



วารสารผลงานวิชาการ

กรมวิทยาศาสตร์บริการ

BULLETIN OF APPLIED SCIENCES

ปีที่ 11 ฉบับที่ 11 สิงหาคม 2565
Vol. 11 No. 11 August 2022

ISSN 2286-7708 (Printed)
ISSN 2697-5262 (Online)



<http://bas.dss.go.th>



**วารสารผลงานวิชาการ
กรมวิทยาศาสตร์บริการ
BULLETIN OF APPLIED SCIENCES**

ปีที่ 11 ฉบับที่ 11 สิงหาคม 2565
Vol. 11 No. 11 August 2022

ชื่อวารสาร	วารสารผลงานวิชาการ กรมวิทยาศาสตร์บริการ Bulletin of Applied Sciences	
วัตถุประสงค์	1. เพื่อเป็นวารสารเผยแพร่ผลงานวิชาการ ผลงานวิจัย ของนักวิจัย นักวิทยาศาสตร์ ให้เป็นที่ประจักษ์แก่ภาครัฐ ภาคเอกชน นักวิชาการ ผู้ประกอบการและประชาชนทั่วไป 2. เพื่อให้สามารถนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์ในทางวิชาการ การอ้างอิง และการประกอบกิจการภาคการผลิตและอุตสาหกรรม	
เจ้าของ	กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม	
นโยบายการจัดพิมพ์	วารสารผลงานวิชาการ กรมวิทยาศาสตร์บริการ รับผิดชอบต่อความวิจัย บทความวิชาการ และบทความปริทัศน์จากผู้เขียนทั้งภายในและภายนอกหน่วยงาน ในสาขาเคมี ฟิสิกส์ เทคโนโลยีชีวภาพ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร วัสดุศาสตร์ มาตรฐานวิทยาศาสตร์ หรือ วิทยาศาสตร์ประยุกต์	
ที่ปรึกษา	ดร.นพ. ปฐม สวรรค์ปัญญาเลิศ	อธิบดีกรมวิทยาศาสตร์บริการ
หัวหน้ากองบรรณาธิการ	ดร.อรสา อ่อนจันทร์	นักวิทยาศาสตร์เชี่ยวชาญ รักษาการในตำแหน่งผู้เชี่ยวชาญเฉพาะด้านวิเคราะห์ทดสอบ (นักวิทยาศาสตร์ทรงคุณวุฒิ)
บรรณาธิการจัดการ	นางสาวปัทมา นพรัตน์	ผู้อำนวยการกองหอสมุดและศูนย์สารสนเทศ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กรมวิทยาศาสตร์บริการ
กองบรรณาธิการ	ศ.ดร. ดวงดาว อัจฉรงค์ ศ.ดร. ภาวิณี ชินะโชติ รศ.ดร. กรรณิการ์ สหะโร รศ.ดร. จรุณ จักรมณี รศ.ดร. นภาพร ยังวิเศษ รศ.ดร. นุสเรศ เชื้อสุวรรณ รศ.ดร. นาทิพย์ วิภาวิน รศ.ดร. พิมพ์า หอมนิรันดร์ รศ.ดร. ภัทธินฤณ วุฒิจิตติพล รศ.ดร. วิภารัตน์ เชื้อขวด ชัยสิทธิ์ รศ.ดร. วิษณุ เพชรภา รศ.ดร. วิณา สาริตปัติพันธ์ รศ.ดร. อติยา ศิริปัญญาพันธ์ รศ.ดร. อรทัย จงประทีป ผศ.ภญ.ดร. จิตติมา ลัดนากุล ผศ.ดร. ชัยรัตน์ ดังดวงดี ผศ.ดร. เทอดเกียรติ ลิ้มปีทีปการ ผศ.ดร. ธีร เชาวน์นทีปัญญา ผศ.ดร. ปริญดา เพ็ญโรจน์ ผศ.ดร. พีระวัฒน์ นันทวราราศ ผศ.ดร. พุทธิรักษา วรานุศุภากุล	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สมาคมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอาหารแห่งประเทศไทย (FoSTAT) มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมมาธิราช มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ มหาวิทยาลัยนเรศวร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง มหาวิทยาลัยมหิดล มหาวิทยาลัยมหิดล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผศ.ดร. เย้าวภา หล่อเจริญผล
ผศ.ดร. รัฐภูมิ ปรีชาตปรีชา
ผศ. สมพร ชัยอารีย์กิจ
ดร. นงนภัส ดวงดี
ดร. นุชนาฏ ณะระนอง
ดร. ประสาร คิตดี
ดร. มาณพ สิทธิเดช

ดร. ลดา พันธุ์สุขุมธนา
ดร. วราวุฒิ ศุภมิตตมงคล
ดร. สันติชัย ยอดมณี
ดร. อองอาจ ธเนศนิตย์
นายชาติวี วงษ์แก้ว
นายวีระ ตูลาสสมบัติ
ดร. กนิษฐ์ ตะปะสา
ดร. จิราภรณ์ บุราคร
ดร. กรรรม สติกรกุล

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
นักวิชาการอิสระ
กรมพัฒนาฝีมือแรงงาน
อดีตอัครราชทูตที่ปรึกษาฝ่ายวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
ประจำสถานเอกอัครราชทูต ณ กรุงบรัสเซลส์ ประเทศเบลเยียม
นักวิชาการอิสระ
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
มหาวิทยาลัยราชภัฏภูเก็ต
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
นักวิชาการอิสระ
นักวิชาการอิสระ
กรมวิทยาศาสตร์บริการ
กรมวิทยาศาสตร์บริการ
กรมวิทยาศาสตร์บริการ

ฝ่ายจัดการและเลขานุการ หัวหน้ากลุ่มหอสมุดวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ฝ่ายประสานงาน นางสาวอุดมลักษณ์ เวียนงาม
นางสาวจอย ผิวสะอาด
นางสาวทิพย์วาทิ กรรัมย์

ฝ่ายเผยแพร่ประชาสัมพันธ์ นางสาวพรทิพย์ เส้นสด

เว็บไซต์วารสาร นางสาวพรรัชชล รัตนปานี

การจัดพิมพ์และเผยแพร่ จัดพิมพ์ปีละ 1 ฉบับ กำหนดออกเผยแพร่เดือน สิงหาคม

จำนวนพิมพ์ 200 เล่ม

สำนักงานวารสาร

กองหอสมุดและศูนย์สารสนเทศวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม
75/7 ถนนพระรามที่ 6 เขตราชเทวี กรุงเทพฯ 10400
โทรศัพท์ 0 2201 7000 ต่อ 7260, 7288
เว็บไซต์ <http://bas.dss.go.th>
e-mail: info@dss.go.th
Facebook: www.facebook.com/ScienceLibraryDSS

ISSN (Printed): 2286-7708

ISSN (Online): 2697-5262

บทความใน “วารสารผลงานวิชาการ กรมวิทยาศาสตร์บริการ” ถือเป็นผลงานทางวิชาการ และเป็นความเห็นส่วนตัวของผู้เขียน ไม่ใช้ความเห็นของกรมวิทยาศาสตร์บริการ หรือกองบรรณาธิการ ผู้เขียนต้องรับผิดชอบบทความของตน และบทความที่ตีพิมพ์ในเล่มนี้ไม่เคยพิมพ์ในวารสารใดมาก่อน และจะไม่นำส่งไปเพื่อพิจารณาตีพิมพ์ในวารสารอื่นภายใน 60 วัน

พิมพ์ที่

บริษัท ชัคเซสพับลิเคชัน จำกัด

34 ซอยลาซาล 22 ถนนสุขุมวิท 105 แขวงบางนา เขตบางนา กรุงเทพมหานคร 10260

โทรศัพท์ 089 777 4067, 081 755 0969 อีเมล successpub56@gmail.com

บทบรรณาธิการ

วารสารผลงานวิชาการกรมวิทยาศาสตร์บริการ Bulletin of Applied Sciences ได้มีการตีพิมพ์อย่างต่อเนื่องเป็นปีที่ 11 โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเผยแพร่ผลงานวิชาการและผลงานวิจัยให้เป็นที่ประจักษ์แก่ภาครัฐ ภาคเอกชน นักวิชาการ ผู้ประกอบการ และประชาชนทั่วไป มุ่งเน้นให้สามารถนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์ในทางวิชาการ ตลอดจนอ้างอิงในการประกอบกิจการภาคการผลิตและอุตสาหกรรมได้ ฉบับนี้เป็นฉบับที่ 11 ปี พ.ศ. 2565 เนื้อหาสาระยังคงความน่าสนใจอันหลากหลายครอบคลุมสาขาเคมี ฟิสิกส์ เทคโนโลยีชีวภาพ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร วัสดุศาสตร์ มาตรวิทยา วิศวกรรมศาสตร์ และวิทยาศาสตร์ประยุกต์ โดยในฉบับนี้มีเนื้อหาบทความวิชาการที่ให้ความรู้และน่าสนใจรวม 13 บทความ ได้แก่ การเตรียมผงสีเซรามิกจากเศษหนังฟอกเหลือทิ้ง, การทดสอบหาปริมาณสารอะครีลาไมด์ในตัวอย่างผลิตภัณฑ์อาหารทอดด้วยเทคนิคเมทริกซ์ โซลิด ดิสเพนชันและอัลตราไฮเพอร์ฟอร์แมนซ์ลิควิด โครมาโทกราฟี-แทนเดมแมสสเปกโทรเมตรี, การตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีทดสอบหาปริมาณซูโครโลสในเครื่องดื่มโดยเทคนิคโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง, การเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมเมทิลลีน บลู ในน้ำด้วยถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนเมโซพอร์จากเหง้ามันสำปะหลังที่เตรียมด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนในเซชันแบบหม้อเดียว, การพัฒนาสูตรยางคอมพาวนด์สำหรับการวัลคาไนซ์ด้วยล่อเล็กทรอนิกส์, การพัฒนาระบบเซนเซอร์แบบกระจายอย่างง่ายสำหรับการเฝ้าติดตามและแจ้งเตือนอัตโนมัติผ่านระบบออนไลน์: กรณีศึกษาการพัฒนาต้นแบบระบบอุปกรณ์โครงข่ายเซนเซอร์ TVOC สำหรับเฝ้าติดตามและแจ้งเตือนคุณภาพอากาศในพื้นที่ปฏิบัติงานแบบเรียลไทม์, การพัฒนาชุดป้องกันการติดเชื้อสำหรับบุคลากรทางการแพทย์เพื่อรองรับสถานการณ์เร่งด่วนการแพร่ระบาดของเชื้อ COVID-19 ในประเทศไทย, การสังเคราะห์และวิเคราะห์คุณลักษณะคาร์บอนนาโนสเฟียร์ที่มีรูพรุนจากอนุพันธ์ชีวมวล, ผลกระทบของระบบปรับตั้งต่อประสิทธิภาพของเครื่องชั่งน้ำหนักอิเล็กทรอนิกส์, สมบัติการป้องกันรังสียูวีของกระดาษหัตถกรรมปอสา, คุณลักษณะทางเคมีกายภาพและปริมาณสารแคปไซซินอยด์ของสายพันธุ์พริกที่ใช้ในการผลิตเครื่องแกงส้มปักษ์ใต้, เติ่งพลิกผู้ป่วยอัตโนมัติราคาประหยัด

กองบรรณาธิการวารสารผลงานวิชาการ กรมวิทยาศาสตร์บริการ ขอขอบคุณผู้สนับสนุนทุกท่านที่ส่งบทความมาให้พิจารณาตีพิมพ์เผยแพร่องค์ความรู้และงานวิจัย ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการปฏิบัติงานด้านการพัฒนาวิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรมของประเทศ ขอขอบพระคุณผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่านสำหรับการพิจารณาบทความ (Peer review) โดยได้ให้ข้อเสนอแนะในการปรับปรุงแก้ไขบทความต่าง ๆ ให้ความถูกต้องทางวิชาการและอ่านได้เข้าใจง่ายขึ้น และขอขอบพระคุณทุกท่านที่มีส่วนในการจัดทำวารสารฉบับนี้ให้เสร็จสมบูรณ์ด้วยดี กองบรรณาธิการหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวารสารฉบับนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับผู้อ่านทุกท่านในการเสริมสร้างองค์ความรู้ทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และขอขอบคุณผู้อ่านที่ได้ให้ความสนใจติดตามวารสารนี้อย่างต่อเนื่อง โปรดติดตามความรู้และงานวิจัยดีๆ จากวารสารผลงานวิชาการ กรมวิทยาศาสตร์บริการฉบับหน้า

ดร. อรสา อ่อนจันทร์
หัวหน้ากองบรรณาธิการ

จริยธรรมการตีพิมพ์ (Publication ethics)

วารสารผลงานวิชาการ กรมวิทยาศาสตร์บริการ (Bulletin of Applied Sciences)

จัดทำขึ้นเพื่อเผยแพร่บทความวิจัย บทความวิชาการในสาขาเคมี ฟิสิกส์ เทคโนโลยีชีวภาพ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี การอาหาร วัสดุศาสตร์ มาตราวิทยา วิศวกรรมศาสตร์ หรือวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มุ่งมั่นที่จะรักษามาตรฐานด้านจริยธรรมในการตีพิมพ์สูงสุด และให้การเผยแพร่เป็นไปอย่างถูกต้อง มีคุณภาพ และความโปร่งใสตามมาตรฐานการตีพิมพ์ที่เป็นที่ยอมรับกันในระดับชาติและระดับนานาชาติ ดังนั้นทุกฝ่ายที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ บรรณาธิการ (Editor) ผู้นิพนธ์ (Authorship) และผู้ประเมินบทความ (Reviewer) จะต้องปฏิบัติตามหลักการและมาตรฐานด้านจริยธรรมในการตีพิมพ์อย่างเคร่งครัด

บทบาทและหน้าที่ของกองบรรณาธิการ

1. บรรณาธิการมีหน้าที่พิจารณา คัดกรอง ตรวจสอบ บทความที่ส่งมาเพื่อตีพิมพ์ ให้เหมาะสม สอดคล้องตรงกับวัตถุประสงค์และขอบเขต (Aim and scope) ของวารสาร รวมถึงการตรวจสอบคุณภาพบทความในกระบวนการประเมินและคุณภาพบทความก่อนการตีพิมพ์ในกรณีที่เนื้อหาบทความไม่เหมาะสม สอดคล้องกับวารสาร บรรณาธิการต้องรีบแจ้งให้ผู้นิพนธ์ได้รับทราบ
2. บรรณาธิการเป็นผู้ส่งต้นฉบับบทความให้กองบรรณาธิการวารสาร เพื่อช่วยพิจารณาคุณภาพเบื้องต้นของบทความที่ส่งเข้ามาว่าอยู่ในระดับเหมาะสมที่จะส่งต่อให้ผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความไม่น้อยกว่า 2 ท่าน อ่านพิจารณาในขั้นตอนต่อไปหรือไม่
3. บรรณาธิการต้องใช้เหตุผลทางวิชาการในการพิจารณาบทความทุกครั้งโดยปราศจากอคติที่มีต่อบทความของผู้นิพนธ์ในด้านเชื้อชาติ เพศ ศาสนา วัฒนธรรม การเมือง และสังกัดของผู้นิพนธ์ หรือหากบรรณาธิการไม่แน่ใจเกี่ยวกับเนื้อหาและคุณภาพเบื้องต้นของบทความเรื่องใด ๆ บรรณาธิการต้องไม่พิจารณาปฏิเสธบทความเรื่องนั้น ๆ ทันทีด้วยใจอคติ โดยอาจพิจารณาขอความเห็นเพิ่มเติมจากกองบรรณาธิการที่มีความเชี่ยวชาญเฉพาะด้านเกี่ยวกับเนื้อหาบทความนั้น ๆ ก่อนเสมอ
4. บรรณาธิการต้องไม่มีส่วนได้ส่วนเสียกับผู้นิพนธ์ หรือผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ ไม่นำบทความหรือวารสารไปใช้ประโยชน์ในเชิงธุรกิจ หรือนำไปเป็นผลงานทางวิชาการของตนเอง
5. บรรณาธิการพิจารณาคัดเลือกผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ ที่มีความเชี่ยวชาญในสาขาต่าง ๆ ในการประเมินบทความเรื่องนั้น ๆ และส่งบทความให้ผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ โดยจะไม่เปิดเผยชื่อของผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความหรือผู้นิพนธ์ให้อีกฝ่ายหนึ่งได้ทราบโดยเด็ดขาด (Double blind) รวมทั้งบุคคลอื่นที่ไม่มีส่วนเกี่ยวข้องด้วย
6. เมื่อเกิดกรณีที่ข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความทั้ง 2 ท่าน มีความขัดแย้งกัน บรรณาธิการจะเป็นผู้ตัดสินใจว่าจะดำเนินการในขั้นตอนถัดไปกับบทความเรื่องนั้น ๆ อย่างไรต่อไป เช่น อิงตามข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความท่านใดท่านหนึ่ง หรือพิจารณาคัดเลือกผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความท่านที่ 3 ต่อไป
7. บรรณาธิการต้องไม่แก้ไขหรือเปลี่ยนแปลงเนื้อหาบทความและผลประเมินของผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ รวมถึงไม่ปิดกั้นหรือแทรกแซงข้อมูลที่ใช้แลกเปลี่ยนระหว่างผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ และผู้นิพนธ์
8. บรรณาธิการส่งผลการประเมินให้ผู้นิพนธ์แก้ไข และพิจารณา ตรวจสอบการแก้ไขของผู้นิพนธ์อย่างเคร่งครัด
9. บรรณาธิการเป็นผู้จัดสรรบทความผ่านกระบวนการประเมินบทความและอยู่ในสถานะพร้อมตีพิมพ์เผยแพร่ โดยจะพิจารณาจากเหตุผลหลัก คือ ลำดับก่อนหน้าของการส่งบทความ (Queue) และความน่าสนใจ/ความหลากหลายของเนื้อหาบทความ (Content) รวมถึงเหตุผลในด้านความเหมาะสมอื่น ๆ (Suitability) เป็นสำคัญ
10. ในกรณีที่เหตุผลสำคัญ ที่อาจจะไม่นำบทความของผู้นิพนธ์เรื่องใดเรื่องหนึ่ง ลงตีพิมพ์ในวารสารผลงานวิชาการ กรมวิทยาศาสตร์บริการ ในฉบับตามที่ระบุในหนังสือตอบรับให้ได้นั้น บรรณาธิการขอสงวนสิทธิ์ในการนำบทความดังกล่าว ลงตีพิมพ์ในวารสารผลงานวิชาการ กรมวิทยาศาสตร์บริการในฉบับต่อไป ตามที่เห็นสมควร โดยบรรณาธิการจะต้องแจ้งให้ผู้นิพนธ์เรื่องนั้น ๆ ได้รับทราบล่วงหน้าก่อนเสมอ
11. บรรณาธิการเป็นผู้ควบคุมและให้ความสำคัญต่อการตีพิมพ์เป็นรูปเล่มของวารสารในแต่ละฉบับ รวมถึงการเผยแพร่ทางเว็บไซต์วารสาร ให้มีความถูกต้อง สมบูรณ์ และออกตรงตามกำหนดเวลา อย่างเคร่งครัด

บทบาทและหน้าที่ของผู้เขียน (Duties of authorship)

1. ผู้เขียนต้องรับรองว่าบทความที่ส่งมาตีพิมพ์นั้นยังไม่เคยได้รับการเผยแพร่ที่ไหนมาก่อน หรืออยู่ระหว่างการพิจารณาตีพิมพ์ในวารสารอื่น การละเมิดลิขสิทธิ์ถือเป็นความรับผิดชอบของผู้เขียนโดยตรง
2. ผู้เขียนต้องไม่คัดลอกผลงานของผู้อื่น และต้องอ้างอิงทุกครั้งเมื่อนำผลงานของผู้อื่นมานำเสนอหรืออ้างอิงในเนื้อหาบทความของตนเอง รวมทั้งต้องทำเอกสารอ้างอิงไว้ท้ายบทความโดยจัดรูปแบบการอ้างอิงตามที่กองบรรณาธิการได้กำหนดไว้อย่างเคร่งครัด
3. ผู้เขียนต้องเขียนบทความให้ถูกต้องตามรูปแบบที่วารสารผลงานวิชาการ กรมวิทยาศาสตร์บริการ กำหนดไว้อย่างเคร่งครัด
4. ผู้เขียนยินดีแก้ไขปรับปรุงรูปแบบและคุณภาพของบทความ ให้ถูกต้องและเหมาะสมตามข้อเสนอแนะเบื้องต้นจากกองบรรณาธิการฯ ก่อนเข้าสู่กระบวนการพิจารณาในขั้นตอนของผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความไม่น้อยกว่า 2 ท่านในลำดับต่อไป
5. ข้อคิดเห็นที่ปรากฏและแสดงในเนื้อหาบทความต่าง ๆ ในวารสารผลงานวิชาการ กรมวิทยาศาสตร์บริการถือเป็นความเห็นและความรับผิดชอบโดยตรงของผู้เขียนนั้น ๆ มิใช่เป็นความเห็นและความรับผิดชอบใด ๆ ของกองบรรณาธิการฯ และกรมวิทยาศาสตร์บริการ แต่อย่างใด
6. ผู้เขียนต้องรับทราบและยอมรับถึงข้อกำหนด และนโยบายในการรับพิจารณาตีพิมพ์บทความจากวารสารผลงานวิชาการ กรมวิทยาศาสตร์บริการ เป็นอย่างดีแล้ว
7. ผู้เขียนต้องรับทราบว่าบทความ ข้อมูล เนื้อหา รูปภาพ ฯลฯ ที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารผลงานวิชาการกรมวิทยาศาสตร์บริการ ถือเป็นลิขสิทธิ์เฉพาะของกรมวิทยาศาสตร์บริการ มิใช่เป็นลิขสิทธิ์ของผู้เขียนบทความแต่อย่างใด และไม่นำผลงานไปเผยแพร่หรือตีพิมพ์กับแหล่งอื่นอีกหลังจากได้รับการตีพิมพ์กับวารสารผลงานวิชาการกรมวิทยาศาสตร์บริการ แล้ว

บทบาทและหน้าที่ของผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ (Duties of reviewers)

1. ผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความพิจารณาความถูกต้อง คุณภาพและความน่าสนใจของเนื้อหาบทความภายใต้หลักการและเหตุผลทางวิชาการ ด้วยใจเป็นกลาง และปราศจากอคติ หรือความคิดเห็นส่วนตัว ตลอดจนประโยชน์ที่ผู้อ่านบทความจะได้รับ และพร้อมจะให้คำติชม ข้อเสนอแนะ และแนวทางแก้ไขปรับปรุงบทความที่สร้างสรรค์และชัดเจนในเชิงประจักษ์ รวมทั้งไม่มีส่วนได้ส่วนเสียกับผู้เขียน
2. ผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความต้องตระหนักว่าตนเองมีความรู้ความเข้าใจในเนื้อหาของผลงานทางวิชาการที่ประเมินอย่างแท้จริง หากไม่มีความเชี่ยวชาญเนื้อหาในระดับที่มากพอจะวิจารณ์บทความเรื่องนั้น ๆ ได้อย่างมีคุณภาพ ผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความควรแจ้งปฏิเสธการประเมินบทความให้กองบรรณาธิการได้ทราบ
3. ผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความต้องรักษาระยะเวลาประเมินตามกรอบเวลาที่กำหนด หากไม่สามารถส่งข้อเสนอแนะบทความได้ทันตามเวลาที่กองบรรณาธิการได้กำหนดไว้ ผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความควรแจ้งให้กองบรรณาธิการได้ทราบ พร้อมทั้งควรแจ้งกำหนดเวลาใหม่ในการส่งคืนข้อเสนอแนะบทความ
4. ผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความต้องไม่แสวงหาประโยชน์จากบทความที่ตนเองได้ประเมิน และไม่เปิดเผยข้อมูลบทความให้ผู้ที่ไม่มีส่วนเกี่ยวข้องได้รับรู้
5. หากผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความตรวจสอบพบว่าบทความที่ประเมินมีการคัดลอกผลงานชิ้นอื่น ๆ ต้องแจ้งให้บรรณาธิการทราบทันที
6. ภายหลังจากการประเมินบทความและให้ข้อเสนอแนะในรอบที่ 1 เรียบร้อยแล้ว เมื่อผู้เขียนได้แก้ไขปรับปรุงบทความ (พร้อมเหตุผลและคำชี้แจง) กลับมาเพื่อพิจารณาอีกครั้งหนึ่ง กองบรรณาธิการจะขอความเห็นหรือความเห็นในการประเมินบทความรอบที่ 2 ซึ่งผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความจะเป็นผู้พิจารณาการแก้ไขปรับปรุงบทความดังกล่าว เมื่อพิจารณาแล้วเสร็จ ผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความควรแจ้งผลการพิจารณาสุดท้ายให้กองบรรณาธิการได้รับทราบต่อไป เช่น แจ้งเห็นควรตอบรับการตีพิมพ์ หรือแจ้งปฏิเสธการตีพิมพ์ หรือแจ้งข้อเสนอแนะเพิ่มเติมสำหรับการแก้ไขปรับปรุงในรอบที่ 2

การคุ้มครองข้อมูลส่วนบุคคล

1. วารสารผลงานวิชาการ กรมวิทยาศาสตร์บริการ จะเคร่งครัดกรณีบทความมีการคัดลอก การนำเสนอรูปภาพ หรือการนำผลงานผู้อื่นมาเป็นส่วนหนึ่งของบทความเพื่อตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสาร
2. วารสารผลงานวิชาการ กรมวิทยาศาสตร์บริการ จะไม่เปิดเผยรายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความให้แก่ผู้เขียนหรือบุคคลอื่น

สารบัญ

วารสารผลงานวิชาการ กรมวิทยาศาสตร์บริการ
ปีที่ 11 ฉบับที่ 11 สิงหาคม 2565

1

การเตรียมผงสีเซรามิกจากเศษหนังฟอกเหลือทิ้ง
ปราณี จันทรีลา, นิธิวัชร นวอัครฐานนท์, อรวรรณ ศรีคุ้มวงษ์

11

2

การทดสอบหาปริมาณสารอะคริลาไมด์ในตัวอย่างผลิตภัณฑ์อาหารทอดด้วย
เทคนิคเมทริกซ์ โซลิด ดิสเพอชั่นและอัลตราไฮเพอร์ฟอร์แมนซ์ลิกวิด โครมา
โทกราฟี-แทนเดมแมสสเปกโทรเมตรี
จุฑาทิพย์ ลาภวิบูลย์สุข, สมภาพ ลาภวิบูลย์สุข

21

3

การตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีทดสอบหาปริมาณซูโคราโลสในเครื่องดื่ม
โดยเทคนิคโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง
นันทิดา จิตแก้ว, สวรรินทร์ สีนะวิวัฒน์

35

4

การเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมเมทิลีน บลู ในน้ำด้วยถ่านกัมมันต์ที่มี
รูพรุนเมโซพอร์จากเหง้ามันสำปะหลังที่เตรียมด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์
มอลคาร์บอนในเซชันแบบหม้อเดียว
เจนจิรา ภูริรักษ์พิติกร, กิตติยา ปลื้มใจ, วรินดา เฟื่องชูนุช, แหลมทอง ชื่นชม

45

5

การพัฒนาสูตรยางคอมพาวนด์สำหรับการวัลคาไนซ์ด้วยล่อเล็กทรอนิกส์
ภัณฑิลา ภูมิระเปียบ, อรวรรณ ปิ่นประยูร, นิชาภา บัวสุวรรณ, เกศินี เหมวิเชียร

57

6

การพัฒนาระบบเซนเซอร์แบบกระจายอย่างง่ายสำหรับการเฝ้าติดตามและแจ้งเตือน
อัตโนมัติผ่านระบบออนไลน์ : กรณีศึกษาการพัฒนาต้นแบบระบบอุปกรณ์โครงข่าย
เซนเซอร์ TVOC สำหรับเฝ้าติดตามและแจ้งเตือนคุณภาพอากาศในพื้นที่ปฏิบัติงาน
แบบเรียลไทม์

67

ชนก ท่วมจระ

7

การพัฒนาชุดป้องกันการติดเชื้อสำหรับบุคลากรทางการแพทย์เพื่อรองรับ
สถานการณ์เร่งด่วนการแพร่ระบาดของเชื้อ COVID-19 ในประเทศไทย 77
กนิษฐ ตะปะสา, สมจิตต์ ตั้งชัยวัฒนา, สมพงษ์ คำวงเวียน, สุวรรณ เทพบุตรดี

8

การสังเคราะห์และวิเคราะห์คุณลักษณะคาร์บอนนาโนสเฟียร์ที่มีรูปทรงจาก
อนุพันธ์ชีวมวล 87
ฐิติพร วัฒนกุล, ลลิตา บึงกิจเจริญ, อาทิตย์ อัสวสุชี

9

การทดสอบเครื่องวัดอุณหภูมิชนิดอินฟราเรดด้วยเพลเลียร์เทคนิค 101
วีระชัย วาริยาตร์, วันชัย ชินชูศักดิ์

10

ผลกระทบของระบบปรับตั้งต่อประสิทธิภาพของเครื่องชั่งน้ำหนักอิเล็กทรอนิกส์ 105
จิตตกานต์ อินเที่ยง

11

สมบัติการป้องกันรังสีของกระดาษหัตถกรรมปอสา 113
ฐิตาริณี สุโรพันธ์, ก่อพงศ์ หงษ์ศรี

12

คุณลักษณะทางเคมีกายภาพและปริมาณสารแคปไซซินอยด์ของสายพันธุ์พริกที่ใช้ 121
ในการผลิตเครื่องแกงส้มได้
ชนิษฐา อินทร์ประสิทธิ์, ลลิตา ชูแก้ว, เจนจิรา สุขสวัสดิ์, สุทธยา ชื่นวัฒนา

13

เตียงพลิกผู้ป่วยอัตโนมัติราคาประหยัด 133
สมพล โคศรี, ศักดิ์สิทธิ์ ดีอ่ำ

CONTENTS

Bulletin of Applied Sciences

Vol. 11 No. 11 August 2022

1

Preparation of ceramic pigment from tanned leather waste

11

Pranee Junlar, Nithiwach Nawaukaratharnant, Orawan Srekumwong

2

Determination of acrylamide in fried food product by matrix solid dispersion with ultra-high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry

21

Jutathip Lapviboonsuk, Sompop Lapviboonsuk

3

Method validation for determination of sucralose in beverage by high performance liquid chromatography

35

Nantida Jitkaew, Savarin Sinaviwat

4

Enhancing adsorption efficiency of methylene blue from water using cassava rhizome-derived mesoporous activated carbons prepared via one-pot hydrothermal carbonization

45

Jenjira Phuriragpitikhon, Kittiya Pluamjai, Warinda Fuangchoonuch, Laemthong Chuenchom

5

Development of compound rubber formula for electron beam vulcanization

57

Pantila Bhumirabiab, Orawan Pinprayoon, Nichapa Buasuwan, Kasinee Hemvichian

6

Developing a simple distributed sensor system for automated online monitoring and alerting: Case study of TVOC sensor network system prototype development for real-time monitoring and alerting of air quality in operations

67

Chanok Thuamjorn

7	Development of protection suits for bloodborne pathogen safety for the emergency use during the pandemic of COVID-19 in Thailand Kanit Tapasa, Somjit Tungchaiwattana, Sompong Kamwongwian, Suwannee Thepbutdee	77
8	Synthesis and characterization of porous carbon nanospheres from biomass derived compounds Titiporn Wattanakul, Lalita Buengkitcharoen, Artit Ausavasukhi	87
9	Verification of IRT with the peltier technique Weerachai Variyart, Wanchai Chinchusak	101
10	The effect of adjustment system to the electronic balance performance Jittakant Intiang	105
11	UV-Protection property of mulberry craft paper Thitarini Suropan, Korpong Hongsri	113
12	Physicochemical properties and capsinoids content of Thai chili cultivars used in southern sour curry paste (Kaeng som) Khanittha Inprasit, Lalita Chookaew, Janejira Suksawad, Sutachaya Chuenwatthana	121
13	A Low-cost automatic flipping patient bed Sompol Kosri, Saksit Deeum	133

การเตรียมผงสีเซรามิกจากเศษหนังฟอกเหลือทิ้ง

Preparation of ceramic pigment from tanned leather waste

ปรานี จันทร์ลา¹, นิธิวัชร นวอัครฐานนท์², อรวรรณ ศรีคุ้มวงษ์¹

Pranee Junlar¹, Nithiwach Nawaukarathanant², Orawan Srekumwong¹

รับบทความ: 1 มีนาคม 2565 แก้ไขบทความ: 17 พฤษภาคม 2565 ยอมรับตีพิมพ์: 6 มิถุนายน 2565

1

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการนำเศษหนังฟอกเหลือทิ้งที่เกิดขึ้นจากอุตสาหกรรมฟอกหนังซึ่งมีโครเมียม (Cr) เป็นส่วนประกอบมาใช้ผลิตเป็นผงสีเซรามิก โดยเริ่มจากนำเศษหนังฟอกเหลือทิ้งมาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี และองค์ประกอบทางเฟสด้วยเครื่อง X-ray fluorescence (XRF) และ X-ray diffraction (XRD) ตามลำดับ จากนั้นนำเศษหนังฟอกเหลือทิ้งเผาที่ 1,100 °C พบเฟสหลักคือ โครเมียม (II) ออกไซด์ (Cr_2O_3) ถูกใช้เป็นแหล่งของโครเมียมสำหรับการผลิตผงสีนำเศษหนังหลังเผามาผสมแบบเปียกกับซิงค์ออกไซด์ (ZnO) อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Al}(\text{OH})_3$) เพื่อผลิตผงสีชมพูในระบบ Zn- Al-Cr และผสมกับซิงค์ออกไซด์และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) เพื่อผลิตผงสีน้ำตาลในระบบ Zn-Fe-Cr นำส่วนผสมไปเผาที่อุณหภูมิ 1,200 °C ก่อนนำไปใช้เป็นผงสีในเคลือบของสโตนแวร์ จากนั้นเติมเศษหนังหลังเผาและผงสีที่เตรียมได้ 10 wt% ลงในเคลือบเซรามิกใส เคลือบลงบนเนื้อดินบิสกิตแล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 1,200 °C ผลการทดลองพบว่าขึ้นทอดอบหลังเผาให้สีเขียว สีชมพู และสีน้ำตาล ดังนั้น เศษหนังฟอกเหลือทิ้งสามารถเป็นแหล่งให้โครเมียมที่นำไปผลิตเป็นผงสีเซรามิกได้ นอกจากนั้น ยังได้ทดสอบหาปริมาณสารตะกั่ว (Pb) แคดเมียม (Cd) และโครเมียม (Cr) ที่ละลายออกจากเคลือบ

Abstract

This research studies on the utilization of tanned leather waste from tannery industries composed of chromium for producing the ceramic pigment. Firstly, the chemical composition and phase composition of the waste were characterized using X-ray fluorescence (XRF) and X-ray diffraction (XRD), respectively. The waste fired at 1,100 °C, which the main phase was chromium (II) oxide (Cr_2O_3), was used as chromium source to create the ceramic pigment. The fired waste was wet-mixed with ZnO and $\text{Al}(\text{OH})_3$ to create the pink pigment (Zn-Al-Cr system) and with ZnO and Fe_2O_3 to create the brown pigment (Zn-Fe-Cr system). The mixtures were then fired at 1,200 °C before using as ceramic pigment in a glazed stoneware. 10 wt% of the fired waste and the prepared pigments were separately added into the transparent glaze and were then coated on the biscuit samples before firing at 1,200 °C. The results shown that the glazed samples (green, pink, and brown) were successfully produced the ceramic pigment using the tanned leather waste as chromium source. Moreover, the leaching of Lead (Pb), Cadmium (Cd) and Chromium (Cr) from glazed product were detected.

คำสำคัญ: สีเซรามิก เศษหนังฟอกเหลือทิ้ง การเตรียมสีเซรามิก

Keywords: Ceramic pigment, Tanned leather waste, Preparation of ceramic pigment

¹ กรมวิทยาศาสตร์บริการ

² สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

^{*} Corresponding author e-mail address: pranee@dss.go.th

1. บทนำ (Introduction)

อุตสาหกรรมฟอกหนังเป็นอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญ อุตสาหกรรมหนึ่งของประเทศไทย ซึ่งสามารถผลิตแผ่นหนังสำเร็จรูป เพื่อจำหน่ายทั้งในประเทศและส่งออกไปยังต่างประเทศ โดยสามารถสร้างรายได้ให้กับประเทศไทยเป็นจำนวนมาก แผ่นหนังสำเร็จรูปจะถูกนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เช่น เครื่องหนังประเภทต่าง ๆ เฟอร์นิเจอร์ และเบาะหนังรถยนต์ เป็นต้น ปัจจุบันมีผู้ประกอบการมากกว่า 100 โรงงาน ส่วนใหญ่ตั้งอยู่ในจังหวัดสมุทรปราการ สำหรับโรงงานขนาดกลาง พบว่าในกระบวนการผลิตแผ่นหนังสำเร็จรูป วัสดุเหลือทิ้งที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการตัดแต่งหนังส่วนเกิน ปรับแต่งความหนา และตกแต่งขอบ มีประมาณ 10-20 ตัน/เดือน/โรงงาน โดยวัสดุเหลือทิ้งดังกล่าวถูกนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ เช่น สกัดคอลลาเจนเพื่อใช้งานในด้านการเกษตร เป็นต้น แต่พบว่ายังควมมีวัสดุเหลือทิ้งบางส่วนที่ไม่ถูกนำไปใช้ประโยชน์ ได้แก่ เศษหนังฟอกเหลือทิ้งจากการขัดตกแต่งด้วยกระดาษทรายเพื่อปรับความหนา ซึ่งมีจำนวนประมาณ 2-3 ตัน/ปี/โรงงาน ปัจจุบันโรงงานต้องจ้างบริษัทเอกชนเพื่อนำไปกำจัดในราคาสูง เศษหนังดังกล่าวมีส่วนผสมของโครเมียม เนื่องจากในกระบวนการฟอกหนังจะต้องใช้เกลือของโครเมียมเป็นสารเคมีในการฟอกหนัง เพื่อป้องกันการเน่าเสียของแผ่นหนัง [1-3] ซึ่งเกลือดังกล่าวมีส่วนประกอบหลักเป็นโครเมียมมากกว่า 50 % ดังนั้น การใช้เศษหนังฟอกเหลือทิ้งดังกล่าวเป็นแหล่งของโครเมียมจึงมีความน่าสนใจ

สีเซรามิก คือ สีที่ได้จากการนำวัตถุดิบที่มีส่วนประกอบของสารประกอบออกไซด์ของโลหะมาบดผสมและเผาให้อยู่ในรูปของผลึกที่มีความเสถียรของโครงสร้าง เมื่อนำไปผสมในเคลือบจะทำให้สีที่สม่ำเสมอและถูกต้อง ทำให้สะดวกในการใช้งานและควบคุมกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เซรามิกได้ดี ส่วนใหญ่แล้วผลึกจะอยู่ในรูปของสารประกอบออกไซด์ โดยวัตถุดิบที่นำมาใช้ผลิตผงสีเซรามิก คือ ออกไซด์ของโลหะต่าง ๆ ได้แก่ ดีบุก (Sn), โคบอล (Co), นิกเกิล (Ni), วานเดียม (Va), เหล็ก (Fe) และ โครเมียม (Cr) เป็นต้น ด้วยการนำออกไซด์ที่ให้สีต่าง ๆ มาผสมกันในอัตราส่วนต่าง ๆ และนำไปเผาที่อุณหภูมิในช่วง 1,100-1,300 °C ซึ่งจะทำให้เกิดสีหลังเผาที่แตกต่างกัน เพื่อผลิตสีที่หลากหลายและนำไปใช้เพื่อสร้างผลิตภัณฑ์ที่มีสีสันที่สวยงาม [4-6]

จากงานวิจัยเกี่ยวกับการผลิตสีเซรามิก พบว่าการผลิตผงสีเซรามิกสีแดงและสีเปลือกมังคุด (Sn-Ca-Si-Cr) เป็นสีเซรามิกที่ได้มาจากการผสมของดีบุกออกไซด์ (SnO₂) โคบอลออกไซด์ (Co₂O) ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO₂) และโครเมียมออกไซด์ (Cr₂O₃) จากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 1,250-1,300 °C พบว่าผงสีหลังเผาเกิดเป็นสีแดง จนถึงสีเปลือกมังคุด ซึ่งเกิดจากการแพร่ของไอออนโครเมียมเข้าไปในโครงสร้างของผลึกที่อุณหภูมิสูง ทำให้เกิดความเสถียร

และไม่ละลายออกจากโครงสร้างในสภาวะบรรยากาศออกซิเดชัน และยังพบว่าองค์ประกอบทางเคมีของสารตั้งต้นเป็นสิ่งสำคัญ โดยจำเป็นต้องควบคุมไม่ให้มีส่วนประกอบของเหล็กปนเปื้อนในปริมาณสูง [4-7]

นอกจากนั้น สำหรับการผลิตผงสีเซรามิกสีเขียว (Cr-Co-Zn-Al) เป็นสีเซรามิกที่ได้มาจากการผสมโคบอลออกไซด์ โครเมียมออกไซด์ ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) อะลูมินา (Al₂O₃) เเผาที่อุณหภูมิ 1,250-1,280 °C พบว่าได้ผงสีหลังเผาเป็นสีเขียวที่เสถียรที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากวัตถุดิบส่วนใหญ่ทนไฟสามารถใช้เป็น Body stain ได้ [4-8]

ยิ่งไปกว่านั้น โครเมียมออกไซด์ ยังสามารถนำมาผสมกับซิงค์ออกไซด์ และเหล็กออกไซด์ ให้ผงสีเซรามิกสีน้ำตาล เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 1,200-1,300 °C และได้ผงสีชมพูเมื่อนำโครเมียมออกไซด์มาผสมกับอะลูมินา ซิงค์ออกไซด์ และกรดบอริก เเผาที่อุณหภูมิ 1,200-1,300 °C โดยการเกิดสีนั้นจะขึ้นอยู่กับปริมาณโครเมียมออกไซด์ที่เติมลงในส่วนผสมหลัก ในกรณีที่เติมปริมาณโครเมียมออกไซด์ไม่เกิน 1 wt% พบว่าสีหลังเผาจะไม่ปรากฏเป็นสีชมพู แต่จะออกเป็นสีเหลืองอมส้ม ซึ่งถ้าต้องการให้เกิดสีชมพูจะต้องใส่ในปริมาณมากกว่าหรือเท่ากับ 5 wt% [4-8]

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่า ส่วนตะกอนน้ำทิ้ง (sludge) จากอุตสาหกรรมฟอกหนัง สามารถเป็นแหล่งให้โครเมียม ที่ใช้เป็นตัวเติมในเตรียมผงสีเซรามิกได้ ในอุตสาหกรรมเซรามิกได้ ด้วยการนำตะกอนดังกล่าวไปเผาที่อุณหภูมิ 1,100 °C จากนั้นนำไปผสมเหล็กออกไซด์ (Fe₂O₃) 35-55 wt% คอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) 10-15 wt% นิกเกิลออกไซด์ (Ni₂O₃) 20-25 wt% เเผาที่อุณหภูมิ 1,200 °C จะได้ผงสีที่สามารนำไปใช้เป็นผงสีเซรามิกได้ [9] หรือนำส่วนเศษหนัง (Leather waste) ที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานฟอกหนัง เเผาแคลไซต์ที่อุณหภูมิ 900 °C ผสมกับซิงค์ออกไซด์ 1 โมล อะลูมินา 0.95 โมล และ เศษหนังแคลไซต์ 0.05 โมล เเผาที่อุณหภูมิ 1,200 °C เกิดเป็นโครงสร้างสปีเนล ZnAl_{0.95}Cr_{0.05}O₄ ผงสีชมพู สามารถใช้เป็นผงสีเซรามิกได้ [10]

เพื่อตอบโจทย์ของระบบเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular economy) การนำวัสดุเหลือทิ้งที่เป็นขยะกลับมาสร้างคุณค่าใหม่ โดยนำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ชนิดใหม่จึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจ ดังนั้น คณะวิจัยจึงสนใจศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเศษหนังฟอกที่มีส่วนประกอบของโครเมียม ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการปรับความหนาของแผ่นหนังด้วยการขัดกระดาษทรายจากอุตสาหกรรมฟอกหนัง กลับมาใช้ใหม่ในการผลิตผงสีเซรามิกซึ่งเป็นวัสดุที่สำคัญในอุตสาหกรรมเซรามิก สำหรับใช้ในการตกแต่งลวดลายให้ผลิตภัณฑ์เซรามิกมีสีสันสวยงาม และนำไปใช้ รวมทั้งเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตภัณฑ์ โดยเริ่มจากการนำเศษหนังฟอกเหลือทิ้งที่เกิดขึ้นจากอุตสาหกรรม

ฟอกหนังมาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค X-ray fluorescence (XRF) องค์ประกอบทางเฟสด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD) ศึกษาอุณหภูมิเผาที่เหมาะสม โดยเผาเศษหนังที่อุณหภูมิ 800-1,100 °C ในบรรยากาศปกติ จากนั้นนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและองค์ประกอบทางเฟส ศึกษาผลของการใช้เศษหนังหลังเผาที่เตรียมได้ในการใช้เป็นแหล่งของโครเมียมออกไซด์สำหรับการผลิตผงสีเซรามิกสีชมพู (ระบบ Zn- Al-Cr) และสีน้ำตาล (ระบบ Zn-Fe-Cr) นำเศษหนังหลังเผาที่เตรียมได้และผงสีเซรามิกทั้ง 2 สี มาทดลองใช้งานเป็นแหล่งให้สีในเคลือบใสบนชิ้นทดสอบผลิตภัณฑ์เซรามิก

2. วิธีการวิจัย (Experimental methods)

2.1 สารเคมี

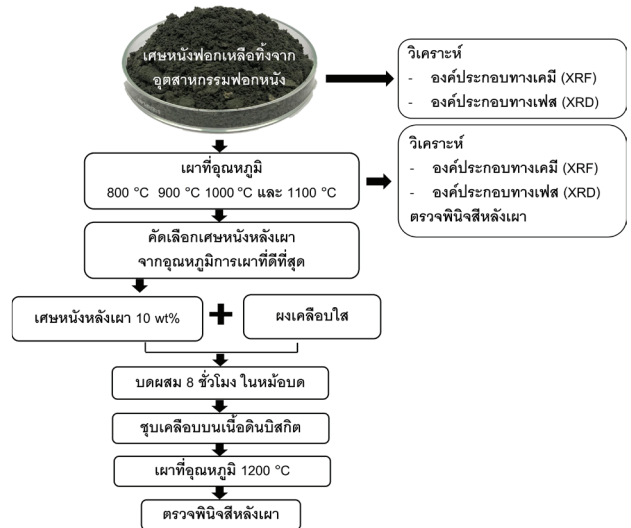
- เศษหนังฟอกเหลือทิ้งจากโรงงานฟอกหนัง ของ บริษัท อุตสาหกรรมฟอกหนังสงวนกิจ จำกัด
- ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ของบริษัท เซอร์นิค จำกัด
- อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Al}(\text{OH})_3$) ของบริษัท ไฮมีเดีย (Himedia) จำกัด
- เพอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) ของบริษัท พื้ททาร์ เคลย์ จำกัด
- กรอบอริก (H_2BO_3) ของบริษัท พื้ททาร์ เคลย์ จำกัด
- เคลือบใสสำเร็จรูป ของบริษัท เซอร์นิค จำกัด

2.2 วิธีดำเนินงาน

2.2.1 นำเศษหนังฟอกเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมฟอกหนังที่ใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้น มาอบที่อุณหภูมิ 110 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อกำจัดความชื้น และนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง XRF (ยี่ห้อ Bruker รุ่น S8 Tiger) และองค์ประกอบทางเฟสด้วยเครื่อง XRD (ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance) ใช้ $\text{Cu-K}\alpha$ radiation ที่ scanning speed 2 องศาต่อวินาที ในช่วงมุม 2-theta ตั้งแต่ 5 ถึง 80°

2.2.2 ศึกษาอุณหภูมิการเผาที่เหมาะสมด้วยการนำเศษหนังฟอกเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมฟอกหนังไปเผาที่อุณหภูมิ 800-1,100 °C ยืนไฟเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อให้ได้เศษหนังหลังเผาซึ่งมีองค์ประกอบของโครเมียมออกไซด์ที่สามารถนำไปใช้ทำเป็นผงสีเซรามิกได้ และวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง XRF และองค์ประกอบทางเฟสด้วยเครื่อง XRD

2.2.3 คัดเลือกเศษหนังหลังเผาที่อุณหภูมิที่เหมาะสม โดยพิจารณาจากองค์ประกอบทางเฟส มาทดลองใช้งานในเคลือบใส โดยนำเศษหนังหลังเผาที่เตรียมได้ปริมาณ 10 wt% ผสมกับเคลือบใสสำเร็จรูป และบดผสมแบบเปียกด้วยลูกบดอะลูมินาในหม้อบดเป็นเวลา 8 ชั่วโมง โดยกำหนดเป็นชื่อสูตร C1 จากนั้นนำไปเคลือบด้วยวิธีการชุบบนชิ้นทดสอบเนื้อดินบิสกิตที่เตรียมจากเนื้อดินเซรามิกชนิดสโตนแวร์ และนำไปเผาเคลือบที่อุณหภูมิ 1,200 °C ยืนไฟเป็นเวลา 30 นาที ตรวจพินิจสีที่ได้หลังเผา ขั้นตอนการทดลองและลักษณะของเศษหนังก่อนเผาแสดงดังรูปที่ 1

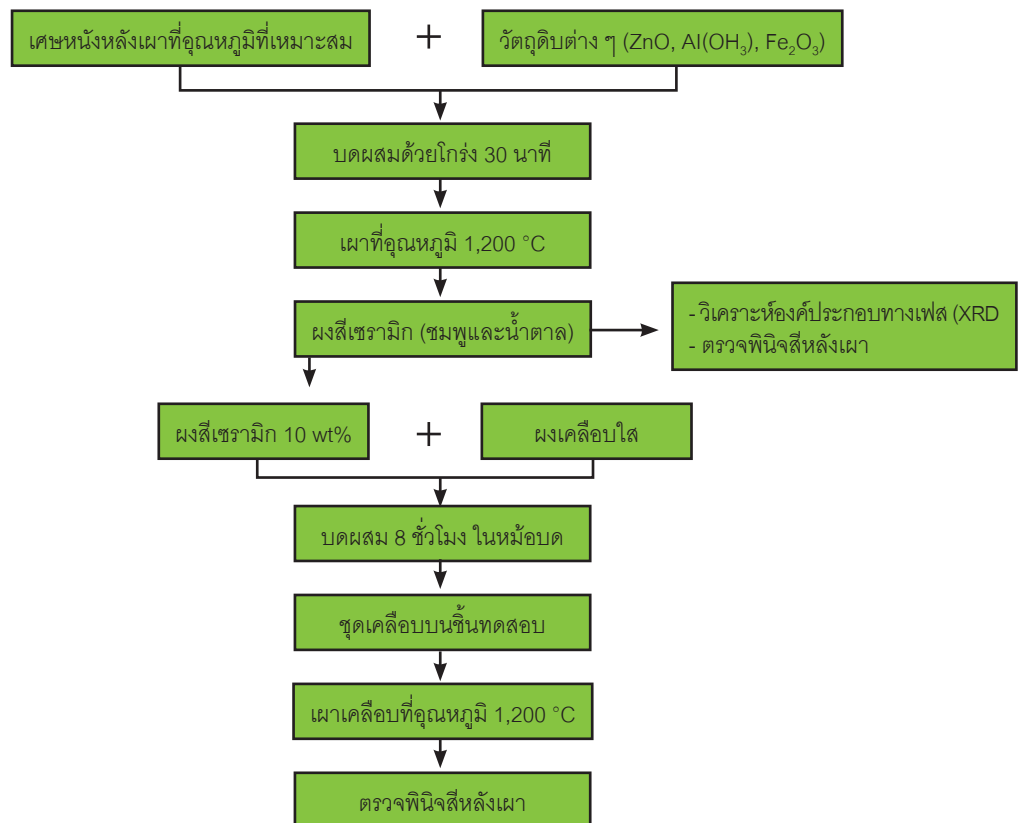


รูปที่ 1 ขั้นตอนการทดลองเตรียมเศษหนังหลังเผาและการทดลองใช้งานร่วมกับเคลือบใส

2.2.4 ศึกษาการเตรียมผงสีเซรามิกสีชมพูและสีน้ำตาล ด้วยการคัดเลือกเศษหนังหลังเผาที่อุณหภูมิเหมาะสมที่สุดมาผสมกับวัตถุดิบชนิดอื่น ๆ โดยผสมกับซิงค์ออกไซด์ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ และกรอบอริก เพื่อสังเคราะห์ผงสีชมพู และนำเศษหนังหลังเผาผสมกับซิงค์ออกไซด์ และเพอร์ริกออกไซด์ เพื่อสังเคราะห์ผงสีน้ำตาล โดยการบดผสมแบบแห้งในเครื่องบดโกร่งเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำผงที่บดได้บรรจุในภาชนะอะลูมินาและเผาที่อุณหภูมิ 1,200 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ในบรรยากาศปกติ ในการทดลองนี้ใช้สูตรส่วนผสมผงสีเซรามิกทั้ง 2 สี ตามเอกสารทางวิชาการของวรรณ [5] ซึ่งมีสูตรโครงสร้างและส่วนผสมตามตารางที่ 1 และมีขั้นตอนการทดลองเตรียมผงสีเซรามิกดังรูปที่ 2

ตารางที่ 1 สูตรและโครงสร้างผงสีเซรามิกสีชมพูและสีน้ำตาล [5]

ชื่อ	โครงสร้าง	สูตร-ส่วนผสม	สีหลังเผา
A3	Zinc Chrome alumina pink spinel $\text{Zn}(\text{Al}, \text{Cr})_2\text{O}_4$	$\text{ZnO} (0.8 \text{ Al}, 0.2 \text{ Cr})_2\text{O}_3$ ส่วนผสม 1. ซิงค์ออกไซด์ 31.3 wt% 2. อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ 47.9 wt% 3. กรดบอริก 9.1 wt% 4. เศษหนังหลังเผาที่อุณหภูมิ 1,100 °C 11.7 wt%	สีชมพู
B2	Zinc Iron Chromite brown spinel $(\text{Zn}, \text{Fe})(\text{Fe}, \text{Cr}_2)\text{O}_4$	$\text{ZnO} (0.4 \text{ Fe}, 0.6 \text{ Cr})_2\text{O}_3$ ส่วนผสม 1. ซิงค์ออกไซด์ 34.3 wt% 2. เหล็กออกไซด์ 27.1 wt% 3. เศษหนังหลังเผาที่อุณหภูมิ 1,100 °C 38.6 wt%	สีน้ำตาล



รูปที่ 2 ขั้นตอนการทดลองเตรียมผงสีเซรามิก (สีชมพูและน้ำตาล) และการทดลองใช้งานร่วมกับเคลือบใส

3. ผลและวิจารณ์ (Results and discussion)

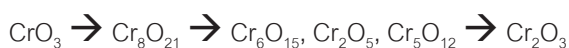
ตารางที่ 2 แสดงผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเศษหนังฟอกเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมฟอกหนัง พบว่าส่วนใหญ่เป็นค่าการสูญเสียน้ำหนักหลังเผา (Loss of ignition หรือ LOI) ซึ่งมีค่ามากถึง 91 % เนื่องจากองค์ประกอบหลักของวัสดุเหลือทิ้งเป็นสารประกอบอินทรีย์ ส่วนองค์ประกอบที่เหลืออยู่คือ โครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3) 4.66 % ส่วนองค์ประกอบอื่นๆ ที่พบ เช่น SiO_2 , SO_3 , ZnO และ Cl เกิดจากการใช้สารเคมีในกระบวนการผลิต [11-12]

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของเศษหนังฟอกเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมฟอกหนัง

องค์ประกอบทางเคมี (wt%)	Cr ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	Al ₂ O ₃	ZnO	Na ₂ O	MgO	P ₂ O ₅	Cl	อื่น ๆ	LOI
	4.66	0.69	1.85	0.31	0.11	0.07	0.11	0.31	0.53	0.89	91.00

แผนภาพ XRD ของเศษหนังฟอกเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมฟอกหนังก่อนเผาและหลังเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 3 โดยเห็นได้ว่าเศษหนังฟอกเหลือทิ้งก่อนเผา (อบ 110 °C) มีโครงสร้างแบบอสัณฐาน (Amorphous) และมีโครงสร้างที่เป็นผลึกบางส่วน ประกอบด้วย 2 เฟส คือ โซเดียมโครเมียมออกไซด์ (Sodium chromium oxide: Na₂CrO₄) และ โซเดียมโครเมียมซัลเฟต (Sodium chromium sulfate: NaCr₅SO₄) ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างหนังและสารเคมีที่ใช้ในการฟอกหนัง เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 800 °C พบว่าเกิดเฟสโครเมียม (III) ออกไซด์ (Chromium (III) oxide: Cr₂O₃) เป็นเฟสหลัก และเฟสรองเป็น ซิงค์โครเมียมออกไซด์ (Zinc chromium oxide: ZnCrO₄) และพบเฟสโครเมียมออกไซด์ (Chromium oxide: Cr₅O₁₂) เหลืออยู่เพียงเล็กน้อย รวมถึงพบควอตซ์ (Quartz: SiO₂) บางส่วน เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 900 °C และ 1,000 °C พบว่าเฟสหลักยังคงเป็น Cr₂O₃ และยังคงมีเฟส Cr₅O₁₂ และพบเฟสควอตซ์เพียงเล็กน้อย จากนั้นเมื่อเผาที่สูงขึ้นที่อุณหภูมิ 1,100 °C พบว่า Cr₂O₃ ยังคงเป็นเฟสหลักและมีความเข้มของพีคที่สูงขึ้นอย่างชัดเจน และยังคงพบเฟสรองคือ ควอตซ์ และพบพีคของซิงค์โครเมียมออกไซด์ที่อยู่ในรูปโครงสร้าง ZnCr₂O₄ เล็กน้อย

ในเศษหนังหลังเผาทุกอุณหภูมิตรวจพบเฟสควอตซ์ รวมทั้งสารประกอบของซิงค์ เนื่องจากวัสดุเหลือทิ้งที่นำมาใช้ในการทดลองนี้มาจากขั้นตอนการตกแต่งหนังด้วยกระดาษทรายซึ่งผ่านกระบวนการฟอกและย้อมสีมาแล้ว เมื่อพิจารณาเศษหนังหลังเผาที่ 1,100 °C ไม่พบโครงสร้างผลึกแบบ Cr₅O₁₂ เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสไปเป็น Cr₂O₃ การเปลี่ยนแปลงนี้สามารถเกิดได้เมื่ออยู่ในสภาวะการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงมากขึ้น โดยอุณหภูมิในการเปลี่ยนเฟสจะขึ้นกับองค์ประกอบทางเคมีของสารรวมอื่น ๆ ตามสภาวะแวดล้อม เส้นทางการเปลี่ยนเฟสดังนี้ [13-14]

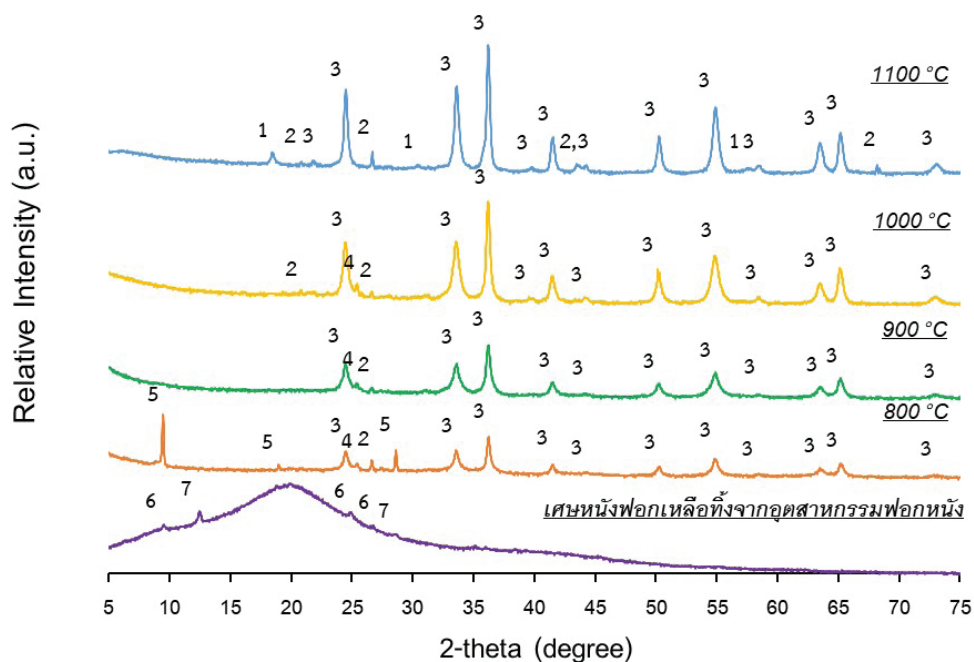


ส่วนเฟสซิงค์โครเมียมออกไซด์ ZnCr₂O₄ เกิดจากการเกิดปฏิกิริยาการละลายของของแข็งระหว่าง ZnO และ Cr₂O₃ ในขณะที่เผาทำให้เกิดไอออน Zn₂₊ ละลายเข้าไปในตำแหน่ง Octahedral แทนที่ไอออน Cr₃₊ บางตำแหน่งแบบสุ่ม เกิดเป็นโครงสร้างแบบสปีเนลของ ZnO/Cr₂O₃ ดังนั้น การเผาที่อุณหภูมิ 1,100 °C จึงเป็นอุณหภูมิการเผาที่ดีที่สุดต่อการเผาเศษหนังฟอกเหลือทิ้งเพื่อผลิตเศษหนังหลังเผาซึ่งมีองค์ประกอบเป็นเฟสโครเมียมออกไซด์ทั้ง Cr₂O₃ และ ZnCr₂O₄ ที่มีความเสถียรและไม่เป็นพิษ รวมทั้งเกิดเฟสร่วมที่ส่งผลดีต่อการสังเคราะห์ผงสีเซรามิกในการทดลองขั้นต่อไป นอกจากนั้น ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสยังสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง XRF ของเศษหนังหลังเผาที่ 1,100 °C ดังตารางที่ 3 อย่างไรก็ตาม จากแผนภาพ XRD อาจไม่แสดงเฟสที่มีองค์ประกอบทางเคมีบางชนิด เนื่องจากอาจอยู่ในรูปของอสัณฐาน (Amorphous) หรืออยู่ในรูปผลึกที่มีปริมาณน้อยมากซึ่งทำให้เครื่อง XRD ไม่สามารถตรวจสอบได้

ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางเคมีของเศษหนังฟอกเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมฟอกหนังหลังเผาที่ 1,100°C

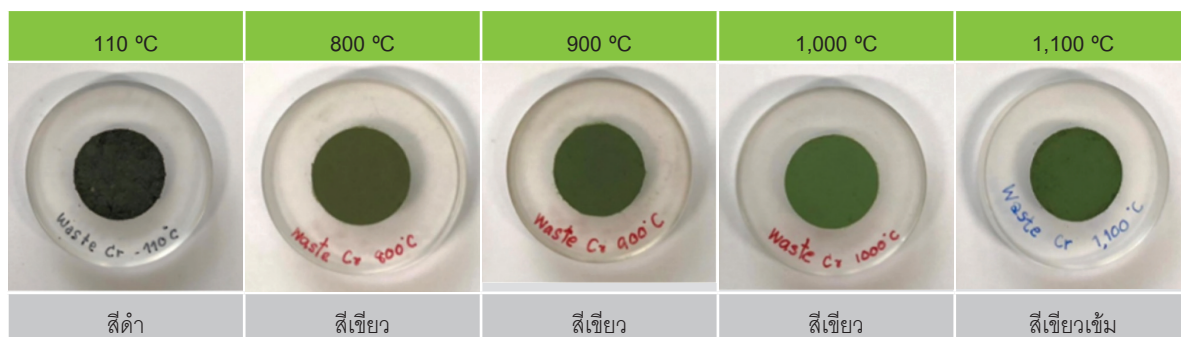
องค์ประกอบทางเคมี (wt%)	Cr ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	Al ₂ O ₃	ZnO	Na ₂ O	MgO	P ₂ O ₅	Cl	อื่น ๆ
	64.96	9.60	0.26	4.28	1.47	0.93	1.55	4.31	7.39	5.25

1= Zinc chromium Oxide (ZnCr_2O_4) 2= Quartz (SiO_2) 3= Chromium oxide (Cr_2O_3)
 4= Chromium oxide (Cr_5O_{12}) 5= Zinc chromium Oxide (ZnCrO_4) 6= Sodium Chromium oxide (Na_4CrO_4)
 7= Sodium chromium sulfate (NaCr_5SO_4)



รูปที่ 3 องค์ประกอบทางเฟสของเศษหนังฟอกเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมฟอกหนังทั้งก่อนเผาและหลังเผาที่อุณหภูมิ 800-1,100 °C

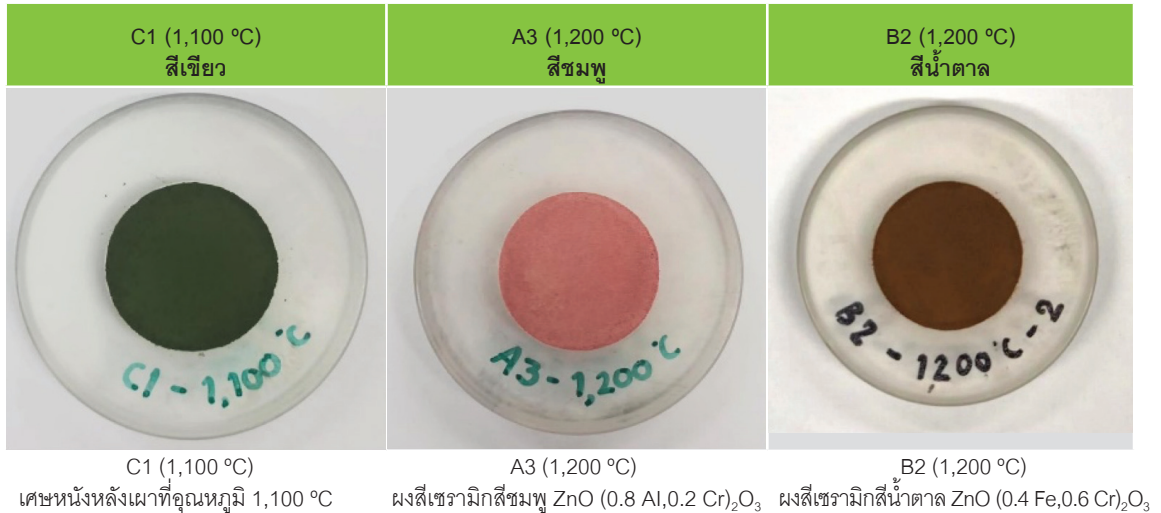
รูปที่ 4 แสดงสีของเศษหนังฟอกเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมฟอกหนังทั้งก่อนเผาและเศษหนังหลังเผาที่อุณหภูมิ 800-1,100 °C พบว่าสีของผงตัวอย่างเกิดการเปลี่ยนแปลงจากสีดำ (หลังอบที่ 110 °C) ไปเป็นสีเขียวหลังเผาในทุกอุณหภูมิ จะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิการเผาสูงขึ้น ความชัดเจนของสีเขียวจะเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 5 ซึ่งสอดคล้องกับผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟส โดยเฟส Cr_2O_3 เป็นเฟสที่ให้สีเขียว ดังนั้น เมื่อพบเฟส Cr_2O_3 มากขึ้น จึงทำให้เศษหนังหลังเผามีสีเขียวที่ชัดเจนยิ่งขึ้น



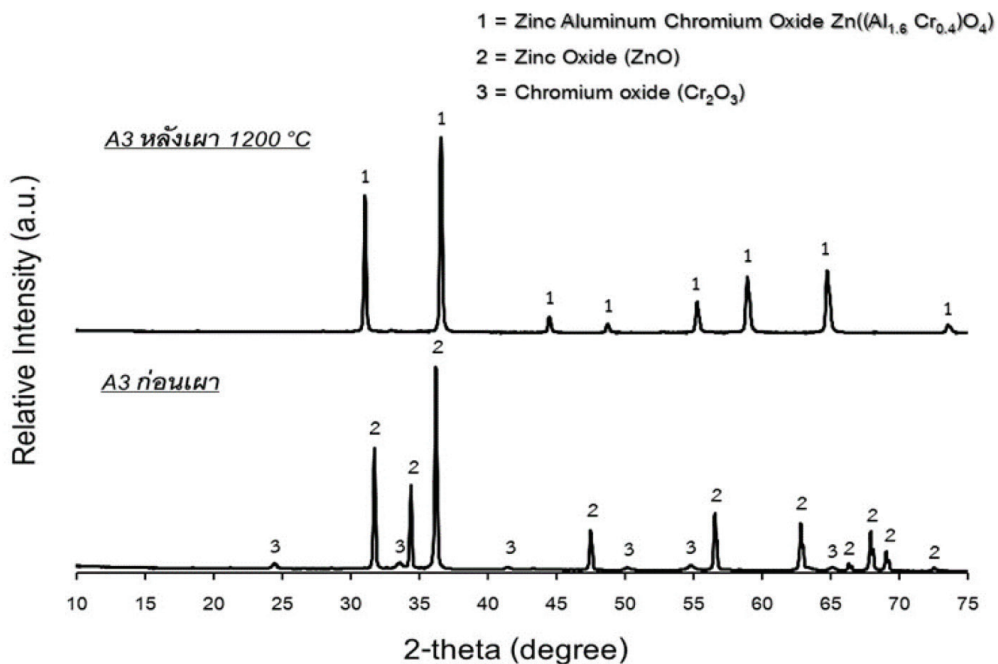
รูปที่ 4 สีหลังเผาของเศษหนังฟอกเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมฟอกหนังที่เผาตั้งแต่อุณหภูมิ 800-1,100 °C

ในส่วนของผลจากการสังเคราะห์ผงสีเซรามิกสีชมพู (A3) และสีน้ำตาล (B2) และใช้เศษหนังหลังเผาที่อุณหภูมิ 1,100 °C (C1) แสดงดังรูปที่ 5 เป็นแหล่งของโครเมียมออกไซด์ นำมาผสมร่วมกับวัตถุดิบอื่น ๆ โดยในสูตร A3 เตรียมได้จากการนำเศษหนังหลังเผาที่อุณหภูมิ 1,100 °C ผสมกับซิงค์ออกไซด์ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ และกรดบอริกตามสูตรเคมี $\text{ZnO} \cdot (0.8 \text{ Al} \cdot 0.2 \text{ Cr})_2\text{O}_3$ เพื่อให้เกิดโครงสร้างสปีเนล $\text{Zn}(\text{Al}, \text{Cr})_2\text{O}_4$ และเผาที่อุณหภูมิ 1,200 °C สามารถให้สีหลังเผาเป็นผงสีชมพู ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟส พบว่าสูตร A3 ก่อนเผา พบเพียง 2 เฟสหลัก คือ ซิงค์ออกไซด์ และโครเมียม

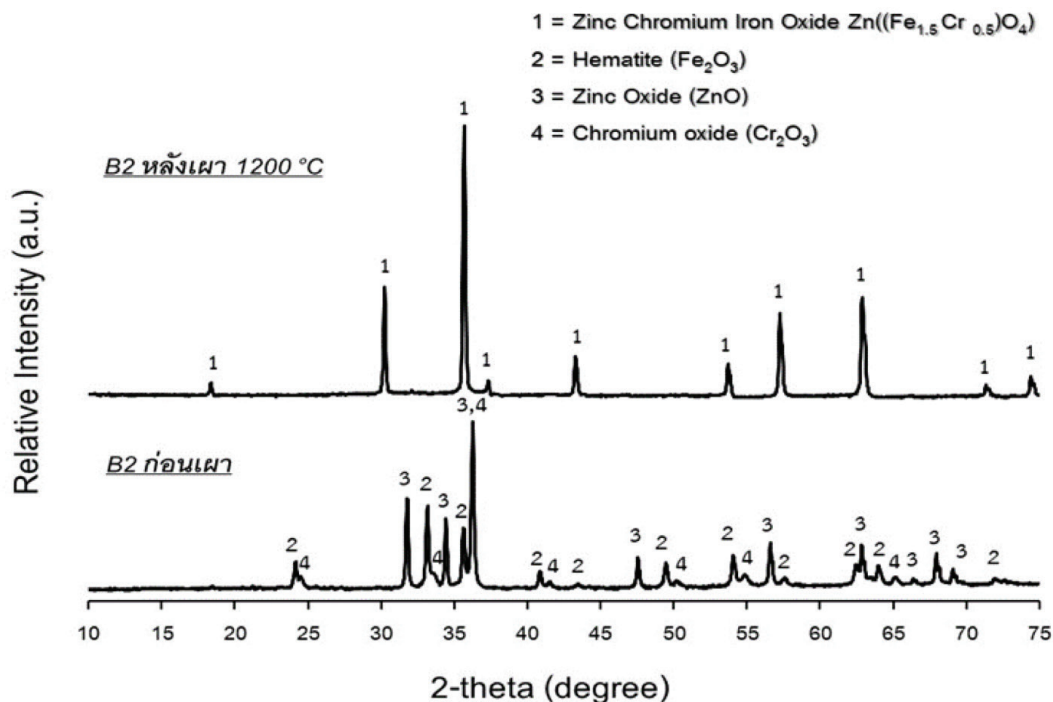
ออกไซด์ ส่วนอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ และกรดบอริก อยู่ในรูปอสัณฐานจึงทำให้ไม่ปรากฏพีคและเฟสหลังเผาที่อุณหภูมิ 1,200 °C พบเฟสหลักเพียงเฟสเดียว คือ ซิงค์อะลูมิเนียมโครเมียมออกไซด์ Zinc Aluminum chromium oxide ($\text{Zn}(\text{Al}_{1.6}\text{Cr}_{0.4})\text{O}_4$) ดังรูปที่ 6 และพบว่าในสูตร B2 เตรียมได้จากการนำเศษหนึ่งหลังเผาที่อุณหภูมิ 1,100 ผลสมกับซิงค์ออกไซด์ และเฟอร์ริกออกไซด์ ตามสูตรเคมี $\text{ZnO} (0.4 \text{ Fe}, 0.6 \text{ Cr})_2\text{O}_3$ เพื่อให้เกิดโครงสร้างสปีเนล $(\text{Zn}, \text{Fe})(\text{Fe}, \text{Cr})_2\text{O}_4$ และเผาที่อุณหภูมิ 1,200 °C ผลการวิเคราะห์หองค์ประกอบทางเฟส พบว่าสูตร B2 ก่อนเผา พบเฟสหลัก 3 เฟส คือ ซิงค์ออกไซด์ เฟอร์ริกออกไซด์ (Hematite) และโครเมียมออกไซด์ และเฟสหลังเผาที่อุณหภูมิ 1,200 °C พบเฟสหลักเพียงเฟสเดียว คือ ซิงค์โครเมียมไอเอิร์นออกไซด์ Zinc chromium iron oxide ($\text{Zn}(\text{Fe}_{1.5}\text{Cr}_{0.5})\text{O}_4$) ซึ่งทำให้เกิดสีหลังเผาเป็นสีน้ำตาล ดังรูปที่ 7 [15-17]



รูปที่ 5 สีหลังเผาของการสังเคราะห์ผงสีเซรามิกสีชมพูและสีน้ำตาลที่อุณหภูมิ 1,200 °C



รูปที่ 6 แผนภาพ XRD ของการสังเคราะห์ผงสีเซรามิกสีชมพูสูตร A3 ก่อนเผาและหลังเผาที่อุณหภูมิ 1,200 °C



รูปที่ 7 แผนภาพ XRD ของการสังเคราะห์ผงสีเซรามิกสีน้ำตาลสูตร B2 ก่อนเผาและหลังเผาที่อุณหภูมิ 1,200 °C

รูปที่ 8 แสดงส่วนผสมของผงสีและเคลือบ และลักษณะขั้นตอนทดสอบหลังเผาเคลือบอุณหภูมิ 1,200 °C สำหรับการทดลองใช้แหล่งของโครเมียมที่ได้จากการใช้เศษหนังหลังเผาที่อุณหภูมิ 1,100 °C ในปริมาณ 10 wt% ผสมในเคลือบใส แล้วนำไปชุบเคลือบบนขั้นตอนทดสอบเนื้อดินสโตนแวร์ จากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 1,200 °C พบว่าให้สีหลังเผาเป็นสีเขียวเข้มผิวเคลือบมีลักษณะมันวาวไม่เกิดรานตัวหลังเผา ส่วนการนำผงสีเซรามิกสีชมพูสูตร A3 ปริมาณ 10 wt% และ ผงสีเซรามิกสีน้ำตาลสูตร B2 ที่สังเคราะห์ได้ในปริมาณ 10 wt% ผสมลงเคลือบใส แล้วนำไปชุบเคลือบบนขั้นตอนทดสอบเนื้อดินสโตนแวร์ จากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 1,200 °C พบว่าสามารถให้สีเคลือบหลังเผาเป็นสีชมพูอ่อนและสีน้ำตาลเข้ม ตามลำดับ โดยผิวเคลือบมีความมันวาวไม่เกิดรานตัวหลังเผา นอกจากนี้ เพื่อเพิ่มความมั่นใจในการใช้งานผลิตภัณฑ์ที่มีส่วนผสมของเศษหนังหลังเผาในปริมาณ 10 wt% (สูตร C1) จึงได้ทำการเตรียมขั้นตอนทดสอบรูปทรงถ้วยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.5 เซนติเมตร จำนวน 3 ใบ ดังรูปที่ 9 ทดสอบสารตะกั่ว แคดเมียม และโครเมียมที่ละลายจากภาชนะเซรามิกที่เข้ากับอาหาร ตามมาตรฐาน มอก.32-2546 [18] ทดสอบโดยใช้วิธีการสกัดผิวภาชนะด้วยสารละลายกรดแอสติก 4 % (v/v) ที่อุณหภูมิ 22 ± 2 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปทดสอบด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

ชนิดเฟลม (Flame atomic absorption spectrometry FAAS : ยี่ห้อ Varian รุ่น AA280FS) ผลการทดสอบพบว่าไม่พบปริมาณสารตะกั่ว แคดเมียม และโครเมียม

สูตร	ส่วนผสม	สี	ขั้นตอนทดสอบหลังเผา 1,200 °C
1	เคลือบใส + เศษหนังหลังเผาที่อุณหภูมิ 1,100 °C (C1) 10 wt%	สีเขียว	
2	เคลือบใส + ผงสีชมพู (A3) 10 wt%	สีชมพู	
3	เคลือบใส + ผงสีน้ำตาล (B2) 10 wt%	สีน้ำตาลเข้ม	

รูปที่ 8 ส่วนผสมเคลือบและลักษณะขั้นตอนทดสอบเคลือบหลังเผาที่อุณหภูมิ 1,200 °C



รูปที่ 9 ชิ้นทดสอบรูปถ้วยเคลือบสูตร C1 ทดสอบสารตะกั่ว แคดเมียม และโครเมียมที่ละลายจากภาชนะเซรามิกที่ใช้กับอาหาร ตามมาตรฐาน มอก.32-2546

4. สรุป (Conclusion)

ผลการทดลองนำเศษหนังฟอกเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมฟอกหนังมาเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ พบว่าการเผาที่ 1,100 °C เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเตรียมเศษหนังหลังเผาที่มีความเสถียร โดยให้สีผงหลังเผาเป็นผงสีเขียวเข้ม ซึ่งประกอบไปด้วยเฟสหลักคือ โครเมียม (III) ออกไซด์ และเมื่อนำมาผสมเคลือบใส และเผาเคลือบที่อุณหภูมิ 1,200 °C พบว่าให้สีเคลือบหลังเผาเป็นสีเขียวเข้มและผิวเคลือบมีความมันวาวไม่เกิด รานตัว และเมื่อนำชิ้นงานหลังเคลือบมาทำการทดสอบหาสารตะกั่ว แคดเมียม และโครเมียมที่ละลายจากภาชนะเซรามิกที่ใช้กับอาหารตามมาตรฐาน มอก.32-2546 ไม่พบปริมาณสารตะกั่ว แคดเมียม และโครเมียม ในส่วนของการนำเศษหนังหลังเผามาใช้เป็นแหล่งของโครเมียมในส่วนผสมในการสังเคราะห์ผงสีเซรามิกสีชมพูที่มีโครงสร้าง $Zn(Al_{1.6}Cr_{0.4}O_4)$ และสีน้ำตาลที่มีโครงสร้าง $Zn(Fe_{1.5}Cr_{0.5}O_4)$ หลังเผาที่อุณหภูมิ 1,200 °C พบว่าสามารถให้สีหลังเผาตามต้องการคือ สีชมพูและสีน้ำตาล ตามลำดับ และเมื่อนำผงสีเซรามิกดังกล่าวมาผสมกับเคลือบใส ทดลองเผาเคลือบที่อุณหภูมิ 1,200°C พบว่าสามารถให้สีเคลือบหลังเผาเป็นสีชมพูและสีน้ำตาลตามต้องการ โดยผิวเคลือบมีความมันวาวไม่เกิดรานตัวหลังเผา ดังนั้น เศษหนังหลังเผาที่อุณหภูมิ 1,100 °C จึงมีแนวโน้มที่จะสามารถนำมาใช้เป็นแหล่งของโครเมียมออกไซด์เพื่อเป็นผงสีเขียวใส่ผสมเคลือบเซรามิก และเพื่อสังเคราะห์ผงสีเซรามิกสีชมพูและสีน้ำตาลได้

5. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

ขอขอบคุณผู้บังคับบัญชาและเจ้าหน้าที่ กองวัสดุและวิศวกรรมทุกท่านช่วยสนับสนุนการทำงานวิจัย และสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) สำหรับเงินสนับสนุนส่วนหนึ่ง รวมทั้ง บริษัท อุตสาหกรรมฟอกหนัง สงวนกิจ จำกัด สำหรับการให้ความอนุเคราะห์เศษหนังฟอกเหลือทิ้งและข้อมูลห้องปฏิบัติการกลุ่มวิจัยและพัฒนาเซรามิกและแก้ว กรมวิทยาศาสตร์บริการ สำหรับการทดสอบสารตะกั่ว แคดเมียม และโครเมียมที่ละลายจากภาชนะเซรามิกที่ใช้กับอาหารตามมาตรฐาน มอก.32-2546

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] NOGUEIRA, FRANCISCO G.E., ISABELA A. CASTRO, ANA R.R. BASTOS, GUILHERME A.SOUZA, JANICE G.DE.CARVALHO, and LUIZ C.A. OLIVEIRA. Recycling of solid waste rich in organic nitrogen from leather industry:Mineral nutrition of rice plants. *Journal of Hazardous Materials*. 2011, **186**, 1064–1069.
- [2] BETHELHEM HAILE TESEMA. *Tannery solid waste generation rate and preparation of leather board from chrome shaving waste and plant fibers "A wealth from waste approach for leather industry"*.Degree of master of science, Environmental science Addis Ababa University. 2018.
- [3] SATHISH, M., B. MADHAN, and J.R. RAO. Leather solid waste: An eco-benign raw material for leather chemical preparation-A circular economy example. *Waste Management*. 2019, **87**, 357–367.
- [4] ศชินท์ สายอินทวงศ์. สีเซรามิก (Color stain) [ออนไลน์]. 2551 เข้าถึงจาก: http://www.thaiceramicsociety.com/rm_paint_ceramiccolor.php. [อ้างถึงวันที่ 20 กุมภาพันธ์ 2565].
- [5] วรณา ต.แสงจันทร์. การวิจัยและพัฒนาสีเซรามิกชนิดสปีเนลสีน้ำตาล และสีชมพู. *เอกสารเผยแพร่ผลงานวิชาการ*. กรุงเทพฯ: กรมวิทยาศาสตร์บริการ, 2542.
- [6] OZEL, E. and S. TURAN. Production and characterization of iron-chromium pigments and their interactions with transparent glazes. *Journal of the European Ceramic Society*. 2003, **23**, 2097–2104.
- [7] สุจินดา ไซติพานิช และ วรณา ต.แสงจันทร์. สีผงเซอร์คอน. *วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ*. 2535, **40**(130) กันยายน, 5-11.
- [8] VERGER, L., O. DARGAUD, N. MENGUY, D. TROADEC, and L. CORMIER. Interaction between Cr-bearing pigments, and transparent glaze: A transmission electron microscopy study. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2017, **459**, 184-191.
- [9] CHEN, Z., Y. DU, Z. LI, D. SUN, and C. ZHU. Synthesis of black pigments containing chromium from leather sludge. *Ceramics International*, 2015, **41**, 9455–9460.

- [10] LAZAU, R.I., C. PACURARIU, D. BECHERESCU, and R. IANOS. Ceramic pigments with chromium content from leather wastes. *Journal of the European Ceramic Society*. 2007, **27**, 1899–1903.
- [11] TAHIRI, S., A. ALBIZANE, A. MESSAOUDI, M. AZZI, J. BENNAZHA. S.A. YOUNSSI, and M. BOUHRIA. Thermal behaviour of chrome shavings and of sludges recovered after digestion of tanned solid wastes with calcium hydroxid. *Waste Management*. 2007, **27**, 89–95.
- [12] YANGA, Y., H. MAA, X. CHENA, C. ZHUA, and X. LI. Effect of incineration temperature on chromium speciation in real chromium-rich tannery sludge under air atmosphere. *Environmental Research*. 2020, **183**, 109159.
- [13] NORBY, P., A. NORLUND, H. FJELLVAG, and M. NIELSEN. The crystal structure of Cr₈O₂₁ determined from powder diffraction data: Thermal transformation and magnetic properties of a chromium-chromate-tetrachromate. *Journal of Solid State Chemistry*. 1991, **94**(2), 281-293.
- [14] MAO, L., B. GAO, N. DENG, L. LIU, and H. CUI. Oxidation behavior of Cr(III) during thermal treatment of chromium hydroxide in the presence of alkali and alkaline earth metal chlorides. *Chemosphere*. 2016, **145**, 1-9.
- [15] LAZAU, R.I., C. PACURARIU, R. BECHERESCU, and R. IANOS. Ceramic pigments with chromium content from leather wastes. *Journal of the European Ceramic Society*. 2007, **27**, 1899–1903.
- [16] GRYGAR, T., P. BEZDICKA, J. DEDECEK, E. PETROVSKY, and O. SCHNEEWEISS. Fe₂O₃-Cr₂O₃ system revised. *Ceramics-Silikáty*. 2003, **47** (1), 32-39.
- [17] TUYEN, T.N., N.D. QUYEN, and T.B. LAM. Synthesis of Fe_xZn_{1-x}Cr₂O₄ brown ceramic pigment by starch assisted sol-gel process. *Hue University Journal of Science: Natural Science*, 2019, **128**, 13–19.
- [18] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ.). มอก. 32-2546. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม วิธีทดสอบตะกั่วและแคดเมียมที่ละลายจากภาชนะเซรามิก ภาชนะเซรามิกแก้ว และภาชนะแก้วที่ใช้กับอาหาร. กรุงเทพฯ : สมอ. 2546.

การทดสอบหาปริมาณสารอะคริลาไมด์ในตัวอย่างผลิตภัณฑ์อาหาร ทอดด้วยเทคนิคเมทริกซ์ โซลิด ดิสเพอชั่นและอัลตราไฮเพอร์ฟอร์ แมนซ์ลิควิด โครมาโทกราฟี-แทนเดมแมสสเปกโตรเมตรี

Determination of acrylamide in fried food product by matrix solid dispersion with ultra-high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry

2

จุฑาทิพย์ ลาภวิบูลย์สุข¹, สมภพ ลาภวิบูลย์สุข¹
Jutathip Lapviboonsuk¹, Sompop Lapviboonsuk¹

รับบทความ: 15 กุมภาพันธ์ 2565 แก้ไขบทความ: 30 พฤษภาคม 2565 ยอมรับตีพิมพ์: 13 มิถุนายน 2565

บทคัดย่อ

การตรวจวัดปริมาณสารอะคริลาไมด์ในผลิตภัณฑ์อาหารทอด ดำเนินการโดยศึกษาความเหมาะสมของเทคนิคลิควิด โครมาโทกราฟี-แทนเดมแมสสเปกโตรเมตรีและเทคนิค การเตรียมตัวอย่างเมทริกซ์ โซลิด ดิสเพอชั่น (Matrix solid dispersion) หรือเทคนิค QuEChERS ซึ่งได้ดำเนินการ ตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีมีความถูกต้องอยู่ในเกณฑ์ที่ ยอมรับตาม EU Commission regulation 2017/2158 ได้ ค่าร้อยละการคืนกลับเฉลี่ยร้อยละ 100.7 95.3 และ 103.8 ที่ระดับความเข้มข้น 20 500 และ 1,000 ไมโครกรัมต่อ กิโลกรัม ตามลำดับ ความเที่ยงอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับ และ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์มีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 3.82-8.00 นอกจากนี้ขีดจำกัดของการตรวจวัดและ ขีดจำกัดของการหาปริมาณ เท่ากับ 5 และ 20 ไมโครกรัม ต่อกิโลกรัม ตามลำดับ จากผลการวิจัยแสดงว่าวิธีนี้มีความน่าเชื่อถือ และเหมาะสมสำหรับการใช้หาปริมาณ สารอะคริลาไมด์ในผลิตภัณฑ์อาหารทอด

Abstract

The determination of acrylamide in fried food products was studied the suitability of liquid chromatography-tandem mass spectrometry and also performed sample preparation technique: matrix solid dispersion or QuEChERS. The method validation was performed and fell in acceptable range as following the EU Commission regulation 2017/2158. The averages of recoveries were 100.7, 95.3 and 103.8 % at the concentration level of 20, 500 and 1,000 $\mu\text{g kg}^{-1}$, respectively. The precision was also in the acceptable range. The relative standard deviations (RSDs) were in the range of 3.82%-8.00%. Moreover, the detection limit and quantitation limit were 5 and 20 $\mu\text{g kg}^{-1}$, respectively. These results demonstrated that the method was reliable and suitable for the measurement of acrylamide content in fried food products.

คำสำคัญ: อะคริลาไมด์ อาหารทอด ลิควิดโครมาโทกราฟี-แทนเดมแมสสเปกโตรเมตรี

Keywords: Acrylamide, Fried food product, Liquid chromatography-tandem mass spectrometry

¹ กรมวิทยาศาสตร์บริการ

^{*} Corresponding author e-mail address: jutathip@dss.go.th

1. บทนำ (Introduction)

สารอะคริลาไมด์ (Acrylamide) เป็นสารที่เกิดขึ้นในอาหารที่มีคาร์โบไฮเดรตสูง (Carbohydrate-rich food) เช่น เมล็ดธัญชาติ (Cereal grain) และ มันฝรั่ง เป็นต้น โดยสามารถเกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการแปรรูปอาหารที่มีความชื้นต่ำและอุณหภูมิสูง คือ อุณหภูมิสูงกว่า 120°C โดยผ่านกระบวนการผลิตที่มีความชื้นต่ำ ดังนี้ การทอด (Frying) การอบ (Baking) การคั่ว (Roasting) การปิ้ง (Toasting) การย่าง (Grilling) [1] และเนื่องด้วยสารอะคริลาไมด์ จัดอยู่ในกลุ่มสารก่อมะเร็งในสัตว์ทดลองที่มีความเสี่ยงจะทำให้เกิดมะเร็งในมนุษย์ ดังนั้น จึงมีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาหาวิธีตรวจวัดสารอะคริลาไมด์ที่เหมาะสม เพื่อการควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้มีความปลอดภัยต่อผู้บริโภค นอกจากนี้ สารอะคริลาไมด์ จัดเป็นกลุ่มที่มีความเป็นไปได้สูงในการก่อมะเร็งในคน (กลุ่ม 2A) โดยหน่วยงานวิจัยมะเร็งระหว่างประเทศ (International Agency for Research on Cancer; IARC) และในปี 2554 หน่วยงาน FAO/WHO ได้ประเมินค่า NOAEL (No observe adverse effect level) ของสารนี้ในการเกิดพิษต่อระบบประสาทเท่ากับ 0.2 ไมโครกรัมต่อน้ำหนักตัว 1 กิโลกรัมต่อวัน [2-3] เมื่อสารอะคริลาไมด์เข้าสู่ร่างกาย จะถูกเอนไซม์ในร่างกายนเปลี่ยนเป็นไกลซิโดไมด์ ซึ่งสามารถก่อความเป็นพิษต่อร่างกายได้โดยการไปจับกับดีเอ็นเอ หรือ โปรตีนในร่างกาย [4-5] อย่างไรก็ตาม ร่างกายมีกลไกในการขจัดพิษจากสารอะคริลาไมด์และสารไกลซิโดไมด์โดยใช้ สารกลูตาไธโอน ซึ่งเป็นเปปไทด์ที่อยู่ในตับไปจับกับสารทั้งสองตัว แล้วขับออกทางปัสสาวะ ในแต่ละวันร่างกายสามารถขับสารอะคริลาไมด์และไกลซิโดไมด์ที่ระดับปริมาณต่ำกว่า 50 ไมโครกรัมออกทางปัสสาวะได้อย่างรวดเร็ว [6] แต่เมื่อร่างกายได้รับสารอะคริลาไมด์ในปริมาณสูงเข้าไปอย่างเฉียบพลัน ร่างกายจะสะสมสารอะคริลาไมด์และส่งผลต่อการเคลื่อนไหวของเซลล์เม็ดเลือดแดงและฮีโมโกลบินในคน [7-8] และเกิดความผิดปกติโดยตรงต่อระบบประสาทส่วนหลังส่วนกลางและระบบประสาทรอบนอก [9-12]

วิทยาการสมัยใหม่ในปัจจุบันทำให้มีความรู้ความเข้าใจมากขึ้นเกี่ยวกับสารปนเปื้อนที่มาจากอาหาร ข้อมูลทางวิทยาศาสตร์สามารถระบุชนิดของสารที่ทำให้ก่อมะเร็งได้ เช่น สารอะคริลาไมด์ ซึ่งมีการตรวจพบสารอะคริลาไมด์ในอาหารหลายชนิด และมีกลุ่มนักวิจัยศึกษาปริมาณการปนเปื้อนสารอะคริลาไมด์ทั้งในต่างประเทศและประเทศไทย โดยสังเขป ดังนี้

- ประเทศสมาชิกในกลุ่มสหภาพยุโรปมีการตรวจพบสารอะคริลาไมด์ในปริมาณที่สูงในช่วงปี พ.ศ. 2552-2560 โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 655-5,900 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม ในอาหารประเภทบิสกิตและมันฝรั่งทอด [13]

- พ.ศ. 2561 ผู้พิพากษาศาลนครลอสแอนเจลิส ในรัฐแคลิฟอร์เนีย ของประเทศสหรัฐอเมริกา ได้มีคำสั่งให้ร้านกาแฟแบรนด์ดัง และผู้ผลิตกาแฟยี่ห้ออื่น ๆ ต้องติดฉลากคำเตือนเกี่ยวกับสารก่อมะเร็งที่ผลิตภัณฑ์ (สารก่อมะเร็งในที่นี้หมายถึงสารอะคริลาไมด์) [14]
- พ.ศ. 2551 ได้มีการตรวจพบปริมาณสารอะคริลาไมด์ในอาหารไทย ในตัวอย่างแกงเขียวหวาน แกงกระหรี่ แกงแดง แกงมัสมั่น และซูชิปลา ที่มีการจำหน่ายในรูปอาหารกระป๋อง อาหารแช่แข็ง และอาหารถุงปรุงสำเร็จ ซึ่งปริมาณที่ตรวจพบมีค่าตั้งแต่ น้อยกว่า 60 นาโนกรัมต่อกรัมของน้ำหนักแห้งของอาหาร จนถึง 606 นาโนกรัมต่อกรัมของน้ำหนักแห้งของอาหาร [15]
- พ.ศ. 2555 สถาบันอาหาร กระทรวงอุตสาหกรรม ได้สุ่มตัวอย่างสำรวจในคุกกี จำนวน 5 แห่ง ผลแสดงว่า ไม่พบอะคริลาไมด์ในทุกตัวอย่าง ในหน่วย ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งในปี พ.ศ. 2558 ประเทศไทยโดยสถาบันอาหาร ได้ดำเนินการสุ่มตัวอย่างคุกกีสำรวจอีกครั้ง จำนวน 5 ยี่ห้อ พบปริมาณอะคริลาไมด์ ตั้งแต่ ไม่พบ ถึง 156.60 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม และตรวจพบอะคริลาไมด์จากจำนวน 3 ใน 5 ตัวอย่าง [16]
- กลุ่มนักวิจัยได้ทำการสำรวจปริมาณสารอะคริลาไมด์ในตลาดหนองมน จังหวัดชลบุรีในปี พ.ศ. 2555 พบว่าในกลุ่มของอาหารทอด เช่น มันฉาบ ผัดกวน ขนมหั้หงส์ ก๋วยเตี๋ยวทอด ปอเปี๊ยะทอดมีปริมาณอยู่ในช่วง 150-500 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม และพบสารอะคริลาไมด์ ที่ระดับน้อยกว่า 150 ไมโครกรัม/กิโลกรัมในข้าวหลาม ปาท่องโก๋ ขนุนทอด ก๋วยเตี๋ยว ผัดผัสดอง ขนมหั้หงส์ และเครปซิคโคแลต แต่อาหารที่มีส่วนประกอบเป็นโปรตีนสูง เช่น ปลาเส้นอบแห้ง ข้าวเกรียบกุ้ง ฮ่อยจ๊อและทอดมันปลาทราย มีการตรวจพบในปริมาณที่น้อยกว่า 15 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม [17]

จากข้อมูลการตรวจพบอะคริลาไมด์ในประเทศต่าง ๆ แสดงให้เห็นว่า อะคริลาไมด์ เป็นภัยเงียบที่สามารถแฝงมากับอาหารชนิดต่าง ๆ ซึ่งประเทศไทยยังมีข้อจำกัดเรื่องข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการปนเปื้อนของสารอะคริลาไมด์ในอาหาร [15-18] การได้มาซึ่งข้อมูลการตรวจสอบต่าง ๆ จำเป็นต้องมีวิธีการตรวจหาปริมาณสารอะคริลาไมด์ที่มีความถูกต้องและน่าเชื่อถือในผลการทดสอบดังกล่าว โดยเทคนิคการตรวจวัดที่ได้รับความนิยมแพร่หลายคือ เทคนิคลิควิดโครมาโทกราฟี-เทนเดมแมสสเปกโตรเมตรี (Liquid chromatography tandem mass spectrometry; LC-MS/MS) [19-23] ซึ่งมี

ประสิทธิภาพสูงในการตรวจวัดหาปริมาณในระดับต่ำได้ถึง พีพีที (ppt) และสามารถยืนยันชนิดของสารได้ด้วย การแยกตัวของสารภายในเครื่องแมสสเปกโตรมิเตอร์ นอกจากนี้ เทคนิคไฮเพอร์ฟอร์แมนซ์ลิควิด โครมาโทกราฟี (High performance liquid chromatography; HPLC) [24-26] แก๊สโครมาโทกราฟี (Gas chromatography; GC) [27-29] และแก๊สโครมาโทกราฟี แมสสเปกโตรเมตรี (Gas chromatography-mass spectrometry; GC-MS) [30-31] สามารถใช้หาปริมาณสารอะคริลาไมด์ได้อย่างถูกต้องได้เช่นกัน โดยเทคนิค GC จำเป็นต้องมีการทำให้เกิดสารอนุพันธ์ (Derivatization) เพื่อให้สารที่ทำการทดสอบมีสมบัติเหมาะสมต่อการตรวจวัดในสถานะแก๊ส ซึ่งการทำปฏิกิริยากับ โพแทสเซียมโบรไมด์และโพแทสเซียมโบรมิเดสามารถที่จะผลิต 2,3-dibromopropanamide ภายใต้สภาวะที่เป็นกรด จะช่วยเพิ่มความไวในการตรวจวัดด้วยเครื่อง GC [31] รวมทั้งการสกัดตัวอย่างก็มีบทบาทสำคัญต่อความถูกต้องของผลการทดสอบในการลดการรบกวนของเมทริกซ์ตัวอย่าง เช่น เทคนิคการทำความสะอาดตัวอย่างด้วย Solid phase extraction (SPE) [26] โดยตาม EU Commission regulation 2017/2158 กำหนดให้วิธีตรวจวัดสารอะคริลาไมด์มีค่าร้อยละการคืนกลับที่ยอมรับเท่ากับ 75-110 และกำหนดให้ค่าการทำซ้ำที่ยอมรับ (Repeatability; RSD,) คือ 0.66 เท่าของ ค่าความสามารถในการทำซ้ำ (Reproducibility; RSDR) จากการคำนวณด้วยสมการ Horwitz ค่าขีดจำกัดของการตรวจวัด (Limit of detection; LOD) เท่ากับ 3 ใน 10 ของ ค่าขีดจำกัดของการหาปริมาณ (Limit of quantitation; LOQ) ซึ่งมีความมากกว่าหรือเท่ากับ 20 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม งานวิจัยนี้จึงพัฒนาวิธีที่เหมาะสมของการตรวจวัดปริมาณ สารอะคริลาไมด์ในผลิตภัณฑ์อาหารทอด เพื่อความถูกต้อง แม่นยำของผลการทดสอบ รวมทั้งพิสูจน์ความใช้ได้ของวิธีการทดสอบว่ามีความเหมาะสมตรงตามวัตถุประสงค์การใช้งาน

2. วิธีการวิจัย (Experimental methods)

2.1 สารเคมีและวัสดุวิทยาศาสตร์

สารอะคริลาไมด์ที่มีความบริสุทธิ์ ร้อยละ 99 ผลิตโดย Sigma และสารมาตรฐานภายใน (Internal standard) คือ อะคริลาไมด์ไอโซโทป (2,3,3-D3) ที่มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 98 ผลิตโดย Cambridge Isotope Laboratories, Inc. รวมทั้งอะซิโตรไนไตรล์ (Acetonitrile; ACN) และเมทานอล (Methanol; MeOH) มีชั้นคุณภาพเกรด LC ผลิตโดย Merck ส่วนเฮกเซน (hexane; C_6H_{14}) แมกนีเซียมซัลเฟต (Magnesium sulfate; $MgSO_4$) โซเดียมคลอไรด์ (Sodium chloride; NaCl) ไพรมารี เซกันดารี เอมีน (Primary secondary amine; PSA) ซิงค์ ซัลเฟต เฮปตะไฮเดรต (Zinc sulfate heptahydrate; $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$) และโพแทสเซียม

เฮกซะไซยาโนเฟอเรต (II) ไตรไฮเดรต (Potassium hexacyanoferrate (II) trihydrate; $K_4Fe(CN)_6 \cdot 3H_2O$) มีชั้นคุณภาพสำหรับการวิเคราะห์ (Analytical grade; AR) ผลิตโดย Merck และน้ำบริสุทธิ์ปราศจากไอออน มีความต้านทานไม่น้อยกว่า 18.2 เมกะโอห์ม-เซนติเมตร สำหรับใช้เตรียมสารละลายและเฟสเคลื่อนที่ คอลัมน์สำหรับเครื่อง LC-MS/MS เป็นของยี่ห้อ Agilent รุ่น ZORBAX SB-C18 ขนาด 3.0×250 มิลลิเมตร 5 ไมครอน พร้อมการ์ดยี่ห้อ Agilent รุ่น ZORBAX SB-C18 ขนาด 4.6×12.5 มิลลิเมตร 5 ไมครอน และตัวกรองชนิด PTFE ขนาด 13 มิลลิเมตร 0.2 ไมครอน

2.2 การเตรียมสารละลาย

2.2.1 Carrez I: ชั่ง $K_4Fe(CN)_6 \cdot 3H_2O$ 15 กรัม ละลายด้วยน้ำและปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร

2.2.2 Carrez II: ชั่ง $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ 30 กรัมละลายด้วยน้ำและปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร

2.3 การเตรียมตัวอย่างโดยอ้างอิงตามวิธี Analysis of acrylamide in french fries using agilent sampliQ QuEChERS AOAC kit and LC/MS/MS, food Application: agilent technologies. [32]

ชั่งตัวอย่าง 1 กรัม นำมาเติมสารมาตรฐานภายใน ที่ระดับความเข้มข้น 10 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ปริมาตร 80 ไมโครลิตร แล้วเติมเฮกเซน 5 มิลลิลิตรของและเขย่าด้วย เครื่องผสมสารละลาย (Vortex mixer) เป็นเวลา 1 นาที หลังจากนั้นเติมน้ำและอะซิโตรไนไตรล์ อย่างละ 10 มิลลิลิตร เติมเกลือในการสกัดแบบ QuEChERS ซึ่งได้แก่ $MgSO_4$ จำนวน 4 กรัม และ NaCl 0.5 กรัม แล้วเขย่าเป็นเวลา 1 นาที และทำการหมุนเหวี่ยงเพื่อตกตะกอนที่ 5,000 รอบต่อ นาที เป็นเวลา 1 นาที แล้วแยกชั้นเฮกเซนและปิเปตจำนวน 4 มิลลิลิตร เพื่อนำไประเหยด้วยเครื่องเป่าลมไนโตรเจนที่มีการควบคุมอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และเติมน้ำจำนวน 2 มิลลิลิตรแล้วเขย่าด้วยเครื่องผสมสารละลาย เป็นเวลา 1 นาที และกรองด้วย PTFE ขนาด 0.2 ไมครอนเพื่อตรวจวัด ปริมาณด้วยเครื่อง LC-MS/MS

2.4 การตรวจวัดด้วยเทคนิคโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี

สภาวะการฉีดเข้าเครื่อง LC-MS/MS ดำเนินการตามวิธี Analysis of acrylamide in french fries using agilent sampliQ QuEChERS AOAC kit and LC/MS/MS, food application: agilent technologies. ซึ่งมีรายละเอียดโดยสังเขป ดังนี้

สภาวะโครมาโทกราฟี	เฟสเคลื่อนที่: 2.5% เมทานอล/ 97.5% ของกรดฟอร์มิก ร้อย ละ 0.1 ชนิด Isocratic elution
	อัตราการไหล: 0.20 มิลลิลิตร ต่อนาที
สภาวะแมสสเปกโตรเมตรี	อะคริลไมด์ 72.1 → 55.0 และ 72.1 → 27.0
	อะคริลไมด์ [² d ₃] (Internal standard) 75.1 → 58.2

2.5 การตรวจสอบความใช้ได้ของวิธี

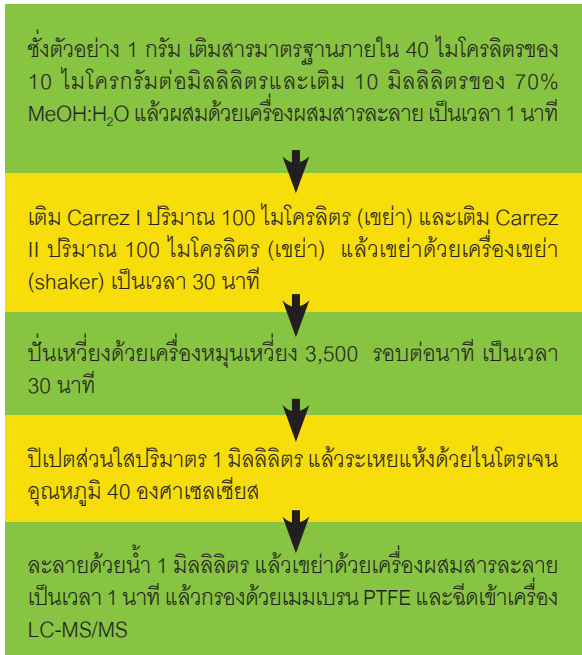
การทดสอบตัวอย่างแบบลงค์และตัวอย่างที่มีการเติมสารละลายมาตรฐานที่ระดับความเข้มข้นต่ำ ๆ หรือใกล้เคียงศูนย์ จำนวน 10 ซ้ำ เพื่อประมาณค่าขีดจำกัดของการตรวจพบและขีดจำกัดของการหาปริมาณ ซึ่งในที่นี้ทำการเติมที่ระดับความเข้มข้น 20 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม และเตรียมตัวอย่างที่เติมสารมาตรฐานอีก 2 ระดับความเข้มข้น คือ 500 และ 1,000 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม เพื่อทดสอบความเข้มข้นที่ระดับกลางและสูงของช่วงการวัด แล้วคำนวณร้อยละการคืนกลับและค่าความเบี่ยงเบนสัมพัทธ์เพื่อพิสูจน์ความถูกต้องและความเที่ยงของวิธีทดสอบ นอกจากนี้ ได้ดำเนินการทดสอบช่วงความเป็นเส้นตรง โดยทดสอบที่ความเข้มข้น 6 ระดับ ดังนี้ 2, 5, 10, 20, 40 และ 80 ไมโครกรัมต่อลิตร จำนวน 3 ซ้ำ

3. ผลและวิจารณ์ (Results and discussion)

3.1 การศึกษาความเหมาะสมของการเตรียมตัวอย่าง

วิธีการสกัดสารอะคริลไมด์ศึกษาโดยเปรียบเทียบ 4 วิธีดังนี้ วิธีที่ 1 ใช้เทคนิคการตกตะกอนโปรตีนโดยการเติม Carrez I: K₄Fe(CN)₆ · 3H₂O 15 กรัมในน้ำ 100 มิลลิลิตร และ Carrez II : ZnSO₄ · 7H₂O 30 กรัมในน้ำ 100 มิลลิลิตร และวิธีที่ 2 และวิธีที่ 3 ใช้การเติม MgSO₄ : NaCl ตามเทคนิค QuEChERS เพื่อลดสิ่งรบกวนในขั้นตอนการตรวจวัด แต่วิธีที่ 3 เพิ่มขั้นตอนการสกัดด้วย PSA และ MgSO₄ และใช้อัตราส่วนของ MgSO₄ : NaCl ที่แตกต่างกันซึ่งมีรายละเอียดขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างดังต่อไปนี้

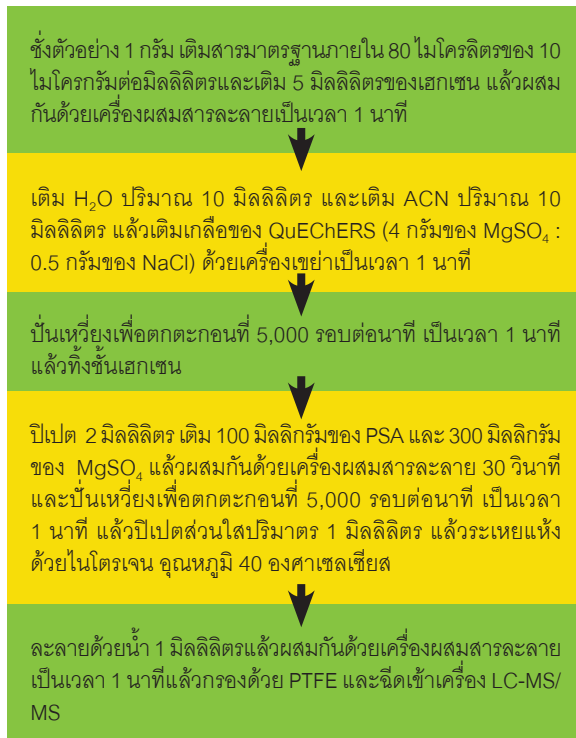
วิธีที่ 1) วิธีมาตรฐาน สำหรับการวิเคราะห์อาหารเล่มที่ 5 กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ รหัสวิธี DMSc F1074: การวิเคราะห์ปริมาณอะคริลไมด์ในอาหาร โดย LC/MS-MS หน้า 41-46 [33]



วิธีที่ 2) Quantification of acrylamide in a variety of food matrices by LC/MS/MS triple quadrupole, application note: agilent technologies. [34]



วิธีที่ 3) Analysis of acrylamide in french fries using agilent sampliQ QuEChERS AOAC kit and LC/MS/MS, food application: agilent technologies. [32]



วิธีที่ 4) In-house method based on analysis of acrylamide in french fries using agilent SampliQ QuEChERS AOAC kit and LC/MS/MS, food Application: agilent technologies. [32] โดยการลดขั้นตอนการสกัดด้วย PSA และ MgSO₄ ออกแล้วทำการระเหยด้วยไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสแล้วนำไปละลายน้ำและกรองด้วย PTFE เพื่อฉีดเข้าเครื่อง LC-MS/MS ต่อไป

ผลการทดลองการสกัดวิธีละ 6 ซ้ำ แยกเป็นการสกัดตัวอย่าง 3 ซ้ำและการสกัดตัวอย่างที่เติมน้ำมาตรฐานที่ระดับความเข้มข้น 500 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมอีก 3 ซ้ำในตัวอย่างกล้วยทอด โดยทดสอบตามวิธีมาตรฐานของกรมวิทยาศาสตร์การแพทย์พบว่า ค่าร้อยละการคืนกลับมีค่าอยู่ระหว่าง 100.8-106.2 % และดำเนินการทดสอบซ้ำที่ระดับความเข้มข้น 50 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมอีก 3 ซ้ำในตัวอย่างเผือกทอด มีค่าร้อยละการคืนกลับอยู่ระหว่าง 94.8-103.8 % สำหรับวิธีที่ 2 Application note: agilent technologies. [34] การเติมน้ำมาตรฐานที่ระดับความเข้มข้น 500 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมในตัวอย่างกล้วยทอด พบว่า มีค่าร้อยละการคืนกลับอยู่ระหว่าง 93.0-100.1% และที่ระดับความเข้มข้น 50 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมในตัวอย่างเผือกทอด มีค่าอยู่ระหว่าง 85.4-109.1% และวิธีที่ 3 Food application:

agilent technologies. [32] ที่ 500 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมในตัวอย่างกล้วยทอด มีค่าระหว่าง 92.2-98.3% และที่ 50 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมในตัวอย่างเผือกทอด มีค่าระหว่าง 86.6-107.2% โดยวิธีที่ 4 ทำการทดสอบตามวิธีที่ 3 แต่ไม่ได้สกัดสิ่งรบกวนด้วย PSA และ MgSO₄ พบว่า ตัวอย่างกล้วยทอดมีค่าระหว่าง 84.9-95.4% ซึ่งยังมีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับคือ 75-110% ดังรายละเอียดสรุปตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบวิธีการสกัดตัวอย่างจำนวน 4 วิธีด้วยเทคนิคการเติมน้ำมาตรฐาน (Spiked sample) ที่ระดับความเข้มข้น 50 และ 500 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม

วิธีที่ 1		วิธีที่ 2		วิธีที่ 3		วิธีที่ 4	
เผือกทอด	กล้วยทอด	เผือกทอด	กล้วยทอด	เผือกทอด	กล้วยทอด	เผือกทอด	กล้วยทอด
ปริมาณสารอะคริลาไมด์ในตัวอย่าง (ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม)							
21.19	37.05	36.89	39.20	34.21	38.90	37.75	
25.00	31.38	31.98	33.25	42.57	45.75	38.20	
27.72	37.96	39.29	35.42	39.57	41.45	35.82	
ค่าเฉลี่ย							
21.41	34.21	33.40	25.42	36.43	37.79	32.30	
ร้อยละของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (RSD, %) n = 3							
3.28	3.57	3.73	3.01	4.24	3.46	1.26	
ปริมาณสารอะคริลาไมด์ในตัวอย่างที่เติมน้ำมาตรฐาน (ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม)							
71.68	530.11	80.19	503.97	84.26	497.97	456.88	
74.29	553.67	86.55	490.08	87.03	516.85	503.47	
76.33	541.89	92.30	528.33	94.19	525.74	505.60	
ร้อยละการคืนกลับ (Recovery, %) n = 3							
94.83	100.79	85.38	94.69	86.59	92.19	84.90	
99.65	106.25	98.71	92.95	92.25	97.12	95.42	
103.76	103.64	109.11	100.09	107.22	98.27	95.21	

การดำเนินการทดสอบตามวิธีที่ 4 In-house method based on food application: agilent technologies [32]. เพื่อยืนยันผลการวิเคราะห์ โดยทำการทดสอบซ้ำจำนวน 2 ครั้งในตัวอย่างเผือกทอดและกล้วยทอด โดยเติมน้ำมาตรฐานที่ระดับความเข้มข้น 500 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมให้ค่าร้อยละการคืนกลับและค่าความเที่ยงอยู่ในช่วงเกณฑ์การยอมรับ แสดงตามตารางที่ 2 ดังนี้

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบซ้ำตามวิธีที่ 4 In-house method based on food application: agilent technologies [32].
การทดสอบซ้ำครั้งที่ 1

ตัวอย่าง	ความเข้มข้นในตัวอย่าง (ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม)			ตัวอย่าง	ความเข้มข้นในตัวอย่างที่เติมสารละลายมาตรฐาน มาตรฐาน (ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม)		
เผือกทอด	34.22	34.96	34.78	เผือกทอด	509.16	492.94	504.85
ค่าเฉลี่ย	34.65			%Recovery	95.59	93.80	99.17
%RSD	1.12						
กล้วยทอด	39.65	41.57	40.11	กล้วยทอด	525.25	537.83	526.42
Average	40.44			%Recovery	101.43	106.04	103.53
%RSD	2.48						

การทดสอบซ้ำครั้งที่ 2

ตัวอย่าง	ความเข้มข้นในตัวอย่าง (ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม)				ตัวอย่าง	ความเข้มข้นในตัวอย่างที่เติมสารละลายมาตรฐาน มาตรฐาน (ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม)			
เผือกทอด	35.28	32.05	32.96	32.68	เผือกทอด	477.45	485.84	481.70	480.84
ค่าเฉลี่ย	33.24				%Recovery	90.41	92.17	90.05	89.63
%RSD	1.41								
กล้วยทอด	45.55	44.10	38.71	45.61	กล้วยทอด	485.33	507.61	502.65	483.97
Average	43.49				%Recovery	89.62	96.18	93.63	92.65
%RSD	3.26								

3.2 การศึกษาความเหมาะสมของเทคนิคลิควิดโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี

ศึกษาวิธีการหาปริมาณสารอะคริลาไมด์ที่เหมาะสมด้วยเทคนิคลิควิดโครมาโทกราฟี เทนเดมแมสสเปกโตรเมตรี (LC-MS/MS) เปรียบเทียบ 3 วิธีเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของเฟสเคลื่อนที่ (Mobile phase) และแมสสเปกโตรเมตรี (MS) ดังนี้
วิธีที่ 1 วิธีมาตรฐาน สำหรับการวิเคราะห์อาหาร เล่มที่ 5 กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ รหัสวิธี DMSc F1074 :
การวิเคราะห์ปริมาณอะคริลาไมด์ในอาหาร โดย LC/MS-MS หน้า 41-46 [33]

เฟสเคลื่อนที่: กรดอะซิติก ร้อยละ 0.1 / เมทานอล (97:3) ชนิด Isocratic elution อัตราการไหล: 0.25 มิลลิลิตรต่อนาที
วิธีที่ 2 Quantification of acrylamide in a variety of food matrices by LC/MS/MS triple quadrupole, application note: agilent technologies [34].

เฟสเคลื่อนที่: กรดอะซิติกในน้ำ ร้อยละ 0.1 / กรดอะซิติกในเมทานอล ร้อยละ 0.1 ชนิด Gradient elution แสดงดัง
ตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แสดงการตั้งค่าของเฟสเคลื่อนที่ในเครื่อง LC-MS/MS

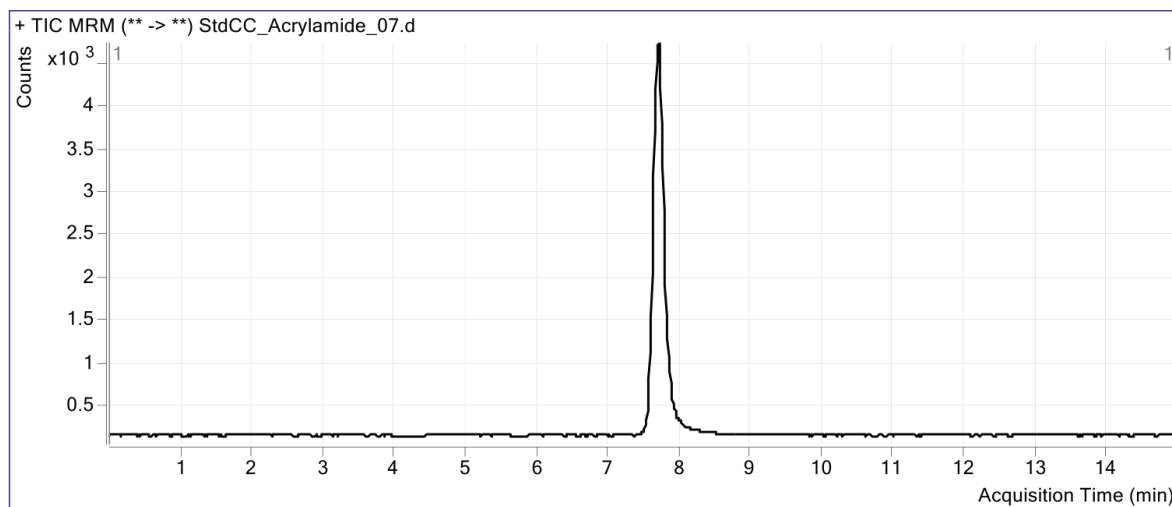
เวลา (นาที)	อัตราการไหล (มล./นาที)	%A: กรดอะซิติกในน้ำ ร้อยละ 0.1	%B: กรดอะซิติกในเมทานอล ร้อยละ 0.1
0	0.25	90	10
5.5	0.25	90	10
6.0	0.25	10	90
8.0	0.25	10	90
8.1	0.25	90	10
13.0	0.25	90	10

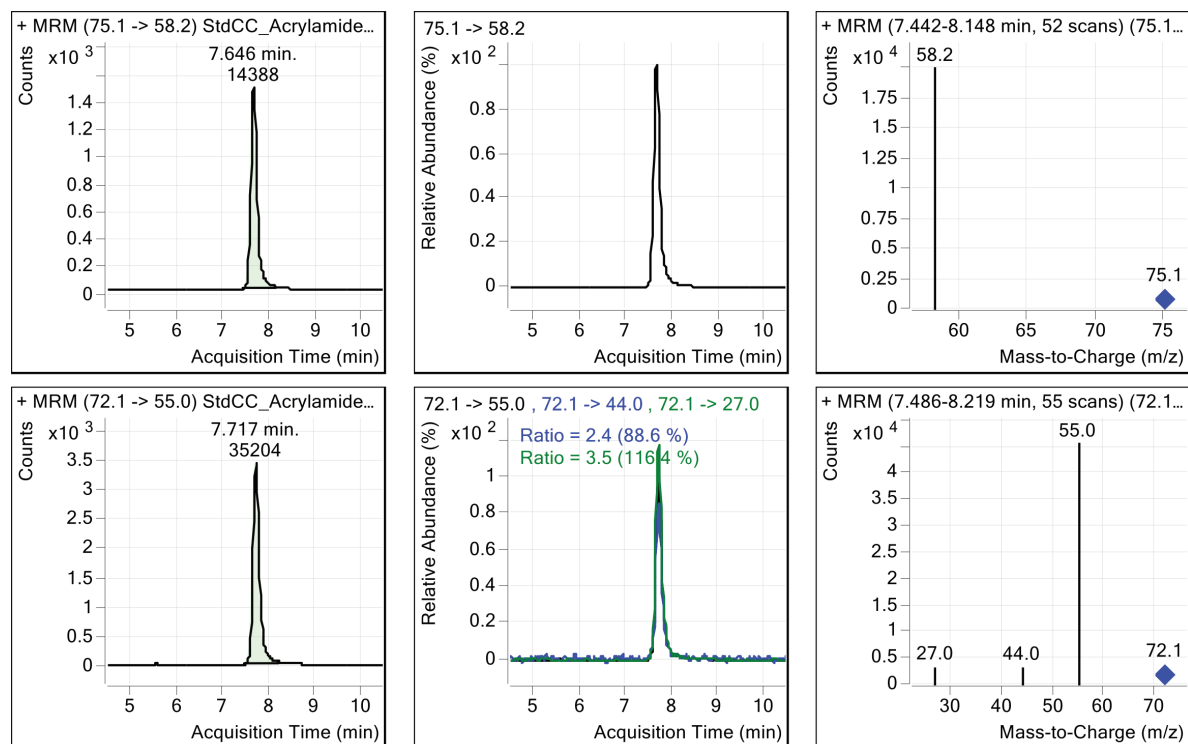
วิธีที่ 3 Analysis of acrylamide in french fries using agilent sampliQ QuEChERS AOAC kit and LC/MS/MS, food application: agilent technologies [32].

เฟสเคลื่อนที่: 2.5% เมทานอล / 97.5% กรดฟอร์มิก ร้อยละ 0.1 ชนิด Isocratic elution

อัตราการไหล: 0.20 มิลลิลิตรต่อนาที

สภาวะการทดสอบที่เหมาะสม คือ วิธีที่ 3 Analysis of acrylamide in french fries using agilent sampliQ QuEChERS AOAC kit and LC/MS/MS, food application: agilent technologies [32]. โดยปรับอัตราการไหลเป็น 0.25 มิลลิลิตรต่อนาที โครมาโทแกรมของสารอะคริลาไมด์และสารมาตรฐานภายใน แสดงดังรูปที่ 1 โดยการเตรียมสารมาตรฐานในอะซิโตรไนไตรล์ มีผลทำให้พบพีคบริเวณใกล้เคียงกับสารมาตรฐานและคาร์เท็นชันไทม์ (Retention time; RT) ของอะคริลาไมด์ในตัวอย่าง (RT: 5.979) และสารมาตรฐาน (RT: 6.345) ซึ่งไม่ตรงกัน ดังนั้น การเตรียมกราฟมาตรฐานและตัวอย่างต้องใช้ตัวทำลายชนิดเดียวกันคือ น้ำ และเติมสารมาตรฐานภายในเพื่อใช้ยืนยันพีคของสารอะคริลาไมด์ในกรณีที่เกิดตัวอย่างเกิดการเลื่อน (Shift) ของ RT





รูปที่ 1 โครมาโทแกรมของสารอะคริลาไมด์ที่ระดับความเข้มข้น 80 ไมโครกรัมต่อลิตร

3.3 การตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีการทดสอบ โดยศึกษาความเหมาะสมตามวิธี In-house method based on food application: agilent technologies [32].

มีปัจจัยที่เกี่ยวข้องต่าง ๆ ดังนี้ ช่วงความเป็นเส้นตรง ความถูกต้อง พิจารณาจากค่าร้อยละการคืนกลับ และความเที่ยง พิจารณาจากค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ รวมทั้งศึกษาขีดจำกัดในการตรวจวัด (LOD) และขีดจำกัดในการหาปริมาณ (LOQ) โดยการศึกษาค่า LOD และ LOQ ดำเนินการโดยเติมสารละลายมาตรฐานที่ความเข้มข้นต่ำ ๆ ดังนี้ 10 40 100 และ 200 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม โดยสรุปผลแสดงดังตารางที่ 4 แล้วดำเนินการทดสอบที่ระดับความเข้มข้น 20 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม จำนวน 10 ซ้ำ โดยแบ่งการทดสอบเป็น 3 ครั้ง ซึ่งครั้งละ 3 ซ้ำ 3 ซ้ำ และ 4 ซ้ำตามลำดับ เช่นเดียวกันกับที่ระดับ 500 และ 1,000 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมแสดงดังตารางที่ 5 ดังนี้

ตารางที่ 4 แสดงการประเมินค่า LOD และ LOQ ที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ ดังนี้ 10 40 100 และ 200 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม

ลำดับที่	ความเข้มข้นในตัวอย่าง (ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม)	ปริมาณในตัวอย่างที่เติมสารมาตรฐาน (ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม)				ร้อยละค่าการคืนกลับ			
		10	40	100	200	10	40	100	200
1	34.70	48.36	80.01	134.44	268.38	85.07	113.08	99.43	115.31
2	36.75	49.52	79.82	134.53	231.54	99.18	111.97	96.52	101.13
3	35.42	49.73	75.53	141.27	251.07	103.04	102.69	103.04	109.61
เฉลี่ย	35.62	49.20	78.45	136.75	250.33	95.76	109.25	99.66	108.68
SD	1.04	0.74	2.53	3.92	18.43	9.46	5.71	3.27	7.14
%RSD	2.92	1.50	3.23	2.86	7.36	9.88	5.22	3.28	6.57

สรุปประสิทธิภาพของการตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีการทดสอบ โดยดำเนินการทดสอบในตัวอย่างกล้วยทอด (Linearity ในช่วงความเข้มข้น 0-80 ไมโครกรัมต่อลิตร และค่า Correlation coefficient, r ต้องมากกว่าหรือเท่ากับ 0.995)

ตารางที่ 5 แสดงประสิทธิภาพของการตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีการทดสอบที่ระดับความเข้มข้น 20 500 และ 1,000 ไมโครกรัมต่อลิตร

No.	ความเข้มข้นในตัวอย่าง (ไมโครกรัมต่อลิตร)	ปริมาณในตัวอย่างที่เติมสารมาตรฐาน (ไมโครกรัมต่อลิตร)			ร้อยละการคืนกลับ		
		20	500	1,000	20	500	1,000
1	37.69	56.54	444.92	1,065.06	104.58	82.62	107.42
2	37.54	56.60	484.26	1,067.61	105.94	91.63	108.80
3	34.42	56.22	505.30	1,069.97	104.37	95.29	108.02
4	39.65	59.89	525.25	1,045.70	101.24	101.43	106.63
5	41.57	54.55	537.83	1,042.99	78.34	106.04	106.16
6	40.11	60.16	526.42	990.04	102.59	103.53	99.60
7	45.55	60.67	485.33	998.61	105.45	89.62	100.78
8	44.10	59.71	507.61	997.29	101.16	96.18	99.10
9	38.71	59.59	502.65	1,004.58	101.69	93.63	102.78
10	45.61	59.28	483.97	984.40	101.97	92.65	99.06
เฉลี่ย	40.50	58.32	500.35	1,026.63	100.73	95.26	103.84
SD	3.70	2.12	27.11	34.83	8.06	6.97	3.97
%RSD	9.14	3.64	5.42	3.39	8.00	7.32	3.82
เกณฑ์	21.0						

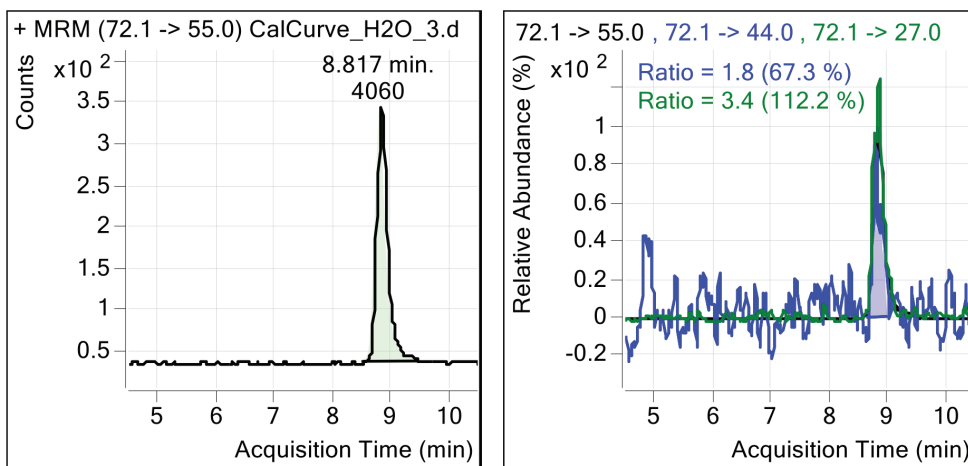
การคำนวณค่า LOD และ LOQ ดำเนินการตาม Eurachem guide: the fitness for purpose of analytical methods-a laboratory guide to method validation and related topics [35] ดังสมการ

$$S'_0 = \frac{S_0}{\sqrt{n}}$$

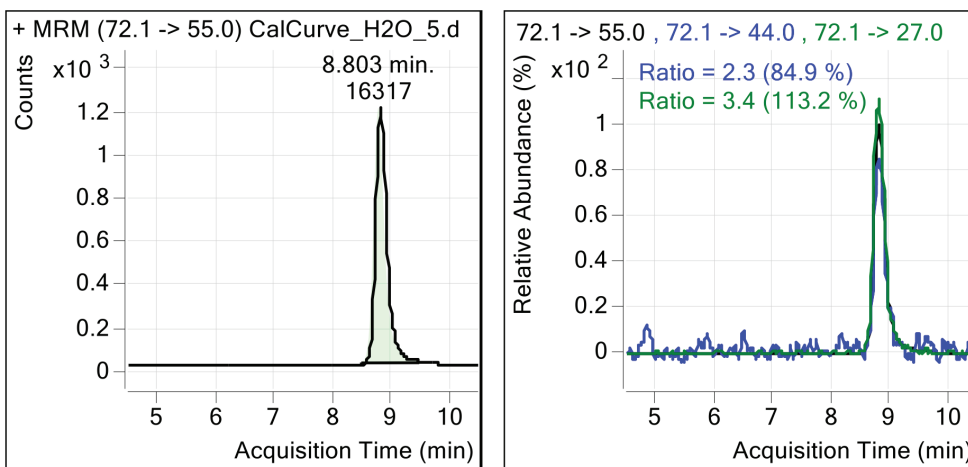
โดย S_0 คือ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ระดับความเข้มข้นใกล้เคียงศูนย์ และ n คือ จำนวนซ้ำที่ใช้ในการทดสอบ สำหรับค่า LOD และ LOQ คำนวณจากสมการ

$$LOD = 3 \times S'_0 \text{ และ } LOQ = 10 \times S'_0$$

ดังนั้น ค่าต่ำสุดที่ตรวจพบ (LOD) คือ 5.00 ไมโครกรัมต่อลิตร และค่าต่ำสุดที่สามารถรายงานค่าได้ (LOQ) คือ 20.0 ไมโครกรัมต่อลิตร แสดงโครมาโทแกรม ดังนี้



รูปที่ 2 โครมาโทแกรมของสารอะคริลาไมด์ที่ระดับ LOD ความเข้มข้น 5.00 ไมโครกรัมต่อลิตร



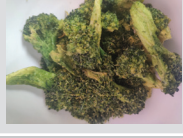
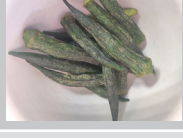
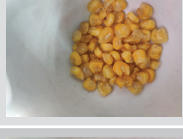
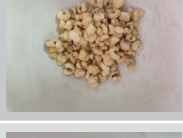
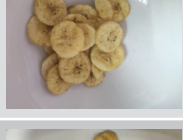
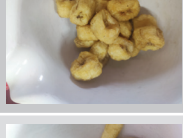
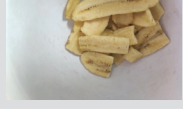
รูปที่ 3 โครมาโทแกรมของสารอะคริลาไมด์ที่ระดับ LOQ ความเข้มข้น 20.0 ไมโครกรัมต่อลิตร

3.4 การทดสอบในตัวอย่างผลิตภัณฑ์อาหารทอด

ศึกษาความเหมาะสมของวิธีทดสอบโดยการทดสอบตัวอย่างที่มีเมทริกซ์ต่าง ๆ กัน พบว่าการเติมสารมาตรฐานและคำนวณค่าร้อยละการคืนกลับมีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับ 75 -110 โดยปริมาณสารอะคริลาไมด์ที่มีการตรวจพบในตัวอย่างมีรายละเอียดแสดงดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 แสดงปริมาณสารอะคริลาไมด์ที่มีการตรวจพบในผลิตภัณฑ์อาหารทอดที่มีจำหน่ายในท้องตลาด

ลำดับที่	ผลิตภัณฑ์อาหาร	ปริมาณสารอะคริลาไมด์ (ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม)	รูปผลิตภัณฑ์
1	กล้วยทอด รสหวาน (น้ำผึ้ง+น้ำตาล)	41.4	

ลำดับที่	ผลิตภัณฑ์อาหาร	ปริมาณสารอะคริลาไมด์ (ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม)	รูปผลิตภัณฑ์
2	เผือกทอด	34.6	
3	กล้วยสุกทอดสมุนไพร (เบรคแตก)	37.5	
4	เต้าหู้กรอบ รสดั้งเดิม	53.3	
5	บร็อคโคลี่กรอบ รสสาหร่าย	43.5	
6	กระเจี๊ยบกรอบ รสธรรมชาติ	31.9	
7	เมล็ดข้าวโพดหวานกรอบ รสธรรมชาติ	21.3	
8	ลูกเดี๋ยกรอบ รสดั้งเดิม	22.9	
9	กล้วยหอมทองอบกรอบ	ไม่พบ	
10	กล้วยหอมทองกรอบฟู	< 20.0	
11	กล้วยเล็บมือนางอบกรอบ	ไม่พบ	

4. สรุป (Conclusion)

งานวิจัยนี้ได้ตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีการหาปริมาณสารอะคริลาไมด์ในผลิตภัณฑ์อาหารทอด โดยได้ตรวจสอบความใช้ได้ของวิธี พบว่าวิธีทดสอบ In-house method based on analysis of acrylamide in french fries using agilent sampliQ QuEChERS AOAC kit and LC/MS/MS, food application: agilent technologies. มีความถูกต้องอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับ โดยให้ค่าร้อยละการคืนกลับเฉลี่ยร้อยละ 100.7 95.3 และ 103.8 ที่ระดับความเข้มข้น 20 500 และ 1,000 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และความเที่ยง ซึ่งแสดงด้วยค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ มีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 3.82-8.00 นอกจากนี้พบว่าวิธีนี้มีขีดจำกัดของการตรวจวัด เท่ากับ 5 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม และขีดจำกัดของการหาปริมาณ 20 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม

5. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากกรมวิทยาศาสตร์บริการ ปีงบประมาณ 2563

6. เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). Safety evaluation of certain contaminants in food. In: *WHO Food Additives Series, No. 63/FAO JECFA Monographs 8*. Geneva: WHO Press, 2011.
- [2] WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). Safety evaluation of certain contaminants in food. In: *WHO Food Additives Series, No. 55/FAO Food and Nutrition Paper, No. 82*. Geneva: WHO Press, 2006.
- [3] FAO/WHO (Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives), 2011. Evaluation of certain food contaminants. seventy-second report of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives (Rome, 16–25 February 2010). *WHO Technical Reports Series 959*.
- [4] TAREKE, E., P. RYDBERG, P. KARLSSON, S. ERIKSSON, and M. TÖRNQVIST. Acrylamide: a cooking carcinogen. *Chemical Research in Toxicology*. 2000, **13**(6), 517-522.
- [5] SWENSSON, K., L. ABRAMSSON, W. BECKER, A. GLYNN, S. HELLEN, E. K., Y. LIND, and N. ROS. J. Dietary intake of acrylamide in Sweden. *Journal of the Food and Chemical Toxicology*, 2003, **41**, 1581-1586.
- [6] SÖRGE, F., M. KINZIG-SCHIPPERS, M. ILLAUER, A. SKOTT, C. LANDERSDORFER, R. WEISSENBACHER, and A. HOFMANN. Acrylamide: Increased concentrations in homemade food and first evidence of its variable absorption from food, variable metabolism and placental and breast milk transfer in humans. *Journal of Chemotherapy*. 2002, **48**(6), 267-274.
- [7] KLAUS, A.N. and W. SCHMAHL, Mutagenic and teratogenic effects of acrylamide in the mammalian spot tests. *Mutation Research*. 1989, **226**(3), 157-162.
- [8] BERGMARK, E. Hemoglobin adducts of acrylamide and acrylonitrile in laboratory workers, smokers, and nonsmokers. *Journal of Chemical Research*. 1997, **16**, 579-591.
- [9] TILSON, H.A. The neurotoxicity of acrylamide: An overview. *Neurobehavioral Toxicology and Teratology*. 1981, **3**(4), 455-461.
- [10] U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (U.S. EPA). In: *Health and Environmental Effects Profile for Acrylamide*. Washington, D.C. : U.S. EPA, 1985. pp. 95.
- [11] KLAASEN, C.A.M. and J. DOULL. Casaret and Doull's toxicology: the basic science of poisons. New York: Macmillan, 1986.
- [12] SHANKER, R. and P.K. SETH. Toxic effects of acrylamide in a fresh water fish, *Heteropneustes fossilis*. *Archives Environmental Contamination and Toxicology*, 1986, **37**(2), 274-280.
- [13] RASFF-the Rapid Alert System for Food and Feed [online]. Available from: <https://webgate.ec.europa.eu/>. [viewed 2018-04-16].
- [14] ศาลสหรัฐฯ สั่งรื้อกาแฟแบรนด์ดัง ติดป้ายเตือนมะเร็ง [ออนไลน์]. 30 มีนาคม 2561. เข้าถึงจาก: <https://www.posttoday.com/world/546155>. [อ้างถึงวันที่ 6 เมษายน 2561].
- [15] NA JOM, K., P. JAMNONG, and S. LERTSIRI. Investigation of acrylamide in curries made from coconut milk. *Food and Chemical Toxicology*. 2008, **46**(1), 119-124.
- [16] ศูนย์วิจัยและประเมินความเสี่ยงด้านความปลอดภัยสถาบันอาหาร [ออนไลน์]. เข้าถึงจาก: <http://fics.nfi.or.th/foodsafety/>. [อ้างถึงวันที่ 6 เมษายน 2561]

- [17] KOMTHONG, P., O. SURIYAPHAN, and J. CHAROENPANICH. Determination of acrylamide in Thai conventional snacks from Nong Mon market, Chonburi using GC-MS technique. *Food Additives and Contaminants (Part B)*. 2012, **5**(1), 20-28.
- [18] จิตติมา เจริญพานิช. สารอะคริลาไมด์ที่แฝงมากับอาหารไทย. *วารสารวิทยาศาสตร์มข.* 2555, **40**(4), 1059-1072.
- [19] MICRO, S., E. ROSS, and J. WILLIAMS. Determination of Acrylamide in Processed Foods using ACQUITY I-Class and Xevo TQ-S micro. *Waters*, 2020.
- [20] TÖIGYESI, Á. and V. K. SHARMA. Determination of acrylamide in gingerbread and other food samples by HILIC-MS/MS: A dilute-and-shoot method. *Journal of Chromatography B* [online]. 2020, **1136**, 121933 Available from: <https://doi.org/10.1016/j.jchromb.2019.121933>. [viewed 2019-10-20]
- [21] ZHANG, Y., Y. REN, J. JIAO, D. LI, and Y. ZHANG. Ultra high-performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry for the simultaneous analysis of asparagine, sugars, and acrylamide in Maillard reactions. *Analytical Chemistry*. 2011, **83**(9), 3297–3304.
- [22] DE PAOLA, E.L., G. MONTEVECCHI, F. MASINO, D. GARBINI, M. BARBANERA, and A. ANTONELLI. Determination of acrylamide in dried fruits and edible seeds using QuEChERS extraction and LC separation with MS detection. *Food Chemistry*. 2017, **217**, 191–195.
- [23] FERNÁNDEZ, A., M.I. TALAVERANO, F. PÉREZ-NEVADO, E. BOSELLI, A.M. CORDEIRO, S. MARTILLANES, R. FOLIGNI, and D. MARTIN-VERTEDOR. Evaluation of phenolics and acrylamide and their bioavailability in high hydrostatic pressure treated and fried table olives. *Journal of Food Processing and Preservation*. 2020, **44**(4), 14384.
- [24] SINGH, P., P. SINGH, and R.B. RAJA. Determination of acrylamide concentration in processed food products using normal phase high-performance liquid chromatography (HPLC). *African Journal of Biotechnology*. 2010, **9**(47), 8085–8091.
- [25] GENG, Z.M., P. WANG, and A.M. LIU. Determination of acrylamide in starch-based foods by HPLC with pre-column ultraviolet derivatization. *Journal Chromatographic Science*. 2011, **49**(10), 818–824.
- [26] LONGHUA, XU., Z. LIMIN, Q. XUGUANG, X. ZHIXIANG, and S. JIAMING. Determination of trace acrylamide in potato chip and bread crust based on SPE and HPLC. *Chromatographia*. 2012, **75**, 269–274.
- [27] SUN, S.Y., Y. FANG, and Y.M. XIA. A facile detection of acrylamide in starchy food by using a solid extraction-GC strategy. *Food Control*. 2012, **26**(2), 220–222.
- [28] YAO, W.J. Direct determination of acrylamide in food by gas chromatography with nitrogen chemiluminescence detection. *Journal of Separation Science*. 2015, **38**(13), 2272–2277.
- [29] SARAJI, M. and S. JAVADIAN. Single-drop microextraction combined with gas chromatography-electron capture detection for the determination of acrylamide in food samples. *Food Chemistry*. 2019, **274**, 55–60.
- [30] KAMANKESH, M., A. NEMATOLLAHI, A. MOHAMMADI, and R. FERDOWSI. Investigation of composition, temperature, and heating time in the formation of acrylamide in snack: central composite design optimization and microextraction coupled with gas chromatography-mass spectrometry. *Food Analytical Methods* [online]. 2020, **14**, 44-53. Available from: <https://doi.org/10.1007/s12161-020-01849-6>. [viewed: 2019-10-20].
- [31] KANG, C., H. MA, Y. LI, C. ZHANG, Y. HONG, and M. SHAO. Determination of acrylamide in foods by automatic accelerated solvent extraction and gas chromatography-mass spectrometry. *Acta Chromatographica* [online]. 2020, **33**(1), 64-72. Available from: <https://akjournals.com/view/journals/1326/aop/article-10.1556-1326.2020.00755/article-10.1556-1326.2020.00755.xml>. [viewed: 2019-10-20].

- [32] Al-TAHER, FADWA. *Analysis of acrylamide in french fries using agilent sampliQ QuEChERS AOAC kit and LC/MS/MS* [online]. Available from: <https://www.agilent.com/cs/library/applications/5990-5940EN.pdf> [viewed 2022-05-24].
- [33] กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์. *วิธีมาตรฐานทางเคมีสำหรับการวิเคราะห์อาหารของกรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ DMSc F1074: การวิเคราะห์ปริมาณอะคริลาไมด์ในอาหารโดย LC/MS-MS. ในวิธีมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์อาหาร เล่มที่ 5. นนทบุรี : กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์, 2560. หน้า 41-46.*
- [34] ZHAO, HUI. *Quantification of acrylamide in a variety of food matrices by LC/MS/MS triple quadrupole* [online]. Available from: <https://www.agilent.com/cs/library/applications/application-acrylamide-food-6470-qqq-5994-0820en-agilent.pdf>. [viewed 2022-05-24].
- [35] MAGNUSSON, B. and U. ORNEMARK (eds.). *Eurachem guide: the fitness for purpose of analytical methods-a laboratory guide to method validation and related topics*. 2nd ed., Teddington, Middlesex: Eurachem Secretary, 2014.

การตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีทดสอบหาปริมาณซูคราโลสใน เครื่องดื่มโดยเทคนิคโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง Method validation for determination of sucralose in beverage by high performance liquid chromatography

3

นันทิดา จิตแก้ว¹, สวรรินทร์ สินะวิวัฒน์¹Nantida Jitkaew¹, Savarin Sinaviwat¹

รับบทความ: 18 กุมภาพันธ์ 2565 แก้ไขบทความ: 31 พฤษภาคม 2565 ยอมรับตีพิมพ์: 13 มิถุนายน 2565

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการทดสอบความใช้ได้ของวิธี การทดสอบปริมาณซูคราโลสในเครื่องดื่มซึ่งดัดแปลงวิธีทดสอบจากวิธีมาตรฐาน BS EN 16155:2012 Foodstuffs- Determination of sucralose-High performance liquid chromatographic method ได้ทำการตรวจสอบความใช้ได้ของวิธี โดยมีการศึกษาช่วงความเป็นเส้นตรงของวิธีวิเคราะห์ พบว่ามีความเป็นเส้นตรงอยู่ในช่วง 0-400 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าขีดจำกัดในการตรวจพบและขีดจำกัดในการวัดเชิงปริมาณของการตรวจวัดเท่ากับ 4.0 และ 15.0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ การศึกษาความแม่นยำและความเที่ยงของวิธีโดยใช้ตัวอย่างที่เติมสารละลายมาตรฐาน 3 ระดับความเข้มข้น (25, 250, 2,000 มิลลิกรัม/กิโลกรัม) พบว่ามีค่าร้อยละกลับคืนอยู่ในช่วงร้อยละ 92.0-101.6, 98.8-99.4 และ 98.0-99.8 ตามลำดับ และความเที่ยงประเมินจากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ที่แสดงด้วยค่า %RSD, เท่ากับร้อยละ 3.799, 0.169 และ 0.586 ตามลำดับค่า HORRAT เท่ากับ 0.824, 0.052 และ 0.246 ตามลำดับ ซึ่งค่าร้อยละกลับคืน ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ และค่า HORRAT อยู่ในเกณฑ์การยอมรับและเป็นไปตามข้อกำหนดของ EURACHEM/CITAC Guide: 2012 รวมทั้งได้ประเมินค่าความไม่แน่นอนขยายของการทดสอบซูคราโลสในเครื่องดื่ม พบว่ามีค่าความไม่แน่นอนคิดเป็นร้อยละ 3.7 ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (k=2) นอกจากนี้ ได้ทำการเก็บตัวอย่างที่ขายในท้องตลาดจำนวน 30 ตัวอย่าง มาทำการทดสอบตามวิธีที่ผ่านการทดสอบ ความใช้ได้แล้ว พบว่า ตัวอย่างทั้งหมดนี้มีปริมาณซูคราโลส อยู่ในช่วงไม่พบหรือน้อยกว่า 4.0 ถึง 172.7 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จากการศึกษาแสดงให้เห็นว่าวิธีการทดสอบนี้เหมาะสมกับการใช้งานตามวัตถุประสงค์

Abstract

The determination of sucralose in beverages was performed and validated by the modified standard method based on BS EN 16155:2012 Foodstuffs - Determination of sucralose - High performance liquid chromatographic method. The linear calibration curve was obtained in concentrations ranging from 0 to 400 mg/L. The limit of detection (LOD) and the limit of quantitation (LOQ) were 4.0 and 15.0 mg/kg, respectively. The precision and accuracy studies were performed by spiking 3 concentration levels in the samples (25, 250, and 2,000 mg/kg). The recoveries were obtained from 92.0 to 101.6%, 98.8 to 99.4% and 98.0 to 99.8%, respectively. The precision calculated as a relative standard deviation of repeatability (%RSDr) found good repeatability at 3.799%, 0.169%, and 0.586%. The HORRAT values were 0.824, 0.052 and 0.246, respectively. The percent recovery, precision, and HORRAT value were acceptable and complied with the requirement of EURACHEM/CITAC Guide: 2012. The percentage of expanded uncertainty was 3.7% at a 95% confidence interval (k=2). Moreover, thirty samples from local markets were analyzed following this validated method and found that sucralose concentration ranged from not detected or less than 4.0 to 172.7 mg/kg. The result of this study showed the modified methods were fit for the intended use.

คำสำคัญ: ซูคราโลส เครื่องดื่ม โครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง

Keywords: Sucralose, Beverage, High performance liquid chromatography

¹ กรมวิทยาศาสตร์บริการ

^{*} Corresponding author e-mail: nantida@dss.go.th

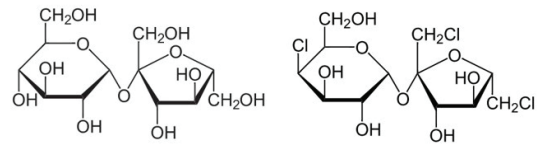
1. บทนำ (Introduction)

ปัจจุบันผู้บริโภคได้หันมาให้ความสนใจและให้ความสำคัญเรื่องสุขภาพกันมากขึ้น อีกทั้งพยายามหลีกเลี่ยงอาหารที่มีน้ำตาลในปริมาณมากซึ่งเชื่อว่าจะมีผลเสียต่อสุขภาพ จากสถิติการบริโภคน้ำตาลของคนไทย พบว่า มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจากการรับประทานอาหารที่มีการเติมน้ำตาล และเครื่องดื่มต่าง ๆ เช่น กาแฟ ชาเขียว น้ำอัดลม น้ำชา น้ำสมุนไพร และน้ำผลไม้ที่มีการใส่น้ำตาลในปริมาณมาก ทำให้ร่างกายได้รับพลังงานส่วนเกิน ก่อให้เกิดปัญหาด้านสุขภาพตามมา เช่น น้ำหนักเกิน โรคอ้วน โรคเบาหวาน โรคหัวใจ และโรคเรื้อรังอื่น ๆ [1]

สารให้ความหวานแทนน้ำตาล สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ ชนิดที่มีคุณค่าทางโภชนาการและให้พลังงาน ได้แก่ ฟรุกโทส (Fructose), มอลทิทอล (Maltitol), ซอร์บิทอล (Sorbitol), อิริทริทอล (Erythritol) และไซลิตอล (Xylitol) ซึ่งสารให้ความหวานกลุ่มนี้ ไม่เหมาะสำหรับผู้ที่ต้องการควบคุมน้ำหนัก และผู้ป่วยโรคเบาหวาน ส่วนอีกชนิดหนึ่ง คือ ชนิดที่ไม่มีคุณค่าทางโภชนาการและไม่ให้พลังงาน ได้แก่ ซูคราโลส (Sucralose) สตีเวียหรือสารสกัดจากหญ้าหวาน (Stevia or Stevia extract) แอสปาร์เทม (Aspartame) อะซิซัลเฟม-เค (Acesulfame-k) แซ็คคาริน (Saccharin) หรือซันทสกร โดยสารให้ความหวานกลุ่มนี้เหมาะสำหรับผู้ที่ต้องการควบคุมน้ำหนัก และผู้ป่วยโรคเบาหวาน [2]

ซูคราโลส เป็นสารให้ความหวานแทนน้ำตาล (Alternative sweetener) มีลักษณะเป็นผงผลึกสีขาวถึงขาวนวล ไม่มีกลิ่น ละลายได้ดีในน้ำ [3] ให้ความหวานสูงกว่าน้ำตาลทรายถึง 600 เท่า เมื่อเทียบระดับความหวานเดียวกันกับน้ำตาลจึงมีราคาที่ต่ำกว่า สามารถใช้ลดต้นทุนผลิตภัณฑ์ได้ อีกทั้งยังมีรสชาติที่คล้ายคลึงกับน้ำตาลทราย ทำให้ผู้บริโภคมีความคุ้นเคยมากกว่า ซูคราโลสถูกค้นพบในปี พ.ศ. 2519 วัตถุดิบเริ่มต้นคือ น้ำตาลซูโครส (Sucrose) ซึ่งผ่านกระบวนการพิเศษโดยแทนที่กลุ่มไฮดรอกซิลด้วยอะตอมคลอรีนที่ตำแหน่งคาร์บอนอะตอมที่ 1, 4 และ 6 ของซูโครส ดังโครงสร้างโมเลกุลของซูโครส เมื่อเทียบกับซูคราโลส (รูปที่ 1) ทำให้มีสูตรโครงสร้างคล้ายน้ำตาล โดยให้รสชาติหวานใกล้เคียงกับน้ำตาล ไม่ให้พลังงาน ไม่มีรสขมติดลิ้น แต่ร่างกายไม่สามารถย่อยได้ [1] ซึ่ง Sucralose ที่รับประทานเข้าไปนั้นจะถูกขับออกมาในปัสสาวะและอุจจาระ จึงสามารถใช้ Sucralose ทดแทนน้ำตาลเพื่อควบคุมพลังงานที่จะได้รับ ทั้งนี้ Sucralose ย่อยสลายเข้าไปสู่ร่างกายจะไม่ส่งผลต่อระดับน้ำตาลในเลือดและระดับอินซูลิน และไม่พบอันตรายใด ๆ จากการที่รับประทาน และในปี พ.ศ. 2541 สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยาแห่งสหรัฐอเมริกา (US FDA) ได้ประกาศอนุญาตให้ใช้ในผลิตภัณฑ์อาหาร 15 ชนิด และใช้ร่วมกับสารให้ความหวานชนิดอื่น ๆ ในอาหาร

ประเภทเครื่องดื่ม หมากรฝรั่ง ขนมหวานแช่แข็ง น้ำผลไม้และเจลลาติน จนกระทั่งปี พ.ศ. 2542 จึงประกาศ ให้ใช้ได้กับอาหารทุกชนิดโดยผ่านการทดสอบความปลอดภัยต่อการบริโภคมากกว่า 110 ครั้ง [1,4] โดยสามารถสังเกตได้จากฉลากของผลิตภัณฑ์ซึ่งจะแสดงเป็นเลขรหัสในระบบ International Numbering System for Food Additives คือ INS No. 955



Sucrose

Sucralose

รูปที่ 1 สูตรโครงสร้างของซูโครสและซูคราโลส

ปี พ.ศ. 2533 คณะผู้เชี่ยวชาญจาก The Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additive (JECFA) กำหนดค่า Acceptable Daily Intake (ADI) ของซูคราโลสไว้ที่ 0-15 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักตัว 1 กิโลกรัม ในขณะที่ US FDA ระบุว่าซูคราโลสปลอดภัยสำหรับทุกคน รวมถึงสตรีมีครรภ์ปลอดภัยในระหว่างตั้งครรภ์และให้นมบุตร [3,5] และกำหนดค่า ADI ไว้ที่ 5 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักตัว 1 กิโลกรัมต่อ 1 วัน ในประเทศไทยนิยมเติมซูคราโลสในผลิตภัณฑ์อาหารและเครื่องดื่มประเภทต่าง ๆ โดยมีการกำหนดตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข (ฉบับที่ 389) พ.ศ. 2561 เรื่อง วัตถุเจือปนอาหาร (ฉบับที่ 5) [6] และประกาศกระทรวงสาธารณสุข (ฉบับที่ 418) พ.ศ. 2563 ออกตามความในพระราชบัญญัติอาหาร พ.ศ. 2522 เรื่อง กำหนดหลักเกณฑ์เงื่อนไข วิธีการใช้ และอัตราส่วนของวัตถุเจือปนอาหาร (ฉบับที่ 2) เช่น เครื่องดื่มแต่งกลิ่นรส น้ำผัก ผลไม้ชนิดเนคต้า น้ำผัก ผลไม้เนคต้าเข้มข้น เครื่องดื่มที่มีนมเป็นส่วนประกอบหลัก (ปรุงแต่ง) ปริมาณสูงสุดที่อนุญาต 300 มิลลิกรัมต่อ กิโลกรัม [7]

ในปัจจุบันไม่มีรายงานเกี่ยวกับพิษในการบริโภควัตถุให้ความหวานชนิดนี้ แต่ยังมีเกณฑ์แนะนำในการบริโภค ดังนั้นเพื่อสร้างความมั่นใจในคุณภาพของสินค้าให้แก่ผู้ผลิตผลิตภัณฑ์ และเพื่อให้เกิดความปลอดภัยต่อผู้บริโภค กรมวิทยาศาสตร์บริการ กลุ่มงานความปลอดภัยในอาหาร ได้พัฒนาวิธีการทดสอบหาปริมาณซูคราโลสในผลิตภัณฑ์เครื่องดื่ม โดยใช้วิธีทดสอบที่ดัดแปลงจากวิธีมาตรฐานและมีการตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีด้วย

2. วิธีการวิจัย (Experimental methods)

2.1 เครื่องมือและวัสดุอุปกรณ์

2.1.1 เครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง

(High performance liquid chromatography refractive index detector, HPLC-RID) รุ่น Alliance 2695 ยี่ห้อ Water

2.1.2 คอลัมน์สำหรับ HPLC-RID ชนิดเหล็กกล้า ไร้สนิมขนาด 4.6 x 250 มิลลิเมตร บรรจุด้วย C18 ขนาดอนุภาค 5 ไมโครเมตร ยี่ห้อ Hichrom

2.1.3 เครื่องชั่งไฟฟ้า (Electronic analytical balance) รุ่น AE 240 ยี่ห้อ Mettler

2.1.4 เครื่องทำน้ำบริสุทธิ์ (Deionizer) รุ่น Smart2pure ยี่ห้อ Thermo scientific

2.1.5 อ่างน้ำอัลตราโซนิก (Ultrasonic bath) รุ่น LUC 40 5 ยี่ห้อ Power sonic

2.1.6 ชุดอุปกรณ์การกรองพร้อมแผ่นเมมเบรน (Membrane filter) ชนิดเมทิลเซลลูโลส (Methylcellulose, MCE) และชนิดพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน (Polytetrafluoroethylene, PTFE) ขนาด 47 มิลลิเมตร ขนาดรูพรุน 0.22 ไมโครเมตร

2.1.7 หลอดฉีด (Syringe) ขนาด 10 มิลลิลิตร พร้อมตัวกรอง (Syringe filter) ชนิด MCE ขนาด 25 มิลลิเมตร, 0.22 ไมโครเมตร หรือตัวกรองชนิดอื่น ๆ ที่มีคุณสมบัติเหมือนกัน

2.1.8 ขวดแก้วขนาดเล็ก (Vial) ขนาด 2 มิลลิลิตร

2.1.9 กระดาษกรองวัดตัมแมนเบอร์ 2 (Whatman no.2) หรือเทียบเท่า

2.1.10 เครื่องแก้วต่าง ๆ เช่น ปิเปตต์ ขวดแก้ววัดปริมาตร บีกเกอร์ และกระบอกตวงขนาดต่าง ๆ

2.1.11 กรวยกรองชนิดแก้วหรือพลาสติก

2.2 สารมาตรฐาน สารเคมีและอื่น ๆ

2.2.1 สารมาตรฐานซูคราโลส (CAS No. 56038-13-2) ความบริสุทธิ์อย่างน้อยร้อยละ 99.0 ยี่ห้อ Sigma-Aldrich

2.2.2 เมทานอล ชั้นคุณภาพวิเคราะห์ HPLC ยี่ห้อ Merck

2.2.3 น้ำที่มีความบริสุทธิ์สูง มีค่าความต้านทานไฟฟ้าไม่น้อยกว่า 18.2 MΩ·cm

2.2.4 โพแทสเซียมเฟอร์โรไซยาไนด์ ($K_4[Fe(CN)_6 \cdot 3H_2O]$) ชั้นคุณภาพวิเคราะห์ AR (carrez I) ยี่ห้อ Merck

2.2.5 ซิงค์ไนเตรท ($Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$) ชั้นคุณภาพวิเคราะห์ AR (carrez II) ยี่ห้อ Alfa aesar

2.2.6 สารละลายผสมเฟสเคลื่อนที่ (สารละลายเมทานอล ร้อยละ 20)

2.2.7 สารละลายมาตรฐานซูคราโลสความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.2.8 สารละลายมาตรฐานซูคราโลสช่วงใช้งานความเข้มข้น 0, 5, 10, 50, 100, 200 และ 400 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.3 ตัวอย่าง

ตัวอย่างที่ใช้ในการตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีเป็นตัวอย่างเครื่องดื่มชนิดไม่มีแอลกอฮอล์ที่มีจำหน่ายตามท้องตลาด จำนวน 30 ตัวอย่าง ได้แก่ เครื่องดื่มน้ำอัดลม เครื่องดื่มน้ำเติมวิตามิน เครื่องดื่มให้พลังงาน เครื่องดื่มว่านหางจระเข้ผสมกลินพีช เครื่องดื่มน้ำผักผลไม้รวมรสสตอเบอรี่ เป็นต้น

2.4 การเตรียมตัวอย่าง [8]

ชั่งตัวอย่าง 20 ± 0.5 กรัม (ความละเอียดของการชั่งตัวอย่างคือ 0.0001 กรัม) ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นละลายผสมเฟสเคลื่อนที่ (ข้อ 2.2.6) ประมาณ 80 มิลลิลิตร แล้วเติม carrez I (ข้อ 2.2.4) และ carrez II (ข้อ 2.2.5) อย่างละ 1 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยสารละลายผสมเฟสเคลื่อนที่จนครบปริมาตร 100 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันและตั้งทิ้งไว้ 10 นาที จากนั้นนำไปกรองด้วยกระดาษกรองวัดตัมแมนเบอร์ 2 (ข้อ 2.1.9) นำสารละลายส่วนใสที่ได้ไปกรองผ่านหลอดฉีดพร้อมตัวกรอง 0.22 ไมโครเมตร ชนิด MCE ขนาด 25 มิลลิเมตร (ข้อ 2.1.7) ใส่ในขวดแก้วขนาดเล็ก (Vial) ปริมาตร 2 มิลลิลิตร สำหรับใช้กับเครื่อง HPLC-RID (ข้อ 2.1.8) แล้ววัดหาปริมาณซูคราโลสโดยใช้เครื่อง HPLC-RID

2.5 การเตรียมสารมาตรฐาน

2.5.1 นำสารละลายมาตรฐานซูคราโลสที่มีความเข้มข้นระหว่าง 0 ถึง 400 มิลลิกรัมต่อลิตร (ข้อ 2.2.8) กรองผ่านแผ่นเมมเบรน ขนาด 0.22 ไมโครเมตร ลงในขวดขนาดเล็ก ฉีดเข้าเครื่อง HPLC-RID ตามสภาวะที่เหมาะสมในการทดสอบซูคราโลส ดังนี้

คอลัมน์สำหรับเครื่อง HPLC-RID	ชนิดเหล็กกล้าไร้สนิม ขนาด 4.6 x 250 มิลลิเมตร บรรจุด้วย C18-coated spherical silicagel ขนาดอนุภาค 5 ไมโครเมตร ยี่ห้อ Hichrom พร้อม Guard column
เฟสเคลื่อนที่	เมทานอล 20 มิลลิลิตรต่อน้ำ 80 มิลลิลิตร โดยบรรจุที่สาย A และปรับการไหลเป็น 100%
อัตราการไหล	1.0 มิลลิลิตรต่อนาที
ปริมาตรที่ฉีด	50 ไมโครลิตร
อุณหภูมิคอลัมน์	40 °C
อุณหภูมิเครื่องตรวจวัด	30 °C
เครื่องตรวจวัด	Refractive index detector (RID)
Sensitivity	+8
เวลาในการฉีด (Run time)	18 นาที
เวลาที่สารเคลื่อนที่	ประมาณ 13.8 นาที

2.5.2 ตรวจสอบสมรรถนะของเครื่อง HPLC-RID โดยการฉีดสารละลายมาตรฐานที่ระดับความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร จำนวนอย่างน้อย 3 ซ้ำ เพื่อคำนวณค่า System suitability ตาม US Pharmacopoeia โดยมีเกณฑ์การยอมรับประกอบด้วย Theoretical plate > 2,000, Capacity factor (k') > 2, Resolution > 2, Tailing factor ≤ 2 , Relative standard deviation (RSD) of area < 2% และ RSD of RT < 2%

2.6 การคำนวณผลการทดสอบ

ปริมาณซูโครโลส (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) =

$$\frac{C \times V}{W} \quad (1)$$

เมื่อ C = ความเข้มข้นของซูโครโลสที่ได้จากกราฟมาตรฐาน (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร)
V = ปริมาตรทั้งหมด (มิลลิลิตร)
W = น้ำหนักตัวอย่างที่ใช้ (กรัม)

2.7 การตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีวิเคราะห์ [9]

2.7.1 การตรวจสอบความจำเพาะเจาะจงของวิธี (Selectivity/ specificity)

เตรียมสารละลายมาตรฐานผสม (Mixed standard solution) โดยใช้สารให้ความหวานชนิดอื่น ๆ ได้แก่ อะซีซัลเฟรม-เค, แซ็กคาริน, ซัคคาโลส และแอสพาร์เทม รวมกับซูโครโลสที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร วิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC-RID ตรวจสอบการแยกของซูโครโลสออกจากสารอื่น สารทั้งหมดต้องมีค่าเวลาที่สารเคลื่อนที่ (Retention time) ต่างกันและให้พีคที่ไม่ซ้อนทับกัน

2.7.2 ความเป็นเส้นตรง (Linearity) และช่วงของการใช้งาน (Working range)

2.7.2.1 ศึกษาความเป็นเส้นตรงของสารละลายมาตรฐานซูโครโลสที่ 7 ระดับความเข้มข้น ดังนี้ 0, 5, 10, 50, 100, 200 และ 400 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ดูความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานซูโครโลส (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร) กับพื้นที่ใต้กราฟของซูโครโลส จากค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด (Coefficient of determination, R^2) โดยเกณฑ์การยอมรับได้อยู่ในช่วง 0.995-1.000 และยืนยันความสัมพันธ์ความเป็นเส้นตรงด้วยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานซูโครโลสกับการตกค้าง (Residual)

2.7.2.2 ศึกษาช่วงของการใช้งานโดยการทดสอบสารละลายมาตรฐานซูโครโลสที่เติมลงในตัวอย่างเครื่องมือที่ 7 ระดับความเข้มข้น ดังนี้ 0, 25, 50, 250, 500, 1,000 และ 2,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม วัดระดับความเข้มข้นละ 3 ซ้ำ ดูความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของซูโคร

โลสจากการวัด (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) กับความเข้มข้นของซูโครโลสที่เติมในตัวอย่าง (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) จากค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด (Coefficient of determination, R^2) โดยเกณฑ์การยอมรับได้อยู่ในช่วง 0.995-1.000

2.7.3 ขีดจำกัดในการตรวจพบ (Limit of detection, LOD) และขีดจำกัดในการวัดปริมาณ (Limit of quantitation, LOQ)

โดยวัดแบบลบล้างของตัวอย่าง (Sample blank) จำนวน 10 ซ้ำ และตัวอย่างที่เติมสารละลายมาตรฐานซูโครโลส (Spiked sample) ที่ระดับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานซูโครโลส 15.0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จำนวน 10 ซ้ำ คำนวณหาส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S'_0) เพื่อหาค่า LOD และ LOQ คำนวณจาก

$$LOD = 3 \times S'_0 \quad (2)$$

$$LOQ = k_Q \times S'_0, k_Q = 10 \quad (3)$$

$$\text{เมื่อ } S'_0 = \frac{S_0}{\sqrt{n}} \quad (4)$$

S'_0 = ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) ที่ใช้คำนวณค่า LOD และ LOQ

S_0 = ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation)

n = จำนวนของการวัดตัวอย่างซ้ำ

2.7.4 การยืนยันค่า LOQ

โดยวัดตัวอย่างที่เติมสารละลายมาตรฐานซูโครโลสที่ระดับความเข้มข้นเดียวกับ ค่า LOQ จำนวน 10 ซ้ำ พิจารณาความแม่นยำ (Accuracy) โดยประเมินจากค่าร้อยละกลับคืน (%Recovery) และความเที่ยง (Precision) โดยประเมินจากการทวนซ้ำ (Repeatability) ที่แสดงด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (Relative standard deviation, %RSD_r) และ ค่า HORRAT (Horwitz's ratio) ที่คำนวณจากอัตราส่วนระหว่างค่า %RSD_r กับค่า %PRSD_r (Predicted relative standard deviation (%PRSD_r))

2.7.5 การทดสอบความแม่นยำ (Accuracy) และความเที่ยง (Precision)

โดยวัดตัวอย่างที่เติมสารละลายมาตรฐานซูโครโลสที่ระดับความเข้มข้น 3 ระดับ คือ ที่ 25, 250 และ 2,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จำนวนระดับละ 10 ซ้ำ โดยความเที่ยงประเมินจากการทวนซ้ำ (Repeatability) ที่แสดงด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (Relative standard deviation, %RSD_r) และ HORRAT และความแม่นยำประเมินโดยใช้ค่าร้อยละกลับคืน (%Recovery)

2.7.5.1 ความเที่ยง

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (Relative standard deviation, %RSD,) เกณฑ์การยอมรับ ดังตารางที่ 1 และ HORRAT น้อยกว่า 2

$$\% RSD_r = \frac{SD \times 100}{\bar{x}} \quad (5)$$

% RSD_r = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (Relative standard deviation, %RSD)

SD = ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation)

$\bar{x}$ = ค่าเฉลี่ยของซูคราโลสในตัวอย่าง (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมหรือมิลลิกรัมต่อลิตร)

ตารางที่ 1 เกณฑ์การยอมรับของค่า % RSD_r ตามช่วงระดับ ความเข้มข้น [10]

ความเข้มข้นของซูคราโลส (%)	อัตราส่วนของซูคราโลส	หน่วย	เกณฑ์การยอมรับค่า % RSD _r
0.1	10 ⁻³	0.1%	3.7
0.01	10 ⁻⁴	100 ppm (mg/kg)	5.3
0.001	10 ⁻⁵	10 ppm (mg/kg)	7.3
0.0001	10 ⁻⁶	1 ppm (mg/kg)	11

และ HORRAT (Horwitz ratio) = %RSD_r/%PRSD_r
Horwitz equation : Predicted relative standard deviation (%PRSD_r)

Repeatability: %PRSD_r = 0.66 * 2^(1-0.5logC)

โดยที่ C = Concentration ratio

$$HORRAT = \frac{\% RSD_r}{\% PRSD_r} \quad (6)$$

2.7.5.2 ความแม่นยำ

ร้อยละกลับคืน จากตัวอย่างที่เดิม สารละลายมาตรฐาน 3 ระดับความเข้มข้น เกณฑ์การยอมรับ ดังแสดงตารางที่ 2

$$\% \text{ Recovery } (\%R') = \frac{\bar{x}' - \bar{x}}{x_{\text{spiked}}} \times 100 \quad (7)$$

โดยที่

$\bar{x}'$ = ความเข้มข้นของสารในตัวอย่างที่เติมสารมาตรฐานซูคราโลส (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม หรือ มิลลิกรัมต่อ ลิตร)

$\bar{x}$ = ความเข้มข้นของสารซูคราโลสในตัวอย่าง (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม หรือมิลลิกรัมต่อลิตร)

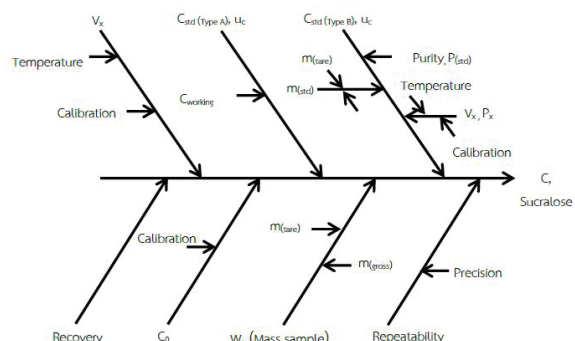
x_{spiked} = ความเข้มข้นของสารมาตรฐานซูคราโลสที่เติมลงในตัวอย่าง (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมหรือ มิลลิกรัมต่อลิตร)

ตารางที่ 2 เกณฑ์การยอมรับของค่า % Recovery ตามช่วงระดับความเข้มข้น [10]

ความเข้มข้นของซูคราโลส (%)	อัตราส่วนของซูคราโลส	หน่วย	เกณฑ์การยอมรับค่า % Recovery
0.1	10 ⁻³	0.1%	95-105
0.01	10 ⁻⁴	100 ppm (mg/kg)	90-107
0.001	10 ⁻⁵	10 ppm (mg/kg)	80-110
0.0001	10 ⁻⁶	1 ppm (mg/kg)	

2.8 การประมาณค่าความไม่แน่นอนของผลการวัด

การประมาณค่าความไม่แน่นอนของการทดสอบหาปริมาณซูคราโลสในเครื่องต้มโดยเทคนิคโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูงตาม EURACHEM/CITAC Guide: 2012 [11] โดยรวมแหล่งที่มาของค่าความไม่แน่นอนแสดงด้วยแผนภูมิแก๊งปลา รูปที่ 2 จากนั้นคำนวณหาค่าความไม่แน่นอนแต่ละแหล่งและ ค่าความไม่แน่นอนรวมและค่าความไม่แน่นอนขยายที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (k=2)

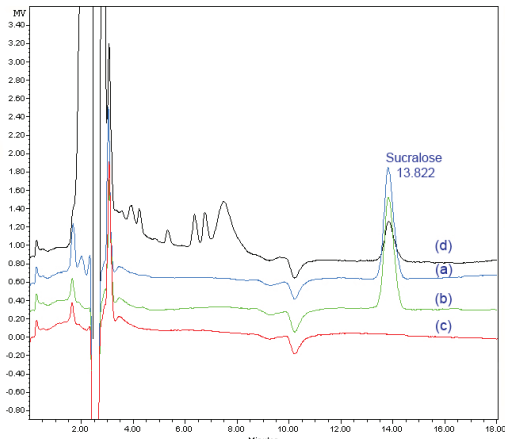


รูปที่ 2 แหล่งของความไม่แน่นอน

3. ผลและวิจารณ์ (Result and discussion)

3.1 การตรวจสอบความจำเพาะเจาะจงของวิธี (Selectivity/ specificity)

จากการฉีดสารละลายมาตรฐานผสม (Mixed standard solution) ที่มีสารอะซีซัลเฟม-เค, แอ็กคาริน, ซัยคลาเมต, แอสพาร์เทม และซูคราโลส พบว่าสามารถแยกสารซูคราโลสออกจากสารให้ความหวานตัวอื่นๆ ได้โดยไม่มี การรบกวนของสารตัวอื่น วิธีการวิเคราะห์นี้มีความสามารถในการวัดที่จำเพาะกับซูคราโลส และเวลาที่ซูคราโลสเคลื่อนที่ (Retention time) เท่ากับ 13.822 นาที (รูปที่ 3)



รูปที่ 3 โครมาโทแกรมของซูคราโลส

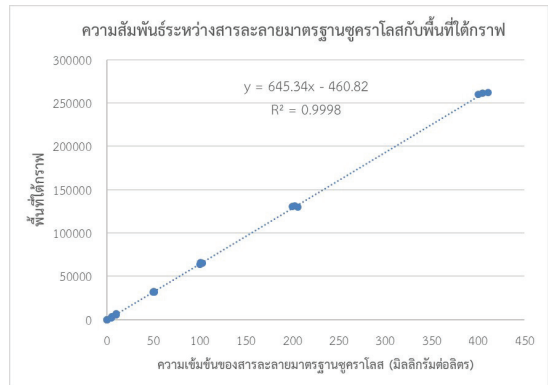
- (a) สารละลายมาตรฐานผสม (Mixed standard solution) ที่มีสารอะซีซัลเฟม-เค, แอ็กคาริน, ซัยคลาเมต, แอสพาร์เทม และซูคราโลส
- (b) สารละลายมาตรฐานซูคราโลส
- (c) แบลงค์ของสารละลาย (Solvent blank)
- (d) ซูคราโลสในตัวอย่างเครื่องดื่ม

3.2 ความเป็นเส้นตรง (Linearity) และช่วงของการใช้งาน (Working range)

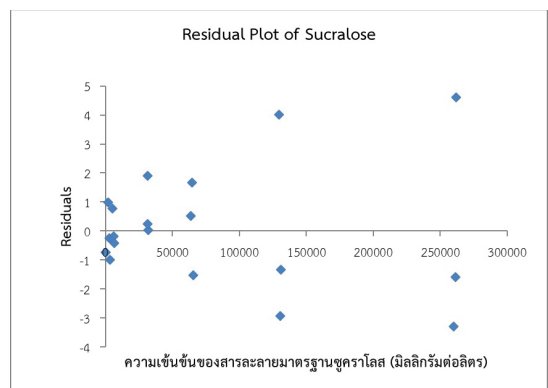
3.2.1 จากการศึกษาคือความเป็นเส้นตรง ที่ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานซูคราโลส ตั้งแต่ 0 ถึง 400 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า ให้กราฟเส้นตรงสมการ $y = 645.34x + 460.82$ ค่า R^2 เท่ากับ 0.9998 ดังแสดงใน รูปที่ 4 และ ยืนยันความสัมพันธ์ความเป็นเส้นตรงของสารละลายมาตรฐานซูคราโลสด้วยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานซูคราโลสกับการตกค้าง (Residual) ดังแสดงใน รูปที่ 5

3.2.2 จากการศึกษาคือช่วงของการวัดความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานซูคราโลสที่เติมลงในตัวอย่างเครื่องดื่ม ตั้งแต่ 0-2,000.0 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า ให้กราฟเส้นตรงสมการ $y = 1.0011x - 0.7411$ ค่า R^2 เท่ากับ 1.0000 ดังแสดงในรูปที่ 6

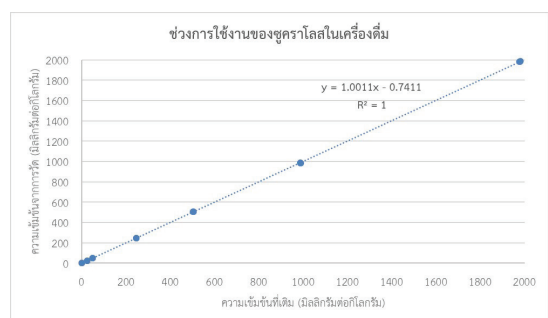
โดยที่งานวิจัย [12] ได้ศึกษาความถูกต้องของวิธีวิเคราะห์ ปริมาณซูคราโลสในเครื่องดื่มโดยเทคนิค UPLC-ELSD ซึ่งเทคนิคดังกล่าวจะแสดงผลของสารให้ความหวานอื่น ๆ ออกมาด้วยและมีความเป็นเส้นตรงของช่วงความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานอยู่ในช่วง 10-200 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขณะที่งานวิจัย [13] ได้ศึกษาการหาปริมาณซูคราโลสในเครื่องดื่มโดยเทคนิค HPLC-RID สามารถหาความเป็นเส้นตรงของช่วงความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานได้ในช่วง 20-400 มิลลิกรัมต่อลิตร



รูปที่ 4 กราฟแสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นของสารละลายซูคราโลสกับพื้นที่ใต้กราฟ ความเข้มข้น 0-400 มิลลิกรัมต่อลิตร



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานซูคราโลสกับการตกค้าง (Residual)



รูปที่ 6 กราฟแสดงช่วงการวัดและความเป็นเส้นตรงของซูคราโลสในตัวอย่างความเข้มข้น 0-2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

3.3 ขีดจำกัดของการตรวจหา (LOD) และขีดจำกัดของการวัดเชิงปริมาณ (LOQ)

ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างที่เติมสารละลายมาตรฐานซูคราโลสระดับความเข้มข้น 15.0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมจำนวน 10 ซ้ำ คำนวณค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S_0) ได้เท่ากับ 1.206 คำนวณ LOD ได้เท่ากับ 3.62 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และค่า LOQ ได้เท่ากับ 12.1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

3.4 การยืนยันค่า LOQ

ผลการฉีดสารละลายตัวอย่างที่เติมสารละลายมาตรฐานซูคราโลสลงไปทีละระดับความเข้มข้น 15.0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จำนวน 10 ซ้ำ คำนวณค่าร้อยละกลับคืน อยู่ในช่วงร้อยละ 97.3-102.0 และค่าร้อยละของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ เท่ากับ 1.373 และค่า HORRAT เท่ากับ 0.277 ซึ่งค่าที่ได้อยู่ในช่วงเกณฑ์การยอมรับได้

(ตามข้อ 2.8.5) ดังนั้นที่ความเข้มข้นระดับนี้ มีความแม่นยำ และ ความเที่ยงเหมาะสมกับการใช้งาน

3.5 การทดสอบความแม่นยำ (Accuracy) และความเที่ยง (Precision)

ผลการฉีดสารละลายตัวอย่างที่เติมสารละลายมาตรฐานซูคราโลสที่ 3 ระดับความเข้มข้น คือ 25, 250 และ 2,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จำนวนระดับละ 10 ซ้ำ พบความแม่นยำที่ประเมินจากค่าร้อยละกลับคืนทั้ง 3 ระดับ อยู่ในช่วงร้อยละ 92.0-101.6, 98.8-99.4 และ 98.0-99.8 ตามลำดับ และความเที่ยงประเมินจากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ ที่แสดงด้วยค่า %RSD, เท่ากับร้อยละ 3.799, 0.169, 0.586 ตามลำดับ และค่า HORRAT เท่ากับ 0.824, 0.052 และ 0.246 ตามลำดับ ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าร้อยละการคืนกลับ (%Recovery), ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD) และค่า HORRAT ของวิธีการวิเคราะห์ปริมาณซูคราโลสในเครื่องต้ม

ลำดับที่	ระดับความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)							
	15		25		250		2,000	
	ค่าที่ได้ (มก./กก.)	ร้อยละการคืนกลับ (%)	ค่าที่ได้ (มก./กก.)	ร้อยละการคืนกลับ (%)	ค่าที่ได้ (มก./กก.)	ร้อยละการคืนกลับ (%)	ค่าที่ได้ (มก./กก.)	ร้อยละการคืนกลับ (%)
1	14.9	99.3	23.9	95.6	247.9	99.2	1,982.3	99.1
2	15.2	101.3	23.0	92.0	247.8	99.1	1,979.2	99.0
3	15.0	100.0	25.1	100.4	247.6	99.0	1,986	99.3
4	15.0	100.0	24.7	98.8	247.5	99.0	1,983.3	99.2
5	15.3	102.0	25.4	101.6	248.4	99.4	1,994.8	99.7
6	15.1	100.7	25.3	101.2	246.9	98.8	1,996.5	99.8
7	15.3	102.0	24.8	99.2	247.3	98.9	1,995.2	99.8
8	15.0	100.0	23.0	92.0	248.1	99.2	1,988.8	99.4
9	15.0	100.0	25.5	102	247.7	99.1	1,960	98.0
10	14.6	97.3	24.7	98.8	247.5	99.0	1,970.2	98.5
เฉลี่ย	15.0	100.3	24.5	98.2	247.67	99.1	1,983.6	99.2
SD	0.207		0.932		0.419		11.628	
%RSD _r	1.373		3.799		0.169		0.586	
%PRSD _r	4.965		4.612		3.257		2.318	
HORRAT	0.277		0.823		0.052		0.246	

3.6 การประมาณค่าความไม่แน่นอนของผลการวัด

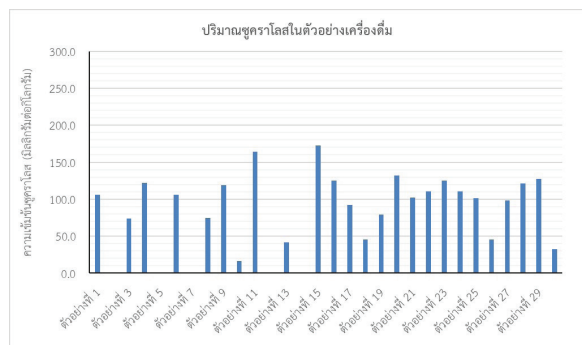
จากผลการทดลองสามารถประมาณค่าไม่แน่นอนของการทดสอบหาปริมาณซูโครสในเครื่องดื่มโดยเทคนิคโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง มีค่าความไม่แน่นอนขยายที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($k=2$) ได้ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ค่าความไม่แน่นอนของการทดสอบหาปริมาณซูโครสในเครื่องดื่มโดยเทคนิคโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง

แหล่งที่มา	หน่วย	ปริมาณที่วัด, x_i	ความไม่แน่นอนมาตรฐาน, $u_{(xi)}$	ความไม่แน่นอนสัมพัทธ์, $u_{(xi)} / x_i$	ความไม่แน่นอนสัมพัทธ์, $(u_{(xi)} / x_i)^2$
1. สารมาตรฐาน					
-ความบริสุทธิ์ (P_{std})	ร้อยละ	99.0	2.89×10^{-1}	2.89×10^{-3}	8.35×10^{-6}
-น้ำหนัก (m_{std})	กรัม	0.05	9.19×10^{-6}	1.84×10^{-4}	3.39×10^{-8}
-ขวดวัดปริมาตร (V_x)	มิลลิลิตร	100	6.13×10^{-2}	6.13×10^{-4}	3.76×10^{-7}
-ปิเปตต์ (P_x)	มิลลิลิตร	5	3.26×10^{-3}	6.52×10^{-4}	4.25×10^{-7}
2. ตัวอย่าง					
-น้ำหนัก (m_s)	กรัม	20	6.20×10^{-5}	3.10×10^{-5}	9.61×10^{-7}
-ขวดวัดปริมาตร (V_s)	มิลลิลิตร	100	6.13×10^{-2}	6.13×10^{-4}	3.76×10^{-7}
3. ความเข้มข้นของซูโครสที่ได้จากกราฟ (C_0)	มิลลิกรัมต่อลิตร	49.7	8.98×10^{-1}	1.82×10^{-2}	3.26×10^{-4}
4. การทดสอบซ้ำ (RSD_r)	-	1	1.19×10^{-3}	1.19×10^{-3}	1.42×10^{-6}
5. ร้อยละกลับคืน	-	1.003	1.72×10^{-3}	1.71×10^{-3}	2.94×10^{-6}
ความไม่แน่นอนสัมพัทธ์รวม, (U_c/C)			= 0.0184		
ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานรวม (U_c)			= 4.5577 ($c=247.7$ มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)		
ค่าความไม่แน่นอนขยาย ($2 \times U_c$), $k=2$			= 9.1154 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม		
รายงานผล :			247.7 ± 9.1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (คิดเป็นร้อยละ 3.7)		

3.7 การตรวจวิเคราะห์ในตัวอย่าง

ตัวอย่างเครื่องดื่มชนิดไม่มีแอลกอฮอล์ที่เก็บจากการจำหน่ายตามท้องตลาด จำนวน 30 ตัวอย่าง นำมาวิเคราะห์ตามวิธีทดสอบที่ได้ตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีแล้ว พบว่า ตัวอย่างทั้งหมดนี้มีปริมาณซูคราโลสอยู่ในช่วงไม่พบหรือน้อยกว่า 4.0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ถึง 172.7 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ดังแสดงในรูปที่ 7 ซึ่งเป็นไปตามพระราชบัญญัติอาหาร พ.ศ. 2522 ประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 418 (พ.ศ. 2563) ที่ให้มีได้สูงสุด 300 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม



รูปที่ 7 ปริมาณของซูคราโลสในตัวอย่างเครื่องดื่มชนิดไม่มีแอลกอฮอล์ที่เก็บจากการจำหน่ายตามท้องตลาด

4. สรุป (Conclusion)

การตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีทดสอบหาปริมาณซูคราโลสในเครื่องดื่ม โดยการดัดแปลงวิธีจากวิธีมาตรฐาน BS EN 16155:2012 Foodstuffs-Determination of sucralose-High performance liquid chromatographic method ตามคุณลักษณะเฉพาะต่าง ๆ ได้แก่ ความจำเพาะเจาะจงของวิธี (Selectivity/ specificity), ความเป็นเส้นตรง (Linearity) และช่วงของการใช้งาน (Working range), ขีดจำกัดในการตรวจพบ (Limit of detection, LOD) และขีดจำกัดในการวัดปริมาณ (Limit of quantitation, LOQ), การทดสอบความแม่นยำ (Accuracy) และความเที่ยง (Precision), การประมาณค่าความไม่แน่นอนของผลการวัด พบว่าเป็นไปตามเกณฑ์การยอมรับที่กำหนด แสดงว่าวิธีทดสอบนี้เหมาะกับการใช้งานตามวัตถุประสงค์และสามารถนำไปทดสอบผลิตภัณฑ์ และเก็บตัวอย่างเครื่องดื่มที่มีจำหน่ายในท้องตลาดมาตรวจวิเคราะห์หาค่าปริมาณซูคราโลสอยู่ในช่วงต่ำกว่า 300 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 418 (พ.ศ.2563)

5. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

ขอขอบคุณผู้บังคับบัญชาและบุคลากรกองผลิตภัณฑ์อาหารและวัสดุสัมผัสอาหาร กรมวิทยาศาสตร์บริการ ที่ช่วยให้คำแนะนำ ทำให้การดำเนินงานในครั้งนี้สำเร็จตามวัตถุประสงค์

6. เอกสารอ้างอิง (Reference)

- [1] Sucralose สารให้ความหวานที่มีรสชาติคล้ายน้ำตาลที่สุด [ออนไลน์]. พฤศจิกายน 2563. เข้าถึงจาก: <https://www.tinnakorn.com/articles/sucralose-sweetener> [อ้างถึงวันที่ 24 มกราคม 2565].
- [2] ซูคราโลส [ออนไลน์]. 2560. เข้าถึงจาก: <https://www.disthai.com/17268970/%E0%B8%8B%E0%B8%B9%E0%B8%84%E0%B8%A3%E0%B8%B2%E0%B9%82%E0%B8%A5%E0%B8%AA> [อ้างถึงวันที่ 24 มกราคม 2565].
- [3] THE JOINT FAO/WHO EXPERT COMMITTEE ON FOOD ADDITIVE (JECFA). Sucralose [online]. 1990. Available from: https://www.fao.org/fileadmin/user_upload/jecfa_additives/docs/Monograph1/Additive-444.pdf [viewed 2021-10-21].
- [4] RODERO A.B, L.S. RODERO, and R. AZOUBEL. Toxicity of sucralose in humans: a review. *International Journal of Morphology*. 2009, 27(1), 239-244.
- [5] AMERICAN PREGNANCY ASSOCIATION. Artificial sweetener and pregnancy [online]. 2015. Available from: <https://americanpregnancy.org/healthy-pregnancy/is-it-safe/artificial-sweeteners-and-pregnancy> [viewed 2022-01-24].
- [6] กระทรวงสาธารณสุข. พระราชบัญญัติอาหาร พ.ศ. 2522 ประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 389 (พ.ศ. 2561) เรื่อง วัตถุเจือปนอาหาร (ฉบับที่ 5). *ราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 135 ตอนพิเศษ 178 ง* (วันที่ 25 กรกฎาคม 2561). หน้า 521-523.
- [7] กระทรวงสาธารณสุข. พระราชบัญญัติอาหาร พ.ศ. 2522 ประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 418 (พ.ศ. 2563) เรื่อง กำหนดหลักเกณฑ์ เงื่อนไข วิธีการใช้ และอัตราส่วนของวัตถุเจือปนอาหาร (ฉบับที่ 2). *ราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 137 ตอนพิเศษ 237 ง* (วันที่ 8 ตุลาคม 2563). หน้า 534-536.
- [8] BRITISH STANDARD INSTITUTION (BSI). BS EN 16155:2012. Foodstuffs-Determination of sucralose-High performance liquid chromatographic method. London, UK: British Standard Institution (BSI), 2012. 16 p.

- [9] EURACHEM. *The fitness for purpose of analytical methods. A laboratory guide to method validation and related topics*. 2nd ed. [online]. 2014. Available from: https://www.eurachem.org/images/stories/Guides/pdf/MV_guide_2nd_ed_EN.pdf [viewed 2021-10-21].
- [10] ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS. *Appendix F: Guidelines for standard method performance requirements*. [online]. 2016. Available from: http://www.eoma.aoac.org/app_f.pdf [viewed 2021-10-29].
- [11] ELLISON S.L.R. and A. WILLIAMS. *EURACHEM/CITAC Guide CG4: Quantifying uncertainty in analytical measurement*. 3rd ed. [online]. 2012. Available from: https://www.eurachem.org/images/stories/Guides/pdf/QUAM2012_P1.pdf [viewed 2021-11-10].
- [12] กิตติมา โสณะมิตร, สุรชาติพิทยวิทย์ชัยวุฒิมังค์ และญาณิตหาญทวีทรัพย์. การทดสอบความถูกต้องของวิธีวิเคราะห์ปริมาณซูคราโลสในเครื่องดื่มโดยเทคนิค UPLC-ELSD. *วารสารกรมวิทยาศาสตร์การแพทย์*. 2562, 61(3), 107-120.
- [13] SANG, L. Optimization of determination of sucralose in drink by HPLC. *Journal of Economic Science Research* [online]. 2019, 2(3), 50-54. Available from: <http://doi.org/10.30564/jesr.v2i3.1023> [viewed 2021-11-10].

การเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมเมทิลีน บลู ในน้ำด้วยถ่าน กัมมันต์ที่มีรูพรุน เมโซพอร์จากเหง้ามันสำปะหลังที่เตรียมด้วย กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชันแบบหม้อเดียว Enhancing adsorption efficiency of methylene blue from water using cassava rhizome-derived mesoporous activated carbons prepared via one-pot hydrothermal carbonization

เจนจิรา ภูริรักษ์พิติกร^{1**}, กิตติยา ปลุ่มใจ¹, วรินดา เฟื่องชูณัฐ¹, แลลมทอง ชื่นชม²

Jenjira Phuriragpitikhon^{1**}, Kittiya Pluamjai¹, Warinda Fuangchoonuch¹, Laemthong Chuenchom²

รับบทความ: 1 กุมภาพันธ์ 2565 แก้ไขบทความ: 5 พฤษภาคม 2565 ยอมรับตีพิมพ์: 14 มิถุนายน 2565

บทคัดย่อ

อุตสาหกรรมฟอกย้อมเป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมกลางน้ำที่สำคัญของอุตสาหกรรมสิ่งทอในประเทศไทย กระบวนการผลิตนั้นต้องใช้สีย้อมเป็นวัตถุดิบหลัก เมื่อน้ำเสียที่ปนเปื้อนไปด้วยสีย้อมถูกปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ จะส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศและสุขภาพของมนุษย์ในพื้นที่ข้างเคียง งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการพัฒนาประสิทธิภาพวัสดุดูดซับจำพวกถ่านกัมมันต์ที่ได้จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรให้มีความสามารถในการกำจัดสีย้อมออกจากน้ำทิ้งมากขึ้น ด้วยการสร้างรูพรุนเมโซพอร์เพิ่มเติมในโครงสร้างของถ่านกัมมันต์ ในงานศึกษาวิจัยนี้ถ่านกัมมันต์เตรียมได้จากเหง้ามันสำปะหลัง โดยใช้ $ZnCl_2$ เป็นตัวกระตุ้นผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชันแบบหม้อเดียวตามด้วยการคาร์บอนไนเซชันของไฮโดรชาร์ที่ได้ ณ อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ซึ่งพบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากเหง้ามันสำปะหลังให้มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงสุด คือ การใช้ $ZnCl_2$ ในอัตราส่วนต่อเหง้ามันสำปะหลังเท่ากับ 3 โดยมวล (3.0Z-AC) ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีโครงสร้างรูพรุนแบบสองลักษณะในช่วงไมโครพอร์และเมโซพอร์ โดยมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงถึง 1,405 ตารางเมตรต่อกรัม และมีปริมาตรรูพรุนไมโครพอร์และเมโซพอร์มากถึง 0.42 และ 0.54 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับจากการศึกษาการดูดซับสีย้อมเมทิลีน บลู ในน้ำสีสังเคราะห์ด้วยถ่านกัมมันต์ดังกล่าว พบว่า มีพฤติกรรมการดูดซับแบบชั้นเดียวสอดคล้องกับแบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์ ($R^2 = 0.9993$) โดยมีระยะเวลาสมดุลในการดูดซับเมทิลีน บลู 210 นาที และมีค่าความจุการดูดซับเมทิลีน บลู สูงสุดถึง 274 มิลลิกรัมต่อกรัม ขณะที่ถ่านกัมมันต์ทางการค้าใช้เวลาในการดูดซับถึง 270 นาที และมีค่าการดูดซับสูงสุดเพียง 260 มิลลิกรัมต่อกรัม

Abstract

The textile dyeing industry is one of the important midstream industries for textile industry in Thailand. This production process requires dyes as the main components. When such contaminated wastewater is discharged into public water, this negatively affects surrounding ecosystems and human health. The present work aims to improve the adsorption efficiency of agricultural residues derived activated carbons in removing dyes from textile dyeing effluent by the creation of the mesopores into the carbon structure. The activated carbons were prepared from cassava rhizome using $ZnCl_2$ as an activating agent and were fabricated by onepot hydrothermal carbonization, followed by the carbonization of the obtained hydrochars at 800 °C. The result demonstrated that the optimal condition to obtain activated carbons with a high specific surface area and the largest mesopore volume was using the mass ratio of $ZnCl_2$ to cassava rhizome of 3 (3.0Z-AC). The 3.0Z-AC possessed bimodal pore size distribution in the range of the micro and mesopores and had the specific surface area, the micropore- and mesopore volumes of 1,405 m²/g, 0.42 cm³/g and 0.54 cm³/g, respectively. Such a mesoporous activated carbon was used as the adsorbent to investigate the adsorption efficiency of methylene blue in dye-contaminated water. The adsorption behavior of methylene blue on 3.0Z-AC was monolayer adsorption based on the Langmuir isotherm model ($R^2 = 0.9993$). The equilibrium time of 210 minutes and adsorption capacity of 274 mg/g were found for this sample, while the equilibrium time of the commercial activated carbon is 270 minutes and its maximum adsorption capacity is 260 mg/g.

คำสำคัญ: การดูดซับ ถ่านกัมมันต์ ไฮโดรชาร์ เหง้ามันสำปะหลัง รูพรุนเมโซพอร์ เมทิลีน บลู

Keywords: Adsorption, Activated carbons, Hydrochar, Cassava rhizome, Mesopores, Methylene blue

¹ กรมวิทยาศาสตร์บริการ

² สาขาวิชาวิทยาศาสตร์กายภาพ (เคมี) คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

Corresponding author e-mail address: Jenjira@dss.go.th

1. บทนำ (Introduction)

อุตสาหกรรมฟอกย้อมเป็นอุตสาหกรรมกลางน้ำที่สำคัญของอุตสาหกรรมสิ่งทอและเครื่องนุ่งห่ม เป็นกระบวนการเปลี่ยนวัสดุสิ่งทอในรูปวัตถุดิบที่เป็นเส้นด้ายหรือผ้าดิบให้เป็นวัสดุสำเร็จ เพื่อนำไปจำหน่ายแก่ผู้บริโภคได้โดยตรงหรือจำหน่ายเป็นวัตถุดิบให้กับอุตสาหกรรมปลายน้ำต่อไป เช่น อุตสาหกรรมเสื้อผ้าสำเร็จรูป และเครื่องนุ่งห่ม เป็นต้น กระบวนการฟอกย้อมส่วนใหญ่เป็นกระบวนการทางเคมีที่อาศัยการปรับเปลี่ยนสมบัติของเส้นใยโดยการใช้สารเคมีและสีย้อมที่เหมาะสมโดยอาศัยน้ำเป็นตัวกลาง อุตสาหกรรมฟอกย้อมจึงเป็นอุตสาหกรรมที่ต้องใช้น้ำปริมาณมากในกระบวนการผลิต โดยอาจมากถึง 1,300 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน [1-2] ทั้งนี้ปัญหาหนึ่งที่พบ คือ การปล่อยน้ำเสียที่มีสี แม้ว่าสีที่อยู่ในน้ำทิ้งจะมีปริมาณเพียงเล็กน้อย แต่ก็สามารถมองเห็นได้ชัดเจน และเกิดทัศนียภาพที่ไม่ชวนมองแก่ผู้ใช้แหล่งน้ำ สีย้อมทั่วไปแม้ว่าจะมีความเป็นพิษต่ำ แต่สารประกอบและการสลายตัวของผลิตภัณฑ์ในสีย้อมสามารถทำให้ความเป็นพิษเพิ่มขึ้นได้ [3] สีที่ใช้ในอุตสาหกรรมฟอกย้อมมีหลายชนิด เช่น สีย้อมแอซิก, สีย้อมรีด, สีย้อมเบสิก, สีย้อมเร็กต์ และสีย้อมซูเปอร์ เป็นต้น [1] สีย้อมสังเคราะห์เหล่านี้ส่วนใหญ่จะละลายน้ำได้ดี มีโครงสร้างโมเลกุลขนาดใหญ่และซับซ้อนจึงไม่สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติในสภาวะปกติ [4] อีกทั้งพบว่า สีที่พบในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมส่วนใหญ่เป็นอนุภาคคอลลอยด์สามารถบดบังแสงอาทิตย์ที่ส่องผ่านลงสู่ผิวน้ำ จนพืชน้ำไม่สามารถสังเคราะห์ด้วยแสงได้ ทำให้ปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำลดลง ส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ ในน้ำตลอดจนห่วงโซ่อาหารของสิ่งมีชีวิตในระบบนิเวศ ดังนั้นน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมต้องผ่านระบบบำบัดเพื่อกำจัดสารต่าง ๆ รวมทั้งสีที่ตกค้างก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะหรือแหล่งน้ำตามธรรมชาติ ทั้งนี้มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงานตามที่กระทรวงอุตสาหกรรมกำหนด กำหนดไว้ว่า สีของน้ำทิ้ง (Color) จากโรงงานจะต้องไม่เกิน 300 ADMI [5] ซึ่งพบว่า โรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอไทยจำนวนมากยังไม่สามารถกำจัดสีจากน้ำทิ้งให้เป็นไปตามมาตรฐานดังกล่าวได้ (มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 400-700 ADMI) [6] การกำจัดสีย้อมที่ปนเปื้อนในน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมทำได้หลายวิธีทั้งทางกายภาพทางเคมี และทางชีวภาพ วิธีบำบัดทางเคมีและชีวภาพ เช่น การตกตะกอนด้วยสารเคมี การออกซิไดซ์ด้วยโอโซน หรือการบำบัดแบบใช้ออกซิเจน เป็นต้น [7] ถึงแม้จะมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดสีย้อม และใช้ได้กับสีย้อมหลากหลายชนิด แต่จำเป็นต้องใช้ร่วมกับเครื่องมือที่มีลักษณะจำเพาะที่ใช้พลังงานสูง และเกิดผลิตภัณฑ์พลอยได้ที่ต้องนำไปกำจัดเพิ่มเติม วิธีทางกายภาพจึงเป็นวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย เช่น การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ และ

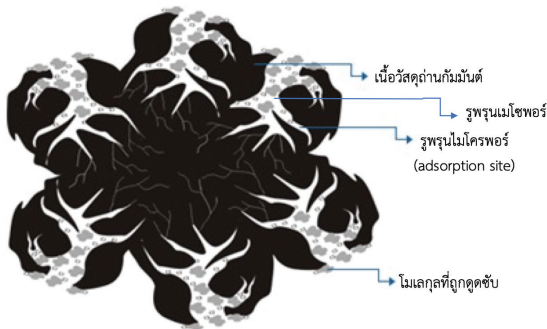
การกรองผ่านด้วยเยื่อกรอง [1,8] และเป็นเทคโนโลยีที่มีความเป็นไปได้ที่จะพัฒนาให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น เทคโนโลยีที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการกรองผ่านด้วยเยื่อกรอง วิธีดูดซับสีด้วยถ่านกัมมันต์เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมมากกว่า เนื่องจากสามารถใช้ได้กับการกำจัดสีย้อมในน้ำทิ้งที่มีความเข้มข้นสูงในสภาวะปกติ กระบวนการไม่ซับซ้อน และต้นทุนต่ำ

ถ่านกัมมันต์สามารถผลิตจากวัตถุดิบตั้งต้นหลายชนิด เช่น พอลิเมอร์/เรซิน เศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร และถ่านหิน เป็นต้น วัตถุดิบตั้งต้นเหล่านี้จะผ่านกระบวนการ 2 ขั้นตอน ได้แก่ การคาร์บอนไนซ์ (Carbonization) เป็นกระบวนการทำให้ปริมาณคาร์บอนในวัตถุดิบตั้งต้นสูงขึ้น โดยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 500-800 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะไร้อากาศ หรือจำกัดอากาศทำให้มีออกซิเจนน้อย จากนั้นถ่านจะถูกเพิ่มพื้นที่ผิว (Surface area) และปริมาตรรูพรุน (Pore volume) ด้วยขั้นตอนการกระตุ้น (Activation) จนได้ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) โดยการกระตุ้น (Activation) มี 2 ประเภท ได้แก่ 1) การกระตุ้นด้วยสารเคมี (Chemical activation) ตัวกระตุ้นที่นิยมใช้ เช่น ซิงค์คลอไรด์ (Zinc chloride; $ZnCl_2$) กรดฟอสฟอริก (Phosphoric acid; H_3PO_4) และโปตัสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium hydroxide; KOH) เป็นต้น 2) การกระตุ้นทางกายภาพ (Physical activation) โดยใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) หรือไอน้ำ เป็นตัวออกซิไดส์ภายใต้อุณหภูมิสูงประมาณ 800-1,000 องศาเซลเซียส [9] กระบวนการกระตุ้นโดยทั่วไปมักจะถูกดำเนินการหลังวัตถุดิบตั้งต้นเปลี่ยนสภาพเป็นวัสดุคาร์บอนจากการ Carbonization แล้ว (Post-activation) การกระตุ้นนี้จะทำให้โครงสร้างทางกายภาพของถ่านเกิดรูพรุนหรือรอยแตกขนาดเล็กมากขึ้น ด้วยกลไกที่แตกต่างกันขึ้นกับชนิดของตัวกระตุ้น

กระบวนการดูดซับ (Adsorption) บนวัสดุดูดซับ (Adsorbent) ที่เป็นของแข็ง เป็นกระบวนการที่ทำให้โมเลกุลของสาร (Adsorbate) ติดบนผิวของตัววัสดุดูดซับ โดยทั่วไปประสิทธิภาพการดูดซับจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณรูพรุนใน adsorbent [10] เนื่องจากถ่านกัมมันต์มีรูพรุนขนาดเล็กผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 2 นาโนเมตร ที่เรียกว่า รูพรุนไมโครพอร์ (Micropore) เป็นจำนวนมาก รูพรุนชนิดนี้จะทำหน้าที่เป็นตำแหน่งดูดซับ Adsorbate (Adsorption site) ดังนั้น ถ่านกัมมันต์โดยทั่วไปจึงมีพื้นที่ผิวจำเพาะ (Surface area) ในการดูดซับ Adsorbate มากนั่นเอง [11] การดูดซับของ Adsorbate ภายในรูพรุนเป็นได้ทั้งการดูดซับทางกายภาพที่เกิดจากแรงดึงดูดระหว่าง Adsorbate และรูพรุนของ Adsorbent อย่างอ่อน ๆ ด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ และการดูดซับทางเคมี หากบนวัสดุดูดซับมีหมู่ไฮดรอกซิล หมู่คาร์บอกซิล หรือหมู่อะมิโน (ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบที่นำมาใช้ในการผลิตวัสดุดูดซับ) ที่สามารถยึดจับไอออน

หรือโมเลกุลที่มีประจุลบและบวกของ Adsorbate ได้ [3]

เนื่องด้วยถ่านกัมมันต์เป็นวัสดุที่มีรูพรุนไมโครพอร์จำนวนมาก จึงมักถูกใช้เป็นวัสดุดูดซับสารต่าง ๆ อย่างไรก็ตาม วัสดุที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะมาก ไม่ได้มีค่าความจุการดูดซับ (Adsorption capacity) สูงเสมอไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งสารที่มีโครงสร้างโมเลกุลขนาดใหญ่ ดังเช่น สีย้อม (ในงานศึกษาวิจัยนี้ Adsorbate คือ โมเลกุลสีย้อม) เนื่องจากหากมีการสะสมของโมเลกุลสีย้อมบนพื้นผิวของตัวถ่านกัมมันต์บางจุดระหว่างการดูดซับ จะเกิดการอุดตันของรูพรุนไมโครพอร์ ทำให้โมเลกุลสีย้อมไม่สามารถแพร่เข้าสู่ Adsorption site ในรูพรุนไมโครพอร์ได้อย่างทั่วถึง [12] ส่งผลให้อัตราการแพร่ผ่าน (Diffusion rate) ของโมเลกุลสีย้อมไปตาม Adsorption site ช้า ประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมของถ่านกัมมันต์จึงถูกลดทอนลง [10] ข้อจำกัดดังกล่าวนี้สามารถปรับปรุงได้โดยการเพิ่มรูพรุนที่ใหญ่ขึ้นที่เรียกว่า รูพรุนเมโซพอร์ (Mesopores) ซึ่งเป็นรูพรุนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 2-50 นาโนเมตร ในโครงสร้างของถ่านกัมมันต์ (รูปที่ 1) เพื่อช่วยอำนวยความสะดวกในการแพร่ผ่านของโมเลกุลสีย้อมไปยัง Adsorption site ให้ทั่วถึงและ เร็วขึ้น ซึ่งจะช่วยพัฒนาประสิทธิภาพโดยรวมของถ่านกัมมันต์ในการดูดซับสีย้อมให้ดียิ่งขึ้น [13]



รูปที่ 1 แบบจำลองการแพร่ผ่านของโมเลกุลสีย้อมในวัสดุดูดซับ (ดัดแปลงจาก [14])

มีงานวิจัยมากมายที่กล่าวถึงบทบาทของรูพรุนเมโซพอร์ต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ Adsorbate ชนิดต่าง ๆ เช่น Asouhidou และคณะ [15] พบว่า Adsorption capacity ของถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนเมโซพอร์ในการดูดซับสีย้อม Rhodamine blue และ Remazol red 3BS สูงกว่าถ่านกัมมันต์ทางการค้าที่มีรูพรุนไมโครพอร์เพียงอย่างเดียว ต่อมา Libbrecht และคณะ [16] ได้ทดสอบความสามารถในการดูดซับ Bisphenol-A (BPA) ของคาร์บอนรูพรุนเมโซพอร์ (Mesoporous carbon) และถ่านกัมมันต์ทางการค้า พบว่าคาร์บอนรูพรุนเมโซพอร์ใช้เวลาในการดูดซับ BPA จนเข้าสู่สภาวะสมดุลประมาณ 20-60 นาที (ขึ้นกับรูปทรงของรูพรุน) ขณะที่ถ่านกัมมันต์ทางการค้าใช้เวลาถึง 90 นาที นอกจากการดูดซับของ Adsorbate ในช่องเหลือ แล้วการมีโครงสร้าง

รูพรุนเมโซพอร์ในถ่านกัมมันต์ยังเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับแก๊สอีกด้วย เช่น รูพรุนเมโซพอร์ทำให้การดูดซับ CO_2 (Equilibrium time) ของถ่านกัมมันต์เข้าสู่สมดุลได้เร็วขึ้นโดยเฉลี่ย 30-40% [17] รวมทั้งยังทำให้ Adsorption capacity ของ CO_2 เพิ่มขึ้นอีกด้วย นอกจากนี้การที่ถ่านกัมมันต์มีรูพรุนเมโซพอร์ในโครงสร้าง ยังทำให้การปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันทางเคมีที่เป็นประโยชน์ต่อการดูดซับมีประสิทธิภาพมากขึ้นโดยที่ยังคงคุณลักษณะของถ่านกัมมันต์ที่มี Surface area สูงไว้ได้เช่นเดิม เนื่องจากรูพรุนเมโซพอร์มีปริมาตรของรูพรุน (Pore volume) มาก ทำให้มีพื้นที่ให้หมู่ฟังก์ชันถูกเพิ่มเติมเข้าไปได้ง่าย ลดโอกาสที่รูพรุนไมโครพอร์จะถูกบล็อกด้วยหมู่ฟังก์ชันที่เติมแต่ง ซึ่งการอุดตันของรูพรุนไมโครพอร์เป็นสาเหตุทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับลดลง [18] การเพิ่มรูพรุนเมโซพอร์ในถ่านกัมมันต์สามารถทำได้โดยการเติมสารกำหนดโครงสร้าง (Templates) เช่น ตัวกระตุ้นที่ก่อให้เกิดรูพรุน ซิลิกาที่มีรูพรุนเมโซพอร์ โคพอลิเมอร์แบบบล็อก และโลหะออกไซด์ที่มีขนาดอนุภาคระหว่าง 2-50 นาโนเมตร เป็นต้น [14] ระหว่างการเตรียมถ่านกัมมันต์ เมื่อสารดังกล่าวถูกกำจัดออกด้วยความร้อนหรือสารเคมี (ขึ้นอยู่กับชนิดของ Template ที่ใช้) จะทิ้งรูพรุนเมโซพอร์ไว้ในโครงสร้างของถ่านกัมมันต์นั่นเอง

ในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นพัฒนาถ่านกัมมันต์จากเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร คือ เหน้จามันสำปะหลัง ให้มีความสามารถในการดูดซับสีย้อมดีขึ้น ด้วยการเติมรูพรุนเมโซพอร์ในโครงสร้างถ่านกัมมันต์ เนื่องจากวัสดุชีวมวลมีองค์ประกอบที่หลากหลายและโครงสร้างที่ซับซ้อน ทำให้ถ่านกัมมันต์ที่ได้ส่วนใหญ่มักมีรูพรุนไมโครพอร์ที่เล็กมาก และมีลักษณะปิดตาย [19] เมื่อใช้เป็นวัสดุดูดซับจะทำให้การสัมผัสระหว่างพื้นผิวของ Adsorbent และ Adsorbate ไม่ทั่วถึง เป็นเหตุให้ประสิทธิภาพการดูดซับโดยรวมลดลง การสร้างรูพรุนเมโซพอร์จะดำเนินการโดยการเติมซิงค์คลอไรด์ (ZnCl_2) ที่เป็นสารก่อรูพรุนในปริมาณต่าง ๆ ระหว่างการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนในเซชันแบบหม้อเดียว กล่าวคือ วัตถุดิบตั้งต้นคาร์บอนและตัวกระตุ้นจะถูกผสมรวมกันตั้งแต่ต้นในขั้นตอนเดียวในตุ๋นกลางที่เป็นน้ำ ดังนั้นกระบวนการกระตุ้นและการคาร์บอนในเซชันเกิดขึ้นพร้อมกัน ไม่จำเป็นต้องกระตุ้นถ่านไฮโดรคาร์บอนด้วยสารเคมีอีกครั้งเหมือนดังวิธีทั่วไป ทำให้ลดขั้นตอนในการทำงาน สะดวกรวดเร็ว และลดการใช้พลังงานในการสังเคราะห์ สีย้อมที่ใช้เป็นต้นแบบในการศึกษาครั้งนี้ คือ เมทิลีนบลู (Methylene blue) ซึ่งเป็นสีที่ละลายน้ำได้ดี และใช้ทั่วไปในการฟอกย้อมผ้า กระดาษ ขนสัตว์ ผ้าบาติก เป็นต้น ดังนั้น งานวิจัยนี้นอกจากจะได้ถ่านกัมมันต์ที่มีประสิทธิภาพสูงในการดูดซับสีย้อมด้วยวิธีที่รวดเร็วแล้ว ยังเป็นการช่วยเพิ่มมูลค่าของวัสดุที่เหลือทิ้งทางการเกษตรอีกด้วย

2. วิธีการวิจัย (Experimental methods)

2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

2.1.1 X-ray Powder Diffraction (XRD), ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance

2.1.2 High throughput surface area and porosity analyzer, ยี่ห้อ Micromeritics รุ่น ASAP2460

2.1.3 CHN determinator, ยี่ห้อ Leco รุ่น TruSpec

2.1.4 Scanning electron microscopy-Energy dispersive spectrometer (SEM-EDS), ยี่ห้อ JEOL

รุ่น JSM-6610LV

2.1.5 ตู้อบลมร้อน, ยี่ห้อ Binder รุ่น FD 115

2.1.6 Teflon chamber autoclave ขนาด 125 ml

2.1.7 เครื่องชั่งดิจิตอล, ยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น XPE 50

2.1.8 เครื่องปั่นเหวี่ยงตกตะกอน, ยี่ห้อ Eppendorf รุ่น 5418R

2.1.9 เครื่องเขย่าสารละลายแบบควบคุมอุณหภูมิ (Shaking Incubator), ยี่ห้อ SSERIKER II รุ่น VS-8480SFN

2.1.10 เครื่อง UV-Visible Spectrometers, ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น U-2700

2.2 สารเคมี

2.2.1 เมทิลีนบลู (Methylene blue hydrate) ความบริสุทธิ์อย่างน้อย 95%, ผลิตโดยบริษัท Sigma Aldrich

2.2.2 ซิงค์คลอไรด์ (Zinc chloride: $ZnCl_2$, reagent grade) ความบริสุทธิ์อย่างน้อย 98%, ผลิตโดยบริษัท Sigma Aldrich

2.2.3 กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid fuming 37%: HCl, ACS grade) 37%, ผลิตโดยบริษัท Merck

2.3 วัตถุดิบตัวอย่าง

เหง้ามันสำปะหลัง จากบริษัท ทรัพย์ทิพย์ จำกัด จังหวัดลพบุรี

2.4 การเตรียมตัวอย่างเหง้ามันสำปะหลังก่อนนำไปผลิตเป็นไฮโดรซาร์และถ่านกัมมันต์

นำเหง้ามันสำปะหลังล้างผึ่งแห้งแล้วมาบดให้มีขนาดประมาณ 1X1 มิลลิเมตร (ดังรูปที่ 2) ด้วยเครื่องตัดประเภท Universal cutting mill (FRITSCH, Germany) แล้วเก็บไว้ในภาชนะที่แห้งและปิดสนิท



รูปที่ 2 เหง้ามันสำปะหลังแห้งที่บดเป็นผงละเอียด

2.5 การเตรียมถ่านไฮโดรซาร์และถ่านกัมมันต์จากเหง้ามันสำปะหลังด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชันแบบหม้อเดียว (One-pot hydrothermal carbonization synthesis; One pot-HTC)

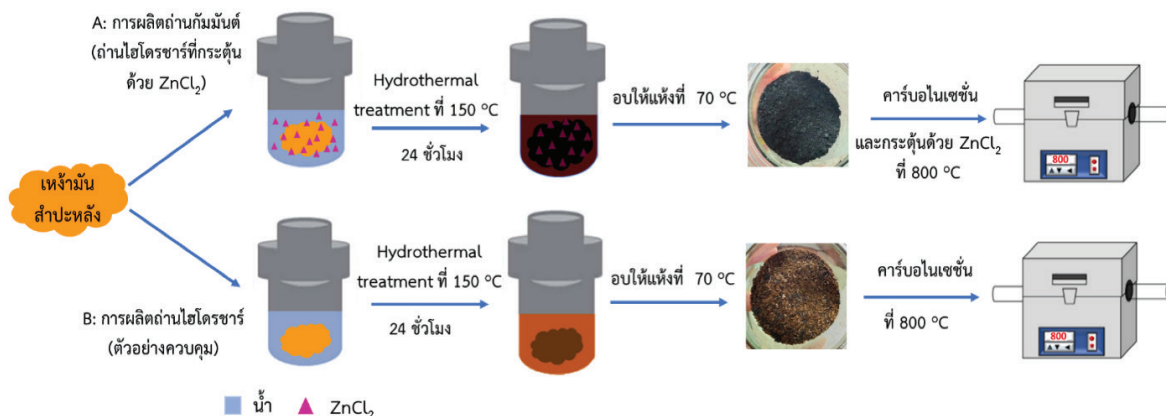
2.5.1 ถ่านกัมมันต์จากเหง้ามันสำปะหลังจะถูกเตรียมด้วยกระบวนการ one pot-HTC ตามที่แสดงในรูปที่ 3A กล่าวคือ ผสมเหง้ามันสำปะหลังแห้งและซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) เข้าด้วยกันในอัตราส่วนโดยมวลระหว่าง $ZnCl_2$ ต่อเหง้ามันสำปะหลัง เท่ากับ 0.25, 0.5, 1, 2 และ 3 ในน้ำปราศจากไอออนปริมาตร 50 มิลลิลิตร กวนอย่างต่อเนื่อง ณ อุณหภูมิห้องด้วยแท่งคนแม่เหล็กเป็นเวลา 2 ชั่วโมง

2.5.2 จากนั้นถ่ายเทสารผสมทั้งหมดลงในหม้อแรงดันสูงที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 125 มิลลิลิตร และให้ความร้อนในเตาอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

2.5.3 หลังจากนำหม้อแรงดันสูงออกจากเตาอบและทิ้งให้เย็น จากนั้นนำสารผสมที่ได้ไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิประมาณ 70 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไปเผากระตุ้นภายใต้บรรยากาศการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

2.5.4 จากนั้นล้างถ่านกัมมันต์ที่ได้ด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1 N โดยการกวนด้วยแท่งคนแม่เหล็กเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงเป็นเวลา 30 นาที ที่ความเร็ว 11,000 รอบต่อนาที และตามด้วยล้างน้ำร้อนปราศจากไอออนตามขั้นตอนเดียวกับการล้างด้วยกรดประมาณ 2-3 ครั้ง จนกระทั่งน้ำล้างมีสภาวะ pH ที่เป็นกลาง หรือเท่ากับ pH ของน้ำปราศจากไอออน เพื่อการเปรียบเทียบโครงสร้างรูพรุน ถ่านไฮโดรซาร์จะถูกเตรียมด้วยขั้นตอนเดียวกันกับถ่านกัมมันต์เพียงแต่ $ZnCl_2$ จะไม่ถูกผสมไปกับเหง้ามันสำปะหลัง ดังรูป 3B

2.5.5 ตัวอย่างทั้งหมดจะถูกนำไปวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวจำเพาะตามทฤษฎีของ Brunauer-Emmette-Teller (SBET), การกระจายตัวของรูพรุน (Pore size distribution; PSD), ปริมาตรรูพรุนรวม, ปริมาตรรูพรุนไมโครพอร์ และปริมาตรรูพรุนเมโซพอร์ เพื่อหาอัตราส่วนระหว่างเหง้ามันสำปะหลังต่อ $ZnCl_2$ ในการเตรียมถ่านกัมมันต์ที่ให้พื้นที่ผิวจำเพาะสูงและปริมาตรรูพรุนเมโซพอร์มากที่สุด



รูปที่ 3 ภาพรวมขั้นตอนการเตรียม (A) ถ่านกัมมันต์ และ (B) ถ่านไฮโดรคาร์ (ตัวอย่างควบคุม)

2.6 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของวัสดุดูดซับ

วัสดุดูดซับคาร์บอนที่ได้จะถูกวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ ได้แก่

2.6.1 พื้นที่ผิวจำเพาะตามทฤษฎีของเบท (S_{BET}), ปริมาตรรูพรุน และการกระจายของรูพรุนขนาดต่าง ๆ โดยใช้ทฤษฎีการคำนวณ The 2D-Non-local density functional theory (2D-NLDFT)

2.6.2 ลักษณะสัณฐานวิทยาของตัวอย่างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM)

2.6.3 โครงสร้างออสซิลโลกราฟีของตัวอย่างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction; XRD)

2.7 ศึกษาประสิทธิภาพของการดูดซับสีย้อมในน้ำ

2.7.1 การหาเวลาเข้าสู่สมดุล (Equilibrium time) ของการดูดซับ

ซึ่งตัวอย่างถ่านกัมมันต์ปริมาณ 70 มิลลิกรัม เติมลงในสารละลายเมทิลีน บลู ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัม ต่อลิตร ปริมาตร 250 มิลลิลิตร ในขวดรูปชมพู่ปริมาตร 500 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปเขย่าด้วยความเร็ว 250 รอบต่อนาที ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 330 นาที เก็บตัวอย่าง ณ เวลาต่าง ๆ เพื่อหาระยะเวลาที่เข้าสู่ภาวะสมดุล ทำการแยกถ่านกัมมันต์ออกจากสารละลายด้วยการปั่นเหวี่ยงแล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Visible spectrometer ที่ความยาวคลื่น 664 นาโนเมตร จากนั้นสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมเมทิลีน บลู และปริมาณของเมทิลีน บลู ที่ถูกดูดซับบนถ่านกัมมันต์ กับเวลาที่ใช้ในการดูดซับ โดยประสิทธิภาพการดูดซับและปริมาณของเมทิลีน บลู

ที่ถูกดูดซับบนถ่านกัมมันต์สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (1) และ (2) ตามลำดับ [20]

$$\text{ประสิทธิภาพการดูดซับ} = \frac{(C_0 - C_e)}{C_0} \times 100 \quad (1)$$

(ร้อยละ)

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

โดยที่ q_e คือ ปริมาณเมทิลีนบลูที่ถูกดูดซับบนถ่านกัมมันต์ (มิลลิกรัมต่อกรัมของวัสดุดูดซับ; mg/g), V คือ ปริมาตรของสารละลาย (ลิตร; L) และ m คือ ปริมาณของถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการทดลองการดูดซับ (กรัม; g), C_0 คือ ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของเมทิลีน บลู (มิลลิกรัมต่อลิตร; mg/L) หาได้จากสมการที่ได้กราฟมาตรฐานของสารละลายเมทิลีน บลู ที่สร้างขึ้น และ C_e คือ ค่าความเข้มข้นของเมทิลีน บลู ณ ภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร; mg/L) หาได้จากสมการที่ได้กราฟมาตรฐานของสารละลายเมทิลีน บลู ที่สร้างขึ้น

2.7.2 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับและการหาค่าการดูดซับสูงสุดเมทิลีน บลู

การวิเคราะห์ไอโซเทอมการดูดซับจะใช้อธิบายรูปแบบของการดูดซับเมทิลีน บลู บนถ่านกัมมันต์ เริ่มจากการชั่งตัวอย่างถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ ประมาณ 70 มิลลิกรัม จากนั้นเติมลงในสารละลายเมทิลีน บลู ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ได้แก่ 20, 50, 100 150, และ 200 มิลลิกรัม ต่อลิตร ปริมาตร 250 มิลลิลิตร ในขวดรูปชมพู่ปริมาตร 500 มิลลิลิตร นำไปเขย่าด้วยอัตรา 250 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จนเข้าสู่ภาวะสมดุลการดูดซับ ทำการแยกถ่านกัมมันต์ ออกจากสารละลายด้วยการปั่นเหวี่ยงแล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-visible spectrometer ที่ความยาวคลื่น 664 นาโนเมตร

การอธิบายพฤติกรรม การดูดซับและค่าการดูดซับ เมทิลลีน บลู สูงสุดจะอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไอโซเทอมการดูดซับ (Isotherm model) ของแลงเมียร์ (Langmuir) และฟรอนด์ลิช (Freundlich) ซึ่งได้ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลองของการดูดซับไอโซเทอมแลงเมียร์ มีสมมติฐานว่า ตัวถูกดูดซับจะเข้าปกคลุมพื้นที่ผิวของตัวดูดซับเพียงชั้นเดียว (Monolayer formation) พื้นผิวของตัวดูดซับมีลักษณะแบบเดียวกันทั้งหมด และไม่มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ โดยสมการเส้นตรงของแลงเมียร์ไอโซเทอม แสดงดังสมการที่ (3) [21]

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

จากสมการดังกล่าว เมื่อเขียนกราฟระหว่าง C_e/q_e กับ C_e ค่า q_m และ K_L สามารถหาได้จากความชัน (Slope) และจุดตัดแกน Y ตามลำดับ โดยที่ q_m คือ ค่าการดูดซับสูงสุดแบบแลงเมียร์ไอโซเทอมของวัสดุดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัมของวัสดุดูดซับ), ขณะที่ K_L คือค่าคงที่ของแลงเมียร์ไอโซเทอมที่อุณหภูมิหนึ่ง (ลิตรต่อมิลลิกรัม)

ขณะที่ไอโซเทอมแบบฟรอนด์ลิช มีสมมติฐานว่า ตัวถูกดูดซับจะเข้าไปยึดติดเป็นชั้น ๆ (Multilayer formation) บนพื้นผิวของตัวดูดซับ เนื่องจากพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีความไม่เป็นเนื้อเดียวกัน โดยสมการเส้นตรงของฟรอนด์ลิชไอโซเทอม แสดงดังสมการที่ (4) [21]

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

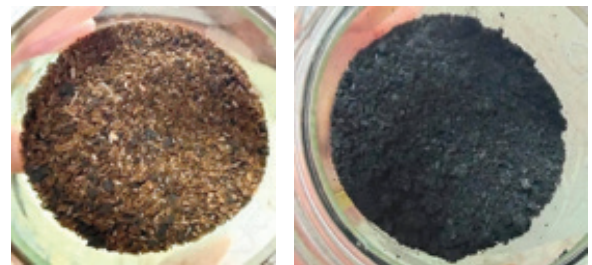
เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\log q_e$ กับ $\log C_e$ จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ $1/n$ และมีจุดตัดแกน Y เท่ากับ $\log K_f$ โดยค่า n และ K_f คือ ค่าคงที่แสดงถึงความแข็งแรงในการดูดซับ และค่าคงที่ของฟรอนด์ลิชที่แสดงถึงความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม) ตามลำดับ ถ้า $1/n$ น้อยกว่า 1 แสดงว่า ปริมาณพื้นผิวบนตัวดูดซับมีปริมาณที่จำกัดที่จะใช้ในการดูดซับ [22]

3. ผลและวิจารณ์ (Results and discussion)

3.1 ลักษณะทางกายภาพของไฮโดรซาร์ และถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระบวนการ One-pot HTC

ไฮโดรซาร์ที่ได้จากการกระบวนการ HTC (รูป 4A, ตัวอย่างก่อนคาร์บอนไนเซชันที่ 800 องศาเซลเซียส) มีสีเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลเข้มขึ้นจากวัตถุดิบเหง้ามันสำปะหลัง (รูปที่ 2) เนื่องจากเกิดการรวมตัวของสารประกอบออกซิเจนเป็นสารประกอบใหม่ที่มีขนาดใหญ่ภายในโครงสร้าง [23] ขณะที่

ที่ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ (รูป 4B) มีสีดำ เป็นผลมาจากตัวกระตุ้นที่ใช้ คือ $ZnCl_2$ มีฤทธิ์ในการเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์โมเลกุลขนาดใหญ่ ส่งผลให้สารอินทรีย์ดังกล่าวถูกเปลี่ยนเป็นคาร์บอนได้มากขึ้น จึงปรากฏเป็นสีดำของสารคาร์บอน [24]

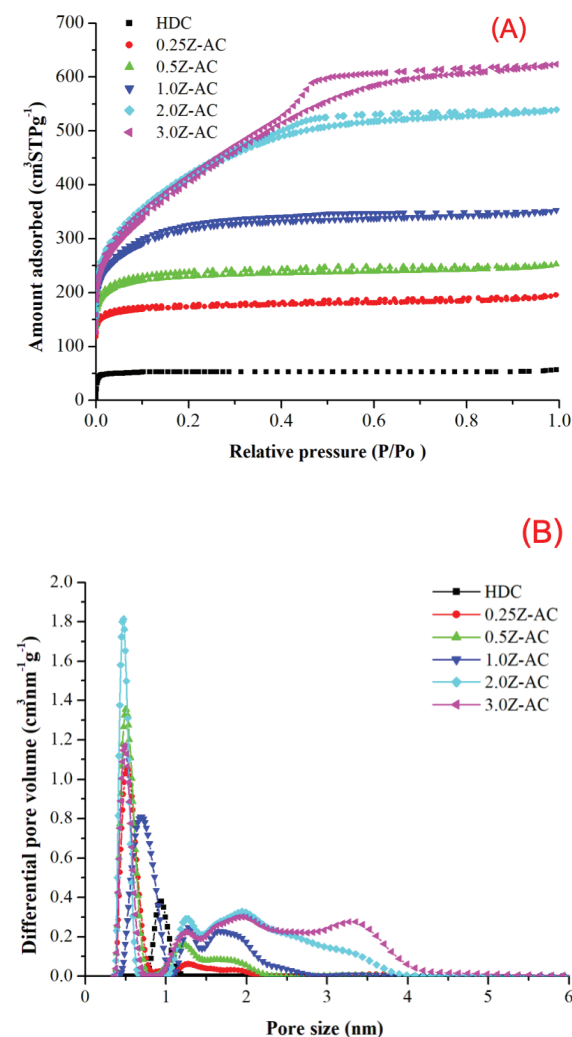


รูปที่ 4 ลักษณะทางกายภาพของ (A) ไฮโดรซาร์ และ (B) ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ ที่ได้จากการกระบวนการ One-pot HTC

3.2 ลักษณะโครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์

รูปที่ 5A และ 5B แสดงไอโซเทอมของการดูดซับแก๊สไนโตรเจน (Nitrogen adsorption isotherm) ที่อุณหภูมิ 77 K และความหนาแน่นของรูพรุนขนาดต่าง ๆ ที่กระจายตัวอยู่บนพื้นผิวของถ่านไฮโดรซาร์จากเหง้ามันสำปะหลัง (HDC) และถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ (xZ-AC) พบว่า ไอโซเทอมของถ่านไฮโดรซาร์เป็นแบบ I โดยจำแนกตามระบบของ IUPAC [25] อธิบายได้ว่า HDC ประกอบไปด้วยรูพรุนขนาดเล็กในช่วงไมโครพอร์เป็นส่วนใหญ่ สอดคล้องกับการกระจายตัวของรูพรุนที่แสดงดังรูป 5B โดยรูพรุนที่มีความหนาแน่นมากที่สุดในตัวอย่างนี้มีขนาดประมาณ 0.95 นาโนเมตร โดยมีพื้นผิวจำเพาะ, ปริมาตรรูพรุนรวม และปริมาตรรูพรุนไมโครพอร์ เท่ากับ $207 \text{ m}^2/\text{g}$, $0.09 \text{ cm}^3/\text{g}$ และ $0.08 \text{ cm}^3/\text{g}$ ตามลำดับ (ตารางที่ 1) ขณะที่ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ ต่อเหง้ามันสำปะหลังในอัตราส่วนเท่ากับ 0.25 (0.25Z-AC), 0.5 (0.5Z-AC) และ 1.0 (1.0Z-AC) โดยมวล พบไอโซเทอมเป็นแบบผสมระหว่าง I และ IV ปรากฏ Hysteresis loop ขนาดเล็กบนไอโซเทอมการดูดซับ ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะดังกล่าวนี้นี้เป็นลักษณะของวัสดุที่มีรูพรุนเมโซพอร์ (ขนาดระหว่าง 2-50 นาโนเมตร) ไอโซเทอมเป็นแบบผสมนี้ บ่งบอกว่าพื้นผิวของทั้งสามตัวอย่างประกอบไปด้วยรูพรุนไมโครพอร์เกือบทั้งหมด และเริ่มมีการก่อตัวของรูพรุนเมโซพอร์อยู่บ้างแต่ในปริมาณที่น้อยมาก ดังแสดงในรูปที่ 5B โดยพื้นผิวจำเพาะ, ปริมาตรรูพรุนรวม, ปริมาตรรูพรุนไมโครพอร์ และปริมาตรรูพรุนเมโซพอร์ของ 0.25Z-AC, 0.5Z-AC และ 1.0Z-AC อยู่ในช่วง $678\text{-}1172 \text{ m}^2/\text{g}$, $0.30\text{-}0.54 \text{ cm}^3/\text{g}$, $0.28\text{-}0.44 \text{ cm}^3/\text{g}$ และ $0.02\text{-}0.10 \text{ cm}^3/\text{g}$ ตามลำดับ สำหรับถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นไฮโดรซาร์ด้วย $ZnCl_2$ ในอัตราส่วนที่มากขึ้น คือ 2 (2.0Z-AC) และ 3 (3.0Z-AC) เกิดเป็นไอโซเทอมเป็นแบบ IV ปรากฏ

Hysteresis loop ที่ชัดเจนบนไอโซเทอมการดูดซับ สอดคล้องกับการกระจายตัวของรูพรุนที่เกิดขึ้น และพบว่า ทั้งสองตัวอย่างมีปริมาณรูพรุนเมโซพอร์มากกว่า HDC, 0.25Z-AC, 0.5Z-AC และ 1.0Z-AC โดยพื้นที่ผิวจำเพาะ, ปริมาตรรูพรุนรวม, ปริมาตรรูพรุนไมโครพอร์ และปริมาณรูพรุนเมโซพอร์ของ 2.0Z-AC และ 3.0Z-AC อยู่ในช่วง 1405-1425 m²/g, 0.83-0.96 cm³/g, 0.42-0.49 cm³/g และ 0.34-0.54 cm³/g ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบ HDC พบว่า ถ่านกัมมันต์ทั้งหมดที่เตรียมด้วยวิธี One-pot HTC มีพื้นที่ผิวจำเพาะ, ปริมาตรรูพรุนทั้ง ไมโครพอร์และเมโซพอร์เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจน กล่าวได้ว่า การสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์ ด้วยวิธี One-pot HTC นี้เป็นวิธีหนึ่งทีรวดเร็ว ลดขั้นตอนการทำงาน และมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 5 (A) ไอโซเทอมการดูดซับและคายของแก๊สไนโตรเจน และ (B) การกระจายตัวของขนาดรูพรุนในตัวอย่างถ่านไอโซธราล์, HDC และถ่านกัมมันต์; x-Z-AC

ตารางที่ 1 ตัวแปรที่บ่งบอกลักษณะโครงสร้างรูพรุนของตัวอย่างที่ศึกษาวิจัย

ชื่อตัวอย่าง	พื้นที่ผิวจำเพาะแบบเบ็ต (m ² /g)	ปริมาตรรูพรุนรวม (cm ³ /g)	ปริมาตรรูพรุนไมโครพอร์ (cm ³ /g)	ปริมาตรรูพรุนเมโซพอร์ (cm ³ /g)	ร้อยละปริมาตรรูพรุนเมโซพอร์ต่อปริมาตรรูพรุนรวมในวัสดุดูดซับ
HDC	207	0.09	0.08	0.01	11
0.25Z-AC	678	0.30	0.28	0.02	7
0.50Z-AC	888	0.39	0.37	0.02	5
1.0Z-AC	1172	0.54	0.44	0.10	19
2.0Z-AC	1425	0.83	0.49	0.34	41
3.0Z-AC	1405	0.96	0.42	0.54	56
Com-PAC	1078	0.49	0.45	0.04	8

หมายเหตุ: ร้อยละปริมาตรรูพรุนเมโซพอร์ต่อปริมาตรรูพรุนรวมในวัสดุดูดซับ เท่ากับ

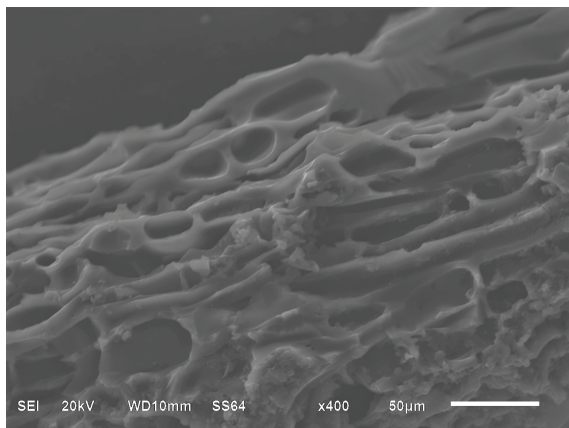
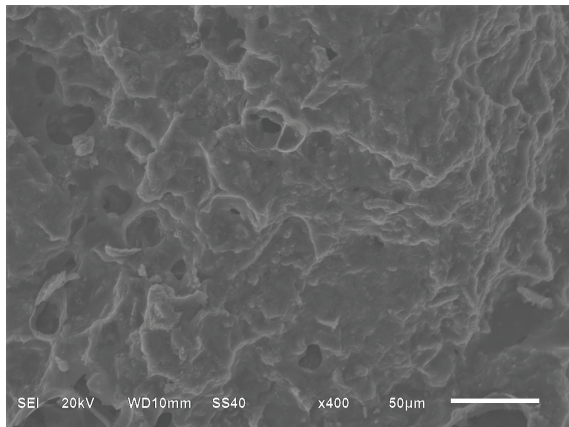
$$\frac{\text{ปริมาตรรูพรุนเมโซพอร์}}{\text{ปริมาตรรูพรุนรวม}} \times 100 \quad [26]$$

จะเห็นได้ว่า การปรับเปลี่ยนปริมาณของ ZnCl₂ มีผลต่อความเป็นรูพรุนของถ่านกัมมันต์ กล่าวคือ ZnCl₂ จะช่วยเพิ่มปริมาตรรูพรุนไมโครพอร์ในตัวอย่าง สังเกตได้จากปริมาณการดูดซับไนโตรเจนในช่วง p/p₀ ต่ำของถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วย ZnCl₂ ในทุกอัตราส่วนมากกว่า HDC เนื่องจากมีปริมาณไมโครพอร์มีมากกว่า ส่งผลให้พื้นที่ผิวจำเพาะมากขึ้นตามไปด้วย นอกจากรูพรุนไมโครพอร์แล้ว การเติม ZnCl₂ ยังทำให้เกิดรูพรุนเมโซพอร์ในโครงสร้างของถ่านกัมมันต์อีกด้วยเมื่อเติมในปริมาณที่มากพอ โดยรูพรุนเมโซพอร์ที่เกิดขึ้นมีขนาดอยู่ในช่วง 2-4.5 นาโนเมตร การเพิ่มของรูพรุนทั้งไมโครพอร์และเมโซพอร์ด้วยการกระตุ้นด้วยสารเคมีจะเกิดขึ้นผ่าน 2 กระบวนการ คือ การสร้างรูใหม่ (Pore drilling) และการขยายรูพรุนเดิมที่มีอยู่ก่อน (Pore widening) ทั้งนี้กระบวนการหลัง มักจะเกิดขึ้นเมื่อปริมาณของตัวกระตุ้นมากพอจนถึงจุด ๆ หนึ่ง [9]

จากผลการศึกษา พบว่าการใช้อัตราส่วน ZnCl_2 ต่อเหง้ามันสำปะหลัง เท่ากับ 3.0 (3.0Z-AC) ในการเตรียมถ่านกัมมันต์ จะให้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะค่อนข้างสูง และปริมาณรูพรุนเมโซพอร์มากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างอื่น ๆ และมีค่ามากกว่าถ่านกัมมันต์ทางการค้า (พื้นที่ผิวจำเพาะ, ปริมาตรรูพรุนรวม, ปริมาตรรูพรุนไมโครพอร์ และปริมาตรรูพรุนเมโซพอร์ของ Com-PAC เท่ากับ $1078 \text{ m}^2/\text{g}$, $0.49 \text{ cm}^3/\text{g}$, $0.45 \text{ cm}^3/\text{g}$ และ $0.04 \text{ cm}^3/\text{g}$ ตามลำดับ) ดังนั้น 3.0Z-AC จะถูกนำไปศึกษาคุณลักษณะต่าง ๆ ต่อไป

3.3 ผลการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM)

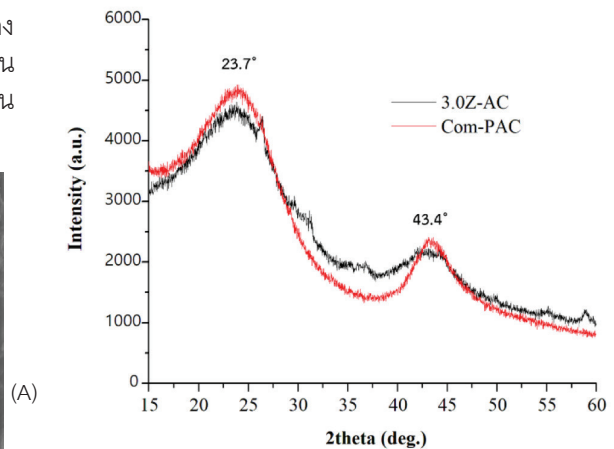
ภาพถ่าย SEM ดังแสดงในรูปที่ 6 พบว่า ตัวอย่างถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วย ZnCl_2 มีพื้นที่ผิวขรุขระ รูพรุน และรอยแยกบนพื้นผิวมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับถ่านไฮโดรคาร์บที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการกระตุ้น เนื่องจากการระเหยของ ZnCl_2 ที่ผสมอยู่ในเหง้ามันสำปะหลังระหว่างการคาร์บอนไเซชันที่ 800°C ส่งผลให้เกิดรูพรุนมากขึ้นบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ [27]



รูปที่ 6 ภาพสัณฐานวิทยาถ่ายด้วย SEM ที่กำลังขยาย 400 เท่า ของ (A) ถ่านจากไฮโดรคาร์บ (HDC) และ (B) ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วย ZnCl_2 (3.0Z-AC)

3.4 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างและเฟสขององค์ประกอบด้วยเทคนิค XRD analysis

จากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ดังรูปที่ 7 พบว่า ถ่านกัมมันต์จากเหง้ามันสำปะหลังที่ใช้ ZnCl_2 เป็นตัวกระตุ้น (3.0Z-AC) ปรากฏพีคกว้าง (Broad peak) ที่ตำแหน่งมุม 2θ ประมาณ 23.7° และ 43.4° เช่นเดียวกับถ่านกัมมันต์ทางการค้า (Com-PAC) แสดงให้เห็นว่า เกิดคาร์บอนอสัณฐาน (Amorphous carbon) ที่ระนาบ (0 0 2) และ (1 0 0) ตามลำดับ [9] มีลักษณะคล้ายแกรไฟต์ที่จัดเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ (Turbostratic carbon structure) จากการซ้อนกันของชั้นอะโรมาติก (Aromatic layer) ภายในโครงสร้าง [28] กล่าวได้ว่า การเตรียมถ่านกัมมันต์จากเหง้ามันสำปะหลังด้วยวิธี One pot-HTC โดยใช้ ZnCl_2 เป็นตัวกระตุ้นประสบความสำเร็จ

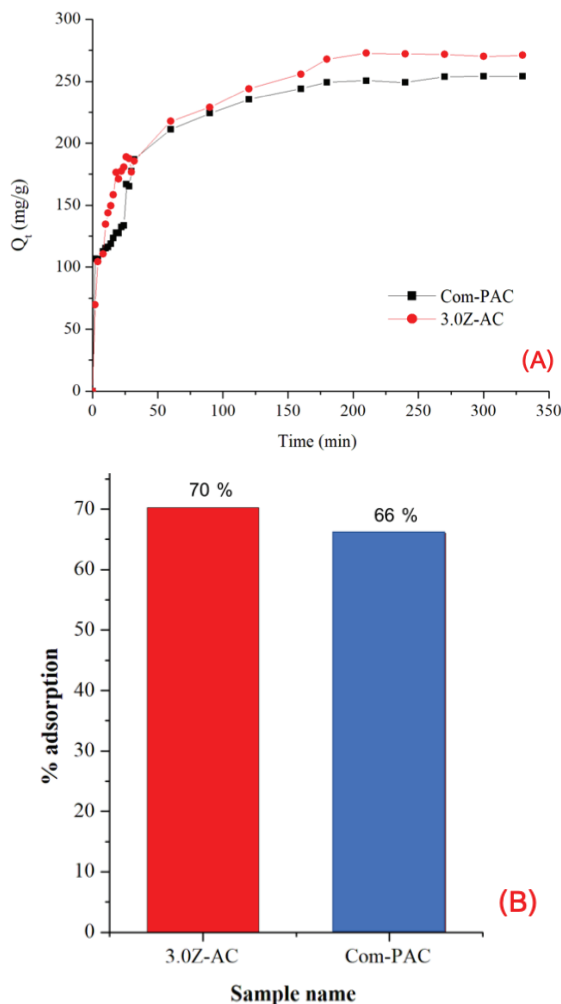


รูปที่ 7 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD patterns) ของ 3.0Z-AC และ Com-PAC

3.5 ความสามารถในการดูดซับเมทิลีน บลู ของถ่านกัมมันต์จากเหง้ามันสำปะหลังที่กระตุ้นด้วย ZnCl_2

3.5.1 ระยะเวลาที่มีผลต่อการดูดซับเมทิลีน บลู รูปที่ 8A แสดงอิทธิพลของเวลาในการสัมผัสต่อการดูดซับเมทิลีน บลู บนถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วย ZnCl_2 (3.0Z-AC) และถ่านกัมมันต์ทางการค้า (Com-PAC) พบว่า ปริมาณการดูดซับบนตัวอย่างทั้งสองชนิดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 30 นาทีแรก เนื่องจากตัวอย่างยังมีพื้นที่ผิวที่เป็นบริเวณที่เกิดการดูดซับอยู่มาก จึงทำให้ดูดยึดโมเลกุลของสีย้อมในบริเวณดังกล่าวได้ง่ายและรวดเร็ว แต่เมื่อระยะเวลาผ่านไปช่วงหนึ่ง พื้นที่ผิวนอกบางส่วนถูกปกคลุมไปด้วยโมเลกุลของสีย้อม ทำให้โมเลกุลสีย้อมแพร่เข้าสู่พื้นผิวภายในรูพรุนของ 3.0Z-AC และ Com-PAC ได้ยากมากขึ้น ส่งผลให้มีอัตราการดูดซับช้าลง จนเข้าสู่สภาวะสมดุลที่เวลา 210 และ 270 นาที โดยคิดเป็นประสิทธิภาพการดูดซับ ณ สมดุลเท่ากับ ร้อยละ 70 และ 66 ตามลำดับ โดย 3.0Z-AC มี

ประสิทธิภาพการดูดซับเมทิลลีน บลู ที่ดีกว่า Com-PAC ณ สภาวะสมดุล (รูปที่ 8B) ทั้งนี้เป็นเพราะตัวอย่างนี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่า ประกอบกับมีทั้งรูพรุนไมโครพอร์และเมโซพอร์ (ตารางที่ 1) นอกจากนี้ ยังพบว่า การดูดซับเมทิลลีน บลู ของ 3.0Z-AC ยังเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เร็วกว่า Com-PAC อีกด้วย อาจเป็นเพราะ 3.0Z-AC มีโครงสร้างรูพรุนเมโซพอร์ร้อยละ 56 ของปริมาตรรูพรุนทั้งหมด และมีขนาดของรูพรุนเมโซพอร์ตั้งแต่ 2-4.5 นาโนเมตร ดังแสดงในตารางที่ 1



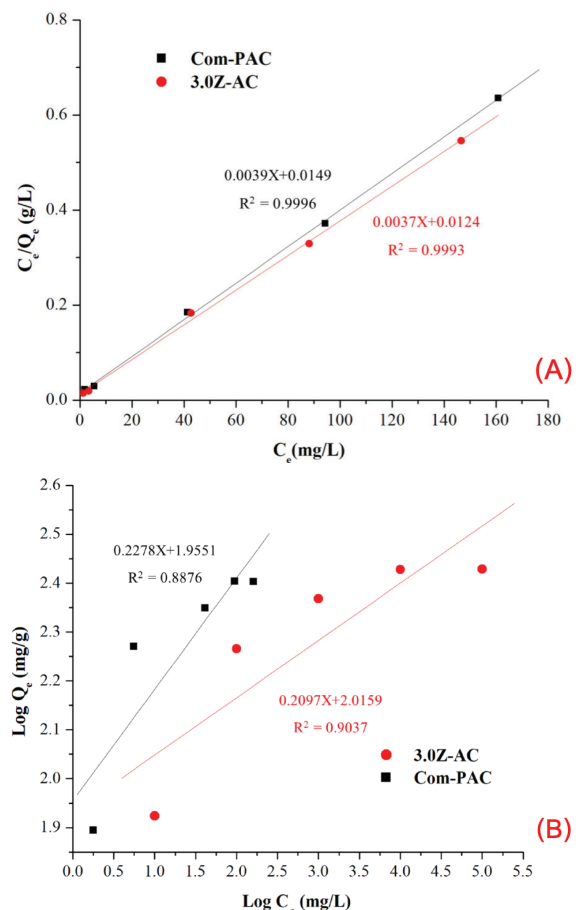
รูปที่ 8 (A) อิทธิพลของเวลาในการสัมผัสต่อการดูดซับเมทิลลีน บลู และ (B) ประสิทธิภาพการดูดซับ ณ ระยะเวลาสมดุลของ 3.0Z-AC นาที่ที่ 210 นาที และ Com-PAC นาที่ที่ 270 (C_0 : 100 mg/L, 250 rpm, pH ประมาณ 10)

ขณะที่ Com-PAC มีโครงสร้างรูพรุนเมโซพอร์เพียงร้อยละ 8 เท่านั้น การมีรูพรุนเมโซพอร์ในโครงสร้างของถ่านกัมมันต์นั้นจะช่วยเร่งการเคลื่อนที่ของเมทิลลีน บลู ที่มีโมเลกุลค่อนข้างใหญ่ (ขนาดรัศมีโมเลกุลของเมทิลลีน บลู ประมาณ 1.6 นาโนเมตร [29]) เข้าสู่รูพรุนที่มีขนาดเล็กกว่าภายในโครงสร้างที่เป็นบริเวณที่เกิดการดูดซับได้เร็วขึ้น สอดคล้อง

กับผลวิจัยของ Libbrecht และคณะ [16] โดยได้ทดสอบความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ เช่น Bisphenol-A (BPA) ของคาร์บอนที่มีรูพรุนเมโซพอร์และถ่านกัมมันต์ทางการค้า พบว่า คาร์บอนที่มีรูพรุนเมโซพอร์ใช้เวลาในการดูดซับ BPA ของจนเข้าสู่สภาวะสมดุลประมาณ 20-60 นาที ขณะที่ถ่านกัมมันต์ทางการค้าใช้เวลาถึง 90 นาที

3.5.2 ไอโซเทอมการดูดซับและการหาค่าการดูดซับสูงสุดเมทิลลีน บลู

จากผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความจุในการดูดซับเมทิลลีน บลู ของถ่านกัมมันต์ (q_e) และความเข้มข้นของเมทิลลีน บลู ที่สภาวะสมดุล (C_e) ในรูปแบบสมการเส้นตรงของไอโซเทอมด้วยการดูดซับแบบแลงเมียร์ (รูปที่ 9A) และฟรอนดลิช (รูปที่ 9B) พบว่าผลการทดลองของทั้ง 2 ตัวอย่าง สอดคล้องกับไอโซเทอมของแลงเมียร์มากกว่าฟรอนดลิช โดยเปรียบเทียบจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) เข้าใกล้ 1 มากกว่า (ตารางที่ 2 และ 3) แสดงว่า กลไกการดูดซับของเมทิลลีน บลู บนวัสดุดูดซับทั้ง 2 ชนิดเกิดกลไกการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer formation) ที่มีความสม่ำเสมอ (Homogenous) [3]



รูปที่ 9 (A) ไอโซเทอมการดูดซับสีย้อมเมทิลลีน บลูของ 3.0Z-AC และ Com-PAC แบบแลงเมียร์ และ (B) แบบฟรอนดลิช

จากผลการทดลอง พบว่า 3.OZ-AC ที่ได้ในงานวิจัยนี้ มีค่าการดูดซับเมทิลลีน บลู สูงสุด (q_m) 274 มิลลิกรัม ต่อกรัม ซึ่งมากกว่าถ่านกัมมันต์ทางการค้า (Com-PAC) โดยมี q_m เท่ากับ 260 มิลลิกรัมต่อกรัม โดย 3.OZ-AC และ Com-PAC มีค่าคงที่แลงเมียร์ (K_L) เท่ากับ 0.294 และ 0.259 ลิตรต่อมิลลิกรัม ตามลำดับ

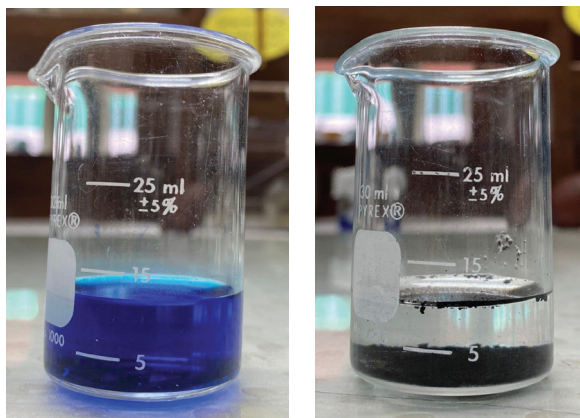
ตารางที่ 2 ค่าคงที่ไอโซเทอรัมแบบแลงเมียร์ของการดูดซับเมทิลลีน บลู

ชนิดวัสดุดูดซับ	ไอโซเทอรัมแบบแลงเมียร์		
	R^2	q_m (mg/g)	K_L (L/mg)
3.OZ-AC	0.9993	274	0.294
Com-PAC	0.9996	260	0.259

ตารางที่ 3 ค่าคงที่ไอโซเทอรัมแบบฟรุนดลิชของการดูดซับเมทิลลีน บลู

ชนิดวัสดุดูดซับ	ไอโซเทอรัมแบบฟรุนดลิช		
	R^2	$1/n$	K_F (mg/g)
3.OZ-AC	0.9037	0.2097	103.72
Com-PAC	0.8876	0.2278	90.18

จากผลการทดลองสรุปได้ว่า ถ่านกัมมันต์จากเหง้ามันสำปะหลังที่ได้ในงานศึกษาวิจัยนี้ สามารถดูดซับสีย้อมเมทิลลีน บลู ได้ดี (รูปที่ 10) ถึงแม้ว่าค่าความจุการดูดซับสูงสุดของสีย้อมเมทิลลีน บลู ของ 3.OZ-AC จะไม่แตกต่างจาก Com-PAC มากนัก เนื่องจากปริมาณรูพรุนไมโครพอร์ของทั้งสองตัวอย่างใกล้เคียงกัน แต่ระยะการเข้าสู่สมดุลของ Com-PAC ช้ากว่าถึง 60 นาที อาจเป็นเพราะ 3.OZ-AC มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงกว่าและมีรูพรุนเมโซพอร์ในโครงสร้าง



รูปที่ 10 (A) รูปถ่ายสารละลายเมทิลลีนบลูก่อนเติม 3.OZ-AC และ (B) สารละลายเมทิลลีนบลูภายหลังเติม 3.OZ-AC เป็นเวลา 2 นาที

4. สรุป (Conclusions)

วิธี One-pot HTC เป็นวิธีหนึ่งที่รวดเร็ว และช่วยลดการใช้พลังงานในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากวัสดุชีวมวล เนื่องจากวัตถุดิบตั้งต้นคาร์บอนและตัวกระตุ้นจะถูกผสมรวมกันตั้งแต่ต้นในขั้นตอนเดียวในตัวกลางที่เป็นน้ำ อีกทั้งกระบวนการกระตุ้นและการคาร์บอนไนเซชันจะเกิดขึ้นพร้อมกัน จากผลการศึกษา พบว่า วิธีนี้ประสบความสำเร็จในการใช้เตรียมถ่านกัมมันต์จากเหง้ามันสำปะหลังให้มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง (1,405 ตารางเมตรต่อกรัม) และมากกว่าพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์ทางการค้า (1,078 ตารางเมตรต่อกรัม) ทั้งนี้ ถ่านกัมมันต์ที่ได้ยังมีโครงสร้างรูพรุนเมโซพอร์อีกด้วย โดยสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากเหง้ามันสำปะหลังให้มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงและมีปริมาตรรูพรุนเมโซพอร์มากที่สุดด้วยวิธี One pot-HTC ตามด้วยการคาร์บอนไนเซชันที่ 800 องศาเซลเซียส คือ การใช้ $ZnCl_2$ ในอัตราส่วนต่อเหง้ามันสำปะหลังเท่ากับ 3 โดยมวล (3.OZ-AC) ตัวอย่างดังกล่าวสามารถดูดซับสีย้อมเมทิลลีน บลู ในน้ำสีสังเคราะห์ได้สูงสุดและสูงกว่าถ่านกัมมันต์ทางการค้าในด้านอัตราเร็วในการดูดซับ และค่าความจุการดูดซับสูงสุด โดยมีระยะเวลาสมดุลในการดูดซับสีย้อมเมทิลลีน บลู เพียง 210 นาที และมีค่าความจุการดูดซับเมทิลลีนบลูสูงสุดถึง 274 มิลลิกรัมต่อกรัม ขณะที่ถ่านกัมมันต์ทางการค้าใช้เวลาในการดูดซับถึง 270 นาที และมีค่าการดูดซับสูงสุดเพียง 260 มิลลิกรัมต่อกรัม จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่มีคุณลักษณะดังกล่าว ยังสามารถประยุกต์ใช้เป็นวัสดุดูดซับสารพิษหรือสารปนเปื้อนอื่น ๆ นอกจากสีย้อมได้อีกด้วย เช่น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ [9], โทลูอีน [31] และโลหะหนัก [32] เป็นต้น

5. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

งานวิจัยนี้สำเร็จได้ด้วยการสนับสนุนด้านเครื่องมือวิเคราะห์จากกลุ่มผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ในครัวเรือนและกลุ่มเคมีเพื่ออุตสาหกรรม กรมวิทยาศาสตร์บริการ, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์กายภาพ (เคมี) คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ และภาควิชาวิทยาศาสตร์สังคมและสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์เขตร้อน มหาวิทยาลัยมหิดล

6. เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. แนวทางที่ดีด้านการป้องกันและลดมลพิษสำหรับอุตสาหกรรม. [ออนไลน์]. เข้าถึงจาก: http://www.diw.go.th/hawk/job/1_8.pdf [อ้างถึงวันที่ 5 พฤษภาคม 2564]
- [2] ไพฑิพย์ ธีรเวชญาณ, สิริพรเทพ เต้าประยูร, ดวงรัตน์ อินทร, เพ็ชรพร เขาวกิจเจริญ และประไพ ธุรกิจ. การกำจัดสีในน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอโดย

ใช้วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร และของเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ [ออนไลน์]. เข้าถึงจาก: http://www.tnrr.in.th/2558/?page=result_search&record_id=83216 [อ้างถึงวันที่ 29 ธันวาคม 2564].

- [3] ศิริพรรณ พกธรรมา, ภาวดี ช่วยบำรุง, ชุตินันท์ พูลเกิด และสิทธิสุนทร สุโพธิณะ. การบำบัดน้ำสีรีแอคทีฟที่พบความเข้มข้นสูงด้วยปฏิกิริยาเฟ้นตันและเสมือนเฟ้นตันที่ใช้ผงตะไบเหล็ก. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*. 2562, 27(4), 27661-27674.
- [4] ALI, H. Biodegradation of Synthetic Dyes-a Review. *Water, Air, & Soil Pollution*. 2010, 213, 251-273.
- [5] กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. *ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมเรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงานที่ประกอบกิจการเกี่ยวกับการฟอก ขีด หรือเคลือบสีหนังสัตว์ พ.ศ. 2561* [ออนไลน์]. เข้าถึงจาก: <https://www.diw.go.th/webdiw/wp-content/uploads/2021/07/law-fac-env-12022562.pdf> [อ้างถึงวันที่ 29 ธันวาคม 2564]
- [6] ปิณฑน์ ธรรมมงคล. *การประยุกต์ใช้ไบโอเทคโนโลยีกำจัดสีในน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อม* [ออนไลน์]. เข้าถึงจาก: https://www.atdp-textiles.org/blog_biotech_environment [อ้างถึงวันที่ 5 พฤษภาคม 2564].
- [7] CHOOAKSORN, W. Color Removal Technology in Industrial Wastewater. *Burapha Science Journal*. 2012, 17(1), 181-191.
- [8] พัชรินทร์ จันทร์พลอย, กฤติยาภรณ์ หลวงดี และ นภารัตน์ จิवालักษณ์. การดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูของถ่านเปลือกส้มโอที่เตรียมจากการเผาแบบเตาลาน. *วารสารวิชาการและวิจัย มทร. พระนคร*. 2563, 14(1), 15-25
- [9] PHURIRAGPITIKHON, J., P. GHIMIRE, and M. JARONIEC. Tannin-Derived Micro-Mesoporous Carbons Prepared by One-Step Activation with Potassium Oxalate and CO₂. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2020, 558, 55-67.
- [10] วริณา ศรีมูล. การบำบัดสีย้อมในน้ำเสียด้วยกระบวนการดูดซับ. *วารสารวิทยาศาสตร์ มข.* 2559, 44(3), 419-434.
- [11] THABUOT, M. Development of Heavy Metal and Dye Adsorbents to Substitute for the Commercial Activated Carbon. *Naresuan University Journal: Science and Technology*. 2553, 18(2), 17-27.
- [12] MUNTEAN, S.G., N. MARIA ANDREEA, E. MUNTEAN, A. TODEA, R. IANOS, and C. PĂCURARIU. Removal of Colored Organic Pollutants from Wastewaters by Magnetite/Carbon Nanocomposites: Single and Binary Systems. *Journal of Chemistry*. 2018, 2018, 6249821.
- [13] SZCZĘŚNIAK, B., J. PHURIRAGPITIKHON, J. CHOMA, and M. JARONIEC. Recent Advances in the Development and Applications of Biomass-Derived Carbons with Uniform Porosity. *Journal of Materials Chemistry A*. 2020, 8, 18464-18491.
- [14] CARBON FILTRATION SOLUTIONS PTY LTD. *Carbon information*. [ออนไลน์]. เข้าถึงจาก: <https://carbonfiltrationsolutions.com.au/carbon-information/> [อ้างถึงวันที่ 12 พฤษภาคม 2564]
- [15] ASOUHIDOU, D. D., K.S. TRIANTAFYLIDIS, N. K. LAZARIDIS, K. A. MATIS, S. S. KIM, and T. J. PINNAVAIA. Sorption of Reactive Dyes from Aqueous Solutions by Ordered Hexagonal and Disordered Mesoporous Carbons. *Microporous and Mesoporous Materials*. 2009, 117(1-2), 257-267.
- [16] LIBBRECHT, W., K. VANDAELE, K. DE BUYSSER, A. VERBERCKMOES, J.W. THYBAUT, H. POELMAN, J. DE CLERCQ, and P. VAN DER VOORT. Tuning the Pore Geometry of Ordered Mesoporous Carbons for Enhanced Adsorption of Bisphenol-A. *Materials*. 2015, 8(4), 1652-1665.
- [17] MARSZEWSKA, J. and M. JARONIEC, Tailoring Porosity in Carbon Spheres for Fast Carbon Dioxide Adsorption. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2017, 487, 162-174.
- [18] JIANG, Y., Q. XIE, Y. ZHANG, C. GENG, B. YU, and J. CHI, Preparation of Magnetically Separable Mesoporous Activated Carbons from Brown Coal with Fe₃O₄. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2019, 29(3), 513-519.
- [19] GUO, F., X. JIANG, X. JIA, S. LIANG, L. QIAN, and Z. RAO, Synthesis of Biomass Carbon Electrode Materials by Bimetallic Activation for the Application in Supercapacitors. *Journal of Electroanalytical Chemistry*. 2019, 844, 105-115.

- [20] JIN, Q., Y. LI, D. YANG, and J. CUI. Chitosan-Derived Three-Dimensional Porous Carbon for Fast Removal of Methylene Blue from Wastewater. *RSC Advances*. 2018, 8(3), 1255-1264.
- [21] CHEN S., S. TANG, Y. SUN, G. WANG, H. CHEN, X. YU, Y. SU, and G. CHEN. Preparation of a Highly Porous Carbon Material Based on Quinoa Husk and Its Application for Removal of Dyes by Adsorption. *Materials (Basel, Switzerland)*. 2018, 11(8), 1407.
- [22] สุภาวดี น้อยน้ำใส และสมสกุล รัตนบุญชร, การปรับปรุงตัวดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียด้วยตะกอนจากระบบผลิตน้ำประปา, *วารสารวิทยาศาสตร์ มช.* 2559, 44(3), 542-552.
- [23] BALOU, S., S. E. BABAK, and A. PRIYE. Synergistic Effect of Nitrogen Doping and Ultra-Microporosity on the Performance of Biomass and Microalgae-Derived Activated Carbons for CO₂ Capture. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2020, 12(38), 42711-42722.
- [24] GALE, M., T. NGUYEN, M. MORENO, and K. L. GILLIARD-ABDULAZIZ. Physiochemical Properties of Biochar and Activated Carbon from Biomass Residue: Influence of Process Conditions to Adsorbent Properties. *ACS Omega*. 2021, 6(15), 10224-10233.
- [25] SING, K. S. W. Reporting Physisorption Data for Gas/solid Systems with Special Reference to the Determination of Surface Area and Porosity (Recommendations 1984). *Pure & Applied Chemistry*. 1985, 57(4), 603-619,
- [26] SZCZĘŚNIAK, B., J. PHURIRAGPITIKHON, J. CHOMA, and M. JARONIEC. Mechanochemical Synthesis of Three-Component Graphene Oxide/ordered Mesoporous Carbon/metal-Organic Framework Composites. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2020, 577, 163-172.
- [27] SHOKRY, H., M. ELKADY, and E. SALAMA. Eco-Friendly Magnetic Activated Carbon Nano-Hybrid for Facile Oil Spills Separation. *Scientific Reports*. 2020, 10, 10265.
- [28] ธิรดิษฐ์ โพธิ์ตันติมงคล และปิยธิดา อูระชื่น, การกำจัดตะกั่วในน้ำเสียอุตสาหกรรมโดยใช้ถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามที่ผ่านการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*. 2560, 25(2), 191-209.
- [29] EL-HALWANY, M. M. Study of Adsorption Isotherms and Kinetic Models for Methylene Blue Adsorption on Activated Carbon Developed from Egyptian Rice Hull (Part II). *Desalination*. 2010, 250(1), 208-213.
- [30] ชานัญชัย คหาปนะ และณภัทร โพธิ์วัน, การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้วัสดุดูดซับที่เตรียมจากผักตบชวา, *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ*. 2563, 15(2), 58-70.
- [31] ZHANG, G., B. LEI, S. CHEN, H. XIE, and G. ZHOU. Activated Carbon Adsorbents with Micro-Mesoporous Structure Derived from Waste Biomass by Stepwise Activation for Toluene Removal From Air, *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2021, 9(4), 105387.
- [32] MANDAL, S., J. CALDERON, S.B. MARPU, M.A. OMARY, and S.Q. SHI. Mesoporous Activated Carbon as a Green Adsorbent for the Removal of Heavy Metals and Congo Red: Characterization, adsorption kinetics, and isotherm studies, *Journal of Contaminant Hydrology*. 2021, 243, 103869.

การพัฒนาสูตรยางคอมพาวนด์สำหรับการวัลคาไนซ์ด้วยลำอิเล็กตรอน

Development of compound rubber formula for electron beam vulcanization

5

ภัณฑิลา ภูมิระเบียบ^{1*}, อรวรรณ ปิ่นประยูร¹, นิชาภา บัวสุวรรณ¹, เกศินี เหมวิเชียร²

Pantila Bhumirabab^{1*}, Orawan Pinprayoon¹, Nichapa Buasuwan¹, Kasinee Hemvichian²

รับบทความ: 7 มีนาคม 2565 แก้ไขบทความ: 1 มิถุนายน 2565 ยอมรับตีพิมพ์: 14 มิถุนายน 2565

บทคัดย่อ

การวัลคาไนซ์ยางด้วยลำอิเล็กตรอน (Electron beam) เป็นเทคนิคที่ให้อัตราเร็วในการวัลคาไนซ์สูง และมีความสม่ำเสมอมากกว่าการวัลคาไนซ์ด้วยระบบกัมมันต์ อีกทั้งมีการเติมสารเคมีลงในระบบน้อย ทำให้ไม่มีสารตกค้าง จึงเป็นวิธีที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม งานวิจัยนี้ใช้ยางแท่งในการพัฒนาสูตรยางคอมพาวนด์ที่วัลคาไนซ์ได้ด้วยลำอิเล็กตรอน โดยการศึกษาชนิดและปริมาณของสารไวต่อปฏิกิริยา (Sensitizers) คือ n-Butyl acrylate (n-BA) และ Trimethylolpropane trimethacrylate (TMPT) ในปริมาณ 3 phr และ 5 phr แล้วเปรียบเทียบค่าความแข็ง ความต้านแรงดึง ความยืดเมื่อขาด โมดูลัสที่ความยืดร้อยละ 300 และการยืดอยู่ตัวของแผ่นยางคอมพาวนด์ที่วัลคาไนซ์ด้วยลำอิเล็กตรอนที่ได้กับแผ่นยางคอมพาวนด์ที่วัลคาไนซ์ด้วยกัมมันต์ นอกจากนี้ ยังได้ศึกษาปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอน (Dose) ที่เหมาะสมสำหรับการวัลคาไนซ์ยาง โดยการฉายลำอิเล็กตรอนที่มีพลังงานในการเร่งอนุภาคของอิเล็กตรอน 10 ล้านอิเล็กตรอนโวลต์ (MeV) ไปยังแผ่นยางที่มีปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอนต่าง ๆ ได้แก่ 50 kGy, 100 kGy, 150 kGy และ 200 kGy จากการศึกษาพบว่าสูตรที่เหมาะสมสำหรับการวัลคาไนซ์ด้วยลำอิเล็กตรอนสำหรับผลิตภัณฑ์ยางที่ต้องการความยืดอยู่ต่ำคือสูตรที่ประกอบด้วยสารไวต่อปฏิกิริยาชนิด TMPT ในปริมาณ 5 phr และวัลคาไนซ์ที่ปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอน 200 kGy อย่างไรก็ตาม สมบัติทางกายภาพของยางที่ได้จากการศึกษานี้ยังคงน้อยกว่าแผ่นยางคอมพาวนด์ที่ได้จากการวัลคาไนซ์ด้วยกัมมันต์

Abstract

The electron beam (E-Beam) vulcanization system is a high-speed vulcanization technique, which offers products with better homogeneity than those obtained from sulfur vulcanization system. In addition, E-Beam vulcanization requires less chemicals than sulfur vulcanization, thus leaving fewer chemical residues and therefore making it an environmentally friendly process. In this study, Standard Thai Rubber (STR) was used to develop rubber compound formulae for electron beam vulcanization. Two types of sensitizer; n-Butyl acrylate (n-BA) and trimethylolpropane trimethacrylate (TMPT) along with their varied amount (3 phr and 5 phr) were studied and their physical properties (hardness, tensile strength, elongation at break, modulus at 300% elongation and tension set) of the rubber sheets were compared to those vulcanized with conventional sulfur system. The study of the optimum dose for electron beam irradiation for rubber vulcanization was carried out using an electron beam accelerator with accelerated energy of 10 million electron volts (MeV) at four different doses: 50 kGy, 100 kGy, 150 kGy and 200 kGy. From this study, it was found that the formulation containing 5 phr TMPT sensitizer, vulcanized with the electron beam at 200 kGy was considered suitable for vulcanizing rubber products which low tension set property is required. However, the physical properties of the e-beam vulcanized rubber obtained from this study were significantly lower than those prepared from sulfur-vulcanized system.

คำสำคัญ: ลำอิเล็กตรอน ปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอน การวัลคาไนซ์ยาง สารไวต่อปฏิกิริยา

Keywords: Electron beam, E-Beam dose, Rubber vulcanization, Sensitizers

¹ กรมวิทยาศาสตร์บริการ

² สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ

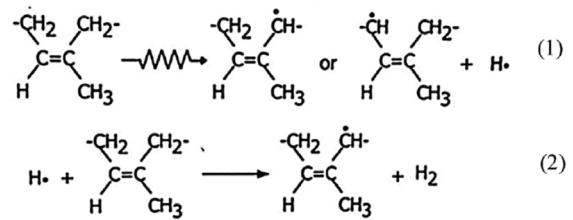
* Corresponding author e-mail address: pantila@dss.go.th

1. บทนำ (Introduction)

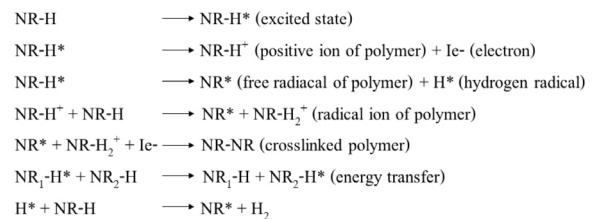
ประเทศไทยเป็นผู้ผลิตและส่งออกยางธรรมชาติมากที่สุดในโลก อย่างไรก็ตาม มากกว่าร้อยละ 90 ของการส่งออกในปี 2564 เป็นวัตถุดิบยางชั้นกลางทั้งที่เป็นยางแท่ง ยางแผ่น และน้ำยางข้น [1] การแปรรูปผลิตภัณฑ์ยางภายในประเทศยังมีสัดส่วนที่ต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณการผลิต ดังนั้น เพื่อให้สอดคล้องกับนโยบายของรัฐบาล Thailand 4.0 ที่ส่งเสริมการใช้นวัตกรรมมาขับเคลื่อนเศรษฐกิจ การพัฒนาผลิตภัณฑ์ยางใหม่หรือผลิตภัณฑ์เดิมโดยใช้เทคโนโลยีขั้นสูงที่มีประสิทธิภาพและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม จึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจอย่างมาก การทำผลิตภัณฑ์ยางส่วนใหญ่จะมีการรีดและบดผสมยางกับสารเคมีและทำให้คงรูปผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชัน เพื่อให้ได้ยางที่มีคุณสมบัติเหมาะสมกับความต้องการใช้งาน โดยทั่วไปการวัลคาไนซ์หรือการทำให้ยางคงรูปแบ่งเป็น 3 ระบบใหญ่ ๆ [2] คือ ระบบการคงรูปด้วยกำมะถัน (Sulfur vulcanization) ระบบการคงรูปด้วยเปอร์ออกไซด์ (Peroxide vulcanization) และระบบการคงรูปด้วยสารเคมีอื่น ๆ ระบบการคงรูปด้วยกำมะถันเป็นระบบที่ได้รับความนิยมมากที่สุดเนื่องจากมีต้นทุนต่ำและเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ได้เร็ว ปัจจุบันได้มีการนำรังสีต่าง ๆ เช่น รังสีเอกซ์ (X-rays) รังสีแกมมา (Gamma ray) รังสีอัลตราไวโอเลต (Ultraviolet radiation, UV) และลำอิเล็กตรอน (Electron beam) มาใช้ในการวัลคาไนซ์ยางมากขึ้น งานวิจัยนี้เลือกการฉายลำอิเล็กตรอนมาใช้ในการศึกษาเนื่องจากลำอิเล็กตรอนเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นสั้น คือ 10^{-7} - 10^{-4} μm และมีความถี่ที่ 10^{21} - 10^{18} Hz [3] ซึ่งสูงกว่ารังสีอื่น ๆ ทำให้มีพลังงานและความสามารถในการทะลุทะลวงสูง ส่งผลให้มีอัตราเร็วในการวัลคาไนซ์สูงมาก ถือได้ว่าเป็นเทคโนโลยีการวัลคาไนซ์ยางที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม กล่าวคือ มีการเติมสารเคมีลงในระบบน้อย มีของเสียเกิดขึ้นในกระบวนการผลิตน้อย ไม่มีสารตกค้าง นอกจากนี้ ยังสามารถที่จะควบคุมการผลิตลำอิเล็กตรอนได้ด้วยการเปิด-ปิดสวิตช์ และยังสามารถประหยัดพลังงานเนื่องจากสามารถวัลคาไนซ์ได้ที่อุณหภูมิห้อง

เมื่อนำพอลิเมอร์ไปฉายรังสี พลังงานจากต้นกำเนิดรังสีจะถูกถ่ายโอนไปสู่พอลิเมอร์ ซึ่งพลังงานนี้จะก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างของพอลิเมอร์ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้แก่การเชื่อมขวางโมเลกุล (Crosslinking) การพอลิเมอร์ไรซ์ (Polymerization) การกรฟต์ (Grafting) การตัดสายโซ่ (Chain scission) และการเสื่อมสภาพ (Degradation) ขึ้นอยู่กับชนิดของพอลิเมอร์และปริมาณรังสีที่ใช้ กลไกที่เกิดขึ้นเมื่อฉายลำอิเล็กตรอนลงบนวัสดุจะเกิดการถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอนว่องวนนอกสุดที่โคจรรอบนิวเคลียสของวัสดุ และเกิดการหลุดออกจากอะตอมได้เป็นไอออนบวกและอิเล็กตรอนอิสระ (Free electron) อิเล็กตรอนบางตัวที่รับพลังงานจากลำอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ด้วย

ความเร็วสูงและมีพลังงานสูงขึ้น ทำให้เกิดเป็นอนุมูลอิสระ (Free radical) ดังนั้น เมื่อฉายลำอิเล็กตรอนลงบนยางจะสามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้นทั้งการตัดสายโซ่และการเชื่อมขวางโมเลกุลไปพร้อม ๆ กัน ผลที่ได้จะขึ้นกับว่าปฏิกิริยาใดสามารถเกิดขึ้นได้มากกว่ากัน การเกิดอนุมูลอิสระของยางธรรมชาติในการฉายลำอิเล็กตรอนแสดงในรูปที่ 1 และกลไกการเชื่อมขวางโมเลกุลของยางธรรมชาติกับลำอิเล็กตรอน ซึ่งเกิดขึ้นโดยไม่ต้องให้ความร้อนและไม่มีการวัลคาไนซ์ แสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 1 การเกิดอนุมูลอิสระของยางธรรมชาติโดยการฉายลำอิเล็กตรอน [4]



รูปที่ 2 กลไกการเชื่อมขวางโมเลกุลของยางธรรมชาติกับลำอิเล็กตรอน [4]

ปัจจุบันได้มีการนำเทคโนโลยีลำอิเล็กตรอนไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น อุตสาหกรรมถุงมือยางและอุตสาหกรรมล้อยาง ในอุตสาหกรรมถุงมือยาง [5] มีการฉายลำอิเล็กตรอนในน้ำยางข้นแล้วนำน้ำยางนี้ไปทำเป็นผลิตภัณฑ์ต่อไป ส่วนในอุตสาหกรรมล้อยาง [6] การวัลคาไนซ์ยางล้อทั้งเส้นยังไม่ค่อยประสบความสำเร็จและยังไม่สามารถใช้งานได้จริง เพราะเป็นการใช้ลำอิเล็กตรอนฉายลงบนส่วนประกอบของยางล้อบางส่วนก่อน ได้แก่ ดอกยางและยางบุเคลือบผิวภายใน เพื่อทำการพรีวัลคาไนซ์ (Pre-vulcanization) แล้วจึงนำส่วนประกอบต่าง ๆ มาประกอบเป็นล้อยางแล้วนำไปวัลคาไนซ์ต่อจึงจะช่วยให้ล้อยางสามารถวัลคาไนซ์ได้อย่างทั่วถึงและสม่ำเสมอ การเลือกสภาวะที่ใช้ในการวัลคาไนซ์ยางด้วยลำอิเล็กตรอนจะส่งผลต่อสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุ ไม่ว่าจะเป็นสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สมบัติทางเคมี สมบัติการหลอมเหลว ขนาดของอนุภาค ความเข้ากันได้ของวัสดุ และสมบัติอื่น ๆ การใช้สารไวต่อปฏิกิริยา (Sensitizer) ในการวัลคาไนซ์ยางด้วยลำอิเล็กตรอนจะช่วยให้เกิดการเชื่อมขวางของโมเลกุลของพอลิเมอร์ได้เร็วขึ้น เป็นการลดปริมาณรังสีที่ใช้ใน

การวัลคาไนซ์งานวิจัยนี้จึงได้พัฒนาสูตรยางคอมพาวนด์ที่สามารถวัลคาไนซ์ได้ด้วยล้าอิลเล็กตรอนแทนการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันสำหรับผลิตภัณฑ์ยางที่ต้องการความยืดหยุ่นตัวต่ำ โดยศึกษาชนิดและปริมาณของสารไวต่อปฏิกิริยาและปริมาณรังสีจากล้าอิลเล็กตรอนที่เหมาะสมสำหรับการวัลคาไนซ์ยาง เพื่อให้ได้สูตรยางที่มีความปลอดภัยสามารถใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร

2. วิธีการวิจัย (Experimental methods)

2.1 ยางและสารเคมี

2.1.1 ยางธรรมชาติ (Natural rubber, C_5H_8): STR 5L

2.1.2 สารตัวเติม: แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate, $CaCO_3$) CAS No. 471-34-1

2.1.3 สารกระตุ้นสารเร่งปฏิกิริยายางคงรูป: ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO) CAS No. 1314-13-2 และ กรดสเตียริก (Stearic acid, $C_{18}H_{36}O_2$) CAS No. 57-11-4

2.1.4 สารเร่งปฏิกิริยายางคงรูป: ไดเบนโซไทอะไซด์ (Dibenzothiazyl disulfide; MBTS, $C_{14}H_8N_2S_4$) CAS No. 120-78-5 และ เตตระเมทิลไทอูรัมไดซัลไฟด์ (Tetramethyl thiuram disulphide; TMTD, $C_6H_{12}N_2S_4$) CAS No. 137-26-8

2.1.5 สารทำให้ยางคงรูป: กำมะถัน (Sulfur, S) CAS No. 7704-34-9

2.1.6 สารป้องกันการเสื่อมสภาพ: วินสเทย์ แอล (Wingstay-L, $C_{21}H_{28}O$) CAS No. 68610-51-5

2.1.7 สารช่วยในการแปรรูปยาง: น้ำมันพาราฟิน (Paraffin oil, C_nH_{2n+2}) CAS No. 8012-95-1

2.1.8 สารไวต่อปฏิกิริยา (Sensitizers) ระหว่างยางกับล้าอิลเล็กตรอน: นอร์มอล บิวทิล อะคริเลต (n-Butyl acrylate, n-BA, $C_7H_{12}O_2$) CAS No. 141-32-2 และ ไตรเมทิลอลโพรเพน ไตรเมทิลอะคริเลต (Trimethylolpropane trimethacrylate, TMPT, $C_{18}H_{26}O_6$) CAS No. 3290-92-4

2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

2.2.1 เครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) ยี่ห้อ YFM (Yong Fong) รุ่น 0241

2.2.2 เครื่องบดผสมยางแบบสองลูกกลิ้ง (Two-rolls mill) ยี่ห้อ YFM (Yong Fong) รุ่น 0242

2.2.3 เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding machine) ยี่ห้อ YFM (Yong Fong) รุ่น 0138

2.2.4 เครื่องชั่ง (Electric balance) ความละเอียด 0.01 กรัม ยี่ห้อ Satorius รุ่น ED224S

2.2.5 เครื่องหาอุณหภูมิและเวลาคงรูป (Moving die rheometer, MDR) ยี่ห้อ RECH PRO รุ่น rheo TECH MD+

2.2.6 เครื่องทดสอบสมบัติทางกายภาพ (Universal testing machine, UTM) ยี่ห้อ Zwick รุ่น Z005

2.2.7 เครื่องวัดความแข็ง (Durometer hardness tester) ยี่ห้อ Bareiss รุ่น Digitest II

2.2.8 เครื่องเร่งอนุภาคล้าอิลเล็กตรอน (Electron beam accelerator) ผลิตโดยบริษัท Mevex Corporation Ltd. รุ่น MB20-16 ประเทศแคนาดา

2.3 สูตรยางคอมพาวนด์ที่วัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน และสูตรยางที่ใช้ศึกษาการวัลคาไนซ์ด้วยล้าอิลเล็กตรอน ตารางที่ 1 แสดงสูตรยางคอมพาวนด์ที่วัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน (สูตร FS) ใช้เป็นสูตรเริ่มต้นในการปรับปรุงสูตรผสมของยางคอมพาวนด์ (Compound formulation) เพื่อให้ได้สูตรยางที่สามารถวัลคาไนซ์ได้ด้วยล้าอิลเล็กตรอน ด้วยการไม่ใช้สารเร่งปฏิกิริยายางคงรูป (TMTD และ MBTS) และสารทำให้ยางคงรูป (Sulfur)

ตารางที่ 1 สูตรยางคอมพาวนด์ที่วัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน (สูตร FS)

วัตถุดิบ	Parts per hundred of rubber (phr)
ยางธรรมชาติ : STR 5L	100
สารตัวเร่ง : Dibenzothiazyl disulfide	0.75
สารตัวเร่ง : Tetramethyl thiuram disulphide	0.375
สารกระตุ้นสารตัวเร่ง : Stearic acid	1
สารกระตุ้นสารตัวเร่ง : Zinc Oxide	1
สารตัวเติม : Calcium carbonate	25
สารช่วยในการแปรรูป : Paraffin oil	2
สารป้องกันการเสื่อมสภาพ : Wingstay-L	1
สารทำให้ยางคงรูป : Sulfur	1.25
รวม	132.37

ที่มา: ปรับจากสูตรยางคอมพาวนด์สำหรับผลิตยางรัดของ

การวัลคาไนซ์ยางด้วยล้าอิลเล็กตรอนจำเป็นต้องใช้สารไวต่อปฏิกิริยา [7] เพื่อให้ยางเกิดการเชื่อมขวางของโมเลกุลของพอลิเมอร์ได้เร็วขึ้นในระหว่างการฉายล้าอิลเล็กตรอน งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาชนิดและปริมาณของสารไวต่อปฏิกิริยา และปริมาณรังสีจากล้าอิลเล็กตรอนที่เหมาะสมสำหรับการวัลคาไนซ์ยาง โดยได้ออกแบบการทดลองเป็น 3 ชุด ดังนี้

1) การศึกษาปริมาณรังสีจากล้าอิลเล็กตรอนที่เหมาะสม โดยใช้สารไวต่อปฏิกิริยาชนิดเดียวกันทำการวัลคาไนซ์ที่ปริมาณรังสีจากล้าอิลเล็กตรอนต่างกัน

- สารไวต่อปฏิกิริยา: n-BA (สูตร FBA3) ที่ปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอน 50 kGy, 100 kGy, 150 kGy และ 200 kGy
- สารไวต่อปฏิกิริยา: TMPT [8] (สูตร FT3) ที่ปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอน 50 kGy, 100 kGy, 150 kGy และ 200 kGy

2) การศึกษาปริมาณของสารไวต่อปฏิกิริยาระหว่างยางและลำอิเล็กตรอน โดยใช้สารไวต่อปฏิกิริยาชนิดเดียวกัน ในปริมาณต่างกัน

- สารไวต่อปฏิกิริยา: n-BA ในปริมาณ 3 phr (สูตร FBA3) และ 5 phr (สูตร FBA5)
- สารไวต่อปฏิกิริยา: TMPT ในปริมาณ 3 phr (สูตร FT3) และ 5 phr (สูตร FT5)

3) การศึกษาชนิดของสารไวต่อปฏิกิริยาระหว่างยางและลำอิเล็กตรอน โดยใช้สารไวต่อปฏิกิริยาต่างชนิดกันที่ปริมาณสารไวต่อปฏิกิริยาและปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอนเดียวกัน

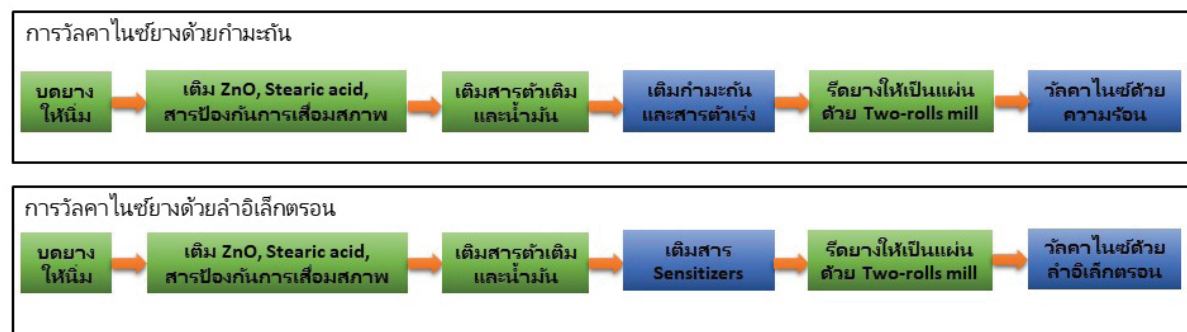
- ที่ปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอนเดียวกัน: n-BA (สูตร FBA3, 3 phr) และ TMPT (สูตร FT3, 3 phr)
- ที่ปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอนเดียวกัน: n-BA (สูตร FBA5, 5 phr) และ TMPT (สูตร FT5, 5 phr)

สูตรยางที่ใช้ในการศึกษาทดลองนี้แสดงไว้ในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สูตรยางที่ใช้ศึกษาการวัลคาไนซ์ด้วยลำอิเล็กตรอน

วัตถุดิบ	Parts per hundred of rubber (phr)			
	FBA3	FBA5	FT3	FT5
Natural rubber	100	100	100	100
CaCO ₃	25	25	25	25
Wingstay-L	1	1	1	1
Paraffin oil	2	2	2	2
n-BA	3	5	-	-
TMPT	-	-	3	5
รวม	131	133	131	133

เมื่อได้สูตรยางเรียบร้อยแล้วก็จะคำนวณปริมาณยางและสารเคมีที่เหมาะสมเพื่อนำไปบดผสมด้วยเครื่องบดผสมระบบปิด และรีดเป็นแผ่นด้วยเครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้ง สำหรับสูตรยางที่วัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันจะทำให้ยางคงรูปโดยการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปด้วยความร้อน ส่วนสูตรยางที่วัลคาไนซ์ด้วยลำอิเล็กตรอนจะทำให้ยางคงรูปโดยการฉายลำอิเล็กตรอนที่มีพลังงานในการเร่งอนุภาคของอิเล็กตรอน 10 MeV ไปยังแผ่นยางด้วยปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอนต่าง ๆ เพื่อหาปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอนที่เหมาะสมในการวัลคาไนซ์ยาง โดยเปรียบเทียบความแข็ง ความต้านแรงดึง ความยืดเมื่อขาด มอดูลัสที่ความยืดร้อยละ 300 และความยืดอยู่ตัว กระบวนการผลิตยางคอมพาวนด์ที่วัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันและลำอิเล็กตรอนแสดงดังรูปที่ 3



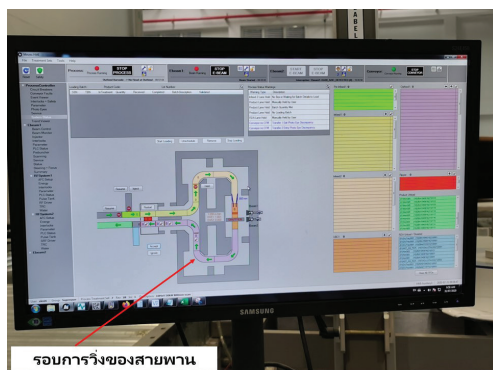
รูปที่ 3 กระบวนการผลิตยางคอมพาวนด์ด้วยกำมะถันและลำอิเล็กตรอน

2.4 ขั้นตอนการวัลคาไนซ์ยางด้วยลำอิเล็กตรอน

การวัลคาไนซ์ด้วยลำอิเล็กตรอนทำโดยการฉายรังสีที่ปริมาณต่าง ๆ จำนวน 4 ระดับ ได้แก่ 50 kGy, 100 kGy, 150 kGy และ 200 kGy รูปที่ 4 แสดงวิธีการฉายลำอิเล็กตรอนโดยการวางแผ่นยางที่รีดเป็นแผ่นหนาประมาณ 2 mm ด้วยเครื่องแบบผสมแบบสองลูกกลิ้งลงในถาดรองแผ่นตัวอย่างไม่ให้ตัวอย่างซ้อนทับกันเพื่อให้แผ่นยางจะได้โดนรังสีอย่างทั่วถึง แล้วควบคุมถาดให้วิ่งไปตามสายพานด้วยความเร็วคงที่ 1.089 mm/min เมื่อถาดวิ่งไปถึงช่องปล่อยลำอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนที่มีพลังงานในการเร่งอนุภาคของอิเล็กตรอนขนาด 10 MeV และกระแสลำอิเล็กตรอนขนาด 125 mA ก็จะถูกปล่อยลงมาบนแผ่นยาง เมื่อครบรอบสายพานดังรูปที่ 5 ก็จะได้ปริมาณลำอิเล็กตรอนที่ปล่อยออกมา 50 kGy ดังนั้นหากต้องการฉายลำอิเล็กตรอน 50 kGy, 100 kGy, 150 kGy และ 200 kGy จึงต้องฉายลำอิเล็กตรอนจำนวน 1 รอบ 2 รอบ 3 รอบ และ 4 รอบ ตามลำดับ



รูปที่ 4 ขั้นตอนการฉายลำอิเล็กตรอน



รูปที่ 5 ระบบควบคุมการทำงานของกระบวนการฉายลำอิเล็กตรอน

2.5 การทดสอบสมบัติทางกายภาพของแผ่นยางคอมพาวนด์

การทดสอบสมบัติทางกายภาพของแผ่นยางคอมพาวนด์ที่ได้จากสูตรยางที่วัลคาไนซ์ด้วยลำอิเล็กตรอน และสูตรยางที่วัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน รายการ ความแข็ง (Hardness)

ตามมาตรฐาน ISO 48-4: 2018 [9] ความต้านแรงดึง (Tensile strength) ความยืดเมื่อขาด (Elongation at break) โมดูลัสที่ความยืดร้อยละ 300 (Modulus at 300% elongation) ตามมาตรฐาน ISO 37: 2017 [10] และความยืดอยู่ตัวตามมาตรฐาน ISO 2285: 2019 [11] และวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติจากการทำซ้ำสูตรยางที่ได้จากการศึกษานี้ โดยใช้การทดสอบแบบเอฟ (F-test) และที (t-test) [12]

3. ผลและวิจารณ์ (Results and discussion)

3.1 สมบัติทางกายภาพของแผ่นยางคอมพาวนด์ที่วัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน

แผ่นยางคอมพาวนด์ที่วัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันซึ่งเป็นสูตรควบคุมได้จากการขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 160°C เป็นเวลา 3.27 นาที ซึ่งเป็นอุณหภูมิและระยะเวลาการคงรูปที่ได้จากการวัดด้วยเครื่อง MDR แล้วทดสอบความแข็งแรงดึง ความยืดเมื่อขาด โมดูลัสที่ความยืดร้อยละ 300 และความยืดอยู่ตัว ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 สมบัติทางกายภาพของแผ่นยางคอมพาวนด์ที่วัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน

รายการ	ผลการทดสอบ
ความแข็ง, Shore A	33
ความต้านแรงดึง, MPa	19.0
ความยืดเมื่อขาด, %	673
โมดูลัสที่ความยืดร้อยละ 300, MPa	2.0
ความยืดอยู่ตัว, %	4.0

3.2 สมบัติทางกายภาพของแผ่นยางคอมพาวนด์ที่วัลคาไนซ์ด้วยลำอิเล็กตรอน

ส่วนนี้เป็นการศึกษาชนิดและปริมาณของสารไวต่อปฏิกิริยาระหว่างยางและลำอิเล็กตรอน และปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอนที่เหมาะสมสำหรับการวัลคาไนซ์ยางโดยการเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพของแผ่นยางคอมพาวนด์ รายการความแข็ง ความต้านแรงดึง ความยืดเมื่อขาด โมดูลัสที่ความยืดร้อยละ 300 และการยืดอยู่ตัว

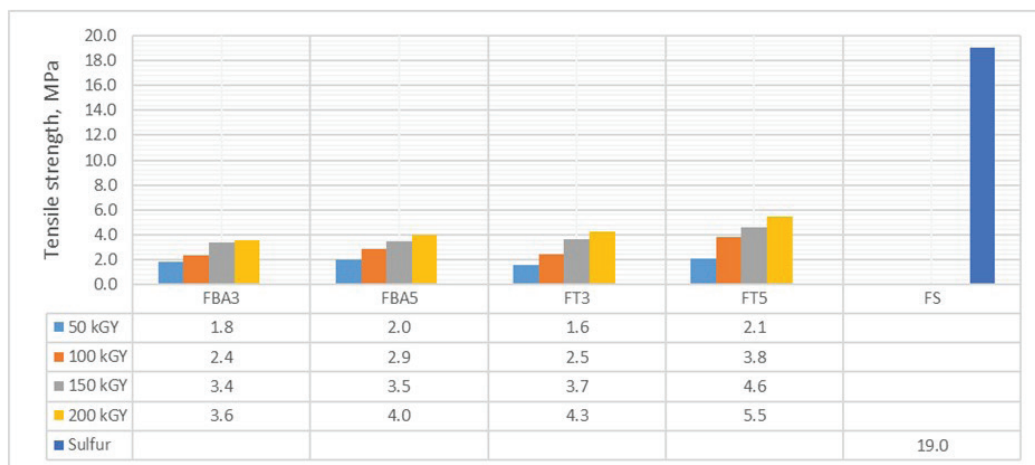
ผลการทดสอบค่าความแข็งสำหรับศึกษาชนิดและปริมาณของสารไวต่อปฏิกิริยา รวมทั้งปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอนที่เหมาะสมในการวัลคาไนซ์ยางด้วยลำอิเล็กตรอนแสดงในรูปที่ 6 จากการศึกษาปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอนที่เหมาะสมสำหรับวัลคาไนซ์ยาง 4 ระดับ คือ 50 kGy, 100 kGy, 150 kGy และ 200 kGy โดยใช้สารไวต่อปฏิกิริยาน-Ba และ TMPT ในปริมาณ 3 phr พบว่าทั้งสูตร FBA3 (n-Ba 3 phr) และ สูตร FT3 (TMPT 3 phr) ที่ปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอน 50 kGy มีความแข็งแรงน้อยที่สุดในขณะที่

ปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอน 100 kGy, 150 kGy และ 200 kGy มีค่าความแข็งไม่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นจึงสรุปเบื้องต้นได้ว่าปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอน 50 kGy ไม่เหมาะสำหรับใช้วัลคาไนซ์ยางที่ใช้สารไวต่อปฏิกิริยาเป็น n-BA และ TMPT เมื่อเพิ่มปริมาณสารไวต่อปฏิกิริยาจาก 3 phr เป็น 5 phr พบว่าค่าความแข็งระหว่างสูตร FBA3 (n-BA 3 phr) และ FBA5 (n-BA 5 phr) ที่ปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอนเดียวกันมีความแตกต่างกันเล็กน้อย และค่าความแข็งระหว่างสูตร FT3 (TMPT 3 phr) และ FT5 (TMPT 5 phr) มีแนวโน้มไปในทางเดียวกันกับสูตรที่ใช้ n-BA เป็นสารไวต่อปฏิกิริยาเมื่อเปรียบเทียบระหว่างสารไวต่อปฏิกิริยาทั้ง 2 ชนิดที่ปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอนเดียวกัน พบว่าสูตรที่ใช้ TMPT เป็นสารไวต่อปฏิกิริยามีค่าความแข็งสูงกว่าสูตรที่ใช้ n-BA เล็กน้อย อย่างไรก็ตามค่าความแข็งที่มากที่สุดจากการทดลองนี้คือ สูตร FT5 ที่ปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอน 200 kGy แต่ยังไม่พอกว่าสูตรยางที่วัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน



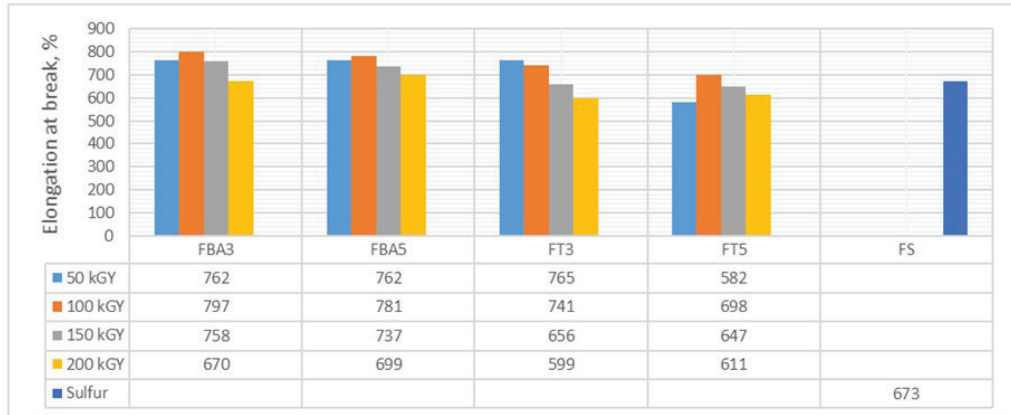
รูปที่ 6 ผลการทดสอบความแข็ง

รูปที่ 7 แสดงผลของการเปรียบเทียบค่าความต้านแรงดึงของสูตรยางที่มี n-BA และ TMPT เป็นสารไวต่อปฏิกิริยาในปริมาณ 3 phr ที่ปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอน 50 kGy, 100 kGy, 150 kGy และ 200 kGy จะเห็นได้ว่าทั้งสูตร FBA3 (n-BA 3 phr) และสูตร FT3 (TMPT 3 phr) ที่ปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอน 50 kGy มีค่าความต้านแรงดึงที่น้อยที่สุด และเมื่อเพิ่มปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอนพบว่าค่าความต้านแรงดึงเพิ่มขึ้น ดังนั้นที่ปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอน 200 kGy > 150 kGy > 100 kGy ตามลำดับ การเพิ่มปริมาณ n-BA และ TMPT จาก 3 phr เป็น 5 phr ที่ปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอนระดับเดียวกัน พบว่าค่าความต้านแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างสารไวต่อปฏิกิริยาทั้ง 2 ชนิดพบว่าที่ปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอนและปริมาณสารไวต่อปฏิกิริยาเดียวกันสูตรที่มี TMPT เป็นสารไวต่อปฏิกิริยามีค่าความต้านแรงดึงสูงกว่าสูตรที่ประกอบด้วย n-BA เล็กน้อย อย่างไรก็ตามค่าความต้านแรงดึงสูงสุดจากการทดลองนี้คือ สูตร FT5 ที่ปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอน 200 kGy แต่ยังไม่พอกว่าสูตรยางที่วัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน



รูปที่ 7 ผลการทดสอบความต้านแรงดึง

เมื่อพิจารณาค่าความยืดเมื่อขาดดังรูปที่ 8 สูตรยางที่มี n-BA และ TMPT เป็นสารไวต่อปฏิกิริยา ในปริมาณ 3 phr ที่ปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอน 50 kGy, 100 kGy, 150 kGy และ 200 kGy พบว่าค่าความยืดเมื่อขาดทั้ง 2 สูตร (FBA3 และสูตร FT3) มีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอนมากขึ้น และเมื่อเพิ่มปริมาณสารไวต่อปฏิกิริยาทั้ง 2 ชนิด จาก 3 phr เป็น 5 phr พบว่าค่าความยืดเมื่อขาดไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และยังพบว่าสูตรยางที่วัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันและสูตรยางที่ใช้สารไวต่อปฏิกิริยาทั้ง 2 ชนิด สูตร FBA3 (n-BA 3 phr) สูตร FBA5 (n-BA 5 phr) และสูตร FT5 (TMPT 5 phr) วัลคาไนซ์ที่ปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอน 200 kGy ให้ค่าความยืดเมื่อขาดไม่แตกต่างกัน



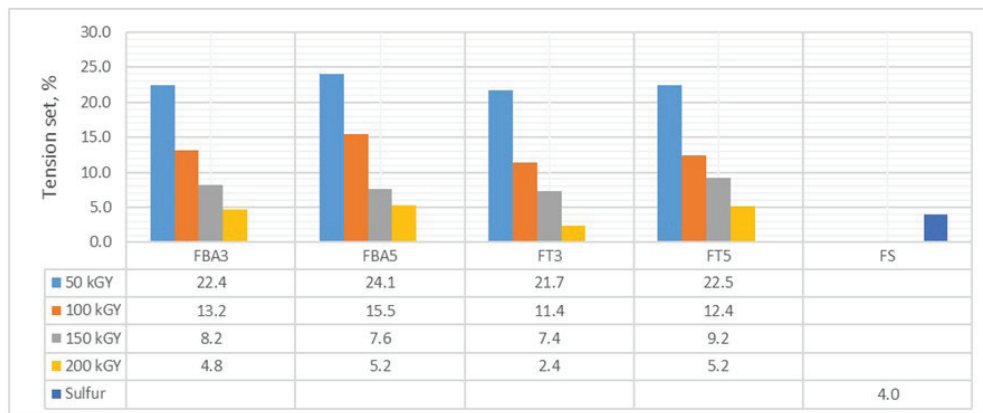
รูปที่ 8 ผลการทดสอบความยืดเมื่อขาด

ผลการทดสอบค่ามอดุลัสที่ความยืดร้อยละ 300 ดังรูปที่ 9 มีแนวโน้มเป็นไปในทางเดียวกับผลการทดสอบค่าความแข็งแรงและความต้านแรงดึง นั่นคือ สูตรยางที่มีสารไวต่อปฏิกิริยา n-BA และ TMPT ในปริมาณ 3 phr มีค่ามอดุลัสที่ความยืดร้อยละ 300 เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอน และเมื่อเพิ่มปริมาณสารไวต่อปฏิกิริยาทั้ง 2 ชนิด จาก 3 phr เป็น 5 phr พบว่าค่ามอดุลัสที่ความยืดร้อยละ 300 แตกต่างกันเล็กน้อยที่ปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอนระดับเดียวกัน และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างสารไวต่อปฏิกิริยาทั้ง 2 ชนิด พบว่าที่ปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอนเดียวกันและปริมาณสารไวต่อปฏิกิริยาเดียวกันสูตรที่มี TMPT เป็นสารไวต่อปฏิกิริยามีค่ามอดุลัสที่ความยืดร้อยละ 300 สูงกว่าสูตรที่ประกอบด้วย n-BA เล็กน้อย อย่างไรก็ตามค่ามอดุลัสที่ความยืดร้อยละ 300 สูงสุดจากการทดลองนี้คือ สูตร FT5 ที่ปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอน 200 kGy แต่ยังไม่พียงสูตรยางที่วัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน



รูปที่ 9 ผลการทดสอบมอดุลัสที่ความยืดร้อยละ 300

เมื่อพิจารณาค่าความยืดอยู่ตัวดังรูปที่ 10 สูตรยางที่มี n-BA และ TMPT เป็นสารไวต่อปฏิกิริยา ในปริมาณ 3 phr ที่ปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอน 50 kGy, 100 kGy, 150 kGy และ 200 kGy พบว่าค่าความยืดอยู่ตัวของทั้งสูตร FBA3 และสูตร FT3 ลดลงเมื่อปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มปริมาณ n-BA และ TMPT จาก 3 phr เป็น 5 phr พบว่าค่าความยืดอยู่ตัวแตกต่างกันเล็กน้อย แสดงว่าการเพิ่มปริมาณสารไวต่อปฏิกิริยาไม่มีผลต่อค่าความยืดอยู่ตัว และสารไวต่อปฏิกิริยาทั้ง 2 ชนิดมีค่าความยืดอยู่ตัวใกล้เคียงกันที่ปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอนและปริมาณสารไวต่อปฏิกิริยาเดียวกัน อย่างไรก็ตามสูตรยางที่มีค่าความยืดอยู่ตัวต่ำและใกล้เคียงกับสูตรยางที่วัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน คือสูตร FBA3 (n-BA 3 phr) สูตร FBA5 (n-BA 5 phr) และสูตร FT5 (TMPT 5 phr)



รูปที่ 10 ผลการทดสอบความยืดอยู่ตัว

จากผลของการศึกษานี้จะเห็นได้ว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอนทำให้ค่าความแข็ง ความต้านแรงดึง และมอดุลัสที่ความยืดร้อยละ 300 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเชื่อมขวางของโมเลกุลของยางในระหว่างการฉายรังสี ซึ่งเกิดจากการผลึกอะตอมไฮโดรเจนออกจากสายโซ่ของยางธรรมชาติ และอะตอมไฮโดรเจนนี้ทำปฏิกิริยากับอะตอมไฮโดรเจนที่อยู่ใกล้เคียงก่อให้เกิดเป็นก๊าซไฮโดรเจนและอนุมูลอิสระ แล้วอนุมูลอิสระนี้จะถูกเติมเข้าไปในพันธะ C=C (C=C bond) ทำให้เกิดการเชื่อมขวางซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเชื่อมขวางของยางธรรมชาติ ในขณะที่ความยืดเมื่อขาดมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มปริมาณรังสีทำให้การเชื่อมขวางระหว่างโมเลกุลของยางดีขึ้น ส่งผลให้เกิดอุปสรรคในการขยายโมเลกุลของพันธะ C-C (C-C bond) จึงทำให้ความยืดเมื่อขาดลดลง แสดงให้เห็นว่าปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอนมีผลต่อการเชื่อมขวางสายโซ่ของยางธรรมชาติ ดังจะเห็นได้จากสูตรยางที่ฉายลำอิเล็กตรอนที่ปริมาณรังสี 50 kGy ไม่สามารถทำให้ยางเกิดการวัลคาไนซ์โดยสมบูรณ์ได้ ดังนั้นเมื่อพิจารณาค่าความแข็ง ความต้านแรงดึง ความยืดเมื่อขาด มอดุลัสที่ความยืดร้อยละ 300 และค่าความยืดอยู่ตัว ที่ได้จากการทดลองนี้ พบว่าปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอนที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการวัลคาไนซ์ยางคือ 200 kGy

เมื่อเปรียบเทียบสารไวต่อปฏิกิริยา 2 ชนิด ระหว่าง n-BA และ TMPT จากการทดลองนี้จะเห็นได้ว่า สูตรยางที่ประกอบด้วย TMPT ที่ระดับปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอนเดียวกัน มีค่าความแข็ง ความต้านแรงดึง และมอดุลัสที่ความยืดร้อยละ 300 สูงกว่าสูตรยางที่ประกอบด้วย n-BA จึงอาจสรุปได้ว่า TMPT เป็นสารไวต่อปฏิกิริยาที่สามารถช่วยให้เกิดการเชื่อมขวางของโมเลกุลของพอลิเมอร์ได้ดีกว่า จากการวิจัยนี้พบว่าสูตรยางที่ประกอบด้วย TMPT เป็นสารไวต่อปฏิกิริยาในปริมาณ 5 phr ทำการวัลคาไนซ์ที่ปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอน 200 kGy เป็นสูตรยางที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการวัลคาไนซ์ยางด้วยลำอิเล็กตรอน

อย่างไรก็ตาม จากการศึกษาพบว่าแผ่นยางคอมพาวนด์ที่วัลคาไนซ์ด้วยลำอิเล็กตรอนมีค่าความต้านแรงดึงต่ำกว่าแผ่นยางคอมพาวนด์ที่วัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันเป็นอย่างมาก ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากการวัลคาไนซ์ด้วยลำอิเล็กตรอนเป็นการเชื่อมโครงข่าย (Network) ด้วยโครงสร้างภายในของยางเองโดยพลังงานจากลำอิเล็กตรอนจะเข้าไปชนโมเลกุลของยางทำให้เกิดการจัดพันธะระหว่างคาร์บอนกับคาร์บอน (C-C bond) ซึ่งต่างจากการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันที่ยางจะทำปฏิกิริยากับกำมะถันสร้างพันธะโคเวเลนต์เชื่อมระหว่างโซ่พอลิเมอร์ให้เป็นโมเลกุลเดียวกันเกิดพันธะระหว่างกำมะถันกับคาร์บอน (C-S bond)

ผลการเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพของแผ่นยางคอมพาวนด์ที่ได้จากการวัลคาไนซ์ด้วยลำอิเล็กตรอนสูตรที่เหมาะสมจากการทดลองนี้ ซึ่งเป็นสูตรสำหรับผลิตภัณฑ์ยางที่ต้องการความยืดอยู่ตัวต่ำ คือ สูตร FT5 วัลคาไนซ์ที่ปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอน 200 kGy กับแผ่นยางคอมพาวนด์ที่วัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน แสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 สมบัติทางกายของแผ่นยางคอมพาวนด์ที่วัลคาไนซ์ด้วยลำอิเล็กตรอนเปรียบเทียบกับแผ่นยางคอมพาวนด์ที่วัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน

รายการ	แผ่นยางคอมพาวนด์ที่วัลคาไนซ์ด้วย				
	กำมะถัน (สูตร FS)	ลำอิเล็กตรอน (สูตร FT5)			
		ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2	
		mean	SD	mean	SD
ความแข็ง, Shore A	33	26	0.52	26	0.41
ความต้านแรงดึง, MPa	19.0	5.5	0.39	5.8	0.18
ความยืดเมื่อขาด, %	673	611	8.53	628	6.47
มอดุลัสที่ความยืดร้อยละ 300, MPa	2.0	1.0	0.07	1.1	0.06
ความยืดอยู่ตัว, %	4.0	5.2	0.08	5.1	0.15

จากการทดลองซ้ำสูตรยางที่ได้จากการศึกษา (สูตร FT5) โดยวัลคาไนซ์ด้วยปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอนเดียวกัน (200 kGy) แล้ววิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติโดยใช้การทดสอบแบบเอฟ (F-test) และที (t-test) ดังแสดงในตารางที่ 5 พบว่า ค่าความแข็ง ความต้านแรงดึง ความยืดเมื่อขาด มอดุลัสที่ความยืดร้อยละ 300 และความยืดอยู่ตัว ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ จึงสรุปได้ว่าการผสมและการวัลคาไนซ์สามารถทำได้

ตารางที่ 5 การวิเคราะห์ผลทางสถิติแบบ F-test และ t-test ของยางสูตร FT5

รายการ	F-test		t-test	
	F_{cal}	F_{crit}	t_{cal}	t_{crit}
ความแข็ง, Shore A	1.62	9.60	1.77	2.31
ความต้านแรงดึง, MPa	4.61	9.60	-1.80	2.31
ความยืดเมื่อขาด, %	1.74	9.60	-3.59	2.31
มอดุลัสที่ความยืดร้อยละ 300, MPa	1.37	9.60	-0.14	2.31
ความยืดอยู่ตัว, %	3.26	39.00	-1.50	2.78

4. สรุป (Conclusion)

การศึกษการพัฒนาสูตรยางคอมพาวนด์สำหรับการวัลคาไนซ์ด้วยลำอิเล็กตรอนด้วยการปรับจากสูตรยางเริ่มต้นที่วัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน โดยการศึกษาชนิดและปริมาณของสารไวต่อปฏิกิริยาระหว่างยางและลำอิเล็กตรอน 2 ชนิดคือ n-Butyl acrylate (n-BA) และ Trimethylolpropane trimethacrylate (TMPT)) ในปริมาณ 3 phr และ 5 phr แล้วเปรียบเทียบค่าความแข็ง ความต้านแรงดึง ความยืดเมื่อขาด มอดุลัสที่ความยืดร้อยละ 300 และการยืดอยู่ตัวของแผ่นยางคอมพาวนด์ที่ได้กับแผ่นยางคอมพาวนด์ที่วัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน และการศึกษาปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอนที่เหมาะสมสำหรับวัลคาไนซ์ยางโดยการฉายลำอิเล็กตรอนที่มีพลังงานในการเร่งอนุภาคของอิเล็กตรอน 10 MeV ไปยังแผ่นยางที่ปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอนต่าง ๆ ได้แก่ 50 kGy, 100 kGy, 150 kGy และ 200 kGy พบว่าสูตรที่ประกอบด้วยสารไวต่อปฏิกิริยาชนิด TMPT ในปริมาณ 5 phr วัลคาไนซ์ที่ปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอน 200 kGy เป็นสูตรยางที่เหมาะสมสำหรับวัลคาไนซ์ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการค่าการยืดอยู่ตัวต่ำ อย่างไรก็ตาม สมบัติทางกายภาพของยางที่ได้จากการศึกษานี้ยังคงน้อยกว่าแผ่นยางคอมพาวนด์ที่ได้จากการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน

5. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

ขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) เอื้อเพื่อการวัดคาบครึ่งอย่างด้วยลำอิเล็กตรอน

6. เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] ยางพารา [ออนไลน์]. กุมภาพันธ์ 2564 เข้าถึงจาก: shorturl.at/nHNQ4 [อ้างถึงวันที่ 17 กุมภาพันธ์ 2565].
- [2] พงษ์ธร แห้วย. สารเคมียาง. ปทุมธานี : ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2548. 4-9. ISBN:974-229-750-9.
- [3] การวัดคาบครึ่งอย่างด้วยลำอิเล็กตรอน [ออนไลน์]. ธันวาคม 2557 เข้าถึงจาก: shorturl.at/cflrP [อ้างถึงวันที่ 3 มีนาคม 2565].
- [4] PHETARPORN, V., S. LOYKULNANT, C. KONGKAEW, A. SEUBSAI, and P. PRAPANINAINAR. *Composite properties of graphene-based materials/natural rubber vulcanized using electron beam irradiation*. New York : ELSEVIER. 2019, 413-424.
- [5] CHIRINOS, H., F. YOSHII, and K. MAKUUCHI. Natural rubber latex using gamma rays and electron beam radiation. *Kautschuk Gummi Kunststoffe*. 2007, 535-541.
- [6] KARAAGAC, B., A. AYTAC, and V. DENIZ. Application of radiation technology to rubber and tire industries. *Hacettepe Journal of Biology and Chemistry*. 2014, **42**(1), 24-34.
- [7] HAGUE, M.E., N.C. DAFADER, F. AKHTAR, and M.U. AHMED. Radiation dose required for the vulcanization of natural rubber latex. *Radiation Physics and Chemistry*. 1996, **48**(4), 505-510.
- [8] MANAILA, E., and others. Radiation vulcanization of natural rubber with polyfunctional monomers. *Polymer Bulletin*. 2014, **71**(1), 57-82.
- [9] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). ISO 48-4: 2018. *Rubber, vulcanized or thermoplastic-Determination of hardness-Part 4: Indentation hardness by durometer method (Shore hardness)*. Geneva, Switzerland: ISO. 2018.
- [10] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). ISO 37: 2017. *Rubber, vulcanized or thermoplastic-Determination of tensile stress-strain properties*. Geneva, Switzerland: ISO. 2017.
- [11] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). ISO 2285: 2019. *Rubber, vulcanized or thermoplastic-Determination of tension set under constant elongation, and of tension set, elongation and creep under constant tensile load*. Geneva, Switzerland: ISO. 2019.
- [12] จันทรัตน์ วรสรรพวิทย์. การใช้โปรแกรมสำเร็จรูป excel ในการทดสอบแบบเอฟและที. *วารสารสำนักบริหารและรับรองห้องปฏิบัติการ*. 2552, **5**(14), 12-19.

การพัฒนาระบบเซนเซอร์แบบกระจายอย่างง่ายสำหรับการเฝ้าติดตามและแจ้งเตือนอัตโนมัติผ่านระบบออนไลน์: กรณีศึกษาการพัฒนาต้นแบบระบบอุปกรณ์โครงข่ายเซนเซอร์ TVOC สำหรับเฝ้าติดตามและแจ้งเตือนคุณภาพอากาศในพื้นที่ปฏิบัติงานแบบเรียลไทม์

Developing a simple distributed sensor system for automated online monitoring and alerting : case study of TVOC sensor network system prototype development for real-time monitoring and alerting of air quality in operations

ชนก ท่วมจรรย์¹

Chanok Thuamjorn¹

รับบทความ: 18 กุมภาพันธ์ 2565 แก้ไขบทความ: 8 มิถุนายน 2565 ยอมรับตีพิมพ์: 23 มิถุนายน 2565

บทคัดย่อ

การพัฒนาต้นแบบระบบอุปกรณ์โครงข่ายเซนเซอร์ TVOC (Total Volatile Organic Compound) สำหรับเฝ้าติดตามและแจ้งเตือนคุณภาพอากาศในพื้นที่ปฏิบัติงานแบบเรียลไทม์เป็นส่วนหนึ่งของการพัฒนาระบบเซนเซอร์แบบกระจายสำหรับเฝ้าติดตามและแจ้งเตือนอัตโนมัติผ่านระบบออนไลน์ ต้นแบบระบบที่พัฒนาขึ้นใช้วัสดุไฟฟ้า ประกอบด้วยเซนเซอร์แก๊ส TVOC ชนิด MOS แผ่นวงจรปรับระดับแรงดันลอจิก เป็นวัสดุหลักรวมไปถึงซอฟต์แวร์โอเพนซอร์สด้านเทคโนโลยีสารสนเทศที่เกี่ยวข้องเช่น Virtual Private Server (VPS) ซอฟต์แวร์ IoT Broker และ ซอฟต์แวร์ IoT Gateway ซอฟต์แวร์ IoT Dashboard รวมไปถึง MQTT API เพื่อการพัฒนาต้นแบบตามแนวทางการพัฒนาอุปกรณ์ในระบบอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT) ที่มีความสำคัญอย่างมากในการพัฒนาระบบไซเบอร์-กายภาพ (CPS) ในอนาคต ผลผลิตของการพัฒนานี้ได้ต้นแบบระบบสมรรถนะเซนเซอร์ TVOC ที่สามารถบันทึกข้อมูลความเข้มข้นได้แบบเรียลไทม์ สามารถแสดงผลข้อมูลย้อนหลังได้บน IoT Dashboard ในรูปแบบของกราฟ และสามารถแจ้งเตือนได้ผ่านแอปพลิเคชันสื่อสารและส่งข้อความ ทำให้สามารถวางแผนการจัดการมลพิษทางอากาศในพื้นที่ปฏิบัติงานได้สะดวกขึ้น ซึ่งเป็นข้อดีของระบบสมรรถนะเซนเซอร์แบบโครงข่ายเมื่อเทียบกับเซนเซอร์ที่ทำงานแบบโดดเดี่ยว อย่างไรก็ตามเมื่อทำการทดสอบข้อมูลดิบจากต้นแบบที่ประกอบจากเซนเซอร์ TVOC จำนวน 3 ตัวในระบบ พบว่าค่าความสัมพันธ์ระหว่างเซนเซอร์ภายในกลุ่มมีความเป็นเชิงเส้นน้อย ($R^2 < 0.9$) เมื่อใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนร่วมภายในกลุ่มเซนเซอร์ ทั้งนี้ ประเด็นดังกล่าวเป็นเรื่องปกติของคุณสมบัติของระบบที่ใช้เซนเซอร์แบบกระจาย ซึ่งจำเป็นต้องใช้การปรับแก้ค่า หรือการทำข้อมูลให้เป็นมาตรฐานก่อนการวิเคราะห์ข้อมูลซึ่งสามารถดำเนินการได้ในการพัฒนาระบบในขั้นต่อไป

คำสำคัญ: สารอินทรีย์ระเหยง่ายทั้งหมด, สมรรถนะเซนเซอร์, ระบบเฝ้าติดตามแบบเรียลไทม์, คุณภาพอากาศ, ระบบแจ้งเตือน, แอปพลิเคชันสื่อสารและส่งข้อความ

Keywords: TVOC, Smart-sensor, Real-time monitoring, Air quality, Mobile messenger application

¹ กรมวิทยาศาสตร์บริการ

* Corresponding author e-mail address: chanok@dss.go.th

1. บทนำ (Introduction)

การแจ้งเตือนคุณภาพอากาศในพื้นที่ปฏิบัติงานภายในอาคาร มีความสำคัญอย่างมากต่อผู้ปฏิบัติงาน เนื่องจากคุณภาพอากาศในพื้นที่ปฏิบัติงานส่งผลกระทบต่อสุขภาพและคุณภาพชีวิตของผู้ปฏิบัติงาน [1] ยิ่งไปกว่านั้น การแจ้งเตือนแบบเรียลไทม์จะทำให้ทราบถึงอันตรายของมลพิษทางอากาศที่เกิดขึ้นได้อย่างทันท่วงทีเพื่อป้องกันความสูญเสียทั้งชีวิตและทรัพย์สินที่จะเกิดขึ้นได้ปัญหามลพิษทางอากาศในพื้นที่ปฏิบัติงานมักมาพร้อมกับปัญหากลิ่นรบกวนซึ่งเป็นปัญหาที่พบบ่อยในพื้นที่ปฏิบัติงานโดยเฉพาะพื้นที่ปฏิบัติงานที่เกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรม ไม่ว่าจะเป็น อุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับสารเคมี อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมเกษตรแปรรูป รวมไปถึงการทำเกษตรกรรม และปศุสัตว์พื้นที่ปฏิบัติงานมักมีการปนเปื้อนของไอระเหยที่เป็นสารเคมีซึ่งส่วนมากจะอยู่ในกลุ่มของสารอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Organic Compounds: VOC) เมื่อความเข้มข้นของ VOC ในอากาศมีค่ามากก่อให้เกิดเป็นมลพิษทางอากาศภายในพื้นที่ปฏิบัติงาน และหากการทำงานของระบบระบายอากาศภายในพื้นที่ปฏิบัติงานไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอ มลพิษทางอากาศยังสามารถแพร่กระจายออกสู่สิ่งแวดล้อมภายนอกได้อีกด้วย การจำกัดความเสี่ยงต่อการปนเปื้อนของสารเคมีและกลิ่นรบกวนในอากาศ นอกเหนือจากการออกแบบระบบการจัดการทางลมภายในพื้นที่ปฏิบัติงานและระบบบำบัดอากาศที่ดีแล้ว ยังต้องมีระบบตรวจสอบที่เป็นอุปกรณ์ที่สามารถตรวจจับการปนเปื้อนของสารเคมีในอากาศได้อย่างต่อเนื่องทันการณ์เพื่อใช้ทวนสอบประสิทธิภาพของอุปกรณ์และระบบที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดและกำจัดมลพิษทางอากาศในพื้นที่ปฏิบัติงาน

เซนเซอร์ TVOC (Total volatile organic compound) เป็นเซนเซอร์ที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้สำหรับเติมเต็มการวัดค่าคุณภาพอากาศภายในอาคารหรือพื้นที่ปฏิบัติงาน โดยนำมาใช้เติมเต็มวิธีการวัดค่าความเข้มข้น VOC ในอากาศที่เป็นมาตรฐาน [2-3] ทั้งนี้วิธีมาตรฐานดังกล่าวเหมาะกับการใช้สำรวจคุณภาพอากาศเฉพาะช่วงเวลาที่ทำการศึกษา และเป็นวิธีการวัดค่า VOC ที่มีความยุ่งยากค่าใช้จ่ายสูง จำเป็นต้องใช้เครื่องมือวิเคราะห์ด้านเคมีขั้นสูงไม่เหมาะสำหรับการนำมาประยุกต์ใช้สำหรับการเฝ้าระวังการรั่วไหลหรือการสะสม VOC หรือเหตุการณ์อื่นที่เป็นเหตุเฉพาะกาลได้

บทความนี้นำเสนอการพัฒนากระบวนการพัฒนาระบบสมรรถนะเซนเซอร์ตามกรอบการออกแบบและพัฒนาระบบไซเบอร์-กายภาพ [4] โดยเลือกการพัฒนาต้นแบบระบบอุปกรณ์โครงข่ายเซนเซอร์ TVOC สำหรับเฝ้าติดตามและแจ้งเตือนคุณภาพอากาศในพื้นที่ปฏิบัติงานแบบเรียลไทม์เป็นกรณีศึกษา เนื่องจากปัญหากลิ่นรบกวนจากกระบวนการทำงานและระบบระบายอากาศในพื้นที่ปฏิบัติงานเป็นปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อ

ต่อคุณภาพชีวิตของผู้ปฏิบัติงานและสิ่งแวดล้อมในพื้นที่ปฏิบัติงาน [4] ระบบอุปกรณ์ต้นแบบได้พัฒนาขึ้นตามแนวทางการพัฒนาเทคโนโลยีเซนเซอร์ในระบบอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of Things: IoT) [5] กระบวนการพัฒนาต้นแบบระบบอุปกรณ์โครงข่ายสมรรถนะเซนเซอร์ TVOC นี้เริ่มต้นด้วย 1) การออกแบบโครงข่ายอุปกรณ์และการสื่อสารการรับและการส่งผ่านและการจัดการข้อมูล 2) การจัดทำต้นแบบ (Embodiment design) ระบบอุปกรณ์โครงข่ายเซนเซอร์ TVOC เพื่อการทดสอบระบบเบื้องต้น 3) การทดสอบระบบและการนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์ด้วยการแจ้งเตือนอัตโนมัติและเฝ้าติดตามผ่านระบบออนไลน์แบบเรียลไทม์ และ 4) การทดสอบความแปรปรวนร่วมภายในกลุ่ม (Covariance analysis) เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ (Correlation) ของเซนเซอร์ในระบบหาแนวทางในการพัฒนาระบบในขั้นต่อไป

2. วิธีการวิจัย (Experimental methods)

สำนักอนามัยสิ่งแวดล้อม กรมอนามัยและ [6-7] ได้จัดทำแนวทางสำหรับการประเมินคุณภาพอากาศภายในอาคาร (Indoor Air Quality: IAQ) โดยกำหนดค่าสารอินทรีย์ระเหยง่ายทั้งหมด (Total volatile organic compound : TVOC) เป็นองค์ประกอบดัชนีชี้วัดคุณภาพอากาศภายในอาคาร ตรวจวัดโดย Real-time Photoionization Detector (PID) หรือวิธีเทียบเท่า มีค่าสูงสุดที่ยอมรับได้ (8 ชั่วโมง) เท่ากับ 3,000 ppb เมื่อค่า TVOC > 3,000 ppb หรือพบว่ามึกลิ่นภายในอาคาร หรือมีการระบายอากาศ (Ventilation rates) น้อยกว่าที่กำหนดไว้ในมาตรฐานอ้างอิง Singapore Standard SS 553: 2009 Code of practice for air-conditioning and mechanical ventilation in buildings ควรมีการวิเคราะห์ VOC รายชนิด (Species) ต่อไป ทั้งนี้การศึกษาลักษณะของ VOC ต่อการปฏิบัติงานของผู้ปฏิบัติงานในพื้นที่โดย Lars Mølhave พบว่าผู้ปฏิบัติงานในพื้นที่ดูเหมือนไม่รับรู้การเปลี่ยนแปลงของอากาศที่มีสาร VOC เจือปนที่ความเข้มข้นน้อยกว่า 200 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และเริ่มมีความรู้สึกไม่สะดวกในการปฏิบัติงานเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นเป็น 3,000 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นถึง 25,000 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ผู้ปฏิบัติงานจะรู้สึกปวดหัวร่วมกับอาการทางระบบประสาทอื่น ๆ [8]

นอกเหนือจากเซนเซอร์ชนิด PID ที่ระบุในแนวทางการตรวจวัด TVOC ในอาคารของสำนักอนามัยสิ่งแวดล้อม กรมอนามัย และเซนเซอร์ TVOC ที่มักพบบ่อยในปัจจุบันมีอีก 2 ชนิด [9] ได้แก่ เซนเซอร์ชนิด Electrochemical และเซนเซอร์ชนิด Metal oxide semiconductor (MOS) สำหรับการพัฒนานี้เลือกใช้เซนเซอร์ชนิด MOS ซึ่งในปัจจุบันมีสินค้าอุปกรณ์ตรวจวัดคุณภาพอากาศที่ใช้เซนเซอร์ชนิดนี้

ในตลาดอย่างแพร่หลาย อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพในการวัดของเซนเซอร์ชนิดนี้ยังขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของผู้ผลิตเป็นผู้กำหนด อีกทั้งยังไม่มีแก๊ส TVOC มาตรฐาน (Certified Reference Material: CRMs) สำหรับใช้ในการสอบเทียบเซนเซอร์ TVOC ทุกชนิด เนื่องจากยังไม่สามารถหาสัดส่วนที่ตายตัวสำหรับการผสมแก๊ส TVOC มาตรฐานที่สมมาตรกับส่วนผสมของแก๊ส VOC ที่เป็นองค์ประกอบได้ งานพัฒนานี้จึงนำเซนเซอร์ชนิด MOS มาใช้เพื่อศึกษาให้ได้องค์ความรู้พื้นฐานที่เพียงพอในการพัฒนาระบบเซนเซอร์ในขั้นถัดไป

2.1 การออกแบบโครงข่ายอุปกรณ์และการสื่อสาร การรับและการส่งผ่านและการจัดการข้อมูล

ต้นแบบระบบอุปกรณ์โครงข่ายเซนเซอร์ TVOC ที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก 3 ส่วนเป็นสำคัญ ได้แก่ 1) เซนเซอร์ TVOC แบบกระจายซึ่งติดตั้งแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบ System on Module (SOM) เพื่อใช้ในการดึงข้อมูลจากเซนเซอร์และเชื่อมต่อกับระบบเครือข่าย 2) เซิร์ฟเวอร์เสมือนภายในองค์กร (Local VPS) สำหรับใช้เป็นศูนย์รวมข้อมูลจากเซนเซอร์ TVOC ในโครงข่ายภายในองค์กร และ 3) ระบบอินเทอร์เน็ตสำหรับการส่งข้อมูลการแจ้งเตือนและการติดตามผ่านระบบออนไลน์การทำงานของระบบได้ถูกออกแบบให้มีการสื่อสาร การรับและการส่งผ่านข้อมูลอย่างเป็นขั้นตอน ดังนี้

2.1.1 การดึงข้อมูลจากเซนเซอร์เพื่อบันทึกเข้าสู่ฐานข้อมูล

- 1) แผงวงจร SOM เริ่มการทำงานเมื่อจ่ายไฟเลี้ยงให้แก่วงจร
- 2) แผงวงจร SOM ทำการดึงข้อมูล TVOC จากเซนเซอร์ทุก 10 วินาที
- 3) แผงวงจร SOM ทำการกรองข้อมูลที่ไม่ถูกต้องทางดิจิทัลออก
- 4) แผงวงจรนำข้อมูลเซนเซอร์ที่ถูกต้องมาผนวกกับข้อมูลการประทับเวลา
- 5) แผงข้อมูลนำข้อมูลที่ประทับเวลาแล้วส่งเข้าสู่ Local VPS
- 6) IoT Broker/Gateway ทำการบันทึกข้อมูลลงในฐานข้อมูลในหน่วยความจำของ Local VPS
- 7) ระบบเริ่มทำซ้ำข้อ 2.1.1 ข้อ 2) เพื่อดึงข้อมูลจากเซนเซอร์เข้าสู่ฐานข้อมูลอัตโนมัติทุก 10 วินาที
- 8) ทำซ้ำข้อ 2.1.1 ข้อ 1) เมื่อต้องการเริ่มต้นการทำงานใหม่ทั้งระบบ

2.1.2 การแจ้งเตือนค่าความเข้มข้น TVOC แบบเรียลไทม์

- 1) โปรแกรมอัตโนมัติเริ่มทำงานเมื่อถึงเวลาที่ตั้งค่าไว้
- 2) โปรแกรมอ่านในมิติส่งค่าขอรหัสยืนยันตัวตนเพื่อเข้าถึงข้อมูลภายใน IoT Broker/Gateway

3) โปรแกรมอัตโนมัติดึงค่าข้อมูลปัจจุบันจากเซนเซอร์ล่าสุดที่ถูกบันทึกไว้ในฐานข้อมูลของ IoT Broker/Gateway

4) โปรแกรมอัตโนมัติส่งค่าขอรหัสยืนยันตัวตนเพื่อส่งข้อมูลเข้าสู่ระบบแอปพลิเคชันสื่อสารและส่งออกข้อมูล

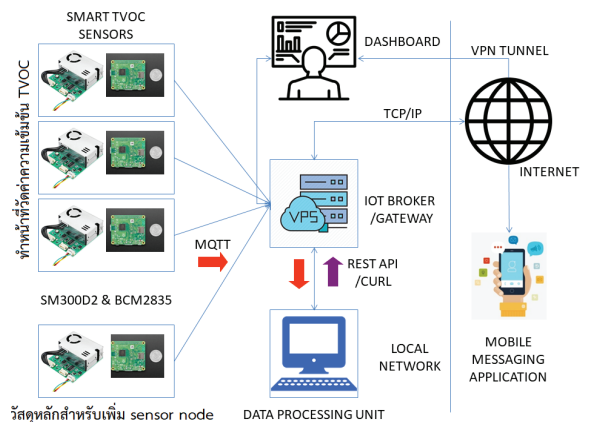
5) โปรแกรมอัตโนมัติส่งข้อความที่บรรจุข้อมูลในข้อ 2.3 เข้าสู่แอปพลิเคชันสื่อสารและส่งออกข้อมูล

6) ระบบเริ่มทำซ้ำข้อ 2.1.2 ข้อ 1) ตามเวลาที่ตั้งค่าไว้

2.1.3 การเฝ้าติดตามข้อมูลความเข้มข้น TVOC แบบเรียลไทม์บน IoT Dashboard

- 1) ใช้ IoT Broker GUI เลือกช่วงเวลาล่าสุดของข้อมูลที่ต้องการเฝ้าติดตาม
- 2) เลือกการแสดงผลข้อมูลล่าสุดในรูปแบบของกราฟหรือตารางบน IoT Dashboard
- 3) ทำซ้ำข้อ 2.1.3 ข้อ 1) เมื่อต้องการเฝ้าติดตามข้อมูลความเข้มข้น TVOC ใหม่

2.2 การจัดทำต้นแบบ (Embodiment design) ระบบอุปกรณ์โครงข่ายเซนเซอร์ TVOC เพื่อการทดสอบระบบเบื้องต้น



รูปที่ 1 แสดงต้นแบบระบบอุปกรณ์โครงข่ายสำหรับการพัฒนาเซนเซอร์ TVOC แบบกระจายอย่างง่ายเพื่อการทดสอบระบบเบื้องต้น

ต้นแบบระบบอุปกรณ์โครงข่ายเซนเซอร์ TVOC เลือกใช้เซนเซอร์ TVOC ชนิด MOS ยี่ห้อ Luziwen รุ่น SM3200D2 จำนวน 3 ตัวในการสร้างหน่วยตรวจวัด (Sensor node) มีคุณลักษณะวัดค่า TVOC ได้ในช่วงการวัด 0-2,000 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าความละเอียด 1 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อุณหภูมิในการทำงาน 0-50 องศาเซลเซียส วัดค่าได้ 1 ครั้งต่อวินาที ใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 5 โวลต์ 60 มิลลิแอมป์แปร ค่าที่วัดได้เป็นสัญญาณดิจิทัลส่งผ่านช่องเชื่อมต่อสัญญาณแบบ Universal asynchronous

receiver and transmitter (UART) ระดับ Transistor-transistor logic (TTL) 5 โวลต์ ที่จำนวนหน่วยสัญญาณต่อวินาที (Baud rate) เท่ากับ 9600 บิตต่อวินาที (bps) สัญญาณจากเซนเซอร์แต่ละตัวถูกลดระดับ TTL ลงมาที่ 3.3 V ด้วยแผ่นวงจรปรับระดับแรงดันลอจิก โดยข้อมูลการวัด 1 ครั้งถูกส่งเป็นข้อมูลเลขฐาน 16 จำนวน 17 ไบต์ (Byte) โดยที่ 1 ไบต์ เท่ากับ 8 บิต (Bit) เท่ากับ 1 ออกเตต (Octet) แสดงโดย 2 อักขระของเลขฐาน 16 ส่งเข้าสู่แผ่นวงจรควบคุมแบบ SOM รุ่น Broadcom BCM2835 ผ่านช่องเชื่อมต่อสัญญาณ UART ระดับ TTL 3.3 โวลต์

แผ่นวงจร SOM มีการติดตั้งระบบปฏิบัติการขนาดเล็ก ย่อมประเภทลินุกซ์ (Linux) และติดตั้งอุปกรณ์เชื่อมต่อระบบเครือข่ายไร้สาย (WLAN) เพื่อเชื่อมต่อกับระบบเครือข่ายภายในขององค์กร แผ่นวงจร SOM ติดตั้งเครื่องมือสร้างซอฟต์แวร์ด้วยภาษาไพธอน (Python) โปรแกรมอัตโนมัติสำหรับดึงค่าข้อมูลจากเซนเซอร์และแปลงค่าข้อมูลเซนเซอร์เป็นค่าความเข้มข้น TVOC ถูกสร้างขึ้นด้วยภาษาไพธอน เมื่อ SOM ได้รับข้อมูลเลขฐาน 16 โปรแกรมอัตโนมัติจะทำการกรองค่าที่ไม่ถูกต้องออก และแปลงข้อมูลที่ถูกต้องเป็นค่าความเข้มข้น TVOC ในเลขฐาน 10 หลังจากนั้นค่าความเข้มข้น TVOC จะถูกจัดรูปแบบให้อยู่ในรูปแบบ JavaScript Object Notation (JSON) และส่งผ่านเข้าสู่ซอฟต์แวร์เซิร์ฟเวอร์รับส่งข้อความ (IoT Broker) ที่ติดตั้งอยู่บน Local VPS ด้วย Message Queuing Telemetry Transport Protocol (MQTT Protocol) โดยซอฟต์แวร์ Paho MQTT API

Local VPS สร้างขึ้นด้วยการสร้างเครื่องคอมพิวเตอร์เสมือน (Virtual machine) บนเครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่ายขององค์กรโดยใช้ทรัพยากร 2 VCore 1 GB RAM 10 GB HDD โดยกำหนดหมายเลขไอพีภายในองค์กร (Private IP address) แบบจำเพาะเจาะจง (Fix IP) มีการติดตั้งระบบปฏิบัติการเดเบียน (Debian) รุ่นที่ 9 ไม่มีการกำหนดหมายเลขไอพีสาธารณะ (External/Public IP Address) ด้วยเหตุผลด้านความปลอดภัยทางไซเบอร์ทำให้ไม่สามารถเข้าถึง Local VPS จากอินเทอร์เน็ตภายนอกองค์กรได้โดยตรง ในทางตรงกันข้าม Local VPS มีความสามารถเข้าถึงระบบอินเทอร์เน็ตภายนอกองค์กรได้ Local VPS นี้มีการติดตั้ง IoT Broker/Gateway ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์โอเพนซอร์ส

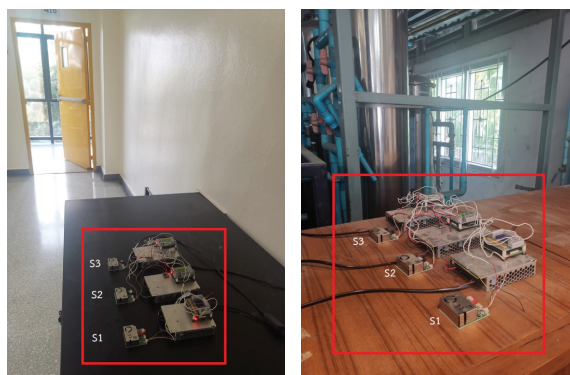
IoT Broker/Gateway ที่ทำการติดตั้งนี้มีโปรแกรมแสดงผลข้อมูล (IoT Dashboard) พร้อมใช้ติดตั้งมาให้อยู่รองรับการรับข้อมูลผ่าน MQTT Protocol และการส่งข้อมูลคำสั่งแบบ RPC ข้อมูลที่ได้รับจากเซนเซอร์จะถูกจัดเก็บไว้ในฐานข้อมูล PostgreSQL การเข้าถึงข้อมูลที่ส่งไปบันทึกไว้ใน PostgreSQL ไม่สามารถเข้าถึงได้โดยตรงเนื่องจากเป็น IoT Broker/Gateway ที่ใช้เป็นรุ่นฟรีแวร์ ดังนั้นเมื่อต้องการเข้าถึงข้อมูลที่บันทึกไว้ใน PostgreSQL จำเป็น

ต้องสร้างโปรแกรมอัตโนมัติสำหรับเรียกใช้ Representational state transfer application programming interface (REST API) หรือ Client for URLs (CURL) แบบอินเตอร์เฟซบรรทัดคำสั่ง (Command line tool) ที่ IoT Broker/Gateway มีการรองรับ

เนื่องจาก Local VPS ที่สร้างขึ้นเป็นการจำลอง VM ขนาดเล็กเพื่อวัตถุประสงค์สำหรับรับค่าข้อมูลจากเซนเซอร์ TVOC แบบกระจายและทำการจัดเก็บข้อมูลสำหรับ IoT Broker เท่านั้น ดังนั้นความสามารถในการประมวลผลข้อมูลจึงมีขีดจำกัดไม่สามารถประมวลผลข้อมูลจำนวนมากได้ในคราวเดียว สำหรับการติดตามเพื่อเฝ้าระวังความเข้มข้น TVOC อัตโนมัติจำเป็นต้องมีหน่วยประมวลผลเพิ่มเติมสำหรับการทำกรวิเคราะห์ข้อมูล (Data analytic) หรือการสร้างโปรแกรมอัตโนมัติจำพวกปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence: AI) ด้วยเหตุผลนี้จึงทำการติดตั้งคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กที่มีพลังประมวลผลสูงขึ้นโดยมีคุณลักษณะประกอบด้วย 8 VCore 16GB RAM 120 SSD เพิ่มเติมสำหรับงานที่กล่าวถึงข้างต้น

สำหรับผู้ใช้งานระบบที่ใช้การเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตจากภายนอกองค์กร ผู้ใช้งานดังกล่าวสามารถรับข้อความแจ้งเตือนอย่างปกติได้ เนื่องจากการส่งข้อความผ่านช่องทางข้อมูลขาออกซึ่งมีการเชื่อมต่อกับอินเทอร์เน็ต แต่ผู้ใช้เหล่านี้จะไม่สามารถเข้าถึง IoT Broker/Gateway รวมไปถึง IoT Dashboard ที่สร้างขึ้นได้โดยตรง เนื่องจาก Local VPS ไม่มี External/Public IP ดังที่กล่าวไว้แล้ว ทำให้บุคลากรที่เกี่ยวข้องไม่สามารถเข้าถึงระบบเฝ้าติดตามผ่าน Dashboard ได้โดยตรง แต่สามารถเข้าถึงได้ผ่านช่องทาง VPN Tunnel ซึ่งสามารถแจกจ่ายให้บุคลากรที่เกี่ยวข้องเข้าถึงได้ ทั้งนี้ต้นแบบระบบอุปกรณ์โครงข่ายเซนเซอร์ TVOC ที่กล่าวถึงทั้งหมดนี้ได้แสดงไว้ในรูปที่ 1

2.3 การทดสอบระบบและการนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์ด้วยการแจ้งเตือนอัตโนมัติและการเฝ้าติดตามผ่านระบบออนไลน์แบบเรียลไทม์



รูปที่ 2 แสดงการติดตั้งระบบเซนเซอร์เพื่อการทดสอบระบบ (ก) การติดตั้งที่ตำแหน่งติดตั้งที่ 1 (ข) การติดตั้งที่ตำแหน่งติดตั้งที่ 2

2.3.1 การทดสอบที่ตำแหน่งติดตั้งที่ 1 บริเวณทางออกบันไดหนีไฟชั้น 3 อาคารสถานศึกษาเคมีปฏิบัติ กรมวิทยาศาสตร์บริการ

ต้นแบบระบบอุปกรณ์โครงข่ายเซนเซอร์ TVOC ที่ประกอบด้วยเซนเซอร์ TVOC จำนวน 3 ตัวถูกวางไว้ใกล้กันที่ระยะห่างกัน 20 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2 (ก) เพื่อทดสอบการเปลี่ยนแปลงค่า TVOC ที่ระบบบันทึกได้ว่ามีลักษณะข้อมูลเป็นอย่างไร เซนเซอร์ชุดนี้ถูกวางทิ้งไว้เป็นเวลา 1 ปี ตั้งแต่วันที่ 1 เดือนธันวาคม พ.ศ. 2563 ถึงวันที่ 31 เดือนพฤศจิกายน พ.ศ.2564 ระหว่างนั้นทำการบันทึกปัญหาที่เกิดขึ้นกับระบบเพื่อทดสอบลักษณะการทำงานแบบการเฝ้าติดตามแบบต่อเนื่อง ทดสอบการแจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชันสื่อสารและส่งข้อความ โดยกำหนดให้ระบบทำการแจ้งเตือนอัตโนมัติผ่านแอปพลิเคชันสื่อสารและส่งข้อความโดยการส่งข้อมูลล่าสุดทุก 20 นาที และทดสอบการเฝ้าติดตามข้อมูลผ่าน IoT Dashboard แบบเรียลไทม์

2.3.2 การทดสอบที่ตำแหน่งติดตั้งที่ 2 บริเวณชั้น 1 อาคารโรงงานเทคโนโลยีชุมชน กรมวิทยาศาสตร์บริการ

ต้นแบบระบบอุปกรณ์โครงข่ายเซนเซอร์ TVOC ที่ประกอบด้วยเซนเซอร์ TVOC จำนวน 3 ตัวถูกติดตั้งและทดสอบเช่นเดียวกับการทดสอบที่ตำแหน่งติดตั้งที่ 1 เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของลักษณะข้อมูลเมื่อทำการติดตั้งต่างพื้นที่ โดยการทดสอบที่ตำแหน่งที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 2 (ข) ทำการศึกษาก่อนเวลา 1 เดือน ตั้งแต่วันที่ 1 ถึงวันที่ 31 เดือนมกราคม พ.ศ. 2565 โดยกำหนดให้ระบบทำการแจ้งเตือนอัตโนมัติผ่านแอปพลิเคชันสื่อสารและส่งข้อความโดยการส่งข้อมูลล่าสุดทุก 30 นาทีและทดสอบการเฝ้าติดตามข้อมูลผ่าน IoT Dashboard แบบเรียลไทม์

2.4 การทดสอบความแปรปรวนร่วมภายในกลุ่ม (Covariance analysis) เพื่อศึกษาค่าสหสัมพันธ์ (Correlation) ของเซนเซอร์ในระบบเพื่อหาแนวทางในการพัฒนาระบบต่อไป

เนื่องจากเซนเซอร์ TVOC ยังไม่มีแก๊สมาตรฐานสำหรับการสอบเทียบ จึงไม่สามารถหาค่าความแม่นยำ (Accuracy) ของระบบได้ การทดสอบนี้ จึงใช้วิธีการหาค่าสหสัมพันธ์โดยการทดสอบความแปรปรวนร่วมภายในกลุ่มเป็นตัวบ่งบอกประสิทธิภาพการวัดของระบบ โดยการใช้ความสัมพันธ์เชิงเส้นของผลการวัด [10] ของเซนเซอร์ทั้ง 3 ตัวในระบบเป็นตัวแปรอิสระ การทดสอบใช้ข้อมูลจากระบบในช่วงเวลาระหว่างวันที่ 1 ถึงวันที่ 31 มกราคม พ.ศ. 2564 และข้อมูลระหว่างวันที่ 1 ถึงวันที่ 31 มกราคม พ.ศ. 2565 โดยข้อมูลแต่ละจุดใช้ค่าเฉลี่ยในช่วงเวลา 2 ชั่วโมงของค่าความเข้มข้น TVOC ที่ระบบบันทึกไว้เพื่อลดปริมาณข้อมูลที่นำมาใช้ในการทดสอบเบื้องต้น

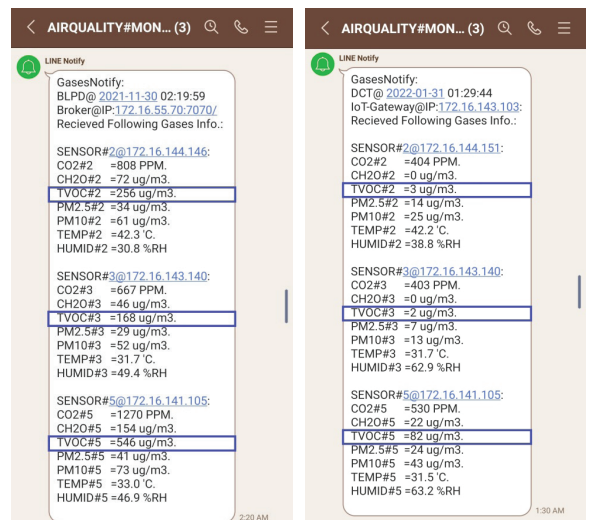
3. ผลและวิจารณ์ (Results and discussion)

3.1 ผลการทดสอบระบบและการนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์ด้วยการแจ้งเตือนอัตโนมัติและการเฝ้าติดตามผ่านระบบออนไลน์แบบเรียลไทม์

การทำงานของต้นแบบระบบอุปกรณ์โครงข่ายเซนเซอร์ TVOC ที่มีเซนเซอร์ทั้ง 3 ตัวในระบบสามารถส่งข้อมูลแบบเรียลไทม์ขึ้นไปเก็บไว้ใน IoT Broker/Gateway ผ่าน MQTT Protocol ได้ทุก 10 วินาที ข้อมูลที่จัดเก็บไว้ใน PostgreSQL สามารถเข้าถึงและเรียกดูข้อมูลได้ผ่าน REST API และชุดคำสั่ง CURL command line tool ที่ IoT Broker/Gateway รองรับ

อย่างไรก็ตาม ยังพบปัญหาทั่วไปของระบบอุปกรณ์สมาร์ต [11] ซึ่งทำให้ข้อมูลบางส่วนขาดหายไป เช่น ปัญหาไฟดับทำให้เซนเซอร์ไม่ทำงาน ปัญหาการเชื่อมต่อสัญญาณผ่าน WLAN ขาดหายทำให้เซนเซอร์ไม่สามารถติดต่อ Local VPS ได้ อย่างไรก็ตาม ระบบต้นแบบนี้ไม่พบปัญหาข้อจำกัดแบบดียวของระบบ เนื่องจากการออกแบบได้คำนวณไว้ให้เพียงพอต่อการทำงานของเซนเซอร์จำนวน 3 ตัว (ที่การส่งข้อมูล 1 ครั้งใน 10 วินาที)

รูปที่ 3 แสดงผลการแจ้งเตือนข้อมูลความเข้มข้น TVOC แบบเรียลไทม์ผ่านแอปพลิเคชันสื่อสารซึ่งส่งข้อความได้ตามที่กำหนดไว้รูปที่ 4 และรูปที่ 5 แสดงการติดตามความเข้มข้น TVOC แบบเรียลไทม์บน IoT Dashboard



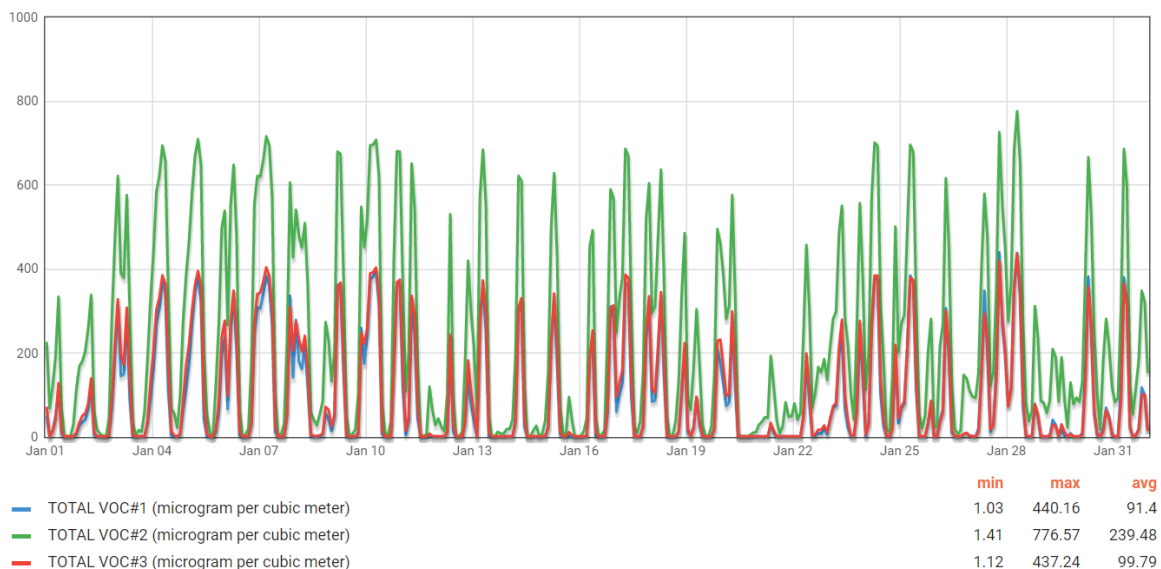
รูปที่ 3 แสดงผลการแจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชันสื่อสารและส่งข้อความ (ก) การทดสอบที่ตำแหน่งติดตั้งที่ 1 (ข) การทดสอบที่ตำแหน่งติดตั้งที่ 2

TOTAL VOC



รูปที่ 4 แสดงการเฝ้าติดตามความเข้มข้น TVOCแบบเรียลไทม์บน IoT Dashboard ระหว่างวันที่ 1-31 มกราคม 2564 โดยใช้ต้นแบบระบบเซนเซอร์ TVOC แบบโครงข่ายติดตั้งบริเวณทางออกบันไดหนีไฟชั้น 3 อาคารสถานศึกษาเคมีปฏิบัติ กรมวิทยาศาสตร์บริการ

TOTAL VOC



รูปที่ 5 แสดงการเฝ้าระวังความเข้มข้น TVOC แบบเรียลไทม์บน IoT Dashboard ระหว่างวันที่ 1-31 มกราคม 2565 โดยใช้ต้นแบบระบบเซนเซอร์ TVOC แบบโครงข่ายติดตั้งบริเวณชั้น 1 อาคารโรงงานเทคโนโลยีชุมชน กรมวิทยาศาสตร์บริการ

3.2 ผลการทดสอบความแปรปรวนร่วมภายในกลุ่ม (Covariance analysis) เพื่อศึกษาค่าสหสัมพันธ์ (Correlation) ของเซนเซอร์ในระบบเพื่อหาแนวทางในการพัฒนาระบบต่อไป

	Covariance		
	TVOC_S1	TVOC_S2	TVOC_S3
TVOC_S1	8269.693	16475.29	17338.67
TVOC_S2	16475.29	36223.09	38223.3
TVOC_S3	17338.67	38223.3	40534.49

(ก)

	Covariance		
	TVOC_S1	TVOC_S2	TVOC_S3
TVOC_S1	14988.29	15570.96	27020.98
TVOC_S2	15570.96	16393.62	28479.17
TVOC_S3	27020.98	28479.17	51733.12

(ข)

รูปที่ 6 แสดงผลการคำนวณค่าความแปรปรวนร่วมภายในกลุ่ม (Covariance analysis) ของ ก) การทดสอบที่ตำแหน่งติดตั้งที่ 1 และ ข) การทดสอบที่ตำแหน่งติดตั้งที่ 2 ด้วยเครื่องมือ Data analysis จากโปรแกรม Microsoft excel

ความสัมพันธ์ของค่าสหสัมพันธ์ (Correlation) หาได้จากค่าความแปรปรวนร่วมภายในกลุ่ม (Covariance) ดังสมการที่ 1 หรือสามารถใช้เครื่องมือ Data analysis จากโปรแกรม Microsoft excel หาค่าได้เช่นเดียวกัน

$$r = \frac{\text{covariance}(x,y)}{\sqrt{\text{variance}(x) \times \text{variance}(y)}} \quad (\text{สมการที่ 1})$$

	Correlation		
	TVOC_S1	TVOC_S2	TVOC_S3
TVOC_S1	1	0.951909	0.947019
TVOC_S2	0.951909	1	0.997523
TVOC_S3	0.947019	0.997523	1

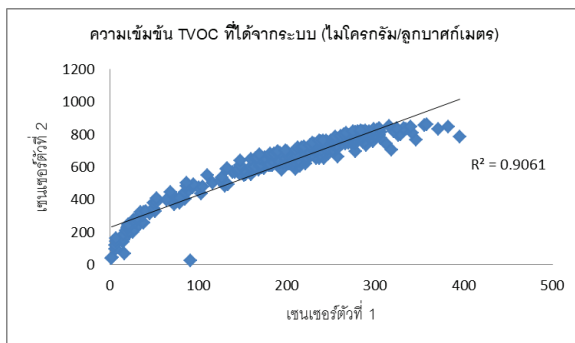
(ก)

	Correlation		
	TVOC_S1	TVOC_S2	TVOC_S3
TVOC_S1	1	0.993349	0.970378
TVOC_S2	0.993349	1	0.977925
TVOC_S3	0.970378	0.977925	1

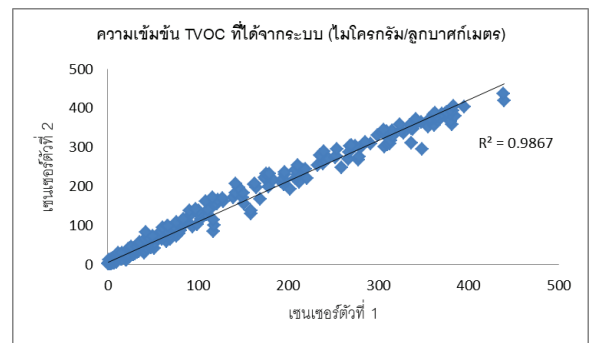
(ข)

รูปที่ 7 แสดงผลการคำนวณค่าสหสัมพันธ์ (Correlation) ของ ก) การทดสอบที่ตำแหน่งติดตั้งที่ 1 และ ข) การทดสอบที่ตำแหน่งติดตั้งที่ 2 ด้วยเครื่องมือ Data analysis จากโปรแกรม Microsoft excel

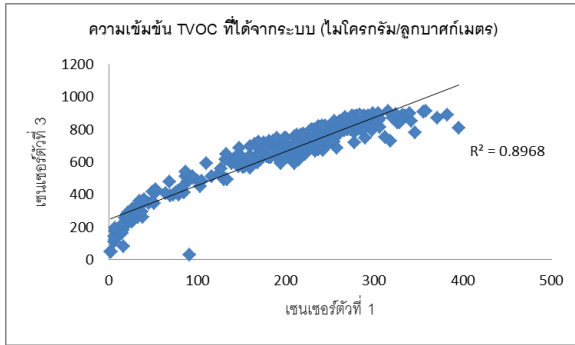
เมื่อพิจารณาเฉพาะค่าสหสัมพันธ์พบว่า ค่าสหสัมพันธ์ของข้อมูลจากเซนเซอร์แต่ละคู่มีความสัมพันธ์สูง มีค่า r ใกล้เคียง 1 โดยใช้สมการที่ 1 ซึ่งเป็นสมการสหสัมพันธ์แบบเพียร์สัน (Pearson correlation coefficient) ในการคำนวณ แต่เมื่อทำการสร้างแผนภูมิแสดงค่าความสัมพันธ์เชิงเส้นของเซนเซอร์แต่ละคู่ดังแสดงในรูปที่ 8 โดยค่า R^2 มีค่าเท่ากับค่าสหสัมพันธ์ยกกำลังสองจะพบว่า การทำงานของระบบเซนเซอร์ที่ใช้เซนเซอร์มากกว่า 2 ตัวขึ้นไปไม่สามารถบ่งชี้ประสิทธิภาพการวัดได้โดยการใช้การวิเคราะห์เฉพาะค่าสหสัมพันธ์โดยตรงเพียงอย่างเดียว เนื่องจากความสัมพันธ์เชิงเส้นของเซนเซอร์บางคู่ไม่ได้เป็นเส้นตรงอย่างสมบูรณ์ และเส้นสมการถดถอยของเซนเซอร์บางคู่ไม่ตัดจุดกำเนิดของแผนภูมิ เป็นต้น



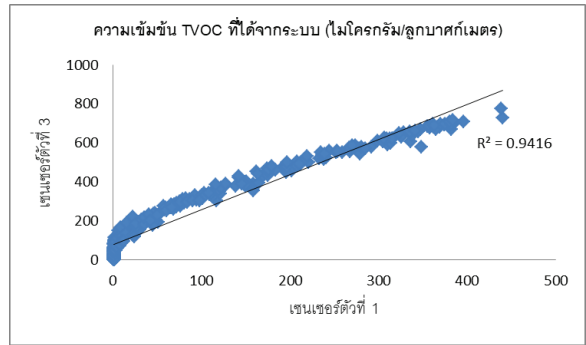
(ก1)



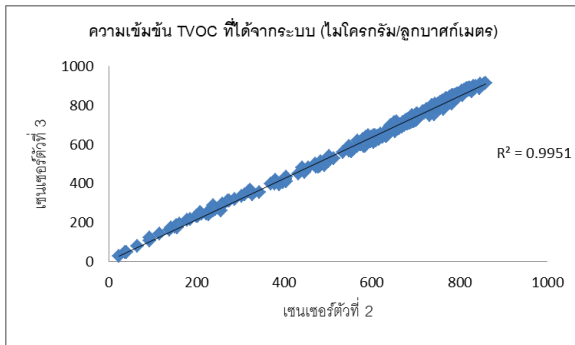
(ข1)



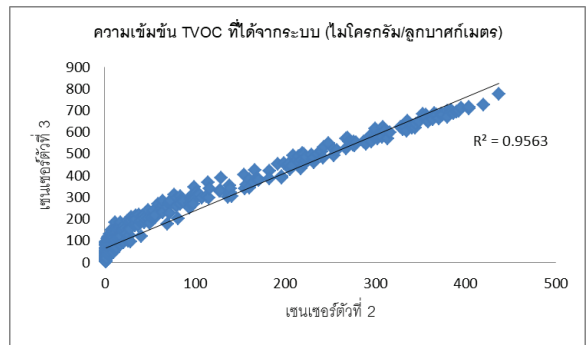
(n2)



(ข2)



(n3)



(ข3)

รูปที่ 8 แสดงแผนภูมิความสัมพันธ์เชิงเส้นของเซนเซอร์แต่ละคู่และค่าสหสัมพันธ์ในรูป R^2 (n1-n3) แสดงการทดสอบที่ตำแหน่งติดตั้งที่ 1 (ข1-ข3) แสดงการทดสอบที่ตำแหน่งติดตั้งที่ 2

เนื่องจากการพัฒนานี้เป็นการพัฒนาสร้างต้นแบบเพื่อใช้ทดสอบและสร้างแนวทางในการพัฒนาต่อยอดจึงได้ประเมินประสิทธิภาพการวัดของระบบด้วยการกำหนดค่าประมาณการสหสัมพันธ์รวมของระบบให้มีค่าเท่ากับผลคูณของค่าสหสัมพันธ์ของเซนเซอร์แต่ละคู่ โดยใช้กฎการคูณความน่าจะเป็นของค่าสหสัมพันธ์ในรูป R^2 เพื่อความสะดวกในการทดสอบ ดังนั้น ประสิทธิภาพการวัดของระบบที่จุดติดตั้งที่ 1 มีค่าประมาณการสหสัมพันธ์รวมเท่ากับ 0.81 และประสิทธิภาพการวัดของระบบที่จุดติดตั้งที่ 2 มีค่า 0.88 แสดงให้เห็นว่าความแม่นยำการวัดของระบบยังไม่เพียงพอสำหรับการเป็นระบบการวัดที่แม่นยำ แต่ทิศทางของข้อมูลและการเปลี่ยนแปลงข้อมูลสามารถนำมาใช้ในการแจ้งเตือนและเฝ้าติดตามข้อมูลความเข้มข้น TVOC ในพื้นที่ปฏิบัติงานได้ ทั้งนี้ หากพิจารณากราฟในรูปที่ 8 โดยละเอียดพบว่าต้นแบบระบบเซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้นมีแนวโน้มที่จะพบปัญหาการเลื่อนของค่าต่ำสุดที่เซนเซอร์วัดได้ (Sensor baseline drift) และปัญหาการเสื่อมถอยของความไวต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น TVOC (Sensor sensitivity degradation) ของเซนเซอร์ ซึ่งเป็นปัญหาที่พบบ่อยในระบบเซนเซอร์แบบกระจาย [12-13]

4. สรุป (Conclusion)

ต้นแบบระบบอุปกรณ์โครงข่ายเซนเซอร์ TVOC ที่พัฒนาขึ้นสามารถทำงานได้ครบถ้วนตามวัตถุประสงค์ที่วางไว้คือใช้เป็นระบบแจ้งเตือนอัตโนมัติผ่านแอปพลิเคชันสื่อสารและส่งข้อความและเฝ้าติดตามคุณภาพอากาศในพื้นที่ปฏิบัติงานแบบเรียลไทม์ได้ โดยมีค่าสหสัมพันธ์ที่จุดติดตั้งที่ 1 ดังนี้คือ 1) ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างเซนเซอร์ตัวที่ 1 กับเซนเซอร์ตัวที่ 2 มีค่า 0.951909 2) ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างระหว่างเซนเซอร์ตัวที่ 1 กับเซนเซอร์ตัวที่ 3 มีค่า 0.947909 3) ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างเซนเซอร์ตัวที่ 2 กับเซนเซอร์ตัวที่ 3 มีค่า 0.997523 และมีค่าสหสัมพันธ์ที่จุดติดตั้งที่ 2 ดังนี้คือ 1) ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างเซนเซอร์ตัวที่ 1 กับเซนเซอร์ตัวที่ 2 มีค่า 0.993349 2) ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างระหว่างเซนเซอร์ตัวที่ 1 กับเซนเซอร์ตัวที่ 3 มีค่า 0.970378 3) ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างเซนเซอร์ตัวที่ 2 กับเซนเซอร์ตัวที่ 3 มีค่า 0.977925 และค่าประมาณการสหสัมพันธ์รวมของเซนเซอร์ 3 ตัวที่จุดติดตั้งที่ 1 มีค่า 0.81 ในขณะที่ค่าประมาณการสหสัมพันธ์รวมของเซนเซอร์ 3 ตัวที่จุดติดตั้งที่ 2 มีค่า 0.88

แนวทางในการพัฒนาระบบในขั้นต่อไปสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเด็นหลัก ประเด็นแรกคือการใช้ระบบปัญญาประดิษฐ์เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ข้อมูลจำนวนมากเพื่อรองรับจำนวนเซนเซอร์ที่ต่อเข้าระบบมากขึ้น และเนื่องจากระบบได้

ออกแบบให้เซนเซอร์ส่งข้อมูล 1 ครั้งภายใน 10 วินาทีเพื่อวัตถุประสงค์ในการแจ้งเตือนและเฝ้าติดตามแบบเรียลไทม์ ดังนั้นเซนเซอร์แต่ละตัวจะสร้างข้อมูลจำนวน 3,153,600 ชุด เมื่อใช้เซนเซอร์จำนวน 3 ตัวจะมีข้อมูลถูกสร้างขึ้น 9,460,800 ชุดภายใน 1 ปี การใช้ปัญญาประดิษฐ์ร่วมกับการวิเคราะห์หึ่งข้อมูล จะทำให้สามารถนำข้อมูลมาใช้ประโยชน์ได้รวดเร็วขึ้นและมีประสิทธิภาพมากขึ้น ประเด็นที่สองคือประเด็นการเพิ่มประสิทธิภาพการวัด ซึ่งสามารถทำได้ด้วยการเพิ่มค่าสหสัมพันธ์ของเซนเซอร์ที่นำมาใช้ในระบบซึ่งมีหลายวิธี เช่น ทำข้อมูลดิบให้ได้มาตรฐาน (Data normalization) การปรับเทียบด้วยตนเองของระบบเซนเซอร์แบบกระจาย (Distributed sensor self-calibration) การเพิ่มค่าแก้ (Data correction) ซึ่งสามารถทำได้โดยใช้ข้อมูลประวัติการวัดของเซนเซอร์ซึ่งมีเก็บไว้ในระบบอยู่แล้ว การเพิ่มค่าชดเชย (Data compensation) จากสภาพแวดล้อมการวัดเช่นอุณหภูมิ ความชื้น รวมไปถึงการชดเชยความผิดพลาดภายในเซนเซอร์เอง เช่น การปรับแก้ Sensor baseline drift หรือการปรับแก้ Sensor sensitivity degradation เป็นต้น

5. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

ผู้วิจัยขอขอบคุณนางอาภาพร สีนธูสาร ผู้อำนวยการกองเทคโนโลยีชุมชน นางสาวปัทมาน พรัตน์ ผู้อำนวยการกองหอสมุดและศูนย์สารสนเทศวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่เล็งเห็นความสำคัญในการพัฒนาเทคโนโลยีด้านระบบไซเบอร์กายภาพ และเทคโนโลยีด้านเซนเซอร์ ขอคุณ ดร.ณัฐกานต์ เกตุคุ้ม วีวองโกส หัวหน้าโครงการยกระดับการจัดการสารเคมีและห้องปฏิบัติการที่เกี่ยวข้องกับสารเคมีในภาคอุตสาหกรรม เพื่อเข้าสู่ระดับมาตรฐานสากล ประจำปีงบประมาณ 2563 ที่เล็งเห็นประโยชน์ของกิจกรรมการพัฒนาอุปกรณ์เพื่อลดความเสี่ยงผลกระทบของมลพิษในพื้นที่ปฏิบัติงานต่อผู้ปฏิบัติงาน ขอคุณฝ่ายเทคโนโลยีสารสนเทศ กรมวิทยาศาสตร์บริการ ที่ให้ความอนุเคราะห์จัดหาเซิร์ฟเวอร์เสมือนภายในองค์กร (Local VPS) สำหรับใช้ในการพัฒนาด้านแบบ ขอคุณบุคลากรกลุ่มวิจัยและพัฒนาเครื่องมือและอุปกรณ์ชุมชนกองเทคโนโลยีชุมชน กรมวิทยาศาสตร์บริการ ที่สนับสนุนให้เขียนบทความฉบับนี้

6. เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] ณัฐกานต์ เกตุคุ้ม. การสร้างแนวปฏิบัติการจัดการสารเคมีในห้องปฏิบัติการอย่างปลอดภัยสำหรับอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์ในประเทศไทย. *Bulletin of Applied Sciences*. 2019, 8(8), 78-87.
- [2] UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (U.S.EPA). Method TO-14A. *Determination of volatile organic compounds (VOCs) in ambient air using specially prepared canisters with subsequent analysis by gas chromatography*.
- [3] UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (U.S.EPA). Method TO-15. *Determination of volatile organic compounds (VOCs) in air collected in specially prepared canisters and analyzed by gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS)*.
- [4] กุลชาติ มีทรัพย์หลก. ระบบไซเบอร์-กายภาพพื้นฐานสำคัญในการยกระดับเทคโนโลยี [online]. [viewed 2022-01-01]. Available from: <https://www.nectec.or.th/research/research-project/nectec-cps.html>.
- [5] Mr. Digital. เทคโนโลยีเซนเซอร์ (Sensor Technology) [online]. Available from: <https://ops.go.th/main/index.php/knowledge-base/article-pr/1520-sensor> [viewed 2022-01-01].
- [6] สำนักอนามัยสิ่งแวดล้อม กรมอนามัย. คู่มือการปฏิบัติงานเพื่อตรวจสอบประเมินคุณภาพอากาศภายในอาคารสำหรับเจ้าหน้าที่. นนทบุรี: สำนักอนามัยสิ่งแวดล้อม กรมอนามัย, 2559.
- [7] สำนักอนามัยสิ่งแวดล้อม กรมอนามัย. คู่มือวิชาการ เรื่องสารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศ. กรุงเทพฯ: องค์การสงเคราะห์ทหารผ่านศึกในพระบรมราชูปถัมภ์, 2555. ISBN 978-616-11-1333-9.
- [8] MOLHAVE, L. Volatile organic compounds, indoor air quality and health. *Indoor Air*. 1991, 1(4), 357-376.
- [9] LAWSON, Jon. How do you choose a VOC sensor [online]. Available from: <https://www.engineerlive.com/content/how-do-you-choose-voc-sensor> [viewed 2022-01-01].
- [10] อุมภาพร สุขม่วง. การใช้ความสัมพันธ์เชิงเส้นในการประเมินวิธีทดสอบ. *วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ* [online]. 2555, 60(188), 12-15. เข้าถึงจาก: http://lib3.dss.go.th/fulltext/dss_j/2555_60_188_p12-15.pdf [อ้างถึงวันที่ 1 มกราคม 2565].
- [11] RAJESH, G. and A. CHATURVEDI. Correlation analysis and statistical characterization of heterogeneous sensor data in environmental sensor networks. *Computer Network*. 2019, 164, 106902.

- [12] GROVER, A. and B. LALL. A Novel method for removing baseline drifts in multivariate chemical sensor. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2020, **69**(9), 7306-7316.
- [13] ROWE, E. G. and T. A. WETTERGREN. Coverage and reliability of randomly distributed sensor systems with heterogeneous detection range. *International Journal of Distributed Sensor Networks*. 2009, **5**(4), 303-320.

การพัฒนาชุดป้องกันการติดเชื้อสำหรับบุคลากรทางการแพทย์ เพื่อรองรับสถานการณ์เร่งด่วนการแพร่ระบาด ของเชื้อ COVID-19 ในประเทศไทย

Development of protection suits for bloodborne pathogen safety for
the emergency use during the pandemic of COVID-19 in Thailand

7

กนิษฐ์ ตะปะสา¹, สมจิตต์ ตั้งชัยวัฒนา¹, สมพงษ์ คำวงเวียน¹, สุวรรณี เทพบุตรดี¹

Kanit Tapasa¹, Somjit Tungchaiwattana¹, Sompong Kamwongwian¹, Suwannee Thepbutdee¹

รับบทความ: 21 กุมภาพันธ์ 2565 แก้ไขบทความ: 17 พฤษภาคม 2565 ยอมรับตีพิมพ์: 29 มิถุนายน 2565

บทคัดย่อ

ในช่วงแพร่ระบาดของเชื้อ COVID-19 ในประเทศไทย เมื่อต้นปี พ.ศ. 2563 เกิดการขาดแคลนชุดป้องกันการติดเชื้อ ที่ได้มาตรฐานสำหรับบุคลากรทางการแพทย์ ทั้งชุดแบบ Coverall และแบบ Isolation gown เนื่องจาก ขณะนั้นยังไม่มีการผลิตชุดดังกล่าวภายในประเทศไทย ต้องนำเข้ามาจากต่างประเทศ กรมวิทยาศาสตร์บริการจึง ร่วมมือกับหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง พัฒนาชุดป้องกันการติดเชื้อแบบ Coverall ระดับ 4 ตามมาตรฐาน ANSI/AAMI PB70 โดยได้ทดลองนำผ้าสแปนบอนด์เส้นใยพอลิโพรพิลีน (PP) น้ำหนัก 40 gsm และพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) น้ำหนัก 50 gsm มาเคลือบด้วยฟิล์มโพลีเอทิลีน (PE) แบบระบายอากาศ (Breathable film) น้ำหนัก 20 gsm ซึ่ง จากการทดสอบพบว่าผ้าทั้งสองมีสมบัติทางกายภาพใกล้เคียงกับชุด Coverall ทางกรมวิทยาศาสตร์บริการ และ สามารถป้องกันการซึมผ่านของเชื้อไวรัส Phi-X174 bacteriophage ซึ่งใช้เป็น Phage suspension ที่มีลักษณะ เป็นทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.027 ไมโครเมตร เล็กกว่าเชื้อ COVID-19 ที่มีขนาด 0.125 ไมโครเมตร และ นำผ้าไปตัดเย็บชุด Coverall พบว่าการเย็บตะเข็บแบบ Ultrasonic สามารถป้องกันการซึมผ่านของไวรัสได้ และ จากการประเมินการใช้งานจริงของบุคลากรทางการแพทย์ พบว่าผู้ประเมินเห็นด้วยว่าชุดที่ตัดเย็บมีความเหมาะสมและ ใส่แล้วมีความคล่องตัว โดยมีความพึงพอใจกับชุดที่ทำจาก ผ้า PET มากกว่าผ้า PP

Abstract

During the epidemic of COVID-19 in Thailand at the beginning of 2020, there was a shortage of personal protective suit for medical personnel in Thailand as they were always imported. The department of Science Service in cooperating with other institutes developed the coverall level 4 suit, according to ANSI/AAMI PB70, for medical use. Two types of spunbond nonwoven fabric were used to tailor the the coverall Level 4 suit, namely, Polypropylene (PP) with the weight of 40 gsm and Polyethylene terephthalate (PET) 50 gsm. Both fabric were coated with the breathable Polyethylene (PE) film 20 gsm. The physical properties of both fabric is similar to the commercial coverall suits. Both fabric could prevent the penetration of Phi-X174 bacteriophage, that used as the phage suspension which had a spherical shape with 0.027 μm in diameter and smaller than COVID-19 disease (0.125 μm in diameter). Seaming is also an important factor because seams must prevent the virus penetration. It was found that Ultrasonic seaming was the best method. The usability survey indicated that the medical staffs satisfied with the coverall Level 4 suits as they was suitable and flexible to use. Nevertheless, the PET fabric was more preferred than the PP.

คำสำคัญ: ชุดป้องกันการส่วนบุคคล ชุดคลุมทั้งตัว ระดับ 4 โคโรนา-19

Keywords: Personal protective suit, Coverall Level 4, COVID-19

¹ กรมวิทยาศาสตร์บริการ

* Corresponding author e-mail address: kanit@dss.go.th

1. บทนำ (Introduction)

ในช่วงแพร่ระบาดของเชื้อ COVID-19 ในประเทศไทย เมื่อต้นปี พ.ศ. 2563 เกิดการขาดแคลนชุดป้องกันการติดเชื้อ ที่ได้มาตรฐานสำหรับบุคลากรทางการแพทย์ ทั้งชุดแบบ Coverall และแบบ Isolation gown ซึ่งในขณะนั้นมีการประเมินว่าต้องใช้ประมาณ 250 ชุดต่อคนไข้ 1 คน หรือประมาณ 500,000 ชุดต่อเดือน และมีการคาดการณ์ว่าจะมีปริมาณไม่เพียงพอ เพราะประเทศไทยนำเข้าจากต่างประเทศมาโดยตลอด และเมื่อทั่วโลกเกิดการแพร่ระบาดของเชื้อ COVID-19 ทำให้ประเทศไทยไม่สามารถนำเข้าชุดป้องกันการติดเชื้อมาใช้ในปริมาณที่เพียงพอได้จากปัญหาดังกล่าวจึงมีผู้ประกอบการในอุตสาหกรรมสิ่งทอและอุตสาหกรรมเครื่องนุ่งห่ม ร่วมมือ สถาบันพัฒนาอุตสาหกรรมสิ่งทอ กรมวิทยาศาสตร์บริการ สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา พัฒนาชุด Isolation gown ที่สามารถซักและนำกลับมาใช้ใหม่ได้ 20 ครั้ง โดยมีคุณสมบัติป้องกันของเหลวซึมผ่านระดับ 2 ตามมาตรฐาน ANSI/AAMI PB70 จำหน่ายให้กับองค์การเภสัชกรรม เมื่อต้นเดือนพฤษภาคม 2563 เพื่อนำไปให้แกهโรงพยาบาลทั่วประเทศ อย่างไรก็ตาม ชุด Isolation gown ระดับ 2 สามารถใช้ในสภาวะที่มีการหัตถการ แล้วมีเลือดกระเด็นใส่ หรือภายในห้องดูแลผู้ป่วยหนัก หรือภายในห้องปฏิบัติการ แต่ไม่สามารถใช้การได้ในสภาวะที่มีเชื้อโรค หรือโรคติดต่อ หรือสารคัดหลั่งจากผู้ป่วย จึงไม่เหมาะกับการดูแลหรือใกล้ชิดผู้ป่วยติดเชื้อ COVID-19 (ดูตารางที่ 1)

องค์การอนามัยโลก (WHO) ได้ออกคำแนะนำด้านคุณลักษณะของชุดป้องกันการติดเชื้อในทางการแพทย์ที่ใช้ป้องกันเชื้อ COVID-19 (Requirements and technical specifications of personal protective equipment (PPE) for the novel coronavirus (2019-ncov) in healthcare settings by WHO) เมื่อวันที่ 6 กุมภาพันธ์ 2020 ว่า คุณลักษณะของชุดป้องกันการติดเชื้อที่ใช้ขึ้นอยู่กับลักษณะงานที่ปฏิบัติ รายละเอียดดังนี้

ทางเลือกที่ 1 สำหรับงานที่ต้องป้องกันการซึมผ่านของเหลว (Fluid penetration resistant) ใช้งานในสภาวะที่มีการทำหัตถการ มีเลือดกระเด็นใส่ในปริมาณมากหรือภายในห้องฉุกเฉิน ชุดป้องกันการติดเชื้อต้องผ่านมาตรฐานยุโรป EN 13795 ระดับสมรรถนะสูง (High performance) หรือมาตรฐานอเมริกา ANSI/AAMI PB70 ไม่น้อยกว่าระดับ 3 หรือเทียบเท่า ซึ่งกำหนดว่าให้ทดสอบการต้านการซึมผ่านของน้ำที่มีแรงดัน (Hydrostatic pressure) ตามมาตรฐาน AATCC127 และการต้านการทะลุผ่านของน้ำ (Water impacting penetration) ตามมาตรฐาน AATCC42 โดยต้องทนแรงดันของน้ำ ได้มากกว่าหรือเท่ากับ 50 cmH₂O (49.03 mbar) ทั้งตรงเนื้อผ้าและตะเข็บ และปริมาณน้ำที่ทะลุผ่านต้องน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1 กรัม

ทางเลือกที่ 2 สำหรับงานที่ต้องป้องกันการซึมผ่านของเชื้อโรค (Blood borne pathogens penetration resistant) ใช้งานในสภาวะที่มีเชื้อโรค หรือโรคติดต่อ หรือสารคัดหลั่งจากผู้ป่วย ชุดป้องกันการติดเชื้อต้องผ่านมาตรฐานอเมริกา ANSI/AAMI PB70 ระดับ 4 หรือตามมาตรฐานยุโรป EN 14126 ที่กำหนดให้ต้องทดสอบการต้านการซึมผ่านของเลือดเทียมและไวรัส ตามมาตรฐาน ISO16603 และ ISO16604 ตามลำดับ โดยต้องผ่าน Class 5 ที่แรงดันไม่น้อยกว่า 14 kPa หรือ 140 mbar ทั้งตรงเนื้อผ้าและตะเข็บ โดยเชื้อไวรัสที่ใช้ทดสอบคือเชื้อไวรัส Phi-X174 Bacteriophage ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.027 ไมโครเมตร เล็กกว่าเชื้อ COVID-19 ที่มีขนาด 0.125 ไมโครเมตร

ชุดป้องกันการติดเชื้อ ระดับ 4 ที่ใช้ในทางการแพทย์ ส่วนใหญ่เป็นชุดที่ใช้แล้วทิ้ง เนื้อผ้าทำจากเส้นใย Polypropylene (PP) หรือ Polyethylene terephthalate (PET) หรือ High-density polyethylene (HDPE) และขึ้นรูปเป็นผ้า (Spunbond) หรือสแปนเลส (Spunlace) เคลือบด้วยฟิล์ม Polyester (PE) ซึ่งประเทศไทยมีผู้ผลิตวัตถุดิบดังกล่าวในสมาคมอุตสาหกรรมเส้นใยประดิษฐ์ไทย และสมาคมทอผ้าไทย สมาคมอุตสาหกรรม ทำให้ศักยภาพในการผลิตชุดป้องกันการติดเชื้อระดับ 4 ขึ้นได้เองภายในประเทศ อย่างไรก็ตาม ชุดป้องกันการติดเชื้อจัดว่าเป็นเครื่องมือแพทย์ จำเป็นต้องได้รับการทดสอบคุณภาพตามมาตรฐานสากลซึ่งเน้นการทดสอบความสามารถในการป้องกันการซึมผ่านไวรัส และการทดสอบความเข้ากันได้ทางชีวภาพ

วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัยนี้คือ การพัฒนาชุดป้องกันการติดเชื้อแบบคลุมทั้งตัว (Coverall) ระดับ 4 มาตรฐานอเมริกา ANSI/AAMI PB70 โดยใช้วัสดุที่ผลิตภายในประเทศไทย ได้แก่ ผ้าสแปนบอนด์ที่ผลิตจากเส้นใยพอลิโพรพิลีน (PP) พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) นำไปเคลือบด้วยฟิล์มโพลีเอทิลีน (PE) แบบระบายอากาศ (Breathable film) ซึ่งใช้เคลือบผ้าอ้อมเด็ก ผู้ผลิตวัสดุดังกล่าวในประเทศไทย ได้แก่

- วัตถุดิบ (PP, PET, PE) เช่น บริษัท PTTGC SGC Teijin Indorama MHM เป็นต้น
- ผลิตผ้าสแปนบอนด์ที่ เช่น บริษัท Narula MHM TUSCO เป็นต้น
- การเคลือบผิวผ้า (Coating หรือ Lamination) เช่น บริษัท TPC, Teijin Frontier Narula เป็นต้น

ตารางที่ 1 ระดับการใช้งานชุดป้องกันการติดเชื้อตามมาตรฐาน ANSI/AAMI PB70

ระดับ	ความเหมาะสมในการใช้งาน	การทดสอบ	มาตรฐานทดสอบ	เกณฑ์การยอมรับ
1	การใช้งานทั่วไปในโรงพยาบาล	Water impacting penetration	AATCC 42	≤ 4.5 g
2	การใช้ในสภาวะที่มีการหัตถการแล้วมีเลือดกระเด็นใส่ หรือภายในห้องดูแลผู้ป่วยหนัก หรือภายในห้องปฏิบัติการ	Water impacting penetration	AATCC 42	≤ 10 g
		Hydrostatic pressure	AATCC 127	≥ 20 cmH ₂ O
3	การใช้ในสภาวะที่มีการหัตถการแล้วมีเลือดกระเด็นใส่ในปริมาณมาก หรือภายในห้องฉุกเฉิน	Water impacting penetration	AATCC 42	≤ 10 g
		Hydrostatic pressure	AATCC 127	≥ 50 cmH ₂ O
4	การใช้ในสภาวะที่มีเชื้อโรค หรือโรคติดต่อ หรือสารคัดหลั่งจากผู้ป่วย	Synthetic blood penetration resistant	ASTM F1670	ไม่มีการซึมผ่าน
		Blood borne pathogens penetration resistant	ASTM F1671	ไม่มีการซึมผ่าน

2. วิธีการวิจัย (Experimental methods)

2.1 วิธีดำเนินงาน

2.1.1 ทดสอบสมบัติของผ้าที่นำมาใช้ตัดเย็บชุด Coverall จำนวน 2 ชนิด ได้แก่ ผ้าสปันบอนด์จากเส้นใยพอลิโพรพิลีน (PP) น้ำหนัก 40 กรัมต่อตารางเมตร (gsm) และผ้าสปันบอนด์จากพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) น้ำหนัก 50 gsm เคลือบด้วยฟิล์มโพลีเอทิลีน (PE) แบบระบายอากาศ (Breathable film) น้ำหนัก 20 gsm โดยทดสอบสมบัติทางกายภาพ และความสามารถในการป้องกันการซึมผ่าน ตามรายการทดสอบในตารางที่ 2 และ 3 ตามลำดับ

ตารางที่ 2 รายการทดสอบสมบัติทางกายภาพของผ้าตัวอย่าง

สมบัติทางกายภาพ	มาตรฐานทดสอบ
ความหนา (Thickness)	ASTM D1777
น้ำหนัก (Basis weight)	DIN EN ISO 536
ความแข็งแรง (Breaking strength-grab)	ASTM D5034
การต้านการฉีกขาด (Tear resistance-trap tear)	EN ISO 9073-4
การวัดอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (Water vapor transmission rate, WVTR)	ASTM D6701

ตารางที่ 3 รายการทดสอบความสามารถในการป้องกันการซึมผ่านของผ้าตัวอย่าง

ความสามารถในการป้องกันการซึมผ่าน	มาตรฐานทดสอบ
ความต้านทานการซึมผ่านน้ำภายใต้แรงอัด (Hydrostatic pressure)	AATCC 127
ความต้านทานการซึมผ่านของเลือดเทียม (Synthetic blood penetration test)	ASTM F1670 Procedure A
ความต้านทานการซึมผ่านของเชื้อไวรัส (Viral penetration test)	ASTM F1671 Procedure A

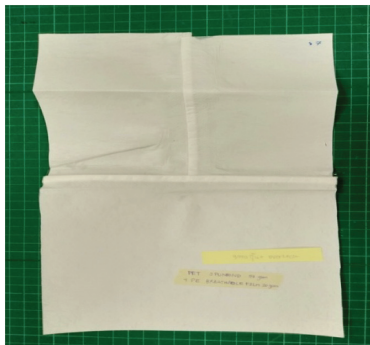
ขั้นตอนการทดสอบความต้านทานการซึมผ่านของเลือดเทียมตามมาตรฐาน ASTM F1670 และความต้านทานการซึมผ่านของเชื้อไวรัสตามมาตรฐาน ASTM F1671 เริ่มจากทิ้งเลือดเทียม/สารละลายบรรจุเชื้อ Phi-X174 Bacteriophage ให้สัมผัสกับตัวอย่างเป็นเวลา 5 นาที โดยไม่มีความดัน จากนั้นอัดความดันไปที่ 13.8 kPa ทิ้งไว้ 1 นาที แล้วปล่อยความดันให้เป็นศูนย์ ทิ้งไว้อีก 54 นาที ถ้าไม่มีเลือดเทียม/สารละลายบรรจุเชื้อ Phi-X174 Bacteriophage รั่วซึมตลอดกระบวนการทดสอบแสดงว่าตัวอย่างผ่านการทดสอบ

ตัวอย่างที่นำไปทดสอบความต้านทานการซึมผ่านของเชื้อไวรัสต้องผ่านการฆ่าเชื้อด้วยแสง UVC เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และทดสอบภายใต้สภาวะอุณหภูมิในช่วง 22-25 °C ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity) ในช่วง 58-62% และผลการทดสอบ Compatibility ratio ของผ้า PET และ PP เท่ากับ 1.5 และ 1.28 ตามลำดับ และความเข้มข้นของสารละลายเชื้อ Phi-X174 Bacteriophage (Challenge suspension concentration) ที่ใช้ทดสอบผ้า PET และ PP เท่ากับ 3×10^8 PFU/mL และ 2×10^8 PFU/mL ตามลำดับ

2.1.2 ทดสอบความสามารถในการป้องกันการซึมผ่านของตะเข็บแบบต่าง ๆ ดังตัวอย่างตะเข็บในรูปที่ 1 โดยให้ผู้ผลิต 4 ราย ดังตารางที่ 4 ขึ้นแนวตะเข็บแบบทางแยก ซึ่งเป็นบริเวณเป้า รักแร้ ของชุด ซึ่งเป็นจุดเสี่ยงต่อการรั่วซึมมากกว่าทางตรง เนื่องจากการเย็บซ้อนกันหลายชั้น ในการทดสอบนี้จึงนำผ้าที่เย็บตะเข็บทางแยกและผ่านการทดสอบการซึมผ่านของเลือดเทียม ไปทดสอบป้องกันการซึมผ่านของไวรัสนั้น

ตารางที่ 4 ตัวอย่างทดสอบความสามารถในการป้องกันการซึมผ่านของตะเข็บ

ตัวอย่าง	ผู้ผลิต	ชนิดของผ้า	การเย็บตะเข็บ
YS-PP-S	YS	PP Spunbond 40gsm เคลือบด้วย PE Breathable Film 20gsm	กึ่ง ทางตรง
YS-PP-C	YS	PP Spunbond 40gsm เคลือบด้วย PE Breathable Film 20gsm	กึ่ง ทางแยก
VT-PP-S	VT	PP Spunbond 40gsm เคลือบด้วย PE Breathable Film 20gsm	โพ้ง และ กึ่งเข็มเดียวทางตรง
VT-PP-C	VT	PP Spunbond 40gsm เคลือบด้วย PE Breathable Film 20gsm	โพ้ง และ กึ่งเข็มเดียวทางแยก
VT-PP-S-UL	VT	PP Spunbond 40gsm เคลือบด้วย PE Breathable Film 20gsm	Ultrasonic ทางตรง
VT-PP-C-UL	VT	PP Spunbond 40gsm เคลือบด้วย PE Breathable Film 20gsm	Ultrasonic ทางแยก
GF-PP-S	GF	PP Spunbond 40gsm เคลือบด้วย PE Breathable Film 20gsm	Over stitch ทางตรง
GF-PP-C	GF	PP Spunbond 40gsm เคลือบด้วย PE Breathable Film 20gsm	Over stitch ทางแยก
EN-PP-S-UL	EN	PP Spunbond 40gsm เคลือบด้วย PE Breathable Film 20gsm	Ultrasonic ทางตรง
EN-PP-C-UL	EN	PP Spunbond 40gsm เคลือบด้วย PE Breathable Film 20gsm	Ultrasonic ทางแยก
EN-PP-C-UL-TP	EN	PP Spunbond 40gsm เคลือบด้วย PE Breathable Film 20gsm	Ultrasonic ทางแยกปิดด้วยเทป
YS-PET-C	YS	PET Spunbond 50gsm เคลือบด้วย PE Breathable Film 20gsm	กึ่ง ทางแยก
VT-PET-C	VT	PET Spunbond 50gsm เคลือบด้วย PE Breathable Film 20gsm	โพ้ง และ กึ่งเข็มเดียวทางแยก
VT-PET-C-UL	VT	PET Spunbond 50gsm เคลือบด้วย PE Breathable Film 20gsm	Ultrasonic ทางแยก
GF-PET-C	GF	PET Spunbond 50gsm เคลือบด้วย PE Breathable Film 20gsm	Over stitch ทางแยก
EN-PET-C-UL	EN	PET 50gsm เคลือบด้วย PE Breathable Film 20gsm	Ultrasonic ทางแยก
EN-PET-C-UL-TP	EN	PET 50gsm เคลือบด้วย PE Breathable Film 20gsm	Ultrasonic ทางแยกปิดด้วยเทป



Overlock stitch และ ก้น ทางแยก



ตะเข็บทางแยกปิดด้วยเทป

รูปที่ 1 ตัวอย่างการเย็บตะเข็บ

2.1.3 ประเมินการใช้ (Usability test) ในการสวมใส่ชุด Coverall ที่ตัดเย็บ (อ้างอิงจาก EN340-2003 Annex C) โดยสอบถามจากบุคลากรทางแพทย์จำนวน 8-10 คน เกี่ยวกับ

1) ความพึงพอใจโดยรวมของชุด ความสะดวกในการสวมใส่และถอดชุด การระบายอากาศ ความรู้สึกร้อน ความระคายผิวหนึ่งเวลาใส่ โดยใช้แบบสอบถามมาตราส่วนประมาณค่า 5 ระดับ (ไม่พอใจระดับ 1 และพอใจมากที่สุดระดับ 5) และคำนวณหาค่าเฉลี่ย

2) ความคล่องตัวในการปฏิบัติงานอริยบทต่าง ๆ ได้แก่ ยืน นั่ง เดิน ขึ้นบันได ยกแขนขึ้นเหนือศีรษะ ก้มลงเก็บของ โดยให้ผู้สวมใส่ประเมินว่ามีความคล่องตัวหรือไม่คล่องตัว

3) ความเห็นต่อรูปแบบของชุด ในแง่ของ ความปกปิดทุกส่วน ความยาวของแขนและขาเหมาะสม ความแข็งแรงทนทานของชุด ความสะดวกในการสวมใส่เมื่อใส่อุปกรณ์ครบชุด โดยให้ผู้สวมใส่ประเมินว่ามีความพอใจหรือไม่พอใจ

4) ความเห็นเพิ่มเติมจากผู้ประเมิน

3. ผลและวิจารณ์ (Results and discussion)

ผลการศึกษาสมบัติของผ้าสับบอนด์ที่ทำจากเส้นใย PP 40 gsm เคลือบด้วย PE Breathable film 20 gsm และเส้นใย PET 50 gsm เคลือบด้วย PE Breathable film 20 gsm แสดงในตารางที่ 5 และผลการทดสอบความสามารถในการป้องกันการซึมผ่าน (Barrier performance) ของตะเข็บที่ใช้ต่อผ้าทั้ง 2 ชนิดให้เป็นชุด Coverall แสดงในตารางที่ 6

ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพพบว่าผ้าสับบอนด์ทั้ง 2 ชนิดมีน้ำหนัก 65.8 g/m² และ 78.96 g/m² มากกว่าผ้าของชุดที่ขายในท้องตลาด ได้แก่ Dupont Tyvek 500, 600Plus และ 800 ที่มีค่า 41.5 g/m², 41.5 g/m², และ 59 g/m² ตามลำดับ ทำให้ชุด Coverall น้ำหนักมากกว่า แต่ความแข็งแรงของเนื้อผ้ามากกว่า ค่า Breaking strength และ Tear resistance โดยผ้าชนิด PET 50 gsm มี Breaking strength สูงกว่าผ้า PP 40 gsm แต่ Tear resistance ต่ำกว่า สำหรับ การอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ ซึ่งสะท้อนถึงการระบายเหงื่อของชุด Coverall มีค่าค่อนข้างสูงทั้ง 2 ชนิด และจากการทดสอบความสามารถในการซึมผ่านของเชื้อไวรัสตามมาตรฐาน ASTM 1671 พบว่าผ้าทั้ง 2 ชนิด มีความสามารถป้องกันการซึมผ่านของเชื้อไวรัส เหมาะที่จะนำมาใช้ผลิตชุดป้องกันการติดเชื้อแบบ Coverall ระดับ 4

จากการนำตัวอย่างผ้าจำนวน 4 ตัวอย่าง ไปทดสอบ Hydrostatic pressure เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับผ้าที่ไม่มีตะเข็บ จำนวน 1-2 ตัวอย่าง และนำตัวอย่างที่เหลือนำไปทดสอบการซึมผ่านของเลือดเทียม ซึ่งเป็น Screening test สำหรับการทดสอบการซึมผ่านของเชื้อไวรัส ซึ่งถ้าตัวอย่างทั้งหมดไม่มีการรั่วซึมของไวรัส ถือว่าผ่าน และสามารถป้องกันการรั่วซึมของไวรัสที่มีขนาดเล็กกว่า ที่มีขนาดใหญ่กว่าเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.027 ไมโครเมตร

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบสมบัติผ้าสปันบอนด์ 2 ชนิดที่ใช้ในการตัดชุด Coverall

รายการทดสอบ	มาตรฐานทดสอบ	ตัวอย่างผ้า	
		PP 40 gsm เคลือบด้วย PE Breathable film 20 gsm	PET 50 gsm เคลือบด้วย PE Breathable film 20 gsm
ความหนา (Thickness)	ASTM D1777	0.26 mm	0.29 mm
น้ำหนัก (Basis weight)	DIN EN ISO 536	65.8 g/m ²	78.96 g/m ²
Breaking strength-grab (MD)	ASTM D5034	243.28 N	256.87 N
Breaking strength-grab (CD)	ASTM D5034	107.34 N	126.72 N
Tear resistance-trap tear (MD)	EN ISO 9073-4	24.12 N	13.21 N
Tear resistance-trap tear (CD)	EN ISO 9073-4	22.81 N	13.20 N
อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (WVTR)	ASTM D6701	4,691.65 g/m ² /day	4,408.57 g/m ² /day
ความต้านทานการซึมผ่านน้ำภายใต้แรงอัด (Hydrostatic pressure)	AATCC 127	1,870 mmH ₂ O	1,638.8 mmH ₂ O
ความต้านทานการซึมผ่านของเลือดเทียม (Synthetic blood penetration test)	ASTM F1670	Pass	Pass
ความต้านทานการซึมผ่านของเชื้อไวรัส (Viral penetration test)	ASTM F1671	Pass	Pass

ผลการทดสอบ Hydrostatic pressure ตัวอย่างส่วนใหญ่มีค่ามากกว่าผ้าที่ไม่หีต๊ะเทบ ยกเว้นตัวอย่าง YS-PP-C, GF-PP-C, EN-PP-C-UL, GF-PET-C, EN-PET-C-UL และ EN-PET-C-UL-TP และพบว่าตัวอย่าง VT-PP-C-UL และ VT-PET-C-UL ผ่านการทดสอบความสามารถในการป้องกันการรั่วซึมของเลือดเทียมและไวรัส

ตารางที่ 6 ผลการทดสอบความสามารถในการป้องกันการซึมผ่าน (Barrier performance) ของตะเทบทางแยก

Specimen	No.	Hydrostatic (mmH ₂ O)	Blood test (kPa)			Virus test (kPa)		
			0 (5 min)	13.8 (1 min)	0 (54min)	0 (5 min)	13.8 (1 min)	0 (54min)
YS-PP-C	1	1,540.2	-	-	-	-	-	-
	2	1,142.4	-	-	-	-	-	-
	3	-	Pass	Pass	Pass	Pass	Fail	n/a
	4	-	Pass	Pass	Pass	Pass	Fail	n/a
VT-PP-C	1	3,529.2	-	-	-	-	-	-
	2	-	Pass	Pass	Pass	Pass	Fail	n/a
	3	-	Pass	Pass	Pass	Pass	Fail	n/a
	4	-	Pass	Pass	Pass	n/a	n/a	n/a
VT-PP-C-UL	1	1,805.4	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass
	2	-	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass
	3	-	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass
GF-PP-C	1	234.6	-	-	-	-	-	-
	2	-	Pass	Fail	-	n/a	n/a	n/a
	3	-	Pass	Fail	-	n/a	n/a	n/a
	4	-	Pass	Fail	-	n/a	n/a	n/a

Specimen	No.	Hydrostatic (mmH ₂ O)	Blood test (kPa)			Virus test (kPa)		
			0 (5 min)	13.8 (1 min)	0 (54min)	0 (5 min)	13.8 (1 min)	0 (54min)
EN-PP-C-UL	1	357	-	-	-	-	-	-
	2	-	Pass	Fail	-	n/a	n/a	n/a
	3	-	Pass	Fail	-	n/a	n/a	n/a
	4	-	Pass	Fail	-	n/a	n/a	n/a
EN-PP-C-UL-TP	1	2,947.8	-	-	-	-	-	-
	2	-	Pass	Fail	-	n/a	n/a	n/a
	3	-	Pass	Pass	Pass	n/a	n/a	n/a
	4	-	Pass	Pass	Pass	n/a	n/a	n/a
YS-PET-C	1	1,438.2	-	-	-	-	-	-
	2	1,591.2	-	-	-	-	-	-
	3	-	Pass	Fail	Pass	n/a	n/a	n/a
	4	-	Pass	Pass	Pass	n/a	n/a	n/a
VT-PET-C	1	4,600.2	-	-	-	-	-	-
	2	-	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass
	3	-	Pass	Pass	Pass	Pass	Fail	n/a
	4	-	Pass	Pass	Pass	n/a	n/a	n/a
VT-PET-C-UL	1	3,661.8	-	-	-	-	-	-
	2	-	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass
	3	-	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass
	4	-	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass
GF-PET-C	1	959.8	-	-	-	-	-	-
	2	-	Pass	Fail	-	n/a	n/a	n/a
	3	-	Pass	Fail	-	n/a	n/a	n/a
	4	-	Pass	Pass	Pass	n/a	n/a	n/a
EN-PET-C-UL	1	192.8	-	-	-	-	-	-
	2	-	Pass	Fail	-	n/a	n/a	n/a
	3	-	Fail	-	-	n/a	n/a	n/a
	4	-	Pass	Fail	-	n/a	n/a	n/a
EN-PET-C-UL-TP	1	1,356.6	-	-	-	-	-	-
	2	-	Pass	Fail	Pass	n/a	n/a	n/a
	3	-	Pass	Pass	Pass	n/a	n/a	n/a
	4	-	Pass	Pass	Pass	n/a	n/a	n/a

ผ้าสับบอนด์ที่ผลิตจากเส้นใย PP 40 gsm เคลือบด้วย Breathable film น้ำหนัก 20 gsm และผ้าสับบอนด์จาก PET 50 gsm เคลือบด้วย Breathable film น้ำหนัก 20 gsm มีความสามารถในการป้องกันการซึมผ่านของเชื้อ Phi-X174 Bacteriophage ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกว่าเชื้อ COVID-19 หลายเท่า โดยตารางที่ 7 แสดงสมบัติของผ้าทั้ง 2 ชนิด เทียบกับสมบัติของชุด Coverall ของ Dupont รุ่นต่าง ๆ โดยรุ่นที่นิยมนำมาใช้ได้แก่ Dupont TYVEK 500 TYVEK600 TYVEK 600Plus และ TYVEK 800 เห็นได้ว่าความหนาของผ้าทั้ง 2 ชนิด มีความหนาใกล้เคียงกับชุดรุ่น TYCHEM 2,000 โดยมีความหนาประมาณ 0.26-0.29 มม. และมีน้ำหนักมากกว่าชุด TYVEK รุ่น 500, 600, 600Plus และ 800 ซึ่งทำให้ชุด Coverall ที่ผลิตขึ้นมีน้ำหนักกว่าชุด Coverall ของ TYVEK ทั้งนี้ เนื่องจากหากผ้าสับบอนด์ที่ใช้น้ำหนักเบาเกินไปอาจทำให้ความสามารถในการป้องกันการซึมผ่านของเลือดเทียมและไวรัสลดลง

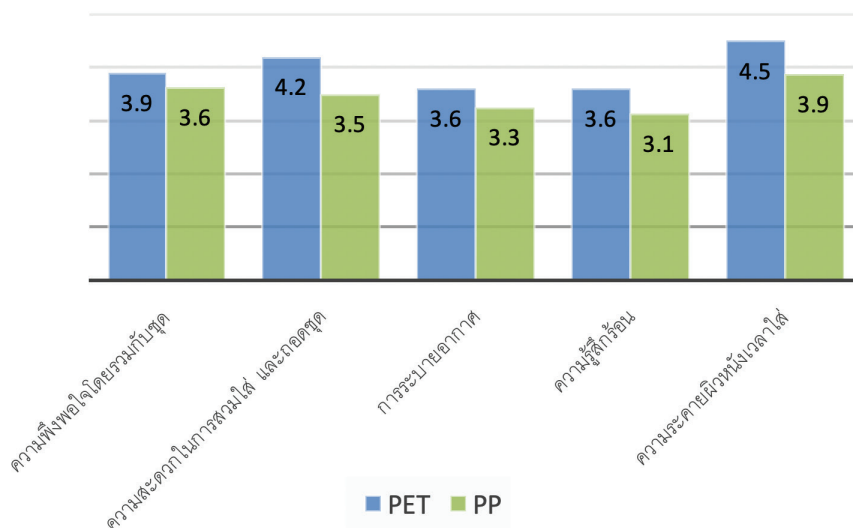
ค่า Hydrostatic static pressure ของผ้าทั้ง 2 ชนิด มีค่าสูงมาก เมื่อเทียบกับชุด Coverall ระดับ 2 และ 3 และสูงกว่าชุดรุ่น TYVEK 500, 600 แต่สำหรับชุด Coverall ระดับ 4 ไม่ได้พิจารณาจาก Hydrostatic static pressure แต่ต้องพิจารณาจากความสามารถในการป้องกันการซึมผ่านของเลือดเทียมและไวรัส ซึ่งผ้าทั้ง 2 ชนิดนี้ทดสอบผ่านเช่นกัน

เมื่อพิจารณาความแข็งแรงของผ้าทั้ง 2 ชนิดนี้ พบว่า Breaking strength-grab (MD) สูงกว่า TYCHEM 2,000 ซึ่งเป็นชุด Coverall รุ่นที่มีประสิทธิภาพในการป้องกันที่สูงของยี่ห้อ Dupont สำหรับค่า Tear resistance ผ้า PP 40 gsm มีค่าใกล้เคียงกับรุ่น TYVEK 500, 600 และค่า Tear resistance ผ้า PET 50 gsm ถือว่ายอมรับได้ ถ้าเทียบกับรุ่น TYVEK 600Plus และอัตราการซึมผ่านของไอน้ำของผ้าทั้ง 2 ชนิด มีค่าค่อนข้างสูง ซึ่งสะท้อนถึงความสามารถในการระบายเหงื่อที่ดี



รูปที่ 2 ชุด Coverall ระดับ 4 ที่พัฒนาและนำไปสำรวจความพึงพอใจ

จากการทดสอบความสามารถในการป้องกันการซึมผ่านของเลือดเทียมและไวรัสของตะเข็บที่ไช้ดัดเย็บชุด Coverall ระดับ 4 จากผ้าทั้ง 2 ชนิด พบว่า มีเพียงผู้ผลิต VT ที่ผลิตตะเข็บที่ผ่านการทดสอบการซึมผ่านของเลือดเทียมและไวรัสโดยใช้วิธีการเย็บแบบ Ultrasonic seaming ซึ่งเป็นการเทคโนโลยีการเย็บขั้นสูง และไม่มีรอยเย็บที่เป็นจุดเสี่ยงต่อการรั่วซึม ดังนั้น สรุปได้ว่าผ้าทั้ง 2 ชนิดเหมาะกับการมาผลิตชุด Coverall ระดับ 4 ตามมาตรฐาน ANSI/AAMI PB 70 แต่ต้องใช้ในการเย็บตะเข็บด้วยวิธี Ultrasonic seaming ซึ่งจากการประเมินพบว่าผู้ใช้มีความพึงพอใจในระดับปานกลางค่อนข้างไปทางมาก โดยค่าเฉลี่ยของผลการประเมินแสดงใน รูปที่ 3 และพึงพอใจกับชุดที่ผลิตจากผ้า PET 50 gsm มากกว่า PP 40 gsm ในทุกด้าน ทั้งนี้ผู้ประเมินจำนวน 7 คน สวมใส่ชุด PET ในห้องปรับอากาศ และ 3 คน นอกห้องปรับอากาศ ส่วนผู้ประเมินที่ใส่ชุด PP ทั้งหมดสวมใส่ในห้องปรับอากาศ ตารางที่ 8 แสดงผลการประเมินความคล่องตัวในการปฏิบัติงานอริยบทต่าง ๆ พบว่าส่วนใหญ่เห็นว่าใส่แล้วมีความคล่องตัวทั้งชุดที่ผลิตจากผ้า PET และ PP ตารางที่ 9 แสดงผลการประเมินความเห็นต่อรูปแบบของชุด พบว่าส่วนใหญ่เห็นด้วยว่าชุดมีการตัดเย็บที่เหมาะสมต่อการใช้งาน อย่างไรก็ตาม ยังคงมีความเห็นเรื่องการออกแบบชุดและความหนาและความแข็งแรงของเนื้อผ้าที่ต้องปรับปรุง



รูปที่ 3 ค่าเฉลี่ยการประเมินการสวมใส่ชุด Coverall

ตารางที่ 7 สมบัติของผ้าสปันบอนดที่ใช้ตัดชุด Coverall ระดับ 4 เทียบกับสมบัติของชุด Coverall ของ Dupont

Biological barrier	Test method	ProShield 80	TYVEK 500, 600	TYVEK 600Plus	TYVEK 800	TYCHEM 2,000	PP 40 gsm เคลือบ PE BF 20 gsm	PET 50 gsm เคลือบ PE BF 20 gsm
Thickness, mm	ASTM D1777	0.381	-		-	0.254	0.26	0.29
Basis weight, gsm	DIN EN ISO 536	-	41.5	41.5	59	-	65.8	78.96
Hydrostatic static pressure, mmH ₂ O	AATCC 127	2,032	1,219.2		-	-	1,870	1,638.8
Breaking strength-grab (MD), N	ASTM D5034	120.1	-		-	173.5 N	243.28	256.87
Breaking Strength-Grab (CD), N	ASTM D5034	84.5	-		-	191.3 N	107.34	126.72
Tear resistance-trap tear (MD), N	EN ISO 9073-4	-	27	>10	31	-	24.12	13.21
Tear resistance-trap tear (CD), N	EN ISO 9073-4	-	20	>10	3	-	22.81	13.20
WVTR, g/m ² /day	ASTM D6701	3,770	-		-	-	4,691.65	4,408.57

ตารางที่ 8 ผลการประเมินความคล่องตัวในการปฏิบัติงานอริยบทต่าง ๆ

ความคล่องตัวในการปฏิบัติงาน (ผู้ประเมิน PET 10 คน PP 8 คน)	PET 50 gsm		PP 40 gsm	
	ไม่คล่องตัว	คล่องตัว	ไม่คล่องตัว	คล่องตัว
ยืน		10	1	7
นั่ง	2	8	1	7
เดิน	1	9	1	7
ขึ้นบันได	1	9	1	7
ยกแขนขึ้นเหนือศีรษะ	1	9	1	7
ก้มลงเก็บของ	2	8	0	7

ตารางที่ 9 ผลการประเมินความเห็นต่อรูปแบบของชุด

ความเห็นต่อรูปแบบของชุด (ผู้ประเมิน PET 10 คน PP 8 คน)	PET 50 gsm		PP 40 gsm	
	ไม่ใช่	ใช่	ไม่ใช่	ใช่
ความปกปิดทุกส่วน	0	10	0	8
ความยาวของแขนและขาเหมาะสม	0	10	1	7
ความแข็งแรงทนทานของชุด	0	10	1	7
ความสะดวกในการสวมใส่เมื่อใส่อุปกรณ์ครบชุด	1	9	0	8

4. สรุป (Conclusion)

ชุดป้องกันการติดเชื้อแบบ Coverall ระดับ 4 ตามมาตรฐาน ANSI/AAMI PB70 ที่พัฒนาขึ้นในโครงการนี้ มีเป้าหมายในการป้องกันการซึมผ่านของเชื้อ COVID-19 ตามคำแนะนำองค์การอนามัยโลก (WHO) เพื่อรองรับสถานการณ์เร่งด่วนในประเทศไทยที่ขาดแคลนชุดป้องกันการติดเชื้อสำหรับบุคลากรทางการแพทย์ เนื่องจากต้องนำเข้าจากต่างประเทศ โดยวัตถุดิบที่นำมาผลิตสามารถหาได้ในประเทศไทย ผ้าที่ใช้ในการตัดเย็บชุด Coverall ระดับ 4 เป็นผ้าสปันบอนด์ที่ทำจากพอลิโพรพิลีน (PP) ที่มีน้ำหนัก 40 กรัมต่อตารางเมตร (gsm) และพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) น้ำหนัก 50 gsm โดยนำผ้าทั้งสองชนิดไปเคลือบด้วยฟิล์มโพลีเอทิลีน (PE) แบบระบายอากาศ (Breathable film) น้ำหนัก 20 gsm ซึ่งเป็นวัสดุเดียวกับที่ใช้เคลือบผ้าอ้อมเด็ก จากการทดสอบสมบัติทางกายภาพของผ้าทั้งสองแบบ พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับชุด Coverall ทางกายภาพที่นิยมใช้กันประจำ สามารถป้องกันการซึมผ่านตามมาตรฐาน ANSI/AAMI PB70 และสามารถป้องกันการซึมผ่านของเชื้อ Phi-X174 Bacteriophage ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.027 ไมโครเมตร ซึ่งเล็กกว่าเชื้อ COVID-19 ที่มีขนาด 0.125 ไมโครเมตร จึงสรุปได้ว่าสามารถป้องกันเชื้อ COVID-19 ทะลุผ่านได้ การพัฒนาในครั้งนี้มีผู้ผลิตชุด 4 ราย นำผ้าทั้งสองแบบไปผลิตชุด Coverall ซึ่งปัจจัยสำคัญอีกอย่างคือการตะเข็บของชุดต้องมีความสามารถในการป้องกันการซึมผ่านของเชื้อไวรัสได้ งานวิจัยนี้พบว่าการเย็บตะเข็บแบบ Ultrasonic seaming สามารถป้องกันการซึมผ่านของเชื้อไวรัสได้ จากการสอบถามความพึงพอใจในการสวมใส่ของบุคลากรทางการแพทย์ พบว่าส่วนใหญ่เห็นด้วยว่าชุดมีการตัดเย็บที่เหมาะสมต่อการใช้งาน และมีความคล่องตัวในการปฏิบัติงานอริยบทต่าง ๆ ทั้งชุดที่ผลิตจากผ้า PET และ PP และผู้ประเมินมีความพึงพอใจกับชุดที่ทำจากผ้า PET มากกว่าผ้า PP อย่างไรก็ตาม ยังมีความเห็นเรื่องของการออกแบบชุดและความหนาและความแข็งแรงของเนื้อผ้าที่ต้องปรับปรุง

5. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

ขอขอบคุณ สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่ให้ทุนวิจัยสนับสนุน ขอขอบคุณ คุณสมคิด รัตนประภาพร จากสมาคมอุตสาหกรรมเส้นใยประดิษฐ์ไทย ผู้ริเริ่มและขับเคลื่อนแนวคิดในการผลิตชุด PPE Coverall ระดับ 4 ในประเทศไทย และคุณปณิธาน ปวโรฬารวิทยา ประธานกรรมการ บ.บุคติกนิษฐ์ มหานคร ที่ประสานงานกับบริษัทตัดเย็บในประเทศไทย รวมถึงประสานงานกับองค์การเภสัชกรรมในการนำผลงานครั้งนี้ไปใช้ประโยชน์แก้ปัญหาในสภาวะวิกฤติ ขอขอบคุณ ผศ.ภญ.ดร.จิตติมา ลัดนากุล รองคณบดี คณะเภสัชศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และ รศ.ดร.อนงค์นาฏ สมหวังธนาโรจน์ รองคณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในความร่วมมือด้านการทดสอบ

6. เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] PAN AMERICAN HEALTH ORGANIZATION. *Requirements and technical specifications of personal protective equipment (PPE) for the novel coronavirus (2019-ncov) in healthcare settings, interim recommendations, 2/6/2020*. [online]. Available from: <https://iris.paho.org/handle/10665.2/51977>. [viewed 2022-01-01].
- [2] LILL, MARTIN. *Coronavirus 2019-nCoV Update: Virus Size and Understanding EN 14126*. [online]. February 4, 2020. Available from: <https://blog.lakeland.com/europe/coronavirus-2019-ncov-update-virus-size-and-understanding-en-14126> [viewed 2022-01-01].
- [3] CENTERS FOR DISEASE CONTROL AND PREVENTION. *Considerations for selecting protective clothing used in healthcare for protection against microorganisms in blood and body fluids*. [online]. Available from: <https://www.cdc.gov/niosh/npptl/topics/protectiveclothing/default.html>. [viewed 2022-01-01].

การสังเคราะห์และวิเคราะห์คุณลักษณะคาร์บอนนาโนสเฟียร์ที่มีรูพรุนจากอนุพันธ์ชีวมวล

Synthesis and characterization of porous carbon nanospheres from biomass derived compounds

ฐิติพร วัฒนกุล^{1*}, ลลิตา บึงกิจเจริญ² และ อาทิตย์ อัสวสุชี^{2*}

Titiporn Wattanakul^{1*}, Lalita Buengkitcharoen² and Artit Ausavasukhi^{2*}

รับบทความ: 6 กุมภาพันธ์ 2565 แก้ไขบทความ: 16 มิถุนายน 2565 ยอมรับตีพิมพ์: 7 กรกฎาคม 2565

8

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนสเฟียร์ที่มีรูพรุนซึ่งเตรียมได้จากอนุพันธ์สารชีวมวล ได้แก่ กลูโคส ซูโครส กลีเซอรอล และเซลลูโลสด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลร่วมกับการกระตุ้นที่อุณหภูมิสูง โดยวิธีไฮโดรเทอร์มอลสามารถใช้สังเคราะห์วัสดุคาร์บอนนาโนสเฟียร์ให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางที่แตกต่างกัน ซึ่งขนาดอนุภาคของวัสดุคาร์บอนนาโนสเฟียร์สามารถปรับแต่งได้ง่ายตั้งแต่ 188-10,000 นาโนเมตร โดยเปลี่ยนชนิดของอนุพันธ์สารชีวมวล และความเข้มข้นของตัวทำละลาย ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะของหมู่ฟังก์ชันที่พื้นผิว ลักษณะทางสัณฐานวิทยา ความพรุน เสถียรภาพทางความร้อน และค่าพีเอชที่ประจุที่ผิวเป็นศูนย์นำไปใช้อธิบายสมบัติการดูดซับ การศึกษาพฤติกรรมการดูดซับของสีย้อม 3 ชนิด (เมทิลีนบลู คองโกเรด และไดเรกต์สการ์เลต 4บีเอส) บนตัวดูดซับวัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุนจากอนุพันธ์สารชีวมวลดำเนินการในระบบแบบกะ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม 3 ชนิดบนคาร์บอนนาโนสเฟียร์ที่มีรูพรุนมีค่าสูงสุดที่พีเอชเริ่มต้นของสารละลายในช่วง 7-9 (ปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับบนตัวดูดซับ (q_t) ประมาณ 100 มิลลิกรัมต่อกรัม)

Abstract

This research studied a synthesis of porous carbon nanospheres prepared from biomass derived compounds, namely glucose, sucrose, glycerol and cellulose by hydrothermal process combined with high temperature activation. The porous carbon nanospheres have been synthesized successfully in various diameters by hydrothermal method. The particle size of the carbon nanospheres is easily tunable from 188 to 10,000 nm by simply varying the biomass derived compounds type and solvent concentrations. Surface functional groups, morphology, porosity, thermal stability and pH of zero charge were characterized to describe adsorption property. The adsorption behaviors of three dyes (methylene blue, congo red and direct scarlet 4BS) onto this biomass derived porous carbon nanospheres were investigated in batch systems. The experimental findings showed that the removal efficiencies of three dyes onto porous carbon nanospheres were maximum at the initial solution pH of 7-9 (amount of adsorbed sorbate (q_t) ~ 100 mg/g).

คำสำคัญ: อนุพันธ์สารชีวมวล คาร์บอนนาโนสเฟียร์ที่มีรูพรุน กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล สมบัติการดูดซับ

Keywords: Biomass derived compounds, Porous carbon nanosphere, Hydrothermal process, Adsorption property

¹ กรมวิทยาศาสตร์บริการ

² สาขาเคมีประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

*Corresponding author e-mail address: titiporn@dss.go.th, ausavasukhi@gmail.com

1. บทนำ (Introduction)

วัสดุที่มีรูพรุนเป็นวัสดุที่ได้รับความสนใจในการนำมาใช้งานทางด้านอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีพื้นที่ผิวสูง ซึ่งส่วนใหญ่สามารถเตรียมได้จากสารอินทรีย์และวัสดุเหลือใช้ทางธรรมชาติ เช่น กะลามะพร้าว [1] เปลือกไม้อื่น ๆ [2] และน้ำมันปาล์มสำหรับปรุงอาหารบนถ่านกัมมันต์ [3] โดยนำมาผ่านกระบวนการกระตุ้นทำให้กลายเป็นวัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุน โดยคุณลักษณะที่สำคัญของวัสดุนี้จะเป็นประกอบด้วยพื้นที่ผิว ปริมาตร ความจุ ขนาดของรูพรุน และการกระจายตัวของรูพรุน โดยความแตกต่างของคุณลักษณะของตัวดูดซับขึ้นอยู่กับกระบวนการกระตุ้นทางเคมี และทางกายภาพรวมถึงวัตถุดิบที่ใช้ในการเตรียม [4] ปัจจุบันมีความพยายามสังเคราะห์วัสดุคาร์บอนให้มีรูพรุนที่เฉพาะเจาะจง รวมถึงการเตรียมวัสดุคาร์บอนให้มีอนุภาคนาโน [5] อย่างไรก็ตาม วัสดุที่มีสมบัติดังกล่าวไม่สามารถเตรียมได้จากกะลามะพร้าว หรือวัสดุชีวมวลที่มีโครงสร้างขนาดใหญ่ (Macrostructure) วิธีการหนึ่งที่ใช้เตรียมวัสดุคาร์บอนนาโนทำได้โดยใช้ปฏิกิริยาโซลเจลพอลิคอนเดนเซชัน (Sol-gel polycondensation) โดยใช้รีซอร์ซินอล (Resorcinol)-ฟอर्मัลดีไฮด์ (Formaldehyde) เป็นสารตั้งต้น [6-9] และเมื่อนำไปคาร์บอนเซชัน (Carbonization) ภายใต้บรรยากาศของแก๊สเฉื่อยจะได้วัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุนสูง วัสดุคาร์บอนที่เตรียมได้นี้ถูกเรียกว่าคาร์บอนแอโรเจล (Carbon aerogel) นอกจากนี้ยังมีความพยายามที่จะเตรียมคาร์บอนแอโรเจลจากสารตั้งต้นอื่น ๆ เช่น เมลามีน (Melamine)-รีซอร์ซินอล-ฟอर्मัลดีไฮด์ [10] ลิกนิน (Lignin)-รีซอร์ซินอล-ฟอर्मัลดีไฮด์ [11] รีซอร์ซินอล-ฟิวรัล (Furfural) [12] อย่างไรก็ตาม แม้ว่าจะสามารถเตรียมคาร์บอนแอโรเจลที่มีรูพรุนสูงได้ แต่สารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมวัสดุคาร์บอนแอโรเจลมีราคาแพง ประเทศไทยไม่มีศักยภาพในการผลิตเชิงอุตสาหกรรม

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะนำอนุพันธ์สารชีวมวล ได้แก่ กลูโคส ซูโครส กลีเซอรอล และเซลลูโลสที่ประเทศไทยมีศักยภาพในการผลิตมาใช้ในการเตรียมคาร์บอนนาโนสเฟียร์ที่มีรูพรุน เมื่อนำอนุพันธ์สารชีวมวลเหล่านี้มาผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal) จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นวัสดุคาร์บอน เมื่อนำมากระตุ้นด้วยสารเคมี เช่น ซิงค์คลอไรด์ และกระบวนการคาร์บอนเซชัน (Carbonization) จะได้วัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุน (Porosity) เพิ่มมากขึ้น โดยสมบัติของวัสดุคาร์บอนที่เตรียมได้นี้มีรูพรุนขนาดกลาง และมีลักษณะโครงสร้างเป็นแบบทรงกลมซึ่งเหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่าง ๆ ได้แก่ ด้านการดูดซับมลพิษ เช่น สีย้อม โดยงานวิจัยนี้สนใจศึกษาการดูดซับสีย้อมจำนวน 3 ชนิด ได้แก่ เมทิลีนบลู คองโกเรด และไดเรกต์สการ์เลต 4บีเอส ซึ่งมีขนาดโมเลกุลที่แตกต่างกัน และเมื่อพิจารณาจากโครงสร้างของสีย้อมพบว่าสีย้อมเมทิลีนบลู

เป็นสีย้อมประจุบวก (Cationic dye) ในขณะที่สีย้อมคองโกเรด และไดเรกต์สการ์เลต 4บีเอสเป็นสีย้อมประจุลบ (Anionic dye) การศึกษานี้จะทำให้ทราบถึงพฤติกรรมการดูดซับของสีย้อมบนตัวดูดซับ และสมบัติของวัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุนที่เตรียมได้จากอนุพันธ์สารชีวมวล

2. วิธีการวิจัย (Experimental methods)

2.1 การเตรียมคาร์บอนนาโนสเฟียร์ที่มีรูพรุน

ซึ่งอนุพันธ์สารชีวมวล ได้แก่ กลูโคส ($C_6H_{12}O_6$; Apex chemicals) หรือซูโครส ($C_{12}H_{22}O_{11}$; Sigma-aldrich) หรือเซลลูโลส ($(C_6H_{10}O_5)_n$; Sigma-aldrich) หรือกลีเซอรอล ($C_3H_8O_3$; Apex chemicals) จำนวน 6 กรัม ใส่ลงในปิกเกอร์จากนั้นเติมน้ำปราศจากไอออนจำนวน 60 มิลลิลิตร เขย่าให้สารละลายผสมกัน (ในกรณีของการเตรียมวัสดุคาร์บอนโดยใช้เซลลูโลสและกลีเซอรอลอาจใช้สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl; Apex chemicals) ความเข้มข้น 0.1 หรือ 1.0 โมลาร์ในการเตรียมแทนการใช้น้ำปราศจากไอออน) นำของผสมที่เตรียมได้ใส่ลงในภาชนะสังเคราะห์ความดันสูงขนาด 100 มิลลิลิตร ปิดฝาภาชนะสังเคราะห์ให้สนิทแล้วนำเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาที่กำหนดนำภาชนะสังเคราะห์ความดันสูงออกจากตู้อบแล้วทิ้งไว้ให้เย็น จากนั้นแยกของผสมด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยง นำของแข็งที่ได้ไปอบให้แห้งและชั่งน้ำหนักเพื่อนำมาคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ของของแข็ง จากนั้นนำของแข็งมาเติมซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$; Sigma-aldrich) ความเข้มข้น 0.8 โมลาร์ เป็นเวลา 12 ชั่วโมง นำมาอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะแก๊สไนโตรเจน เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นนำมาล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ เพื่อกำจัดซิงค์คลอไรด์ และล้างต่อด้วยน้ำกับเมทานอล (CH_3OH ; Apex chemicals) แล้วนำไปอบให้แห้ง

2.2 การวิเคราะห์คุณลักษณะและพื้นที่ผิว

2.2.1 ทดสอบหาค่าไอโอดีนนัมเบอร์

นำตัวอย่างไปอบที่อุณหภูมิ 110-120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น ชั่งและบันทึกน้ำหนักตัวอย่าง แล้วนำใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตรซึ่งมีจุลปิด จากนั้นใส่สารละลายไอโอดีน (I_2 ; Apex chemicals) จำนวน 100 มิลลิลิตร ปิดจุกและเขย่าแรง ๆ เป็นเวลา 30 นาที กรองด้วยกระดาษกรอง ที่สารละลายที่กรองได้ 20 มิลลิลิตรแรก ดูดสารละลายที่กรองได้ 50 มิลลิลิตร จากนั้นหยดน้ำแบ่ง 3 หยดไทเทรตด้วยสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต ($Na_2S_2O_3$; Apex chemicals) ความเข้มข้น 0.1 นอร์มอล จนถึงจุดยุติคือสารละลายไม่มีสี บันทึกปริมาตรของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้เป็นมิลลิลิตร คำนวณค่าการดูดซับจำเพาะ (X/M) และความเข้มข้นที่สมดุลของสารละลายไอโอดีน [1]

2.2.2 การหาประจุที่ผิวเป็นศูนย์ (Point of zero charge)

เตรียมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl; Apex chemicals) ความเข้มข้น 0.01 โมลาร์ จากนั้นนำสารละลายโซเดียมคลอไรด์ปริมาณ 100 มิลลิลิตรมาปรับความเป็นกรด-เบส ให้อยู่ในช่วงพีเอช 3-12 ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH; Apex chemicals) ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ทำการวัดพีเอชโดยใช้พีเอชมิเตอร์ จากนั้นนำตัวอย่างปริมาณ 0.2 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ ปิดปากขวดรูปชมพู่ให้สนิท นำไปแช่ยาที่ความเร็ว 120 รอบต่อนาที โดยใช้เวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นกรองตัวดูดซับออก ทำการวัดพีเอชของสารละลาย จากนั้นนำไปเขียนความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชเริ่มต้น และพีเอชสุดท้าย โดยประจุที่ผิวเป็นศูนย์ของตัวดูดซับหาได้จากเส้นพีเอชเริ่มต้น และ พีเอชสุดท้ายตัดกับเส้นทแยงมุม [13]

2.2.3 การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM) นำตัวอย่างที่เป็นผงประมาณ 0.5-1.0 กรัมไปติดบนสตัป (Stub) โดยพยายามติดให้อนุภาคเรียงตัวในลักษณะชั้นเดียวไม่เกาะกลุ่มกัน จากนั้นนำเข้ากล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (JEOL model JSM-6010LV) เพื่อวิเคราะห์ โดยกำหนดสภาวะโดยใช้กำลังขยายประมาณ 5,000 เท่า ค่าความละเอียดในการแยกประมาณ 50-127 อิเล็กตรอนโวลต์

2.2.4 การวิเคราะห์ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectrometer; FTIR)

ใส่ตัวอย่างประมาณ 50 มิลลิกรัม ในเซลล์ใส่สารตัวอย่าง วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของตัวอย่างด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Perkin Elmer model spectrum 100) โดยใช้เลขคลื่นตั้งแต่ 4,000-650 เซนติเมตร⁻¹

2.2.5 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเปลี่ยนแปลงทางความร้อน (Thermogravimetric analysis; TGA) นำตัวอย่างใส่ลงไปในภาชนะใส่สารตัวอย่าง (Sample pan)

ประมาณ 5-10 มิลลิกรัม นำมาทดสอบเสถียรภาพด้วยเครื่องวัดการเปลี่ยนแปลงทางความร้อน (Perkin elmer model STA 6000) ที่อุณหภูมิเริ่มต้น 50 องศาเซลเซียสจนถึงอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้สภาวะไนโตรเจน

2.3 ศึกษาสมบัติการเป็นตัวดูดซับ

นำวัสดุคาร์บอนที่เตรียมได้มาทดสอบความสามารถในการดูดซับสารละลายสีย้อมทั้ง 3 ชนิดซึ่งได้แก่ เมทิลีนบลู คองโกเรด และไดเรกสการ์เลต 4บีเอส ดังนี้ ซึ่งตัวดูดซับจำนวน 0.1 กรัมลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เตรียมสารละลายสีย้อมที่ต้องการทดสอบให้มีความเข้มข้นของสารละลาย 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ทำการปรับพีเอชที่ต้องการทดสอบให้อยู่ในช่วงระหว่างพีเอชที่ 5-9 จากนั้นเทสารละลายรวมกับตัวดูดซับ นำไปปั่นจนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จากนั้นกรองเอาตัวดูดซับออก นำสารละลายที่กรองได้มาเจือจางจำนวน 10 เท่า โดยปรับพีเอชให้เท่ากับพีเอชเริ่มต้น นำสารละลายที่ได้ไปวัดหาความเข้มข้นของสีย้อมด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Shimadzu model UV-2450) จากนั้นทำการทดลองในลักษณะเดียวกันจนครบทุกสภาวะที่จะทำการศึกษ และคำนวณหาปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับบนตัวดูดซับ (q) [14]

3. ผลและวิจารณ์ (Results and discussion)

3.1 การศึกษาเปอร์เซ็นต์ผลผลิตที่ได้จากการการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล

จากการทดลองนำอนุพันธ์สารชีวมวล ได้แก่ กลูโคส ซูโครส กลีเซอรอล และเซลลูโลสผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง พบว่าของผสมอนุพันธ์สารชีวมวลบางชนิดมีการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพจากของเหลวใส หรือคอลลอยด์ไปเป็นของแข็งที่มีสีน้ำตาลเข้มไม่ละลายน้ำ และมีของเหลวผสมอยู่บ้างเล็กน้อย เมื่อนำส่วนของแข็งที่ได้ไปล้าง อบให้แห้ง แล้วนำไปชั่งน้ำหนักเพื่อนำมาคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ของผลผลิต ให้ผลการทดลองดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เปอร์เซ็นต์ผลผลิตของวัสดุคาร์บอน ค่าไอโอดีนนับเบอร์ และค่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์

ชนิดของอนุพันธ์สารชีวมวล	ผลผลิตที่ได้ (%)	สัญลักษณ์ของวัสดุคาร์บอนภายหลังการกระตุ้นด้วยความร้อน	ค่าไอโอดีนนับเบอร์ (mg/g)	ค่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์
กลีเซอรอล	-	-	-	-
กลีเซอรอล + HCl 0.1 M	-	-	-	-
กลีเซอรอล + HCl 1.0 M	3.6	MCN-Glycerol + HCl 1.0 M	1,180	6.0
กลูโคส	21.1	MCN-Glucose	806	6.1
ซูโครส	64.0	MCN-Sucrose	1,189	5.1

ชนิดของอนุพันธ์สารชีวมวล	ผลผลิตที่ได้ (%)	สัญลักษณ์ของวัสดุคาร์บอนภาย หลังการกระตุ้นด้วยความร้อน	ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ (mg/g)	ค่าประจุที่ผิวเป็น ศูนย์
เซลลูโลส	77.5	MCN-Cellulose	1,152	5.0
เซลลูโลส + HCl 0.1 M	46.9	MCN-Cellulose + HCl 0.1 M	1,241	6.2
เซลลูโลส + HCl 1.0 M	30.9	MCN-Cellulose + HCl 1.0 M	1,308	5.2

จากตารางที่ 1 แสดงให้เห็นว่ากลูโคส ซึ่งเป็นมอนอเมอร์ตามธรรมชาติสามารถเกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนจากมอนอเมอร์กลายเป็นพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงขึ้นได้ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Falco และคณะ [15] ซึ่งสามารถเตรียมกลูโคสเป็นวัสดุคาร์บอนนาโนสเฟียร์ได้จากการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล โดยกลไกการเกิดปฏิกิริยาเกิดจากการสลายตัวของกลูโคสเป็น 5-ไฮดรอกซีเมทิลเฟอรัลฟูรอล (5-Hydroxymethylfurfural; HMF) รวมถึงกรดเลวูลินิก (Levulinic acid) ไดไฮดรอกซีอะซิโตน (Dihydroxyacetone) และกรดฟอร์มิก (Formic acid) สารประกอบที่มีสมบัติเป็นกรดเหล่านี้จะช่วยเร่งปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน (Dehydration) ของกลูโคสเป็น 5-ไฮดรอกซีเมทิลเฟอรัลฟูรอล ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน-พอลิคอนเดนเซชัน (Polymerization-polycondensation) เป็นสารประกอบพอลิฟูรานิก (Polyfuranic type compounds) และถ้ากระบวนการไฮโดรเทอร์มอลเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงกว่า 180 องศาเซลเซียส สายโซ่ของพอลิฟูรานิกจะทำปฏิกิริยาพอลิคอนเดนเซชัน (Condensation) ดีไฮเดรชัน และดีคาร์บอกซิเลชัน (Decarboxylation) ได้วัสดุคาร์บอน [15]

ส่วนในกรณีของน้ำตาลซูโครสคาดว่าภายใต้กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลน้ำตาลซูโครสสามารถสลายตัวให้น้ำตาลกลูโคสและฟรุคโตส (Fructose) และน้ำตาลทั้งสองนี้สามารถเกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชันได้ 5-ไฮดรอกซีเมทิลเฟอรัลฟูรอลเป็นผลิตภัณฑ์ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Ausavasukhi และคณะ [16] ซึ่งพบว่าน้ำตาลซูโครสสามารถเกิดปฏิกิริยาให้ผลิตภัณฑ์เป็น 5-ไฮดรอกซีเมทิลเฟอรัลฟูรอลภายใต้สภาวะการเร่งปฏิกิริยาด้วยกรด ส่วนในกรณีของเซลลูโลสภายใต้สภาวะไฮโดรเทอร์มอลที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) เปลี่ยนเซลลูโลสเป็นกลูโคสได้ แต่เซลลูโลสอาจเกิดปฏิกิริยาพอลิคอนเดนเซชัน ดีไฮเดรชัน และดีคาร์บอกซิเลชันภายในโมเลกุลได้วัสดุคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ [15] เพื่อต้องการศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของเซลลูโลสจึงทดลองเติมกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1 และ 1.0 โมลาร์เพื่อเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเปลี่ยนเซลลูโลสเป็นกลูโคส โดยคาดหวังว่ากลูโคสที่เกิดขึ้นสามารถเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องได้ วัสดุคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ จากตารางที่ 1 พบว่า ในกรณีของการเติมและไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยากรดไฮโดรคลอริก วัสดุคาร์บอนที่เกิดขึ้นมีปริมาณแตกต่างกัน โดยในกรณีของ

การเติมตัวเร่งปฏิกิริยากรดไฮโดรคลอริก การสังเคราะห์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลของเซลลูโลสจะให้เปอร์เซ็นต์ของวัสดุคาร์บอนต่ำกว่า ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจากเมื่อตัวเร่งปฏิกิริยากรดไฮโดรคลอริกทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสให้ผลิตภัณฑ์ที่มีโมเลกุลขนาดเล็กและละลายน้ำได้ โมเลกุลบางส่วนเหล่านี้อาจไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน-พอลิคอนเดนเซชันได้ เมื่อผ่านกระบวนการกรองจะถูกแยกออกมา ดังนั้น กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลของเซลลูโลสเมื่อเติมตัวเร่งปฏิกิริยากรดไฮโดรคลอริกจึงให้วัสดุคาร์บอนในปริมาณที่ต่ำกว่า

ในกรณีของการเตรียมวัสดุคาร์บอนจากกลีเซอรอลพบว่ากลีเซอรอลไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันได้ ภายใต้สภาวะไฮโดรเทอร์มอลที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ในงานวิจัยนี้จึงได้ทดลองเติมกรดไฮโดรคลอริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่า การใช้กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ไม่เพียงพอสำหรับการเร่งปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน อย่างไรก็ตาม การเพิ่มความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกเป็น 1.0 โมลาร์สามารถเร่งปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันเพื่อเตรียมวัสดุคาร์บอนได้ โดยตัวเร่งปฏิกิริยากรดอาจไปเร่งปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของกลีเซอรอลเกิดเป็น 3-ไฮดรอกซีโพรพานาล (3-Hydroxypropanal) อะโครลีน (Acrolein) อะซีตัลดีไฮด์ (Acetaldehyde) ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันเป็นวัสดุคาร์บอน หรือกลีเซอรอลอาจถูกโปรตอนเนชันเกิดเป็นสารตัวกลาง (Protonated intermediate) ที่สามารถเกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชันเป็นไฮดรอกซีอะซิโตน (Hydroxyacetone) ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันเป็นวัสดุคาร์บอน สอดคล้องกับงานวิจัยของ Lingqin และคณะ [17] แต่ปริมาณของวัสดุคาร์บอนที่เกิดขึ้นมีปริมาณต่ำกว่าการเตรียมโดยใช้สารอนุพันธ์ชีวมวลอื่นๆ เมื่อนำวัสดุคาร์บอนที่เตรียมได้จากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลไปกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ (Zinc chloride; $ZnCl_2$) ภายใต้สภาวะบรรยากาศไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง พบว่า วัสดุคาร์บอนมีลักษณะเป็นของแข็งสีดำ และมีความมันวาว เนื่องจากซิงค์คลอไรด์จะทำหน้าที่เป็นกรดลิวอิส (Lewis acid) โดยการทำปฏิกิริยาดีไฮเดรชันเพื่อกำจัดไฮโดรเจน และออกซิเจนออกจากสารอนุพันธ์ชีวมวลเพื่อลดการเกิดทาร์ (Tar) แต่เข้าไปสู่การก่อตัวของวัสดุคาร์บอนที่มีพื้นที่ผิวสูงและมีโครงสร้างเป็นรูพรุน [14] วัสดุคาร์บอนที่ได้รับการกระตุ้นนี้จะใช้สัญลักษณ์แสดงดังตารางที่ 1

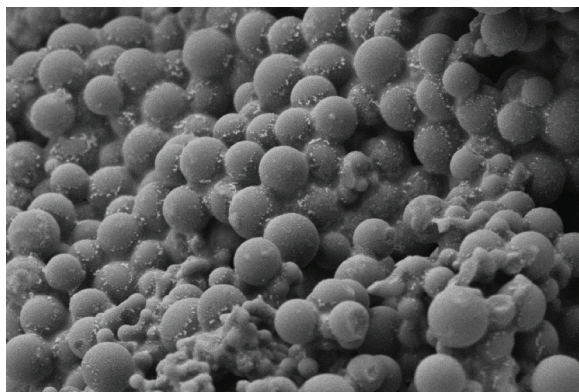
3.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติของวัสดุคาร์บอน

3.2.1 การวิเคราะห์ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ และค่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์

เมื่อนำวัสดุคาร์บอนที่เตรียมได้จากอนุพันธ์สารชีวมวล ได้แก่ กลูโคส ซูโครส กลีเซอรอล และเซลลูโลส ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยความร้อนไปวิเคราะห์พบว่าวัสดุคาร์บอนที่เตรียมได้มีค่าไอโอดีนนัมเบอร์ในช่วง 806-1308 มิลลิกรัมต่อกรัม แสดงให้เห็นว่าวัสดุคาร์บอนนี้มีโครงสร้างที่มีรูพรุนสูง และเมื่อนำไปวิเคราะห์ค่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์พบว่ามีความในช่วง 5.0-6.2 (ตารางที่ 1)

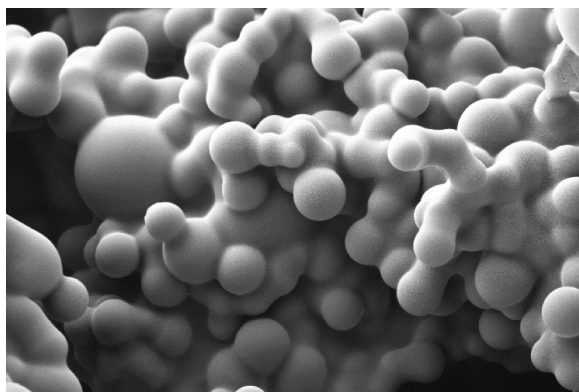
3.2.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติของวัสดุคาร์บอนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

เมื่อนำวัสดุคาร์บอนที่เตรียมได้จากอนุพันธ์สารชีวมวล ได้แก่ กลูโคส ซูโครส กลีเซอรอล และเซลลูโลส ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยความร้อนไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ให้ผลการทดลองดังรูปที่ 1



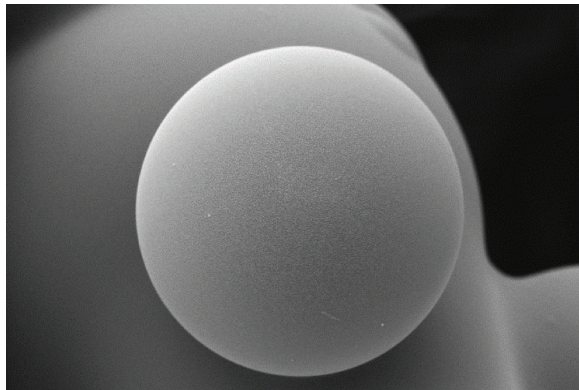
1 μ m SUT FESEM EHT=3.00kV mag=10.00KX WD=6.1mm
Signal A=SE2

(ก)



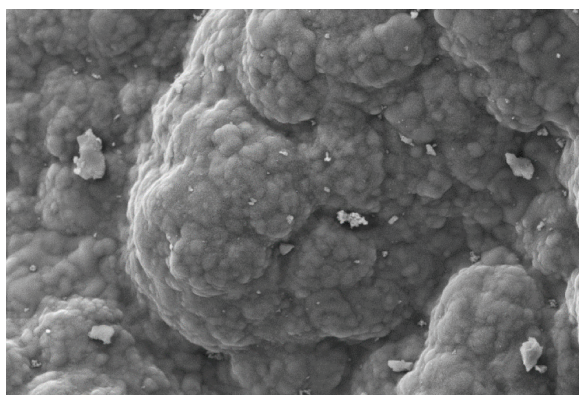
1 μ m SUT FESEM EHT=3.00kV mag=10.00KX
WD=7.3mm Signal A=SE2

(ข)



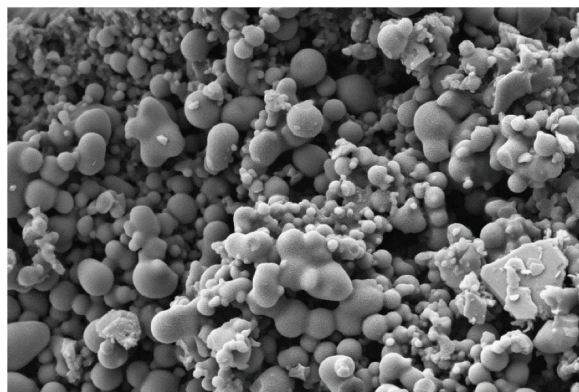
1 μ m SUT FESEM EHT=3.00kV mag=10.00KX WD=7.6mm
Signal A=SE2

(ค)



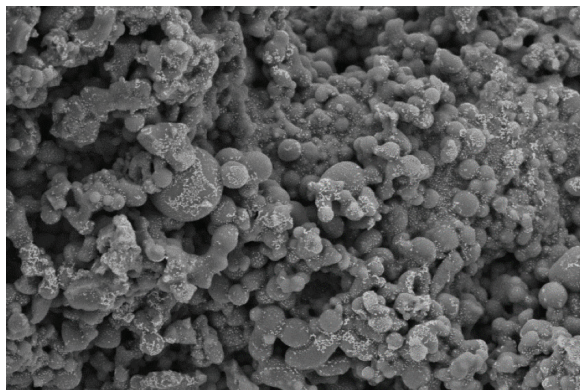
1 μ m SUT FESEM EHT=3.00kV mag=10.00KX WD=7.6mm
Signal A=SE2

(ง)



1 μ m SUT FESEM EHT=3.00kV mag=10.00KX WD=8.5mm
Signal A=SE2

(จ)



1 μm SUT FESEM EHT=3.00kV mag=10.00KX WD=8.5mm
Signal A=SE2

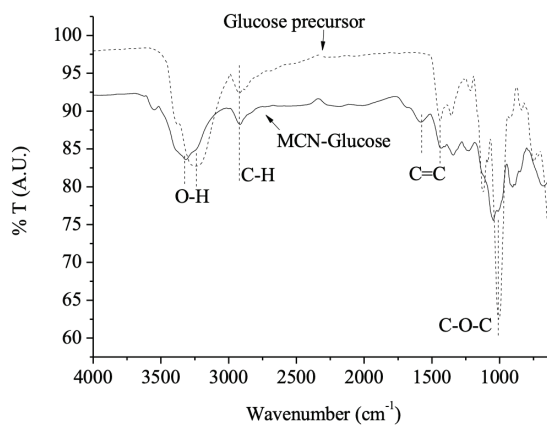
(ก)

รูปที่ 1 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของวัสดุคาร์บอนที่เตรียมจาก (ก) กลูโคส (ข) ซูโครส (ค) กลีเซอรอลที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยากัดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 โมลาร์ (ง) เซลลูโลส (จ) เซลลูโลสที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยากัดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ และ (ฉ) เซลลูโลสที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยากัดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1.0 โมลาร์ ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยความร้อน

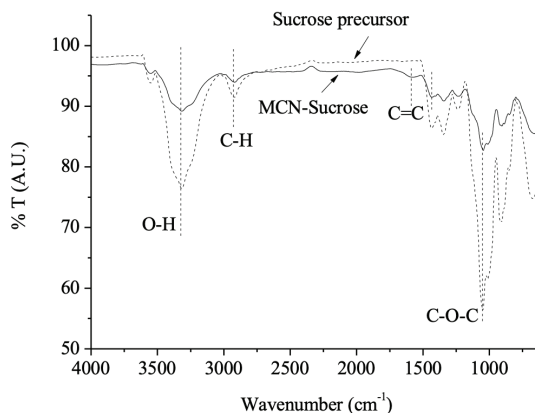
จากรูปที่ 1 เมื่อวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของวัสดุคาร์บอนที่เตรียมจากกลูโคส ซูโครส และกลีเซอรอลที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยากัดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้น 1.0 โมลาร์ และผ่านการกระตุ้นด้วยความร้อน พบว่ามีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเป็น 636, 793 และ 6,543 นาโนเมตรตามลำดับ ซึ่งวัสดุคาร์บอนที่เตรียมจากกลูโคส (รูปที่ 1(ก)) และซูโครส (รูปที่ 1(ข)) มีอนุภาคเป็นทรงกลมที่มีขนาดเล็กกว่าวัสดุคาร์บอนที่เตรียมจากกลีเซอรอลที่ถูกเร่งปฏิกิริยาด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1.0 โมลาร์ (รูปที่ 1(ค)) สันนิษฐานว่ากลีเซอรอลสามารถเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน-พอลิคอนเดนเซชันได้ดีภายใต้สภาวะไฮโดรเทอร์มอล และการใช้กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1.0 โมลาร์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้อนุภาคของวัสดุคาร์บอนที่เตรียมได้มีขนาดใหญ่ ในขณะที่การสังเคราะห์วัสดุคาร์บอนที่เตรียมจากกลูโคสและซูโครสภายใต้สภาวะไฮโดรเทอร์มอลกลูโคสและซูโครสจะเปลี่ยนเป็น 5-ไฮดรอกซีเมทิลเฟอรูล ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน-พอลิคอนเดนเซชันเป็นสารประกอบพอลิฟราโนก ให้วัสดุคาร์บอนที่มีลักษณะพื้นฐานที่เป็นทรงกลม และอนุภาคนั้นมีขนาดเล็กกว่าอนุภาคของวัสดุคาร์บอนที่เตรียมจากเซลลูโลส และเซลลูโลสที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยากัดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้น 0.1 และ 1.0 โมลาร์ และผ่านการกระตุ้นด้วยความร้อน พบว่ามีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 10,000, 188 และ 476 นาโนเมตรตามลำดับ โดยวัสดุคาร์บอนที่เตรียมจากเซลลูโลส (รูปที่ 1(ง)) มีการเกาะกันเป็นกลุ่มและมีขนาดใหญ่กว่าอนุภาคของวัสดุคาร์บอนที่เตรียมจากเซลลูโลสที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา

กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ (รูปที่ 1(จ)) และ 1.0 โมลาร์ (รูปที่ 1(ฉ)) สันนิษฐานว่าการสังเคราะห์เซลลูโลสโดยไม่เติมกรดไฮโดรคลอริกภายใต้สภาวะไฮโดรเทอร์มอลเซลลูโลสไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสได้ ทำให้ลักษณะพื้นที่ผิวไม่เป็นทรงกลมที่ชัดเจนและเกาะกลุ่มกันเป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ ในขณะที่การสังเคราะห์วัสดุคาร์บอนที่เตรียมจากเซลลูโลสที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยากัดไฮโดรคลอริกมีลักษณะพื้นฐานเป็นทรงกลมที่สังเกตเห็นได้อย่างชัดเจน และอนุภาคนั้นมีขนาดเล็กกว่าอนุภาคของเซลลูโลสจากการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเลือกใช้สารตั้งต้น และความเข้มข้นของสารละลายกรดมีผลอย่างยิ่งต่อการสังเคราะห์วัสดุคาร์บอนที่เป็นทรงกลมให้มีขนาดที่แตกต่างกัน

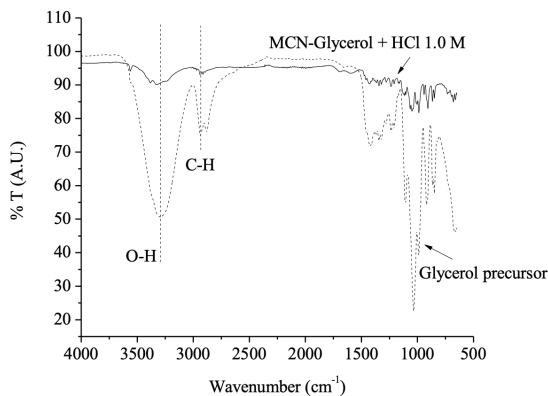
3.2.3 การวิเคราะห์คุณลักษณะของวัสดุคาร์บอนด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี
เมื่อนำวัสดุคาร์บอนที่เตรียมได้จากกลูโคส ซูโครส และกลีเซอรอล ภายใต้สภาวะไฮโดรเทอร์มอลภายใต้สภาวะไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ และ 1.0 โมลาร์ และผ่านการกระตุ้นด้วยความร้อนไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปีให้ผลการทดลองดังรูปที่ 2



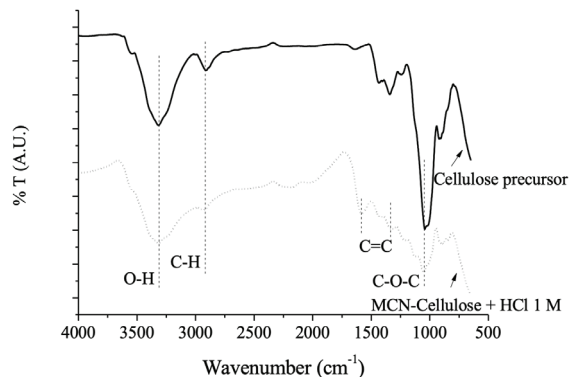
(ก)



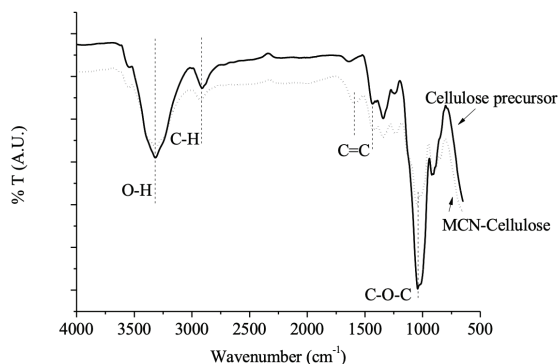
(ข)



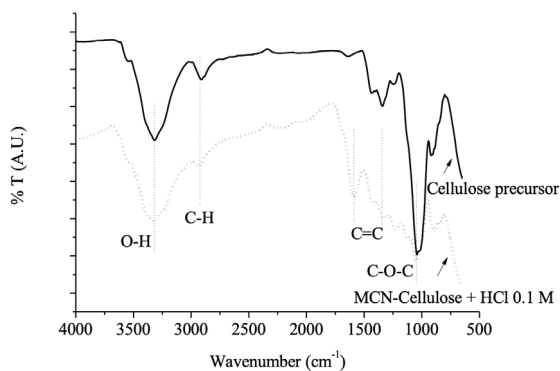
(ค)



(ง)



(จ)



(ฉ)

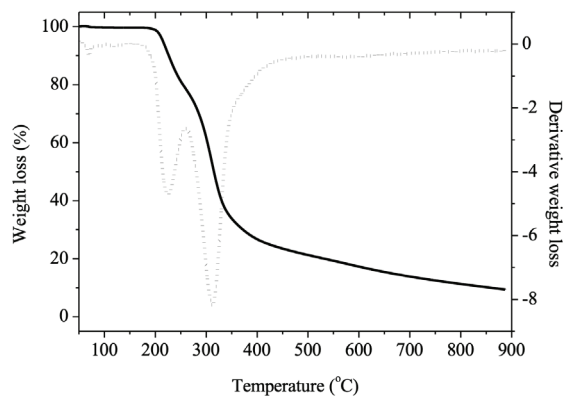
รูปที่ 2 อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุคาร์บอนที่เตรียมจาก (ก) กลูโคส (ข) ซูโครส (ค) กลีเซอรอลที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยากรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1.0 โมลาร์ (ง) เซลลูโลส (จ) เซลลูโลสที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยากรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ และ (ฉ) เซลลูโลสที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยากรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1.0 โมลาร์ ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยความร้อน

จากรูปที่ 2 พบว่าวัสดุคาร์บอนที่เตรียมจากกลูโคส ซูโครส และกลีเซอรอลที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยากรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้น 1.0 โมลาร์ ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล และนำมากระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ภายใต้อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส มีลักษณะของสเปกตรัมแตกต่างจากอนุพันธ์สารชีวมวลที่ใช้ในการเตรียมวัสดุคาร์บอน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีของการเตรียมวัสดุคาร์บอนจากกลีเซอรอลที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยากรดไฮโดรคลอริก เมื่อพิจารณาสเปกตรัมของกลูโคส ซูโครส และกลีเซอรอลซึ่งใช้เป็นสารตั้งต้นพบว่าให้แถบการสั่นที่เลขคลื่นประมาณ 3,300 เซนติเมตร⁻¹ ซึ่งเป็นการสั่นของหมู่ไฮดรอกซิล (O-H) แถบการสั่นที่เลขคลื่น 2,950 เซนติเมตร⁻¹ ซึ่งเป็นการสั่นของพันธะคาร์บอน-ไฮโดรเจน (C-H) โดยในกรณีของอนุพันธ์สารชีวมวลกลูโคส และซูโครสจะพบแถบการสั่นที่เลขคลื่น 1,050 เซนติเมตร⁻¹ ซึ่งเป็นการสั่นของหมู่เอเทอร์ (C-O-C) อย่างชัดเจน มากไปกว่านั้น ในกรณีของการวิเคราะห์วัสดุคาร์บอนจะพบแถบการสั่นในช่วง 1,600 และ 1,400 เซนติเมตร⁻¹ ซึ่งเป็นการสั่นของหมู่อะโรมาติกส์ (C=C) ที่เกิดขึ้นมาใหม่ ในขณะที่วัสดุคาร์บอนที่เตรียมจากเซลลูโลส และเซลลูโลสที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยากรดไฮโดรคลอริกที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล และนำมากระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ภายใต้อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส พบว่ามีลักษณะแตกต่างจากสเปกตรัมของเซลลูโลสที่ใช้เป็นสารตั้งต้นในการเตรียมวัสดุคาร์บอน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีของการเตรียมวัสดุคาร์บอนจากเซลลูโลสที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยากรดไฮโดรคลอริก เมื่อพิจารณาสเปกตรัมของเซลลูโลสซึ่งใช้เป็นสารตั้งต้น จะพบแถบการสั่นที่เลขคลื่น

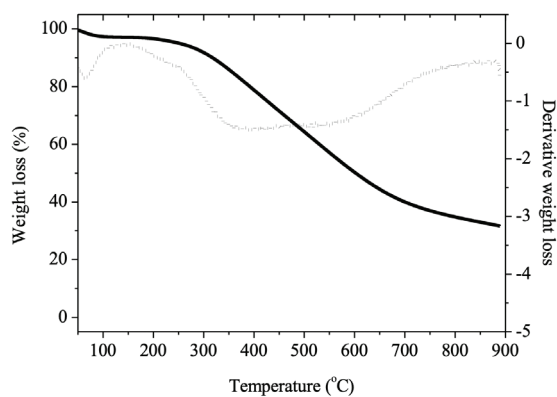
3,330 เซนติเมตร⁻¹ ซึ่งเป็นการสั่นของหมู่ไฮดรอกซี (O-H) แถบการสั่นที่เลขคลื่น 2,883 เซนติเมตร⁻¹ ซึ่งเป็นการสั่นของพันธะคาร์บอน-ไฮโดรเจน (C-H) และแถบการสั่นที่เลขคลื่น 1,169 เซนติเมตร⁻¹ ซึ่งเป็นการสั่นของหมู่เอเทอร์ (C-O-C) ในขณะที่วัสดุคาร์บอนที่เตรียมจากเซลลูโลสมีสเปกตรัมที่ใกล้เคียงกับเซลลูโลส แต่มีความเข้มของสัญญาณต่ำกว่า โดยเฉพาะอย่างยิ่งแถบการสั่นที่เลขคลื่น 1,169 เซนติเมตร⁻¹ ซึ่งเป็นการสั่นของหมู่เอเทอร์ (C-O-C) มากไปกว่านั้นยังพบแถบการสั่นในช่วง 1,600 และ 1,400 เซนติเมตร⁻¹ ซึ่งเป็นการสั่นของหมู่เอโรมาติกส์ (C=C) ที่เกิดขึ้นมาใหม่ เมื่อพิจารณาภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของวัสดุคาร์บอนที่เตรียมจากเซลลูโลสซึ่งมีการเกาะกันเป็นกลุ่มและมีขนาดใหญ่ แสดงว่าภายใต้สภาวะไฮโดรเทอร์มอล และการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ภายใต้ความร้อน 400 องศาเซลเซียสสามารถเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเซลลูโลสเป็นวัสดุคาร์บอนที่มีความเป็นเอโรมาติกส์ได้มากขึ้น แต่ส่วนใหญ่วัสดุคาร์บอนที่เตรียมได้แล้วยังมีลักษณะไม่แตกต่างจากเซลลูโลสซึ่งใช้เป็นสารตั้งต้นมากนัก อย่างไรก็ตาม ในกรณีของวัสดุคาร์บอนที่เตรียมจากเซลลูโลสที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยากัดไฮโดรคลอริก จะปรากฏแถบการสั่นในช่วง 1,600 และ 1,400 เซนติเมตร⁻¹ ซึ่งเป็นการสั่นของหมู่เอโรมาติกส์เพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ยังพบแถบการสั่นที่เลขคลื่น 1,169 เซนติเมตร⁻¹ ซึ่งเป็นการสั่นของหมู่เอเทอร์ลดลงอย่างมาก แสดงว่าการเติมตัวเร่งปฏิกิริยากัดไฮโดรคลอริกจะสามารถเปลี่ยนหมู่ฟังก์ชันที่อยู่บนสายโซ่เซลลูโลสให้เป็นวัสดุคาร์บอนที่มีโครงสร้างเป็นเอโรมาติกส์เพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตาม การกระตุ้นด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสไม่สามารถเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนเป็นส่วนประกอบได้อย่างสมบูรณ์ จึงยังปรากฏการสั่นที่เลขคลื่น 3,330 เซนติเมตร⁻¹ ซึ่งเป็นการสั่นของหมู่ไฮดรอกซี

3.2.4 การวิเคราะห์คุณลักษณะของวัสดุคาร์บอนด้วยเทคนิคการเปลี่ยนแปลงทางความร้อน

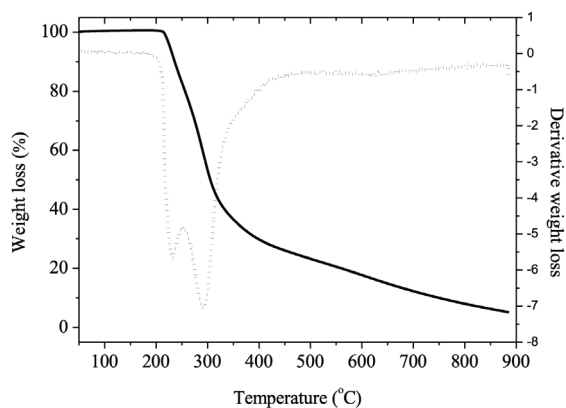
เมื่อนำกลูโคส ซูโครส และกลีเซอรอลที่ใช้เป็นสารตั้งต้นสำหรับการเตรียมวัสดุคาร์บอน วัสดุคาร์บอนที่เตรียมได้จากกลูโคส ซูโครส กลีเซอรอลที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยากัดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้น 1.0 โมลาร์ เซลลูโลส วัสดุคาร์บอนที่เตรียมได้จากเซลลูโลส และเซลลูโลสที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยากัดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้น 0.1 และ 1.0 โมลาร์ที่ผ่านการกระตุ้น ไปวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อน ให้ผลการทดลองดังรูปที่ 3



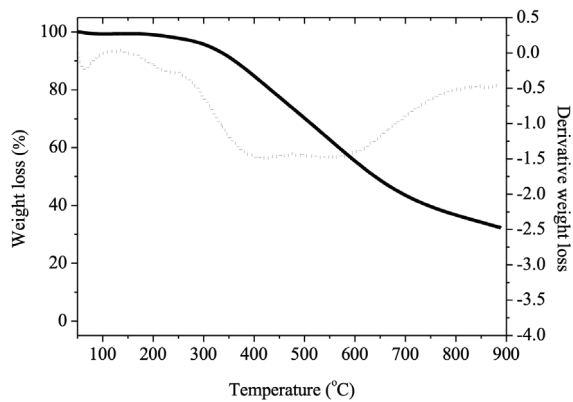
(ก)



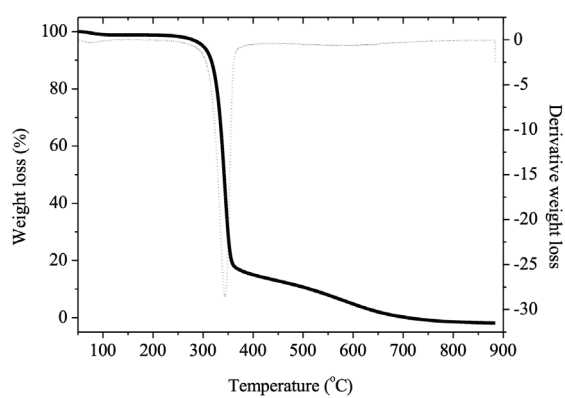
(ข)



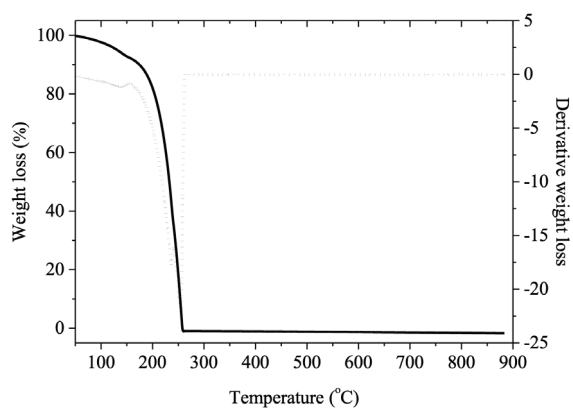
(ค)



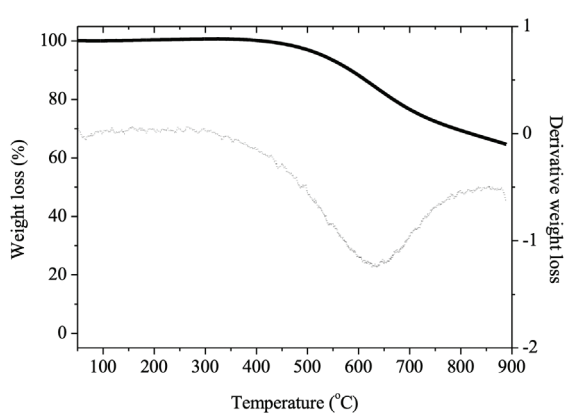
(จ)



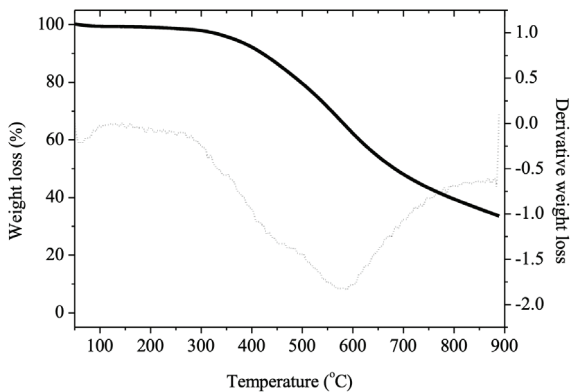
(ฉ)



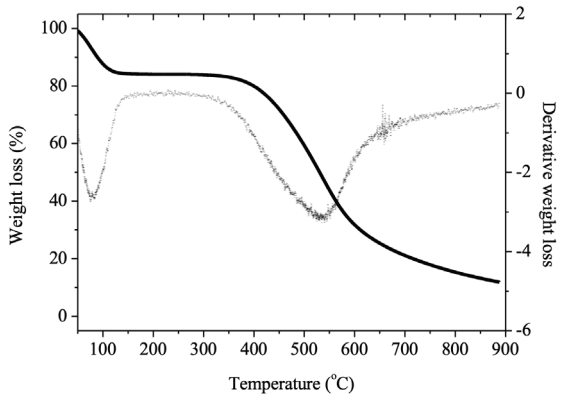
(ค)



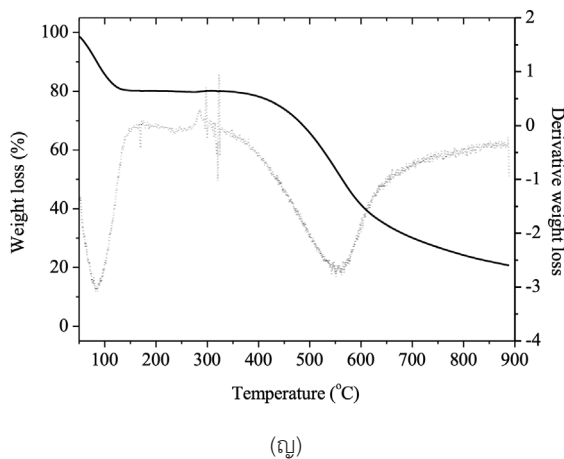
(ง)



(ฉ๑)



(ฉ๒)



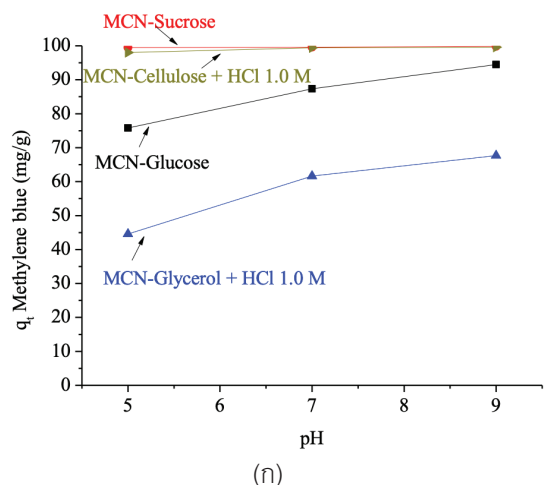
รูปที่ 3 เทอร์โมแกรมของ (ก) กลูโคส (ข) วัสดุคาร์บอนที่เตรียมจากกลูโคส (ค) ซูโครส (ง) วัสดุคาร์บอนที่เตรียมจากซูโครส (จ) กลีเซอรอล (ฉ) วัสดุคาร์บอนที่เตรียมจากกลีเซอรอลที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยากรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้น 1.0 โมลาร์ (ช) เซลลูโลส (ซ) วัสดุคาร์บอนที่เตรียมจากเซลลูโลส (ฅ) วัสดุคาร์บอนที่เตรียมจากเซลลูโลสที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยากรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ และ (ญ) วัสดุคาร์บอนที่เตรียมจากเซลลูโลสที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยากรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1.0 โมลาร์ (วัสดุคาร์บอนที่นำมาทดสอบผ่านการกระตุ้นด้วยความร้อน)

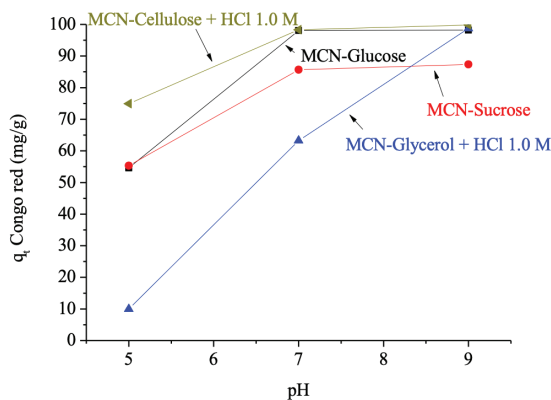
จากรูปที่ 3 พบว่ากลูโคสและซูโครสมีการสลายตัวสองขั้นตอน โดยในช่วงแรกจะสลายที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส และช่วงที่สองเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส [18] ในขณะที่กลีเซอรอลจะเกิดการสลายตัวอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิประมาณ 250 องศาเซลเซียส [19] อย่างไรก็ตาม วัสดุคาร์บอนที่เตรียมจากกลูโคส ซูโครส และกลีเซอรอลที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยากรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้น 1.0 โมลาร์ และผ่านการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ภายใต้ความร้อนที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส จะเกิดการสลายตัวในช่วงกว้างที่อุณหภูมิประมาณ 350-700 องศาเซลเซียส เมื่อเกิดการสลายตัวจนถึงอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส พบว่ามีส่วนของคาร์บอนคงค้างน้อยกว่า 40 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่เซลลูโลสจะเกิดการสลายตัวทางความร้อนในช่วงแคบที่อุณหภูมิประมาณ 340 องศาเซลเซียส สอดคล้องกับงานวิจัยของ Yeng และคณะ [20] ซึ่งพบการสลายตัวของเซลลูโลสที่อุณหภูมิประมาณ 340 องศาเซลเซียสเช่นกัน อย่างไรก็ตาม วัสดุคาร์บอนที่เตรียมจากเซลลูโลส และนำมากระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ภายใต้ความร้อนที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส จะเกิดการสลายตัวในช่วงกว้างที่อุณหภูมิประมาณ 640 องศาเซลเซียส เมื่อเกิดการสลายตัวจนถึง

อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส พบว่ามีส่วนของคาร์บอนคงค้างมากกว่า 60 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นว่าวัสดุคาร์บอนที่เตรียมได้น่าจะมีโครงสร้างขนาดใหญ่และมีเสถียรภาพทางความร้อนสูง สอดคล้องกับภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของวัสดุคาร์บอนที่เตรียมจากเซลลูโลส (รูปที่ 1(ง)) ในขณะที่วัสดุคาร์บอนที่เตรียมจากเซลลูโลสที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยากรดไฮโดรคลอริกพบการสูญเสียน้ำหนักในช่วงอุณหภูมิ 50-110 องศาเซลเซียส เนื่องจากมีการระเหยของน้ำในตัวอย่าง แสดงให้เห็นว่าวัสดุคาร์บอนที่เตรียมจากเซลลูโลสที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยากรดไฮโดรคลอริกมีความชอบน้ำ (Hydrophilicity) สูงกว่า วัสดุคาร์บอนที่เตรียมจากเซลลูโลสที่ไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยากรดไฮโดรคลอริกซึ่งไม่มีการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการระเหยของน้ำในช่วงอุณหภูมิดังกล่าว แสดงให้เห็นว่าวัสดุคาร์บอนที่เตรียมจากเซลลูโลสที่ไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยากรดไฮโดรคลอริกมีสมบัติไม่ชอบน้ำ (Hydrophobicity) นอกจากนี้ วัสดุคาร์บอนที่เตรียมจากเซลลูโลสที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยากรดไฮโดรคลอริก ยังพบการสูญเสียน้ำหนักในช่วงอุณหภูมิประมาณ 550 องศาเซลเซียส เมื่อเกิดการสลายตัวจนถึงอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส พบว่ามีส่วนของคาร์บอนคงค้างต่ำกว่า 25 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งให้เห็นว่าวัสดุคาร์บอนดังกล่าวน่าจะมีเสถียรภาพทางความร้อนต่ำ

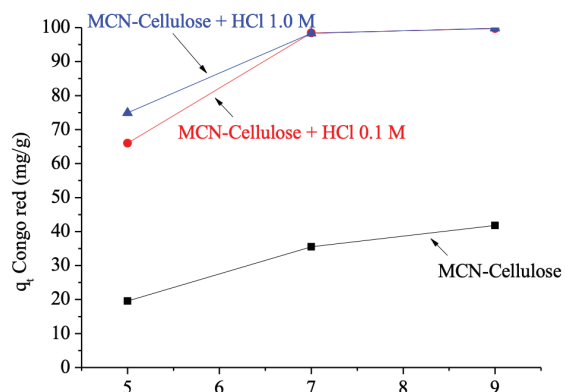
3.3 สมบัติการเป็นตัวดูดซับของวัสดุคาร์บอน

เมื่อนำวัสดุคาร์บอนที่เตรียมจากกลูโคส ซูโครส กลีเซอรอลที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยากรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้น 1.0 โมลาร์ เซลลูโลส และเซลลูโลสที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยากรดไฮโดรคลอริก และผ่านการกระตุ้นด้วยความร้อน มาทดสอบการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูคองไกรเด และไดเรกต์สการ์เลต 4บีเอส ให้ผลการทดลองดังรูปที่ 4

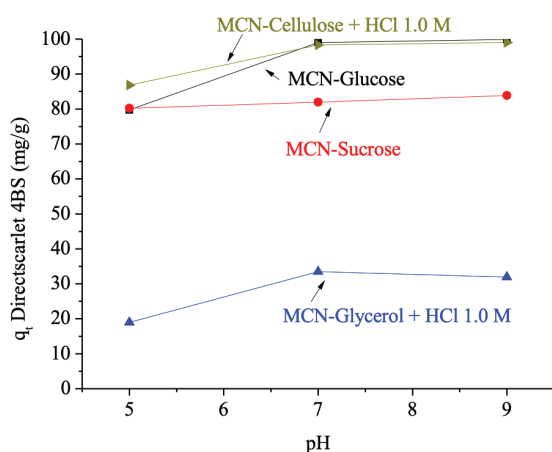




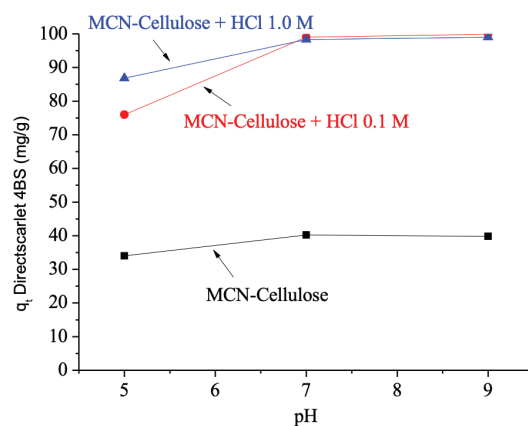
(ก)



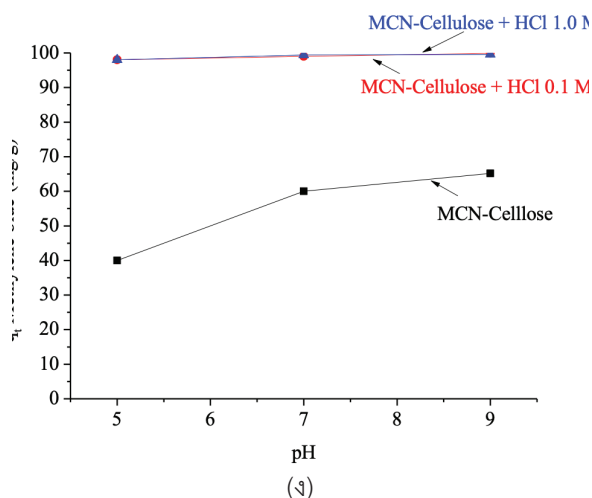
(ข)



(ค)



(ง)

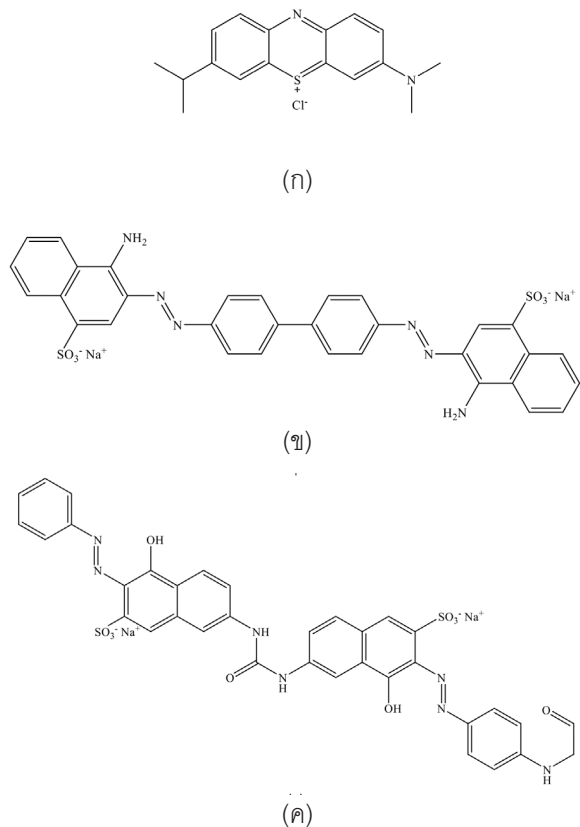


(จ)

รูปที่ 4 วัสดุคาร์บอนที่เตรียมจากกลูโคส ซูโครส กลีเซอรอลที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยากรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้น 1.0 โมลาร์ต่อประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อม (ก) เมทิลีนบลู(ข) คองโกเรด และ (ค) ไดเรกต์สการ์เลต 4บีเอส และวัสดุคาร์บอนที่เตรียมจากเซลลูโลส และเซลลูโลสที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยากรดไฮโดรคลอริกต่อประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อม (ง) เมทิลีนบลู(จ) คองโกเรด และ (ข) ไดเรกต์สการ์เลต 4 บีเอส (สภาวะ: พีเอช = 5-9, อุณหภูมิ = 25 องศาเซลเซียส, เวลา = 2 ชั่วโมง, ปริมาตรสารละลายสีย้อม = 100 มิลลิลิตร, ความเข้มข้นของสีย้อม = 100 มิลลิกรัมต่อลิตร, ปริมาณตัวดูดซับ = 0.1 กรัม)

จากรูปที่ 4 พบว่าโดยส่วนใหญ่วัสดุคาร์บอนที่เตรียมจากกลีเซอรอลที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยากรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้น 1.0 โมลาร์ และที่เตรียมจากเซลลูโลสมีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุคาร์บอนที่เตรียมจากกลูโคส ซูโครส และที่เตรียมจากเซลลูโลสที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยากรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้น 0.1 และ 1.0 โมลาร์ ทั้งในกรณีของการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู คองโกเรด และไดเรกต์สการ์เลต 4บีเอส โดยเมื่อพิจารณาขนาดโมเลกุลของสีย้อมชนิดต่าง ๆ ที่คำนวณจากโปรแกรม

Chem3D Pro และโปรแกรม Jmol พบว่าเมทิลีนบลูคองโกเรด และไดเรกต์สการ์เลต 4 บีเอสมีขนาดเป็น 0.48×1.32 , 0.67×2.27 และ 0.82×2.96 นาโนเมตรตามลำดับ (รูปที่ 5)



รูปที่ 5 โครงสร้างของสีย้อม (ก) เมทิลีนบลู(ข) คองโกเรด และ (ค) ไดเรกต์สการ์เลต 4บีเอส

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมที่พีเอช 5 (รูปที่ 4) วัสดุคาร์บอนจะมีประสิทธิภาพในการดูดซับที่ต่ำ แต่เมื่อพีเอชเพิ่มขึ้นจะมีประสิทธิภาพในการดูดซับที่สูงขึ้น ทั้งในกรณีของเมทิลีนบลู คองโกเรด และไดเรกต์สการ์เลต 4บีเอส โดยจะเห็นได้ว่าที่พีเอช 7 และ 9 มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมที่ใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาค่าพีเคของสีย้อมเมทิลีนบลู ($pK_a = 3.8$) [21] สีย้อมคองโกเรด ($pK_a = 4.1$) [22] พบว่ามีค่าต่ำกว่า 5 ในขณะที่สีย้อมไดเรกต์สการ์เลต 4บีเอสยังไม่พบการรายงานค่าพีเค แต่คาดว่าน่าจะอยู่ในช่วง 5.2-5.7 [23] (ประมาณจากสีย้อมที่มีโครงสร้างใกล้เคียงกัน) และเมื่อพิจารณาจากโครงสร้างของสีย้อมพบว่าสีย้อมเมทิลีนบลูเป็นสีย้อมประจุบวก (Cationic dye) ในขณะที่สีย้อมคองโกเรด และไดเรกต์สการ์เลต 4บีเอสเป็นสีย้อมประจุลบ (Anionic dye) ดังนั้นในสภาวะที่พีเอชมากกว่า 5 (ในช่วงพีเอช 7-9) โมเลกุลของสีย้อมเมทิลีนบลูจะมีประจุเป็นบวก ในขณะที่สีย้อมคองโกเรด และไดเรกต์สการ์เลต 4บีเอสจะมีประจุเป็นลบ

เมื่อพิจารณาค่าพีเอชที่ประจุที่ผิวเป็นศูนย์ (Point of zero charge) ของตัวดูดซับคาร์บอนที่เตรียมได้จากกลูโคส ซูโครส กลีเซอรอลที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยากัดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้น 1.0 โมลาร์ เซลลูโลส และเซลลูโลสที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยากัดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้น 0.1 และ 1.0 โมลาร์มีค่าพีเอชที่ประจุที่ผิวเป็นศูนย์เป็น 6.1, 5.1, 6.0, 5.0, 6.2 และ 5.2 ตามลำดับ (ตารางที่ 1) เมื่อพีเอชของสารละลายมากกว่าพีเอชที่ประจุที่ผิวเป็นศูนย์ตัวดูดซับจะมีสภาพประจุที่ผิวเป็นลบ ในทางตรงกันข้ามถ้าพีเอชของสารละลายต่ำกว่าพีเอชที่ประจุที่ผิวเป็นศูนย์ตัวดูดซับจะมีสภาพประจุเป็นบวก ดังนั้น การดูดซับที่พีเอช 5 วัสดุคาร์บอนที่เตรียมได้จะมีสภาพประจุที่ผิวเป็นบวก ในขณะที่การดูดซับที่พีเอชมากกว่า 5 (พีเอช 7-9) วัสดุคาร์บอนที่เตรียมได้จะมีสภาพประจุที่ผิวเป็นลบ ทำให้สันนิษฐานได้ว่าการดูดซับเมทิลีนบลูบน วัสดุคาร์บอนที่เตรียมได้น่าจะเกิดขึ้นจากแรงดึงดูด-แรงผลักทางไฟฟ้าสถิต (Electrostatic attraction and repulsion) โดยที่พีเอชมากกว่า 5 สีย้อมเมทิลีนบลูมีประจุเป็นบวก ในขณะที่วัสดุคาร์บอนที่เตรียมได้มีสภาพประจุที่ผิวเป็นลบทำให้เกิดแรงดึงดูด สอดคล้องกับการเพิ่มค่าพีเอชของการดูดซับ ประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมของวัสดุคาร์บอนมีค่าเพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณากลไกการดูดซับของสีย้อมคองโกเรด และไดเรกต์สการ์เลต 4บีเอส ที่พีเอชมากกว่า 5 สีย้อมคองโกเรด และไดเรกต์สการ์เลต 4บีเอสจะมีประจุเป็นลบ และวัสดุคาร์บอนที่เตรียมได้มีสภาพประจุที่ผิวเป็นลบเช่นกัน ดังนั้น ถ้ากลไกการดูดซับเป็นแบบแรงดึงดูด-แรงผลักทางไฟฟ้าสถิต จะทำให้สีย้อมและตัวดูดซับเกิดแรงผลักกัน ประสิทธิภาพการดูดซับจึงควรลดต่ำลงเมื่อเพิ่มพีเอชของการดูดซับ ในทางตรงกันข้ามผลการทดลอง (รูปที่ 4) กลับพบว่าการเพิ่มค่าพีเอชของการดูดซับทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมของวัสดุคาร์บอนมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้น อันตรกิริยาระหว่างสีย้อมคองโกเรด และไดเรกต์สการ์เลต 4บีเอส และตัวดูดซับวัสดุคาร์บอนที่เตรียมได้ไม่ได้เกิดขึ้นแบบแรงดึงดูด-แรงผลักทางไฟฟ้าสถิต แต่อาจเกิดขึ้นเนื่องจากแรงดึงดูดประเภทอื่น ๆ ซึ่งแรงดึงดูดดังกล่าวอาจเป็นแรงดึงดูดระหว่างขั้ว (Dipole-dipole interaction) พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bonding) อันตรกิริยาระหว่างพันธะไพ หรือวงอะโรมาติกส์ ($\pi-\pi$ (Aromatic-aromatic) interaction) แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der waals forces) [22] ซึ่งอาจเกิดขึ้นได้กับวัสดุคาร์บอนที่มีโครงสร้างเป็นอะโรมาติกส์ แต่ยังคงมีหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนเป็นส่วนประกอบที่พื้นผิว ซึ่งยังคงเหลืออยู่จากการกระตุ้นด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสที่ไม่สามารถเปลี่ยนโครงสร้างของหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนเป็นส่วนประกอบได้อย่างสมบูรณ์

เมื่อพิจารณาจากขนาดโมเลกุลของสีย้อมเมทิลีนบลูซึ่งนิยมใช้ในการตรวจสอบวัสดุที่มีรูพรุนขนาดกลาง (Mesoporous material) [24] แสดงให้เห็นว่าวัสดุคาร์บอนที่เตรียมจากกลูโคส ซูโครส และที่เตรียมจากเซลลูโลสที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยากรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้น 0.1 และ 1.0 โมลาร์ เมื่อนำมาผ่านการกระตุ้นด้วยความร้อนเป็นวัสดุที่มีโครงสร้างโดยส่วนใหญ่เป็นวัสดุที่มีรูพรุนขนาดกลาง จึงสามารถดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู และโมเลกุลของสีย้อมคองโกเรด และไดเรกต์สการ์เลต 4 บีเอส ซึ่งมีขนาดโมเลกุลใหญ่กว่าสีย้อมเมทิลีนบลูได้ อย่างไรก็ตาม วัสดุคาร์บอนที่เตรียมจากกลีเซอรอลที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยากรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้น 1.0 โมลาร์ และที่เตรียมจากเซลลูโลสแม้มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมต่ำ แต่ให้ค่าไอโอดีนน้ำหนักสูง (ตารางที่ 1) ซึ่งชี้ให้เห็นว่าวัสดุคาร์บอนนี้จะมีโครงสร้างโดยส่วนใหญ่เป็นวัสดุที่มีรูพรุนขนาดเล็ก (Microporous material)

4. สรุป (Conclusion)

งานวิจัยนี้สามารถเตรียมวัสดุคาร์บอนจากอนุพันธ์สารชีวมวลซึ่งได้แก่ กลูโคส ซูโครส กลีเซอรอล และเซลลูโลส โดยใช้กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส โดยในกรณีของการเตรียมวัสดุคาร์บอนจากเซลลูโลส และกลีเซอรอลจำเป็นต้องใช้กรดไฮโดรคลอริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เมื่อนำวัสดุคาร์บอนที่เตรียมได้จากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลมากระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ และนำมาผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส จะทำให้วัสดุคาร์บอนเกิดเป็นรูพรุน และมีสมบัติในการดูดซับไอโอดีน และสีย้อม เมื่อทำการวิเคราะห์คุณลักษณะของวัสดุคาร์บอนที่เตรียมได้ พบว่ามีลักษณะเป็นทรงกลม และมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยระหว่าง 188-10,000 นาโนเมตร โดยการกระตุ้นด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ไม่สามารถเปลี่ยนโครงสร้างของหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนเป็นส่วนประกอบได้อย่างสมบูรณ์ ทำให้วัสดุคาร์บอนที่เตรียมได้มีหมู่ฟังก์ชันที่พื้นผิว และสภาพพื้นผิวนี้มีบทบาทสำคัญต่อการกำหนดพฤติกรรมดูดซับของสีย้อม 3 ชนิด ได้แก่ เมทิลีนบลู คองโกเรด และไดเรกต์สการ์เลต 4 บีเอส จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม 3 ชนิดบนคาร์บอนนาโนสเฟียร์ที่มีรูพรุนมีค่าสูงที่สุดที่พีเอชเริ่มต้นของสารละลายในช่วง 7-9 โดยมีปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับบนตัวดูดซับ (q_t) ประมาณ 100 มิลลิกรัมต่อกรัม

5. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสาขาเคมีประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ในการเอื้อเฟื้อห้องปฏิบัติการวิจัย ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลงได้เป็นอย่างดี

6. เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] YUSUFU, M.I., C.C. ARIAHU, and B.D. IGBABUL. Production and characterization of activated carbon from selected local raw materials. *African journal of pure and applied chemistry*. 2012, 6(9), 123-131.
- [2] SRICHAROENCHAİKAL, V., C. PECHYEN, D. AHL-ONG, and D. ATONG. Preparation and characterization of activated carbon from the pyrolysis of physic nut (*Jatropha curcas L.*) waste energy. *Fuels*. 2007, 22, 31-37.
- [3] KRISTIANO, H., C.D. Putra, A.A. ARIE, M. HALIM, and J.K. LEE. Synthesis and characterization of carbon nanospheres using cooking palm oil as natural precursors onto activated carbon support. *Procedia chemistry*. 2016, 16, 328-333
- [4] CHEN, Y., Y. ZHU, Z. WANG, Y. Li, L. WANG, L. DING, X. GAO, Y. Ma, and Y. GAO. Application studies of activated carbon derived from rice husks produced by chemical-thermal process. A review. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2011, 163, 39-52.
- [5] KRISHNAMURTHY, G. and R. NAMITHA, SARIKA AGARWAL. Synthesis of carbon nanotubes and carbon spheres and study of their hydrogen storage property by electrochemical method. *Procedia Materials Science*. 2014, 5, 1056-1065. ISSN 2211-8128.
- [6] MOHAN, D. and C.U. PITTMAN. Activated carbons and low cost adsorbents for remediation of tri- and hexavalent chromium from water. *Journal of Hazardous Materials*. 2006, 137, 762-811.
- [7] อภินันท์ สุทธิธรรวัช, การเตรียมผงคาร์บอนที่มีรูพรุนระดับ 2-50 นาโนเมตรโดยอาศัยกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย, งานวิจัยฉบับสมบูรณ์ที่ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยปี 2557.
- [8] เกรียงศักดิ์ ไกวัฒนวงศ์ และ ปิยะสาร ประเสริฐธรรม. การเตรียมเมสโซพอร์รัสคาร์บอนซีโรเจลจากกรีซอร์ซินอลและฟอร์มัลดีไฮด์. งานวิจัยฉบับสมบูรณ์ที่ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยปี 2552.

- [9] เกียรติศักดิ์ ไกรวัฒนวงศ์, สุรีย์ภรณ์ ตันติธัญญกุล, ชนิตา เวสนุสิทธิ์ และ ธัชพล ภักดีอาษา. เมโซพอร์สคาร์บอนเจล: ปัจจุบันและอนาคต, *วิศวกรรมสารลาดกระบัง*. 2551, **25**(1), 37-41.
- [10] ZHU, Y., H. HU, W. LI, and X. ZHANG. Resorcinol-formaldehyde based porous carbon as an electrode material for supercapacitors. *Carbon*. 2007, **45**(1), 160-165.
- [11] MACIAS, C., G. RASINES, T.E. GARCIA, M.C. ZAFRA, P. LAVELA, J.L. TIRADO, and C.O. ANIA. Synthesis of porous and mechanically compliant carbon aerogels using conductive and structural additives. *Gels*. 2016, **2**(4), 1-16.
- [12] CHEN, F., M. XU, L. WANG, and J. LI. Preparation and characterization of organic aerogels from a lignin-resorcinol-formaldehyde copolymer. *Bioresources*. 2011, **6**(2), 1262-1272.
- [13] RIVERA-UTRILLA, J., I. BAUTISTA-TOLEDO, M.A. Ferro-Garcia, and C. MORENO-CASTILLA. Activated carbon surface modifications by adsorption of bacteria and their effect on aqueous lead adsorption. *J. Chem. Technol. Biotechnol*. 2001, **76**, 1209-1215.
- [14] ZHAO, H., H. ZHONG, Y. JIANG, H. LI, P. TANG, D. LI, and Y. FENG. Porous ZnCl₂-activated carbon from shaddock peel: methylene blue adsorption behavior. *Materials*, 2022, **15**(3), 895.
- [15] FALCO, C., N. BACCILE, and M.-M. TITIRICI. Morphological and structural differences between glucose, cellulose and lignocellulosic biomass derived hydrothermal carbons. *Green Chemistry*. 2011, **13**(11), 3273-3281.
- [16] AUSAVASUKHI, A., S. SOMBATSRI, P. KUMBOONMA, and T. SOOKNOI. Catalytic behavior of Cr-modified zeolites in the conversion of glucose to 5-hydroxymethylfurfural. *Burapha Science Journal*. 2015, **20**(1), 1-14.
- [17] SHEN, L., H. YIN, A. WANG, Y. FENG, Y. SHEN, Z. WU and T. Jiang. Liquid phase dehydration of glycerol to acrolein catalyzed by silicotungstic, phosphotungstic, and phosphomolybdic acids. *Chemical Engineering Journal*, 2011, **180**, 277-283.
- [18] RUIZ-CABRERA, M.A., C. RIVERA-BAUTISTA, A. GRAJALES-LAGUNES, R. GONZÁLEZ-GARCÍA, and S.J. SCHMIDT. State diagrams for mixtures of low molecular weight carbohydrates. *Journal of Food Engineering*. 2016, **171**(1), 185-193.
- [19] GÓMEZ-SIURANA, A., A. MARCILLA, M. BELTRÁN, D. BERENGUER, I. MARTÍNEZ-CASTELLANOS, and S. MENARGUES. TGA/FTIR study of tobacco and glycerol-tobacco mixtures. *Thermochimica Acta*. 2013, **573**(1), 146-157.
- [20] LEE, C.Y., M.U. WAHIT, and N. OTHMAN. Thermal and flexural properties of regenerated cellulose(RC)/poly(3-hydroxybutyrate)(PHB) biocomposites. *Jurnal Teknologi*. 2015, **75**(11), 107-112.
- [21] KIM, J.R., B. SANTIANO, H. KIM, and E. KAN. Heterogeneous oxidation of methylene blue with surface-modified iron-amended activated carbon. *American Journal of Analytical Chemistry*. 2013, **4**(1), 115-122.
- [22] AUSAVASUKHI, A., C. KAMPOOSAEN, and O. KENGNOK Adsorption characteristics of Congo red on carbonized leonardite. *Journal of Cleaner Production*. 2016, **134**(1), 506-514.
- [23] SUN, D., Z. ZHANG, M. WANG, and Y. WU Adsorption of reactive dyes on activated carbon developed from *Enteromorpha prolifera*. *American Journal of Analytical Chemistry*. 2013, **4**(1), 17-26.
- [24] KOUOTOU, D., H.N. MANGA, A. BACAOUI, A. YAACOUBI, and J.K. MBADCAM. Optimization of activated carbons prepared by H₃PO₄ and steam activation of oil palm shells. *Journal of Chemistry*. 2013, **2013**(1), 1-10.

การทวนสอบเครื่องวัดอุณหภูมิชนิดอินฟราเรดด้วยเพลลียร์เทคนิค Verification of IRT with the peltier technique

วีระชัย วาริยาตรี¹, วันชัย ชินชูศักดิ์^{1*}

Weerachai Variyart¹, Wanchai Chinchusak^{1*}

รับบทความ: 18 กุมภาพันธ์ 2565 แก้ไขบทความ: 9 กรกฎาคม 2565 ยอมรับตีพิมพ์: 11 กรกฎาคม 2565

บทคัดย่อ

ปัจจุบันความต้องการใช้เครื่องวัดอุณหภูมิชนิดอินฟราเรดเพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย เช่น ตามจุดคัดกรองและสถานบริการด้านการสาธารณสุขเพื่อป้องกันการแพร่ระบาดของเชื้อไวรัสโควิด-19 แต่ไม่ค่อยมีความน่าเชื่อถือสาเหตุจากมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงซึ่งมีความเสี่ยงต่อการแพร่ระบาดของเชื้อไวรัสโควิด-19 เพิ่มมากขึ้น การทวนสอบเครื่องวัดอุณหภูมิชนิดอินฟราเรดดังกล่าวด้วยแบล็คบอดี้จะทำให้ค่าใช้จ่ายสูงและค่าความแม่นยำสูงเกินความจำเป็น เทคนิคการทวนสอบเครื่องวัดอุณหภูมิชนิดอินฟราเรดด้วยชุดสมาร์ตคิทซึ่งสามารถทวนสอบเครื่องวัดอุณหภูมิชนิดอินฟราเรดตามมาตรฐาน ASTM E1965-98 [1] ช่วงการวัดตั้งแต่ 36°C ถึง 39°C และตามช่วงการยอมรับ $\pm 0.3^\circ\text{C}$ อีกทั้งยังเพิ่มประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือของเครื่องวัดอุณหภูมิชนิดอินฟราเรดด้วยเสถียรภาพดีกว่า

Abstract

Recently, the demand for infrared thermometers (IRT) is increasing continuously. They are widely used in many applications, such as measuring temperature at the screening points and public health facilities to prevent the spread of the COVID-19 virus. However, it is not reliable due to their limit of tolerance, which results in an increased risk of the epidemic of the COVID-19 virus. Verifying those IRTs with a black body can be costly and unnecessarily for high accuracy. Techniques for verifying the IRT with smart kits are detailed in the document of ASTM E1965-98 [1]. By using these techniques for the smart kit, the measuring range with the accuracy of $\pm 0.3^\circ\text{C}$ can be cover up the temperature of 36°C to 39°C. These methods of verification also improve the efficiency and reliability of infrared thermometers.

คำสำคัญ: ชุดสมาร์ตคิท เครื่องวัดอุณหภูมิชนิดอินฟราเรด เพลลียร์เทคนิค การทวนสอบ แบล็คบอดี้

Keywords: Smart kits, Infrared thermometer, Peltier technique, Verification, Black body

¹ Department of Science Service

*e-mail address: weerachai@dss.go.th

**Corresponding author e-mail address : wanchai@dss.go.th

1. (Introduction)

1.1 Introduction

At the present, non-contact infrared thermometers (IRT) are widely applied for measuring temperature at the screening points and hospitals, because they are both more convenient and safer in using for everyone, especially when they are used for the measuring of patient temperature. Although those IRTs are more convenient and safer in use than a simple thermometer, there are some errors in the measurement results of the devices. Unfortunately, each one of IRT is not reliable in measurement and conforms specification, which may cause errors in the risk of diagnosis.

The IRT needs to calibrate or routine performance check as the interval program, in order to correct and prove within their tolerance of specification. Generally, the IRT is necessary calibrated by using black body source in the metrological laboratory. Blackbody source or Black body knows well as the measurement standard used for calibrating non-contact infrared thermometer.

Practically, it is not possible to do this, due to a large number of IRTs. Moreover, it is not only the high calibration cost, but service period of calibration might also take a long time. Verification is the process of establishing the accuracy, or validity of IRT. The verification is a good way, good solution, and more suitable for solving this condition.

This paper will present the IRT verification technique by using a smart kit, which was built by the principle of the Peltier effect technique. The Peltier semiconductor type generates warm temperature on one side of its surface and another side of its surface generates cool temperature, when apply electrical voltage to Peltier plate. The smart kit for IRT produces a warm side to create temperature within controlling by the enhance microcontroller at the temperature range of 36°C to 39°C, according to ASTM E1965-98(2016), which their measurement stability is better than $\pm 0.3^\circ\text{C}$. This solution is equivalent to the black body source for solving the IRT reliability. By using this new device, insufficiency of the IRT calibration service would be also solved. The next project would develop the verification of IRT face recognition type.

1.2 Principles and designs

1.2.1 Blackbody source

The blackbody [2] source is an electromagnetic radiation system that is emitted by an object that is in thermodynamic equilibrium. An object is considered an ideal of perfect blackbody when it absorbs all of the incoming light and does not reflect any. Blackbody source or Blackbody is known well as the measurement standard used for calibrating non-contact infrared thermometer (IRT). Generally, the blackbody sources consisting of a black target plate as shown in the Fig. 1 can be heated to specific temperatures, and they have a characteristic of very high accuracy with the emissivity $\varepsilon = 1$.

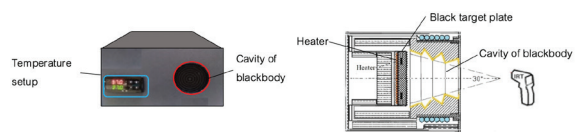


Fig.1 Black body source and basic structure

1.2.2 Smart kit for IRT designs

The design of Smart kit for IRT is as following the ITS -90 traceability of all thermometers, both contact and non-contact thermometer. The smart kit for IRT is traceable to the SPRT thermometer, as shown in Fig. 2.

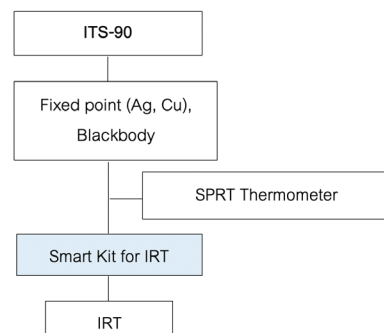


Fig. 2 The traceability of thermometer

Typically, the Peltier effect [3] is multi-junctions in series of n-type and p-type semiconductor, through which a current is driven. Due to the Peltier effect, some of the junctions absorb heat or lose heat (cold side) on ceramic surface, while others release heat or gain heat (hot side) on ceramic surface, as shown in Fig. 3. Thermoelectric heat pumps exploit this technology, such as Peltier devices found in refrigerators.

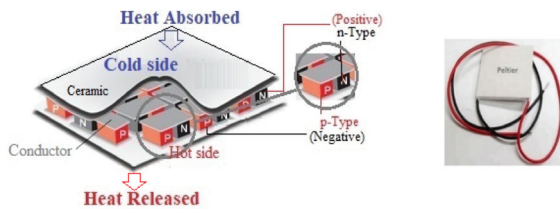


Fig. 3 Principle of Peltier effects and Peltier device

The design of smart kit for IRT uses the principle of Peltier effect. It has just only used hot side junction to create temperature instead of the heater. In order to save the electrical power and to control temperature, a microcontroller (Arduino) [4] and software are used in the design.

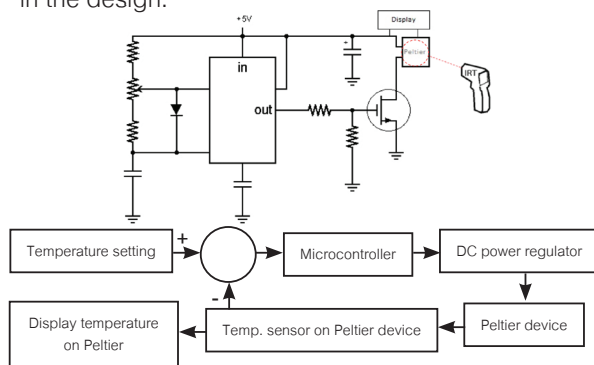


Fig. 4 The schematic diagram and flow chart of smart kit for IRT

2. Experimental methods

An experiment was carried out in order to fulfil 2 objectives. The first objective was to verify the smart kit by comparing with black body in term of controlling a heat radiation. This objective was done by using IRTs, which were used in Thailand as artefacts. The second objective was to verify IRT performance. By comparing temperature measured from IRT with the heat sources radiated from the smart kit and the black body, a performance of IRT can be verified.



Fig. 5 IRT to measure temperature at heat radiation of the smart kit and black body.

Before the experiment was done, the smart kit was calibrated by the thermometer with thermocouple. The processes of experiment were carried out as follows.

- Setting the heat radiation of the smart kit and the black body was at 36°.
- IRTs were used to measure temperature at the heat radiation of both sources (Fig. 5).
- Temperatures measured from IRTs and both sources were recorded.
- The processes of setting the heat radiation of both sources, measuring and recording temperature of IRTs were carried out for the temperature at 37°, 38° and 39°, which were called as 1 cycle of measurement.
- The measurements of this experiment were conducted for 3 cycles.

3. Results and discussion

3.1 Experimental results

Results of the experiment were showed on table 1, Table 2 and graph 1

Table1 Average of temperature measured from IRT

$T_s(^{\circ}\text{C})$	IRT 1		IRT 2		IRT 3
	$T_{irs}(^{\circ}\text{C})$	$T_{irb}(^{\circ}\text{C})$	$T_{irs}(^{\circ}\text{C})$	$T_{irb}(^{\circ}\text{C})$	$T_{irs}(^{\circ}\text{C})$
36.0	36.8	36.8	36.3	36.3	36.0
37.0	37.0	37.0	36.6	36.5	37.0
38.0	38.4	38.5	36.7	36.7	38.0
39.0	39.8	39.8	37.2	37.2	39.1

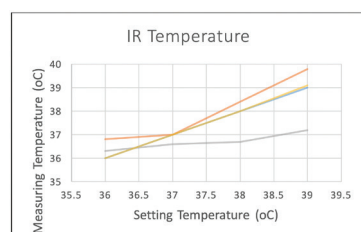
Remarks: 1. IRT 3 cannot be used with the black body in the mode of body.

2. Measurement uncertainty [5] of T_{irs} is 0.87 °C and T_{irb} is 0.42 °C approximately at confidential level of 95%.

Which T_s is the temperature setting from the smart kit and the black body,

T_{irs} is the average temperature measured from an IRT used with the heat radiation of the smart kit,

T_{irb} is the average temperature measured from an IRT used with the heat radiation of the black body.



Graph 1: Temperature measured from IRT: Blue line = ideal, Brown line = temperature from IRT 1, Purple line = temperature from IRT2 and Green line = temperature from IRT 3.

Table 2 EN Ratio for verification of the smart kit

$T_s(^{\circ}\text{C})$	EN Ratio	
	IRT 1	IRT 2
36.0	0	0
37.0	0	0.11
38.0	0.11	0
39.0	0	0

3.2 Discussion

One of the objectives of the experiment is to verify the smart kit. To do this, temperatures measured from the IRT using the smart kit as the heat radiation was compared with that using the black body as the heat radiation. The comparison is carried out in term of the EN Ratio. This EN Ratio was calculated by the equation of [6]

$$\text{EN} = \left| \frac{T_{\text{irb}} - T_{\text{irs}}}{\sqrt{U_{\text{irb}}^2 + U_{\text{irs}}^2}} \right|$$

, which U_{irb} and U_{irs} are measurement uncertainty of T_{irb} and T_{irs} , respectively.

By using data from table 1, the EN Ratio was calculated as shown in Table 2. Since the EN Ratio is less than 1, so the experimental results distinctively verify that the smart kit gives the good performance according to the black body.

To verify quality of IRTs, these instruments will measure its temperature accuracy, since the standard ASTM E1965-98 [1] assigns that IRT used for measuring skin temperature must accurate within $\pm 3^{\circ}\text{C}$. The Data from table 1 and graph 1 clearly demonstrate that the accuracy of the IRT 1 corresponds with that standard only at the temperature of 37°C while that of the IRT 2 corresponds with the standard only at the temperature of 36°C . From observation, hence both instruments, IRT 1 and IRT 2, are unqualified to be used anymore.

4. Conclusion

This paper has described the principle of the smart kit for an IRT. Its performance was successfully verified by the experiment results in term of EN Ratio. The results also shows that IRT, which was used in the present, might be unreliable.

5. Acknowledgement

We are grateful to executives of the department of science service for the supporting this research.

6. References

- [1] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). ASTM E1965 –98(2016). *Standard specification for infrared thermometers for intermittent determination of patient temperature*. West Conshohocken, Pa. : ASTM International, 2016.
- [2] CI SYSTEMS-ELECTRO OPTICAL TESTING & MEASUREMENT. *Highly accurate black body radiation sources* [online]. 17 July 2016. Available from: <https://www.ci-systems.com/blackbodies>. [viewed 2021-11-10].
- [3] *Thermoelectric effect* [online]. 2021. Available from: https://en.wikipedia.org/wiki/Thermoelectric_effect. [viewed 2021-12-10].
- [4] *Arduino ecosystem* [online]. 2021. Available from: <https://docs.arduino.cc/learn>. [viewed 2021-01-10].
- [5] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION AND INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (ISO/IEC). ISO/IEC Guide 98-3:2008. *Uncertainty of measurement — Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995)*. Geneva, Switzerland : ISO, 2008.
- [6] UNITED KINGDOM ACCREDITATION SERVICE. Lab 46: *UKAS policy for participation in measurement audits and interlaboratory comparisons* [online]. UKAS edition 4 May 2019. Available from: <https://www.ukas.com/wp-content/uploads/filebase/publications/publications-relating-to-laboratory-accreditation/LAB-46-Edition-4-May-2019.pdf>. [viewed 2021-01-05].

ผลกระทบของระบบปรับตั้งต่อประสิทธิภาพของ เครื่องชั่งน้ำหนักอิเล็กทรอนิกส์

The effect of adjustment system to the electronic balance performance

จิตตกานต์ อินเที่ยง^{1*}Jittakant Intiang^{1*}

รับบทความ: 17 กุมภาพันธ์ 2565 แก้ไขบทความ: 6 พฤษภาคม 2565 ยอมรับตีพิมพ์: 18 กรกฎาคม 2565

10

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะนำเสนอผลกระทบของระบบปรับตั้งที่มีต่อประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องชั่งน้ำหนักอิเล็กทรอนิกส์ ในงานวิจัยนี้จะทำการสอบเทียบเครื่องชั่งน้ำหนักตัวอย่างที่มีความสามารถสูงสุด 520 กรัม ค่าความละเอียด 0.1 มิลลิกรัม ที่ได้รับการปรับตั้งแตกต่างกัน 2 แบบ ได้แก่ การปรับตั้งด้วยตุ้มน้ำหนักภายในและการปรับตั้งด้วยตุ้มน้ำหนักภายนอกตามวิธีการสอบเทียบ EURAMET cg-18 จากผลการสอบเทียบในหัวข้อค่าผิดพลาดของการอ่านค่า (Error of indication) ซึ่งสัมพันธ์กับคุณลักษณะค่าความผิดพลาดเชิงเส้น (Linearity deviation) ของเครื่องชั่งน้ำหนักพบว่าผลการสอบเทียบในหัวข้อดังกล่าวสำหรับการปรับตั้งทั้ง 2 แบบมีค่า E_n number แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ $|E_n| > 1$ โดยเมื่อพิจารณาจากเส้นกราฟความเป็นเชิงเส้น (Linearity graph) ของทั้ง 2 เงื่อนไขพบว่าค่าความผิดพลาดเชิงเส้นของทั้ง 2 เงื่อนไขมีค่าต่างกันแต่น้อยกว่าค่าที่กำหนดจากผู้ผลิต ± 0.4 มิลลิกรัม แต่เมื่อพิจารณาค่าความชัน (Slope) ที่แสดงถึงคุณลักษณะค่าความไว (Sensitivity) พบว่าในกรณีปรับตั้งด้วยตุ้มน้ำหนักภายในมีค่าความชัน (Slope) 4.00×10^{-6} และเมื่อทำการปรับตั้งด้วยตุ้มน้ำหนักภายนอกค่าความชัน (Slope) มีค่าลดลงเป็น 5.97×10^{-7} ซึ่งแสดงว่าระบบปรับตั้งด้วยตุ้มน้ำหนักภายในของเครื่องชั่งตัวอย่างนี้มีค่าผิดพลาดจนส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพเครื่องชั่ง

Abstract

This research aims to present the impact of the adjustment system on the performance of electronic balance. In this research, the electronic balance with a maximum capacity 520 g and readability 0.1 mg has been adjusted differently; internal built-in weight adjustment system and external weight adjustment system according to EURAMET cg-18 calibration method. The calibration results of both conditions in the topic of the error of indication test, which is associated with linearity deviation characteristics of the electronic balance, showed that the E_n number for this topic were significantly different, $|E_n| > 1$. Based on the linearity graph of both conditions, the linearity deviation of both conditions were different but still less than the value specified by the manufacturer; ± 0.4 mg. However, when considering the slope that represents the sensitivity characteristic, it was found that in case of adjusting with an internal weight with a slope of 4.00×10^{-6} and when adjusted with an external weight, the slope value was reduced to 5.97×10^{-7} , indicating that the internal weight adjustment system of this electronic balance experienced an error that affected the performance of the electronic balance.

คำสำคัญ: เครื่องชั่งน้ำหนักอิเล็กทรอนิกส์ ระบบปรับตั้ง ความเป็นเชิงเส้น ความไว

Keywords: Electronic balance, Adjustment system, Linearity, Sensitivity

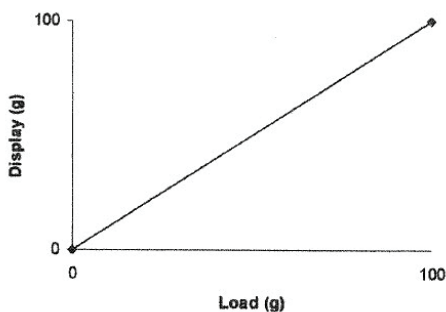
¹กรมวิทยาศาสตร์บริการ

* e-mail address: jittakant@dss.go.th

1. บทนำ (Introduction)

เครื่องชั่งน้ำหนักเป็นเครื่องมือวัดที่สำคัญและใช้งานกันอย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรมหลายด้าน โดยเฉพาะในทางการแพทย์ อาหาร และปิโตรเคมี ซึ่งมีความต้องการค่าน้ำหนักที่มีความถูกต้องแม่นยำอย่างสูงเนื่องจากส่งผลกระทบต่อคุณภาพชีวิต และความปลอดภัยของประชาชน เครื่องชั่งน้ำหนักที่นิยมใช้กันเป็นเครื่องชั่งน้ำหนักแบบอิเล็กทรอนิกส์เพราะใช้งานได้สะดวก รวดเร็ว และดูแลรักษาง่าย นอกจากนี้ ยังมีค่าความละเอียดในการอ่านค่าน้ำหนักได้สูง แต่ความถูกต้องแม่นยำของค่าที่อ่านได้จากเครื่องชั่งแบบอิเล็กทรอนิกส์ขึ้นอยู่กับสภาวะแวดล้อมที่เครื่องชั่งติดตั้งอยู่และขณะใช้งานเครื่องชั่ง เช่น ค่าอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์และความดันบรรยากาศของสภาวะแวดล้อมขณะทำการชั่งน้ำหนัก เป็นต้น ดังนั้น ผู้ผลิตเครื่องชั่งจึงได้มีการพัฒนาระบบที่ทำหน้าที่ปรับค่าความถูกต้องของเครื่องชั่งให้เหมาะสมสอดคล้องตามสภาวะแวดล้อมที่เครื่องชั่งใช้งานอยู่ ส่งผลให้ค่าน้ำหนักที่ได้จากการชั่งมีความถูกต้องแม่นยำอยู่ตลอดเวลา ระบบที่ทำหน้าที่นี้ถูกเรียกว่าระบบปรับตั้งเครื่องชั่ง

การปรับตั้งเครื่องชั่ง หมายถึง การปรับให้เครื่องชั่งอ่านค่าน้ำหนักได้ถูกต้องหรือใกล้เคียงค่าน้ำหนักจริงของวัตถุที่นำมาชั่งมากที่สุด โดยให้เครื่องชั่งรับรู้ค่าน้ำหนักที่ถูกต้องและบันทึกลงในหน่วยความจำ ณ ตำแหน่งที่น้ำหนักที่ชั่งมีค่าเป็นศูนย์ ตำแหน่งที่มีค่าน้ำหนักที่ระบุอื่นใดอีกตำแหน่งหนึ่ง ลักษณะกราฟที่เกิดขึ้นจากการปรับตั้งแสดงได้ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ลักษณะกราฟที่เกิดขึ้นจากการปรับตั้ง [1]

เครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ควรได้รับการปรับตั้งในกรณีต่อไปนี้ เช่น เมื่อทำการติดตั้งเครื่องชั่งเป็นครั้งแรก มีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งที่วางเครื่องชั่ง มีการปรับระดับเครื่องชั่งใหม่ หรือสภาวะแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความดันบรรยากาศ มีการเปลี่ยนแปลงไปจากภาวะที่ทำการปรับตั้งในตอนแรก ค่าผิดพลาดจากการชั่งเนื่องจากอุณหภูมิมีชื่อเรียกว่า Temperature

coefficient of the sensitivity (TC) ซึ่งกำหนดให้เป็น การเปลี่ยนแปลงค่าความไว (Sensitivity) ต่อผลต่างของอุณหภูมิ ยกตัวอย่างเช่น เครื่องชั่งที่มีค่า TC สูงสุด $0.0001\%/^{\circ}\text{C}$ หมายความว่าค่าความไว (Sensitivity) ของเครื่องชั่งมีค่าเปลี่ยนไปแค่ 1 ในล้าน เมื่ออุณหภูมิมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลง 1°C [2] นอกจากสาเหตุเนื่องจากอุณหภูมิ แล้วการย้ายเครื่องชั่งจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งก็ส่งผลต่อความถูกต้องน่าเชื่อถือของค่าน้ำหนักเช่นกัน เนื่องจากเครื่องชั่งน้ำหนักไม่ได้วัดค่ามวลของวัตถุแต่จริง ๆ แล้ววัดค่าแรงที่กระทำต่อวัตถุที่นำมาชั่ง แรงกระทำนี้ขึ้นอยู่กับอัตราเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก ณ ตำแหน่งที่ทำการชั่ง ซึ่งอัตราเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกนี้ (โดยประมาณ 9.8 m/s^2) ไม่ได้มีค่าคงที่เท่ากันทั่วโลก แต่ขึ้นอยู่กับตำแหน่ง โดยเฉพาะตำแหน่งละติจูดและความสูงเหนือระดับน้ำทะเล ยกตัวอย่าง เมื่อเครื่องชั่งน้ำหนักถูกเคลื่อนย้ายไปยังตำแหน่งที่สูงกว่าเดิม 1 ชั้น จะมีระยะห่างจากตำแหน่งศูนย์กลางของโลกออกไปอีก 3 เมตร ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\frac{1}{2}$ ในล้านของระยะทางเดิม ค่าอัตราเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงจะมีค่าลดลงไป 1 ในล้านของค่าเดิมเมื่อเปรียบเทียบกับระดับชั้นที่ต่ำกว่า เนื่องจากแรงโน้มถ่วงมีค่าลดลง เป็นอัตราส่วนของระยะทางยกกำลังสอง ถ้าชั่งวัตถุ 200 g ค่าน้ำหนักจะลดลงไป 1 ในล้าน ซึ่งเท่ากับ 0.2 mg ด้วยเหตุผลดังกล่าว จึงควรมีแนวทางแก้ไขผลกระทบอันนี้ การแก้ไขก่อนทำการขนส่งเครื่องชั่งน้ำหนักนั้นเป็นไปได้ เนื่องจากยังไม่ทราบค่าอัตราเร่งโน้มถ่วงที่แท้จริงของตำแหน่งที่จะติดตั้งเครื่องชั่ง แต่ถึงแม้จะทราบค่าแล้วเครื่องชั่งน้ำหนักก็อาจถูกนำไปใช้สำหรับการชั่ง ณ ตำแหน่งเฉพาะ ซึ่งแม้จะเป็นภายในตึกเดียวกันก็ตามแต่คนละชั้น ซึ่งผลกระทบนี้สามารถรับรู้ได้สำหรับเครื่องชั่งน้ำหนักแบบวิเคราะห์ (Analytical balance) ในการแก้ไขสถานการณ์ที่กล่าวมา เครื่องชั่งน้ำหนักถูกติดตั้งอุปกรณ์สำหรับปรับตั้งไว้ซึ่งทำให้สามารถแก้ไขค่าความไว (Sensitivity) หรือ slope ของ Characteristic curve ของเครื่องชั่งน้ำหนักที่มีความต้องการผลการชั่งถูกต้อง ณ ตำแหน่งที่ทำการชั่งน้ำหนักนั้น เมื่อทำการกระตุ้นคำสั่งปรับตั้งของเครื่องชั่งเครื่องชั่งจะทำการชั่งตุ้มน้ำหนักอ้างอิงภายในข้างใต้จานชั่งน้ำหนักด้วยการทำงานของมอเตอร์ ผลจากการทำการปรับตั้งการชั่งน้ำหนักซึ่งเปลี่ยนไปตามสถานที่ ระบบไมโครโปรเซสเซอร์จะทำการคำนวณค่าแฟกเตอร์ (Calibration factor) และเก็บบันทึกค่านี้ไว้จนกระทั่งมีการปรับตั้งใหม่ เมื่อมีค่าแฟกเตอร์นี้แล้วทำให้สามารถตั้งค่าความไว (Sensitivity) ของเครื่องชั่งได้อย่างถูกต้อง ผลการชั่งน้ำหนักภายหลังการปรับตั้งจะมีความสัมพันธ์กับค่าความชัน (Slope) ที่ถูกต้องของ Characteristic curve ดังนั้น วิธีแก้ไขทำได้โดยสอบเทียบเครื่องชั่งทุกครั้งที่มีการย้ายตำแหน่ง และใช้เครื่องชั่งที่มีระบบปรับตั้งเครื่องชั่งแบบอัตโนมัติ [3]

$$\text{Slope} = (\text{Error of indication}/\text{Balance reading})$$

ในการปรับตั้งเครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์นั้น ปัจจุบันพบว่าวิธีทั่วไปที่นิยมใช้ในการปรับตั้งเครื่องชั่งมีด้วยกัน 2 วิธี คือ การปรับตั้งภายใน และการปรับตั้งภายนอก [4]

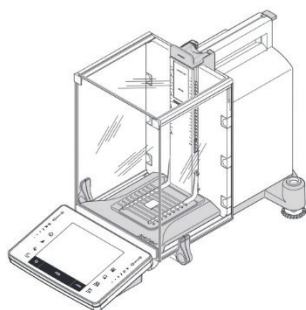
- 1) การปรับตั้งภายใน (Internal calibration) เป็นการปรับตั้งโดยใช้ตุ้มน้ำหนักมาตรฐานที่อยู่ภายในเครื่องชั่งหรือที่เรียกว่า Built-in calibration weight ซึ่งผู้ผลิตจะทำการติดตั้งตุ้มน้ำหนักปรับตั้งไว้ภายในเครื่องชั่ง
- 2) การปรับตั้งภายนอก (External calibration) เป็นการปรับตั้งโดยใช้ตุ้มน้ำหนักมาตรฐานจากภายนอกมาทำการวางบนเครื่องชั่งเพื่อให้เครื่องชั่งจำค่าน้ำหนักแล้วทำการปรับตั้ง ตามปกติจะมีค่าใกล้เคียงกับค่า Capacity ของเครื่องชั่ง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะนำเสนอผลกระทบของระบบปรับตั้งที่มีต่อประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องชั่งน้ำหนักอิเล็กทรอนิกส์ ในงานวิจัยนี้จะทำการสอบเทียบเครื่องชั่งน้ำหนักตัวอย่างที่มีค่าความสามารถสูงสุด 520 กรัม ค่าความละเอียด 0.1 มิลลิกรัม ที่ได้รับการปรับตั้งแตกต่างกัน 2 แบบ ได้แก่ การปรับตั้งด้วยตุ้มน้ำหนักภายใน (Internal built-in weight adjustment system) และการปรับตั้งด้วยตุ้มน้ำหนักภายนอก (External weight adjustment system) ตามวิธีการสอบเทียบ EURAMET cg-18 ซึ่งผลจากการวิจัยนี้ต้องการสร้างความตระหนักให้ผู้ใช้งานเครื่องชั่งสามารถนำผลการสอบเทียบมาวิเคราะห์หาปัญหาที่เกิดจากระบบปรับตั้งพร้อมทั้งแนวทางการแก้ไขปัญหาเบื้องต้น

2. วิธีการวิจัย (Experimental methods)

2.1 ตัวอย่าง

เครื่องชั่งน้ำหนักอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 2 โดยมีคุณลักษณะแสดงในตารางที่ 1



รูปที่ 2 เครื่องชั่งตัวอย่าง [5]

ตารางที่ 1 คุณลักษณะของเครื่องชั่งตัวอย่าง

คุณลักษณะ (Specification)	ค่าที่กำหนดจากผู้ผลิต (Manufacturer value)	หน่วย (Unit)
Maximum capacity	520	g
Readability	0.1	mg
Repeatability (500 g)	0.12	mg
Linearity deviation	0.4	mg
Eccentricity deviation (200 g)	0.4	mg
Sensitivity temperature drift	0.0001	%/°C

2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัยนี้ประกอบด้วย

2.2.1 ตุ้มน้ำหนักมาตรฐานพร้อมใบรับรองการสอบเทียบ สำหรับดำเนินกิจกรรมสอบเทียบเครื่องชั่งซึ่งเป็นชุดตุ้มน้ำหนักมาตรฐาน Class E2 ขนาด 1 g-500 g ดังแสดงในรูปที่ 3

2.2.2 ตุ้มน้ำหนักมาตรฐานสำหรับปรับตั้งเครื่องชั่งด้วยระบบการปรับตั้งแบบใช้ตุ้มน้ำหนักภายนอกเป็นตุ้มน้ำหนักมาตรฐานก่อนเดียว Class E2 ขนาด 500 g พร้อมใบรับรองการสอบเทียบ ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 3 ชุดตุ้มน้ำหนักมาตรฐาน Class E2 ขนาด 1 g-500 g



รูปที่ 4 ตุ้มน้ำหนักปรับตั้ง Class E2 ขนาด 500 g

2.2.3 อุปกรณ์วัดสภาวะแวดล้อมขณะทำการสอบเทียบ ซึ่งสามารถวัดได้ทั้งค่าอุณหภูมิ ความชื้น และความดันบรรยากาศ ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 อุปกรณ์วัดสภาวะแวดล้อม

2.2.4 อุปกรณ์ประกอบสำหรับหยิบจับตุ้มน้ำหนัก และทำความสะอาด เช่น ถุงมือผ้า คีมจับตุ้มน้ำหนัก ที่เป่าลมทำความสะอาด เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 อุปกรณ์ประกอบสำหรับการสอบเทียบ

2.3 สารเคมี

ในงานวิจัยนี้มีการใช้แอลกอฮอล์สำหรับการทำความสะอาดเครื่องชั่งน้ำหนักและบริเวณโดยรอบก่อนดำเนินการสอบเทียบเท่านั้น

2.4 วิธีดำเนินงาน

ในการดำเนินงานวิจัยนี้จะขึ้นตอนการดำเนินงานดังนี้

2.4.1 ทำการสอบเทียบเครื่องชั่งน้ำหนักอิเล็กทรอนิกส์ด้วยวิธีการสอบเทียบตามมาตรฐาน EURAMET cg-18 ใน 3 หัวข้อ ได้แก่ หัวข้อ Repeatability, Error of Indication, Eccentricity และประเมินค่าความไม่แน่นอนสำหรับหัวข้อ Error of Indication [6] โดยทำการสอบเทียบ 2 เงื่อนไข คือ ในกรณีที่เครื่องชั่งน้ำหนักได้รับการปรับตั้งด้วยตุ้มน้ำหนักภายใน และ ในกรณีที่เครื่องชั่งน้ำหนักได้รับการปรับตั้งด้วยตุ้มน้ำหนักภายนอก

2.4.2 ทำการเปรียบเทียบผลการสอบเทียบทั้ง 2 เงื่อนไข โดยนำผลการสอบเทียบในหัวข้อ Error of Indication มาเปรียบเทียบกับสถิติ E_n number [7] ซึ่งเป็นสถิติที่ใช้เปรียบเทียบผลการวัดพร้อมค่าความไม่แน่นอนของข้อมูล 2 ชุด เพื่อพิจารณาความแตกต่างของผลการสอบเทียบทั้ง 2 เงื่อนไข

2.4.3 นำข้อมูลในหัวข้อ Error of Indication มาทำการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักสอบเทียบกับค่าผิดพลาดของเครื่องชั่ง ณ แต่ละค่าน้ำหนักสอบเทียบ เพื่อพิจารณาค่าความไวจากค่าความชันของเส้นกราฟ และ ค่าความผิดพลาดเชิงเส้น ของทั้ง 2 เงื่อนไข

และเปรียบเทียบกับค่าที่กำหนดจากผู้ผลิต

2.4.4 ทำการคำนวณค่าความไม่แน่นอนของการชั่งสำหรับผู้ใช้งานเครื่องชั่งน้ำหนัก และทำการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าดังกล่าวในกรณีที่มีการปรับตั้งด้วยตุ้มน้ำหนักภายใน และการปรับตั้งด้วยตุ้มน้ำหนักภายนอก

3. ผลและวิจารณ์ (Results and discussion)

3.1 ผลการสอบเทียบเครื่องชั่ง

ในหัวข้อนี้จะแสดงผลการสอบเทียบเครื่องชั่งน้ำหนักอิเล็กทรอนิกส์ตามวิธีการ EURAMET cg-18 ของทั้ง 2 เงื่อนไขในตารางที่ 2 ประกอบด้วยหัวข้อ Repeatability, Error of indication และ Eccentricity deviation

เมื่อนำผลการสอบเทียบในตารางที่ 2 ไปเทียบกับค่าที่กำหนดของผู้ผลิตในตารางที่ 1 พบว่าผลการสอบเทียบทั้ง 3 หัวข้อมีค่าไม่เกินค่าที่กำหนดของผู้ผลิต และเมื่อพิจารณาในส่วนของหัวข้อ Repeatability และ Eccentricity deviation ของทั้ง 2 เงื่อนไขพบว่ามีค่าไม่แตกต่างกัน แต่สำหรับหัวข้อ Error of indication ผลการสอบเทียบสำหรับเครื่องชั่งที่ได้รับการปรับตั้งด้วยตุ้มน้ำหนักภายในแสดงแนวโน้มค่าผิดพลาดมากขึ้น เมื่อน้ำหนักสอบเทียบมีค่ามากขึ้น แต่ค่าความไม่แน่นอนของทั้ง 2 เงื่อนไขมีค่าไม่แตกต่างกัน ซึ่งเมื่อพิจารณาเฉพาะค่าผิดพลาดของกรณีปรับตั้งด้วยตุ้มน้ำหนักภายในจะพบว่าเครื่องชั่งตัวอย่างนี้มีค่าผิดพลาดสูงสุดได้ถึง 20 เท่าของค่าความละเอียดเครื่องชั่ง

ตารางที่ 2 ผลการสอบเทียบเครื่องชั่งน้ำหนักตาม EURAMET cg-18 ของทั้ง 2 เงื่อนไข

Repeatability				
Reading (g)	Internal adjustment		External adjustment	
500	0.055 mg		0.055 mg	
Error of indication				
Reading (g)	Internal adjustment		External adjustment	
	Error (g)	Uncertainty at 95% (g)	Error (g)	Uncertainty at 95% (g)
0	0.0000	± 0.000065	0.0000	± 0.000065
50	+ 0.0002	± 0.00011	- 0.0001	± 0.00011
100	+ 0.0002	± 0.00014	- 0.0002	± 0.00013
200	+ 0.0006	± 0.00020	- 0.0002	± 0.00020
250	+ 0.0008	± 0.00026	- 0.0003	± 0.00026

Error of indication				
Reading (g)	Internal adjustment		External adjustment	
	Error (g)	Uncertainty at 95% (g)	Error (g)	Uncertainty at 95% (g)
250	+ 0.0008	± 0.00026	- 0.0003	± 0.00026
300	+ 0.0010	± 0.00030	- 0.0004	± 0.00030
350	+ 0.0011	± 0.00036	- 0.0003	± 0.00036
400	+ 0.0016	± 0.00038	- 0.0003	± 0.00038
450	+ 0.0020	± 0.00043	- 0.0001	± 0.00043
500	+ 0.0024	± 0.00045	0.0000	± 0.00045
Eccentricity deviation				
Reading (g)	Internal adjustment		External adjustment	
200	0.2 mg		0.2 mg	

3.2 ผลการเปรียบเทียบ E_n number

ในหัวข้อนี้จะใช้แนวทางของ ISO/IEC 17043 มาเปรียบเทียบผลการสอบเทียบของทั้ง 2 เงื่อนไข ว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ โดยผลการเปรียบเทียบ

แสดงในตารางที่ 3 ซึ่งจะนำผลการสอบเทียบในหัวข้อ Error of indication พร้อมค่าความไม่แน่นอนมาเปรียบเทียบกับด้วยสถิติ E_n number ตามสมการที่ 1 พร้อมเกณฑ์การตัดสินดังนี้

$$E_n = \frac{X_I - X_E}{\sqrt{U_I^2 + U_E^2}}$$

โดย: X_I = ค่า Error ของเงื่อนไข Internal Adjustment

X_E = ค่า Error ของเงื่อนไข External Adjustment

U_I = ค่าความไม่แน่นอนที่ 95% ของค่า Error ของเงื่อนไข Internal Adjustment

U_E = ค่าความไม่แน่นอนที่ 95% ของค่า Error ของเงื่อนไข External Adjustment

การพิจารณาค่า E_n number เพื่อสรุปผลการเปรียบเทียบ มีหลักเกณฑ์ดังนี้ :

- ผลการเปรียบเทียบผ่านเกณฑ์ ถ้า |E_n| ≤ 1.0 แสดงว่าผลการสอบเทียบไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ
- ผลการเปรียบเทียบไม่ผ่านเกณฑ์ ถ้า |E_n| > 1.0 แสดงว่าผลการสอบเทียบมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

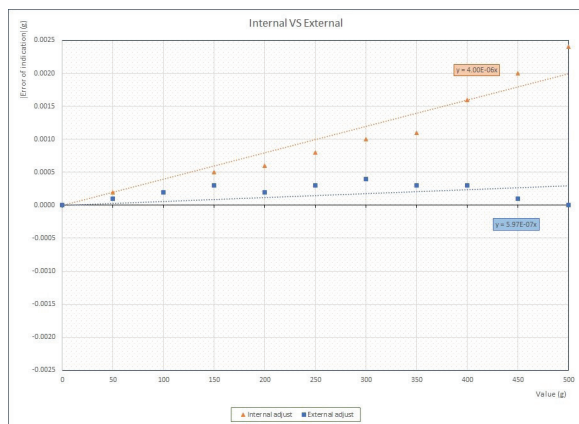
ตารางที่ 3 ผลการเปรียบเทียบ E_n number ระหว่างผลการสอบเทียบของทั้ง 2 เงื่อนไข

Error of indication						
Reading (g)	Internal adjustment		External adjustment		E _n	Result
	Error (g)	Uncertainty at 95% (g)	Error (g)	Uncertainty at 95% (g)		
0	0.0000	± 0.000065	0.0000	± 0.000065	0.00	Pass
50	+ 0.0002	± 0.00011	- 0.0001	± 0.00011	1.93	Fail
100	+ 0.0002	± 0.00014	- 0.0002	± 0.00013	2.09	Fail
150	+ 0.0005	± 0.00019	- 0.0003	± 0.00019	2.98	Fail
200	+ 0.0006	± 0.00020	- 0.0002	± 0.00020	2.83	Fail
250	+ 0.0008	± 0.00026	- 0.0003	± 0.00026	2.99	Fail
300	+ 0.0010	± 0.00030	- 0.0004	± 0.00030	3.30	Fail
350	+ 0.0011	± 0.00036	- 0.0003	± 0.00036	2.75	Fail
400	+ 0.0016	± 0.00038	- 0.0003	± 0.00038	3.54	Fail
450	+ 0.0020	± 0.00043	- 0.0001	± 0.00043	3.45	Fail
500	+ 0.0024	± 0.00045	0.0000	± 0.00045	3.77	Fail

จากผลการเปรียบเทียบ E_n number ในตารางที่ 3 พบว่าผลการสอบเทียบของทั้ง 2 เจือ้นไขมีค่าแตกต่างกัน ซึ่งเมื่อพิจารณาจากข้อมูลในตาราง พบว่า ค่าความไม่แน่นอนของทั้ง 2 เจือ้นไขมีค่าไม่แตกต่างกัน ดังนั้น สาเหตุที่ทำให้ผลการสอบเทียบของทั้ง 2 เจือ้นไขแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญมาจากค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้น ซึ่งในกรณีปรับตั้งด้วยตุ้มน้ำหนักภายในค่าผิดพลาดจะมีค่าเพิ่มขึ้นสัมพันธ์กับค่าน้ำหนักสอบเทียบ

3.3 เส้นกราฟความเป็นเชิงเส้น

เมื่อนำข้อมูลในหัวข้อ Error of indication มาทำการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักสอบเทียบกับค่าสัมบูรณ์ของค่าผิดพลาดของเครื่องชั่ง ณ แต่ละค่าน้ำหนักสอบเทียบของทั้ง 2 เจือ้นไข และทำการสร้างกราฟความสัมพันธ์เชิงเส้นเพื่อพิจารณาความไวจากค่าความชันของเส้นกราฟ และ ค่าความผิดพลาดเชิงเส้น ของทั้ง 2 เจือ้นไข จะได้กราฟความสัมพันธ์ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักสอบเทียบกับค่าสัมบูรณ์ของค่าผิดพลาดของเครื่องชั่ง ณ แต่ละค่าน้ำหนักสอบเทียบในกรณีปรับตั้งเครื่องชั่งทั้ง 2 เจือ้นไข

จากรูปกราฟความสัมพันธ์ในรูปที่ 7 สามารถหาค่าความไวจากความชันของเส้นกราฟและค่าความผิดพลาดเชิงเส้นเทียบกับค่าที่กำหนดของผู้ผลิตได้ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ค่าความไวและความผิดพลาดเชิงเส้นของเครื่องชั่งทั้ง 2 เจือ้นไข

Parameters	Internal adjustment	External adjustment
Sensitivity	4.00×10^{-3} mg	5.97×10^{-4} mg
Linearity deviation	0.4 mg	0.3 mg

จากข้อมูลในตารางที่ 4 พบว่าค่าความไว (Sensitivity) ของเครื่องชั่งซึ่งพิจารณาจากค่าความชัน (Slope) ของเส้นกราฟของเครื่องชั่งที่ได้รับการปรับตั้งด้วยตุ้มน้ำหนักภายในนอกมีค่าลดลงจากการปรับตั้งด้วยตุ้มน้ำหนักภายใน จากค่า 4.00×10^{-3} เป็น 5.97×10^{-4} ซึ่งค่าความไว (Sensitivity) นี้เป็นค่าที่ผู้ใช้งานเครื่องชั่งสามารถพิจารณาความผิดปกติของระบบปรับตั้งได้ โดยเส้นกราฟที่มีค่าความชัน (Slope) มากขึ้นบ่งบอกถึงความผิดปกติของระบบปรับตั้งที่มากขึ้นเช่นกัน ส่วนค่าความผิดพลาดเชิงเส้น (Linearity deviation) ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความผิดปกติของระบบการรับน้ำหนักของเครื่องชั่งของทั้ง 2 เจือ้นไขมีค่าต่างกันแต่เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่กำหนดจากผู้ผลิต 0.4 mg พบว่ามีค่าไม่เกินเกณฑ์ที่กำหนด ดังนั้น เครื่องชั่งเครื่องนี้ได้รับผลกระทบหลักมาจากระบบปรับตั้งที่ผิดพลาด

3.4 ค่าความไม่แน่นอนของผลการชั่งน้ำหนัก

เอกสาร EURAMET cg-18 ซึ่งเป็นวิธีการสอบเทียบเครื่องชั่งน้ำหนักวิธีหนึ่งมีความแตกต่างจากวิธีการสอบเทียบเครื่องชั่งวิธีอื่น ๆ ที่นิยมใช้กัน ในส่วนของข้อมูลเพิ่มเติมสำหรับผู้ใช้งานเครื่องชั่งที่สามารถนำไปพิจารณาค่าผิดพลาดจากการชั่งน้ำหนัก (Error of indication) ค่าความไม่แน่นอนของการชั่งที่ความเชื่อมั่น 95% ในกรณีที่มีการใช้ค่าปรับแก้จากผลการสอบเทียบ (Uncertainty of weighing results: In case of using the correction value) และ ค่าความไม่แน่นอนของการชั่งที่ความเชื่อมั่น 95% ในกรณีที่ไม่มีการใช้ค่าปรับแก้จากผลการสอบเทียบ (Uncertainty of weighing results: In case of not using the correction value) ได้ โดยผู้ใช้งานเครื่องชั่งควรนำข้อมูลเหล่านี้ไปใช้พิจารณาเทียบกับเกณฑ์การยอมรับได้ของงานเพื่อพิจารณาว่าเครื่องชั่งยังคงมีความเหมาะสมกับการนำไปใช้งาน ต่อหรือไม่ สำหรับข้อมูลเพิ่มเติมของเครื่องชั่งตัวอย่างได้แสดงไว้ในตารางที่ 5 ในกรณีที่เครื่องชั่งได้รับการปรับตั้งด้วยตุ้มน้ำหนักภายใน และการปรับตั้งด้วยตุ้มน้ำหนักภายนอก

ตารางที่ 5 ข้อมูลเพิ่มเติมสำหรับผู้ใช้งานเครื่องชั่งน้ำหนักของทั้ง 2 เองโซ

Additional information		
Parameters	Internal adjustment	External adjustment
Error of an indication (g)	$3.6 \times 10^{-6} R$	$-8.8 \times 10^{-7} R$
Uncertainty of weighing results: In case of using the correction value at 95% (g)	$1.4 \times 10^{-4} + 5.8 \times 10^{-6} R$	$1.4 \times 10^{-4} + 3.5 \times 10^{-6} R$
Uncertainty of weighing results: In case of not using the correction value at 95% (g)	$1.4 \times 10^{-4} + 9.4 \times 10^{-6} R$	$1.4 \times 10^{-4} + 4.4 \times 10^{-6} R$

หมายเหตุ : R เป็นตัวแปรอิสระแทนค่าด้วยค่าน้ำหนักที่อ่านได้จากการชั่งน้ำหนัก

จากข้อมูลในตารางที่ 5 สมมุติว่าเครื่องชั่งตัวอย่างไปชั่งของแล้วค่าที่อ่านได้จากการชั่งน้ำหนัก (R) มีค่า 25.0000 g เมื่อนำค่าดังกล่าวไปแทนค่าในสมการดังกล่าวในตารางที่ 5 จะได้ข้อมูลดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ข้อมูลเพิ่มเติมสำหรับผู้ใช้งานเครื่องชั่งน้ำหนักของทั้ง 2 เองโซ ที่ R = 25.0000 g

Additional information		
Parameters	Internal adjustment	External adjustment
Error of an indication (mg)	0.090	-0.022
Uncertainty of weighing results: In case of using the correction value at 95% (mg)	± 0.29	± 0.23
Uncertainty of weighing results: In case of not using the correction value at 95% (mg)	± 0.38	± 0.25

จากข้อมูลในตารางที่ 6 พบว่า ค่าผิดพลาดจากการชั่งน้ำหนัก (Error of indication) ค่าความไม่แน่นอนของการชั่งที่ความเชื่อมั่น 95% ในกรณีที่มีการใช้ค่าปรับแก้จากผลการสอบเทียบ (Uncertainty of weighing results: In case of using the correction value) และ ค่าความไม่แน่นอนของการชั่งที่ความเชื่อมั่น 95% ในกรณีที่ไม่มีการใช้ค่าปรับแก้จากผลการสอบเทียบ (Uncertainty of weighing results: In case of not using the correction value) ในกรณีที่มีการปรับตั้งด้วยค่าน้ำหนักภายนอกมีค่าลดลงกว่าในกรณีที่มีการปรับตั้งด้วยค่าน้ำหนักภายใน

4. สรุป (Conclusion)

จากผลการทดลองนี้พบว่า ระบบปรับตั้งด้วยค่าน้ำหนักภายในของเครื่องชั่งตัวอย่างมีความผิดปกติ ซึ่งผู้ใช้งานเครื่องชั่งสามารถตรวจสอบความผิดพลาดของระบบปรับตั้งดังกล่าวได้จากการนำข้อมูลในหัวข้อ Error of indication มาสร้างกราฟความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างค่าน้ำหนักสอบเทียบกับค่าผิดพลาด และพิจารณาจากค่าความชันของเส้นตรง หากเส้นกราฟมีค่าความชันมากแสดงว่าระบบปรับตั้งเครื่องชั่งมีความผิดปกติมากเช่นกัน ซึ่งผู้ใช้งานเครื่องชั่งควรติดต่อให้ผู้ผลิตมาดำเนินการแก้ไขปรับแก้ค่าในระบบดังกล่าว แต่ในระหว่างรอผู้ผลิตมาดำเนินการแก้ไข ผู้ใช้งานเครื่องชั่งสามารถแก้ปัญหาเบื้องต้นได้โดยการเปลี่ยนไปใช้ระบบปรับตั้งด้วยค่าน้ำหนักภายนอก ในกรณีที่เครื่องชั่งมีระบบดังกล่าวในเอกสารคู่มือการใช้งานของผู้ผลิตจะมีการระบุขนาดและ class ที่เหมาะสมสำหรับค่าน้ำหนักที่นำมาใช้ปรับตั้งเครื่องชั่ง ในงานวิจัยนี้พบว่า เมื่อเปลี่ยนการปรับตั้งเครื่องชั่งจากการใช้ค่าน้ำหนักภายในมาเป็นการใช้ค่าน้ำหนักภายนอก พบว่า เส้นกราฟมีค่าความชันลดลงอย่างมาก และเมื่อทำการเปรียบเทียบผลการสอบเทียบเครื่องชั่งของทั้ง 2 เองโซ ด้วยสถิติ E_n number พบว่ามีค่ามากกว่า 1 แสดงว่าผลการสอบเทียบของทั้ง 2 เองโซ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อคำนวณค่าผิดพลาดจากการชั่งน้ำหนัก (Error of indication) ค่าความไม่แน่นอนของการชั่งที่ความเชื่อมั่น 95% ในกรณีที่มีการใช้ค่าปรับแก้จากผลการสอบเทียบ (Uncertainty of weighing results: In case of using the correction value) และ ค่าความไม่แน่นอนของการชั่งที่ความเชื่อมั่น 95% ในกรณีที่ไม่มีการใช้ค่าปรับแก้จากผลการสอบเทียบ (Uncertainty of weighing results: In case of not using the correction value) ในส่วนของผู้ใช้งานเครื่องชั่ง พบว่า ค่าผิดพลาดจากการชั่งน้ำหนัก (Error of indication) มีค่าลดลงเมื่อทำการปรับตั้งเครื่องชั่งด้วยค่าน้ำหนักภายนอก ทำให้เครื่องชั่งมีโอกาสผ่านเกณฑ์การใช้งานที่ผู้ใช้งานเครื่องชั่งกำหนดได้มากขึ้น

5. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณกรมวิทยาศาสตร์บริการที่ให้ความรู้และประสบการณ์ในการทำงาน ตลอดจนคณะครูอาจารย์ วิทยาลัยที่ประกอบในการดำเนินงานวิจัย รวมทั้งเจ้าหน้าที่กลุ่มสอบเทียบที่ให้คำแนะนำในการวิเคราะห์ผลการวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] จิตตกานต์ อินทรีย์. การปรับตั้งเครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ (ตอนที่ 1). *UP DATE สมท.สาร.* 11(1) มกราคม-มีนาคม 2549, 13-16.
- [2] SCORER, T., M. PERKIN, and M. BUCKLEY. *Measurement Good Practice Guide No.70 : Weighing in the pharmaceutical industry.* Middlesex : NPL, 2004, pp.15-16.
- [3] INTIANG, J., W. SIRICHOTE, and S. BOONSANIT. Development of automatic calibration system for electronic balances. *Bulletin of Applied Science* . 8(8) 2019, 40-47.
- [4] EDWIN, C. M. and K.M.K. FEN. *The Calibration of weights and balances.* Sydney : CSIRO, 2003. pp. 47-48.
- [5] METTLER-TOLEDO. *User manual analytical balances XPE models (11/2016)* [online]. Available from: https://www.mt.com/dam/P5/labtec/02_Analytical_Balances/01_XPE/Documents/06_Quick_Guides/QG_XPE_Analytical_EN.pdf. [viewed 2021-11-10].
- [6] EURAMET. Calibration Guide No. 18. *Guidelines on the calibration of non-automatic weighing instruments. version 4.0 (11/2015)* [online]. Available from: https://iris.inrim.it/retrieve/handle/11696/72070/50133/I-CAL-GUI-018_Calibration_Guide_No._18_web.pdf. [viewed 2021-11-10].
- [7] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION AND INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (ISO/IEC). ISO/IEC 17043:2010(E). *Conformity assessment-General requirements for proficiency testing.* Geneva, Switzerland : ISO, 2010.

สมบัติการป้องกันรังสียูวีของกระดาษหัตถกรรมปอสา

UV-Protection property of mulberry craft paper

ธิตารินีย์ สุโรพันธ์^{1*}, กอพงค์ หงษ์ศรี^{1**}
Thitarinee Suropan^{1*}, Korpong Hongsri^{1**}

รับบทความ: 18 กุมภาพันธ์ 2565 แก้ไขบทความ: 13 พฤษภาคม 2565 ยอมรับตีพิมพ์: 19 กรกฎาคม 2565

11

บทคัดย่อ

รังสียูวีจากแสงแดดสามารถทำอันตรายต่อผิวหนังของมนุษย์งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นในการศึกษาให้ทราบถึงสมบัติการป้องกันรังสียูวีของกระดาษหัตถกรรมปอสา เพื่อนำไปใช้ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ป้องกันรังสียูวีจากกระดาษหัตถกรรมปอสา การตรวจสอบการป้องกันรังสียูวีของกระดาษหัตถกรรมปอสาซึ่งทำโดยการทดสอบการส่องผ่าน และการดูดกลืนรังสียูวีที่มีความยาวคลื่น 280-400 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer พบว่า กระดาษหัตถกรรมปอสา น้ำหนักมาตรฐาน 25 50 และ 100 แกรม มีการส่องผ่านรังสียูวีอยู่ที่ร้อยละ 12.17 3.11 และ 0.41 การดูดกลืนรังสียูวีอยู่ที่ร้อยละ 1.87 2.10 และ 2.86 ตามลำดับ หลังจากการเคลือบกระดาษหัตถกรรมปอสา น้ำหนักมาตรฐาน 25 และ 50 แกรม ด้วยทาลคัม อลูมิเนียม และทองแดงออกไซด์ พบว่า กระดาษมีความหนาเพิ่มขึ้น 80-90 ไมโครเมตร การส่องผ่านรังสียูวีลดลง และมีการดูดกลืนรังสียูวีเพิ่มขึ้นเป็นประมาณร้อยละ 3 ถึงแม้การเคลือบจะช่วยปรับปรุงค่าความทึบแสงของกระดาษให้สูงขึ้น ความพรุนของกระดาษลดลง และความสามารถในการป้องกันรังสียูวีของกระดาษเพิ่มขึ้น แต่จะเห็นได้ว่า ผลจากการทดลองความสามารถในการป้องกันรังสียูวีนั้นขึ้นอยู่กับสมบัติด้านโครงสร้างของกระดาษหัตถกรรมปอสาเป็นหลัก นั่นคือ ความหนา โดยความหนาที่เพิ่มขึ้นจากน้ำหนักมาตรฐานที่เพิ่มขึ้นในกรณีของกระดาษไม่เคลือบผิว และความหนาที่เพิ่มขึ้นจากชั้นของสารเคลือบในกรณีของกระดาษที่ผ่านการเคลือบผิวสามารถช่วยลดการส่องผ่านของรังสียูวีได้ ทำให้ความสามารถในการป้องกันรังสียูวีของกระดาษหัตถกรรมปอสาเพิ่มขึ้น

Abstract

The UV is harmful to human skins. The research was thus aimed to study the UV-protection property of mulberry craft paper to use in the development of UV protection products from mulberry craft paper. The investigation of the UV protection of mulberry craft paper was done by measuring the UV transmittance and UV absorbance using UV-VIS spectrophotometer with the wavelength of 280-400 nm. It was found that the mulberry craft paper with the grammage of 25 gsm., 50 gsm. and 100 gsm. has UV transmittance of 12.17 % 3.11% and 0.41%, respectively and UV absorbance of 1.87% 2.10 % and 2.86%, correspondingly. After the mulberry craft papers with the grammage of 25 gsm. and 50 gsm. were coated with Talcum, Aluminum and Copper oxide, it was found that thickness was increased by 80-90 μ m. UV transmittance was reduced and UV absorbance was increased by about 3%. Although the coating of mulberry craft paper made paper opacity higher, paper porosity lower and UV protection ability improved. The UV protection ability was more related to structural properties of mulberry craft paper which is thickness. The thickness which was increased by higher grammage for the case of uncoated paper and by coating layer for the case of coated paper could reduce UV absorbance and increase UV protection ability of the mulberry craft paper.

คำสำคัญ: กระดาษ กระดาษหัตถกรรม การป้องกันรังสียูวี รังสียูวี

Keywords: Paper, Handicraft paper, UV-protection, UV radiation

¹กรมวิทยาศาสตร์บริการ

* e-mail address: thitarinee@dss.go.th

**Corresponding author e-mail address: korpong@dss.go.th

1. บทนำ (Introduction)

ทุกคนสามารถสัมผัสกับรังสีจากทั้งแสงอาทิตย์ และจากแหล่งรังสีเทียมที่ใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น การพาณิชย์ อุตสาหกรรมบันเทิง ซึ่งผลกระทบจากรังสีที่มีต่อมนุษย์ที่เห็นได้อย่างชัดเจนคือ ผลกระทบที่มีต่อผิวหนัง และสุขภาพตาจากรังสี UV-A ที่มีความยาวคลื่นในช่วง 315-400 นาโนเมตร และ UV-B ที่มีความยาวคลื่นในช่วง 280-315 นาโนเมตร [1] ประเทศไทยอยู่ในเขตร้อน มีสภาพอากาศร้อน แดดจัด มีความเข้มแสงสูง และมีดัชนีรังสียูวี (Ultraviolet index : UVI) อยู่ในช่วง 8-12 ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่สูง โดยค่า UVI ที่สูงขึ้นบ่งบอกถึงระดับอันตรายที่เพิ่มมากขึ้นของรังสียูวีที่มีต่อร่างกาย หากมีค่า UVI มากกว่า 3 ทางกรมแพทย์แนะนำให้จำเป็นต้องสวมใส่อุปกรณ์เพื่อป้องกันรังสียูวีเมื่อต้องสัมผัสกับแสงแดดเสมอ [2] ในช่วงเวลาที่ผ่านมา มีงานวิจัยจำนวนมากที่พยายามคิดค้นวิธีเพื่อลดการสัมผัสรังสียูวี เช่น ผลิตภัณฑ์กันแดด ครีมกันแดด ด้วยวัสดุการผลิตต่าง ๆ รวมถึงได้มีการนำโลหะ (Metallics) และโลหะออกไซด์ (Metallic oxides) มาใช้เป็นวัสดุที่ช่วยดูดซับความร้อนและรังสียูวีซึ่งมีกลไกในการช่วยดูดซับความร้อนและรังสียูวีไว้บางส่วนแล้วสะท้อนออก โลหะส่วนใหญ่ที่นำมาใช้ได้แก่ สังกะสี เงิน อลูมิเนียม อลูมิเนียมออกไซด์ และทองแดง เป็นต้น โดยมีการนำมาใช้ในอุตสาหกรรมกระจกรถยนต์ กระจกบ้าน ฉนวนกันความร้อน กระจกหน้าต่าง และในอุตสาหกรรมสิ่งทอโดยการนำโลหะมาทอเป็นเส้นใยโลหะ (Metallic yarns) และใช้ฉาบลงบนผ้า รวมถึงเครื่องสำอางและครีมกันแดด ก็มีส่วนผสมของโลหะเพื่อช่วยในการป้องกันความร้อนและรังสียูวี

งานวิจัยและข้อมูลเกี่ยวกับการป้องกันรังสียูวีในกระดาดยังมีน้อย ซึ่งแตกต่างกับอุตสาหกรรมสิ่งทอที่มีการทำวิจัยในเรื่องดังกล่าวอย่างแพร่หลาย รวมถึงมีมาตรฐานสากลในการทดสอบ และมีการกำหนดค่าความสามารถในการป้องกันรังสีอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet protection factor : UPF) ของวัสดุสิ่งทอ โดยบอกเป็นอัตราส่วนของปริมาณรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่สัมผัสผิวเมื่อมีผ้าป้องกันอยู่ต่อปริมาณรังสีที่สัมผัสผิวเมื่อไม่มีผ้า โดยทั่วไปค่า UPF จะอยู่ในช่วง 30-50 สิ่งทอที่มีค่า UPF เท่ากับ 50 นั้นจะยอมให้รังสีอัลตราไวโอเล็ตเพียงแค่ 1 ใน 50 ส่วนของรังสีที่ตกกระทบพื้นผิววัสดุผ่านทะลุได้ ซึ่งหมายความว่าสามารถป้องกันรังสีอัลตราไวโอเล็ตได้ถึง 98% [3] จากข้อมูลการวิเคราะห์ผ้าจากร่มรังสียูวีด้วยเทคนิค EDS ที่สามารถบอกชนิดของธาตุซึ่งเป็นองค์ประกอบของวัสดุ พบไทเทเนียม ทองแดง ในปริมาณเล็กน้อย ซิลิคอนปริมาณปานกลาง และอะลูมิเนียมในปริมาณมาก อะลูมิเนียมเป็นสารสีอะลูมิเนียม (Aluminum pigment) ซึ่งมักอยู่ในรูปของเกล็ดอะลูมิเนียม (Aluminum flake) เป็นตัวช่วยในการสะท้อนแสง รังสียูวี และรังสี

อินฟราเรด โดยอะลูมิเนียมสามารถสะท้อนคลื่นความยาว 2,400-4,000 อังสตรอม (บางส่วนของรังสียูวี) ได้ประมาณ 30-50% [4] GHANE และ GHORBANI [5] ได้ทำการศึกษาหาเทคนิคในกระบวนการผลิตผ้าที่สามารถป้องกันรังสียูวีได้สูงขึ้น มีการใช้เส้นด้ายโลหะ (Metallic yarn) คือ ทองแดง และอะลูมิเนียมมาใช้เป็นเส้นพุ่ง (Weft yarn) ที่ทอขัดในแนวตั้งฉาก ทอผสมกับไนลอน ผ้า และโพลีเอสเตอร์ในกระบวนการทอพบว่า ผ้าที่ทอผสมด้วยด้ายทองแดงให้ค่า UPF สูงกว่าผ้าที่ทอผสมด้วยด้ายอะลูมิเนียมเนื่องจากทองแดงมีค่าสัมประสิทธิ์ความสามารถในการปลดปล่อยสูง สามารถดูดซับคลื่นแม่เหล็กได้มาก ทำให้ค่าการส่องผ่านลดลง และปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการป้องกันรังสียูวีของสิ่งทอขึ้นอยู่กับโครงสร้างของสิ่งทอ ความหนา ความหนาแน่น รูปทรง ทิศทางการเรียงตัวของเส้นใยในการทอ รวมถึงวัสดุพอกขาว และวัสดุช่วยดูดซับรังสียูวีอื่น ๆ สิ่งทอหรือผ้ากับกระดาดนั้นมีความใกล้เคียงกันในเรื่องของการนำเส้นใยมาใช้เป็นวัสดุในการผลิตมีโครงสร้างที่เกิดจากการสานกันของเส้นใย และมีลักษณะเป็นแผ่นราบ หรือเป็นผืนแผ่นคล้ายกัน ดังนั้น ปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการป้องกันรังสียูวีของกระดาดคาดว่าจะมีแนวโน้มของปัจจัยที่คล้ายกันกับสิ่งทอ งานวิจัยนี้จึงมีความสนใจในเรื่องการตรวจสอบสมบัติการป้องกันรังสียูวีของกระดาดชนิดถดถดกรรมปอสา เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการนำไปใช้ต่อยอดและวิจัยพัฒนาการผลิตแผ่นกระดาดป้องกันรังสียูวี ผลิตภัณฑ์ป้องกันรังสียูวีจากกระดาดชนิดถดถดกรรม เช่น ม่านบังแสงแดดในรถยนต์ หมวก ฉากกันแสง เป็นต้น

สมบัติเชิงแสง (Optical properties) ของกระดาดนั้นเมื่อมีแสงตกกระทบกระดาดสิ่งที่เกิดขึ้นคือ การสะท้อน ส่องผ่าน การกระเจิง การดูดกลืน ซึ่งปรากฏการณ์ต่าง ๆ เหล่านี้ของแสงที่มีต่อวัตถุและการตอบสนองของผลต่อสมบัติเชิงแสงของกระดาด เส้นใยเซลลูโลสที่ไม่มีสี และจากภาพหน้าตัดกระดาดในรูปที่ 1 จะเห็นเส้นใยเซลลูโลสที่สานกันอยู่ แต่ครั้งที่แสงตกกระทบเส้นใยเซลลูโลส แสงบางส่วนจะสะท้อนจากพื้นผิวของเส้นใยและบางส่วนจะส่องผ่านเส้นใยโปร่งแสง รวมถึงหักเหเมื่อกระทบกับเส้นใยเส้นอื่น ๆ ทิศทางของแสงจึงมีการเปลี่ยนแปลงจากเส้นใยหนึ่งเกิดการสะท้อนและเปลี่ยนทิศทาง มีการเปลี่ยนแปลงที่เกิดจากการสะท้อนและหักเหภายในชั้นเส้นใยกระดาด ส่งผลให้แสงกระเจิงไปทุกทิศทาง นอกจากนี้โดยทั่วไปแล้วเยื่อกระดาดไม่ได้ประกอบไปด้วยเซลลูโลสเพียงอย่างเดียว ยังมีสารแทรก ลิกนิน ลิงสกปรก รวมถึงสารเติมแต่งที่ใส่เข้าไปในกระบวนการผลิตกระดาด ทำให้เกิดการดูดกลืนแสงขึ้นเมื่อแสงกระทบกับวัตถุที่ไม่โปร่งแสงหรือสีอื่น ๆ ในแผ่นกระดาด แสงจะถูกดูดกลืน คายความร้อน และสะท้อนออกไป [6] ดังแสดงในรูปที่ 1 ในอุตสาหกรรมกระดาดนิยมนำสารเติมแต่งมาใช้ในการผลิตกระดาด ได้แก่

ปูนขาว ดินขาว ทัลคัม ไททาเนียมไดออกไซด์ เป็นต้น เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงแสงของกระดาษ คือ ความขาว ความขาวสว่าง และความทึบแสง VIPUL และ NISHI [7] ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของทัลคัมในการทำกระดาษ พบว่าการลดระดับขนาดอนุภาคของผงทัลคัมจะช่วยปรับปรุงสมบัติการกระเจิงแสงของกระดาษ ซึ่งจะทำให้การส่องแสงผ่านกระดาษเป็นไปได้อย่างดีขึ้นด้วย



รูปที่ 1 การตกกระทบของแสงบนกระดาษ [6]

การทดสอบการป้องกันรังสียูวีทดสอบด้วยเครื่อง UV/VIS Spectrophotometer ซึ่งตรวจวัดปริมาณแสงและค่าความเข้ม (Intensity) ในช่วงรังสียูวีและช่วงแสงขาวที่ทะลุผ่านหรือถูกดูดกลืนโดยตัวอย่างที่วางอยู่ในเครื่องมือ โดยที่ความยาวคลื่นแสงจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณและชนิดของสารที่อยู่ในตัวอย่าง เมื่อโมเลกุลของตัวอย่างถูกฉายด้วยแสงในช่วงรังสียูวีหรือแสงขาวที่มีพลังงานเหมาะสมจะทำให้เกิดการดูดกลืนแสงในอะตอมดูดกลืนแสงแล้วเปลี่ยนสถานะไปอยู่ในชั้นที่มีระดับพลังงานสูงกว่า เมื่อทำการวัดปริมาณของแสงที่ส่องผ่านหรือสะท้อนมาจากตัวอย่างเทียบกับแสงจากแหล่งกำเนิดที่ความยาวคลื่นค่าต่าง ๆ ตามกฎของ Beer-Lambert ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ของสารจะแปรผันกับจำนวนโมเลกุลที่มีการดูดกลืนแสง [8] งานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะศึกษาการดูดกลืนและการส่องผ่านรังสียูวีในกระดาษหัตถกรรมปอสา ซึ่งการผลิตเยื่อกระบวนการหัตถกรรมเป็นการต้มด้วยสารละลายโซเดียม

ไฮดรอกไซด์ (NaOH) แบบระบบเปิด จึงทำให้เส้นใยมีการแยกออกจากกันไม่สมบูรณ์เท่ากับกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษในภาคอุตสาหกรรม ส่งผลให้เยื่อหรือเส้นใยปอสามีความยาว และยังคงหลงเหลือมัดเส้นใยปะปนอยู่ รวมถึงปอสานั้นมีผนังเซลล์ของเส้นใยที่หนา เมื่อนำมาขึ้นแผ่นกระดาษด้วยวิธีหัตถกรรม ซึ่งไม่ผ่านการรีดน้ำหรืออัดกระดาษให้แน่น จึงทำให้มีช่องว่างระหว่างเส้นใยขนาดใหญ่ แผ่นกระดาษหัตถกรรมจึงมีลักษณะฟุ้ง หรือความแน่นหนาปรากฏ (Appearance density) ต่ำ และมีความพรุนสูง [9] ซึ่งอาจส่งผลต่อปริมาณการส่องผ่านของรังสียูวีได้ ดังนั้น การเคลือบผิวกระดาษหัตถกรรมปอสาจึงมีจุดประสงค์เพื่อปรับปรุงสมบัติด้านโครงสร้างกระดาษ ได้แก่ ความหนา ลักษณะโดยรวมของแผ่นกระดาษ ลักษณะโครงสร้างขนาดเล็ก บนพื้นผิว เช่น ขนาดของรูพรุน ความลึกของรูพรุน และการกระจายตัวของรูพรุน สำหรับการผสมโลหะ และสารเติมแต่งลงในสารเคลือบนี้เพื่อใช้เป็นวัสดุที่ช่วยดูดซับความร้อนและดูดกลืนรังสียูวี โดยใช้ผงทัลคัม ผงอลูมิเนียม และทองแดงออกไซด์ เป็นต้น

2. วิธีการวิจัย (Experimental methods)

งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการวิจัยในเดือนตุลาคม 2563-มิถุนายน 2564 ณ ห้องปฏิบัติการเส้นใยธรรมชาติ กลุ่มงานเส้นใยธรรมชาติ กองวัสดุวิศวกรรม กรมวิทยาศาสตร์บริการ โดยได้แบ่งการทำงานเป็น 3 ส่วน ดังนี้ 1. การเตรียมตัวอย่าง ได้แก่ การเตรียมกระดาษหัตถกรรมปอสา น้ำหนักมาตรฐาน 25 50 และ 100 แกรม การเตรียมสารเคลือบทัลคัม สารเคลือบอลูมิเนียม และสารเคลือบทองแดงออกไซด์ และการเคลือบกระดาษด้วยสารเคลือบ 2. การทดสอบสมบัติกระดาษหัตถกรรมปอสา ก่อนเคลือบและหลังเคลือบ 3. การรวบรวมข้อมูลและเปรียบเทียบผล ดังกรอบแนวคิดสำหรับงานวิจัยที่แสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 กรอบแนวคิดสำหรับงานวิจัย

2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้

- เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง (Analytical balance) รุ่น Type AC2105 บริษัท Sartorius
- เครื่องทดสอบความทึบแสง (Opacity tester) รุ่น CTH-ISO บริษัท Technidyne
- เครื่องทดสอบความพรุน (Porosity tester) H.E. Gurley บริษัท Messmer
- เครื่องทดสอบความหนาของกระดาษ (Thickness tester) รุ่น 49-s6-10-0003 บริษัท Technidyne
- เครื่องวัดรังสียูวี (UV-VIS Spectrophotometer) รุ่น Specord 250 บริษัท Analytik jena
- เครื่องกวนสารละลายแบบใบพัด รุ่น E284 บริษัท Electro-Craft® Servo
- เตาให้ความร้อน (Hot plate) รุ่น SP131320-33 บริษัท Barnstead Thermolyne

2.2 สารเคมีและวัสดุ

- ผงทัลคัม (Talcum powder) บริษัท SARKOTET เกรดทั่วไป
- ผงอลูมิเนียม (Aluminium metal fine powder) บริษัท HIMEDIA เกรดทั่วไป
- ผงทองแดงออกไซด์ (Copper oxide powder) 98% ขนาด < 10 μm บริษัท SIGMA-ALDRICH เกรดทั่วไป
- เยื่อปอสาฟอกขาว สำหรับการผลิตกระดาษหัตถกรรม จากฟาร์มกระดาษสา

2.3 วิธีดำเนินงาน

2.3.1 การเตรียมตัวอย่าง

1) การเตรียมกระดาษหัตถกรรมปอสา

นำเยื่อปอสาฟอกขาว ความชื้นร้อยละ 80 กระจายด้วยเครื่องกระจายเยื่อ นำไปขึ้นแผ่นด้วยตะแกรงขึ้นแผ่นแบบหัตถกรรม โดยให้น้ำหนักมาตรฐาน 25 50 และ 100 แกรม

2) การเตรียมสารเคลือบ

นำสารเคลือบหรือตัวยึดติด (Binder) ที่เตรียมไว้ซึ่งประกอบด้วย โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (Poly vinyl alcohol) แป้งประจุบวก (Modified Starch) กลีเซอรอล (Glycerol) และคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Sodium carboxymethyl cellulose) ในปริมาณ 1,000 มิลลิตร ผสมกับอลูมิเนียม 10% ทองแดงออกไซด์ 10% และผงทัลคัม 10% ใช้ใบพัดผสมจนให้เข้ากันเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จะได้สารเคลือบดังแสดงในรูปที่ 3



(ก)



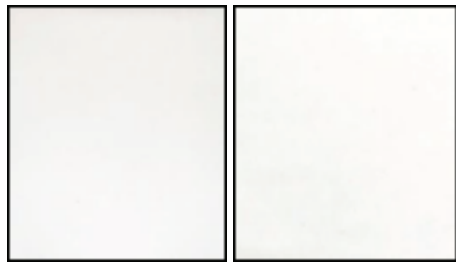
(ข)



(ค)

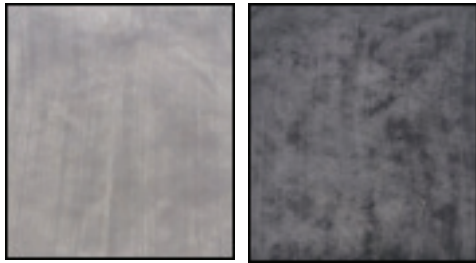
รูปที่ 3 (ก) สารเคลือบผสมอลูมิเนียม 10% (ข) สารเคลือบผสมทองแดงออกไซด์ 10% และ (ค) สารเคลือบผสมทัลคัม 10%

นำสารเคลือบอลูมิเนียม 10% สารเคลือบทองแดงออกไซด์ 10% สารเคลือบทัลคัม 10% ที่ผลิตได้ เคลือบลงบนแผ่นกระดาษหัตถกรรมปอสา น้ำหนักมาตรฐาน 25 และ 50 แกรม 1 ด้าน ด้วยแปรง โดยใช้สารเคลือบ 100 มิลลิตร เคลือบลงบนกระดาษหัตถกรรมปอสาขนาด A4 ให้ทั่วแผ่น แล้วทิ้งให้สารเคลือบแห้งเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง จะได้กระดาษหลังเคลือบดังแสดงในรูปที่ 4



(ก)

(ข)



(ค)

(ง)

รูปที่ 4 แสดงกระดาษหัตถกรรมปอสา (ก) ไม่ผ่านการเคลือบ (ข) เคลือบด้วยสารเคลือบทึบดำ (ค) เคลือบด้วยสารเคลือบอลูมิเนียม (ง) เคลือบด้วยสารเคลือบทองแดงออกไซด์

2.3.2 การทดสอบสมบัติและความสามารถในการป้องกันรังสียูวีของกระดาษหัตถกรรมปอสา

นำตัวอย่างจากกระดาษหัตถกรรมปอสา น้ำหนักมาตรฐาน 25 และ 50 แกรม ที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบทั้ง 3 สูตร รวมถึงกระดาษหัตถกรรมปอสา น้ำหนักมาตรฐาน 25 50 และ 100 แกรม ที่ไม่ผ่านการเคลือบ มาทดสอบสมบัติดังต่อไปนี้

1) การทดสอบสมบัติด้านโครงสร้าง

- ความพรุน (Porosity) ทดสอบตามมาตรฐาน ISO 5636-5 :2013 Paper and board -Determination of air permeance (medium range)-Part 5: Gurley method

- ความหนา (Thickness) ทดสอบตามมาตรฐาน ISO 534 :2011 Paper and board-Determination of thickness, density and specific volume

2) การทดสอบสมบัติเชิงแสง

- ความทึบแสง (Opacity) ทดสอบตามมาตรฐาน ISO 2471: 2008 Paper and board-Determination of opacity (paper backing)-Diffuse reflectance method

3) การทดสอบความสามารถในการป้องกันรังสียูวีด้วยเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer ในช่วงรังสียูวีและช่วงแสงขาวที่ทะลุผ่านหรือถูกดูดกลืนโดยตัวอย่างที่วางอยู่ในเครื่องมือ ซึ่งในการทดสอบได้กำหนดช่วง

ความยาวคลื่นในการทดสอบที่ 315-400 นาโนเมตร และ 280-314 นาโนเมตร สำหรับการทดสอบดังต่อไปนี้ การส่องผ่านของแสง (Transmittance) และการดูดกลืนของแสง (Absorbance) [8]

ความสามารถในการป้องกันรังสียูวี UVA UVB จากการทดสอบการส่องผ่านของแสงด้วยเครื่อง UV-VIS นั้นบ่งบอกถึงร้อยละของปริมาณรังสียูวีที่ไม่สามารถทะลุผ่านกระดาษหัตถกรรมปอสาได้ โดยในอุตสาหกรรมสิ่งทอได้นำไปคำนวณหาค่า UPF ซึ่งเป็นดัชนีแสดงถึงความสามารถในการป้องกันรังสีอัลตราไวโอเล็ตของวัสดุสิ่งทอ โดยบอกเป็นอัตราส่วนของปริมาณรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่สัมผัสผิวเมื่อมีผ้าป้องกันอยู่ต่อปริมาณรังสีที่สัมผัสผิวเมื่อไม่มีผ้า ซึ่งมีความสัมพันธ์กับร้อยละของปริมาณรังสียูวีที่ป้องกันได้ ดังสมการ และ ตารางที่ 1

$$UPF = \frac{\sum_{280}^{400} E_{\lambda} S_{\lambda} \Delta_{\lambda}}{\sum_{280}^{400} E_{\lambda} S_{\lambda} T_{\lambda} \Delta_{\lambda}}$$

เมื่อ E_{λ} คือค่าความเข้มรังสีที่มีผลกระทบต่อผิวหนัง S_{λ} คือ ความเข้มแสงเชิงสเปกตรัมของรังสีดวงอาทิตย์ T_{λ} คือ การส่องผ่านของแสงผ่านชิ้นตัวอย่างที่วิเคราะห์ได้ และ Δ_{λ} คือ ความยาวคลื่นที่ใช้ทดสอบในหน่วยนาโนเมตร [5]

ตารางที่ 1 การจำแนกประเภทของ UPF และเปอร์เซ็นต์การส่องผ่าน UVR ตามมาตรฐาน AS/NZ4399: 1996 การจำแนกประเภทของเสื้อผ้าที่ป้องกันแสงแดด [10]

ค่า UPF	ระดับการป้องกัน	ระยะเวลาในการป้องกัน (ชม.)	การป้องกันรังสียูวี (%)	การส่องผ่านรังสี UVR (%)
10	ปานกลาง	2.5-5.0	90-95	10-5
20-29	สูง	5.0-7.5	95-96.5	5-3.5
30-40	สูงมาก	7.5-12.5	96.7-98	3.3-2.0
50+	มากที่สุด	>12.5	>98	<2

ตารางที่ 1 UVR นั้นถูกแบ่งตามความยาวคลื่นของรังสียูวี ออกเป็น 3 ช่วง คือ UVA UVB และ UVC ซึ่งในช่วงคลื่นของรังสี UVC นั้นจะถูกชั้นบรรยากาศโอโซนดูดซับไว้ ดังนั้น ค่าที่ใช้เปรียบเทียบในตารางจึงเป็นค่าการส่องผ่านของรังสี UVA และ UVB ที่ช่วงคลื่น 280-400 นาโนเมตร จะเห็นว่าสัดส่วนการส่องผ่านของรังสี UVR นั้นจะแปรผกผันกับความสามารถในการป้องกันรังสียูวี

3. ผลและวิจารณ์ (Results and discussion)

จากการทดสอบสมบัติด้านโครงสร้างของกระดาษหัตถกรรมปอสาน้ำหนักมาตรฐาน 25 50 และ 100 กรัม ก่อนและหลังการเคลือบ ได้ผลการทดสอบความหนาและความพรุน ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ความหนาและความพรุนของกระดาษหัตถกรรมปอสา

กระดาษหัตถกรรมปอสา										
การทดสอบ	หน่วย	25 กรัม	เคลือบ			50 กรัม	เคลือบ			100 กรัม
			ทึบดำ	อลูมิเนียม	ทองแดงออกไซด์		ทึบดำ	อลูมิเนียม	ทองแดงออกไซด์	
ความหนา	µm	87	167	171	174	219	300	303	309	495
ความพรุน	s	0	72	78	75	0	81	83	88	0

จากตารางที่ 2 พบว่า กระดาษที่ผ่านการเคลือบมีความหนาของกระดาษเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับก่อนการเคลือบผิว 80-90 ไมโครเมตร ผิวหน้าของกระดาษที่ลึกลงจากช่องว่างของเส้นใยและความพรุนของกระดาษที่ลดลง เกิดจากการถูกเติมเต็มด้วยสารเคลือบ โดยวัดจากการซึมผ่านอากาศที่ปริมาตร 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร หลังการเคลือบผิวพบว่า การซึมผ่านอากาศใช้เวลาในการซึมผ่านกระดาษนานขึ้น เนื่องจากสารเคลือบได้เข้าไปปิดผิวหน้าของกระดาษและช่องว่างระหว่างเส้นใยในกระดาษ ทำให้อากาศซึมผ่านไปได้ยากและใช้เวลาซึมผ่านนานขึ้น ดังนั้น การเคลือบผิวสามารถช่วยปรับปรุงสมบัติด้านโครงสร้างของกระดาษหัตถกรรมปอสาให้ดีขึ้น

ผลการทดสอบสมบัติเชิงแสงของกระดาษหัตถกรรมปอสาน้ำหนักมาตรฐาน 25 50 และ 100 กรัม ก่อนและหลังการเคลือบ ได้แสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบสมบัติเชิงแสงของกระดาษหัตถกรรมปอสา

กระดาษหัตถกรรมปอสา										
การทดสอบ	หน่วย	25 กรัม	เคลือบ			50 กรัม	เคลือบ			100 กรัม
			ทึบดำ	อลูมิเนียม	ทองแดงออกไซด์		ทึบดำ	อลูมิเนียม	ทองแดงออกไซด์	
ความทึบแสง,	%	57.17	69.23	90.15	97.49	70.37	89.03	92.97	95.60	90.00
การส่องผ่าน,	%	12.17	4.84	4.48	4.03	3.11	1.20	1.16	1.13	0.41
UV A		6.59	2.42	2.29	2.14	1.68	0.93	0.75	0.93	0.35
UV B		5.58	2.42	2.19	1.89	1.43	0.27	0.71	0.30	0.056
การดูดกลืน,	%	1.87	3.28	3.35	3.41	2.10	3.81	3.51	3.77	2.86
UV A		0.71	1.63	1.67	1.84	0.90	2.13	2.26	2.07	2.36
UV B		1.16	1.65	1.68	1.57	1.20	2.68	2.23	2.70	2.50

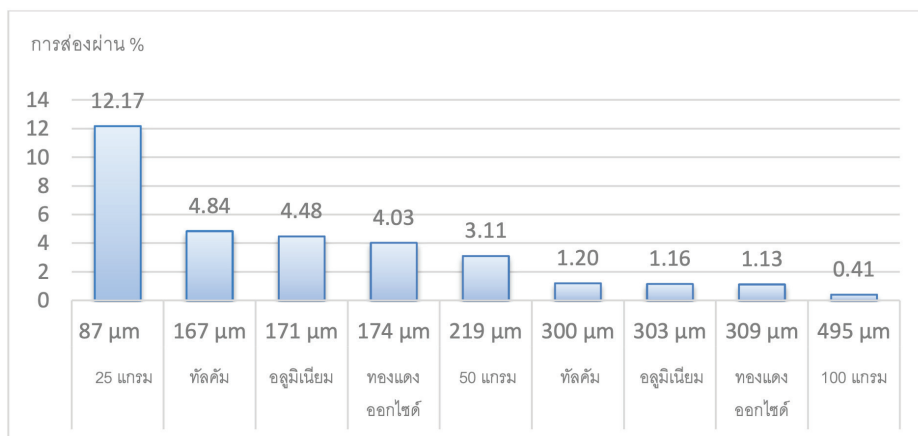
จากตารางที่ 3 พบว่า ค่าความทึบแสงของกระดาษหัตถกรรมปอสาเพิ่มขึ้นเมื่อกระดาษมีน้ำหนักมาตรฐานเพิ่มขึ้นและเมื่อกระดาษผ่านการเคลือบ โดยที่น้ำหนักมาตรฐานกระดาษ 25 กรัม หมายถึงกระดาษหัตถกรรมปอสา 1 ตารางเมตร มีเยื่อปอสาอยู่ 25 กรัม เมื่อน้ำหนักมาตรฐานเพิ่มขึ้นในพื้นที่กระดาษเท่าเดิมเนื่องจากมีปริมาณเยื่อ/เส้นใยในกระดาษเพิ่มขึ้น จึงทำให้ความหนาเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งค่าความทึบแสงนั้นมีความสัมพันธ์กับความหนาของกระดาษ รวมถึงความหนาแน่นของเส้นใย สารเติมแต่ง วิธีการผลิตเยื่อ วิธีการผลิตกระดาษ และลักษณะของเส้นใย เส้นใยปอสาที่มีลักษณะผนังเส้นใยที่หนา เมื่อแสงส่องมากกระทบเส้นใยที่มีผนังหนาจึงส่องผ่านไปได้ยาก แสงบางส่วนที่สามารถส่องผ่านจะเกิดการ

หักเหภายในกระดาดระหว่างเส้นใย ช่องว่างระหว่างเส้นใยทำให้แสงสามารถหักเหและสะท้อนของแสงได้มากขึ้น แสงบางส่วนมีการกระเจิงและสะท้อนออกของแสง เมื่อน้ำกระดาดมาเคลือบด้วยโลหะและสารเติมแต่ง ซึ่งมีสมบัติการดูดกลืนแสงและสะท้อนแสง จึงทำให้ค่าความทึบแสงเพิ่มขึ้น และเกิดการส่องผ่านของแสงผ่านกระดาดได้น้อยลง

การทดสอบความสามารถในการป้องกันรังสียูวีของกระดาดหัตถกรรมปอสา พบว่ากระดาดที่ไม่ได้ผ่านการเคลือบมีค่าการส่องผ่านรังสียูวีร้อยละ 12.17, 3.11 และ 0.41 ตามลำดับ และมีการดูดกลืนรังสียูวีร้อยละ 1.87, 2.10 และ 2.86 ตามลำดับ เมื่อน้ำหนักมาตรฐานเพิ่มขึ้น และความหนาเพิ่มขึ้น การส่องผ่านของรังสียูวีจึงเป็นได้ยากขึ้น หลักการเดียวกันกับการส่องผ่านของแสงในค่าความทึบแสง เพียงแต่แตกต่างกันที่แหล่งกำเนิดแสงและการใช้ช่วงความยาวของคลื่นแสงที่ส่องผ่าน สำหรับการดูดกลืนรังสียูวีของกระดาดหัตถกรรมปอสาเพิ่มขึ้นเมื่อน้ำหนักมาตรฐานกระดาดเพิ่มขึ้นนั้น เนื่องจากการผลิตเส้นใยเยื่อปอสาเป็นการต้มด้วยระบบเปิด อาจมีมัดเส้นใยขนาดเล็ก (Shive) ที่ต้มไม่สุก หรือเศษตาไม้หลงเหลือและปะปนอยู่กับเยื่อที่ผลิตในปริมาณที่มากขึ้นด้วย โดยที่เศษเหล่านี้มีพวกสารแทรก ลิกนิน รวมถึงสิ่งสกปรกอื่นๆ ซึ่งอาจจะเป็นสารอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อนและสารอนินทรีย์ที่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นที่เครื่องวัดรังสียูวีสามารถดูดกลืนได้

การเคลือบกระดาดหัตถกรรมปอสาด้วยโลหะและทาลค์ม พบว่า ที่น้ำหนักมาตรฐาน 25 แกรม ทำให้เกิดการลดการส่องผ่านรังสียูวีร้อยละ 7-8 สำหรับที่น้ำหนักมาตรฐาน 50 แกรม ปริมาณการส่องผ่านรังสียูวีลดลงร้อยละ 2 เมื่อเทียบกับกระดาดที่ไม่ผ่านการเคลือบ เห็นได้ว่ากระดาดที่น้ำหนักมาตรฐานน้อยกว่า การเคลือบผิวกระดาดด้วยโลหะและทาลค์ม ช่วยในการลดการส่องผ่านของรังสียูวีได้ดีกว่า และพบว่ากระดาดหัตถกรรมปอสาที่มีการดูดกลืนรังสียูวีที่เพิ่มหลังการเคลือบด้วยโลหะและทาลค์ม เมื่อเทียบกันระหว่างการเคลือบผิวด้วยทาลค์ม อลูมิเนียม และทองแดงออกไซด์ พบว่า มีค่าการส่องผ่านของรังสียูวีและการดูดกลืนรังสียูวีที่ไม่แตกต่างกัน

ในการทดสอบการส่องผ่านและดูดกลืนรังสียูวีด้วยรังสียูวีเอ และรังสียูวีบีนั้นใช้ช่วงคลื่นแสงที่ 315-400 นาโนเมตร และ 280-314 นาโนเมตร ในการทดสอบพบว่า กระดาดสามารถดูดกลืนช่วงความยาวคลื่นรังสียูวีบีได้มากกว่ารังสียูวีเอ ทำให้รังสียูวีเอส่องผ่านกระดาดไปได้มากกว่าเล็กน้อย แต่เมื่อกระดาดผ่านการเคลือบพบว่า การส่องผ่านและการดูดกลืนใน 2 ช่วงคลื่นแสงดังกล่าวไม่มีความแตกต่างกัน



รูปที่ 5 การส่องผ่านรังสียูวีและความหนาของกระดาดหัตถกรรมปอสา

ความสามารถในการป้องกันรังสียูวีของกระดาดหัตถกรรมปอสาขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย โดยสารเคลือบโลหะหรือทาลค์ม นั้นมีผลต่อการดูดกลืนรังสียูวีที่เพิ่มขึ้น เมื่อรังสียูวีส่องกระทบกระดาด รังสียูวีส่วนหนึ่งจะถูกโลหะหรือทาลค์มดูดกลืน สะท้อนและปล่อยเป็นพลังงานความร้อนออกไป รวมถึงความหนาของกระดาดที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้รังสียูวีบางส่วนนั้นส่องผ่านกระดาดเป็นไปได้ยากขึ้น เนื่องจากรังสียูวีต้องส่องผ่านชั้นของสารเคลือบ โลหะหรือทาลค์ม ชั้นของเส้นใย ชั้นสารเคลือบก่อนจะทะลุผ่านกระดาดมาอีกด้าน จากรูปที่ 5 แสดงให้เห็นว่าเมื่อความหนาเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าการส่องผ่านรังสียูวีลดลง ซึ่งการส่องผ่านของรังสียูวีนั้นมีผลต่อความสามารถในการป้องกันรังสียูวี ในอุตสาหกรรมสิ่งทอมีการนำค่าการส่องผ่านของแสงผ่านขึ้นตัวอย่างที่วิเคราะห์ได้นำมาใช้ในการคำนวณค่า UPF และเมื่อเปรียบเทียบค่าการส่องผ่านรังสียูวีในตารางที่ 3 กับตารางที่ 1 พบว่า กระดาดหัตถกรรมปอสาหลังจากการเคลือบด้วยโลหะและทาลค์มมีการป้องกันรังสียูวีอยู่ในระดับที่สูงขึ้น

4. สรุป (Conclusions)

จากผลการทดลองสรุปได้ว่าปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการป้องกันรังสียูวีของกระดาษหัตถกรรมปอสาขึ้นอยู่กับสมบัติด้านโครงสร้างของกระดาษหัตถกรรมปอสาเป็นหลัก นั่นคือ ความหนา ซึ่งความหนาที่เพิ่มขึ้นสามารถช่วยลดการส่องผ่านของปริมาณรังสียูวีที่ผ่านกระดาษ ในขณะที่การเคลือบกระดาษด้วยทัลคัม อลูมิเนียม และ ทองแดงออกไซด์ ส่งผลให้กระดาษมีความพรุนลดลง มีความทึบแสงเพิ่มขึ้น รวมถึงมีความหนาเพิ่มขึ้น และช่วยเพิ่มปริมาณการดูดกลืนรังสียูวีแล้วสะท้อนออกไป จึงส่งผลให้กระดาษที่ผ่านการเคลือบมีความสามารถในการป้องกันรังสียูวีเพิ่มขึ้น สำหรับการผสมผงทัลคัม ผงอลูมิเนียม และทองแดงออกไซด์ลงในสารเคลือบสามารถช่วยดูดกลืนรังสียูวีเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม ไม่พบความแตกต่างของความสามารถในการป้องกันรังสียูวีและการดูดกลืนรังสียูวีอย่างมีนัยสำคัญเมื่อใช้โลหะต่างชนิดกันและทัลคัมในการเคลือบกระดาษ

5. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

ผู้วิจัยขอขอบคุณผู้บังคับบัญชาและเจ้าหน้าที่กลุ่มงานเส้นใยธรรมชาติทุกท่านที่ให้การช่วยเหลือและสนับสนุนในการทำโครงการวิจัยนี้

6. เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). Radiation: *Ultraviolet (UV) radiation* [online]. 9 March 2016. Available form: [https://www.who.int/news-room/questions-and-answers/item/radiation-ultraviolet-\(uv\)](https://www.who.int/news-room/questions-and-answers/item/radiation-ultraviolet-(uv)) [viewed 2022-01-19].
- [2] ศูนย์โอโซนและรังสี. *UV Index* [ออนไลน์]. 2021. เข้าถึงจาก: http://ozone.tmd.go.th/UV_index.htm [อ้างถึงวันที่19 มกราคม 2565].
- [3] ศูนย์วิเคราะห์ทดสอบสถาบันพัฒนาอุตสาหกรรมสิ่งทอ. สิ่งทอป้องกันแสงอัลตราไวโอเล็ต (*Ultraviolet Protection Textiles*) [ออนไลน์]. 2020. เข้าถึงจาก: <https://testing.thaitextile.org/wp-content/uploads/2020/10> [อ้างถึงวันที่11 พฤษภาคม 2565].
- [4] บัญชา ธนบุญสมบัติ. ร่มยูวีปกป้องคุณได้อย่างไร. *วารสารเทคโนโลยีวัสดุ* (ออนไลน์). มกราคม-มีนาคม 2545, 55-58. เข้าถึงจาก: https://www2.mtec.or.th/th/e-magazine/admin/upload/281_55.pdf [อ้างถึงวันที่11 พฤษภาคม 2565].

- [5] GHANE, M. and GHORBANI, E. Investigation into the UV-protection of woven fabrics composed of metallic weft yarns. *Autex Research Journal*. 2016, 16(3), 150-159.
- [6] TECHNIDYNE CORPORATION. *Measurement and control of the optical properties of paper*. 2nd ed. Ninth publication Copyright, 1996. pp. 5-10.
- [7] VIPUL, S. and NISHI, K. Efficacy of dispersion of magnesium silicate (talc) in papermaking. *Arabian Journal of Chemistry*. 2017, 10, s1059-s1066
- [8] ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. *เครื่องทดสอบ UV/VIS Spectrophotometer* [ออนไลน์]. เข้าถึงจาก: http://www2.nanotec.or.th/th/?page_id=575 [อ้างถึงวันที่19 มกราคม 2565].
- [9] สำนักส่งเสริมและฝึกอบรม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. *ปอสาและกระดาษสา*. [ออนไลน์]. เข้าถึงจาก: <http://www.eto.ku.ac.th/neweto/e-book/other/other28.pdf> [อ้างถึงวันที่19 มกราคม 2565].
- [10] RESEACHGATE. *Examining the effect of natural and synthetic uv absorbers* [online]. April 2020. Available form: <https://www.researchgate.net/publication/340375734> [viewed 2022-05-11].

คุณลักษณะทางเคมีกายภาพและปริมาณสารแคปไซซินอยด์ของ สายพันธุ์พริกที่ใช้ในการผลิตเครื่องแกงส้มปักษ์ใต้

Physicochemical properties and capsaicinoids content of Thai chili cultivars used in southern sour curry paste (Kaeng Som)

ขนิษฐา อินทรประสิทธิ์¹, ลลิตา ชูแก้ว¹, เจนจิรา สุขสวัสดิ์¹, สุทธชยา ชื่นวัฒนา¹

Khanittha Inprasit¹, Lalita Chookaew¹, Janejira Suksawad¹, Sutachaya Chuenwatthana¹

รับบทความ: 18 กุมภาพันธ์ 2565 แก้ไขบทความ: 10 มิถุนายน 2565 ยอมรับตีพิมพ์: 22 กรกฎาคม 2565

12

บทคัดย่อ

พริกเป็นเครื่องเทศที่นิยมนำมาปรุงแต่งอาหารทั่วโลก เพื่อเพิ่มสี สัน รสชาติ และกลิ่น ซึ่งความเผ็ดของพริกนั้น เกิดจากสารแคปไซซินอยด์ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาคุณลักษณะทางกายภาพและเคมีของสายพันธุ์ พริกที่ใช้ในการผลิตเครื่องแกงส้มปักษ์ใต้ จำนวน 5 สายพันธุ์ ทั้งหมด 8 ตัวอย่าง ได้แก่ KHO.1P, KHO.2P, KAR.2R, JIN.2K, YOD.1N, YOD.2N, KEN.2R และ KEN.2P โดยนำตัวอย่างพริกไปตรวจสอบคุณลักษณะทางกายภาพ ผลการทดลองพบว่า พริกสดส่วนใหญ่มีค่าความชื้นในช่วง สีแดงถึงสีเหลืองเขียว ผลการวิเคราะห์ทางเคมีพบว่า ปริมาณ ของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (TSS) ความเป็นกรด-ด่าง ปริมาณกรดทั้งหมด (TA) และดัชนีการสุก อยู่ในช่วง 6.0-13.0 °Brix, 5.09-5.60, 0.11-0.18%, และ 35.3-86.7 ตาม ลำดับ และพริกทั้งหมดมีปริมาณสารแคปไซซินอยด์อยู่ใน ช่วง 3,048.64-6,832.56 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง และค่าดัชนีความเผ็ดของพริกแบ่งได้ 2 กลุ่ม คือ ระดับเผ็ด มากที่สุด (> 80,000 SHU) ได้แก่ YOD.1N > KAR.2R > KEN.2P > YOD.2N > KHO.1P และระดับเผ็ดมาก (25,000-70,000 SHU) ได้แก่ KEN.2R > KHO.2P > JIN.2K ซึ่งค่า ดังกล่าวมีความแตกต่างกันตามสายพันธุ์ แหล่งเพาะปลูก สภาพแวดล้อมในการปลูก และระยะการสุกของผลพริก

Abstract

Chili is a spice that is regularly used in food production to enhance the color, taste, and flavor all over the world. The pungency of chili originated from capsaicinoids. Therefore, this research aims to analyzed the physical and chemical properties of Thai chili cultivars used in Southern Kaeng Som. Five cultivars of Thai chillies (8 samples) were collected, including KHO.1P, KHO.2P, KAR.2R, JIN.2K, YOD.1N, YOD.2N, KEN.2R and KEN.2P. In order to find their quality, the physical appearance, physical properties were analyzed. The physical analysis showed that the color of fresh chili samples was found as red to yellow-green. The chemical analysis showed that their the total soluble solid (TSS), pH, total acidity (TA) and maturity index were found in the range of 6.0-13.0 °Brix, 5.09-5.60, 0.11-0.18% and 35.3-86.7, respectively. Moreover, their capsaicinoids were found in the range of 3,048.64-6,832.56 mg/kg dry weight. The pungency of chili samples was classified to very highly pungent (>80,000 SHU): YOD.1N > KAR.2R > KEN.2P > YOD.2N > KHO.1P, and highly pungent (25,000-70,000 SHU): KEN.2R > KHO.2P > JIN.2K, respectively. Furthermore, their capsaicinoids and pungency depended on cultivars, agricultural area, growing conditions, and maturity stage.

คำสำคัญ: แคปไซซินอยด์ ระดับความเผ็ด ดัชนีความเผ็ด พันธุ์พริก เครื่องแกงส้ม

Keywords: Capsaicinoids, Pungency level, Scoville heat units, Chili cultivars, Sour curry paste

¹กรมวิทยาศาสตร์บริการ

^{*}Corresponding author e-mail address: khanittha@dss.go.th

1. บทนำ (Introduction)

พริกเป็นพืชเศรษฐกิจที่มีศักยภาพสูงและมีความสำคัญทางด้านเศรษฐกิจของประเทศไทย เพราะนอกจากนำพริกไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตอาหารแล้ว พริกยังสามารถใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมอื่นได้ด้วย เช่น การผลิตยารักษาโรค เครื่องสำอาง และอาหารสัตว์ [1] เนื่องจากพริกมีสารสำคัญอยู่หลายชนิด โดยเฉพาะสารแคปไซซินอยด์เป็นสารสำคัญที่แสดงเอกลักษณ์ของพริกที่ทำให้พริกมีความเผ็ด ประกอบด้วยสารแคปไซซิน ซึ่งเป็นสารหลักและไดไฮโดรแคปไซซิน ซึ่งปริมาณสารแคปไซซินอยด์ในพริกมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ แหล่งเพาะปลูก สภาพแวดล้อมในการปลูก และระยะการสุกของผลพริก (ความแก่อ่อนของพริก) โดยปัจจัยดังกล่าวนี้เป็นสิ่งสำคัญต่อการนำพริกไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ปัจจุบันมาตรฐานการซื้อขายพริกในตลาดโลกใช้ระดับความเผ็ดของพริกในหน่วยวัด Scoville heat unit (SHU) เป็นมาตรฐานสำคัญเพื่อใช้ชี้บ่งปริมาณแคปไซซินอยด์ในผลพริกและควบคุมคุณภาพการซื้อขายพริกแต่ละสายพันธุ์

ภาคอุตสาหกรรมอาหารในประเทศไทย มีการตรวจวัดความเผ็ดเพื่อใช้ในการควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์ เช่น ซอสพริก น้ำจิ้มไก่ แต่ยังไม่มีมีการกำหนดเป็นมาตรฐานเพื่อใช้ในการควบคุมคุณภาพสินค้าภายในประเทศที่มีพริกเป็นส่วนประกอบสำคัญ เช่น เครื่องแกงซึ่งจัดเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้รับความนิยมเนื่องจากมีความเผ็ดร้อน กลิ่นรส และรสชาติที่เป็นอัตลักษณ์โดยเฉพาะเครื่องแกงส้มปักษ์ใต้ จากการสำรวจกลุ่มผู้ผลิตเครื่องแกงในพื้นที่จังหวัดภาคใต้ พบว่าเครื่องแกงส้มมีการใช้พริกหลายสายพันธุ์รวมกับการใช้พริกสายพันธุ์พื้นถิ่นที่มีความเผ็ดร้อน และให้กลิ่นรสที่เป็นอัตลักษณ์เฉพาะในพื้นที่ อาทิ เครื่องแกงส้มของจังหวัดพัทลุงที่ใช้พริกขี้หนูซึ่งพริกพื้นถิ่นเป็นวัตถุดิบหลักและประกอบกับในปัจจุบันยังไม่มีรายงานการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับปริมาณสารแคปไซซินอยด์และคุณสมบัติด้านต่าง ๆ ของสายพันธุ์พริกที่ใช้เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตผลิตภัณฑ์ ทั้งนี้เพื่อใช้เป็นแนวทางในการเพิ่มมูลค่าผลพริกสด ร่วมกับการควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์ให้มีความสม่ำเสมอและเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปริมาณสารแคปไซซินอยด์และคุณลักษณะทางทางกายภาพและทางเคมีของสายพันธุ์พริกที่ใช้ในการผลิตเครื่องแกงส้มปักษ์ใต้ในพื้นที่จังหวัดพัทลุงและจังหวัดสงขลา จำนวน 5 สายพันธุ์ ทั้งหมด 8 ตัวอย่าง ได้แก่ พริกขี้หนู (เขียว) พัทลุง (KHO.1P) พริกขี้หนู (แดง) พัทลุง (KHO.2P) พริกกระเหรี่ยง (แดง) ราชบุรี (KAR.2R) พริกจินดา (แดง) กาญจนบุรี (JIN.2K) พริกยอดสนเข้ม (เขียว) นครพนม (YOD.1N) พริกยอดสนเข้ม (แดง) นครพนม (YOD.2N) พริกขี้หนูสวน (แดง) ราชบุรี (KEN.2R) และพริกขี้หนูสวน (แดง) พัทลุง (KEN.2P)

เพื่อให้ได้องค์ความรู้ที่สามารถใช้เป็นแนวทางอ้างอิงในการเลือกสายพันธุ์พริกในการผลิตผลิตภัณฑ์โดยคำนึงถึงปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพ โดยเฉพาะความเผ็ดให้ใกล้เคียงกับความต้องการของผู้ผลิต และเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค เนื่องจากระดับความเผ็ดเป็นปัจจัยสำคัญในการกำหนดคุณภาพของวัตถุดิบ (ผลพริก) และผลิตภัณฑ์ ผู้การนำไปประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์อื่น ๆ ต่อไป

2. วิธีการวิจัย (Experimental methods)

2.1 วัตถุดิบตัวอย่าง

คัดเลือกพันธุ์พริกที่ใช้ผลิตเครื่องแกงส้มในพื้นที่จังหวัดพัทลุงและสงขลา จำนวน 5 สายพันธุ์ ทั้งหมด 8 ตัวอย่าง แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่ม *Capsicum frutescens* ได้แก่ KHO.1P, KHO.2P, KAR.2R, YOD.1N, YOD.2N, KEN.2R, KEN.2P และกลุ่ม *Capsicum annuum* ได้แก่ JIN.2K จากแหล่งขายพริกที่สามารถระบุพื้นที่เพาะปลูกได้ บรรจุในถุงพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีน (Polyethylene: PE) เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 7-8 องศาเซลเซียส ก่อนนำมาใช้ในขั้นตอนต่อไป

2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

2.2.1 ตู้อบลมร้อน (Hot air oven: FP115, Binder, Germany)

2.2.2 เครื่องวัดความชื้น (Moisture analyser: Mettler LP16, Diethelm, Switzerland)

2.2.3 เครื่องเขย่า (Shaker: KS4000, IKA, Germany)

2.2.4 เครื่องระเหย (Evaporator: Hei-VAP, Heidolph, U.S.A.)

2.2.5 เครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวแบบสมรรถนะสูง (High performance liquid chromatography: Acquity ARC, waters, U.S.A.)

2.2.6 เครื่องวัดสี (Hunter Lab Colorimeter: UltraScanPro, Color Global, U.S.A.)

2.2.7 สมุดเทียบสีมาตรฐาน (Munsell book: M40115B, X-Rite, U.S.A.)

2.2.8 เครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH meter: 3Star, Thermo Scientific, U.S.A.)

2.2.9 ตะแกรงร่อน ขนาด 50 เมช (Sieve: SATM E11, Endecotts, English)

2.2.10 เครื่องวัดความหวาน (Refractometer: Master-M, Atago, Japan)

2.3 สารเคมี

2.3.1 เมทานอล (Methanol; CH₃OH: HPLC grade, Honeywell, Riedel-d Haen, U.S.A.)

2.3.2 อะซีโตน (Acetone; C_3H_6O : Analytical grade, RCI, Labscan, Ireland)

2.3.3 แคปไซซินสังเคราะห์บริสุทธิ์ (Capsaicin; $C_{18}H_{27}NO_3$: Analytical grade, Sigma-aldrich, St. Louise, U.S.A.) ค่า a.i เท่ากับ 99.3%

2.3.4 ไดไฮโดรแคปไซซินสังเคราะห์บริสุทธิ์ (Dihydrocapsaicin; $C_{18}H_{29}NO_3$: Analytical grade, Sigma-aldrich, St. Louise, U.S.A.) ค่า a.i. เท่ากับ 98.1%

2.3.5 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide; NaOH: analytical grade, Merck, Germany)

2.4 การเตรียมตัวอย่างพริกที่ใช้ผลิตเครื่องแกงส้มปักษ์ใต้

2.4.1 พริกสด นำพริกสดจาก ข้อ 2.1 มาคัดคุณภาพ ได้ผลพริกที่สมบูรณ์ไม่มีตำหนิ และไม่เน่าเสีย ตัดปลายขั้วล้างน้ำสะอาด และผึ่งให้แห้ง

2.4.2 พริกผง นำตัวอย่างพริกสด จากข้อ 2.1 นำไปอบที่อุณหภูมิ 60-65 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 6-12 ชั่วโมง ให้มีความชื้นสุดท้ายร้อยละ 8-12 จากนั้นนำไปบดและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 300 ไมโครเมตร (50 เมช) ตามวิธีการของ [2] เพื่อใช้ในการสกัดสารแคปไซซินอยด์ (สารแคปไซซินและไดไฮโดรแคปไซซิน) ในตัวอย่างพริก ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างพริกสำหรับตรวจสอบคุณลักษณะทางกายภาพและทางเคมี

2.5 การตรวจสอบคุณลักษณะทางกายภาพของพันธุ์พริกที่ใช้ผลิตเครื่องแกงส้มปักษ์ใต้

2.5.1 ตรวจสอบลักษณะ (ผลภายนอก) ทางพฤกษศาสตร์เบื้องต้นของสายพันธุ์พริก

นำตัวอย่างพริกสดจาก ข้อ 2.4 มาตรวจสอบลักษณะทางพฤกษศาสตร์โดยการสังเกต วัดขนาดของผลโดยใช้เวอร์เนียร์คาลิปเปอร์ และจัดบันทึก

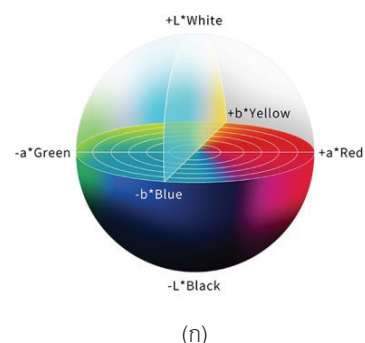
2.5.2 การวัดค่าสีด้วยเครื่องวัดสี และสมุดเทียบสี ดังนี้

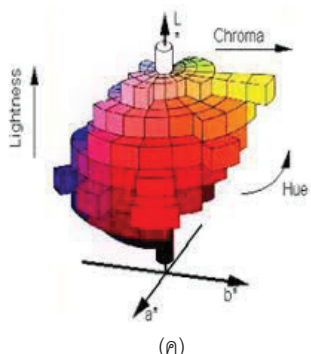
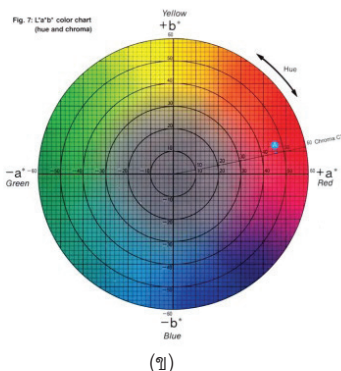
1) การวัดค่าสีด้วยเครื่องวัดสี

นำตัวอย่างพริกสดมาวัดค่าสีในระบบ CIELAB (L^* a^* b^*) ด้วยเครื่องวัดสีในการวัดแบบสะท้อนแสง (Reflectance) ในโหมด Reflectance specular included (RSIN) โดยวัดแสงสะท้อนรวมของ Specular กับตัวอย่าง โดยสุ่มตัวอย่างพริกมาวางโดยตรงกับตำแหน่ง Reflectance port ของเครื่อง และทำการวัด จำนวน 5 ซ้ำ โดยแสดงในรูปของค่า L^* , a^* , b^* , ค่ามุมของสี (Hue angle; H°) และค่าความเข้มข้นของสี (Chroma; C) [3]

ค่ามุมของสี	แสดงช่วงสีของวัตถุที่มีค่าอยู่ระหว่าง 0° - 360°
0° - 45°	แสดงสีม่วงแดงถึงสีส้มแดง
45° - 90°	แสดงสีส้มแดงถึงสีเหลือง
90° - 135°	แสดงสีเหลืองถึงสีเหลืองเขียว
135° - 180°	แสดงสีเหลืองเขียวถึงสีเขียว
180° - 225°	แสดงสีเขียวถึงสีน้ำเงินเขียว
225° - 270°	แสดงสีน้ำเงินเขียวถึงสีน้ำเงิน
270° - 315°	แสดงสีน้ำเงินถึงสีม่วง
315° - 360°	แสดงสีม่วงถึงสีม่วงแดง

การอ่านค่าและลักษณะสีในระบบ CIE ดังแสดงในรูปที่ 2





รูปที่ 2 (ก) Color space ของสีในระบบ CIE (ข) การบรรยายสีในระบบ CIE ในรูปสองมิติ และ (ค) การบรรยายสีในระบบ CIE ในรูปสามมิติที่มีการเชื่อม ค่า a^* และ b^* เข้ากับค่า hue และ chroma (ที่มา: <http://www.sightgrip.co.uk/bbstest.htm>, <http://www.sightgrip.co.uk/bbstest.htm> และ <http://www.sightgrip.co.uk/bbstest.htm>)

2) การวัดค่าสีด้วยสมุดเทียบสีมาตรฐาน นำตัวอย่างพริกสดในข้อ 2.4 มาวัดค่าสีโดยเทียบกับสมุดเทียบสีมาตรฐาน (Munsell book) โดยการอ่านค่าและลักษณะสีในระบบ Munsell และบันทึกค่า Hue และ Value/chroma

2.6 การตรวจสอบคุณลักษณะทางเคมีของพันธุ์พริกที่ใช้ผลิตเครื่องแกงส้มบักขี้ไต้

2.6.1 การวัดปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (TSS) วัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ปริมาณกรดทั้งหมด (TA) และดัชนีความสุกของผล (MI) ในตัวอย่างพริก

1) การวัดปริมาณ TSS

นำตัวอย่างพริกสดจากข้อ 2.4 ปริมาณ 5 กรัม ไปบด คั้นน้ำจากผลพริก นำไปวัดโดยใช้เครื่อง Hand refractometer รายงานค่าในหน่วยของศาบริกซ์ (°Brix) โดยสุ่มตัวอย่างพริก และทำการวัดค่าจำนวน 3 ซ้ำ

2) การวัดค่า pH [4]

นำตัวอย่างพริกสดจากข้อ 2.4 ปริมาณ 5 กรัม ไปบด เติมน้ำกลั่น 10 มิลลิลิตร และวัดค่าโดยใช้เครื่องวัด pH โดยสุ่มตัวอย่างพริก และทำการวัดค่าจำนวน 3 ซ้ำ

3) การวัดปริมาณกรดทั้งหมด (Total acidity, TA) [5]

นำตัวอย่างพริกสดจากข้อ 2.4 ปริมาณ 5 กรัม ไปบด และเติมน้ำกลั่น 10 มิลลิลิตร เติมน้ำฟอสฟอริก 1 ปริมาณ 2-3 หยด เพื่อเป็นอินดิเคเตอร์ (indicator) และนำมาไตเตรตด้วยสารละลายมาตรฐาน โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 0.1 นอร์มัลลิตี จนกระทั่งถึงจุดยุติ คือจุดที่สารละลายเปลี่ยนเป็นสีชมพู และรายงานค่าในรูปของเปอร์เซ็นต์ของกรดซิตริก ดังสมการ โดยวิเคราะห์จำนวน 3 ซ้ำ

$$\text{ปริมาณกรดในรูปกรดซิตริก (\%)} = \frac{\text{ความเข้มข้น NaOH} \times \text{ปริมาตร NaOH ที่ใช้} \times \text{น้ำหนักสมมูลของกรดซิตริก} \times 100}{\text{ปริมาตรของตัวอย่าง}}$$

4) ดัชนีความสุกของผล (Maturity Index) ตามวิธีของ [6]

คำนวณจากอัตราส่วนระหว่างปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดกับปริมาณกรดทั้งหมด ดังสมการ

$$\text{ดัชนีความสุกของผล} = \frac{\text{ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด}}{\text{ปริมาณกรดทั้งหมด}}$$

2.6.2 การวิเคราะห์ปริมาณสารแคปไซซินอยด์ (แคปไซซินและไดไฮโดรแคปไซซิน) และดัชนีความเผ็ด

วิเคราะห์ปริมาณสารแคปไซซินอยด์ในพริก โดยการหาปริมาณแคปไซซินและไดไฮโดรแคปไซซิน ซึ่งเป็นสารองค์ประกอบหลักที่ส่งผลต่อปริมาณความเผ็ดในพริก จากนั้นนำปริมาณสารแคปไซซินและไดไฮโดรแคปไซซินมาคำนวณหาดัชนีความเผ็ดในหน่วย Scoville Heat Unit (SHU) มีรายละเอียดการวิเคราะห์ดังนี้

1) การเตรียมโวลีโอเรซิน (Oleoresin) จากตัวอย่างพริก [7]

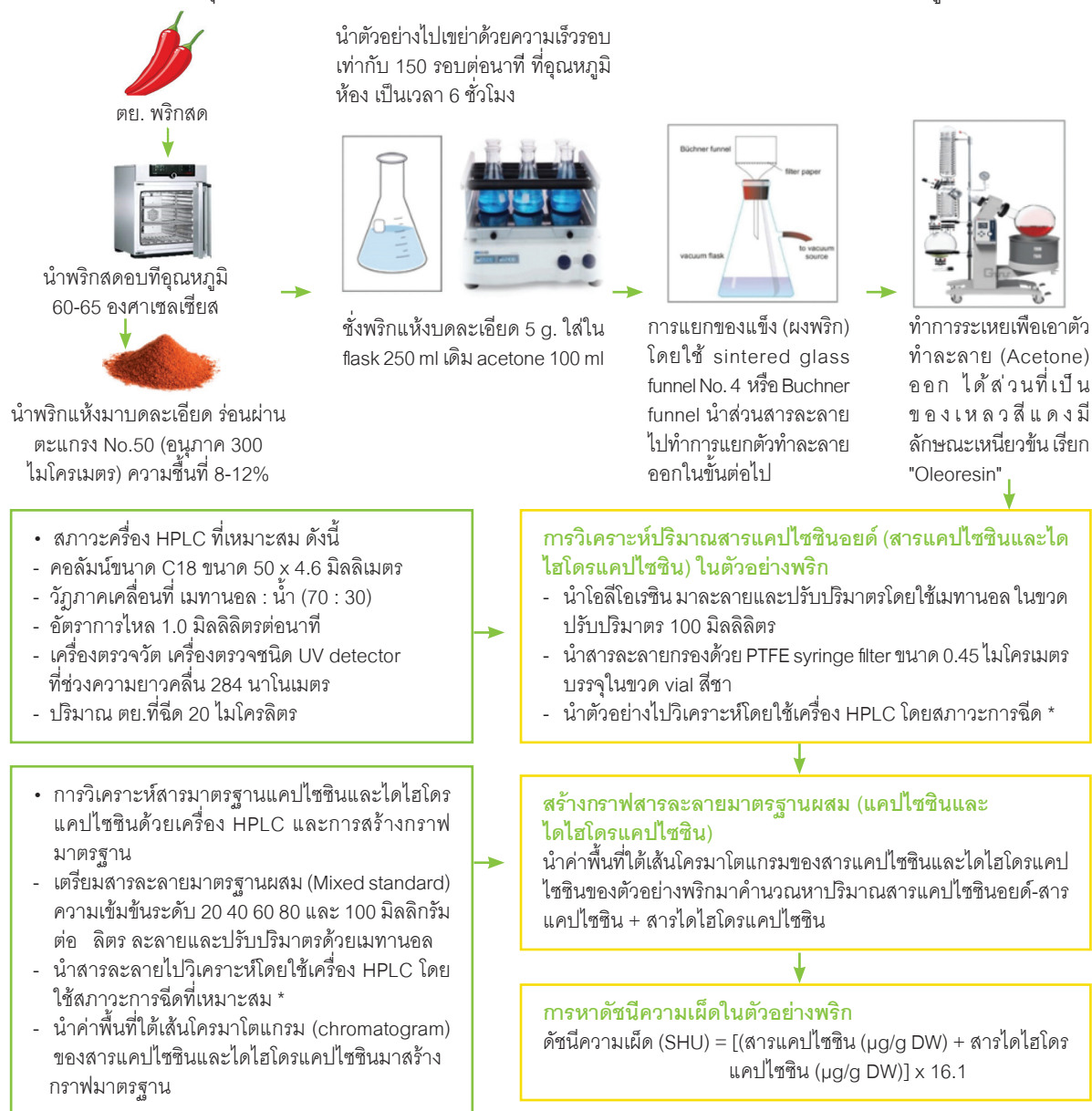
นำพริกสดจากข้อ 2.4 ที่มีขั้นตอนการเตรียม ดังแสดงในรูปที่ 1 มาสกัดสารด้วยวิธีการเขย่า (Shaker) โดยชั่งพริกสด 5 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมน้ำโซเดียมคลอไรด์ 100 มิลลิลิตร นำไปสกัดโดยใช้เครื่องเขย่า ปรับให้มีความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง [8] เมื่อครบเวลาสกัด กรองโดยใช้ Sintered glass funnel No.4 ภายใต้ปั๊มสุญญากาศ จากนั้นนำสารละลายที่ได้จากการกรองมาระเหยเพื่อกำจัดตัวทำละลายโดยใช้เครื่องกลั่นระเหยแบบลดความดัน (Evaporator) เป็นเวลา 20 นาที ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ได้ส่วนที่เป็นของเหลวสีแดงเหนียวข้นที่เรียกว่า โวลีโอเรซิน (Oleoresin) ทำการสกัดจำนวน 2 ซ้ำในแต่ละสายพันธุ์พริก ดังแสดงในรูปที่ 3

2) การเตรียมตัวอย่างสารละลายตัวอย่างสำหรับตรวจวัดปริมาณสารแคปไซซินอยด์

นำโอสโตรซินที่สกัดได้ทั้งหมดในแต่ละสายพันธุ์พริก จากข้อ 2.6.2 ข้อ1) มาละลายและปรับปริมาตรในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร โดยใช้เมทานอล (เพื่อหาความเข้มข้นหรือปริมาณสารแคปไซซินอยด์ของตัวอย่างพริก) จากนั้นกรองด้วย PTFE syringe filter ที่มีขนาดรูพรุน 0.45 ไมโครเมตร บรรจุในขวด Vial สีชา และนำตัวอย่างไปวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง HPLC ที่สภาวะเดียวกันกับสารมาตรฐาน รายละเอียดดังแสดงในรูปที่ 3

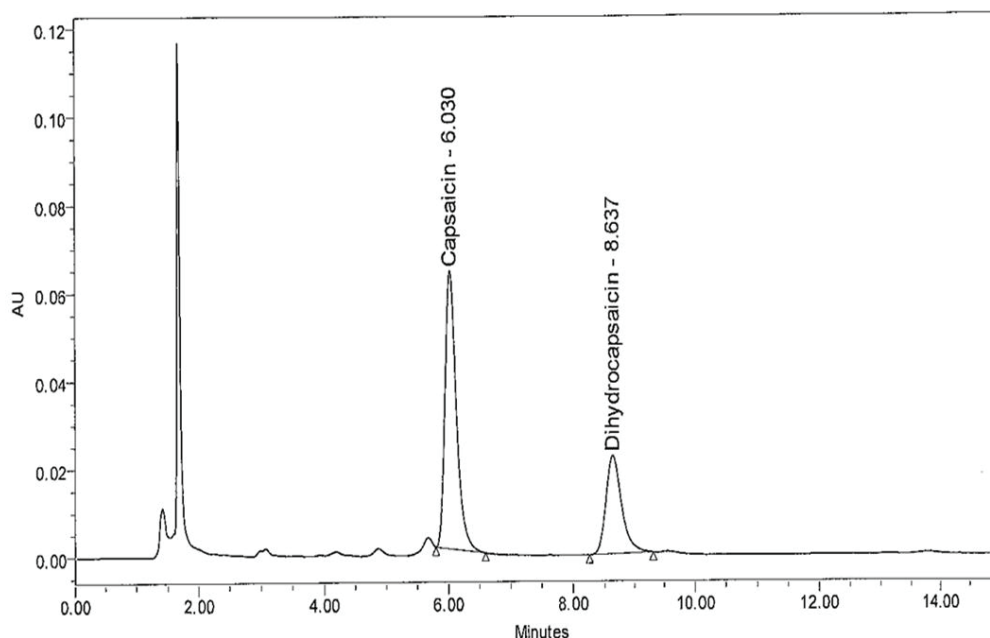
3) การตรวจวัดปริมาณสารแคปไซซินอยด์ (สารแคปไซซินและไดไฮโดรแคปไซซิน) โดยใช้วิธี HPLC ดัดแปลงมาจากวิธี [9]

สร้างกราฟมาตรฐาน (Calibration curve) จากสารมาตรฐานแคปไซซินและไดไฮโดรแคปไซซิน โดยใช้สารแคปไซซินสังเคราะห์บริสุทธิ์ (N-[(4-hydroxy-3-methoxyphenyl)methyl]-8-methyl-6-nonenamide) และสารไดไฮโดรแคปไซซินสังเคราะห์บริสุทธิ์ (N-[(4-hydroxy-3-methoxyphenyl)methyl]-8-methylnonenamide) ในการเตรียมสารละลายมาตรฐานผสม (Mixed standard) ที่ระดับความเข้มข้น 20, 40, 60, 80 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ละลายและปรับปริมาตรในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร โดยใช้เมทานอล จากนั้นกรองด้วย PTFE syringe filter ที่มีขนาดรูพรุน 0.45 ไมโครเมตร บรรจุในขวด Vial สีชา ฉีดเข้าเครื่อง HPLC ตามสภาวะเครื่องที่เหมาะสม ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 ขั้นตอนการเตรียมสารสกัดจากตัวอย่างพริกและการวิเคราะห์ปริมาณสารแคปไซซินอยด์และดัชนีความเผ็ด

เมื่อทำการฉีดทดสอบสารแคปไซซินและไดไฮโดรแคปไซซินที่สกัดได้จากตัวอย่างพริก พบว่าพีคของสารแคปไซซินที่เวลา 6.03 (RT=6.03) และไดไฮโดรแคปไซซินที่เวลา 8.64 (RT=8.64) ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 แสดงตัวอย่างโครมาโตแกรมของสารแคปไซซินและไดไฮโดรแคปไซซินที่สกัดได้จาก KHO.2P

นำค่าพื้นที่ใต้เส้นโครมาโตแกรมของสารแคปไซซินและไดไฮโดรแคปไซซินของตัวอย่างพริกมาคำนวณหาปริมาณสารแคปไซซินและไดไฮโดรแคปไซซินโดยใช้กราฟมาตรฐานของสารมาตรฐานแคปไซซินและไดไฮโดรแคปไซซิน จากนั้นหาปริมาณสารแคปไซซินอยด์ ซึ่งคำนวณจากผลรวมของปริมาณสารแคปไซซินและไดไฮโดรแคปไซซิน มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง (mg/kg DW) ดังสมการ ทำการวิเคราะห์จำนวน 3 ซ้ำ ในแต่ละสายพันธุ์พริก

แคปไซซินอยด์ (mg/kg DW) = ปริมาณสารแคปไซซิน (mg/kg DW) + ปริมาณสารไดไฮโดรแคปไซซิน (mg/kg DW)

4) การหาดัชนีความเผ็ดในตัวอย่างพริก [10]

ดัชนีความเผ็ดในตัวอย่างพริกคำนวณจากผลรวมของปริมาณสารแคปไซซินและไดไฮโดรแคปไซซินที่ได้จากข้อ 2.6.2 ข้อ 3) คูณกับ 16.1 ค่าที่ได้มีหน่วยเป็น Scoville heat unit (SHU) ดังสมการ

ดัชนีความเผ็ด (SHU) = [ปริมาณสารแคปไซซิน (mg/kg DW) + ปริมาณสารไดไฮโดรแคปไซซิน (mg/kg DW)] X 16.1

3. ผลและวิจารณ์ (Results and discussion)

3.1 ผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพของพริกที่ใช้ผลิตเครื่องแกงส้มปักษ์ใต้

3.1.1 ผลการตรวจสอบลักษณะ (ผลภายนอก) ทางพฤกษศาสตร์เบื้องต้นของสายพันธุ์พริก

จากการตรวจสอบลักษณะทางพฤกษศาสตร์เบื้องต้นของแต่ละสายพันธุ์พริก โดยการสังเกต วัดขนาด และระบุกลุ่มพริกที่สนใจศึกษา ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์เบื้องต้นของพริกที่ใช้ผลิตเครื่องแกงส้มบักขี้ได้

พันธุ์พริก	ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของผล (จากการสังเกตและวัดขนาดของผล)	ภาพประกอบ
1. พริกขาวชัยบุรีพัทลุง หรือเรียกพริกขาวซี พริกเดือยไก่หรือพริกบ้าน <i>Capsicum frutescens</i>	มีลักษณะเรียวยาว ปลายแหลมเหมือนเดือย ไก่ คัดงอ มีความยาวประมาณ 5-8 ซม. กว้าง ประมาณ 0.7-1 ซม. พริกมีทั้งสีขาว เหลือง ส้ม และแดง	 KHO.1P KHO.2P
2. พริกกะเหรี่ยงสีแดงราชบุรี <i>Capsicum frutescens</i>	มีลักษณะป้อม ๆ กลม ๆ โคนผลใหญ่ ปลาย แหลม ผิวเป็นคลื่น ผลยาวประมาณ 3-5 ซม. และกว้างประมาณ 0.9-1 ซม. มีสีเขียวเขียว ส้มแดง และไปถึงสีแดง	 KAR.2R
3. พริกยอดสนเข้มนครพนม <i>Capsicum frutescens</i>	มีลักษณะเรียวยาว ปลายแหลม ผิวมันวาว ผนังผลบางผลจะคดงอและเป็นคลื่น ยาว ประมาณ 7-10 ซม. กว้างประมาณ 0.5-1 ซม. มีสีเขียว ส้มแดง และสีแดง	 YOD.1N YOD.2N
4. พริกขี้หนูสวน <i>Capsicum frutescens</i> 4.1 พริกขี้หนูสวนราชบุรี 4.2 พริกขี้หนูสวนพัทลุง	ผลยาวรี ปลายแหลม ผิวเป็นคลื่น มีขนาดผล ที่เล็กกว่าพริกชนิดอื่น ยาวประมาณ 2-3 ซม. มีสีเขียว ส้มแดง และสีแดง ผลยาว โคนผลใหญ่ ปลายแหลม ผิวเป็นคลื่น ยาวประมาณ 3-4 ซม. กว้าง 0.9-1.2 ซม. มี ลักษณะผลใหญ่เหมือนพริกกะเหรี่ยง มีสีเขียว ส้มแดง และไปถึงสีแดง	 KEN.2R  KEN.2P
5. พริกจินดากาญจนบุรี <i>Capsicum annum</i>	ผลพริกยาวรี ปลายแหลม ผิวมันวาวสวย มี สีแดงสด ยาวประมาณ 6-8 ซม. กว้างประมาณ 1.0-1.2 ซม. มีทั้งสีเขียว และสีแดง พริกมี สีสันทดกว่าพริกพันธุ์อื่น ๆ	 JIN.2K

3.1.2 ผลการวิเคราะห์ค่าสี

จากการวิเคราะห์ค่าสีในตัวอย่งพริก โดยใช้เครื่อง Hunter lab colorimeter ในระบบ CIE L* a* b* แล้ว
คำนวณหาค่าความเข้มของสี (C) เป็นค่าแสดงความสดสว่างของสี ถ้าค่า C เพิ่มขึ้นแสดงว่าความสดสว่างของสีเพิ่มขึ้น
และนำมาคำนวณหาค่ามุมของสี (H°) ซึ่งเป็นค่าที่แสดงช่วงสีที่ปรากฏ นำไปเปรียบเทียบกับค่าสีจากการวัดด้วยสมุด
เทียบสีมาตรฐาน พบว่าการวิเคราะห์ค่าสีโดยใช้เครื่อง Hunter lab colorimeter มีความเข้มของสี อยู่ในช่วง 31.08-

60.55 ค่ามุมของสี อยู่ในช่วง 39.12-107.20 และมีลักษณะเฉดสีที่ปรากฏเป็นสีแดงถึงเหลืองเขียว สำหรับผลการวิเคราะห์ค่าสี โดยใช้สมุดเทียบสีมาตรฐาน พบว่า มีค่า 7.5R 3/12 ถึงค่า 2.5GY 4/6 แสดงเฉดสีในช่วงสีแดงถึงเหลืองเขียว สรุปได้ว่าทั้งสองวิธีได้ผลการวิเคราะห์สอดคล้องกัน

เมื่อพิจารณาค่าสีกับระยะการสุกของพริกที่ใช้ผลิตเครื่องแกงส้ม ดังแสดงในตารางที่ 1 ในสายพันธุ์ KHO.P พริกผลอ่อน (พริกดิบ) คือ KHO.1P ให้ช่วงสีเหลือง และพริกผลแก่ (พริกสุก) คือ KHO.2P ให้ช่วงสีส้มแดง ในสายพันธุ์ YOD.N พริกผลอ่อน คือ YOD.1N ให้ช่วงสีเหลืองเขียว และพริกผลแก่ คือ YOD.2N ให้ช่วงสีแดง ในพริกที่แสดงช่วงสีเหลืองเขียว ช่วงสีเหลือง ช่วงสีส้มแดง และช่วงสีแดง ค่ามุมของสีจะลดลงตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 2 พริกผลอ่อนจะให้ค่ามุมของสีสูงกว่าพริกผลแก่ และค่ามุมสีที่แตกต่างกันส่งผลให้แสดงช่วงสีแตกต่างกัน สอดคล้องกับงานวิจัยของ [11] ซึ่งการเปลี่ยนสีของพริกตามช่วงระยะการสุก เกิดจากการสลายตัวของคลอโรฟิลล์และการเกิดสารแคโรทีนอยด์ที่ติดอยู่ในโครโมพลาสต์ชั้นเนื้อผลพริก [12] ที่แตกต่างกัน พริกผลอ่อนจะมีผลสีเขียวซึ่งสารเขียว คือ คลอโรฟิลล์ พบได้ทั้งชนิดเอ และ บี เมื่อพริกเริ่มสุกรงควัตถุคลอโรฟิลล์ทั้งสองชนิดจะทำหน้าที่เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์สารให้เฉดสีถัดมา คือ สารกลุ่มแคโรทีนอยด์ ซึ่งรงควัตถุกลุ่มนี้จะให้เฉดสีเหลือง ส้มแดง และแดง โดยการเปลี่ยนสีเริ่มจากการเปลี่ยนแปลงพันธะคู่นววงแหวนของโครงสร้างโมเลกุลของ Lutein ที่ให้สีเหลือง เป็น Zeaxanthin ที่ให้สีส้ม จากนั้นมีการสลายตัวของพันธะคู่นววงแหวนเป็น Antheraxanthin และ Violaxanthin ที่ให้สีส้มแดงที่ต่างออกไป และเกิดการเปลี่ยนแปลงเชิงโครงสร้างด้วยกระบวนการจัดเรียงอะตอมในโมเลกุลแบบ Pinacol rearrangements เกิดเป็น Capsanthin, Capsanthin-5, 6-epoxide และ Capsorubin ซึ่งเป็นรงควัตถุสีแดงเข้ม [13] จะเห็นได้ว่าค่าสีขึ้นอยู่กับ สายพันธุ์ ระยะการสุกของผล รวมถึงแหล่งเพาะปลูก สภาพแวดล้อมในการปลูกพริก [14]

ตารางที่ 2 แสดงค่าสีของสายพันธุ์พริกที่ใช้ผลิตเครื่องแกงส้มปักษ์ใต้ โดยใช้เครื่อง Hunter lab colorimeter^a และสมุดเทียบสีมาตรฐาน (Munsell book)

สายพันธุ์พริก	ค่าจากเครื่อง Hunter lab colorimeter					ค่าจาก Munsell book	เฉดสีที่ปรากฏ
	L*	a*	b*	ค่าความเข้มของสี (C)	ค่ามุมของสี (H°)		
KHO.1P	69.10 ± 0.61	0.17 ± 0.36	32.45 ± 0.59	32.45 ± 0.82	89.70 ± 0.21	7.5Y 8/4	เหลือง
KHO.2P	49.71 ± 0.75	37.79 ± 0.67	43.73 ± 0.39	57.80 ± 0.57	49.17 ± 0.48	2.5YR 5/14	ส้มแดง
KAR.2R	41.50 ± 0.98	41.69 ± 0.47	38.79 ± 0.52	56.94 ± 0.32	42.94 ± 0.18	8.7R 4/12	แดง
JIN.2K	29.53 ± 0.98	38.68 ± 0.52	33.77 ± 0.78	51.35 ± 0.45	41.12 ± 0.26	8.75R 4/14	แดง
YOD.1N	37.85 ± 0.57	-9.19 ± 0.84	29.69 ± 0.40	31.08 ± 0.39	107.20 ± 0.39	2.5GY 4/6	เหลืองเขียว
YOD.2N	36.46 ± 0.63	43.57 ± 0.72	42.05 ± 0.62	60.55 ± 0.57	43.98 ± 0.73	10R 4/12	แดง
KEN.2R	31.95 ± 0.89	35.76 ± 0.69	34.98 ± 0.28	50.02 ± 0.86	44.37 ± 0.18	10R 4/12	แดง
KEN.2P	31.38 ± 0.72	41.05 ± 0.38	33.38 ± 0.73	52.91 ± 0.54	39.12 ± 0.86	7.5R 3/12	แดง

^a Data are expressed as means ± standard deviation, n = 3; L* = Lightness value, a* = Redness value, b* = Yellowness value

3.1.3 ผลการวิเคราะห์ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (TSS) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ปริมาณกรดทั้งหมด (TA) และดัชนีความสุก (MI) ของพริกที่ใช้ผลิตเครื่องแกงส้มปักษ์ใต้

จากการวิเคราะห์ค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด ค่าความเป็นกรด-ด่าง ปริมาณกรดทั้งหมด และดัชนี ความสุกในตัวอย่างพริก พบว่ามีค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดอยู่ในช่วง 6.0-13.0 °Brix ค่าความเป็นกรด-ด่างอยู่ในช่วง 5.09-5.60 ปริมาณกรดทั้งหมดอยู่ในช่วงร้อยละ 0.11-0.18 และดัชนีความสุกอยู่ในช่วง 35.3- 86.7 ซึ่งค่าดังกล่าวมีความแตกต่างกันตามสายพันธุ์ แหล่งเพาะปลูก สภาพแวดล้อมในการปลูก และระยะการสุกของผลพริก ดังแสดงในตาราง ที่ 3

เมื่อพิจารณาค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด ปริมาณกรดทั้งหมด และดัชนีความสุกของผล ดังแสดงในตารางที่ 3 พบว่า พริกสีแดงมีค่าดัชนีความสุกของผลพริกสูงกว่าพริกสีเขียว เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง

โพลีแซคคาไรด์ในผนังเซลล์ของพืชกลายเป็นน้ำตาล [15] ส่งผลให้มีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดสูงขึ้น และในระหว่างการสุกพืชยังคงมีการหายใจเกิดขึ้น ส่งผลให้มีความเข้มข้นของกรดอินทรีย์เพิ่มขึ้น [16-17] ซึ่งในกระบวนการหายใจของพืชระหว่างการสุก เอนไซม์เพกตินเมทิลเอสเทอเรส (Pectinmethylesterase enzyme; PME) [18] ทำให้เกิดการไฮโดรไลซิสของเพกตินเมทิลเอสเทอร์ (Pectin methylester) เกิดเป็นกรดโพลีกลาลักตูโรนิก (Polygalacturonic acid) และสารนี้จะถูกไฮโดรไลซิสต่อยด้วยเอนไซม์โพลีกลาลักตูโรเนส (Polygalacturonase enzyme; PG) เกิดเป็นกรดกาแลกทูโรนิก (Galacturonic acid) [16-17] จากการศึกษา สรุปได้ว่าเมื่อระยะการสุกของพริกในสายพันธุ์เดียวกันเพิ่มมากขึ้น ค่าดัชนีความสุกจะเพิ่มขึ้นเช่นกัน สอดคล้องกับงานวิจัยของ [19] ที่พบว่าเมื่อระยะการสุกของ Spinach pepper ในสายพันธุ์ Fresno de la vega และ Benavente-los valles มากขึ้น ส่งผลให้มีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดและปริมาณกรดทั้งหมดมีค่าสูงขึ้น และสอดคล้องกับงานวิจัย [15] ที่พบว่าเมื่อระยะการสุกของ Yellow bell pepper เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดและปริมาณกรดทั้งหมดมีค่าสูงขึ้น

ตารางที่ 3 ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (TSS) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ปริมาณกรดทั้งหมด (TA) และดัชนี ความสุก (TSS/TA) ของพริกที่ใช้ผลิตเครื่องแกงส้มปักษ์ใต้^a

สายพันธุ์พริก	TSS (°Brix)	pH	TA (ร้อยละ)	TSS/TA
KHO.1P	6.8 ± 0.10	5.60 ± 0.03	0.11 ± 0.01	61.8 ± 0.86
KHO.2P	10.1 ± 0.15	5.31 ± 0.01	0.13 ± 0.02	77.7 ± 0.92
KAR.2R	13.0 ± 0.06	5.23 ± 0.06	0.15 ± 0.02	86.7 ± 0.87
JIN.2K	11.1 ± 0.06	5.23 ± 0.06	0.18 ± 0.01	61.7 ± 0.94
YOD.1N	6.0 ± 0.10	5.40 ± 0.03	0.17 ± 0.03	35.3 ± 0.81
YOD.2N	9.9 ± 0.25	5.40 ± 0.05	0.17 ± 0.02	55.0 ± 1.09
KEN.2R	12.8 ± 0.10	5.29 ± 0.03	0.167 ± 0.03	80.0 ± 0.61
KEN.2P	9.1 ± 0.11	5.09 ± 0.05	0.15 ± 0.02	60.7 ± 0.65

^aData are expressed as means ± standard deviation, n=3

3.2 ผลการศึกษาสมบัติทางเคมีของพริกที่ใช้ผลิตเครื่องแกงส้มปักษ์ใต้

จากผลการวิเคราะห์ปริมาณสารแคปไซซินอยด์ในตัวอย่างพริก พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 3,048.64-6,832.56 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง โดยพริกที่มีปริมาณสารแคปไซซินอยด์สูงที่สุด คือ YOD.1N รองลงมา คือ KAR.2R, KEN.2P, YOD.2N, KHO.1P, KEN.2R, KHO.2P และ JIN.2K ตามลำดับ และมีปริมาณแคปไซซินเป็น 1.64-3.38 เท่าของสารไดไฮโดรแคปไซซิน ดังแสดงในตารางที่ 4 ซึ่งสอดคล้องตาม [20] ที่ระบุว่าอัตราส่วนระหว่างสารแคปไซซินและสารไดไฮโดรแคปไซซินของพริกโดยทั่วไปมีปริมาณสารแคปไซซินเป็นประมาณ 2 เท่าของสารไดไฮโดรแคปไซซินขึ้นกับชนิดและสายพันธุ์พริก

จากผลการหาค่าดัชนีความเผ็ดของตัวอย่างพริก พบว่า มีค่าดัชนีความเผ็ดอยู่ในช่วง 49,083.10-110,004.22 SHU และสามารถแบ่งระดับความเผ็ดได้เป็น 2 กลุ่ม คือ พริกที่มีระดับความเผ็ดมากที่สุด ได้แก่ YOD.1N รองลงมา คือ KAR.2R, KEN.2P, YOD.2N และ KHO.1P ตามลำดับ และพริกที่มีระดับความเผ็ดมาก ได้แก่ KEN.2R รองลงมา คือ KHO.2P และ JIN.2K ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4 และสามารถสรุปได้ว่าค่าดัชนีความเผ็ดมีความสัมพันธ์แบบแปรผันตรงกับปริมาณสารแคปไซซินอยด์

เมื่อเปรียบเทียบค่าดัชนีความสุก กับปริมาณแคปไซซินอยด์ในสายพันธุ์พริกเดียวกัน ดังแสดงในตารางที่ 3 และ 4 พบว่า KHO.2P มีปริมาณแคปไซซินอยด์ต่ำกว่า KHO.1P และ YOD.2N มีปริมาณแคปไซซินอยด์ต่ำกว่า YOD.1N เนื่องจากพริกสีแดง (พริกผลแก่) มีค่าดัชนีความสุกสูง มีกิจกรรมการทำงานของเอนไซม์เปอรอกซิเดสสูงกว่าพริกสีเขียว ซึ่งเอนไซม์นี้สามารถออกซิไดส์สารแคปไซซินและไดไฮโดรแคปไซซินได้ [21] ทำให้ระดับแคปไซซินอยด์ มีการเปลี่ยนแปลงในอัตราที่ลดลง ส่งผลให้ปริมาณสารให้ความเผ็ดลดลง [22] และพบว่า ปริมาณสารแคปไซซินอยด์มีค่าแตกต่างกันตามสายพันธุ์ แหล่งเพาะปลูก สภาพแวดล้อมในการปลูก และระยะการสุก และสามารถสรุปได้ว่าค่าดัชนีความสุกมีความสัมพันธ์แบบแปรผันตรงกับปริมาณสารแคปไซซินอยด์

ตารางที่ 4 ปริมาณสารแคปไซซินอยด์^a และดัชนีความเผ็ดของพริกที่ใช้ผลิตเครื่องแกงส้มบักขี้ได๋

สายพันธุ์พริก	แคปไซซิน (mg/kg DW)	ไดไฮโดรแคปไซซิน (mg/kg DW)	แคปไซซินอยด์ (mg/kg DW)	จำนวนเท่าของแคปไซซินต่อไดไฮโดรแคปไซซิน	ดัชนีความเผ็ด (SHU)	ระดับความเผ็ด**
KHO.1P	3,754.36 ± 0.71	1,184.76 ± 0.85	4,939.12 ± 1.56	3.17	79,519.83	เผ็ดมากที่สุด
KHO.2P	2,455.52 ± 0.96	951.04 ± 0.51	3,406.56 ± 1.47	2.58	54,845.62	เผ็ดมาก
KAR.2R	5,165.72 ± 0.43	1,530.12 ± 0.91	6,695.84 ± 1.34	3.38	107,803.02	เผ็ดมากที่สุด
JIN.2K	2,167.44 ± 0.64	881.20 ± 0.49	3,048.64 ± 1.13	2.50	49,083.10	เผ็ดมาก
YOD.1N	4,244.16 ± 0.42	2,588.40 ± 0.76	6,832.56 ± 1.18	1.64	110,004.22	เผ็ดมากที่สุด
YOD.2N	3,429.68 ± 0.53	1,801.84 ± 0.86	5,231.52 ± 1.39	1.90	84,227.47	เผ็ดมากที่สุด
KEN.2R	2,938.96 ± 0.76	978.56 ± 0.45	3,917.52 ± 1.21	3.00	63,072.07	เผ็ดมาก
KEN.2P	4,403.72 ± 0.20	1,418.36 ± 0.37	5,822.08 ± 0.57	3.10	93,735.49	เผ็ดมากที่สุด

^a Data are expressed as means ± standard deviation, n = 3

หมายเหตุ: **ระดับความเผ็ด แบ่งเป็น 5 ระดับ [23]

1) ไม่เผ็ด (0-700 SHU) 2) เผ็ดน้อย (700-3,000 SHU) 3) เผ็ดปานกลาง (3,000-25,000 SHU)

4) เผ็ดมาก (25,000 -70,000 SHU) และ 5) เผ็ดมากที่สุด (> 80,000 SHU)

4. สรุป (Conclusion)

จากผลการตรวจวิเคราะห์ปริมาณแคปไซซินอยด์และสมบัติทางเคมีกายภาพของสายพันธุ์พริกที่ใช้ในการผลิตเครื่องแกงส้มบักขี้ได๋ในพื้นที่จังหวัดพัทลุงและสงขลา จำนวน 5 สายพันธุ์ ทั้งหมด 8 ตัวอย่าง พบว่า ค่าความสว่าง (L*) มีแนวโน้มลดลง และค่าความเป็นสีแดง (a*) ค่าความเป็นสีเหลือง (b*) ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด ค่าความเป็นกรด-ด่าง ปริมาณกรดทั้งหมดเพิ่มขึ้นเมื่อระยะการสุกเพิ่มขึ้น โดยผลพริกสีเขียวเปลี่ยนเป็นสีแดง สำหรับปริมาณสารแคปไซซินอยด์ และดัชนีความเผ็ดในพันธุ์พริกขาวชัยบุรีและพริกยอดสนเข้มจะลดลงเมื่อระยะการสุกเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ ขึ้นอยู่กับสายพันธุ์พริก ความอ่อนแก่ (ระยะการสุก) แหล่งปลูก สภาพแวดล้อมในการปลูก ในพริกสายพันธุ์อื่น ๆ ยังต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมจากผลการตรวจวิเคราะห์ตัวอย่างพริกสามารถจัดระดับความเผ็ดของพริกได้ 2 ระดับ คือ ระดับเผ็ดมากที่สุด (YOD.1N > KAR.2R > KEN.2P > YOD.2N > KHO.1P) และระดับเผ็ดมาก (KEN.2R > KHO.2P > JIN.2K) ตามลำดับ ในพริกสายพันธุ์เดียวกันที่ศึกษาพริกสีแดงจะมีปริมาณสารแคปไซซินอยด์น้อยกว่าพริกสีเขียว นอกจากนี้ ดัชนีความสุกของพริกที่เพิ่มขึ้น ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่า TSS และปริมาณกรดทั้งหมด เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโพลีแซคคาไรด์ในผนังเซลล์ของพืชกลายเป็นน้ำตาล และในระหว่างการสุกของพริกยังคงมีการหายใจเกิดขึ้น ทำให้ความเข้มข้นของกรดอินทรีย์เพิ่มขึ้น รวมถึงกระบวนการหายใจของพืชระหว่างการสุกส่งผลให้เกิดกิจกรรมของเอนไซม์เปอร์ออกซิเดสไปสลายสารแคปไซซิน ทำให้ปริมาณสารให้ความเผ็ดลดลง ดังนั้น องค์ความรู้จากการวิจัยสามารถใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงปริมาณสารแคปไซซินอยด์ (ระดับความเผ็ด) ของวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ ประกอบกับเครื่องแกงส้มบักขี้ได๋มีการใช้พริกหลายสายพันธุ์รวมกับการใช้พริกสายพันธุ์พื้นถิ่นที่มีความเผ็ดร้อน และให้กลิ่นรสเป็นอัตลักษณ์ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์และเป็นเกณฑ์มาตรฐานสำคัญใช้ซื้อขายพริกในตลาดโลก ผู้การนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมอื่น ๆ ต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณกองผลิตภัณฑ์อาหารและวัสดุสัมผัสอาหาร ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ เครื่องมือ และให้คำแนะนำปรึกษาด้านวิเคราะห์ทดสอบเพื่อพัฒนางานวิจัยนี้ ขอขอบคุณกองเทคโนโลยีชุมชน กรมวิทยาศาสตร์บริการ ที่ช่วยสนับสนุนการทำโครงการวิจัยนี้ และขอบคุณสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัย

6. ข้อเสนอแนะ (Recommendation)

งานวิจัยนี้ควรต่อยอดการศึกษาระยะการสุกของผลพริกสดที่มีต่อปริมาณสารแคปไซซินอยด์ของแต่ละสายพันธุ์พริก โดยเฉพาะพริกขี้หนู เนื่องจากพบว่ามีความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารแคปไซซินอยด์สูง โดยมีการระบุแหล่งเพาะปลูก สภาพแวดล้อมในการปลูก รวมถึงวิธีการสุกเก็บตัวอย่างและการเก็บรักษาตัวอย่างหลังการเก็บเกี่ยว เพื่อรักษาคุณภาพและปริมาณสารสำคัญของผลพริกสดไว้

ผู้วิจัยสามารถนำข้อมูลจากงานวิจัยไปจัดทำเป็นฐานข้อมูลเพื่อขึ้นปริมาณ ระดับความเผ็ดของแต่ละสายพันธุ์พริก และสามารถใช้อ้างอิงในการเลือกพันธุ์พริกหรือการหาพันธุ์พริกทดแทนในช่วงวัตถุดิบขาดแคลน เนื่องจากความเผ็ดเป็นปัจจัยสำคัญในการกำหนดคุณภาพวัตถุดิบที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ต่อความต้องการของผู้ผลิต และการยอมรับของผู้บริโภค ทั้งนี้ผู้การนำไปใช้ประโยชน์ในภาคอุตสาหกรรมแปรรูปอาหาร และภาคการผลิตอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องต่อไป เช่น การสกัดสารจากผลพริกที่มีฤทธิ์ทางชีวภาพและมีสมบัติเป็นยาต่อไปในอนาคตได้

7. เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] ทัดดาว ภาชีผล ปันดดา มาลาศรี และสุภาวดีดา ศรีลำไย. สมบัติทางเคมีกายภาพของสารสกัดจากพริก ขี้พ่าที่ใช้ตัวทำละลายที่ไม่ใช้น้ำ. มหาสารคาม: ภาควิชาเทคโนโลยีการอาหารและโภชนาการ คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม, 2560.
- [2] นนทวัฒน์ ปรีดาภักทพงษ์. การผลิตโพลีเอสเตอร์และสีน้ำมันจากพริก. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2537.
- [3] ขวัญชัย ชอบสำราญ และคณะ. ผลของแสงสว่างที่มีต่อการเปลี่ยนสีของไส้กรอกหมูในระหว่างการจัดเก็บ. การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ครั้งที่ 54 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2559, 319-326.
- [4] นิจุรา ทูลธรรม. เคี้ยวเคี้ยวความเผ็ดและกลิ่นของพริกแห้ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2557.
- [5] AOAC. Office Method of Analysis. 20th ed. Association of Official Analytical Chemists. VA.: U.S.A., 2016.
- [6] สายชล เกตุษา และคณะ. การเจริญเติบโต การเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมี และดัชนีการเก็บเกี่ยวของผลมะม่วงพันธุ์ทองคำ. 2534, 25 (4), 391-399.
- [7] พันธุ์ทิพย์ ปานกลาง. ลักษณะทางกายภาพ ปริมาณ oleoresin และความเผ็ดของผลพริก. นครปฐม: ภาควิชาพืชสวน คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2547.
- [8] ประเสริฐ ประภานภินันท์. เปรียบเทียบเทคนิคการสกัดสารแคปไซซินในพริกพันธุ์ต่าง ๆ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2544.
- [9] KRAIKRUAN, W., S. SUKPRAKARN, O. MONGKOLPORN, and S. WASEE. Capsaicin and Dihydrocapsaicin Contents of Thai Chili Cultivars. *Kasetsart Journal (Natural Science)*. 2008. 42, 611-616
- [10] SRICHAROEN, P., N. LAMAIPHAN, P. PATTHAWARO, N. LIMCHOOOWONG, S. TECHAWONGSTIEN, and S. CHANTHAI. Phytochemicals in Capsicum oleoresin from different varieties of hot chilli peppers with their antidiabetic and antioxidant activities due to some phenolic compounds. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2017, 38, 629-639.
- [11] วสุ อมฤตสุทธิ. การศึกษาสถานภาพการผลิต และความสัมพันธ์ของสิ่งแวดล้อมที่มีผลต่อผลผลิต คุณภาพ และปริมาณสาร capsaicin ในพริกพันธุ์การค้า กรณีศึกษา : จังหวัดอุบลราชธานี และศรีสะเกษ. มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 2548.
- [12] VERA-GUZMAN, A.M., J. L. CHAVEZ-SERVIA., J. C. CARRILLO-RODRIGUEZ., and M. G. LOPEZ. Phytochemical evaluation of wild and cultivated pepper (*Capsicum annuum* L. and *C. Pubescens* Ruiz & Pav.) from Oaxaca, México. *Chilean Journal of Agricultural Research*. 2011, 71(4), 578-585.
- [13] อรไท สวัสดิชัยกุล. ชีวเคมีของพริก ตอนที่ 1 สีสันแสนสวยด้วยเม็ดสีที่แตกต่างกัน. *วารสารอาหาร*. 2558, 45(4), 23-28.
- [14] GIUFFRIDA, D., P. DUGO, G. TORRE, C. BIGNARDI, A. CAVAZZA, C. CORRADINI, and G. DUGO. Characterization of 12 Capsicum varieties by evaluation of their carotenoid profile and pungency determination. *Food Chemistry*. 2013, 140(4), 794-802.

- [15] ANTONIALI, S., P.A.M. LEAL, A.M. MAGALHÃES, R.T. FUZIKI, and J. SANCHES. Physico-chemical characterization of 'ZARCO HS' yellow bell pepper for different ripeness stages. *Science Agricultural*. 2007, **64**(1), 19-22.
- [16] MIRANDA-MOLINA, F. D., S. VALLE-GUADARRAMA, D. GUERRA-RAMIREZ, M. D. L. AREVALO-GALARZA, M. PEREZ-GRAJALES, and F. ARTES-HERNÁNDEZ. Quality attributes and antioxidant properties of Serrano chili peppers (*Capsicum annum* L.) affected by thermal conditions postharvest. *International Food Research Journal*. 2019, **26**(6), 1889-1898.
- [17] SAMIRA, A., K. WOLDETSADIK, and T.S. WORKNEH. Postharvest quality and shelf life of some hot pepper varieties. *Journal of Food Science and Technology*. 2013, **50**(5), 842-855.
- [18] Soethe, C., C. A. STEFFENS, L.M. MATTOS, N. A FERREIRA, and D.M. MAYER. Postharvest quality and functional compounds in "dedo-de-moça" 'BRS Mari' pepper fruit at different stages of maturity. *Ciência Rural, Santa Maria*. 2016, **46**(8), 1322-1328.
- [19] BERNARDO, A., S. MARTINEZ, M. ALVAREZ, A. FERNANDEZ, and M. LOPEZ. The composition of two spinash pepper varieties (Fresno De La Vega and Benavente-Los Valles) in different ripening stages. *Journal of Food Quality*. 2008, **31**(6), 701-716.
- [20] GOVINDARAJAN, V.S. and M.N. SATHYANARAYANA. Capsicum-production, technology, chemistry, and quality. Part V. Impact on physiology, pharmacology, nutrition, and metabolism; structure, pungency, pain, and desensitization sequences. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 1991, **29**(6), 435-473.
- [21] MANIKHARDA., M. TAKAHASHI, M. ARAKAKI, K. YONAMINE, F. HASHIMOTO, K. TAKARA, and K. WADA. Influence of fruit ripening on color, organic acid contents, capsaicinoids, aroma compounds, and antioxidant capacity of shimatogarashi (*Capsicum frutescens*). *Journal of Oleo Science*. 2018, **67**(1), 113-123.
- [22] พัฒนา ภาสอน ถวิล ชนะบุญ สมบัติ อัมมะระกา และ เรียมจิตร สุทธิโชคเชื้อก. ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารแคปไซซินอยด์ของพริกน้อย (*Capsicum frutescens* Linn.) และคุณสมบัติเคมีของดิน. *Journal of Science and Technology Mahasarakham University*. 2012, **31**(3), 211-216.
- [23] WEISS, E.A. *Spice crops*. London : CABI publishing, 2002. 411 p.

เตียงพลิกผู้ป่วยอัตโนมัติราคาประหยัด A Low-cost automatic flipping patient bed

สมพล โคศรี^{2*}, ศักดิ์สิทธิ์ ดีอ่ำ¹
Sompol Kosri^{2*}, Saksit Deem¹

รับบทความ: 21 กุมภาพันธ์ 2565 แก้ไขบทความ: 20 กรกฎาคม 2565 ยอมรับตีพิมพ์: 9 สิงหาคม 2565

13

บทคัดย่อ

เตียงพลิกผู้ป่วยมีความจำเป็นอย่างมากสำหรับงานพยาบาล เนื่องจากงานของพยาบาลและผู้ดูแลผู้ป่วยนั้นมีภาระงานมาก หากไม่ดูแลอย่างใกล้ชิดจะทำให้ผู้ป่วยมีโอกาสเกิดแผลกดทับสูงอีกทั้งการพลิกผู้ป่วยซึ่งมีจำนวนมาก ส่งผลให้พยาบาลหรือผู้ดูแลผู้ป่วยเจ็บหลังอีกด้วย ยิ่งไปกว่านั้น ในท้องตลาดเตียงพลิกผู้ป่วยอัตโนมัติมีราคาสูงและหาซื้อได้ไม่ง่าย จึงทำให้เกิดนวัตกรรมเตียงพลิกผู้ป่วยอัตโนมัติราคาประหยัดขึ้นมาเพื่อพลิกตัวผู้ป่วยอัตโนมัติลดโอกาสการเกิดแผลกดทับและอำนวยความสะดวกแก่ผู้ให้การพยาบาล เตียงพลิกผู้ป่วยอัตโนมัติราคาประหยัดทำงานด้วยระบบนิวเมติกส์ มีฟังก์ชันครบเหมือนเตียงไฟฟ้าทั่วไป พร้อมเบาะพีวีซี ซึ่งเป็นวัสดุอุปกรณ์ที่หาซื้อได้ตามท้องตลาดในประเทศ ทำให้ต้นทุนการผลิตเตียงดังกล่าวถูกกว่าเตียงไฟฟ้าที่มีจำหน่ายโดยทั่วไปตามท้องตลาดถึงร้อยละ 45 เตียงพลิกผู้ป่วยที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถเลือกการทำงานควบคุมด้วยมือและควบคุมแบบอัตโนมัติ มี 5 ฟังก์ชันการทำงาน คือ ฟังก์ชันเตียงปกติ ฟังก์ชันเคลื่อนไหวส่วนหัว ฟังก์ชันเคลื่อนไหวส่วนขา ฟังก์ชันเคลื่อนไหวส่วนซ้าย ฟังก์ชันเคลื่อนไหวส่วนขวา

Abstract

A flipping patient bed plays an essential role for nursing work. Since nurses' and caregivers' tasks are greatly burdensome, in case they are not closely supervised, their bedridden patients who are in need of being turned over periodically would be at risk of suffering from pressure ulcers. It also causes back pain among a nurse or a nursing caregiver. For this reason, an innovative flipping patient bed is initiated as an assistive equipment to automatically turn and position the patient in bed for alleviating the possibility of pressure ulcers and facilitating nursing caregivers' working operation. Thus, an inexpensive automated flipping patient bed for patients was invented, operated with pneumatics. Besides the mentioned automatic function, the proposed bed offers function similar to what general commercial electric bed do, as well as, its style and cushion material which is PVC. This allows this bed to be priced at 45% cheaper than commercially available electric beds. Manual and automatic modes can be selected with five main functions, namely normal function, header movement function, leg movement function, left-sided movement function, and right-sided movement function.

คำสำคัญ: เตียงผู้ป่วย ระบบนิวเมติก แผลกดทับ ราคาประหยัด

Keywords: Patient bed, Pneumatic system, Bedsore, Low-cost

¹กรมวิทยาศาสตร์บริการ

²คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ วิทยาเขตระยอง

*e-mail address: saksit@dss.go.th

**Corresponding author e-mail address: sompol.k@eat.kmutnb.ac.th

1. บทนำ (Introduction)

จากปัญหาการเปลี่ยนแปลงด้านประชากรในประเทศที่มีประชากรผู้สูงอายุเพิ่มมากขึ้น [2] ผู้สูงอายุเป็นวัยที่มีการเปลี่ยนแปลงทางด้านร่างกาย จิตใจอารมณ์ และสังคม ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงไปในทางเสื่อมถอยตามธรรมชาติ ทำให้มีโรคภัยไข้เจ็บเข้ามาเบียดเบียน โดยเฉพาะโรคเรื้อรังต่าง ๆ ส่งผลให้เกิดโรคเพิ่มมากขึ้นและเกิดภาวะทุพพลภาพสูงขึ้น การดูแลผู้สูงอายุที่ประสบกับภาวะทุพพลภาพเป็นหน้าที่สำคัญยิ่งของสังคมไทยในปัจจุบัน จากการเพิ่มขึ้นของประชากรผู้สูงอายุ (ผู้ที่มีอายุ 60 ปีขึ้นไป) ซึ่งทางองค์การอนามัยโลก (WHO, 1980) ให้คำจำกัดความของคำว่า “ภาวะทุพพลภาพ” หมายถึง ความจำกัดหรือ สูญเสียความสามารถในการประกอบกิจต่าง ๆ ที่ควรจะทำได้เป็นปกติ อันเป็นผลที่เกิดตามมาจากภาวะบกพร่องทางร่างกาย

1.1 ประเภทของผู้ป่วยทุพพลภาพ

ก. ทุพพลภาพถาวรสิ้นเชิง คือ ทุพพลภาพถึงขนาดไม่สามารถประกอบหน้าที่การงานใด ๆ ในอาชีพประจำหรืออาชีพอื่น ๆ โดยสิ้นเชิง เช่น อาจถูกรถชนจนทำให้เป็นอัมพาตไม่สามารถขยับตัวได้

ข. ทุพพลภาพถาวรบางส่วน คือ ทุพพลภาพถึงขนาดไม่สามารถประกอบหน้าที่การงานใด ๆ ในอาชีพประจำตลอดไป แต่ทำงานอื่นเพื่อ สิ้นจ้างได้ เช่น เดิมทำอาชีพคนงานก่อสร้าง แต่พลัดตกลงมาจากที่สูง ทำให้กระดูกสันหลังยุบและแตก เมื่อรักษาตัวแล้ว ก็ไม่สามารถยกของหนักหรือใช้แรงมาก ๆ ได้อีกต่อไป อาจจะต้องไปประกอบอาชีพอื่น ๆ แทน เช่น ขายลอตเตอรี่

ค. ทุพพลภาพชั่วคราวสิ้นเชิง คือ ทุพพลภาพถึงขนาดไม่สามารถประกอบหน้าที่การงานใด ๆ หรืออาชีพอื่น ๆ ได้โดยสิ้นเชิง ชั่วระยะเวลาหนึ่ง เช่น มีอาชีพพนักงานขับรถ เมื่อเกิดอุบัติเหตุทำให้ขาบาดเจ็บ ต้องเข้าเฝือกทั้ง 2 ข้าง ทำให้ในช่วงการรักษาตัวไม่สามารถทำหน้าที่คนขับรถได้ เมื่อรักษาหายปกติแล้วจึงกลับไปทำตามเดิม

กรณีที่ผู้ป่วยที่อายุมากกว่า 70 ปีประมาณร้อยละ 70 เมื่อเกิดแผลกดทับ [1] จะเพิ่มความเสี่ยงต่อการเสียชีวิตถึง 4-6 เท่า และมีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่ออายุมากขึ้น ในประเทศไทยได้มีการศึกษาถึงอุบัติการณ์การเกิดแผลกดทับของผู้ป่วยที่เข้ารับการรักษาในโรงพยาบาลในภาพรวมในระยะเวลา 10 ปีที่ผ่านมาพบว่าสูงถึงร้อยละ 55 และจะสูงขึ้นเมื่อกลุ่มผู้ป่วยมีอายุมากกว่า 80 ปีขึ้นไป เป็นต้น

1.2 แผลกดทับ

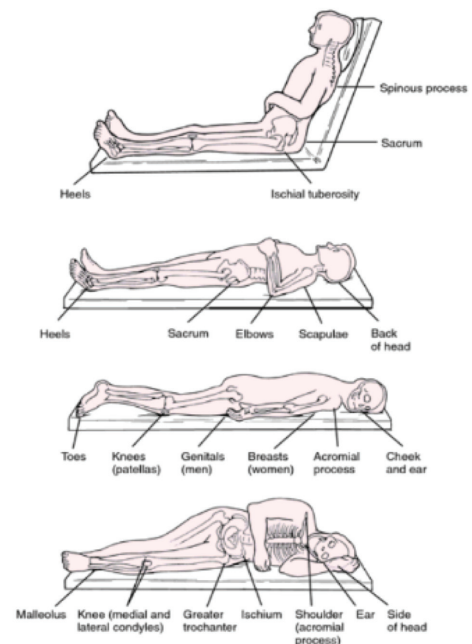
ตามปกติร่างกายคนเรามีก้นและผิวหนังปกคลุมร่างกายให้ปลอดภัยจากการบาดเจ็บจากอุบัติเหตุได้ในระดับหนึ่ง [3] แต่ทว่าเมื่อมีปัจจัย เข้ามาทำให้ร่างกาย

เคลื่อนไหวได้น้อยไม่สามารถเคลื่อนไหวร่างกายได้ปกติ ต้องนอนนิ่ง ๆ เป็นเวลานาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในรายที่เจ็บป่วย เรื้อรังต้องนอนอยู่บนเตียงตลอดเวลาหรือนอนติดเตียง เช่น ไม่รู้สึกตัวหรือเป็นอัมพาต ทำให้การไหลเวียนเลือดไม่สะดวก เกิดการคั่งของเลือด ร่วมกับการขาดสารอาหารทำให้ชุ่มพอม ผิวหนังไม่แข็งแรงขาดความยืดหยุ่นจึงมีโอกาสเกิดแผลกดทับ (Bedsore หรือ Pressure sore) ได้ง่าย ตามปุ่มกระดูกต่าง ๆ ทั่วร่างกาย

แผลกดทับ [4] คือ การได้รับบาดเจ็บของผิวหนัง เนื้อเยื่อใต้ผิวหนัง กล้ามเนื้อ และกระดูกเป็นผลจากแรงกดหรือแรงกดร่วมกับแรงเสียดสี แรงเสียดทาน ทำให้นเนื้อเยื่อบริเวณที่ถูกกดขาดเลือดไปเลี้ยงจนเกิด เป็นแผล แผลกดทับมักเกิดบริเวณเนื้อเยื่อที่อยู่เหนือปุ่มกระดูก พบบ่อย บริเวณกระดูกก้นกบ กระดูกสะโพก กระดูกเชิงกราน ตาตุ่ม เป็นต้น

1.3 ตำแหน่งของแผลกดทับ

แผลกดทับมักเกิดบริเวณปุ่มกระดูก เช่น สะดก ได้ เบนเหน็บ ก้นกบ ก้นย้อย เข่าด้านใน ตาตุ่ม ส้นเท้า เป็นต้น ตำแหน่งของแผลกดทับ [5] มีความสัมพันธ์กับท่าของผู้ป่วย เช่น ท่านอนหงายมักเกิดแผลกดทับบริเวณใต้กระเบนเหน็บ (Sacrum) ท่านอนตะแคงเกิดแผลบริเวณปุ่มกระดูกด้านข้างข้อสะโพก (Greater trochanter) ท่านั่งมักเกิดแผลบริเวณปุ่มกระดูกรองนั่ง (Ischium) และกระดูกก้นกบ (Coccyx) หากมีแผลกดทับควรหลีกเลี่ยงท่าที่ทำให้เกิดการกดทับบริเวณแผลกดทับโดยตรง เช่น ถ้ามีแผลกดทับบริเวณกระดูกใต้กระเบนเหน็บ ให้หลีกเลี่ยงท่านอนหงาย แล้วเปลี่ยนเป็นท่านอนคว่ำหรือตะแคง ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ตำแหน่งแผลกดทับที่พบบ่อยเมื่อนอนท่าต่าง ๆ ที่มา: <https://medical-dictionary.thefreedictionary.com/pressure+ulcer>

1.4 ชนิดของเตียงพลิกผู้ป่วย

1.4.1 เตียงทั่วไป

เตียงพลิกผู้ป่วยแบบทั่วไปที่มีการติดตั้งมือหมุนไถ่เตียงเอาไว้ที่บริเวณปลายเตียง คือข้อจำกัดในเรื่องของการปรับระดับหรือควบคุมการทำงานของเตียงผู้ป่วยแบบธรรมดาซึ่งผู้ป่วยไม่สามารถทำการควบคุมได้ด้วยตัวเองและต้องพึ่งพาผู้ดูแลในการช่วยปรับระดับเตียงผู้ป่วยแบบธรรมดาให้อยู่เสมอ ซึ่งข้อจำกัดเหล่านี้ถือเป็นสาเหตุสำคัญที่จะทำให้ผู้ป่วยหรือผู้สูงอายุเกิดความรู้สึกด้อยค่าในตัวเองมากยิ่งขึ้นจากการที่ไม่สามารถทำการควบคุมหรือช่วยเหลือตัวเองได้ตั้งใจ จนทำให้เกิดความเครียดสะสมที่อาจนำไปสู่การเกิดความผิดปกติทางอารมณ์และการเกิดภาวะซึมเศร้าได้ในอนาคตหากไม่ได้รับการรักษาและเยียวยาอย่างทันท่วงที

1.4.2 เตียงไฟฟ้า

การใช้งานเตียงพลิกผู้ป่วยไฟฟ้าที่ผู้ป่วยหรือผู้สูงอายุสามารถควบคุมการใช้งานผ่านรีโมทหรือปุ่มกดได้ด้วยตัวเอง จะช่วยให้ผู้ป่วยหรือผู้สูงอายุที่ยังสามารถช่วยเหลือตัวเองได้ สามารถทำการควบคุมและปรับระดับเตียงผู้ป่วยไฟฟ้าเพื่อการขยับตัวลุกขึ้นนั่ง เดิน หรือช่วยเหลือตัวเองในเรื่องต่าง ๆ ได้อย่างสะดวกมากยิ่งขึ้น โดยที่ไม่จำเป็นต้องร้องขอความช่วยเหลือจากผู้ดูแลอยู่ตลอดเวลา ซึ่งการใช้งานเตียงผู้ป่วยไฟฟ้าที่ช่วยสนับสนุนให้ผู้ป่วยหรือผู้สูงอายุสามารถช่วยเหลือตัวเองได้มากขึ้นนั้นเองก็นับได้ว่าเป็นวิธีการที่ดีที่สุดที่จะสามารถช่วยให้ผู้ป่วยเกิดความรู้สึกภาคภูมิใจ และช่วยเพิ่มความรู้สึกมีคุณค่าในตัวเองให้กับผู้ป่วยและผู้สูงอายุได้มากยิ่งขึ้น

1.4.3 เตียงอัตโนมัติ

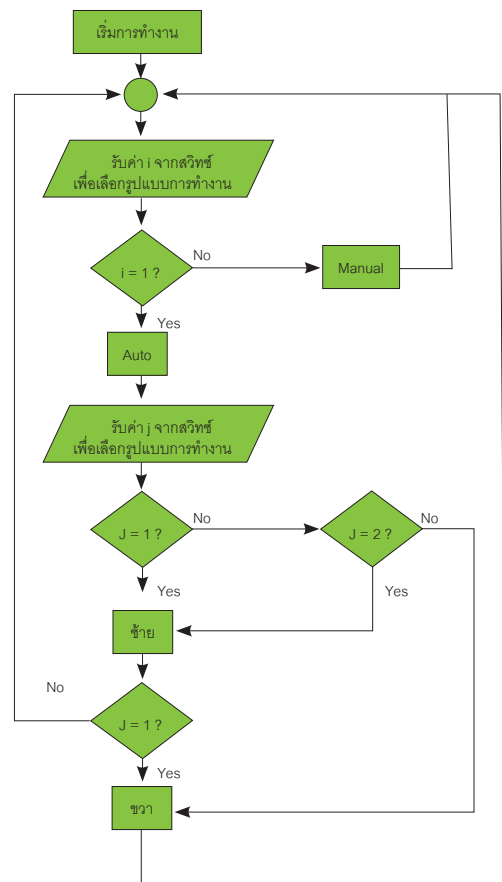
เตียงพลิกผู้ป่วยอัตโนมัติสามารถปรับระดับเตียงเพื่อให้พยาบาลและผู้ดูแลผู้ป่วยใช้งานได้อย่างเหมาะสม เมื่อพยาบาลและผู้ดูแลผู้ป่วยนำผู้ป่วยขึ้น-ลงจากวิลแชร์ไปสู่เตียง นอกจากนี้ยังสามารถตั้งโปรแกรมกำหนดระยะเวลาให้เตียงเคลื่อนไหวทุก ๆ กี่นาที หรือทุกชั่วโมงเป็นไปโดยอัตโนมัติ กลไกการทำงานของเตียงพิเศษช่วยพลิกตะแคงตัวผู้ป่วยที่อ่อนแรง คือเตียงจะค่อย ๆ ตะแคงไปเรื่อย ๆ ด้านหนึ่งมีที่กั้นเตียงไว้ประมาณ 20 องศา จากนั้นจะตะแคงกลับมามีอีกด้านหนึ่ง มีกลไกเซ็นเซอร์สลับกันไปมาตลอด ด้วยหลักการดังกล่าวจะทำให้คนไข้เปลี่ยนจุดกดทับ สามารถป้องกันแผลกดทับได้ดี และตัดปัญหาคนไข้เวียนศีรษะ

ดังนั้นการดูแลผู้ป่วยอัมพาตจำเป็นต้องพลิกตัวเป็นประจำภายใน 2 ชั่วโมง จึงมีความจำเป็นอย่างมากเพื่อป้องกันการเกิดแผลกดทับ ซึ่งการดูแลผู้ป่วยในเรื่องนี้ต้องเสียเวลาของพยาบาลและผู้ดูแลผู้ป่วยไม่น้อย เพราะหากไม่ทำแรงดันกดทับและความชื้นสะสมจากการที่อยู่ในตำแหน่งเดิม ทำให้เกิดแผลกดทับได้ และยิ่งผู้ป่วยเป็นโรค

เบาหวานด้วยแล้วหากเกิดแผลกดทับ แผลนั้นจะลุกลามได้รวดเร็วและรักษายากมากยิ่งขึ้น แต่เนื่องจากเตียงพลิกผู้ป่วยแบบอัตโนมัติที่มีขายทั่วไปยังมีราคาสูง ทำให้ผู้ป่วยส่วนมากถึงเตียงชนิดนี้ยังมีจำนวนน้อยอยู่ จึงได้เกิดเตียงพลิกผู้ป่วยอัตโนมัติราคาประหยัด เพื่อช่วยเหลือผู้ป่วยที่มีรายได้น้อยแต่มีความจำเป็นต้องใช้เตียงชนิดนี้ ให้เข้าถึงเตียงชนิดนี้ได้ง่ายขึ้น

2. วิธีการวิจัย (Experimental methods)

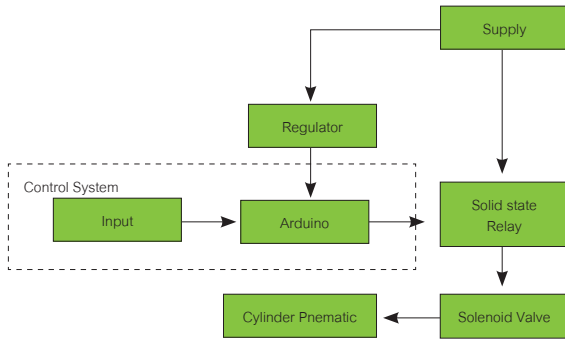
2.1 แผนภูมิเงื่อนไขการทำงาน



รูปที่ 2 แผนภูมิเงื่อนไขการทำงาน

แผนภูมิการทำงานของระบบควบคุมในเตียงพลิกผู้ป่วยอัตโนมัติราคาประหยัด โดยรับค่าจากสวิทช์เพื่อเลือกรูปแบบการทำงาน ถ้า $i = 1$ ทำงานที่โหมด อัตโนมัติถ้า $i \neq 1$ ทำงานที่โหมดด้วยมือ และเมื่อเข้าโหมดอัตโนมัติแล้วจะรับค่าจากสวิทช์เพื่อเลือกโหมดการทำงาน ถ้า $j = 1$ ทำการพลิกซ้ายและพลิก ขวา แล้ววนไปปรับค่า i ใหม่ ถ้า $j = 2$ ให้ทำการพลิกซ้ายแล้ววนไปปรับค่า i ใหม่ แต่ถ้า $j \neq 1$ และ $j \neq 2$ ให้ทำการพลิกขวาแล้ววนไปปรับค่า i ใหม่

2.2 ไลอะแกรมระบบควบคุม



รูปที่ 3 ไลอะแกรมระบบควบคุม

ออกแบบระบบควบคุมโดยแหล่งจ่ายไฟฟ้า (Power Supply) จะจ่ายไฟฟ้าให้อุปกรณ์ปรับระดับแรงดันไฟฟ้าเพื่อที่จะจ่ายไฟฟ้าให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่จะใช้ควบคุมสัญญาณที่ส่งไปยังโซลิดสเตตรีเลย์ (Solid state Relay) โดยโซลิดสเตตรีเลย์จะรอคำสั่งข้อมูลจากในการควบคุมระบบไฟฟ้าที่จะจ่ายให้ โซลินอยด์วาล์ว (Solenoid Valve) หรือ วาล์วที่ทำงานด้วยไฟฟ้าที่ใช้ควบคุมระบบนิวเมติกส์ที่ใช้เคลื่อนตำแหน่งของเตียงตามฟังก์ชันที่ต้องการ

2.3 การออกแบบโครงสร้างทางกล

จำลองการออกแบบโครงสร้างและการทำงานเตียงพลิกผู้ป่วยอัตโนมัติราคาประหยัดโดยใช้โปรแกรมเขียนแบบ 3 มิติ



รูปที่ 4 เตียงปกติ



รูปที่ 5 เตียงเคลื่อนไหวนส่วนหัว



รูปที่ 6 เตียงเคลื่อนไหวนส่วนขา



รูปที่ 7 เตียงเคลื่อนไหวนส่วนซ้าย



รูปที่ 8 เตียงเคลื่อนไหวนส่วนขวา

ออกแบบโครงสร้างเตียงพลิกผู้ป่วยอัตโนมัติราคาประหยัดและทดลองการเคลื่อนไหวด้วยระบบนิวเมติกส์ด้วยโปรแกรม 3 มิติ มีการทำงาน 5 ฟังก์ชัน คือ ฟังก์ชันที่ 1 ใช้งานด้วยการนอนรูปแบบเตียงปกติ ดังรูปที่ 4 ฟังก์ชันที่ 2 ใช้งานสำหรับเคลื่อนไหวนส่วนหัว ดังรูปที่ 5 ฟังก์ชันที่ 3 ใช้งานสำหรับเคลื่อนไหวนส่วนขา ดังรูปที่ 6 ฟังก์ชันที่ 4 ใช้สำหรับเคลื่อนไหวนส่วนซ้ายเพื่อการเอียงตัวผู้ป่วย ดังรูปที่ 7 ฟังก์ชันที่ 5 ใช้สำหรับเคลื่อนไหวนส่วนขวาเพื่อการเอียงตัวผู้ป่วย ดังรูปที่ 8

2.4 ภาพงานจริง



รูปที่ 9 เตียงปกติจริง



รูปที่ 10 เตียงเคลื่อนไหวนส่วนหัวจริง



รูปที่ 11 เตียงเคลื่อนไหวนส่วนขาจริง



รูปที่ 12 เตียงเคลื่อนไหวนอนผู้ป่วยจริง



รูปที่ 13 เตียงเคลื่อนไหวนอนผู้ป่วยจริง

3. ผลและวิจารณ์ (Results and discussion)

การดำเนินการทดสอบโดยทดสอบกับเตียงต้นแบบ ทำการจับเวลาการเคลื่อนที่ขึ้น-ลงสุดของส่วนหัว ส่วนขา ส่วนซ้าย และส่วนขวา โดยใช้นาฬิกาจับเวลา (Stop watch) ที่เชื่อถือได้ ยี่ห้อ Casio รุ่น HS-3V-1BR และทำการวัดมุม ระดับองศาโดย Digital angle gauge meter 360 โดยแต่ละค่าทำการทดสอบซ้ำ 3 ครั้ง และหาค่าเฉลี่ยนำมาบันทึกลงในตารางผลการทดสอบ ตารางที่ 1-4

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบฟังก์ชันเคลื่อนไหวนอนส่วนหัว

ส่วนหัว	เวลาของการขึ้น (วินาที)	เวลาของการลง (วินาที)	ระดับองศา
ครั้งที่ 1	4.46	3.01	35
ครั้งที่ 2	4.39	2.83	38
ครั้งที่ 3	4.65	2.83	37
ครั้งที่ 4	4.00	2.90	38
ครั้งที่ 5	4.52	2.69	38

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบฟังก์ชันเคลื่อนไหวนอนส่วนขา

ส่วนหัว	เวลาของการขึ้น (วินาที)	เวลาของการลง (วินาที)	ระดับองศา
ครั้งที่ 1	1.45	2.50	30
ครั้งที่ 2	1.70	2.11	29
ครั้งที่ 3	1.71	2.04	29
ครั้งที่ 4	1.97	2.23	29
ครั้งที่ 5	1.84	2.17	30

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบฟังก์ชันเคลื่อนไหวนอนซ้าย

ส่วนหัว	เวลาของการขึ้น (วินาที)	เวลาของการลง (วินาที)	ระดับองศา
ครั้งที่ 1	5.19	5.25	21
ครั้งที่ 2	5.51	4.45	21
ครั้งที่ 3	3.94	4.53	21
ครั้งที่ 4	5.89	5.65	20
ครั้งที่ 5	4.00	4.58	21

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบฟังก์ชันเคลื่อนไหวนอนขวา

ส่วนหัว	เวลาของการขึ้น (วินาที)	เวลาของการลง (วินาที)	ระดับองศา
ครั้งที่ 1	3.34	1.78	25
ครั้งที่ 2	3.48	1.32	25
ครั้งที่ 3	3.35	1.86	26
ครั้งที่ 4	3.67	1.38	26
ครั้งที่ 5	3.75	1.45	25

4. สรุป (Conclusions)

ก่อนหน้านี้นเตียงพลิกตะแคงตัวจะเป็นระบบไฟฟ้าซึ่งนำไปใช้กับผู้ป่วยสูงอายุ ที่ไม่สามารถช่วยเหลือตัวเองได้ พบว่ามีอัตราการหายของแผลกดทับดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับผู้ป่วยที่ใช้เตียงธรรมดา ต่อมาจึงได้ออกแบบให้มีความทันสมัยมากยิ่งขึ้น รวมไปถึงการออกแบบเพื่อให้มีความสะดวกปลอดภัยและมีต้นทุนที่ไม่สูงมากนัก

ด้วยเหตุนี้จึงทำให้เกิดการประดิษฐ์เตียงพลิกตะแคงตัวด้วยระบบอัตโนมัติราคาประหยัด ซึ่งมีขนาดกว้าง 0.60 เมตร ยาว 1.35 เมตร สูง 0.64 เมตร น้ำหนักทดสอบ 45 กิโลกรัม โดยเคลื่อนไหวนอนด้วยระบบ มิวเมติกส์ ใช้ลมในการทำงานที่ 6 บาร์ ใช้ไฟฟ้าขนาด 220 โวลต์ 65 วัตต์ ต่อชั่วโมง มีการทำงานด้วยกัน 5 ฟังก์ชัน คือ ฟังก์ชันเตียงปกติ ฟังก์ชันเคลื่อนไหวนอนส่วนหัวเพื่อป้องกันการเกิดแรงกดทับบริเวณท้ายทอย ไบพู ไบหน้าและเพื่อยกศีรษะสูงเวลารับประทานอาหารหรือเวลาเปลี่ยนอริยาบถ มีเวลาของการขึ้นเฉลี่ย 4.4 วินาที เวลาของการลงเฉลี่ย 2.8 วินาทีเคลื่อนไหวนอนได้เฉลี่ย 37.2 องศา ฟังก์ชันเคลื่อนไหวนอนส่วนขาเพื่อป้องกันการเกิดแรงกดทับบริเวณใต้เข่า ข้อเข่า ส้นเท้า ตามีเวลาของการขึ้นเฉลี่ย 1.7 วินาที เวลาของการลงเฉลี่ย 2.2 วินาทีเคลื่อนไหวนอนได้เฉลี่ย 29.4 องศา ฟังก์ชันเคลื่อนไหวนอนซ้ายเพื่อป้องกันการเกิดแรงกดทับบริเวณกระดูกด้านขวา มีเวลาของการขึ้นเฉลี่ย 4.9 วินาที เวลาของการลงเฉลี่ย 4.9 วินาทีเคลื่อนไหวนอนได้ เฉลี่ย 20.8 องศา ฟังก์ชันเคลื่อนไหวนอนขวา

เพื่อป้องกันการเกิดแรงกดทับบริเวณกระดูกด้านซ้าย มีเวลาของการขึ้นเฉลี่ย 3.5 วินาที เวลาของการลงเฉลี่ย 1.6 วินาที เคลื่อนไหวได้เฉลี่ย 25.4 องศา โดยแสดงการเปรียบเทียบราคาเตียงไฟฟ้าที่มีจำหน่ายโดยทั่วไปตามท้องตลาดกับเตียงที่พัฒนาขึ้นดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบราคาเตียงไฟฟ้าทั่วไปกับเตียงที่พัฒนาขึ้น (ชนิด 5 โกร)

ชื่อทางการค้า	รุ่น	ราคา (บาท)	บริษัทตัวแทนจำหน่าย
เตียงต้นแบบ	Low-Cost	30,000	-
WN Medical	MK-A-03	57,000	บริษัท วรรณกานต์ เมดิคอล จำกัด
CU Medical Home	SKD-B	55,000	บริษัท แอ็ดเลอร์ จำกัด
Fasicare	FB-303	54,140	บริษัท ฟาซิแคร์ จำกัด
Lifepius	T43 Nature Extra	52,900	บริษัท ที โอ พี อีปอร์เท็กซ์ ปอร์ จำกัด
Pro Fascino	FB-301	52,000	บริษัท โปรฟาสซิโน จำกัด

หมายเหตุ: ราคาสืบค้น ณ เดือน กรกฎาคม พ.ศ. 2565

5. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

ขอขอบคุณผู้ให้ทุนสนับสนุนเพื่อสร้างเตียงพลิกผู้ป่วยอัตโนมัติราคาประหยัด จากโครงการ Startup Thailand League 2018, โครงการพัฒนานวัตกรรมผลิตภัณฑ์ร่วมกับสถาบัน-Startup University Model ธนาคารออมสิน

6. เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] พรทิพย์ สาริโส, ปิยะภร ไพรสนธิ์ และ อโนทัย เฉลิมศรี. ประสิทธิภาพการป้องกันการเกิดแผลกดทับของฟองนิลชนิดไม่มีการ เคลื่อนที่ของลมและชนิดที่มีการเคลื่อนที่ของลม : การศึกษาเบื้องต้น (Efficacy of a visco-elastic foam mattress and alternating-pressure air mattress in preventing pressure ulcers: a preliminary study). *วารสารสหภาพพยาบาล* [ออนไลน์]. กรกฎาคม-กันยายน 2559, 31(3), 83-96. เข้าถึงจาก: <https://he02.tci-thaijo.org/index.php/TJONC/article/view/49845> [เข้าถึงวันที่ 19 ธันวาคม 2564].

- [2] สมชาย วิริกรรมย์กุล, ดลพัฒน์ ยศธร, เกรียงศักดิ์ ธรรมอภิพล, สุพัตรา ศรีวณิชชากร และ กวินรัตน์ สุทธิสุนทร. สถานการณ์สุขภาพของผู้สูงอายุที่มีภาวะทุพพลภาพ : กรณีศึกษา อำเภอท่ามะกา และ อำเภอด่านมะขามเตี้ย จังหวัดกาญจนบุรี. *วารสารวิทยาลัยราชสุดาเพื่อการศึกษาและพัฒนาคนพิการ* [ออนไลน์]. มีนาคม 2561, 11(14), 24-42. เข้าถึงจาก: <https://rs.mahidol.ac.th/rs-journal/vol.11/vol.11-002.php> [เข้าถึงวันที่ 19 มกราคม 2564].
- [3] พัทนัย แก้วแพง และ โสรัต จันทเลิศ. ผลของการปฏิบัติการพยาบาลเพื่อลดความเสี่ยงต่อการเกิดแผลกดทับในผู้ป่วยศัลยกรรมกระดูกและข้อโรงพยาบาลสงขลานครินทร์. *สงขลานครินทร์เวชสาร. พศจิกายน-ธันวาคม 2555*, 30(6), 331-341.
- [4] สายฝน ไทยประดิษฐ์, วิภา แซ่เฮี้ย และเพลินพิศ สุธานีวัฒนานนท์. ผลของโปรแกรมควบคุมความเป็นกรดต่างของผิวหนังต่ออุบัติการณ์การเกิดแผลกดทับในผู้ป่วยสูงอายุที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดแผลกดทับ [ออนไลน์]. บทความวิจัยเสนอในการประชุมหาดใหญ่วิชาการ ครั้งที่ 4 เรื่อง การวิจัยเพื่อพัฒนาสังคมไทย วันที่ 10 พฤษภาคม 2556. เข้าถึงจาก: http://www.hu.ac.th/conference/conference2013/Proceedings2013/pdf/Book1/Describe6/701_1-9.pdf [เข้าถึงวันที่ 19 ธันวาคม 2564].
- [5] พัทนัย แก้วแพง และ โสรัต จันทเลิศ (2555) ผลของการปฏิบัติการพยาบาลเพื่อลดความเสี่ยงต่อการเกิดแผลกดทับในผู้ป่วยศัลยกรรมกระดูกและข้อโรงพยาบาลสงขลานครินทร์. *สงขลานครินทร์เวชสาร*. 30(6): 311-341

คำแนะนำในการส่งต้นฉบับ

วารสารผลงานวิชาการ กรมวิทยาศาสตร์บริการ

Bulletin of Applied Sciences

บทความที่ส่งตีพิมพ์จะต้องไม่เคยตีพิมพ์หรืออยู่ในระหว่างการรอพิจารณาเพื่อตีพิมพ์ในวารสารอื่น บทความที่เสนอมาเพื่อตีพิมพ์อาจเขียนเป็นภาษาไทยหรือภาษาอังกฤษก็ได้ แต่บทความต้องต้องมีทั้งสองภาษา ทั้งนี้บทความทุกเรื่องจะได้รับการพิจารณาตรวจแก้ไขจากผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาที่เกี่ยวข้อง และกองบรรณาธิการขอสงวนสิทธิ์ในการตรวจแก้ไขต้นฉบับ และพิจารณาตีพิมพ์ตามลำดับก่อนหลัง

ความรับผิดชอบ

บทความที่ตีพิมพ์ในวารสารผลงานวิชาการกรมวิทยาศาสตร์บริการ ถือเป็นผลงานทางวิชาการ และเป็นความเห็นส่วนตัวของผู้เขียน ไม่ใช่ความเห็นของกรมวิทยาศาสตร์บริการ หรือกองบรรณาธิการ ผู้เขียนต้องรับผิดชอบต่อบทความของตน และบทความที่ตีพิมพ์ในเล่มนี้ไม่เคยพิมพ์ในวารสารใดมาก่อน และจะไม่นำส่งไปเพื่อพิจารณาตีพิมพ์ในวารสารอื่นภายใน 60 วัน

การเตรียมต้นฉบับและการส่งต้นฉบับ

- **ชื่อเรื่อง :** ชื่อเรื่องต้องมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ตัวอักษร Cordia New ขนาด 18 ตัวหนา จัดวางข้อความชื่อเรื่องตรงกึ่งกลางหน้ากระดาษ โดยชื่อเรื่องภาษาอังกฤษเฉพาะคำขึ้นต้น ให้พิมพ์ตัวใหญ่
- **ชื่อผู้วิจัย ผู้วิจัยร่วม :** ชื่อผู้วิจัย ผู้วิจัยร่วม ต้องมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ตัวอักษร Cordia New ขนาด 12 ตัวปกติ จัดวางข้อความชื่อผู้วิจัย ผู้วิจัยร่วมกึ่งกลางหน้ากระดาษ ใช้เลข 1.2.3....โดยยกกำลังแสดงตรงชื่อ และเป็นเลขเดียวกันเพื่อแสดงที่อยู่ และ e-mail address.

ตัวอย่าง

จิตตกานต์ อินเทียง¹, วิชิต ศิริโชค^{2*}

Jittakant Intiang¹, Wichit Sirichote^{2*}

¹กรมวิทยาศาสตร์บริการ

²สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

* E-mail address: jittakant@dss.go.th

** Corresponding author e-mail address: wichit.sirichote@gmail.com

- **บทคัดย่อ (Abstract) :** บทคัดย่อต้องมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ตัวอักษร Cordia New ขนาด 14 ตัวปกติ เนื้อหาในคัดย่อ ควรระบุวัตถุประสงค์ ผลการวิจัย และบทสรุปโดยย่อ
- **คำสำคัญ (Keywords) :** คำสำคัญต้องมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ระบุคำสำคัญหรือวลีสั้น ๆ จำนวน 3-5 คำ คำที่ 1, คำที่ 2, คำที่ 3 ตัวอักษร Cordia New ขนาด 12 ตัวปกติ
- **เนื้อเรื่อง** แบ่งเป็นส่วนต่าง ๆ ดังนี้
 1. **บทนำ (Introduction) :** หัวข้อบทนำ ตัวอักษร Cordia New ขนาด 16 ตัวหนา จัดชิดขอบด้านซ้าย หัวข้อย่อย ตัวอักษร Cordia New ขนาด 14 ตัวหนา เนื้อหา ตัวอักษร Cordia New ขนาด 14 ตัวปกติ
 2. **วิธีการวิจัย (Experimental methods) :** หัวข้อวิธีการวิจัย ตัวอักษร Cordia New ขนาด 16 ตัวหนา จัดชิดขอบด้านซ้าย หัวข้อย่อย ตัวอักษร Cordia New ขนาด 14 ตัวหนา เนื้อหา ตัวอักษร Cordia New ขนาด 14 ตัวปกติ
 3. **ผลและวิจารณ์ (Results and discussion) :** หัวข้อผลและวิจารณ์ ตัวอักษร Cordia New ขนาด 16 ตัวหนา จัดชิดขอบด้านซ้าย หัวข้อย่อย ตัวอักษร Cordia New ขนาด 14 ตัวหนา เนื้อหา ตัวอักษร Cordia New ขนาด 14 ตัวปกติ

4. **สรุป (Conclusion)** : หัวข้อสรุป ตัวอักษร Cordia New ขนาด 16 ตัวหนา จัดชิดขอบด้านซ้าย เนื้อหา ตัวอักษร Cordia New ขนาด 14 ตัวปกติ

5. **กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)** : หัวข้อกิตติกรรมประกาศ ตัวอักษร Cordia New ขนาด 16 ตัวหนา จัดชิดขอบด้านซ้าย เนื้อหา ตัวอักษร Cordia New ขนาด 14 ตัวปกติ

6. **เอกสารอ้างอิง (References)** : การอ้างอิงเอกสารให้ใช้ระบบเรียงตามตัวเลข ใส่หมายเลขในวงเล็บเหลี่ยม [] เรียงตามลำดับการอ้างอิงในเรื่อง เอกสารอ้างอิงทุกฉบับจะต้องมีการอ้างอิงหรือกล่าวถึงในบทความ

ตัวอย่าง (อ้างอิงตาม ISO 690)

- [1] AKGUL, M. and A. TOZLUOGLU. Alkaline-ethanol pulping of cotton stalks. *Scientific Research and Essays*. 2010, 5(10), 1068-1074.
- [2] STADELMAN, W. J. and O. J. COTTERILL. *Egg Science and Technology*. 4th ed. New York : Food Produce Press, 1990, 591 p.
- [3] TECHNICAL DIVISION ON REFERENCE MATERIALS OF AOAC INTERNATIONAL. *Standard format and guidance for AOAC standard method performance requirement documents* [online]. 2011. Available from: http://stakeholder.aoac.org/SPIFAN/SMPR_Guidelines_v13.pdf. [viewed 2011-01-26].

• **ตาราง (Table) และรูป (Figure)** : ตัวอักษร Cordia New ขนาด 12 ตัวปกติ

- ตาราง : ให้ระบุลำดับที่ของตาราง หัวตารางให้จัดชิดขอบด้านซ้าย ชื่อตารางให้อยู่ด้านบนของตาราง
- รูป : ให้ระบุลำดับที่ของรูป คำบรรยายรูปภาพให้อยู่ใต้รูปภาพ และจัดกึ่งกลางคอลัมน์

การส่งข้อมูลเพื่อตีพิมพ์

1. การส่งนิพนธ์ต้นฉบับเพื่อขอรับการตีพิมพ์ให้ส่งในเว็บไซต์ของวารสารเท่านั้น (Online submission) โดยดำเนินการตามคำแนะนำสำหรับผู้พิมพ์ (<http://bas.dss.go.th>) ไฟล์นิพนธ์ต้นฉบับที่ส่งต้องเป็น Ms word เท่านั้น หากผู้พิมพ์ต้องการส่ง Pdf file ให้เพิ่มให้เป็นไฟล์เสริม (Supp.files)
2. ส่งภาพความละเอียดอย่างต่ำ 300x300 dpi ทุกภาพ

ดรราชনীคำสำคัญ

	หน้า		หน้า
ก		ผ	
กระดาด	113	แผลกดทับ	133
กระดาดหัตถกรรม	113	พ	
กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล	87	พันธุ์พริก	121
การดูดซับ	45	เพลเธียร์เทคนิค	101
การเตรียมสีเซรามิก	11	ม	
การทวนสอบ	101	เมทิลลีน บลู	45
การป้องกันรังสียูวี	113	ร	
การวัดคาโนซียาง	57	ระดับความเผ็ด	121
ค		ระบบแจ้งเตือน	67
ความเป็นเชิงเส้น	105	ระบบนิวเมติก	133
ความไว	105	ระบบปรับตั้ง	105
คาร์บอนนาโนสเฟียร์ที่มีรูพรุน	87	ระบบเฝ้าติดตามแบบเรียลไทม์	67
คุณภาพอากาศ	67	รังสียูวี	114
เครื่องแกงส้ม	121	ราคาประหยัด	133
เครื่องชั่งน้ำหนักอิเล็กทรอนิกส์	105	รูพรุนเมโซพอร์	45
เครื่องต้ม	35	ล	
เครื่องวัดอุณหภูมิชนิดอินฟราเรด	101	ลำอิเล็กตรอน	57
แคปไซซินอยด์	121	ลิวคิตโครมาโทกราฟี-แทนเดมแมสสเปกโตรเมตรี	21
โครมาโตกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง	35	ศ	
โควิด-19	77	เศษหนังฟอกเหลือทิ้ง	11
ช		ส	
ชุดคลุมทั้งตัว ระดับ 4	77	สมบัติการดูดซับ	87
ชุดป้องกันการส่วนบุคคล	77	สมาร์ทเซนเซอร์	67
ชุดสมาร์ททิช	101	สารไวต่อปฏิกิริยา	57
ช		สารอินทรีย์ระเหยง่ายทั้งหมด	67
ซูโครโลส	35	สีเซรามิก	11
ด		ห	
ดัชนีความเผ็ด	121	เหง้ามันสำปะหลัง	45
ด		อ	
เตียงผู้ป่วย	133	อนุพันธ์สารชีวมวล	87
ถ		อะครีลาไมด์	21
ถ่านกัมมันต์	45	อาหารทอด	21
บ		แอปพลิเคชันสื่อสารและส่งข้อความ	67
แบล็คบอดี้	101	ฮ	
ป		ไฮโดรซาร์	45
ปริมาณรังสีจากลำอิเล็กตรอน	57		

Keyword index

	Page		Page
A		M	
Acrylamide	21	Mesopores	45
Activated carbons	45	Methylene blue	45
Adjustment system	105	Mobile messenger application	67
Adsorption	45	P	
Adsorption property	87	Paper	113
Air quality	67	Patient bed	133
B		Peltier technique	101
Bedsore	133	Personal protective suit	77
Beverage	35	Pneumatic system	133
Biomass derived compounds	87	Porous carbon nanosphere	87
Black body	101	Preparation of ceramic pigment	11
C		Pungency level	121
Capsaicinoids	121	R	
Cassava rhizome	45	Real-time monitoring	67
Ceramic pigment	11	Rubber vulcanization	57
Chili cultivars	121	S	
Coverall Level 4	77	Scoville heat units	121
COVID-19	77	Sensitivity	105
E		Sensitizer	57
E-beam dose	57	Smart kits	101
Electron beam	57	Smart-sensor	67
Electronic balance	105	Sour curry paste	121
F		Sucralose	35
Fried food product	21	T	
H		Tanned leather waste	11
Handicraft paper	113	TVOC	67
High performance liquid chromatography	35	U	
Hydrochar	45	UV radiation	113
Hydrothermal process	87	UV-protection	113
I		V	
Infrared thermometer	101	Verification	101
L			
Linearity	105		
Liquid chromatography-tandem mass spectrometry	21		
Low-cost	133		

ดรราชินีผู้แต่ง

	หน้า		หน้า
ก		ภ	
กนิษฐิตะปะสา	77	ภณพิลา ภูมิมะเบียบ	57
ก่อพงศ์ หงษ์ศรี	113	ล	
กิตติยา ปลื้มใจ	45	ลลิตา ชูแก้ว	121
เกศินี เหมวิเชียร	57	ลลิตา บึงกิกเจริญ	87
ข		ว	
ชนิษฐา อินทร์ประสิทธิ์	121	วรินดา เพ็ญชูหนูช	45
จ		วันชัย ชินชูศักดิ์	101
จิตตกานต์ อินเที่ยง	105	วีระชัย วาริยาตร์	101
จุฑาทิพย์ ลาภวิบูลย์สุข	21	ศ	
เจนจิรา สุขสวัสดิ์	121	ศักดิ์สิทธิ์ ดีอ่ำ	133
เจนจิรา ภูริรักษ์พิติกร	45	ส	
ช		สมจิตต์ ตั้งชัยวัฒนา	77
ชนก ท่วมจร	67	สมพงษ์ คำวงเวียน	77
ฉ		สมพล โคศรี	133
ฐิตาริณี สุโรพันธ์	113	สมภาพ ลาภวิบูลย์สุข	21
ฐิติพร วัฒนกุล	87	สวรินทร์ สันะวิวัฒน์	35
น		สุทธชยา ชื่นวัฒนา	121
นันทิดา จิตแก้ว	35	สุวรรณี เทพบุตรดี	77
นิชาภา บัวสุวรรณ	57	ห	
นิธิวัชร นวอัครฐานนท์	11	แหลมทอง ชื่นชม	45
ป		อ	
ปราณี จันทร์ลา	11	อรรวรรณ ปิ่นประยูร	57
		อรรวรรณ ศรีคุ้มวงษ์	11
		อาทิตย์ อัครสุธี	87

Author index

	Page		Page
A		O	
Artit Ausavasukhi	87	Orawan Pinprayoon	57
C		Orawan Srekumwong	11
Chanok Thuamjorn	67	P	
J		Pantila Bhumirabiab	57
Janejira Suksawad	121	Pranee Junlar	11
Jenjira Phuriragpitikhon	45	S	
Jittakant Intiang	105	Saksit Deeum	133
Jutathip Lapviboonsuk	21	Savarin Sinaviwat	35
K		Somjit Tungchaiwattana	77
Kanit Tapasa	77	Sompol Kosri	133
Kasinee Hemvichian	57	Sompong Kamwongwian	77
Khanittha Inprasit	121	Sompop Lapviboonsuk	21
Kittiya Pluamjai	45	Sutachaya Chuenwatthana	121
Korpong Hongsri	113	Suwannee Thepbutdee	77
L		T	
Laemthong Chuenchom	45	Thitarini Suropan	113
Lalita Chookaew	121	Titiporn Wattanakul	87
Lalita Buengkitcharoen	87	W	
N		Wanchai Chinchusak	101
Nantida Jitkaew	35	Warinda Fuangchoonuch	45
Nichapa Buasuwan	57	Weerachai Variyart	101
Nithiwach Nawaukkaratharnant	11		



BULLETIN OF APPLIED SCIENCES

วารสารผลงานวิชาการ กรมวิทยาศาสตร์บริการ

Call for Papers

ขอเชิญชวน ผู้สนใจ ดุรายละเอียด
การรับ-ส่งบทความ ที่เว็บไซต์
<http://bas.dss.go.th>

ติดต่อสอบถาม

ฝ่ายประสานงาน โทร. 0 2201 7260, 0 2201 7288, 0 2201 7291

ฝ่ายรับ-ส่ง บทความวิชาการออนไลน์ โทร. 0 2201 7285



กรมวิทยาศาสตร์บริการ
กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม
Department of Science Service
Ministry of Higher Education, Science, Research and Innovation

75/7 ถนนพระรามที่ 6 แขวงทุ่งพญาไท
เขตราชเทวี กรุงเทพฯ 10400
e-mail : bulletin@dss.go.th
website : <http://bas.dss.go.th>