



วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์

กรมวิทยาศาสตร์บริการ

BULLETIN OF APPLIED SCIENCES



ปีที่ 13 ฉบับที่ 1 มกราคม – มิถุนายน 2567

Vol. 13 No. 1 January – June 2024

ISSN 2822-1532 (Print)

ISSN 2822-1540 (Online)





**วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์
กรมวิทยาศาสตร์บริการ
BULLETIN OF APPLIED SCIENCES**

ปีที่ 13 ฉบับที่ 1 มกราคม - มิถุนายน 2567

Vol. 13 No. 1 January - June 2024

วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ กรมวิทยาศาสตร์บริการ

Bulletin of Applied Sciences

ISSN 2822-1532 (Print)

ISSN 2822-1540 (Online)

ปีที่ 13 ฉบับที่ 1 มกราคม - มิถุนายน 2567, Vol. 13 No. 1 January - June 2024

ชื่อวารสาร	วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ กรมวิทยาศาสตร์บริการ Bulletin of Applied Sciences	
วัตถุประสงค์	1. เพื่อเผยแพร่ผลงานวิชาการ ผลงานวิจัย ของนักวิจัย นักวิทยาศาสตร์ให้เป็นที่ประจักษ์แก่ภาครัฐ ภาคเอกชน นักวิชาการ ผู้ประกอบการและประชาชนทั่วไป 2. เพื่อให้สามารถนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์ในทางวิชาการ การอ้างอิง และการประกอบกิจการ ภาคการผลิตและอุตสาหกรรม	
เจ้าของ	กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม	
นโยบายการจัดพิมพ์	วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ กรมวิทยาศาสตร์บริการ รับผิดชอบต่อความวิจัย บทความวิชาการ และ บทความปริทัศน์ จากผู้เขียนทั้งภายในและภายนอกหน่วยงานในสาขาเคมี ฟิสิกส์ เทคโนโลยีชีวภาพ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร วัสดุศาสตร์ มาตรวิทยา วิศวกรรมศาสตร์ หรือ วิทยาศาสตร์ประยุกต์	
หัวหน้ากองบรรณาธิการ	นพ. รุ่งเรือง กิจผาติ	อธิบดีกรมวิทยาศาสตร์บริการ
บรรณาธิการวิชาการ	ดร. อรสา อ่อนจันทร์	นักวิทยาศาสตร์เชี่ยวชาญ
บรรณาธิการจัดการ	นางสาวปัทมา นพรัตน์	ผู้อำนวยการกองหอสมุดและศูนย์สารสนเทศวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กรมวิทยาศาสตร์บริการ
กองบรรณาธิการ	ศ.ดร. ดวงดาว อัจฉรงค์ ศ.ดร. ภาวิณี ชินะโชติ รศ.ดร. กรรณิการ์ สหกะโร รศ.ภญ.ดร. จิตติมา ลัดคนากุล รศ.ดร. จรูญ จักรมณี รศ.ดร. ธีร์ เชาวนนท์ปัญญา รศ.ดร. นภาพร ยิ่งวิเศษ รศ.ดร. นุเรศ เชื้อสุวรรณ รศ.ดร. นาทิพย์ วิภาวิน รศ.ดร. พิมพ์า หอมนิรันดร์ รศ.ดร. ภัทรินถน วุฒิจิตติพล รศ.ดร. วิภารณ์ เชื้อชวด ชัยสิทธิ์ รศ.ดร. วิษณุ เพชรภา รศ.ดร. วิณา สาทิตปัตติพันธ์ รศ.ดร. อติทยา ศิริปัญญาพันธ์ รศ.ดร. อรทัย จงประทีป ผศ.ดร. ชัยรัตน์ ตั้งดวงดี ผศ.ดร. เทอดเกียรติ ลิ้มปิติปราการ ผศ.ดร. ปริญดา เพ็ญโรจน์ ผศ.ดร. พิระวัฒน์ นันทวรารงค์ ผศ.ดร. พุทธิรักษา วรานุศุภากุล ผศ.ดร. เยาวภา หล่อเจริญผล ผศ.ดร. รัฐภูมิ ปรีชาตปรีชา ผศ. สมพร ชัยอารีย์กิจ ดร. นงนภัส ดวงดี ดร. นุชนาฏ ณะระนอง ดร. ประสาร คิตติ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สมาคมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอาหารแห่งประเทศไทย (FoSTAT) มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมมาธิราช มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ มหาวิทยาลัยนเรศวร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง มหาวิทยาลัยมหิดล มหาวิทยาลัยมหิดล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี มหาวิทยาลัยศิลปากร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ นักวิชาการอิสระ กรมพัฒนาฝีมือแรงงาน

ดร. มาณพ สิทธิเดช

อดีตอัครราชทูตที่ปรึกษาฝ่ายวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
ประจำสถานเอกอัครราชทูต ณ กรุงบรัสเซลส
ประเทศเบลเยียม

ดร. ลดา พันธุ์สุนทรนา

นักวิชาการอิสระ

ดร. วราวุฒิ ศุภมิตรมงคล

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ดร. สัญชัย ยอดมณี

มหาวิทยาลัยราชภัฏภูเก็ต

ดร. ่องอาจ ธเนศนิตย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

นายชาติรี วงษ์แก้ว

นักวิชาการอิสระ

นายวีระ ตูลาสมบัติ

นักวิชาการอิสระ

ดร. กนิษฐ์ ตะปะสา

กรมวิทยาศาสตร์บริการ

ดร. จิราภรณ์ บุราคร

กรมวิทยาศาสตร์บริการ

ดร. กรรรม สติกรกุล

กรมวิทยาศาสตร์บริการ

นางวรรณิ อุโฬบุญ

กรมวิทยาศาสตร์บริการ

ผู้ช่วยกองบรรณาธิการ

ดร. จุฑาทิพย์ ลาภวิบูลย์สุข

กรมวิทยาศาสตร์บริการ

ดร. อรพรรณ อภิรักษ์กานต์

กรมวิทยาศาสตร์บริการ

นางสาวกมลชนก ศรีไทย

กรมวิทยาศาสตร์บริการ

นางสาวกิตติยา ปลื้มใจ

กรมวิทยาศาสตร์บริการ

นางสาวชีวิภัทร ปาโมกข์

กรมวิทยาศาสตร์บริการ

นางสาวประภัสสร ศิลปศาสตร์ดำรง

กรมวิทยาศาสตร์บริการ

นายวรวุฒิ มะโนชาติ

กรมวิทยาศาสตร์บริการ

นายสาย์ณห์ เกลี้ยงสิน

กรมวิทยาศาสตร์บริการ

นางสาวสุรรัตน์ ยอดเกื้อน

กรมวิทยาศาสตร์บริการ

เลขานุการ

หัวหน้ากลุ่มหอสมุดวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ฝ่ายบริหารจัดการ

นางสาวอุดมลักษณ์ เวียงงาม

นางสาวจอย ผิวสะอาด

นางสาวทิพย์วาทิ กรรัมย์

นางสาวอุศนา มหานิตพงษ์

ฝ่ายเผยแพร่ประชาสัมพันธ์

นางสาวพรทิพย์ เส้นสด

ฝ่ายเว็บไซต์วารสาร

นางสาวพรชชล รัตนปานิ

การจัดพิมพ์และเผยแพร่

จัดพิมพ์ปีละ 2 ฉบับ กำหนดออกเผยแพร่เดือน มกราคม - มิถุนายน และ กรกฎาคม - ธันวาคม

จำนวนพิมพ์

150 เล่ม

ค่าธรรมเนียมการตีพิมพ์

ไม่มีค่าใช้จ่ายสำหรับการตีพิมพ์ในวารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ กรมวิทยาศาสตร์บริการ

สำนักงานวารสาร

กองหอสมุดและศูนย์สารสนเทศวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม

75/7 ถนนพระรามที่ 6 เขตราชเทวี กรุงเทพฯ 10400

โทรศัพท์ 0 2201 7000 ต่อ 7260, 7288

เว็บไซต์ <https://ph03.tci-thaijo.org/index.php/BAS>

e-mail: bas@dss.go.th Facebook: www.facebook.com/ScienceLibraryDSS

บทความใน “วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ กรมวิทยาศาสตร์บริการ” ถือเป็นผลงานทางวิชาการ และเป็นความเห็นส่วนตัวของผู้เขียน ไม่ใช่
ความเห็นของกรมวิทยาศาสตร์บริการ หรือกองบรรณาธิการ ผู้เขียนต้องรับผิดชอบต่อบทความของตน และบทความที่ตีพิมพ์ในเล่มนี้
ไม่เคยพิมพ์ในวารสารใดมาก่อน และจะไม่นำส่งไปเพื่อพิจารณาตีพิมพ์ในวารสารอื่นภายใน 60 วัน

พิมพ์ที่

บริษัท ซีคเซสพับลิเคชั่น จำกัด

34 ซอยลาซาล 22 ถนนสุขุมวิท 105 แขวงบางนา เขตบางนา กรุงเทพมหานคร 10260

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

บทบรรณาธิการ

วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ กรมวิทยาศาสตร์บริการ (Bulletin of Applied Sciences) ที่ท่านอ่านอยู่ในขณะนี้ ได้ผ่านการรับรองคุณภาพวารสารของ TCI ถูกจัดให้อยู่ใน “วารสารกลุ่มที่ 2” มีวัตถุประสงค์เพื่อเผยแพร่ผลงานวิชาการ ผลงานวิจัย ของนักวิจัย นักวิทยาศาสตร์ให้เป็นที่ประจักษ์แก่ภาครัฐ ภาคเอกชน นักวิชาการ ผู้ประกอบการ และประชาชนทั่วไป มุ่งเน้นให้สามารถนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์ในทางวิชาการ ตลอดจนอ้างอิงในการประกอบกิจการภาคการผลิต และอุตสาหกรรมได้ วารสารได้จัดให้มีระบบ Peer reviews จากบรรณาธิการทั้งในและนอกองค์กรจากหลากหลายสาขาวิชา และมีการปรับปรุงรูปแบบให้น่าสนใจ ตลอดจนมุ่งเน้นให้เนื้อหา มีความเข้มข้นทางวิชาการมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยในวารสารฉบับนี้มีบทความที่น่าสนใจมากมาย ได้แก่ ผลกระทบของการหมุนและการเยื้องศูนย์กลางแนวแรงของโหลดเซลล์ มาตรฐานต่อการสอบเทียบเครื่องทดสอบแรงดึง/แรงกด, ระบบสอบเทียบดิจิตอลเทอร์โม-ไฮโกรมิเตอร์แบบอัตโนมัติโดยใช้วิธีการประมวลผลภาพและเครือข่ายไร้สาย, การตรวจหาปริมาณสารไพมารีอะโรมาติกเอมีนในวัสดุสัมผัสอาหาร ด้วยเทคนิคอัลตราไฮเพอร์ฟอร์แมนซ์ลิควิด โครมาโทกราฟี-แทนเดมแมสสเปกโทรเมตรี, การทดสอบสมรรถนะหน้ากากอนามัยใช้ครั้งเดียวประเภทใช้ทางการแพทย์: คุณลักษณะทางฟิสิกส์, ผลของการเตรียมวัตถุดิบ ปริมาณวัตถุดิบ ความเข้มข้นของเอนไซม์ และระยะเวลาการสกัดต่อผลผลิตเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำได้จากเศษเหลือทิ้งหน่อไม้ฝรั่ง และการตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีสำหรับวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักหลายชนิดในเวลาเดียวกัน (ปรอท แคดเมียม สารหนู และตะกั่ว) ที่ระดับความเข้มข้นต่ำมากในใบกระท่อม

กองบรรณาธิการวารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ กรมวิทยาศาสตร์บริการ ขอขอบคุณผู้พิมพ์ทุกท่านที่ส่งบทความ มาให้พิจารณาตีพิมพ์เผยแพร่องค์ความรู้และงานวิจัย ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการปฏิบัติงานด้านการพัฒนาวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรมของประเทศ ขอขอบพระคุณผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่านสำหรับการพิจารณาบทความ (Peer review) โดยได้ให้ข้อเสนอแนะในการปรับปรุงแก้ไขบทความต่าง ๆ ให้มีความถูกต้องทางวิชาการ และอ่านได้เข้าใจง่ายขึ้น และขอขอบพระคุณทุกท่านที่มีส่วนในการจัดทำวารสารฉบับนี้ให้เสร็จสมบูรณ์ด้วยดี กองบรรณาธิการหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวารสารฉบับนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับผู้อ่านทุกท่านในการเสริมสร้างองค์ความรู้ทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อพัฒนางาน หรือช่วยแก้ปัญหาที่พบในการปฏิบัติงานได้ และขอขอบคุณผู้อ่านที่ได้ให้ความสนใจติดตามวารสารนี้อย่างต่อเนื่อง โปรดติดตามความรู้ และงานวิจัยดี ๆ จากวารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ กรมวิทยาศาสตร์บริการฉบับหน้า

ดร. อรสา อ่อนจันทร์
บรรณาธิการวิชาการ

จริยธรรมการตีพิมพ์

วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ กรมวิทยาศาสตร์บริการ (Bulletin of Applied Sciences)

จัดทำขึ้นเพื่อเผยแพร่บทความวิจัย บทความวิชาการ และบทความปริทัศน์ ในสาขาเคมี ฟิสิกส์ เทคโนโลยีชีวภาพ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร วัสดุศาสตร์ มาตรวิทยา วิศวกรรมศาสตร์ หรือวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มุ่งมั่นที่จะรักษามาตรฐานด้านจริยธรรมในการตีพิมพ์สูงสุด และให้การเผยแพร่เป็นไปอย่างถูกต้อง มีคุณภาพ และความโปร่งใสตามมาตรฐานการตีพิมพ์ที่เป็นที่ยอมรับในระดับชาติและระดับนานาชาติ ดังนั้นทุกฝ่ายที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ บรรณาธิการ (Editor) ผู้พิมพ์ (Authorship) และผู้ประเมินบทความ (Reviewer) จะต้องปฏิบัติตามหลักการและมาตรฐานด้านจริยธรรมการตีพิมพ์อย่างเคร่งครัด

บทบาทและหน้าที่ของกองบรรณาธิการ

1. บรรณาธิการมีหน้าที่พิจารณา คัดกรอง ตรวจสอบ บทความที่ส่งมาเพื่อตีพิมพ์ ให้เหมาะสม สอดคล้องตรงกับวัตถุประสงค์และขอบเขต (Aim and Scope) ของวารสาร รวมถึงการตรวจสอบคุณภาพบทความในกระบวนการประเมินและคุณภาพบทความก่อนการตีพิมพ์ ในกรณีที่เนื้อหาบทความไม่เหมาะสม สอดคล้องกับวารสาร บรรณาธิการต้องรีบแจ้งให้ผู้พิมพ์ได้รับทราบ
2. บรรณาธิการเป็นผู้ส่งต้นฉบับบทความให้กองบรรณาธิการวารสาร เพื่อช่วยพิจารณาคุณภาพเบื้องต้นของบทความที่ส่งเข้ามาว่าอยู่ในระดับเหมาะสมที่จะส่งต่อให้ผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ ไม่น้อยกว่า 3 ท่าน อ่านพิจารณาในขั้นตอนต่อไปหรือไม่
3. บรรณาธิการต้องใช้เหตุผลทางวิชาการในการพิจารณาบทความทุกครั้งโดยปราศจากอคติที่มีต่อบทความของผู้พิมพ์ในด้านเชื้อชาติ เพศ ศาสนา วัฒนธรรม การเมือง และสังกัดของผู้พิมพ์ หรือหากบรรณาธิการไม่แน่ใจเกี่ยวกับเนื้อหาและคุณภาพเบื้องต้นของบทความเรื่องใด ๆ บรรณาธิการต้องไม่พิจารณาปฏิเสธบทความเรื่องนั้น ๆ ทันทีด้วยใจอคติ โดยอาจพิจารณาขอความเห็นเพิ่มเติมจากกองบรรณาธิการที่มีความเชี่ยวชาญเฉพาะด้านเกี่ยวกับเนื้อหาบทความนั้น ๆ ก่อนเสมอ
4. บรรณาธิการต้องไม่มีส่วนได้ส่วนเสียกับผู้พิมพ์ หรือผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ ไม่นำบทความหรือวารสารไปใช้ประโยชน์ในเชิงธุรกิจ หรือนำไปเป็นผลงานทางวิชาการของตนเอง
5. บรรณาธิการพิจารณาคัดเลือกผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ ที่มีความเชี่ยวชาญในสาขาต่าง ๆ ในการประเมินบทความเรื่องนั้น ๆ และส่งบทความให้ผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ โดยจะไม่เปิดเผยชื่อของผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความหรือผู้พิมพ์ให้อีกฝ่ายหนึ่งได้ทราบโดยเด็ดขาด (Double blind) รวมทั้งบุคคลอื่นที่ไม่มีส่วนเกี่ยวข้องด้วย
6. เมื่อเกิดกรณีที่ข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความทั้ง 3 ท่าน มีความขัดแย้งกัน บรรณาธิการจะเป็นผู้ตัดสินใจว่าจะดำเนินการในขั้นตอนถัดไปกับบทความเรื่องนั้น ๆ อย่างไรต่อไป
7. บรรณาธิการต้องไม่แก้ไขหรือเปลี่ยนแปลงเนื้อหาบทความและผลประเมินของผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ รวมถึงไม่ปิดกั้นหรือแทรกแซงข้อมูลที่แจ้งแลกเปลี่ยนระหว่างผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ และผู้พิมพ์
8. บรรณาธิการส่งผลการประเมินให้ผู้พิมพ์แก้ไข และพิจารณา ตรวจสอบการแก้ไขของผู้พิมพ์อย่างเคร่งครัด
9. บรรณาธิการเป็นผู้จัดสรรบทความที่ผ่านกระบวนการประเมินบทความและอยู่ในสถานะพร้อมตีพิมพ์เผยแพร่ โดยจะพิจารณาจากเหตุผลหลัก คือ ลำดับก่อนหน้าของการส่งบทความ (Queue) และความน่าสนใจ/ความหลากหลายของเนื้อหาบทความ (Content) รวมถึงเหตุผลในด้านความเหมาะสมอื่น ๆ (Suitability) เป็นสำคัญ
10. ในกรณีที่เหตุผลสำคัญที่อาจจะไม่นำบทความของผู้พิมพ์เรื่องใดเรื่องหนึ่ง ลงตีพิมพ์ในวารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ กรมวิทยาศาสตร์บริการ ในฉบับตามทีระบุในหนังสือตอบรับให้ได้นั้น บรรณาธิการขอสงวนสิทธิ์ในการนำบทความดังกล่าว ลงตีพิมพ์ในวารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ กรมวิทยาศาสตร์บริการ ในฉบับต่อ ๆ ไป ตามที่เห็นสมควร โดยบรรณาธิการจะต้องแจ้งให้ผู้พิมพ์เรื่องนั้น ๆ ได้รับทราบล่วงหน้าก่อนเสมอ

11. บรรณาธิการเป็นผู้ควบคุมและให้ความสำคัญต่อการตีพิมพ์เป็นรูปเล่มของวารสารในแต่ละฉบับ รวมถึงการเผยแพร่ทางเว็บไซต์วารสาร ให้มีความถูกต้อง สมบูรณ์ และออกตรงตามกำหนดเวลา อย่างเคร่งครัด

บทบาทและหน้าที่ของผู้นิพนธ์

1. ผู้นิพนธ์ต้องรับรองว่าบทความที่ส่งมาตีพิมพ์นั้นยังไม่เคยได้รับการเผยแพร่ที่ไหนมาก่อน หรืออยู่ระหว่างการพิจารณาตีพิมพ์ในวารสารอื่น การละเมิดลิขสิทธิ์ถือเป็นความรับผิดชอบของผู้นิพนธ์โดยตรง
2. ผู้นิพนธ์ต้องไม่คัดลอกผลงานของผู้อื่น และต้องอ้างอิงทุกครั้งเมื่อนำผลงานของผู้อื่นมานำเสนอหรืออ้างอิงในเนื้อหาของบทความของตนเอง รวมทั้งต้องทำเอกสารอ้างอิงไว้ท้ายบทความโดยจัดรูปแบบการอ้างอิงตามที่กองบรรณาธิการฯ ได้กำหนดไว้อย่างเคร่งครัด
3. ผู้นิพนธ์ต้องเขียนบทความให้ถูกต้องตามรูปแบบที่วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ กรมวิทยาศาสตร์บริการ กำหนดไว้อย่างเคร่งครัด
4. ผู้นิพนธ์ที่มีการศึกษาหรือทดลองเกี่ยวกับสิ่งมีชีวิต เช่น การใช้สัตว์ทดลอง หรือมนุษย์ ผู้นิพนธ์ต้องได้รับอนุญาตจากคณะกรรมการจริยธรรมก่อนทำการทดลอง และผู้นิพนธ์จะต้องแนบส่งหนังสือรับรองจากคณะกรรมการจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์ หรือในสัตว์ทดลองสำหรับการส่งตีพิมพ์กับวารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ กรมวิทยาศาสตร์บริการ
5. ผู้นิพนธ์ยินดีแก้ไขปรับปรุงรูปแบบและคุณภาพของบทความ ให้ถูกต้องและเหมาะสมตามข้อเสนอแนะเบื้องต้นจากกองบรรณาธิการฯ ก่อนเข้าสู่กระบวนการพิจารณาในขั้นตอนของผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ จำนวน 3 ท่าน ในลำดับต่อไป
6. ข้อคิดเห็นที่ปรากฏและแสดงในเนื้อหาของบทความต่าง ๆ ในวารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ กรมวิทยาศาสตร์บริการ ถือเป็นความเห็นและความรับผิดชอบโดยตรงของผู้นิพนธ์นั้น ๆ มิใช่เป็นความเห็นและความรับผิดชอบใด ๆ ของกองบรรณาธิการฯ และกรมวิทยาศาสตร์บริการแต่อย่างใด
7. ผู้นิพนธ์ต้องรับทราบและยอมรับถึงข้อกำหนด และนโยบายในการรับพิจารณาตีพิมพ์บทความจากวารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ กรมวิทยาศาสตร์บริการ เป็นอย่างดีแล้ว
8. ผู้นิพนธ์ต้องรับทราบว่าบทความ ข้อมูล เนื้อหา รูปภาพ ฯลฯ ที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ กรมวิทยาศาสตร์บริการ ถือเป็นลิขสิทธิ์เฉพาะของกรมวิทยาศาสตร์บริการ มิใช่เป็นลิขสิทธิ์ของผู้นิพนธ์บทความแต่อย่างใด และไม่นำผลงานไปเผยแพร่หรือตีพิมพ์กับแหล่งอื่นอีกหลังจากได้รับการตีพิมพ์กับวารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ กรมวิทยาศาสตร์บริการ แล้ว
9. ผู้นิพนธ์ต้องระบุข้อมูลของแหล่งทุนวิจัย (ถ้ามี)

บทบาทและหน้าที่ของผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ

1. ผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความพิจารณาความถูกต้อง คุณภาพและความน่าสนใจของเนื้อหาของบทความภายใต้หลักการและเหตุผลทางวิชาการ ด้วยใจเป็นกลาง และปราศจากอคติ หรือความคิดเห็นส่วนตัว ตลอดจนประโยชน์ที่ผู้อ่านบทความจะได้รับ และพร้อมจะให้คำติชม ข้อเสนอแนะ และแนวทางแก้ไขปรับปรุงบทความที่สร้างสรรค์ และชัดเจนในเชิงประจักษ์ รวมทั้งไม่มีส่วนได้ส่วนเสียกับผู้นิพนธ์
2. ผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความต้องตระหนักว่าตนเองมีความรู้ความเข้าใจในเนื้อหาของผลงานทางวิชาการที่ประเมินอย่างแท้จริง หากไม่มีความเชี่ยวชาญเนื้อหาในระดับที่มากพอจะพิจารณาบทความเรื่องนั้น ๆ ได้อย่างมีคุณภาพ ผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความควรแจ้งปฏิเสธการประเมินบทความให้กองบรรณาธิการฯ ได้ทราบ
3. ผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความต้องรักษาระยะเวลาประเมินตามกรอบเวลาที่กำหนด หากไม่สามารถส่งข้อเสนอแนะบทความได้ทันตามเวลาที่กองบรรณาธิการฯ ได้กำหนดไว้ ผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความควรแจ้งให้กองบรรณาธิการฯ ได้ทราบ พร้อมทั้งควรแจ้งกำหนดเวลาใหม่ในการส่งคืนข้อเสนอแนะบทความ
4. ผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความต้องไม่แสวงหาประโยชน์จากบทความที่ตนเองได้ประเมิน และไม่เปิดเผยข้อมูลบทความให้ผู้ที่ไม่มีส่วนเกี่ยวข้องได้รับรู้
5. หากผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความตรวจสอบพบว่าบทความที่ประเมินมีการคัดลอกผลงานชิ้นอื่น ๆ ต้องแจ้งให้บรรณาธิการทราบทันที
6. ภายหลังจากการประเมินบทความและให้ข้อเสนอแนะในรอบที่ 1 เรียบร้อยแล้ว เมื่อผู้นิพนธ์ได้แก้ไขปรับปรุงบทความ (พร้อมเหตุผลและคำชี้แจง) กลับมาเพื่อพิจารณาอีกครั้งหนึ่ง กองบรรณาธิการฯ จะขอความเห็นอีกครั้ง

ในการประเมินบทความรอบที่ 2 ซึ่งผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความจะเป็นผู้พิจารณาการแก้ไขปรับปรุงบทความดังกล่าว เมื่อพิจารณาแล้วเสร็จ ผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความควรแจ้งผลการพิจารณาสุดท้ายให้กองบรรณาธิการได้รับทราบต่อไป เช่น แจ้งเห็นควรตอบรับการตีพิมพ์ หรือแจ้งปฏิเสธการตีพิมพ์ หรือแจ้งข้อเสนอแนะเพิ่มเติมสำหรับการแก้ไขปรับปรุงในรอบที่ 2

การคุ้มครองข้อมูลส่วนบุคคล

1. วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ กรมวิทยาศาสตร์บริการ จะเคร่งครัดกรณีบทความมีการคัดลอก การนำเสนอรูปภาพ หรือการนำผลงานผู้อื่นมาเป็นส่วนหนึ่งของบทความเพื่อตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสาร
2. วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ กรมวิทยาศาสตร์บริการ จะไม่เปิดเผยรายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความให้แก่ผู้นิพนธ์หรือบุคคลอื่น

Publication ethics

Bulletin of Applied Sciences (BAS), which aims to publish research and academic articles in the fields of chemistry, physics, biotechnology, food science and food technology, material science, metrology, engineering, and applied science, is committed to maintaining the highest standards of publication ethics. We intend to provide publishing standards, and have quality publications to acquire a qualification that is recognized both nationally and internationally. Thus, publisher, editors, reviewers, and authors are required to strictly follow our guidelines, standards, and publication ethics.

Duties of Editors

1. Ensure a submitted manuscript is relevant to aims and scopes of the journal. Also examine whether its quality meet the journal's standards. However, if an unsuitable submission is found, editors should inform authors immediately.
2. Pre-screen the manuscript, check duplications and plagiarism before sending to experts (at least 2 persons) for peer review.
3. Evaluate the manuscript for their intellectual merit without regard to race, gender, sexual orientation, religious belief, ethnicity, political viewpoints or affiliation of authors. Ensure that the peer review process is fair and unbiased. Where necessary, editors should seek additional opinions from experts before rejecting any manuscript.
4. Editors must have no conflicts of interest or relationships that pose potential conflicts related to manuscripts under consideration. Moreover, editors must avoid taking advantage of information obtained from a manuscript/article or the journal for business or use and misrepresent it as their own academic works.
5. Invite external reviewers in related field to provide a comprehensive evaluation of the manuscript. Ensure that authors and reviewers do not know each other's identity (double blind) including blind to an unauthorized person.
6. Decide based on feedback from the peer review, whether to seek more peer reviews (in case three reviewers have different opinions).
7. Must not make substantial edits on author's work or alter peer review reports or interfere with the information exchanged between reviewers and authors.
8. Collect and send the reviewer reports to authors, work with authors to revise the manuscript in response to the reviewers' comments. The revised manuscript is returned to the reviewers to ensure that their concerns have been satisfactorily resolved.
9. Once the manuscript has been accepted, editors shall arrange publication in the chronological order of submission date, content, or other suitability reasons.
10. In case, an accepted manuscript cannot be published in the journal volume that state in an acceptance letter at any reasons, editors should inform authors promptly and manage to publish in the next volume where appropriate.
11. Ensure the publication process is accurate and timely for both printed and online versions.

Duties of Authors

1. Assure the submitted manuscript is original, has not been published before and is not currently being considered for publication elsewhere. It is the responsibility of authors to obtain permission from copyright holders, to ensure that the use of images, data, and illustrations in the manuscript do not violate copyright laws.
2. Avoid plagiarism. Any relevant prior works and publications should be properly cited with reference lists at the end of the manuscript.
3. Ensure the manuscript followed the formatting instruction.
4. The research contained the experimental with animals or human must be allowed from ethical committee before testing. The author must submit the approved ethical statement along to submitted manuscript.
5. After pre-screening, if errors are discovered, authors should collaborate with editors or publisher to quickly correct their work before sending to evaluate by experts.
6. The manuscript is an academic work with authors' perspective not by the Department of Science Service or editorial board. Authors are responsible for their works.
7. Authors should have read and agreed to publication requirements policies thoroughly.
8. As standard copyright agreement, we would like to inform authors that you transfer or "assign" copyright to the Department of Science Service as the owner and publisher of the journal (BAS). After publication in BAS, the work must not be published and distributed by others.
9. Authors also should mention about financial and material support.

Duties of Reviewers

1. Provide unbiased, constructive feedbacks on the work's scholarly merits and scientific value. Evaluate the work's composition, scientific accuracy, creativity, and interest to the journal's readers as well as it is clear, concise, and relevant. Give objective and fair suggestions for improvements and avoid personal comments or criticism. Disclose conflicts of interest to editors (if any).
2. Notifying editors immediately if unable to review and/or decline the review.
3. Evaluate the manuscript in a timely manner. Notify editors when you fail to complete a review on time in order to set a new agreement.
4. Maintain privacy of the review process by refraining from discuss or reveal any information from the reviewed manuscript with outside parties.
5. Notify editors if any ethical concerns such as plagiarism or similarity between the reviewed manuscript and other published articles.
6. The revised manuscript will be returned to reviewers (together with the response letter) to ensure that the comments raised have been satisfactorily resolved. Reviewers make a recommendation report to editors as to whether the manuscript should be rejected, accepted, or required another revision.

Personal Data Protection

1. Manuscript contained plagiarism and copying such as figure and data will not be accepted for publication in Bulletin of Applied Sciences (BAS) journal
2. Bulletin of Applied Sciences (BAS) journal will not reveal name and personal information of reviewers.

1

ผลกระทบของการหมุนและการเยื้องศูนย์กลางแนวแรงของโหนดเซลล์มาตรฐาน 12
ต่อการสอบเทียบเครื่องทดสอบแรงดึง/แรงกด
ไกรศักดิ์ ยืนยั้ง, พิสิฐ หอมเชย, วิชัย กาญจนพัฒน์

2

ระบบสอบเทียบดิจิทัลเทอร์โม-ไฮโกรมิเตอร์แบบอัตโนมัติ โดยใช้ 27
วิธีการประมวลผลภาพและเครือข่ายไร้สาย
เจตนา ทองใบ

3

การตรวจหาปริมาณสารไพมารีอะโรมาติกเอมีนในวัสดุสัมผัสอาหารด้วยเทคนิค 37
อัลตราไฮเพอร์ฟอร์แมนซ์ลิควิดโครมาโทกราฟี-แทนเดมแมสสเปกโตรเมตรี
จุฑาทิพย์ ลาภวิบูลย์สุข, พัฒนนิภา วงศ์พิชัย, สมภาพ ลาภวิบูลย์สุข

4

การทดสอบสมรรถนะหน้ากากอนามัยใช้ครั้งเดียว ประเภทใช้ทางการแพทย์: 52
คุณลักษณะทางฟิสิกส์
ศรสวรรค์ สิทธิพงศ์, ศิวะ สิทธิพงศ์, ณัฐพงศ์ นิลจรัสวงษ์, ณัฐพล พรนำพา,
ไพโรจน์ สังขพิทุฑย์, ชัยยุทธ มิ่งาม

5

ผลของการเตรียมวัตถุดิบ ปริมาณวัตถุดิบ ความเข้มข้นของเอนไซม์ และ 66
ระยะเวลาการสกัดต่อผลผลิตเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำได้จากเศษเหลือทิ้ง
หน่อไม้ฝรั่ง
เรวดี มีลัดดี, ยุทธศักดิ์ สุบการี

6

การตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีสำหรับวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักหลายชนิด 79
ในเวลาเดียวกัน (ปรอท แคดเมียม สารหนู และตะกั่ว) ที่ระดับความเข้มข้นต่ำมาก
ในใบกระท่อม
ธารินี ศรีดารา, สายจิต ดาวสุโข, สุนงกษ ทรัพย์แดง, วีระ สอนโธสง

1

- The effect of rotation and force misalignment of standard load cell on tension/compression testing machine calibration 12
Kraisak Yuenyoung, Pisit Hormchoey, Wichai Khanjanapat

2

- Automated calibration system for a digital thermo-hygrometer using image processing approaches and wireless communication 27
Jettana Tongbai

3

- Determination of primary aromatic amines in food contact materials by ultra-high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry 37
Jutathip Lapviboonsuk, Patnipa Wongpichai, Sompop Lapviboonsuk

4

- The performance test of single-use medical masks: physical characteristics 52
Sornsawan Sidthipong, Siva Sitthipong, Nuttapong Niljrusvanit, Nattapon Pornnumpa, Phairote Sungkhaphaitoon, Chaiyoot Meengam

5

- The effect of material pretreatment, substrate content, enzyme concentration and extraction time on yield of soluble dietary fiber from asparagus by-product 66
Rewadee Meesat, Yuttasak Subkaree

6

- Method validation for simultaneous determination of heavy metals (Hg, Cd, As and Pb) at trace concentration levels in kratom leaves 79
Tharinee Sridara, Saijit Daosukho¹, Subongkoch Subtaeng, Weera Suanthaisong

ผลกระทบของการหมุนและการเยื้องศูนย์กลางแนวแรงของ โหลดเซลล์มาตรฐานต่อการสอบเทียบเครื่องทดสอบแรงดึง/แรงกด

The effect of rotation and force misalignment of standard load cell on tension/compression testing machine calibration

1

ไกรศักดิ์ ยืนยง¹, พิศิฐ หอมเชย¹, วิชัย กาญจนพัฒน์¹

Kraisak Yuenyoung¹, Pisit Hormchoey¹, Wichai Khanjanapat¹

รับบทความ 30 มิถุนายน 2566 แก้ไขบทความ 26 ธันวาคม 2566 ยอมรับตีพิมพ์ 27 ธันวาคม 2566

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอผลกระทบของการหมุนโหลดเซลล์และการเยื้องศูนย์กลางแนวแรงในระหว่างการสอบเทียบเครื่องทดสอบแรงดึง/แรงกด ตามมาตรฐาน ISO 7500-1:2018 (E) ในงานวิจัยได้ทำการสอบเทียบเครื่องทดสอบขนาด 1000 kN ค่าความละเอียด 0.5 kN คลาส 0.5 ด้วยเงื่อนไขที่แตกต่างกัน 3 กรณี ได้แก่ กรณี A ไม่หมุนโหลดเซลล์มาตรฐานและไม่เยื้องศูนย์กลางแนวแรง กรณี B หมุนโหลดเซลล์มาตรฐานเป็นมุม 0 องศา, 120 องศา และ 240 องศา ตามลำดับ และไม่เยื้องศูนย์กลางแนวแรง กรณี C ไม่หมุนโหลดเซลล์มาตรฐาน แต่เลื่อนตำแหน่งของโหลดเซลล์มาตรฐานให้เยื้องศูนย์กลางแนวแรงเป็นระยะ 10 มม. เมื่อทวนสอบผลการสอบเทียบของทั้งสามกรณีได้คลาส 0.5 เท่ากัน ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของผลการสอบเทียบกรณี A และ B ได้ผลไม่แตกต่างกัน ส่วนกรณี A และ C พบค่าความผิดพลาดในการลดแรงกระทำของเครื่องทดสอบจากค่าแรงสูงสุดกลับมายังตำแหน่งเดิม (Relative error of reversibility) เพิ่มขึ้นถึง -0.45% และค่าความไม่แน่นอนของการสอบเทียบที่ระดับความเชื่อมั่น 95% มีค่าเพิ่มขึ้นถึง $\pm 0.53\%$ โดยพารามิเตอร์ทั้งสองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามขนาดของแรงกระทำ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับสถิติ (E_n number) พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 0.05 - 0.89 ซึ่งความแตกต่างนั้นไม่มีนัยสำคัญ และถ้าหากเพิ่มแรงกระทำมากขึ้น E_n number มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่อยู่ในระดับที่ยอมรับได้ เมื่อเครื่องทดสอบแรงดึง/แรงกด และโหลดเซลล์มีคลาสที่ดี การหมุนโหลดเซลล์ไม่ส่งผลต่อการสอบเทียบ แต่การเยื้องศูนย์กลางแนวแรงจะส่งผลต่อการสอบเทียบ

คำสำคัญ: เครื่องทดสอบแรงดึง/แรงกด การสอบเทียบ โหลดเซลล์มาตรฐาน การหมุน การเยื้องศูนย์กลางแนวแรง

¹กองสอบเทียบเครื่องมือวัด กรมวิทยาศาสตร์บริการ

Abstract

The purpose of this research is to present the effects of load cell rotation and force misalignment during the calibration of a tension/compression testing machine according to ISO 7500-1:2018 (E). A 1000 kN testing machine, resolution 0.5 kN, class 0.5, was calibrated under 3 different conditions: case A, standard load cell was not rotated and force misalignment, case B, standard load cell was rotated to 0 degrees, 120 degrees, and 240 degrees, and case C, standard load cell was not rotated but force misalignment from the force center by 10 mm. When verification of results obtained from three cases was conducted the class of machine range to 0.5 class. The parameters of the test results of case A and B were not different. However, in cases A and C, the relative errors of reversibility were found to be up to -0.45%, and the uncertainty of the calibration at the 95% confidence level were different and increased up to $\pm 0.53\%$, with respect to the increasing magnitude of the applied force. When comparing the results using E_n number method, the values were found between 0.05 - 0.89, and the difference was not significant. When more force was applied, the E_n number increased slightly. This can be concluded that for tension/compression testing machine and standard load cell of a good class, the standard load cell rotation does not affect the calibration, but the force misalignment does.

Keywords: Tension/compression testing machine, Calibration, Standard load cell, Rotation, Force misalignment

¹Measuring Instrument Calibration Division, Department of Science Service

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

1. บทนำ (Introduction)

เครื่องทดสอบแรงดึง/แรงกด

เครื่องทดสอบแรงดึง/แรงกด เป็นเครื่องมือวัดสมบัติทางกายภาพของวัสดุที่ใช้งานอย่างแพร่หลาย ทั้งในภาคอุตสาหกรรม การวิจัย และการศึกษา วัตถุประสงค์หลักในการใช้เครื่องทดสอบดังกล่าวก็เพื่อวัดค่าความต้านแรงดึง ความต้านแรงกด และความต้านแรงดัดโค้งของวัสดุทดสอบซึ่งสมบัติดังกล่าวนี้มีความสำคัญต่อการนำวัสดุไปใช้งาน ทั้งทางวิทยาศาสตร์ และวิศวกรรม

เครื่องทดสอบแรงดึง/แรงกดสามารถแบ่งตามลักษณะโครงสร้างภายนอกได้ 3 แบบ คือชนิดที่มีโครงสร้างรับแรงกระทำแบบเสาเดียว ชนิดที่มีโครงสร้างรับแรงกระทำแบบสองเสา และชนิดที่มีโครงสร้างรับแรงกระทำแบบสี่เสา โดยที่ในแต่ละชนิดสามารถสร้างแรงกระทำจากน้อยไปหามากตามลำดับ แต่ถ้าหากแบ่งตามชนิดของเซนเซอร์ที่ใช้วัดแรงกระทำจะสามารถแบ่งได้ 2 ประเภท ประเภทแรกคือชนิดที่มีเซนเซอร์วัดแรงกระทำจากความดัน (Pressure cell) เครื่องชนิดนี้เซนเซอร์จะวัดความดันของน้ำมันไฮดรอลิกในระบบที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเครื่องออกแรงกระทำแล้วแปลงสัญญาณกลับเป็นค่าแรงกระทำ ส่วนประเภทที่สองมีเซนเซอร์วัดแรงกระทำโดยตรงจากโหลดเซลล์ (Load cell) ซึ่งจะวัดแรงที่เครื่องทดสอบกระทำกับวัสดุโดยตรง โดยตำแหน่งการติดตั้งโหลดเซลล์มีทั้งแบบติดตั้งที่ปลายกระบอกไฮดรอลิกของเครื่องทดสอบซึ่งซ่อนอยู่ภายใน หรือติดตั้งที่ด้านบนของเครื่องในบริเวณคานด้านบน (Upper crosshead) หรือคานด้านล่าง (Lower crosshead) รูปที่ 1 แสดงองค์ประกอบของเครื่องทดสอบแรงดึง/แรงกด ชนิดสี่เสา



รูปที่ 1 องค์ประกอบเครื่องทดสอบแรงดึง/แรงกดชนิดสี่เสา

การสอบเทียบเครื่องทดสอบแรงดึง/แรงกด

การใช้งานเครื่องทดสอบแรงดึง/แรงกด ไม่ว่าจะเป็นประเภทใด สิ่งสำคัญที่ขาดไม่ได้ก่อนการใช้งานก็คือการสอบเทียบ เพราะการสอบเทียบทำให้รู้ถึงค่าความผิดพลาดของเครื่อง (Relative error of indication) ว่ามีขนาดเท่าใด มีทิศทางเป็นอย่างไร รวมถึงพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่มีความจำเป็นในการพิจารณาสมบัติของเครื่องทดสอบว่าเหมาะสมกับงานที่จะทำการทดสอบหรือไม่ มาตรฐานการทดสอบมีหลายมาตรฐาน เช่น มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) มอก. 2752 เล่ม 12-2562 [1] หรือ มอก. 409-2562 [2] มีการกำหนดค่าความผิดพลาดสูงสุดในการให้แรงกระทำของเครื่องทดสอบที่มีเช่นกัน การสอบเทียบเครื่องทดสอบแรงดึง/แรงกดตามมาตรฐาน ISO 7500-1:2018 (E)[3] ข้อมูลที่ได้จากการสอบเทียบจะถูกคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังตารางที่ 1 เพื่อพิจารณาความสามารถของเครื่องทดสอบต่อไป

Class of machine range	Maximum permissible value %				
	Relative error of				Relative Resolution a
	Indication q	Repeatability b	Reversibility v	Zero f_0	
0.5	± 0.5	0.5	± 0.75	± 0.05	0.25
1	± 1.0	1.0	± 1.5	± 0.1	0.5
2	± 2.0	2.0	± 3.0	± 0.2	1.0
3	± 3.0	3.0	± 4.5	± 0.3	1.5

ความหมายของค่าพารามิเตอร์ มีดังนี้

Class of machine range หมายถึง ค่าความสามารถโดยรวมของเครื่องทดสอบโดยที่คลาส 0.5 เป็นระดับความสามารถสูงสุดของเครื่อง โดยทั่วไปงานทดสอบตาม มอก. จะใช้เครื่องทดสอบที่มีคลาสไม่เกิน 1

Relative error of indication หมายถึง ค่าความผิดพลาดในการแสดงผลของเครื่องทดสอบ เมื่อเทียบกับโหลดเซลล์มาตรฐาน (ค่าแรงอ้างอิง) หากมีค่าบวกลบหมายถึงมีขนาดมากกว่าค่าแรงอ้างอิง แต่ถ้ามีค่าลบหมายถึงมีขนาดน้อยกว่าค่าแรงอ้างอิง พารามิเตอร์นี้บอกถึงความแม่นยำในการแสดงผล

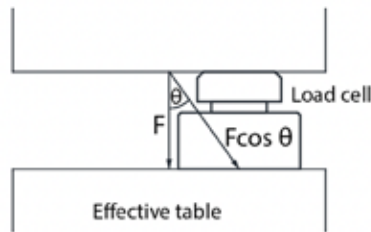
Relative error of repeatability หมายถึง ค่าความผิดพลาดในการอ่านค่าเดิมซ้ำกันหลาย ๆ ครั้ง (การสอบเทียบรอบที่ 1 - 3) เครื่องทดสอบที่มีค่าดังกล่าวน้อยเมื่อวัดจุดเดิมซ้ำกันหลาย ๆ ครั้ง กลุ่มข้อมูลที่ได้จะมีค่าใกล้เคียงกัน มีการกระจายตัวน้อย

Relative error of reversibility หมายถึง ค่าความผิดพลาดในการลดแรงกระทำของเครื่องทดสอบจากค่าแรงสูงสุดกลับมายังตำแหน่งเดิมโดยเปรียบเทียบที่จุดเดียวกันของการสอบเทียบรอบที่ 3 (เพิ่มแรงกระทำ) และรอบที่ 4 (ลดแรงกระทำ) เครื่องทดสอบที่มีค่าดังกล่าวน้อยแสดงถึงความสามารถในการลดแรงกระทำจากจุดสูงสุดย้อนกลับมาที่จุดสอบเทียบเดิมแล้วได้ค่าใกล้เคียงกัน

Relative error of zero หมายถึง ค่าความผิดพลาดในการแสดงค่าศูนย์เมื่อเครื่องทดสอบไม่มีแรงกระทำใด ๆ แล้วเป็นเวลา 30 วินาที

Relative resolution หมายถึง ความเหมาะสมในการแสดงผลของเครื่องทดสอบเทียบกับจุดที่ทำการสอบเทียบ หากจุดที่สอบเทียบมีค่าแรงน้อยความละเอียดในการแสดงผลของเครื่องทดสอบควรมีมาก เช่น แสดงด้วยทศนิยมหลายตำแหน่ง ต่อเมื่อจุดสอบเทียบมีค่าแรงที่มากขึ้น ความละเอียดในการแสดงผลอาจจะลดลงได้ตามลำดับ หรือคงความละเอียดในการแสดงผลไว้เช่นเดิมตลอดการสอบเทียบ เครื่องทดสอบที่มีค่าดังกล่าวน้อยแสดงว่ามีความสามารถในการแสดงผลที่ละเอียดเพียงพอ สอดคล้องกับจุดที่สอบเทียบ

ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการสอบเทียบเครื่องทดสอบ คือ การหมุนเปลี่ยนมุมของโหลดเซลล์ในระหว่างรอบการสอบเทียบเนื่องจากตามมาตรฐาน ISO 7500-1:2018 (E) กำหนดให้หมุนเปลี่ยนตำแหน่งมุมของโหลดเซลล์มาตรฐานที่ใช้ในการสอบเทียบเริ่มจาก 0 องศา 120 องศา และ 240 องศา ตามลำดับ เพื่อให้การสอบเทียบครอบคลุมแหล่งความผิดพลาดที่อาจมีสาเหตุมาจากโหลดเซลล์ที่ใช้ อีกหนึ่งปัจจัยก็คือการจัดวางตำแหน่งของโหลดเซลล์ให้ตรงกับศูนย์กลางแนวแรงของเครื่องทดสอบเนื่องจากเมื่อวางโหลดเซลล์มาตรฐานเยื้องจากศูนย์กลางแนวแรงของเครื่องทดสอบดังแสดงในรูปที่ 2 แรงลัพธ์ที่กระทำกับโหลดเซลล์ (F_{ZL}) มีค่าเท่ากับ $F_{ZL} = F \cos \theta$ โดยค่าแรง F_{ZL} จะลดลงตามขนาดของมุม θ ที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 2 แรงกระทำกับโหลดเซลล์มาตรฐานเมื่ออยู่ในตำแหน่งเยื้องศูนย์กลางแนวแรง

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอผลกระทบของการหมุนและการเยื้องศูนย์กลางของโหลดเซลล์มาตรฐาน ต่อผลการสอบเทียบเครื่องทดสอบแรงดึง/แรงกด ในระหว่างการสอบเทียบโหลดเซลล์จะถูกหมุนเป็นมุมต่าง ๆ เปรียบเทียบกับการไม่หมุน และทำการเลื่อนตำแหน่งของโหลดเซลล์ออกจากศูนย์กลางแนวแรงของเครื่องทดสอบเปรียบเทียบกับเมื่ออยู่ในศูนย์กลางแนวแรงพอดีเพื่อสร้างความตระหนักให้ผู้ใช้งานเครื่องทดสอบและผู้ทำการสอบเทียบ สามารถนำข้อมูลไปปรับใช้เพื่อแก้ปัญหาในการปฏิบัติงานได้ สำหรับเครื่องทดสอบที่ทำการสอบเทียบเป็นชนิดสี่เสา คลาส 0.5 มีเซนเซอร์วัดแรงกระทำแบบความดัน สามารถสร้างแรงกระทำสูงสุดได้ 1000 kN ค่าความละเอียดในการแสดงผล 0.5 kN โหลดเซลล์มาตรฐานที่นำมาใช้สอบเทียบมีขนาด 3000 kN ผ่านการสอบเทียบตามมาตรฐาน ISO 376 [4] จากหน่วยงานที่ได้การรับรอง ISO/IEC 17025 สภาพแวดล้อมในการสอบเทียบมีอุณหภูมิอยู่ระหว่าง $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ ก่อนเริ่มการสอบเทียบ มีการเตรียมความพร้อมของระบบด้วยการให้แรงกระทำจนถึงจุดสอบเทียบสูงสุด 3 รอบ การสอบเทียบเครื่องทดสอบ กำหนดจุดสอบเทียบ 5 จุด (300, 350, 400, 450 และ 500) kN ทำการสอบเทียบทั้งหมด 4 รอบ แบ่งเป็นทิศเพิ่มแรงกระทำ 3 รอบและลดแรงกระทำ 1 รอบ เมื่อวัดค่าแรงสูงสุดในรอบที่ 3 จึงเริ่มลดแรงกระทำลง (เริ่มการสอบเทียบรอบที่ 4) จนถึงจุดเริ่มต้นจึงสิ้นสุดการสอบเทียบ

2. วิธีการวิจัย (Experimental methods)

2.1 เครื่องทดสอบแรงดึง/แรงกด

เครื่องทดสอบแรงดึง/แรงกดที่ใช้ในการดำเนินการวิจัยมีการจัดวางเครื่องมือดังแสดงในรูปที่ 3 มีคุณลักษณะแสดงดังตารางที่ 2 [5]



รูปที่ 3 การจัดวางเครื่องมือในการดำเนินการวิจัย

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของเครื่องทดสอบแรงดึง/แรงกดที่ใช้ในการดำเนินการวิจัย [5]

คุณลักษณะ (Specification)	ค่าที่กำหนดจากผู้ผลิต (Manufacturer value)	หน่วย (Unit)
Maximum capacity	1000	kN
Readability	0.5	kN
Maximum plate-to-plate distance (Compression)	900	mm
Ram stroke	250	mm
Effective table area	750x750	mm
Test force measuring accuracy	± 1	% (of reading)

2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

2.2.1 โหลดเซลล์มาตรฐานขนาด 3000 kN สำหรับสอบเทียบเครื่องทดสอบแรงดึง/แรงกด ดังแสดงในรูปที่ 4 มีใบรับรองผลการสอบเทียบตาม ISO 376 จากหน่วยงานที่ได้รับการรับรอง ISO/IEC 17025 และผลการทวนสอบโหลดเซลล์ตาม ISO 376 ไม่เกินคลาส 1



รูปที่ 4 โหลดเซลล์มาตรฐานที่ใช้ในการสอบเทียบ

2.2.2 เครื่องประมวลผลสัญญาณดังแสดงในรูปที่ 5 มีใบรับรองผลการสอบเทียบจากหน่วยงานที่ได้รับการรับรอง ISO/IEC 17025 สำหรับประมวลผลสัญญาณจากโหลดเซลล์มาตรฐานในระหว่างการสอบเทียบ



รูปที่ 5 เครื่องประมวลผลสัญญาณจากโหลดเซลล์

2.2.3 เครื่องวัดสภาวะแวดล้อมขณะทำการสอบเทียบ และเครื่องวัดระยะด้วยเลเซอร์แบบดิจิทัลที่มีความละเอียดในการแสดงผล 0.1 มม. สำหรับจัดวางตำแหน่งโหนดเซลล์มาตรฐานให้อยู่ตรงกลางแนวแรงของเครื่องทดสอบ แสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 เครื่องวัดสภาวะแวดล้อม และเครื่องวัดระยะด้วยเลเซอร์แบบดิจิทัลตามลำดับ

2.3 วิธีดำเนินงาน

การดำเนินงานวิจัยเริ่มจากนำโหนดเซลล์มาตรฐานมาติดตั้งบนเครื่องทดสอบ จัดวางโหนดเซลล์ให้อยู่ตรงกลางแนวแรงของเครื่องทดสอบโดยใช้เครื่องวัดระยะด้วยเลเซอร์ ตั้งระยะความสูงของ Effective table ให้คงที่ที่ 20 มม. โดยสังเกตจากค่าความสูงของระยะการเคลื่อนที่ที่หน้าจอแสดงผลของเครื่องทดสอบ สอบเทียบเครื่องทดสอบตามมาตรฐาน ISO 7500-1:2018 (E) ทำการบันทึกอุณหภูมิและความชื้นในทุก ๆ รอบการสอบเทียบโดยการสอบเทียบแบ่งเป็น 3 กรณี คือ A B และ C ดังนี้

2.3.1 กรณี A สอบเทียบเครื่องทดสอบโดยไม่หมุนโหนดเซลล์มาตรฐานและไม่เอียงศูนย์กลางแนวแรง

2.3.2 กรณี B สอบเทียบเครื่องทดสอบโดยหมุนโหนดเซลล์มาตรฐานเป็นมุม 0 องศา, 120 องศา และ 240 องศาตามลำดับในแต่ละรอบของการสอบเทียบโดยไม่เอียงศูนย์กลางแนวแรง

2.3.3 กรณี C สอบเทียบเครื่องทดสอบโดยเลื่อนตำแหน่งของโหนดเซลล์ออกจากศูนย์กลางแนวแรงเป็นระยะ 10 มม. โดยวัดจากเครื่องวัดระยะด้วยเลเซอร์และไม่หมุนโหนดเซลล์

2.4 การคำนวณ

คำนวณค่าเฉลี่ยของแรงกระทำ Relative error of indication, Relative error of repeatability, Relative error of reversibility, Relative error of zero, Relative resolution ประเมินคลาสของเครื่องทดสอบ และคำนวณค่าความไม่แน่นอนของการสอบเทียบ โดยมีสมการการคำนวณ ดังนี้

2.4.1 การคำนวณแรงเฉลี่ย

สำหรับแรงที่ใช้ในการทดลองนั้นจะมี 5 ระดับ คือ 300, 350, 400, 450 และ 500 kN ทำการวัดสามรอบโดยกำหนดให้เป็น F_1 , F_2 , F_3 ตามลำดับ และจะมีการคำนวณค่าเฉลี่ย ($\bar{F}$) ตามสมการ (1)

$$\bar{F} = \frac{F_1 + F_2 + F_3}{3} \quad (1)$$

2.4.2 การคำนวณ Relative error of indication, q

การสอบเทียบในทิศเพิ่มแรงกระทำทั้ง 3 รอบ ที่แต่ละจุดการสอบเทียบสามารถคำนวณค่า Relative error of indication ในการสอบเทียบแต่ละรอบได้ตามชุดสมการ (2), (3) และ (4)

$$q_1 = \frac{(F_{i1} - F_1)}{F_1} \times 100 \quad (2)$$

$$q_2 = \frac{(F_{i2} - F_2)}{F_2} \times 100 \quad (3)$$

$$q_3 = \frac{(F_{i3} - F_3)}{F_3} \times 100 \quad (4)$$

โดย q_1, q_2, q_3 คือ Relative error of indication ของจุดการสอบเทียบหนึ่งจุดในรอบที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ

F_{i1}, F_{i2}, F_{i3} คือ ค่าแรงที่อ่านได้จากเครื่องทดสอบ ในรอบที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ

F_1, F_2, F_3 คือ ค่าแรงที่อ่านได้จากโหลดเซลล์มาตรฐานในรอบที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ

ดังนั้น ค่าเฉลี่ยของ Relative error of indication คำนวณได้จากสมการ (5)

$$q = \frac{(q_1 + q_2 + q_3)}{3} \quad (5)$$

2.4.3 การคำนวณ Relative repeatability error, b

Relative repeatability error เป็นผลต่างระหว่างค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของ Relative error of indication สามารถคำนวณได้ตามสมการ (6)

$$b = q_{\max} - q_{\min} \quad (6)$$

โดย $q_{\max}$ คือ ค่าสูงสุดของ Relative error of indication ที่ได้จากการเปรียบเทียบค่า q_1, q_2 และ q_3 (%)

$q_{\min}$ คือ ค่าต่ำสุดของ Relative error of indication ที่ได้จากการเปรียบเทียบค่า q_1, q_2 และ q_3 (%)

2.4.4 การคำนวณ Relative reversibility error, v

Relative reversibility error คือ ค่า Hysteresis คำนวณจากรอบสุดท้ายที่มีการเพิ่มแรงจนถึงระดับสูงสุดของการสอบเทียบแล้วถอยแรงกลับ โดยค่านี้เป็นผลต่างของค่าแรงช่วงที่เพิ่มแรงขึ้นเทียบกับค่าแรงช่วงที่ถอยแรงกลับ ณ จุดสอบเทียบเดียวกัน โดยคำนวณจากสมการที่ (7)

$$v = \frac{F - F'}{F} \times 100 \quad (7)$$

โดย F คือ ค่าแรงที่อ่านได้จากโหลดเซลล์มาตรฐานในช่วงที่เพิ่มแรงขึ้น

F' คือ ค่าแรงที่อ่านได้จากโหลดเซลล์มาตรฐานในช่วงที่ถอยแรงกลับ

$\bar{F}$ คือ ค่าแรงเฉลี่ยในช่วงที่เพิ่มแรงขึ้นทั้ง 3 รอบ

2.4.5 การคำนวณ Relative zero error, f_0

Relative zero error เป็นค่าความผิดพลาด ณ ตำแหน่งที่ไม่มีแรงกระทำของแต่ละรอบการสอบเทียบ คำนวณจากสมการ (8)

$$f_0 = \frac{F_{i0}}{F_N} \times 100 \quad (8)$$

โดย F_{i0} คือ ค่าแรงของเครื่องทดสอบ ณ ตำแหน่งที่ไม่มีแรงกระทำ

F_N คือ ค่าสูงสุดของพิสัยการสอบเทียบ

2.4.6 การคำนวณ Relative resolution, a

Relative resolution ของตัวอ่านค่าแรง (Force Indicator) คำนวณจากสมการ (9)

$$a = \frac{r}{F_i} \times 100 \quad (9)$$

โดย r คือ ความละเอียดของตัวอ่านค่าแรงของเครื่องทดสอบ

F_i คือ ค่าแรงที่อ่านได้จากเครื่องทดสอบตามจุดสอบเทียบที่กำหนด

2.5 การหาค่าความไม่แน่นอนของการวัด

2.5.1 ความไม่แน่นอนของการวัดจากโหนดเซลล์มาตรฐาน

- ค่าความไม่แน่นอนที่ได้จากผลการสอบเทียบโหนดเซลล์มาตรฐาน (u_{cal}) คำนวณได้จากสมการ (10)

$$u_{cal} = \frac{U_{cal}}{k} \quad (10)$$

โดย U_{cal} คือ ค่าความไม่แน่นอนจากใบรายงานผลการสอบเทียบของโหนดเซลล์มาตรฐาน

k คือ ค่า Coverage factor จากใบรายงานผลการสอบเทียบของโหนดเซลล์มาตรฐาน

- ค่าความไม่แน่นอนที่ได้จาก Drift ของโหนดเซลล์มาตรฐาน (u_{drift}) คำนวณได้จากสมการ ซึ่งใช้ในกรณีที่โหนดเซลล์ใหม่ยังไม่มีประวัติการสอบเทียบ คำนวณได้จากสมการ (11)

$$u_{drift} = \frac{U_{cal}}{\sqrt{3}} \quad (11)$$

หากเป็นโหนดเซลล์มาตรฐานที่มีประวัติการสอบเทียบแล้วค่า Drift คำนวณได้จากสมการ (12)

$$u_{drift} = \frac{(U_{cal} \text{ ของปีล่าสุด} - U_{cal} \text{ ของปีก่อนหน้า})}{\sqrt{3}} \quad (12)$$

- ค่าความไม่แน่นอนจากผลกระทบของอุณหภูมิ (u_{temp}) ในขณะที่มีการใช้งานโหนดเซลล์มาตรฐาน คำนวณได้จากสมการ (13)

$$u_{temp} = \frac{\sqrt{u_{temp_zero}^2 + u_{temp_sen}^2}}{2\sqrt{3}} \quad (13)$$

โดย

$$u_{temp_zero} = (20 - temp_{before\ cal.}) \times zero\ temp.\ coeff.$$

$$u_{temp_sen} = ((temp_{on-site} - 23) + \Delta t) \times sensitivity\ temp.\ coeff.$$

และ Zero temp. coeff. คือ สัมประสิทธิ์ตามอุณหภูมิของโหนดเซลล์เมื่อยังไม่มี การรับแรง

Sensitivity temp. coeff. คือ สัมประสิทธิ์ตามอุณหภูมิของโหนดเซลล์ขณะที่มีการรับแรง

Δt คือ ค่าความผันผวนของอุณหภูมิในระหว่างการสอบเทียบ

- ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานที่ได้จาก force transfer effect (u_{trans}) คือ ค่าความต่างของผลลัพธ์ที่เป็นไปได้ของโหนดเซลล์มาตรฐาน เมื่อนำไปใช้ภายนอกห้องปฏิบัติการสอบเทียบของสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ โดยมีค่าประมาณ 150 ppm (0.015 %) และมี Divisor เป็น $\sqrt{3}$ คำนวณได้จากสมการ (14)

$$u_{trans} = \frac{0.015}{\sqrt{3}} \quad (14)$$

2.5.2 ความไม่แน่นอนของการวัดจากเครื่องทดสอบ

- ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานที่เกิดจากการวัดซ้ำ (u_{rep}) จุดเดิมหลาย ๆ ครั้ง สามารถคำนวณได้จากสมการ (15)

$$u_{rep} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (q_i - \bar{q})^2} \quad (15)$$

โดย n คือ จำนวนรอบการวัดซ้ำของการอ่านค่าแรงตามจุดสอบเทียบที่กำหนด

q_i คือ ค่า Relative indication error ครั้งที่ i ของเครื่องทดสอบตามจุดสอบเทียบที่กำหนด

$\bar{q}$ คือ ค่าเฉลี่ยของ Relative indication error ตามจุดสอบเทียบที่กำหนด (%)

- ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานจากความละเอียดตัวอ่านค่าแรงของเครื่องทดสอบ (u_{res}) คำนวณได้จากสมการ (16)

$$u_{res} = \sqrt{\left[\frac{a_F}{2\sqrt{3}}\right]^2 + \left[\frac{a_z}{2\sqrt{3}}\right]^2} \quad (16)$$

โดย a_F คือ Relative resolution ของตัวอ่านค่าแรงเครื่องทดสอบที่แต่ละจุดสอบเทียบขณะเพิ่มแรง (%)

a_z คือ Relative resolution ของตัวอ่านค่าแรงเครื่องทดสอบขณะไม่มีแรงกระทำ (%)

- ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานจากค่าแรงของเครื่องทดสอบ ณ ตำแหน่งที่ไม่มีแรงกระทำของแต่ละรอบ (u_{zero}) คำนวณได้จากสมการ (17)

$$u_{zero} = \frac{f_0}{\sqrt{3}} \quad (17)$$

- ค่าความไม่แน่นอนจากการสอบเทียบโดยมีการถอยแรงในรอบสุดท้าย คำนวณได้จากค่าสูงสุดของพารามิเตอร์ Reversibility (v) หารด้วย $\sqrt{3}$ ตามสมการที่ (18)

$$u_{rev} = \frac{v}{\sqrt{3}} \quad (18)$$

2.5.3 การรวมค่าความไม่แน่นอนจากการสอบเทียบ

- ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐาน (Combined uncertainty, u_c) คำนวณจากสมการ (19)

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_i^2} \quad (19)$$

โดย u_i คือ ความไม่แน่นอนมาตรฐานที่เกิดจากการวัดค่าต่าง ๆ

- ค่าความไม่แน่นอนขยาย (Expanded uncertainty, U) คำนวณจากสมการ (20)

$$U = k \times u_c \quad (20)$$

โดย k คือ ค่าสัมประสิทธิ์ครอบคลุม (Coverage factor) โดยค่า k สามารถหาได้จาก ตารางการแจกแจงแบบ t (t -distribution) ที่ระดับความเชื่อมั่นประมาณ 95% ซึ่งต้องคำนวณหาค่า effective degree of freedom (ν_{eff}) เพื่อนำไปหาค่า k คำนวณจากสมการ (21)

$$\nu_{eff} = \frac{u_c^4}{\sum_{i=1}^n \frac{u_i^4}{\nu_i}} \quad (21)$$

3. ผลและวิจารณ์ (Results and discussion)

3.1 ผลการสอบเทียบเครื่องทดสอบแรงดึง/แรงกด ทั้งสามกรณีเป็นไปตามตารางที่ 3, 4 และ 5

ตารางที่ 3 ผลการสอบเทียบในกรณี A

Machine reading F (kN)	Arithmetic mean $\bar{F}$ (kN)	Maximum permissible value (%)					Class	Uncertainty U ($\pm\%$)
		Relative error of				Relative Resolution a		
		Indication q	Repeatability b	Reversibility v	Zero f_0			
300.0	300.124	-0.04	0.03	-0.01	0.00	0.17	0.5	0.13
350.0	350.185	-0.05	0.04	0.05		0.14	0.5	0.14
400.0	400.296	-0.07	0.07	0.05		0.13	0.5	0.14
450.0	450.338	-0.08	0.06	0.03		0.11	0.5	0.12
500.0	500.410	-0.08	0.02	0.03		0.10	0.5	0.11

ตารางที่ 4 ผลการสอบเทียบในกรณี B

Machine reading F (kN)	Arithmetic mean $\bar{F}$ (kN)	Maximum permissible value (%)					Class	Uncertainty U ($\pm\%$)
		Relative error of				Relative Resolution a		
		Indication q	Repeatability b	Reversibility v	Zero f_0			
300.0	300.046	-0.02	0.04	0.03	0.00	0.17	0.5	0.14
350.0	350.087	-0.02	0.11	0.07		0.14	0.5	0.16
400.0	400.274	-0.07	0.03	0.03		0.13	0.5	0.12
450.0	450.239	-0.05	0.05	0.02		0.11	0.5	0.11
500.0	500.369	-0.07	0.04	0.05		0.10	0.5	0.12

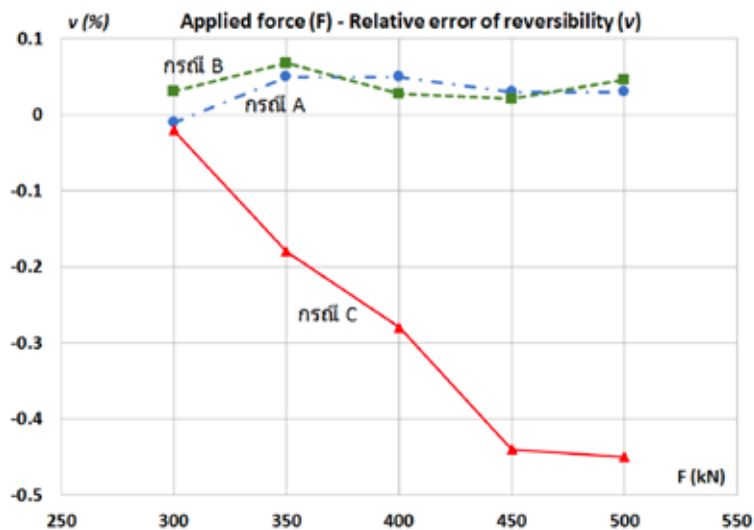
ตารางที่ 5 ผลการสอบเทียบในกรณี C

Machine reading F (kN)	Arithmetic mean $\bar{F}$ (kN)	Maximum permissible value (%)					Class	Uncertainty U ($\pm\%$)
		Relative error of				Relative Resolution a		
		Indication q	Repeatability b	Reversibility v	Zero f_0			
300.0	300.429	-0.14	0.09	-0.02	0.00	0.17	0.5	0.15
350.0	350.255	-0.07	0.16	-0.18		0.14	0.5	0.26
400.0	400.137	-0.03	0.07	-0.28		0.13	0.5	0.35
450.0	450.014	0.00	0.10	-0.44		0.11	0.5	0.52
500.0	499.657	0.07	0.05	-0.45		0.10	0.5	0.53

เมื่อนำผลการสอบเทียบในกรณี A B และ C มาเปรียบเทียบกับพบว่าค่าพารามิเตอร์ทั้งสามกรณีให้ผลการทวนสอบตามมาตรฐาน ISO 7500-1:2018 (E) ได้คลาส 0.5 เท่ากัน ซึ่งถือว่าเป็นคลาสสูงสุด เมื่อพิจารณาในหัวข้อค่าเฉลี่ย Relative error of indication, Relative error of repeatability, Relative error of zero และ Relative resolution ของทั้งสามกรณีพบว่าไม่มีค่าที่แตกต่างกัน แต่ในกรณี C มีพารามิเตอร์ Relative error of reversibility และความไม่แน่นอนของการสอบเทียบมีค่าที่แตกต่างออกไป ข้อมูลผลการสอบเทียบทั้งสามกรณีที่ให้เห็นว่าการเยื้องศูนย์กลางแนวแรงของโหลดเซลล์มาตรฐานส่งผลต่อการสอบเทียบมากกว่าผลจากการหมุนโหลดเซลล์มาตรฐานในระหว่างการสอบเทียบ

3.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและ Relative error of reversibility

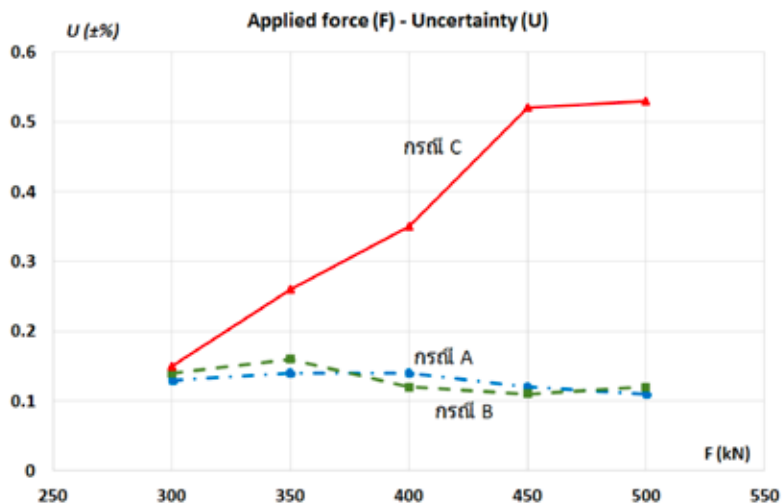
กรณี A B ไม่แตกต่างกัน แต่กรณี C มีค่าแตกต่างออกไป โดยมีขนาดเพิ่มขึ้นในทิศทางลบตามขนาดแรงกระทำที่เพิ่มขึ้น แต่มีแนวโน้มลดลงในช่วงปลายของแรงกระทำตามกราฟรูปที่ 7 การมีทิศทางลบหมายความว่าที่จุดวัดเดียวกันวัดค่าแรงในรอบที่ 4 ได้มากกว่ารอบที่ 3



รูปที่ 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและ Relative error of reversibility กรณี A, B และ C

3.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและความไม่แน่นอนของการสอบเทียบที่ความเชื่อมั่น 95%

กรณี A และ B ไม่แตกต่างกัน แต่กรณี C มีค่าที่แตกต่างออกไป โดยมีขนาดเพิ่มขึ้นตามขนาดของแรงกระทำที่เพิ่มขึ้น แต่มีแนวโน้มลดลงในช่วงปลายของแรงกระทำตามกราฟรูปที่ 8



รูปที่ 8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและ Uncertainty กรณี A, B และ C

3.4 การเปรียบเทียบทางสถิติ (E_n number)

ในหัวข้อนี้จะใช้แนวทางของ ISO/IEC 17043 [6] มาเปรียบเทียบผลการสอบเทียบของกรณี A และ C ในพารามิเตอร์ Relative error of reversibility ว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ โดยผลการเปรียบเทียบแสดงในตารางที่ 6 ซึ่งคำนวณตามสมการที่ (22) พร้อมเกณฑ์การตัดสินดังนี้

$$E_n = \frac{X_A - X_C}{\sqrt{U_A^2 + U_C^2}} \quad (22)$$

โดย X_A = Relative error of reversibility ของกรณี A

X_C = Relative error of reversibility ของกรณี C

U_A = ค่าความไม่แน่นอนที่ 95% ของค่า Relative error of reversibility ของกรณี A

U_C = ค่าความไม่แน่นอนที่ 95% ของค่า Relative error of reversibility ของกรณี C

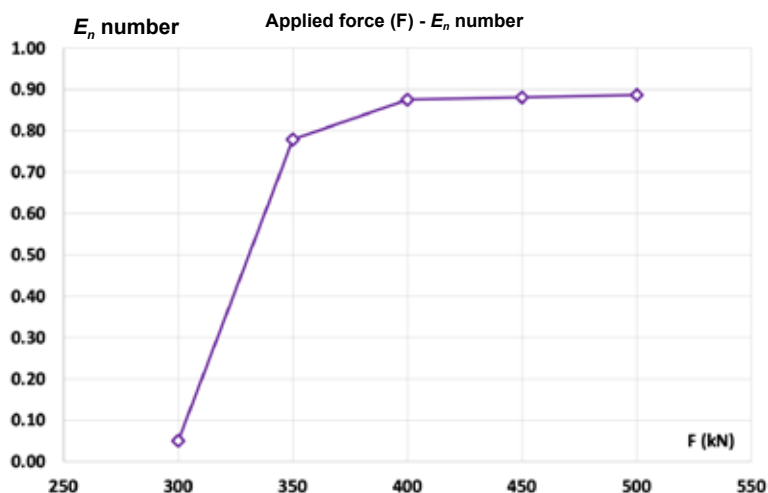
การพิจารณาค่า E_n number มีหลักเกณฑ์ดังนี้

- ถ้า $E_n < 1$ แสดงว่าผลการเปรียบเทียบไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และผ่านเกณฑ์
- ถ้า $E_n > 1$ แสดงว่าผลการเปรียบเทียบมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และไม่ผ่านเกณฑ์

ตารางที่ 6 ผลการเปรียบเทียบทางสถิติ (E_n number) ของ Relative error of reversibility กรณี A และ C

Machine reading F (kN)	Relative error of reversibility v (%)		Uncertainty U ($\pm$ %)		$ E_n $	Result
	A	C	A	C		
300.0	-0.01	-0.02	0.13	0.15	0.05	Pass
350.0	0.05	-0.18	0.14	0.26	0.78	Pass
400.0	0.05	-0.28	0.14	0.35	0.88	Pass
450.0	0.03	-0.44	0.12	0.52	0.88	Pass
500.0	0.03	-0.45	0.11	0.53	0.89	Pass

จากผลการเปรียบเทียบในตารางที่ 6 พบว่า Relative error of reversibility ในกรณี A และ C ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยมี $E_n < 1$ และเมื่อนำมาเขียนกราฟกับแรงกระทำดังแสดงในรูปที่ 9 พบว่า มีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงแรกและแนวโน้มลดลงจนเกือบอยู่ในแนวระดับในช่วงปลาย



รูปที่ 9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและ E_n number กรณี A - C

4. สรุป (Conclusion)

4.1 เครื่องทดสอบแรงดึง/แรงกดที่ทำการวิจัยเมื่อสอบเทียบกรณีหมุนโหลดเซลล์เป็นมุม 0 องศา 120 องศา และ 240 องศา ตามรอบการสอบเทียบ พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของการสอบเทียบและค่าความไม่แน่นอนของการสอบเทียบไม่แตกต่างจากกรณีสอบเทียบโดยไม่หมุนโหลดเซลล์ ที่เป็นเช่นนี้น่าจะมีสาเหตุจากระดับผิวหน้าของ Effective table ของเครื่องทดสอบแรงดึง/แรงกดที่ทำการวิจัยมีสมดุที่ตี ไม่เอียงไปทางใดทางหนึ่ง การหมุนโหลดเซลล์มาตรฐานระหว่างการสอบเทียบจึงไม่ส่งผลต่อการสอบเทียบ วัตถุประสงค์ของการหมุนโหลดเซลล์ในระหว่างรอบการสอบเทียบก็เพื่อให้ครอบคลุมแหล่งความผิดพลาดที่อาจมีสาเหตุมาจากเครื่องทดสอบและตัวโหลดเซลล์เอง ดังนั้นหากโหลดเซลล์ที่นำมาสอบเทียบมีคุณสมบัติที่ดี ผ่านการสอบเทียบตามมาตรฐาน ISO 376 มีผลการทวนสอบโหลดเซลล์ไม่เกินคลาส 1 และเครื่องทดสอบแรงดึง/แรงกด มีคลาสที่ดีจะได้ผลการสอบเทียบของทั้งสองกรณีไม่แตกต่างกัน

4.2 เครื่องทดสอบแรงดึง/แรงกดที่ทำการวิจัยเมื่อสอบเทียบกรณีเอียงศูนย์กลางแนวแรง ให้ผลการสอบเทียบในพารามิเตอร์ Relative error of reversibility และค่าความไม่แน่นอนของการสอบเทียบที่ความเชื่อมั่น 95% แตกต่างจากกรณีสอบเทียบโดยไม่เอียงศูนย์กลางแนวแรง โดยค่าทั้งสองมีขนาดเพิ่มขึ้นตามขนาดของแรงกระทำที่เพิ่มขึ้นแต่ยังไม่มีนัยสำคัญ ค่าความไม่แน่นอนของการสอบเทียบนั้นคำนวณจากแหล่งความไม่แน่นอนย่อย ๆ (Uncertainty budget) หลายแหล่ง ซึ่งหนึ่งในนั้นคือค่าความผิดพลาดของ Relative error of reversibility ดังนั้นสาเหตุที่ทำให้ค่าความไม่แน่นอนของการสอบเทียบเพิ่มขึ้นเกิดจากค่า Relative error of reversibility ที่เพิ่มขึ้นนั่นเอง จากกราฟรูปที่ 9 พบว่าค่า Relative error of reversibility มีแนวโน้ม เพิ่มขึ้นตามขนาดของแรงกระทำในช่วงต้นถึงช่วงกลางซึ่งจะส่งผลให้ E_n number มีขนาดเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ แต่ในช่วงปลายหากเพิ่มขนาดของแรงกระทำในการสอบเทียบมากขึ้นเรื่อย ๆ ค่า E_n number จะมีแนวโน้มเปลี่ยนไปเพียงเล็กน้อย

การเอียงศูนย์กลางแนวแรงมากถึง 10 มม. น่าจะส่งผลต่อค่า Relative error of indication ตามสมการ $F_{ZL} = F \cos \theta$ เพราะค่าแรงที่กระทำกับโหลดเซลล์ถูกแตกแรงออกมาเป็นมุม θ แต่จากข้อมูลพบว่าได้ค่าไม่แตกต่างกันในทุก ๆ กรณีที่เป็นเช่นนี้มีสาเหตุมาจากการเอียงศูนย์กลางแนวแรง 10 มม. นั้นสามารถคำนวณเป็นมุมได้ $\theta \approx 1.818$ องศา ซึ่ง $\cos \theta \approx 0.9995$ เมื่อนำมาคูณกับค่าแรงกระทำจึงได้ผลลัพธ์ที่เปลี่ยนแปลงไปน้อย อย่างไรก็ตามในการปฏิบัติงานจริงมักพบการเอียงศูนย์กลางแนวแรงไม่เกิน 5 มม. ระยะเอียงศูนย์กลาง 10 มม. ถือเป็นกรณีที่พบได้ยาก

การจัดวางโหลดเซลล์เพื่อทำการสอบเทียบในบางครั้งแทนวางตัวอย่างของเครื่องทดสอบไม่มีเส้นอ้างอิงสำหรับวางตัวอย่างทดสอบ ในกรณีเช่นนี้ผู้ปฏิบัติงานสามารถใช้ดัดลบเมตรวัดระยะจากขอบของแท่นวางถึงตัวของโหลดเซลล์ให้เท่ากันทั้งสองด้านเพื่อให้อยู่ตรงศูนย์กลางแนวแรง ความผิดพลาดเล็กน้อยจากการวัดด้วยดัดลบเมตร 2 - 3 มม. จะไม่ส่งผลต่อความแม่นยำของการแสดงผลของเครื่องทดสอบ แต่ทั้งนี้ต้องไม่ลืมพิจารณาหัวข้อ Relative error of reversibility ควบคู่ด้วย

5. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณกองสอบเทียบเครื่องมือวัด กรมวิทยาศาสตร์บริการ ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ เครื่องมือและคำแนะนำปรึกษาในงานวิจัยนี้

6. เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] สำนักมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ). มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม วิธีทดสอบปูนซีเมนต์ เล่ม 12 วิธีทดสอบความต้านแรงอัดของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก. มอก. 2752 เล่ม 12-2562. กรุงเทพฯ: สมอ.; 2562.
- [2] สำนักมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ). มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม วิธีทดสอบความต้านแรงอัดของแท่งทดสอบคอนกรีต. มอก.409-2562. กรุงเทพฯ: สมอ.; 2562.

- [3] International Organization for Standardization (ISO). Metallic materials-calibration and verification of static uniaxial testing machines- Part 1: Tension/compression testing machines-calibration and verification of the force-measuring system. ISO 7500-1:2018(E). Geneva, Switzerland: ISO; 2018.
- [4] International Organization for Standardization (ISO). Metallic materials-calibration of force-proving instruments used for the verification of uniaxial testing machines. ISO 376:2011(E). Geneva, Switzerland: ISO; 2011.
- [5] Shimadzu. Instruction manual computer-controlled, hydraulic-servo UH-I Series 2000kN-1000kN model.
- [6] International Organization for Standardization and International Electrotechnical Commission (ISO/IEC). Conformity assessment-general requirements for proficiency testing. ISO/IEC 17043:2010(E). Geneva, Switzerland: ISO; 2010.

ระบบสอบเทียบดิจิทัลเทอร์โม-ไฮโกรมิเตอร์แบบอัตโนมัติ โดยใช้วิธีการประมวลผลภาพและเครือข่ายไร้สาย

Automated calibration system for a digital thermo-hygrometer using image
processing approaches and wireless communication

เจตนา ทองใบ^{1*}

Jettana Tongbai^{1*}

รับบทความ 12 มิถุนายน 2566 แก้ไขบทความ 14 กุมภาพันธ์ 2567 ยอมรับตีพิมพ์ 19 กุมภาพันธ์ 2567

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอระบบอัตโนมัติสำหรับสอบเทียบดิจิทัลเทอร์โม-ไฮโกรมิเตอร์ (Digital thermo-hygrometer) แบบที่ไม่มีตัวต่อประสานการสื่อสารโดยใช้เทคโนโลยีการประมวลผลภาพดิจิทัล (Digital image processing) และวิธีการสื่อสารไร้สายแบบเรียลไทม์เพื่อลดระยะเวลาการสอบเทียบและลดข้อผิดพลาดของผู้ปฏิบัติงาน (Human error) งานวิจัยนี้นำเสนอวิธีแก้ปัญหาโดยใช้ ESP32-CAM ซึ่งเป็นโมดูลกล้องขนาดเล็กและราคาถูก จับภาพมิเตอร์และส่งไปยังเว็บเซิร์ฟเวอร์ที่ประมวลผลภาพด้วยวิธี Seven Segment Optical Character Recognition (SSOCR) ผลการวัดและสอบเทียบจะนำเสนอบนแดชบอร์ดที่เข้าถึงได้ผ่านเว็บเบราว์เซอร์ ผลการทดลองตรวจสอบประสิทธิภาพของทั้งอัลกอริทึมและแอปพลิเคชันของผู้ใช้ โดยให้ประสิทธิภาพโดยรวมเทียบเท่ากับกระบวนการสอบเทียบด้วยตนเอง โดยเฉพาะอย่างยิ่งผลการทดลองในระบบที่สร้างขึ้นแสดงให้เห็นว่าวิธีการจดจำภาพที่นำเสนอมีความแม่นยำเฉลี่ย 96.48%

คำสำคัญ: การประมวลผลภาพดิจิทัล จอแสดงผลแบบ 7 ส่วน การสอบเทียบ ดิจิทัลเทอร์โม-ไฮโกรมิเตอร์

¹กองสอบเทียบเครื่องมือวัด, กรมวิทยาศาสตร์บริการ

Abstract

This research presents an automated calibration system for the calibration of a Digital Thermo-Hygrometer not equipped with a communication interface using digital image processing technology and a real-time wireless communication method to reduce time-consuming calibrations and reduce human errors. This research proposes a solution based on an ESP32-CAM, a small and low-cost camera module, capturing a meter image and transferring it to a web server processing using the seven-segment optical character recognition (SSOCR) method. The measurement and calibration results are presented in a dashboard accessible through the web browser. The experimental results validate the effectiveness of both algorithm and user applications, offering overall performance comparable with manual calibrating processes. In particular, the experimental results on the built-up system show that the proposed image recognition methods provide an average accuracy of 96.48%.

Keywords: Digital image processing, 7-Segment Display, Calibration, Digital thermo-hygrometer

¹Measuring Instrument Calibration Division, Department of Science Service

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

1. บทนำ (Introduction)

ดิจิทัลดเทอร์โม-ไฮโกรมิเตอร์ (Digital thermo-hygrometer) เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับตรวจสอบอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศโดยส่วนใหญ่จะถูกนำไปใช้วัดสภาวะแวดล้อมของห้องปฏิบัติการทดสอบและสอบเทียบที่ต้องการควบคุมระดับอุณหภูมิและความชื้นให้อยู่ในช่วงที่กำหนดไว้หรือใช้บันทึกอุณหภูมิและความชื้นในห้องปฏิบัติการทดสอบและสอบเทียบ [1-3] เนื่องจากห้องปฏิบัติการต้องเฝ้าระวัง ควบคุม และบันทึกสภาวะแวดล้อมต่างๆ ต้องไม่ให้อุณหภูมิและความชื้นมีอิทธิพลต่อความใช้ได้ของผลการวัดตามมาตรฐาน ISO/IEC 17025 หรือข้อกำหนดทั่วไปว่าด้วยความสามารถของห้องปฏิบัติการทดสอบและสอบเทียบ (General requirements for the competence of testing and calibration laboratories) [4] นอกจากนี้ดิจิทัลดเทอร์โม-ไฮโกรมิเตอร์ยังถูกนำไปใช้ในด้านทางการแพทย์ เช่น การควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของระบบปรับอากาศภายในห้องผ่าตัด (Operating room, OR) เพื่อควบคุมการเจริญเติบโตของเชื้อโรคในห้องผ่าตัดและให้คนทำงานอยู่ในสภาวะสบาย [5] การควบคุมอุณหภูมิและความชื้นเพื่อยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อโรคในห้องผู้ป่วยภาวะวิกฤติ (Intensive care unit, ICU) สำหรับผู้ป่วยที่มีอาการบาดเจ็บค่อนข้างรุนแรงหรือมีภาวะล้มเหลวของระบบการทำงานของอวัยวะต่าง ๆ ในร่างกาย [6] และการควบคุมอุณหภูมิความชื้นสัมพัทธ์ในการเก็บรักษายาที่ห้องยาของโรงพยาบาล [7] เป็นต้น การควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ถือเป็นอีกหนึ่งปัจจัยหลักที่ช่วยควบคุมคุณภาพของสินค้า ผลิตภัณฑ์และการบริการให้ได้ตามมาตรฐาน อีกทั้งยังช่วยลดผลกระทบความเสียหายที่จะเกิดขึ้นต่อสินค้าหรือเครื่องมืออุปกรณ์ต่าง ๆ อันเนื่องมาจากความชื้นเมื่อเครื่องมือดังกล่าวถูกใช้งานอย่างต่อเนื่องก็อาจส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการการวัดค่าอุณหภูมิและความชื้น ดังนั้น จึงจำเป็นที่จะต้องสอบเทียบเครื่องมือ เพื่อตรวจสอบว่าเครื่องมือเหล่านั้นสามารถวัดค่าได้อย่างถูกต้องและเป็นการสร้างความมั่นใจและความน่าเชื่อถือของผลการวัด

การสอบเทียบดิจิทัลดเทอร์โม-ไฮโกรมิเตอร์เป็นการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์กับเครื่องมือวัดอุณหภูมิและความชื้นมาตรฐานอ้างอิงภายใต้สภาวะอุณหภูมิและความชื้นคงที่ภายในตู้สร้างอุณหภูมิและความชื้น (Temperature and humidity generator) [8] โดยที่ดิจิทัลดเทอร์โม-ไฮโกรมิเตอร์จะต้องติดตั้งตัวเครื่องหรือโพรบวัดไว้ภายในตู้สร้างอุณหภูมิและความชื้น เปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดอุณหภูมิและเครื่องมือวัดความชื้นมาตรฐานอ้างอิงที่มีความถูกต้องสูง ซึ่งอาจใช้ดิจิทัลดเทอร์โม-ไฮโกรมิเตอร์หรือใช้เครื่องมือวัดอุณหภูมิจุดน้ำค้าง (Dew-point hygrometer) ที่มีความถูกต้องที่ดีกว่าอย่างน้อย 4 เท่าเป็นมาตรฐานอ้างอิงในการสอบเทียบหรืออาจใช้แหล่งกำเนิดความชื้น (Humidity source) อื่น ๆ เป็นค่ามาตรฐานอ้างอิงทางความชื้นโดยตรงก็ได้ การสอบเทียบแต่ละจุดสอบเทียบต้องให้แหล่งกำเนิดของอุณหภูมิและความชื้นมีความเสถียรภาพ (Stability) เสถียรภาพคือการคงที่ของอุณหภูมิ ณ อุณหภูมิใด ๆ ในช่วงเวลาหนึ่ง หากอุณหภูมิหรือความชื้นนี้มีการเปลี่ยนแปลงในช่วงเวลานั้น ๆ หรือสร้างอุณหภูมิและความชื้นมีความไม่เสถียร (Instability) เกิดขึ้น ก็ย่อมที่จะส่งผลต่อค่าอุณหภูมิและความชื้นที่อ่านได้ของทั้งเครื่องมือมาตรฐานอ้างอิงและดิจิทัลดเทอร์โม-ไฮโกรมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ เมื่ออุณหภูมิและความชื้นของตู้สร้างอุณหภูมิและความชื้นมีความเสถียรภาพจึงทำการอ่านค่าและจดบันทึกการแสดงผลของดิจิทัลดเทอร์โม-ไฮโกรมิเตอร์ในตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นผ่านช่องกระจก จากนั้นคำนวณผลการสอบเทียบและค่าความไม่แน่นอนของการวัด จะเห็นได้ว่ากระบวนการสอบเทียบ ดิจิทัลดเทอร์โม-ไฮโกรมิเตอร์มีความยุ่งยากและใช้เวลานานเนื่องจากความเสถียรภาพของตู้สร้างอุณหภูมิและความชื้นในแต่ละจุดสอบเทียบต้องใช้เวลานานที่ค่อนข้างนาน การสอบเทียบแบบอัตโนมัติจึงมีบทบาทสำคัญในการลดระยะเวลาในการสอบเทียบและลดความผิดพลาดในการสอบเทียบเครื่องมือวัดทางด้านอุณหภูมิ [9] โดยใช้รูปแบบการเชื่อมต่อ Universal Serial Bus (USB) และ General Purpose Interface Bus (GPIB) ในการเชื่อมต่อเพื่อถ่ายโอนข้อมูลและประมวลผลในการสอบเทียบได้แบบเรียลไทม์ แต่เนื่องจากดิจิทัลดเทอร์โม-ไฮโกรมิเตอร์ ที่พบส่วนมากในห้องปฏิบัติการสอบเทียบเป็นแบบชนิดพกพาใช้จอแสดงผลเพื่อแสดงข้อมูลที่เป็นตัวเลขที่ไม่มีตัวต่อประสานการสื่อสาร เครื่องมือดังกล่าวจึงไม่มีความสามารถในการเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์และแสดงผลข้อมูลได้แบบเรียลไทม์ ด้วยเหตุผลดังกล่าวสถาปัตยกรรมระบบที่เหมาะสมและอัลกอริทึมการประมวลผลภาพจึงเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งต่อการอ่านหน้าจอของเครื่องมือวัดที่ไม่มีตัวต่อประสานการสื่อสาร เทคโนโลยีการประมวลผลภาพได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในระบบอัตโนมัติ โดยใช้กล้องดิจิทัลดสามารถชี้แทนดวงตาของมนุษย์เพื่อจับภาพของจอแสดงผล

ดิจิทัลหรืออะนาล็อก จากนั้นภาพที่ถ่ายจะถูกส่งไปยังคอมพิวเตอร์ ซึ่งจอแสดงผลจะได้รับการจดจำโดยอัลกอริทึมการจดจำรูปภาพ (Image recognition algorithm) สำหรับการรับรู้ของจอแสดงผลดิจิทัลนั้นเพื่อแก้ปัญหาของเครื่องมือวัดที่ไม่มีพอร์ตเชื่อมต่อสื่อสาร [10-11]

ระบบการอ่านมิเตอร์โดยใช้วิธีการประมวลผลภาพถูกพัฒนาในการส่งภาพผ่านเครือข่ายไร้สายแบบเรียลไทม์โดยใช้กล้องจับภาพมิเตอร์ไฟฟ้าส่งภาพมายังฐานข้อมูลกลาง จากนั้นระบบทำการประมวลผลภาพนำข้อมูลมิเตอร์เพื่อทำการออกบิลให้กับลูกค้าได้อย่างรวดเร็วและลดปัญหาความผิดพลาดจากอ่านอ่านมิเตอร์ของเจ้าหน้าที่ [12] ด้วยความสามารถในการอ่านมิเตอร์จากการประมวลผลภาพได้นำไปใช้ในงานทางด้านมาตรวิทยา การสอบเทียบระยะไกลของงานด้านระบบไฟฟ้าที่อยู่ตามโรงงานอุตสาหกรรมโดยใช้กล้องขนาดเล็กจับภาพมิเตอร์ส่งข้อมูลผ่านโมดูลไปยังฐานข้อมูลเพื่อปรับปรุงระบบสอบเทียบให้มีความสะดวกมากขึ้น สามารถแก้ปัญหาต่าง ๆ ของการสอบเทียบแบบดั้งเดิมได้อย่างมีประสิทธิภาพ [13]

งานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอเทคโนโลยีการประมวลผลภาพและเครือข่ายไร้สายสำหรับการสอบเทียบดิจิทัลเทอร์โม-ไฮโกรมิเตอร์แบบอัตโนมัติโดยใช้ ESP32-CAM ซึ่งเป็นโมดูลกล้องขนาดเล็กและราคาถูก จับภาพหน้าจอแสดงผลของดิจิทัลเทอร์โม-ไฮโกรมิเตอร์และส่งไปยังเว็บเซิร์ฟเวอร์ที่ประมวลผลด้วยวิธี Seven Segment Optical Character Recognition (SSOCR) ผลการวัดและสอบเทียบจะนำเสนอบนแดชบอร์ดที่เข้าถึงได้ผ่านเว็บเบราว์เซอร์ ระบบที่นำเสนอได้ทดสอบในสภาพแวดล้อมการใช้งานจริงกับการสอบเทียบตามขั้นตอนมาตรฐานการสอบเทียบดิจิทัลเทอร์โม-ไฮโกรมิเตอร์ เพื่อทดสอบประสิทธิภาพในการทำงานระบบอัลกอริทึมและแอปพลิเคชัน

2. วิธีการวิจัย (Experimental methods)

2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับสอบเทียบดิจิทัลเทอร์โม-ไฮโกรมิเตอร์แบบอัตโนมัติประกอบด้วย เครื่องมือมาตรฐานอ้างอิงและเครื่องมือที่ต้องการสอบเทียบ, (Unit under calibration; UUC) ดังนี้

2.1.1 ตู้สร้างอุณหภูมิและความชื้น (Temperature and humidity generator: 2500ST-LT, Thunder Scientific, U.S.A.)

2.1.2 เครื่องวัดอุณหภูมิจุดน้ำค้าง (Dew-point hygrometer: 473-SH2, MBW calibration, Switzerland)

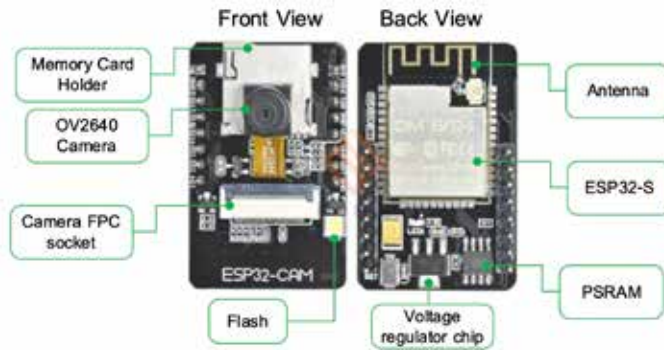
2.1.3 ดิจิทัลเทอร์โม-ไฮโกรมิเตอร์จอแสดงผลชนิด Seven-segment (ดิจิทัลเทอร์โม-ไฮโกรมิเตอร์, testo 608-H1, Testo SE & Co. KGaA, Germany)



รูปที่ 1 ดิจิทัลเทอร์โม-ไฮโกรมิเตอร์จอแสดงผลชนิด 7-Segment (UUC)

2.1.4 โมดูล ESP32-CAM

อุปกรณ์ต้นแบบระบบเครือข่ายไร้สายและประมวลผลภาพใช้โมดูล ESP32-CAM [14] ซึ่งเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ที่รองรับการเชื่อมต่อ Wi-Fi 802.11b/g/n ในตัว โดยเป็นตัวรับสัญญาณ (Station-mode) และตัวส่งสัญญาณ (Access point-mode) ได้ในตัวเดียวเป็นบอร์ดที่มีราคาถูกและประหยัดพลังงานความถี่สัญญาณนาฬิกาสูงสุด 160 MHz มีหน่วยความจำ 520 KB พร้อมกล้องขนาดเล็ก OV2640 ขนาดเซ็นเซอร์ 2 ล้านพิกเซล พร้อมไฟแฟลชในตัว และมีช่องเสียบการ์ดสำหรับใส่หน่วยความจำ SD Card ซึ่งโมดูล ESP32-CAM ดังรูปที่ 2

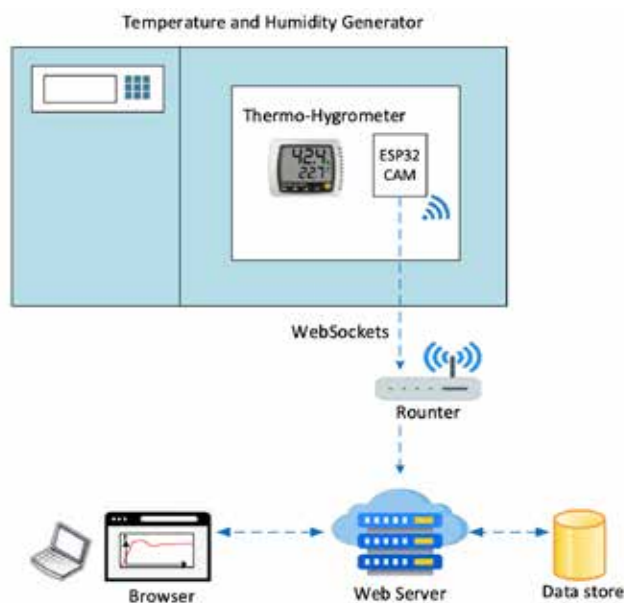


รูปที่ 2 โมดูล ESP32-CAM

2.2 การออกแบบภาพรวมของระบบสอบเทียบดิจิทัลเทอร์โม-ไฮโกรมิเตอร์

การออกแบบภาพรวมของระบบสอบเทียบ ดิจิทัลเทอร์โม-ไฮโกรมิเตอร์ เพื่อเพิ่มความสามารถในการสอบเทียบเครื่องมือที่ไม่มีตัวต่อประสานการสื่อสาร (Communication interface) ได้มีการนำวิธีการ SSOCR มาใช้กับระบบนี้ เมื่อพิจารณาจากแผนภาพบล็อกไดอะแกรมที่แสดงในรูปที่ 3 การออกแบบระบบทางด้านฮาร์ดแวร์แยกเป็นสองส่วนหลัก ในส่วนแรกเป็นการถ่ายภาพหน้าจอของ ดิจิทัลเทอร์โม-ไฮโกรมิเตอร์ ที่สอบเทียบในตู้สร้างอุณหภูมิและความชื้นผ่านกระจกโดยใช้โมดูล ESP 32-CAM ภาพจะถูกส่งผ่านเครือข่ายไร้สายมายังเว็บเซิร์ฟเวอร์ (WebServer) การทำงานการสื่อสารสำหรับการแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างเซิร์ฟเวอร์บนโปรโตคอลเว็บซ็อกเก็ต (WebSocket) ส่วนที่สองเซิร์ฟเวอร์ทำการประมวลผลภาพ ภาพจะถูกแปลงเป็นค่าตัวเลข สุดท้ายผลการวัดและสอบเทียบจะนำเสนอบนเว็บเบราว์เซอร์

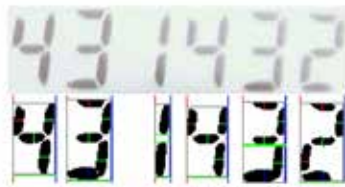
การออกแบบซอฟต์แวร์ในส่วน Front-end และ Back-end ที่ทำงานในระบบที่นำเสนอ ในส่วนของซอฟต์แวร์ด้าน Front-end ใช้ภาษาสำหรับพัฒนาเว็บ เช่น HTML, CSS และ JavaScript/ES6 ถึงแม้ว่าจะมั่นใจได้ว่าแอปพลิเคชันสามารถทำงานได้ในทุกเบราว์เซอร์ ซอฟต์แวร์ Front-end เป็นเว็บแอปพลิเคชันที่ทำงานบนเว็บเบราว์เซอร์สามารถทำงานได้ทั้งคอมพิวเตอร์และสมาร์ทโฟน แอปพลิเคชันออกแบบมาสำหรับ Graphical user interface สำหรับซอฟต์แวร์ส่วน Back-end จะถูกนำไปใช้กับ JavaScript/ES6 ทำงานบน ซอฟต์แวร์ Node.js Back-end ทำงานบนเว็บและเซิร์ฟเวอร์ข้อมูลเป็นแกนหลักของระบบสอบเทียบอัตโนมัติ ซึ่งมีหน้าที่ การจดจำภาพ การคำนวณ การจัดเก็บ และยังดำเนินการเกี่ยวกับการสื่อสารผ่านโปรโตคอล WebSocket สำหรับเว็บเซิร์ฟเวอร์



รูปที่ 3 บล็อกไดอะแกรมระบบสอบเทียบอัตโนมัติที่นำเสนอ

2.3 อัลกอริทึม Seven Segment Optical Character Recognition (SSOCR)

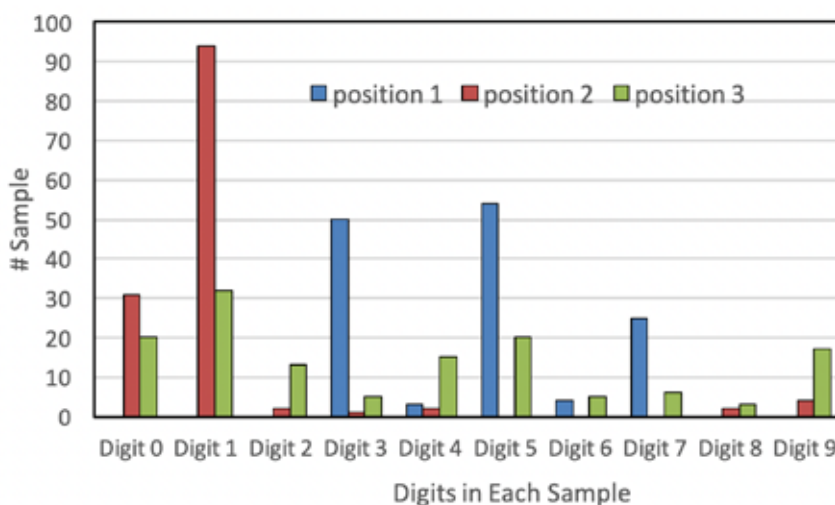
การกำหนดขอบเขตบริเวณบนภาพที่สนใจ (Region of interest: ROI) จะถูกวาดบนเว็บเบราว์เซอร์โดยผู้ปฏิบัติงาน จุดที่สนใจเฉพาะตัวเลขบนหน้าจอแสดงผลของดิจิทัลเทอร์โม-ไฮโกรมิเตอร์ จากนั้นประมวลผลภาพ ด้วยวิธี Seven Segment Optical Character Recognition (SSOCR) [15] อัลกอริทึม SSOCR ที่ใช้นั้นค่อนข้างเรียบง่ายและถูกกำหนดขึ้นอย่างคร่าวๆ มีความเชี่ยวชาญในการรับรู้จอ 7-Segment ภาพจะถูกกรองและแปลงเป็นภาพขาวดำโดยมีตัวเลขเป็นฉากหน้าโดยใช้วิธีเทคนิคเทรชโฮลด์ (Threshold) รูปภาพนี้ถูกแบ่งส่วน (Image Segmentation) เพื่อค้นหาตัวเลข จากนั้นระบบจะจดจำแต่ละหลักแยกกัน เส้นขอบด้านซ้ายของตัวเลขแสดงด้วยคอลัมน์สีแดง เส้นขอบด้านขวาเป็นคอลัมน์สีน้ำเงิน เส้นสีเขียวแนวนอนแสดงความกว้างของตัวเลขแต่ละหลักที่เชื่อมต่อกัน สีเหลืองสีเทาแสดงถึงขนาดพิกเซลของตัวเลขที่พบ ในเส้นสแกนแนวตั้งจะแสดงเป็นสีแดงสำหรับตำแหน่งด้านบน สีเขียวตำแหน่งตรงกลาง และน้ำเงินตำแหน่งด้านล่าง เส้นสแกนในแนวนอนจะแสดงเป็นสีแดงในตำแหน่งด้านซ้ายและสีเขียวตำแหน่งด้านขวาของตัวเลข ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 อัลกอริทึม Seven Segment Optical Character Recognition (SSOCR)

3. ผลและวิจารณ์ (Results and discussion)

การทดสอบประสิทธิภาพการอ่านจอแสดงผลดิจิทัลเทอร์โม-ไฮโกรมิเตอร์จอแสดงผลแบบ 7-Segment ที่มีความละเอียด (Resolution) 0.1 %RH ทำการสอบเทียบการจับภาพในสภาวะที่มีแฟลชหรือแสงสะท้อนจากจอแสดงผล ดังรูปที่ 6 จำนวนตัวอย่างที่เก็บได้ทั้งหมด 398 ตัวอย่าง จากการอ่านหน้าจอทุก 1 นาที การกระจายตัวของหน้าจอแสดงผลดิจิทัลเทอร์โม-ไฮโกรมิเตอร์ ภายใต้เงื่อนไขจุดสอบเทียบที่แตกต่างกันโดยมีจุดการสอบเทียบความชื้นสัมพัทธ์ที่ (30, 50 และ 70) %RH พบว่าการกระจายของตัวเลขส่วนใหญ่จะอยู่ในตำแหน่งที่ 2 (Position 2) และตำแหน่งที่ 3 (Position 3) ส่วนตัวเลข (Digit) เกือบที่มีการกระจายเหมือนกันหมดยกเว้นตัวเลข 1 (Digit 1) ที่จำนวนตัวอย่างมากที่สุด ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 การกระจายตัวของหน้าจอแสดงผล

ผลการทดสอบประสิทธิภาพการอ่านจอแสดงผลดิจิทัลเทอร์โม-ไฮโกรมิเตอร์ชนิด 7-Segment ความแม่นยำในการจดจำ การคำนวณเปอร์เซ็นต์ความถูกต้อง (Accuracy) ดังสมการที่ 1 เปอร์เซ็นต์ความถูกต้อง (Accuracy) ของแต่ละตัวเลขตั้งแต่ “0” ถึง “9” ของการอ่านหน้าจอ ดิจิทัลเทอร์โม-ไฮโกรมิเตอร์ มีอัตราเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องน้อยที่สุดอยู่ที่ 89.68 % ที่ตัวเลข “0” และ 98.04% ที่ตัวเลข “2” ตามลำดับ นอกนั้นมีความถูกต้องที่ 100% ความถูกต้องโดยรวมอยู่ที่ 96.48 % ดังตารางที่ 1

$$Accuracy (\%) = \frac{Recognized\ digits}{total\ no.of\ digits} \times 100 \quad (1)$$

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการอ่านจอแสดงผลดิจิทัลเทอร์โม-ไฮโกรมิเตอร์

Digit	total no. of digits	Recognized digits	Accuracy (%)
Digit 0	51	50	98.04
Digit 1	126	113	89.68
Digit 2	15	15	100.00
Digit 3	52	52	100.00
Digit 4	17	17	100.00
Digit 5	74	74	100.00
Digit 6	8	8	100.00
Digit 7	30	30	100.00
Digit 8	5	5	100.00
Digit 9	20	20	100.00
Total	398	384	96.48

หัวข้อนี้จะใช้แนวทางวิธีการทางสถิติสำหรับการทดสอบความชำนาญโดยการเปรียบเทียบระหว่างห้องปฏิบัติการ (ISO 13528:2015) [16] คำนวณการเปรียบเทียบการอ่านค่าดิจิทัลเทอร์โม-ไฮโกรมิเตอร์ด้วยระบบอัตโนมัติและเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ เปรียบเทียบผลการสอบเทียบของทั้ง 2 เงื่อนไข ว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ ซึ่งจะนำค่าได้จากผลการสอบเทียบพร้อมค่าความไม่แน่นอนมาเปรียบเทียบกับกันด้วยสถิติ E_n number ตามสมการที่ 2 พร้อมเกณฑ์การตัดสินดังนี้

$$E_n = \frac{X_m - X_a}{\sqrt{U_m^2 + U_a^2}} \quad (2)$$

โดยที่

X_a ค่าแก้ของการสอบเทียบด้วยอ่านค่าดิจิทัลเทอร์โม-ไฮโกรมิเตอร์แบบอัตโนมัติ

X_m ค่าแก้ของการสอบเทียบด้วยเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ

U_a ค่าความไม่แน่นอนที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ของการสอบเทียบด้วยอ่านค่าดิจิทัลเทอร์โม-ไฮโกรมิเตอร์แบบอัตโนมัติ

U_m ค่าความไม่แน่นอนที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ของการสอบเทียบด้วยเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ

$|E_n| < 1.0$ เป็นไปตามเกณฑ์แสดงว่าผลการสอบเทียบไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

$|E_n| \geq 1.0$ ไม่เป็นไปตามเกณฑ์แสดงว่าผลการสอบเทียบมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

จากตารางที่ 2 ผลเปรียบเทียบการอ่านค่าความชื้นสัมพัทธ์ของดิจิทัลดเทอร์โม-ไฮโกรมิเตอร์ด้วยระบบอัตโนมัติและเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการและตารางที่ 3 ผลเปรียบเทียบการอ่านค่าอุณหภูมิของดิจิทัลดเทอร์โม-ไฮโกรมิเตอร์ด้วยระบบอัตโนมัติและเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ เนื่องจากค่าแก้และค่าความไม่แน่นอนที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% ของจุดสอบเทียบทั้งหมดทั้ง 2 เจ็อนไซม์ค่าที่ใกล้เคียงกัน จึงทำให้ผลการเปรียบเทียบผลการสอบเทียบด้วยสถิติ E_n number ตามสมการที่ 2 เป็นไปตามเกณฑ์แสดงว่าผลการสอบเทียบไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นว่าระบบอัตโนมัติที่นำเสนอมีค่าเทียบเคียงกับการสอบเทียบด้วยเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ

ตารางที่ 2 ผลเปรียบเทียบการอ่านค่าความชื้นสัมพัทธ์ของดิจิทัลดเทอร์โม-ไฮโกรมิเตอร์ด้วยระบบอัตโนมัติและเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ

Point of Calibration (%RH)	Automated Calibration		Manual Calibration		E_n
	Correction (%RH)	Uncertainty ± (%RH)	Correction (%RH)	Uncertainty ± (%RH)	
30	1.1	0.8	1.0	0.8	0.09
50	1.4	0.9	1.4	0.9	0.00
70	1.2	1.0	1.2	1.0	0.00

ตารางที่ 3 ผลเปรียบเทียบการอ่านค่าอุณหภูมิของดิจิทัลดเทอร์โม-ไฮโกรมิเตอร์ด้วยระบบอัตโนมัติและเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ

Point of Calibration (°C)	Automated Calibration		Manual Calibration		E_n
	Correction (°C)	Uncertainty ± (°C)	Correction (°C)	Uncertainty ± (°C)	
20	0.1	0.3	0.1	0.3	0.00
25	0.2	0.3	0.2	0.3	0.00
30	0.2	0.3	0.2	0.3	0.00

จากตารางที่ 4 ผลการเปรียบเทียบระยะเวลาการทำงานระหว่างระบบอัตโนมัติและเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการจากการสอบเทียบดิจิทัลดเทอร์โม-ไฮโกรมิเตอร์ตามขั้นตอนในการสอบเทียบทั้งกระบวนการโดยมีจุดสอบเทียบทั้งหมด 6 จุดสอบเทียบระบบอัตโนมัติที่นำเสนอมีการลดระยะเวลาในการอ่านและจดบันทึก การคำนวณผลการสอบเทียบ การออกรายงานและใบรับรองผลการสอบเทียบ แสดงให้เห็นว่าระบบอัตโนมัติที่นำเสนอช่วยให้ห้องปฏิบัติการสอบเทียบลดระยะเวลาในการสอบเทียบดิจิทัลดเทอร์โม-ไฮโกรมิเตอร์

ตารางที่ 4 ผลการเปรียบเทียบระยะเวลาการทำงานระหว่างระบบอัตโนมัติและเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ

ขั้นตอนหลักในการสอบเทียบ	ระบบอัตโนมัติ (นาที)	เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ (นาที)
ระยะเวลาผู้สร้างอุณหภูมิและความชื้นมีความเสถียรภาพ (6 จุดสอบเทียบ)	670	670
การอ่านและจดบันทึก (6 จุดสอบเทียบ)	30	70
การคำนวณผลการสอบเทียบ	2	30
การออกรายงานและใบรับรองผลการสอบเทียบ	2	30
เวลารวม	704	800

4. สรุป (Conclusion)

การออกแบบระบบสอบเทียบอัตโนมัติสำหรับ ดิจิทัลเทอร์โม-ไฮโกรมิเตอร์แบบไม่มีตัวต่อประสานการสื่อสาร โดยใช้เทคนิคการประมวลผลภาพและวิธีการสื่อสารไร้สายแบบเรียลไทม์ ระบบเครือข่ายไร้สายและประมวลผลภาพใช้โมดูล ESP32-CAM ที่มีขนาดเล็กและราคาถูกสามารถสื่อสารแบบไร้สายในการส่งภาพของหน้าจอของดิจิทัลเทอร์โม-ไฮโกรมิเตอร์ได้แบบเรียลไทม์และในการอ่านหน้าจอแสดงผลดิจิทัลในระบบประมวลผลภาพมีการนำเสนอมือถือการประมวลผลภาพและการรับรู้ (Recognition) จากผลการทดสอบประสิทธิภาพการอ่านจอแสดงผลในการสอบเทียบดิจิทัลเทอร์โม-ไฮโกรมิเตอร์ชนิด 7-Segment ในตัวควบคุมอุณหภูมิและความชื้นแต่ละจุดสอบเทียบแสดงให้เห็นว่าความแม่นยำในการจดจำรวมอยู่ที่ 96.48% และประสิทธิภาพระบบสอบเทียบดิจิทัลเทอร์โม-ไฮโกรมิเตอร์แบบอัตโนมัติโดยรวมจากการเปรียบเทียบผลการสอบเทียบด้วยการอ่านค่าดิจิทัลเทอร์โม-ไฮโกรมิเตอร์ด้วยระบบอัตโนมัติและเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการด้วยสถิติผลการสอบเทียบของทั้งสองแบบไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($E_n < 1$) แสดงให้เห็นว่าระบบอัตโนมัติที่นำเสนอมีค่าเทียบเคียงกับการสอบเทียบด้วยเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ และการเปรียบเทียบระยะเวลาการทำงานระหว่างระบบอัตโนมัติและเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการช่วยลดระยะเวลาการสอบเทียบที่ต้องใช้เจ้าหน้าที่ในการจดบันทึกและถ่ายโอนข้อมูลลงในคอมพิวเตอร์ หลักเกณฑการพิมพ์ด้วยเจ้าหน้าที่ปฏิบัติงาน ลดข้อผิดพลาด ระบบสอบเทียบอัตโนมัติสำหรับดิจิทัลเทอร์โม-ไฮโกรมิเตอร์นี้ จึงสามารถนำมาใช้ในการสอบเทียบเพื่อลดระยะเวลาการสอบเทียบและลดข้อผิดพลาดของผู้ปฏิบัติงานได้ แนวทางในการพัฒนาระบบในขั้นต่อไป คือ เพิ่มประสิทธิภาพของระบบอัตโนมัติในเรื่องการอ่านมิเตอร์ที่ยังมีข้อผิดพลาดจากความสว่างที่ค่อนข้างน้อยและระบบควบคุมการทำงานแบบอัตโนมัติโดยสมบูรณ์ (Fully automated) ที่สามารถทำงานแบบอัตโนมัติทั้งหมดโดยปราศจากคนเข้าไปเกี่ยวข้อง

5. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณกรมวิทยาศาสตร์บริการที่ให้ความรู้และประสบการณ์ในการทำงาน ตลอดจนเครื่องมือวิทยาศาสตร์ที่ใช้ประกอบในการดำเนินงานวิจัย รวมทั้งเจ้าหน้าที่กองสอบเทียบเครื่องมือวัดที่ให้คำแนะนำในการทำวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] จิตตกานต์ อินเทียง. ผลกระทบของระบบปรับตั้งต่อประสิทธิภาพของเครื่องชั่งน้ำหนักอิเล็กทรอนิกส์. Bull Appl Sci. 2022;11(11):105-112.
- [2] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ.). ข้อแนะนำการสอบเทียบเวอร์เนียรคาลิปเปอร์ (Vernier calipers) พิสัยการวัด 0 mm ถึง 1000 mm (GLA-21) [อินเทอร์เน็ต]. 2558 [เข้าถึงเมื่อ 18 เมษายน 2566]. เข้าถึงได้จาก: https://mx.nimt.or.th/wp-content/uploads/2022/11/GLA_21_Vernier-Calipers_TH.pdf
- [3] จิระศักดิ์ ชัยสนิท, สุรเดช พานเพ็ง, ขวัญใจ สมบุญ, ภูวดิ์ ตูจินดา. การศึกษาแนวทางการทดสอบความชำนาญของห้องปฏิบัติการทดสอบความต้านแรงกดกลองกระดาดลูกฟูก. Bull Appl Sci. 2017;6(6):101-7.
- [4] International Organization for Standardization and International Electrotechnical Commission (ISO/IEC). General requirements for the competence of testing and calibration laboratories. ISO/IEC 17025: 2017. Geneva, Switzerland: ISO; 2017.
- [5] จักรพันธ์ ภาวิฑฐะรัตน์. การควบคุมการติดเชื้อทางอากาศสำหรับโรงพยาบาล. บทความวิชาการสมาคมเครื่องปรับอากาศแห่งประเทศไทย. 2543;6(6):105-111.
- [6] สุพจน์ เตชะอำนวยวิทย์. แนวทางการออกแบบการปรับอากาศและระบายอากาศสำหรับโรงพยาบาล. บทความวิชาการสมาคมเครื่องปรับอากาศแห่งประเทศไทย. 2551;21(18):51-59.

- [7] ชะอรสิน สุขศรีวงศ์. เก็บยาในโรงพยาบาลให้ถูกวิธี [อินเทอร์เน็ต]. 2558 [เข้าถึงเมื่อ 18 เมษายน 2566]. เข้าถึงได้จาก: <https://pharmacy.mahidol.ac.th/knowledge/files/0328.pdf>
- [8] Institute of Measurement and Control. A guide to the measurement of humidity [Internet]. 1996 [cited 2023 Mar 10]. Available from: <https://www.npl.co.uk/special-pages/guides/a-guide-to-the-measure-of-humidity-gpg103>
- [9] Bojkovski J, Drnovsek J, Pusnik I, Tasic T. Automation of a precision temperature calibration laboratory. IEEE Trans Instru Meas. 2000 Jun;49(3):596-601.
- [10] Grzeczka G, Klebba M. Automated calibration system for digital multimeters not equipped with a communication interface. Sensors. 2020 Jun 29;20(13):3650.
- [11] Belan PA, Araujo SA, Librantz AFH. Segmentation-free approaches of computer vision for automatic calibration of digital and analog instruments. Measurement. 2013 Jan;46(1):177 - 84.
- [12] Vemuri R, Sapte V, Cheriyan J, Maniyar R, Kshirsagar A, Real time & automated meter reading using image processing reducing human error. Int Res J Eng Technol (IRJET). 2022 Nov;11(9):875-881.
- [13] Wang Q, Li H, Wang H, Zhang J, Fu J. A Remote calibration device using edge intelligence. Sensors. 2022; 22(1):322. doi: 10.3390/s2201032.
- [14] Jackson L. ESP32-CAM: Machine vision tips, camera guides and projects [Internet]. 2021 [cited 2023 Jan 5]. Available from: <https://www.arducam.com/esp32-machine-vision-learning-guide/>
- [15] Auerswald E. Seven segment optical character recognition [Internet]. 2017 [cited 2023 Jan 5]. Available from: <https://www.unix-ag.uni-kl.de/~auerswal/ssocr/>
- [16] International Organization for Standardization and International Electrotechnical Commission (ISO/IEC). Statistical methods for use in proficiency testing by interlaboratory comparison. ISO/IEC 13528: 2015. Geneva, Switzerland: ISO; 2015.

การตรวจหาปริมาณสารไพมารีอะโรมาติกเอมีนใน วัสดุสัมผัสอาหารด้วยเทคนิคอัลตราไฮเพอร์ฟอร์แมนซ์ลิควิด โครมาโทกราฟี-แทนเดมแมสสเปกโตรเมตรี

Determination of primary aromatic amines in food contact materials by ultra-high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry

จุฑาทิพย์ ลาภวิบูลย์สุข¹, พัฒนนิภา วงศ์พิชัย¹, สมภพ ลาภวิบูลย์สุข¹

Jutathip Lapviboonsuk¹, Patnipa Wongpichai¹, Sompop Lapviboonsuk¹

รับบทความ 22 ธันวาคม 2566 แก้ไขบทความ 4 มีนาคม 2567 ยอมรับตีพิมพ์ 4 มีนาคม 2567

บทคัดย่อ

การตรวจวัดสาร Primary aromatic amines (PAAs) ในวัสดุสัมผัสอาหาร จำนวน 10 ชนิด ได้แก่ Aniline (ANL), o-Anisidine (o-ASD), 4-chloro-aniline (4-CA), 4-chloro-o-toluidine (4-CoT), 2,6-dimethylaniline (2,6-DMA), 4,4'-methylenedianiline (4,4'-MDA), 4,4'-methylenedi-o-toluidine (4,4'-MDoT), 2-methoxy-5-methylaniline (2-M-5-MA), m-phenylenediamine (m-PDA) และ o-toluidine (o-T) ได้ดำเนินการโดยสกัดสาร PAAs ด้วยสารละลายตัวแทนอาหารเป็นกรดอะซิติก ความเข้มข้นร้อยละ 3 (น้ำหนักต่อปริมาตร) ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส แล้วทำการตรวจวัดโดยใช้เทคนิคอัลตราไฮเพอร์ฟอร์แมนซ์ลิควิด โครมาโทกราฟี-แทนเดมแมสสเปกโตรเมตรี การตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีตาม Eurachem Guide: The fitness for purpose of analytical methods, 2014 แสดงค่าการตรวจวัดต่ำสุด (Limit of detection; LOD) และค่าการวัดเชิงปริมาณ (Limit of quantitation; LOQ) เท่ากับ 2 และ 10 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ การพิสูจน์ความเป็นเส้นตรงอยู่ในช่วง 2.00 - 20.0 นาโนกรัมต่อมิลลิลิตร พบว่า สาร PAAs ทุกชนิดมีค่าสัมประสิทธิ์การกำหนดมากกว่า 0.995 นอกจากนี้ได้ตรวจสอบความถูกต้องและความเที่ยงที่ 3 ระดับความเข้มข้นคือ 10, 25 และ 50 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม โดยมีความถูกต้องและความเที่ยงเป็นไปตามเกณฑ์การยอมรับตาม 2002/657/EC ดังนั้นวิธีทดสอบนี้มีความเหมาะสมในการนำไปใช้ทดสอบสาร PAAs ดังกล่าวได้

คำสำคัญ: ไพมารีอะโรมาติกเอมีน วัสดุสัมผัสอาหาร โพลีเอไมด์ ไนลอนสีดำ ลิควิดโครมาโทกราฟี-แทนเดมแมสสเปกโตรเมตรี

¹กองผลิตภัณฑ์อาหารและวัสดุสัมผัสอาหาร กรมวิทยาศาสตร์บริการ

Abstract

The determination of primary aromatic amines (PAAs) in food contact materials involved the examination of ten specific types of PAAs: Aniline (ANL), o-Anisidine (o-ASD), 4-chloro-aniline (4-CA), 4-chloro-o-toluidine (4-CoT), 2,6-dimethylaniline (2,6-DMA), 4,4'-methylenedianiline (4,4'-MDA), 4,4'-methylenedi-o-toluidine (4,4'-MDoT), 2-methoxy-5-methylaniline (2-M-5-MA), m-phenylenediamine (m-PDA) and o-toluidine (o-T). The extraction solution for PAAs, known as food simulant, was 3% (w/v) acetic acid at 100 °C, which analyzed by ultra-high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry. The method validation according to Eurachem Guide: The Fitness for Purpose of Analytical Methods, 2014, limit of detection and limit of quantitation were 2 and 10 microgram per kilogram, respectively. To prove linearity within the range of 2.00 - 20.0 nanograms per milliliter, each type of PAA was assessed, yielding a coefficient of determination above 0.995. Moreover, accuracy and precision were investigated at 3 concentration levels: 10, 25 and 50 micrograms per kilogram which met the requirement of 2002/657/EC. Therefore, this test method fit in the application of PAAs testing.

Keywords: Primary aromatic amine, Food contact materials, Polyamide, Black nylon, Liquid chromatography - tandem mass spectrometry

¹Division of Food Products and Food Contact Material, Department of Science Service

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

1. บทนำ (Introduction)

การปนเปื้อนของสารไพรมารีอะโรมาติกเอมีน (Primary aromatic amines; PAAs) พบในวัสดุสัมผัสอาหาร (Food contact materials, FCMs) จำพวกพลาสติก เช่น ผลิตภัณฑ์เครื่องครัวที่ผลิตจากพลาสติกชนิดโพลีเอไมด์ (Polyamide) หรือไนลอน (Nylon) ที่ผลิตไม่ได้มาตรฐานและสีจากหมึกพิมพ์ต่าง ๆ นอกจากนี้ยังพบการปนเปื้อนของสาร PAAs เช่น บรรจุภัณฑ์อาหารที่เคลือบด้วยโพลีเอทีเรน และอุปกรณ์เครื่องครัวที่ผลิตจากโพลีเอไมด์หรือไนลอน ซึ่งมีคุณสมบัติทนความร้อนสูง ราคาถูกและไม่ทำให้เกิดรอยกับผิวภาชนะอื่น โดยในกระบวนการผลิตพลาสติกมีการใส่สีเช่น สีเอโซ (Azo dyes) ซึ่งใช้สาร PAAs เป็นสารตั้งต้นในการผลิตและการผลิตโพรยูรีเทนที่มีการเติมสีและเคลือบเงาจึงทำให้สารไอโซไซยานเอทอิสระ (Free isocyanates) อาจหลงเหลือจากกระบวนการผลิตโมโนเมอร์ที่ใช้ในการผลิต เมื่อพลาสติกสัมผัสกับน้ำที่อยู่ในอาหาร สารไอโซไซยานเอทจะเปลี่ยนเป็นสาร PAAs และเคลื่อนย้ายจากพลาสติกไปสู่อาหารได้ โดย Aniline (อนิลีน; ANL) เป็นสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยที่สุดและจัดเป็นโครงสร้างหน่วยย่อยในกลุ่ม PAAs [1-2] สาร PAAs จัดเป็นสารที่มีความเป็นพิษสูง ซึ่งจัดเป็นสารก่อมะเร็งชนิดหนึ่ง รวมทั้งเป็นสารที่เป็นต้นเหตุของการกลายพันธุ์และสารก่อภูมิแพ้ นอกจากนี้สารกลุ่ม PAAs เช่น 4,4'-methylenedianiline (4,4'-MDA) เป็นสารซึ่งก่อให้เกิดมะเร็งกระเพาะปัสสาวะ [3] และอนิลีนทำให้เกิดอาการที่เลือดไม่สามารถนำออกซิเจนไปเลี้ยงร่างกายได้ตามปกติหรือเรียกว่า Methemoglobinemia [4] จากการศึกษาทางานวิจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับสารกลุ่ม PAAs ในสหภาพยุโรป พบว่า มีการรายงานการปนเปื้อนของสาร PAAs ในตัวอย่างวัสดุสัมผัสอาหารจำนวนมาก เช่น การเคลื่อนย้ายของอนิลีนจากเครื่องครัวชนิดไนลอนสีดำ (Black nylon) ที่ผลิตหรือมีส่วนประกอบของโพลีเอไมด์ เมื่อต้มในน้ำเดือดที่ 100 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที เนื่องจากความร้อนจะละลายสีในโพลีเมอร์พลาสติกออกมา [1] นอกจากนี้ ในปี 2547-2552 ผลการสุ่มตัวอย่างเครื่องครัวจำนวน 136 ตัวอย่าง แล้วสกัดด้วยสารละลายกรดอะซิติก ร้อยละ 3 ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง พบว่า มีจำนวน 30 ตัวอย่างที่พบปริมาณ PAAs เกินเกณฑ์มาตรฐานกำหนดและส่วนใหญ่ผลิตจากประเทศจีน [3] การปนเปื้อนของ PAAs ในปี 2552 พบมีจำนวน 33 ตัวอย่างที่ปริมาณเกินเกณฑ์มาตรฐาน จากทั้งหมด 84 ตัวอย่าง โดย 4,4'-MDA มีการเคลื่อนย้ายมากที่สุด รองลงมา คือ อนิลีน และ 3,3'-Dimethylbenzidine (3,3'-DMB) ตามลำดับ [5] การตรวจพบการปนเปื้อนของสาร PAAs ทำให้สหภาพยุโรปได้ออกกฎระเบียบเกี่ยวกับวัสดุและสิ่งของที่มาจากพลาสติกที่สัมผัสอาหารโดยตรง ใน Annex I ของ Regulation 10/2011 ซึ่งระบุว่าสารจำพวก PAAs ต้องไม่ถ่ายเทจากวัสดุสัมผัสอาหารไปสู่อาหารในปริมาณไม่เกิน 10 ไมโครกรัมต่ออาหาร 1 กิโลกรัม [6] ถือเป็นค่า Specific migration limit (SML) ที่อนุญาตให้อาหารสัมผัส PAAs ได้ ต่อมาในปี 2554 สหภาพยุโรปได้ออกกฎระเบียบเพิ่มเติมตาม Regulation 284/2011 เกี่ยวกับการนำเข้าอุปกรณ์เครื่องครัวโพลีเอไมด์และเมลามีนจากประเทศจีนและเขตปกครองพิเศษฮ่องกง รายงานการวิเคราะห์อุปกรณ์เครื่องครัวโพลีเอไมด์สีดำในปี 2557 ยังคงพบการเคลื่อนย้ายของ PAAs จำนวน 11 ตัวอย่างจาก 25 ตัวอย่างในปริมาณที่เกินมาตรฐาน [7] นอกจากนี้การปนเปื้อนของ PAAs ยังพบได้ในเครื่องครัวสีน้ำตาลที่เก็บตรวจในปี 2548 และ 2550 จำนวน 8 ตัวอย่าง จาก 21 ตัวอย่างที่เกินมาตรฐาน [2] และในปี พ.ศ. 2563-2565 สหภาพยุโรปมีการแจ้งเตือน 77 ครั้ง เกี่ยวกับการปนเปื้อนของสารไพรมารีอะโรมาติกเอมีนในวัสดุสัมผัสอาหาร โดยส่วนใหญ่ตรวจพบในวัสดุสัมผัสอาหารจากประเทศจีน [8] สำหรับประเทศสหรัฐอเมริกา มีการตรวจสอบปริมาณ PAAs ในอุปกรณ์ครัวที่ทำจากพลาสติกหลายชนิดและหลายสี จำนวน 45 ตัวอย่าง พบการปนเปื้อน 8 ตัวอย่างที่ PAAs เกินค่ามาตรฐานทั้งในพลาสติกสีดำ สีส้ม และสีน้ำเงิน สาเหตุมาจากการเติมสีในกระบวนการผลิต และทั้งพลาสติกที่ผลิตจากประเทศจีนและสหรัฐอเมริกาเอง มีการพบ PAAs ในการเคลื่อนย้ายครั้งแรก (first migration) [9] นอกจากนี้ในปี 2564 ได้มีการพัฒนาวิธีทดสอบโดยใช้เทคนิค Capillary zone electrophoresis (CE) ร่วมกับ tandem mass spectrometry (MS/MS) และช่วงการวัดได้ต่ำที่ 0.2 - 1.3 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม การปนเปื้อนของ PAAs ในตัวอย่างพอลิเอไมด์ ตรวจพบเกินเกณฑ์มาตรฐานสูงถึงร้อยละ 38 ซึ่งผลิตจากประเทศจีนคิดเป็นร้อยละ 25 และประเทศบราซิลคิดเป็นร้อยละ 13 [10] และในปี 2564 เช่นกันได้มีการพัฒนาวิธีหาสาร PAAs จำนวน 24 ชนิดในสารละลายตัวแทนอาหารโดยเทคนิค Solid phase extraction (SPE) และ LC-MS/MS พบว่ามีประสิทธิภาพตามเกณฑ์ Commission Regulation No. 10/2011 มีค่าช่วงการวัดที่ต่ำที่สุด 0.15 ไมโครกรัมต่อลิตร [11] ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการพัฒนาวิธีการทดสอบเพื่อหาปริมาณการเคลื่อนย้ายของสาร PAAs จากวัสดุสัมผัสอาหารประเภทเครื่องครัว เช่น ทัพพี

และตะหลิว โดยครอบคลุมการพัฒนาเทคนิคการตรวจวัดด้วยเทคนิค MS/MS ที่ทำให้สามารถวัดปริมาณสาร PAAs ได้จำนวน 10 ชนิดในคราวเดียวกัน ซึ่งดัดแปลงวิธีจาก EUR 24815 EN 2011 [12]

2. วิธีการวิจัย (Experimental methods)

2.1 สารเคมีและวัสดุวิทยาศาสตร์

สารมาตรฐาน มีความบริสุทธิ์อย่างน้อยร้อยละ 99 จำนวน 10 ชนิด โดยแสดงชนิดของสารมาตรฐานและ CAS No. ดังตารางที่ 1 และกรดเพนตะฟลูออโรโพรพิโอนิก (Pentafluoropropionic acid (PFPA)) ความบริสุทธิ์อย่างน้อยร้อยละ 97 ชั้นคุณภาพวิเคราะห์ AR ผลิตโดย Sigma - Aldrich เช่นเดียวกับสารมาตรฐาน เมทานอลชั้นคุณภาพวิเคราะห์ HPLC หรือ LC ผลิตโดย Merck และกรดอะซิติก ชั้นคุณภาพวิเคราะห์ GR ผลิตโดย Merck การเตรียมสารละลายต่าง ๆ ใช้น้ำที่มีความบริสุทธิ์สูง มีค่าความต้านทานไฟฟ้าไม่น้อยกว่า 18.2 MΩ•cm

ตารางที่ 1 ชนิดของสารมาตรฐานและ CAS No.

ลำดับที่	ชนิดสารมาตรฐาน	คำย่อ	CAS No.
1	m-Phenylenediamine	m-PDA	108-45-2
2	Aniline	ANL	62-53-3
3	o-Anisidine	o-ASD	90-04-0
4	o-Toluidine	o-T	95-53-4
5	4-Chloro-aniline	4-CA	106-47-8
6	2,6-Dimethylaniline	2,6-DMA	87-62-7
7	2-Methoxy-5-methylaniline	2-M-5-MA	120-71-8
8	4,4'-Methylenedianiline	4,4'-MDA	101-77-9
9	4-Chloro-o-toluidine	4-CoT	95-69-2
10	4,4'-Methylenedi-o-toluidine	4,4'-MDoT	838-88-0

2.2 สารละลายและวิธีเตรียม

- 2.2.1 สารละลายกรดเพนตะฟลูออโรโพรพิโอนิกในน้ำ ความเข้มข้น 4.7 มิลลิโมลาร์ (เฟสเคลื่อนที่ (Mobile phase))
เติมกรดเพนตะฟลูออโรโพรพิโอนิก 0.504 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น 1000 มิลลิลิตร
- 2.2.2 สารละลายกรดเพนตะฟลูออโรโพรพิโอนิกในเมทานอล ความเข้มข้น 4.7 มิลลิโมลาร์ (เฟสเคลื่อนที่ (Mobile phase))
เติมกรดเพนตะฟลูออโรโพรพิโอนิก 0.504 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยเมทานอล 1000 มิลลิลิตร
- 2.2.3 สารละลายกรดอะซิติก ร้อยละ 3 น้ำหนักโดยปริมาตร
ชั่งแก๊สอะซิติก จำนวน 30 กรัม แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น 1000 มิลลิลิตร
- 2.2.4 สารมาตรฐานไพรมารีอะโรมาติกเอมีน (Stock standard solution) ความเข้มข้น 500 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร
ชั่งสารมาตรฐานเอมีน จำนวน 25 ± 0.1 มิลลิกรัม ละลายและปรับปริมาตรด้วยเมทานอลในขวดปรับปริมาตร (Volumetric flask) 50 มิลลิลิตร คำนวณความเข้มข้นของสารละลายในหน่วย ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร และเตรียมสารมาตรฐานอื่นๆ เช่นเดียวกันดังนี้ ANL, o-ASD, 4-CA, 4-CoT, 2,6-DMA, 4,4'-MDA, 4,4'-MDoT, 2-M-5-MA m-PDA และ o-T
- 2.2.5 สารละลายมาตรฐานไพรมารีอะโรมาติกเอมีนผสม (Mixed standard solution) ความเข้มข้น 5 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร

ปิเปตสารละลายในข้อ 2.2.4 (Stock standard solution) มาสารมาตรฐานละ 100 ไมโครลิตร ใส่ลงในขวดปรับปริมาตร 10 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยเมทานอล

2.2.6 สารละลายมาตรฐานไพรมารีอะโรมาติกเอมีนผสมแบบเจือจาง (Diluted mix solution) ความเข้มข้น 100 นาโนกรัมต่อมิลลิลิตร

ปิเปตสารละลายในข้อ 2.2.5 (Mixed standard solution) จำนวน 500 ไมโครลิตร ใส่ลงในขวดปรับปริมาตร 25 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยกรดอะซิติก ร้อยละ 3

2.2.7 สารละลายมาตรฐานไพรมารีอะโรมาติกเอมีน ความเข้มข้น 0 - 20 นาโนกรัมต่อมิลลิลิตร (0, 2, 5, 10, 15 และ 20 นาโนกรัมต่อมิลลิลิตร)

เติมสารละลายตัวแทนอาหารจำลอง (Food simulant) คือ กรดอะซิติก ร้อยละ 3 จำนวน 4 มิลลิลิตร ใส่ในขวดปรับปริมาตร 10 มิลลิลิตร แล้วปิเปตสารละลายในข้อ 2.2.6 ที่ปริมาตร 0, 200, 500, 1000, 1500 และ 2000 ไมโครลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยกรดอะซิติก ร้อยละ 3 จากนั้นกรองสารละลายเพื่อนำไปตรวจวิเคราะห์ด้วยเครื่อง LC-MS/MS โดยสร้างกราฟมาตรฐานแบบถ่วงน้ำหนัก ($1/x$)

2.3 การเตรียมตัวอย่าง ดำเนินการตาม EUR 24815 EN 2011 [12]

การเตรียมกรดอะซิติกร้อยละ 3 โดยให้ความร้อนจนอุณหภูมิ 100 ± 2 องศาเซลเซียส แล้วถ่ายสารละลายกรดอะซิติกร้อยละ 3 ที่มีอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ใส่ลงบีกเกอร์แก้วที่มีตัวอย่าง (วัสดุสัมผัสอาหารประเภทเครื่องครัว คือ ทัพพี) จำนวน 3 ชิ้นหรือ 3 ชุดแล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เมื่อครบ 2 ชั่วโมงเทสารละลายที่ได้เก็บไว้โดยนับเป็นสารละลายตัวแทนอาหารครั้งที่ 1 แล้ววิเคราะห์ด้วยเครื่อง LC-MS/MS หากไม่เกินเกณฑ์มาตรฐานไม่ต้องทำการทดสอบต่อ แต่ถ้าเกินเกณฑ์ทำซ้ำอีก 2 ครั้ง จะได้สารละลายตัวแทนอาหารครั้งที่ 2 และสารละลายตัวแทนอาหารครั้งที่ 3 ทำการทดสอบโดยแยกทดสอบเป็นชิ้นหรือชุดตัวอย่าง แล้วนำสารละลายตัวแทนอาหารครั้งที่ 3 ไปทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง LC-MS/MS

2.4 การควบคุมคุณภาพ

การเตรียม Standard check สารละลายมาตรฐานไพรมารีอะโรมาติกเอมีน โดยเลือกเตรียมที่ระดับความเข้มข้น 1 ระดับ จาก 10 นาโนกรัมต่อมิลลิลิตร ซึ่งเตรียมเช่นเดียวกันกับข้อ 2.2.7 และกรองผ่านแผ่นเมมเบรนขนาด 0.20 หรือ 0.22 ไมโครเมตรลงในขวดขนาดเล็กสำหรับฉีดเข้ากับเครื่อง LC-MS/MS

2.5 การตรวจวัดด้วยเทคนิคโครมาโทกราฟี-แทนเดมแมสสเปกโตรเมตรี

2.5.1 นำสารละลายมาตรฐานไพรมารีอะโรมาติกเอมีนผสม ที่ความเข้มข้นระหว่าง 0 ถึง 20 นาโนกรัมต่อมิลลิลิตร และเมทานอลที่กรองผ่านแผ่นเมมเบรน ขนาด 0.20 หรือ 0.22 ไมโครเมตร ลงในขวดขนาดเล็กสีขาว ฉีดเข้าเครื่อง LC-MS/MS ตามสภาวะเครื่อง LC-MS/MS ที่เหมาะสมในการทดสอบ โดยพัฒนาวิธีการตรวจวัดให้เหมาะสมกับสาร PAAs จำนวน 10 ชนิด ซึ่งดัดแปลงวิธีจาก EUR 24815 EN 2011 [12] ดังนี้

คอลัมน์:	คอลัมน์ LC-MS/MS ชนิด stainless steel ขนาด 2.1×150 และการ์ดคอลัมน์ 2.1×5 มิลลิเมตร บรรจุด้วย Zorbax SB-C3 ขนาดอนุภาค 5.0 ไมโครเมตร
อุณหภูมิคอลัมน์:	40 องศาเซลเซียส
ปริมาตรที่ฉีด:	3 ไมโครลิตร
วัฏภาคเคลื่อนที่และอัตราการไหล:	ตามตารางที่ 2
เครื่องตรวจวัด:	MS detector ตามตารางที่ 3

ตารางที่ 2 เฟสเคลื่อนที่และอัตราการไหล

เวลา (นาที)	A, % PFPA 4.7 มิลลิโมลาร์ ในน้ำ	B, % PFPA 4.7 มิลลิโมลาร์ ในเมทานอล	อัตราการไหล (มิลลิลิตรต่อนาที)
0.00	95	5	0.200
3.00	80	20	0.200
7.50	20	80	0.500
8.00	20	80	0.500
11.0	95	5	0.500
14.0	95	5	0.200

ตารางที่ 3 สภาวะของเครื่อง MS detector

No.	Analytes	Retention time (RT; min)	MRM traces		Fragment energy (Frag; V)	Collision energy (CE; V)
			Precursor ion (MS1)	Product ion (MS2)		
1	m-PDA	8.611	109.1	92.1	90	22
			109.1	65.1	90	22
2	ANL	10.938	94.1	77.1	20	17
			94.1	51.0	20	30
3	o-ASD	14.224	124.1	109.1	100	17
			124.1	80.1	100	29
4	o-T	14.450	108.2	91.1	120	17
			108.2	65.1	120	29
5	4-CA	14.664	128.1	93.1	80	18
			128.1	111.2	80	18
6	2,6-DMA	15.098	122.2	105.1	110	18
			122.2	107.1	110	14
7	2-M-5-MA	15.165	138.2	123.1	100	17
			138.2	106.0	100	25
8	4,4'-MDA	15.239	199.1	106.2	130	22
			199.1	77.2	140	50
9	4-CoT	15.287	142.0	107.2	110	18
			142.0	125.2	110	18
10	4,4'-MDoT	15.608	227.2	120.2	150	22
			227.2	178.2	150	22

2.5.2 ตรวจสอบสมรรถนะของเครื่อง LC-MS/MS โดยการฉีดสารมาตรฐานที่ระดับความเข้มข้น 1 ระดับออกจาก 10 นาโนกรัมต่อมิลลิลิตร จำนวนอย่างน้อย 3 ซ้ำ เพื่อกำหนดค่า System suitability ตาม US Pharmacopoeia โดยมีเกณฑ์การยอมรับดังนี้

- Relative standard deviation (RSD) of area < 2%
- RSD of RT < 2%

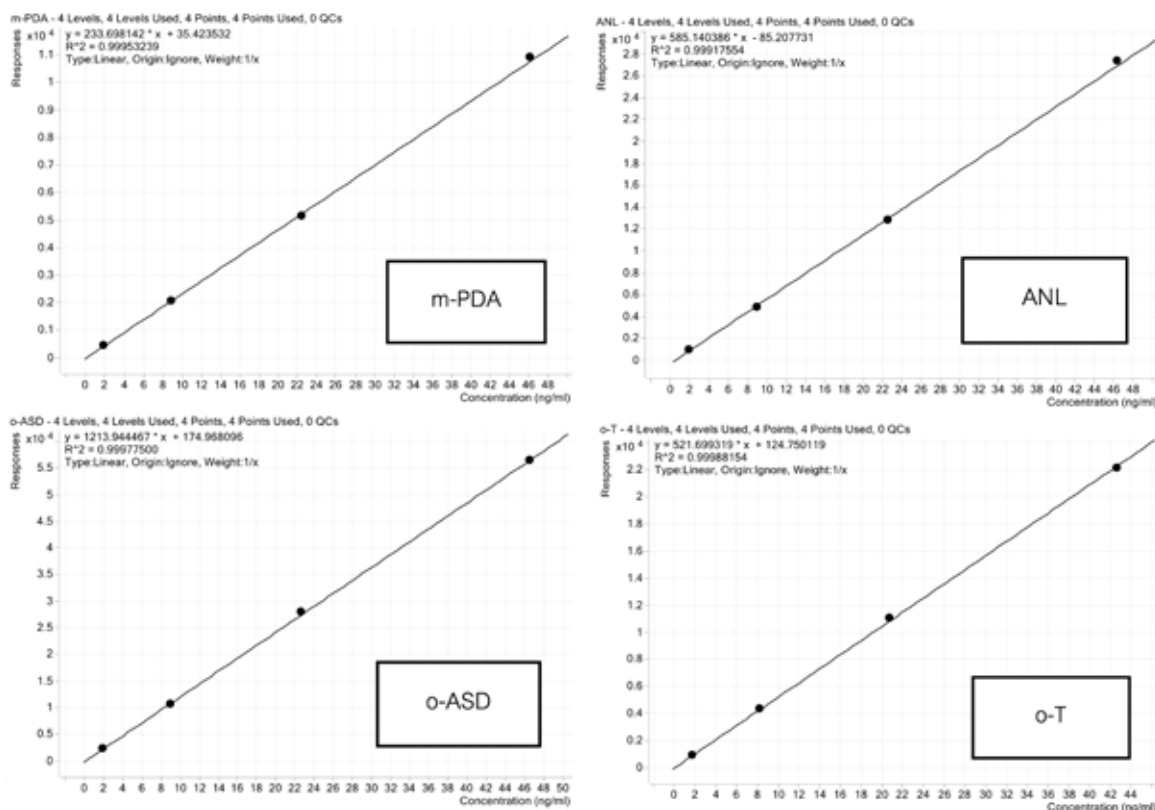
2.6 การตรวจสอบความใช้ได้ของวิธี

การทดสอบตัวอย่างแบบลงค์และตัวอย่างที่มีการเติมสารละลายมาตรฐานที่ระดับความเข้มข้นต่ำ ๆ หรือใกล้เคียงศูนย์ จำนวน 10 ซ้ำ เพื่อประมาณค่าขีดจำกัดของการตรวจพบและขีดจำกัดของการหาปริมาณ ซึ่งในที่นี้ทำการเติมที่ระดับความเข้มข้น 10 นาโนกรัมต่อมิลลิลิตร และเตรียมตัวอย่างที่เติมสารมาตรฐานอีก 2 ระดับความเข้มข้น คือ 25 และ 50 นาโนกรัมต่อมิลลิลิตร เพื่อทดสอบความเข้มข้นที่ระดับกลางและสูงของช่วงการวัด แล้วคำนวณร้อยละการคืนกลับและค่าความเบี่ยงเบนสัมพัทธ์เพื่อพิสูจน์ความถูกต้องและความเที่ยงของวิธีทดสอบ นอกจากนี้ ได้ดำเนินการทดสอบช่วงความเป็นเส้นตรง โดยทดสอบที่ความเข้มข้น 5 ระดับ ดังนี้ 0, 2.00, 5.00, 10.0, 15.0 และ 20.0 นาโนกรัมต่อมิลลิลิตร และระดับความเข้มข้นละ 3 ซ้ำ

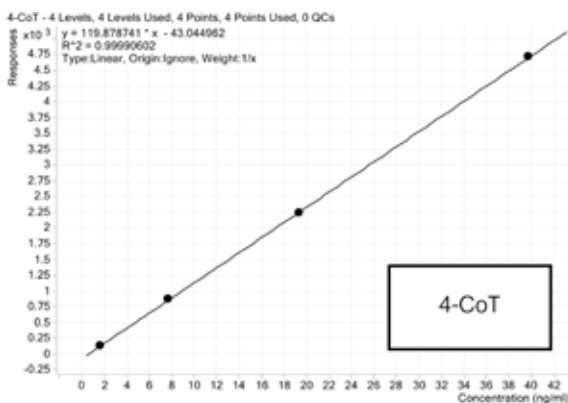
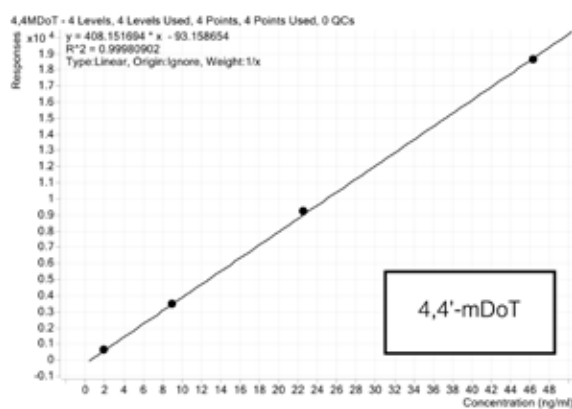
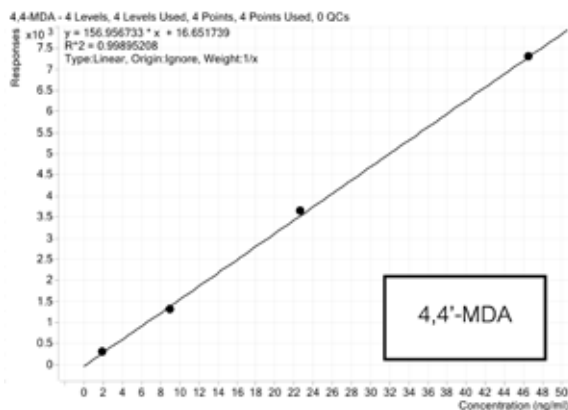
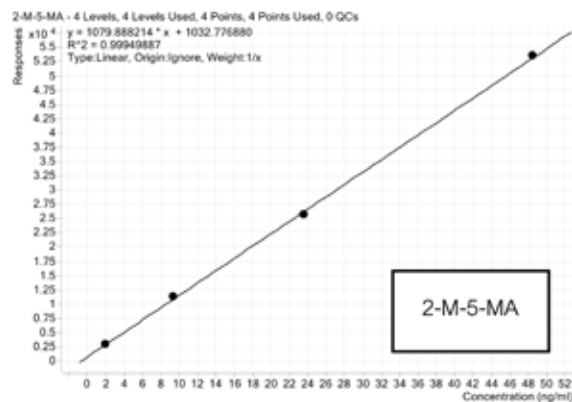
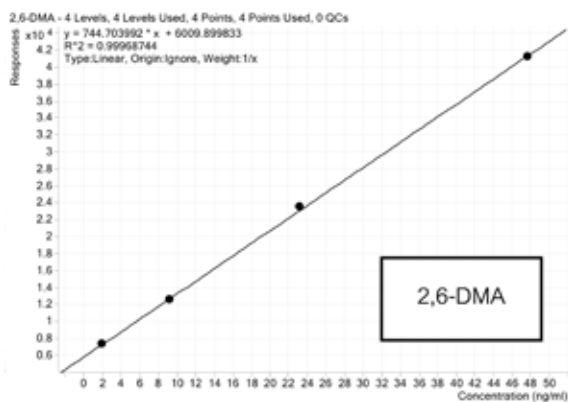
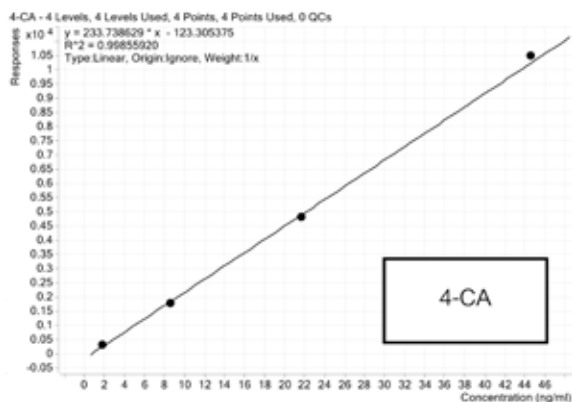
3. ผลและวิจารณ์ (Results and discussion)

3.1 การทดสอบความเป็นเส้นตรง (Linearity) ของสารมาตรฐานไพรมารีอะโรมาติกเอมีน

ศึกษาโดยการทดสอบสารมาตรฐานที่ 5 ระดับความเข้มข้น ดังนี้ 0, 2.00, 5.00, 10.0, 15.0 และ 20.0 นาโนกรัมต่อมิลลิลิตร และรูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารที่สนใจและพื้นที่ใต้กราฟซึ่งตรวจวัดด้วยดีเทคเตอร์ชนิด MS detector ดังรูปที่ 1 และตารางที่ 4 แสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างความเข้มข้นและพื้นที่ใต้กราฟด้วยค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด (Coefficient of determination, R^2) โดยสาร PAAs ทุกชนิดให้ค่า R^2 มากกว่า 0.99 ตามมาตรฐานวิธีกำหนด [12] ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0.99856 - 0.99991



รูปที่ 1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ Primary aromatic amine จำนวน 10 ชนิด และพื้นที่ใต้กราฟซึ่งตรวจวัดด้วยดีเทคเตอร์ ชนิด MS detector



รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ Primary aromatic amine จำนวน 10 ชนิด และพื้นที่ใต้กราฟซึ่งตรวจวัดด้วยดีเทคเตอร์ ชนิด MS detector (ต่อ)

ตารางที่ 4 ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างความเข้มข้นและพื้นที่ใต้กราฟของ Primary aromatic amine

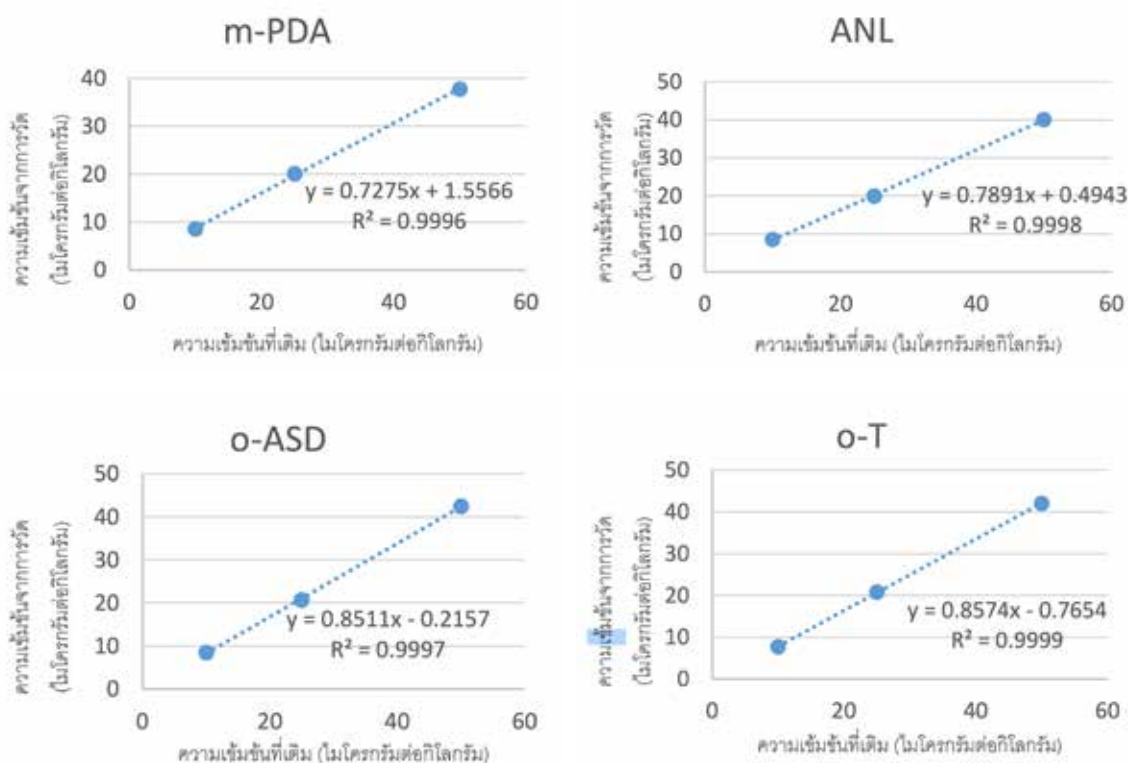
ลำดับที่	ชนิดของสาร	สัมประสิทธิ์การกำหนด (Coefficient of determination, R^2)
1	m-PDA	0.99953
2	ANL	0.99918
3	o-ASD	0.99978
4	o-T	0.99988
5	4-CA	0.99856

ตารางที่ 4 ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างความเข้มข้นและพื้นที่ใต้กราฟของ Primary aromatic amine (ต่อ)

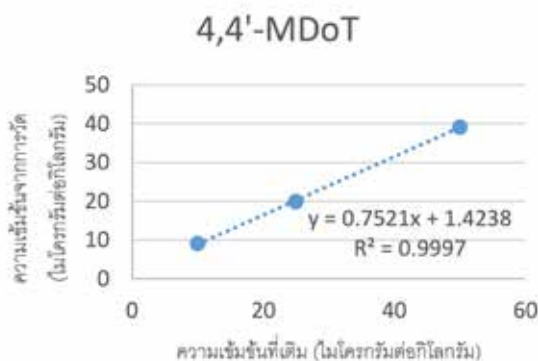
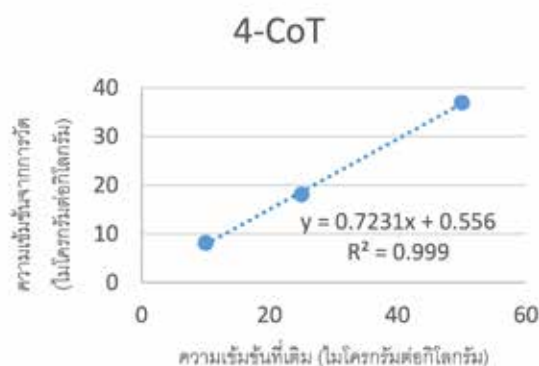
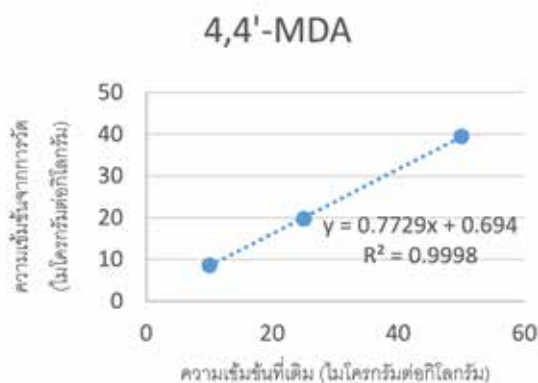
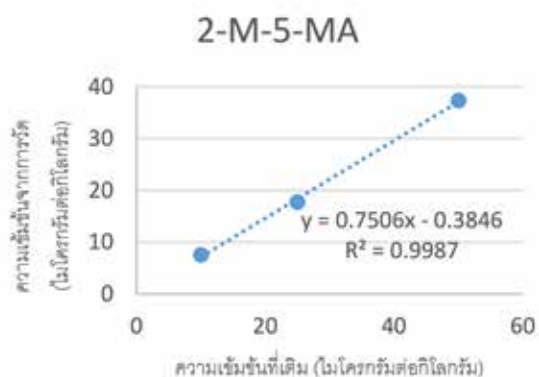
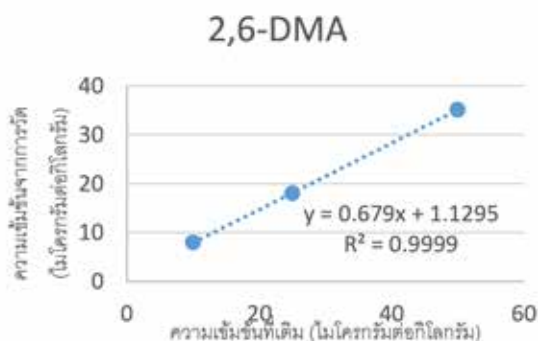
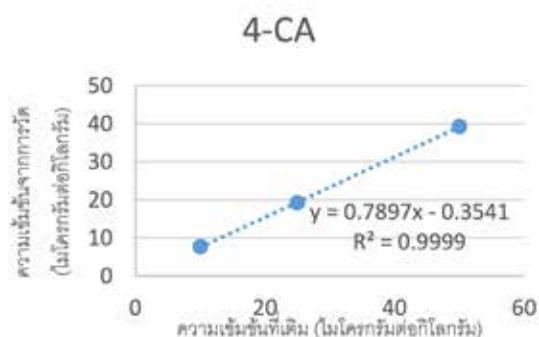
ลำดับที่	ชนิดของสาร	สัมประสิทธิ์การกำหนด (Coefficient of determination, R^2)
6	2,6-DMA	0.99968
7	2-M-5-MA	0.99950
8	4,4'-MDA	0.99895
9	4-CoT	0.99991
10	4,4'-MDoT	0.99981

3.2 การทดสอบช่วงการใช้งาน (Working range) ในวัสดุสัมผัสอาหาร

ศึกษาโดยทดสอบตัวอย่างแบบลบล้าง (Blank sample) และตัวอย่างที่เติมสารมาตรฐาน (Spiked sample) ในระดับความเข้มข้นต่าง ๆ ดังนี้ 10.0, 25.0 และ 50.0 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม ระดับความเข้มข้นละ 6 ซ้ำ โดยมีค่าร้อยละการคืนกลับอยู่ในช่วงเกณฑ์การยอมรับตาม 2002/657/EC คือ 70 - 110% ที่ระดับ 1 - 10 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม และ 80 - 110% ที่ระดับมากกว่าหรือเท่ากับ 10 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม แสดงช่วงการใช้งานของการตรวจวัดสารที่สนใจระหว่างความสัมพันธ์ของความเข้มข้นที่เติมและค่าที่วัดได้ในหน่วยไมโครกรัมต่อกิโลกรัม ดังในรูปที่ 2 จากผลการทดลองพบว่าช่วงการใช้งาน มีค่าอยู่ในช่วง 50.0 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม โดยมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงในช่วงความเข้มข้นดังกล่าว



รูปที่ 2 ช่วงการใช้งานของการตรวจวัด Primary aromatic amines ระหว่างความสัมพันธ์ของความเข้มข้นที่เติมและค่าที่วัดได้ ในหน่วย ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม



รูปที่ 2 ช่วงการใช้งานของการตรวจวัด Primary aromatic amines
ระหว่างความสัมพันธ์ของความเข้มข้นที่เติมและค่าที่วัดได้ ในหน่วย ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม (ต่อ)

3.3 การหาขีดต่ำสุดที่ตรวจวัดได้ (Limit of detection; LOD) และขีดจำกัดของการหาปริมาณ (limit of quantitation; LOQ)

ศึกษาโดยทดสอบตัวอย่างแบบลบล้างจำนวน 6 ซ้ำตามหลักเกณฑ์ของ Eurachem Guide: The Fitness for Purpose of Analytical Methods, 2014 [13] และตัวอย่างที่เติมสารมาตรฐานที่ระดับความเข้มข้นต่ำ คือ 10 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม จำนวน 6 ซ้ำ ดังตารางที่ 5-6

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบ Primary aromatic amines ของตัวอย่างแบบลงค์และตัวอย่างที่เติมสารมาตรฐานที่ระดับ 10 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม

ลำดับ ที่	ปริมาณที่ตรวจวัดได้ (ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม)										
	ตัวอย่าง แบบลงค์	m-PDA	ANL	o-ASD	o-T	4-CA	2,6-DMA	2-M-5-MA	4,4'-MDA	4-CoT	4,4'-MDoT
1	ไม่พบ	7.98	8.4	8.39	7.48	7.37	8.91	7.38	9.55	9.94	8.68
2	ไม่พบ	8.45	8.39	8.75	7.56	7.51	7.73	8.28	8.46	7.99	8.35
3	ไม่พบ	8.94	8.82	9.20	7.62	7.76	8.80	7.60	8.42	8.17	10.9
4	ไม่พบ	8.84	9.07	8.77	7.46	7.84	7.51	7.68	8.39	7.13	9.18
5	ไม่พบ	8.52	8.53	8.42	8.18	7.59	7.30	7.17	8.18	8.22	9.13
6	ไม่พบ	8.94	8.11	7.53	8.02	7.85	7.68	6.95	8.54	7.29	8.55
	ค่าเฉลี่ย	8.61	8.55	8.51	7.72	7.65	7.99	7.51	8.59	8.12	9.13
	SD	0.37	0.34	0.56	0.3	0.19	0.69	0.47	0.48	1.00	0.92
	S ₀	0.22	0.20	0.32	0.18	0.11	0.40	0.27	0.28	0.58	0.53
	LOD	0.65	0.60	0.97	0.53	0.34	1.19	0.81	0.84	1.73	1.59
	LOQ	2.16	1.99	3.25	1.76	1.12	3.97	2.69	2.8	5.78	5.29

ตารางที่ 6 ผลการทดสอบ Primary aromatic amines แสดงร้อยละการคืนกลับ (%recovery) ของตัวอย่างที่เติมสารมาตรฐานที่ระดับ 10 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม

ลำดับ ที่	ค่าร้อยละการคืนกลับ (%Recovery)									
	m-PDA	ANL	o-ASD	o-T	4-CA	2,6-DMA	2-M-5-MA	4,4'-MDA	4-CoT	4,4'-MDoT
1	79.5	84.0	83.9	73.5	73.7	89.1	72.6	95.5	99.4	86.8
2	84.5	83.7	86.2	74.3	75.1	77.3	81.5	84.6	79.9	83.5
3	89.4	88.1	90.6	74.8	76.8	88	74.8	84.2	81.7	108.6
4	88.4	90.6	86.4	73.3	77.7	74.7	75.6	83.9	71.3	91.6
5	85.2	85.2	83.0	85.5	78.1	72.6	74.1	94.5	86.8	91.2
6	89.4	84.2	78.0	84.3	81.2	76.3	72.2	99.2	77.3	92.2
ค่าเฉลี่ย	86.1	86.0	84.7	77.6	77.1	79.7	75.2	90.3	82.7	92.3
SD	3.85	2.77	4.20	5.66	2.58	7.06	3.38	6.82	9.62	8.66

จากการคำนวณตามสูตร Eurachem Guide: The Fitness for Purpose of Analytical Methods, 2014 [13] และตรวจสอบความถูกต้องและความเที่ยง พบว่าค่า LOD มีระดับความเข้มข้นที่ 2 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม และ LOQ ที่ระดับ 10 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งมีค่าร้อยละการคืนกลับอยู่ระหว่าง 71.3 - 108.6 ซึ่งเป็นไปตามเกณฑ์การยอมรับ 70-110% ตาม Commission Decision of 12 August 2002 implementing Council Directive 96/23/EC concerning the performance of analytical methods and the interpretation of results (2002/657/EC) [14]

3.4 ความถูกต้อง (Accuracy) และความเที่ยง (Precision)

การตรวจสอบความถูกต้องและความเที่ยงที่ 3 ระดับความเข้มข้น (ต่ำ กลาง และสูง) ดังนี้ 10, 25 และ 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จำนวน 6 ซ้ำ ตามที่ระบุไว้ใน Eurachem Guide: The Fitness for Purpose of Analytical Methods, 2014 [13] จากผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 7 พบว่า ที่ระดับ 10 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม มีค่าร้อยละการคืนกลับอยู่ระหว่าง

75.1 - 92.3 และ $\%RSD_R$ อยู่ระหว่าง 2.54 - 12.3 และที่ระดับ 25 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมมีค่าร้อยละการคืนกลับอยู่ระหว่าง 80.0 - 97.0 และ $\%RSD_R$ มีค่าอยู่ระหว่าง 3.24 - 11.2 และที่ระดับ 50 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมมีค่าร้อยละการคืนกลับอยู่ระหว่าง 85.3 - 98.3 และ $\%RSD_R$ มีค่าอยู่ระหว่าง 2.96 - 15.4 ดังนั้นค่าร้อยละการคืนกลับหรือ $\%recovery$ มีค่าอยู่ในช่วงเกณฑ์การยอมรับ คือ 70 - 110% ที่ระดับ 1 - 10 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม และ 80 - 110% ที่ระดับมากกว่าหรือเท่ากับ 10 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม และ $\%RSD_R$ ไม่เกิน 23% ตาม 2002/657/EC [14] ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับวิธี EUR 24815 EN 2011 [12] พบว่า วิธีที่พัฒนาขึ้นสามารถตรวจวัดสาร PAAs จำนวน 10 ชนิดได้อย่างมีความถูกต้องและความเที่ยงเป็นไปตามเกณฑ์การยอมรับเช่นเดียวกัน และมีช่วงการใช้งานกว้างขึ้นที่ 50.0 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม และค่า SD ของการทดสอบนี้ในตัวอย่างเครื่องครัวด้วยสารละลายตัวแทนอาหาร มีความแปรปรวนอยู่ในระดับที่มากกว่าการทดสอบสาร PAAs ในตัวอย่างลามิเนต โดยค่า SD สูงสุดอยู่ที่ 13.4 [15]

ตารางที่ 7 ผลการทดสอบ Primary aromatic amines ของตัวอย่างที่เติมสารมาตรฐานที่ระดับ 10.0, 25.0 และ 50.0 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม (n=6)

ชนิดของสาร	ความเข้มข้นที่เติม (ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม)	ปริมาณที่ตรวจวัดได้ ($\pm$ SD) (ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม)	ค่าร้อยละการคืนกลับ ($\pm$ SD) (%Recovery)	$\%RSD_R$ ของปริมาณที่ตรวจ วัดได้
m-PDA	10.0	8.61 $\pm$ 0.37	86.1 $\pm$ 3.85	4.34
	25.0	20.1 $\pm$ 2.25	85.6 $\pm$ 7.40	11.2
	50.0	37.8 $\pm$ 5.81	86.1 $\pm$ 13.4	15.4
ANL	10.0	8.55 $\pm$ 0.34	86.0 $\pm$ 2.77	4.02
	25.0	20.0 $\pm$ 0.87	97.0 $\pm$ 4.33	4.38
	50.0	40.0 $\pm$ 1.18	98.3 $\pm$ 3.25	2.96
o-ASD	10.0	8.51 $\pm$ 0.56	84.7 $\pm$ 4.20	6.61
	25.0	20.7 $\pm$ 0.75	91.7 $\pm$ 1.68	3.64
	50.0	42.5 $\pm$ 2.58	94.8 $\pm$ 3.64	6.08
o-T	10.0	7.72 $\pm$ 0.30	77.6 $\pm$ 5.66	3.94
	25.0	20.8 $\pm$ 1.29	94.5 $\pm$ 4.95	6.20
	50.0	42.0 $\pm$ 2.82	96.2 $\pm$ 5.57	6.71
4-CA	10.0	7.65 $\pm$ 0.19	77.1 $\pm$ 2.58	2.54
	25.0	19.2 $\pm$ 0.67	87.6 $\pm$ 3.17	3.48
	50.0	39.2 $\pm$ 1.33	90.2 $\pm$ 3.37	3.39
2,6-DMA	10.0	7.99 $\pm$ 0.69	79.7 $\pm$ 7.06	8.61
	25.0	18.0 $\pm$ 0.68	85.9 $\pm$ 6.73	3.77
	50.0	35.1 $\pm$ 1.03	86.3 $\pm$ 5.82	2.94
2-M-5-MA	10.0	7.51 $\pm$ 0.46	75.1 $\pm$ 3.38	6.20
	25.0	17.8 $\pm$ 1.05	80.9 $\pm$ 3.74	5.90
	50.0	37.4 $\pm$ 2.63	85.8 $\pm$ 3.89	7.04

ตารางที่ 7 ผลการทดสอบ Primary aromatic amines ของตัวอย่างที่เติมสารมาตรฐานที่ระดับ 10.0, 25.0 และ 50.0 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม (n=6) (ต่อ)

ชนิดของสาร	ความเข้มข้นที่เติม (ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม)	ปริมาณที่ตรวจวัดได้ ($\pm$ SD) (ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม)	ค่าร้อยละการคืนกลับ ($\pm$ SD) (%Recovery)	%RSD _R ของปริมาณที่ตรวจ วัดได้
4,4'-MDA	10.0	8.59 $\pm$ 0.48	90.3 $\pm$ 6.82	5.64
	25.0	19.7 $\pm$ 0.89	89.1 $\pm$ 5.94	4.52
	50.0	39.4 $\pm$ 1.99	88.0 $\pm$ 4.95	5.05
4-CoT	10.0	8.12 $\pm$ 1.00	82.7 $\pm$ 9.62	12.3
	25.0	18.1 $\pm$ 0.57	80.0 $\pm$ 2.78	3.24
	50.0	36.9 $\pm$ 1.04	85.3 $\pm$ 2.24	2.83
4,4'-MDoT	10.0	9.13 $\pm$ 0.92	92.3 $\pm$ 8.66	10.0
	25.0	19.9 $\pm$ 0.96	88.9 $\pm$ 2.62	4.81
	50.0	39.1 $\pm$ 2.30	90.0 $\pm$ 5.96	5.88

3.5 การทดสอบในตัวอย่างเครื่องครัว

การสุ่มเก็บตัวอย่างเครื่องครัว (ทัพพี) จากร้านค้า จำนวน 5 ตัวอย่าง เพื่อยืนยันวิธีการทดสอบที่พัฒนาขึ้นพบว่า วิธีการทดสอบนี้สามารถนำมาใช้กับการทดสอบสาร PAAs จำนวน 10 ชนิด ได้แก่ m-PDA, ANL, o-ASD, o-T, 4-CA, 2,6-DMA, 2-M-5-MA, 4,4'-MDA, 4-CoT และ 4,4'-MDoT

ตารางที่ 8 ผลการทดสอบ Primary aromatic amines ของตัวอย่างเครื่องครัว จำนวน 5 ตัวอย่าง

ชื่อตัวอย่าง	ปริมาณที่ตรวจวัดได้ (ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม) ($\pm$ SD) (n = 3)									
	m-PDA	ANL	o-ASD	o-T	4-CA	2,6-DMA	2-M-5-MA	4,4'-MDA	4-CoT	4,4'-MDoT
ตัวอย่าง 1	ไม่พบ	< 10	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	< 10	ไม่พบ	ไม่พบ
ตัวอย่าง 2	ไม่พบ	< 10	ไม่พบ	< 10	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	41.9 $\pm$ 2.0	ไม่พบ	ไม่พบ
ตัวอย่าง 3	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	< 10	ไม่พบ	ไม่พบ
ตัวอย่าง 4	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ
ตัวอย่าง 5	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ	<10	ไม่พบ	ไม่พบ

4. สรุป (Conclusion)

การพัฒนาวิธีทดสอบสาร Primary aromatic amines ในวัสดุสัมผัสอาหาร ได้ดำเนินการตาม Eurachem Guide: The Fitness for Purpose of Analytical Methods, 2014 [13] โดยศึกษาสาร PAAs จำนวน 10 ชนิด ดังนี้ m-PDA, ANL, o-ASD, o-T, 4-CA, 2,6-DMA, 2-M-5-MA, 4,4'-MDA, 4-CoT และ 4,4'-MDoT ซึ่งแสดงค่าการตรวจวัดต่ำสุด (LOD) 2 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมและค่าการวัดเชิงปริมาณ (LOQ) 10 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม ความเป็นเส้นตรงอยู่ในช่วง 2.00 - 20.0 นาโนกรัมต่อมิลลิเมตร พบว่า สาร PAAs ทุกชนิดมีค่าสัมประสิทธิ์การกำหนดมากกว่า 0.995 นอกจากนี้ ได้ตรวจสอบความถูกต้องและความเที่ยงที่ 3 ระดับความเข้มข้น คือ 10, 25 และ 50 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม โดยมีความถูกต้องเป็นไปตามเกณฑ์การยอมรับตาม 2002/657/EC [14] ดังนั้น วิธีทดสอบนี้มีความเหมาะสมสามารถนำไปใช้ในการทดสอบสาร PAAs ดังกล่าวได้

5. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากกรมวิทยาศาสตร์บริการ

6. เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] Brede C, Skjevrak I. Migration of aniline from polyamide cooking utensils into food simulant. Food Addit. Contam. 2004;21:1115-1124.
- [2] Sendón R, Bustos J, Sánchez JJ, Paseiro P, Cirugeda ME. Validation of a liquid chromatography-mass spectrometry method for the determination of primary aromatic amines migrating from cooking utensils, and its application to real samples. Food Addit. Contam.: Part A. 2010;27(1): 107-117.
- [3] Trier X, Okholm B, Foverskov A, Binderup ML, Petersen JH. Primary aromatic amines (PAAs) in black nylon and other food-contact materials, 2004 - 2009. Food Addit. Contam.: Part A. 2010;27(9):1325-1335.
- [4] Kiroška-Petreska E, Memeti S, Kostik V. Health safety on plastic materials that come into contact with food - migration of primary aromatic amines. J. Hygien. Eng. Des. 2014; 6:152-156.
- [5] McCall E, Keegan J, Foley B. Primary aromatic amine migration from polyamide kitchen utensils: method development and product testing. Food Addit. Contam.: Part A. 2012;29(1):149-160.
- [6] European Commission. Commission Regulation (EU) No. 10/2011 of 14 January 2011 on plastic materials and articles intended to come into contact with food. Off. J. Eur. Union. 2011 Jan 14;12:1-89.
- [7] Trier X, Granby K. Analysis of primary aromatic amines (PAA) in black nylon kitchenware 2014: Selected samples from the Norwegian Market. Denmark: National Food Institute, Technical University of Denmark; 2015.
- [8] European Commission. RASFF Window. [Internet]. [cited 2022 Dec 13]. Available from: <https://webgate.ec.europa.eu/rasff-window/screen/search>
- [9] Paseiro-Cerrato R, Noonan GO, Begley TH. Development of a rapid screening method to determine primary aromatic amines in kitchen utensils using direct analysis in real time mass spectrometry (DART-MS). Food Addit. Contam.: Part A. 2014;31(3):537 - 545.
- [10] Favaro Perez MÂ, Daniel D, Padula M, Lago CL, Grespan Bottoli CB. Determination of primary aromatic amines from cooking utensils by capillary electrophoresis-tandem mass spectrometry. Food Chem. 2021;362:129902. doi:10.1016/j.foodchem.2021.129902.

- [11] Szabó BS, Jakab PP, Hegedűs J, Kirchkeszner C, Petrovics N, Nyiri Z, et al. Determination of 24 primary aromatic amines in aqueous food simulants by combining solid phase extraction and salting-out assisted liquid-liquid extraction with liquid chromatography tandem mass spectrometry. *Microchem. J.* 2021;164:105927. doi: 10.1016/j.microc.2021.105927.
- [12] Simoneau C, Hoekstra E, Bradley E, Bustos J, Golja V, Kappenstein O, et al. Technical guidelines on testing the migration of primary aromatic amines from polyamide kitchenware and of formaldehyde from melamine kitchenware 1st ed. EUR 24815 EN 2011, JRC Scientific and Technical Reports. 2011.
- [13] Magnusson B, Örnemark U. editors. Eurachem Guide: The fitness for purpose of analytical methods - a laboratory guide to method validation and related topics [Internet]. 2nd ed. 2014 [cited 2022 Dec 13]. Available from: www.eurachem.org
- [14] Commission Decision of 12 August 2002 implementing Council Directive 96/23/EC concerning the performance of analytical methods and the interpretation of results (2002/657/EC). *Off J Eur Comm.* [Internet]. 2002 [cited 2022 Dec 19]. Available from: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32002D0657&from=EN>
- [15] Mortensen SK, Trier XT, Foverskov A, Petersen JH. Specific determination of 20 primary aromatic amines in aqueous food simulants by liquid chromatography-electrospray ionization-tandem mass spectrometry. *J Chromatogr A.* 2005;1091:40-50.

การทดสอบสมรรถนะหน้ากากอนามัยใช้ครั้งเดียว ประเภทใช้ทางการแพทย์: คุณลักษณะทางฟิสิกส์

The performance test of single-use medical masks: physical characteristics

ศรสวรรค์ สิทธิพงศ์¹, ศิวะ สิทธิพงศ์², ณัฐพงศ์ นิลจรัสวณิช², ณัฐพล พรนำพา², ไพโรจน์ สังขพิชญ์³, ชัยยุทธ มีงาม⁴

Somsawan Sidthipong¹, Siva Sitthipong², Nuttapon Niljrusvanit², Nattapon Pornnumpa²,

Phairote Sungkhaphaitoon³, Chaiyoot Meengam⁴

รับบทความ 18 ธันวาคม 2566 แก้ไขบทความ 28 กุมภาพันธ์ 2567 ยอมรับตีพิมพ์ 28 กุมภาพันธ์ 2567

บทคัดย่อ

รายงานจากห้องปฏิบัติการนี้มีจุดประสงค์เพื่อแสดงวิธีการตรวจทดสอบหน้ากากอนามัยใช้ครั้งเดียว และรายงานผลความสอดคล้องหรือไม่สอดคล้องในส่วนของ ลักษณะทั่วไป สมบัติการใช้งาน และคุณลักษณะทางฟิสิกส์ ตามข้อกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมหน้ากากอนามัยใช้ครั้งเดียว มอก.2424-2565 ซึ่งการทดสอบคุณลักษณะทางฟิสิกส์อ้างอิงวิธีการทดสอบตาม ASTM F2100-21 ผลการทดสอบพบว่า หน้ากากตัวอย่างที่นำมาทดสอบมีค่าความแตกต่างความดัน 4 mmH₂O/cm² และมีค่าความต้านการซึมผ่านของของเหลว (เลือดสังเคราะห์) ที่ความดันต่ำสุด 80 mmHg ส่วนการลามไฟถูกจัดให้อยู่ใน Class 1 ประสิทธิภาพการกรองอนุภาคและประสิทธิภาพการกรองแบคทีเรีย คือ 95.7% และ 97.6% ตามลำดับ ซึ่งคุณลักษณะทางฟิสิกส์นี้สอดคล้องตามเกณฑ์การทดสอบหน้ากากอนามัยใช้ครั้งเดียว ประเภทใช้ทางการแพทย์ระดับที่ 1 สามารถนำไปทดสอบคุณลักษณะทางชีวภาพเพื่อยืนยันความสอดคล้องตามข้อกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ส่วนข้อมูลการศึกษาสมบัติวัสดุและโครงสร้างของหน้ากากอนามัย ได้รายงานผลไว้ให้ผู้ผลิตสามารถนำไปวิเคราะห์ปรับปรุงพัฒนา ยกระดับมาตรฐานผลิตภัณฑ์ต่อไป

คำสำคัญ: สเปนบอนด์ แผ่นกรอง หน้ากากอนามัยใช้ครั้งเดียว ASTM F2100-21 มอก.2424-2565

¹กลุ่มงานอาชีวเวชกรรม โรงพยาบาลหาดใหญ่ จ.สงขลา

²ห้องปฏิบัติการทดสอบทางฟิสิกส์ ศูนย์ทดสอบและมาตรวิทยา สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย จ.สมุทรปราการ

³ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีวัสดุ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จ.สงขลา

⁴คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา จ.สงขลา

Abstract

This laboratory report aims to demonstrate methods for testing single-use face masks and report compliance or non-conformity regarding general characteristics, functional properties, and physical characteristics according to the single-use face mask industry product standard requirements (TIS 2424-2565). Physical characteristics testing is based on testing methods according to ASTM F2100-21. The test results showed that the tested mask had a pressure difference of 4 mmH₂O/cm², a resistance to permeability of liquids (synthetic blood) at a minimum pressure of 80 mmHg, face mask flame retardant test was classified in Class 1, and the particle filtration efficiency and bacterial filtration efficiency are 95.7% and 97.6%, respectively. This physical characteristic meets the testing criteria for single-use medical masks, Class 1. They can be tested for biological characteristics to confirm compliance with industrial product standard requirements. As for the study of face mask material properties and structure, results have been reported for manufacturers to analyze and improve to develop product standards further.

Keywords: Spunbond, Meltblown, Single use mask, ASTM F2100-21, TIS 2424-2565

¹Occupational Health and Safety Hat Yai Hospital, Songkhla

²Physics Testing Laboratory, Industrial Metrology and Testing Service Centre, Thailand Institute of Scientific and Technological Research, Samut Prakan

³Materials Science and Technology, Faculty of Science, Prince of Songkhla University

⁴Faculty of Industrial Technology, Songkhla Rajabhat University

*Corresponding author e-mail address: siva@tistr.or.th, p.sungkhaphaitoon@gmail.com

1. บทนำ (Introduction)

หน้ากากอนามัยใช้ครั้งเดียวเป็นวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ป้องกันอนุภาค (Particle) ลดความเสี่ยงต่อการแพร่กระจายของเชื้อโรคจากบุคคลหนึ่งไปยังอีกบุคคลหนึ่ง โดยเฉพาะในสถานการณ์การแพร่ระบาดของไวรัสโควิด 19 ที่ผ่านมามีหน้ากากอนามัยใช้ครั้งเดียวทางการแพทย์ถูกให้ความสำคัญมากขึ้น หน้ากากอนามัยใช้ครั้งเดียวจำแนกตามวัตถุประสงค์การใช้งาน 2 ประเภท คือ ประเภทใช้งานทั่วไป และประเภทใช้งานทางการแพทย์ คุณภาพของหน้ากากอนามัยใช้ครั้งเดียวพิจารณาจากลักษณะทั่วไป สมบัติการใช้งาน คุณลักษณะทางฟิสิกส์ และคุณลักษณะทางชีวภาพ ขอบเขตงานวิจัยนี้ศึกษาตรวจสอบเฉพาะลักษณะทั่วไป สมบัติการใช้งาน และคุณลักษณะทางฟิสิกส์เท่านั้น โดยวิธีการทดสอบจะเป็นไปตาม ASTM F2100-21 [1] ซึ่งประกอบด้วย การทดสอบประสิทธิภาพการกรองอนุภาค ประสิทธิภาพการกรองแบคทีเรีย ความแตกต่างของความดัน ความต้านของเหลวซึมผ่านความดันต่ำสุด และการลามไฟ เพื่อเป็นข้อมูลแก่ผู้ผลิตไปใช้พัฒนายกระดับมาตรฐานผลิตภัณฑ์

2. วิธีการวิจัย (Experimental methods)

2.1 การเก็บตัวอย่างวิเคราะห์ทดสอบ

สุ่มหน้ากากอนามัยแบบจีบ ชนิดมีสายคล้องหูในล็อตเดียวกันมาจำนวน 69 ชิ้น นำมาวิเคราะห์ลักษณะทั่วไป และสมบัติการใช้งานอย่างละ 3 ชิ้น รวม 6 ชิ้น นำมาวิเคราะห์ชนิดของเส้นใย 3 ชิ้น นำมาวิเคราะห์โครงสร้าง ขนาดและการจัดเรียงตัวของเส้นใย และความหนาแน่นอย่างละ 1 ชิ้น รวม 3 ชิ้น นำมาทดสอบความแข็งแรง 5 ชิ้น ใช้เป็นตัวอย่างทดสอบประสิทธิภาพการกรองอนุภาค 5 ชิ้น ประสิทธิภาพการกรองแบคทีเรีย 5 ชิ้น ความแตกต่างของความดัน 5 ชิ้น ความต้านของเหลวซึมผ่านความดันต่ำสุด 32 ชิ้น การลามไฟ 5 ชิ้น

2.2 วัสดุและอุปกรณ์

2.2.1 อุปกรณ์สำหรับเตรียมตัวอย่างทดสอบ

หม้อนึ่งความดันไอน้ำ (Autoclave) ช่วงการใช้งานอุณหภูมิ 121 °C เป็นเวลา 15 - 20 min ตู้บ่มเชื้อ (Incubators) ช่วงการใช้งานอุณหภูมิ 37 °C ± 2 °C เครื่องชั่งที่มีความละเอียด 0.001g vortex mixer เครื่องเขย่าที่มีความเร็วรอบ 100 - 250 rpm ตู้เย็น ช่วงการใช้งานอุณหภูมิ 2 °C ± 8 °C เครื่องนับจำนวนโคโลนี ตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ นาฬิกาจับเวลา ขวดพลาสติก ปริมาตร 250 - 500 ml จานเพาะเชื้อขนาด 15 x 100 mm² ปิเปต ขนาด 1 ml, 5 ml และ 10 ml ที่วางหลอดทดลอง ขวดแก้วขนาดความจุ 100 - 500 ml ลูกปี่เย็บเชื้อ และหลอดทดลอง ขนาด 16 x 150 mm² พร้อมฝาปิด

2.2.2 เครื่องทดสอบ

เครื่องวิเคราะห์วัสดุด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FTIR) ยี่ห้อ BRUKER รุ่น TENSOR 27 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (OM) ยี่ห้อ OLYMPUS รุ่น BX53 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ยี่ห้อ FEI รุ่น QUANTA 400 เครื่องทดสอบสากล (Universal testing machine) ยี่ห้อ SHIMADZU รุ่น AGS-500A เครื่องทดสอบความแตกต่างความดัน ยี่ห้อ TESTEX รุ่น TN141 เครื่องทดสอบการกรองอนุภาค เครื่องทดสอบการกรองแบคทีเรีย ยี่ห้อ GBPI รุ่น GB-XF1000 เครื่องทดสอบการลามไฟ และเครื่องทดสอบความต้านของเหลวซึมผ่านความดันต่ำสุด (ความดันปะทะ 80, 120 และ 160 mmHg) ยี่ห้อ TESTEX รุ่น TN141

2.2.3 เชื้อและอาหารเลี้ยงเชื้อ

เชื้ออ้างอิงใช้ *Staphylococcus aureus* ATCC 6538 อาหารเลี้ยงเชื้อคือ Tryptone Soya Agar (TSA), Tryptone Soya Broth (TSB) และ Peptone water

2.3 วิธีการทดสอบ

2.3.1 การตรวจพินิจลักษณะทั่วไป

สุ่มตัวอย่างหน้ากากอนามัยจำนวน 3 ชิ้น มาตรวจพินิจ พิจารณาความไม่มีกลิ่นผิดปกติ ความไม่เปรอะเปื้อน และความไม่มีตำหนิที่อาจเป็นผลเสียต่อการใช้งาน

2.3.2 การตรวจพินิจสมบัติการใช้งาน

สุ่มตัวอย่างหน้ากากอนามัยจำนวน 3 ชิ้น มาตรวจพินิจพิจารณาความครอบคลุมจมูกและปาก ความปรับกระชับได้พอดีกับใบหน้าผู้ใช้ ความไม่ฉีกขาดขณะใช้งาน ความไม่ลอกเป็นขุยบริเวณด้านขอบหน้ากาก และแถบปรับกระชับต้องงอตัวตามรูปทรงที่ติดได้ตามรูปดัดงอและโหนกแก้มของผู้ใช้ เช่น อะลูมิเนียมหรือวัสดุอื่นที่มีสมบัติเทียบเท่า โดยต้องยึดแน่นไม่หลุดออกง่ายขณะใช้ ไม่มีส่วนใดยื่นออกจากหน้ากาก และต้องไม่สัมผัสกับผิวของผู้ใช้โดยตรง

2.3.3 การวิเคราะห์ชนิดวัสดุเส้นใย

สุ่มตัวอย่างหน้ากากอนามัยจำนวน 3 ชิ้น นำมาลอกชั้นหน้ากากอนามัย 3 ชั้น คือ สปันบอนดัดขึ้นนอก แผ่นกรอง และสปันบอนดัดขึ้นใน และนำไปทดสอบด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี (FTIR) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้หลักวิเคราะห์การสั่นของโมเลกุลของสารจากการได้รับพลังงานแสงอินฟราเรด คลื่นความถี่ที่จำเพาะของโมเลกุลทำให้เกิดพีก (Peak) ที่ตำแหน่งเลขคลื่น (Wave number) ทำให้ได้ลายพิมพ์อินฟราเรดสเปกตรัม ตามพันธะในโมเลกุลของวัสดุนั้น ๆ การกระตุ้นสารด้วยพลังงานแสงช่วงแสงอินฟราเรด (Infrared light) ที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ สามารถบอกหมู่ฟังก์ชันคร่าว ๆ ในวัสดุที่ไม่ทราบว่าเป็นวัสดุอะไรได้ โดยเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลในตัวเครื่อง

2.3.4 การวิเคราะห์โครงสร้าง ขนาดและการจัดเรียงตัวของเส้นใย และความหนาแน่น

สุ่มตัวอย่างหน้ากากอนามัยจำนวน 3 ชิ้น นำมาชั่งน้ำหนักและปริมาตร หาค่าความหนาแน่น จากนั้นนำมาลอกชั้นหน้ากากอนามัย 3 ชั้น คือ สปันบอนดัดขึ้นนอก แผ่นกรอง และสปันบอนดัดขึ้นใน นำมาตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมขนาดเล็ก จากนั้นนำชิ้นงานไปวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคและการจัดเรียงตัวของเส้นใยด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope, OM) และใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning electron microscope, SEM) วัดขนาดเส้นใย ซึ่งการสร้างภาพทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของตัวอย่างที่ทำการสำรวจ ซึ่งภาพที่ได้จากนี้จะเป็นภาพลักษณะของ 3 มิติ สามารถนำมาใช้ในการศึกษาสัญญาณและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง

2.3.5 การทดสอบความแข็งแรง

สุ่มตัวอย่างหน้ากากอนามัยจำนวน 5 ชิ้น นำมาลอกชั้นหน้ากากอนามัย 3 ชั้น คือ สปันบอนดัดขึ้นนอก แผ่นกรอง และสปันบอนดัดขึ้นในออกมา จากนั้น ตัดสปันบอนดัดขึ้นนอก ขึ้นใน และแผ่นกรอง ของหน้ากากอนามัยด้วย Die-C ให้ได้ชิ้นทดสอบแบบดัมเบล (Specimen dumbbell) รูปร่างและขนาดตาม ASTM D 412 - 16 [2] จำนวนอย่างละ 5 ชิ้น รวม 15 ชิ้น ทำการวัดระยะทดสอบ (Gauge length) ความกว้าง และความหนา เพื่อนำไปคำนวณหาพื้นที่ของชิ้นงาน จากนั้นจึงนำไปทดสอบแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบสากล (Universal Testing Machine, UTM) แล้วนำข้อมูลที่ได้ไปพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด (Stress-strain curve) เพื่อหาค่าความแข็งแรงดึงมอดูลัสยืดหยุ่น และ % การยืดตัว

2.3.6 การทดสอบความแตกต่างความดัน

สุ่มตัวอย่างหน้ากากอนามัยจำนวน 5 ชิ้น นำไปปรับสภาพในตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ที่อุณหภูมิ $21 \pm 5^{\circ}\text{C}$ และความชื้นสัมพัทธ์ $85 \pm 5\%$ เป็นเวลา 4 h แล้วนำไปทดสอบกับเครื่องวัดความแตกต่างความดัน โดยวางหน้ากากอนามัยลงบนแท่นวางซึ่งเป็นทรงกระบอกกลวง ขนาดพื้นที่หน้าตัด 4.9 cm^2 แล้วจ่ายอากาศผ่านกระบอกกลวงด้วยอัตราไหล 8 l/min เครื่องจะประมวลผลความแตกต่างความดันในหน่วย $\text{mmH}_2\text{O}/\text{cm}^2$ โดยอาศัยการประมวลข้อมูลความดันขาเข้า ความดันขาออก จากமானอมิเตอร์ ต่อหน่วยพื้นที่ จากนั้นลอกหน้ากากอนามัย 3 ชั้น ออก คือ สปันบอนดัดขึ้นนอก ขึ้นใน และแผ่นกรอง นำไปทดสอบด้วยวิธีการเดียวกัน

2.3.7 การทดสอบความต้านการซึมผ่านของของเหลว (เลือดสังเคราะห์) ณ ความดันต่ำสุด

สุ่มตัวอย่างหน้ากากอนามัยจำนวน 32 ชิ้น นำไปปรับสภาพในตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ที่อุณหภูมิ $21 \pm 5^{\circ}\text{C}$ และความชื้นสัมพัทธ์ $85 \pm 5\%$ เป็นเวลา 4 h แล้วนำไปทดสอบกับเครื่องทดสอบความต้านการซึมผ่านของของเหลว โดยยึดหน้ากากอนามัยเข้ากับแท่นจับ ใส่เลือดสังเคราะห์ ดังค่าความดันปะทะ 3 ค่า ที่ 80 mmHg,

120 mmHg และ 160 mmHg ตามลำดับ ฉีดพ่นไปยังชิ้นงาน ด้วยความเร็ว 450 cm/s, 550 cm/s และ 635 cm/s ตามลำดับ จากนั้นพิจารณาการซึมผ่านของของเหลว

2.3.8 การทดสอบประสิทธิภาพการกรองแบคทีเรีย

สุ่มตัวอย่างหน้ากากอนามัยจำนวน 5 ชิ้น นำไปปรับสภาวะในตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ที่อุณหภูมิ $21^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ และความชื้นสัมพัทธ์ $85 \pm 5\%$ เป็นเวลา 4 h

2.3.8.1 วิธีการเตรียมเชื้อ

ให้เชื้อเชื้ออ้างอิงจาก Stock culture ลงในฟลาस्कที่มีอาหารเลี้ยงเชื้อ Tryptone Soya Broth (TSB) ปริมาตร 100 ml และบ่มเชื้อในเครื่องเขย่าที่ $35^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 24 ± 2 h ทำการเจือจาง ใน peptone water เพื่อให้ได้ความเข้มข้นของแบคทีเรียที่ 5×10^5 CFU/ml และอัตราการส่งผ่าน (Delivery rate) ควรมีค่า 2200 ± 500 viable particle per test ซึ่งสามารถทดสอบโดยการทดสอบ positive control ที่ไม่มีแผ่นกรองอยู่

2.3.8.2 วิธีการทดสอบ

ให้เตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อ Tryptone Soya Agar (TSA) จำนวน 24 จานเพาะเชื้อ ต่อ 1 ตัวอย่าง วางจานเพาะเชื้อจำนวน 6 จานเพาะเชื้อ ลงบนแท่นวางเชื้อ แล้วเปิดเครื่องตรวจสอบประสิทธิภาพการกรองแบคทีเรีย เพื่อให้ฟั่นละอองฝอยเชื้อลงมายังจานเพาะเชื้อ โดยกำหนดอัตราการไหลที่ 28.3 l/min กำหนดเวลาที่เชื้อมาถึงเครื่องฟั่นฝอยแบบละออง (Nebulizer) เป็น 1 min และกำหนดเวลาที่ความดันอากาศและที่แท่นวางเชื้อเป็น 2 min นำจานเพาะเชื้อออกมาเพื่อเขียนตำแหน่งของแต่ละจานเพาะเชื้อ และนำไปบ่ม (Positive control) เปลี่ยนจานเพาะเชื้อจำนวน 6 จานเพาะเชื้อ ลงบนแท่นวางเชื้อ และวางตัวอย่างทดสอบในตำแหน่งบนสุดของจานเพาะเชื้อ (Material under test) เปิดเครื่องตรวจสอบประสิทธิภาพการกรองแบคทีเรีย เพื่อให้ฟั่นละอองฝอยเชื้อลงมายังจานเพาะเชื้อ โดยกำหนดอัตราการไหลที่ 28.3 l/min กำหนดเวลาที่เชื้อมาถึงเครื่องฟั่นฝอยแบบละออง (Nebulizer) เป็น 1 min และกำหนดเวลาที่ความดันอากาศและที่แท่นวางเชื้อเป็น 2 min นำจานเพาะเชื้อออกมาเพื่อเขียนตำแหน่งของแต่ละจานเพาะเชื้อ และนำไปบ่ม (Test sample) เปลี่ยนจานเพาะเชื้อจำนวน 6 จานเพาะเชื้อ ลงบนแท่นวางเชื้อ และนำสารละลายเชื้อออกจากเครื่องทดสอบประสิทธิภาพ เปิดเครื่องตรวจสอบประสิทธิภาพการกรองแบคทีเรีย เพื่อให้ฟั่นละอองฝอยเชื้อลงมายังจานเพาะเชื้อ โดยกำหนดอัตราการไหลที่ 28.3 l/min กำหนดเวลาที่เชื้อมาถึงเครื่องฟั่นฝอยแบบละออง (Nebulizer) เป็น 1 min และกำหนดเวลาที่ความดันอากาศและที่แท่นวางเชื้อเป็น 2 min นำจานเพาะเชื้อออกมาเพื่อเขียนตำแหน่งของแต่ละจานเพาะเชื้อ และนำไปบ่ม (Negative control) ดำเนินการทำ positive control อีกครั้ง เพื่อตรวจสอบค่าอัตราการส่งผ่าน (delivery rate) นำจานเพาะเชื้อทั้งหมด ไปบ่มที่ตู้บ่มเชื้อที่อุณหภูมิ $37^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 48 ± 4 h เมื่อครบเวลา บันทึกผลจำนวนโคโลนีที่ขึ้นในแต่ละจานเพาะเชื้อ และคำนวณประสิทธิภาพการกรองแบคทีเรีย

ประสิทธิภาพการกรองแบคทีเรีย (%BFE) หาได้จากสมการที่ 1

$$\eta_b = [(C - T) / C] \times 100 \quad (1)$$

โดย η_b คือ ประสิทธิภาพการกรองแบคทีเรีย

C คือ ค่าเฉลี่ยของจำนวนเชื้อแบคทีเรียของ Positive control

T คือ ค่าเฉลี่ยของจำนวนเชื้อแบคทีเรียของ Test Sample

2.3.9 การทดสอบการลามไฟ

สุ่มตัวอย่างหน้ากากอนามัยจำนวน 5 ชิ้น นำไปปรับสภาวะในตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ที่อุณหภูมิ $21^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ และความชื้นสัมพัทธ์ $85 \pm 5\%$ เป็นเวลา 4 h แล้วใช้บิวเทน 99.5% เผาที่ความยาวเปลวไฟ 16 mm เป็นเวลา 1 s ภายใต้อุณหภูมิทดสอบ 25.1°C ความชื้นสัมพัทธ์ 53% โดยลักษณะการจีดวางชิ้นงานอยู่ในแนวเอียงทำมุม 45° กับแนวระดับ สังเกตลักษณะการไหม้และระยะเวลาการไหม้ แล้วจัด Class การลามไฟ

2.3.10 การทดสอบประสิทธิภาพการกรองอนุภาค

สุ่มตัวอย่างหน้ากากอนามัยจำนวน 5 ชิ้น นำไปปรับสภาวะในตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ที่อุณหภูมิ $21^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ และความชื้นสัมพัทธ์ $85 \pm 5\%$ เป็นเวลา 4 h ง่ายอนุภาคทรงกลมชนิดพอลิสไตรีนลาเท็กซ์ จากแหล่งกำเนิดละอองลอยแบบอะตอมไมเซอร์ผ่านเข้าไปยังตัวไล่ความชื้นแบบแพร์ เพื่อกำจัดละอองน้ำและความชื้น ออก จากนั้นปรับความเข้มข้นของอนุภาค และทำให้อนุภาคมีสมมูลประจุบอลลทซ์มัน ด้วยตัวทำให้อะอองลอยเป็นกลาง แบบ Soft X-ray เพื่อคัดแยกขนาดอนุภาคแบบเคลื่อนที่ได้ทางไฟฟ้า (Electrical mobility) ด้วยเครื่องคัดแยกขนาดอนุภาค แบบไฟฟ้าสถิตโดยแยกอนุภาคตกค้าง (Residual particle) ที่เป็นอนุภาคแร่ธาตุของน้ำออกให้ได้เฉพาะอนุภาคที่มีขนาด เดียว (Monodisperse aerosol) หลังจากคัดแยกขนาดแล้ว อนุภาคพอลิสไตรีนลาเท็กซ์ถูกทำให้มีสภาพประจุเป็นกลาง ด้วยตัวทำให้อะอองลอยเป็นกลางแล้วเข้าไปยังห้องผสมและเจือจางละอองลอยกับอากาศให้ได้อัตราการไหลและความเข้มข้นของอนุภาคตามที่ต้องการ จากนั้นถูกส่งเข้าไปยังห้องทดสอบ (Test chamber) ซึ่งมีแผ่นวัสดุกรองทดสอบอยู่ ภายใน โดยมีหัวเก็บอนุภาคก่อนและหลังผ่านแผ่นกรอง การเก็บอนุภาคลักษณะนี้เรียกไอโซไคเนติก (Isokinetic sampling) จากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณประสิทธิภาพการกรองอนุภาค

ประสิทธิภาพการกรองอนุภาค (%PFE) หาได้จากสมการที่ 2

$$\eta_{fp} = [(C_{in} - C_{out}) / C_{in}] \times 100 \quad (2)$$

โดย η_{fp} คือ ประสิทธิภาพการกรองอนุภาค

C_{in} คือ ค่าความเข้มข้นของอนุภาคก่อนผ่านตัวกรอง

C_{out} คือ ค่าความเข้มข้นของอนุภาคหลังผ่านตัวกรอง

3. ผลและวิจารณ์ (Results and discussion)

3.1 ผล

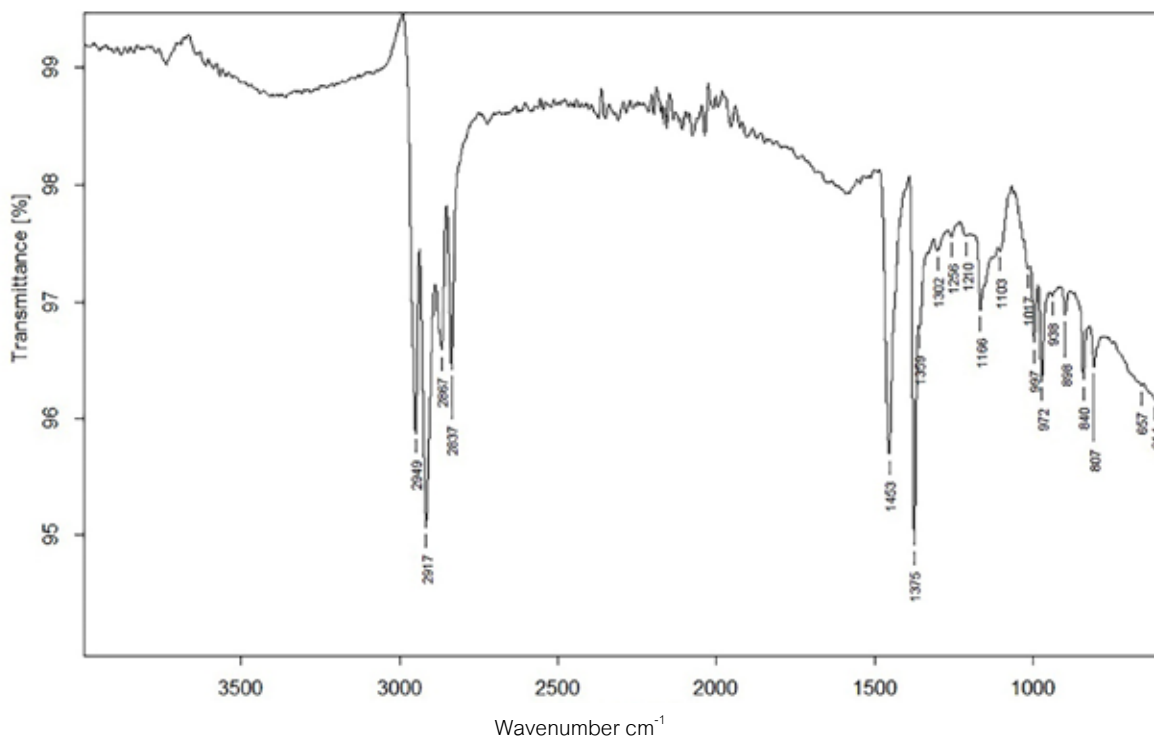
3.1.1 ผลการตรวจพินิจลักษณะทั่วไปและสมบัติการใช้งาน

หน้ากากตัวอย่างไม่มีกลิ่นผิดปกติ ไม่มีร่องรอยเปื้อน และไม่มีตำหนิที่อาจเป็นผลเสียต่อการใช้งาน หน้ากากตัวอย่างครอบคลุมจมูกและปาก และปรับกระชับได้พอดีกับใบหน้าผู้ใช้ หน้ากากตัวอย่างไม่ฉีกขาดขณะใช้งาน ไม่ลอกเป็นขุยบริเวณด้านขอบหน้ากาก ส่วนแถบปรับกระชับดังจุกทำจากอะลูมิเนียม ยึดแน่นไม่หลุดออกง่ายขณะใช้ และไม่มีส่วนใดยื่นออกจากหน้ากาก หรือสัมผัสกับผิวของผู้ใช้

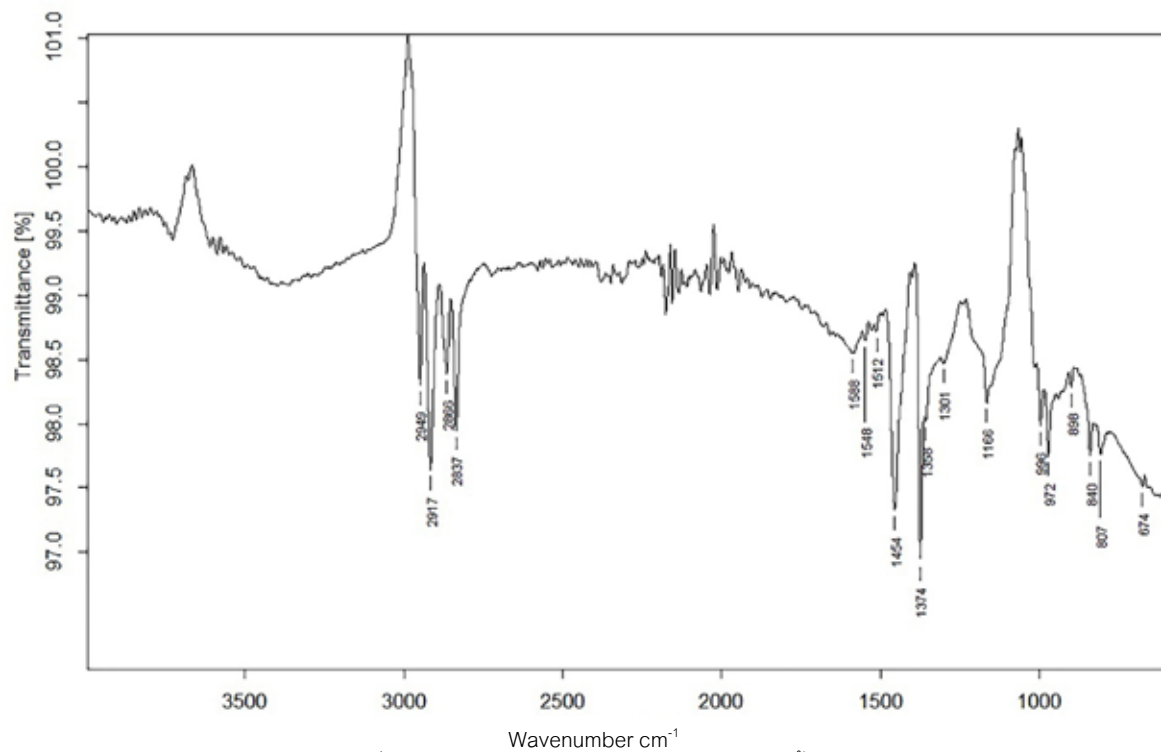
3.1.2 ผลการวิเคราะห์ชนิดวัสดุเส้นใย

สปันบอนด์ (Spunbond) ของหน้ากากอนามัย เมื่อวิเคราะห์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรด สเปคโตรสโคปี (Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR) พบว่า วัสดุสปันบอนด์ทั้งชั้นนอกและชั้นใน ให้ข้อมูลที่ตรงกับสเปกตรัมของพอลิเมอร์ประเภทโพลีโพรพิลีน (Polypropylene polymer, PP) คือ Poly(1-methylethylene) เนื่องจากพบการดูดกลืนรังสีที่ 2917 cm^{-1} แสดงให้เห็นถึงการสั่นของหมู่ฟังก์ชัน CH_2 ในสายโซ่หลัก ซึ่งเป็นองค์ประกอบ โครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์ ประเภทโพลีโพรพิลีน สเปกตรัมแสดงให้เห็นการดูดกลืนรังสีในช่วงเลขคลื่น $3000\text{--}2840\text{ cm}^{-1}$ โดยที่ 2949 และ 2867 cm^{-1} แสดงถึงการสั่นแบบ Asymmetric และ Symmetric stretching ของหมู่ฟังก์ชันเมทิล $-\text{CH}_3$ ในขณะที่พิกที่ 2917 และ 2837 cm^{-1} แสดงถึงการสั่นแบบ Asymmetric และ Symmetric stretching ของหมู่ฟังก์ชัน $-\text{CH}_2$ ตามลำดับ พิกที่ 1453 และ 1375 cm^{-1} เกิดการสั่นแบบ Scissor ของหมู่ฟังก์ชัน $-\text{CH}_2$ หรือการสั่นแบบ Asymmetric และ Symmetric stretching ของหมู่ฟังก์ชันเมทิล $-\text{CH}_3$ พิกที่เกิดขึ้น อยู่ในช่วง $1200\text{--}700\text{ cm}^{-1}$ พิกเหล่านี้เกิด จากพันธะ C-C ใน ลักษณะ Symmetric stretching การสั่นแบบ Asymmetric rocking ของหมู่ฟังก์ชันเมทิล $-\text{CH}_3$ และการ สั่นแบบ Wagging และ Rocking ของพันธะ C-H และ CH_2 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 1 และ 2

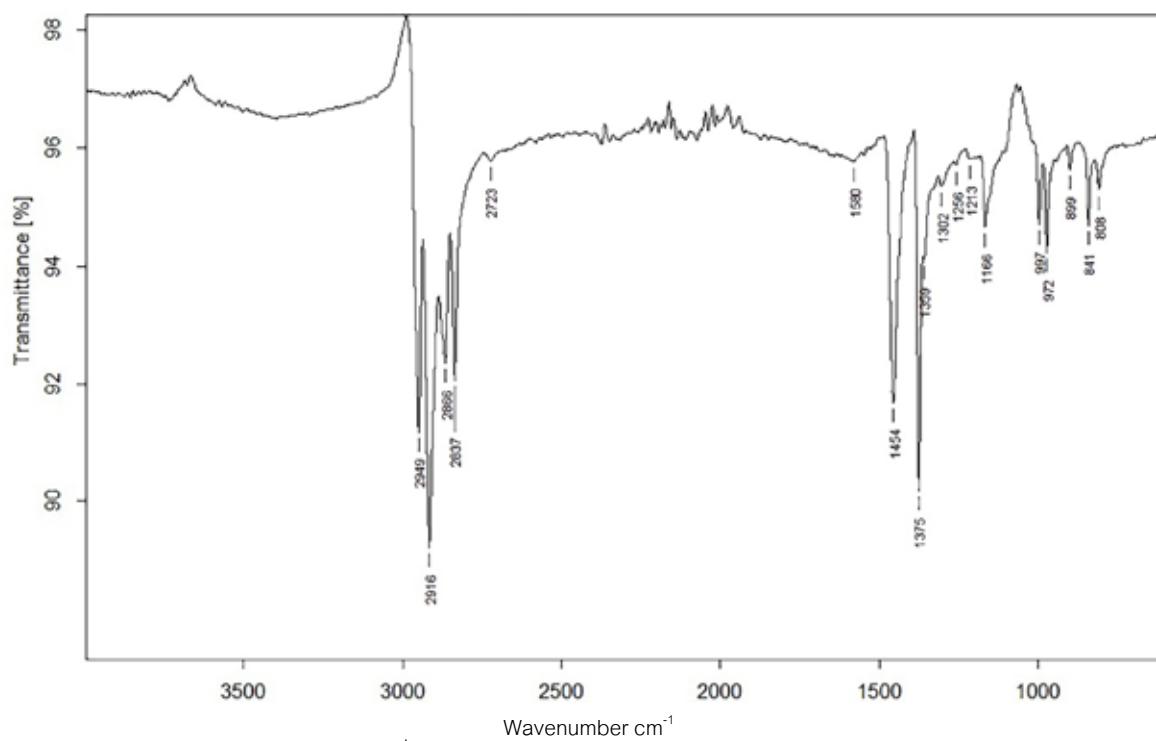
แผ่นกรอง (Melt blown) ของหน้ากากอนามัย เมื่อวิเคราะห์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรด สเปกโทรสโคปี (Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR) พบว่า วัสดุเป็นพอลิเมอร์ ประเภทโพลิโพรพิลีน (Polypropylene polymer, PP) คือ poly(1-methylethylene) เนื่องจากพบการดูดกลืนรังสีที่ 2916 cm^{-1} แสดงให้เห็นถึงการสั่นของหมู่ฟังก์ชัน -CH_2 ในสายโซ่หลัก ซึ่งเป็นองค์ประกอบ โครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์ประเภทโพลิโพรพิลีน สเปกตรัมแสดงให้เห็นการดูดกลืนรังสีในช่วง เลขคลื่น $3000\text{-}2700\text{ cm}^{-1}$ โดยที่ 2949 และ 2868 cm^{-1} แสดงถึงการสั่นแบบ Asymmetric และ Symmetric stretching ของหมู่ฟังก์ชัน -CH_3 ในขณะที่พีกที่ 2916 และ 2837 cm^{-1} แสดงถึงการสั่นแบบ Asymmetric และ Symmetric stretching ของหมู่ฟังก์ชัน -CH_2 ตามลำดับ พีกที่ 1454 และ 1375 cm^{-1} เกิดการสั่นแบบ Scissor ของหมู่ฟังก์ชัน -CH_2 หรือการสั่นแบบ Asymmetric และ Symmetric stretching ของหมู่ฟังก์ชัน -CH_3 พีกที่เกิดขึ้นบริเวณย่านรอยนิ้วมือ (Fingerprint region) อยู่ในช่วง $1200\text{-}700\text{ cm}^{-1}$ พีกเหล่านี้เกิดจากพันธะ C-C ในลักษณะ Symmetric stretching การสั่นแบบ Asymmetric rocking ของหมู่ฟังก์ชัน -CH_3 และการสั่นแบบ Wagging และ Rocking ของพันธะ C-H และ CH_2 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 1 ผลการวิเคราะห์ด้วย FTIR สำหรับสปันบอนดัดชั้นนอก



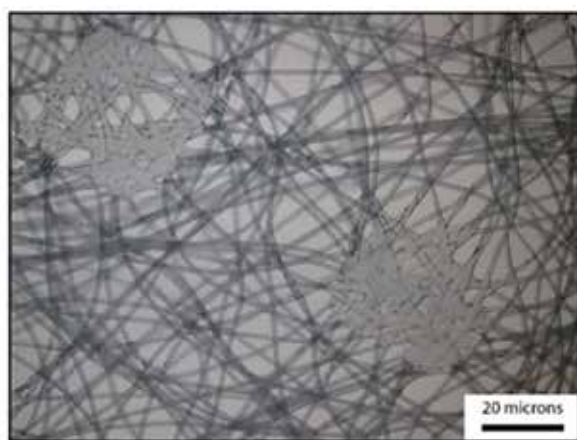
รูปที่ 2 ผลการวิเคราะห์ด้วย FTIR สำหรับสปีนบอนด์ขึ้นใน



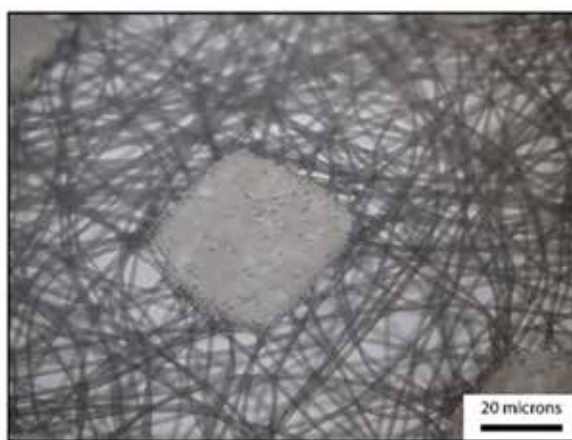
รูปที่ 3 ผลการวิเคราะห์ด้วย FTIR สำหรับแผ่นกรอง

3.1.3 ผลการวิเคราะห์โครงสร้าง ขนาดและการจัดเรียงตัวของเส้นใย และความหนาแน่น

โครงสร้างมหภาคและจุลภาคของสปีนบอนด์ชั้นนอกและสปีนบอนด์ชั้นในของหน้ากากอนามัย ที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope, OM) แสดงในรูปที่ 4 และ ที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) แสดงในรูปที่ 5 พบว่าสปีนบอนด์ชั้นนอกและสปีนบอนด์ชั้นในของหน้ากากอนามัย มีโครงสร้างและลักษณะการจัดเรียงตัวที่คล้ายคลึงกัน โดยจะมีเส้นใยขนาดใกล้เคียงกัน ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ $25\text{ }\mu\text{m}$ เป็นเส้นใยที่ยาวต่อเนื่องคล้ายริบบิ้นแบน (Flat ribbon) และเส้นใยมีการพาดสานกันในทุกทิศทางและมีการจัดเรียงตัวของเส้นใยที่แนบชิดกัน และไม่เป็นระเบียบหรือเส้นใยมีการจัดเรียงตัวแบบสุ่ม และมีการเชื่อมติดกันตรงจุดพาดผ่านระหว่างเส้นใยด้วยกันที่เกิดจากการขึ้นรูปผ้าแบบไม่ถักทอ โดยที่การจัดเรียงตัวของเส้นใยที่มีความต่อเนื่องและยึดติดอย่างแน่นหนา ส่งผลต่อความหนาแน่นของ สปีนบอนด์ โดยที่สปีนบอนด์ชั้นนอกของหน้ากากอนามัย มีความหนาแน่น $1.76 \times 10^{-4}\text{ g/mm}^3$ สปีนบอนด์ชั้นในของหน้ากากอนามัย มีความหนาแน่น $2.64 \times 10^{-4}\text{ g/mm}^3$ ซึ่งจากข้อมูลค่าความหนาแน่นจะเห็นได้ว่าสปีนบอนด์ชั้นในของหน้ากากอนามัยมีความหนาแน่นมากกว่า สปีนบอนด์ชั้นนอก ซึ่งเป็นประเภทการออกแบบเพื่อช่วยยับยั้งการคัดหลั่งจากผู้สวมใส่ไปยังภายนอก

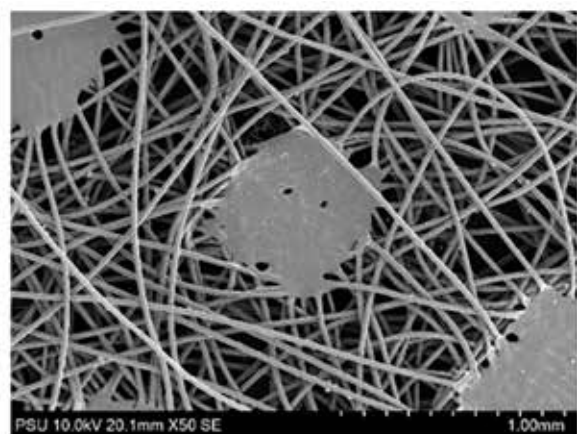


Spunbond outer layer

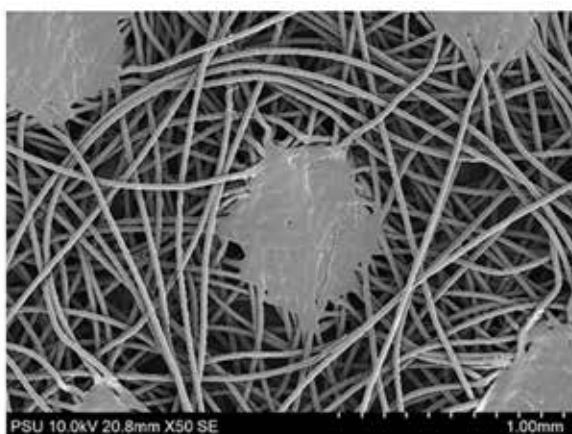


Spunbond Inner layer

รูปที่ 4 ลักษณะโครงสร้างจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง



Spunbond outer layer

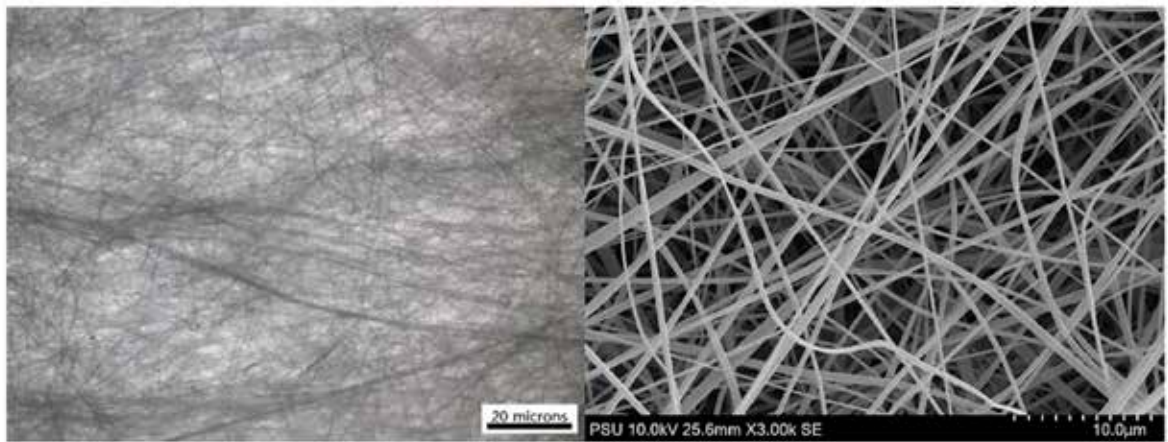


Spunbond inner layer

รูปที่ 5 ลักษณะโครงสร้างจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของแผ่นกรอง (Melt blown) ของหน้ากากอนามัย ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope, OM) และ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)

พบว่าแผ่นกรองมีโครงสร้างเส้นใยที่สั้น มีทั้งเส้นใยขนาดเล็กและขนาดใหญ่ที่จัดเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยอยู่ในช่วง 200-800 nm หรือเส้นใยมีการจัดเรียงตัวแบบสุ่ม (Random arrangement) ซ้อนทับกันไปมาหลาย ๆ ชั้น ทำให้เกิดรูพรุนขนาดไมครอน (Micropore) ที่มีขนาดและรูปร่างต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 6 แผ่นกรองมีความหนาแน่นเท่ากับ $3.15 \times 10^{-4} \text{ g/mm}^3$



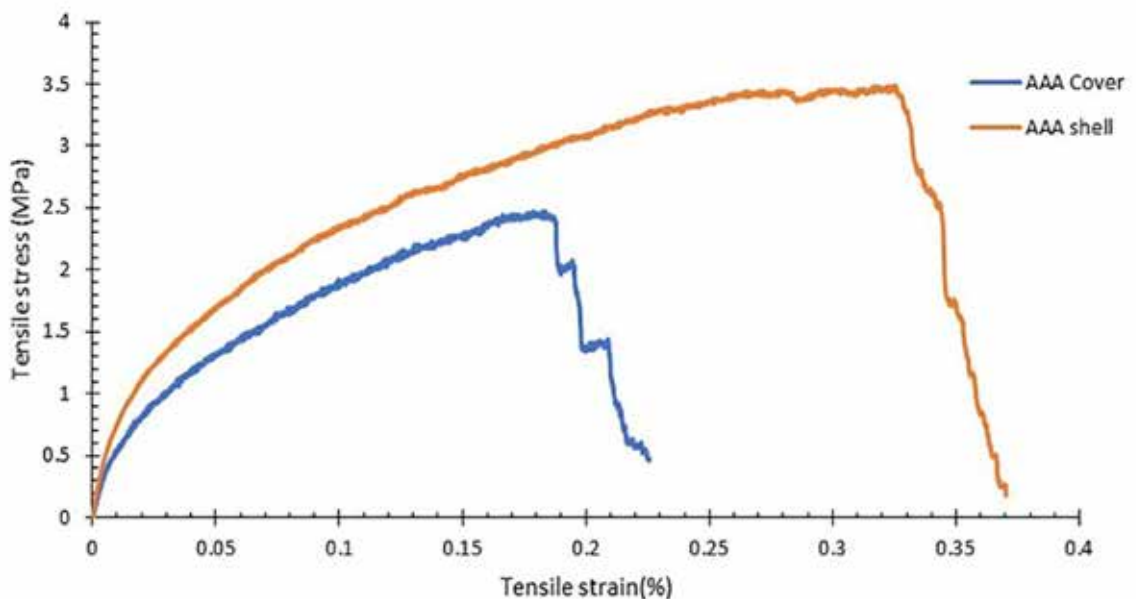
OM

SEM

รูปที่ 6 ลักษณะโครงสร้างมหภาคและจุลภาคของแผ่นกรอง

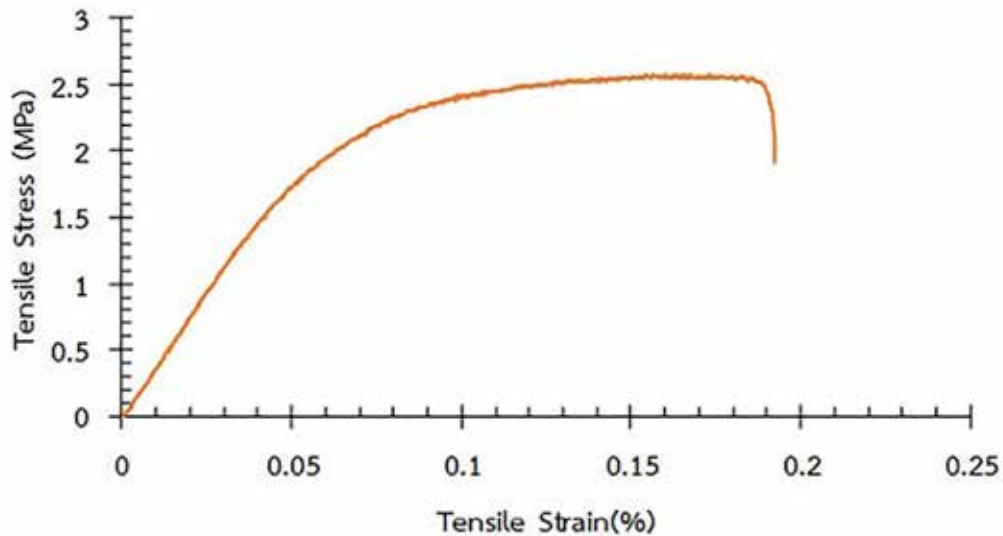
3.1.4 ผลการทดสอบความแข็งแรง

ผลการทดสอบความแข็งแรงของวัสดุสปีนบอนด์ชั้นนอกและชั้นในของหน้ากากอนามัยด้วยเครื่องทดสอบสากล (Universal testing machine, UTM) พบว่า ความต้านทานแรงดึงของสปีนบอนด์ชั้นนอกต่ำกว่าชั้นใน มีค่าเป็น 2.49 เมกะปาสคาล และ 3.49 เมกะปาสคาล ตามลำดับ ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นของสปีนบอนด์ชั้นนอก 10.73 เมกะปาสคาล และ 13.62 เมกะปาสคาล ตามลำดับ โดย %การยืดตัวของ สปีนบอนด์ชั้นนอกสูงกว่าชั้นใน มีค่าเป็น 32.54% และ 18.26% ตามลำดับ ความสัมพันธ์ระหว่างกราฟความเค้น - ความเครียด ของสปีนบอนด์ชั้นนอกและชั้นใน แสดงดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด ของสปีนบอนด์ชั้นนอกและชั้นใน

ผลการทดสอบความแข็งแรงของวัสดุแผ่นกรองของหน้ากากอนามัยด้วยเครื่องทดสอบสากล (Universal testing machine, UTM) พบว่า ความต้านทานแรงดึงของแผ่นกรอง มีค่าเป็น 2.58 เมกะปาสคาล ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น 13.41 เมกะปาสคาล %การยืดตัว มีค่า 19.25% ความสัมพันธ์ระหว่างกราฟความเค้น-ความเครียด ของแผ่นกรอง แสดงดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด ของแผ่นกรอง

3.1.5 ผลการทดสอบความแตกต่างความดัน

ผลการทดสอบความแตกต่างความดัน พบว่า สปันบอนด์ชั้นนอกไม่มีความแตกต่างของความดัน ส่วนสปันบอนด์ชั้นในมีความแตกต่างความดัน $0.2 \text{ mmHg}/\text{cm}^3$ และในส่วนแผ่นกรองซึ่งเป็นชั้นที่มีความแตกต่างความดันสูงสุดมีความแตกต่างความดัน $3.92 \text{ mmHg}/\text{cm}^3$

ผลการทดสอบความแตกต่างความดันของหน้ากากอนามัย 3 ชั้น ตาม ASTM F2100-21 ซึ่งอ้างอิงวิธีการทดสอบตาม BS EN 14683:2019 Annex C [3] พบว่ามีความแตกต่างความดัน $4 \text{ mmHg}/\text{cm}^2$

3.1.6 ผลการทดสอบความต้านการซึมผ่านของของเหลว (เลือดสังเคราะห์) ณ ความดันต่ำสุด

ผลการทดสอบความต้านการซึมผ่านของของเหลวของหน้ากากอนามัย 3 ชั้น ตาม ASTM F2100-21 ซึ่งอ้างอิงวิธีการทดสอบตาม ASTM F1862-17 [4] พบว่า ปรากฏการซึมผ่านของของเหลวที่ความดันปะทะ 120 มิลลิเมตรปรอท และ 160 มิลลิเมตรปรอท ส่วนที่ความดันปะทะ 80 มิลลิเมตรปรอท ไม่ปรากฏการซึมผ่านของของเหลว ดังแสดงในรูปที่ 9



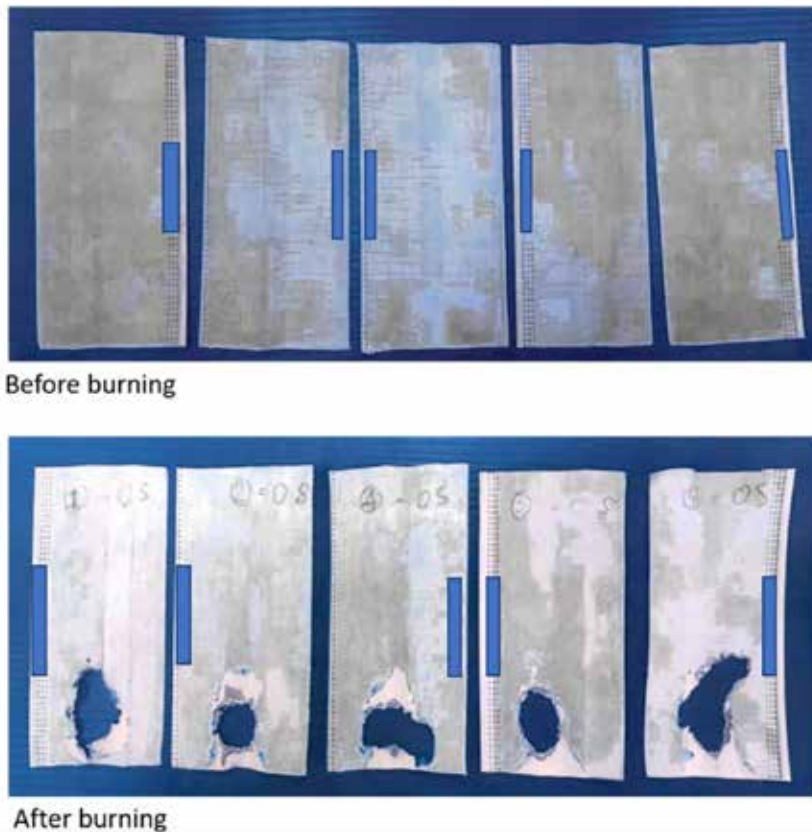
รูปที่ 9 ปรากฏการซึมผ่านของของเหลว (เลือดสังเคราะห์)

3.1.7 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการกรองอนุภาคและประสิทธิภาพการกรองแบคทีเรีย

ผลการทดสอบประสิทธิภาพการกรองอนุภาคและประสิทธิภาพการกรองแบคทีเรียของหน้ากากอนามัย 3 ชั้น ตาม ASTM F2100-21 ซึ่งอ้างอิงวิธีการทดสอบตาม ASTM F2299-17 [5] และ ASTM F2101-19 [6] ตามลำดับ พบว่าหน้ากากตัวอย่างมีประสิทธิภาพการกรองอนุภาค 95.7% และมีประสิทธิภาพการกรองแบคทีเรีย 97.6%

3.1.8 ผลการทดสอบการลามไฟ

ผลการทดสอบการลามไฟของหน้ากากอนามัย 3 ชั้น ตาม ASTM F2100-21 ซึ่งอ้างอิงวิธีการทดสอบตาม 16 CFR Part 1610 [7] พบว่ามีเวลาในการลุกไหม้ตั้งแต่ 2 ค่าขึ้นไป และมีค่าเฉลี่ยมากกว่า 7 วินาที มีการไหม้ที่พื้นผ้าของหน้ากากตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 10 จึงจัดชั้นการติดไฟให้อยู่ใน Class 1



รูปที่ 10 รอยเผาไหม้ที่พื้นผ้าของหน้ากากตัวอย่าง

3.2 วิจัยรณัผล

จากการศึกษาโครงสร้างมหภาคและจุลภาคของตัวอย่างหน้ากากอนามัยที่ถูกส่งมาทดสอบ พบว่าวัสดุที่ใช้ทำเป็นโพลีโพรพิลีนที่ขึ้นรูปแบบไม่ถักไม่ทอ การลามไฟจัดอยู่ใน Class 1 ตาม 16 CFR Part 1610 ขนาดเส้นใยของชั้นสปีนบอนด์ละเอียดระดับไมครอน ส่วนความละเอียดชั้นแผ่นกรองระดับนาโน เส้นใยเหล่านี้สานไขว้กันอย่างไม่เป็นระเบียบ ทำให้มีประสิทธิภาพป้องกันการแพร่กระจายของเชื้อโรค ตามกลไกการดักจับอนุภาคทั้ง 4 [8] ประกอบด้วย 1. กลไกการสกัดกั้น คือความหนาแน่นของเส้นใยที่มี ทำให้อนุภาคไม่สามารถลอดผ่านเส้นใยได้ทั้งหมด 2. กลไกการคัดกรอง คือ อนุภาคที่ขนาดใหญ่กว่าช่องว่างระหว่างเส้นใยไม่สามารถลอดผ่านได้ 3. กลไกการชน คือ การปะทะของอนุภาคกับเส้นใยโดยตรง ทำให้อนุภาคไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านไป 4. กลไกการแพร่ คือ การเกาะตัวกันของอนุภาคที่มาเกาะติดกับเส้นใยเป็นกลุ่มก้อนช่วยป้องกันอนุภาคอื่น ส่วนความหนาแน่นกับความแข็งแรงของเส้นใยไม่มีความสัมพันธ์กันในทิศทางใดทิศทางหนึ่งที่ชัดเจน และอ้างอิงผลการวิจัย [9] พบว่า ความแข็งแรงของหน้ากากอนามัยขึ้นกับชนิดวัสดุ

ขนาดและ ความหนาของเส้นใย และจากผลการทดสอบความแตกต่างความดัน พบว่า สอดคล้องตามมาตรฐานกำหนด แต่มีข้อสังเกตคือผู้ผลิตออกแบบให้สปีนบอนด์ชั้นในหนากว่าชั้นนอก ซึ่งอ้างอิงจากข้อมูลของเทคโนโลยีการผลิต [10-11] เป็นไปได้ว่า การออกแบบลักษณะนี้ ทำให้สปีนบอนด์ชั้นในช่วยซับสารคัดหลั่งที่ออกมาจากผู้สวมใส่ได้ดียิ่งขึ้น แต่ในขณะเดียวกันการเพิ่มความหนาของชั้นสปีนบอนด์อาจมีผลให้ความต้านทานการหายใจของผู้สวมใส่เพิ่มขึ้นเช่นกัน อาจทำให้หายใจลำบากขึ้น และจากการทดสอบการต้านการซึมผ่านของของเหลวโดยใช้เลือดสังเคราะห์ ซึ่งพบว่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานระดับ 1 ไม่ปรากฏการซึมผ่านที่ความดันปะทะ 80 มิลลิเมตรปรอทนั้น หากต้องการพัฒนาผลิตภัณฑ์ไปสู่ระดับที่สูงกว่าที่สามารถรับแรงดันปะทะระดับ 2 120 mmHg และ ระดับ 3 160 mmHg โดยไม่ปรากฏการซึมผ่านของของเหลว ผู้ผลิตอาจจะออกแบบให้สปีนบอนด์ชั้นนอกหนากว่าชั้นใน เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพความต้านการซึมผ่านของของเหลวจากภายนอกก่อนผ่านแผ่นกรอง ช่วยให้เห็นกรองลดแรงปะทะจากของเหลว ทำให้ไม่ปรากฏการซึมผ่านของของเหลวในระดับ 2,3 ที่ความดัน 120 mmHg, 160 mmHg ตามลำดับ ซึ่งแต่ละยี่ห้อออกแบบความหนาของสปีนบอนด์ชั้นนอกและชั้นในด้วยจุดประสงค์ที่แตกต่างกัน และจากการทดสอบประสิทธิภาพการกรองอนุภาคและประสิทธิภาพการกรองแบคทีเรีย ได้ค่า 95.7% และ 97.6% ตามลำดับ ซึ่งจัดอยู่ในประเภทใช้งานทางการแพทย์ระดับ 1 คือประสิทธิภาพไม่น้อยกว่า 95% แต่ไม่ถึง 98% สอดคล้องกับผลการทดสอบการต้านการซึมผ่านของของเหลว

4. สรุป (Conclusion)

ผลการตรวจสอบลักษณะทั่วไป สมบัติการใช้งาน โครงสร้าง ความแข็งแรง และคุณลักษณะทางฟิสิกส์ พบว่า หน้ากากตัวอย่างผ่านเกณฑ์ข้อกำหนดคุณลักษณะทางฟิสิกส์ของมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมหน้ากากอนามัยใช้ครั้งเดียว มอก.2424-2565 และเพื่อยืนยันคุณภาพของผลิตภัณฑ์ว่าเหมาะสมใช้งานในทางการแพทย์ ที่ระดับชั้นคุณภาพ ระดับที่ 1 ใช้งานทางการแพทย์ทั่วไป หรือไม่นั้น นอกจากผลคุณลักษณะทางฟิสิกส์ ที่ค่าความแตกต่างความดัน 4 mmH₂O/cm² ค่าความต้านการซึมผ่านของของเหลว (เลือดสังเคราะห์) ที่ความดันต่ำสุด 80 mmHg การลามไฟ Class 1 ประสิทธิภาพการกรองอนุภาค 95.7% และประสิทธิภาพการกรองแบคทีเรีย 97.6% แล้ว จำเป็นต้องส่งหน้ากากตัวอย่างไปทดสอบคุณลักษณะทางชีวภาพประกอบด้วย ห่วงข้อ การแพ้ทางผิวหนัง การระคายเคือง และความเป็นพิษต่อเซลล์เนื้อเยื่อเพาะเลี้ยง หากผ่านเกณฑ์ทั้ง 3 หัวข้อ จะสามารถสรุปได้ทันทีว่าเป็นหน้ากากอนามัยประเภทใช้งานทางการแพทย์ ระดับที่ 1 ที่มีศักยภาพที่จะพัฒนาเป็นหน้ากากอนามัยประเภทใช้งานทางการแพทย์ ระดับที่ 3 ซึ่งใช้งานด้านการแพทย์ในทางศัลยกรรม และข้อมูลผลการทดสอบผลิตภัณฑ์ที่ครอบคลุมถึงส่วนของการวิจารณ์จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ผลิตผลิตภัณฑ์ หน้ากากอนามัยใช้ครั้งเดียว เพื่อสามารถใช้เป็นแนวทางปรับปรุงและยกระดับผลิตภัณฑ์ ให้ผ่านการตรวจสอบในระดับชั้นคุณภาพที่ต้องการ

5. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

ขอขอบคุณ คุณกรรณิการ์ จิตตารัตนถาวร และ คุณสุรเดช เตชะวาทกุล นักวิชาการของห้องปฏิบัติการทดสอบทางฟิสิกส์ ศูนย์ทดสอบและมาตรวิทยาบางปู ที่ช่วยจัดเตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับใช้ในการทดสอบและสนับสนุนให้ งานวิจัยสำเร็จลุล่วง

6. เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] American Society for Testing and Materials (ASTM). Standard specification for performance of materials used in medical face masks. ASTM F2100-21. West Conshohocken, United States of America: ASTM International; 2021.

- [2] American Society for Testing and Materials (ASTM). Standard test methods for vulcanized rubber and thermoplastic elastomers-tension. ASTM D412-16. West Conshohocken, United States of America: ASTM International; 2021.
- [3] British Standards Institution (BSI). Medical face masks - Requirements and test methods. BS EN 14683-2019. London, United Kingdom: BSI; 2019.
- [4] American Society for Testing and Materials (ASTM). Standard test methods for resistance of medical face masks to penetration by synthetic blood (Horizontal projection of fixed volume at a known velocity). ASTM F1862/F1862M-17. West Conshohocken, United States of America: ASTM International; 2017.
- [5] American Society for Testing and Materials (ASTM). Standard test method for determining the initial efficiency of materials used in medical face masks to penetration by particulates using latex spheres. ASTM F2299/F2299M-03. West Conshohocken, United States of America: ASTM International; 2017.
- [6] American Society for Testing and Materials (ASTM). Standard test method for evaluating the bacterial filtration efficiency (BFE) of medical face mask materials, using a biological aerosol of *Staphylococcus aureus*. ASTM F2101-19. West Conshohocken, United States of America: ASTM International; 2019.
- [7] Code of Federal Regulations. Standard for the flammability of clothing textiles. 16CFR Part 1610. United States of America: CFR; 2022.
- [8] Tcharkhtchi A, Abbasnezhad N, Zarbini Seydani M, Zirak N, Farzaneh S, Shirinbayan M. An overview of filtration efficiency through the masks: mechanisms of the aerosols penetration. *Bioact Mater*. 2021;6(1):106-122. doi: 10.1016/j.bioactmat.2020.08.002.
- [9] Xiao Y, Sakib N, Yue Z, Wang Y, Cheng S, You J, et al. Study on the relationship between structure parameters and filtration performance of polypropylene meltblown nonwovens. *Autex Res J*. 2020;20(4):366-71. doi: 10.2478/aut-2019-0029.
- [10] Midha VK, Dakuri A. Spun bonding technology and fabric properties: a review. *J Text Eng Fash Technol* 2017;1(4): 126-133. doi: 10.15406/jteft.2017.01.00023.
- [11] Essa W, Yasin S, Saeed I, Ali G. Nanofiber-based face masks and respirators as COVID-19 protection: a review. *Membranes (Basel)*. 2021;11(4):250. doi: 10.3390/membranes11040250.

ผลของการเตรียมวัตถุดิบ ปริมาณวัตถุดิบ ความเข้มข้นของเอนไซม์ และระยะเวลาการสกัดต่อผลผลิตเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำได้จาก เศษเหลือทิ้งหน่อไม้ฝรั่ง

5

The effect of material pretreatment, substrate content, enzyme concentration and extraction time on yield of soluble dietary fiber from asparagus by-product

เรวดี มีสัตย์¹, ยุทธศักดิ์ สุปการ¹

Rewadee Meesat¹, Yuttasak Subkaree¹

รับบทความ 22 ธันวาคม 2566 แก้ไขบทความ 27 กุมภาพันธ์ 2567 ยอมรับตีพิมพ์ 4 มีนาคม 2567

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการเตรียมวัตถุดิบ (อุณหภูมิและการบดเปียก) ปริมาณวัตถุดิบ ความเข้มข้นเอนไซม์ (เซลลูเลสและเฮมิเซลลูเลส) และ ระยะเวลาการสกัดต่อผลผลิตเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำได้จากเศษเหลือทิ้งหน่อไม้ฝรั่ง จากการศึกษพบว่า การเตรียมวัตถุดิบ (อุณหภูมิและการบดเปียก) ปริมาณวัตถุดิบ ปริมาณเอนไซม์ (เซลลูเลสและเฮมิเซลลูเลส) และระยะเวลาการสกัดมีผลต่อผลผลิตเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำได้จากเศษเหลือทิ้งหน่อไม้ฝรั่งอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ผลจากการศึกษาในครั้งนี้คือ การเตรียมวัตถุดิบปริมาณ 1:20 (เศษเหลือทิ้งหน่อไม้ฝรั่งต่อน้ำ) ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นเวลา 15 นาที แล้วบดเปียกให้เป็นเนื้อเดียวกัน นำไปย่อยด้วยเอนไซม์เซลลูเลสปริมาณร้อยละ 2.5 โดยปริมาตรต่อน้ำหนัก และเฮมิเซลลูเลสร้อยละ 2.5 โดยปริมาตรต่อน้ำหนัก ที่พีเอช 4.6 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ผลผลิตเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำได้ร้อยละ 11.26 ± 0.63 โดยน้ำหนัก โดยเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้มีปริมาณเส้นใยอาหารทั้งหมดร้อยละ 69.06 ± 0.40 โดยน้ำหนัก แบ่งเป็นเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำได้ร้อยละ 67.97 ± 0.92 โดยน้ำหนัก และเส้นใยอาหารไม่ละลายน้ำร้อยละ 1.09 ± 0.53 โดยน้ำหนัก เส้นใยอาหารที่ละลายน้ำที่ได้มีความสามารถในการอุ้มน้ำ 1.40 ± 0.07 กรัม/น้ำต่อกรัม ความสามารถในการอุ้มน้ำมัน 1.64 ± 0.42 กรัม/น้ำมันต่อกรัม และความสามารถในการละลายน้ำร้อยละ 75.45 ± 0.25 โดยน้ำหนัก นอกจากนั้น เส้นใยอาหารที่ละลายน้ำได้มีความสามารถในการกำจัดอนุมูลอิสระ (IC_{50} เท่ากับ 2.31 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร) ผลนี้แสดงให้เห็นว่าปัจจัยเหล่านี้มีผลต่อศักยภาพในการสกัดเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำได้จากเศษเหลือทิ้งหน่อไม้ฝรั่ง

คำสำคัญ: เส้นใยอาหารที่ละลายน้ำได้ เศษเหลือทิ้งหน่อไม้ฝรั่ง การสกัดเส้นใยอาหารด้วยเอนไซม์

¹ศูนย์เชี่ยวชาญนวัตกรรมอาหารสุขภาพ (ศนอ.) สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.)

Abstract

This research aims to study the effect of material pretreatment (temperature and wet blending), substrate content, enzyme concentration (cellulase and hemicellulase) and extraction time on yield of soluble dietary fibers (SDF) from asparagus by-products. This study found that material pretreatment (temperature and wet blending), substrate content, enzyme concentration (cellulase and hemicellulase) and extraction time effected on SDF yield from asparagus by-products significantly ($p < 0.05$). The extraction condition from this study were material pretreatment of 1:20 (asparagus : water) at 121 °C, 15 lb./sq. inch for 15 min, wet blending to slurry, hydrolysis by using 2.5%(v/w) of cellulase and 2.5%(v/w) of hemecellulase at pH 4.6, 50 °C for 4 h. These condition gave $11.26 \pm 0.63\%$ (w/w) of SDF yield. The obtained SDF consisted of $69.06 \pm 0.40\%$ (w/w) of total dietary fiber (TDF) which classified to $67.97 \pm 0.92\%$ (w/w) of SDF and $1.09 \pm 0.53\%$ (w/w) of insoluble dietary fiber (IDF). The obtained SDF had 1.40 ± 0.07 g/g of water holding capacity, 1.64 ± 0.42 g/g of oil holding capacity and $75.45 \pm 0.25\%$ (w/w) of water solubility index. Moreover, the obtained SDF had antioxidant activity (IC_{50} 2.31 mg/mL). These results indicated that these conditions had effect on the potential of SDF extraction from asparagus by-products.

Keywords: Soluble dietary fibers, Asparagus by-products, Enzymatic dietary fiber extraction

¹Expert Centre of Innovative Health Food (InnoFood), Thailand Institute of Scientific and Technological Research (TISTR)

*Corresponding author e-mail address: Rewadee@tistr.or.th

1. บทนำ (Introduction)

หน่อไม้ฝรั่ง (Asparagus) สายพันธุ์ *Asparagus officinalis* L. เป็นพืชที่นิยมนำมาบริโภคเป็นอาหาร เป็นพืชที่มีคุณค่าทางโภชนาการ และมีความสำคัญทางเศรษฐกิจ โดยในปี ค.ศ. 2017 หน่อไม้ฝรั่งทั่วโลกมีมูลค่า 20 พันล้านเหรียญสหรัฐ จะเพิ่มขึ้นเป็น 30 พันล้านเหรียญสหรัฐ ในปี ค.ศ. 2027 ประเทศที่มีการผลิตมากที่สุดคือ จีน ตามด้วย เปรู เม็กซิโก และเยอรมนี สำหรับประเทศไทยมีการผลิตหน่อไม้ฝรั่งติด 1 ใน 10 ของผู้ผลิตลำดับต้นๆ โกล์เดียวกับประเทศญี่ปุ่น และเนเธอร์แลนด์ [1] หน่อไม้ฝรั่งเป็นอีกวัตถุดิบหนึ่งที่ได้รับการพิจารณาว่ามีศักยภาพในการผลิตเส้นใยอาหาร เนื่องจากมีปริมาณเส้นใยอาหารค่อนข้างสูง (Fiber-rich food) โดยมีประมาณร้อยละ 60.7 - 79.0 โดยน้ำหนักแห้ง [1-3] นอกจากนั้นยังถูกจัดเป็นเส้นใยอาหารที่มีฤทธิ์ทางชีวภาพ (Bioactive dietary fiber) มีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระเนื่องจากมีซาโปนิน (Saponin) เมลานอยด์ (Melanoidins) และไซโลโอลิโกแซคคาไรด์ (Xylooligosaccharides) สูง ส่งผลให้มีกลิ่นคล้ายกาแฟและโกโก้ ในกระบวนการผลิตหน่อไม้ฝรั่งไม่จำเป็นที่จะเป็นการผลิตหน่อไม้ฝรั่งสด หน่อไม้ฝรั่งกระป๋อง หน่อไม้ฝรั่งแช่แข็ง และหน่อไม้ฝรั่งแห้ง จะมีวัสดุเศษเหลือทิ้ง (By-products) จำนวนมากประมาณร้อยละ 30 - 50 โดยน้ำหนัก วัสดุเศษเหลือทิ้งเหล่านี้ถูกนำไปใช้เป็นอาหารสัตว์และปุ๋ยที่มีมูลค่าต่ำ บางส่วนจะถูกทิ้งเกิดเป็นมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม [1] วัสดุเศษเหลือทิ้งจากหน่อไม้ฝรั่งจึงมีความน่าสนใจในการนำมาผลิตเป็นเส้นใยอาหารที่มีมูลค่าสูง โดยเฉพาะเส้นใยอาหารที่มีฤทธิ์ทางชีวภาพ (Bioactive dietary fiber) [1,3]

เส้นใยอาหาร (Dietary fibers) เป็นส่วนประกอบของผนังเซลล์พืชที่สามารถกินได้และต้านทานต่อการย่อยในระบบทางเดินอาหารของมนุษย์ เส้นใยอาหารสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ เส้นใยอาหารที่ละลายน้ำได้ (Soluble dietary fiber; SDF) ได้แก่ เพกติน (Pectin) กัม (Gums) และ มิวซิเลจ (Mucilage) และเส้นใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำ (Insoluble dietary fiber; IDF) ได้แก่ เซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และ ลิกนิน (Lignin) [4-5] เส้นใยอาหารมีคุณสมบัติในการอุ้มน้ำช่วยให้อิ่มท้องได้นานกว่าปกติทำให้สามารถลดได้ทั้งปริมาณอาหารและพลังงานช่วยลดคอเลสเตอรอล ลดน้ำตาลในเลือด และลดโรคอ้วนได้ คุณสมบัติในการอุ้มน้ำนั้นช่วยให้สามารถดื่มน้ำจากอาหารที่รับประทานด้วยการขับถ่าย ซึ่งจะช่วยป้องกันโรคหลอดเลือดและหัวใจ เส้นใยอาหารที่ละลายน้ำได้จะมีคุณสมบัติและประโยชน์ที่ดีกว่าเส้นใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำ เส้นใยอาหารที่ละลายน้ำได้มีคุณสมบัติในการละลายน้ำได้ดีช่วยให้สามารถการจับหรือดูดซับสารต่าง ๆ ที่ละลายน้ำได้ไม่จำเป็นที่จะเป็นโลหะหนัก แบคทีเรีย น้ำตาล และไขมัน จึงมีผลช่วยป้องกันการเกิดโรคเบาหวาน ไขมันในเลือดสูง และโรคหลอดเลือด เป็นต้น [6-7] อีกทั้งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการผลิตได้หลากหลายรูปแบบทั้งผลิตภัณฑ์อาหารและเครื่องดื่ม และมีราคาที่สูงกว่าเส้นใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำ อย่างไรก็ตามในธรรมชาติจะมีเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำได้ค่อนข้างน้อยประมาณร้อยละ 3 - 5 โดยน้ำหนัก [8] การพัฒนาระบบการเปลี่ยนเส้นใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำให้เป็นเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำได้หรือกระบวนการสกัดเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำได้กำลังได้รับความสนใจเพิ่มขึ้น

ในการเปลี่ยนเส้นใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำให้เป็นเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำได้จำเป็นต้องสลายพอลิเมอร์ขนาดใหญ่ของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ให้มีขนาดเล็กจนสามารถละลายน้ำได้ กระบวนการสลายพอลิเมอร์ให้มีความเล็กลงมีหลายวิธีไม่ว่าจะเป็น วิธีทางกายภาพ (Physical method) เช่น การลดขนาด การใช้ความร้อนและความดัน วิธีทางเคมี (Chemical method) เช่น การใช้กรดและด่าง วิธีทางชีวภาพ (Biological method) เช่น การใช้เอนไซม์และเชื้อจุลินทรีย์ และวิธีแบบผสม (Combine method) ซึ่งเป็นการใช้หลายวิธีรวมกัน จากที่กล่าวมาวิธีทางกายภาพเป็นกระบวนการที่ง่าย ใช้ระยะเวลาสั้น ต้นทุนต่ำ และมีปริมาณสารเคมีตกค้างน้อย วิธีทางเคมีจะใช้ระยะเวลาสั้นและสามารถดำเนินการที่อุณหภูมิห้องได้แต่จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความบริสุทธิ์ต่ำและมีปริมาณสารเคมีตกค้างสูง ส่วนวิธีทางชีวภาพโดยเฉพาะการใช้เอนไซม์มีการใช้อย่างกว้างขวาง เป็นวิธีที่มีความจำเพาะสูง ใช้สภาวะปานกลาง ไม่รุนแรง (พีเอช 4 - 5 อุณหภูมิ 40 - 50 องศาเซลเซียส) และมีความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม แต่ข้อเสียคือเอนไซม์มีราคาค่อนข้างสูง สำหรับวิธีแบบผสมด้วยวิธีการทางกายภาพ (การลดขนาดและการให้ความร้อน) กับวิธีการทางชีวภาพ (การใช้เอนไซม์) เป็นวิธีการหนึ่งที่มีศักยภาพและให้ผลผลิตสูง การลดขนาดและการให้ความร้อนจะทำให้วัตถุดิบมีความอ่อนนุ่มและช่วยทำลายโครงสร้างพอลิเมอร์ที่มีความแข็งแรงส่งผลต่อเนื่องให้เอนไซม์สามารถแทรกซึมเข้าถึงและย่อยพอลิเมอร์ขนาดใหญ่ให้มีขนาดเล็กที่สามารถละลายน้ำได้ [8]

งานวิจัยนี้จะสกัดเส้นใยอาหารจากเศษเหลือทิ้งหน่อไม้ฝรั่งด้วยวิธีการแบบผสมผสานระหว่างวิธีทางกายภาพ (การบดเปียก และการให้ความร้อน) กับวิธีทางชีวภาพ (การใช้เอนไซม์) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสภาวะในการเตรียมวัตถุดิบ ปริมาณ วัตถุดิบ ความเข้มข้นของเอนไซม์ (เซลลูเลสและเฮมิเซลลูเลส) และระยะเวลาในการสกัดต่อผลผลิตเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำ ได้จากเศษเหลือทิ้งหน่อไม้ฝรั่ง

2. วิธีการวิจัย (Experimental methods)

2.1 วัตถุดิบเศษเหลือทิ้งหน่อไม้ฝรั่ง

วัตถุดิบเศษเหลือทิ้งหน่อไม้ฝรั่ง (*Asparagus by-products*) สายพันธุ์ *Asparagus officinalis* L. ได้รับจากกลุ่ม เกษตรกรจังหวัดเพชรบูรณ์ มีขนาด 1 - 15 เซนติเมตร นำไปล้างทำความสะอาดและหั่นเป็นชิ้นขนาด 1 - 5 เซนติเมตร จากนั้นนำไปอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อน (Memmert, เยอรมัน) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง แล้วบดให้ละเอียดด้วยเครื่องบดสมุนไพร (Spring Green Evolution PG2500, จีน) และร่อนผ่านตะแกรงขนาด 30 เมช (0.60 มิลลิเมตร) ใส่ถุงซิปล็อคและเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิห้อง วัตถุดิบเศษเหลือทิ้งหน่อไม้ฝรั่งมีปริมาณเส้นใยอาหารทั้งหมด ร้อยละ 63.83 ± 0.37 โดยน้ำหนัก โดยมีเส้นใยอาหารไม่ละลายน้ำร้อยละ 58.30 ± 0.15 โดยน้ำหนักและ เส้นใยอาหารที่ละลายน้ำได้ร้อยละ 5.54 ± 0.32 โดยน้ำหนัก วิเคราะห์ด้วยวิธี Enzymatic and gravimetric method [9]

2.2 การศึกษาวิธีการสกัดเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำได้จากเศษเหลือทิ้งหน่อไม้ฝรั่งด้วยเอนไซม์

2.2.1 การศึกษาผลของอุณหภูมิการเตรียมวัตถุดิบ

นำวัตถุดิบเศษเหลือทิ้งหน่อไม้ฝรั่งที่ผ่านการบดและร่อนแยกขนาดมาเติมน้ำให้ได้อัตราส่วน 1:10 (เศษเหลือทิ้งหน่อไม้ฝรั่งต่อน้ำ) จากนั้นนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 25, 50 และ 90 องศาเซลเซียส ด้วยอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Memmert, เยอรมัน) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และ 121 องศาเซลเซียส ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ด้วยเครื่องนึ่งฆ่าเชื้อ (ALP, ญี่ปุ่น) เป็นเวลา 15 นาที นำเศษเหลือทิ้งหน่อไม้ฝรั่งที่ได้ไปปรับพีเอชเป็น 4.6 ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 1.0 โมลาร์ เติมเอนไซม์เซลลูเลสปริมาณร้อยละ 5.00 โดยปริมาตรต่อน้ำหนัก จากนั้นนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง กรองแยกกากแล้วนำสารละลายที่ได้ไปตกตะกอนแยกเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำได้ด้วยเอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 95 ปริมาณ 4 เท่าของสารละลาย วางให้ตกตะกอนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง กรองแยกตะกอนที่ได้แล้วนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส คำนวณปริมาณผลผลิตเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำจากสมการที่ 1

$$\text{ผลผลิตเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำได้ (ร้อยละ)} = \frac{\text{ตะกอนเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำได้ (กรัมแห้ง)} \times 100}{\text{ปริมาณวัตถุดิบ (กรัมแห้ง)}} \quad (1)$$

2.2.2 การศึกษาผลของปริมาณวัตถุดิบและการบดเปียก

นำวัตถุดิบเศษเหลือทิ้งหน่อไม้ฝรั่งที่ผ่านการบดและร่อนแยกขนาดมาเติมน้ำให้ได้อัตราส่วน 1:10 และ 1:20 (เศษเหลือทิ้งหน่อไม้ฝรั่งต่อน้ำ) จากนั้นนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่องนึ่งฆ่าเชื้อ (ALP, ญี่ปุ่น) เป็นเวลา 15 นาที นำเศษเหลือทิ้งหน่อไม้ฝรั่งที่ได้ไปบดเปียกให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยเครื่องปั่นผลไม้ (Philips, เนเธอร์แลนด์) แล้วปรับพีเอชเป็น 4.6 ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1.0 โมลาร์ เติมเอนไซม์เซลลูเลส ปริมาณร้อยละ 5.00 โดยปริมาตรต่อน้ำหนัก จากนั้นนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง กรองแยก กากแล้วนำสารละลายที่ได้ไปตกตะกอนแยกเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำได้ด้วยเอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 95 ปริมาณ 4 เท่าของสารละลาย วางให้ตกตะกอนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง กรองแยกตะกอนที่ได้แล้วนำไป อบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส คำนวณปริมาณผลผลิตเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำจากสมการที่ 1

2.2.3 การศึกษาผลของปริมาณเอนไซม์เซลลูเลส

นำวัตถุดิบเศษเหลือทิ้งหน่อไม้ฝรั่งที่ผ่านการบดและร่อนแยกขนาดมาเติมน้ำให้ได้อัตราส่วน 1:20

(เศษเหลือทิ้งหน่อไม้ฝรั่งต่อน้ำ) จากนั้นนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่องนึ่งฆ่าเชื้อ (ALP, ญี่ปุ่น) เป็นเวลา 15 นาที นำเศษเหลือทิ้งหน่อไม้ฝรั่งที่ได้ไปบดเปียกให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยเครื่องปั่นผลไม้ (Philips, เนเธอร์แลนด์) แล้วปรับพีเอชเป็น 4.6 ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1.0 โมลาร์ เติมน้ำโซเดียมคลอไรด์ ปริมาณร้อยละ 0.00, 0.50, 1.00, 2.50 และ 5.00 โดยปริมาตรต่อน้ำหนัก จากนั้นนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง กรองแยกกากแล้วนำสารละลายที่ได้ไปตกตะกอนแยกเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำได้ด้วยเอทานอล ความเข้มข้นร้อยละ 95 ปริมาณ 4 เท่าของสารละลาย วางให้ตกตะกอนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง กรองแยกตะกอนที่ได้แล้วนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส คำนวณปริมาณผลผลิตเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำจากสมการที่ 1

2.2.4 การศึกษาผลของปริมาณเอนไซม์เซลลูเลส

นำวัตถุดิบเศษเหลือทิ้งหน่อไม้ฝรั่งที่ผ่านการบดและร่อนแยกขนาดมาเติมน้ำให้ได้อัตราส่วน 1:20 (เศษเหลือทิ้งหน่อไม้ฝรั่งต่อน้ำ) จากนั้นนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่องนึ่งฆ่าเชื้อ (ALP, ญี่ปุ่น) เป็นเวลา 15 นาที นำเศษเหลือทิ้งหน่อไม้ฝรั่งที่ได้ไปบดเปียกให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยเครื่องปั่นผลไม้ (Philips, เนเธอร์แลนด์) แล้วปรับพีเอชเป็น 4.6 ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1.0 โมลาร์ เติมน้ำโซเดียมคลอไรด์ ปริมาณร้อยละ 2.50 โดยปริมาตรต่อน้ำหนัก และเอนไซม์เซลลูเลสปริมาณร้อยละ 0.00, 1.25, 2.50 และ 5.00 โดยปริมาตรต่อน้ำหนัก จากนั้นนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง กรองแยกกากแล้วนำสารละลายที่ได้ไปตกตะกอนแยกเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำได้ด้วยเอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 95 ปริมาณ 4 เท่าของสารละลาย วางให้ตกตะกอนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง กรองแยกตะกอนที่ได้แล้วนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส คำนวณปริมาณผลผลิตเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำจากสมการที่ 1

2.2.5 การศึกษาผลของระยะเวลาการสกัดด้วยเอนไซม์

นำวัตถุดิบเศษเหลือทิ้งหน่อไม้ฝรั่งที่ผ่านการบดและร่อนแยกขนาดมาเติมน้ำให้ได้อัตราส่วน 1:20 (เศษเหลือทิ้งหน่อไม้ฝรั่งต่อน้ำ) จากนั้นนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่องนึ่งฆ่าเชื้อ (ALP, ญี่ปุ่น) เป็นเวลา 15 นาที นำเศษเหลือทิ้งหน่อไม้ฝรั่งที่ได้ไปบดเปียกให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยเครื่องปั่นผลไม้ (Philips, เนเธอร์แลนด์) แล้วปรับพีเอชเป็น 4.6 ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1.0 โมลาร์ เติมน้ำโซเดียมคลอไรด์ ปริมาณร้อยละ 2.50 โดยปริมาตรต่อน้ำหนัก และเอนไซม์เซลลูเลสปริมาณร้อยละ 2.50 โดยปริมาตรต่อน้ำหนัก จากนั้นนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2, 4, 6 และ 8 ชั่วโมง กรองแยกกากแล้วนำสารละลายที่ได้ไปตกตะกอนแยกเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำได้ด้วยเอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 95 ปริมาณ 4 เท่าของสารละลาย วางให้ตกตะกอนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง กรองแยกตะกอนที่ได้แล้วนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส คำนวณปริมาณผลผลิตเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำจากสมการที่ 1

2.3 การวิเคราะห์ปริมาณและคุณภาพของเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำได้

2.3.1 การวิเคราะห์ปริมาณเส้นใยอาหาร (Dietary fiber; DF)

วิเคราะห์ปริมาณเส้นใยอาหารทั้งหมด (Total dietary fiber; TDF) เส้นใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำ (Insoluble dietary fiber; IDF) และเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำได้ (Soluble dietary fiber; SDF) ด้วยวิธี Enzymatic and gravimetric method ตามวิธีการของ Prosky และคณะ [9] โดยใช้ Total Dietary Fiber Assay Kit (TDF-100A) (Megazyme, Ireland)

2.3.2 การวิเคราะห์ความสามารถในการอุ้มน้ำ (Water holding capacity; WHC)

วิเคราะห์ความสามารถในการอุ้มน้ำด้วยวิธีการดัดแปลงจาก Fuentes-alventosa และคณะ [3] ทำโดยการชั่งตัวอย่าง 0.25 กรัม (ตัวอย่างแห้ง) ใส่ในหลอดสำหรับปั่นเหวี่ยงขนาด 15 มิลลิลิตร แล้วเติมน้ำกลั่นปริมาณ 5 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันแล้วบ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยง (HERMLE, เยอรมัน) ที่ความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 นาที เทส่วนใสแล้วชั่งน้ำหนักส่วนที่ตกตะกอน คำนวณความสามารถในการอุ้มน้ำในรูป กรัม น้ำต่อกรัม ตัวอย่าง ตามสมการที่ 2

$$\text{ความสามารถในการอุ้มน้ำ (กรัมต่อกรัม)} = \frac{\text{น้ำหนักตัวอย่างที่เพิ่มขึ้นหลังปั่นเหวี่ยง (กรัมน้ำ)}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างแห้ง (กรัมตัวอย่าง)}} \quad (2)$$

2.3.3 การวิเคราะห์ความสามารถในการอุ้มน้ำมัน (Oil holding capacity; OHC)

วิเคราะห์ความสามารถในการอุ้มน้ำมันจะใช้วิธีประยุกต์จากวิธีของ Fuentes-alventosa และคณะ [3] ทำโดยการชั่งตัวอย่าง 0.25 กรัม (ตัวอย่างแห้ง) ใส่ในหลอดสำหรับปั่นเหวี่ยงขนาด 15 มิลลิลิตร แล้วเติมน้ำมันถั่วเหลือง ปริมาณ 5 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันแล้วบ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยง (HERMLE, เยอรมัน) ที่ความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 นาที เทส่วนใสแล้วชั่งน้ำหนักส่วนที่ตกตะกอน คำนวณความสามารถในการอุ้มน้ำมันในรูป กรัมไขมันต่อกรัมตัวอย่าง ตามสมการที่ 3

$$\text{ความสามารถในการอุ้มน้ำมัน (กรัมต่อกรัม)} = \frac{\text{น้ำหนักตัวอย่างที่เพิ่มขึ้นหลังปั่นเหวี่ยง (กรัมไขมัน)}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างแห้ง (กรัมตัวอย่าง)}} \quad (3)$$

2.3.4 การวิเคราะห์ความสามารถในการละลายน้ำ (Water Solubility Index; WSI)

วิเคราะห์ความสามารถในการละลายน้ำจะใช้วิธีประยุกต์จากวิธีของ Cadavid และคณะ [10] โดยใช้กระบวนการเดียวกับการวิเคราะห์ความสามารถในการอุ้มน้ำ ทำโดยการชั่งตัวอย่าง 0.25 กรัม (ตัวอย่างแห้ง) ใส่ในหลอดสำหรับปั่นเหวี่ยงขนาด 15 มิลลิลิตร แล้วเติมน้ำกลั่นปริมาณ 5 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันแล้วบ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยง (HERMLE, เยอรมัน) ที่ความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 นาที เทส่วนใสในครุชเบิ้ลอะลูมิเนียมแล้วนำไปอบด้วยตู้อบลมร้อน (Memmert, เยอรมัน) ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักตะกอนที่ได้ และคำนวณความสามารถในการละลายน้ำในรูป ร้อยละโดยน้ำหนัก ตามสมการที่ 4

$$\text{ความสามารถในการละลายน้ำ (ร้อยละ)} = \frac{\text{น้ำหนักตะกอนที่ได้หลังอบ (กรัม)} \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่างแห้ง (กรัมตัวอย่าง)}} \quad (4)$$

2.3.5 การวิเคราะห์ความสามารถในการกำจัดอนุมูลอิสระ (Antioxidant activity)

วิเคราะห์ความสามารถในการกำจัดอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH radical scavenging assay โดยประยุกต์จากงานวิจัยของ Chen และคณะ [11] ทำการเตรียมสารละลายเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำได้ความเข้มข้น 0.02 - 2.00 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตรแล้ว นำไปศึกษาความสามารถในการกำจัดอนุมูลอิสระโดยการดูดสารละลายฟอสเฟตบัพเฟอร์ (0.02 M, pH 6.0) ปริมาณ 1.0 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดลอง จากนั้นเติมสารละลาย 2,2- Diphenyl-1-picryl-hydrazyl radical (DPPH) ความเข้มข้น 0.2 มิลลิโมลาร์ ในเอทานอลร้อยละ 95 โดยปริมาตร ปริมาณ 1.0 มิลลิลิตร และเติมสารละลายตัวอย่างปริมาณ 1.0 มิลลิลิตร บ่มที่อุณหภูมิห้องในที่มืดเป็นเวลา 30 นาที นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 517 นาโนเมตร คำนวณความสามารถในการกำจัดอนุมูลอิสระ (ร้อยละ) ในแต่ละความเข้มข้นของสารละลายตัวอย่าง ตามสมการที่ 5 จากนั้นหาปริมาณความเข้มข้นของสารละลายตัวอย่าง (ในหน่วยมิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร) ที่สามารถกำจัดอนุมูลอิสระได้ร้อยละ 50 (IC_{50})

$$\text{ความสามารถในการละลายน้ำ (ร้อยละ)} = \frac{(\text{Abs (DPPH)} - \text{Abs (sample)}) \times 100}{\text{Abs (DPPH)}} \quad (5)$$

โดยที่ : Abs (DPPH) เป็นค่าการดูดกลืนแสงของ DPPH และ Abs (sample) เป็นค่าการดูดกลืนแสงของ DPPH ผสมกับตัวอย่าง

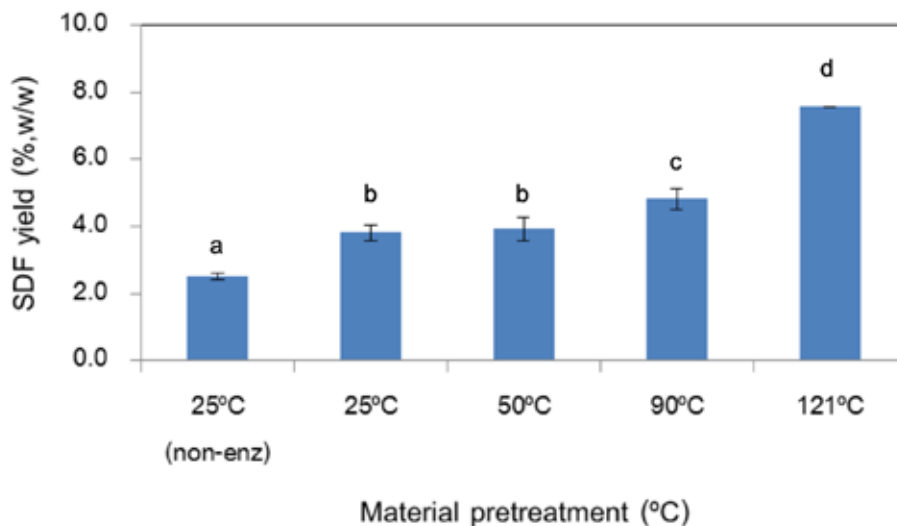
2.4 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ทำการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ (Replication) วิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance; ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของแต่ละชุดการทดลองโดยวิธี Duncan's new multiple range test (DRMT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS Statistic (Version 19.0) แสดงผลในรูป ค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

3. ผลและวิจารณ์ (Results and discussion)

3.1 ผลการศึกษาอุณหภูมิการเตรียมวัตถุดิบต่อผลผลิตเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำได้

จากการศึกษาการเตรียมวัตถุดิบเศษเหลือทิ้งหน่อไม้ฝรั่งในอัตราส่วน 1:10 (เศษเหลือทิ้งหน่อไม้ฝรั่งต่อน้ำ) ที่อุณหภูมิ 25 - 121 องศาเซลเซียส แล้วนำไปย่อยด้วยเอนไซม์เซลลูเลสปริมาณร้อยละ 5.0 โดยปริมาตรต่อน้ำหนัก ที่พีเอช 4.6 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จะให้ผลผลิตเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำตามรูปที่ 1 จากการศึกษาพบว่า เมื่ออุณหภูมิการเตรียมวัตถุดิบสูงขึ้นจะสามารถสกัดเส้นใยอาหารละลายน้ำได้มากขึ้น และการเตรียมวัตถุดิบที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว จะให้ปริมาณเส้นใยอาหารละลายน้ำสูงที่สุด เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้สารต่าง ๆ เช่น แป้ง โปรตีน และไขมัน รวมถึงเส้นใยอาหารละลายน้ำ สามารถละลายได้มากขึ้นและถูกสกัดออกจากวัตถุดิบเศษเหลือทิ้งหน่อไม้ฝรั่ง นอกจากนั้น เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้โครงสร้างของเส้นใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำ (เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน) บางส่วนถูกทำลาย สิ่งเหล่านี้จะทำให้วัตถุดิบเศษเหลือทิ้งหน่อไม้ฝรั่งมีความอ่อนนุ่ม และมีความเป็นรูพรุนมากขึ้น [8] เมื่อวัตถุดิบมีความเป็นรูพรุนและอ่อนนุ่มจะทำให้เอนไซม์เซลลูเลสสามารถแทรกซึมเข้าถึงโครงสร้างพอลิเมอร์ขนาดใหญ่ของเซลลูโลสและย่อยให้เป็นพอลิเมอร์ขนาดเล็กที่สามารถละลายน้ำได้ ดังนั้นจากการศึกษาจึงคัดเลือกให้การเตรียมวัตถุดิบที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเตรียมวัตถุดิบเศษเหลือทิ้งหน่อไม้ฝรั่งสำหรับการสกัดเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำได้

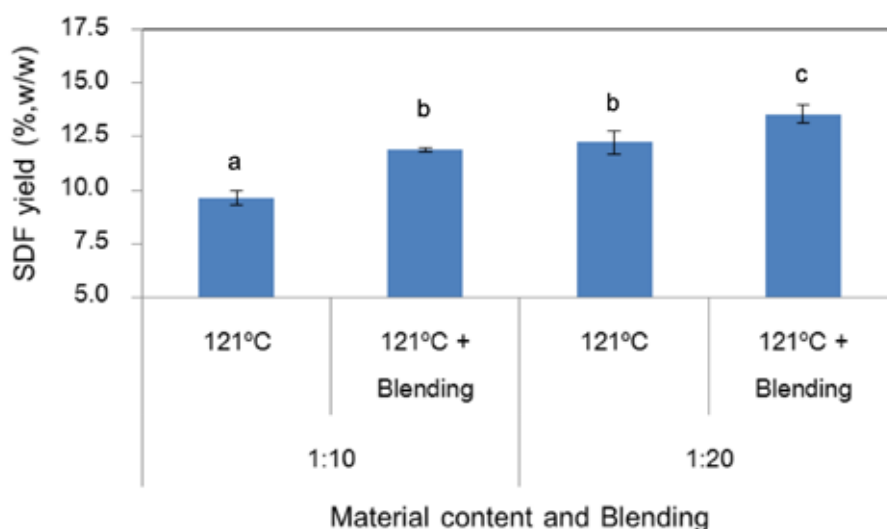


รูปที่ 1 ผลของอุณหภูมิการเตรียมวัตถุดิบต่อผลผลิตเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำได้จากเศษเหลือทิ้งหน่อไม้ฝรั่ง

3.2 ผลการศึกษาปริมาณวัตถุดิบและการบดเปียกต่อผลผลิตเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำได้

จากการศึกษาการเตรียมวัตถุดิบเศษเหลือทิ้งหน่อไม้ฝรั่งที่อัตราส่วน 1:10 และ 1:20 (เศษเหลือทิ้งหน่อไม้ฝรั่งต่อน้ำ) ด้วยอุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นเวลา 15 นาที และการบดเปียกให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยเครื่องปั่นผลไม้ แล้วนำไปย่อยด้วยเอนไซม์เซลลูเลสปริมาณร้อยละ 5.0 โดยปริมาตรต่อน้ำหนัก ที่พีเอช 4.6 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จะให้ผลผลิตเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำตามรูปที่ 2 จากการศึกษาพบว่า การเตรียมวัตถุดิบ 1:20 (เศษเหลือทิ้งหน่อไม้ฝรั่งต่อน้ำ) จะให้ปริมาณผลผลิตเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำได้สูงกว่าการเตรียมวัตถุดิบ 1:10 (เศษเหลือทิ้งหน่อไม้ฝรั่งต่อน้ำ) และการบดเปียกให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยเครื่องปั่นผลไม้จะให้ปริมาณผลผลิตเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำได้สูงกว่าการไม่บดเปียกอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้ เป็นเพราะเมื่อปริมาณวัตถุดิบน้อยลงหรือมีปริมาณน้ำมากขึ้นจะทำให้สารต่าง ๆ เช่น โปรตีน น้ำตาล แร่ธาตุ รวมถึงเส้นใยอาหารละลายน้ำ สามารถละลายได้มากขึ้น เมื่อสารต่าง ๆ ละลายหรือถูกสกัดออกมาได้มากขึ้นจะทำให้วัตถุดิบเศษเหลือทิ้งหน่อไม้ฝรั่งมีความเป็นรูพรุนมากขึ้น

จะทำให้เอนไซม์เซลลูเลสสามารถแทรกซึมเข้าถึงโครงสร้างของเซลลูโลสและย่อยให้สามารถละลายน้ำได้ นอกจากนั้น เมื่อปริมาณวัตถุดิบน้อยลงหรือมีปริมาณน้ำมากขึ้นจะทำให้ระบบมีความหนืดน้อยลงซึ่งจะส่งผลให้เกิดการไหลและการเคลื่อนที่ของเอนไซม์เข้าหาวัตถุดิบได้ดีขึ้นเกิดการย่อยได้ดีขึ้น ผลนี้สอดคล้องกับการศึกษาของ Hu and Zhao [6] ซึ่งพบว่าเมื่อปริมาณสัดส่วนน้ำมากขึ้นจะสามารถสกัดเส้นใยอาหารละลายน้ำได้มากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามเมื่อปริมาณสัดส่วนน้ำมากกว่า 1:45 จะไม่สามารถสกัดเส้นใยอาหารละลายน้ำได้เพิ่มขึ้น สำหรับการบดเปียกให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยเครื่องปั่นผลไม้หลังจากการเตรียมวัตถุดิบนอกจากจะช่วยทำให้สารต่าง ๆ สามารถละลายได้มากขึ้นแล้วยังสามารถทำให้ขนาดของเศษเหลือทิ้งหน่อไม้ฝรั่งเล็กลงด้วยซึ่งจะช่วยเพิ่มความเป็นรูปทูน พื้นที่ผิว และเกิดการถ่ายเทมวลได้ดีขึ้น สิ่งเหล่านี้จะช่วยส่งผลให้เอนไซม์เซลลูเลสสามารถแทรกซึมเข้าถึงเซลลูโลสและย่อยได้ง่ายขึ้น ผลนี้สอดคล้องกับการศึกษาของ Hu and Zhao [6] ซึ่งพบว่าการใช้ความเร็วรอบในการปั่นเพิ่มมากขึ้นจะทำให้กากสับปะรด (Pineapple pomace) มีขนาดเล็กลง มีพื้นที่ผิวมากขึ้น เกิดการถ่ายเทมวลได้ดีขึ้น และส่งผลให้สามารถสกัดเส้นใยอาหารละลายน้ำได้มากขึ้น อย่างไรก็ตาม การใช้ความเร็วที่มากเกินไปอาจจะทำให้เส้นใยอาหารที่ละลายน้ำเกิดการสลายตัวมากด้วยเช่นกัน และอาจจะทำให้เกิดการสูญเสียเส้นใยอาหารละลายน้ำได้ โดย Hu and Zhao [6] ระบุว่าความเร็วในการตัดจาก 5,000 เป็น 9,000 รอบต่อนาที จะทำให้ได้ผลผลิตเส้นใยอาหารละลายน้ำมากขึ้น แต่เมื่อเพิ่มมากกว่า 9,000 รอบต่อนาที จะทำให้ได้ปริมาณเส้นใยอาหารละลายน้ำลดลง นอกจากนั้น ระยะเวลาในการตัดหรือปั่นมีผลต่อปริมาณเส้นใยอาหารละลายน้ำด้วย การตัดหรือปั่นเป็นเวลา 10 ถึง 20 นาที จะให้ปริมาณเส้นใยอาหารละลายน้ำเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่เมื่อใช้ระยะเวลานานกว่า 20 นาที จะให้ปริมาณเส้นใยอาหารละลายน้ำลดลง ระยะเวลาที่นานเกินไปทำให้เกิดการทำลายเส้นใยอาหารละลายน้ำได้ ดังนั้น จากการศึกษาจึงคัดเลือกให้การใช้ปริมาณเศษเหลือทิ้งหน่อไม้ฝรั่ง 1:20 (เศษเหลือทิ้งหน่อไม้ฝรั่งต่อน้ำ) และการบดเปียกให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยเครื่องปั่นผลไม้ มีความเหมาะสมต่อการสกัดเส้นใยอาหารจากเศษเหลือทิ้งหน่อไม้ฝรั่ง ทั้งนี้ เพราะการใช้ปริมาณวัตถุดิบ 1:20 (วัตถุดิบต่อน้ำ) ให้ผลผลิตสูง ส่วนการใช้ปริมาณวัตถุดิบมากกว่า 1:20 (วัตถุดิบต่อน้ำ) จะต้องใช้เอทานอลปริมาณมากในการตกตะกอนเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำได้จากสารละลาย ทำให้มีต้นทุนค่อนข้างสูง

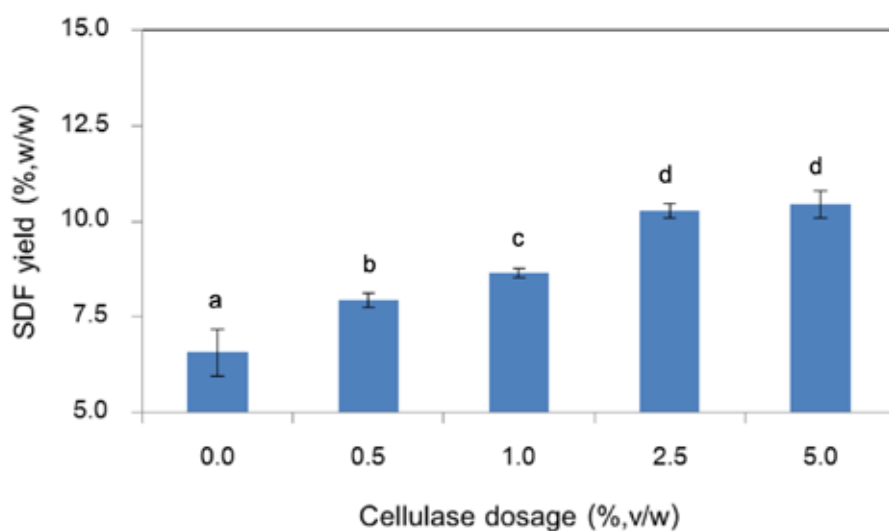


รูปที่ 2 ผลของปริมาณวัตถุดิบและการบดเปียกต่อผลผลิตเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำได้จากเศษเหลือทิ้งหน่อไม้ฝรั่ง

3.3 ผลการศึกษาปริมาณเอนไซม์เซลลูเลสต่อผลผลิตเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำได้

จากการศึกษาการสกัดเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำได้จากวัตถุดิบเศษเหลือทิ้งหน่อไม้ฝรั่งที่ผ่านการเตรียมในอัตราส่วน 1:20 (เศษเหลือทิ้งหน่อไม้ฝรั่งต่อน้ำ) ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นเวลา 15 นาที และการบดเปียกให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยเครื่องปั่นผลไม้ ด้วยเอนไซม์เซลลูเลสปริมาณร้อยละ 0.00, 0.50, 1.00,

2.50 และ 5.00 โดยปริมาตรต่อน้ำหนัก ที่พีเอช 4.6 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จะให้ผลผลิตเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำตามรูปที่ 3 จากการศึกษาพบว่าเมื่อปริมาณเอนไซม์เซลลูเลสเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 0.00 เป็น 2.50 โดยปริมาตรต่อน้ำหนัก จะสามารถสกัดเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำได้เพิ่มขึ้น ทั้งนี้ เพราะเมื่อปริมาณเอนไซม์เซลลูเลสเพิ่มขึ้น จะสามารถย่อยเซลลูโลสได้มากขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อปริมาณเอนไซม์เซลลูเลสสูงถึงร้อยละ 5.00 โดยปริมาตรต่อน้ำหนัก จะให้ปริมาณเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำได้ไม่แตกต่างจากปริมาณเอนไซม์เซลลูเลสร้อยละ 2.50 โดยปริมาตรต่อน้ำหนัก ทั้งนี้เพราะเมื่อมีเอนไซม์เซลลูเลสปริมาณมากจะทำให้เกิดการย่อยเซลลูโลสที่มากเกินไป เส้นใยอาหารที่ละลายน้ำได้ที่ได้จากการย่อยเซลลูโลสถูกย่อยต่อจนกลายเป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว ผลที่ได้สอดคล้องกับการศึกษาของ Hu and Zhao [6], Qi และคณะ [12] และ Chen และคณะ [7] ซึ่งพบว่าเมื่อปริมาณเอนไซม์เซลลูเลสเพิ่มขึ้นจะสกัดเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำได้มากขึ้นแต่เมื่อมีปริมาณเอนไซม์มากเกินไปจะให้เส้นใยอาหารที่ละลายน้ำได้ลดลง อย่างไรก็ตาม ปริมาณเอนไซม์ที่เหมาะสมจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ลักษณะวัตถุดิบ ปริมาณวัตถุดิบที่ใช้ การเตรียมวัตถุดิบ ปริมาณของเอนไซม์ และประสิทธิภาพของเอนไซม์ เป็นต้น ในการย่อยกากสับประรดปริมาณเอนไซม์เซลลูเลสที่เหมาะสมคือร้อยละ 5.00 โดยปริมาตรต่อน้ำหนัก [6] การย่อยผักกัวเหลือปริมาณเอนไซม์เซลลูเลสที่เหมาะสมคือร้อยละ 0.30 โดยปริมาตรต่อน้ำหนัก [12] การย่อยรำข้าวเหนียว (Glutinous rice bran) ปริมาณเอนไซม์ที่เหมาะสมคือ 9,000 ยูนิตต่อกรัม [7] สำหรับในการศึกษาค้นคว้าการใช้เอนไซม์เซลลูเลสปริมาณร้อยละ 2.50 โดยปริมาตรต่อน้ำหนัก ให้ผลผลิตแตกต่างจากการใช้เอนไซม์เซลลูเลสปริมาณร้อยละ 5.0 โดยปริมาตรต่อน้ำหนัก อย่างไม่มีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

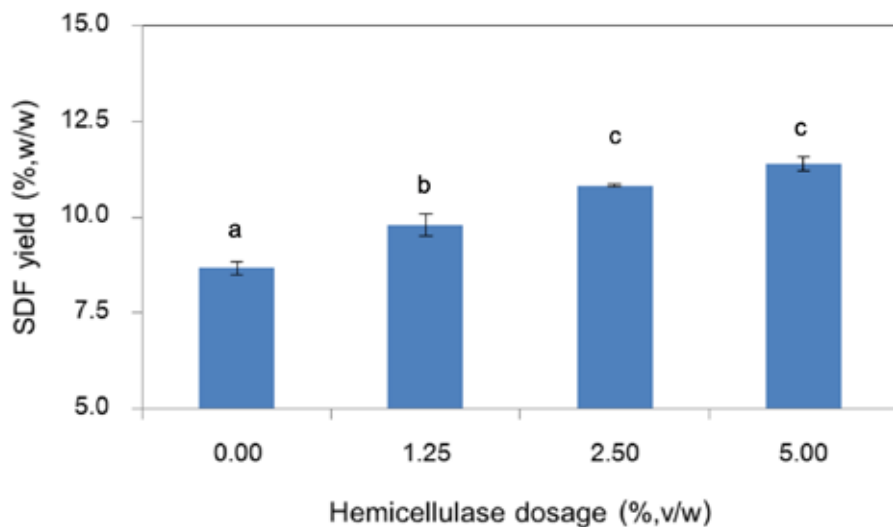


รูปที่ 3 ผลของปริมาณเอนไซม์เซลลูเลสต่อผลผลิตเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำได้จากเศษเหลือทั้งหมดไม่ฝรั่ง

3.4 ผลการศึกษาปริมาณเอนไซม์เฮมิเซลลูเลสต่อผลผลิตเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำได้

จากการศึกษาการสกัดเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำได้จากวัตถุดิบเศษเหลือทั้งหมดไม่ฝรั่งที่ผ่านการเตรียมในอัตราส่วน 1:20 (เศษเหลือทั้งหมดไม่ฝรั่งต่อน้ำ) ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นเวลา 15 นาที และการบดเปียกให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยเครื่องปั่นผลไม้ ด้วยเอนไซม์เฮมิเซลลูเลสปริมาณร้อยละ 2.50 โดยปริมาตรต่อน้ำหนัก และเอนไซม์เฮมิเซลลูเลสร้อยละ 0.00, 1.25, 2.50 และ 5.00 โดยปริมาตรต่อน้ำหนัก ที่พีเอช 4.6 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จะให้ผลผลิตเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำตามรูปที่ 4 จากการศึกษาพบว่า เมื่อปริมาณเอนไซม์เฮมิเซลลูเลสเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 0.00 เป็น 2.50 โดยปริมาตรต่อน้ำหนัก จะให้ผลผลิตเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำได้มากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) แต่เมื่อปริมาณเอนไซม์เฮมิเซลลูเลสสูงถึงร้อยละ 5.00 โดยปริมาตรต่อน้ำหนัก จะให้ผลผลิตเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำได้แตกต่างจากสกัดด้วยปริมาณเอนไซม์ร้อยละ 2.50 โดยปริมาตรต่อน้ำหนัก อย่างไม่มีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) เอนไซม์เฮมิเซลลูเลสสามารถเปลี่ยนเฮมิเซลลูโลสซึ่งเป็นเส้นใยอาหารไม่ละลายน้ำให้เป็นเส้นใยอาหารที่ละลาย

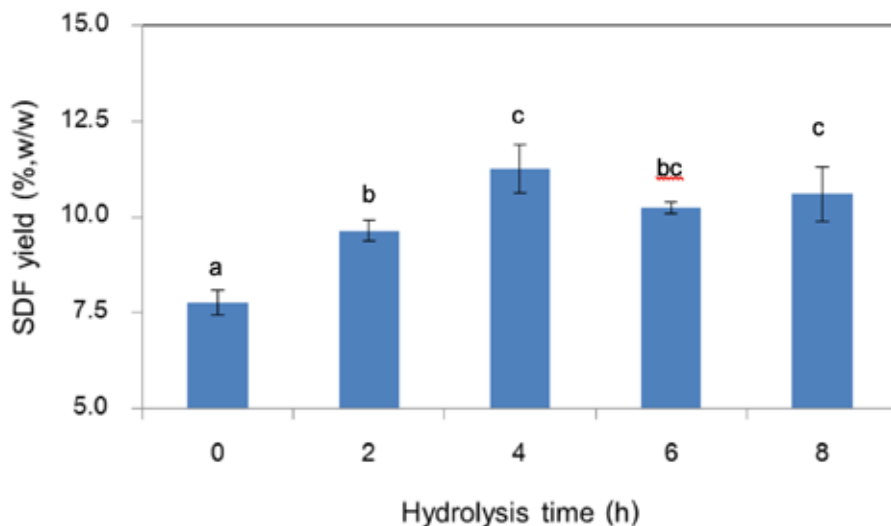
น้ำได้โดยการย่อยพอลิเมอร์สายยาวของเฮมิเซลลูโลสให้เป็นพอลิเมอร์สายสั้น ๆ ที่สามารถละลายน้ำได้ เมื่อเอนไซม์เฮมิเซลลูเลสมากขึ้นจะสามารถย่อยเฮมิเซลลูโลสให้เป็นเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำได้มากขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อมีปริมาณเอนไซม์เฮมิเซลลูเลสมากเกินไปจะทำให้พอลิเมอร์ของเฮมิเซลลูโลสถูกย่อยจนกลายเป็นน้ำตาลจนทำให้เกิดการสูญเสียเส้นใยอาหารละลายน้ำลักษณะเช่นเดียวกับการย่อยด้วยเอนไซม์เซลลูเลส



รูปที่ 4 ผลของปริมาณเอนไซม์เฮมิเซลลูเลสต่อผลผลิตเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำได้จากเศษเหลือทิ้งหน่อไม้ฝรั่ง

3.5 ผลการศึกษาระยะเวลาการย่อยด้วยเอนไซม์ต่อผลผลิตเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำได้

จากการศึกษาการสกัดเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำได้จากวัตถุดิบเศษเหลือทิ้งหน่อไม้ฝรั่งที่ผ่านการเตรียมในอัตราส่วน 1:20 (เศษเหลือทิ้งหน่อไม้ฝรั่งต่อน้ำ) ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นเวลา 15 นาที และการบดเปียกให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยเครื่องปั่นผลไม้ ด้วยเอนไซม์เฮมิเซลลูเลสปริมาณร้อยละ 2.50 โดยปริมาตรต่อน้ำหนัก และเอนไซม์เฮมิเซลลูเลสร้อยละ 2.50 โดยปริมาตรต่อน้ำหนัก ที่พีเอช 4.6 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2, 4, 6 และ 8 ชั่วโมง จะให้ผลผลิตเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำตามรูปที่ 5 จากการศึกษาพบว่าเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นจาก 0 เป็น 4 ชั่วโมง จะให้ปริมาณผลผลิตเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำได้เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) แต่เมื่อใช้ระยะเวลาการย่อยนานขึ้นเป็น 6 และ 8 ชั่วโมง จะให้ปริมาณผลผลิตเส้นใยอาหารละลายน้ำแตกต่างจาก 4 ชั่วโมง อย่างไม่มีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) ผลที่ได้ในการศึกษาครั้งนี้มีแนวโน้มสอดคล้องกับการศึกษาของ Hu and Zhao [6] และ Qi และคณะ [12] คือผลผลิตเส้นใยอาหารเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นแต่ผลผลิตลดลงเมื่อใช้ระยะเวลานานเกินไป อย่างไรก็ตาม ระยะเวลาที่เหมาะสมในการย่อยจะแตกต่างกันไป การศึกษาของ Hu and Zhao [6] ระยะเวลาที่เหมาะสมในการย่อยคือ 2 ชั่วโมง ส่วนการศึกษาของ Qi และคณะ [12] ระยะเวลาที่เหมาะสมคือ 1 ชั่วโมง 30 นาที ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย โดยเฉพาะปริมาณวัตถุดิบและปริมาณเอนไซม์ การศึกษาของ Hu and Zhao [6] ใช้ปริมาณวัตถุดิบ 1:45 (ปริมาณวัตถุดิบต่อน้ำ) ต่างจากการศึกษาในครั้งนี้ที่ใช้ปริมาณวัตถุดิบ 1:20 (ปริมาณวัตถุดิบต่อน้ำ) ระยะเวลาการย่อยด้วยเอนไซม์เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญอย่างมากต่อผลผลิตเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำได้ การย่อยพอลิเมอร์ของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสที่เป็นเส้นใยอาหารไม่ละลายน้ำให้เป็นเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำได้ต้องใช้เวลาที่เหมาะสม เพราะหากใช้ระยะเวลานานเกินไปจะทำให้เกิดการย่อยที่มากเกินไปจนกลายเป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวและเกิดการสูญเสียเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำได้ [6]



รูปที่ 5 ผลของระยะเวลาการย่อยด้วยเอนไซม์ต่อผลผลิตเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำได้จากเศษเหลือทิ้งหน่อไม้ฝรั่ง

การศึกษานี้จะให้สภาวะในการสกัดเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำได้จากเศษเหลือทิ้งหน่อไม้ฝรั่ง คือ การใช้ปริมาณวัตถุดิบ 1:20 (เศษเหลือทิ้งหน่อไม้ฝรั่งต่อน้ำ) เตรียมที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้วเป็นเวลา 15 นาที แล้วบดเปียกให้เป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นนำไปย่อยด้วยเอนไซม์เซลลูเลสปริมาณร้อยละ 2.5 โดยน้ำหนัก และเอนไซม์เฮมิเซลลูเลสร้อยละ 2.5 โดยน้ำหนัก ที่พีเอช 4.6 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ภายใต้สภาวะนี้จะให้ผลผลิตเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำได้ร้อยละ 11.26 ± 0.63 โดยน้ำหนัก มากกว่าการสกัดจากผักถั่วเหลือง (Soy pods) ที่ให้ผลผลิตร้อยละ 6.72 โดยน้ำหนัก [12] และการสกัดจากกากสับปะรด (Pineapple pomace) ที่ให้ผลผลิต 8.76 โดยน้ำหนัก [6] ผลนี้แสดงให้เห็นว่าสภาวะหรือปัจจัยเหล่านี้มีผลต่อการสกัดเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำได้จากเศษเหลือทิ้งหน่อไม้ฝรั่ง การศึกษาปัจจัยเหล่านี้จะสามารถเพิ่มศักยภาพในการสกัดเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำได้ อย่างไรก็ตามวิธีการนี้จะผลิตเส้นใยอาหารละลายน้ำได้ผลผลิตต่ำกว่าการผลิตจากรำข้าวเหนียว (Glutinous rice bran) และเยื่อมันฝรั่ง (Potato pulp) ซึ่งให้ปริมาณผลผลิตสูงถึงร้อยละ 34.87 ± 0.55 โดยน้ำหนัก [7] และ 39.7 โดยน้ำหนัก [13] ตามลำดับ ทั้งนี้ ส่วนหนึ่งอาจเป็นเพราะลักษณะของวัตถุดิบที่ต่างกัน วัตถุดิบรำข้าวเหนียวมีขนาดเล็ก นุ่ม และผ่านการสกัดน้ำมัน เยื่อมันฝรั่งมีขนาดเล็กและอ่อนนุ่ม ซึ่งอาจจะทำให้ง่ายต่อการสกัดเส้นใยอาหาร

3.6 คุณภาพของเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำได้

เส้นใยอาหารที่ละลายน้ำได้จากการศึกษาในครั้งนี้มีปริมาณเส้นใยอาหารทั้งหมดร้อยละ 69.06 ± 0.40 โดยน้ำหนัก ส่วนใหญ่เป็นเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำได้ร้อยละ 67.97 ± 0.92 โดยน้ำหนัก มีเส้นใยอาหารไม่ละลายน้ำเพียงร้อยละ 1.09 ± 0.53 โดยน้ำหนัก เส้นใยอาหารที่ละลายน้ำได้มีความสามารถในการอุ้มน้ำ 1.40 ± 0.07 กรัม/น้ำต่อกรัม อุ้มน้ำมัน 1.64 ± 0.42 กรัม/น้ำมันต่อกรัม และการละลายน้ำร้อยละ 75.45 ± 0.25 โดยน้ำหนัก และมีความสามารถในการกำจัดอนุพลอิสระโดยมีค่า IC_{50} เท่ากับ 2.31 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ความสามารถในการอุ้มน้ำใกล้เคียงกับเส้นใยอาหารละลายน้ำที่สกัดจากรำข้าวเหนียว (1.81 - 2.12 กรัมต่อกรัม) ความสามารถในการอุ้มน้ำของเส้นใยอาหารละลายน้ำจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความอิมท้องซึ่งจะมีประโยชน์ในการลดการบริโภคอาหาร [7] ทำให้สามารถลดได้ทั้งปริมาณอาหารและพลังงาน ซึ่งจะช่วยลดคอเลสเตอรอล ลดน้ำตาลในเลือด และลดโรคอ้วนได้ ความสามารถในการอุ้มน้ำมันช่วยให้เส้นใยอาหารมีความสามารถในการดึงน้ำมันจากอาหารที่รับประทานด้วยการขับถ่ายซึ่งจะช่วยป้องกันโรคหลอดเลือดและหัวใจ ความสามารถในการละลายน้ำช่วยให้เส้นใยอาหารที่ละลายน้ำได้มีคุณสมบัติในการจับหรือดูดซับสารต่างๆ ที่ละลายน้ำได้ไม่ว่าจะเป็นโลหะหนัก แป้ง น้ำตาล และไขมัน จึงมีผลช่วยป้องกันการเกิดโรคเบาหวาน ไขมันในเลือดสูง และโรคหลอดเลือด เป็นต้น [6,7]

4. สรุป (Conclusion)

ในการศึกษาครั้งนี้พบว่า อุณหภูมิการเตรียมวัตถุดิบ ปริมาณวัตถุดิบ การบดเปียก ปริมาณเอนไซม์ และระยะเวลา มีผลต่อการสกัดเส้นใยอาหารละลายน้ำได้จากเศษเหลือทิ้งหน่อไม้ฝรั่ง และสภาวะการสกัดที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้คือ การใช้ปริมาณวัตถุดิบ 1:20 (เศษเหลือทิ้งหน่อไม้ฝรั่งต่อน้ำ) เตรียมที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ความดัน 15 ปอนด์ ต่อตารางนิ้ว เป็นเวลา 15 นาที บดเปียกให้เป็นเนื้อเดียวกัน แล้วย่อยด้วยเอนไซม์เซลลูเลสปริมาณร้อยละ 2.5 โดยน้ำหนัก และเอนไซม์เฮมิเซลลูเลสร้อยละ 2.5 โดยน้ำหนัก ที่พีเอช 4.6 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง สภาวะนี้ให้ผลผลิตเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำได้ร้อยละ 11.26 ± 0.63 โดยน้ำหนัก มีความสามารถในการอุ้มน้ำ อุ้มน้ำมัน และมีความสามารถทางชีวภาพใน นอกจากนั้น ยังมีความสามารถในการละลายสูงเหมาะสมต่อการนำไปประยุกต์ใช้เป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์เครื่องดื่ม

5. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณกลุ่มเกษตรกรจังหวัดเพชรบูรณ์ที่ให้การสนับสนุนเศษเหลือทิ้งหน่อไม้ฝรั่งเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในงานวิจัยครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] Chitrakar B, Zhang M, Adhikari B. Asparagus (*Asparagus officinalis*): Processing effect on nutritional and phytochemical composition of spear and hard-stem byproducts. Trends Food Sci Technol. 2019;93:1-11.
- [2] Pegiou E, Mumm R, Acharya P, de Vos RCH, Hall RD. Green and white asparagus (*Asparagus officinalis*): A source of developmental, chemical and urinary intrigue. Metabolites. 2019;10(17):1-23.
- [3] Fuentes-Alventosa JM, Rodriguez-Gutierrez G, Jaramillo-Carmona S, Espejo-Calvo JA, Rodriguez-Arcos R, Fernandez-Bolanos J, Guillin-Bejarano R, Jimenez-Araujo A. Effect of extraction method on chemical composition and functional characteristics of high dietary fibre powders obtained from asparagus by-products. Food Chem. 2009;113(2):665-71.
- [4] Dhingra D, Michael M, Rajput H, Patil RT. Dietary fibre in foods: a review. J Food Sci Technol. 2012;49(3):255-66.
- [5] กมลลักษณ์ วิชาเรว. ผลของวิธีการสกัดต่อสมบัติทางเคมีกายภาพและสมบัติเชิงหน้าที่ของเส้นใยอาหารจากหน่อไม้ฝรั่งเหลือ. [วิทยานิพนธ์หลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต]. พะเยา: มหาวิทยาลัยพะเยา; 2563.
- [6] Hu H, Zhao Q. Optimization extraction and functional properties of soluble dietary fiber from pineapple pomace obtained by shear homogenization-assisted extraction. RSC Adv. 2018;8(72):41117-30.
- [7] Chen H, He S, Sun H, Li Q, Gao K, Miao X, Xiang J, Wu X, Gao L, Zhang Y. A comparative study on extraction and physicochemical properties of soluble dietary fiber from glutinous rice bran using different methods. Separations. 2023;10(2):1-13.
- [8] Ma C, Ni L, Guo Z, Zeng H, Wu M, Zhang M, Zheng B. Principle and application of steam explosion technology in modification of food fiber. Foods. 2022;11(3370):1 - 19.
- [9] Prosky L, Nils-Georg ASP, Schweizer TF, Devries JW, Furda I. Determination of insoluble, soluble and total dietary fiber in foods and food products: Interlaboratory study. J Assoc Off Anal Chem. 1988;71(5):1017-24.
- [10] Cadavid ELA, Molina DAR, Valenzuela JRC. Chemical, physicochemical and functional characteristics of dietary fiber obtained from asparagus byproducts (*Asparagus officinalis* L.). Rev Fac Nal Agr Medellin. 2015;68(1):7533-44.

- [11] Chen GT, Zhao L, Zhao LY, Cong T, Bao SF. *In vitro* study on antioxidant activities of peanut protein hydrolysate. J Sci Food Agric. 2007;87(2):357-62.
- [12] Qi B, Jiang L, Li Y, Chen S, Sui X. Extract dietary fiber from the soy pods by chemistry enzymatic methods. Procedia Eng. 2011;15:4862-73.
- [13] Cheng L, Zhang X, Hong Y, Li Z, Li C, Gu Z. Characterisation of physicochemical and functional properties of soluble dietary fibre from potato pulp obtained by enzyme-assisted extraction. Int J Biol Macromol. 2017;101:1004-11.

การตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีสำหรับวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนัก หลายชนิดในเวลาเดียวกัน (ปรอท แคดเมียม สารหนู และตะกั่ว) ที่ระดับความเข้มข้นต่ำมากในใบกระท่อม

Method validation for simultaneous determination of heavy metals (Hg, Cd,
As and Pb) at trace concentration levels in kratom leaves

ธาริณี ศรีดารา¹, สายจิต ดาวสุโข¹, สุนงกช ททรัพย์แดง¹, วีระ สวนไธสง¹

Tharinee Sridara¹, Saijit Daosukho¹, Subongkoch Subtaeng¹, Weera Suanthaisong¹

รับบทความ 12 มกราคม 2567 แก้ไขบทความ 23 กุมภาพันธ์ 2567 ยอมรับตีพิมพ์ 4 มีนาคม 2567

บทคัดย่อ

การศึกษานี้เป็นการตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักหลายชนิดในเวลาเดียวกัน ประกอบด้วย ปรอท แคดเมียม สารหนู และตะกั่ว ในใบกระท่อมที่ระดับความเข้มข้นต่ำมาก (หนึ่งส่วนต่อพันล้าน, ppb) ด้วยเทคนิค อินดักทีฟพลาสมา-ออปติคอลลูมิเนสเซนส์เพกโทรสโกปี (ICP-OES) และกระบวนการย่อยและการเตรียมสารละลาย ตัวอย่างก่อนทำการวิเคราะห์ได้ตัดแปรวิธีของ AOAC (999.10) โดยใช้ผงใบกระท่อมแห้งผสมกับกรดไนตริกและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมกับการย่อยด้วยวิธีไมโครเวฟ ผลการศึกษาพบว่าช่วงการปฏิบัติงานของวิธีทดสอบปรอท แคดเมียม สารหนู และตะกั่วเท่ากับ 0.25 - 1.25, 0.05 - 1.25, 0.50 - 12.50 และ 0.50 - 12.50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ค่าขีดจำกัด การตรวจหาของวิธี (LOD) เท่ากับ 0.050 (ปรอท), 0.010 (แคดเมียม), 0.15 (สารหนู) และ 0.15 (ตะกั่ว) มิลลิกรัม ต่อกิโลกรัม ขีดจำกัดการวัดปริมาณ (LOQ) เท่ากับ 0.25 (ปรอท), 0.050 (แคดเมียม), 0.50 (สารหนู) และ 0.50 (ตะกั่ว) มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม การศึกษาความโอนเอียงมีช่วงร้อยละการคืนกลับ (%Recovery) เท่ากับ 67 - 74% (ปรอท), 80 - 82% (แคดเมียม), 83 - 91% (สารหนู) และ 80 - 82% (ตะกั่ว) การศึกษาความเที่ยงมีช่วงร้อยละค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD) ของแคดเมียม สารหนู และตะกั่วอยู่ในช่วง 0.6 - 7.3% และปรอทอยู่ในช่วง 8.2 - 11.7% อีกทั้งค่าความไม่แน่นอนขยายของแคดเมียม สารหนู และตะกั่ว มีค่าน้อยกว่า $\pm 25\%$ และปรอทน้อยกว่า $\pm 38\%$ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ซึ่งผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าวิธีวิเคราะห์มีความน่าเชื่อถือ และเหมาะสมสำหรับใช้ในการวิเคราะห์เชิงปริมาณโลหะหนักในใบกระท่อม

คำสำคัญ: ปรอท แคดเมียม สารหนู ตะกั่ว กระท่อม ICP-OES

¹กองเทคโนโลยีชุมชน กรมวิทยาศาสตร์บริการ

Abstract

This manuscript reports the validation of an analytical method for simultaneous determination of heavy metals (Hg, Cd, As and Pb) in Kratom at low concentrations (part per billion, ppb) using an inductive coupled plasma-optical emission spectrophotometer (ICP-OES). Sample preparation followed AOAC (999.10) guideline, involving the microwave digestion of dried Kratom leaves powder with nitric acid and hydrogen peroxide. The linear concentration ranges for Hg, Cd, As and Pb were found to be 0.25 - 1.25, 0.05 - 1.25, 0.50 - 12.50 and 0.50 - 12.50 mg/kg, respectively. Limits of detection (LOD) were determined as 0.050 (Hg), 0.010 (Cd), 0.15 (As) and 0.15 (Pb) mg/kg, with corresponding limits of quantitation (LOQ) at 0.25 (Hg), 0.050 (Cd), 0.50 (As) and 0.50 (Pb) mg/kg. The recovery bias showed percentages ranging from 67 - 74% (Hg), 80 - 82% (Cd), 83 - 91% (As) and 80 - 82 (As). Precision, represented by the percentage of relative standard deviations (%RSD), was within the range of 0.6 - 7.3% for Cd, As and Pb, and 8.2 - 11.7% for Hg. Additionally, expanded uncertainties for Cd, As and Pb were below $\pm 25\%$, and for Hg, it was below $\pm 38\%$, at a confidence level of 95%. These results affirm the reliability and suitability of the proposed method for the quantitative analysis of heavy metals in Kratom leaves.

Keywords: Mercury, Cadmium, Arsenic, Lead, Kratom, ICP-OES

¹Division of Community Technology, Department of Science Service

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

1. บทนำ (Introduction)

กระพ้อม (*Kratom*; *Mitragyna speciosa*) เป็นพืชในเขตเมืองร้อน พบมากในประเทศแถบเอเชีย โดยเฉพาะทางตอนใต้ของประเทศไทย ในอดีตมักบริโภคด้วยการเคี้ยวใบสดหรือนำใบไปต้มน้ำสำหรับดื่ม เพื่อช่วยกระตุ้นให้เกิดความตื่นตัวและกระปรี้กระเปร่า อีกทั้งใช้เป็นยารักษาอาการปวดเมื่อยและลดอาการเจ็บปวด [1-2] สืบเนื่องจากกฎหมายของประเทศไทยได้ประกาศปลดพืชกระพ้อมออกจากรายการยาเสพติดให้โทษประเภทที่ 5 ภายใต้พระราชบัญญัติสารเสพติดให้โทษ ฉบับที่ 8 (พ.ศ. 2564) [3] ส่งผลให้การใช้พืชกระพ้อมและผลิตภัณฑ์จากพืชกระพ้อมขยายตัวมากขึ้น อย่างไรก็ตามบริเวณพื้นที่เพาะปลูกพืชกระพ้อมอาจได้รับการปนเปื้อนจากสารเคมีอันตรายกลุ่มโลหะหนัก ที่อาจจะมาจากสภาวะแวดล้อมในพื้นที่เพาะปลูก เช่น ดิน น้ำ อากาศ รวมทั้งการใช้สารเคมีในการเพาะปลูก และสารปนเปื้อนในพืชกระพ้อมที่เกิดขึ้น อาจก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้บริโภค [4] ดังนั้นการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในใบกระพ้อมจึงมีความสำคัญต่อความปลอดภัยของผู้บริโภค ทั้งนี้ตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข เรื่องเกณฑ์มาตรฐาน ค่าความบริสุทธิ์ หรือคุณลักษณะอื่นอันมีความสำคัญต่อคุณภาพ พ.ศ. 2564 ได้กำหนดปริมาณสูงสุดของโลหะปนเปื้อน 4 ชนิด ในผลิตภัณฑ์สมุนไพร ดังนี้ ปรอท (Hg), แคดเมียม (Cd), สารหนู (As), และตะกั่ว (Pb) ต้องไม่เกิน 0.5, 0.3, 5 และ 10 ส่วนในล้านส่วน (ppm) [5]

วิธีการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักมีหลายเทคนิค ซึ่งแต่ละเทคนิคนั้นมีข้อดีและข้อจำกัดแตกต่างกันไป เช่น (1) เทคนิค Atomic absorption spectrometry (AAS) ที่มีสภาพไว (Sensitivity) ในการวิเคราะห์สูง แต่วิเคราะห์โลหะได้ทีละธาตุ อีกทั้งยังต้องใช้สารเคมีเพื่อช่วยให้เกิดปฏิกิริยา เช่น การใช้ Potassium iodide (KI) และ sodium tetrahydroborate (NaBH_4) ในการเกิด Hydride atomization เพื่อให้สามารถวิเคราะห์สารหนู หรือการใช้ Stannous chloride (SnCl_2) ในการเกิด Cold-vapour atomization เพื่อให้สามารถวิเคราะห์ปรอท [4, 6-7] (2) เทคนิค Anodic stripping voltammetry (ASV) ที่มีสภาพไวในการวิเคราะห์สูง สามารถวิเคราะห์ได้หลายธาตุในเวลาเดียวกัน แต่มีความซับซ้อนในการเตรียมตัวอย่าง จากการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า ดังนั้น ถ้าสารละลายตัวอย่างมีตัวรบกวนที่ไปขัดขวางการนำไฟฟ้าจะส่งผลโดยตรงต่อความถูกต้องของการวิเคราะห์ [4, 8] และ (3) เทคนิค Inductive coupled plasma (ICP) spectrometry ที่มีข้อดีคือมีสภาพไวในการวิเคราะห์สูง วิเคราะห์ได้หลายธาตุในเวลาเดียวกัน แต่ก็มีข้อจำกัดในการวัดโลหะบางชนิดที่ระดับความเข้มข้นต่ำ ๆ [4, 9]

การวิจัยครั้งนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อพัฒนาวิธีวิเคราะห์โลหะหนักหลายชนิดที่มีปริมาณน้อยมากได้พร้อมกัน ที่สามารถนำไปใช้ประเมินคุณภาพใบกระพ้อม โดยตรวจสอบคุณลักษณะด้านความปลอดภัยเกี่ยวกับปริมาณโลหะหนัก ตามวิธีของ AOAC 2023 (999.10) [10] ที่มีการเปลี่ยนแปลงเครื่องมือตรวจวัด โดยการพัฒนาวิธีทดสอบครั้งนี้ได้ตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณโลหะปรอท, แคดเมียม, สารหนูและตะกั่ว ด้วยเทคนิค ICP-OES ที่สามารถนำไปทดสอบหาปริมาณโลหะหนักที่ปนเปื้อนในใบกระพ้อมได้พร้อมกันอย่างรวดเร็ว โดยได้ศึกษาคุณลักษณะเฉพาะของวิธี ได้แก่ ความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง (Linearity), ขีดจำกัดการตรวจหา (Limits of detection, LOD), ขีดจำกัดการวัดปริมาณ (Limits of quantitation, LOQ), ความเอนเอียง (Bias), ความเที่ยง (Precision) เพื่อให้ผลการทดสอบมีความถูกต้อง แม่นยำ น่าเชื่อถือ และสามารถตัดสินใจเกณฑ์ข้อกำหนดได้ รวมถึงการนำผลการทดสอบไปใช้ประโยชน์ด้านการควบคุมคุณภาพใบกระพ้อมให้มีความปลอดภัยและการเพิ่มมูลค่าในเชิงพาณิชย์อีกด้วย

2. วิธีการวิจัย (Experimental methods)

2.1 ตัวอย่าง

ตัวอย่างใบกระพ้อม (จากจังหวัดชุมพร) เตรียมโดยนำใบกระพ้อมสดมาล้างให้สะอาดด้วยน้ำประปา จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จนกระทั่งแห้งสนิท แล้วนำไปบดและร่อนผ่านตะแกรงที่มีขนาดรูพรุน 250 ไมครอน ผงใบกระพ้อมมีลักษณะเป็นผงแห้งและเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นเก็บตัวอย่างไว้ในตู้ดูดความชื้นสำหรับการทดลองต่อไป

2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

เครื่อง Inductive coupled plasma-optical emission spectrophotometer; ICP-OES ยี่ห้อ Thermo Fisher Scientific รุ่น iCAP PRO ผลิตจากประเทศเยอรมัน, เครื่องย่อยระบบไมโครเวฟ ยี่ห้อ Analytik Jena รุ่น TOPwave ผลิตจาก

ประเทศอังกฤษ, เครื่องชั่งไฟฟ้าความละเอียด 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Sartorius รุ่น Quintix224-1S ผลิตจากประเทศสหรัฐอเมริกา, ขวดวัดปริมาตร (Volumetric flask, class A) และปิเปต (Volumetric pipette, class A) ขนาดต่าง ๆ

2.3 สารเคมี

2.3.1 สารละลายมาตรฐานอ้างอิง (Reference standard solution) ยี่ห้อ Perkin Elmer, ผลิตจากประเทศสหรัฐอเมริกา ความเข้มข้น 1000 ± 5 mg/L สำหรับสร้างกราฟมาตรฐาน ได้แก่ สารละลายมาตรฐานปรอท (Lot No. 26-174HGY1), แคดเมียม (Lot No. 26-76CDY1), สารหนู (Lot No. 27-24ASAY1) และตะกั่ว (Lot No. 27-05PBY1)

2.3.2 สารละลายมาตรฐานอ้างอิง (Reference standard solution) ยี่ห้อ AccuStandard, ผลิตจากประเทศสหรัฐอเมริกา ความเข้มข้น 1000 ± 2.4 mg/L สำหรับการหาค่าขีดจำกัดการวัดปริมาณ ความไวและความเที่ยง ได้แก่ สารละลายมาตรฐานปรอท (Lot No. 223035027), แคดเมียม (Lot No. 222095085), สารหนู (Lot No. 222065166) และ ตะกั่ว (Lot No. 222065210)

2.3.3 กรดไนตริก (Nitric acid; HNO₃) ความเข้มข้นร้อยละ 65 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร (%w/v), AR grade, ยี่ห้อ Merck, เยอรมัน

2.3.4 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide; H₂O₂) ความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก (%w/w), AR grade, ยี่ห้อ Merck, เยอรมัน

2.4 วิธีดำเนินงาน

2.4.1 การเตรียมสารละลายมาตรฐานผสมสำหรับสร้างกราฟมาตรฐาน (Preparation of standard solution for calibration curve)

ปิเปตสารละลายมาตรฐานเข้มข้น (Stock solution, ข้อ 2.3.1) ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100.00 mL เจือจางและปรับปริมาตรด้วยสารละลายกรดไนตริกความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยปริมาตร (%v/v) เพื่อให้ได้สารละลายมาตรฐานผสม (Mixed standard solution, MSTD) ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานผสมของโลหะหนักสำหรับสร้างกราฟมาตรฐาน

สารละลาย	ความเข้มข้น (µg/L)			
	ปรอท	แคดเมียม	สารหนู	ตะกั่ว
Calibration blank	0.00	0.00	0.00	0.00
MSTD 1	1.00	1.00	10.00	10.00
MSTD 2	5.00	5.00	50.00	50.00
MSTD 3	10.00	10.00	100.00	100.00
MSTD 4	15.00	15.00	150.00	150.00
MSTD 5	20.00	20.00	200.00	200.00
MSTD 6	25.00	25.00	250.00	250.00

2.4.2 การย่อยและการเตรียมสารละลายตัวอย่าง (Digestion and preparation of sample solution)

ชั่งตัวอย่างผงใบกระท่อม 1.00 g แล้วถ่ายตัวอย่างไปยังหลอดย่อย (Digestion vessel) จากนั้นเติม กรดไนตริกเข้มข้น 8 mL และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้มข้น 2 mL ตามลำดับ ปิดฝาหลอดย่อยให้อยู่ในระบบปิด แล้วนำไปย่อยด้วยเครื่องไมโครเวฟ ย่อยจนสารละลายใสไม่มีตะกอน โดยใช้เวลาย่อยทั้งหมด 75 นาที (พารามิเตอร์ที่ใช้ในการย่อยแสดงดังตารางที่ 2) จากนั้นยกออกจากเครื่องและปล่อยให้เย็นจนกระทั่งถึงอุณหภูมิห้อง เทสารละลายตัวอย่าง ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 50.00 mL แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน กรองสารละลายผ่าน Nylon syringe filter ขนาดรูพรุน 0.45 µm เพื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง ICP-OES (ภาวะการทำงานเครื่อง ICP-OES แสดงดังตารางที่ 3)

ตารางที่ 2 ขั้นตอนการย่อยด้วยเครื่องไมโครเวฟ

ขั้นที่	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	พลังงาน (วัตต์)	เวลา (นาที)
1	170	90	15
2	200	90	30
3	50	0	10
4	50	0	10
5	50	0	1

ตารางที่ 3 ภาวะการทำงานของเครื่อง ICP-OES

Analysis mode	Axial view, iFR mode
Rf power	1150 W
Gas flow rate	Plasma (argon) 12.5 L/min Auxiliary gas 0.50 L/min Nebulizer 0.35 L/min
Pump speed	45 rpm
Wavelength	Hg 184.950 nm As 189.042 nm Pb 220.353 nm Cd 226.502 nm

2.4.3 การเตรียมสารละลายสำหรับการศึกษาความเอนเอียงและความเที่ยง (Preparation of solution for bias and precision study)

การเตรียมสารละลายสำหรับการศึกษาในขั้นตอนนี้ ทำวิธีเดียวกับข้อ 2.4.2 แต่มีการเติมสารละลายมาตรฐานโลหะหนักชนิดต่าง ๆ (เตรียมจาก Stock solution, ข้อ 2.3.2) ที่สามระดับความเข้มข้นดังแสดงในตารางที่ 4 ปริมาณอย่างละ 1.00 mL ในแต่ละตัวอย่างก่อนปิดหลอดย่อย

ตารางที่ 4 ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานผสมที่สามระดับความเข้มข้น

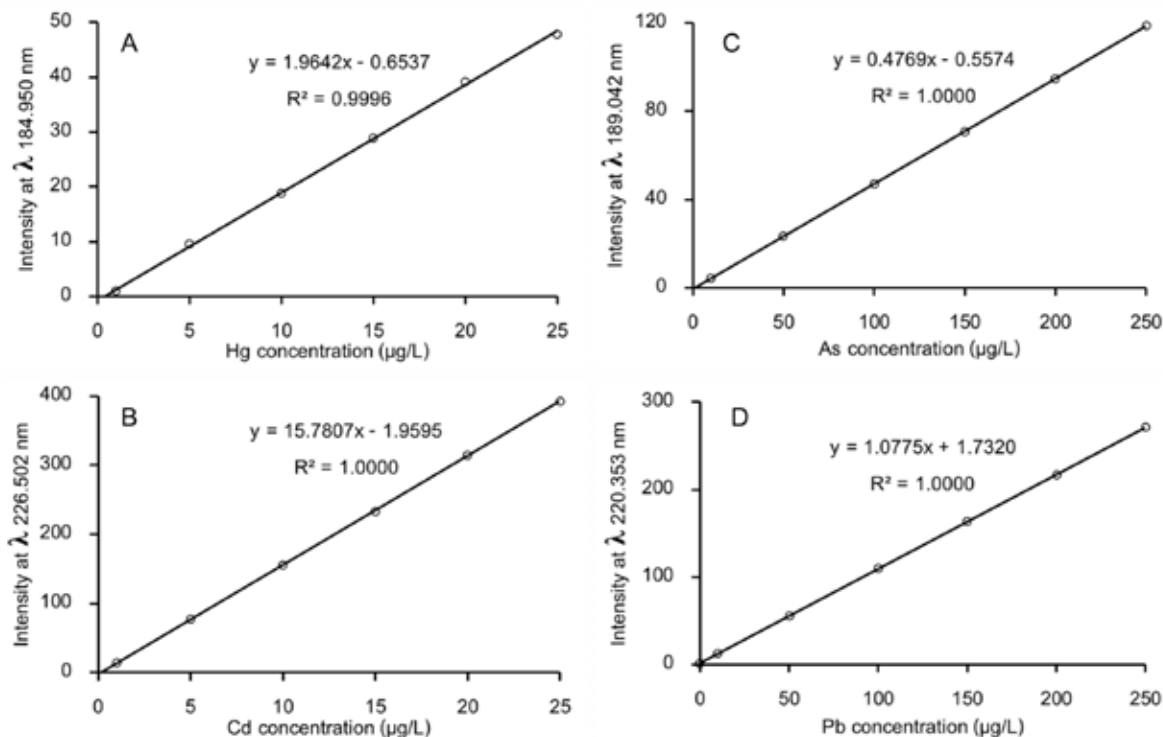
สารละลาย	ความเข้มข้น (µg/L)			
	ปรอท	แคดเมียม	สารหนู	ตะกั่ว
ระดับต่ำ	5.00	1.00	10.00	10.00
ระดับกลาง	15.00	15.00	150.00	150.00
ระดับสูง	25.00	25.00	250.00	250.00

3. ผลและวิจารณ์ (Results and discussion)

3.1 ช่วงการใช้งานของเครื่องมือ (Instrument working range)

การใช้เครื่องมือ ICP-OES ในการทดสอบปริมาณโลหะหนักมีข้อดีคือสามารถวิเคราะห์โลหะได้รวดเร็ว และสามารถวิเคราะห์เชิงปริมาณได้หลายธาตุในเวลาเดียวกัน และเหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับการทดสอบในสารละลายที่มีระดับความเข้มข้นต่ำ ๆ เนื่องจากมีสภาพไว (Sensitivity) ความถูกต้อง (Accuracy) และความแม่นยำ (Precision) ในการวิเคราะห์สูง จากการหาปริมาณโลหะในสารละลายผสมที่ความเข้มข้นต่าง ๆ โดยอาศัยความยาวคลื่นแสงที่จำเพาะกับโลหะนั้น ๆ พบว่าสัญญาณความเข้มแสง (Intensity) ที่เกิดขึ้นจะแปรผันตรงกับความเข้มข้น (Concentration, µg/L)

ของโลหะหนักที่เพิ่มขึ้น เมื่อนำไปสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของโลหะกับความเข้มแสง ดังแสดงในรูปที่ 1 พบว่าสมการความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง ($y = mx + c$) ของโลหะทั้งสี่ธาตุ มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination, R^2) เข้าใกล้ 1 แสดงให้เห็นว่าค่าความเข้มข้นของสารละลายที่คำนวณจากสมการเส้นตรงดังกล่าวมีความถูกต้องสูง



รูปที่ 1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น (Concentration, $\mu\text{g/L}$) ของโลหะที่สนใจวิเคราะห์กับความเข้มแสง (Intensity) ที่ความยาวคลื่นที่จำเพาะกับโลหะนั้น ๆ ได้แก่ปรอท; 184.950 nm (A), แคดเมียม; 226.502 nm (B), สารหนู; 189.042 nm (C) และตะกั่ว; 220.353 nm (D)

จากการศึกษาขีดจำกัดของเครื่องมือวัด (Instrumental detection limit, IDL) ตามวิธี U.S. EPA. Method 6010D, 2014 [11] โดยทำการทดสอบในสารละลาย Calibration blank จำนวน 10 ซ้ำ พบว่ามีค่า IDL เท่ากับ 0.50, 0.10, 2.5 และ 1.8 $\mu\text{g/L}$ สำหรับปรอท แคดเมียม สารหนูและตะกั่ว ตามลำดับ และได้ศึกษาความถูกต้องของเครื่องมือ มีร้อยละความถูกต้อง (%Accuracy) อยู่ในช่วง 80 - 105% ดังตารางที่ 5 จึงยืนยันได้ว่าเครื่องมือสามารถวัดปริมาณธาตุทั้งสี่ได้ถูกต้อง แม่นยำ เป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด จึงนำเครื่องมือนี้ไปใช้ตรวจสอบหาปริมาณ LOD, LOQ, ความเอนเอียง และความเที่ยงของวิธี

ตารางที่ 5 แสดงร้อยละความถูกต้อง (%Accuracy) และร้อยละส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD) ของการทดสอบในสารละลาย calibration blank สำหรับยืนยันความสามารถของเครื่องมือ

ธาตุ	ความเข้มข้นที่ตรวจยืนยัน ($\mu\text{g/L}$)	ปริมาณที่ตรวจวัดได้เฉลี่ย ($\mu\text{g/L}$) $\pm$ SD (n = 10)	%Accuracy	%RSD
ปรอท	5.00	4.00 $\pm$ 0.14	80	2.3
แคดเมียม	1.00	1.05 $\pm$ 0.05	105	4.9
สารหนู	10.00	8.70 $\pm$ 0.63	89	7.2
ตะกั่ว	10.00	8.45 $\pm$ 0.46	85	5.5

3.2 ขีดจำกัดการตรวจหาของวิธี (Limits of detection, LOD) และขีดจำกัดการวัดปริมาณของวิธี (Limits of quantitation, LOQ)

ผลการศึกษา LOD และการประมาณค่า LOQ ของวิธี โดยทำการทดสอบ Sample blank จำนวน 10 ซ้ำ (repeatability, n=10) แล้วนำมาคำนวณตามสมการที่ (1) (2) และ (3) ตามลำดับ [12] พบว่าได้ค่า LOD และค่าประมาณ LOQ แสดงดังตารางที่ 6

$$\text{LOD} = 3(S'_0) \quad (1)$$

$$\text{LOQ} = 10(S'_0) \quad (2)$$

$$S'_0 = S_0 \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{1}{n_b}} \quad (3)$$

เมื่อ S_0 คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) คำนวณจากผลการทดสอบใน Sample blank (repeatability, n=10)

n คือ จำนวนซ้ำของตัวอย่างที่ห้องปฏิบัติการใช้สำหรับรายงานผลการทดสอบ (n=2)

n_b คือ จำนวนซ้ำของ Blank ที่ใช้ในการทดสอบ (n=1)

ตารางที่ 6 แสดงขีดจำกัดของวิธี (LOD) และค่าประมาณขีดจำกัดการวัดปริมาณของวิธี (LOQ)

ธาตุ	LOD		ค่าประมาณ LOQ	
	(µg/L)	(mg/kg)	(µg/L)	(mg/kg)
ปรอท	1.0	0.050	3.0	0.15
แคดเมียม	0.20	0.010	1.0	0.050
สารหนู	3.0	0.15	10.0	0.50
ตะกั่ว	3.0	0.15	10.0	0.50

เมื่อได้ค่าประมาณ LOQ แล้ว ทำการตรวจยืนยัน LOQ ของวิธี โดยทำการเตรียมสารละลาย Sample blank ที่เติมสารละลายมาตรฐานผสมของโลหะทั้ง 4 ธาตุ ที่ความเข้มข้น 5, 1, 10 และ 10 µg/L สำหรับปรอท แคดเมียม สารหนู และปรอท ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่เลือกพิสูจน์ความแม่นยำและความเที่ยง จำนวนความเข้มข้นละ 8 ซ้ำ แล้วนำมาคำนวณร้อยละการคืนกลับและร้อยละค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD) ตามสมการที่ (4) และ (5) พบว่า %Recovery และ %RSD สำหรับปรอท แคดเมียม สารหนู และตะกั่ว ดังแสดงในตารางที่ 7 ในส่วนของความเข้มข้นที่ระดับต่ำสุดของแต่ละธาตุอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับ ยกเว้นปรอทที่มี %Recovery น้อยกว่าเกณฑ์กำหนด เนื่องจากปรอทเป็นโลหะประเภทระเหยง่าย (Volatile) และการศึกษาปริมาณปรอทครั้งนี้อยู่ในระดับความเข้มข้นน้อยมาก (ระดับส่วนในพันล้านส่วน, ppb) จึงเกิดการสูญเสียได้ง่ายในขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง แม้ว่าขั้นตอนการเตรียมจะได้ดำเนินการในระบบปิดแล้วก็ตาม

3.3 ความเอนเอียง (Bias)

การศึกษาความเอนเอียงสำหรับช่วงการใช้งานของวิธี โดยทำการเตรียมสารละลายตัวอย่าง ที่เติมสารละลายมาตรฐานผสมของโลหะทั้ง 4 ธาตุ ที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ (ต่ำ กลาง และสูง) ภายใต้การวิเคราะห์ 8 ซ้ำ แล้วนำมาคำนวณ %Recovery ตามสมการที่ (4) พบว่าโลหะที่สนใจวิเคราะห์ทุกระดับความเข้มข้นมีค่า %Recovery อยู่ในเกณฑ์กำหนด แสดงในตารางที่ 7 ยกเว้นปรอทที่มี %recovery น้อยกว่าเกณฑ์กำหนด

$$\% \text{Recovery} = \frac{C_{\text{obs}} - C_{\text{native}}}{C_{\text{spike}}} \times 100 \quad (4)$$

เมื่อ C_{obs} คือ ความเข้มข้นที่วัดได้

C_{native} คือ ความเข้มข้นของตัวอย่างที่ไม่ได้เติมสารละลายมาตรฐาน

C_{spike} คือ ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานที่เติม

$$\%RSD = \frac{SD}{\bar{X}} \times 100 \quad (5)$$

เมื่อ SD คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูล

$\bar{X}$ คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูล

ตารางที่ 7 ค่าร้อยละการกลับคืน (%Recovery) ของโลหะทั้ง 4 ธาตุ ในสารละลายตัวอย่างไปกระท่อมที่เติมสารละลายมาตรฐานที่ระดับความเข้มข้นต่ำ กลาง และสูง

ธาตุ	ความเข้มข้นที่เติม (µg/L)	ค่าอ้างอิง (mg/kg)	ปริมาณที่ตรวจวัดได้โดยเฉลี่ย (mg/kg) ± SD (n=8)	%recovery*	%RSD**
ปรอท	5.0	0.25	0.17 ± 0.01	67	8.1
	15.0	0.75	0.53 ± 0.02	71	2.9
	25.0	1.25	0.93 ± 0.01	74	0.9
แคดเมียม	1.0	0.050	0.062 ± 0.001	80	2.0
	15.0	0.75	0.64 ± 0.01	82	1.6
	25.0	1.25	1.05 ± 0.01	82	0.7
สารหนู	10.0	0.50	0.46 ± 0.03	83	6.3
	150.0	7.50	6.52 ± 0.06	86	0.8
	250.0	12.5	11.4 ± 0.1	91	0.7
ตะกั่ว	10.0	0.50	0.66 ± 0.02	80	3.0
	150.0	7.50	6.40 ± 0.17	82	2.6
	250.0	12.5	10.6 ± 0.1	82	0.6

หมายเหตุ

*เกณฑ์ยอมรับได้ %Recovery; 60 - 115% ที่ระดับความเข้มข้น 0.01 mg/kg และ 80 - 110% ที่ระดับความเข้มข้น 0.1 - 10 mg/kg [13]

**เกณฑ์ยอมรับได้ %RSD; 21% ที่ระดับความเข้มข้น 0.01 mg/kg, 15% ที่ระดับความเข้มข้น 0.1 mg/kg, 11% ที่ระดับความเข้มข้น 1 mg/kg และ 7.3% ที่ระดับความเข้มข้น 10 mg/kg [13]

3.4 ความเที่ยง (Precision)

การศึกษาความเที่ยงโดยทำการเตรียมสารละลายตัวอย่างที่เติมสารละลายมาตรฐานผสมของโลหะทั้ง 4 ธาตุ ที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ (ต่ำ กลาง และสูง) ภายใต้การวิเคราะห์ซ้ำ 6 ครั้งในวันที่แตกต่างกัน (Intermediate precision) แล้วประเมินค่าความเที่ยงจาก %RSD ตามสมการที่ (5) พบว่าโลหะที่สนใจวิเคราะห์ทุกระดับความเข้มข้น มี %RSD อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ดังแสดงในตารางที่ 8 แสดงว่าวิธีวิเคราะห์นี้มีความเที่ยงสูง

ตารางที่ 8 ร้อยละค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD) ของโลหะทั้ง 4 ธาตุ ในสารละลายตัวอย่างใบกระท่อมที่เดิมสารละลายมาตรฐานที่ระดับความเข้มข้นต่ำ กลาง และสูง

ธาตุ	ความเข้มข้นที่เดิม (µg/L)	ค่าอ้างอิง (mg/kg)	ปริมาณที่ตรวจวัดได้โดยเฉลี่ย (mg/kg) ± SD (n=6)	%RSD*
ปรอท	5.0	0.25	0.18 ± 0.02	11.7
	15.0	0.75	0.61 ± 0.06	9.2
	25.0	1.25	0.96 ± 0.08	8.2
แคดเมียม	1.0	0.050	0.065 ± 0.002	2.7
	15.0	0.75	0.63 ± 0.01	1.0
	25.0	1.25	1.03 ± 0.01	0.7
สารหนู	10.0	0.50	0.52 ± 0.04	7.3
	150.0	7.50	6.84 ± 0.09	1.3
	250.0	12.5	11.3 ± 0.1	0.9
ตะกั่ว	10.00	0.50	0.65 ± 0.03	4.4
	150.0	7.50	6.18 ± 0.10	1.5
	250.0	12.5	10.2 ± 0.1	0.6

หมายเหตุ *เกณฑ์ยอมรับได้ %RSD; 21% ที่ระดับความเข้มข้น 0.01 mg/kg, 15% ที่ระดับความเข้มข้น 0.1 mg/kg, 11% ที่ระดับความเข้มข้น 1 mg/kg และ 7.3% ที่ระดับความเข้มข้น 10 mg/kg [13]

3.5 การประมาณค่าความไม่แน่นอน (Measurement uncertainty)

จากการศึกษาข้างต้นสามารถนำข้อมูลที่ได้มาประมาณค่าความไม่แน่นอนของการวัด โดยคำนวณตามสมการที่ (6) [14] และได้พิจารณาที่ความเข้มข้นระดับกลางของช่วงการวิเคราะห์ของโลหะทั้ง 4 ธาตุ

$$u_c = C \sqrt{u(R)^2 + \left(\frac{u(P)}{P}\right)^2} \quad (6)$$

เมื่อ u_c คือ ค่าความไม่แน่นอนรวม

C คือ ความเข้มข้นของสารละลาย

$u(R)$ คือ ความไม่แน่นอนจากการทดสอบความโอนเอียง

$u(P)/P$ คือ ความไม่แน่นอนจากการทดสอบความเที่ยง

ซึ่งค่าความไม่แน่นอนจากการทดสอบความโอนเอียง, $u(R)$ ในการศึกษา (ข้อ 3.3) เป็นการศึกษาแบบ Spiking individual portions of a “blank matrix” จึงคำนวณค่า $u(R)$ ตามสมการที่ (7) และ (8) ตามลำดับ และค่าความไม่แน่นอนจากการทดสอบความเที่ยง, $u(P)/P$ ได้มาจากการศึกษาความเที่ยง (ข้อ 3.4) โดยพิจารณาจาก RSD ที่ระดับความเข้มข้นต่ำ กลาง หรือสูง แล้วเลือกค่าที่การกระจายกว้างที่สุดมาแทนค่าเป็น $u(P)/P$ [14]

$$u(\bar{R}_m) = \bar{R}_m \sqrt{\left(\frac{s^2 m_{obs}}{n \times m_{obs}^2}\right) + \left(\frac{u(m_{spike})}{m_{spike}}\right)^2} \quad (7)$$

$$u(R) = \sqrt{u(\bar{R}_m)^2 + u(R_s)^2} \quad (8)$$

เมื่อ $u(\bar{R}_m)$	คือ ค่าความไม่แน่นอนขยายของค่าคืนกลับ
$\bar{R}_m$	คือ ค่าคืนกลับ
$S_{m\text{ obs}}$	คือ RSD ของค่าคืนกลับ
n	คือ จำนวนการวิเคราะห์ซ้ำ (Repeatability, $n = 8$)
$\bar{m}_{\text{obs}}$	คือ ความเข้มข้นเฉลี่ยที่วิเคราะห์ได้
$u(m_{\text{spike}})$	คือ ค่าความไม่แน่นอนของ CRM
m_{spike}	คือ ความเข้มข้นของ CRM ที่เติม

ผลการคำนวณค่าความไม่แน่นอนขยายของธาตุแคดเมียม สารหนู และตะกั่ว พบว่ามีค่าน้อยกว่า $\pm 25\%$ สรุปดังตารางที่ 9 ยกเว้นปรอทมีค่าความไม่แน่นอนขยายเท่ากับ $\pm 38\%$ ซึ่งมีค่าความไม่แน่นอนในการวิเคราะห์กว้างกว่าโลหะหนักอื่น ๆ เนื่องจากการวิเคราะห์ปรอทด้วยเทคนิค ICP-OES มีค่าความผิดพลาดเชิงระบบสูงกว่าดังเหตุผลที่กล่าวในข้อ 3.2 หากต้องการวิเคราะห์ปริมาณปรอทที่มีค่าความไม่แน่นอนลดลง จำเป็นต้องใช้เครื่องมืออื่นที่มีความจำเพาะเจาะจง ได้แก่ Mercury analyzer แต่อย่างไรก็ตามการศึกษครั้งนี้ไม่พบปริมาณปรอทในตัวอย่างไบกระท่อม รวมถึงปริมาณแคดเมียม, สารหนู และตะกั่วที่พบมีปริมาณน้อยกว่า LOQ เมื่อคำนวณความเข้มข้นในหน่วย mg/kg ตามสมการที่ (9) พิจารณาร่วมกับความไม่แน่นอนขยาย (U) จะเห็นว่าปริมาณโลหะที่วิเคราะห์ในตัวอย่างไบกระท่อมไม่เกินค่าตามมาตรฐานกระทรวงสาธารณสุขกำหนด ทั้งนี้หากวิเคราะห์ในตัวอย่างไบกระท่อมจากแหล่งที่มาอื่น ๆ แล้วผลการทดสอบมีค่าน้อยกว่า LOQ ของวิธี แสดงว่าวิธีทดสอบนี้ยังคงสามารถใช้ตัดสินได้ว่าเป็นไปตามกฎหมายกำหนดหรือไม่ จึงสรุปได้ว่าวิธีทดสอบปริมาณโลหะปรอท แคดเมียม สารหนู และตะกั่วที่ศึกษานี้สามารถใช้วิเคราะห์ในตัวอย่างไบกระท่อมได้

$$\text{ความเข้มข้น (mg/kg)} = \frac{C \times D \times V}{wt \times 1000} \quad (9)$$

- เมื่อ C คือ ความเข้มข้นของตัวอย่างที่หักลบค่าแบลนด์ (μg/L)
D คือ แฟกเตอร์สำหรับการเจือจาง
V คือ ปริมาตรของสารละลายตัวอย่าง (mL)
wt คือ น้ำหนักตัวอย่าง (g)

ตารางที่ 9 สรุปค่าความไม่แน่นอนของวิธีทดสอบ

ความเข้มข้นที่เติม (μg/L)	ปรอท	แคดเมียม	สารหนู	ตะกั่ว
ค่าความไม่แน่นอนจากการทดสอบความโอนเอียง, $u(R)$	0.149	0.090	0.080	0.091
ค่าความไม่แน่นอนจากการทดสอบความเที่ยง, $u(P)/P$	0.117	0.027	0.073	0.044
ความเข้มข้น, C (mg/kg)	0.75	0.75	7.5	7.5
ค่าความไม่แน่นอนรวม, u_c (mg/kg)	0.142	0.070	0.813	0.757
ค่าความไม่แน่นอนขยาย, U (mg/kg) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($k=2$)	0.28	0.14	1.63	1.51
ค่าความไม่แน่นอนขยาย, U (%)	37.9	18.8	21.7	20.2
LOQ $\pm U$ (mg/kg)	0.25 ± 0.09	0.05 ± 0.01	0.50 ± 0.11	0.50 ± 0.10
เกณฑ์กำหนดปริมาณตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข (mg/kg)	ไม่เกิน 0.5	ไม่เกิน 0.3	ไม่เกิน 5	ไม่เกิน 10

4. สรุป (Conclusion)

การตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีวิเคราะห์ทดสอบโลหะปรอท แคดเมียม สารหนู และตะกั่ว ในตัวอย่างใบกระท่อม โดยการเตรียมสารละลายตัวอย่างด้วยกรดเข้มข้นร่วมกับการย่อยด้วยไมโครเวฟที่ดัดแปลงมาจากวิธี AOAC แล้วตรวจวัดเชิงปริมาณด้วยเทคนิค ICP-OES เมื่อทำการศึกษาคู่คุณลักษณะเฉพาะต่าง ๆ ได้แก่ ความเป็นเส้นตรงในการวิเคราะห์ ซีดจำกัดการตรวจหา ซีดจำกัดการวัดปริมาณ ความไว และความเที่ยง พบว่าผลที่วิเคราะห์ได้เป็นไปตามเกณฑ์ยอมรับ รวมถึงค่าความไม่แน่นอนในการวัดน้อยกว่าเป้าหมายที่ตั้งไว้ (น้อยกว่า $\pm 25\%$) ยกเว้นปรอทซึ่งมีความไวและความไม่แน่นอนของการวัดที่ไม่อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด หากนำวิธีนี้ไปใช้ทดสอบหาปริมาณปรอทร่วมกับธาตุอื่น จำเป็นจะต้องพิจารณาเกณฑ์กำหนดปริมาณต่ำสุดตามที่กฎหมายกำหนดร่วมด้วย ดังนั้นการศึกษานี้สามารถนำไปวิเคราะห์ทดสอบและตัดสินปริมาณสารตกค้างในใบกระท่อมจากแหล่งต่าง ๆ ได้ตามวัตถุประสงค์

5. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

ขอขอบคุณบุคลากรกลุ่มวิจัยและพัฒนาเสริมและแก้ว กลุ่มวิจัยและพัฒนาสมุนไพร กองเทคโนโลยีชุมชน และกลุ่มผลิตภัณฑ์โลหะ กองเคมีภัณฑ์และผลิตภัณฑ์อุปโภค ที่ให้การสนับสนุน ให้คำปรึกษา ตลอดจนให้ความช่วยเหลือจนการศึกษานี้สำเร็จตามวัตถุประสงค์ ขอขอบคุณผู้บังคับบัญชาและบุคลากรกรมวิทยาศาสตร์บริการทุกท่านที่ทำให้การดำเนินงานลุล่วงไปได้ด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] วุฒิชัย รุ่งเรือง. พิษวิทยาของพืชกระท่อม. วารสารเภสัชกรรมโรงพยาบาล. 2563 พฤษภาคม - สิงหาคม;30(2):118 - 124.
- [2] Subtaeng S, Kruatian T, Jitpreeda P, Wanitsuwan W. Method validation for determination of mitragynine in Kratom leaf extract by high performance liquid chromatography. Bull Appl Sci. 2023 July - December;12(2):10 - 22. doi:10.60136/bas.v12.2023.621.
- [3] พระราชบัญญัติยาเสพติดให้โทษ ฉบับที่ 8 (พ.ศ. 2564). ราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 138 ตอนที่ 35 ก.
- [4] Guo C, Lv L, Liu Y, Ji M, Zang E, Liu Q, Zhang M, Li M. Applied analytical methods for detecting heavy metals in medicinal plants. Crit Rev Anal Chem. 2023;53(2):339 - 359. doi:10.1080/10408347.2021.1953371.
- [5] ประกาศกระทรวงสาธารณสุข เรื่อง เกณฑ์มาตรฐาน ค่าความบริสุทธิ์ หรือคุณลักษณะอื่นอันมีความสำคัญต่อคุณภาพ สำหรับตำรับผลิตภัณฑ์สมุนไพรที่ขึ้นทะเบียน แจ้งรายละเอียด หรือจดแจ้ง (พ.ศ. 2564). ราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 138 ตอนพิเศษ 294 ง. หน้า 6.
- [6] Ministry of Public Health, Department of Medical Sciences. Thai Herbal Pharmacopoeia 2021. Bangkok: Keawjawjom Printing & Publishing Suan Sunandha Rajabhat University; 2021.
- [7] Rashid M, Fardous Z, Chowdhury M, Alam M, Bari M, Moniruzzaman M, Gan SH. Determination of heavy metals in the soils of tea plantations and in fresh and processed tea leaves: an evaluation of six digestion methods. Chem Cent J. 2016;10(1):1-13. doi:10.1186/s13065-016-0154-3.
- [8] Mamani MCV, Aleixo LM, Abreu MF, Rath S. Simultaneous determination of cadmium and lead in medicinal plants by anodic stripping voltammetry. J Pharm Biomed Anal. 2005;37(4):709-713. doi:10.1016/j.jpba.2004.11.049.
- [9] Markandeya AG, Firke NP, Pingale SS, Salunke-Gawali S. Quantitative elemental analysis of Celocia

- argentea leaves by ICP-OES technique using various digestion methods. *Int J Chem Anal Sci.* 2013;4(4):175-181. doi:10.1016/j.ijcas.2013.08.003.
- [10] AOAC International. Lead cadmium zinc copper iron in foods. Atomic absorption spectrophotometry after microwave digestion. AOAC official methods of analysis 999.10. 21st ed. Rockville, Maryland: AOAC International; 2023.
- [11] U.S. Environmental Protection Agency (U.S. EPA). Inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry. Method 6010D (SW-846) revision 4: 2014. Washington, DC.: U.S. EPA; 2014.
- [12] Eurachem Method Validation Working group. Eurachem guide the fitness for purpose of analytical method-A laboratory guide to method validation and related topics. 2nd ed. Belgium: Eurachem Secretary; 2014.
- [13] AOAC International. Appendix F: guidelines for standard method performance requirements. AOAC official methods of analysis. Rockville, Maryland: AOAC International; 2016.
- [14] Barwick VJ, Ellison SLR. VAM Project 3.2.1. Development and harmonization of measurement uncertainty principles. part (d): protocol for uncertainty evaluation from validation data. Report no. LGC/VAM/1998/088. LGC (Teddington) Limited; 2000.

คำแนะนำในการจัดทำต้นฉบับ วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ กรมวิทยาศาสตร์บริการ Bulletin of Applied Sciences

บทความที่ส่งตีพิมพ์จะต้องไม่เคยตีพิมพ์หรืออยู่ในระหว่างการรอพิจารณาเพื่อตีพิมพ์ในวารสารอื่น บทความที่เสนอมาเพื่อตีพิมพ์อาจเขียนเป็นภาษาไทยหรือภาษาอังกฤษก็ได้ แต่บทความต้องมีทั้งสองภาษา ทั้งนี้บทความทุกเรื่องจะได้รับการพิจารณาตรวจแก้จากผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาที่เกี่ยวข้อง และกองบรรณาธิการขอสงวนสิทธิ์ในการตรวจแก้ไขต้นฉบับ และพิจารณาตีพิมพ์ตามลำดับก่อนหลัง

ความรับผิดชอบ

บทความที่ตีพิมพ์ในวารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ กรมวิทยาศาสตร์บริการ ถือเป็นผลงานทางวิชาการ และเป็นความเห็นส่วนตัวของผู้เขียน ไม่ใช่ความเห็นของกรมวิทยาศาสตร์บริการ หรือกองบรรณาธิการ ผู้เขียนต้องรับผิดชอบต่อบทความของตน และบทความที่ตีพิมพ์ในเล่มนี้ไม่เคยพิมพ์ในวารสารใดมาก่อน และจะไม่นำไปเพื่อพิจารณาตีพิมพ์ในวารสารอื่นภายใน 60 วัน

การเตรียมต้นฉบับและการส่งต้นฉบับ

1) บทความวิจัย (Research article) ประกอบด้วยหัวข้อ ดังนี้

- **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

จารวี เล็กสุขศรี¹, ก่อพงศ์ หงษ์ศรี²,ธีรวัธ อาจสำอางค์³

Jarawee Leksuksri¹, Korpong Hongsi², Theerat Ardsamang³

¹กองวัสดุวิศวกรรม กรมวิทยาศาสตร์บริการ

²ภาควิชาวนผลิตภัณฑ์ คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

³Engineering Materials Division, Department of Science Service

²Department of Forest Products, Faculty of Forestry, Kasetsart University

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

- **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)** : การเขียนเอกสารอ้างอิงให้ใช้ระบบเรียงตามตัวเลข ใส่หมายเลขในวงเล็บเหลี่ยม [] เรียงตามลำดับการอ้างอิงในเรื่อง เอกสารอ้างอิงทุกฉบับจะต้องมีการอ้างอิงหรือกล่าวถึงในบทความกรณีมีการอ้างอิงมากกว่า 1 รายการ ให้จัดเรียงดังนี้ รายการลำดับต่อเนื่องกันให้ใช้เครื่องหมาย - คั่น เช่น [1 - 3] รายการลำดับไม่ต่อเนื่องกันให้ใช้เครื่องหมาย, คั่น เช่น [1,3,5] รายการมีทั้งที่ลำดับต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่องกันให้ใช้เครื่องหมาย - และ , ร่วมกัน เช่น [1 - 2,4]

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

1. ตาราง : ให้ระบุลำดับที่ของตาราง หัวตารางให้จัดชิดขอบด้านซ้าย ชื่อตารางให้อยู่ด้านบนของตาราง
2. รูป : ให้ระบุลำดับที่ของรูป คำบรรยายรูปภาพให้อยู่ใต้รูปภาพ และจัดกึ่งกลางคอลัมน์ กรณีเป็นรูปถ่ายความละเอียดของรูปไม่ต่ำกว่า 300 dpi

2) บทความวิชาการ (Academic article) ประกอบด้วยหัวข้อ ดังนี้

- **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

จารวี เล็กสุขศรี¹, ก่อพงศ์ หงษ์ศรี²,ธีรวัธ อาจสำอางค์²

Jarawee Leksuksri¹, Korpong Hongsi², Theerat Ardsamang²

¹กองวัสดุวิศวกรรม กรมวิทยาศาสตร์บริการ

²ภาควิชาวนผลิตภัณฑ์ คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

¹Engineering Materials Division, Department of Science Service

²Department of Forest Products, Faculty of Forestry, Kasetsart University

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

- **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. **เนื้อหา :** นำเสนอตามหัวข้อหรือประเด็นที่ผู้นิพนธ์กำหนดเพื่อแสดงรายละเอียดของเรื่อง
 3. **สรุป (Conclusion) :** กล่าวถึงสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ ของเรื่องที่เขียนเพื่อให้ผู้อ่านเข้าใจ
 4. **กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement) :** กล่าวถึงบุคคล หรือหน่วยงานที่ให้การสนับสนุนการศึกษา
 5. **เอกสารอ้างอิง (References) :** ต้องอ้างอิงในระบบ Vancouver ใช้ระบบเรียงตามตัวเลข โดยใส่หมายเลขในวงเล็บเหลี่ยม [] เรียงตามลำดับการอ้างอิงในเรื่อง เอกสารอ้างอิงทุกฉบับจะต้องมีการอ้างอิงหรือกล่าวถึงในบทความ

การเขียนเอกสารอ้างอิงตามระบบ Vancouver

รูปแบบการเขียนเอกสารอ้างอิงแบบ Vancouver ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ

1. การอ้างอิงในเนื้อหา (In-text citation)
2. การอ้างอิงท้ายเล่ม หรือ เอกสารอ้างอิง (References) ดังนี้

1. **การอ้างอิงในเนื้อหา (In-text citation)** เมื่อนำผลงานของบุคคลอื่น ไม่ว่าบางส่วน หรือทั้งหมด มาอ้างอิงในบทความ ให้ใส่ตัวเลขตามลำดับของการอ้างอิง ในเครื่องหมายวงเล็บเหลี่ยม [] หลังชื่อผู้เขียน หรือ หลังข้อความที่อ้างอิง และใส่เลขลำดับเดิมในกรณีที่มีการอ้างอิงซ้ำทุกครั้ง ส่วนเอกสารอ้างอิงท้ายบท จัดเรียงตัวเลขตามลำดับของการอ้างอิงในเนื้อหา กรณีที่มีการอ้างอิงหลายรายการพร้อมกัน ในกรณีที่ตัวเลขลำดับการอ้างอิง เป็นลำดับที่ต่อเนื่องกันให้ใช้เครื่องหมายยัติภังค์ (-) คั่นระหว่างตัวเลข เช่น [1 - 3] แต่ถ้าตัวเลขลำดับการอ้างอิง ไม่ต่อเนื่องกันให้ใช้เครื่องหมายจุลภาค (,) คั่นระหว่างตัวเลข เช่น [2,4]

2. **การอ้างอิงท้ายเล่ม** เป็นการนำรายการอ้างอิงในเนื้อหา มารวบรวมไว้ในส่วนท้ายของบทความภายใต้หัวข้อ **เอกสารอ้างอิง (References)** โดยจัดเรียงตัวเลขตามลำดับ 1, 2, 3, ... ในเครื่องหมายวงเล็บเหลี่ยม [] ซึ่งตัวเลขต้องสอดคล้องกับลำดับตัวเลขของการอ้างอิงในเนื้อหา ข้อมูลที่นำมาเขียนเอกสารอ้างอิงจะแตกต่างกันตามประเภทของเอกสารที่นำมาอ้างอิง เช่น หนังสือ บทความวารสาร วิทยานิพนธ์ เอกสารประกอบการประชุม หนังสืออิเล็กทรอนิกส์ เอกสารจากอินเทอร์เน็ต ลิขสิทธิ์ มาตรฐาน เป็นต้น

รูปแบบการเขียนเอกสารอ้างอิงประเภทต่าง ๆ

หนังสือ (Book)

- ผู้แต่งคนไทยให้ใช้ชื่อและนามสกุล เช่น จิตตกานต์ อินเทียง.
- ผู้แต่งชาวต่างชาติให้ใช้ชื่อสกุล ตามด้วยอักษรย่อชื่อตัวและชื่อกลาง เช่น Muller AC.
 - » ผู้แต่งไม่เกิน 6 คน เช่น Peng Q, Zhou M. ให้ใช้เครื่องหมาย , คั่น
 - » ผู้แต่งมากกว่า 6 คน ให้ใช้ชื่อ 6 คนแรก ตามด้วย “และคณะ.” หรือ “et al.” โดยใช้เครื่องหมาย , คั่น เช่น Muller AC, Hachimura K, Hara S, Ogiso T, Aida M, Yasuoka K, et al.
- นิติบุคคล ให้ใช้ชื่อหน่วยงานใหญ่และตามด้วยหน่วยงานย่อย เช่น มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, คณะวิทยาศาสตร์.
- ไม่ปรากฏชื่อผู้แต่ง ให้ใช้ชื่อหนังสือแทนในตำแหน่งชื่อผู้แต่ง
- หนังสือที่มีเฉพาะบรรณาธิการ ให้ใช้ชื่อบรรณาธิการในตำแหน่งชื่อผู้แต่ง ตามด้วยจุลภาค และคำว่า บรรณาธิการ editor หรือ editors

- หนังสือที่มีทั้งผู้แต่งและบรรณาธิการหรือผู้แปล ให้ใช้ชื่อบรรณาธิการ/ผู้แปลไว้หลังชื่อหนังสือหรือครั้งที่พิมพ์ตามด้วยจุลภาค และคำว่า บรรณาธิการ editor editors หรือผู้แปล translator translators
- ชื่อหนังสือภาษาไทยให้ใช้ตามที่ปรากฏ ส่วนชื่อภาษาอังกฤษให้ใช้อักษรตัวใหญ่เฉพาะคำแรกของชื่อ (ชื่อเฉพาะให้ใช้อักษรตัวใหญ่) เช่น Nanotechnology research methods for foods and bioproducts, The availability of solar energy in Thailand
- ครั้งที่พิมพ์ให้ระบุการพิมพ์ครั้งที่ 2 เป็นต้นไป เช่น พิมพ์ครั้งที่ 3. 2nd ed. 3rd ed. 4th ed. โดยไม่ทำด้วย n
- หนังสือชุดที่มีหลายเล่มจบ ให้ใส่จำนวนเล่มทั้งหมด เช่น 5 ล. หรือ 5 vol. (ย่อมาจาก volume) อ้างอิงเพียงเล่มใดเล่มหนึ่ง โดยใส่ไว้หลังชื่อเรื่องหรือครั้งที่พิมพ์ เช่น เล่ม 5. หรือ Vol. 5.

รูปแบบ : ชื่อผู้แต่ง.✓ ชื่อหนังสือ.✓ ครั้งที่พิมพ์.✓ สถานที่พิมพ์.✓ สำนักพิมพ์.✓ ปีพิมพ์.✓ เล่ม.

ตัวอย่าง

- [1] จำนงค์ นพรัตน์, ชวดี นพรัตน์. โลหิตวิทยา (Hemato-Book). พิมพ์ครั้งที่ 2. สงขลา: ภาควิชาพยาธิวิทยา คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์; 2563.
- [2] พงษ์ธร แชอูย. สารเคมียาง. ปทุมธานี: ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ; 2548.
- [3] Padua GW, Wang Q, editors. Nanotechnology research methods for foods and bioproducts. Ames (IA): Wiley-Blackwell; 2012.
- [4] Hubschmann HJ. Handbook of GC-MS: fundamentals and applications. 3rd ed. Weinheim: Wiley-VCH; 2015.

บทหนึ่งในหนังสือ (Chapter in book)

รูปแบบ: ชื่อผู้แต่ง.✓ ชื่อบทความ.✓ ใน:หรือ In:✓ ชื่อบรรณาธิการ, บรรณาธิการ.✓ ชื่อหนังสือ.ครั้งที่พิมพ์.✓ สถานที่พิมพ์.✓ สำนักพิมพ์.✓ ปีพิมพ์.น. หรือ p. เลขหน้าเริ่มต้น-เลขหน้าสุดท้าย.

ตัวอย่าง

- [1] นงลักษณ์ ลิ้มกุล.การบริหารความต่อเนื่อง เพื่อฟื้นฟองูเล็ดกรรม. ใน: ธีระ กลลดาเรืองไกร, บรรณาธิการ. การบริหารความต่อเนื่องในภาวะฉุกเฉินของโรงพยาบาล. กรุงเทพฯ: คณะแพทยศาสตร์ ศิริราชพยาบาล มหาวิทยาลัยมหิดล; 2562. หน้า 33 - 60.
- [2] กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์. มาตรฐานทางเคมีสำหรับภาควิเคราะห์อาหารของกรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ DMSc F1074: การวิเคราะห์ปริมาณอะคริลาไมด์ในอาหารโดย LC/MS-MS. ใน: มาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์อาหาร เล่มที่ 5. นนทบุรี: กรม; 2560. หน้า 41 - 46.

บทความวารสาร (Journal article)

- วารสารภาษาไทย ให้เขียนชื่อเต็ม
- วารสารภาษาอังกฤษ ใช้เขียนชื่อย่อของวารสารตามแบบของ index medicus (<http://cassi.cas.org>) หรือ (<http://www2.bg.am.poznan.pl/czasopisma/medicus.php?lang=eng>)
- หากเป็นวารสารชื่อสั้น ๆ คำเดียว มักจะไม่ย่อชื่อวารสาร

- เลขหน้าสุดท้ายให้ใส่เฉพาะเลขที่ไม่ซ้ำกับเลขหน้าแรก ยกเว้นเลขโรมันหรือเลขที่มีตัวอักษรต่อท้าย เช่น หน้า 4 - 12 ให้ระบุว่าเป็น 4 - 12.
หน้า 22 - 28 ให้ระบุว่าเป็น 22 - 8.
หน้า 1012A - 1045A ให้ระบุว่าเป็น 1012A - 1045A.

รูปแบบ : ชื่อผู้แต่ง.✓ ชื่อบทความ.✓ ชื่อวารสาร.✓ ปีที่พิมพ์;ปีที่(ฉบับที่):เลขหน้าเริ่มต้น - เลขหน้าสุดท้าย.

ตัวอย่าง

- [1] จิตตกานต์อินทียง. การปรับตั้งเครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ (ตอนที่ 1). UP DATE สมท.สาร. 2549 มกราคม - มีนาคม;11(1):13 - 6.
[2] Intiang J, Sirichote W, Boonsanit S. Development of automatic calibration system for electronic balances. Bull Appl Sci. 2019;8(8):40 - 7.

วิทยานิพนธ์ (Thesis/Dissertation)

ประเภท/ระดับปริญญา เช่น วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต dissertation thesis ฯลฯ

รูปแบบ: ชื่อผู้แต่ง.✓ ชื่อเรื่อง✓ [ประเภท/ระดับปริญญา].✓ เมืองที่พิมพ์:✓ มหาวิทยาลัย;✓ ปีที่รับปริญญา.
ตัวอย่าง

- [1] Kaplan SJ. Post-hospital home health care: the elderly's access and utilization [dissertation]. St. Louis, MO: Washington University; 1995.
[2] Tesema BH. 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" [thesis]. Addis Ababa: Ethiopia; 2018.
[3] ประเสริฐ ประภาณภินันท์. เปรียบเทียบเทคนิคการสกัดสารแคปไซซินในพริกพันธุ์ต่าง ๆ [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต]. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์; 2544.
[4] นิจจวาทูธรรม. คำโครงความผิดและกลิ่นของพริกแห้ง [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรดุษฎีบัณฑิต]. สงขลา: มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์; 2557.

สิทธิบัตร (Patent)

รูปแบบ: ชื่อผู้ประดิษฐ์.✓ ผู้ประดิษฐ์/inventor;✓ ชื่อผู้ขอรับสิทธิบัตร.✓ ผู้ขอรับสิทธิบัตร/assignee.✓
ชื่อสิ่งประดิษฐ์.✓ ประเทศที่ออกสิทธิบัตร✓ สิทธิบัตร/patent✓ รหัสประเทศ✓ เลขที่สิทธิบัตร.✓
วัน เดือน ปี/year month day ที่จดสิทธิบัตร.

หมายเหตุ; กรณีที่ผู้ประดิษฐ์ และผู้ขอรับสิทธิบัตรเป็นบุคคลเดียวกัน ให้ใช้ ผู้ประดิษฐ์และผู้ขอรับสิทธิบัตร/inventor(s) and assignee

ตัวอย่าง

- [1] มัณฑนา เอื้อวิทยา, ผู้ประดิษฐ์; บริษัทมหัทธิพาณิชยเชียงใหม่ จำกัด, ผู้ขอรับสิทธิบัตร. องค์ประกอบสมุนไพรรจากกวาวเครือ. ประเทศไทย สิทธิบัตรไทย 8919. 10 พ.ค. 2542.
- [2] Eppler RA, O'conor EF, inventors and assignee. Composition and process for glazing ceramic ware. United States patent application US appl. 3871890. 1975 Mar 18.
- [3] Pagedas AC, inventor; Ancel Surgical R&D Inc., assignee. Flexible endoscopic grasping and cutting device and positioning tool assembly. United States patent US 20020103498. 2002 Aug 1.
- [4] Seiko Ohkubo, inventor; Seiko Ohkubo, assignee. Acupressure appliance for medical treatment. United Kingdom patent GB 2 350 301. 2000 Nov 29.
- [5] Tintara H, inventor; Prince of Songkla University, assignee. Amniotomy training model. Thai petty patent 7488. 2012 Sep 18.

มาตรฐาน (Standards)

รูปแบบ : ชื่อหน่วยงานหรือสมาคมวิชาชีพ.✓ ชื่อเรื่อง.✓ หมายเลขมาตรฐาน.✓ สถานที่พิมพ์✓ สำนักพิมพ์; ✓ ปีพิมพ์.

ตัวอย่าง

- [1] British Standard Institution (BSI). Foodstuffs-determination of sucralose-high performance liquid chromatographic method. BS EN 16155: 2012. London, UK: BSI; 2012.
- [2] International Organization for Standardization (ISO). Rubber, vulcanized or thermoplastic-determination of tension set under constant elongation, and of tension set, elongation and creep under constant tensile load. ISO 2285: 2019. Geneva, Switzerland: ISO; 2019.
- [3] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ). มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม วิธีทดสอบตะกั่วและแคดเมียมที่ละลายจากภาชนะเซรามิก ภาชนะเซรามิกแก้ว และภาชนะแก้วที่ใช้กับอาหาร. มอก. 32-2546. กรุงเทพฯ: สมอ.; 2546.

กฎหมายที่ประกาศในราชกิจจานุเบกษา

รูปแบบ: ชื่อหน่วยงาน.✓ ชื่อกฎหมาย.✓ ราชกิจจานุเบกษา เล่มที่... ตอน...,✓ วัน เดือน ปีพิมพ์.✓
หน้าเริ่มต้น - หน้าสิ้นสุด

ตัวอย่าง

- [1] กระทรวงสาธารณสุข. พระราชบัญญัติอาหาร พ.ศ. 2522 ประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 389 (พ.ศ. 2561) เรื่อง วัตถุเจือปนอาหาร (ฉบับที่ 5). ราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 35 ตอนพิเศษ 178 ง, 25 กรกฎาคม 2561. 521 - 523.
- [2] สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา. ประกาศสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา เรื่อง หลักเกณฑ์การพิจารณาขึ้นทะเบียนตำรับยาแผนโบราณเกี่ยวกับมาตรฐานการปนเปื้อนเชื้อจุลินทรีย์ และโลหะหนัก. ราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 121 ตอนพิเศษที่ 43 ง, 21 เมษายน 2547. 40 - 42.

เอกสารอิเล็กทรอนิกส์ (รูปแบบทั่วไป)

รูปแบบ : ชื่อผู้แต่ง.✓ ชื่อเรื่อง [ประเภทของสื่อ].✓ ปีพิมพ์✓ [เข้าถึงเมื่อ วัน เดือน ปี หรือ cited ปี เดือน วัน].
✓ เข้าถึงได้จาก/Available from: http://...

หมายเหตุ: ประเภทของสื่อ เช่น [อินเทอร์เน็ต] [Internet] [ซีดีรอม] [CD-ROM] [ดีวีดี] [DVD] เป็นต้น

หนังสืออิเล็กทรอนิกส์ (E-Book)

รูปแบบ : ชื่อผู้แต่ง.✓ ชื่อหนังสือ [อินเทอร์เน็ต/Internet].✓ ครั้งที่พิมพ์.✓ สถานที่พิมพ์.✓ สำนักพิมพ์.✓
ปีพิมพ์✓ [เข้าถึงเมื่อ วัน เดือน ปี/cited ปี เดือน วัน].✓ เข้าถึงได้จาก/Available from: http://...

ตัวอย่าง

- [1] วิชัย โชควิวัฒน์. เหลียวหลังแลหน้าไวรัสโคโรนา-2019 [อินเทอร์เน็ต]. นนทบุรี: สำนักงานคณะกรรมการสุขภาพแห่งชาติ; 2563 [เข้าถึงเมื่อ 3 พฤษภาคม 2564]. เข้าถึงได้จาก: <https://infocenter.nationalhealth.or.th/Ebook/COVID19DrVichai/book.html#p=1>
- [2] Knoop KJ, Stack LB, Storrow AB, Thurman J. The atlas of emergency medicine [Internet]. 5th ed. New York: McGraw-Hill; 2021 [cited 2021 Apr 27]. Available from: <https://accessmedicine.mhmedical.com/book.aspx?bookid=2969>

บทความวารสารอิเล็กทรอนิกส์ (e-Journal)

รูปแบบ : ชื่อผู้แต่ง.✓ ชื่อบทความ.✓ ชื่อวารสาร✓ อินเทอร์เน็ต/Internet].✓ ปีที่พิมพ์✓ [เข้าถึงเมื่อ วัน เดือน ปี/cited ปี เดือน วัน];ปีที่(ฉบับที่):เลขหน้าเริ่มต้น - เลขหน้าสุดท้าย.✓ เข้าถึงได้จาก/
Available from: http://...

ตัวอย่าง

- [1] นาดยา อังคนาวิน. ผลของการใช้สตีเวียและมอลทิทอลต่อสมบัติทางเคมี-กายภาพการทดสอบประสาทสัมผัส คุณค่าทางโภชนาการและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของเซอรเบทหม่อน. วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี) [อินเทอร์เน็ต]. ก.ค. - ธ.ค. 2562 [เข้าถึงเมื่อ 16 ส.ค. 2563];11(22):78 - 90. เข้าถึงได้จาก: <http://ejournals.swu.ac.th/index.php/SWUJournal/article/view/12118/10268>
- [2] Sang L. Optimization of determination of sucralose in drink by HPLC. J Econ Sci Res [Internet]. 2019 [cited 2021 May 3];2(3): 50 - 4. Available from: <http://doi.org/10.30564/jesr.v2i3.1023>
- [3] Sorbara JC, Ngo HL, Paimert MP. 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 Anal Methods [Internet]. 2021 [cited 2021 Apr 3];14: 44 - 53. Available from: <https://doi.org/10.1007/s12161-020-01849-6>

บทความวารสารที่มีหมายเลข Digital Object Identifier (DOI)

รูปแบบ : ชื่อผู้แต่ง.✓ ชื่อบทความ.✓ ชื่อวารสาร✓ ปีที่พิมพ์;ปีที่(ฉบับที่):เลขหน้าเริ่มต้น - เลขหน้าสุดท้าย.
✓ doi:✓ xxxxxxxxxxxx.

ตัวอย่าง

- [1] Kang C, Ma H, Li Y, Zhang C, Hong Y, Shao M. Determination of acrylamide in foods by automatic accelerated solvent extraction and gas chromatography-mass spectrometry. *Acta Chromatogr.* 2020;33(1):64 - 72. doi: 10.1556/1326.2020.00755.
- [2] Driver CN, Laporta ML, Bergese SD, Urman RD, DiPiazza F, Overdyk FJ, et al. Frequency and temporal distribution of postoperative respiratory depressive events. *Anesth Analg.* 2021;132:1206 - 14. doi: 10.1213/ANE.0000000000005478.

ข้อแนะนำการส่งบทความ

รายการตรวจสอบก่อนส่งบทความ

ในขั้นตอนการส่งบทความ ผู้นิพนธ์ต้องตรวจสอบและปฏิบัติตามข้อกำหนดรายการตรวจสอบการส่งทุกข้อ ดังต่อไปนี้ และบทความอาจถูกส่งคืนให้กับผู้แต่งกรณีที่ไม่ปฏิบัติตามข้อกำหนดทั้งหมด

- รับรองว่า บทความเป็นผลงานของผู้นิพนธ์ และยังไม่เคยส่งหรือกำลังส่งตีพิมพ์วารสารอื่น
- รับรองว่า ผลการศึกษา การบันทึก และการรายงานปราศจากการเสกสรรปั้นแต่งขึ้นเอง (Fabrication)
- รับรองว่า สารเนื้อหาการวิจัย เครื่องมือ กระบวนการ ปราศจากการปลุกปั่นยั่วยุถ่ายเท (Manipulate) อันเปลี่ยนแปลงหรือละเลยผลการศึกษาโดยไม่อธิบายหรือไม่นำเสนออย่างถูกต้องตามข้อมูลในแบบลงข้อมูล
- รายชื่อคณะผู้นิพนธ์เป็นตามความเป็นจริง และเป็นผู้มีส่วนร่วมทางปัญญา (Intellectual contribution) ต่อบทความวิชาการ
- มีการให้ URLs ที่เข้าถึงได้ สำหรับเอกสารที่อ้างอิงจากอินเทอร์เน็ต
- ไฟล์บทความอยู่ในรูปแบบ Microsoft word การกระจายตัวอักษรให้ขอบขวามีขนาดเท่ากัน โดย เลือกรการจัดตำแหน่งการกระจายแบบไทย (Thai distributed) ใช้ระยะห่างบรรทัดปกติ (Single-spaced) ใช้ตัวอักษรแบบ Cordia New ทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ และจัดเตรียมบทความตามข้อกำหนด ทั้งในด้านของรูปแบบและการเขียนเอกสารอ้างอิงแบบ Vancouver ตามคำแนะนำสำหรับผู้นิพนธ์ (Author guidelines)
- การทำงานผ่านระบบวารสารออนไลน์ ทางวารสารจะติดต่อและแจ้งข้อความต่าง ๆ ผ่านอีเมล ของท่านที่ได้กรอกเข้าสู่ระบบเป็นหลัก เพื่อให้เข้ามารับ-ส่ง ข้อมูลผ่านในระบบเว็บไซต์วารสารฯ (การตอบกลับไม่ใช้การ reply เมล) ดังนั้นขอให้ตรวจสอบกล่องจดหมายของท่านว่าได้รับอีเมลของวารสารฯ หากไม่ได้รับอีเมลใดๆ หลังจากส่งบทความนี้แล้ว (บางครั้งอาจตกอยู่ใน spam/junk mail) กรุณาติดต่อที่ tci.thai@gmail.com หรือ passachon@dss.go.th
- กรุณาให้ชื่อและหมายเลขโทรศัพท์มือถือของท่านไว้ใน ข้อความถึงบรรณาธิการ (Comment for editor) และ กฉบับที่กรอก รวมถึงหากมีข้อสงสัยสามารถสอบถามได้ในช่องทางดังกล่าว

นโยบายส่วนบุคคล

ชื่อและที่อยู่อีเมล หรือข้อมูลส่วนบุคคล ที่กรอกในเว็บไซต์วารสารนี้จะใช้สำหรับวัตถุประสงค์ที่ระบุไว้ในงานวารสารเท่านั้นและจะไม่เปิดเผยเพื่อวัตถุประสงค์ในกิจกรรมอื่น ๆ หรือให้กับบุคคลหรือหน่วยงานอื่นใดทราบ

การคุ้มครองข้อมูลส่วนบุคคล

1. วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ กรมวิทยาศาสตร์บริการ จะเคร่งครัดกรณีบทความมีการคัดลอก การนำเสนอรูปภาพ หรือการนำผลงานผู้อื่นมาเป็นส่วนหนึ่งของบทความเพื่อตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสาร

2. วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ กรมวิทยาศาสตร์บริการ จะไม่เปิดเผยรายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ ให้แก่ผู้นิพนธ์หรือบุคคลอื่น

กรมวิทยาศาสตร์บริการให้ความสำคัญกับการคุ้มครองข้อมูลส่วนบุคคลอย่างเคร่งครัดและปฏิบัติตามกฎหมาย และข้อบังคับทั้งหมดเกี่ยวกับการปกป้องข้อมูลส่วนบุคคลของท่าน ท่านสามารถอ่านรายละเอียดแนวนโยบายและแนวปฏิบัติในการคุ้มครองข้อมูลส่วนบุคคล ได้ที่ <https://www.dss.go.th/images/ict/PrivacyPolicy2564.pdf>

Submission Guidelines

Submission preparation checklist

As part of the submission process, authors are required to check off their submission's compliance with all of the following items, and submissions may be returned to authors that do not adhere to these guidelines.

- Certify that the manuscript is authors' original work, has not been published before, and is not being considered for publication elsewhere.
- Confirm that results, records and reports are presented clearly, honestly without fabrication, falsification.
- When referring to a source accessed from the internet, provide the URLs and a retrieval date in the reference list.
- Certify that the experiment's independent variables are not changed, altered, or influenced on purpose by the researchers (Experimental manipulation).
- Prepare manuscript in Microsoft Word format, align paragraph in Thai distributed, use single-spaced lines, Cordia New font for both Thai and English, and Vancouver referencing style. More stylistic and reference list requirements are outlined in the Author Guidelines.
- As part of online submission process, the journal will contact authors through your registered e-mail address, please check your inbox regularly. If it is not there, please checking your spam/junk mail folder. If you still experience difficulties when submission, please contact tcj.thai@gmail.com or passachon@dss.go.th
- Authorship list should be honestly reflected their intellectual contributions to the work.
- Provide authors, name and mobile phone number in "Comment for Editor" and save. For inquiries, please also send to "Comment for Editor".

Author guidelines

Manuscript preparation and submission

For Research and Academic article

- Title in Thai and English languages. Use font of Cordia New style, bold, size 18 and centered align. For English title; only the first word has a capital letter.
- Name of the author and co-author: both in Thai and English. Use font of Cordia New style, regular, size 12 and centered align. Use superscript numbers (1, 2, 3...) before name to represent author's address and e-mail.

Example

Pranee Junlar^{1*}, Nithiwach Nawaukkaratharnant²

¹Division of Engineering Materials, Department of Science Service

²Metallurgy and Materials Science Research Institute, Chulalongkorn University

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

Research article

1. **Abstract** in Thai and English languages. Use font of Cordia New style, regular, size 14. The usual sections should briefly contain objectives, methods, results and conclusion.
2. **Keywords** in Thai and English, not more than 3-5 words for each language. Use font of Cordia New style, regular, size 12.
3. **Content** contains:
 - Introduction:
 - » Main topic: Cordia New style, bold, size 16
 - » Sub topic: Cordia New style, bold, size 14
 - » Content: Cordia New style, regular, size 14
 - Experimental methods:
 - » Main topic: Cordia New style, bold, size 16, left align.
 - » Sub topic: Cordia New style, bold, size 14
 - » Content: Cordia New style, regular, size 14
 - Results and discussion:
 - » Main topic: Cordia New style, bold, size 16, left align.
 - » Sub topic: Cordia New style, bold, size 14
 - » Content: Cordia New style, regular, size 14
 - Conclusion:
 - » Topic: Cordia New style, bold, size 16, left align.
 - » Content: Cordia New style, regular, size 14
 - Acknowledgement:
 - » Topic: Cordia New style, bold, size 16, left align.
 - » Content: Cordia New style, regular, size 14
 - References: Bulletin of Applied Sciences uses the Vancouver referencing style.
 - » A number in square brackets, [], should be assigned in numerical order to each reference as it is cited in the text.
 - » Reference lists should be listed numerically at the end of the article, in the same order in which they were cited in text.
 - » If citing more than one reference, write a number for each separated by comma e.g. [1, 3].
 - » If citing more than one reference which is numbered consecutively, include reference numbers in increasing order separated by hyphen e.g. [1-3].
4. **Table and Figure:**
 - Use Cordia New style, regular, size 12
 - Table: Every table must have a caption that includes the table number on the top of the table, with left align.
 - Figure: Every figure must have a caption that includes the figure number on the bottom of the figure, with centered align. Image resolution should not less than 300 dpi.

Academic article

1. **Abstract** in Thai and English languages. Use font of Cordia New style, regular, size 14. The usual sections should briefly contain objectives, methods, results and conclusion.
2. **Keywords** in Thai and English, not more than 3-5 words for each language. Use font of Cordia New style, regular, size 12.
3. **Content contains:**
 - Introduction:
 - » Main topic: Cordia New style, bold, size 16
 - » Sub topic: Cordia New style, bold, size 14
 - » Content: Cordia New style, regular, size 14
 - Content: states the written work in the topic.
 - Conclusion: should contain the most important message of the study and author perspective/suggestion.
 - Acknowledgement: should contain financial support and other research contributions.
 - References: Bulletin of Applied Sciences uses the Vancouver referencing style.
 - » A number in brackets, [], should be assigned in numerical order to each reference as it is cited in the text.
 - » Reference lists should be listed numerically at the end of the article, in the same order in which they were cited in text.

Copyright notice

- The manuscript must never been published elsewhere or is under consideration by another journal.
- The manuscript can be written in either Thai or English. Abstract must be in both Thai and English.
- The submitted manuscript will be sent to at least three experts in the field (referee) to evaluate the manuscript by double-blind (double-blind peer review).
- BAS' editors reserve the right to pre-screening the manuscript and request the revise version.

Responsibility: The published article is an academic work with authors' perspective not by The Department of Science Service or editorial board. Authors are responsible for their works. The published article must never been published elsewhere and is not under consideration by another journal within 60 days.

Privacy statement

Personal data protection

On BAS website, we collect and use your personal information (name, email, and other personal data) to facilitate efficiency and productivity in BAS publishing process. BAS is dedicated to protecting your personal information and does not share your personal data with anyone outside the organization.

1. BAS is strictly concerned about plagiarism and unacknowledged others' work applies not only to text, but also to illustrations/graphs of the submitted manuscript.
2. BAS does not disclose reviewers' information to authors or other unauthorized persons.

Department of Science Service is aware of Personal Data Protection Act (PDPA) requirements and comply with PDPA law. Information about policy and personal data management guideline, please visit <https://www.dss.go.th/images/ict/PrivacyPolicy2564.pdf>

ดรราชনীคำสำคัญ

	หน้า		หน้า
ก		พ	
กระท่อม	79	ไพรมารีอะโรมาติกเอมีน	37
การประมวลผลภาพดิจิทัล	27	โพลีเอไมด์	37
การเยื้องศูนย์กลางแนวแรง	12		
การสกัดเส้นใยอาหารด้วยเอนไซม์	66	ม	
การสอบเทียบ	12, 27	มอก.2424-2565	52
การหมุน	12		
		ล	
จ		ลิกวิตโครมาโทกราฟี-แทนเดม	37
จอแสดงผลแบบ 7 ส่วน	27	แมสสเปกโตรเมตรี	
ค		ว	
เครื่องทดสอบแรงดึง/แรงกด	12	วัสดุสัมผัสอาหาร	37
ด		ส	
ดิจิทัลเทอร์โม-ไฮโกรมิเตอร์	27	สปีนบอนด์	52
แคดเมียม	79	สารหนู	79
		เส้นใยอาหารที่ละลายน้ำได้	66
ต			
ตะกั่ว	79	ห	
		หน้ากากอนามัยใช้ครั้งเดียว	52
น		โพลีเอไมด์	12
ไนลอนสีดำ	37		
		ศ	
ป		เศษเหลือทิ้งของไม้ฝรั่ง	66
ปรอท	79		
ผ			
แผ่นกรอง	52		

Keyword index

	Page		Page
A		L	
Arsenic	80	Lead	80
Asparagus by-products	67	Liquid chromatography - tandem	38
ASTM F2100-21	52, 53	mass spectrometry	
B		M	
Black nylon	38	Meltblown	53
		Mercury	80
C		P	
Cadmium	80	Polyamide	38
Calibration	13, 28	Primary aromatic amine	38
D		R	
Digital thermo-hygrometer	28	Rotation	13
Digital image processing	28		
E		T	
Enzymatic dietary fiber extraction	67	Tension/compression testing	13
		machine	
F		TIS 2424-2565	53
Food contact materials	38		
Force misalignment	13	S	
		7-Segment Display	28
I		Single use mask	53
ICP-OES	79, 80	Soluble dietary fibers	67
		Spunbond	53
K		Standard load cell	13
Kratom	80		

គរុធម្មនិព្វិន័យ

	หน้า		หน้า
ก		ว	
ไกรศักดิ์ ยืนย้ง	12	วิชัย กาญจนพัฒน์	12
		วีระ สวนโธสง	79
จ			
จุฑาทิพย์ ลาภวิบูลย์สุข	37	ย	
เจตนา ทองใบ	27	ยุทธศักดิ์ สุบกาวี	66
ช		ศ	
ชัยยุทธ มืงาม	52	ศรสวรรค์ สิทธิพงศ์	52
		ศิวะ สิทธิพงศ์	52
ณ			
ณัฐพงศ์ นิลจรัสวงษ์	52	ส	
ณัฐพล พรนำพา	52	สุบงกช ทรัพย์แดง	79
		สมภาพ ลาภวิบูลย์สุข	37
ธ		สายจิต ดาวสุโข	79
ธาริณี ศรีดารา	79		
พ			
พิสิฐ หอมเชย	12		
พัฒน์นิภา วงศ์พิชัย	37		
ไพโรจน์ สังขไพฑูรย์	52		
ร			
เรวดี มีสัตย์	66		

Author index

	Page		Page
C		T	
Chaiyoot Meengam	52	Tharinee Sridara	79
J		W	
Jettana Tongbai	27	Wichai Khanjanapat	12
Jutathip Lapviboonsuk	37	Weera Suanthaisong	79
K		Y	
Kraisak Yuenyoung	12	Yuttasak Subkaree	66
N			
Nattapon Pornnumpa	52		
Nuttapong Niljrusvanit	52		
P			
Patnipa Wongpichai	37		
Phairote Sungkhaphaitoon	52		
Pisit Hormchoey	12		
R			
Rewadee Meesat	66		
S			
Saijit Daosukho	79		
Sompop Lapviboonsuk	37		
Sornsawan Sidthipong	52		
Siva Sitthipong	52		
Subongkoch Subtaeng	79		

[illegible]

This image shows a full page of white paper with horizontal dashed lines, typical of primary-ruled notebook paper. The lines are evenly spaced and run across the width of the page. There are no margins, text, or other markings present.

[illegible]

[illegible]

[illegible]

[illegible]

[illegible]



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 : bas@dss.go.th