการบีบอัดที่อุณหภูมิห้อง (25 °C) พื้นผิวรอยแตกหักจะมีลักษณะเป็นหลุมตื้นๆ ขนาดเล็กและมีความสูงน้อย ซึ่งเป็นรูปแบบของการแตกหักแบบเปราะ ส่วนรูปที่ 9(b) แสดงให้เห็นถึงลักษณะพื้นผิวรอยแตกบนขอบตัดชิ้นทดสอบที่อุณหภูมิ 600 °C ซึ่งจะพบว่าพื้นผิวรอยแตกมีลักษณะเป็นหลุมลึกและมียอดผิวสูง ซึ่งแสดงให้เห็นได้ชัดเจนว่าวัสดุจะมีรูปแบบการแตกหักแบบเหนียวมากขึ้น

3.2. การกระจายตัวของค่าความเครียดเชิง

ชิ้นทดสอบที่ได้จากการบีบอัดด้วยแม่พิมพ์ที่มีระยะช่องว่างคมตัดและที่อุณหภูมิแตกต่างกันถูกนำไป

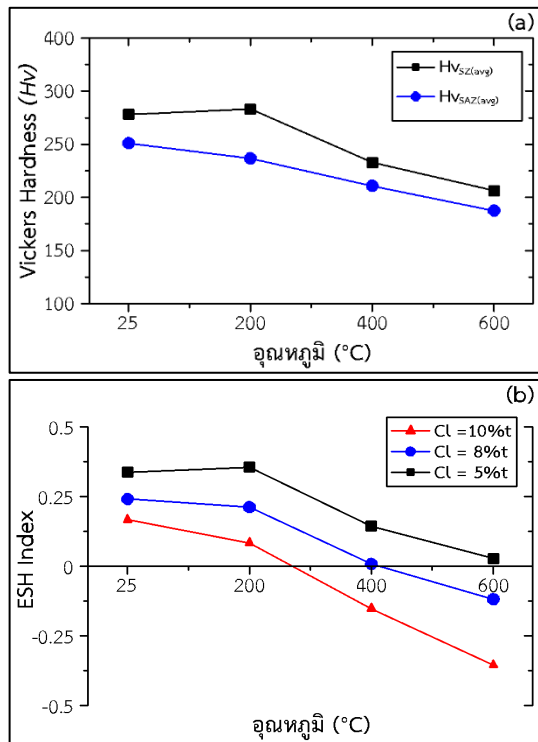
จับยึดเพื่อกำหนดตำแหน่งการทดสอบค่าความแข็งแรงวิกเกอร์โดยเครื่องวัดความแข็งแรงแบบจุลภาค (Micro-hardness tester) ใน 5 ตำแหน่งซึ่งมีระยะห่างจากขอบตัดที่แตกต่างกันและคำนวณเป็นค่าความแข็งแรงเฉลี่ย ซึ่งรูปแบบการกำหนดตำแหน่งการทดสอบค่าความแข็งแรงในแนวนานกับขอบตัดเฉือน (SZ) จะทำการกำหนดจุดทดสอบดังรูปที่ 10(a) ส่วนการตรวจสอบค่าความแข็งแรงในแนวตั้งฉากกับขอบตัดเฉือน (SAZ) จะทำการกำหนดจุดทดสอบดังรูปที่ 10(b) โดยโลหะแผ่นก่อนการตัดเฉือนที่อุณหภูมิปกติมีค่าความแข็งแรงที่ 200 Hv. จากนั้นนำผลการวัดค่าความแข็งแรงไปคำนวณหาค่าดัชนีของความเครียดเชิง (ESH) จากสมการ (1)



รูปที่ 10 การกำหนดตำแหน่งและทิศทางการทดสอบความแข็งแรง (a) แนวนานกับขอบตัดเฉือน (b) แนวตั้งฉากกับขอบตัดเฉือน

ผลการวัดค่าความแข็งแรงของชิ้นทดสอบจากการบีบอัดด้วยแม่พิมพ์ที่มีระยะช่องว่างคมตัด 5%t ดังรูปที่ 11 (a) พบว่าค่าความแข็งแรงของวัสดุจะมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิการตัดเฉือนเพิ่มสูงขึ้นในทั้งสองทิศทาง โดยชิ้นทดสอบที่ได้จากการบีบอัดที่อุณหภูมิห้อง (25 °C) มีค่าความแข็งแรงเฉลี่ยในแนวนานกับขอบตัดเฉือน (SZ) คือ 278 HV และจะลดลงเหลือ 203 Hv เมื่อทำการตัดเฉือนที่อุณหภูมิ 600 °C เช่นเดียวกับค่าความแข็งแรงในแนวตั้งฉากกับขอบตัดเฉือน (SAZ) พบว่าที่อุณหภูมิห้อง (25 °C) มีค่าความแข็งแรงเฉลี่ยที่ 250 HV และจะลดลงเหลือ 187 Hv เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นที่ 600 °C โดยค่าความแข็งแรงของโลหะแผ่นก่อนการตัดเฉือนที่อุณหภูมิห้อง (25 °C) จะถูกใช้เป็นค่าความแข็งแรงอ้างอิง (HV_{base}) เพื่อการ

คำนวณค่าดัชนีความเครียดแข็ง (ESH) ทั้งนี้ผลการคำนวณค่าดัชนีความเครียดแข็งของชิ้นทดสอบภายหลังการบีบอัดด้วยแม่พิมพ์ที่มีระยะช่องว่างคมตัดและอุณหภูมิแตกต่างกันแสดงดังรูปที่ 11(b)



รูปที่ 11 (a) ความแข็งเฉลี่ยในแนวนานและตั้งฉากกับขอบตัดเฉือนที่ระยะช่องว่างคมตัด 5%t (b) ค่าดัชนีความเครียดแข็งในแนวนานกับขอบตัดเฉือนที่ระยะช่องว่างคมตัดต่าง ๆ

โดยดัชนีของความเครียดแข็งที่แสดงค่าเป็นบวกบ่งชี้ว่าหลังการตัดเฉือนได้มีความเครียดแข็งเกิดขึ้นบริเวณขอบตัด โดยค่าดัชนีความเครียดแข็งจะมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิการตัดเฉือนเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้หากค่าดัชนีความเครียดแข็งหลังการขึ้นรูปมีค่าเป็นลบจะบ่งชี้ว่าวัสดุดังกล่าวไม่มีผลกระทบด้านความเครียดหรือหลังการขึ้นรูปโลหะแผ่นมีค่าความแข็งต่ำกว่าค่าความแข็งอ้างอิง โดยพบในชิ้นทดสอบที่ได้จากการตัดเฉือนที่อุณหภูมิ 600 °C ด้วยแม่พิมพ์ที่มีระยะช่องว่างคมตัด 8%t และ

ชิ้นทดสอบที่ได้จากการตัดเฉือนที่อุณหภูมิ 400 °C และ 600 °C ด้วยแม่พิมพ์ที่มีระยะช่องว่างคมตัด 10%t เนื่องจากค่าความร้อนของชิ้นทดสอบในช่วงอุณหภูมิดังกล่าวสามารถเอาชนะพฤติกรรมความเค้นจากการเปลี่ยนรูปของวัสดุ จึงส่งผลให้ค่าดัชนีของความเครียดแข็งมีค่าเป็นลบ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิการตัดเฉือนได้ส่งผลอย่างชัดเจนต่อค่าดัชนีของความเครียดแข็งของชิ้นทดสอบหลังการบีบอัดขึ้นรูป

4. สรุปผล

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิและระยะช่องว่างคมตัดที่ส่งผลต่อลักษณะขอบตัดขึ้นงานสำเร็จโลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงชนิดเฟสคู่ จากการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

1. อุณหภูมิการการตัดเฉือนจะส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพขอบตัดขึ้นงานสำเร็จ คือ เมื่ออุณหภูมิการตัดเฉือนเพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้ค่าความสูงของส่วนโค้งมน ส่วนเรียบตรง และส่วนของครีบ มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น ขณะที่ความสูงของส่วนรอยแตกมีแนวโน้มลดลง

2. อุณหภูมิการการตัดเฉือนจะส่งผลต่อลักษณะพื้นผิวรอยแตก โดยพบว่าการตัดเฉือนที่อุณหภูมิต่ำส่งผลให้พื้นผิวรอยแตกมีลักษณะการแตกแบบเปราะ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นลักษณะของพื้นผิวรอยแตกจะมีลักษณะของการแตกแบบเหนียวมากขึ้น

3. อุณหภูมิการตัดเฉือนส่งผลต่อค่าดัชนีความเครียดแข็งบริเวณขอบตัด ซึ่งพบว่าเมื่ออุณหภูมิการตัดเฉือนเพิ่มสูงขึ้น จะส่งผลให้ค่าดัชนีความเครียดแข็งมีแนวโน้มลดลง แสดงให้เห็นว่าบริเวณขอบตัดเฉือนจะไม่ได้รับผลกระทบจากค่าความเครียดแข็งเมื่อทำการตัดเฉือนที่อุณหภูมิสูง

4. ระยะช่องว่างคมตัดส่งผลต่อลักษณะขอบตัดและความเครียดแข็งบริเวณขอบตัด ซึ่งพบว่าเมื่อระยะช่องว่างคมตัดเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ส่วนโค้งมน ส่วนรอยแตก และส่วนของครีบบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ขณะที่

ความสูงของส่วนเรียบตรง และดัชนีความเครียดแข็งมีแนวโน้มลดลง

ดังนั้นสภาวะการบีบอัดแผ่นเปล่าที่อุณหภูมิสูง ไม่เพียงแต่ช่วยในการปรับปรุงคุณภาพขอบตัดเท่านั้น แต่ยังช่วยในการลดแรงตัดและเพิ่มความสามารถการขึ้นรูปในขั้นตอนถัดไปได้อีกด้วย

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณอาจารย์และเจ้าหน้าที่สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมการผลิต คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี ที่อนุเคราะห์เครื่องมือ เครื่องจักร และอุปกรณ์ในการดำเนินการวิจัย รวมทั้งขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้การสนับสนุนงบประมาณในการดำเนินการวิจัย งานวิจัยฉบับนี้ดำเนินการสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Konieczny and T. Henderson, "On Formability Limitations in Stamping Involving Sheared Edge Stretching," *SAE Tech*, 2007.
- [2] S. F. Golovashchenko, "Quality of Trimming and its Effect on Stretch Flanging of Automotive Panels," *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 17, pp. 316-325, 2008.
- [3] Z. Mingqing, C. L. Yixian, L. Xiaochuan and C. Zhaocheng, "Numerical forming limit prediction for the optimisation of initial blank shape in hot stamping of AA7075," *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, vol. 4, pp. 269-280, 2021.
- [4] F. Sergey, N. Wang and L. Quochung, "Trimming and sheared edge stretchability of automotive 6xxx aluminum alloys," *Journal of Materials Processing Tech*, vol. 264, pp. 64-75, 2019.
- [5] S. Golovashchenko, W. Zhou, S. Naseri, and N. Wang, "Trimming and Sheared Edge Stretchability of Light Weight Sheet Metal Blanks," *Procedia Engineering*, vol. 207, pp. 1552-1557, 2017.
- [6] M. Bolin, Z. G. Liu, Z. Jiang, X. Wu, K. Diao and M. Wa, "Prediction of forming limit in DP590 steel sheet forming: An extended fracture criterion," *Materials and Design*, vol. 96, pp. 401-408, 2016.
- [7] J. H. Kim, J. H. Sung, K. Piao and R. H. Wagoner, "The shear fracture of dual-phase steel," *International Journal of Plasticity*, vol. 27, no. 1, pp. 1658-1676, 2011.
- [8] L. Pan, J. Xiong, Z. Zuo, W. Tan, J. Wang and W. Yu, "Study of the stretch-flangeability improvement of dual phase steel," *Procedia Manufacturing*, vol. 50, pp. 761-764, 2020.
- [9] B. L. Ennis, C. Bos, M. P. Aarnts, P. D. Lee and E. Jimenez-Melero, "Work hardening behaviour in banded dual phase steel structures with improved formability," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 713, pp. 278-286, 2018.
- [10] D. Parkes, D. Westerbaan, S.S. Nayak, Y. Zhou, F. Goodwin, S. Bhole and D.L. Chen, "Tensile properties of fiber laser welded joints of high strength low alloy and dual-

- phase steels at warm and low temperatures,” *Materials and Design*, vol. 56, pp. 193–199, 2014.
- [11] G. Nürnberg, X. Jing, D. Scherer, K. Ersoy-Nürnberg, R. Golle, J. Bohlen, L. Fuskova, D. Letzig and H. Hoffmann, “Improving the sheared edge in the blanking of commercial AZ31 sheet through texture modification,” *Journal of Material Processing Technology*, vol. 211, pp. 2022–2031, 2011.
- [12] L. D. Scintilla and L. Tricarico, “Experimental investigation on fiber and CO₂ inert gas fusion cutting of AZ31 magnesium alloy sheets,” *Optics & Laser Technology*, vol. 46, pp. 42–52, 2013.
- [13] Z. Tekiner, M. Nalbant and H. Gürün, “An experimental study for the effect of different clearances on burr, smooth-sheared and blanking force on aluminium sheet metal,” *Materials and Design*, vol. 27, pp. 1134–1138, 2006.
- [14] A. Mackensen, M. Golle, R. Golle and H. Hoffmann, “Experimental investigation of the cutting force reduction during the blanking operation of AHSS sheet materials,” *CIRP Annals*, vol. 59, pp. 283–286, 2010.
- [15] K. Mori, S. Saito and S. Maki, “Warm and hot punching of ultra high strength steel sheet,” *CIRP Annals*, vol. 57, pp. 321–324, 2008.
- [16] P. Fazily, J. Yu and C. W. Lee, “Finite Element Analysis of Blanking Operation of Magnesium Alloy (AZ31) Sheet Using Ductile Fracture Criteria and Its Experimental Verification at Various Temperatures,” *Journal of Physics: Conference Series*, pp. 1063, 2018.
- [17] J. Dykeman, S. Malcolm, B. Yan, J. Chintamani, G. Huang, N. Ramiseti and H. Zhu, “Characterization of Edge Fracture in Various Types of Advanced High Strength Steel,” *SAE Technology*, 2011.
- [18] C. Butcher, D. Anderson, M. Worswick, “Predicting Failure during Sheared Edge Stretching Using a Damage-Based Model for the Shear-Affected Zone,” *SAE International Journal of Materials and Manufacturing*, vol. 6, pp. 304–312, 2013.
- [19] C. Chiriac, M. F. Shi, “Studies on Edge Strain Hardening Produced by Trimming Operations,” *SAE Technology*, 2013.

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

ผลของการใช้ตัวถูกละลายทางเลือกและอัลตราซาวด์ต่อการถ่ายโอนมวลสารของสับประรดพันธุ์ทองระยองในกระบวนการอินฟิวชันแบบแห้ง

วิชมนิ ยืนยงพุทธิกาล* ศนิ จิระสถิตย์ และ อพัชชา สวัสดิ์ผล

ภาควิชาวิทยาศาสตร์การอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

169 ถนนลงหาดบางแสน ตำบลแสนสุข อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี 20131

รับบทความ 30 ตุลาคม 2564 แก้ไขบทความ 1 พฤษภาคม 2565 ตอรับบทความ 28 มิถุนายน 2565

บทคัดย่อ

การอินฟิวชันแบบแห้งทำได้โดยการเติมน้ำตาลลงในชิ้นผลไม้โดยตรงแล้วปล่อยให้เกิดการสัมผัสกัน มีประสิทธิภาพในการดึงน้ำออกจากผลไม้ได้ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการใช้ตัวถูกละลายทางเลือกชนิดต่าง ๆ ได้แก่ น้ำตาลโอลิโกฟรุคโตส มอลโทเดกซ์ทริน และซอร์บิทอล แทนการใช้น้ำตาลซูโครส ผลการติดตามการถ่ายโอนมวลสารของสับประรดทองระยองระหว่างกระบวนการอินฟิวชันแบบแห้ง พบว่า ชนิดของตัวถูกละลายมีต่อค่าการถ่ายโอนมวลสาร โดยการใช้ซอร์บิทอลทำให้มีค่าการถ่ายโอนมวลสารสูงที่สุด ($p < 0.05$) จากการศึกษาผลของสภาวะการใช้อัลตราซาวด์เพื่อกระตุ้นการถ่ายโอนมวลสาร พบว่า การเตรียมชิ้นต้นโดยใช้อัลตราซาวด์ที่อุณหภูมิ 50 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที ร่วมด้วยเป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุด ทำให้ค่าปริมาณน้ำที่สูญเสีย (WL) ปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้น (SG) และปริมาณน้ำหนักรีดลดลง (WR) เท่ากับ ร้อยละ 37.08 6.58 และ 30.49 ตามลำดับ สับประรดกึ่งแห้งที่ผ่านการอินฟิวชันแบบแห้งได้รับคะแนนความชอบด้านลักษณะปรากฏ สี เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม มากกว่าสับประรดกึ่งแห้งที่ไม่ผ่านการอินฟิวชันแบบแห้ง ($p < 0.05$) โดยได้รับคะแนนความชอบโดยรวมอยู่ในระดับชอบปานกลาง

คำสำคัญ : อินฟิวชันแบบแห้ง; ตัวถูกละลายทางเลือก; สับประรดกึ่งแห้ง

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

Effect of Alternative Solutes and Ultrasound on Mass Transfer of Thong Rayong Pineapple in Dry Infusion Process

Wichamanee Yuenyongputtakal* Sani Jirasatid and Apatcha Sawatphon

Department of Food Science, Faculty of Science, Burapha University
169 Longhaad Bangsaen Road, Saensuk, Mueang, ChonBuri 20131

Received 30 October 2021; Revised 1 May 2022; Accepted 28 June 2022

Abstract

Dry infusion was carried out by adding sugar directly to the fruit pieces and allowing them to contact together. It was effective for removing of water from the fruit. The purpose of this research was to study the effect of using different types of alternative solutes, namely oligofructose, maltodextrin and sorbitol instead of sucrose. Mass transfer of Thong Rayong pineapple during dry infusion process showed that the solute types affect the mass transfer parameters. The use of sorbitol had the highest mass transfer value ($p < 0.05$). Effect of ultrasound assisted mass transfer was studied. The result showed that ultrasound applied at 50 ± 2 °C for 15 min was the optimum condition which enhanced Water Loss (WL), Solid Gain (SG) and Weight Reduction (WR) values of 37.08%, 6.58%, and 30.49%, respectively. Sensory scores in terms of appearance, color, texture, and overall preference of semi-dried pineapple from infusion process were more than semi-dried pineapple without dry infusion ($p < 0.05$), with a moderate overall liking score.

Keywords : Dry Infusion; Alternative Solute; Semi-dried Pineapple

* Corresponding Author. Tel.: +668 5840 6347, E-mail Address: wich@go.buu.ac.th

1. บทนำ

ผลิตภัณฑ์อาหารกึ่งแห้ง เป็นอาหารที่สามารถบริโภคได้โดยไม่ต้องนำไปคั้นตัว มีความคงตัวโดยไม่ต้องนำไปเก็บที่อุณหภูมิต่ำหรือฆ่าเชื้อด้วยความร้อน โดยผลิตภัณฑ์ผักผลไม้กึ่งแห้ง ควรมีความชื้นอยู่ในช่วง 15-40% และมีค่า a_w อยู่ในช่วง 0.65-0.90 ในการแปรรูปผลไม้กึ่งแห้งมักเตรียมขึ้นต้นด้วยการดองน้ำออกบางส่วนก่อนการอบแห้ง วิธีที่นิยมใช้คือการดองน้ำออกด้วยวิธีออสโมซิส ซึ่งทำได้โดยแช่ชิ้นผลไม้ในสารละลายออสโมติก (osmotic solution) ซึ่งเตรียมจากสารละลายความเข้มข้นสูง อย่างไรก็ตามข้อจำกัดหนึ่งของกระบวนการออสโมซิส คือ การจัดการกับสารละลายออสโมติกที่ใช้แล้วปริมาณมาก ถึงแม้จะมีแนวทางการใช้สารละลายออสโมติกให้เกิดประโยชน์สูงขึ้นได้ แต่ต้องใช้ต้นทุนเพิ่มเติม [1] การอินฟิวชันแบบแห้ง (dry infusion) ทำได้โดยการเติมน้ำตาลลงในชิ้นผลไม้โดยตรงแล้วปล่อยให้เกิดการสัมผัสกัน วิธีนี้มีประสิทธิภาพในการดึงน้ำออกจากผลไม้ได้ โดยใช้หลักการความแตกต่างทางศักย์ภาพเคมี (chemical potential gradients) ระหว่างเนื้อเยื่อผลไม้กับน้ำตาลที่เติมลงไป มีผลให้เกิดการเกิดกลไกการแพร่ของน้ำออกจากชิ้นผลไม้ได้ กระบวนการอินฟิวชันแบบแห้งจึงเป็นการดึงน้ำออกจากผลไม้วิธีหนึ่งที่สามารถลดปัญหาการเลือกทิ้งสารละลายออสโมติกปริมาณมากหลังการแช่ผลไม้ในสารละลาย [2]

การออสโมซิสนิยมแช่ผลไม้ในสารละลายซูโครสที่มีความเข้มข้นสูงเป็นระยะเวลานาน จึงทำให้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายมีรสหวานมากและเสียกลิ่นรสที่เป็นเอกลักษณ์ของผลไม้ ผลิตภัณฑ์มีโอกาสเหี่ยวและคล้ำระหว่างการทำแห้งด้วยลมร้อน อีกทั้งการบริโภคน้ำตาลปริมาณมากทำให้เกิดโรคอ้วนและโรคเบาหวาน ซึ่งเป็นปัญหาหลักด้านสุขภาพและไม่สอดคล้องกับความต้องการของผู้บริโภคในปัจจุบัน งานวิจัยนี้จึงสนใจใช้ตัวถูกละลายทางเลือกชนิดต่าง ๆ แทนการใช้น้ำตาลซูโครส ได้แก่ น้ำตาลโอลิโกฟรุคโตส (oligofructose) เป็นน้ำตาลโอลิ

โกแซคคาร์ไรด์ชนิดย่อยไม่ได้ มีสมบัติเป็น ปริโบอิดิก ให้รสหวานและพลังงานน้อยกว่าน้ำตาลซูโครสประมาณ 50% และสามารถใช้ในการดึงน้ำออกจากผลไม้ได้ [3] มอลโทเดกซ์ทริน (maltodextrin) เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยสลายให้มีความโมเลกุลเล็กลง มีรายงานว่าสามารถใช้มอลโทเดกซ์ทรินเพื่อการดึงน้ำออกจากผลไม้ได้ [4] ซอร์บิทอล (sorbitol) เป็นน้ำตาลแอลกอฮอล์ชนิดหนึ่ง ให้รสหวานน้อยกว่าน้ำตาลซูโครสประมาณ 50%-60% แต่มีสมบัติในการดูดความชื้นมากกว่า จึงช่วยลดค่า a_w ของผลิตภัณฑ์ลงได้มาก [1]

แม้กระบวนการอินฟิวชันแบบแห้งจะสามารถดึงน้ำออกจากผลไม้ได้ แต่มักใช้เวลานานในการปล่อยให้ตัวถูกละลายละลายและเกิดการถ่ายเทมวลสารจนถึงสมดุล งานวิจัยนี้สนใจใช้เทคนิคอัลตราซาวด์ (ultrasound) ร่วมด้วย เป็นการใช้พลังงานคลื่นเสียงที่มีความถี่สูงมากกว่า 20 kHz สามารถช่วยกระตุ้นการถ่ายโอนมวลสารได้เนื่องจากการเกิดปรากฏการณ์ sponge effect หรือ cavitation effect ที่เกิดจากการสั่นของคลื่น ทำให้เกิดฟองอากาศขนาดเล็กจำนวนมากในสารละลาย โดยฟองอากาศที่เกิดขึ้นและยุบตัวนี้จะกระแทกสัมผัสกับชิ้นผลไม้ ทำให้เนื้อเยื่อผลไม้เกิดรูพรุนขนาดเล็ก ซึ่งมีโอกาสเพิ่มการถ่ายโอนมวลสารได้มากขึ้น โดยการใช้อัลตราซาวด์ในระยะเวลาสั้นจะไม่ทำลายลักษณะโครงสร้างของเนื้อเยื่อผลไม้ไปมากนัก จึงยังคงมีลักษณะคล้ายของสดอยู่ [6]

งานวิจัยนี้มีแนวคิดแปรรูปสับปะรดทองระยองกึ่งแห้ง โดยสับปะรดพันธุ์ทองระยองเป็นสับปะรดพันธุ์ล่าสุดที่ได้รับการประกาศเป็นสินค้าที่มีลักษณะเฉพาะต้องบ่งชี้ทางภูมิศาสตร์ (Geographical Indication, GI) เมื่อ พ.ศ.2562 และยังไม่พบว่ามีมีการนำสับปะรดพันธุ์ทองระยองมาแปรรูปด้วยวิธีอินฟิวชันแบบแห้ง งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ดังนี้ 1) เพื่อศึกษาผลของชนิดตัวถูกละลายทางเลือกต่อการถ่ายโอนมวลสารของสับปะรดทองระยองระหว่างกระบวนการอินฟิวชันแบบแห้ง และ

2) เพื่อศึกษาผลของสภาวะการใช้อัลตราซาวด์ต่อค่าการถ่ายโอนมวลสารของสับปะรดที่ผ่านกระบวนการอินฟิวชันแบบแห้ง

2. ระเบียบวิธีวิจัย

นำสับปะรดพันธุ์ทองระยอง น้ำหนักประมาณ 400 กรัมต่อผล มีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ 18-20 องศาบริกซ์ หั่นเป็นแว่นหนาประมาณ 2 เซนติเมตร ใช้พิมพ์สแตนเลสแบบกลม เส้นผ่านศูนย์กลาง 8 เซนติเมตร กดตัดเพื่อแยกส่วนเปลือกและตาออก แล้วหั่นเนื้อสับปะรดเป็นชิ้นคล้ายสามเหลี่ยม แว่นละ 4 ชิ้น โดยไม่ตัดส่วนแกนออก ล้างด้วยน้ำสะอาด แล้วลวกด้วยไอน้ำเพื่อป้องกันการเกิดสีน้ำตาล โดยการนึ่งในลังถึง เป็นเวลา 5 นาที แล้วปล่อยให้เย็นบนตะแกรง [7]

2.1 การศึกษาผลของชนิดตัวถูกละลายต่อค่าการถ่ายโอนมวลสารระหว่างกระบวนการอินฟิวชันแบบแห้ง

ตัวถูกละลายที่ใช้ ได้แก่ น้ำตาลซูโครส (ตราลิน, ประเทศไทย) โอลิโกฟรุคโตส (P95, Beneo ORAFIT[®], ประเทศเบลเยียม) มอลโทเดกซ์ทริน (DE 10-15, บริษัท อีเบส จำกัด, ประเทศไทย) ซอร์บิทอล (บริษัท Univar Australia Pty, ประเทศออสเตรเลีย)

กระบวนการอินฟิวชันแบบแห้ง ทำได้โดยเตรียมชิ้นสับปะรดไว้ในอ่างสแตนเลสแล้วเติมตัวถูกละลายลงไป ในชิ้นสับปะรด กำหนดใช้ตัวถูกละลาย 700 กรัม/กิโลกรัม ของน้ำหนักเนื้อสับปะรด คลุกให้เข้ากันแล้วปล่อยให้ละลาย 30 นาที จากนั้นถ่ายตัวอย่างลงในถุงพลาสติกชนิด LDPE ปิดผนึกสนิท แล้วแช่ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 50 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที [8] แล้วนำตัวอย่างมาเก็บไว้ในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4 ± 2 องศาเซลเซียส จนครบเวลา 720 นาที [2]

2.2 การศึกษาผลของการใช้อัลตราซาวด์ต่อค่าการถ่ายโอนมวลสารเมื่อผ่านกระบวนการอินฟิวชันแบบแห้ง

เมื่อเลือกตัวถูกละลายที่เหมาะสมได้แล้ว นำมาคลุกกับสับปะรดให้เข้ากันตามสัดส่วนที่กำหนด บดปล่อยให้ละลาย 30 นาที ถ่ายลงในถุงพลาสติกแล้วปิดผนึกสนิทนำไปเตรียมชิ้นต้นโดยใช้เทคนิคอัลตราซาวด์ ทำได้โดยนำถุงที่บรรจุชิ้นสับปะรดไปวางลงใน ultrasonic bath ที่บรรจุน้ำไว้เป็นตัวกลาง กำหนดใช้อัลตราซาวด์ที่ความถี่ 38.5 KHz ตามเวลาที่กำหนด (15 และ 30 นาที) สำหรับสิ่งทดลองที่ใช้อุณหภูมิห้อง (28 ± 2 องศาเซลเซียส) ไม่ต้องเปิดตัวทำความร้อนของเครื่อง สำหรับสิ่งทดลองที่ต้องให้ความร้อนร่วมด้วยให้ตั้งอุณหภูมิเครื่องอัลตราซาวด์ที่ 50 ± 2 องศาเซลเซียส แล้วจึงแช่ตามเวลาที่กำหนด เปรียบเทียบกับการแช่ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิอย่างเดียวและไม่ใช้การเตรียมชิ้นต้นเลย รายละเอียดดังตารางที่ 1 หลังการเตรียมชิ้นต้นนำตัวอย่างมาเก็บไว้ในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4 ± 2 องศาเซลเซียส จนครบเวลา 720 นาที

2.3 การวิเคราะห์ค่าการถ่ายโอนมวลสาร

สุ่มตัวอย่างสับปะรดที่ผ่านการแช่ทุก 90 นาที นำสับปะรดมาล้างด้วยน้ำเพื่อกำจัดสารละลายส่วนเกินที่ผิวออกแล้วซับให้แห้งด้วยกระดาษซับ ชั่งน้ำหนักและหาปริมาณความชื้น [9] คำนวณค่าการถ่ายโอนมวลสาร ได้แก่ ปริมาณน้ำที่สูญเสีย (Water Loss; WL) ปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้น (Solid Gain; SG) และปริมาณน้ำหนักที่ลดลง (Weight Reduction; WR) จากสูตรดังนี้

$$WL(\%) = \frac{W_o M_o - W_t M_t}{W_o} \times 100$$

$$SG(\%) = \frac{[W_t(100 - M_t) - W_o(100 - M_o)]}{W_o} \times 100$$

$$WR(\%) = \frac{W_o - W_t}{W_o} \times 100$$

W_o = น้ำหนักเริ่มต้น (กรัม)

W_t = น้ำหนักหลังการแช่ (กรัม)

M_o = ปริมาณความชื้นเริ่มต้น (กรัม/100 กรัม)

M_t = ปริมาณความชื้นหลังแช่ (กรัม/ 100 กรัม)

ตารางที่ 1 สภาวะการเตรียมชิ้นต้นโดยใช้อัลตราซาวด์ที่สภาวะต่าง ๆ และการแช่ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ

สิ่งทดลอง	การแช่ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ	การใช้อัลตราซาวด์	
		อุณหภูมิ (°C)	เวลา (นาที)
USLT15	ไม่ใช้	28±2	15
USLT30	ไม่ใช้	28±2	30
USHT15	ไม่ใช้	50±2	15
USHT30	ไม่ใช้	50±2	30
WB	ใช้*	-	-
Control	ไม่ใช้	-	-

* ควบคุมอุณหภูมิที่ 50±2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที

2.4 การประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสของสับปะรดกึ่งแห้ง

นำสับปะรดที่ผ่านกระบวนการอินฟิวชันแบบแห้งตามสภาวะที่เหมาะสมที่เลือกได้ มาทำแห้งต่อด้วยการอบด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส จนมีปริมาณความชื้นอยู่ในช่วง 15-40% และมีค่า a_w อยู่ช่วง 0.65-0.90 ให้ได้เป็นผลิตภัณฑ์อาหารกึ่งแห้ง [1] สุ่มตัวอย่างมาประเมินทางประสาทสัมผัสด้วยวิธี 9-point hedonic scale ประเมินความชอบด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม ใช้ผู้บริโภคร่วมไป 30 คน

2.5 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

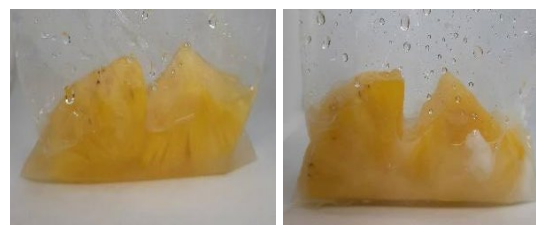
ทำการทดลอง 3 ซ้ำ วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design) สำหรับ

การวิเคราะห์ค่าคุณภาพทุกด้านยกเว้นการประเมินทางประสาทสัมผัสวางแผนการทดลองแบบสุ่มบล็อกสมบูรณ์ (Randomized Complete Block Design) วิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล (ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธี Tukey ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ด้วยโปรแกรม Minitab® 18

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

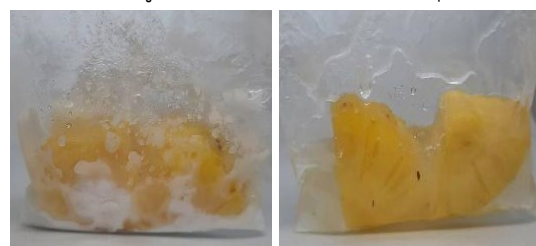
3.1 ผลของชนิดตัวถูกละลายต่อค่าการถ่ายโอนมวลสารระหว่างกระบวนการอินฟิวชันแบบแห้ง

งานวิจัยนี้เป็นกระบวนการอินฟิวชันแบบแห้ง ไม่มีการเติมน้ำเพื่อละลายตัวถูกละลาย จึงต้องใช้เวลาให้ตัวถูกละลายมีโอกาสละลายกับน้ำที่แพร่ออกจากชิ้นสับปะรด จากรูปที่ 1 แสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้เวลา 720 นาที เพียงพอที่จะทำให้น้ำตาลซูโครสและซอร์บิทอลละลายได้หมด ในขณะที่มอลโทเดกซ์ทรินมีส่วนที่ไม่ละลายเหลืออยู่ค่อนข้างมาก ส่วนโอลิโกฟรุคโตสมีบางส่วนที่ยังละลายไม่หมด



(ก) ซูโครส

(ข) โอลิโกฟรุคโตส



(ค) มอลโทเดกซ์ทริน

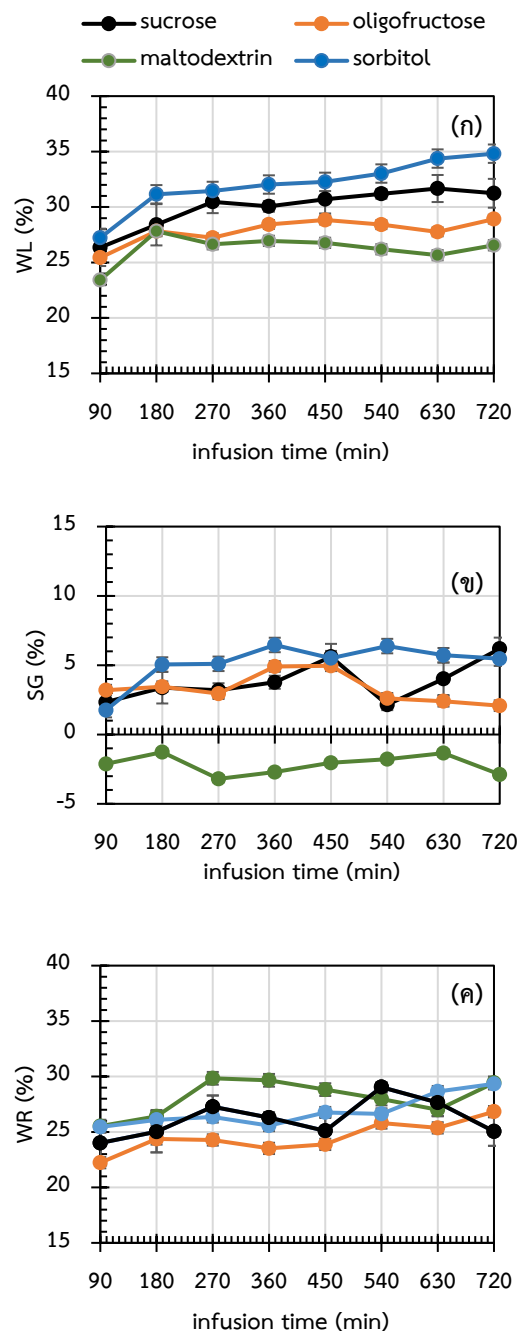
(ง) ซอร์บิทอล

รูปที่ 1 ลักษณะของสิ่งทดลองที่ใช้ถูกละลายชนิดต่าง ๆ เมื่อผ่านการอินฟิวชันแบบแห้ง 720 นาที

มอลโมเลกุลเป็นสำคัญต่อการถ่ายโอนมวลสาร การใช้ตัวถูกละลายที่มีมอลโมเลกุลต่ำจะสามารถแพร่เข้าไปในชั้นอาหารได้รวดเร็วกว่าตัวถูกละลายที่มีมอลโมเลกุลสูง ส่งผลให้เกิดแรงดันออสโมติกในการดึงน้ำออกจากตัวอย่างอาหารได้มากกว่า [10], [11] จากงานวิจัยนี้สามารถเรียงลำดับมอลโมเลกุลจากต่ำไปสูงได้ดังนี้ ซอร์บิทอล (182.17 กรัม/โมล) น้ำตาลซูโครส (342.30 กรัม/โมล) [12] น้ำตาลโอลิโกฟรุคโตส (828 กรัม/โมล) [11] และมอลโทเดกซ์ทริน (7,700 กรัม/โมล) [13]

จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่า ชนิดของตัวถูกละลายที่ใช้ในกระบวนการอินฟิวชันแบบแห้งในงานวิจัยนี้มีผลต่อค่าการถ่ายโอนมวลสาร (WL, SG และ WR) ($p < 0.05$) จาก รูปที่ 2 ก) พบว่า ตลอดกระบวนการอินฟิวชันแบบแห้งนี้ การใช้ซอร์บิทอลมีผลให้ค่า WL สูงที่สุด ($p < 0.05$) เมื่อใช้เวลา 720 นาที มีค่า WL 33.97% ซึ่งแนวโน้มค่า WL สอดคล้องกับมอลโมเลกุล ที่พบว่าสิ่งทดลองที่มีการใช้ตัวถูกละลายที่มีมอลโมเลกุลต่ำกว่าเอื้อต่อการแพร่เข้าสู่เซลล์ของพืชได้ง่ายกว่า ส่งผลให้เกิดแรงดันออสโมติกสูงกว่า จึงมีโอกากระตุ้นให้เกิดแรงขับในการถ่ายเทมวลสารได้มากกว่า ดังนั้นจึงพบว่า สิ่งทดลองที่มีค่า WL รองลงมาจากซอร์บิทอลมีแนวโน้มดังนี้ น้ำตาลซูโครส โอลิโกฟรุคโตส และมอลโทเดกซ์ทรินตามลำดับ โดยการใช้ น้ำตาลซูโครสและโอลิโกฟรุคโตส มีค่า WL ไม่แตกต่างกัน ($p \geq 0.05$) การใช้โอลิโกฟรุคโตสและมอลโทเดกซ์ทริน มีค่า WL ต่ำที่สุด ($p < 0.05$) ในช่วง 90 นาที มีค่า WL มาก (ประมาณ 23%-27%) อาจเนื่องมาจากความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นภายในและภายนอกชิ้นสับประรดมาก จึงเกิดแรงขับมากที่จะทำให้เกิดการแพร่ของน้ำออกจากชิ้นสับประรดได้มาก อย่างไรก็ตามเมื่อใช้เวลานานขึ้น ค่า WL มีโอกาสเพิ่มขึ้นไม่มากเท่ากับช่วงแรกของการแช่ โดยการลดลงของการแพร่ของน้ำเมื่อเวลานานขึ้น เป็นผลจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณของแข็งที่แพร่เข้ามาในชั้นอาหาร โดยของแข็ง

สามารถแพร่มาเคลือบที่บริเวณพื้นผิวของชิ้นอาหารที่อาจทำให้ปิดกั้นการแพร่ออกของน้ำได้ [14]



รูปที่ 2 ปริมาณน้ำที่สูญเสีย (WL) ปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้น (SG) และน้ำหนักที่ลดลง (WR) ของสับประรดที่ใช้ถูกละลายชนิดต่าง ๆ ระหว่างการอินฟิวชันแบบแห้ง

จาก รูปที่ 2 ข) พบว่า การใช้ซอร์บิทอลและน้ำตาลซูโครสมีผลให้มีค่า SG สูงที่สุด รองลงมา ได้แก่ โอลิโกฟรุคโตส และมอลโทเดกซ์ทริน ตามลำดับ การใช้ซอร์บิทอลและน้ำตาลซูโครสมีผลให้เกิดการแพร่ของตัวถูกละลายเข้าไปในชั้นสับปะรดได้มากกว่าเกี่ยวข้องกับความสามารถให้การละลายในน้ำ ที่พบว่ามีความใกล้เคียงกัน ความสามารถในการละลายในน้ำ (20 °C) ของซอร์บิทอลและน้ำตาลซูโครส เท่ากับ 2039 กรัม/ลิตร และ 2350 กรัม/ลิตร ตามลำดับ [12] นอกจากนี้ยังมีแนวโน้มสอดคล้องกับมวลโมเลกุลด้วย ที่พบว่าสิ่งทดลองที่มีการใช้ตัวถูกละลายที่มีมวลโมเลกุลต่ำกว่าเอื้อต่อการแพร่เข้าสู่เซลล์ของพืชได้ง่ายกว่า รวมทั้งยังสอดคล้องกับลักษณะการละลายที่สังเกตเห็น และจากรูปที่ 2 ข) พบว่า การใช้มอลโทเดกซ์ทรินมีค่า SG เป็นลบซึ่งแสดงว่าตัวอย่างสูญเสียของแข็งไป สอดคล้องกับที่มีการรายงานว่าในกระบวนการดองน้ำออกจากมันฝรั่งโดยใช้มอลโทเดกซ์ทริน มีค่า SG เป็นลบ เป็นผลจากความเข้มข้นของของแข็งที่ละลายได้ระหว่างชั้นมันฝรั่งและสารละลายแตกต่างกัน โดยของแข็งที่ละลายได้ในชั้นมันฝรั่ง เช่น น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวและสารอาหารที่มีมวลโมเลกุลต่ำสามารถแพร่ออกจากชั้นมันฝรั่งผ่านเยื่อเลือกผ่านได้ ในขณะที่มอลโทเดกซ์ทรินไม่สามารถแพร่เข้าไปในชั้นมันฝรั่งได้เนื่องจากมีมวลโมเลกุลสูง [4] จากภาพรวมของผลการวิจัยจะเห็นว่าค่า WL อยู่ในช่วง 23-34% ในขณะที่ค่า SG อยู่ในช่วง -3.2-6.5% แสดงให้เห็นว่าในระหว่างกระบวนการอินฟิวชันนี้ มีการสูญเสียน้ำมากกว่าการเพิ่มขึ้นของของแข็ง เนื่องจากโมเลกุลของน้ำมีขนาดเล็กกว่าของแข็งจึงมีโอกาสแพร่ผ่านเซลล์เมมเบรนที่ทำหน้าที่เป็นเยื่อเลือกผ่านได้มากกว่า

จาก รูปที่ 2 ค) แสดงถึงค่า WR ซึ่งเป็นผลของปริมาณน้ำที่สูญเสียเป็นส่วนใหญ่ที่หักปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้นออก พบว่า ที่เวลา 720 นาที การใช้มอลโทเดกซ์ทรินมีค่า WR สูงที่สุดเท่ากับ 29.43% เนื่องจากสิ่งทดลองนี้มีการสูญเสียน้ำหนักจากปริมาณของแข็งที่ลดลง

ด้วยนั่นเอง แต่อย่างไรก็ตามไม่แตกต่างกับการใช้ซอร์บิทอลและโอลิโกฟรุคโตสที่มีค่า WR เท่ากับ 28.00% และ 26.83% ตามลำดับ ($p \geq 0.05$)

จากการพิจารณาพฤติกรรมการถ่ายโอนมวลสารระหว่างกระบวนการ พบว่า ในช่วงเวลา 90-720 นาที ซอร์บิทอลมีค่า WL สูงที่สุด และมีข้อสังเกตว่าที่ 720 นาที ซอร์บิทอลละลายได้ทั้งหมด กระบวนการอินฟิวชันแบบแห้ง เป็นการดึงน้ำออกจากวัตถุดิบโดยการเติมตัวถูกละลายลงไปโดยตรง ไม่ได้เตรียมอยู่ในรูปสารละลาย การละลายได้หมดของตัวถูกละลายจึงเป็นเรื่องสำคัญที่ส่งผลต่อความสามารถในการดองน้ำออก จากการวิจัยนี้พบข้อสังเกตว่าการที่ตัวถูกละลายละลายได้ไม่หมด โดยเฉพาะเมื่อใช้มอลโทเดกซ์ทริน ที่ยังเคลือบติดกับชั้นสับปะรด แสดงให้เห็นว่าเป็นตัวถูกละลายที่ไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้งาน รวมทั้งการใช้มอลโทเดกซ์ทรินและโอลิโกฟรุคโตสมีค่า WL ต่ำกว่าการใช้ซอร์บิทอล จึงไม่ควรเลือกใช้ในการทดลองต่อไป รวมทั้งการใช้โอลิโกฟรุคโตส ซึ่งมีสมบัติเป็นพรีไบโอติกอาจต้องคำนึงถึงปริมาณที่เหมาะสมในการบริโภคเพื่อลดโอกาสการเกิดอาการข้างเคียงจากการบริโภคในปริมาณมากเกินไป เช่น อาการท้องเดิน ผลจากการทดลองแสดงให้เห็นว่าการใช้ซอร์บิทอลทำให้ได้ค่า WR และ SG มีค่าสูงที่สุด ($p < 0.05$) การมี SG สูงมีผลดีในการเพิ่มมวลของแข็ง ที่เพิ่มโอกาสการสร้างพันธะกับน้ำอิสระซึ่งมีผลต่อการลดค่า water activity ของผลิตภัณฑ์ ดังนั้นตัวถูกละลายที่เหมาะสมที่สุดที่จะเลือกใช้สำหรับขั้นตอนต่อไป คือ ซอร์บิทอล

3.2 ผลของการใช้อัตราชาวดต่อค่าการถ่ายโอนมวลสารเมื่อผ่านกระบวนการอินฟิวชันแบบแห้ง

จากตารางที่ 2 พบว่า การเตรียมชิ้นต้นทุกวิธีที่ทำให้มีค่า WL มากกว่าตัวควบคุม (control) แสดงให้เห็นว่าหากต้องการเพิ่มการแพร่ของน้ำออกจากชั้น

สับปรดต้องใช้ในการเตรียมชิ้นต้นร่วมด้วย และผลการทดลอง พบว่า สิ่งทดลอง USHT15 และ USHT30 ซึ่งใช้อัลตราซาวด์ที่อุณหภูมิ 50±2 เป็นเวลา 15-30 นาที มีค่า WL มากที่สุด 37.18%-38.05% ($p<0.05$) โดยทำให้ค่า WL มากกว่าตัวควบคุม (22.51%) ถึงประมาณ 14.67%-15.87% แสดงให้เห็นว่าการใช้อัลตราซาวด์ร่วมกับการใช้อุณหภูมิสูงช่วยกระตุ้นการแพร่ออกของน้ำได้ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากอัลตราซาวด์เป็นคลื่นที่มีความถี่สูง (มากกว่า 20 kHz) สามารถส่งพลังงานจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งด้วยการถ่ายโอนพลังงานกลของอนุภาคผ่านตัวกลาง ในการเคลื่อนที่ของคลื่นนี้จะเกิดปรากฏการณ์ captivation effect ซึ่งเกิดขึ้นในตัวกลางที่รับรู้คลื่นอัลตราโซนิกเนื่องจากฟองอากาศที่เกิดขึ้น โดยฟองอากาศที่เกิดขึ้นภายในตัวกลางสัมผัสกับแรงสั่นที่เกิดจากคลื่นอัลตราซาวด์เป็นระยะ ๆ และเกิดการแลกเปลี่ยนแก๊สระหว่างกัน ฟองอากาศดังกล่าวมีผลทำให้เกิดรูขนาดเล็กขึ้นในชิ้นผักผลไม้ได้ [15] สอดคล้องกับที่มีการรายงานว่าการใช้อัลตราซาวด์จัดเป็นการเตรียมชิ้นต้นวิธีหนึ่งที่มีการรายงานถึงผลดีต่อการกระตุ้นการถ่ายโอนมวลสารได้จากการทำลายผนังเซลล์พืชเพียงเล็กน้อยจากการทำให้เกิดรูขนาดเล็ก [6] สำหรับการใช้อุณหภูมิสูงร่วมด้วยในการอัลตราซาวด์มีโอกาสทำให้โครงสร้างบางส่วนของผักผลไม้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพไป คือ เยื่อหุ้มเซลล์อ่อนตัวลงจึงทำให้การแพร่ผ่านของน้ำและตัวถูกละลายเป็นไปได้ง่ายกว่าการใช้อุณหภูมิต่ำ อย่างไรก็ตามต้องไม่ใช้ความร้อนที่สูงเกินไปอาจทำให้เซลล์แตกซึ่งทำให้สารประกอบอื่น ๆ แพร่ออกมาได้ด้วย [4] จากตารางที่ 2 พบว่า สิ่งทดลอง USLT15 ซึ่งใช้อัลตราซาวด์ที่อุณหภูมิห้องโดยไม่ใช้ความร้อนร่วมด้วยเป็นเวลาเพียง 15 นาที มีค่า WL น้อยกว่าสิ่งทดลอง WB ซึ่งเตรียมชิ้นต้นโดยการแช่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ 50±2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที แสดงให้เห็นว่าแม้ใช้เวลาเตรียมชิ้นต้นเท่ากัน การกระตุ้นการแพร่ของน้ำด้วยความร้อนส่งผลให้มีค่า WL มากกว่าการใช้อัลตราซาวด์ที่

อุณหภูมิห้อง และพบว่า สิ่งทดลอง WB มีค่า WL ไม่แตกต่างกัน ($p\geq 0.05$) กับสิ่งทดลอง USLT30 ซึ่งใช้อัลตราซาวด์ที่อุณหภูมิ 28±2 เป็นเวลา 30 นาที แสดงให้เห็นแนวทางว่าหากต้องการหลีกเลี่ยงการใช้ความร้อนจากอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิสามารถใช้อัลตราซาวด์ได้แต่ต้องใช้เวลาเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 2 ปริมาณน้ำที่สูญเสีย (WL) ของสับปรดที่ผ่านการเตรียมชิ้นต้นต่าง ๆ และอินฟิวชันแบบแห้ง 720 นาที

สิ่งทดลอง	WL (%)
USLT15	28.44 ^c ±1.15
USLT30	34.32 ^b ±1.02
USHT15	37.08 ^{ab} ±0.40
USHT30	38.05 ^a ±1.45
WB	34.41 ^b ±1.03
Control	22.51 ^d ±1.25

a,b,c,d คือ แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

จากตารางที่ 3 พบว่า ปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้น (SG) มีค่าอยู่ในช่วง 5.47%-6.70% ซึ่งมีค่าน้อยกว่า WL (22.51%-38.15%) แสดงให้เห็นว่าในกระบวนการอินฟิวชันแบบแห้งทำให้เกิดปริมาณน้ำที่แพร่ออกจากชิ้นสับปรดมากกว่าปริมาณของแข็งที่แพร่เข้าไปในชิ้นสับปรด โดยค่า SG ของแต่ละสภาวะไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p\geq 0.05$) โดยพบแนวโน้มว่าสิ่งทดลองที่ใช้อัลตราซาวด์ทุกสิ่งทดลองและสิ่งทดลอง WB ยังไม่ได้ช่วยกระตุ้นให้เกิดการแพร่เข้าของของแข็งเข้ามาในชิ้นสับปรดมากนัก อาจเนื่องมาจากการเตรียมชิ้นต้นที่ใช้ส่งผลให้เกิดการทำลายเนื้อเยื่อที่เอื้อต่อการแพร่ออกของน้ำได้มากกว่า การใช้อัลตราซาวด์มีโอกาสทำลายเนื้อเยื่อให้เกิดเป็นลักษณะรูพรุนขนาดเล็ก ๆ และสำหรับการใช้ความร้อนจากการแช่ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิมีโอกาสทำลายเยื่อเนื้อเยื่อให้มีลักษณะอ่อนนุ่มมากขึ้น การทำลายเนื้อเยื่อสับปรดที่เกิดขึ้นนี้จึงอาจ

ส่งเสริมให้น้ำซึ่งมีโมเลกุลขนาดเล็กแพร่ออกมากกว่าที่จะให้ตัวถูกละลาย (ซอร์บิทอล) ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่กว่าแพร่เข้ามาในชั้นสับประรด

ตารางที่ 3 ปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้น (SG) ของสับประรดที่ผ่านการเตรียมขั้นตอนต่าง ๆ และอินฟิวชันแบบแห้ง 720 นาที

สิ่งทดลอง	SG ^{ns} (%)
USLT15	5.52±0.90
USLT30	5.76±1.40
USHT15	6.58±0.29
USHT30	6.47±0.67
WB	5.47±0.37
Control	6.70±0.59

^{ns} คือ ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$)

ตารางที่ 4 ปริมาณน้ำหนักที่ลดลง (WR) ของสับประรดที่ผ่านการเตรียมขั้นตอนต่าง ๆ และอินฟิวชันแบบแห้ง 720 นาที

สิ่งทดลอง	WR (%)
USLT15	22.93 ^c ±1.75
USLT30	28.56 ^b ±1.77
USHT15	30.49 ^{ab} ±0.27
USHT30	31.58 ^a ±0.77
WB	29.23 ^{ab} ±0.94
Control	15.39 ^d ±0.94

^{a,b,c,d} คือ แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

จากตารางที่ 4 พบว่า การเตรียมขั้นตอนทุกวิธี ทำให้มีค่า WR มากกว่าตัวควบคุม ซึ่งมีแนวโน้มคล้ายกับค่า WL และพบว่า สิ่งทดลอง USLT30 USHT15 USHT30 และ WB มีค่า WR มากที่สุด 28.56%-31.58% ($p < 0.05$) โดยทำให้ค่า WR มากกว่าตัวควบคุม (15.39%) ถึงประมาณ 13.17%-16.19% แสดงให้เห็นว่าการใช้อัลตราซาวด์ร่วมกับการใช้อุณหภูมิสูงหรือการใช้เวลานาน

เพียงพอสามารถช่วยกระตุ้นการแพร่ออกของน้ำในระหว่างกระบวนการได้

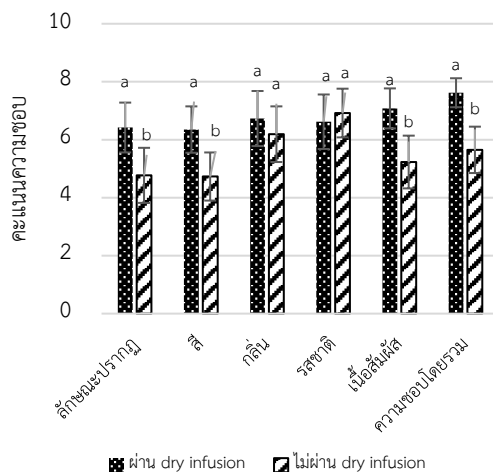
จากการพิจารณาพฤติกรรมการถ่ายโอนมวลสารพบว่า อัลตราซาวด์มีส่วนช่วยในการถ่ายโอนมวลสาร โดยเฉพาะทำให้ ค่า WL และ WR เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับตัวควบคุม สภาวะการใช้อัลตราซาวด์อุณหภูมิ ที่ 50 ± 2 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 15 และ 30 นาที ที่มีค่า WL และ WR สูงที่สุด ($p < 0.05$) โดยเฉพาะค่า WL มีค่ามากกว่าสิ่งทดลองอื่น ในการเลือกสภาวะที่เหมาะสมที่สุดเพื่อทำการทดลองต่อจึงเลือกใช้การเตรียมขั้นตอนโดยใช้อัลตราซาวด์ที่อุณหภูมิ ที่ 50 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดโดยไม่เลือกการใช้เวลา 30 นาที เนื่องจากหลีกเลี่ยงโอกาสการสูญเสียสารสำคัญต่าง ๆ เช่น วิตามินซี สารให้กลิ่นรส ปริมาณกรด เป็นต้น ที่อาจสูญเสียได้เพิ่มขึ้นหากใช้เวลาอัลตราซาวด์เพิ่มขึ้น การใช้เวลานานเกินไปอาจทำให้เนื้อเยื่อของชิ้นสับประรดได้รับความเสียหายมาก เนื้อสัมผัสจะเปลี่ยนแปลงไปจากของสดมาก และจากการสังเกตในการทำการทดลองพบว่า เนื้อสับประรดที่ผ่านการเตรียมขั้นตอนด้วยการอัลตราซาวด์ที่อุณหภูมิ ที่ 50 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที มีเนื้อนุ่มกว่าการใช้เวลา 15 นาที

3.3 ผลการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสของสับประรดกึ่งแห้ง

จากการนำสับประรดมาผ่านกระบวนการอินฟิวชันแบบแห้งตามสภาวะที่เลือกได้ คือ การใช้ซอร์บิทอลเป็นตัวถูกละลายและผ่านการเตรียมขั้นตอนโดยใช้อัลตราซาวด์ที่อุณหภูมิ ที่ 50 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที แล้วนำตัวอย่างมาเก็บไว้ในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4 ± 2 องศาเซลเซียส จนครบเวลา 720 นาที นำตัวอย่างมาทำแห้งต่อด้วยการอบด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส พบว่า ตัวอย่างที่ผ่านการอินฟิวชันแบบแห้งใช้เวลาทำแห้ง 3 ชั่วโมง ในขณะที่สับประรดที่ไม่ผ่านการอิน

พืชน้ำใช้เวลาทำแห้ง 4 ชั่วโมง โดยมีปริมาณความชื้น (36%) และค่า water activity (0.8) ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) และเป็นไปตามเกณฑ์ของผลิตภัณฑ์อาหารกึ่งแห้ง [1]

จากรูปที่ 3 แสดงคะแนนความชอบทางการประเมินทางประสาทสัมผัสของสับปะรดกึ่งแห้งที่ผ่านและไม่ผ่านการอินฟิวชันแบบแห้ง พบว่า สับปะรดกึ่งแห้งที่ผ่านการอินฟิวชันแบบแห้งได้รับคะแนนความชอบด้านลักษณะปรากฏ สี เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมมากกว่าสับปะรดกึ่งแห้งที่ไม่ผ่านการอินฟิวชันแบบแห้ง ($p < 0.05$)



รูปที่ 3 คะแนนความชอบเฉลี่ยจากการประเมินทางประสาทสัมผัสของสับปะรดกึ่งแห้งที่ผ่านและไม่ผ่านการอินฟิวชันแบบแห้ง (^{a,b} คือ ค่าเฉลี่ยที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$))

สับปะรดกึ่งแห้งที่ไม่ผ่านการอินฟิวชันแบบแห้งมีการยุบตัวจากการทำแห้งด้วยลมร้อน ในขณะที่สับปะรดกึ่งแห้งที่ผ่านการอินฟิวชันแบบแห้ง มีการยุบตัวน้อยกว่า จึงทำให้ลักษณะปรากฏของสับปะรดแตกต่างกันและผู้ที่ทดสอบชอบสับปะรดกึ่งแห้งที่ผ่านการอินฟิวชันแบบแห้งมากกว่าเพราะมีลักษณะเป็นชิ้นคงรูปดี น่ารับประทานมากกว่า สำหรับด้านเนื้อสัมผัส พบว่า สับปะรดที่ผ่าน

การอินฟิวชันแบบแห้ง มีเนื้อสัมผัสที่กรอบ คล้ายสับปะรดสดจึงทำให้ได้รับความชอบมากกว่า ในขณะที่สับปะรดที่ไม่ผ่านการอินฟิวชันแบบแห้ง มีเนื้อสัมผัสที่เหนียวและค่อนข้างแข็ง ทำให้ผู้บริโภคชอบเนื้อสัมผัสของสับปะรดกึ่งแห้งที่ผ่านการอินฟิวชันแบบแห้งมากกว่าสำหรับด้านสี พบว่า สับปะรดกึ่งแห้งที่ไม่ผ่านการอินฟิวชันแบบแห้ง ใช้เวลาในการทำแห้งนานกว่าจึงมีโอกาสทำให้มีสีเข้มกว่า ในขณะที่สับปะรดที่ผ่านการอินฟิวชันแบบแห้ง ใช้เวลาในการทำแห้งน้อยกว่าและยังมีตัวถูกละลายที่เคลือบพื้นผิวทำให้ช่วยลดการเปลี่ยนแปลงของสีได้

อย่างไรก็ตามสับปะรดกึ่งแห้งได้รับคะแนนความชอบด้านกลิ่นและรสชาติ ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \geq 0.05$) โดยยังคงมีกลิ่นของสับปะรดที่คล้ายกันจึงทำให้ผู้ทดสอบแยกออกได้ยาก อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 3 แสดงแนวโน้มคะแนนความชอบด้านกลิ่นของสับปะรดกึ่งแห้งที่ผ่านการอินฟิวชันแบบแห้งเป็นที่ชื่นชอบมากกว่า ส่วนด้านรสชาติพบข้อสังเกตว่า สับปะรดกึ่งแห้งที่ผ่านการอินฟิวชันแบบแห้งมีรสหวานมากกว่า (ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด 55 องศาบริกซ์) ในขณะที่สับปะรดที่ไม่ผ่านการอินฟิวชันแบบแห้งมีรสหวาน (ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด 18 องศาบริกซ์) น้อยกว่าจึงรับรสเปรี้ยวของสับปะรดได้ด้วย ผู้บริโภคที่ชอบรสหวานน้อยและมีรสเปรี้ยวด้วยคล้ายสับปะรดสดอาจพึงพอใจในรสชาติมากกว่า จึงมีแนวโน้มได้รับคะแนนสูงกว่า แต่ผลการวิเคราะห์ทางสถิติยังไม่แตกต่างกัน ($p \geq 0.05$)

4. สรุป

ชนิดของตัวถูกละลายมีต่อค่าการถ่ายโอนมวลสารของสับปะรดทองระยงระหว่างกระบวนการ อินฟิวชันแบบแห้ง โดยการใช้ซอร์บิทอลทำให้มีค่าการถ่ายโอนมวลสารสูงที่สุด ($p < 0.05$) จากการศึกษาผลของสภาวะการใช้อัลตราซาวด์ต่อค่าการถ่ายโอนมวลสารของสับปะรดที่ผ่านกระบวนการอินฟิวชันแบบแห้ง พบว่า

การเตรียมขั้นต้นโดยใช้อัลตราซาวด์ที่อุณหภูมิ 50±2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุด เมื่อใช้เวลาในกระบวนการครบ 720 นาที ทำให้ค่า WL SG และ WR เท่ากับ 37.08% 6.58% และ 30.49% ตามลำดับ ผลผลิตแห้งที่สับประรดกึ่งแห้งที่ผ่านการอินฟิวชันแบบแห้งนี้ได้รับการยอมรับทางประสาทสัมผัสมากกว่าผลผลิตแห้งที่ไม่ผ่านกระบวนการอินฟิวชันแบบแห้ง

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา สำหรับทุนอุดหนุนการวิจัย ประเภทเงินรายได้ คณะวิทยาศาสตร์ ประจำปีงบประมาณ 2563

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] D. Torregiani, "Osmotic dehydration in fruit and vegetable processing," *Food Research International*, vol. 26, pp. 59-69, 1993.
- [2] S.M. Alzamora, S. Guerrero, A.B. Nieto and S. Vidales, *Combined preservation technologies for fruits and vegetables: training manual*, Rome: The Agricultural and Food Engineering Technologies Service, 2003.
- [3] V. A. Rao, "The prebiotic properties of oligofructose at low intake levels," *Nutrition Research*, vol. 21, pp. 843-848, 2001.
- [4] A. M. Goula, M. Kokolaki and E. Daftsiou, "Use of ultrasound for osmotic dehydration. The case of potatoes," *Food and Bioproducts Processing*, vol. 105, pp. 157-170, 2017.
- [5] D. Torregiani, E. Forni, E., M.L. Erba and F. Longoni. "Functional properties of pepper osmodehydrated in hydrolyzed whey permeate with or without sorbitol," *Food Research International*, vol. 28, pp. 161-166, 1995.
- [6] N. Nowacka and M. Wedzik, "Effect of ultrasound treatment on microstructure, colour and carotenoid content in fresh and dried carrot tissue," *Applied Acoustics*, vol. 103, pp. 163-171, 2016.
- [7] A. Shukla, R. S. Shukla, C. Das and V.V. Goud, "Gingerols infusion and multi-step process optimization for enhancement of color, sensory and functional profiles of candied mango," *Food Chemistry*, vol. 300, pp. 125-195, 2019.
- [8] V. Prosapio and I. Norton, "Influence of osmotic dehydration pre-treatment on oven drying and freeze drying performance," *LWT*, vol. 80, pp. 401-408, 2017.
- [9] AOAC, *Official Method of Analysis*, 15th ed. Arlington: The Association of official Analysis Chemists, 1990.
- [10] A. Matusek, B. Czukor and P. Merész, "Comparison of sucrose and fructo-oligosaccharides as osmotic agents in apple," *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, vol. 9, pp. 365-373, 2008.
- [11] M.R. Khan, "Osmotic dehydration technique for fruit preservation- A review," *Pakistan Journal of Food Sciences*, vol. 22, pp. 71-85, 2012.
- [12] National Center for Biotechnology Information (2021, April 27). PubChem Compound Summary for CID 5988, Sucrose.

- [Online]. Available: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov>
- [13] S. Samuhasaneetoo, S. Chaiseri, I. A. Farhat, T. Sajjaanantakul and R. Pongsawatmanit, "Application of the "Dual Sorption" Model for Water Adsorption of Maltodextrin Various DE," *Kasetsart J. (Nat. Sci.)*, vol. 38, pp. 515-522, 2004.
- [14] S. Rodrigues and F.A.N. Fernandes, "Use of ultrasound as pretreatment for dehydration of melons," *Drying Technology*, vol. 25, pp. 1791–1796, 2007.
- [15] F. A. N. Fernandes, M. I. Gallao and S. Rodrigues, "Effect of osmosis and ultrasound on pineapple cell tissue structure during dehydration," *Journal of Food Engineering*, vol. 90, pp. 186–190, 2009.

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

การลดของเสียที่เกิดจากการเชื่อมด้วยหุ่นยนต์ในกระบวนการประกอบชิ้นส่วนตัวถังรถชุด-ตัก

อภิชาติ เสมศรี^{1*} อนุชา กาเล็ก¹ และ ธนิตศักดิ์ พุฒิพัฒน์โมษิต²

¹ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเซาธ์อีสท์บางกอก

² คณะโลจิสติกส์และเทคโนโลยีการบิน มหาวิทยาลัยเซาธ์อีสท์บางกอก

^{1,2} 298 ถนนสรพาวุธ แขวงบางนา เขตบางนา กรุงเทพมหานคร 10260

รับบทความ 23 มกราคม 2564 แก้ไขบทความ 2 พฤษภาคม 2565 ตอรับบทความ 28 มิถุนายน 2565

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดของเสียที่เกิดจากการทำงานของหุ่นยนต์เชื่อมในกระบวนการประกอบชิ้นส่วนตัวถัง โดยใช้เครื่องมือควบคุมคุณภาพ 7 อย่าง (7QC Tools) ได้แก่ ใบตรวจสอบ แผนภูมิพาเรโต ผังแสดงเหตุและผล และกราฟ ในการค้นหาสาเหตุและหาแนวทางการปรับปรุงแก้ไข จากการศึกษาพบว่าของเสียมากที่สุดเกิดขึ้นที่กระบวนการประกอบชิ้นส่วนตัวถังด้วยหุ่นยนต์ จากการวิเคราะห์ด้วยผังแสดงเหตุและผล พบว่าปัญหาที่เกิดขึ้นมี 2 ปัจจัย ได้แก่ ปัจจัยที่ 1 เกิดจากหุ่นยนต์ มีสาเหตุที่เกิดจาก หัวเชื่อมสกปรก แนวเชื่อมไม่ตรง และขาดความเที่ยงตรง ในขณะที่เชื่อมและปัจจัยที่ 2 เกิดจากคน มีสาเหตุที่เกิดจากการวางชิ้นงานไม่ตรงตำแหน่ง การแก้ไขปัญหาดังกล่าว คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการจัดทำคู่มือการบำรุงรักษาหุ่นยนต์แจ้งให้พนักงานได้รับรู้เกี่ยวกับการดูแลบำรุงรักษาเพื่อป้องกันการเกิดปัญหาในส่วนประกอบของหุ่นยนต์ทั้งระบบ และได้จัดทำอุปกรณ์จับยึดสำหรับจับยึดชิ้นงานในการเชื่อม เพื่อแก้ปัญหาในส่วนที่เกี่ยวข้องกับการเชื่อมด้วยหุ่นยนต์ ผลการวิจัยและการรวบรวมข้อมูลพบว่าข้อมูลก่อนการปรับปรุงในเดือนมิถุนายน-กรกฎาคม พ.ศ. 2563 จำนวนของเสียที่เกิดจากกระบวนการงานเชื่อมจากเดิมคิดเป็นร้อยละ 47.79 เมื่อเปรียบเทียบข้อมูลหลังจากการปรับปรุงจากการเก็บข้อมูลในเดือน สิงหาคม-กันยายน พ.ศ.2563 จำนวนของเสียลดลงเหลือร้อยละ 12.34 ทำให้เห็นว่าการปรับปรุงในครั้งนี้มีผลทำให้ของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการประกอบชิ้นส่วนตัวถังลดลงถึงร้อยละ 74.18

คำสำคัญ : การลดของเสีย; กระบวนการ; การประกอบชิ้นส่วน; เครื่องมือคุณภาพ 7 QC Tools; หุ่นยนต์งานเชื่อม

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +666 4536 9415, อีเมล: aphichit@southeast.ac.th

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

Reducing Waste Generated by Welding Robots in the Assembly Process of Backhoe Body Parts

Aphichit Semsri^{1*} Anucha Kalek¹ and Thanitsak Pudtipatkosit²

¹ Faculty of Science and Technology, Southeast Bangkok University

² Faculty of Logistics and Aviation Technology, Southeast Bangkok University

^{1,2} 298 Sanphawut Rd., Bangna, Bangna, Bangkok 10260

Received 23 January 2021; Revised 2 May 2022; Accepted 28 June 2022

Abstract

This research aimed to reduce waste caused by welding robots in the assembly process of backhoe body parts. The researchers used 7QC tools: Check Sheet, Pareto Diagram, Cause-and-Effect Diagram and Graphs, to find out causes and solutions. The study revealed that the greatest amount of waste occurred at the robotic assembly process. When using Cause-and-Effect Diagram to analyze the assembly process, it indicated that the problems were caused by 2 factors: machines and workforce. There are 3 drawbacks of machines: dirty welding head, not straight welding line, and lack of precision while welding. The second factor, people, made mistakes by not being able to place the work pieces at the right spot. To solve the problems, firstly, the research team created a manual for robot maintenance. Secondly, we inform employees how to maintain the machines to prevent problems with the entire robot's components. In addition, we prepared a jig for holding the work pieces while welding to solve problems related to robotic welding. The findings and compilation of data showed that the amount of waste from the welding process collected between June and July 2020 was 47.79%. When comparing data after improvement during August to September 2020, the amount of waste reduced to 12.34%. It was obvious that this improvement reduced the waste generated from robotic welding in the assembly process of backhoe body parts up to 74.18%.

Keywords : Waste Reduction; Process; Assembling Process; 7QC Tools; Welding Robots

** Corresponding Author. Tel.: +666 4536 9415, E-mail Address: aphichit@southeast.ac.th*

1. บทนำ

บริษัทผู้ผลิตที่จะสามารถแข่งขันได้ในตลาดจะต้องมีผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพและมีประสิทธิภาพสูงที่สุดในช่วงศตวรรษที่ผ่านมามีความก้าวหน้าเป็นอย่างมากในกระบวนการผลิต ธุรกิจต่าง ๆ ก็ให้ความสำคัญกับการใช้เทคโนโลยี เพื่อผลิตผลิตภัณฑ์ด้วยต้นทุนที่ต่ำที่สุดในระหว่างกระบวนการผลิตจะมีพารามิเตอร์ต่าง ๆ มากมายที่จำเป็นต้องได้รับการควบคุม เช่น ข้อจำกัดในด้านของเสีย ช่วงหยุดการทำงานของเครื่องประกอบชิ้นส่วนและค่าผลตอบแทนพนักงาน เพื่อให้สามารถผลิตได้ด้วยต้นทุนที่น้อยที่สุด ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมาในกลุ่มอุตสาหกรรมการผลิตจะมุ่งเน้นกระบวนการที่เป็นอัตโนมัติเพราะผลิตภัณฑ์จะต้องมีคุณภาพที่สูงขึ้นและมีอัตราการผลิตที่สูงขึ้น หนึ่งในกระบวนการอัตโนมัติที่พบบ่อยที่สุดในสายการประกอบชิ้นส่วนคือการเชื่อม หลายบริษัททั่วโลกใช้การเชื่อมด้วยหุ่นยนต์เนื่องจากกระบวนการนี้เป็นแบบอัตโนมัติและมีประสิทธิภาพมากกว่าช่างเชื่อมมืออาชีพ ประโยชน์ที่ได้จากกระบวนการเชื่อมอัตโนมัติ คือ คุณภาพการเชื่อมที่ดีขึ้น ผลผลิตเพิ่มขึ้น การผลิตของเสียลดลง ต้นทุนที่เกี่ยวข้องกับแรงงานลดลง [1] เพื่อให้แข่งขันกับผู้ค้ารายอื่นๆ ได้จึงจำเป็นที่จะต้องเตรียมพร้อมทั้งสถานการณ์ในอนาคต ผู้ประกอบการจึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพเป็นไปตามความต้องการของลูกค้า โดยที่ต้นทุนต้องต่ำแต่ยังคงคุณภาพงานที่สูง สามารถลดเวลาการผลิต เพื่อที่จะส่งมอบสินค้าได้ทันต่อเวลา จึงทำให้ผู้ประกอบการต้องมีการพัฒนาองค์กรให้เป็นอย่างดีต่อเนื่องในทุกๆ ด้าน เพื่อที่จะเพิ่มผลผลิตสร้างความได้เปรียบเหนือคู่แข่งและเพื่อความอยู่รอด [2] โดยปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการเพิ่มผลผลิตในงานอุตสาหกรรมอย่างหนึ่งก็คือ ต้นทุนการผลิต [3] ซึ่งผู้ประกอบการจะต้องควบคุมและหาแนวทางในการลดต้นทุนอย่างต่อเนื่องเพื่อให้สามารถแข่งขันได้ในระยะยาว และสำหรับอุตสาหกรรมการผลิตนั้น ของเสียที่

เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตต่าง ๆ จะถือเป็นความสูญเสียเปล่า [4] ซึ่งทำให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้นโดยไม่จำเป็นและจะส่งผลให้ผลผลิตลดลงด้วย [5]

จากกรณีศึกษาบริษัทผู้ผลิตชิ้นส่วนด้านการประกอบชิ้นส่วนตัวถังรถชุด-ตก ในกระบวนการประกอบชิ้นส่วนโดยใช้หุ่นยนต์ในการเชื่อมชิ้นส่วน ซึ่งพบว่าเกิดปัญหาด้านของเสียเป็นจำนวนมาก มีผลทำให้เกิดการสูญเสียด้านเวลาในการซ่อมงาน ด้านกำลังคน รวมถึงเสียค่าใช้จ่ายที่จะจ่ายเพิ่มมากขึ้น เพราะจะต้องมีการแก้ไขปัญหามาจากของเสียที่เกิดขึ้น

จากปัญหาดังที่กล่าวมานี้ ทางผู้วิจัยจึงได้เล็งเห็นความสำคัญของการลดจำนวนของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการประกอบชิ้นส่วนตัวถังรถชุด-ตก โดยเข้าไปศึกษาปัจจัยสาเหตุต่าง ๆ ที่มีผลทำให้เกิดของเสียขึ้น ได้นำปัญหาของการทำงานในกระบวนการประกอบชิ้นส่วนมาวิเคราะห์เพื่อหาสาเหตุของปัญหา โดยใช้เครื่องมือ 7 QC Tools นำมาเป็นเครื่องมือในการแก้ไขปัญหา ได้แก่ ไบตรตรวจสอบ แผนภูมิพาเรโต ผังแสดงเหตุและผล และกราฟ และใช้หลักการ 4 M 1 E คือ คน เครื่องจักร วิธีการ วัตถุดิบ และสิ่งแวดล้อม กำหนดแนวทางวิธีการแก้ไขที่สาเหตุดังกล่าวเพื่อลดจำนวนของเสียที่เกิดขึ้น ทำให้สามารถลดต้นทุนการผลิตลงได้อย่างมีประสิทธิภาพและถือเป็นการเพิ่มผลผลิตและเพิ่มศักยภาพในการแข่งขันให้กับองค์กร

2. ระเบียบวิธีวิจัย

ผู้วิจัยได้มีการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทำให้สามารถนำแนวทางมาแก้ไขปัญหาของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต โดยใช้เครื่องมือ 7 QC Tools เพื่อนำมาเป็นเครื่องมือในการแก้ไขปัญหา ได้แก่ ไบตรตรวจสอบ แผนภูมิพาเรโต ผังแสดงเหตุและผล และกราฟ [6], [7] โดยมีขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย 6 ขั้นตอนดังนี้

2.1 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี 1988 เมทริกซ์ของหุ่นยนต์ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมการรถยนต์เพื่อทำการเชื่อมจุดด้านทานบนตัวถังรถยนต์ หลังจากนั้นก็มี การติดตั้งหุ่นยนต์เชื่อมอาร์กมากขึ้นเรื่อย ๆ ทั้งในโรงงานผลิตขนาดใหญ่และขนาดเล็ก หุ่นยนต์เชื่อมถูกใช้ในสองทางของสายการผลิตเป็นสิ่งที่สำคัญในสายการผลิตและเป็นหน่วยแบบสแตนด์อะโลน (หรือระบบการผลิตหุ่นยนต์ที่ยืดหยุ่น) สำหรับการผลิตที่เป็นกลุ่ม ๆ แม้ว่าหุ่นยนต์จะทำงานได้ดีสำหรับงานซ้ำ ๆ ในชิ้นส่วนที่คล้ายคลึงกัน ซึ่งเกี่ยวข้องกับรอยเชื่อมมากกว่าหนึ่งแกนหรือในกรณีการเข้าถึงชิ้นส่วนนั้นทำได้ยาก ผู้ผลิตที่มีการดำเนินการใน ส่วนงานที่มีการเชื่อมด้วยอัตโนมัติ มีการร้องขอเพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นในการประมวลผลชิ้นส่วนต่าง ๆ ด้วยหุ่นยนต์เดียวกัน การสร้างระบบการผลิตหุ่นยนต์ที่มีความยืดหยุ่นเพื่ออำนวยความสะดวกในการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วโดยการเปลี่ยน end-effector ของหุ่นยนต์และปรับเปลี่ยนโปรแกรมหุ่นยนต์ [8] นอกจากนี้ยังมีการใช้หุ่นยนต์ขนถ่ายวัสดุภายในเพื่อจัดตำแหน่งชิ้นส่วนขณะทำการเชื่อมหรือเพื่อโหลดชิ้นส่วนหรือยกเลิกการโหลดชิ้นส่วนในการดำเนินการ เช่น สถานีตรวจสอบ กระบวนการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊ส (GMA) เป็นกระบวนการเชื่อมที่มีการรวมตัวกันของโลหะโดยการให้ความร้อนด้วย ส่วนเชื่อมระหว่างอิเล็กโทรดโลหะฟิวเลอร์แบบต่อเนื่อง (วัสดุสิ้นเปลือง) และชิ้นงานอิเล็กโทรดลวดแบบต่อเนื่องซึ่งดึงออกมาจากรีลโดยตัวป้อนลวดอัตโนมัติจากนั้นป้อนผ่านปลายสัมผัสภายใน ไฟเชื่อมจะหลอมละลายโดยกำลังด้านทานภายในและความร้อนที่ถ่ายโอนจากส่วนเชื่อม ความร้อนถูกทำให้เข้มข้นโดยอาร์คเชื่อมจากปลายอิเล็กโทรดหลอมไปยังแอ่งเชื่อมหลอมเหลวและโลหะหลอมเหลวจะถูกถ่ายโอนไปยังแอ่งเชื่อม สระเชื่อมที่เกิดการหลอมเหลวและลวดอิเล็กโทรดจะได้รับการปกป้องจากสารปนเปื้อนในชั้นบรรยากาศโดยก๊าซป้องกันที่ได้จากการผสมต่างๆ [1]

M. P. Mali and K. H. Inamdar [9] ได้ศึกษาผลกระทบรูปแบบตำแหน่งของการเชื่อมและคุณภาพของชิ้นส่วนโลหะรถยนต์ การเชื่อมจุดด้านทานเป็นวิธีที่นิยมและใช้กันมากที่สุดสำหรับการเชื่อมโลหะแผ่นในยานยนต์และการประกอบอุตสาหกรรมอื่น ๆ อีกมากมาย โดยทั่วไปตัวถังจะเชื่อมติดกันด้วยรอยเชื่อมหลายพันจุด หนึ่งในปัจจัยทางเรขาคณิตที่มีผลต่อผลลัพธ์ทางเรขาคณิตขั้นสุดท้ายของการประกอบชิ้นส่วนโลหะคือกระบวนการเชื่อม เมื่อพิจารณาลำดับการเชื่อมที่ใช้เมื่อชิ้นส่วนเชื่อมเข้าด้วยกัน รอยเชื่อมเฉพาะจุดรับประกันความแข็งแรงของรถ แต่ตำแหน่งยังส่งผลกระทบต่อคุณภาพทางเรขาคณิตของส่วนประกอบย่อยและผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้าย ในทางปฏิบัติตำแหน่งของจุดเชื่อมมักเบี่ยงเบนไปจากตำแหน่งเล็กน้อย ด้วยการวิเคราะห์ข้อมูลการสแกนทางอุตสาหกรรมความเบี่ยงเบนของตำแหน่งรอยเชื่อมคือพวามีขนาดสูงถึง 19 มม. ในบทความนี้จะมีการตรวจสอบอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงในตำแหน่งของจุดเชื่อมด้วยเกี่ยวกับคุณภาพทางเรขาคณิตโดยการจำลองและวิเคราะห์รูปแบบทางเรขาคณิต

N. Ma et al. [10] ได้ศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบจากข้อจำกัดของตำแหน่งอุปกรณ์ในการจับยึดและระยะห่างระหว่าง การเสียรูปของการเชื่อม โดยทำการศึกษาเชิงปริมาณเกี่ยวกับผลกระทบของข้อจำกัดของอุปกรณ์จับยึดต่อการเสียรูปของการเชื่อม การเสียรูปของการเชื่อมในแผ่นสี่เหลี่ยมด้วยการเชื่อมด้วยลูกบิดภายใต้สภาวะที่ปราศจากข้อจำกัดและข้อจำกัดของอุปกรณ์จับยึดจะถูกตรวจสอบโดยการทดลอง มีการใช้โปรแกรม FEM ยืดหยุ่น - พลาสติกแบบยืดหยุ่น ความร้อนจะมีการจำลองอุณหภูมิชั่วคราวและการเสียรูปที่เกิดขึ้นในการเชื่อม เป็นที่สังเกตว่าการเชื่อมจะมีความผิดเพี้ยนเชิงมุมลดลงอย่างมากตามข้อจำกัดของอุปกรณ์จับยึดและได้รับการยืนยันข้อตกลงที่ตรงระหว่างการจำลองและการทดลอง ข้อจำกัดอุปกรณ์จับยึดสามทิศทางและข้อจำกัดอุปกรณ์จับยึดทิศทางปกติถูก

กำหนดตามประเภทข้อจำกัด ทัวไปในวิศวกรรมเชิงปฏิบัติ สองพารามิเตอร์ a และ b ซึ่งแสดงระยะห่างระหว่างสองอุปกรณ์จับยึดในทิศทางการเชื่อมและระยะห่างจากแนวเชื่อมตามลำดับ ผลของข้อจำกัดอุปกรณ์จับยึดจะมีผลต่อการหดตัวตามแนวยาวและการหดตัวตามแนวขวาง

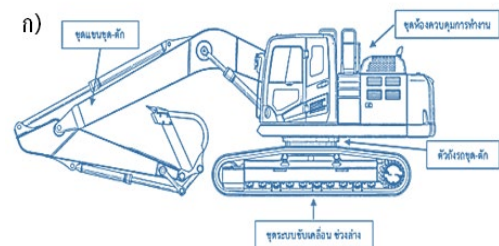
C. Chakrad et al. [11] ได้ศึกษาการลดของเสียในกระบวนการเชื่อมชิ้นส่วนกันสะเทือนรถยนต์(กระบอกใช้คัพ (GT- Welding no.1) ที่มีลักษณะของเสียเกิดเป็นรูพรุน ที่มีสาเหตุเกิดจากฟองอากาศและแนวเชื่อมไม่สม่ำเสมอในขั้นตอนการเชื่อม Cap Side Welding มุ่งเน้นการปรับปรุงวิธีการทำงานของพนักงาน การเปลี่ยนอุปกรณ์ของเครื่องจักรมาเป็นแนวทางที่ช่วยในการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้น โดยมีเป้าหมายการลดของเสียจากเดิมลง 10 เปอร์เซ็นต์ หรือปริมาณของเสียไม่เกิน 0.1559 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณการผลิตในกระบวนการเชื่อม ผลการปรับปรุงพบของเสียที่เกิดขึ้นเฉลี่ย 70.60 ชิ้นต่อเดือน หรือประมาณ 71 ชิ้นต่อเดือน หรือคิดเป็น 0.1403 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นไปตามขอบเขตของโครงการที่ตั้งไว้

A. Kitsutipong et al. [12] ได้ศึกษาการลดข้อบกพร่องในกระบวนการเชื่อมโครงเบาะรถยนต์ มีวัตถุประสงค์เพื่อลดของเสียให้น้อยกว่า 1,500 PPM โดยใช้เครื่องมือคุณภาพในการดำเนินงานวิเคราะห์และแก้ไขปัญหา พบว่ากระบวนการเชื่อมโครงเบาะเกิดข้อบกพร่องและของเสียเป็นจำนวนมาก การลดข้อบกพร่องในกระบวนการเชื่อมโครงเบาะรถยนต์ของชิ้นงาน Frame Cush LH ในขั้นตอนการปรับปรุงได้มีการจัดทำอุปกรณ์เพิ่มเติมเพื่อช่วยในการผลิต เช่น ติดตั้งท่อลมไล่เศษโลหะ ติดตั้ง Sensor ที่หัว Feed ลวด อบรมวิธีการปฏิบัติงานให้แก่พนักงาน ซึ่งหลังจากการปรับปรุงกระบวนการแล้วได้จัดทำแผนควบคุม (Control Plan) เพื่อควบคุมและรักษามาตรฐานในการปฏิบัติงาน ผลจากการดำเนินการดังกล่าวพบว่าสามารถ

ลดของเสียจาก 3,299 PPM เหลือ 758 PPM ซึ่งสามารถบรรลุตามค่าเป้าหมายที่กำหนดไว้

2.2 ศึกษากระบวนการประกอบชิ้นส่วนตัวถัง

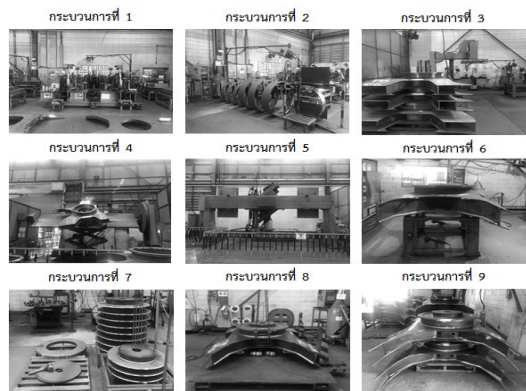
ชิ้นส่วนตัวถังที่ได้นำมาศึกษา เป็นอุปกรณ์ที่ติดตั้งอยู่ในรถชุด-ตัก มีหน้าที่หลักคือเป็นโครงสร้างรองรับชิ้นส่วนต่าง ๆ ด้านบนชิ้นส่วนตัวถังจะทำหน้าที่รองรับห้องควบคุมและชุดแขนชุด-ตัก รวมถึงเป็นจุดหมุนของห้องควบคุม สำหรับด้านล่างจะรองรับอุปกรณ์ของระบบขับเคลื่อน ดังรูปที่ 1 ก) โครงสร้างการรองรับชิ้นส่วนต่างๆ ของตัวถัง ข) ชิ้นส่วนตัวถังรถชุด-ตัก



รูปที่ 1 ก) โครงสร้างการรองรับชิ้นส่วนต่างๆ ของตัวถัง
ข) ชิ้นส่วนตัวถังรถชุด-ตัก

การศึกษากระบวนการประกอบชิ้นส่วนตัวถังเพื่อหาสาเหตุของปัญหาที่เกิดขึ้นในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการนำไปสู่การปรับปรุงแก้ไขต่อไป ขั้นตอนกระบวนการประกอบชิ้นส่วนตัวถัง ดังรูปที่ 2 กระบวนการประกอบชิ้นส่วนตัวถัง มีดังนี้

กระบวนการที่ 1 เป็นกระบวนการประกอบชิ้นงานในส่วนต่าง ๆ เข้าด้วยกันโดยการเชื่อมยึดจุดการเชื่อมจะใช้คนในการเชื่อม



รูปที่ 2 ขั้นตอนกระบวนการประกอบชิ้นส่วนตัวถัง

กระบวนการที่ 2 เป็นกระบวนการนำชิ้นงานที่ตัดเป็นวงกลมและทำการเชื่อมประสานเข้าด้วยกัน การเชื่อมจะใช้คนในการเชื่อม

กระบวนการที่ 3 เป็นกระบวนการ turn positioner เมื่อประกอบชิ้นงานเป็นรูป cover body ให้นำส่วนประกอบตัวถังรถยนต์ใส่ใน turn เพื่อทำการเชื่อมอุทส่วนที่เป็นช่องว่างทั้งด้านบนและด้านล่าง การเชื่อมจะใช้คนในการเชื่อม

กระบวนการที่ 4 เป็นกระบวนการเชื่อมประกอบส่วนประกอบตัวถังด้วยหุ่นยนต์เชื่อมชิ้นงานจนสิ้นสุดกระบวนการเชื่อม

กระบวนการที่ 5 เป็นกระบวนการ semi auto welding เป็นขั้นตอนการเชื่อมเก็บงานในส่วนที่หุ่นยนต์ไม่สามารถเชื่อมได้ การเชื่อมจะใช้คนในการเชื่อม

กระบวนการที่ 6 เป็นกระบวนการตกแต่งพื้นผิวงานของแนวเชื่อมทั้งหมดและเป็นกระบวนการในการทำความสะดวกชิ้นงาน

กระบวนการที่ 7 เป็นกระบวนการประกอบชิ้นส่วนคงเหลือที่จะนำมาประกอบเข้ากับตัวถัง

กระบวนการที่ 8 เป็นกระบวนการประกอบชิ้นส่วนตัวถังกับอุปกรณ์ปกคลุม (cover) การเชื่อมจะใช้คนในการเชื่อม

กระบวนการที่ 9 เป็นกระบวนการตรวจสอบคุณภาพของชิ้นงาน

2.3 เก็บข้อมูลของเสียในกระบวนการประกอบชิ้นส่วนตัวถัง

ผู้วิจัยได้รวบรวมเก็บข้อมูลปริมาณการผลิต และจำนวนของเสียที่เกิดขึ้น ก่อนการปรับปรุงในช่วงเดือน มิ.ย.-ก.ค.2563 ได้ผลตามตารางที่ 1 ข้อมูลที่รวบรวมได้จากใบตรวจสอบ บันทึกของเสียในระหว่างช่วงที่มีการทำงานในแต่ละกระบวนการประกอบชิ้นส่วนตัวถัง ยอดการผลิตรวม 408 ชิ้น พบว่าของเสียมีจำนวนเท่ากับ 195 ชิ้น คิดเป็นร้อยละ 47.79

ตารางที่ 1 ข้อมูลปริมาณการผลิตและจำนวนของเสียก่อนการปรับปรุง

เดือน	ปริมาณการผลิต (ชิ้น)	ของเสีย (ชิ้น)	เปอร์เซ็นต์ของเสีย
มิ.ย.	204	97	47.54
ก.ค.	204	98	48.03
รวม	408	195	47.79

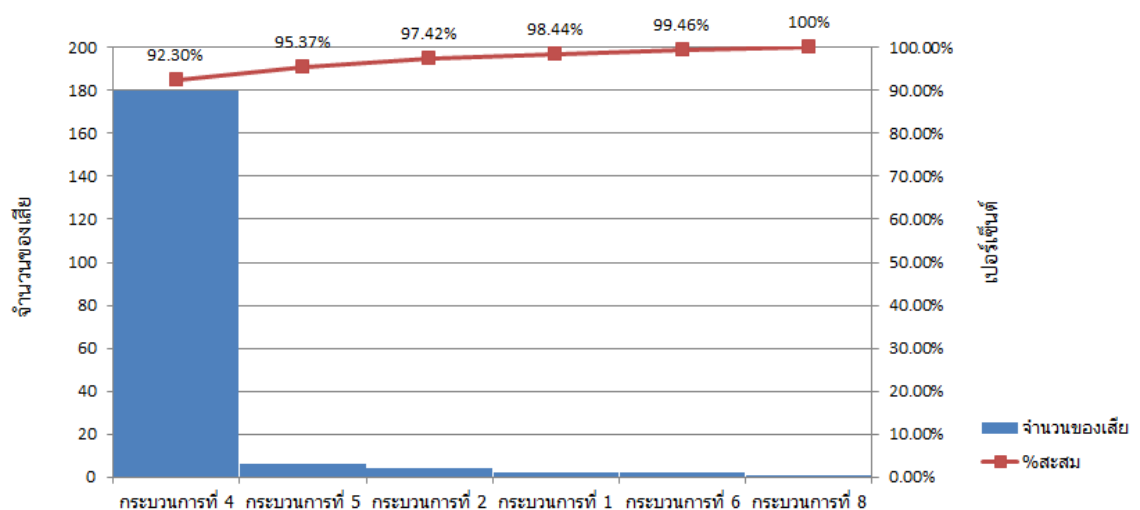
จากกระบวนการประกอบชิ้นส่วนตัวถังมีทั้งหมด 9 กระบวนการ จากการเก็บข้อมูลปริมาณการผลิตรวมทั้งหมด 408 ชิ้น พบว่าของเสียมากที่สุดได้แก่กระบวนการที่ 4 คือกระบวนการเชื่อมประกอบส่วนประกอบตัวถังด้วยหุ่นยนต์มีของเสียเท่ากับ 180 ชิ้น คิดเป็นร้อยละ 92.3 รองลงมา ได้แก่ กระบวนการที่ 5 คือ กระบวนการเชื่อมเก็บงานในส่วนที่หุ่นยนต์เชื่อมไม่สามารถเชื่อมได้ มีของเสียเท่ากับ 6 ชิ้น คิดเป็นร้อยละ 3.07 และกระบวนการที่ 2 กระบวนการเชื่อมประสานส่วนประกอบของชิ้นส่วนเข้าด้วยกันมีของเสียเท่ากับ 4 ชิ้น คิดเป็นร้อยละ 2.05 จากข้อมูลปริมาณของเสียที่เกิดขึ้น ดังตารางที่ 2 ประเภทของเสียในแต่ละกระบวนการและจำนวนของเสีย ก่อนการปรับปรุง

จากรูปที่ 3 แผนภูมิพายเรโด แสดงให้เห็นถึงของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการที่ 4 คือกระบวนการเชื่อมประกอบส่วนประกอบตัวถังด้วยหุ่นยนต์ มีของเสียมากที่สุดถึงร้อยละ 92.3 จึงเป็นแนวคิดของคณะผู้วิจัยที่จะ

ดำเนินการในส่วนของการลดของเสีย โดยได้ ตัวถังรถชุด-ตักที่มีการเชื่อมด้วยหุ่นยนต์ ซึ่งเป็นปัญหาที่
 ทำการศึกษาปัญหาและสาเหตุในกระบวนการเชื่อมตัว ทำให้เกิดของเสียมากที่สุด

ตารางที่ 2 ประเภทของเสียในแต่ละกระบวนการและจำนวนของเสีย ก่อนการปรับปรุง

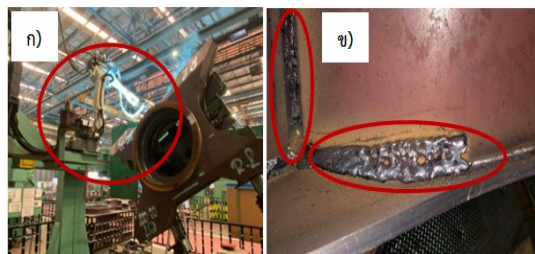
ประเภทของเสียในแต่ละกระบวนการ	จำนวนของเสีย (ชิ้น)	ของเสีย (%)
กระบวนการที่ 1	2	1.02
กระบวนการประกอบชิ้นงานในส่วนต่างๆ (การเชื่อมด้วยคน)		
กระบวนการที่ 2	4	2.05
กระบวนการเชื่อมประสานส่วนประกอบของชิ้นส่วนเข้าด้วยกัน (การเชื่อมด้วยคน)		
กระบวนการที่ 3	0	0
กระบวนการเชื่อมอุดในส่วนที่เป็นช่องว่างทั้งด้านบนและด้านล่าง (การเชื่อมด้วยคน)		
กระบวนการที่ 4	180	92.30
กระบวนการเชื่อมประกอบส่วนประกอบตัวถัง (การเชื่อมด้วยหุ่นยนต์)		
กระบวนการที่ 5	6	3.07
กระบวนการเชื่อมเก็บงานในส่วนที่หุ่นยนต์เชื่อมไม่สามารถเชื่อมได้ (การเชื่อมด้วยคน)		
กระบวนการที่ 6	2	1.02
กระบวนการตกแต่งพื้นผิวงานของแนวเชื่อม และเป็นกระบวนการในการทำความสะอาดชิ้นงาน		
กระบวนการที่ 7	0	0
กระบวนการประกอบชิ้นส่วนคงเหลือที่จะนำมาประกอบเข้ากับตัวถัง(การเชื่อมด้วยคน)		
กระบวนการที่ 8	1	0.51
กระบวนการประกอบชิ้นส่วนตัวถังกับ Cover (การเชื่อมด้วยคน)		
กระบวนการที่ 9	0	0
กระบวนการตรวจสอบคุณภาพของชิ้นงาน		
รวม	195	100



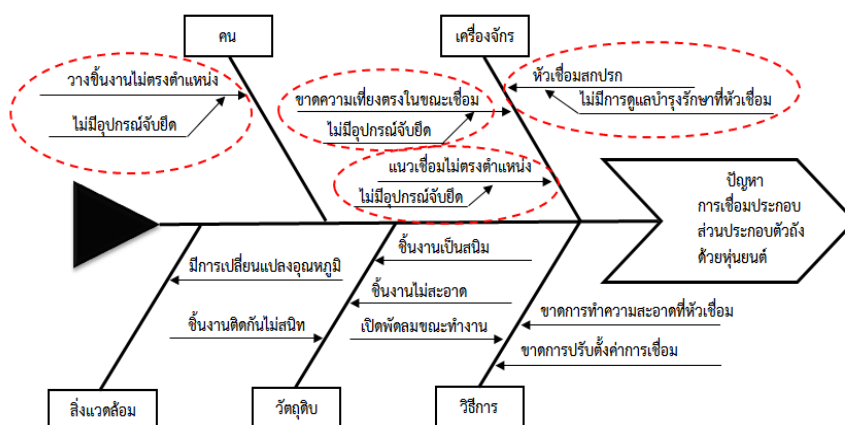
รูปที่ 3 แผนภูมิพาเรโต

2.4 วิเคราะห์ข้อมูลและหาสาเหตุของปัญหาในกระบวนการประกอบชิ้นส่วนตัวถัง

จากแผนภูมิพาเรโต กระบวนการที่ทำให้เกิดของเสียมากที่สุดคือ กระบวนการที่ 4 เป็นกระบวนการเชื่อมประกอบตัวถังด้วยหุ่นยนต์ ลักษณะการทำงานของหุ่นยนต์เชื่อมจะมีการเชื่อมชิ้นส่วนประกอบตัวถังตามลักษณะการเชื่อม ดังรูปที่ 4 ก) การเชื่อมส่วนประกอบตัวถังด้วยหุ่นยนต์ ขณะที่ทำการเชื่อมจะมีของเสียที่เกิดขึ้น ข) ของเสียที่เกิดจากกระบวนการเชื่อมของหุ่นยนต์



รูปที่ 4 ก) การเชื่อมส่วนประกอบตัวถังด้วยหุ่นยนต์
ข) ของเสียที่เกิดจากกระบวนการเชื่อมของหุ่นยนต์



รูปที่ 5 แผนภูมิแก๊งปลาวิเคราะห์หาสาเหตุ

ตารางที่ 3 การหาความสัมพันธ์ระหว่างเหตุและผล

ลำดับที่	ปัจจัยของปัญหา	การระดมสมอง (Brainstorming)							คะแนนรวม (63 คะแนน)	คิดเป็น เปอร์เซ็นต์
		ผกก.ฝ่าย ผลิต	ผกก. แผนก	Supervisor	หัวหน้า งาน	พนักงาน	หัวหน้า ควบคุม คุณภาพ	วิศวกรฝ่าย ผลิต		
1	เครื่องจักร									
	- หัวเชื่อมสกปรก	7	7	7	9	7	7	9	53	84.1
	- แนวเชื่อมไม่ตรงตำแหน่ง	7	9	9	9	9	7	9	59	93.65
2	คน									
	- วางชิ้นงานไม่ตรงตำแหน่ง	7	7	7	9	9	5	7	51	80.9
	- ขาดความเที่ยงตรงในขณะเชื่อม	9	9	7	7	7	7	9	55	87.3
3	วิธีการ									
	- ขาดการทำความสะอาดหัวเชื่อม	7	7	5	7	5	5	7	43	68.25
	- ขาดการปรับตั้งค่าการเชื่อม	5	7	7	7	5	7	7	45	71.42
4	วัสดุ									
	- ชิ้นงานเป็นสนิม	5	5	7	7	7	5	7	43	68.25
	- ชิ้นงานไม่สะอาด	5	7	7	7	5	7	7	45	71.42
5	สิ่งแวดล้อม									
	- เปิดพัดลมขณะปฏิบัติงาน	3	3	1	1	1	3	3	15	23.8
	- มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ	3	3	3	3	1	1	3	17	26.98

ความหมายระดับการให้คะแนน : 9 คะแนน หมายถึง ส่งผลโดยตรงต่อปัญหา 100%, 7 คะแนน หมายถึง ส่งผลโดยตรงต่อปัญหา 80%, 5 คะแนน หมายถึง ส่งผลโดยตรงต่อปัญหา 60%, 3 คะแนน หมายถึง ส่งผลโดยตรงต่อปัญหา 40%, 1 คะแนน หมายถึง ส่งผลโดยตรงต่อปัญหา < 20%

จากปัญหาที่เกิดขึ้นผู้วิจัยจึงได้นำปัญหาของกระบวนการเชื่อมประกอบตัวถังด้วยหุ่นยนต์มาวิเคราะห์เพื่อหาสาเหตุของปัญหา โดยใช้หลักการ 4 M 1 E คือ คน เครื่องจักร วิธีการ วัสดุ และสิ่งแวดล้อม [13] ดังรูปที่ 5 แสดงแผนภูมิแก๊งปลาเพื่อวิเคราะห์หาสาเหตุและได้ศึกษากระบวนการประกอบชิ้นส่วนตัวถังตามกระบวนการทำงานเพื่อนำมาวิเคราะห์จากแผนภูมิแก๊งปลาด้วยวิธีการระดมสมองเพื่อหาสาเหตุที่แท้จริงโดยมีการเรียนเชิญผู้ที่เกี่ยวข้องเข้าร่วมประชุมเพื่อระดมความคิดเห็นและได้นำข้อมูลมาวิเคราะห์จากการหาความสัมพันธ์ระหว่างเหตุและผลเพื่อวิเคราะห์ถึงระดับความสัมพันธ์ ดังตารางที่ 3 ซึ่งเป็นเทคนิคช่วยในการบ่งชี้สาเหตุของปัญหาที่มีโอกาสเกิดขึ้น สาเหตุหลักที่ส่งผลต่อกระบวนการเชื่อมของหุ่นยนต์มี 2 ปัจจัย ที่มีเปอร์เซ็นต์เกินกว่า 80% ได้แก่ ปัจจัยที่หนึ่ง เป็นปัจจัยของเครื่องจักรที่เกี่ยวกับหุ่นยนต์เชื่อม ที่มีสาเหตุเกิดจาก หัวเชื่อมสกปรก แนวเชื่อมไม่ตรง และขาดความเที่ยงตรงในขณะเชื่อม ปัจจัยที่สอง เป็นปัจจัยที่เกิดจากคน ที่มีสาเหตุเกิดจากการวางชิ้นงานไม่ตรงตำแหน่งด้วยเหตุนี้จึงเลือกเป็นสาเหตุของปัญหานี้มาทำการตรวจสอบและปรับปรุงแก้ไข [14]

2.5 วางแผนหาแนวทางแก้ไขปัญหาของเสีย

จากการหาความสัมพันธ์ระหว่างเหตุและผลพบว่าสาเหตุหลักเกิดจาก หัวเชื่อมสกปรก แนวเชื่อมไม่ตรงตำแหน่ง ขาดความเที่ยงตรงในขณะเชื่อมและวางชิ้นงานไม่ตรงตำแหน่ง ด้วยเหตุผลนี้จึงเลือกเป็นสาเหตุของปัญหาที่เกิดขึ้นและทำการหาวิธีการปรับปรุงแก้ไขโดยใช้หลักการ ECRS [15] จากตารางที่ 4 ผลจากการศึกษาสามารถสรุปวิธีการปรับปรุงแก้ไขออกเป็น 4 วิธี ได้แก่ 1) การบำรุงรักษาหัวเชื่อมของหุ่นยนต์ 2) สร้างอุปกรณ์จับยึด 3) ตรวจสอบการติดตั้งหุ่นยนต์งานเชื่อม และ 4) ปรับตั้งค่าโปรแกรมควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์

ตารางที่ 4 ข้อมูลของปัญหา สาเหตุและวิธีการปรับปรุงแก้ไข

ปัญหา	สาเหตุ	วิธีปรับปรุงแก้ไข
การเชื่อมประกอบส่วนประกอบตัวถังด้วยหุ่นยนต์	1. หัวเชื่อมสกปรก	- การบำรุงรักษาหัวเชื่อมของหุ่นยนต์
	2. แนวเชื่อมไม่ตรงตำแหน่ง	- ตรวจสอบการติดตั้งหุ่นยนต์งานเชื่อม - สร้างอุปกรณ์จับยึด - ปรับตั้งค่าโปรแกรมควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์
	3. ขาดความเที่ยงตรงในขณะเชื่อม	- สร้างอุปกรณ์จับยึด - ปรับตั้งค่าโปรแกรมควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์
	4. วางชิ้นงานไม่ตรงตำแหน่ง	- สร้างอุปกรณ์จับยึดสำหรับจับยึดชิ้นงาน

การกำหนดแนวทางการปรับปรุงแก้ไข ทางผู้วิจัยจะนำเสนอด้วยกัน 2 วิธี ได้แก่ 1) การบำรุงรักษาหัวเชื่อมของหุ่นยนต์ และ 2) สร้างอุปกรณ์จับยึดสำหรับ ข้อ 3) ตรวจสอบการติดตั้งหุ่นยนต์งานเชื่อม (กล่าวในหัวข้อ 2.6.2 การทดสอบการทำงานของหุ่นยนต์งานเชื่อม) และ 4) ปรับตั้งค่าโปรแกรมควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์ จะอยู่ในส่วนขั้นตอนของการทดสอบการเชื่อม ผู้วิจัยได้วางแผนการปรับปรุงแก้ไข มีดังนี้

2.5.1 การบำรุงรักษาหัวเชื่อมของหุ่นยนต์

หัวเชื่อมเป็นส่วนประกอบของหุ่นยนต์ที่ทำหน้าที่ในการเชื่อมประสานชิ้นงานให้ติดกัน แต่เนื่องจากการใช้งานอย่างต่อเนื่องมีผลทำให้เกิดสิ่งสกปรกที่เกิดขึ้นกับหัวเชื่อมได้ จึงจำเป็นต้องมีการบำรุงรักษารวมถึงการทำความสะอาดตามช่วงเวลาในการบำรุงรักษาที่ถูกกำหนดไว้ในคู่มือ การบำรุงรักษาในส่วนของอุปกรณ์อื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับหุ่นยนต์ต้องปฏิบัติตามกฎความปลอดภัยที่ผู้ผลิตกำหนดไว้อย่างเข้มงวด รวมถึงการตรวจสอบความสะอาดทั้งภายในและภายนอกหุ่นยนต์ระบบหล่อลื่นกลไก ระบบไฟฟ้า-อิเล็กทรอนิกส์ การ

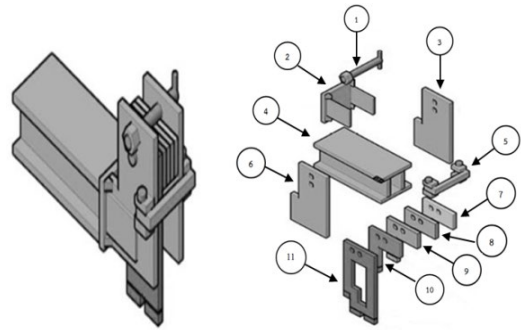
ยึดแน่นของชิ้นส่วนต่าง ๆ ก็จะทำให้หุ่นยนต์อุตสาหกรรมทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีอายุการใช้งานได้ยืนยาวขึ้น คณะผู้วิจัยจึงได้จัดทำแผนการบำรุงรักษาหุ่นยนต์งานเชื่อมไฟฟ้าตามคู่มือเพื่ออธิบายให้พนักงานทุกคนได้รับทราบ ดังตารางที่ 5 การบำรุงรักษาหุ่นยนต์เชื่อมไฟฟ้า [16]

ตารางที่ 5 การบำรุงรักษาหุ่นยนต์เชื่อมไฟฟ้า

ระยะเวลา	หัวข้อ	ลักษณะ
ตรวจสอบ	การตรวจสอบ	การตรวจสอบ
การ ตรวจสอบ ทุกวันโดย พนักงาน	สภาพภายนอก	ความสะอาดของพื้นที่ การทำงานและหุ่นยนต์
	มาร์กต่าง ๆ ที่ติดบนตัว หุ่นยนต์	ไม่หลุดออก
	สายสัญญาณที่ตัวหุ่นยนต์	ไม่หลวม ฉนวนไม่ฉีก ขาด
	อุปกรณ์ชุดหัวเชื่อม	ไม่มีรอยร้าว หรือเสีย รูปทรง
	ตำแหน่งของหัวเชื่อม	ตรงตามตำแหน่งที่ กำหนดไว้
	หัวเชื่อม	ไม่มีสิ่งสกปรกและ สายไฟไม่หลวม
	ชุดป้อนลวดเชื่อม	ไม่มีฝุ่น สภาพตัวป้อนดี
	สายสัญญาณต่าง ๆ และ สายแก๊ส	ไม่รั่ว ไม่หลวม ไม่ฉีก ขาด
ทุก ๆ 3 เดือน	นอตยึดฐานหุ่นยนต์	ไม่คลาย ไม่หลวม
ทุก ๆ 6 เดือน	หัวต่อสัญญาณหุ่นยนต์	ไม่คลาย ไม่หลวม
ทุก ๆ 1 ปี	สายสัญญาณภายในตัว หุ่นยนต์	สายภายในไม่มีรอยขาด
ทุก ๆ 3 ปี	ห้องเกียร์แกนที่ 1, 2, 3	ตรวจสอบ เปลี่ยน จาระบีใหม่
	ห้องเกียร์แกนที่ 4, 5, 6	ตรวจสอบ เปลี่ยน จาระบีใหม่
	สายพานไทมิ่ง	ตรวจสอบ เปลี่ยนใหม่
	สายสัญญาณภายในตัว หุ่นยนต์	ตรวจสอบฉนวนเปลี่ยน ใหม่
	แบตเตอรี่จ่ายไฟสำหรับ เอ็นโค้ดเดอร์	เปลี่ยนใหม่

2.5.2 การออกแบบอุปกรณ์จับยึด

จากสาเหตุแนวเชื่อมไม่ตรงตำแหน่ง ขาดความเที่ยงตรงในขณะเชื่อมและการวางชิ้นงานไม่ตรงตำแหน่ง คณะผู้วิจัยได้ระดมความคิดกับผู้ที่เกี่ยวข้องจึงมีแนวทางในการแก้ไขปัญหาโดยการออกแบบอุปกรณ์จับยึดให้มีความเที่ยงตรง เพื่อป้องกันกับความผิดพลาดในแนวเชื่อมที่เกิดขึ้น



รูปที่ 6 การออกแบบอุปกรณ์จับยึด

ส่วนประกอบอุปกรณ์จับยึดในการออกแบบครั้งนี้จะครอบคลุมถึงการจับยึดชิ้นงานในการประกอบรุ่นอื่น ๆ อีกด้วย ส่วนประกอบมีดังนี้ 1) สลักล็อก 2) ที่จับยึดสตั๊ปเปอร์ 3) ฝาข้างยึดสตั๊ปเปอร์ R/H 4) แขนจับยึดกับอุปกรณ์จับยึด 5) ที่จับยึดสตั๊ปเปอร์หลัง 6) ฝาข้างยึดสตั๊ปเปอร์ L/H 7) สตั๊ปเปอร์ งานรุ่น SK 130 L 8) สตั๊ปเปอร์ งานรุ่น SK 135 STD 9) สตั๊ปเปอร์ งานรุ่น SK 200 STD 10) สตั๊ปเปอร์ งานรุ่น SK 2500 STD 11) สตั๊ปเปอร์ งานรุ่น SK 300 STD ดังรูปที่ 6 แสดงการออกแบบอุปกรณ์จับยึด

การออกแบบอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานเพื่อทำการประกอบใช้ในการเชื่อมจะทำให้เกิดความคล่องตัวในการทำงาน สะดวกและรวดเร็ว การตรวจสอบคุณภาพของอุปกรณ์จับยึดจะต้องมีความเที่ยงตรงสูง ทั้งขนาดความฉากและความขนานกัน เพื่อช่วยในการทำงานสามารถลดโอกาสความผิดพลาดของการทำงานและสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานให้สูงขึ้น [17]-[19]

วิธีการในการออกแบบอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานสามารถสรุปได้ดังนี้

1. การออกแบบอุปกรณ์จับยึดสามารถทำให้คนใช้มือทั้งสองข้างจับชิ้นงานป้อนและนำออก โดยไม่มีสิ่งกีดขวาง
2. การออกแบบสำหรับจับยึดชิ้นงานเล็กๆ หลายชิ้น ควรออกแบบให้สามารถจับยึดชิ้นงานเดียวได้อย่างรวดเร็ว
3. การออกแบบให้สามารถทำงานได้ครั้งละหลายๆ ชิ้น
4. การออกแบบอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน ควรออกแบบให้ง่ายต่อการใช้งาน
5. การออกแบบต้องคำนึงถึงความปลอดภัยในการใช้อุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน

2.6 การติดตั้งอุปกรณ์จับยึดเพื่อทดสอบการทำงาน

งานของหุ่นยนต์งานเชื่อม

2.6.1 การติดตั้งอุปกรณ์จับยึด

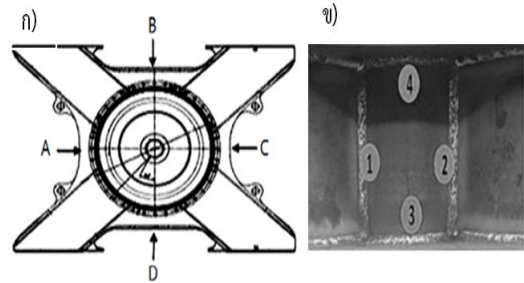
หลังจากการออกแบบและสร้างอุปกรณ์จับยึดเสร็จเรียบร้อยแล้ว ทำการติดตั้งอุปกรณ์จับยึดลงบนแท่นสำหรับวางยึดติดกับชิ้นงาน เพื่อนำมาทดสอบการทำงานของหุ่นยนต์เชื่อม ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์จับยึดชิ้นส่วนตัวถัง

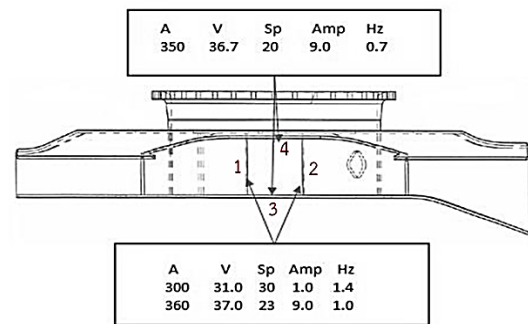
2.6.2 การทดสอบการทำงานหุ่นยนต์งานเชื่อม

ก่อนการทดสอบ จะมีการกำหนดค่าต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดสอบดังนี้



รูปที่ 8 ก) ตำแหน่งแต่ละด้านที่มีการเชื่อมด้วยหุ่นยนต์

ข) จุดการเชื่อมของหุ่นยนต์จำนวน 4 จุด ของแต่ละด้าน



รูปที่ 9 กำหนดเงื่อนไขค่าพลังงานไฟฟ้าในการเชื่อมของหุ่นยนต์เชื่อม

1) ตำแหน่งการเชื่อมของหุ่นยนต์ ในการทดสอบการเชื่อมของหุ่นยนต์จากการปฏิบัติงานจริง จะมีการกำหนดตำแหน่งการเชื่อมออกเป็น 4 ด้าน ประกอบไปด้วยด้าน A, B, C และ D ในแต่ละด้านจะแบ่งการเชื่อมออกเป็น 4 จุด ดังรูปที่ 8 ก) ตำแหน่งแต่ละด้านที่มีการเชื่อมด้วยหุ่นยนต์ ข) จุดการเชื่อมของหุ่นยนต์จำนวน 4 จุด ของแต่ละด้าน

2) การกำหนดเงื่อนไขในการทดสอบด้านพลังงานไฟฟ้าเพื่อใช้ในการเชื่อมของหุ่นยนต์ การเชื่อมจุดที่ 1 และที่ 2 แบ่งการทดสอบออกเป็น 2 เงื่อนไขเพื่อนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับในด้านของพลังงานไฟฟ้าที่ดีที่สุด เงื่อนไขการทดสอบมีดังนี้ เงื่อนไขที่ 1 A(Ampere) = 300, V(Volt) = 31, Speed = 30mm/s , Amp(Amplitude) = 1 และ Hz = 1.4 เงื่อนไขที่ 2 A(Ampere) = 360, V(Volt) = 37, Speed = 23mm/s, Amp(Amplitude) = 9 และ

Hz = 1 สำหรับการทดสอบจุดที่ 3 และ 4 กำหนดให้ A(Ampere) = 350, V(Volt) = 36.7, Speed = 20mm/s, A(Amplitude) = 9 และ Hz = 0.7 เป็นค่าที่ใช้ในการทดสอบมาตรฐานเดียวกัน ดังรูปที่ 9 การกำหนดเงื่อนไขค่าพลังงานไฟฟ้าในการเชื่อมของหุ่นยนต์เชื่อม

2.6.3 ผลการทดสอบการเชื่อมหลังจากการติดตั้งอุปกรณ์จับยึด

ผลที่ได้จากการทดสอบการเชื่อมของหุ่นยนต์ดังตารางที่ 6 จากการทดสอบจุดที่ 1 และจุดที่ 2 จำนวน

ชิ้นงานที่ทำการทดสอบ รวม 40 ชิ้น ทดสอบ 2 ครั้ง พบว่าเงื่อนไข ที่ 2 A (Ampere) = 360, V(Volt) = 37, Speed = 23 mm/s , Amp (Amplitude) = 9 และ Hz = 1 มีผลที่ทำให้เกิดของเสียน้อยที่สุดคิดเป็นร้อยละ 10 การทดสอบจุดที่ 3 และจุดที่ 4 A (Ampere) = 350, V(Volt) = 36.7, Speed = 20 mm/s, Amp (Amplitude) = 9 และ Hz = 0.7 ของเสียที่เกิดขึ้นคิดเป็นร้อยละ 5 ผลที่ได้จากการทดสอบสรุปได้ว่าการติดตั้งอุปกรณ์จับยึดสามารถช่วยลดของเสียที่เกิดขึ้นได้จริง คณะผู้วิจัยจึงได้นำไปทำการผลิตจริงต่อไป

ตารางที่ 6 ผลการทดสอบการเชื่อมของหุ่นยนต์จากการติดตั้งอุปกรณ์จับยึด

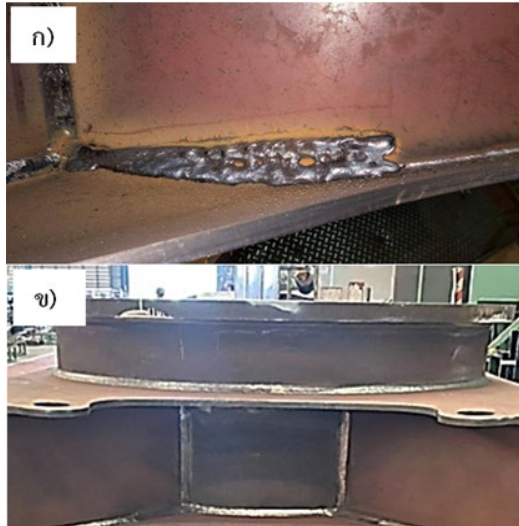
จุดเชื่อมในการทดสอบ	การทดสอบ	จำนวนชิ้นงานทดสอบ (ชิ้น)	ค่ากำหนดพลังงานไฟฟ้าในการเชื่อม					ผลการทดสอบ		
			Current (Ampere)	Potential (Volt)	Speed (mm/s)	Amp (Amplitude)	Frequency (Hz)	จำนวนชิ้นงานผ่านเกณฑ์ (ชิ้น)	จำนวนชิ้นงานไม่ผ่านเกณฑ์ (ชิ้น)	เปอร์เซ็นต์ไม่ผ่านเกณฑ์
จุดที่ 1	ครั้งที่ 1	20	300	31	30	1	1.4	17	3	15%
		20	360	37	23	9	1	18	2	10%
	ครั้งที่ 2	20	300	31	30	1	1.4	17	3	15%
		20	360	37	23	9	1	18	2	10%
จุดที่ 2	ครั้งที่ 1	20	300	31	30	1	1.4	17	3	15%
		20	360	37	23	9	1	18	2	10%
	ครั้งที่ 2	20	300	31	30	1	1.4	17	3	15%
		20	360	37	23	9	1	18	2	10%
จุดที่ 3	ครั้งที่ 1	20	350	36.7	20	9	0.7	19	1	5%
	ครั้งที่ 2	20	350	36.7	20	9	0.7	19	1	5%
จุดที่ 4	ครั้งที่ 1	20	350	36.7	20	9	0.7	19	1	5%
	ครั้งที่ 2	20	350	36.7	20	9	0.7	19	1	5%

2.6.4 การเปรียบเทียบชิ้นงานก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุง

ก่อนการปรับปรุงชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเชื่อมของหุ่นยนต์ พบว่าตำแหน่งรอยเชื่อมที่กำหนดไว้ตั้งแต่เริ่มต้นไม่เป็นไปตามแนวการเชื่อมที่ถูกต้อง หลังจากการวิเคราะห์หาสาเหตุและนำไปสู่การแก้ไข ปัญหาที่เกิดขึ้น พบว่าหลังจากการปรับปรุงกระบวนการเชื่อมของหุ่นยนต์ แนวการเชื่อมจะเป็นไปตามค่าที่

กำหนดไว้ ดังรูปที่ 10 ก) ชิ้นงานก่อนการปรับปรุง ข) ชิ้นงานหลังการปรับปรุง

การตรวจสอบแนวเชื่อมและความเที่ยงตรง หลังจากการปรับปรุง ผู้วิจัยได้นำชิ้นงานไปตรวจสอบด้วยสายตา และทำการทดสอบด้วยสารแทรกซึม (Penetrant Testing – PT) จากการทดสอบไม่พบการแทรกซึมจากแนวการเชื่อม และสภาพรอยเชื่อมทั่วไปจากการเชื่อม เป็นไปตามแนวการเชื่อมที่ถูกต้อง



รูปที่ 10 เปรียบเทียบชิ้นงาน ก) ชิ้นงานก่อนการปรับปรุง ข) ชิ้นงานหลังการปรับปรุง

3. ผลการศึกษา

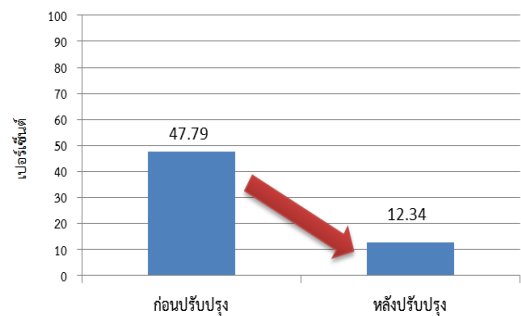
ผลจากการปรับปรุงและแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการที่ 4 เพื่อลดของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเชื่อมของหุ่นยนต์ ดังตารางที่ 7 พบว่ายอดรวมปริมาณการผลิต 2 เดือน เท่ากับ 397 ชิ้น เปอร์เซ็นต์ของเสียหลังการปรับปรุงเฉลี่ยเท่ากับ 12.34% เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการปรับปรุงก่อนและหลัง จากตารางที่ 8 พบว่าของเสียก่อนการปรับปรุงจากเท่ากับ 47.79 % หลังจากปรับปรุงปริมาณงานเสียเท่ากับ 12.34 % ดังรูปที่ 11 ของเสียที่เกิดจากกระบวนการประกอบชิ้นส่วนตัวถังลดลงร้อยละ 74.18

ตารางที่ 7 ข้อมูลปริมาณการผลิตและจำนวนของเสียหลังการปรับปรุง

เดือน	ปริมาณการผลิต (ชิ้น)	ของเสีย (ชิ้น)	เปอร์เซ็นต์ของเสีย
ส.ค.	197	24	12.00
ก.ย.	200	25	12.69
รวม	397	49	12.34

ตารางที่ 8 เปรียบเทียบจำนวนของเสียก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุง

การปรับปรุง	ปริมาณการผลิต (ชิ้น)	ของเสีย (ชิ้น)	เปอร์เซ็นต์ของเสีย
ก่อนการปรับปรุง	408	195	47.79
หลังการปรับปรุง	397	49	12.34



รูปที่ 11 กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ของเสียก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุง

4. อภิปรายผลและสรุป

จากการศึกษากระบวนการประกอบชิ้นส่วนตัวถังรถชุดตก โดยใช้เครื่องมือคุณภาพ 7 QC Tools เพื่อนำมาใช้เป็นเครื่องมือในการแก้ไขปัญหา จากการศึกษาพบว่าของเสียมากที่สุดเกิดขึ้นที่กระบวนการประกอบชิ้นส่วนตัวถังด้วยหุ่นยนต์ จากการวิเคราะห์ด้วยผังแสดงเหตุและผล ปัญหาเกิดจาก 2 ปัจจัย ได้แก่ ปัจจัยที่ 1 เกิดจากหุ่นยนต์ เกิดจากสาเหตุหัวเชื่อมสกปรก แนวเชื่อมไม่ตรง และขาดความเที่ยงตรงในขณะที่เชื่อม ปัจจัยที่ 2 เกิดจากคน เกิดจากสาเหตุการวางชิ้นงานไม่ตรงตำแหน่ง การแก้ไขปัญหาทางคณะผู้วิจัยได้ดำเนินการจัดทำคู่มือการบำรุงรักษาหุ่นยนต์แจ้งให้พนักงานได้รับรู้เกี่ยวกับการดูแลบำรุงรักษาเพื่อป้องกันการเกิดปัญหาในส่วนประกอบของหุ่นยนต์ทั้งระบบ และได้จัดทำอุปกรณ์จับยึดสำหรับ

จับยึดชิ้นงานในการเชื่อม เพื่อแก้ปัญหาในส่วนที่เกี่ยวข้องกับการเชื่อมด้วยหุ่นยนต์

ผลการวิจัยและการรวบรวมข้อมูลพบว่าข้อมูลก่อนการปรับปรุงในเดือนมิถุนายน-กรกฎาคม พ.ศ.2563 จำนวนของเสียที่เกิดจากกระบวนการงานเชื่อมจากเดิมคิดเป็นร้อยละ 47.79 เมื่อเปรียบเทียบข้อมูลหลังจากการปรับปรุงจากการเก็บข้อมูลในเดือนสิงหาคม-กันยายน พ.ศ.2563 จำนวนของเสียลดลงเหลือร้อยละ 12.34 ทำให้เห็นว่าการปรับปรุงในครั้งนี้มีผลทำให้ของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการประกอบชิ้นส่วนตัวถัง ลดลงถึงร้อยละ 74.18

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] B. G. Chandankart and V. M. Chapte, "Productivity Improvement in Welding Robot," *International Journal of Current Engineering and Technology*, pp. 251-254, Oct. 2016.
- [2] M. Supawat and P. Jirawat, "Defects Reduction in Metal Parts Production Process," *Kasem Bundit Engineering Journal*, vol. 6, no. 1, pp. 91-106, Jun. 2016.
- [3] C. Khunponkaew, *Productivity Improvement Principle*, 1st ed. Bangkok: Prachachon Publisher. Thailand Productivity Institute, 2001.
- [4] S. Tangphaitoon, *7 Waste Reduction by Kaizen for Production Improvement*, 1st ed. Nonthaburi, 2004.
- [5] R. B. Chase, *Production and Operations Management*, 7th ed. McGraw-Hill, 1995.
- [6] K. Pipatpanyanukul, *Quality Control*, Top Textbook, 2014.
- [7] S. Nataphan, *Quality Control*, SE-ED Textbook, 2008.
- [8] G. S. Hegde, *A textbook on Industrial Robotics*, University Science Press, 2008.
- [9] M. Mali and K. Inamdar, "Effect of Spot Weld Position Variation on Quality of Automobile Sheet Metal Parts," *International Journal of Applied Research in Mechanical Engineering (IJARME)*, vol. 2, pp. 23-27, 2012.
- [10] N. Ma, H. Huang and H. Murakawa, "Effect of jig constraint position and pitch on welding deformation," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 221, pp. 154-162, Jul. 2015.
- [11] C. Chakrad, S. Nattakorn and D. Phattharaphong, "Waste reduction in welding process of automotive suspension," *RMUTL Journal*, vol. 7, no. 1, pp. 28-141, Jun. 2014.
- [12] A. Kitsutipong and P. Akkharapathomphong, "Failure Reduction in welding process for Automotive Seat Frame," *Research and Development Journal*, vol. 23, no. 1, pp. 84-92, 2012.
- [13] K. Ploypanichcharoen, *Principle of Quality Control*, Technology Promotion Association (Thailand-japan), 2007.
- [14] C. Surasak and K. Rapee, "Product quality improvement in plastic injection process by statistical quality control," in *Proceeding of 15th RSU National Graduate Research Conference*, Rangsit Univesity,Thailand, 2020, pp. 2369-2381.

- [15] W. Jirawat, "Waste reduction in a manufacturing process: A Case Study of dadear Ceramics Factory in lampang provide," *RMUTP Research Journal*, vol. 10, no. 2, pp. 43-53, Sep. 2016.
- [16] T.Manop,*Preventative Maintenance Items for Industrial Robots*, Technology promotion Mag, vol. 36, no. 207, pp. 31-34, Nov. 2009.
- [17] T. Poovanart and T. Chark, "The Comparative Study on Operation Processes and Project Management Body of Knowledge: A Case Study on a Jig Production for the Robotic Welding Machine," *EAU HERITAGE Journal Social ScienceandHumanity*,vol.7,no.2,Aug. 2017.
- [18] W. Methong, *Jig and Fixture Design*, Technology Promotion Association (Thailand-japan), 2008.
- [19] K. Onuma, S. Arkhom, J. Ratchanikorn and S. Worlaluck, "Work Instruction Preparation and Jig Construction for Product Inspection in Bracket Production Process Case Study: SPE Enterprise Co., Ltd," *IE Network Conference*, Preparation Summary, Thailand, 2012, pp. 476-484.

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

ผลของปริมาณเมือกกระเจี๊ยบเขียวและวุ้นเมล็ดแมงลักต่อคุณภาพเยลลี่กระเจี๊ยบแดงพร้อมดื่ม

วรลักษณ์ แสงธาราทิพย์ อนุวัตร แจ้จันต์ และกมลวรรณ แจ้จันต์*

ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

50 ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร 10900

รับบทความ 24 มกราคม 2565 แก้ไขบทความ 21 กรกฎาคม 2565 ตอรับบทความ 30 สิงหาคม 2565

บทคัดย่อ

กระเจี๊ยบเขียว และเมล็ดแมงลัก เป็นพืชสมุนไพรไทยและเป็นแหล่งของใยอาหารที่ดีให้ประโยชน์ต่อสุขภาพของผู้บริโภค เมือกและวุ้นที่ได้จากกระเจี๊ยบเขียวและเมล็ดแมงลักมีลักษณะเป็นเจล ซึ่งเป็นสมบัติที่ดีในการเป็นวัตถุดิบหลักของผลิตภัณฑ์เยลลี่พร้อมดื่ม งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์เยลลี่กระเจี๊ยบพร้อมดื่มเสริมคุณค่าทางโภชนาการจากกระเจี๊ยบเขียวและเมล็ดแมงลัก เพื่อเป็นผลิตภัณฑ์ทางเลือกสำหรับผู้บริโภคที่ดูแลสุขภาพ ในการเตรียมวัตถุดิบ พบว่า เมือกกระเจี๊ยบเขียวและวุ้นเมล็ดแมงลักมีผลผลิต ร้อยละ 38.7 และ 73.7 ตามลำดับ จากการศึกษาผลของปริมาณเมือกกระเจี๊ยบเขียว วุ้นเมล็ดแมงลัก และน้ำในผลิตภัณฑ์เยลลี่กระเจี๊ยบพร้อมดื่มต่อคะแนนความชอบในคุณลักษณะด้านต่าง ๆ โดยวางแผนการทดลองแบบ Mixture design ซึ่งมีจำนวน 7 สิ่งทดลอง พบว่าเมื่อปริมาณเมือกกระเจี๊ยบเขียวและวุ้นเมล็ดแมงลักเพิ่มขึ้นส่งผลให้คะแนนความชอบด้านกลิ่นรสโดยรวม เนื้อสัมผัส รสหวาน รสเปรี้ยว และความชอบโดยรวมลดลง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ปริมาณเมือกกระเจี๊ยบเขียวและน้ำมีอิทธิพลต่อคะแนนความชอบมากกว่าวุ้นเมล็ดแมงลัก การศึกษาผลของปริมาณแคลปาคาราจีแนนที่ ร้อยละ 0.00, 0.25 และ 0.50 ต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์เยลลี่พร้อมดื่ม พบว่า เมื่อปริมาณแคลปาคาราจีแนนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยแคลปาคาราจีแนน ร้อยละ 0.25 มีคะแนนความชอบด้านเนื้อสัมผัสและความชอบโดยรวมสูงที่สุด สูตรที่เหมาะสมของเยลลี่กระเจี๊ยบพร้อมดื่มมีอัตราส่วนของ เมือกกระเจี๊ยบเขียว วุ้นเมล็ดแมงลัก และน้ำ เท่ากับ 1:1:3 และปริมาณแคลปาคาราจีแนน ร้อยละ 0.25

คำสำคัญ : เมือกกระเจี๊ยบเขียว; วุ้นเมล็ดแมงลัก; กระเจี๊ยบ; เยลลี่พร้อมดื่ม; คุณภาพ

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +66 2562 5007, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: fagikwj@ku.ac.th

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

Effect of Okra Mucilage and Basil Seed Mucilage on the Qualities of Roselle Jelly Drink

Woraluk Saengtaratip, Anuvat Jangchud and Kamolwan Jangchud*

Department of product development, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University
50 Ngamwongwan Road, Ladyao, Chatuchak, Bangkok 10900

Received 24 January 2022; Revised 21 July 2022; Accepted 30 August 2022

Abstract

Okra and basil seeds are Thai herbs and good sources of fiber which provide health benefits to the consumers. Okra mucilage and basil seed mucilage have a jelly-like texture, which is a good property for using as the main ingredient of jelly drink products. This research aimed to develop a roselle jelly drink from okra mucilage and basil seed mucilage as an alternative product for healthy consumers. The yield of okra mucilage and basil seed mucilage from the preparation process was 38.7% and 73.7%, respectively. The effect of okra mucilage, basil seed mucilage and water content on the liking score of the roselle jelly drink attributes was investigated using mixture design experiment having seven formulations. The result showed that the increase in okra mucilage and basil seed mucilage resulted in decreased liking score of overall flavor, texture, sweetness, sourness and overall liking. Okra mucilage and water significantly affected liking scores of roselle jelly drink more than basil seed mucilage. The effect of kappa-carrageenan (0.00, 0.25 and 0.50%) on the quality of products indicated that when kappa-carrageenan increased, the hardness significantly increased ($p \leq 0.05$). The product containing 0.25% kappa-carrageenan gave the highest liking score for texture and overall liking. The optimal formula of the roselle jelly drink product contained okra mucilage, basil seed mucilage and water at the ratio of 1:1:3 and 0.25% kappa-carrageenan.

Keywords : Okra Mucilage; Basil Seed Mucilage; Roselle; Jelly Drink; Quality

* Corresponding Author. Tel.: +66 2562 5007, E-mail Address: fagikwj@ku.ac.th

1. บทนำ

กระเจี๊ยบเขียว หรือกระเจี๊ยบมอญ มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Abelmoschus esculentus* (L.) Moench อยู่ในวงศ์ Malvaceae เป็นพืชสมุนไพรที่มีใยอาหารสูง และมีสารประกอบฟีนอลิกที่มีฤทธิ์ในการต่อต้านอนุมูลอิสระ โดยกระเจี๊ยบเขียวฝักสด 100 กรัม มีปริมาณใยอาหาร 3.2 กรัม [1], [2] กระเจี๊ยบเขียวมีเพคตินซึ่งเป็นใยอาหารที่ละลายน้ำได้ ช่วยลดคอเลสเตอรอลในเลือด และลดความเสี่ยงของโรคหัวใจ ใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำช่วยในการทำงานของระบบขับถ่าย [3] นอกจากนี้ฝักของกระเจี๊ยบเขียวยังมีเมือกเส้น หรือเรียกว่า มิวซิเลต (Mucilage) เป็นสารประเภทโพลีแซ็กคาไรด์ ซึ่งถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร ช่วยในการปรับปรุงเนื้อสัมผัส เพิ่มความหนืด ช่วยให้เกิดความคงตัวและใช้เป็นสารก่อเจล [4], [5] งานวิจัยต่าง ๆ ยังพบว่า กระเจี๊ยบเขียวมีส่วนช่วยรักษาอาการและลดอัตราการเกิดโรคต่าง ๆ [6]-[8]

เมล็ดแมงลัก เป็นผลผลิตภายในประเทศที่มีราคาไม่สูง มีประโยชน์ต่อสุขภาพ เมื่อเมล็ดสัมผัสน้ำ ส่งผลให้สารเมือก หรือมิวซิเลตของตัวมีลักษณะเป็นวุ้นรอบเมล็ด มิวซิเลตเป็นใยอาหารที่ละลายน้ำได้ จึงช่วยเพิ่มกากใยในระบบทางเดินอาหาร มีส่วนช่วยในการกระตุ้นระบบขับถ่าย เมื่อรับประทานจะรู้สึกอึดท้อง แต่ไม่ให้อาหารผ่าน จึงนิยมนำเมล็ดแมงลักมาใช้ในผลิตภัณฑ์เพื่อสุขภาพและผลิตภัณฑ์ช่วยควบคุมน้ำหนัก เมือกจากเมล็ดแมงลักเป็นแหล่งของไฮโดรคอลลอยด์ เช่น กลูโคแมนแนน ไซแลน และกลูแคน [9] ที่มีหน้าที่และคุณสมบัติต่าง ๆ ทั้งเป็นสารอิมัลซิไฟเออร์ สารก่อให้เกิดโฟม สารเพิ่มความหนืด สารก่อให้เกิดเจล สารช่วยจับตัว สารทดแทนไขมัน สารเพิ่มความคงตัว และใช้เป็นแหล่งของใยอาหาร [10], [11] นอกจากนี้ยังมีการเติมเมล็ดแมงลักในผลิตภัณฑ์อาหารและเครื่องดื่มเพื่อสุขภาพ เช่น การพัฒนาผลิตภัณฑ์เยลลี่เมาเครื่องดื่มเสริมใยอาหารจากวุ้นเมล็ดแมงลัก [12] การเติมเมล็ดแมงลักในเครื่องดื่มน้ำผลไม้ ทำให้มีโปรตีนและใยอาหารสูงขึ้น และช่วยเพิ่มความคงตัวของผลิตภัณฑ์ [13]

เยลลี่พร้อมดื่ม (Jelly drink) หรือเยลลี่เหลว (Liquid jelly) หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำผักผลไม้ ธัญชาติ หรือสมุนไพร มาคั้นหรือสกัด แล้วผสมกับสารให้ความหวานและสารก่อให้เกิดเจลในปริมาณที่เหมาะสม อาจผสมกรดและส่วนประกอบอื่น ๆ เคี้ยวให้มีความชื้นเหนียวพอเหมาะ บรรจุในภาชนะที่ปิดได้สนิท โดยต้องมีลักษณะเป็นวุ้นเหลว สามารถใช้หลอดดูดได้ [14] เนื้อสัมผัสเป็นคุณภาพที่สำคัญคุณภาพหนึ่งของเยลลี่พร้อมดื่ม ดังนั้นการเสริมสารที่ก่อให้เกิดเจลลงไปจะช่วยปรับปรุงเนื้อสัมผัสให้แก่ผลิตภัณฑ์ แคปซาคาราจีแนน เป็นไฮโดรคอลลอยด์ที่สกัดได้จากสาหร่ายทะเลสีแดง ทำหน้าที่เป็นสารก่อให้เกิดเจล สารเพิ่มความข้นหนืด และสารช่วยให้ความคงตัวในผลิตภัณฑ์อาหาร สามารถละลายได้ดีในน้ำร้อน เมื่อเย็นตัวลงจะเกิดเจลที่สามารถเปลี่ยนกลับเป็นของเหลวได้เมื่อได้รับความร้อน และเกิดเจลอีกครั้งเมื่อเย็นตัวลง (Thermoreversible gel) เจลที่ได้มีลักษณะใส เนื้อสัมผัสแข็งเปราะ โดยในผลิตภัณฑ์เยลลี่และขนมหวานที่มีลักษณะเป็นเจล มักใช้แคปซาคาราจีแนน ร้อยละ 0.5-1.0 [15] จากงานวิจัยที่ศึกษาผลของปริมาณคาราจีแนนในเยลลี่พร้อมดื่มกลั่นกลาย พบว่า ปริมาณคาราจีแนนที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความแข็งเพิ่มขึ้น และปริมาณคาราจีแนนที่ร้อยละ 0.4-0.8 ของน้ำหนักสูตร ส่งผลให้คะแนนความชอบโดยรวมของเยลลี่พร้อมดื่มกลั่นกลายสูงที่สุด [16]

การเข้าสู่สังคมผู้สูงอายุและปัญหาสุขภาพที่พบมากขึ้นในปัจจุบัน ทำให้ผู้บริโภคให้ความสำคัญกับการบริโภคอาหารที่มีประโยชน์ต่อสุขภาพ รวมทั้งให้ความสนใจผลิตภัณฑ์ที่เพิ่มคุณค่าทางโภชนาการ และผลิตภัณฑ์จากธรรมชาติมากขึ้น [17] อีกทั้งเยลลี่พร้อมดื่มเป็นอาหารที่ย่อยง่าย สามารถเข้าถึงผู้บริโภคได้ทุกเพศทุกวัย แต่ผลิตภัณฑ์โดยทั่วไปยังมีคุณค่าทางโภชนาการค่อนข้างต่ำ มีการเติมสารแต่งสี แต่งกลิ่นรส และวัตถุกันเสีย ดังนั้นการพัฒนาเยลลี่พร้อมดื่มที่ดีต่อสุขภาพและเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการจะเป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับผู้บริโภค งานวิจัยนี้เห็นถึงประโยชน์ของ

กระเจี๊ยบเขียวและเมล็ดแมงลัก ซึ่งเป็นผลผลิตภายในประเทศที่มีราคาไม่สูง เป็นแหล่งของใยอาหารและสารต้านอนุมูลอิสระจากธรรมชาติที่สำคัญ จึงนำมาใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับการพัฒนาผลิตภัณฑ์วัตถุประสงคของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาผลของปริมาณเมือกกระเจี๊ยบเขียวและวันเมล็ดแมงลักต่อคุณภาพเยลลี่กระเจี๊ยบพร้อมดื่ม และปรับปรุงให้มีคุณภาพเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 การเตรียมเมือกกระเจี๊ยบเขียวและวันเมล็ดแมงลัก

เตรียมเมือกจากกระเจี๊ยบเขียว โดยนำกระเจี๊ยบเขียวสด (ทั้งฝัก) จากตลาดอมรพันธ์ เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร ล้างทำความสะอาด สะเด็ดน้ำ หั่นเป็นชิ้นตามแนวยาว แยกเมล็ดภายในฝักออก หั่นเป็นชิ้นขนาด 4 เซนติเมตร นำไปลวกในน้ำอุณหภูมิ 90 ± 2 องศาเซลเซียส นาน 2 นาที [18] จากนั้นปั่นผสมกับน้ำอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เพื่อสกัดมิวซิเลจ [19] โดยใช้ปริมาณน้ำต่อน้ำหนักกระเจี๊ยบเขียวในอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก ปั่นด้วยความเร็วสูง กรองแยกกากออก จะได้เมือกสีเขียว เตรียมวันเมล็ดแมงลัก โดยนำเมล็ดแมงลักแห้ง ตราข้าวทอง ร่อนผ่านตะแกรงเพื่อกำจัดฝุ่นและสิ่งปลอมปนออก นำเมล็ดไปแช่น้ำสะอาดที่อุณหภูมิ 65 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 นาที ในอัตราส่วนน้ำต่อเมล็ดแมงลัก เท่ากับ 66:1 โดยน้ำหนัก [20], [21] นำเมล็ดแมงลักที่พองตัวเต็มที่แล้วกรองแยกน้ำออกด้วยกระชอน นำไปปั่นให้ละเอียด กรองกากและเมล็ดออก จะได้วันชั้นหนืดสีขาว

2.2 การศึกษาอิทธิพลของเมือกกระเจี๊ยบเขียว วันเมล็ดแมงลัก และน้ำต่อคุณภาพเยลลี่กระเจี๊ยบพร้อมดื่ม

เยลลี่กระเจี๊ยบพร้อมดื่มมีส่วนผสมหลัก คือ เมือกกระเจี๊ยบเขียว วันเมล็ดแมงลัก และน้ำ ร้อยละ

77.8 ของน้ำหนักสูตรและส่วนผสมอื่น ๆ ประกอบด้วย น้ำกระเจี๊ยบแดง (เตรียมจากดอกกระเจี๊ยบแห้ง ร้อยละ 10) น้ำตาลทราย กรดซิตริก และเกลือป่น ร้อยละ 10, 12, 0.1 และ 0.1 ตามลำดับ งานวิจัยนี้ได้ศึกษาปริมาณส่วนผสมหลักในอัตราส่วนต่าง ๆ โดยใช้แผนการทดลองแบบผสม (Mixture design) กำหนดปริมาณเมือกกระเจี๊ยบเขียว และวันเมล็ดแมงลัก อยู่ในช่วงร้อยละ 0 ถึง ร้อยละ 45 น้ำอยู่ในช่วงร้อยละ 20 ถึงร้อยละ 90 ของน้ำหนักวัตถุดิบหลัก (77.8%) กำหนดสิ่งทดลองที่ครอบคลุมแผนการทดลองจำนวน 7 สิ่งทดลอง ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สิ่งทดลองที่ได้จากแผนการทดลองแบบผสม

สิ่งทดลอง	X_1	X_2	X_3	X_1 (ร้อยละ)	X_2 (ร้อยละ)	X_3 (ร้อยละ)
1	0.10	0.00	0.90	7.8	0.0	70.0
2	0.00	0.10	0.90	0.0	7.8	70.0
3	0.00	0.45	0.55	0.0	35.0	42.8
4	0.35	0.45	0.20	27.2	35.0	15.6
5	0.45	0.35	0.20	35.0	27.2	15.6
6	0.45	0.00	0.55	35.0	0.0	42.8
7	0.20	0.20	0.60	15.6	15.6	46.6

หมายเหตุ ส่วนผสมทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ เมือกกระเจี๊ยบเขียว (X_1) วันเมล็ดแมงลัก (X_2) และน้ำ (X_3) รวมกันเป็น 1.00 (100% Mixture design), ร้อยละของน้ำหนักสูตร

วิธีการเตรียมเยลลี่กระเจี๊ยบพร้อมดื่ม ดัดแปลงจาก Nazir and Adrian [22] เริ่มจากผสมน้ำตาลและเกลือป่นในน้ำ คนให้เข้ากัน นำส่วนผสมตั้งไฟที่อุณหภูมิ 60 ± 2 องศาเซลเซียส คนจนส่วนผสมทั้งหมดละลาย เติมน้ำกระเจี๊ยบเขียวและวันเมล็ดแมงลัก ใช้ตะกร้อมือตีจนเข้ากันดี เพิ่มความร้อนจนส่วนผสมมีอุณหภูมิ 90 ± 2 องศาเซลเซียส นาน 10 นาที พักให้เย็นที่อุณหภูมิห้องจนอุณหภูมิลดลงเป็น 70 ± 2 องศาเซลเซียส เติมน้ำกระเจี๊ยบแดงและกรดซิตริก คนให้ส่วนผสมเข้ากัน บรรจุขณะร้อนในซองอลูมิเนียมฟอยด์ที่มีจุดดูด

ซิลปิดปากของให้สนิท ทำให้เย็นอย่างรวดเร็วโดยแช่ในน้ำที่ผสมน้ำแข็ง จากนั้นนำเข้าแช่เย็นที่อุณหภูมิ 5 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง วิเคราะห์คุณภาพโดยวัดค่าสี ค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (Total Soluble Solid, TSS) ค่าความเป็นกรดต่าง (pH) และประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส

2.3 การศึกษาผลของแคปปาคาราจีแนตต่อคุณภาพเยลลี่กระเจี๊ยบพร้อมดื่ม

เลือกสิ่งทดลองที่เหมาะสม จากผลการทดลองในข้อ 2.2 โดยพิจารณาการใช้ประโยชน์จากเมือกกระเจี๊ยบเขียวและวุ้นเมล็ดแมงลักในปริมาณสูงสุดที่มีความเป็นไปได้ในการพัฒนา และมีคะแนนความชอบโดยรวมตั้งแต่ระดับ 6.0 คะแนน และนำไปพัฒนาต่อโดยศึกษาผลของปริมาณแคปปาคาราจีแนตเพื่อปรับปรุงคุณภาพ วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ ศึกษาปริมาณแคปปาคาราจีแนต 3 ระดับ ที่ร้อยละ 0.00, 0.25 และ 0.50 ของน้ำหนักสูตร ทำการแทนที่ปริมาณน้ำในสูตร และกำหนดให้ส่วนผสมอื่น ๆ คงที่ วิธีการเตรียมเยลลี่กระเจี๊ยบพร้อมดื่มตามวิธีการในข้อ 2.2 วิเคราะห์คุณภาพ โดยวัดค่าสี ค่าความแข็ง ค่า TSS ค่า pH และประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส

2.4 การวิเคราะห์คุณภาพ

2.4.1 การวิเคราะห์ทางกายภาพ

วัดค่าสี ระบบ CIE $L^* a^* b^*$ ด้วยเครื่องวัดค่าสี Spectrophotometer (Konica Minolta CM 3500d, Japan) ที่แหล่งกำเนิดแสง D65 มุมสังเกตการณ์ 10° โดยบรรจุตัวอย่างใน Petri Dish และโหมดการวัดการสะท้อนแสง โดยค่าความสว่าง L^* มีค่า 0-100 โดย 0 หมายถึง ตัวอย่างมีสีดำ และ 100 หมายถึง ตัวอย่างมีสีขาว ค่าสี a^* เป็นบวก ($+a^*$) หมายถึงตัวอย่างมีสีแดง ถ้าค่าเป็นลบ ($-a^*$) หมายถึงตัวอย่างมีสีเขียว และค่าสี b^* เป็นบวก ($+b^*$) หมายถึงตัวอย่างมีสีเหลือง ถ้าค่า

เป็นลบ ($-b^*$) หมายถึงตัวอย่างมีสีน้ำเงิน ทำการวัดค่าจำนวน 3 ซ้ำ

วัดค่าความแข็ง (Hardness) ด้วยเครื่อง Texture Analyser (TA.XT plus, USA) โดยใช้ชุดอุปกรณ์ Back extrusion rig หัววัด A/BE-d48 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 มิลลิเมตร บรรจุตัวอย่างสูง 25 มิลลิเมตร วัดโดยกดตัวอย่างเป็นระยะทาง 12.5 มิลลิเมตร [23] ทำการวัดค่าจำนวน 7 ซ้ำ

2.4.2 การวิเคราะห์ทางเคมี

วัดค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (Total soluble solid, TSS) ด้วย Pocket Refractometer (PAL-3, Japan) และวัดค่า pH ด้วย pH meter (Eutech Instruments pH 700, Singapore) ทำการวัดค่าจำนวน 3 ซ้ำ

2.4.3 ประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส

ประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสด้วยวิธีการให้คะแนนความชอบ (9-Point hedonic scale) ใช้สเกลคะแนน 9 ระดับ ในคุณลักษณะด้านกลิ่นรสโดยรวม เนื้อสัมผัส รสหวาน รสเปรี้ยว และความชอบโดยรวม โดยระดับ 9 หมายถึง ชอบมากที่สุด และ 1 ไม่ชอบมากที่สุด ประเมินโดยผู้ทดสอบที่ไม่ผ่านการฝึกฝน จำนวน 30 คน

2.5 แผนการทดลองและการวิเคราะห์ทางสถิติ

การทดลองวางแผนแบบผสม (Mixture Design) ศึกษา 3 ตัวแปร ได้แก่ เมือกกระเจี๊ยบเขียว วุ้นเมล็ดแมงลัก และน้ำ จำนวน 7 สิ่งทดลอง ทำการทดลอง 2 ซ้ำ วิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง (Response surface methodology) โดยใช้แบบจำลองเส้นตรง (Linear model) กำหนดให้ Y =คะแนนความชอบโดยรวม X_1 =ปริมาณเมือกกระเจี๊ยบเขียว X_2 =ปริมาณวุ้นเมล็ดแมงลัก และ X_3 =ปริมาณน้ำ วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design, CRD) ศึกษาผลของปริมาณแคปปาคาราจีแนต 3 ระดับ

ที่ร้อยละ 0.00, 0.25 และ 0.50 ของน้ำหนักสูตร ต่อคุณภาพเยลลี่กระเจี๊ยบพร้อมดื่ม นำข้อมูลคุณภาพทางกายภาพ เคมี และประสาทสัมผัสมาวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนทางสถิติโดย Analysis of variance (ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$)

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

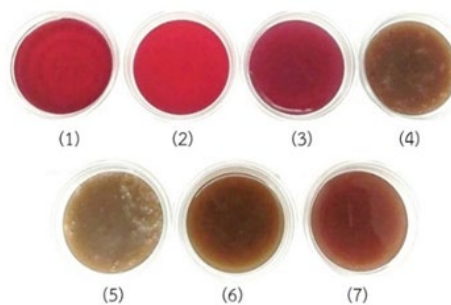
3.1 การเตรียมวัตถุดิบเมือกกระเจี๊ยบเขียวและวุ้นเมล็ดแมงลัก

กระเจี๊ยบเขียวสด (ทั้งฝัก) เมื่อทำการตัดแต่งแยกเมล็ด ปั่นผสมกับน้ำ แล้วกรองแยกกากออก จะได้ผลผลิตเมือกกระเจี๊ยบเขียว ร้อยละ 38.7 เมล็ดแมงลักแห้ง เมื่อนำไปแช่น้ำจนพองตัวเต็มที่ นำไปปั่น กรองกากและเมล็ดออก จะได้ผลผลิตวุ้นเมล็ดแมงลัก ร้อยละ 73.7 โดยเมือกกระเจี๊ยบเขียวที่ได้เป็นของเหลวสีเขียว ลักษณะเนื้อสัมผัสเป็นเมือกกลื่น ยืดเหนียว วุ้นเมล็ดแมงลักเป็นของเหลวขุ่นหนืด สีขาวขุ่น เกาะตัวกันเป็นก้อน ไม่ยืดหยุ่น

3.2 อิทธิพลของเมือกกระเจี๊ยบเขียว วุ้นเมล็ดแมงลัก และน้ำ ต่อคุณภาพเยลลี่กระเจี๊ยบพร้อมดื่ม

เมื่อวิเคราะห์คุณภาพ พบว่า เมือกกระเจี๊ยบเขียว วุ้นเมล็ดแมงลัก และน้ำ มีอิทธิพลต่อค่า TSS และ pH อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยสิ่งทดลองที่ 4-6 มีค่าสีแดง (a^*) ลดลงและมีค่าสีเหลือง (b^*) เพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับสิ่งทดลองที่ 1-3 เนื่องจากการเพิ่มปริมาณเมือกกระเจี๊ยบเขียวในสิ่งทดลองที่ 4-6 ดังรูปที่ 1 เช่นเดียวกับการผสมน้ำกระเจี๊ยบแดงกับน้ำมะม่วง น้ำฝรั่ง และน้ำมะละกอที่อัตราส่วนต่าง ๆ ซึ่งทำให้ค่าสีแตกต่างกัน [24] ค่า TSS อยู่ในช่วง 12.2-12.9 °Brix และค่า pH อยู่ในช่วง 2.96-3.48 ซึ่งใกล้เคียง

กับเยลลี่เม้าเครื่องดื่มที่มีค่า TSS อยู่ในช่วง 12.7-14.5 °Brix และค่า pH อยู่ในช่วง 3.2-3.4 [12] ค่า TSS และ pH ของแต่ละสิ่งทดลองมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ยังคงมีความแตกต่างทางสถิติ เนื่องจากข้อมูลมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำ (Standard Deviation, SD) ดังตารางที่ 2 จากการสังเกตยังพบว่าปริมาณเมือกกระเจี๊ยบเขียวและวุ้นเมล็ดแมงลักมีอิทธิพลต่อเนื้อสัมผัส สิ่งทดลองที่ปริมาณเมือกกระเจี๊ยบเขียวสูงจะมีเนื้อสัมผัสเป็นเมือกกลื่น และสิ่งทดลองที่ปริมาณวุ้นเมล็ดแมงลักสูงจะมีเนื้อสัมผัสเป็นของเหลวขุ่น เนื่องจากลักษณะเนื้อสัมผัสของวัตถุดิบและสารไฮโดรคอลลอยด์ที่ต่างกันได้แก่ เพกตินในเมือกกระเจี๊ยบเขียว กลูโคแมนแนนและไซแลนในวุ้นเมล็ดแมงลัก [3], [9]



รูปที่ 1 ลักษณะปรากฏของสีเยลลี่กระเจี๊ยบพร้อมดื่ม 7 สิ่งทดลอง ที่มีส่วนผสมต่างกัน

การประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส พบว่า ผู้บริโภคให้คะแนนความชอบโดยรวมของสิ่งทดลองที่ 1 และ 2 สูงที่สุด ที่ระดับชอบปานกลาง (7.0 และ 7.3 ตามลำดับ) รองลงมาคือ สิ่งทดลองที่ 7 ที่ระดับชอบเล็กน้อยถึงชอบปานกลาง (6.5) และสิ่งทดลองที่ 3, 4, 5 และ 6 ที่ระดับคะแนน 5.7, 5.1, 5.3 และ 5.2 ตามลำดับ ดังตารางที่ 3 เมื่อใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนองโดยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่าแบบจำลอง Linear model สามารถอธิบายความสัมพันธ์ของตัวแปรได้ ร้อยละ 96 ($R^2 = 0.96$) และเมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ พบว่า คะแนนความชอบด้านกลิ่นรสโดยรวมเนื้อสัมผัส รสหวาน รสเปรี้ยว และความชอบโดยรวมมี

ความสัมพันธ์เป็นไปในทิศทางบวกเช่นเดียวกัน ($p \leq 0.05$) จึงเลือกใช้แบบจำลอง Linear model ของคะแนนความชอบโดยรวม (Y) เป็นตัวแทนในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเมือกกระเจียบเขียว (X_1) วุ้นเมล็ดแมงลัก (X_2) และน้ำ (X_3) แบบจำลองที่ได้คือ $Y = 3.92X_1 + 4.95X_2 + 7.28X_3$ และจากรูปที่ 2 สามารถอธิบายได้ว่า เมื่อปริมาณเมือกกระเจียบเขียวและวุ้นเมล็ดแมงลักมากขึ้น ส่งผลให้คะแนนความชอบในคุณลักษณะต่าง ๆ ของผู้บริโภคมีแนวโน้มลดลง โดยการเพิ่มเมือกกระเจียบเขียวและวุ้นเมล็ดแมงลักมากกว่า ร้อยละ 20 ของส่วนผสมหลัก (77.8%) จะทำให้สิ่งทดลองมีเนื้อสัมผัสยืด

เหนียวและมึนเกินไปที่ไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค เมื่อพิจารณาสิ่งทดลองที่เหมาะสม โดยใช้เกณฑ์คะแนนความชอบโดยรวมสูงกว่าระดับ 6 และมีปริมาณเมือกกระเจียบเขียวและวุ้นเมล็ดแมงลักสูงสุด พบว่า สิ่งทดลองที่ 7 ที่มีปริมาณเมือกกระเจียบเขียว วุ้นเมล็ดแมงลัก และน้ำ ในอัตราส่วน 1: 1: 3 (ร้อยละ 77.8 ของน้ำหนักสูตร) หรือ ร้อยละ 15.6, 15.6 และ 46.6 ของน้ำหนักสูตรทั้งหมดเป็นสิ่งทดลองที่เหมาะสม อย่างไรก็ตามผลิตภัณฑ์ยังมีความแข็งของเจลน้อยเกินไป จึงต้องปรับปรุงเพื่อพัฒนาเนื้อสัมผัส โดยการเติมไฮโดรคอลลอยด์ในการศึกษาในข้อต่อไป

ตารางที่ 2 ค่าคุณภาพทางกายภาพและเคมีของเยลลี่กระเจียบพร้อมดื่ม

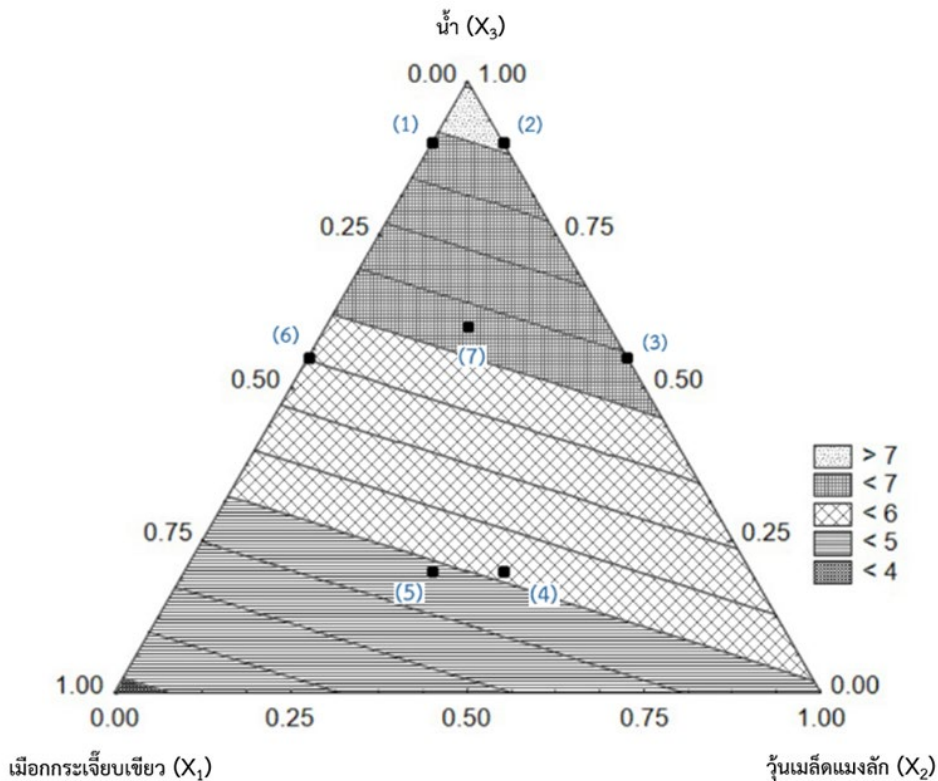
สิ่งทดลอง	เมือกกระเจียบเขียว (X_1)	วุ้นเมล็ดแมงลัก (X_2)	น้ำ (X_3)	ค่าสี			TSS	pH
				L*	a*	b*	(°Brix)	
1	0.10	0.00	0.90	16.50±0.09 ^d	5.84±0.10 ^e	2.08±0.06 ^f	12.6±0.2 ^b	3.01 ±0.01 ^e
2	0.00	0.10	0.90	13.36±0.61 ^e	8.91±0.39 ^b	2.41±0.19 ^e	12.3±0.1 ^c	2.96 ±0.01 ^f
3	0.00	0.45	0.55	16.15±0.66 ^d	18.40±0.66 ^a	1.84±0.26 ^g	12.2±0.0 ^c	3.09 ±0.02 ^d
4	0.35	0.45	0.20	27.98±0.30 ^b	6.54±0.05 ^d	11.85±0.14 ^c	12.9±0.1 ^a	3.43 ±0.01 ^b
5	0.45	0.35	0.20	30.55±0.05 ^a	4.16±0.02 ^f	14.09±0.08 ^a	12.6±0.0 ^b	3.48 ±0.01 ^a
6	0.45	0.00	0.55	25.18±0.07 ^c	4.27±0.06 ^f	12.55±0.27 ^b	12.8±0.1 ^a	3.40 ±0.01 ^b
7	0.20	0.20	0.60	24.74±0.03 ^c	8.05±0.03 ^c	8.36±0.07 ^d	12.6±0.0 ^b	3.23 ±0.04 ^c

หมายเหตุ ^{a-f} ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรแตกต่างกันในแนวตั้ง หมายถึง สิ่งทดลองแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ 3 คะแนนความชอบในคุณลักษณะด้านต่าง ๆ และคะแนนความชอบโดยรวมของสิ่งทดลอง

สิ่งทดลอง	กลิ่นรสโดยรวม	เนื้อสัมผัส	รสหวาน	รสเปรี้ยว	ความชอบโดยรวม
1	7.4 ± 0.9 ^a	6.7 ± 1.4 ^a	7.1 ± 0.8 ^{ab}	7.0 ± 0.8 ^a	7.0 ± 1.0 ^{ab}
2	7.3 ± 0.07 ^a	6.7 ± 1.5 ^a	7.3 ± 1.2 ^a	7.2 ± 1.1 ^a	7.3 ± 0.9 ^a
3	6.0 ± 1.1 ^{bc}	5.3 ± 1.5 ^{bc}	6.3 ± 1.1 ^c	6.2 ± 1.2 ^{bc}	5.7 ± 1.3 ^c
4	5.7 ± 1.1 ^{bc}	5.0 ± 1.5 ^c	6.1 ± 1.1 ^{cd}	5.8 ± 1.3 ^{cd}	5.1 ± 1.4 ^c
5	5.5 ± 1.3 ^c	4.9 ± 1.2 ^c	6.0 ± 1.0 ^{cd}	5.9 ± 1.3 ^{cd}	5.3 ± 1.2 ^c
6	5.7 ± 1.3 ^{bc}	5.0 ± 1.3 ^c	5.7 ± 1.1 ^d	5.5 ± 1.2 ^d	5.2 ± 1.3 ^c
7	6.2 ± 1.3 ^b	5.9 ± 0.9 ^b	6.6 ± 0.8 ^{bc}	6.7 ± 0.8 ^{ab}	6.5 ± 0.8 ^b

หมายเหตุ ^{a-c} ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรแตกต่างกันในแนวตั้ง หมายถึง สิ่งทดลองแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)



รูปที่ 2 แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเมือกกระเจียบเขียว (X_1) วุ้นเมล็ดแมงลัก (X_2) และน้ำ (X_3) ต่อคะแนนความชอบโดยรวม (Y)

3.3 ผลของแคลปการจี้แนต่อคุณภาพ เยลลี่กระเจียบพร้อมดื่ม

สิ่งทดลองที่เหมาะสมจากผลการทดลองในข้อ 3.2 มีลักษณะเป็นเจลที่ไม่แข็งแรง เนื้อสัมผัสค่อนข้างเหลวไม่ตรงตามความต้องการของผู้บริโภค และมีคะแนนความชอบด้านเนื้อสัมผัสอยู่ในระดับชอบเล็กน้อย (5.9) จึงนำมาปรับปรุงเนื้อสัมผัส โดยการเติมสารก่อให้เกิดเจลแคลปการจี้แน ร้อยละ 0.00, 0.25 และ 0.5 ของน้ำหนักสูตร การศึกษาผลของปริมาณแคลปการจี้แนต่อคุณภาพเยลลี่กระเจียบพร้อมดื่มพบว่า ปริมาณแคลปการจี้แนมีอิทธิพลต่อ ค่าสี ค่า TSS ค่า pH และค่าความแข็ง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ดังตารางที่ 4 ทุกสิ่งทดลองมีสีแดงคล้ำ มีค่า TSS อยู่ในช่วง 13.4-13.9°brix และค่า pH อยู่ในช่วง 2.99-3.02 ค่า TSS และ pH ของแต่ละสิ่งทดลองมีค่า

ใกล้เคียงกัน แต่ยังคงมีความแตกต่างทางสถิติ เนื่องจากข้อมูลมีค่า SD ต่ำ ค่าความแข็งของสิ่งทดลองอยู่ในช่วง 33.11-222.70 กรัม การเติมแคลปการจี้แนทำให้สิ่งทดลองมีลักษณะเป็นเจลที่แข็งแรงขึ้น ส่งผลให้ค่าความแข็งสูงขึ้น สิ่งทดลองที่มีปริมาณแคลปการจี้แนสูงมีค่าความแข็งสูงกว่าสิ่งทดลองที่มีปริมาณการจี้แนต่ำกว่า ($p \leq 0.05$) เนื่องการแคลปการจี้แนมีคุณสมบัติเป็นสารก่อให้เกิดเจล เมื่อรวมตัวกับน้ำในอุณหภูมิที่เหมาะสม (30-70°C) จะเกิดโครงสร้างของเจลกึ่งแข็ง ส่งผลให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้น [15]

จากการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสพบว่า ผู้ทดสอบให้คะแนนความชอบด้านกลิ่นรสโดยรวม รสหวาน และรสเปรี้ยวไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) ในขณะที่คะแนนความชอบด้านเนื้อสัมผัสและความชอบโดยรวมแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ดังตารางที่ 5 สิ่งทดลองที่มีปริมาณแคปซาคาราจีแนน ร้อยละ 0.25 มีคะแนนความชอบด้านเนื้อสัมผัสและความชอบโดยรวมที่ระดับชอบเล็กน้อยถึงปานกลาง (6.5 และ 6.8 ตามลำดับ) สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ที่พบว่า คะแนนความชอบด้านเนื้อสัมผัสและคะแนนความชอบโดยรวมมีความสัมพันธ์ในเชิงบวก ($r = 0.7$) หากคะแนนความชอบด้านเนื้อสัมผัสสูงขึ้นจะทำให้คะแนนความชอบโดยรวมสูงขึ้นด้วย ปริมาณแคปซาคาราจีแนน ร้อยละ 0.5 ส่งผลให้คะแนนความชอบด้านเนื้อสัมผัสและความชอบโดยรวมลดลง เนื่องจากมี

ความแข็งมากเกินไป จึงไม่เหมาะสำหรับผลิตภัณฑ์เยลลี่พร้อมดื่ม (เยลลี่เหลว) ที่ต้องมีลักษณะเป็นวุ้นเหลวสามารถใช้หลอดดูดได้ [14] ดังนั้นสิ่งทดลองที่เหมาะสมประกอบด้วย เมื่อกระเจียบเขียว วุ้นเมล็ดแมงลัก น้ำแคปซาคาราจีแนน น้ำกระเจียบแดง น้ำตาลทราย กรดซิตริก และเกลือป่น ร้อยละ 15.60, 15.60, 46.35, 0.25, 10.00, 12.00, 0.10 และ 0.10 ของน้ำหนักสูตรตามลำดับ มีคะแนนความชอบโดยรวมที่ระดับชอบปานกลาง (6.8)

ตารางที่ 4 ค่าสีและค่าคุณภาพต่าง ๆ ของเยลลี่กระเจียบพร้อมดื่มที่มีปริมาณแคปซาคาราจีแนนแตกต่างกัน

แคปซาคาราจีแนน (ร้อยละ)	ค่าสี			TSS (°brix)	pH	ความแข็ง (g)
	L*	a*	b*			
0.00	12.67±0.02 ^c	14.32±0.07 ^c	8.60±0.09 ^c	13.40±0.00 ^c	2.99±0.01 ^b	33.11±0.93 ^c
0.25	13.14±0.02 ^b	15.31±0.09 ^b	9.04±0.18 ^a	13.56±0.10 ^b	3.02±0.01 ^a	94.57±3.74 ^b
0.50	13.67±0.01 ^a	15.90±0.05 ^a	8.81±0.13 ^b	13.90±0.00 ^a	3.00±0.01 ^b	222.70±3.93 ^a

หมายเหตุ ^{a-c} ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรแตกต่างกันในแนวตั้ง หมายถึง สิ่งทดลองแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ 5 คะแนนความชอบในคุณลักษณะต่าง ๆ และความชอบโดยรวม ของเยลลี่กระเจียบพร้อมดื่มที่มีปริมาณแคปซาคาราจีแนนแตกต่างกัน

แคปซาคาราจีแนน (ร้อยละ)	กลิ่นรสโดยรวม ^{ns}	เนื้อสัมผัส	รสหวาน ^{ns}	รสเปรี้ยว ^{ns}	ความชอบ โดยรวม
0.00	6.8 ± 0.9	5.1 ± 1.1 ^c	7.0 ± 0.9	7.1 ± 0.8	5.7 ± 1.0 ^c
0.25	7.0 ± 0.9	6.5 ± 0.7 ^a	7.1 ± 0.9	7.0 ± 0.9	6.8 ± 0.8 ^a
0.50	6.5 ± 1.0	5.8 ± 1.2 ^b	7.2 ± 0.6	7.1 ± 0.8	6.2 ± 1.0 ^b

หมายเหตุ ^{a-c} ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรแตกต่างกันในแนวตั้ง หมายถึง สิ่งทดลองแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

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

4. สรุป

การศึกษาปริมาณเมื่อกระเจียบเขียว ร้อยละ 0-45 วุ้นเมล็ดแมงลัก ร้อยละ 0-45 และน้ำ ร้อยละ 20-90 ของปริมาณส่วนผสมหลัก ด้วยแผนการทดลองแบบผสม พบว่า ปริมาณเมื่อกระเจียบเขียว วุ้นเมล็ดแมงลัก และน้ำส่งผลต่อค่าสี ค่า TSS และค่า pH ของเยลลี่

กระเจียบพร้อมดื่ม การเพิ่มเมื่อกระเจียบเขียวและวุ้นเมล็ดแมงลัก ส่งผลให้คะแนนความชอบคุณลักษณะต่าง ๆ และความชอบโดยรวมมีแนวโน้มลดลง โดยปริมาณที่เติมไม่ควรเกิน ร้อยละ 20 ของส่วนผสมหลัก (77.8%) จากการปรับปรุงเนื้อสัมผัส พบว่า แคปซาคาราจีแนน ร้อยละ 0.25 ของน้ำหนักสูตรทำให้ผลิตภัณฑ์

มีเจลที่แข็งแรงขึ้น โดยมีค่าความแข็ง เท่ากับ 94.57 กรัม และมีคะแนนความชอบด้านเนื้อสัมผัสและความชอบโดยรวมสูงสุด ดังนั้นการเสริมคุณค่าทางโภชนาการในเยลลี่พร้อมดื่มด้วยเมือกกระเจียวเขียวและเมล็ดแมงลักในครั้งนี้เป็นแนวทางในการพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารเพื่อสุขภาพที่เป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับผู้บริโภค

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่สนับสนุนให้งานวิจัยครั้งนี้สำเร็จ

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] USDA. (2018). FoodData Central: Okra (raw). [Online]. Available: <https://fdc.nal.usda.gov/fdc-app.html#/food-details/169260/nutrients>
- [2] A. Roy, S. L. Shrivastava and S. M. Mandal, "Functional properties of Okra *Abelmoschus esculentus* L. (Moench): traditional claims and scientific evidences," *Plant Science Today*, no. 3, pp. 121-130, 2014.
- [3] H. F. Gemedede, N. Ratta, G. D. Haki, A. Z. Woldegiorgis and F. Bey, "Nutritional Quality and Health Benefits of Okra (*Abelmoschus Esculentus*): A Review," *Global Journal of Medical Research*, vol. 14, no. 5, 2014.
- [4] K. Alba, A. P. Laws and V. Kontogiorgos, "Isolation and characterization of acetylated LM-pectins extracted from okra pods," *Food Hydrocolloids*, vol. 43, pp. 726-735, 2015.
- [5] V. Kontogiorgos, I. Margelou, N. Georgiadis and C. Ritzoulis, "Rheological characterization of okra pectins," *Food Hydrocolloids*, vol. 29, no. 2, pp. 356-362, 2012.
- [6] H. Wang, G. Chen, D. Ren and S.-T. Yang, "Hypolipidemic Activity of Okra is Mediated Through Inhibition of Lipogenesis and Upregulation of Cholesterol Degradation," *Phytotherapy Research*, vol. 28, no. 2, pp. 268-273, 2014.
- [7] S. Fan, Y. Zhang, Q. Sun, L. Yu, M. Li, B. Zheng, X. Wu, B. Yang, Y. Li and C. Huang, "Extract of okra lowers blood glucose and serum lipids in high-fat diet-induced obese C57BL/6 mice," *The Journal of Nutritional Biochemistry*, vol. 25, no. 7, pp. 702-709, 2014.
- [8] L. G. Monte, T. Santi-Gadelha, L. B. Reis, E. Braganhol, R. F. Prietsch, O. A. Dellagostin, R. R. e Lacerda, C. A. A. Gadelha, F. R. Conceicao and L. S. Pinto, "Lectin of *Abelmoschus esculentus* (okra) promotes selective antitumor effects in human breast cancer cells," *Biotechnology Letters*, vol. 36, no. 3, pp. 461-469, 2014.
- [9] F. Kurd, M. Fathi and H. Shekarchizadeh, "Basil seed mucilage as a new source for electrospinning: Production and

- physicochemical characterization,” *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 95, pp. 689-695, 2017.
- [10] S. Naji-Tabasi and S. M. A. Razavi, “Functional properties and applications of basil seed gum: An overview,” *Food Hydrocolloids*, vol. 73, pp. 313-325, 2017.
- [11] S. H. Hosseini-Parvar, L. Matia-Merino, K. K. T. Goh, S. M. A. Razavi and S. Mortazavi, “Steady shear flow behavior of gum extracted from *Ocimum basilicum* L. seed: Effect of concentration and temperature,” *Journal of Food Engineering*, vol. 101, no. 3, pp. 236-243, 2010.
- [12] Sukrichaya Hemathulin and Kannika Sombun, “The Functional Mao (*Antidesma bunius*) Jelly Drink with Mucilage, Biological Extracts from Hairy Basil Seed,” *KHON KAENAGR. J.*, vol. 43, SUPPL. 1, 2015.
- [13] A. Hajmohammadi, M. Pirouzifard, M. Shahedi and M. Alizadeh, “Enrichment of a fruit-based beverage in dietary fiber using basil seed: Effect of Carboxymethyl cellulose and Gum Tragacanth on stability,” *LWT*, vol. 74, pp. 84-91, 2016.
- [14] *Thai Community Products Standards*, TCPS Number 518/2547, 2004.
- [15] W. R. Blakemore and A. R. Harpell, “Carrageenan,” in *Food Stabilisers, Thickeners and Gelling Agents*, A. Imeson, 1st ed. UK: Blackwell Publishing, 2010, pp. 73-93.
- [16] S. Rattanatavon, P. Siriphunt and S. Vattanukul, “Development of banana flavor carrageenan jelly drink fortified with banana peel extracts,” *International journal of agricultural technology*, vol. 16, no. 3, pp. 685-694, 2020.
- [17] S. Gisbert. (2018). What's trending in Thai functional drinks [Online]. Available: <https://clients.mintel.com/report/what-s-trending-in-thai-functional-drinks>
- [18] B. Sugara, K. Ambarwati and E. Damayanthi, “Mineral bioavailability in jelly drink made of green okra (*Abelmoschus esculentus*) and strawberry (*Fragaria ananassa*) extract,” *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 196, p. 012007, 2018.
- [19] U. Farooq, R. Malviya and P. K. Sharma, “Extraction and characterization of okmucilage as pharmaceutical excipient,” *Academic Journal of Plant Sciences*, vol. 6, pp. 168-172, 2013.
- [20] S. M. A. Razavi, S. A. Mortazavi, L. Matia-Merino, S. H. Hosseini-Parvar, A. Motamedzadegan and E. Khanipour, “Optimisation study of gum extraction from Basil seeds (*Ocimum basilicum* L.),” *International Journal of Food Science & Technology*, vol. 44, no. 9, pp. 1755-1762, 2009.
- [21] S. Nazir, I. A. Wani and F. A. Masoodi, “Extraction optimization of mucilage from Basil (*Ocimum basilicum* L.) seeds using

- response surface methodology,” *Journal of Advanced Research*, vol. 8, no. 3, pp. 235-244, 2017.
- [22] N. Nazir and M. R. Adrian, “The improvement lycopene availability and antioxidant activities of tomato (*Lycopersicum Esculentum*, Mill) Jelly Drink,” *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, vol. 9, pp. 328-334, 2016.
- [23] J. Hurler, A. Engesland, B. Poorahmary Kermany and N. Škalko-Basnet, “Improved texture analysis for hydrogel characterization: Gel cohesiveness, adhesiveness, and hardness,” *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 125, no. 1, pp. 180-188, 2012.
- [24] B. Mgaya-Kilima, S. F. Remberg, B. E. Chove and T. Wicklund, “Influence of storage temperature and time on the physicochemical and bioactive properties of roselle-fruit juice blends in plastic bottle,” *Food Science & Nutrition*, vol. 2, no. 2, pp. 181-191, 2014.

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

Two Chain-Type Exponential Estimators for the Estimation of the Population Mean

Napattchan Dansawad*

Department of Mathematics, Faculty of Science, King Mongkut's University of Technology
Thonburi, Bangkok
126 Pracha-Uthit Road, Bang Mod, Thung Khru, Bangkok, 10140

Received 27 May 2021; Revised 30 March 2022; Accepted 20 April 2022

Abstract

This paper attempts to suggest two chain-type exponential estimators to estimate population mean when the information regarding auxiliary variable is complete. To the first-order approximation, the bias and the mean squared error (MSE) of the suggested estimators have been discussed. A few members were also derived from the suggested estimators by allocating the different suitable values of constants. In addition, theoretical and numerical studies were used in order to access the efficiency of the suggested estimators. The results of this study show that the suggested estimators are more efficient under bias and percent of relative efficiencies (PREs) criterion compared to other existing estimators.

Keywords : Exponential Estimator; Auxiliary Variable; Bias; Mean Squared Error; Population Mean

* *Corresponding Author. Tel.: +668 3109 1925, E-mail Address: napattchan.dan@kmutt.ac.th*

1. Introduction

In sample survey, the use of auxiliary information has been played the important role to improve the efficiency of the estimates of population parameters such as population mean $\bar{Y}$, variance

$$S_y^2 = (N-1)^{-1} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{Y})^2, \text{ coefficient of}$$

variation $C_y = S_y / \bar{Y}$, and so on of the auxiliary variable y . When the population mean $\bar{X}$ of auxiliary variable x is known, a number of modified versions of ratio and product estimators have been proposed by several researchers. It is to be mentioned that the estimators on some population parameters of the auxiliary variable x may be available to the readers, for examples, H. P. Singh et al. [1], S. Bahl and R. K. Tuteja [2], M. Khoshnevisan et al. [3], H. P. Singh and N. Agnihotri [4], and H. P. Singh and S. K. Pal [5].

Consider finite population $U = \{U_1, U_2, \dots, U_N\}$. We select a sample of size n from this population using simple random sampling without replacement (SRSWOR). Let y and x respectively be the study and auxiliary variables. While, y_i and x_i be the observations on the i th unit. Let $\bar{y} = \sum_{i=1}^n y_i / n$ and $\bar{x} = \sum_{i=1}^n x_i / n$ be the sample means of study variable y and auxiliary variable x respectively. It is desired to estimate the population mean $\bar{Y}$ of the study variable y using information on an auxiliary variable x . We assume that the mean of the auxiliary variable $\bar{X}$ is known.

It is also known that the sample mean $\bar{y}$ of study variable y is an unbiased estimator of the population

mean $\bar{Y}$ and its variance under SRSWOR is given by

$$MSE(\bar{y}) = \theta \bar{Y}^2 C_y^2 \quad (1)$$

where

$$\theta = \left(\frac{1-f}{n} \right), \quad f = \frac{n}{N}.$$

M. Khoshnevisan et al. [3] suggested the following class of estimators for the population mean under SRSWOR that covers the existing ratio and product estimators as follows:

$$\bar{y}_1 = \bar{y} \left(\frac{a\bar{X} + b}{\alpha(a\bar{x} + b) + (1-\alpha)(a\bar{X} + b)} \right)^g \quad (2)$$

where $a(\neq 0)$ and b are real constants or functions of known parameters of auxiliary variable x . α and g are the suitable choice of scalar that makes the MSE of $\bar{y}_1$ as small as possible.

Later, H. P. Singh and N. Agnihotri [4] have adjusted the estimator of M. Khoshnevisan et al. [3] by removing some real constants or functions of auxiliary variable x in the equation of M. Khoshnevisan et al. [3]. The estimator of H. P. Singh and N. Agnihotri [4] are given as follows:

$$\bar{y}_2 = \bar{y} \left[\frac{a\bar{X} + b}{a\bar{x} + b} \right] \quad (3)$$

and

$$\bar{y}_3 = \bar{y} \left[\frac{a\bar{x} + b}{a\bar{X} + b} \right] \quad (4)$$

Nonetheless, H. P. Singh et al. [1] proposed an extension of H. P. Singh and N. Agnihotri [4] by using exponentiation method in SRSWOR. This estimator is given as shown below:

$$\begin{aligned}\bar{y}_4 &= \bar{y} \left[\frac{a\bar{X} + b}{a\bar{x} + b} \right]^g \left[\frac{a\bar{x} + b}{a\bar{X} + b} \right]^{1-g} \\ &= \bar{y} \left[\frac{a\bar{X} + b}{a\bar{x} + b} \right]^{2g-1}\end{aligned}\quad (5)$$

Previously, S. Bahl and R. K. Tuteja [2] studied various estimation results for the estimator of a population mean $\bar{Y}$ for an alternative in SRSWOR, by pioneering the ratio and product type of estimators in the form of exponential. The estimators of S. Bahl and R. K. Tuteja [2] are presented as follows:

$$\bar{y}_5 = \bar{y} \exp\left(\frac{\bar{X} - \bar{x}}{\bar{X} + \bar{x}}\right) \quad (6)$$

and

$$\bar{y}_6 = \bar{y} \exp\left(\frac{\bar{x} - \bar{X}}{\bar{x} + \bar{X}}\right) \quad (7)$$

Adopting the estimators of S. Bahl and R. K. Tuteja [2], H. P. Singh and S. K. Pal [5] introduced to replace $\bar{y}$ in (6) with $\bar{y}_5 = \bar{y} \exp\left(\frac{\bar{X} - \bar{x}}{\bar{X} + \bar{x}}\right)$. The chain ratio-type exponential estimator by H. P. Singh and S. K. Pal [5] is given as follows in (8):

$$\begin{aligned}\bar{y}_7 &= \bar{y}_5 \exp\left(\frac{\bar{X} - \bar{x}}{\bar{X} + \bar{x}}\right) \\ &= \bar{y} \exp\left(\frac{2(\bar{X} - \bar{x})}{\bar{X} + \bar{x}}\right)\end{aligned}\quad (8)$$

In addition, H. P. Singh and S. K. Pal [5] also replaced $\bar{y}$ in (7) with $\bar{y}_6 = \bar{y} \exp\left(\frac{\bar{x} - \bar{X}}{\bar{x} + \bar{X}}\right)$ and suggested chain product-type exponential estimator as follows:

$$\begin{aligned}\bar{y}_8 &= \bar{y}_6 \exp\left(\frac{\bar{x} - \bar{X}}{\bar{x} + \bar{X}}\right) \\ &= \bar{y} \exp\left(\frac{2(\bar{x} - \bar{X})}{\bar{x} + \bar{X}}\right)\end{aligned}\quad (9)$$

To the first-order approximation, the biases and MSEs of $\bar{y}_1$, $\bar{y}_2$, $\bar{y}_3$, $\bar{y}_4$, $\bar{y}_5$, $\bar{y}_6$, $\bar{y}_7$ and $\bar{y}_8$ are respectively given by

$$B(\bar{y}_1) = \theta \bar{Y} \tau \alpha C_x^2 \left[\frac{g(g+1)}{2} \alpha \tau - gC \right], \quad (10)$$

$$B(\bar{y}_2) = \theta \bar{Y} \tau C_x^2 (\tau - C), \quad (11)$$

$$B(\bar{y}_3) = \theta \bar{Y} \tau C C_x^2, \quad (12)$$

$$B(\bar{y}_4) = \theta \bar{Y} \tau (2g-1)(g\tau - C) C_x^2, \quad (13)$$

$$B(\bar{y}_5) = \frac{\theta}{8} \bar{Y} C_x^2 (3-4C), \quad (14)$$

$$B(\bar{y}_6) = \frac{\theta}{8} \bar{Y} C_x^2 (3+4C), \quad (15)$$

$$B(\bar{y}_7) = \theta \bar{Y} C_x^2 (1-C), \quad (16)$$

$$B(\bar{y}_8) = \theta \bar{Y} C C_x^2, \quad (17)$$

$$MSE(\bar{y}_1) = \theta \bar{Y}^2 \left[C_y^2 + \alpha \tau g C_x^2 (\alpha \tau g - 2C) \right], \quad (18)$$

$$MSE(\bar{y}_2) = \theta \bar{Y}^2 \left[C_y^2 + \tau C_x^2 (\tau - 2C) \right], \quad (19)$$

$$MSE(\bar{y}_3) = \theta \bar{Y}^2 \left[C_y^2 + \tau C_x^2 (\tau + 2C) \right], \quad (20)$$

$$MSE(\bar{y}_4) = \theta \bar{Y}^2 \left[C_y^2 + (2g-1)\tau C_x^2 \{(2g-1)\tau - 2C\} \right] \quad (21)$$

$$MSE(\bar{y}_5) = \theta \bar{Y}^2 \left[C_y^2 + \frac{C_x^2}{4} (1-4C) \right], \quad (22)$$

$$MSE(\bar{y}_6) = \theta \bar{Y}^2 \left[C_y^2 + \frac{C_x^2}{4}(1+4C) \right], \quad (23)$$

$$MSE(\bar{y}_7) = \theta \bar{Y}^2 \left[C_y^2 + C_x^2(1-2C) \right], \quad (24)$$

$$MSE(\bar{y}_8) = \theta \bar{Y}^2 \left[C_y^2 + C_x^2(1+2C) \right], \quad (25)$$

where

$$C = \rho_{yx} \left(\frac{C_y}{C_x} \right), \quad \rho_{yx} = \left(\frac{S_{yx}}{S_y S_x} \right), \quad C_x = \left(\frac{S_x}{\bar{X}} \right),$$

$$S_{yx} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{Y})(x_i - \bar{X}), \quad \tau = \frac{a\bar{X}}{a\bar{X} + b},$$

$$S_x^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{X})^2.$$

In this paper, the author attempts to develop the estimators of Singh et al. [1] and S. Bahl and R. K. Tuteja [2] as predictor of the mean of the population using the information of auxiliary in sample. Therefore, the suggested estimators with their properties are presented in section 2. Furthermore, we execute the theoretical comparison among existing estimators in the Sections 3. In section 4, the real data sets are used to discuss about the performance of various estimators numerically. Finally, the last section provides conclusion of this paper.

2. The Suggested Estimators with their Properties

By adjusting the estimator of H. P. Singh et al. [1] and S. Bahl and R. K. Tuteja [2], we define two chain-type exponential estimators for the estimation of population mean $\bar{Y}$ as

$$\bar{y}_{N1} = \bar{y} \left[\frac{a\bar{X} + b}{a\bar{x} + b} \right]^{2g-1} \exp \left(\frac{a(\bar{X} - \bar{x})}{a(\bar{X} + \bar{x}) + 2b} \right) \quad (26)$$

$$\bar{y}_{N2} = \bar{y} \left[\frac{a\bar{X} + b}{a\bar{x} + b} \right]^{2g-1} \exp \left(\frac{a(\bar{x} - \bar{X})}{a(\bar{x} + \bar{X}) + 2b} \right) \quad (27)$$

For obtaining the expression of bias and MSE of these estimators, we consider the following relative of error terms, as $e_0 = (\bar{y} - \bar{Y}) / \bar{Y}$ and $e_1 = (\bar{x} - \bar{X}) / \bar{X}$.

Under SRSWOR, we have the following expectations, $E(e_0) = E(e_1) = 0$, $E(e_0^2) = \theta C_y^2$, $E(e_1^2) = \theta C_x^2$, and $E(e_0 e_1) = \theta C C_x^2$.

Rewriting $\bar{y}_{N1}$ and $\bar{y}_{N2}$ at equation (26) and (27) in term of e_i 's, we have

$$\bar{y}_{N1} = \bar{Y}(1 + e_0) \{1 + \tau e_1\}^{-(2g-1)} \exp \left\{ \frac{-\tau e_1}{2} \left(1 + \frac{\tau e_1}{2} \right)^{-1} \right\} \quad (28)$$

and

$$\bar{y}_{N2} = \bar{Y}(1 + e_0) \{1 + \tau e_1\}^{-(2g-1)} \exp \left\{ \frac{\tau e_1}{2} \left(1 + \frac{\tau e_1}{2} \right)^{-1} \right\} \quad (29)$$

Now, we assume that the sample size to be large enough as compared to the population size so as to make $|e_i|$ and $|e_i'|$ very small. Therefore, all the terms of e_i 's that have power greater than two in equation (28) and (29), it will be considered ignorable, we have

$$\bar{y}_{N1} \cong \bar{Y} \left[\begin{aligned} &1 + e_0 - (2g-1)\tau e_1 - (2g-1)\tau e_0 e_1 \\ &+ g(2g-1)\tau^2 e_1^2 - \frac{\tau e_1}{2} - \frac{\tau e_0 e_1}{2} \\ &+ (2g-1)\frac{\tau^2 e_1^2}{2} + \frac{3\tau^2 e_1^2}{8} \end{aligned} \right] \quad (30)$$

and

$$\bar{y}_{N2} \cong \bar{Y} \begin{bmatrix} 1 + e_0 - (2g-1)\tau e_1 - (2g-1)\tau e_0 e_1 \\ +g(2g-1)\tau^2 e_1^2 + \frac{\tau e_1}{2} + \frac{\tau e_0 e_1}{2} \\ -(2g-1)\frac{\tau^2 e_1^2}{2} - \frac{\tau^2 e_1^2}{8} \end{bmatrix} \quad (31)$$

Expanding the right-hand sides of equation (30) and (31), then subtracting $\bar{Y}$ on both sides, we get

$$(\bar{y}_{N1} - \bar{Y}) \cong \bar{Y} \begin{pmatrix} e_0 - (2g-1)\tau e_1 - (2g-1)\tau e_0 e_1 \\ +g(2g-1)\tau^2 e_1^2 - \frac{\tau e_1}{2} - \frac{\tau e_0 e_1}{2} \\ +(2g-1)\frac{\tau^2 e_1^2}{2} + \frac{3\tau^2 e_1^2}{8} \end{pmatrix} \quad (32)$$

and

$$(\bar{y}_{N2} - \bar{Y}) \cong \bar{Y} \begin{pmatrix} e_0 - (2g-1)\tau e_1 - (2g-1)\tau e_0 e_1 \\ +g(2g-1)\tau^2 e_1^2 + \frac{\tau e_1}{2} + \frac{\tau e_0 e_1}{2} \\ -(2g-1)\frac{\tau^2 e_1^2}{2} - \frac{\tau^2 e_1^2}{8} \end{pmatrix} \quad (33)$$

Taking expectation on both sides of equation (32) and (33), we have the bias of $\bar{y}_{N1}$ and $\bar{y}_{N2}$ as

$$B(\bar{y}_{N1}) = \theta \bar{Y} \tau C_x^2 \left[(2g-1) \left\{ -C + g\tau + \frac{\tau}{2} \right\} - \frac{C}{2} + \frac{3\tau}{8} \right] \quad (34)$$

and

$$B(\bar{y}_{N2}) = \theta \bar{Y} \tau C_x^2 \left[(2g-1) \left\{ -C + g\tau - \frac{\tau}{2} \right\} + \frac{C}{2} - \frac{\tau}{8} \right] \quad (35)$$

By squaring both sides of equation (32) and (33), we get

$$(\bar{y}_{N1} - \bar{Y})^2 \cong \bar{Y}^2 \begin{bmatrix} e_0^2 + (2g-1)^2 \tau^2 e_1^2 + \frac{\tau^2 e_1^2}{4} \\ -2(2g-1)\tau e_0 e_1 - \tau e_0 e_1 \\ +(2g-1)\tau^2 e_1^2 \end{bmatrix} \quad (36)$$

and

$$(\bar{y}_{N2} - \bar{Y})^2 \cong \bar{Y}^2 \begin{bmatrix} e_0^2 + (2g-1)^2 \tau^2 e_1^2 + \frac{\tau^2 e_1^2}{4} \\ -2(2g-1)\tau e_0 e_1 + \tau e_0 e_1 \\ -(2g-1)\tau^2 e_1^2 \end{bmatrix} \quad (37)$$

After that, we just taking expectation on both sides of (36) and (37), so the MSE of $\bar{y}_{N1}$ and $\bar{y}_{N2}$ as

$$MSE(\bar{y}_{N1}) = \theta \bar{Y}^2 \left[C_y^2 + \tau C_x^2 \left(4g^2 \tau - 4gC + C - 2g\tau + \frac{\tau}{4} \right) \right] \quad (38)$$

and

$$MSE(\bar{y}_{N2}) = \theta \bar{Y}^2 \left[C_y^2 + \tau C_x^2 \left(4g^2 \tau - 4gC + 3C - 6g\tau + \frac{9\tau}{4} \right) \right] \quad (39)$$

To replace the different choices of the constants $a(a \neq 0)$, b , and g into equations (2) to (9), (26) and (27), and for the convenience of the readers, a few members of various estimators are also shown in **Table 1**:

Table 1. A few members of various estimators

Estimators	Values of constants			
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>g</i>	α
A few members of $\bar{y}_1$				
$\bar{y}_{1(1)} = \bar{y} \left(\frac{\bar{X}}{\bar{x}} \right)$	1	0	1	1
The usual ratio estimator				
$\bar{y}_{1(2)} = \bar{y} \left(\frac{\bar{X} + \rho_{yx}}{\bar{x} + \rho_{yx}} \right)$	1	ρ_{yx}	1	1
H. P. Singh and R. Tailor [6]				
$\bar{y}_{1(3)} = \bar{y} \left(\frac{\bar{X} + C_x}{\bar{x} + C_x} \right)$	1	C_x	1	1
B. V. S. Sisodia and V. K. Dwivedi [7]				
A few members of $\bar{y}_2$				
$\bar{y}_{2(1)} = \bar{y} \left(\frac{\bar{X}}{\bar{x}} \right) = \bar{y}_{1(1)}$	1	0	-	-
$\bar{y}_{2(2)} = \bar{y} \left(\frac{\bar{X} + \rho_{yx}}{\bar{x} + \rho_{yx}} \right) = \bar{y}_{1(2)}$	1	ρ_{yx}	-	-
$\bar{y}_{2(3)} = \bar{y} \left(\frac{\bar{X} + C_x}{\bar{x} + C_x} \right) = \bar{y}_{1(3)}$	1	C_x	-	-
A few members of $\bar{y}_3$				
$\bar{y}_{3(1)} = \bar{y} \left(\frac{\bar{x}}{\bar{X}} \right)$	1	0	-	-
The usual product estimator				
$\bar{y}_{3(2)} = \bar{y} \left(\frac{\bar{x} + \rho_{yx}}{\bar{X} + \rho_{yx}} \right)$	1	ρ_{yx}	-	-
H. P. Singh and R. Tailor [6]				
$\bar{y}_{3(3)} = \bar{y} \left(\frac{\bar{x} + C_x}{\bar{X} + C_x} \right)$	1	C_x	-	-
B. N. Pandey and V. Dubey [8]				
A few members of $\bar{y}_4$				
$\bar{y}_{4(1)} = \bar{y} \left(\frac{\bar{X}}{\bar{x}} \right) = \bar{y}_{1(1)} = \bar{y}_{2(1)}$	1	0	1	-
$\bar{y}_{4(2)} = \bar{y} \left(\frac{\bar{X} + \rho_{yx}}{\bar{x} + \rho_{yx}} \right) = \bar{y}_{1(2)} = \bar{y}_{2(2)}$	1	ρ_{yx}	1	-
$\bar{y}_{4(3)} = \bar{y} \left(\frac{\bar{X} + C_x}{\bar{x} + C_x} \right) = \bar{y}_{1(3)} = \bar{y}_{2(3)}$	1	C_x	1	-

Table 1. (Cont.)

Estimators	Values of constants			
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>g</i>	α
$\bar{y}_{4(4)} = \bar{y} \left(\frac{\bar{x}}{\bar{X}} \right) = \bar{y}_{3(1)}$	1	0	0	-
$\bar{y}_{4(5)} = \bar{y} \left(\frac{\bar{x} + \rho_{yx}}{\bar{X} + \rho_{yx}} \right) = \bar{y}_{3(2)}$	1	ρ_{yx}	0	-
$\bar{y}_{4(6)} = \bar{y} \left(\frac{\bar{x} + C_x}{\bar{X} + C_x} \right) = \bar{y}_{3(3)}$	1	C_x	0	-
A few members of $\bar{y}_{N1}$				
$\bar{y}_{N1(1)} = \bar{y} \left(\frac{\bar{X}}{\bar{x}} \right) \exp \left(\frac{\bar{X} - \bar{x}}{\bar{X} + \bar{x}} \right)$	1	0	1	-
H. P. Singh and S. K. Pal [5]				
$\bar{y}_{N1(2)} = \bar{y} \left(\frac{\bar{X} + \rho_{yx}}{\bar{x} + \rho_{yx}} \right) \exp \left(\frac{\bar{X} - \bar{x}}{\bar{X} + \bar{x} + 2\rho_{yx}} \right)$	1	ρ_{yx}	1	-
$\bar{y}_{N1(3)} = \bar{y} \left(\frac{\bar{X} + C_x}{\bar{x} + C_x} \right) \exp \left(\frac{\bar{X} - \bar{x}}{\bar{X} + \bar{x} + 2\rho_{yx}} \right)$	1	C_x	1	-
H. P. Singh and S. K. Pal [5]				
$\bar{y}_{N1(4)} = \bar{y} \left(\frac{\bar{x}}{\bar{X}} \right) \exp \left(\frac{\bar{X} - \bar{x}}{\bar{X} + \bar{x}} \right)$	1	0	0	-
$\bar{y}_{N1(5)} = \bar{y} \left(\frac{\bar{x} + \rho_{yx}}{\bar{X} + \rho_{yx}} \right) \exp \left(\frac{\bar{X} - \bar{x}}{\bar{X} + \bar{x} + 2\rho_{yx}} \right)$	1	ρ_{yx}	0	-
$\bar{y}_{N1(6)} = \bar{y} \left(\frac{\bar{x} + C_x}{\bar{X} + C_x} \right) \exp \left(\frac{\bar{X} - \bar{x}}{\bar{X} + \bar{x} + 2\rho_{yx}} \right)$	1	C_x	0	-
A few members of $\bar{y}_{N2}$				
$\bar{y}_{N2(1)} = \bar{y} \left(\frac{\bar{X}}{\bar{x}} \right) \exp \left(\frac{\bar{x} - \bar{X}}{\bar{x} + \bar{X}} \right)$	1	0	1	-
$\bar{y}_{N2(2)} = \bar{y} \left(\frac{\bar{X} + \rho_{yx}}{\bar{x} + \rho_{yx}} \right) \exp \left(\frac{\bar{x} - \bar{X}}{\bar{x} + \bar{X} + 2\rho_{yx}} \right)$	1	ρ_{yx}	1	-
$\bar{y}_{N2(3)} = \bar{y} \left(\frac{\bar{X} + C_x}{\bar{x} + C_x} \right) \exp \left(\frac{\bar{x} - \bar{X}}{\bar{x} + \bar{X} + 2\rho_{yx}} \right)$	1	C_x	1	-
$\bar{y}_{N2(4)} = \bar{y} \left(\frac{\bar{x}}{\bar{X}} \right) \exp \left(\frac{\bar{x} - \bar{X}}{\bar{x} + \bar{X}} \right)$	1	0	0	-
$\bar{y}_{N2(5)} = \bar{y} \left(\frac{\bar{x} + \rho_{yx}}{\bar{X} + \rho_{yx}} \right) \exp \left(\frac{\bar{x} - \bar{X}}{\bar{x} + \bar{X} + 2\rho_{yx}} \right)$	1	ρ_{yx}	0	-
$\bar{y}_{N2(6)} = \bar{y} \left(\frac{\bar{x} + C_x}{\bar{X} + C_x} \right) \exp \left(\frac{\bar{x} - \bar{X}}{\bar{x} + \bar{X} + 2\rho_{yx}} \right)$	1	C_x	0	-

3. Efficiency Comparison

In this part, the author has compared the efficiency between the suggested estimators and various estimators by using the conditions of absolute biases and MSE values. The details of its are as follows:

3.1 Bias comparison of ratio-type estimators

From (10), (11), (13), and (34), we have

$$(i) \quad |B(\bar{y}_{1(1)}, \bar{y}_{2(1)}, \bar{y}_{4(1)})| < |B(\bar{y}_{N1(1)})|$$

that is, $C < \frac{7}{4}$ (40)

$$(ii) \quad |B(\bar{y}_{1(2)}, \bar{y}_{2(2)}, \bar{y}_{4(2)})| < |B(\bar{y}_{N1(2)})|$$

that is, $C < \frac{7\tau_1}{4}$ (41)

$$(iii) \quad |B(\bar{y}_{1(3)}, \bar{y}_{2(3)}, \bar{y}_{4(3)})| < |B(\bar{y}_{N1(3)})|$$

that is, $C < \frac{7\tau_2}{4}$ (42)

If the conditions (40), (41), and (42) are satisfied, then the suggested estimators $(\bar{y}_{N1(1)}, \bar{y}_{N1(2)}, \text{ and } \bar{y}_{N1(3)})$ are less biased respectively to customary the estimators $(\bar{y}_{1(1)}, \bar{y}_{2(1)}, \bar{y}_{4(1)})$, $(\bar{y}_{1(2)}, \bar{y}_{2(2)}, \bar{y}_{4(2)})$, and $(\bar{y}_{1(3)}, \bar{y}_{2(3)}, \bar{y}_{4(3)})$, respectively.

3.2 Bias comparison of product-type estimators

From (12), (13), and (35), we have

$$(i) \quad |B(\bar{y}_{3(1)}, \bar{y}_{4(4)})| < |B(\bar{y}_{N2(4)})|$$

that is, $C > \frac{-3}{4}$ (43)

$$(ii) \quad |B(\bar{y}_{3(2)}, \bar{y}_{4(5)})| < |B(\bar{y}_{N2(5)})|$$

that is, $C > \frac{-3\tau_1}{4}$ (44)

$$(iii) \quad |B(\bar{y}_{3(3)}, \bar{y}_{4(6)})| < |B(\bar{y}_{N2(6)})|$$

that is, $C > \frac{-3\tau_2}{4}$ (45)

If the conditions (43), (44), and (45) are satisfied, then the suggested estimators $(\bar{y}_{N2(4)}, \bar{y}_{N2(5)}, \text{ and } \bar{y}_{N2(6)})$ are less biased respectively to customary the estimators $(\bar{y}_{3(1)}, \bar{y}_{4(4)})$, $(\bar{y}_{3(2)}, \bar{y}_{4(5)})$, and $(\bar{y}_{3(3)}, \bar{y}_{4(6)})$, respectively.

3.3 MSE comparison of ratio-type estimators

From (18), (19), (21), and (38), we have

$$(i) \quad MSE(\bar{y}_{1(1)}, \bar{y}_{2(1)}, \bar{y}_{4(1)}) < MSE(\bar{y}_{N1(1)})$$

if $C < \frac{5}{4}$ (46)

$$(ii) \quad MSE(\bar{y}_{1(2)}, \bar{y}_{2(2)}, \bar{y}_{4(2)}) < MSE(\bar{y}_{N1(2)})$$

if $C < \frac{5\tau_1}{4}$ (47)

$$(iii) \quad MSE(\bar{y}_{1(3)}, \bar{y}_{2(3)}, \bar{y}_{4(3)}) < MSE(\bar{y}_{N1(3)})$$

if $C < \frac{5\tau_2}{4}$ (48)

It is follows that if the conditions (46), (47), and (48) are satisfied, then the suggested estimators $(\bar{y}_{N1(1)}, \bar{y}_{N1(2)}, \text{ and } \bar{y}_{N1(3)})$ are better than the estimators $(\bar{y}_{1(1)}, \bar{y}_{2(1)}, \bar{y}_{4(1)})$, $(\bar{y}_{1(2)}, \bar{y}_{2(2)}, \bar{y}_{4(2)})$, and $(\bar{y}_{1(3)}, \bar{y}_{2(3)}, \bar{y}_{4(3)})$, respectively.

3.4 MSE comparison of product-type estimators

From (20), (21), and (39), we have

$$(i) \quad MSE(\bar{y}_{3(1)}, \bar{y}_{4(4)}) < MSE(\bar{y}_{N2(4)})$$

$$\text{if } C < \frac{-1}{4} \quad (49)$$

$$(ii) \quad MSE(\bar{y}_{3(2)}, \bar{y}_{4(5)}) < MSE(\bar{y}_{N2(5)})$$

$$\text{if } C < \frac{-\tau_1}{4} \quad (50)$$

$$(iii) \quad MSE(\bar{y}_{3(3)}, \bar{y}_{4(6)}) < MSE(\bar{y}_{N2(6)})$$

$$\text{if } C < \frac{-\tau_2}{4} \quad (51)$$

$$\text{where } \tau_1 = \frac{\bar{X}}{\bar{X} + \rho_{yx}}, \tau_2 = \frac{\bar{X}}{\bar{X} + C_x}.$$

It is follows that if the conditions (49), (50), and (51) are satisfied, then the suggested estimators ($\bar{y}_{N2(4)}$, $\bar{y}_{N2(5)}$, and $\bar{y}_{N2(6)}$) are better than the estimators ($\bar{y}_{3(1)}, \bar{y}_{4(4)}$), ($\bar{y}_{3(2)}, \bar{y}_{4(5)}$), and ($\bar{y}_{3(3)}, \bar{y}_{4(6)}$), respectively.

4. Numerical Study

In section 4 , to judge the merits of the suggested estimators $\bar{y}_{N1}$ and $\bar{y}_{N2}$

Table 2. The population data sets

Term	Population		
	I M. N. Murthy [9]	II M. Khoshnevisan <i>et al.</i> [3]	III W. G. Cochran [10]
N	80	20	10
n	20	8	4
$\bar{Y}$	11.264	19.550	5.920
$\bar{X}$	51.826	18.800	3.590
C_y	0.7500	0.3552	0.144
C_x	0.354	0.394	0.128
ρ_{yx}	0.941	-0.920	1.680

over the various estimators, the author has considered three natural population data sets. The description of the population data sets is given in **Table 2**.

To examine the biasedness of various estimators of population mean $\bar{Y}$ we have computed the following absolute bias quantities:

$$B_{(\bar{y}_{1(1)}, \bar{y}_{2(1)}, \bar{y}_{4(1)})} = \left| \frac{B(\bar{y}_{1(1)}, \bar{y}_{2(1)}, \bar{y}_{4(1)})}{\theta \bar{Y} C_x^2} \right| = |1 - C|,$$

$$B_{(\bar{y}_{1(2)}, \bar{y}_{2(2)}, \bar{y}_{4(2)})} = \left| \frac{B(\bar{y}_{1(2)}, \bar{y}_{2(2)}, \bar{y}_{4(2)})}{\theta \bar{Y} C_x^2} \right| = |\tau_1(\tau_1 - C)|,$$

$$B_{(\bar{y}_{1(3)}, \bar{y}_{2(3)}, \bar{y}_{4(3)})} = \left| \frac{B(\bar{y}_{1(3)}, \bar{y}_{2(3)}, \bar{y}_{4(3)})}{\theta \bar{Y} C_x^2} \right| = |\tau_2(\tau_2 - C)|,$$

$$B_{(\bar{y}_{3(1)}, \bar{y}_{4(4)})} = \left| \frac{B(\bar{y}_{3(1)}, \bar{y}_{4(4)})}{\theta \bar{Y} C_x^2} \right| = |C|,$$

$$B_{(\bar{y}_{3(2)}, \bar{y}_{4(5)})} = \left| \frac{B(\bar{y}_{3(2)}, \bar{y}_{4(5)})}{\theta \bar{Y} C_x^2} \right| = |\tau_1 C|,$$

$$B_{(\bar{y}_{3(3)}, \bar{y}_{4(6)})} = \left| \frac{B(\bar{y}_{3(3)}, \bar{y}_{4(6)})}{\theta \bar{Y} C_x^2} \right| = |\tau_2 C|,$$

$$B_{(\bar{y}_{N1(1)})} = \left| \frac{B(\bar{y}_{N1(1)})}{\theta \bar{Y} C_x^2} \right| = \left| \frac{3}{8}(5 - 4C) \right|,$$

$$B_{(\bar{y}_{N1(2)})} = \left| \frac{B(\bar{y}_{N1(2)})}{\theta \bar{Y} C_x^2} \right| = \left| \frac{3\tau_1}{8}(5\tau_1 - 4C) \right|,$$

$$B_{(\bar{y}_{N1(3)})} = \left| \frac{B(\bar{y}_{N1(3)})}{\theta \bar{Y} C_x^2} \right| = \left| \frac{3\tau_2}{8}(5\tau_2 - 4C) \right|,$$

$$B_{(\bar{y}_{N1(4)})} = \left| \frac{B(\bar{y}_{N1(4)})}{\theta \bar{Y} C_x^2} \right| = \left| \frac{1}{8}(4C - 1) \right|,$$

$$B_{(\bar{y}_{N1(5)})} = \left| \frac{B(\bar{y}_{N1(5)})}{\theta \bar{Y} C_x^2} \right| = \left| \frac{\tau_1}{8}(4C - \tau_1) \right|,$$

$$B_{(\bar{y}_{N1(6)})} = \left| \frac{B(\bar{y}_{N1(6)})}{\theta \bar{Y} C_x^2} \right| = \left| \frac{\tau_2}{8}(4C - \tau_2) \right|,$$

$$B_{(\bar{y}_{N2(1)})} = \left| \frac{B(\bar{y}_{N2(1)})}{\theta \bar{Y} C_x^2} \right| = \left| \frac{1}{8} (3 - 4C) \right|,$$

$$B_{(\bar{y}_{N2(2)})} = \left| \frac{B(\bar{y}_{N2(2)})}{\theta \bar{Y} C_x^2} \right| = \left| \frac{\tau_1}{8} (3\tau_1 - 4C) \right|,$$

$$B_{(\bar{y}_{N2(3)})} = \left| \frac{B(\bar{y}_{N2(3)})}{\theta \bar{Y} C_x^2} \right| = \left| \frac{\tau_2}{8} (3\tau_2 - 4C) \right|,$$

$$B_{(\bar{y}_{N2(4)})} = \left| \frac{B(\bar{y}_{N2(4)})}{\theta \bar{Y} C_x^2} \right| = \left| \frac{3}{8} (4C + 1) \right|,$$

$$B_{(\bar{y}_{N2(5)})} = \left| \frac{B(\bar{y}_{N2(5)})}{\theta \bar{Y} C_x^2} \right| = \left| \frac{3\tau_1}{8} (4C + \tau_1) \right|,$$

$$B_{(\bar{y}_{N2(6)})} = \left| \frac{B(\bar{y}_{N2(6)})}{\theta \bar{Y} C_x^2} \right| = \left| \frac{3\tau_2}{8} (4C + \tau_2) \right|,$$

and finding are shown in **Table 3**.

Table 3. Bias quantities of different estimators

Estimators	Population		
	I	II	III
$\bar{y}_{1(1)}, \bar{y}_{2(1)}, \bar{y}_{4(1)}$	0.9936	1.8288	0.8900
$\bar{y}_{1(2)}, \bar{y}_{2(2)}, \bar{y}_{4(2)}$	0.9934	1.9770	0.8234
$\bar{y}_{1(3)}, \bar{y}_{2(3)}, \bar{y}_{4(3)}$	0.9936	1.7711	0.8926
$\bar{y}_{3(1)}, \bar{y}_{4(4)}$	1.9936	0.6288	1.8900
$\bar{y}_{3(2)}, \bar{y}_{4(5)}$	1.9581	0.6014	1.2875
$\bar{y}_{3(3)}, \bar{y}_{4(6)}$	1.9801	0.6117	1.8249
$\bar{y}_{N1(1)}$	0.5355	1.7718	0.4600
$\bar{y}_{N1(2)}$	0.5284	1.7658	0.4181
$\bar{y}_{N1(3)}$	0.5105	1.5811	0.4013
$\bar{y}_{N1(4)}$	0.8718	0.5394	0.8200
$\bar{y}_{N1(5)}$	0.8585	0.5739	0.5857
$\bar{y}_{N1(6)}$	0.8667	0.5258	0.7959
$\bar{y}_{N2(1)}$	0.6218	0.6394	0.5700
$\bar{y}_{N2(2)}$	0.6173	0.6211	0.4697
$\bar{y}_{N2(3)}$	0.6201	0.6461	0.5628
$\bar{y}_{N2(4)}$	1.3655	0.6182	1.2100
$\bar{y}_{N2(5)}$	1.2989	0.5117	1.1053
$\bar{y}_{N2(6)}$	1.3401	0.5774	1.0870

From the **Table 3**, it is observed that the values of bias quantities of some few members of the suggested estimators $\bar{y}_{N1}$ and $\bar{y}_{N2}$ are less in comparison of the other estimators. For population data sets I and III, in the case of positive correlation coefficient, we perceived that the values of bias quantity $\bar{y}_{N1(3)}$ is lowest with respect to all bias quantities of other estimators. For population II, in the case of negative correlation coefficients, one found that the $\bar{y}_{N2(5)}$ have lowest value of bias quantity with comparison to other estimators.

In comparing the efficiency of the suggested estimator over other estimators in this present study, we have used the percent relative efficiencies (PREs) as criteria for comparison with respect to unbiased the estimator $\bar{y}$ which details are presented in the following **Table 4**.

Table 4. The PREs of different estimators with respect to $\bar{y}$

Estimators	Population		
	I	II	III
$\bar{y}$	100.0000	100.0000	100.0000
$\bar{y}_{1(1)}, \bar{y}_{2(1)}, \bar{y}_{4(1)}$	298.9715	23.3928	108.5382
$\bar{y}_{1(2)}, \bar{y}_{2(2)}, \bar{y}_{4(2)}$	288.7267	22.5057	104.7123
$\bar{y}_{1(3)}, \bar{y}_{2(3)}, \bar{y}_{4(3)}$	331.5316	23.7668	151.0022
$\bar{y}_{3(1)}, \bar{y}_{4(4)}$	47.3689	527.0649	20.9346
$\bar{y}_{3(2)}, \bar{y}_{4(5)}$	47.8177	675.5013	27.9892
$\bar{y}_{3(3)}, \bar{y}_{4(6)}$	47.5387	484.5549	21.5203
$\bar{y}_{N1(1)}$	592.3890	14.6275	154.4982
$\bar{y}_{N1(2)}$	571.9153	13.7235	162.1239
$\bar{y}_{N1(3)}$	640.5185	15.0133	163.0460
$\bar{y}_{N1(4)}$	520.6022	348.6796	173.6499
$\bar{y}_{N1(5)}$	301.5186	374.8604	136.4437
$\bar{y}_{N1(6)}$	531.0142	338.6975	178.0580
$\bar{y}_{N2(1)}$	420.3491	391.2801	132.5411
$\bar{y}_{N2(2)}$	355.6011	369.0207	123.7205

Table 4. (Cont.)

Estimators	Population		
	I	II	III
$\bar{y}_{N2(3)}$	416.3933	401.7911	139.5793
$\bar{y}_{N2(4)}$	168.9643	780.3622	113.3635
$\bar{y}_{N2(5)}$	181.6991	793.6975	133.5651
$\bar{y}_{N2(6)}$	173.6042	790.9843	126.4133

It is observed from **Table 4** that:

- (i) For population data sets I and III, when the correlation between study and auxiliary variables is positive, the estimator $\bar{y}_{N1(3)}$ is superior to the other estimators. Because it gives the largest value of PRE as compared to other estimators within the same populations.
- (ii) Also, when comparing the efficiency between the estimators of population data sets II in the case of negative correlation, it has been seen that the PRE of the estimator $\bar{y}_{N2(5)}$ is superior among all of the other estimators. Therefore, the estimator $\bar{y}_{N2(5)}$ appears to be the best in the sense of having largest percent relative efficiency as well as least bias in Population II.

5. Conclusion

In this paper, two chain-type exponential estimators for the estimation of population mean using the information of auxiliary in sample following H. P. Singh et al. [1] and S. Bahl and R. K. Tuteja [2] has been suggested. It has been found that some known estimators of the population mean such as the usual ratio, usual product estimators, and estimators, according to H. P. Singh and S. K. Pal [5], H. P. Singh and R. Tailor [6], B. V. S. Sisodia and V. K. Dwivedi [7], and B. N. Pandey and V. Dubey [8], are members of suggested estimators. The

expressions for bias and MSE of the suggested estimators have been obtained. It has been also found from the results of theoretical and numerical studies that the suggested estimators are less bias and more efficient than other existing estimators. Therefore, we introduced the use of the suggested estimators in practice. However, this conclusion cannot be extrapolated due to limited numerical study.

6. References

- [1] H. P. Singh, R. S. Solanki and A. K. Singh, "A generalized ratio-cum-product estimator for estimating the finite population mean in survey sampling," *Communications in Statistics - Theory and Methods*, vol. 45, no. 1, pp. 158-172, Jan. 2016.
- [2] S. Bahl and R. K. Tuteja, "Ratio and product type exponential estimators," *Journal of Information and Optimization Sciences*, vol. 12, no. 1, pp. 159-164, May 1991.
- [3] M. Khoshnevisan, R. Singh, P. Chauhan, N. Sawan and F. Smarandache, "A general family of estimators for estimating population mean using known value of some population parameter(s)," *Far East Journal of Theoretical Statistics*, vol. 22, pp. 181-191, Jul. 2007.
- [4] H. P. Singh and N. Agnihotri, "A general procedure of estimating population mean using auxiliary information in sample surveys," *Statistics in Transition New Series*, vol. 9, no. 1, pp. 71-87, Jun. 2008.
- [5] H. P. Singh and S. K. Pal, "A new chain ratio-ratio-type exponential estimator using auxiliary information in sample surveys," *International Journal of Mathematics And its*

- Applications*, vol. 3, no. 4-B, pp. 37-46, Sep. 2015.
- [6] H. P. Singh and R. Tailor, "Use of known correlation coefficient in estimating the finite population mean," *Statistics in Transition*, vol. 6, no. 1, pp. 555-560, Jan. 2003.
- [7] B. V. S. Sisodia and V. K. Dwivedi, "A modified ratio estimator using coefficient of variation of auxiliary variable," *Journal Indian Society Agricultural Statistics*, vol. 32, no. 2, pp. 13-18, Jan. 1981.
- [8] B. N. Pandey and V. Dubey, "Modified product estimator using coefficient of variation of auxiliary variate," *Assam Statistical Review*, vol. 2, no. 2, pp. 64-66, Jan. 1988.
- [9] M. N. Murthy, *Sampling Theory and Methods*, 2nd ed. Calcutta: Statistical Publishing Society, 1967.
- [10] W. G. Cochran, *Sampling Techniques*, 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, 1977.

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/> โดยไฟล์รูปแบบบทความมีการตั้งค่านำกระดาษแล้ว 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 สามารถปฏิบัติงานได้อย่างโปร่งใสและมีความเป็นอิสระในการพัฒนาวารสาร ให้ก้าวหน้าและมีคุณภาพ 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 บรรณาธิการ กองบรรณาธิการ ที่ปรึกษาวารสาร รวมทั้งผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องในการจัดทำวารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร 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 Using Sacha Inchi Pressed-Cake as a Substitute for Almond Powder on the Quality of Macaron Shell Product**
Wanida Bureepakdee Thanyaporn Saithong Narinphop Chuaykarn and Siriwan Pruettiwilai
- ◆ **Effect of Xanthan gum and Guar gum on the Qualities of Boba from Germinated Brown Rice Flour and**
- ◆ **Germinated Black Glutinous Rice Flour Substituted Cassava Flour**
Tuangrat Sonnak Rawisara Chuenprapai Duangkamon Sangteerakij and Parisut Chalermchaiwat
- ◆ **Diversity of Yeasts and Molds Isolated from Look-pang**
Kusumawadee Thancharoen and Authaporn Malasri
- ◆ **Augmentation of Natural Convection of Vertical Plate using Corona Wind**
Jetsadaporn Priyadumkol Weerachai Chaiworapuek and Saowanit Lekhavat
- ◆ **Reduction of Defect Rate in Bar Soap Manufacturing Process**
Thanate Ratanawilai Salmee Baraheng and Suriya Jirasatitsin
- ◆ **Effects of Germinated Brown Rice Flour and Inulin on the Quality of Tteokbokki Flour**
Manusanun Dheerakiatkumchorn Jirawit Kanjanalux Parisut Chalermchaiwat and Prawta Chantaro
- ◆ **Antibacterial Potential of Combined Thai Herb Extracts against Methicillin-Resistant *Staphylococcus aureus*, *Edwardsiella tarda* and *Pseudomonas aeruginosa* in Dried, Seasoned, and Crushed Squid**
Subuntith Nimrat Pompimon Soodsawaeng Sangsuriya Sukhapat Phodchamarn Noiaresar Traimat Boonthai and Verapong Vuthiphandchai
- ◆ **Design and development of electric tricycle with dual motor drive system**
Juckamas Laohavanich Nuchida Suwapaet and Chonlatee Photong
- ◆ **Automatic Mobile Robot Indoor with Position Identification by Vision System**
Napassadol Singhata
- ◆ **Compressive Strength and Water Absorption of Geopolymer from Palm Oil Fuel Ash containing Alumina Powder**
Abideng Hawa Preecha Salaemae and Woraphot Prachasaree
- ◆ **Improvement of Medical Record Registration Unit Design of Songklanagarind Hospital Using Queueing Models**
Nitipat Laomongkholchaisri Palida Suttishe Piyakun Kunlaplan and Pasuree Sangsupawanich
- ◆ **The Sheared Edges Characterization of High Strength Steel Sheet Metal DP590 in Warm Blanking Process**
Natthasak Pornputsiri and Pongsakorn Leetrakul
- ◆ **Effect of Alternative Solutes and Ultrasound on Mass Transfer of Thong Rayong Pineapple in Dry Infusion Process**
Wichamanee Yuenyongputtakal Sani Jirasatid and Apatcha Sawatphon
- ◆ **Reducing Waste generated by Welding Robots in the Assembly Process of Backhoe Body Parts**
Aphichit Semsri Anucha Kalek and Thanitsak Pudtipatkosit
- ◆ **Effect of Okra Mucilage and Basil Seed Mucilage on the Qualities of Roselle Jelly Drink**
Woraluk Saengtaratip Anuvat Jangchud and Kamolwan Jangchud

Academic Article

- ◆ **Two Chain-Type Exponential Estimators for the Estimation of the Population Mean**
Napattchan Dansawad