



วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์
กรมวิทยาศาสตร์บริการ

BULLETIN OF APPLIED SCIENCES



ปีที่ 14 ฉบับที่ 1 มกราคม - มิถุนายน 2568

Vol. 14 No.1 January - June 2025

ISSN 2822-1532 (Print)

ISSN 2822-1540 (Online)





**วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์
กรมวิทยาศาสตร์บริการ
BULLETIN OF APPLIED SCIENCES**

ปีที่ 14 ฉบับที่ 1 มกราคม - มิถุนายน 2568

Vol. 14 No. 1 January - June 2025

วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ กรมวิทยาศาสตร์บริการ

Bulletin of Applied Sciences

ISSN 2822-1532 (Print) ISSN 2822-1540 (Online)

ปีที่ 14 ฉบับที่ 1 มกราคม – มิถุนายน 2568, Vol. 14 No. 1 January - June 2025

วารสารฉบับนี้ผ่านเกณฑ์ประเมินคุณภาพวารสาร กลุ่มที่ 1
ของศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (Thai-Journal Citation Index Centre : TCI)

วัตถุประสงค์

1. เพื่อเผยแพร่ผลงานวิชาการ ผลงานวิจัย ของนักวิจัย นักวิทยาศาสตร์ ให้เป็นที่ประจักษ์แก่ภาครัฐ ภาคเอกชน นักวิชาการ ผู้ประกอบการและประชาชนทั่วไป
2. เพื่อให้สามารถนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์ในทางวิชาการ การอ้างอิง และการประกอบกิจการ ภาคการผลิตและอุตสาหกรรม

เจ้าของ

กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม

นโยบายการจัดพิมพ์

วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ กรมวิทยาศาสตร์บริการ รับผิดชอบต่อความวิจัย บทความวิชาการ และ บทความปริทัศน์ จากผู้เขียนทั้งภายในและภายนอกหน่วยงาน ในสาขาเคมี ฟิสิกส์ เทคโนโลยีชีวภาพ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร วัสดุศาสตร์ มาตรฐานวิทยาศาสตร์ หรือ วิทยาศาสตร์ประยุกต์

บรรณาธิการวิชาการ

ดร. ภูวดิ์ ตูจินดา

ผู้อำนวยการสถาบันเทคโนโลยีดิจิทัลวิทยาศาสตร์บริการ
กรมวิทยาศาสตร์บริการ

บรรณาธิการจัดการ

นางสาวอุดมลักษณ์ เวียนงาม

ผู้อำนวยการหอสมุดวิทยาศาสตร์ ดร.ตัว ลพานุกรม
สถาบันเทคโนโลยีดิจิทัลวิทยาศาสตร์บริการ
กรมวิทยาศาสตร์บริการ

กองบรรณาธิการ

ศ.ดร. ดวงดาว อัจฉรงค์
ศ.ดร. ภาวิณี ชินะโชติ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
สมาคมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอาหารแห่งประเทศไทย
(FoSTAT)

รศ.ดร. กรรณิการ์ สหกะโร
รศ.ภญ.ดร. จิตติมา ลักนากุล
รศ.ดร. จุฑาญ จักรมณี
รศ.ดร. อธิ์ ชาวนนท์ปัญญา
รศ.ดร. นาภาพร ยิ่งวิเศษ
รศ.ดร. นุเรศ เชื้อสุวรรณ
รศ.ดร. นาทิพย์ วิภาวิน
รศ.ดร. พิมพา หอมนิรันดร์
รศ.ดร. ภัทธินฤณ วุฒิตติพล
รศ.ดร. วิภาวรัตน์ เชื้อชวด ชัยสิทธิ์
รศ.ดร. วิษณุ เพชรภา
รศ.ดร. วิธนา สาคิตปัดติพันธ์
รศ.ดร. อติตยา ศิริปัญญาพนธ์
รศ.ดร. อรทัย จงประทีป
ผศ.ดร. ชัยรัตน์ ตั้งดวงดี
ผศ.ดร. เทอดเกียรติ ลิ้มปิที่ปราการ
ผศ.ดร. ปริญดา เพ็ญโรจน์
ผศ.ดร.ทพญ. ปิยะนารถ เอกวรพจน์
ผศ.ดร. พิระวัฒน์ นันทรวงศ์
ผศ.ดร. พุทธิรักษา วรานุกุล
ผศ.ดร. ยาวภา หล่อเจริญผล

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมมาธิราช
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
มหาวิทยาลัยนเรศวร
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
มหาวิทยาลัยมหิดล
มหาวิทยาลัยมหิดล
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
มหาวิทยาลัยศิลปากร
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผศ.ดร. รักฤดี สารธิดา
 ผศ.ดร. รัฐภูมิ ปรีชาตปรีชา
 ผศ. สมพร ชัยอารีย์กิจ
 ดร. นงนภัศ ดวงดี
 ดร. นุชนาฏ ณะระนอง
 ดร. ประसार คิตติ
 ดร. มาณพ สิทธิเดช

ดร. ลดา พันธุ์สุพุมธนา
 ดร. วราวุฒิ ศุภมิตรมงคล
 ดร. สัณชัย ยอดมณี
 ดร. อดิชา ธเนศนิตย
 ดร. อนุพงษ์ จูมแพง
 นายชาติรี วงษ์แก้ว
 นายวีระ ตูลาสสมบัติ
 ดร. จิรวัฒน์ สลุดอยู่
 ดร. จิราภรณ์ ใจริญภัทรปรีดา
 ดร. จิโรจ ไชยสาร
 ดร. วรพล นันสุ
 ดร. ศิรินาถ บุญโพธิ์

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

ฝ่ายบริหารจัดการ

นางสาวจอย ผิวสะอาด
 นางสาวอรรชพร วายุภักตร์
 นางสาวทิพย์วาทิ กรรัมย์
 นางเกศินี เกียรติคุณ

กรมวิทยาศาสตร์บริการ
 กรมวิทยาศาสตร์บริการ
 กรมวิทยาศาสตร์บริการ
 กรมวิทยาศาสตร์บริการ

ฝ่ายเผยแพร่ประชาสัมพันธ์

นายอภิวัฒน์ ช้างรบ
 นางสาวภาวิศา จันทร์ขอนแก่น

กรมวิทยาศาสตร์บริการ
 กรมวิทยาศาสตร์บริการ

การจัดพิมพ์และเผยแพร่

จัดพิมพ์ปีละ 2 ฉบับ กำหนดออกเผยแพร่เดือน มกราคม - มิถุนายน และ กรกฎาคม – ธันวาคม

จำนวนพิมพ์

150 เล่ม

ค่าธรรมเนียมการตีพิมพ์

ไม่มีค่าใช้จ่ายสำหรับการตีพิมพ์ในวารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ กรมวิทยาศาสตร์บริการ

สำนักงานวารสาร

สถาบันเทคโนโลยีดิจิทัลวิทยาศาสตร์บริการ
 กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม
 75/7 ถนนพระรามที่ 6 เขตราชเทวี กรุงเทพฯ 10400
 โทรศัพท์ 0 2201 7258, 0 2201 7291
 เว็บไซต์ <https://ph03.tci-thaijo.org/index.php/BAS>
 e-mail: bas@dss.go.th

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

พิมพ์ที่

บริษัท ชัคเซสส์พลีเคชั่น 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) ฉบับนี้ได้ผ่านการรับรองคุณภาพวารสารวิชาการเพื่อเข้าสู่ฐานข้อมูล TCI ใน “วารสารกลุ่มที่ 1” มีวัตถุประสงค์เพื่อเผยแพร่ผลงานวิชาการ ผลงานวิจัย ให้เป็นที่ประจักษ์แก่ภาครัฐ ภาคเอกชน นักวิชาการ ผู้ประกอบการ และประชาชนทั่วไป มุ่งเน้นให้สามารถนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์ในทางวิชาการ ตลอดจนอ้างอิงในการประกอบกิจการภาคการผลิตและอุตสาหกรรมได้ วารสารได้จัดให้มีระบบ Peer review จากผู้ทรงคุณวุฒิที่มีความเชี่ยวชาญหลากหลายสาขาวิชา และมีการปรับปรุงรูปแบบให้น่าสนใจ ตลอดจนมุ่งเน้นให้เนื้อหาที่มีความเข้มข้นทางวิชาการมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยในวารสารฉบับนี้มีบทความที่น่าสนใจมากมาย ได้แก่ การศึกษาพฤติกรรมคลื่นกระแทกด้วยเทคนิคซาร์โดว์กราฟ, การตรวจวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมในกระดาศัสมัผัสอาหารด้วยเทคนิคอินดักทีฟพลาสมาแมสสเปกโทรเมตรี, ปริมาณสารออกฤทธิ์ในผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดและฆ่าเชื้อโรคจากตลาดออนไลน์ของประเทศไทย ปี 2566, การตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีวิเคราะห์ปริมาณฟิเพอร์รีนในพริกไทยดำโดยเทคนิคโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง, ผลของวิธีการสกัดและสายพันธุ์บัวบกต่อปริมาณผลผลิต สารประกอบฟีนอลิกและฤทธิ์ทางชีวภาพในการต้านอนุมูลอิสระของสารสกัด และการประกันคุณภาพการผลิตและทดสอบประสิทธิภาพเจลแอลกอฮอล์

กองบรรณาธิการวารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ กรมวิทยาศาสตร์บริการ ขอขอบคุณผู้สนับสนุนทุกท่านที่ส่งบทความมาให้พิจารณาตีพิมพ์เผยแพร่องค์ความรู้และงานวิจัย ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการปฏิบัติงานด้านการพัฒนาวิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรมของประเทศ ขอขอบพระคุณผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่านสำหรับการพิจารณาบทความ (Peer review) โดยได้ให้ข้อเสนอแนะในการปรับปรุงแก้ไขบทความต่าง ๆ ให้มีความถูกต้องทางวิชาการ และอ่านได้เข้าใจง่ายขึ้น และขอขอบพระคุณทุกท่านที่มีส่วนในการจัดทำวารสารฉบับนี้ให้เสร็จสมบูรณ์ด้วยดี กองบรรณาธิการหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวารสารฉบับนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับผู้อ่านทุกท่านในการเสริมสร้างองค์ความรู้ทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อพัฒนางาน หรือช่วยแก้ปัญหาที่พบในการปฏิบัติงานได้ และขอขอบคุณผู้อ่านที่ได้ให้ความสนใจติดตามวารสารนี้มาอย่างต่อเนื่อง โปรดติดตามความรู้และงานวิจัยดี ๆ จากวารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ กรมวิทยาศาสตร์บริการ ฉบับต่อไป

ดร.ภูวดี ตู้จินดา
บรรณาธิการวิชาการ

จริยธรรมการตีพิมพ์

วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ กรมวิทยาศาสตร์บริการ (Bulletin of Applied Science)

จัดทำขึ้นเพื่อเผยแพร่บทความวิจัย บทความวิชาการ และบทความปริทัศน์ ในสาขาเคมี ฟิสิกส์ เทคโนโลยีชีวภาพ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร วัสดุศาสตร์ มาตรวิทยา วิศวกรรมศาสตร์ หรือวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มุ่งมั่นที่จะรักษามาตรฐานด้านจริยธรรมในการตีพิมพ์สูงสุด และให้การเผยแพร่เป็นไปอย่างถูกต้อง มีคุณภาพ และความโปร่งใส ตามมาตรฐานการตีพิมพ์ที่เป็นที่ยอมรับในระดับชาติและระดับนานาชาติ 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) รวมทั้งบุคคลอื่นที่ไม่เกี่ยวข้องด้วย
6. เมื่อเกิดกรณีที่ข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความทั้ง 3 ท่าน มีความขัดแย้งกัน บรรณาธิการจะเป็นผู้ตัดสินใจว่าจะดำเนินการในขั้นตอนถัดไปกับบทความเรื่องนั้น ๆ อย่างไรต่อไป
7. บรรณาธิการต้องไม่แก้ไขหรือเปลี่ยนแปลงเนื้อหาบทความและผลประเมินของผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ รวมถึงไม่ปิดกั้นหรือแทรกแซงข้อมูลที่ใช้แลกเปลี่ยนระหว่างผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ และผู้พิมพ์
8. บรรณาธิการส่งผลการประเมินให้ผู้พิมพ์แก้ไข และพิจารณา ตรวจสอบการแก้ไขของผู้พิมพ์อย่างเคร่งครัด
9. บรรณาธิการเป็นผู้จัดสรรบทความที่ผ่านกระบวนการประเมินบทความและอยู่ในสถานะพร้อมตีพิมพ์เผยแพร่ โดยจะพิจารณาจากเหตุผลหลัก คือ ลำดับก่อนหน้าของการส่งบทความ (Queue) และความน่าสนใจ/ความหลากหลายของเนื้อหาบทความ (Content) รวมถึงเหตุผลในด้านความเหมาะสมอื่น ๆ (Suitability) เป็นสำคัญ
10. ในกรณีที่เหตุผลสำคัญที่อาจจะไม่นำบทความของผู้พิมพ์เรื่องใดเรื่องหนึ่ง ลงตีพิมพ์ในวารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ กรมวิทยาศาสตร์บริการ ในฉบับตามที่ระบุในหนังสือตอบรับให้ได้นั้น บรรณาธิการขอสงวนสิทธิ์ในการนำบทความดังกล่าว ลงตีพิมพ์ในวารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ กรมวิทยาศาสตร์บริการ ในฉบับต่อ ๆ ไป ตามที่เห็นสมควร โดยบรรณาธิการจะต้องแจ้งให้ผู้พิมพ์เรื่องนั้น ๆ ได้รับทราบล่วงหน้าก่อนเสมอ

11. บรรณาธิการเป็นผู้ควบคุมและให้ความสำคัญต่อการตีพิมพ์เป็นรูปเล่มของวารสารในแต่ละฉบับ รวมถึงการเผยแพร่ทางเว็บไซต์วารสาร ให้มีความถูกต้อง สมบูรณ์ และออกตรงตามกำหนดเวลา อย่างเคร่งครัด

บทบาทและหน้าที่ของผู้นิพนธ์

1. ผู้นิพนธ์ต้องรับรองว่าบทความที่ส่งมาตีพิมพ์นั้นยังไม่เคยได้รับการเผยแพร่ที่ไหนมาก่อน หรืออยู่ระหว่างการพิจารณาตีพิมพ์ในวารสารอื่น การละเมิดลิขสิทธิ์ถือเป็นการละเมิดลิขสิทธิ์ของผู้นิพนธ์โดยตรง
2. ผู้นิพนธ์ต้องไม่คัดลอกผลงานของผู้อื่น และต้องอ้างอิงทุกครั้งเมื่อนำผลงานของผู้อื่นมานำเสนอหรืออ้างอิงในเนื้อหาของบทความของตนเอง รวมทั้งต้องทำเอกสารอ้างอิงไว้ท้ายบทความโดยจัดรูปแบบการอ้างอิงตามที่กองบรรณาธิการฯ ได้กำหนดไว้อย่างเคร่งครัด
3. ผู้นิพนธ์ต้องเขียนบทความให้ถูกต้องตามรูปแบบที่วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ กรมวิทยาศาสตร์บริการ กำหนดไว้อย่างเคร่งครัด
4. ผู้นิพนธ์ที่มีการศึกษาหรือทดลองเกี่ยวกับสิ่งมีชีวิต เช่น การใช้สัตว์ทดลอง หรือมนุษย์ ผู้นิพนธ์ต้องได้รับอนุญาตจากคณะกรรมการจริยธรรมก่อนทำการทดลอง และผู้นิพนธ์จะต้องแนบหนังสือรับรองจากคณะกรรมการจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์ 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 ผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความควรแจ้งปฏิเสธการประเมินบทความให้กองบรรณาธิการได้ทราบ
3. ผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความต้องรักษาระยะเวลาประเมินตามกรอบเวลาที่กำหนด หากไม่สามารถส่งข้อเสนอแนะบทความได้ทันตามเวลาที่กองบรรณาธิการได้กำหนดไว้ ผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความควรแจ้งให้กองบรรณาธิการได้ทราบ พร้อมทั้งควรแจ้งกำหนดเวลาใหม่ในการส่งคืนข้อเสนอแนะบทความ
4. ผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความต้องไม่แสวงหาประโยชน์จากบทความที่ตนเองได้ประเมิน และไม่เปิดเผยข้อมูลบทความให้ผู้ที่ไม่มีส่วนเกี่ยวข้องได้รับรู้
5. หากผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความตรวจสอบพบว่าบทความที่ประเมินมีการคัดลอกผลงานชิ้นอื่น ๆ ต้องแจ้งให้บรรณาธิการทราบทันที

6. ภายหลังจากการประเมินบทความและให้ข้อเสนอแนะในรอบที่ 1 เรียบร้อยแล้ว เมื่อผู้นิพนธ์ได้แก้ไขปรับปรุงบทความ (พร้อมเหตุผลและคำชี้แจง) กลับมาเพื่อพิจารณาอีกครั้งหนึ่ง กองบรรณาธิการจะขอความอนุเคราะห์ในการประเมินบทความรอบที่ 2 ซึ่งผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความจะเป็นผู้พิจารณาการแก้ไขปรับปรุงบทความดังกล่าว เมื่อพิจารณาแล้วเสร็จ ผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความควรแจ้งผลการพิจารณาสุดท้ายให้กองบรรณาธิการได้รับทราบต่อไป เช่น แจ้งเห็นควรตอบรับการตีพิมพ์ หรือแจ้งปฏิเสธการตีพิมพ์ หรือแจ้งข้อเสนอแนะเพิ่มเติมสำหรับการแก้ไขปรับปรุงในรอบที่ 2

การคุ้มครองข้อมูลส่วนบุคคล

1. วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ กรมวิทยาศาสตร์บริการ จะเคร่งครัดการเก็บบทความมีการคัดลอก 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.

สารบัญ

1

การศึกษาพฤติกรรมคลื่นกระแทกด้วยเทคนิคซาร์โดว์กราฟ 12
วุฒิชัย สิทธิวงษ์

2

การตรวจวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมในกระดาศัมผัสอาหารด้วยเทคนิค 25
อินดักทีฟพลาสมาแมสสเปกโตรเมตรี
นุจรินทร์ พลหงษ์, เนตรศิริพันธ์ กฤษวงษ์, วรณรัตน์ บุรณะกุล, วีรภัทร รามณี,
จิตติไล เวฬุวนารักษ์, วีระ สอนไธสง

3

ปริมาณสารออกฤทธิ์ในผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดและฆ่าเชื้อโรคจากตลาดออนไลน์ 40
ของประเทศไทย ปี 2566
หนึ่งฤทัย แสงแสงสีรุ่ง, ดารัตน์ พัฒนະกุลกำจร, ธนัชชา ทองระย้า, กรรณิกา ดีวินิจ,
ชนิษฐ พานชูวงศ์

4

การตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีวิเคราะห์ปริมาณพิเพอร์รีนในพริกไทยดำ 52
โดยเทคนิคโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง
ธิดารัตน์ เครือเทียน, ปัทมาพร จิตปรีดา, สุนงกษ ทรัพย์แดง

5

ผลของวิธีการสกัดและสายพันธุ์บัวบกต่อปริมาณผลผลิต สารประกอบฟีนอลิก 66
และฤทธิ์ทางชีวภาพในการต้านอนุมูลอิสระของสารสกัด
เวรดี มีสตัย, อภิรตรี ศรีธร, ยุทธศักดิ์ สุปการี

6

การประกันคุณภาพการผลิตและทดสอบประสิทธิภาพเจลแอลกอฮอล์ 79
นุศรา ยินยอม, ศิริวรรณ วิชัย

1

- A study of the shock wave behavior using the shadowgraph technique 12
Wuttichai Sittiwong

2

- Determination of cadmium in paper for food contact by inductively coupled 25
plasma mass spectrometry
Nootjarin Phonhong, Netsirin Gissawong, Warunrat Buranakul,
Veerapat Ramanee, Jitwilai Waluvanarak, Weera Suanthaisong

3

- Active substances in cleaning and disinfecting products from Thailand's online 40
market in 2023
Neungrutai Saesaengseerung, Darat Phathanakunkamchon, Thanatcha Tongraya,
Kannika Deevinij, Khanit Panchoowong

4

- Method validation for determination of piperine in black pepper 52
by high performance liquid chromatography
Thidarat Kruatian, Pattamaporn Jitpreeda, Subongkoch Subtaeng

5

- The effect of extraction methods and *Centella asiatica* species on yield, total 66
phenolic content and antioxidant activity of extract
Rewadee Meesat, Apiratree Srithon, Yuttasak Subkaree

6

- Quality assurance for the production and performance testing of alcohol gel 79
Nusara Yinyom, Siriwan Wichai

การศึกษาพฤติกรรมคลื่นกระแทกด้วยเทคนิคชาร์โดว์กราฟ A study of the shock wave behavior using the shadowgraph technique

วุฒิชัย สิริวงษ์^{1*}
Wuttichai Sittiwong^{1*}

รับบทความ 30 เมษายน 2567 แก้ไขบทความ 26 กุมภาพันธ์ 2568 ยอมรับตีพิมพ์ 21 เมษายน 2568

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย เพื่อศึกษาความแตกต่างของพฤติกรรมของคลื่นกระแทก (Shock wave) ที่เกิดจากลูกกระสุนปืนทรงกระบอกที่มีรูปร่างส่วนหัวแตกต่างกัน 5 แบบ ได้แก่ 1) หัวเรียบ 2) หัวมน 3) หัวทรงกรวยตัด 4) หัวทรงกรวยแหลม 30 องศา และ 5) หัวทรงกรวยแหลม 45 องศา ลูกกระสุนปืนขับเคลื่อนด้วยดินปืนชนิดดินคว้นน้อยปริมาณ 3 กรัม พฤติกรรมของคลื่นกระแทกจะถูกบันทึกด้วยเทคนิคชาร์โดว์ (Shadowgraph technique) ร่วมกับกล้องถ่ายภาพเคลื่อนไหวยุติความเร็วสูง จากผลการทดลอง พบว่า เทคนิคชาร์โดว์กราฟร่วมกับกล้องถ่ายภาพเคลื่อนไหวยุติความเร็วสูงสามารถบันทึกพฤติกรรมของคลื่นกระแทกจากลูกกระสุนปืนได้อย่างชัดเจน นอกจากนั้นความเร็วของลูกกระสุนปืนจะแบ่งเป็น 2 กลุ่มตามลักษณะรูปร่างของลูกกระสุนปืน คือ ลูกกระสุนปืนหัวเรียบ หัวมน และหัวกรวยตัด มีความเร็วเฉลี่ยใกล้เคียงกันที่ประมาณ 780 เมตรต่อวินาที ส่วนลูกกระสุนปืนทรงกระบอกหัวทรงกรวย 30 องศา และ 45 องศา มีความเร็วเฉลี่ยประมาณ 550 เมตรต่อวินาที

คำสำคัญ: เทคนิคชาร์โดว์กราฟ, กล้องถ่ายภาพเคลื่อนไหวยุติความเร็วสูง, ดินคว้นน้อย, ปากกระบอกปืน

¹สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตสุรินทร์

Abstract

The purpose of the research is to study the differences shock waves behavior, the cylindrical projectile of following five head shapes are assigned: 1) flat shape head 2) round nose head, 3) flat nose head, 4) 30° boat tail head, and 5) 45° boat tail head shape. The projectile driven with 3 grams of smokeless powder. The behavior of the shock waves recorded using the shadowgraph technique in conjunction with a high-speed video camera. According to the results of the experiment, the shadowgraph technique combined with a high-speed video camera can clearly record the behavior of the shock waves from the projectiles. In addition, the projectile velocity is divided into two groups according to the shape of the bullet: flat shape, round nose headed, and flat nose head projectile. It has a similar average speed of about 780 meters per second. The group including projectiles with 30° and 45° boat tail shapes had a velocity of around 550 m/s. It has an average speed of about 550 meters per second.

Keywords: Shadowgraph technique, High speed video camera, Smokeless powder, Gun muzzle

¹Division of Mechanical Engineering, Faculty of Agriculture and Technology, Rajamangala University of Technology Isan SURIN Campus

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

1. บทนำ (Introduction)

คลื่นกระแทก (Shock wave) เป็นการเคลื่อนที่ของพลังงานในตัวกลาง (ของแข็ง ของเหลว และแก๊ส) ที่เกิดขึ้นทันทีทันใดหรืออย่างรวดเร็วจนทำให้คุณลักษณะของตัวกลางเปลี่ยน คลื่นกระแทกจะมีบทบาทสำคัญสำหรับฟิสิกส์สมัยใหม่ [1] วิศวกรรมอากาศยาน [2] วัสดุศาสตร์ [3] การทหาร [4] หรือแม้กระทั่งทางการแพทย์ [5-7] ปัจจุบันคลื่นกระแทกเป็นตัวเลือกแรก ๆ ในการรักษาหัวใจในโตและท่อปัสสาวะ ระบบทางเดินปัสสาวะเป็นสาขาการแพทย์สำหรับคลื่นกระแทกในการแพทย์มานานแล้ว นอกจากนี้คลื่นกระแทกยังถูกนำมาใช้ในศัลยกรรมกระดูกและบาดแผลเพื่อรักษาเส้นเอ็นอักเสบ (Tendinitis) หัวกระดูกข้อสะโพกตายจากการขาดเลือดและการรักษากระดูกตาย ซึ่งเป็นการรักษาด้วยคลื่นกระแทกนอกร่างกาย [8] เป็นต้น

ในกรณีที่คลื่นกระแทกเกิดขึ้นจากวัตถุเคลื่อนที่ในตัวกลางที่เป็นอากาศด้วยความเร็วสูงกว่าความเร็วเสียงในอากาศ (343 เมตรต่อวินาที, 20 องศาเซลเซียส) เช่น อากาศยาน ลูกกระสุนปืน เป็นต้น โมเลกุลของตัวกลางระหว่างชั้นของคลื่นกระแทก (Shock layer) กับวัตถุจะสั่นตัวทำให้เกิดความร้อนขึ้นเป็นผลให้ชั้นความหนาของคลื่นกระแทกที่เกิดขึ้นรอบ ๆ ลดลง ความดันเกิดขึ้นกระจายรอบ ๆ วัตถุ เป็นผลต่อพลศาสตร์การเคลื่อนที่ของวัตถุ (Aerodynamics) คือ การเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุที่เกิดจาก Pitching moment กรณีของลูกกระสุนปืนเคลื่อนที่ในอากาศที่ความเร็วสูงเหนือเสียง ในทางการทหาร มุมของ Sound shock wave สามารถใช้เป็นข้อมูลเพื่อหาตำแหน่งของผู้ยิง และบอกชนิดของปืนได้ [9] พฤติกรรมของคลื่นกระแทกที่เกิดจากการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงเหนือเสียงในระดับ Supersonic ของลูกกระสุนปืนในลำกล้องปืนมีผลต่อตัวกลางหรืออากาศที่อยู่ส่วนหน้าของลูกกระสุนปืนจะถูกอัด ทำให้ความดันและความหนาแน่นสูงขึ้น หลังจากนั้นจะถูกขับออกมาที่ปลายลำกล้อง ที่เรียกว่า Precursor shock wave ความแตกต่างของความหนาแน่นของอากาศภายนอกทำให้คลื่นกระแทกเกิดพฤติกรรมการหมุนวน หรือเรียกว่า Vortex ring เมื่อลูกกระสุนปืนเคลื่อนที่ออกจากปลายลำกล้องแล้วจะเกิดคลื่นกระแทกโค้ง (Bow shock wave) ขึ้น อย่างไรก็ตามพฤติกรรมของคลื่นกระแทกที่เกิดขึ้นจะมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ความเร็วของลูกปืน รูปทรงของลูกกระสุนปืน เป็นต้น [10-11]

Hao และคณะ [12] ทำการศึกษาการก่อตัวของโพรงอากาศขนาดใหญ่ (Super cavitation) และการเจาะของกระสุนปืน ความเร็วสูงในน้ำด้วยโปรแกรม Ansysfluent19.0 ศึกษาการเจาะของกระสุนปืนในน้ำ ลักษณะโพรงอากาศได้น้ำ วิถี และลักษณะสนามการไหลของกระสุนปืนหัวแบนทรงกรวยและหัวกระสุนปืนแบนรูปไข่ ขนาด 5.8 มิลลิเมตร โดยกระสุนปืนที่ยิงลงน้ำในแนวตั้งด้วยความเร็ว 300, 400, 500 และ 600 เมตรต่อวินาที ซึ่งผลการวิจัยพบว่า อัตราการลดลงของความเร็วในน้ำจะเพิ่มขึ้นตามความเร็วที่เพิ่มขึ้น ภายใน 3 มิลลิวินาทีแรก อัตราการลดของความเร็วของกระสุนปืนทรงกรวยหัวแบนที่มีความเร็วในการยิงลงน้ำ 600 เมตรต่อวินาที คือ 55.6% ในขณะที่อัตราการลดลงของความเร็วของกระสุนปืนที่มีความเร็วในการยิงลงน้ำ 300 เมตรวินาทีนั้นเพียง 16.3% ใน 3 มิลลิวินาที นอกจากนี้แล้ว ยังมีการศึกษาถึงการแพร่กระจายและการสะท้อนของคลื่นกระแทกที่เกิดจากการยิงกระสุนปืนความเร็วสูงลงในถังน้ำด้วยเทคนิคภาพกราฟเงา หรือ Shadowgraph technique [13]

Token และ Korneev [14] ศึกษาระยะและรูปทรงของคลื่นกระแทกที่เกิดจากวัตถุที่มีรูปทรงกระบอกหัวมน (Round nose) รัศมี 14 มิลลิเมตร และ 15 มิลลิเมตร กับรูปทรงกระบอกหัวทรงกรวย มุม 30 องศา และ 45 องศา ที่กำเนิดจากเครื่องยิงความเร็วสูงที่เรียกว่าปืนแก๊สเบาสองขั้น (Two-stage light-gas gun) ที่ความเร็วระดับอัตราเร็วขั้นสูง หรือ Hypersonic จากภาพถ่ายด้วยเทคนิคชูรีน (Schlieren technique) พบว่าคลื่นกระแทกจากวัตถุรูปทรงกรวยมุม 30 องศา มีมุมเฉียงหรือมุมเทมากกว่าวัตถุรูปทรงกรวยมุม 45 องศา และวัตถุที่มีรูปทรงกระบอกหัวมน ตามลำดับ และคลื่นกระแทกที่เกิดจากวัตถุรูปทรงกรวยจะเคลื่อนที่ติดกับวัตถุ (Attach shock wave) ซึ่งแตกต่างจากคลื่นกระแทกที่เกิดจากวัตถุรูปทรงมน ซึ่งมีระยะเกิดขึ้นระหว่างวัตถุกับคลื่นกระแทก (Detach shock wave)

กรณีของลูกกระสุนปืนที่มีความเร็วเหนือความเร็วเสียงถูกขับด้วยแรงระเบิดของดินปืนขับจากปลอกกระสุนปืนซึ่งอยู่ส่วนท้ายของลำกล้องปืน เมื่อลูกกระสุนปืนเคลื่อนที่ทำให้อากาศด้านหน้าของกระบอกปืนถูกขับดันและถูกอัดตัวออกมา

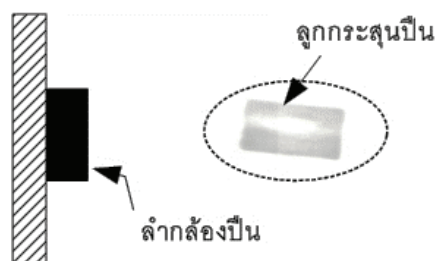
ที่ส่วนปลายลำกล้องปืนเท่านั้น เนื่องจากขนาดของลำกล้องปืนและลูกกระสุนปืนที่มีขนาดเท่ากัน อากาศอัดที่เคลื่อนที่ข้างหน้าลูกกระสุนปืนซึ่งเปรียบได้กับการกำเนิดคลื่นกระแทกแบบท่อคลื่นกระแทก หรือ Shock tube เกิดเป็นคลื่นกระแทกตั้งฉาก (Normal shock wave หรือ Precursor shock wave) เมื่อ Normal shock wave เคลื่อนที่พ้นจากปลายลำกล้องปืน ซึ่งแตกต่างทั้งความดันและพื้นที่ที่ไม่จำกัด จึงขยายตัวออกเป็นแรงระเบิดปลายกระบอกปืน (Muzzle blast) เป็นคลื่นกระแทกจากการระเบิด (Blast wave) ซึ่งเป็นคลื่นกระแทกตั้งฉาก หรือ Precursor blast wave เมื่อลูกกระสุนปืนเคลื่อนที่พ้นจากปลายลำกล้องปืนแล้ว ความดันของแก๊สที่เกิดจากการเผาไหม้ดินปืนขับที่ขับลูกกระสุนปืนออกมาจะเคลื่อนที่ตามลูกกระสุนปืนออกมาจากกระบอกปืนเป็นคลื่นกระแทกลำดับสอง (Secondary shock wave) [14-16] ถึงแม้ว่าพฤติกรรมของคลื่นกระแทกจะเป็นที่น่าสนใจและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านต่าง ๆ ดังที่กล่าวมาแล้ว แต่เนื่องจากวัตถุเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงและพฤติกรรมของคลื่นกระแทกเป็นความแตกต่างของความหนาแน่นของตัวกลางหรืออากาศ (กรณีลูกกระสุนปืนยิงออกไปในอากาศ) ทำให้เป็นไปได้ยากที่จะมองเห็นพฤติกรรมของคลื่นกระแทก นอกจากนี้ ดังที่ได้กล่าวถึงในทางการแพทย์ การใช้คลื่นกระแทกในประเทศไทยมีผู้สนใจทำวิจัยในการใช้เครื่องมือเพื่อประโยชน์ต่อผู้ป่วย เช่น การเปรียบเทียบประสิทธิผลการรักษาด้วยคลื่นกระแทกชนิดเรเดียล (Radial shock wave therapy; RSWT) กับการรักษาด้วยการนวดแบบกดลึก (Deep friction massage; DFM) ในกลุ่มอาการปวดกล้ามเนื้อและพังผืด (Myofascial pain syndrome; MPS) [16] หรือ S. Ladawan [17] ทำการเปรียบเทียบผลของการรักษานิวไทรโตสส่วนปลายด้วยการส่องกล้องท่อไต (Ureteroscopy หรือ URS) และการสลายนิ่วด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง (Extracorporeal shockwave lithotripsy; ESWL) ซึ่งงานวิจัยเหล่านี้ล้วนแต่เป็นการใช้เครื่องมือทางการแพทย์กับผู้ป่วย แต่ไม่มีการวิเคราะห์พฤติกรรมของคลื่นกระแทกหรือคลื่นชอลล์กับอาการป่วย เนื่องจากคลื่นกระแทกไม่สามารถมองด้วยตาเปล่าได้ จึงมีงานวิจัยด้านนี้น้อยมากโดยเฉพาะในประเทศไทย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้เทคนิคชาร์โดว์กราฟ (Shadowgraph technique) ร่วมกับกล้องถ่ายภาพเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงหรือกล้องวิดีโอความเร็วสูง (High speed video camera, HSVC) ศึกษาพฤติกรรมของคลื่นกระแทกที่เกิดจากการเคลื่อนที่วัตถุความเร็วสูง กรณีนี้ใช้ลูกกระสุนปืนที่มีรูปทรงส่วนหัวแตกต่างกันที่ปลายกระบอกปืน ลูกกระสุนปืนถูกยิงจากปืนที่ใช้แรงระเบิดของดินปืนชนิดดินควันน้อย (Smokeless powder) ขับดันลูกกระสุนปืนเคลื่อนที่ในลำกล้องหรือกระบอกปืน ผลการทดลองได้จากภาพถ่ายเพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการพัฒนางานวิจัยต่อไป ดังที่ Sittiwong และคณะ [18] ได้ทำการศึกษาผลของรูปทรงลูกกระสุนปืนที่มีต่อพฤติกรรมของคลื่นในของแข็งด้วยวิธีการและเทคนิคเดียวกันนี้

2. วิธีการวิจัย (Experimental methods)

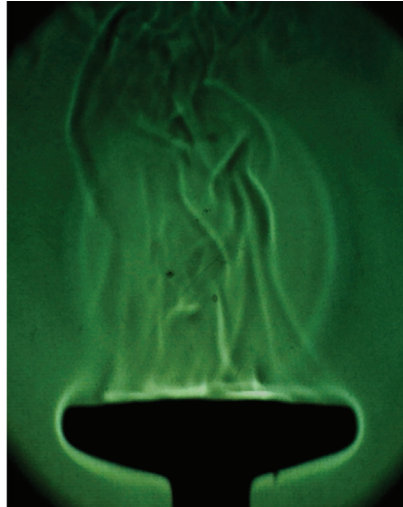
2.1 เทคนิคการบันทึกภาพวัตถุความเร็วสูงและคลื่นกระแทก

คลื่นกระแทกเกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของวัตถุ หรือของไหลผ่านตัวกลางด้วยความเร็วสูงกว่าความเร็วเสียงของตัวกลาง พฤติกรรมเคลื่อนที่ของลูกปืนความเร็วสูงและคลื่นกระแทกไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่าหรือเครื่องมือปกติทั่วไปได้ ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 1 เป็นภาพถ่ายลูกกระสุนปืนที่ความเร็วประมาณ 800 เมตรต่อวินาที ด้วยกล้องถ่ายภาพความเร็วสูงโดยไม่ใช้เทคนิคชาร์โดว์กราฟ จะเห็นว่าสามารถมองเห็นการเคลื่อนที่ของลูกกระสุนปืนได้ แต่ไม่สามารถมองเห็นพฤติกรรมของคลื่นกระแทกได้ เทคนิคชาร์โดว์กราฟใช้หลักการการหักเหของแสงเมื่อผ่านตัวกลางที่มีความหนาแน่นแตกต่างกัน เช่นเดียวกับคลื่นกระแทกที่ความหนาแน่นบริเวณคลื่นกระแทกแตกต่างกับความหนาแน่นของบรรยากาศรอบวัตถุ ดังนั้นการทดลองนี้จึงใช้เทคนิคชาร์โดว์กราฟร่วมกับกล้องถ่ายภาพเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง (HSVC) เพื่อบันทึกผลการทดลอง



รูปที่ 1 ภาพถ่ายลูกกระสุนปืนด้วย HSVC

เทคนิคชาร์โดว์กราฟเป็นวิธีการที่อาศัยหลักการหักเหของแสงที่ผ่านตัวกลาง โดยที่ตัวกลางมีความหนาแน่นแตกต่างกัน เช่น แสงส่องผ่านน้ำที่ไหลในอากาศ ซึ่งกรณีงานวิจัยนี้จะเป็นแสงส่องผ่านลูกกระสุนปืนที่ถูกยิงผ่านอากาศ ความแตกต่างของความหนาแน่นของลูกกระสุนปืนกับความหนาแน่นของอากาศที่แสงส่องผ่านจะทำให้แสงเกิดการหักเห ดังรูปที่ 2 แสดงภาพถ่ายไอความร้อนที่เกิดจากตัวทำความร้อนอินฟราเรดด้วยเทคนิคชาร์โดว์กราฟโดยไม่ใช้กล้องถ่ายภาพเคลื่อนไหวความเร็วสูง ความร้อนทำให้อากาศโดยรอบมีความหนาแน่นลดลงกว่าความหนาแน่นของอากาศปกติที่แสงเคลื่อนที่ผ่าน ทำให้เกิดการหักเหของแสง เกิดเป็นภาพไอความร้อนที่ไม่สามารถมองด้วยตาเปล่าได้

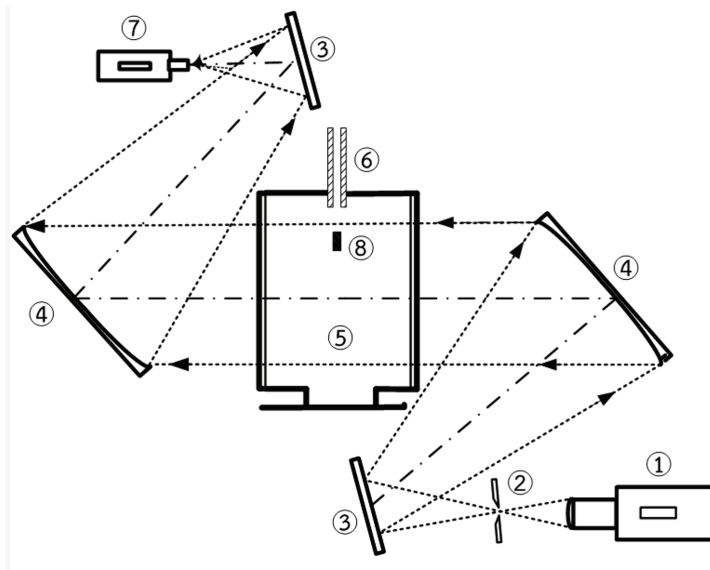


รูปที่ 2 ภาพถ่ายความร้อนจากเทคนิคชาร์โดว์กราฟ

ในรูปที่ 3 แสดงการจัดวางชุดทดลองของกล้องถ่ายภาพเคลื่อนไหวความเร็วสูงใช้ร่วมกับเทคนิคชาร์โดว์กราฟ ประกอบด้วย

1. แหล่งกำเนิดแสง (Light source) จากหลอดไฟซีนอน (HID xenon) ค่าอุณหภูมิสีเคลวิน (K) 4,300 K ค่าความส่องสว่าง 3,500 ลูเมน (Lumens)
2. รูเข็ม (Pinhole) แบบปรับได้ ขนาดรูเล็กสุด 2 มิลลิเมตร ทำหน้าที่ตัดหรือกรองแสงส่วนที่กระจายและความส่องสว่างต่ำออก เพื่อให้ได้แสงจากจุดกำเนิดแสงที่มีความเข้มแสงสูง
3. กระจกเงา (Mirror) แผ่นเรียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 เซนติเมตร ทำหน้าที่เปลี่ยนทิศทางของแสงเพื่อลดพื้นที่การทำงานและติดตั้งอุปกรณ์
4. กระจกเงาเว้า (Concave mirror) เส้นผ่านศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร จุบรวมแสง 1,500 เซนติเมตร จำนวน 2 บาน กระจกบานแรก (ขวา) ทำหน้าที่เปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ของแสงจากแหล่งกำเนิดแสงให้แสงเคลื่อนที่ในแนวขนาน กระจกบานที่สอง (ซ้าย) ทำหน้าที่เปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ของแสงจากขนานเป็นรวมเข้าสู่จุดรวมแสงของกล้องถ่ายภาพเคลื่อนไหวความเร็วสูง
5. ห้องทดสอบ (Test chamber) ทำหน้าที่เก็บและป้องกันอันตรายที่เกิดจากลูกกระสุนปืน ทั้งสองข้างของห้องทดสอบจะกันด้วยกระจกใส หนา 25 มิลลิเมตร
6. ลำกล้องปืน (Gun barrel) ทำหน้าที่เป็นท่อส่งลูกกระสุนปืน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 8 มิลลิเมตร ซึ่งมีขนาดเท่ากับลูกกระสุนปืนเพื่อให้เกิดการขับเคลื่อนจากแรงระเบิดของดินปืนได้
7. กล้องถ่ายภาพเคลื่อนไหวความเร็วสูง (High-speed video camera) ยี่ห้อ Photron รุ่น FASTCAM SA5 ที่สามารถถ่ายภาพเคลื่อนไหวได้สูงสุด 1,000,000 เฟรมต่อวินาที (fps) โดยการทดลองนี้ใช้ความเร็ว 30,000 เฟรมต่อวินาที (fps) ที่ความละเอียด $1,024 \times 240$ พิกเซล

กล้องถ่ายภาพเคลื่อนไหวยุติความเร็วสูงร่วมกับเทคนิคชาร์โดว์กราฟในรูปที่ 3 มีหลักการทำงาน คือ แสงจากจุดกำเนิดแสง (1) จะกระจายออกในแนวรัศมีจากแหล่งกำเนิดแสง (เส้นประ) แสงผ่านเลนส์นูนสองด้านภายในแหล่งกำเนิดแสง เพื่อรวมแสงที่จุดรวมแสง ที่จุดรวมแสง แสงจะถูกกรองด้วยรูเข็ม (Pin hole) (2) และกระจายตกกระทบบนกระจกเงาเว้าบานแรก (4) ในการทดลองนี้ผู้วิจัยได้เพิ่มกระจกเงาแบบแผ่นเรียบ (3) ทำหน้าที่เปลี่ยนทิศทางของแสงเพื่อลดพื้นที่การทำงานเท่านั้น กระจกเงาเว้าบานแรก (ขวา) จะเปลี่ยนทิศทางของแสงจากกระจายในแนวรัศมีเป็นแนวขนานผ่านห้องทดสอบ (5) และกลับมารวมแสงเมื่อผ่านกระจกเงาเว้าบานที่สอง (ซ้าย) ที่จุดรวมแสง แสงจะตกลงบนรูรับแสงของกล้องถ่ายภาพเคลื่อนไหวยุติความเร็วสูง (7) ลูกกระสุนปืนความเร็วสูง (8) จากลากล้องปืน (6) ถูกยิงเข้ามาภายในห้องทดสอบหากมีความเร็วสูงกว่าความเร็วเสียงในอากาศจะทำให้เกิดคลื่นกระแทกขึ้น ความหนาแน่นของอากาศที่เกิดจากคลื่นกระแทกจะแตกต่างกับความหนาแน่นของอากาศในห้องทดสอบ เมื่อแสงจากจุดกำเนิดแสงที่เป็นเส้นขนานเคลื่อนที่ผ่านทำให้เกิดการหักเหและเกิดเป็นภาพเงา ซึ่งภาพเงาที่เกิดขึ้นเร็วมากนั้นจะมองเห็นได้จากเทคนิคชาร์โดว์กราฟและถูกบันทึกด้วยกล้องถ่ายภาพเคลื่อนไหวยุติความเร็วสูง



รูปที่ 3 การจัดอุปกรณ์เทคนิคชาร์โดว์กราฟร่วมกับ HSVC

2.2 วิธีการกำเนิดคลื่นกระแทก

การศึกษากฎธรรมชาติของคลื่นกระแทกด้วยเทคนิคชาร์โดว์กราฟร่วมกับกล้องถ่ายภาพเคลื่อนไหวยุติความเร็วสูงนี้จะกำเนิดคลื่นกระแทกจากลูกกระสุนปืนที่ทำจาก Polymethyl-methacrylate (PMMA) ทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร ยาว 15 มิลลิเมตร ค่าความหนาแน่น 1.1 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และถูกอัดเข้าไปในปลอกกระสุนปืน 10 มิลลิเมตร จากความยาว 15 มิลลิเมตร เท่ากันทุกการทดลอง แตกต่างกันที่รูปร่างของส่วนหัวที่ใช้ทำการทดลองมี 5 แบบ ดังแสดงในรูปที่ 4 คือ

แบบที่ 1 ส่วนหัวตัดแบนเรียบ (P.std)

แบบที่ 2 ส่วนหัวทรงมนโค้งมีรัศมี 4 มิลลิเมตร (P.r4)

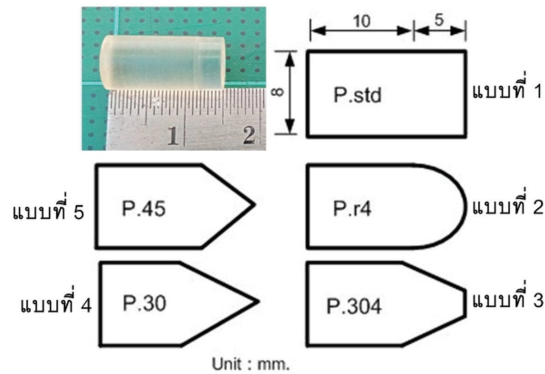
แบบที่ 3 ส่วนหัวทรงกรวยตัด เส้นผ่านศูนย์กลางกรวยตัด 4 มิลลิเมตร มุมเอียง 30 องศา (P.304)

แบบที่ 4 ส่วนหัวทรงกรวยแหลม มุมเอียง 30 องศา (P.30)

แบบที่ 5 ส่วนหัวทรงกรวยแหลมทำมุมเอียง 45 องศา (P.45)

การขับลูกกระสุนปืนใช้หลักการของปืนที่ใช้ดินปืน (Powder gun) จุดชนวนด้วยการกระแทกของเข็มแทงชนวนทำให้เกิดการเผาไหม้ดินปืนในปลอกกระสุนปืนแล้วขยายตัวเกิดความดันในปลอกกระสุนปืน แก๊สที่เกิดจากการเผาไหม้

ดินขั้บมีความดันสูงและขั้บดันลูกกระสุนปืนออกมาตามลำลั้อง ปลอกกระสุนปืนที่ใช้ในการทดลองดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 4 ลูกกระสุนปืนที่ใช้สำหรับการทดลอง 5 แบบ



รูปที่ 5 ปลอกกระสุนปืน

ปลอกกระสุนปืนจะสามารถบรรจุดินปืนขั้บชนิดดินคั้นน้อย (Smokeless powder) ได้สูงสุด 5 กรัม โดยการทดลองนี้ใช้ดินปืนขั้บปริมาณ 3 กรัม ทุกการทดลอง เนื่องจากการบรรจุดินปืนเต็มปลอกกระสุนปืน ภายในปลอกกระสุนปืนจะไม่มีพื้นที่ให้แก๊สจากการเผาไหม้ดินปืนขยายตัว ดินปืนที่เผาไหม้จะขั้บดันลูกกระสุนปืนออกจากปลอกกระสุนปืนก่อนที่จะเกิดการเผาไหม้ดินปืนทั้งหมด จากการทดลองเบื้องต้นพบว่าดินปืนเผาไหม้ไม่หมดจะถูกขั้บออกมาปลายกระบอกปืนทำให้ไม่สามารถเห็นพฤติกรรมของคลั้่นกระแทกได้ และความเร็วของกระสุนปืนยังมีความเร็วไม่คงที่ ดังนั้นการทดลองเบื้องต้นพบว่าปริมาณดินปืนขั้บ 3 กรัม ทำให้ความเร็วลูกกระสุนปืนสูงกว่าความเร็วเสียงในทุกกรณี และบันทึกภาพคลั้่นกระแทกได้ชัดเจน

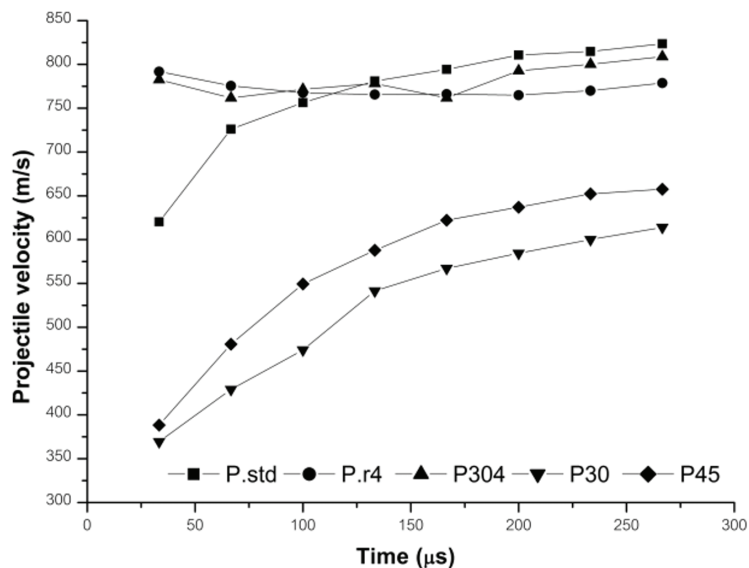
3. ผลและวืจารย์ (Results and discussion)

การทดลองได้ภาพถ่ายลูกกระสุนปืนที่มีลักษณะส่วนหัวแตกต่างกัน 5 แบบ ในห้องทดสอบที่สภาวะบรรยากาศลูกกระสุนปืนและพฤติกรรมของคลั้่นกระแทกที่เกิดขึ้นจะถูกบันทึกด้วยกล้องถ่ายภาพเคลื่อนไห้ความเร็วสูงร่วมกับเทคนิคชาร์โดว์กราฟ ที่การทดลองแบบละ 10 ครั้ง ผลการทดลองถูกวิเคราะห์จากภาพถ่ายที่ได้ร่วมกับเทคนิคชาร์โดว์กราฟ

3.1 ความเร็วของลูกกระสุนปืน

ความเร็วของลูกกระสุนปืนได้จากระยะการเคลื่อนที่ของลูกกระสุนปืนจากภาพถ่ายต่อช่วงเวลาในแต่ละเฟรมของภาพ กรณีการทดลองนี้ใช้ความเร็วการถ่ายภาพ 30,000 เฟรมต่อวินาที หรือ 33 ไมโครวินาทีต่อเฟรม ($\mu s/f$) ในรูปที่ 6 เป็นผลของความเร็วเฉลี่ยจากลูกกระสุนปืนแบบทรงกระบอกหน้าตัดแบนเรียบ หรือ P.std ได้ความเร็วเริ่มต้นประมาณ 600 เมตรต่อวินาที ความเร็วเฉลี่ย 760 เมตรต่อวินาที ความเร็วของลูกกระสุนปืน P.r4 และ P.304 มีความเร็วเริ่มต้นใกล้เคียงกันคือประมาณ 800 เมตรต่อวินาที และความเร็วเฉลี่ยประมาณ 780 เมตรต่อวินาที และใกล้เคียงกับความเร็วของลูกกระสุนปืน

แบบ P.std ส่วนความเร็วของลูกกระสุนปืน P.30 และ P.45 มีความเร็วเริ่มต้นต่ำกว่า (ประมาณ 380 เมตรต่อวินาที) และมีความเร็วเฉลี่ยประมาณ 550 เมตรต่อวินาที จะเห็นได้ว่าความเร็วของลูกกระสุนปืนแบบที่มีรูปทรงเหมือนกันมีแนวโน้มของความเร็วเท่ากัน คือลูกกระสุนปืนแบบ P.std แบบ P.r4 และแบบ P.304 มีความเร็วเริ่มต้นสูงและความเร็วเฉลี่ยใกล้เคียงกัน ส่วนความเร็วของลูกกระสุนปืนแบบ P.30 และแบบ P.45 เริ่มต้นต่ำและความเร็วจะสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง

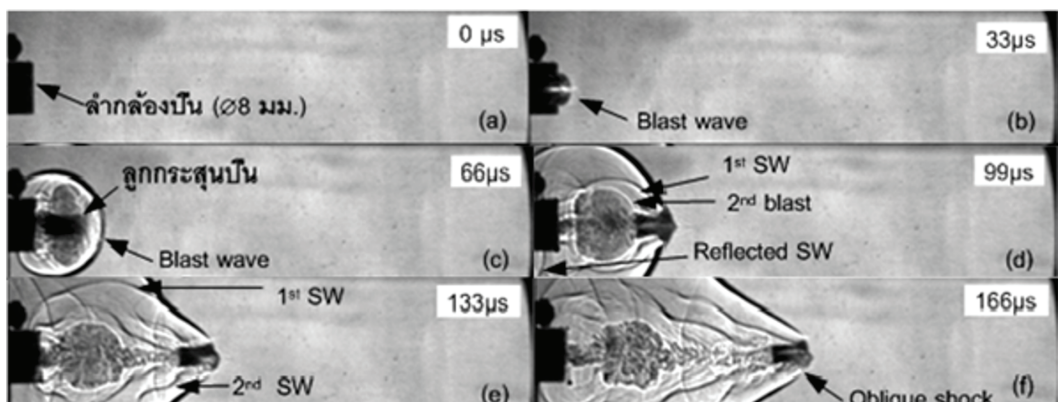


รูปที่ 6 ความเร็วของลูกกระสุนปืนรูปทรงต่าง ๆ

3.2 วิเคราะห์ภาพคลื่นกระแทกจากลูกกระสุนปืน

3.2.1 ผลของภาพถ่ายคลื่นกระแทกจากลูกกระสุนปืนแบบ P.std

ในรูปที่ 7 จากกล้องถ่ายภาพเคลื่อนไหวความเร็วสูงร่วมกับเทคนิคซาริโดว์กราฟ ถูกขับด้วยดินปืน 3 กรัม



รูปที่ 7 คลื่นกระแทกจากลูกกระสุนปืนแบบ P.std

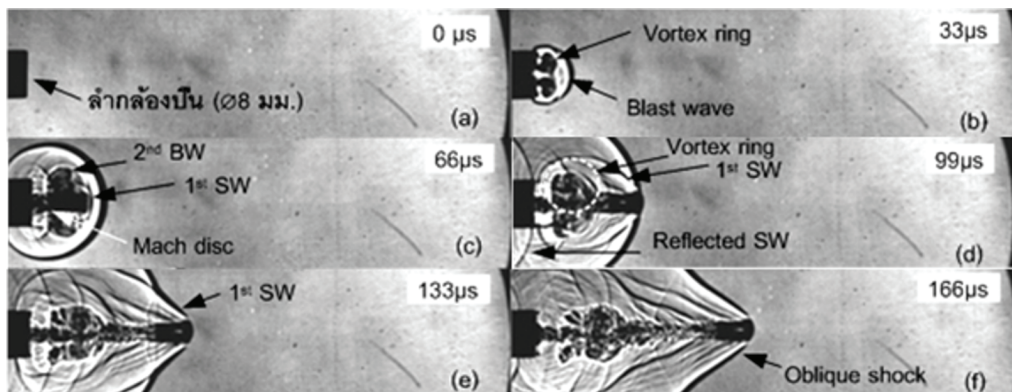
รูปที่ 7(b) แสดงคลื่นกระแทกกระเบิด (Blast wave) หรือ Precursor shock wave ที่เกิดจากอากาศภายในล้ากล้องปืนที่ถูกอัดจากการระเบิดขับเคลื่อนปืนภายในล้ากล้อง ที่เวลา 66 ไมโครวินาที (μs) ในรูปที่ 7(c) Blast wave ขยายตัวขึ้นรอบลูกกระสุนปืนเป็นทรงบอลกลมเห็นได้อย่างชัดเจน และหลัง Blast wave โดยเฉพาะส่วนท้ายของลูกกระสุนปืน จะมองเห็นคลื่นกระแทกซ้อน (Multiple shock wave) ที่เกิดจากการระเบิดของดินปืนขับที่ขับเคลื่อนลูกกระสุนปืนออกมาที่เวลา 99 ไมโครวินาที คลื่นกระแทกกระเบิด หรือ Blast wave ขยายออกจนชนกับผนังห้องทดสอบและคลื่นกระแทกสะท้อนกลับ

(Reflected shock wave) ลูกกระสุนปืนมีความเร็วเหนือความเร็วเสียงทำให้เกิดคลื่นกระแทกแรก (1st shock wave) ขึ้น หลัง Blast wave ความเร็วของ Blast wave ต่ำกว่าความเร็วของลูกกระสุนปืน เห็นได้ชัดจากลูกกระสุนปืนเริ่มเคลื่อนที่ผ่าน Blast wave นอกจากนั้น ส่วนด้านหลังของลูกกระสุนปืนยังเกิดคลื่นกระแทกจากการระเบิดที่สอง (2nd blast wave) ซึ่งเป็นแรงขับเคลื่อนปืนที่ขับเคลื่อนลูกกระสุนปืนอย่างต่อเนื่อง แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนในรูปที่ 7(d) รูปที่ 7(e) และรูปที่ 7(f) คลื่นกระแทกเกิดขึ้นรอบ ๆ ลูกกระสุนปืน และยังเห็นการเปลี่ยนแปลงมุมของคลื่นกระแทก คลื่นกระแทกเฉียง หรือ Oblique shock wave นั้นแสดงว่าความเร็วของลูกกระสุนปืนยังเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ดังผลของความเร็วจากรูปที่ 6 ที่แสดงให้เห็นว่าลูกกระสุนปืนแบบ P.std ยังมีความเร็วที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง

3.2.2 ผลของคลื่นกระแทกจากลูกกระสุนปืนแบบ P.r4

ในรูปที่ 8 เป็นภาพถ่ายคลื่นกระแทกที่กำเนิดจากลูกกระสุนปืนทรงกระบอกส่วนหัวโค้งมนรัศมี 4 มิลลิเมตร หรือ P.r4

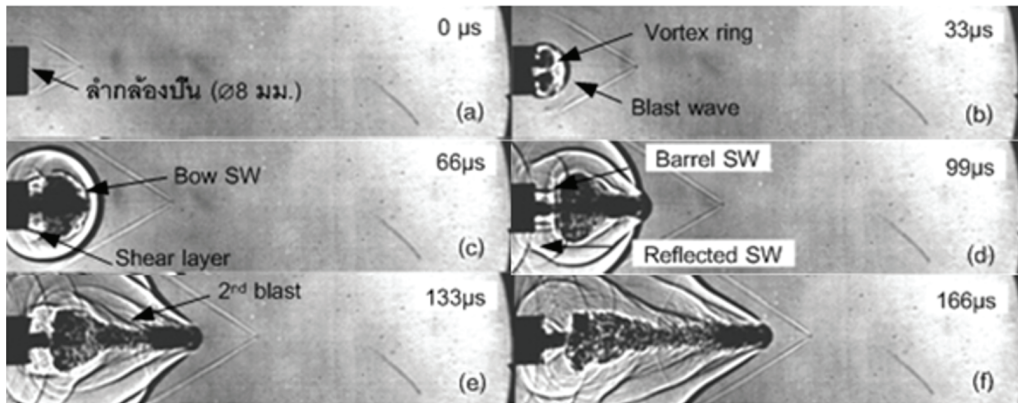
จากรูปที่ 8(b) จะเห็น Blast wave เกิดขึ้นเช่นเดียวกับรูปที่ 7 แต่ที่มองเห็นได้อย่างชัดเจนคือ การเกิดวงแหวนกระแสวน (Vortex ring) ที่ปลายกระบอกปืนก่อนที่ลูกกระสุนปืนจะถูกยิงออกมาจากกระบอกปืน สาเหตุของการเกิด Vortex ring คือ ความแตกต่างของความดันของแก๊สที่ถูกอัดในลำกล้องกับความแตกต่างภายนอก เมื่อความดันถูกอัดออกมาผ่านปลายลำกล้องปืน แรงต้านการเคลื่อนที่ (Drag force) ส่วนหน้าจะสูงประกบกับความดันด้านข้างต่ำกว่าจึงมีแนวโน้มตัวออกด้านข้าง ที่เวลา 66 ไมโครวินาที หลังจากที่ถูกยิงออกมา เกิด 1st shock wave ซึ่งเป็นคลื่นกระแทกที่เกิดจากการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงเหนือเสียงของลูกกระสุนปืนพร้อม ๆ กันกับคลื่นกระแทกจากการระเบิดที่สอง หรือ 2nd blast wave ที่เกิดจากแรงระเบิดของดินปืนขับ ส่วนด้านหลังของลูกกระสุนปืน มองเห็นจานแมค (Mach disc) ได้บ้าง เป็นคลื่นกระแทกที่เกิดจากความดันภายในและแรงต้านของแรงดันจากภายนอกที่มีความแตกต่างกัน ในช่วงเวลาสั้น ๆ แรงดันขับจากด้านหลังจึงพยายามเคลื่อนที่ออกทางด้านข้าง ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 8(d) ที่เกิด Vortex ring ขึ้นอีกครั้งที่ด้านหลังลูกกระสุนปืน ในรูปที่ 8(e) และรูปที่ 8(f) พฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของคลื่นกระแทก คลื่นกระแทกเป็น Oblique shock wave แสดงว่าลูกกระสุนปืนยังเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง



รูปที่ 8 คลื่นกระแทกจากลูกกระสุนปืนแบบ P.r4

3.2.3 ผลของคลื่นกระแทกจากลูกกระสุนปืนแบบ P.304

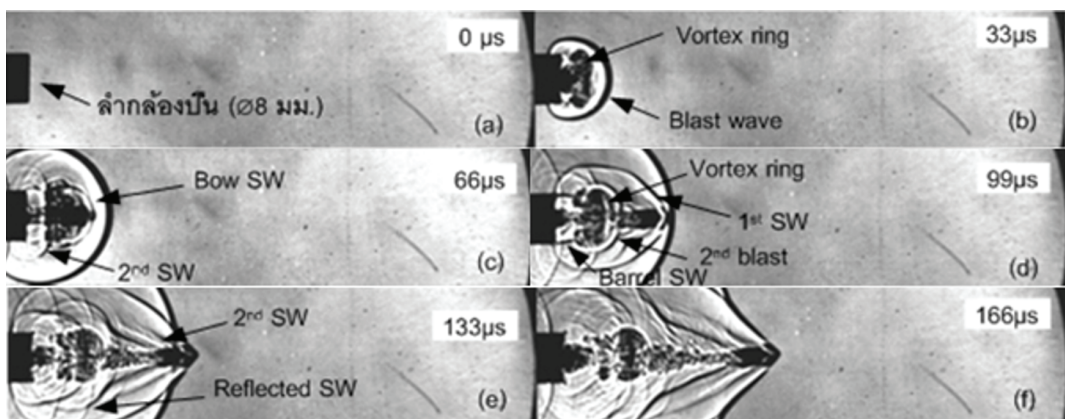
รูปที่ 9(b) ที่เวลาเริ่มต้น 33 ไมโครวินาที เกิด Vortex ring และ Blast wave เช่นเดียวกันกับกรณีอื่น ๆ แต่ที่เห็นได้ชัดก็คือ การเกิด Barrel shock wave และ Shear layer ที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาที่ 33 - 66 ไมโครวินาที ในรูปที่ 9(c) และรูปที่ 9(d) นอกจากนี้คลื่นกระแทกที่ส่วนหัวของลูกกระสุนปืนมีลักษณะเป็นคลื่นกระแทกเฉียง Oblique shock wave แบบคลื่นกระแทกติด หรือ Attached shock wave เหมือนคลื่นกระแทกของกรณี P.r4 เนื่องจากลักษณะรูปร่างของลูกกระสุนปืนทั้งสองคล้ายคลึงกัน



รูปที่ 9 คลื่นกระแทกจากลูกกระสุนปืนแบบ P.304

3.2.4 ผลของคลื่นกระแทกจากลูกกระสุนปืนแบบ P.30

ในรูปที่ 10(b) ที่เวลาเริ่มต้น 33 ไมโครวินาที เกิด Vortex ring และ Blast wave เหมือนกรณีอื่น ๆ และที่เวลา 66 ไมโครวินาที เกิด Bow shock wave ขึ้นที่ด้านหน้าลูกกระสุนปืนแต่เป็นคลื่นกระแทกที่เกิดจากการระเบิดของดินปืนขับ รูปที่ 10(d) แสดงคลื่นกระแทกที่เกิดจากลูกกระสุนปืนหัวทรงกรวยแหลม มุม 30 องศา คลื่นกระแทกที่เกิดขึ้นมีรูปทรงเหมือนส่วนหัวของลูกกระสุนปืน มีลักษณะเป็น Oblique shock wave ที่เป็น Attached shock wave ชัดเจนและในช่วงเวลา 66 - 99 ไมโครวินาที ในรูปที่ 10(c) และรูปที่ 10(d) เกิดคลื่นกระแทกปลายกระบอกปืน และ Vortex ring ด้านหลังลูกกระสุนปืนอย่างชัดเจน



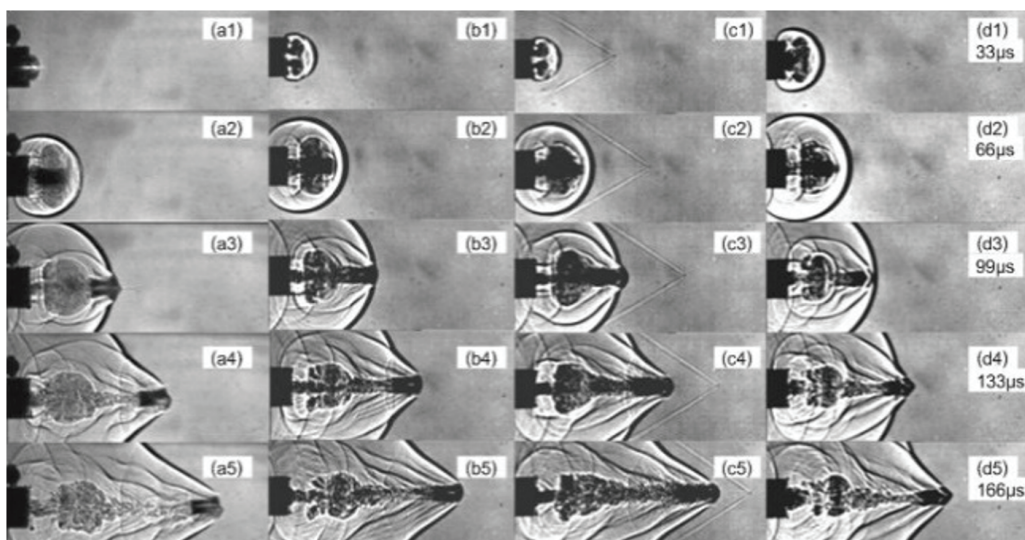
รูปที่ 10 คลื่นกระแทกจากลูกกระสุนปืนแบบ P.30

3.2.5 เปรียบเทียบคลื่นกระแทกของลูกกระสุนปืนแบบต่าง ๆ

ในรูปที่ 11 เปรียบเทียบภาพถ่ายลูกกระสุนปืนแบบ P.std (รูปที่ 7(a)) P.r4 (รูปที่ 8(b)) P.304 (รูปที่ 9(c)) และ P.30 (รูปที่ 10(d)) ที่ช่วงเวลาต่าง ๆ ทุก 33 ไมโครวินาที และเนื่องจากลูกกระสุนปืนแบบ P.45 มีลักษณะที่ใกล้เคียงกับลูกกระสุนปืนแบบ P.30 มาก ดังนั้นผลการทดลองที่ได้จากภาพถ่ายจึงใกล้เคียงกัน และผลของความเร็วในรูปที่ 6 ที่มีความเร็วเริ่มต้น ความเร็วสุดท้ายและแนวโน้มของความเร็วไม่ต่างกัน ดังนั้นการเปรียบเทียบของการทดลองจากภาพถ่ายจึงไม่ได้นำมาเสนอ

ในช่วงเวลาเริ่มต้นของภาพที่บันทึกได้ (ที่ 33 ไมโครวินาที) พฤติกรรมของคลื่นกระแทกที่เกิดขึ้นนั้นไม่แตกต่างกัน คือ Blast wave จากอากาศที่ถูกอัดด้านหน้าของลูกกระสุนปืนมีลักษณะรูปทรงเป็นลูกบอลกลม และเกิด

Vortex ring อยู่ด้านใน แต่ Blast wave ที่เกิดจากลูกกระสุนปืน P.30 (รูปที่ 11(d1)) ซึ่งมีความเร็วต่ำกว่าลูกกระสุนปืนชนิดอื่น (ความเร็วประมาณ 380 เมตรต่อวินาที) มีขนาดใหญ่กว่า Blast wave ของลูกกระสุนปืนแบบอื่น สาเหตุที่เห็นได้ชัดจากภาพคือแรงระเบิดจากดินปืนขับสามารถรื้อไหลผ่านผนังกระบอกปืนกับผิวด้านข้างของลูกกระสุนปืนได้ เพราะพื้นที่ผิวด้านข้างของลูกกระสุนปืนที่สัมผัสผนังลำกล้องปืนน้อย ทำให้ Blast wave ที่เกิดขึ้นรุนแรงกว่าและทำให้แรงขับเคลื่อนลูกกระสุนปืนต่ำ ความเร็วของลูกกระสุนปืนจึงต่ำ รูปที่ 11(b1) และรูปที่ 11(c1) เป็นภาพถ่ายของลูกกระสุนปืน P.r4 กับ P.304 มีขนาดและรูปทรงของ Blast wave ที่ไม่แตกต่างกัน ความเร็วของลูกกระสุนปืนใกล้เคียงกันมาก ดังกราฟความเร็วที่แสดงในรูปที่ 5 ความเร็วที่สูงเกิดจากแรงขับเคลื่อนของดินปืนที่สูงกว่าแบบ P.30 แรงต้านการเคลื่อนที่ของผิวสัมผัสด้านข้างกับแรงต้านด้านหน้าต่ำกว่าแบบ P.std นอกจากนี้ ภาพของ Blast wave กรณีลูกกระสุนปืน P.std ไม่ชัด แสดงถึงความดันอัดตัวของอากาศด้านหน้าลูกกระสุนปืนต่ำ (และการรื้อไหลของแรงขับเคลื่อนด้านหลังลูกปืนน้อย) ความเร็วของลูกกระสุนปืนเริ่มต้นต่ำกว่าลูกกระสุนปืน P.r4 กับ P.304 เนื่องจากพื้นที่ผิวผนังด้านข้างมีแรงเสียดทานสูง ในช่วงเวลาที่ 66 ไมโครวินาที



รูปที่ 11 เปรียบเทียบพฤติกรรมของคลื่นกระแทก

เห็นได้ชัดเจนว่า Blast wave ขยายตัวขึ้นเหมือนกันทุกกรณี พฤติกรรมของคลื่นกระแทกด้านหน้าและด้านหลังของลูกกระสุนปืนไม่แตกต่างกัน คือ Bow shock wave หรือ 2^{nd} blast wave เกิดขึ้นพร้อมกัน และเกิดขึ้นพร้อมกับ Shear layer ด้านหลังลูกกระสุนปืนยกเว้นกรณี P.std (รูปที่ 10(a2)) ที่ไม่ค่อยชัดเจน ช่วงเวลา 99 ไมโครวินาที นั้น 2^{nd} blast wave ขยายตัวออก คลื่นกระแทกที่เกิดจากลูกกระสุนปืนเกิดขึ้นที่ส่วนหัวของลูกกระสุนปืนเห็นได้ชัดเจนขึ้นเหมือนกันทุกกรณี กรณีของคลื่นกระแทกที่เกิดจากลูกกระสุนปืนแบบ P.30 (รูปที่ 10(d)) เห็นได้ชัดเจนที่สุดว่ามีรูปทรงเหมือนหัวกระสุนปืน ส่วนหางของคลื่นกระแทกม้วนกลับเข้าหาแกนกลางเนื่องจากความแตกต่างของความดันที่เกิดจากการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงจึงเกิดการเหนี่ยวนำส่วนท้ายของลูกกระสุนปืน ท้ายสุดของการเคลื่อนที่ของลูกกระสุนปืนที่แสดงในรูป คือช่วงเวลา 133 - 166 ไมโครวินาที นั้น คลื่นกระแทกยังเห็นได้อย่างชัดเจน 3 คลื่นหลัก ๆ เหมือนกันทุกกรณี นั่นคือ

1. Blast wave หรือ Precursor shock wave ส่วนหน้าของลูกกระสุนปืน รวมถึงคลื่นกระแทกที่เกิดจากลูกกระสุนปืน หรือ 1st shock wave
2. คลื่นกระแทกที่สองที่เกิดจากลูกกระสุนปืน หรือ 2^{nd} shock wave
3. Blast wave ที่เกิดจากดินปืนขับส่วนหลังของลูกกระสุนปืน หรือ 2^{nd} blast wave ที่เคลื่อนที่ตามส่วนหางของลูกกระสุนปืนเนื่องจากการระเบิดของดินปืนขับและเหนี่ยวนำของลูกกระสุนปืน

4. สรุป (Conclusion)

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยพื้นฐานเพื่อใช้เทคนิคการโดว์กราฟศึกษาพฤติกรรมของคลื่นกระแทก พฤติกรรมของคลื่นกระแทกกำเนิดจากรูปร่างของลูกกระสุนปืนที่แตกต่างกัน ผลการทดลองที่ได้จากเทคนิคการโดว์กราฟถูกบันทึกด้วยกล้องถ่ายภาพเคลื่อนไหวความเร็วสูง ที่ความเร็วของลูกกระสุนปืนสูงสุดประมาณ 780 เมตรต่อวินาที ที่กำเนิดจากลูกกระสุนปืนทรงกระบอกหัวเรียบ หัวมน และหัวกรวยตัด หรือที่ความเร็วเฉลี่ยประมาณ 550 เมตรต่อวินาที จากลูกกระสุนปืนทรงกระบอกหัวทรงกรวย 30 องศา และ 45 องศา สามารถมองเห็นพฤติกรรมของคลื่นกระแทกได้ชัดเจน

ดังนั้น เทคนิคการโดว์กราฟจะเป็นประโยชน์ในการศึกษาคลื่นกระแทก โดยเฉพาะการกำเนิดคลื่นกระแทกจากเครื่องมือทางการแพทย์ เพื่อการพัฒนาเครื่องมือทางการแพทย์และพฤติกรรมของคลื่นกระแทกให้เหมาะสมกับผู้ป่วยหรือชนิดของโรคต่อไปในอนาคต นอกจากนี้แล้วพฤติกรรมของคลื่นกระแทกยังแสดงถึงความเร็วของวัตถุ ชนิดของกระสุนปืน และวิถีกระสุนได้

5. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ศาสตราจารย์ ดร.กุลเชษฐ์ เพียรทอง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานีที่ให้คำแนะนำ ข้อเสนอแนะในการทำวิจัย และเครื่องมือ ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสุรินทร์ ที่สนับสนุนการทำวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] Kennedy CF, Field JE. Damage threshold velocities for liquid impact. J Mater Sci. 2000;35:5331-9.
- [2] Field JE, Camus JJ, Tinguely M, Obreschkow D, Farhat M. Cavitation in impacted drops and jets and the effect on erosion damage threshold. Wear. 2012;290:154-60.
- [3] Gohardani O, Williamson DM, Hammond DW. Multiple liquid impacts on polymeric matrix composites reinforced with carbon nanotubes. Wear. 2012;294:336-46.
- [4] Settles GS. High-speed imaging of shock waves explosions and gunshots. Am Sci. 2006;94(1):22-31.
- [5] Shergold OA, Fleck NA, King TS. The penetration of a soft solid by a liquid-jets, with application to the administration of a needle-free injection. J Biomech. 2006;39(14):2593-602.
- [6] ปริญา เลิศสินไทย. การรักษาด้วยคลื่นช็อกในความผิดปกติระบบโครงสร้างกระดูกและกล้ามเนื้อ. J Med Tech Phy Ther. 2015;27(2):107-24.
- [7] วลัยลักษณ์กุลไทย, ฌาก ฟองอักชร. การศึกษาเปรียบเทียบผลของคลื่นกระแทกชนิดเรเดียลกับคลื่นเสียงความถี่สูงในการลดอาการปวดในผู้ป่วยโรคข้อเข่าเสื่อม. J Thai Rehabil Med. 2017;27(1):18-24.
- [8] Shrivastava SK, Kailash, Shock wave treatment in medicine. J Biosci. 2005;30(2):269-75.
- [9] Libal U, Spyra K. Wavelet based shock wave and muzzle blast classification for different supersonic projectiles. Expert Syst Appl. 2014;41(11):5079-104.
- [10] Jiang Z, Huang Y, Takayama K. Shocked flows induced by supersonic projectiles moving in tubes. Comput Fluids. 2004;33(7):953-66.
- [11] Horii T, Kasahara J, Endo T, Fujiwara T. Experimental studies on supersonic combustion phenomena of CO-O₂-H₂ premixed gases around hypersonic projectiles. JSME Int J, Ser B. 1998;41(2):316-21.
- [12] Hao B, Lu YG, Dai H. Ballistic characteristics of high-speed projectiles entering water vertically. J Appl Fluid Mech. 2023;16(10):1962-73.

- [13] Chen T, Guo Z, Zhao G, Zhang W. A discrete method and experimental study for the propagation of shock wave induced by high-speed projectile entering water-filled tanks. *Ocean Engineering*. 2022;248:1-15.
- [14] Toker G, Korneev N. Disappearance of holographic and interference fringes accompanies optical diagnostics of a supersonic bow shock flow. *Optik*. 2008;119(3):112-6.
- [15] Jiang Z. Wave dynamic processes induced by a supersonic projectile discharging from a shock tube. *Phys Fluids*. 2003;15(6):1665-75.
- [16] Sukhon TA. Comparison of the effectiveness of radial shock wave therapy (RSWT) and deep friction massage (DFM) in myofascial pain syndrome of upper trapezius. *Medical Journal of Srisaket Surin Buriram Hospitals*. 2018;33(2):129-44.
- [17] Ladawan S. Comparison of ureteroscopy versus extracorporeal shockwave lithotripsy in the treatment of distal ureteral stones. *Region 4-5 Medical Journal*. 2016;35:114-23.
- [18] Sittiwong W, Seehanam W, Pianthong K. Effect of projectile shape on wave behavior in solid. *Journal of Science Ladkrabang*. 2015;24(1):1-5.

การตรวจวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมในกระดาษสัมผัสอาหาร ด้วยเทคนิคอินดักทีฟพลาสมาแมสสเปกโตรเมตรี

Determination of cadmium in paper for food contact
by inductively coupled plasma mass spectrometry

นุจรินทร์ พลหงษ์¹, เนตรศิรินทร์ กฤษวงษ์¹, วรณรัตน์ บุรณะกุล¹, วีรภัทร รามณี¹,
จิตวิไล เวฬุวนารักษ์¹, วีระ สวนไรสง¹

Nootjarin Phonhong¹, Netsirin Gissawong¹, Warunrat Buranakul¹, Veerapat Ramanee¹,
Jitwilai Waluvanarak¹, Weera Suanthaisong¹

รับบทความ 31 พฤษภาคม 2567 แก้ไขบทความ 22 ตุลาคม 2567 ยอมรับตีพิมพ์ 6 พฤศจิกายน 2567

บทคัดย่อ

การศึกษานี้เป็นการตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีการตรวจวัดปริมาณแคดเมียมในกระดาษสัมผัสอาหาร ด้วยการย่อยตัวอย่างกระดาษด้วยไมโครเวฟในสถานะที่เป็นกรด หลังจากนั้นตรวจวัดปริมาณแคดเมียมด้วยเทคนิคอินดักทีฟพลาสมาแมสสเปกโตรเมตรี ห้องปฏิบัติการจำเป็นต้องตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีทดสอบเพื่อประเมินว่าวิธีทดสอบเหมาะสำหรับการนำมาใช้หรือไม่ โดยศึกษาคุณลักษณะเฉพาะของวิธีทดสอบ ได้แก่ ช่วงการใช้งานของเครื่องมือ (Instrument working range) ขีดจำกัดการตรวจหา (Limit of detection, LOD) ขีดจำกัดการวัดปริมาณ (Limit of quantitation, LOQ) ความเอนเอียง (Bias) ความเที่ยง (Precision) ผลกระทบจากองค์ประกอบของตัวอย่าง (Matrix effect) และความไม่แน่นอนของการวัด (Measurement uncertainty) จากการศึกษาพบว่า ช่วงการใช้งานของวิธีทดสอบอยู่ในช่วง 0.040 - 0.40 mg/kg โดยค่า Correlation coefficient (r) เท่ากับ 0.9999 ขีดจำกัดการตรวจหาและขีดจำกัดการวัดปริมาณ เท่ากับ 0.0024 mg/kg และ 0.040 mg/kg ตามลำดับ จากการศึกษาความเอนเอียงและความเที่ยง พบว่าค่าร้อยละการคืนกลับอยู่ในช่วง 86.5 - 92.1 และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์น้อยกว่าร้อยละ 10 นอกจากนี้ค่าความไม่แน่นอนขยายของวิธีน้อยกว่าร้อยละ ± 20 ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังนั้นสรุปว่าวิธีทดสอบนี้สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมในกระดาษสัมผัสอาหารที่ผลิตจากกระดาษแข็งให้ผลการวัดที่มีทั้งความแม่นยำ ความเที่ยง และเหมาะสมกับการใช้งานตามวัตถุประสงค์

คำสำคัญ: การย่อยด้วยไมโครเวฟ, อินดักทีฟพลาสมาแมสสเปกโตรเมตรี, กระดาษสัมผัสอาหาร, แคดเมียม

¹กลุ่มผลิตภัณฑ์โลหะ กองเคมีภัณฑ์และผลิตภัณฑ์อุปโภค กรมวิทยาศาสตร์บริการ

Abstract

This work proposed the method validation for cadmium (Cd) determination in paper for food contact material (FCM). The paper based FCMs was digested using microwave digestion in acidic condition. After that, Cd was analyzed by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). It is necessary that the laboratory has to validate testing method to evaluate whether the validated method is fit for intended use. The performance characteristics were studied including instrument working range, limit of detection (LOD), limit of quantitation (LOQ), bias, intermediate precision, matrix effect and measurement uncertainty. Under the studied condition, the linearity in the range of 0.040 - 0.40 mg/kg with the correlation coefficient (r) of 0.9999 was obtained. The LOD and LOQ were 0.0024 mg/kg and 0.040 mg/kg, respectively. The bias and precision studies showed that percentage of recovery and relative standard deviation (RSD) of Cd were between 86.5 - 92.1% and less than 10%, respectively. Moreover, the expanded uncertainty of the proposed method was less than $\pm 20\%$ at the confidence level of 95%. Thus, it can be concluded that this test method for Cd determination in paper based FCM was valid and fit for the intended use.

Keywords: Microwave digestion, Inductively coupled plasma mass spectrometry, Paper for food contact, Cadmium

¹Metallic Products Group, Chemicals and Consumer Products Division, Department of Science Service

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

1. บทนำ (Introduction)

ในปัจจุบันวัสดุสัมผัสอาหาร (Food contact materials; FCMs) และบรรจุภัณฑ์ต่าง ๆ เป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมที่ส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อม เนื่องจากผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่ผลิตมาจากพลาสติก โฟม ซึ่งเป็นวัสดุที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ และวัสดุประเภทนี้ยังมีส่วนสำคัญในการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก่อให้เกิดปัญหาโลกร้อนเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นเพื่อลดการใช้วัสดุเหล่านี้จึงได้มีการเสนอผลิตภัณฑ์สัมผัสอาหารที่ทำจากกระดาษเป็นวัสดุทดแทน ซึ่งตอบสนองต่อเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular economy) สามารถนำไปรีไซเคิลและนำกลับมาใช้ใหม่ได้ และเป็นการลดปริมาณของเสียที่เกิดขึ้น อย่างไรก็ตามผลิตภัณฑ์ที่ทำจากกระดาษอาจจะมีการเติมสารเคลือบ หรือสารปรุงแต่งต่าง ๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งานให้ดียิ่งขึ้น ดังนั้นสารปนเปื้อนในผลิตภัณฑ์กระดาษ เช่น สารฟอกขาว สารต้านจุลินทรีย์ และโลหะหนัก สามารถเกิดการแพร่หรือละลายออกมาเข้าไปสู่อาหารได้ สหภาพยุโรปจึงได้มีการกำหนดกฎหมายเกี่ยวกับวัสดุสัมผัสอาหารที่เข้มงวดมากขึ้นซึ่งครอบคลุมวัสดุสัมผัสอาหารทั้งหมด 17 ประเภท รวมทั้งกระดาษด้วย

แคดเมียม (Cd) เป็นหนึ่งในโลหะหนักที่อันตราย ซึ่งสามารถตรวจพบได้จากวัสดุสัมผัสอาหารประเภทต่าง ๆ เช่น กระดาษสัมผัสอาหารที่พิมพ์ลายโดยใช้หมึกพิมพ์ที่ไม่ใช้หมึกพิมพ์ชั้นคุณภาพสัมผัสอาหาร เมื่อผู้บริโภคได้รับแคดเมียมในปริมาณที่มากเกินไป จะเกิดผลเสียต่อสุขภาพ ได้แก่ อ่อนเพลีย เหนื่อยง่าย คลื่นไส้ ปวดเมื่อย ส่งผลต่อไตและกระดูก อีกทั้งแคดเมียมยังเป็นสารก่อมะเร็งโดยเฉพาะมะเร็งปอด มะเร็งต่อมลูกหมากและไต ดังนั้นจึงได้มีการกำหนดมาตรฐานต่าง ๆ เพื่อความปลอดภัยต่อผู้บริโภค ในประเทศไทยมีการกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระดาษสัมผัสอาหาร (มอก. 2948) [1] และมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระดาษสัมผัสอาหาร สำหรับปรุงอาหารด้วยความร้อน (มอก. 3438) [2] ซึ่งกำหนดให้ปริมาณแคดเมียมที่สามารถตรวจพบได้ในผลิตภัณฑ์กระดาษมีค่าไม่เกิน 0.50 mg/kg เมื่อทดสอบตามวิธีมาตรฐาน BS EN 12498: Paper and board – Paper and board intended to come into contact with foodstuffs – Determination of cadmium, chromium and lead in an aqueous extract [3] ซึ่งมาตรฐานนี้เสนอการวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมที่สามารถแพร่กระจายสู่อาหารได้ โดยใช้วิธีการสกัดด้วยตัวทำละลายที่เหมาะสมตามลักษณะการใช้งานของผลิตภัณฑ์ เช่น ผลิตภัณฑ์กระดาษที่สัมผัสหรือปรุงอาหารที่ไม่ใช้ความร้อน ให้ใช้วิธีตามมาตรฐาน BS EN 645: Paper and board intended to come into contact with foodstuffs - Preparation of a cold water extract [4] และผลิตภัณฑ์กระดาษที่สัมผัสหรือปรุงอาหารด้วยความร้อน ให้ใช้วิธีตามมาตรฐาน BS EN 647: Paper and board intended to come into contact with foodstuffs – Preparation of a hot water extract [5] ซึ่งทั้งสองวิธีดังกล่าวยังมีข้อจำกัดที่ก่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนของการวัดเชิงระบบของวิธีการวิเคราะห์ (Method bias) เนื่องจากผลิตภัณฑ์กระดาษบางประเภทมีคุณสมบัติเป็นตัวดูดซับ ส่งผลให้ค่าความโอนเียงของวิธีทดสอบตามมาตรฐาน BS EN 12498 ซึ่งประเมินจากค่าคืนกลับของปริมาณแคดเมียมในสารละลายที่สกัดได้จากตัวอย่าง กระดาษแข็งตามมาตรฐานดังกล่าวเปรียบเทียบกับปริมาณแคดเมียมที่ทราบความเข้มข้นที่แท้จริง มีค่าคืนกลับน้อยกว่าร้อยละ 70 [6] ดังนั้นการพัฒนางานวิธีทดสอบผลิตภัณฑ์กระดาษจึงมีความสำคัญเพื่อให้สามารถวิเคราะห์ปริมาณโลหะในผลิตภัณฑ์กระดาษได้ทุกประเภท

การศึกษานี้จึงเป็นการพัฒนางานวิธีการวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมในตัวอย่างผลิตภัณฑ์กระดาษโดยใช้การย่อยด้วยไมโครเวฟและตรวจวัดด้วยเทคนิคอินดักทีฟพลาสมาแมสสเปกโทรเมตรี ซึ่งการพัฒนางานวิธีทดสอบนี้ได้ทำการตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีโดยกำหนดค่าความไม่แน่นอนเป้าหมายของผลการทดสอบไม่เกินร้อยละ ± 20 การศึกษา คุณลักษณะเฉพาะของวิธี ได้แก่ ช่วงการใช้งานของเครื่องมือ (Instrument working range) ขีดจำกัดการตรวจหา (Limit of detection, LOD) ขีดจำกัดการวัดปริมาณ (Limit of quantitation, LOQ) ความโอนเียง (Bias) ความเที่ยง (Precision) ผลกระทบจากองค์ประกอบของตัวอย่าง และการประมาณค่าความไม่แน่นอนของการวัด อ้างอิงแนวทางตามเอกสาร The fitness for purpose of analytical methods – A laboratory guide to method validation and related topics [7] และ VAM Project 3.2.1 Development and harmonisation of measurement uncertainty principles. part (d): Protocol for uncertainty evaluation from validation data. [8]

2. วิธีการวิจัย (Experimental methods)

2.1 ตัวอย่าง

2.1.1 ตัวอย่างกระดาศ หมายถึง กระดาศแห้ง ที่นำมาใช้รองรับอาหารที่ผลิตจากเยื่อบริสุทธิ์หรือเยื่อธรรมชาติ ผ่านการฟอกสีแล้วนำไปอัดแข็งและขึ้นรูปเป็นภาชนะสัมผัสอาหาร จากนั้นไปทำให้แห้ง

2.1.2 ตัวอย่างที่ใช้ศึกษา คือ กระดาศแห้งที่ไม่มีการปนเปื้อนปริมาณแคดเมียมหรือมีปริมาณแคดเมียมไม่เกิน $0.80 \mu\text{g/kg}$ ($0.0040 \mu\text{g/L}$) ที่สุ่มมาจากกลุ่มกระดาศแห้งที่ผลิตขึ้นมาในช่วงเวลาเดียวกัน

2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

2.2.1 เครื่องอินดักทีฟพลาสมาแมสสเปกโตรมิเตอร์ (Inductively coupled plasma mass spectrometer) ยี่ห้อ PerkinElmer รุ่น NexION 350S พร้อมอุปกรณ์

2.2.2 เครื่องย่อยสลายตัวอย่างด้วยระบบไมโครเวฟ (Microwave digestion) ยี่ห้อ Analytik Jena รุ่น TOP Wave พร้อมอุปกรณ์

2.2.3 เครื่องชั่งยี่ห้อ Sartorius รุ่น Quintix 224-1S ความละเอียด 0.1 mg

2.2.4 ขวดแก้ววัดปริมาตร เกรดเอ (Volumetric flask class A) ขนาด 100 mL ที่แห้งและสะอาด โดยการแช่ด้วยกรดไนตริกเจือจาง ที่ความเข้มข้นประมาณ 10% แล้วล้างออกด้วยน้ำสะอาด

2.2.5 ปิเปตวัดปริมาตร เกรดเอ (Volumetric pipette class A) ขนาดต่าง ๆ ที่แห้งและสะอาด โดยการแช่ด้วยกรดไนตริกเจือจาง ที่ความเข้มข้นประมาณ 10% แล้วล้างออกด้วยน้ำสะอาด

2.3 สารเคมี สารละลาย และวิธีเตรียม

2.3.1 สารเคมี

2.3.1.1 น้ำปราศจากไอออนบริสุทธิ์ ความต้านทานไฟฟ้า $18.2 \text{ M}\Omega/\text{cm}$

2.3.1.2 กรดไนตริกเข้มข้น (HNO_3) 65% w/v ความถ่วงจำเพาะ 1.40 Analytical reagent grade ยี่ห้อ Merck

2.3.1.3 สารละลายกรดไนตริก 2% v/v เตรียมโดยตวงน้ำที่ปราศจากไอออน 980 mL และตวงกรดไนตริก 20 mL ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 2,000 mL จากนั้นผสมให้เข้ากัน

2.3.2 สารละลายมาตรฐาน

2.3.2.1 สารละลายมาตรฐานแคดเมียม (Cd) ความเข้มข้น $1,000 \pm 24 \text{ mg/L}$ ยี่ห้อ AccuStandard สอบกลับได้ไปยัง NIST RM 3128

2.3.2.2 สารละลายมาตรฐานแคดเมียม (Cd) ความเข้มข้น $1,000 \pm 3 \text{ mg/L}$ ยี่ห้อ High-purity สอบกลับได้ไปยัง NIST RM 3128 คนละแหล่งกับสารละลายมาตรฐานแคดเมียมในข้อ 2.3.2.1

2.3.2.3 สารละลายมาตรฐานแคดเมียมความเข้มข้น 10.0 และ 0.10 mg/L เตรียมโดยปิเปตสารละลายมาตรฐานแคดเมียมในข้อ 2.3.2.1 ปริมาตรตามตารางที่ 1 ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 100 mL จากนั้นปรับปริมาตรด้วยกรดไนตริกความเข้มข้น 2% v/v จนถึงขีดวัดปริมาตร

2.3.2.4 สารละลายมาตรฐานแคดเมียมสำหรับสร้างกราฟมาตรฐานเตรียมโดยปิเปตสารละลายมาตรฐานแคดเมียม ในข้อ 2.3.2.3 ปริมาตรตามตารางที่ 2 ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 100 mL จากนั้นปรับปริมาตรด้วยกรดไนตริกความเข้มข้น 2% v/v จนถึงขีดวัดปริมาตร

ตารางที่ 1 วิธีการเตรียมสารละลายมาตรฐานแคดเมียมความเข้มข้น 10.0, 0.10 และ 0.010 mg/L

No.	Start conc. of standard, mg/L	Volume of pipette, mL	Final conc of standard, mg/L
Std-10	1000	1	10.0
Std-0.10	10.0	1	0.10
Std-0.010	0.10	10	0.010

ตารางที่ 2 วิธีการเตรียมสารละลายมาตรฐานแคดเมียมสำหรับสร้างกราฟมาตรฐาน

No.	Start conc. of standard, mg/L	Volume of pipette, mL	Final conc of standard, µg/L
Cal-1	0.010	2	0.20
Cal-2	0.010	5	0.50
Cal-3	0.010	10	1.0
Cal-4	0.010	20	2.0

2.4 วิธีดำเนินงาน

2.4.1 การเตรียมตัวอย่าง

2.4.1.1 ตัดตัวอย่างกระดาษขนาด $1.0 \times 1.0 \text{ cm}^2$ แล้วชั่งตัวอย่างกระดาษ 0.50 g ให้ทราบน้ำหนักที่แน่นอนทศนิยม 4 ตำแหน่ง ใส่ลงในหลอด Vessels ของเครื่องย่อยสลายตัวอย่างด้วยระบบไมโครเวฟในข้อ 2.2.2

2.4.1.2 เติมนกรดไนตริกเข้มข้น (HNO_3) 65% w/v ในข้อ 2.3.1.2 ปริมาตร 10 mL รอบประมาณ 1 ชั่วโมงจนกระทั่งไม่มีปฏิกิริยาระหว่างตัวอย่างกับกรด

2.4.1.3 นำเข้าเครื่องย่อยสลายตัวอย่างด้วยระบบไมโครเวฟ

2.4.1.4 ตั้งพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับการย่อยตัวอย่าง เช่น อุณหภูมิ ความดัน เวลา และพลังงาน ดังแสดงในตารางที่ 3 ซึ่งอ้างอิงมาจากคู่มือการใช้งานเครื่องไมโครเวฟยี่ห้อ Analytik Jena AG รุ่น TOPwave

2.4.1.5 เมื่อตัวอย่างย่อยสสมบูรณ์แล้ว นำออกมาตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นถ่ายสารละลายที่ย่อยได้ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 mL ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนจนถึงขีดวัดปริมาตร

2.4.1.6 กรองสารละลายตัวอย่างด้วยกระดาษกรองเบอร์ 6 หรือเบอร์ 42 แล้วเก็บสารละลายที่กรองแล้วลงในขวดพลาสติกที่มีฝาปิด

2.4.1.7 นำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมด้วยเครื่องอินดักทีฟลิคัฟเฟิลพลาสมาแมสสเปกโตรมิเตอร์ในข้อ 2.2.1 โดยเทียบกับกราฟมาตรฐานของสารละลายมาตรฐานแคดเมียมในข้อ 2.3.2.4 และใช้พารามิเตอร์สำหรับการทดสอบตามตารางที่ 4

ตารางที่ 3 พารามิเตอร์ และเวลาการย่อยตัวอย่าง [9]

Step	Target temp [°C]	Pressure limited [bar]	Ramp	Time [min]	Power [%]
1	170	50	5	15	90
2	200	50	1	30	90
3	50	0	1	10	0
4	50	0	1	10	0
5	50	0	1	1	0

ตารางที่ 4 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์แคดเมียมด้วยเครื่อง ICP-MS [10]

พารามิเตอร์	รายละเอียด
Mass	110.904
Analysis mode	KED
Reaction gas	He
Reaction gas flow, mL/min	3.5
RF power, W	1,550
Nebulizer gas flow, mL/min	0.96
Auxiliary gas flow, mL/min	1.25
Plasma gas flow, mL/min	18
Pump speed, rpm	20
Delay time, s	45

2.4.2 ตรวจสอบ Sensitivity ของเครื่อง ICP-MS

ใช้สารละลาย Setup solution ตรวจสอบ Intensity, Doubly charged ion, Oxide และ Background โดยเลือกพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับการทดสอบตารางที่ 4 และหลังจากการปรับตั้งค่าต่าง ๆ เรียบร้อยแล้ว ค่า Intensity, Background, Oxide และ Doubly charged ion ต้องอยู่ในช่วงที่กำหนดของเครื่องมือตามตารางที่ 5

รายการ	เกณฑ์กำหนด
Intensity : Be 9	>4,000
Intensity : In 115	>55000
Intensity : U 238	>35000
Background: Bkgd 220	<=1
Oxide: CeO156/Ce140	<=0.025
Doubly charged ion: Ce++/Ce140	<=0.03

2.4.3 การหาช่วงการใช้งานของเครื่องมือ (Instrument working rang)

วัดค่ามวลต่อประจุของสารละลายมาตรฐานแคดเมียมในข้อ 2.3.2.4 จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายและค่ามวลต่อประจุ

2.4.4 การหาขีดจำกัดการตรวจหา (Limit of detection, LOD) และขีดจำกัดการวัดเชิงปริมาณ (Limit of quantitation, LOQ)

ทำการทดสอบปริมาณแคดเมียมในสารละลายตัวอย่างกระดาศที่ไม่มีแคดเมียม หรือมีแคดเมียมปริมาณน้อย ๆ ประมาณ 1-5 เท่าของค่าขีดจำกัดการตรวจหาของเครื่องมือ (IDL) จำนวน 10 ซ้ำ ด้วยเครื่อง ICP-MS ใช้ข้อมูลขีดจำกัดการตรวจหา (LOD) มาคำนวณค่าประมาณขีดจำกัดการวัดเชิงปริมาณ (LOQ) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 10 เท่าของค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) และยืนยัน LOQ ด้วยการทดสอบปริมาณแคดเมียมในสารละลายตัวอย่างกระดาศที่มีการเติมสารละลายแคดเมียมที่ความเข้มข้นที่ประเมินได้จากขีดจำกัดการตรวจหา หรือที่ความเข้มข้นที่สามารถพิสูจน์ความถูกต้องและความเที่ยงอยู่ในเกณฑ์การยอมรับ จำนวน 10 ซ้ำ

2.4.5 การหาค่าความเอนเอียง (Bias)

ทำการทดสอบปริมาณแคดเมียมในสารละลายตัวอย่างกระดาศที่มีการเติมสารละลายมาตรฐานแคดเมียมที่ความเข้มข้นต่ำ กลาง และสูงของช่วงการใช้งานของวิธีทดสอบ จำนวนความเข้มข้นละ 10 ซ้ำ

2.4.6 การศึกษาผลกระทบจากองค์ประกอบของตัวอย่าง (Matrix effect)

ใช้ข้อมูลจากค่าความเอนเอียงในข้อ 2.4.5 มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่เติมลงในสารละลายและปริมาณที่ตรวจวัดได้เฉลี่ยในตัวอย่าง

2.4.7 การหาค่าความเที่ยง (Precision)

ทำการทดสอบปริมาณแคดเมียมในสารละลายตัวอย่างกระดาศที่มีการเติมสารละลายมาตรฐานแคดเมียมที่ความเข้มข้นต่ำ กลาง และสูงของช่วงของการใช้งานของวิธีทดสอบ อย่างน้อยความเข้มข้นละ 10 ซ้ำ ภายใต้เงื่อนไข Intermediate Precision Condition โดยมีการเปลี่ยนแปลงเวลาและวันที่ทดสอบ

2.4.8 ประเมินค่าความไม่แน่นอนของการวัด (Uncertainty of measurement)

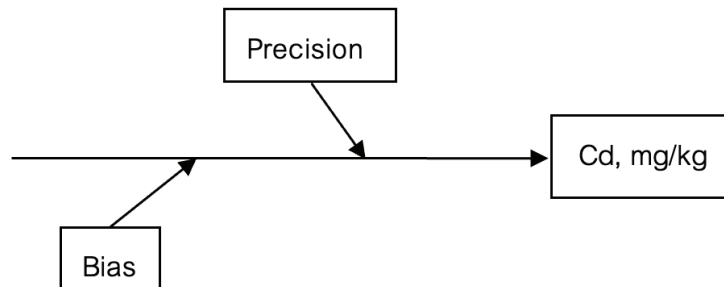
หลังจากการตรวจสอบความใช้ได้ของวิธี ข้อมูลที่ได้จากการตรวจสอบความเอนเอียง และความเที่ยง นำมาใช้ในการประมาณค่าความไม่แน่นอน โดยถือเป็นแหล่งของค่าความไม่แน่นอนที่สำคัญ ซึ่งมีขั้นตอนการประมาณค่าความไม่แน่นอนของการวัด ดังนี้

2.4.8.1 กำหนดรายละเอียดของสิ่งที่ถูกวัด (Specify measurand)

$$\text{Concentration, mg/kg} = \frac{\text{Conc } (\mu\text{g/L}) \times \text{Volume (mL)}}{\text{Weight (g)} \times 1000}$$

เมื่อ Conc คือ ความเข้มข้นที่ตรวจวัดได้ ($\mu\text{g/L}$)
 Volume คือ ปริมาตรสารละลายตัวอย่าง (mL)
 Weight คือ น้ำหนักตัวอย่าง (g)

2.4.8.2 หาแหล่งของค่าความไม่แน่นอนของการวัดโดยใช้แผนภูมิแกงปลา



รูปที่ 1 แผนภูมิแกงปลาของแหล่งค่าความไม่แน่นอนของการวัด

2.4.8.3 คำนวณค่าความไม่แน่นอนจากการทดสอบความอินทรีย์

ก) คำนวณค่าความไม่แน่นอนของค่าคืนกลับเฉลี่ยของผลการวัด, $u(\bar{R}_m)$

จากสูตร

$$\bar{R}_m = \frac{\bar{m}_{\text{obs}}}{m_{\text{spike}}}$$

$$u(\bar{R}_m) = \bar{R}_m \times \sqrt{\left(\frac{S_{m_{\text{obs}}}^2}{n \times \bar{m}_{\text{obs}}^2} \right) + \left(\frac{u(m_{\text{spike}})}{m_{\text{spike}}} \right)^2}$$

เมื่อ $\bar{R}_m$ คือ ค่าคืนกลับเฉลี่ยของปริมาณที่ตรวจวัดได้
 $\bar{m}_{\text{obs}}$ คือ ปริมาณเฉลี่ยที่ตรวจวัดได้ในตัวอย่าง
 m_{spike} คือ ปริมาณที่เติมลงในตัวอย่าง
 $S_{m_{\text{obs}}}^2$ คือ ความแปรปรวนของปริมาณที่ตรวจวัดได้
 $u(m_{\text{spike}})$ คือ ความไม่แน่นอนของปริมาณที่เติมลงในตัวอย่าง
 n คือ จำนวนของการวิเคราะห์ซ้ำ

เมื่อได้ $u(\bar{R}_m)$ ทดสอบความมีนัยสำคัญของความอินทรีย์ โดยใช้สถิติทดสอบ t (t-test) จากสูตร

$$t_{\text{cal}} = \frac{|1 - \bar{R}_m|}{u(\bar{R}_m)}$$

และพิจารณาผลการทดสอบว่ามีนัยสำคัญหรือไม่ ตามกรณีดังนี้

1) $t_{cal} < t_{crit}$ ผลการวัดไม่มีนัยสำคัญ ไม่ต้องนำค่าคืนกลับไปแก้ค่าผลการวัด แต่ยังคงนำค่าความไม่แน่นอนของค่าคืนกลับเฉลี่ยของผลการวัด ($u(\bar{R}_m)$) ไปคำนวณค่าความไม่แน่นอนของผลการทดสอบ

2) $t_{cal} > t_{crit}$ ผลการวัดมีนัยสำคัญ ให้นำค่าคืนกลับไปแก้ค่าผลการวัด และยังคงนำค่าความไม่แน่นอนของค่าคืนกลับเฉลี่ยของผลการวัด ($u(\bar{R}_m)$) ไปคำนวณค่าความไม่แน่นอนของผลการทดสอบ

3) $t_{cal} > t_{crit}$ ผลการวัดมีนัยสำคัญ แต่ไม่ต้องการนำค่าคืนกลับไปแก้ค่าผลการวัด ให้คำนวณค่าความไม่แน่นอนของค่าคืนกลับเฉลี่ยของผลการวัด $u(\bar{R}_m)''$ ไปคำนวณค่าความไม่แน่นอนของผลการทดสอบ

$$u(\bar{R}_m)'' = \sqrt{\left(\frac{1 - \bar{R}_m}{k}\right)^2 + u(\bar{R}_m)^2}$$

เมื่อ k คือ ค่าคงที่ (Coverage factor) ที่จะถูกใช้ในการคำนวณค่าความไม่แน่นอนขยาย

ข) คำนวณค่าความไม่แน่นอนของค่าคืนกลับเฉลี่ยของผลการวัดที่ครอบคลุมช่วงการใช้งาน $u(\bar{R}_s)$
 $u(\bar{R}_s) =$ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าคืนกลับเฉลี่ย

ค) คำนวณค่าความไม่แน่นอนรวมของความโอนเนื่อง $u(R)$
 จากสูตร, เมื่อให้ $R = R_m$ และ $R_s = 1$

$$u(R) = \bar{R}_m \times \sqrt{\left(\frac{u(\bar{R}_m)}{R_m}\right)^2 + u(\bar{R}_s)^2}$$

2.4.8.4 คำนวณค่าความไม่แน่นอนจากการทดสอบความเที่ยง

กรณีที่ทดสอบตัวอย่างที่มีความเข้มข้นของธาตุที่ต้องการทดสอบน้อยกว่า 5 ความเข้มข้นผู้ทดสอบต้องใช้ดุลยพินิจพิจารณาว่าค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงกับความเข้มข้นหรือไม่ ถ้ามีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง คำนวณค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์รวม (RSD_{pool}) โดยใช้สมการ

$$RSD_{pool} = \sqrt{\frac{(n_1-1) \times RSD_1^2 + (n_2-1) \times RSD_2^2 + \dots}{(n_1-1) + (n_2-1) + \dots}}$$

แล้วนำค่า RSD_{pool} ที่ได้ไปใช้เป็นค่าความไม่แน่นอนจากการทดสอบความเที่ยง ($u(P)/P$) ของผลการวัด หากค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานไม่มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงกับความเข้มข้น สามารถเลือกค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ที่มีค่ามากที่สุดเป็นค่าความไม่แน่นอนจากการทดสอบความเที่ยงของผลการวัด

2.4.8.5 ค่าความไม่แน่นอนรวม (u_c)

เมื่อได้แหล่งของความไม่แน่นอนต่าง ๆ แล้วสามารถคำนวณค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานรวม (u_c) จากสูตรดังต่อไปนี้

$$U_c = C \times \sqrt{\left(\frac{u(R)}{R}\right)^2 + \left(\frac{u(P)}{P}\right)^2}$$

เมื่อ C คือ ความเข้มข้นของธาตุใด ๆ

2.4.8.6 ค่าความไม่แน่นอนขยาย (U)

ความไม่แน่นอนขยาย (U) เป็นการคูณค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานรวม (u_c) ด้วยค่าคงที่ (k) เพื่อระบุระดับความเชื่อมั่น โดยทั่วไปใช้ k เท่ากับ 2 เพื่อแสดงระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

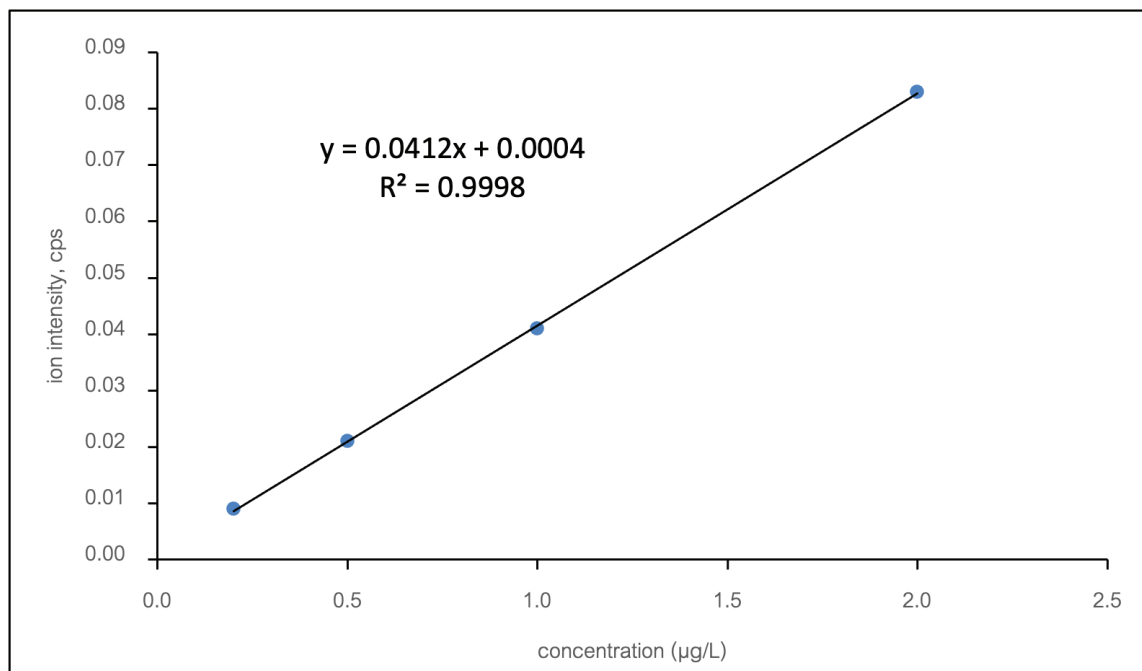
$$U = u_c \times 2$$

หลังจากได้ค่าความไม่แน่นอนของผลการวัดแล้ว ห้องปฏิบัติการต้องพิจารณาว่าค่าความไม่แน่นอนนี้เป็นไปตามวัตถุประสงค์การใช้งานหรือไม่

3. ผลและวิจารณ์ (Results and discussion)

3.1 ช่วงการใช้งานของเครื่องมือ (Instrument working range)

จากการศึกษาการหาปริมาณแคดเมียมโดยใช้กราฟมาตรฐานที่สร้างจากสารละลายมาตรฐาน พบว่ามีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination, R^2) เข้าใกล้ 1 ดังรูปที่ 2 แสดงให้เห็นว่าช่วงการใช้งานของเครื่องมือ มีค่าอยู่ในช่วง 0.20 - 2.0 $\mu\text{g/L}$ และขีดจำกัดการตรวจหาของเครื่อง (Instrument of detection, IDL) ที่คำนวณจาก 3 เท่าของค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลการทดสอบ Calibration blank (10 ซ้ำ) เท่ากับ 0.0040 $\mu\text{g/L}$



รูปที่ 2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นและค่ามวลต่อประจุ

3.2 ขีดจำกัดการตรวจหา (Limit of detection, LOD) และขีดจำกัดการวัดปริมาณ (Limit of quantitation, LOQ)

ขีดจำกัดการตรวจหา (Limit of detection, LOD) เป็นคุณลักษณะที่บอกถึงความเข้มข้นต่ำที่สุดที่สามารถตรวจวัดได้ ขีดจำกัดการวัดปริมาณ (Limit of quantitation, LOQ) เป็นคุณลักษณะที่บอกถึงความเข้มข้นต่ำที่สุดที่สามารถวัดปริมาณได้อย่างมีความแม่นยำและความเที่ยง โดยทำการทดสอบสารละลายตัวอย่างที่ไม่มีส่วนประกอบของธาตุแคดเมียม (Sample blank) หรือมีแคดเมียมปริมาณน้อย ๆ ประมาณ 1 - 5 เท่าของค่าขีดจำกัดการตรวจหาของเครื่องมือ (IDL) จำนวน 10 ซ้ำ แล้วประเมินขีดจำกัดการตรวจหา (LOD) และขีดจำกัดการวัดปริมาณ (LOQ) ได้จากสมการดังต่อไปนี้

กรณีนี้ที่ 1 ทดสอบ sample blank

ขีดจำกัดการตรวจหา, $LOD = \bar{X}_{\text{sample blank}} + 3SD$

จำกัดการตรวจวัดปริมาณ, $LOD = \bar{X}_{\text{sample blank}} + 10SD$

กรณีนี้ที่ 2 ทดสอบตัวอย่างที่มีปริมาณแคดเมียมประมาณ 1-5 เท่าของค่า IDL

ขีดจำกัดการตรวจหา, $LOD = 3SD$

ขีดจำกัดการตรวจวัดปริมาณ, $LOQ = 10SD$

เมื่อ $\bar{X}$ คือ ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของแคดเมียมที่ตรวจวัดได้

SD คือ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ $n = 10$

พบว่าขีดจำกัดการตรวจหาและค่าประมาณขีดจำกัดการวัดปริมาณของแคดเมียมมีค่าเท่ากับ 0.0024 mg/kg และ 0.010 mg/kg ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ขีดจำกัดการตรวจหาและค่าประมาณขีดจำกัดการวัดปริมาณแคดเมียม

รายการ	ปริมาณที่ตรวจวัดได้เฉลี่ยที่ปรับแก้, $\mu\text{g/L}$	ปริมาณที่ตรวจวัดได้เฉลี่ย, mg/kg
Sample blank ($\bar{X}_{\text{sample blank}}$)	-	-
SD	0.0040	0.00079
3SD (LOD)	0.012	0.0024
10SD (LOQ)	0.040	0.010

หมายเหตุ ปริมาณที่ตรวจวัดได้ที่ปรับแก้ ($\mu\text{g/L}$) =
$$\frac{(\text{ปริมาณที่ตรวจวัดได้, } \mu\text{g/L}) \times (0.50 \text{ g})}{(\text{น้ำหนักตัวอย่าง, g})}$$

3.3 การยืนยันขีดจำกัดการวัดปริมาณ (Limit of quantitation, LOQ)

3.3.1 ตรวจยืนยัน LOQ ที่ความเข้มข้น 0.020 mg/kg (0.10 $\mu\text{g/L}$) ซึ่งเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับค่าที่ประเมินได้จาก ค่าขีดจำกัดการตรวจหา พบว่าร้อยละค่าคืนกลับเท่ากับ 128.8 และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์เท่ากับ 15.2 ดังนั้นผลการตรวจยืนยัน LOQ ที่ความเข้มข้น 0.020 mg/kg ให้ค่าความแม่นยำและความเที่ยงไม่อยู่ในเกณฑ์การยอมรับ (Recovery = 80 - 110% และ %RSD น้อยกว่า 10%) [11]

3.3.2 เลือกพิสูจน์ความถูกต้องและความเที่ยงที่ความเข้มข้น 0.040 mg/kg (0.20 $\mu\text{g/L}$) พบว่าร้อยละค่าคืนกลับเท่ากับ 91.4 และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์เท่ากับ 4.7 อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ดังนั้นขีดจำกัดการวัดปริมาณ แคดเมียมเท่ากับ 0.040 mg/kg ที่ให้ผลการวัดถูกต้องและมีความเที่ยงที่สามารถรายงานผลเป็นตัวเลขได้

3.4 การศึกษาความเอนเอียง (Bias)

ความเอนเอียง คือ ผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของค่าที่วัดได้กับค่าจริงหรือค่าอ้างอิง ซึ่งค่าความเอนเอียงนี้เป็นค่าที่ใช้ประเมินความถูกต้องของผลการวัดจากการเติมสารละลายมาตรฐานแคดเมียมลงไปในตัวอย่่างกระดาศหที่ความเข้มข้น 0.040 mg/kg (0.20 $\mu\text{g/L}$, ความเข้มข้นต่ำ) 0.20 mg/kg (1.0 $\mu\text{g/L}$, ความเข้มข้นกลาง) และ 0.40 mg/kg (2.0 $\mu\text{g/L}$, ความเข้มข้นสูง) ของช่วงการใช่งานของวิธี ภายใต้การวิเคราะห์ซ้ำแบบ Repeatability แล้วสรุปความเอนเอียงรวมจากการคำนวณค่าคืนกลับ พบว่าร้อยละค่าคืนกลับอยู่ในช่วง 86.5 - 92.1% แสดงดังตารางที่ 7 พบว่าร้อยละค่าคืนกลับที่ประเมินจากการเติมสารละลายมาตรฐานแคดเมียมที่ความเข้มข้น 0.20 $\mu\text{g/L}$ และ 2.0 $\mu\text{g/L}$ ลงในตัวอย่างกระดาศหสัมผัสอาหารที่ผลิตจากกระดาศหแข็งอยู่ในเกณฑ์ใกล้เคียงเขตล่างของเกณฑ์การยอมรับ คือ 90% (ที่ความเข้มข้น 4.5 $\mu\text{g/L}$)

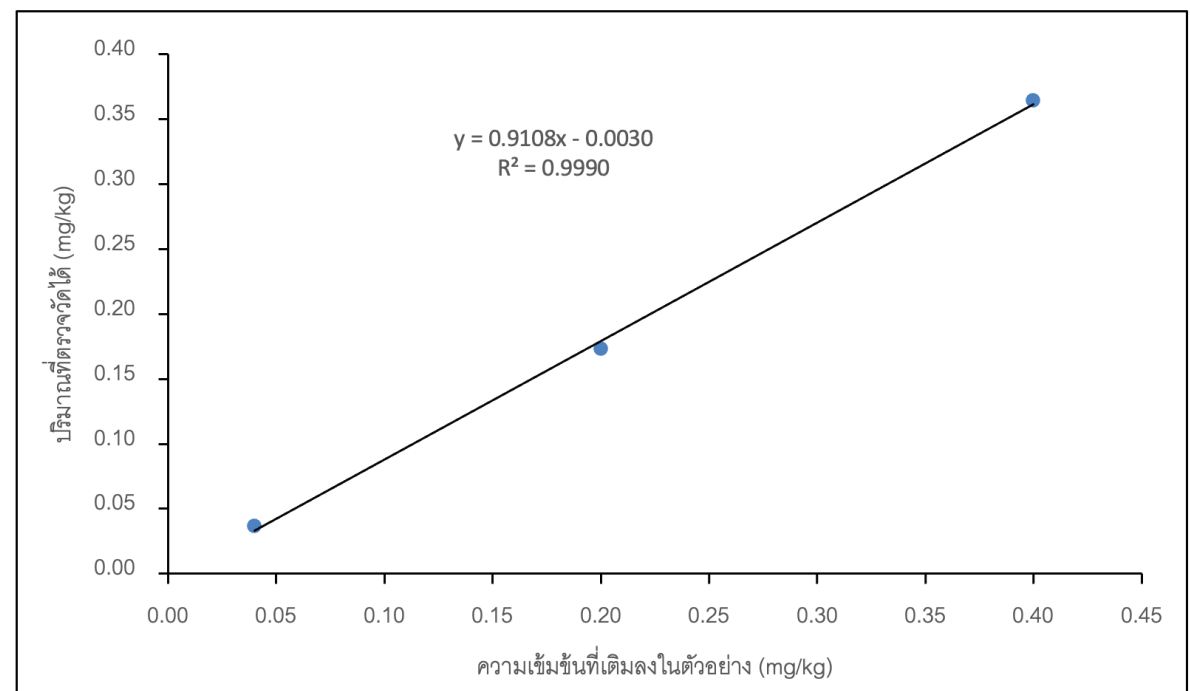
ส่วนร้อยละค่าคืนกลับที่ประเมินจากการเติมสารละลายมาตรฐานแคดเมียมที่ความเข้มข้น 1.0 µg/L ค่าคืนกลับไม่อยู่ในเกณฑ์ดังกล่าว ซึ่งเกิดจากความคลาดเคลื่อนเชิงระบบของผลการวัด ดังนั้นสรุปได้ว่าค่าความเอนเอียงของการทดสอบหาปริมาณแคดเมียมในตัวอย่างกระดาศสัมผัสอาหารที่ผลิตจากกระดาศแข็งที่ความเข้มข้นต่ำกว่า 4.5 µg/L จะมีความคลาดเคลื่อนเชิงระบบสูง จึงจำเป็นต้องนำค่าความไม่แน่นอนเป้าหมายนำมาพิจารณาความแม่นยำของผลการวัดร่วมด้วย

ตารางที่ 7 ร้อยละค่าคืนกลับที่ความเข้มข้นต่ำ กลาง สูง ที่ครอบคลุมช่วงการใช้งานของวิธีทดสอบ

Spiked sample, µg/L	ค่าอ้างอิง, mg/kg	ปริมาณที่ตรวจวัดได้เฉลี่ย, mg/kg	ค่าคืนกลับเฉลี่ย, %	SD	%RSD
0.20 (ค่าต่ำ)	0.040	0.0368	92.1	0.0017	4.2
1.0 (ค่ากลาง)	0.20	0.173	86.5	0.0025	1.4
2.0 (ค่าสูง)	0.40	0.364	90.9	0.0092	2.5
เกณฑ์การยอมรับที่ความเข้มข้น 4.5 µg/L [3]		-	90 - 110		

3.5 ผลกระทบจากองค์ประกอบของตัวอย่าง (Matrix effect)

เป็นการศึกษาผลกระทบจากองค์ประกอบของตัวอย่างกระดาศ โดยนำข้อมูลจากค่าความเอนเอียงมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานแคดเมียมที่เติมลงในตัวอย่างกับปริมาณที่ตรวจวัดได้เฉลี่ยของตัวอย่าง แสดงดังรูปที่ 3 พบว่าความชันมีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่าไม่มีผลกระทบจากองค์ประกอบของตัวอย่าง



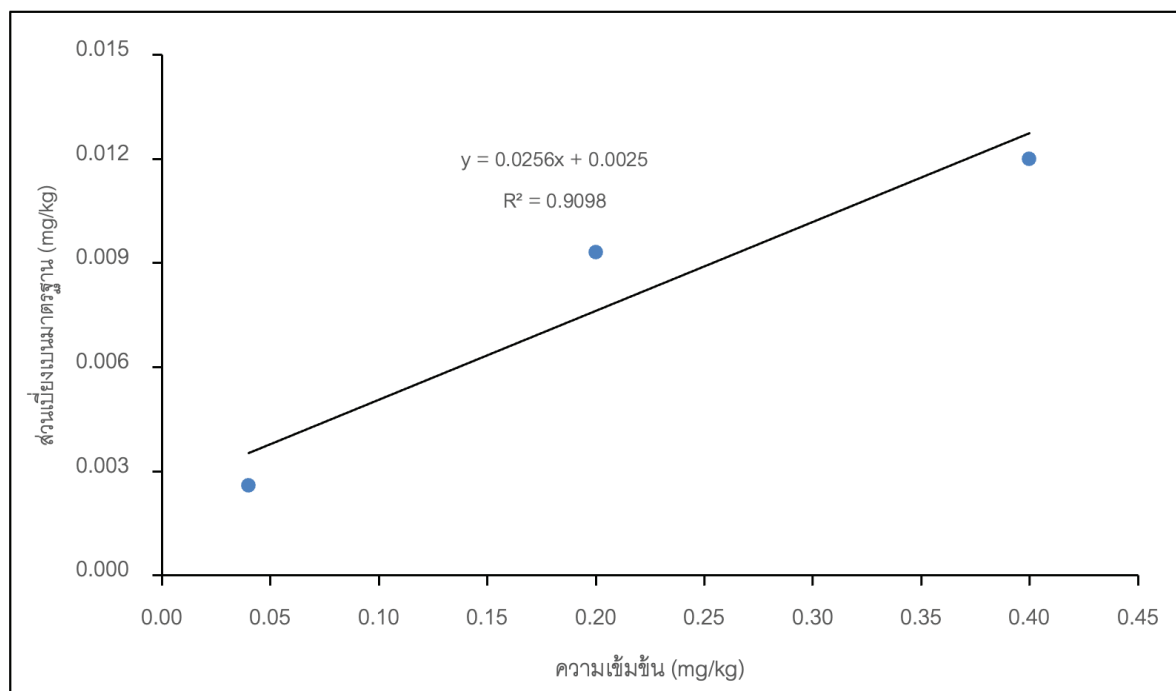
รูปที่ 3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นและปริมาณที่ตรวจวัดได้เฉลี่ยในสารละลายตัวอย่าง

3.6 ความเที่ยง (Precision)

ความเที่ยง คือความใกล้เคียงของผลทดสอบซ้ำของตัวอย่างเดียวกัน ในกรณีนี้ทดสอบสารละลายที่มีการเติมสารละลายมาตรฐานแคดเมียม ที่ความเข้มข้นต่ำ กลาง และสูง โดยมีการเปลี่ยนแปลงเวลาและวันที่ ซึ่งความเที่ยงของผลการวัดประเมินจากค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (RSD) แสดงดังตารางที่ 8 และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน แสดงดังรูปที่ 4

ตารางที่ 8 ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ที่ความเข้มข้นต่ำ กลาง สูง ที่ครอบคลุมช่วงการใช้งานของวิธีทดสอบ

Spiked sample, µg/L	ค่าอ้างอิง, mg/kg	ปริมาณที่ตรวจวัดได้ เฉลี่ย, mg/kg	SD, mg/kg	%RSD
0.20 (ค่าต่ำ)	0.040	0.0351	0.0025	7.1
1.0 (ค่ากลาง)	0.20	0.179	0.0093	5.2
2.0 (ค่าสูง)	0.40	0.361	0.012	3.4
เกณฑ์การยอมรับ [10]		-	-	±10
จำนวนการวิเคราะห์ซ้ำ n = 10		-	-	-



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

3.7 การประเมินค่าความไม่แน่นอนของการวัด (Uncertainty of measurement)

นำข้อมูลจากค่าความเอนเอียง ($u(R)$) และความเที่ยง ($u(P)/P$) มาคำนวณค่าความไม่แน่นอนของการวัด แสดงดังตารางที่ 9 ซึ่งค่าความไม่แน่นอนขยายที่คำนวณได้น้อยกว่าค่าความไม่แน่นอนเป้าหมายที่ห้องปฏิบัติการกำหนดไว้ แสดงว่า ค่าความไม่แน่นอนขยายที่คำนวณได้เป็นไปตามวัตถุประสงค์การใช้งาน

ตารางที่ 9 ค่าความไม่แน่นอนขยายที่คำนวณได้กับค่าความไม่แน่นอนเป้าหมายที่กำหนดไว้

ลำดับ	แหล่งของค่าความไม่แน่นอน	ค่าที่ได้
1	ความเอนเอียง, $u(R)$	0.073
	1.1 ค่าความไม่แน่นอนของค่าคืนกลับเฉลี่ยของผลการวัด, $(u(\bar{R}_m))$	0.0042
	ค่าความไม่แน่นอนของค่าคืนกลับเฉลี่ยของผลการวัด, $(u(\bar{R}_m))$	0.068
	ปริมาณเฉลี่ยที่ตรวจวัดได้ในตัวอย่าง ($\bar{m}_{obs}$) mg/kg	0.173
	ปริมาณที่เติมลงในตัวอย่าง (m_{spike}), mg/kg	0.20
	ค่าคืนกลับเฉลี่ยของปริมาณที่ตรวจวัดได้ ($\bar{R}_m$)	0.865
	ความแปรปรวนของปริมาณที่ตรวจวัดได้ (S_{obs}^2), mg^2/kg^2	0.00000625
	จำนวนของการวิเคราะห์ซ้ำ (n)	10
	$u(m_{spike})/m_{spike}$	0.0015
	t_{cal}	32.14
	$t_{crit}(0.025,9)$	2.226
	1.2 ค่าความไม่แน่นอนของค่าคืนกลับเฉลี่ยของผลการวัดที่ครอบคลุมช่วงการใช้งาน $u(\bar{R}_g) = SD$	0.0295
2	ความเที่ยง, $u(P)/P = RSD_{pool}$	0.0545
3	ความไม่แน่นอนรวม, u_c , mg/kg	0.020
4	ความไม่แน่นอนขยาย (U) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($k = 2$), mg/kg	0.040
5	ความไม่แน่นอนขยายคิดเป็นร้อยละ	20.0

4. สรุป (Conclusion)

การศึกษานี้มุ่งเน้นการพัฒนาวิธีที่ให้ผลการวัดมีความแม่นยำ ความเที่ยงและเหมาะสมสำหรับการตรวจวัดปริมาณแคดเมียมในผลิตภัณฑ์กระดาษสัมผัสอาหารที่ผลิตจากกระดาษแข็ง โดยใช้วิธีการย่อยสลายด้วยไมโครเวฟร่วมกับการตรวจวัดด้วยเทคนิคอินดักทีฟพลาสมาแมสสเปกโทรเมตรี จากการตรวจสอบความใช้ได้ของวิธี และศึกษาคุณลักษณะเฉพาะ ได้แก่ ช่วงความเป็นเส้นตรง ขีดจำกัดการตรวจหา ขีดจำกัดการวัดปริมาณ ความเอนเอียง ความเที่ยง ผลกระทบจากองค์ประกอบของตัวอย่าง และความไม่แน่นอนของการวัด พบว่า ค่าที่ได้เป็นไปตามเกณฑ์การยอมรับตามวิธีมาตรฐาน BS EN 12498; Paper and board – Paper and board intended to come into contact with foodstuffs – Determination of cadmium, chromium and lead in an aqueous extract [3] ซึ่งชี้ให้เห็นว่าวิธีการทดสอบปริมาณแคดเมียมที่พัฒนาใหม่นี้ เป็นวิธีที่ให้ผลการวัดที่มีทั้งความแม่นยำ ความเที่ยง และเหมาะกับการใช้งานตามวัตถุประสงค์สามารถนำมาใช้เทียบเคียงได้กับวิธีมาตรฐาน BS EN 12498 ที่มีข้อจำกัดในเรื่องคุณสมบัติของตัวอย่างที่เป็นตัวดูดซับ ดังนั้นวิธีทดสอบที่ผ่านการตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีนี้สามารถนำมาใช้ในการทดสอบปริมาณแคดเมียมในผลิตภัณฑ์กระดาษสัมผัสอาหารเพื่อให้บริการแก่ลูกค้า และสามารถใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาวิธีทดสอบปริมาณโลหะอื่น ๆ ในผลิตภัณฑ์สัมผัสอาหารต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

ขอขอบคุณกลุ่มผลิตภัณฑ์โลหะ กองเคมีภัณฑ์และผลิตภัณฑ์อุปโภค กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม

6. เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ.). มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระดาษสัมผัสอาหาร. มอก. 2948-2562. กรุงเทพฯ: สมอ.; 2562.
- [2] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ.). มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระดาษสัมผัสอาหารสำหรับปรุงอาหารด้วยความร้อน. มอก. 3438-2565. กรุงเทพฯ: สมอ.; 2565.
- [3] British Standard Institution (BSI). Paper and board – Paper and board intended to come into contact with foodstuffs – Determination of cadmium, chromium and lead in an aqueous extract. BS EN 12498:2018. London: BSI; 2018.
- [4] British Standard Institution (BSI). Paper and board intended to come into contact with foodstuffs – Preparation of a cold water extract. BS EN 645:1994. London: BSI; 1994.
- [5] British Standard Institution (BSI). Paper and board intended to come into contact with foodstuffs – Preparation of a hot water extract. BS EN 647:1994. London: BSI; 1994.
- [6] จิตวิไล เวฬุวนารักษ์. การตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีทดสอบปริมาณแคดเมียมและตะกั่วที่แพร่จากกระดาษสัมผัสอาหาร: เอกสารผลงานที่เสนอเพื่อการประเมินแต่งตั้งให้ดำรงตำแหน่ง นักวิทยาศาสตร์ชำนาญการพิเศษ; 2567.
- [7] Magnusson B, Örnemark U, editors. Eurachem guide: The fitness for purpose of analytical methods – A laboratory guide to method validation and related topics. [place unknown]: Eurachem; 2014.
- [8] Barwick VJ, Ellison SLR. VAM Project 3.2.1 Development and harmonisation of measurement uncertainty principles part (d): Protocol for uncertainty evaluation from validation data version 5.1 [Internet]. Teddington (UK): LGC (Teddington) Limited; 2000 [cited 2023 Dec 20]. Available from: <http://www.demarcheiso17025.com/private/Protocol%20for%20uncertainty%20evaluation%20from%20validation%20data.pdf>
- [9] Analytik Jena AG. TOPwave microwave system for pressure digestion. Jena: Analytik Jena AG; 2014.
- [10] PerkinElmer Inc. Syngistix for ICP-MS software reference guide. Shelton (CT): PerkinElmer; 2014.
- [11] AOAC International. Appendix F: Guidelines for standard method performance requirements [Internet]. 2016 [cited 2023 Dec 20]. Available from: https://www.aoac.org/wp-content/uploads/2019/08/app_f.pdf

ปริมาณสารออกฤทธิ์ในผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดและฆ่าเชื้อโรค จากตลาดออนไลน์ของประเทศไทย ปี 2566

Active substances in cleaning and disinfecting products from Thailand's online market in 2023

3

หนึ่งฤทัย แสงแสงสีรุ่ง¹, ดารัตน์ พัฒนะกุลกำจร¹, ธนัชชา ทองระย้า¹, กรรณิกา ตีวินิจ¹, ชนิษฐ พานชูวงศ์¹
Neungrutai Saesaengseerung¹, Darat Phathanakunkamchon¹, Thanatcha Tongraya¹,
Kannika Deevinij¹, Khanit Panchoowong¹

รับบทความ 31 พฤษภาคม 2567 แก้ไขบทความ 5 พฤศจิกายน 2567 ยอมรับตีพิมพ์ 25 พฤศจิกายน 2567

บทคัดย่อ

ผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดและฆ่าเชื้อโรคที่มีสารออกฤทธิ์ประเภทกรด แอ็กทีฟออกซิเจน และไฮโปคลอไรต์เป็นส่วนผสม เป็นผลิตภัณฑ์ทางเคมีที่ประชาชนสามารถเข้าถึงได้ง่ายและมีการใช้อย่างแพร่หลาย แม้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่วางจำหน่ายในท้องตลาดของประเทศไทยจะถูกควบคุมโดยการขึ้นทะเบียนผลิตภัณฑ์กับหน่วยงานภาครัฐก่อนวางจำหน่ายแล้วก็ตาม แต่การตรวจสอบคุณภาพหลังวางจำหน่ายก็ยังคงมีความสำคัญโดยเฉพาะอย่างยิ่งการตรวจหาปริมาณสารออกฤทธิ์ที่ผสมอยู่ในผลิตภัณฑ์เหล่านี้เนื่องจากปริมาณสารที่ไม่ตรงตามฉลากผลิตภัณฑ์อาจมีผลต่อประสิทธิภาพในการทำความสะอาดและการฆ่าเชื้อโรค งานวิจัยนี้จึงได้สุ่มตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่วางจำหน่ายในตลาดออนไลน์ ปี 2566 รวมทั้งสิ้น 59 ตัวอย่าง โดยแบ่งเป็นผลิตภัณฑ์กลุ่มกรด แอ็กทีฟออกซิเจน และไฮโปคลอไรต์ จำนวน 21, 21 และ 17 ตัวอย่างตามลำดับ ทั้งนี้ได้ใช้วิธีกรด-เบสไทเทรชัน สำหรับทดสอบหาปริมาณสารออกฤทธิ์ประเภทกรด และวิธีรีดอกซ์ไทเทรชัน สำหรับการทดสอบหาปริมาณแอ็กทีฟออกซิเจน (คำนวณเป็นปริมาณไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์) และอะเวละเบิลคลอรีนในผลิตภัณฑ์ 2 กลุ่มหลังตามลำดับ ผลการสำรวจพบเพียงผลิตภัณฑ์ประเภทไฮโดรคลอริก ร้อยละ 42 และผลิตภัณฑ์ประเภทแอ็กทีฟออกซิเจน ร้อยละ 29 ของจำนวนตัวอย่างที่สุ่มตรวจเท่านั้นที่ตรวจพบเลขทะเบียนวัตถุอันตรายทางสาธารณสุขและมีปริมาณสารออกฤทธิ์ที่ตรงตามที่ระบุไว้บนฉลากและผ่านเกณฑ์กำหนดตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของไทย อย่างไรก็ตามไม่พบตัวอย่างใดในกลุ่มผลิตภัณฑ์ประเภทไฮโปคลอไรต์ที่มีปริมาณอะเวละเบิลคลอรีนตรงตามที่ระบุไว้บนฉลากผลิตภัณฑ์

คำสำคัญ: กรดไฮโดรคลอริก, แอ็กทีฟออกซิเจน, อะเวละเบิลคลอรีน, ผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดและฆ่าเชื้อ

¹กองเคมีภัณฑ์และผลิตภัณฑ์อุปโภค กรมวิทยาศาสตร์บริการ

Abstract

Cleaning and disinfecting products contain active ingredients such as acid, active oxygen, and hypochlorite that are chemical products are easily accessible to the public and widely used. Although the quality of these products has been registered by responsible Thailand government agency before placing on market for sale, post-market surveillance is still important; especially checking the amount of active ingredients mixed in these products. It is because the amount of substances that do not match the product label may affect cleaning and disinfecting effectiveness. Therefore this research focused on randomly sampling of 59 products, which divided into 3 groups according to active ingredients such as acid, active oxygen, and hypochlorite for 21, 21 and 17 samples, respectively. Acid-base titration method was used to quantify amount of hydrochloric acid in acid cleaning products and redox titration method was used to determine amount of active oxygen (calculated as H_2O_2) and available chlorine in the latter two groups of products, respectively. The survey results found that only 42% of hydrochloric acid products and 29% of active oxygen products among the sampled items were detected with hazardous substance registration numbers and had active ingredient levels that matched those specified on their labels and met the criteria set by Thai industrial standards. However, none of the hypochlorite products had available chlorine levels that matched those stated on their labels.

Keywords: Hydrochloric acid, Active oxygen, Available chlorine, Cleaning and disinfecting products

¹Chemicals and Consumer Products Division, Department of Science Service

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

1. บทนำ (Introduction)

ผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดและฆ่าเชื้อโรคที่ใช้ในบ้านเรือนนับเป็นเคมีภัณฑ์ที่มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อความปลอดภัยในชีวิตของประชาชนโดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงที่เกิดการแพร่ระบาดของโรคอุบัติใหม่อย่างโควิด-19 รวมถึงภายหลังการแพร่ระบาดใหญ่ กลุ่มผลิตภัณฑ์เคมีเหล่านี้นอกจากจะใช้เพื่อวัตถุประสงค์ในการทำความสะอาดสิ่งสกปรกแล้ว ยังมีส่วนประกอบของสารต้านเชื้อจุลินทรีย์ (Disinfectant) [1] ซึ่งเป็นสารออกฤทธิ์ที่สามารถกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ได้หลากหลายบนพื้นผิวสิ่งของต่าง ๆ ที่ไม่มีชีวิตเพื่อยับยั้งการแพร่กระจายของเชื้อได้อีกด้วย ผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดและฆ่าเชื้อโรคที่มักพบโดยทั่วไปในท้องตลาดมักจะมีสารออกฤทธิ์สำคัญอยู่สามกลุ่ม คือ กลุ่มกรด กลุ่มเพอร์ออกไซด์ และกลุ่มไฮโปคลอไรต์ ทั้งนี้ผลิตภัณฑ์ที่มีส่วนผสมของกรดจะมีกลไกในการฆ่าเชื้อโรคโดยทำให้โครงสร้างทางโปรตีนของเซลล์เชื้อโรคเสียสภาพ และสามารถเปลี่ยนค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของเหลวภายในเซลล์ (Cytoplasm) ส่งผลให้ปฏิกิริยาในเซลล์เชื้อโรคเสียสมดุล [1] ในขณะที่เพอร์ออกไซด์และไฮโปคลอไรต์ซึ่งจัดเป็นสารออกซิไดซ์ที่มีกลไกในการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์โดยออกซิไดซ์เยื่อหุ้มเซลล์ของจุลินทรีย์ทำให้โครงสร้างของเยื่อหุ้มเซลล์ถูกทำลาย เซลล์จึงแตกและเชื้อจุลินทรีย์นั้น ๆ ตายไป [1] อย่างไรก็ตามในการออกฤทธิ์ฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ต่าง ๆ ได้นั้น จำเป็นต้องมีความเข้มข้นของสารออกฤทธิ์ที่เหมาะสม เช่น กรดไฮโดรคลอริกช่วงความเข้มข้น 0.1 - 1 M (หรือ 0.3 - 3%) สำหรับฆ่าแบคทีเรีย [1] โซเดียมไฮโปคลอไรต์ความเข้มข้น 0.1% [2] (หรือคำนวณเป็นอะเวละเบิลคลอรีน 0.095%) และไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 0.5% [3] (หรือคำนวณเป็นแอกทิฟออกซิเจน 0.24%) สำหรับฆ่าเชื้อไวรัสโคโรนา [2,3] ต่อมาในปี พ.ศ. 2564 ได้มีคำแนะนำจากกรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข ในการใช้ผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดและฆ่าเชื้อที่ประชาชนสามารถซื้อหาได้ง่ายโดยบอกวิธีเตรียมสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรต์และไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้นอยู่ในเกณฑ์ที่ออกฤทธิ์ฆ่าเชื้อไวรัสโคโรนา ภายในระยะเวลา 1 นาที โดยคิดจากค่าความเข้มข้นที่ระบุไว้บนฉลาก [4] ดังนั้นจึงเห็นได้ว่าปริมาณสารออกฤทธิ์ที่ระบุไว้ข้างฉลากมีความสำคัญอย่างยิ่ง เพราะหากปริมาณสารออกฤทธิ์ที่มีอยู่จริงในผลิตภัณฑ์มีปริมาณต่ำกว่าที่ระบุข้างฉลากอาจส่งผลให้ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อของสารละลายที่ผู้ใช้เตรียมได้ลดลง หรือหากมีปริมาณสารออกฤทธิ์เข้มข้นเกินกว่าที่ระบุ อาจก่อให้เกิดการระคายเคืองผิวหนัง หรือระบบทางเดินหายใจได้

การที่ปริมาณสารออกฤทธิ์ในผลิตภัณฑ์ไม่ตรงกับข้างฉลากนอกจากเกิดจากคุณภาพของกระบวนการผลิตแล้วยังอาจเกิดจากความไม่เสถียรของตัวสารออกฤทธิ์เอง โดยในปี พ.ศ. 2544 Clarkson และคณะ [5] ค้นพบว่าความเข้มข้นของโซเดียมไฮโปคลอไรต์ในเคมีภัณฑ์สำหรับทันตกรรมนั้นไม่เสถียร เนื่องจากสมบัติของสารไฮโปคลอไรต์ซึ่งเป็นสารออกซิไดซ์รุนแรง อย่างไรก็ตามในขณะที่ยังไม่พบการศึกษาความเสถียรของผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดและฆ่าเชื้อที่มีส่วนประกอบของกรดและเพอร์ออกไซด์ จึงทำให้เกิดคำถามว่าผลิตภัณฑ์เหล่านี้ที่วางจำหน่ายในท้องตลาดของประเทศไทยจะมีคุณภาพตรงตามที่ระบุไว้ข้างฉลากหรือไม่ ยิ่งไปกว่านั้นแม้ว่าผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดและฆ่าเชื้อกลุ่มกรด กลุ่มเพอร์ออกไซด์ และกลุ่มไฮโปคลอไรต์จะมีข้อกำหนดมาตรฐานอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ มอก. 329-2542, มอก. 2274-2549, มอก. 2232-2548 หรือ มอก. 2339-2550 ซึ่งจัดทำโดยสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม [6-9] แต่มาตรฐานเหล่านี้เป็นเพียงมาตรฐานภาคสมัครใจไม่ใช่ภาคบังคับ การวางจำหน่ายในท้องตลาดจึงเพียงต้องจดแจ้งวัตถุดิบตรายต่อหน่วยงานภาครัฐที่เกี่ยวข้องก่อนวางจำหน่ายเท่านั้น จึงทำให้ขาดการควบคุมคุณภาพสินค้าผ่านกลไกตรวจสอบหลังวางจำหน่ายจริง (Post marketing surveillance) ดังนั้นเพื่อเป็นการเฝ้าระวังคุณภาพของผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดที่มีขายในท้องตลาด การเพิ่มความรู้แก่ผู้บริโภคหรือเฝ้าระวังระบบการตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่วางจำหน่ายในประเทศไทย โครงการวิจัยนี้จึงได้ดำเนินการสุ่มตัวอย่างผลิตภัณฑ์กลุ่มกรด กลุ่มเพอร์ออกไซด์ และกลุ่มไฮโปคลอไรต์ ที่วางจำหน่ายในท้องตลาดแล้วดำเนินการทดสอบหาปริมาณสารออกฤทธิ์ที่เกี่ยวข้องด้วยวิธีการทดสอบที่ใช้โดยทั่วไปในการตรวจสอบสารออกฤทธิ์เหล่านี้ ด้วยการไทเทรตสารออกฤทธิ์กับสารละลายมาตรฐานที่รู้ความเข้มข้นที่แน่นอน ได้แก่ สารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์สำหรับหาปริมาณกรดทั้งหมดในผลิตภัณฑ์กลุ่มกรด [6] สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเพอร์แมงกานีสสำหรับหาปริมาณแอกทิฟออกซิเจนในกลุ่มผลิตภัณฑ์เพอร์ออกไซด์ [10] และสารละลายมาตรฐานโซเดียมไทโอซัลเฟตสำหรับการหาปริมาณอะเวละเบิลคลอรีนในกลุ่มผลิตภัณฑ์ไฮโปคลอไรต์ [11]

2. วิธีการวิจัย (Experimental methods)

2.1 ตัวอย่าง

ตัวอย่างทั้งหมดในการศึกษานี้ถูกสุ่มจากตลาดออนไลน์ในระหว่างเดือนมีนาคมถึงสิงหาคม ปี พ.ศ. 2566 แบ่งออกเป็นผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดและฆ่าเชื้อกลุ่มกรด จำนวน 21 ตัวอย่าง ผลิตภัณฑ์กลุ่มแอลกอฮอล์จำนวน 21 ตัวอย่าง ผลิตภัณฑ์กลุ่มไฮโปคลอไรต์ จำนวน 17 ตัวอย่าง รายละเอียดเพิ่มเติมแสดงดังตารางที่ 1

2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

เครื่องชั่งไฟฟ้าทศนิยม 4 ตำแหน่ง แท่นกวนแม่เหล็กไฟฟ้าพร้อมแท่งแม่เหล็ก และเครื่องแก้ววัดปริมาตรชนิดต่าง ๆ ได้แก่ บิวเรตชนิดแก้วปริมาตร 50 มิลลิลิตร ขวดวัดปริมาตรขนาด 100, 250 และ 1000 มิลลิลิตร และปิเปตขนาด 10 มิลลิลิตร

2.3 สารเคมีและการเตรียม

2.3.1 สารละลายมาตรฐานสำหรับการหาปริมาณสารออกฤทธิ์ในผลิตภัณฑ์

สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมสารละลายมาตรฐาน ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (ยี่ห้อ Merck, purity $\geq 99\%$) โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (ยี่ห้อ Merck, purity $\geq 99\%$) โซเดียมไทโอซัลเฟตเพนตะไฮเดรต (ยี่ห้อ Merck, purity $\geq 99\%$) ใช้เตรียมสารละลายมาตรฐานความเข้มข้นชนิดละ 0.1 N สำหรับไทเทรตกับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการทดสอบด้วยวิธีตาม ASTM: E200-16 [12]

สารมาตรฐานปฐมภูมิที่ใช้สำหรับการหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายมาตรฐานที่เตรียมได้ข้างต้น ได้แก่ สารมาตรฐานโพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลต (ยี่ห้อ Supelco, purity $99.98 \pm 0.08\%$) สารมาตรฐานไดโซเดียมออกซาเลต (ยี่ห้อ Supelco, purity $99.90 \pm 0.11\%$) และสารมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมต (ยี่ห้อ Supelco, purity $99.92 \pm 0.017\%$)

2.3.2 สารละลายอินดิเคเตอร์และรีเอเจนต์

ฟีนอล์ฟทาลีน (ยี่ห้อ Labchem, purity $\geq 98\%$) เอทานอล (ยี่ห้อ Pure Surv, $\geq 95\%$) กรดซัลฟิวริกเข้มข้น (ยี่ห้อ Supelco, purity 95-97%) โพแทสเซียมไอโอไดด์ (ยี่ห้อ Fluka, purity $\geq 99.5\%$) แป้ง (Starch, ยี่ห้อ Fluka) และ น้ำกลั่นซึ่งผลิตได้โดยห้องปฏิบัติการ (เครื่องกลั่นน้ำ, ประเทศไทย) ทั้งนี้สารละลายอินดิเคเตอร์และรีเอเจนต์ที่ใช้ในการศึกษานี้ถูกเตรียมด้วยวิธีตาม ASTM: E200-16 [12]

2.4 วิธีดำเนินงาน

2.4.1 การหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายมาตรฐาน

นำสารละลายมาตรฐานที่เตรียมได้ตามข้อ 2.3.1 มาหาความเข้มข้นที่แน่นอนด้วยวิธีการไทเทรตตาม ASTM: E200-16 [12] โดยสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 N ไทเทรตกับสารมาตรฐานโพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลต สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต 0.1 N ไทเทรตกับสารมาตรฐานไดโซเดียมออกซาเลต และสารละลายมาตรฐานโซเดียมไทโอซัลเฟต 0.1 N ไทเทรตกับสารมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมต

2.4.2 การไทเทรตหาปริมาณกรดในตัวอย่างผลิตภัณฑ์กลุ่มกรด [6]

ชั่งตัวอย่างผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดและฆ่าเชื้อกลุ่มกรด ข้อ 2.1 น้ำหนัก 10 กรัม ละลายในน้ำกลั่นแล้ว ถ่ายใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 250 มิลลิลิตร ปรับปริมาตร แล้วปิเปตตัวอย่าง 10 มิลลิลิตรใส่ในขวดรูปชมพู่ เติมสารละลาย ฟีนอล์ฟทาลีนอินดิเคเตอร์ 2-3 หยด แล้วนำไปไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอน จุดยุติสารละลายตัวอย่างจะเปลี่ยนจากสารละลายใสไม่มีสีเป็นสีชมพู บันทึกปริมาตรของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ คำนวณหาปริมาณกรดทั้งหมดด้วยสมการ

$$\text{กรดทั้งหมด (คำนวณเป็น HCl), \%w/w} = \frac{N_{\text{NaOH}} \times V_{\text{NaOH}}}{1000} \times 36.5 \times \frac{250}{10} \times \frac{100}{\text{น้ำหนักตัวอย่าง (g)}}$$

เมื่อ N_{NaOH} = ค่าความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ (N)

V_{NaOH} = ปริมาตรสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ไทเทรต (mL)

2.4.3 การไทเทรตหาปริมาณอะวเลอะเบิลคลอรีนในตัวอย่างผลิตภัณฑ์กลุ่มไฮโปคลอไรต์ [11]

ซึ่งตัวอย่างผลิตภัณฑ์กลุ่มแอทไฟออกซิเจน จากข้อ 2.1 น้ำหนัก 3 กรัม ด้วยเครื่องชั่งไฟฟ้าตนิยม 4 ตำแหน่ง ใส่ลงในขวดรูปกรวยมีจุกปิด แล้วเติมน้ำกลั่นลงไป 50 มิลลิลิตร เติมกรดอะซิติกเข้มข้นปริมาตร 4 มิลลิลิตร เติมสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ปริมาตร 15 มิลลิลิตร แล้วไทเทรตด้วยสารละลายมาตรฐานโซเดียมไทโอซัลเฟต ใช้น้ำแบ่งเป็นอินดิเคเตอร์ จุดยุติมีการเปลี่ยนจากสีน้ำเงินเป็นไม่มีสี จดบันทึกปริมาตรสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้ และคำนวณหาปริมาณอะวเลอะเบิลคลอรีนด้วยสมการ

$$\text{อะวเลอะเบิลคลอรีน, \%w/w} = \frac{N_{\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3} \times V_{\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3}}{1000} \times 35.453 \times \frac{100}{\text{น้ำหนักตัวอย่าง (g)}}$$

เมื่อ $N_{\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3}$ = ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้ไทเทรต (N)

$V_{\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3}$ = ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้ไทเทรต (mL)

2.4.4 การไทเทรตหาปริมาณแอทไฟออกซิเจนในตัวอย่างผลิตภัณฑ์กลุ่มแอทไฟออกซิเจน [10]

ซึ่งตัวอย่างผลิตภัณฑ์กลุ่มไฮโปคลอไรต์ ข้อ 2.1 น้ำหนัก 0.4 - 1 กรัม ใส่ลงในขวดรูปกรวย ด้วยเครื่องชั่งไฟฟ้าตนิยม 4 ตำแหน่ง แล้วเติมน้ำกลั่นลงไป 50 มิลลิลิตร เติมสารละลายกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น ร้อยละ 20 โดยปริมาตร ปริมาตร 5 มิลลิลิตร เติมสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ปริมาตร 15 มิลลิลิตร ไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเพอร์แมงกาเนต ความเข้มข้น 0.1 N ที่บรรจุไว้ในบิวเรตแก้ว ไทเทรตจนได้จุดยุติจากสารละลายสีไม่มีสีกลายเป็นสารละลายสีชมพูอ่อน จดบันทึกปริมาตรสารละลายโพแทสเซียมเพอร์แมงกาเนตที่ใช้ คำนวณหาปริมาณแอทไฟออกซิเจน ด้วยสมการ

$$\text{แอทไฟออกซิเจน (คำนวณเป็น H}_2\text{O}_2\text{), \%w/w} = \frac{N_{\text{KMnO}_4} \times V_{\text{KMnO}_4}}{1000} \times \frac{34.02}{2} \times \frac{100}{\text{น้ำหนักตัวอย่าง (g)}}$$

เมื่อ N_{KMnO_4} = ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเพอร์แมงกาเนต (N)

V_{KMnO_4} = ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเพอร์แมงกาเนต (mL)

2.4.5 การควบคุมคุณภาพผลการทดสอบ

ดำเนินการทดสอบตัวอย่างละ 3 ซ้ำ คำนวณหาค่าเฉลี่ย และค่าร้อยละส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (Relative standard deviation, RSD) โดยเกณฑ์การยอมรับของค่าเฉลี่ยผลการทดสอบ คือ ค่าร้อยละส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ไม่เกินร้อยละ 5 [10]

2.4.6 เกณฑ์กำหนดปริมาณของสารออกฤทธิ์ในผลิตภัณฑ์

ในการศึกษานี้ได้ใช้เกณฑ์กำหนดสองส่วนคือ การพิจารณาปริมาณสารออกฤทธิ์ที่ตรวจวิเคราะห์ได้เทียบกับเกณฑ์กำหนดตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องดังแสดงไว้ในตารางที่ 1 และการเปรียบเทียบกับปริมาณสารออกฤทธิ์ที่ระบุไว้ข้างฉลากผลิตภัณฑ์โดยกำหนดเกณฑ์ค่าคลาดเคลื่อนที่อนุญาตให้มีได้จากปริมาณของสารสำคัญที่ระบุตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข ปี พ.ศ. 2555 [10] สำหรับในกรณีที่ผลิตภัณฑ์ไม่ได้ระบุปริมาณสารออกฤทธิ์ไว้บนฉลากถือว่าผลิตภัณฑ์นั้นไม่สอดคล้องกับค่าบนฉลากผลิตภัณฑ์

ตารางที่ 1 เกณฑ์พิจารณาปริมาณสารออกฤทธิ์ของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้อง

ผลิตภัณฑ์กลุ่ม	มอก. ที่เกี่ยวข้อง	ผลิตภัณฑ์	ชนิดของ สารออกฤทธิ์	เกณฑ์ กำหนด (%w/w)	รหัสตัวอย่าง ผลิตภัณฑ์ที่สุ่มตรวจ
กรด	มอก. 239-2542	ผลิตภัณฑ์ทำความสะอาด ประเภทกรดสำหรับกระเบื้องและ เครื่องสุขภัณฑ์เซรามิก - ชนิดธรรมดา	HCl	8-12	AS-3, AS-5, AS-7, AS-8, AS-13, AS-16, AS-20 และ AS-23
		- ชนิดเข้มข้น	HCl	15-24	AS-2, AS-4, AS-6, AS-9 ถึง 12, AS-14, AS-15, AS-19, AS-24 และ AS-25
แอกทีฟออกซิเจน	มอก. 2274-254	ผลิตภัณฑ์ฟอกผ้าประเภท เพอร์ออกไซด์ - ชนิดเหลว	H ₂ O ₂	≥ 3	OS-3 ถึง 5, OS-10, OS- 11, OS-13 และ OS-14
		- ชนิดผง	H ₂ O ₂	≥ 5	OS-1, OS-2, OS-6 ถึง 9, OS-12 และ OS-15 ถึง 21
ไฮโปคลอไรต์	มอก 2232-2548	ผลิตภัณฑ์ฟอกผ้าประเภท ไฮโปคลอไรต์	อะเวลละเบล คลอรีน	≥ 3	CS-2, CS-4, CS-5 และ CS-8 ถึง 16 และ CS-18
	มอก. 2339-2550	ผลิตภัณฑ์ทำความสะอาด กระเบื้องและเครื่องสุขภัณฑ์เซ รามิก ประเภทไฮโปคลอไรต์	อะเวลละเบล คลอรีน	≥ 1.5	CS-1, CS-3, CS-6 และ CS-7

หมายเหตุ ตัวอย่างรหัส AS-1 แสดงปริมาณกรดบนฉลากคือ 13.13% ซึ่งไม่สอดคล้องกับข้อกำหนดจึงไม่ถูกระบุในตารางที่ 1

3. ผลและวิจารณ์ (Results and discussion)

3.1 การเปรียบเทียบปริมาณสารออกฤทธิ์ที่ตรวจพบกับเกณฑ์กำหนดตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

การเปรียบเทียบปริมาณสารออกฤทธิ์ในทั้งสามกลุ่มผลิตภัณฑ์ที่ทดสอบ (ตารางที่ 2) กับเกณฑ์กำหนดตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องในตารางที่ 1 พบว่าจากจำนวนตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่สุ่มทดสอบรวม 59 ตัวอย่าง มีผลิตภัณฑ์ทั้งหมด 44 ตัวอย่าง (หรือคิดเป็น ร้อยละ 75 ของตัวอย่างทั้งหมดที่ทดสอบ) ที่ปริมาณสารออกฤทธิ์ผ่านเกณฑ์กำหนดตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้อง โดยในกลุ่มผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดประเภทกรด มีตัวอย่างจำนวน 18 ตัวอย่าง จากทั้งหมด 21 ตัวอย่าง ที่ปริมาณสารออกฤทธิ์ผ่านเกณฑ์กำหนดตาม มอก. 239-2542 (ตารางที่ 1) คิดเป็นร้อยละ 81 ของจำนวนผลิตภัณฑ์ (รูปที่ 1) สี่ตัวอย่างที่ไม่ผ่านเกณฑ์กำหนดตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม คือ AS-1, AS-13, AS-19 และ AS-23 โดยที่ตัวอย่าง รหัส AS-1 มีค่าปริมาณกรดไฮโดรคลอริกที่ระบุข้างฉลาก คือ ร้อยละ 13.13 (ตารางที่ 2) ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่ไม่สอดคล้องกับข้อกำหนดของ มอก. 329-2542 ในการศึกษานี้จึงจัดให้ตัวอย่าง AS-1 ไม่ผ่านเกณฑ์กำหนดตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม สำหรับตัวอย่างรหัส AS-13 และ AS-23 ที่ระบุปริมาณกรดบนฉลาก คือ ร้อยละ 10.5 และ 9 ตามลำดับทำให้ผลิตภัณฑ์ถูกจัดเป็นชนิดธรรมดาที่ต้องมีปริมาณกรดอยู่ในช่วงร้อยละ 8-12 (ตารางที่ 1) อย่างไรก็ตามผลการทดสอบปริมาณกรดของทั้งสองตัวอย่าง คือ ร้อยละ 12.6 และ 14.3 ตามลำดับ ซึ่งถือว่าเกินเกณฑ์กำหนดตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม สำหรับตัวอย่าง AS-19 ที่ระบุปริมาณกรดบนฉลากคือ

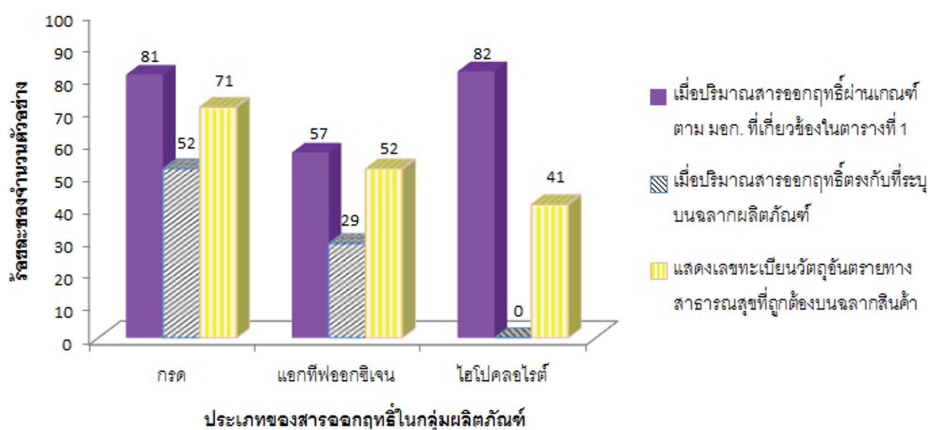
ร้อยละ 15 ทำให้ผลิตภัณฑ์ถูกจัดเป็นชนิดเข้มข้นที่ต้องมีปริมาณกรดอยู่ในช่วงร้อยละ 15 - 24 (ตารางที่ 1) แต่กลับตรวจพบปริมาณกรดเพียง ร้อยละ 14.9 ซึ่งต่ำกว่าเกณฑ์กำหนดตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

อย่างไรก็ตามในภาพรวมของการตรวจสอบปริมาณสารออกฤทธิ์เทียบกับเกณฑ์กำหนดตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม พบว่าปริมาณสารออกฤทธิ์ในผลิตภัณฑ์กลุ่มกรด (ร้อยละ 81) นั้นผ่านเกณฑ์ข้อกำหนดตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมมากกว่าผลิตภัณฑ์กลุ่มไฮโปคลอไรต์ (ปริมาณสารออกฤทธิ์ผ่านเกณฑ์ ร้อยละ 82) และผลิตภัณฑ์ประเภทเพอร์ออกไซด์ (ปริมาณสารออกฤทธิ์ผ่านเกณฑ์ ร้อยละ 57) (รูปที่ 1) โดยผลิตภัณฑ์กลุ่มไฮโปคลอไรต์ที่สุ่มทดสอบทั้งหมด 17 ตัวอย่างแบ่งเป็นผลิตภัณฑ์ฟอกผ้าขาวจำนวน 13 ตัวอย่าง ซึ่งข้อกำหนดของ มอก. 2232-2548 ระบุให้มีปริมาณอะวอลูมิเนตคลอรีนไม่น้อยกว่าร้อยละ 3.0 และตัวอย่างผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดกระเบื้องและเครื่องสุขภัณฑ์เซรามิกที่สุ่มทดสอบมีจำนวน 4 ตัวอย่าง ซึ่งข้อกำหนดของ มอก. 2339-2550 ระบุให้มีปริมาณอะวอลูมิเนตคลอรีนไม่น้อยกว่าร้อยละ 1.5 นั้น ผลการทดสอบหาปริมาณอะวอลูมิเนตพบว่ามีเพียงสามตัวอย่างที่ปริมาณอะวอลูมิเนตคลอรีนน้อยกว่าเกณฑ์ข้อกำหนดที่เกี่ยวข้อง คือ ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ฟอก CS-10 และ CS-14 มีปริมาณอะวอลูมิเนตคลอรีนเพียงร้อยละ 1.8 และ 1.7 ตามลำดับ และผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดกระเบื้องและเครื่องสุขภัณฑ์เซรามิก CS-6 มีปริมาณอะวอลูมิเนตคลอรีนเพียงร้อยละ 1.4

สำหรับกลุ่มผลิตภัณฑ์ประเภทแอกทิฟออกซิเจนผลการทดสอบปริมาณแอกทิฟออกซิเจน (คำนวณเป็น H_2O_2) ในตารางที่ 2 เมื่อพิจารณาปริมาณไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ที่ทดสอบได้เทียบกับ มอก. 2274-2549 [7] ซึ่งกำหนดปริมาณเพอร์ออกไซด์ในผลิตภัณฑ์ประเภทเหลวต้องมากกว่า ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก และประเภทผงต้องมากกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก จากผลการทดสอบตัวอย่างทั้งหมด 21 ตัวอย่าง พบว่ามีตัวอย่างผลิตภัณฑ์จำนวน 12 ตัวอย่างที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (OS-2, OS-3, OS-4, OS-5, OS-7, OS-8, OS10, OS-11, OS-17, OS-19, OS-20 และ OS-21, ตารางที่ 2) คิดเป็นร้อยละ 57 (รูปที่ 1) ซึ่งนับว่าน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับสองกลุ่มผลิตภัณฑ์ข้างต้น ทั้งนี้ยังมีข้อสงสัยเกิดว่าจากตัวอย่างที่ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม จำนวน 9 ตัวอย่างนั้น มีถึง 7 ตัวอย่างที่ฉลากสินค้าไม่แสดงส่วนผสมของผลิตภัณฑ์ (OS-6, OS-9, OS-12 ถึง 15 และ OS-18)

3.2 การเปรียบเทียบปริมาณสารออกฤทธิ์ตรวจพบค่าที่ระบุไว้ข้างฉลากผลิตภัณฑ์

ในภาพรวมของปริมาณสารออกฤทธิ์ที่ตรวจพบในแต่ละกลุ่มผลิตภัณฑ์เทียบกับปริมาณที่ระบุไว้ข้างฉลาก จากจำนวนตัวอย่างทั้งหมด 59 ตัวอย่าง พบว่าผลิตภัณฑ์กลุ่มกรดมีปริมาณสารออกฤทธิ์ตรงกับที่ระบุไว้ข้างฉลากมากที่สุด คือ ร้อยละ 52 ในขณะที่กลุ่มผลิตภัณฑ์เพอร์ออกไซด์ที่ปริมาณสารออกฤทธิ์ตรงกับที่ระบุข้างฉลากมีเพียงร้อยละ 29 และที่น่าสนใจเป็นอย่างยิ่ง คือ ไม่พบผลิตภัณฑ์กลุ่มไฮโปคลอไรต์ที่มีปริมาณสารออกฤทธิ์ตรงกับที่ระบุข้างฉลากเลย (รูปที่ 1)



รูปที่ 1 ร้อยละของจำนวนตัวอย่างในแต่ละกลุ่มผลิตภัณฑ์เมื่อพิจารณาปริมาณสารออกฤทธิ์ที่ทดสอบได้เทียบกับเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เมื่อปริมาณสารออกฤทธิ์ที่ทดสอบได้ตรงกับที่ระบุไว้บนฉลากสินค้า และร้อยละของตัวอย่างที่แสดงทะเบียนวัตถุอันตรายสำหรับใช้ในบ้านเรือน (วอ.ส.) ที่ถูกต้องบนฉลากสินค้า

สำหรับกลุ่มผลิตภัณฑ์ที่มีสารออกฤทธิ์ประเภทกรดเป็นส่วนประกอบนั้น ผลการทดสอบพบว่าตัวอย่างที่ปริมาณกรดไฮโดรคลอริกไม่ตรงกับค่าที่แสดงไว้บนฉลากนั้นมีแนวโน้มที่จะตรวจพบปริมาณของกรดสูงกว่าที่แสดงไว้บนฉลากในช่วงร้อยละ 7 ถึง 59 (AS-1, AS-3, AS-9, AS-13, AS-23 และ AS-24 ตารางที่ 2) ซึ่งอาจจะสะท้อนให้เห็นถึงคุณภาพในการผลิตสินค้าของผู้ผลิต

สำหรับกลุ่มผลิตภัณฑ์ที่มีสารออกฤทธิ์ประเภทแอกทีฟออกซิเจนเป็นส่วนประกอบหลักพบว่าในจำนวนตัวอย่างที่สุ่มเก็บมาจำนวนทั้งสิ้น 21 ตัวอย่าง มีตัวอย่างจำนวนเพียง 11 ตัวอย่างเท่านั้นที่มีการระบุค่าปริมาณแอกทีฟออกซิเจนบนฉลากสินค้า และในจำนวนนี้มีเพียง 6 ตัวอย่างเท่านั้นที่ปริมาณสารออกฤทธิ์ตรงกับที่ระบุไว้ข้างฉลาก คือ ตัวอย่างชนิดของเหลว OS-3, OS-4, OS-5, OS-7, OS-11 และตัวอย่างชนิดผง OS-17 (ตารางที่ 2) สำหรับตัวอย่างที่ปริมาณสารออกฤทธิ์ไม่ตรงกับที่แสดงบนฉลากนั้นมีปริมาณแอกทีฟออกซิเจน (คำนวณเป็น H_2O_2) ประกอบด้วย ตัวอย่าง OS-1, OS-2, OS-16, OS-19 และ OS-21 ซึ่งเป็นตัวอย่างชนิดผงทั้งสิ้นโดยปริมาณสารออกฤทธิ์ที่ตรวจพบน้อยกว่า ร้อยละ 11 ถึง 93 ของปริมาณที่ระบุไว้ข้างฉลาก จากการพิจารณาส่วนผสมที่แสดงบนฉลากผลิตภัณฑ์ในกลุ่มนี้จะพบว่าถ้าเป็นชนิดของเหลวมักจะมีส่วนผสมของสารไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ในขณะที่ชนิดผงจะมีส่วนผสมของโซเดียมคาร์บอเนตเพอร์ออกไซด์ไฮเดรต (Sodium carbonate peroxyhydrate; $2Na_2CO_3 \cdot 3H_2O_2$) อย่างไรก็ตามการผลิตผลิตภัณฑ์กลุ่มแอกทีฟออกซิเจนชนิดผงซึ่งตรวจพบปริมาณแอกทีฟออกซิเจนน้อยกว่าที่ระบุไว้ข้างฉลากนั้นมีความเป็นไปได้ว่าไม่ได้เกิดจากการสลายตัวของสารเพอร์คาร์บอเนตที่เป็นองค์ประกอบหลักเนื่องจากสมบัติของสารเพอร์คาร์บอเนตนั้นจะไม่สลายตัวที่อุณหภูมิน้อยกว่า 55 องศาเซลเซียส [14]

สำหรับผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดและฆ่าเชื้อที่มีสารออกฤทธิ์ประเภทไฮโปคลอไรต์เป็นองค์ประกอบหลักจากการสุ่มตัวอย่างจากตลาดออนไลน์จำนวน 17 ตัวอย่าง มีตัวอย่างจำนวนเพียง 10 ตัวอย่างเท่านั้นที่มีการระบุค่าปริมาณอะเวละเบิลคลอรีนบนฉลากสินค้า (ตารางที่ 2) และเป็นที่น่าสังเกตว่าปริมาณอะเวละเบิลคลอรีนที่ตรวจพบจากทั้ง 10 ตัวอย่างนี้มีปริมาณน้อยกว่าที่ระบุไว้บนฉลากผลิตภัณฑ์ในช่วงร้อยละ 14 ถึง 48 ผลการทดสอบนี้สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Piskin และ Türkün [15] ที่รายงานว่าจะอะเวละเบิลคลอรีนในผลิตภัณฑ์ไฮโปคลอไรต์มักจะไม่ได้เสถียรและเกิดการสลายตัวได้จากหลายปัจจัย เช่น ความเข้มข้นของอะเวละเบิลคลอรีนในผลิตภัณฑ์ และอุณหภูมิในการเก็บรักษา เป็นต้น

3.3 การตรวจสอบเลขทะเบียนวัตถุอันตรายทางสาธารณสุขบนฉลากผลิตภัณฑ์

นอกจากการพิจารณาปริมาณสารออกฤทธิ์ตรวจพบเมื่อเทียบกับเกณฑ์กำหนดตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องและเทียบกับปริมาณที่ระบุไว้ข้างฉลากผลิตภัณฑ์แล้ว ในการศึกษาครั้งนี้ยังได้พิจารณาถึงเลขทะเบียนวัตถุอันตรายทางสาธารณสุข (วอส.) บนฉลากผลิตภัณฑ์ด้วย เนื่องจากสารออกฤทธิ์ทั้งสามกลุ่มที่ศึกษานี้ถูกจัดเป็นวัตถุอันตรายทางสาธารณสุข ดังนั้นผู้ผลิตจำเป็นต้องแจ้งผลิตภัณฑ์กับหน่วยงานที่เกี่ยวข้องและแสดงหมายเลขที่จัดแจ้งไว้บนฉลากสินค้า อย่างไรก็ตามผลการตรวจสอบฉลากบนตัวอย่างทั้งหมดกับฐานข้อมูลบนเว็บไซต์สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา (อย.) พบว่าในกลุ่มผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดและฆ่าเชื้อที่มีสารออกฤทธิ์ประเภทกรด ประเภทแอกทีฟออกซิเจน และประเภทไฮโปคลอไรต์ พบเลขทะเบียนวัตถุอันตรายบนฉลาก ร้อยละของผลิตภัณฑ์แต่ละกลุ่ม คือ 77, 52 และ 41 ตามลำดับ (รูปที่ 1) แม้ร้อยละการพบเลขทะเบียนวัตถุอันตรายจะมีแนวโน้มสอดคล้องกับปริมาณสารออกฤทธิ์ตามเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมสำหรับกลุ่มผลิตภัณฑ์ประเภทกรด (ร้อยละ 81 รูปที่ 1) และกลุ่มแอกทีฟออกซิเจน (ร้อยละ 57 รูปที่ 1) อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาข้อมูลกราฟในรูปที่ 2 จะพบว่าตัวอย่างที่พบเลขทะเบียนร่วมกับปริมาณสารออกฤทธิ์แต่ละกลุ่มที่ตรวจพบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม และปริมาณสารออกฤทธิ์ที่แสดงไว้บนฉลากกลับพบว่า ในผลิตภัณฑ์กลุ่มกรดมีร้อยละของตัวอย่างที่ตรวจพบเลขทะเบียน และปริมาณกรดไฮโดรคลอริกที่ตรวจพบผ่านเกณฑ์ข้อกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม และมีค่าตรงกับฉลากสินค้าเพียงร้อยละ 42 กลุ่มผลิตภัณฑ์ที่มีสารออกฤทธิ์ประเภทแอกทีฟออกซิเจนมีจำนวนเพียงร้อยละ 29 และไม่พบผลิตภัณฑ์กลุ่มไฮโปคลอไรต์ที่มีเลขทะเบียนบนฉลากที่มีปริมาณอะเวละเบิลคลอรีนผ่านเกณฑ์ทั้งสองข้อ

นอกจากนี้ ในการศึกษาเนี่ยยังมีข้อน่าสังเกตเพิ่มเติมคือยังคงพบผลิตภัณฑ์ที่แม้จะแสดงเลขทะเบียนวัตถุอันตรายบนฉลากแต่มีปริมาณสารออกฤทธิ์ไม่ตรงกับฉลากสินค้า ตัวอย่างเช่น ผลิตภัณฑ์กลุ่มกรดตัวอย่าง AS-23 ที่แม้มีการแสดงเลขทะเบียนวัตถุอันตรายทางสาธารณสุข (วอส.) ที่ถูกต้องบนผลิตภัณฑ์ และระบุปริมาณกรดไว้ที่ร้อยละ 9 บนฉลากสินค้า แต่ปริมาณกรดที่ตรวจพบสูงถึงร้อยละ 14.3 (ตารางที่ 2) ซึ่งสูงกว่าค่าที่แสดงบนฉลากถึง ร้อยละ 59 หรือในผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดและฆ่าเชื้อกลุ่มแอกทีฟออกซิเจนซึ่งมีถึงห้าตัวอย่างที่ตรวจพบเลขทะเบียนวัตถุอันตรายบนฉลากสินค้า ได้แก่ OS-1, OS-2, OS-16, OS-19 และ OS-21 แต่กลับตรวจพบปริมาณแอกทีฟออกซิเจนน้อยกว่าค่าที่แสดงไว้บนฉลาก (ตารางที่ 2) โดยเฉพาะตัวอย่าง OS-16 เป็นตัวอย่างที่พบค่าแอกทีฟออกซิเจน (คำนวณเป็น H_2O_2) น้อยกว่าค่าที่แสดงบนฉลากถึงร้อยละ 93 โดยค่าที่พบคือร้อยละโดยน้ำหนัก 0.9 สารออกฤทธิ์ที่แสดงบนฉลาก คือ ร้อยละ 12.99 (ตารางที่ 2) และสุดท้ายผลิตภัณฑ์กลุ่มไฮโปคลอไรต์ซึ่งมีการตรวจพบเลขทะเบียนวัตถุอันตรายเพียง 7 ตัวอย่าง คือ CS-1, CS-2, CS-9, CS-11, CS-12, CS-13 และ CS-18 (ตารางที่ 2) นั้น แม้ทั้งเจ็ดตัวอย่างจะตรวจพบปริมาณอะโวลูเบิลคลอรีนผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้อง (มอก. 2232 หรือ มอก. 2339) แต่ปริมาณสารออกฤทธิ์ที่ตรวจพบกลับต่ำกว่าค่าที่ระบุไว้บนฉลากทั้งสิ้น

สุดท้ายของข้อสังเกตที่เกี่ยวข้องกับการพิจารณาเลขทะเบียนวัตถุอันตราย และมีความสำคัญยิ่งคือ การพบเลขทะเบียนวัตถุอันตรายบนฉลากสินค้า แต่เมื่อทดสอบปริมาณสารออกฤทธิ์แล้วกลับพบว่าไม่ผ่านตามข้อกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมและไม่ตรงกับที่ระบุไว้ข้างฉลาก โดยในผลิตภัณฑ์กลุ่มกรดและแอกทีฟออกซิเจนพบตัวอย่างที่มีลักษณะนี้กลุ่มละ 2 ตัวอย่าง (AS-1, AS-23, OS-1 และ OS-16 ตารางที่ 2) หรือคิดเป็นร้อยละ 10 (รูปที่ 2)

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบหาปริมาณสารออกฤทธิ์ในผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดและฆ่าเชื้อ

ตัวอย่าง	%Total acidity (as HCl) (w/w)			ตัวอย่าง	%Active oxygen (as H_2O_2 ,w/w)		
	บนฉลาก	ที่ตรวจพบ	ที่ตรวจพบ $\pm$ SD (n=3)		บนฉลาก	ที่ตรวจพบ	ที่ตรวจพบ $\pm$ SD (n=3)
² AS-1	13.13	12.3 - 13.9	14.0 $\pm$ 0.02	² OS-1	10.5	9.9 - 11.1	3.0 $\pm$ 0.12
² AS-2	17	16.0 - 18.0	17.3 $\pm$ 0.03	² OS-2	12.43	11.7 - 13.2	8.7 $\pm$ 0.13
² AS-3	11	10.3 - 11.7	11.9 $\pm$ 0.07	² OS-3	5	4.5 - 5.5	5.1 $\pm$ 0.01
² AS-4	15	14.1 - 15.9	15.3 $\pm$ 0.03	² OS-4	5	4.5 - 5.5	5.1 $\pm$ 0.01
² AS-5	8.5	7.7 - 9.4	8.9 $\pm$ 0.01	² OS-5	16.2	15.2 - 17.2	16.4 $\pm$ 0.63
² AS-6	20	18.8 - 21.2	20.0 $\pm$ 0.02	³ OS-6	ไม่ระบุ	-	ไม่พบ
² AS-7	10	9.0 - 11.0	9.6 $\pm$ 0.04	² OS-7	16.2	15.2 - 17.2	16.2 $\pm$ 0.23
² AS-8	9.5	8.6 - 10.5	9.6 $\pm$ 0.02	³ OS-8	ไม่ระบุ	-	22.3 $\pm$ 0.12
² AS-9	15	14.1 - 15.9	16.5 $\pm$ 0.07	³ OS-9	ไม่ระบุ	-	ไม่พบ
³ AS-10	ไม่ระบุ	-	16.1 $\pm$ 0.04	³ OS-10	ไม่ระบุ	-	19.8 $\pm$ 0.02
² AS-11	ไม่ระบุ	-	15.4 $\pm$ 0.03	² OS-11	7.5	6.8 - 8.3	7.7 $\pm$ 0.04
² AS-12	15	14.1 - 15.9	15.5 $\pm$ 0.04	³ OS-12	ไม่ระบุ	-	ไม่พบ
³ AS-13	10.5	9.9 - 11.1	12.6 $\pm$ 0.04	³ OS-13	ไม่ระบุ	-	0.6 $\pm$ 0.01
³ AS-14	15	14.1 - 15.9	15.6 $\pm$ 0.03	³ OS-14	ไม่ระบุ	-	2.6 $\pm$ 0.01

ตัวอย่าง	%Total acidity (as HCl) (w/w)			ตัวอย่าง	%Active oxygen (as H ₂ O ₂ ,w/w)		
	บนฉลาก	¹ ที่ควรพบ	⁵ ที่ตรวจพบ ± SD (n=3)		บนฉลาก	¹ ที่ควรพบ	⁵ ที่ตรวจพบ ± SD (n=3)
² AS-15	22	20.7 - 23.3	22.5 ± 0.03	³ OS-15	ไม่ระบุ	-	ไม่พบ
³ AS-16	ไม่ระบุ	-	10.5 ± 0.02	² OS-16	12.99	12.2 - 13.8	0.9 ± 0.02
² AS-19	15	14.1 - 15.9	14.9 ± 0.26	² OS-17	19.13	18.0 - 20.3	18.3 ± 0.07
³ AS-20	ไม่ระบุ	-	10.3 ± 0.08	³ OS-18	ไม่ระบุ	-	1.3 ± 0.03
² AS-23	9	8.1 - 9.9	14.3 ± 0.01	² OS-19	10.52	9.9 - 11.2	9.4 ± 0.17
⁴ AS-24	22	20.7 - 23.3	23.9 ± 0.07	³ OS-20	ไม่ระบุ	-	29.1 ± 0.09
² AS-25	15	14.1 - 15.9	15.2 ± 0.03	² OS-21	26	24.7 - 27.3	17.9 ± 0.13
ตัวอย่าง	%Available chlorine (w/w)			ตัวอย่าง	%Available chlorine (w/w)		
	บนฉลาก	¹ ที่ควรพบ	⁵ ที่ตรวจพบ ± SD (n=3)		บนฉลาก	¹ ที่ควรพบ	⁵ ที่ตรวจพบ ± SD (n=3)
² CS-1	3	2.7 - 3.3	2.1 ± 0.04	³ CS-10	ไม่ระบุ	-	1.8 ± 0.01
² CS-2	6	5.4 - 6.6	4.4 ± 0.00	² CS-11	6	5.4 - 6.6	3.1 ± 0.01
³ CS-3	5	4.5 - 5.5	4.3 ± 0.02	² CS-12	6	5.4 - 6.6	4.0 ± 0.02
³ CS-4	5.7	5.1 - 6.3	4.6 ± 0.10	² CS-13	6	5.4 - 6.6	3.8 ± 0.02
³ CS-5	ไม่ระบุ	-	4.4 ± 0.09	³ CS-14	ไม่ระบุ	-	1.7 ± 0.01
³ CS-6	ไม่ระบุ	-	1.4 ± 0.02	³ CS-15	9.5	8.6 -10.6	5.2 ± 0.01
³ CS-7	ไม่ระบุ	-	2.2 ± 0.02	³ CS-16	ไม่ระบุ	-	3.0 ± 0.01
³ CS-8	ไม่ระบุ	-	3.1 ± 0.00	² CS-18	6	5.4 - 6.6	3.2 ± 0.01
² CS-9	6	5.4 - 6.6	4.0 ± 0.01				

หมายเหตุ: AS-x คือ ผลิตภัณฑ์กลุ่มกรด, OS-x คือ ผลิตภัณฑ์กลุ่มเพอร์ออกไซด์ และ CS-x คือ ผลิตภัณฑ์กลุ่มไฮโปคลอไรต์ เมื่อ x คือ ตัวเลขแทนหมายเลขผลิตภัณฑ์;

¹แสดงปริมาณสารออกฤทธิ์ที่ระบุข้างฉลาก ± เกณฑ์ค่าคลาดเคลื่อนที่อนุญาตให้มีได้จากปริมาณของสารสำคัญที่ระบุตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข ปี พ.ศ.2555 [10]

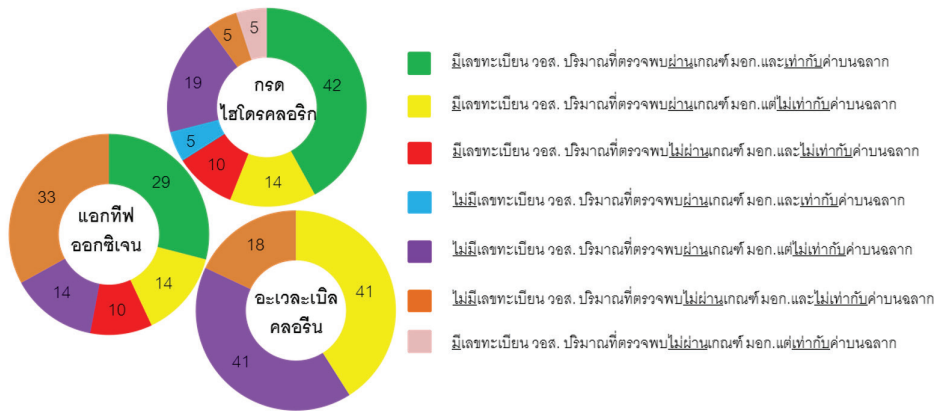
²ตรวจพบเลขทะเบียนวัตถุอันตรายทางสาธารณสุข (วอส.) ที่แสดงบนฉลากผลิตภัณฑ์ตรงกับฐานข้อมูลในเว็บไซต์ <https://oryor.com/check-product-serial>

³ไม่มีการแสดงเลขทะเบียนวัตถุอันตรายบนฉลากผลิตภัณฑ์

⁴มีการแสดงเลขทะเบียนวัตถุอันตรายทางสาธารณสุข (วอส.) บนฉลากผลิตภัณฑ์แต่ค้นไม่พบในฐานข้อมูลเว็บไซต์ <https://oryor.com/check-product-serial>

⁵ที่ตรวจพบ : **ตัวหนา** = ปริมาณสารออกฤทธิ์ผ่านตามเกณฑ์ มอก., **ตัวเอียง** = ปริมาณสารออกฤทธิ์ตรงกับที่ระบุบนฉลากผลิตภัณฑ์ และ **ตัวหนาและเอียง** = ปริมาณสารออกฤทธิ์ผ่านตามเกณฑ์ มอก. และตรงกับที่ระบุบนฉลากผลิตภัณฑ์

และ “-” คือ ไม่สามารถกำหนดค่า “ที่ควรพบ” ได้เนื่องจากฉลากไม่แสดงปริมาณสารออกฤทธิ์



รูปที่ 2 กราฟแสดงร้อยละของจำนวนตัวอย่างในแต่ละกลุ่มผลิตภัณฑ์เมื่อมีพิจารณากรณี/ไม่มีเลขทะเบียนวัตถุอันตรายทางสาธารณสุข (วอส.) ร่วมกับปริมาณสารออกฤทธิ์ที่ตรวจพบเมื่อเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ที่เกี่ยวข้องและค่าที่แสดงบนฉลากสินค้า

4. สรุป (Conclusion)

จากการสุ่มตัวอย่างผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดและฆ่าเชื้อโรคจากตลาดออนไลน์ของประเทศไทย ระหว่างเดือนมีนาคม ถึงสิงหาคม ปี พ.ศ. 2566 ที่มีสารออกฤทธิ์สำคัญ 3 กลุ่ม คือ สารกลุ่มกรดในผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดประเภทกรดสำหรับ กระเบื้องและเครื่องสุขภัณฑ์เซรามิก สารออกฤทธิ์แอกทีฟออกซิเจนในผลิตภัณฑ์ฟอกผ้าประเภทเพอร์ออกไซด์ และสาร กลุ่มไฮโปคลอไรต์ในผลิตภัณฑ์ฟอกผ้าขาวและผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดกระเบื้องและเครื่องสุขภัณฑ์เซรามิก พบว่า ใน ภาพรวมของผลิตภัณฑ์ที่มีการวางจำหน่ายในตลาดออนไลน์นั้นมีเพียงผลิตภัณฑ์ที่มีสารออกฤทธิ์ประเภทกรดไฮโดรคลอริก จำนวน 9 ตัวอย่าง (จากตัวอย่างที่สุ่ม 21 ตัวอย่าง) ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 42 และสารออกฤทธิ์แอกทีฟออกซิเจน จำนวน 6 ตัวอย่าง (จากตัวอย่างที่สุ่ม 21 ตัวอย่าง) ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 29 ของตัวอย่างที่สุ่มทดสอบเท่านั้นที่มีเลขทะเบียนวัตถุอันตราย บนฉลากและปริมาณสารออกฤทธิ์ที่ตรวจพบผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องและตรงกับที่แสดง ไว้ข้างฉลาก และสำหรับผลิตภัณฑ์กลุ่มไฮโปคลอไรต์ที่สุ่มทดสอบ 17 ตัวอย่างนั้น ไม่พบตัวอย่างใดเลยที่เลขทะเบียนวัตถุ อันตรายและปริมาณอะวอลูมิโนคลอรีนที่ตรวจพบผ่านทั้งเกณฑ์กำหนดของมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมและตรงกับ ที่ระบุไว้ข้างฉลาก จะเห็นได้ว่าผู้บริโภคที่ใช้เกณฑ์ในการพิจารณาเลขทะเบียนวัตถุอันตรายเพียงอย่างเดียวอาจมี ความเป็นไปได้ที่จะได้รับสินค้าที่มีปริมาณสารออกฤทธิ์ไม่เป็นไปตามที่แสดงไว้บนฉลากผลิตภัณฑ์ ดังนั้นเพื่อให้ผู้บริโภค มีความปลอดภัยและได้ใช้สินค้าเหล่านี้ได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ กลไกการควบคุมคุณภาพสินค้าที่วางจำหน่ายในตลาด ออนไลน์กลุ่มผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดและฆ่าเชื้อโรคของประเทศไทยจำเป็นต้องมีการทบทวน เช่น การปรับปรุงมาตรฐาน ผลิตภัณฑ์ให้ครอบคลุมผลิตภัณฑ์ที่จำหน่ายจริงในปัจจุบัน การยกระดับให้เป็นมาตรฐานบังคับเพื่อให้ผลิตภัณฑ์ที่วาง จำหน่ายได้เข้าสู่กระบวนการควบคุมมาตรฐานผลิตภัณฑ์ของประเทศ รวมทั้งเร่งสร้างกลไกการตรวจสอบตลาดหลังวาง จำหน่ายให้เข้มแข็งขึ้น

5. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

การศึกษานี้เป็นส่วนหนึ่งของ “โครงการเสริมสร้างความเชื่อมั่นผู้บริโภคในคุณภาพของผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดและ ฆ่าเชื้อด้วยห้องปฏิบัติการทดสอบทางเคมี” ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม (สกสว.) และได้รับการอนุเคราะห์ด้านอุปกรณ์และเครื่องมือวิทยาศาสตร์จากกองเคมีภัณฑ์และ ผลิตภัณฑ์อุปโภค กรมวิทยาศาสตร์บริการ ขอขอบพระคุณ ดร.อรสา อ่อนจันทร์ ผู้อำนวยการกองเคมีภัณฑ์และผลิตภัณฑ์ อุปโภคสำหรับคำแนะนำและข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ จนทำให้การศึกษานี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] วรณพพร ศรีสุคนธรรัตน์. สารต้านเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในบ้านเรือนหรือทางสาธารณสุข. นนทบุรี: กลุ่มพัฒนาระบบวัตถุอันตราย สำนักควบคุมเครื่องสำอางและวัตถุอันตราย; 2558.
- [2] World Health Organization. Cleaning and disinfection of environmental surfaces in the context of Covid-19: Interim guidance [Internet]. 2020 [cited 2021 May 15]. Available from: <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/332096/WHO-2019-nCoV-Disinfection-2020.1-eng.pdf?sequence=1>
- [3] Kampf G. Potential role of inanimate surfaces for the spread of coronaviruses and their inactivation with disinfectant agent. Infect Prev Pract. 2020;2(2):100044. doi: 10.1016/j.infpip.2020.100044.
- [4] กระทรวงสาธารณสุข, กรมอนามัย. คำแนะนำในการทำความสะอาด ทำลายและฆ่าเชื้อโรคในสถานการณ์การระบาดของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 (Covid-19) [อินเทอร์เน็ต]. 2564 [เข้าถึงเมื่อ 2 พฤษภาคม 2564]. เข้าถึงได้จาก: https://covid19.anamai.moph.go.th/web-upload/2xdccaaf3d7f6ae30ba6ae1459eaf3dd66/m_document/6734/35233/file_download/98444bccc2b9af6f3742fd2e9ce01538.pdf
- [5] Clarkson RM, Moule AJ, Podlich HM. The shelf-life of sodium hypochlorite irrigating solutions. Aust Dent J. 2001;46(4):269-76.
- [6] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ.). มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดประเภทกรดสำหรับกระเบื้องและเครื่องสุขภัณฑ์เซรามิก. มอก. 329-2542. กรุงเทพฯ: สมอ.; 2542.
- [7] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ.). มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ผลิตภัณฑ์ฟอกผ้าประเภทเพอร์ออกไซด์. มอก. 2274-2549. กรุงเทพฯ: สมอ.; 2549.
- [8] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ.). มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ผลิตภัณฑ์ฟอกผ้าประเภทไฮโปคลอไรต์. มอก. 2232-2548. กรุงเทพฯ: สมอ.; 2548.
- [9] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ.). มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดกระเบื้องและเครื่องสุขภัณฑ์เซรามิก ประเภทไฮโปคลอไรต์. มอก. 2239-2550. กรุงเทพฯ: สมอ.; 2550.
- [10] American Society for Testing and Materials International (ASTM). Standard test method for active oxygen in bleaching compounds. ASTM D2180-17. West Conshohocken (PA): ASTM International; 2017.
- [11] American Society for Testing and Materials International (ASTM). Standard test method of sampling and chemical analysis of chlorine-containing bleaches. ASTM D2022-89. West Conshohocken (PA): ASTM International; 2016.
- [12] American Society for Testing and Materials International (ASTM). Standard practice for preparation, standardization, and storage of standard and reagent solutions for chemical analysis. ASTM E200-16. West Conshohocken (PA): ASTM International; 2016.
- [13] สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา. ประกาศกระทรวงสาธารณสุข เรื่อง กำหนดเกณฑ์ค่าคลาดเคลื่อนจากปริมาณที่กำหนดไว้ของสารสำคัญในวัตถุอันตรายที่สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยารับผิดชอบ พ.ศ. 2555 (2558). ราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 129 ตอนพิเศษ 107 ง, 6 กรกฎาคม 2555. 46-47.
- [14] Solvay America, Inc. Product safety summary: Sodium percarbonate (sodium carbonate peroxyhydrate) [อินเทอร์เน็ต]. 2556 [เข้าถึงเมื่อ 29 พฤษภาคม 2567]. เข้าถึงได้จาก: <https://www.solvay.com/sites/g/files/srpend221/files/2021-01/PSS-Sodium-Percarbonate.pdf>
- [15] Piskin B, Türkün M. Stability of various sodium hypochlorite solutions. Journal of endodontics. 1995;21(5):253-5.

การตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีวิเคราะห์ปริมาณไพเพอรีนในพริกไทยดำ โดยเทคนิคโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง Method validation for determination of piperine in black pepper by high performance liquid chromatography

ธิดารัตน์ เครือเทียน¹, ปัทมาพร จิตปรีดา¹, สุนงกช ทรัพย์แดง^{1*}

Thidarat Kruatian¹, Pattamaporn Jitpreeda¹, Subongkoch Subtaeng^{1*}

รับบทความ 10 มิถุนายน 2567 แก้ไขบทความ 29 เมษายน 2568 ยอมรับตีพิมพ์ 20 พฤษภาคม 2568

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาและตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีวิเคราะห์สารไพเพอรีนในตัวอย่างพริกไทยดำโดยใช้เทคนิคโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง วิธีดังกล่าวมีความจำเพาะเจาะจงและมีความเป็นเส้นตรงอยู่ในช่วงความเข้มข้น 1 - 6 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.9998 ความถูกต้องแสดงในรูปของค่าร้อยละของการคืนกลับ (%Recovery) อยู่ในช่วงร้อยละ 100.25 - 101.65 ความเที่ยงจากการทำซ้ำมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD) อยู่ในช่วงร้อยละ 0.36 - 2.50 สำหรับการวิเคราะห์ทั้งภายในวันเดียวกันและระหว่างวัน ซึ่งไม่เกินเกณฑ์กำหนดที่ร้อยละ 5 ขีดจำกัดของการตรวจพบ (LOD) และขีดจำกัดของการวัดเชิงปริมาณ (LOQ) เท่ากับ 0.99 และ 1.09 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งคุณลักษณะเฉพาะที่แสดงสมบัติของวิธีทดสอบทั้งหมดเป็นไปตามเกณฑ์การยอมรับของ AOAC guidelines for single laboratory, validation of chemical methods for dietary supplements and botanicals (2019) โดยมีค่าประมาณความไม่แน่นอนของการวัดร้อยละ 3.49 ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($k = 2$) ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าวิธีการวิเคราะห์มีความน่าเชื่อถือ และเหมาะสมสำหรับการตรวจหาปริมาณไพเพอรีนในตัวอย่างพริกไทยดำ จากนั้นได้ทำการวิเคราะห์ตัวอย่างพริกไทยดำจากแหล่งต่าง ๆ จำนวน 28 ตัวอย่าง ตามวิธีที่ผ่านการทดสอบความใช้ได้แล้ว พบว่าตัวอย่างพริกไทยดำมีปริมาณไพเพอรีนอยู่ในช่วงร้อยละ 3.15 ถึง 6.41 โดยน้ำหนัก ซึ่งตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมพริกไทย (มอก. 297-2556) กำหนดปริมาณไพเพอรีนในตัวอย่างพริกไทยต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 4 โดยผลจากงานวิจัยนี้มีตัวอย่างพริกไทยดำผ่านเกณฑ์คุณภาพ จำนวน 20 ตัวอย่าง คิดเป็นร้อยละ 71.4 แสดงให้เห็นว่าวิธีวิเคราะห์สารไพเพอรีนในตัวอย่างพริกไทยดำด้วยเทคนิคโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูงนี้สามารถใช้หาปริมาณไพเพอรีนในตัวอย่างพริกไทยดำจากแหล่งต่าง ๆ และสามารถใช้เป็นแนวทางในการควบคุมคุณภาพวัตถุดิบและสารสกัดสมุนไพรไทยให้ได้มาตรฐาน สามารถแข่งขันได้ในระดับสากล

คำสำคัญ: : ไพเพอรีน, พริกไทยดำ, โครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง

¹ศูนย์วิจัยและพัฒนาวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ สถาบันวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีชุมชน กรมวิทยาศาสตร์บริการ

Abstract

The determination of piperine in black pepper samples using high performance liquid chromatography (HPLC) was successfully performed and validated. The method demonstrated specificity and good linearity in the concentration range of 1 - 6 mg/L with a coefficient of determination (R^2) of 0.9998. Accuracy was evaluated through %recovery studies and obtaining results between 100.25 - 101.65%. The precision expressed as a relative standard deviation (%RSD), showed good repeatability for both intra-day and inter-day analyses, with %RSD values less than 5%. The limit of detection (LOD) and the limit of quantitation (LOQ) were 0.99 and 1.09 mg/L, respectively. The linearity, percent recovery, precision, LOD and LOQ values were acceptable and complied with AOAC guidelines for single laboratory, validation of chemical methods for dietary supplements and botanicals. Measurement uncertainty was calculated as 3.49% at a 95% confidence interval ($k = 2$). All results presented that the method was reliable and suitable for the determination of piperine in black pepper sample. Subsequently, 28 black pepper samples from various sources were analyzed using a validated method. The results showed that piperine content ranged from 3.15% to 6.41% w/w, with 20 samples (71.4%) meeting the Thai Industrial Standard (TIS. 297-2556) requirement of piperine content $\geq 4\%$. The results demonstrate that the proposed HPLC technique for analyzing piperine content in black pepper samples is effective and can be applied to samples from various sources. Furthermore, the data from this study can serve as a guideline for the quality control of Thai herbal raw materials and extracts, ensuring compliance with standard requirements and enhancing global competitiveness.

Keywords: Piperine, Black pepper, High performance liquid chromatography

¹Raw Materials and Product Research Center, Institute of Community Science Technology, Department of Science Service

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

1. บทนำ (Introduction)

พริกไทยเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญชนิดหนึ่งของประเทศไทยที่ผลผลิตมีราคาสูง ประโยชน์ของพริกไทยนอกจากจะใช้เป็นเครื่องเทศแต่งกลิ่น รส และถนอมอาหารแล้วยังจัดเป็นสมุนไพรที่มีสรรพคุณตามตำรายาไทย คือ ใช้เป็นยาขับลม แก้ท้องอืดเพื่อบำรุงธาตุ เจริญอาหาร ขับเหงื่อ ขับปัสสาวะ และกระตุ้นประสาท ปัจจุบันประเทศไทยมีการปลูกพริกไทยเพื่อการส่งออกและในขณะเดียวกันก็มีการนำเข้าพริกไทยเพื่อบริโภคภายในประเทศด้วย โดยปริมาณการส่งออกและปริมาณการนำเข้าพริกไทยตั้งแต่ปี พ.ศ. 2559 ถึงปี พ.ศ. 2564 มีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง แสดงให้เห็นว่าความต้องการบริโภคพริกไทยทั่วโลกมีการขยายตัวเพิ่มมากขึ้น [1] พริกไทยประกอบไปด้วย น้ำ แบ่ง เส้นใย โปรตีน พิเพอริน และน้ำมันหอมระเหย [2] โดยพิเพอริน (Piperine) เป็นสารประกอบประเภทแอลคาลอยด์ (Alkaloid) อยู่ในกลุ่มพิเพอริดีน (Piperidine) เป็นสารที่ให้รสเผ็ดร้อนออกฤทธิ์กระตุ้นต่อมรับรส ทำให้กรดในกระเพาะถูกหลั่งออกมา มีฤทธิ์ทางยาในการขับเหงื่อและปัสสาวะ นอกจากนี้ยังสามารถนำมาใช้ไล่แมลงได้อีกด้วย [3] พิเพอรินเป็นพฤษเคมีที่พบในปริมาณสูง จึงถือเป็นองค์ประกอบหลักที่พบในพริกไทย [4] ซึ่งปริมาณพิเพอรินใช้บ่งชี้ถึงคุณภาพและเพิ่มมูลค่าให้กับพริกไทยได้ จากการศึกษาปริมาณสารพิเพอรินในพริกไทยสายพันธุ์ต่าง ๆ พบว่า พริกไทยดำมีปริมาณสารพิเพอรินสูงกว่าในพริกไทยขาว [5] โดยในพริกไทยดำมีปริมาณสารพิเพอรินสูงถึง 9% [6] ทั้งนี้ปริมาณของสารพิเพอรินในพริกไทยขึ้นอยู่กับสภาวะปัจจัยต่าง ๆ เช่น สายพันธุ์ อายุการเก็บเกี่ยว แหล่งการปลูก สภาพภูมิอากาศ รวมทั้งกระบวนการการทำแห้งพริกไทย [7] จากการศึกษางานวิจัยฤทธิ์ทางชีวภาพของสารพิเพอรินพบว่า มีฤทธิ์ในการเพิ่มการหมุนเวียนเลือด กระตุ้นการย่อยอาหาร [8] ต้านการติดเชื้อ [9] ต้านจุลชีพ [10] และต้านการอักเสบ [11]

การวิเคราะห์สารพิเพอรินในพริกไทยสามารถทำได้โดยใช้หลายเทคนิค ได้แก่ เทคนิค UV-Vis spectrophotometry [12-15], High performance liquid chromatography (HPLC) [16, 17], Thin-layer chromatography (TLC) [18], Voltammetry [19] โดยปัจจุบันวิธีวิเคราะห์พิเพอรินในมาตรฐานต่าง ๆ ของไทย ได้แก่ ตำรามาตรฐานยาสมุนไพรไทย (Thai herbal pharmacopoeia, THP) มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมพริกไทย (มอก. 297-2556) และคู่มือสถาบันวิจัยสมุนไพร กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ มีกระบวนการวิเคราะห์ที่แตกต่างกัน จึงทำให้ปริมาณพิเพอรินที่วิเคราะห์ได้มีค่าแตกต่างกัน ซึ่งส่วนใหญ่ใช้เทคนิค UV-Vis spectrophotometry ในการวิเคราะห์สารพิเพอรินในพริกไทย โดยเทคนิคนี้ให้ผลการวิเคราะห์เป็นปริมาณพิเพอรินรวม ซึ่งรวมถึงอนุพันธ์ต่าง ๆ ของพิเพอรินด้วย ทำให้การวิเคราะห์มีความจำเพาะเจาะจงต่ำ นอกจากการเลือกเทคนิคการวิเคราะห์ที่เหมาะสมแล้ว การสกัดถือเป็นกระบวนการสำคัญที่ส่งผลต่อการวิเคราะห์ปริมาณพิเพอรินในตัวอย่างพริกไทย โดยวิธีที่นิยมใช้ในการสกัดสารพิเพอรินในตัวอย่างพริกไทย ได้แก่ การรีดกลั่น และการใช้คลื่นเสียงความถี่สูงร่วมกับสกัดด้วยตัวทำละลาย [12-17] ดังนั้นในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจึงวิเคราะห์ปริมาณพิเพอรินในตัวอย่างพริกไทยดำด้วยเทคนิค HPLC เนื่องจากเป็นเทคนิคที่ให้ผลการวิเคราะห์ที่มีความจำเพาะเจาะจงสูง รวดเร็ว และมีความน่าเชื่อถือ โดยได้ทำการสกัดตัวอย่างพริกไทยในเมทานอลด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงเพื่อช่วยลดระยะเวลาและปริมาณตัวทำละลายที่ใช้ในการสกัด ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมและทำการทดสอบความใช้ได้ของวิธีวิเคราะห์พิเพอรินในตัวอย่างพริกไทยดำด้วยเทคนิค HPLC เพื่อให้ผลการวิเคราะห์สามารถนำมาจัดทำเป็นข้อกำหนดคุณลักษณะวิธีการทดสอบ (Specification) หรือวิธีมาตรฐานที่ใช้เป็นวิธีอ้างอิงในห้องปฏิบัติการวิเคราะห์ทดสอบ

2. วิธีการวิจัย (Experimental methods)

2.1 ตัวอย่าง

ผู้วิจัยได้ดำเนินการรวบรวมตัวอย่างพริกไทยดำทางการค้า จำนวน 25 ตัวอย่าง และวัตถุดิบพริกไทยดำจากแหล่งปลูกจำนวน 3 ตัวอย่าง รวม 28 ตัวอย่าง นำตัวอย่างพริกไทยดำมาบดให้ละเอียด และคัดขนาดผ่านตะแกรงร่อนขนาด 300 ไมโครเมตร เก็บตัวอย่างไว้ในภาชนะที่ปิดสนิทในตู้ดูดความชื้นเพื่อนำไปใช้ในการทดลองต่อไป

2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

2.2.1 เครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (High-performance liquid chromatography, photodiode array detector, HPLC-PDA) ยี่ห้อ Waters รุ่น Waters 2998 ผลิตจากประเทศสหรัฐอเมริกา

2.2.2 คอลัมน์ C18 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 3.9 มิลลิเมตร ความยาว 15 เซนติเมตร ขนาดอนุภาค 5 ไมโครเมตร ยี่ห้อ Waters ผลิตจากประเทศสหรัฐอเมริกา

2.2.3 เครื่องซังไฟฟ้าทศนิยม 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Scaltec รุ่น SBA 31 ผลิตจากประเทศเยอรมัน

2.2.4 เครื่องเขย่าสารโดยใช้คลื่นเสียงความถี่สูง (Ultrasonic sonicator) กำลัง 300 วัตต์ และความถี่ 40 kHz ยี่ห้อ GT sonic ผลิตจากประเทศจีน

2.2.5 เครื่องทำน้ำบริสุทธิ์ (Deionized water) ยี่ห้อ Ultra-pure water, ELGA, รุ่น Ultra ionic ผลิตจากประเทศสหรัฐอเมริกา

2.3 สารเคมี

2.3.1 สารมาตรฐานพิเพอร์รีน (Piperine) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 97 ยี่ห้อ Sigma-aldrich ผลิตจากประเทศเยอรมัน

2.3.2 เอทานอล ความเข้มข้นร้อยละ 95 (Ethanol 95%) AR grade ยี่ห้อ Merck

2.3.3 เอทานอล ความเข้มข้นร้อยละ 99 (Ethanol 99%) AR grade ยี่ห้อ Merck

2.3.4 เมทานอล (Methanol) HPLC grade ยี่ห้อ Merck

2.3.5 กรดแอซีติก (Acetic acid) HPLC grade ยี่ห้อ Merck

2.3.6 แอซีโตนไทรล์ (Acetonitrile) HPLC grade ยี่ห้อ Merck ผลิตจากประเทศเยอรมัน

2.4 การเตรียมสารละลายมาตรฐาน

เตรียมสารละลายมาตรฐานพิเพอร์รีน ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร (Stock solution) โดยชั่งสารมาตรฐานพิเพอร์รีน 0.0100 กรัม ลงในขวดปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร ละลายและปรับปริมาตรด้วยเมทานอล จากนั้นเตรียมสารละลายมาตรฐานพิเพอร์รีน ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปิเปตสารละลายมาตรฐานพิเพอร์รีน ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 500 ไมโครลิตร ลงในขวดปริมาตรขนาด 5 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรด้วยเมทานอล

2.5 วิธีดำเนินงาน

การทดสอบความใช้ได้ของวิธีทดสอบ พัฒนาขึ้นตาม AOAC guidelines for single laboratory, validation of chemical methods for dietary supplements and botanicals (2019) [20] และ ISO 11027:1993, International standard: Pepper and pepper oleoresins – Determination of piperine content (1993) [21] โดยใช้สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณพิเพอร์รีนด้วยเครื่อง HPLC แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สภาวะที่ใช้ในการทดสอบพีเพอร์รีนด้วยเทคนิค High performance liquid chromatography

สภาวะ	รายละเอียด
คอลัมน์	ชนิด C18 เส้นผ่านศูนย์กลาง 3.9 มิลลิเมตร ความยาว 15 เซนติเมตร ขนาดอนุภาค 5 ไมโครเมตร
Elution mode	Isocratic
เฟสเคลื่อนที่	แอซีโตนไตรล น้ำ และกรดแอซีติก อัตราส่วน 60 : 39.5 : 0.5
อัตราการไหล (มิลลิลิตร/นาที)	1.0
ปริมาตรที่ฉีด (ไมโครลิตร)	20
เวลาในการวิเคราะห์ (นาที)	7
Retention time (นาที)	2.86
เครื่องตรวจจับ	ชนิดโฟโตไดโอดอาร์เรย์ (Photodiode array detector)
ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	340

2.5.1 ความเป็นเส้นตรง (Linearity)

เตรียมสารละลายมาตรฐานพีเพอร์รีน ความเข้มข้น 1.00, 2.00, 3.00, 4.00, 5.00 และ 6.00 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อสร้างกราฟมาตรฐาน โดยปิเปตสารละลายมาตรฐานพีเพอร์รีน ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50, 100, 150, 200, 250 และ 300 ไมโครลิตร ตามลำดับ ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 5 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรด้วยเมทานอล นำสารละลายมาตรฐานที่เตรียมได้แต่ละความเข้มข้น กรองด้วย Syringe filter ขนาดรูพรุน 0.22 ไมโครเมตร นำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์โดยเทคนิค HPLC ความเข้มข้นละ 3 ซ้ำ แล้วนำค่าพื้นที่ใต้พีค (Peak area) และความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานพีเพอร์รีนมาสร้างกราฟมาตรฐาน (Calibration curve) โดยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient) ของกราฟมาตรฐานควรมีค่าไม่น้อยกว่า 0.995

2.5.2 ความเที่ยง (Precision)

การทดสอบหาความเที่ยงของวิธีวิเคราะห์ โดยใช้สารมาตรฐานพีเพอร์รีน 3 ระดับความเข้มข้นในช่วงต่ำ กลาง สูง ได้แก่ ความเข้มข้น 1.00, 3.00 และ 5.00 มิลลิกรัมต่อลิตร และตัวอย่างผงพริกไทยดำ จำนวน 2 ตัวอย่าง โดยทำ Intra-day precision จำนวน 6 ซ้ำภายในวันเดียวกัน แล้วนำปริมาณพีเพอร์รีนมาคำนวณหาค่าเฉลี่ย (Mean) และ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD) จากนั้นทำ Intermediate precision โดย (1) เปลี่ยนผู้ทดลอง และ (2) เปลี่ยนวันที่ ทำการทดลองโดยเป็นผู้ทดลองเดิม เป็นเวลา 3 วัน แล้วนำปริมาณพีเพอร์รีนมาคำนวณหาค่าเฉลี่ย และคำนวณหาร้อยละของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD) จากสมการ โดยควรมีค่าไม่เกิน 5% [21]

$$\%RSD = SD / \bar{X}$$

เมื่อ SD คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้จากการทำการทดลอง 6 ซ้ำ

$\bar{X}$ คือ ค่าเฉลี่ยของปริมาณพีเพอร์รีนที่ได้จากการทำการทดลอง 6 ซ้ำ

2.5.3 ความถูกต้อง (Accuracy)

การทดสอบความถูกต้อง ทำโดยใช้วิธีการเติมสารละลายมาตรฐานพิเพอร์รีนที่ทราบความเข้มข้นลงในตัวอย่างพริกไทยที่มีปริมาณพิเพอร์รีนต่ำ หรือ Sample blank ที่ 3 ระดับความเข้มข้นคือ ต่ำ กลาง และสูง ได้แก่ 1.00, 3.00 และ 5.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังตารางที่ 2 แล้วนำไปสกัดด้วยวิธีเดียวกับการวิเคราะห์จริง ความเข้มข้นละ 3 ซ้ำ นำผลที่ได้มาคำนวณร้อยละของการคืนกลับ (%Recovery) ในแต่ละระดับความเข้มข้น ควรอยู่ในช่วงร้อยละ 92 - 105 ตาม AOAC guidelines for single laboratory (2019) [20] และค่าร้อยละของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ %RSD ไม่เกิน 3.0 โดยมีสูตรคำนวณ ดังนี้

$$\% \text{Recovery} = (C1 - C2)/C3 \times 100$$

- เมื่อ
- C1 คือ ความเข้มข้นของพิเพอร์รีนในตัวอย่างที่เติมสารละลายมาตรฐานพิเพอร์รีน
 - C2 คือ ความเข้มข้นของพิเพอร์รีนในตัวอย่างแบลงค์ (Sample blank)
 - C3 คือ ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานพิเพอร์รีนที่เติมลงในตัวอย่าง (Spiked sample)

ตารางที่ 2 การเติมสารละลายมาตรฐานพิเพอร์รีน และเมทานอลในการสกัดเพื่อทดสอบความถูกต้องของวิธี

ระดับความเข้มข้น ของสารละลายมาตรฐาน พิเพอร์รีน (mg/L)	ปริมาตรสารละลายมาตรฐาน พิเพอร์รีน Stock solution ความเข้มข้น 100 mg/L (mL)	ปริมาตร เมทานอล (mL)	ปริมาตรรวม (mL)
0	0	50.00	50
1.00	0.50	49.50	50
3.00	1.50	48.50	50
5.00	2.50	47.50	50

2.5.4 ขีดจำกัดของการตรวจพบ (Limit of detection, LOD) ขีดจำกัดของการวัดเชิงปริมาณ (Limit of quantitation, LOQ) ทดสอบขีดจำกัดของการตรวจพบ (LOD) โดยใช้ตัวอย่างพริกไทยที่มีพิเพอร์รีนปริมาณต่ำมาใช้ศึกษา โดยประมาณค่าเป็น 3 เท่าของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานบวกกับค่าเฉลี่ยของ Sample blank ตัวอย่างพริกไทยที่มีพิเพอร์รีนปริมาณต่ำทำการวิเคราะห์จำนวน 10 ซ้ำ จากนั้นคำนวณหาค่าเฉลี่ย ($\bar{X}$) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) เพื่อหาค่า LOD และค่าประมาณ LOQ โดยคำนวณจาก

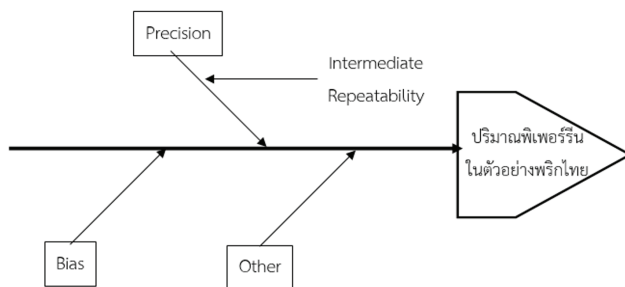
$$\text{LOD} = \bar{X} + 3\text{SD}$$

$$\text{การประมาณค่า LOQ} = \bar{X} + 10\text{SD}$$

จากนั้นยืนยันค่า LOQ โดยเติมสารละลายมาตรฐานพิเพอร์รีนที่ระดับความเข้มข้นเดียวกับค่าประมาณ LOQ จำนวน 7 ซ้ำ แล้วพิจารณาความเที่ยง (Precision) ที่แสดงด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (Relative standard deviation, %RSD) และความแม่นยำ (Accuracy) โดยคำนวณจากค่าร้อยละการคืนกลับ (%Recovery)

2.5.5 การประมาณค่าความไม่แน่นอนของการวัด

ค่าความไม่แน่นอนของการวัดเป็นการประเมินค่ารวมของผลกระทบทั้งหมดที่มีผลต่อการทดสอบเชิงปริมาณ สามารถประมาณได้จากข้อมูลการทดสอบ งานวิจัยนี้ทำการประมาณค่าความไม่แน่นอนของการวิเคราะห์ปริมาณพิเพอร์รีนในตัวอย่างพริกไทย โดยใช้ข้อมูลจาก method validation approach ตามวิธีของ VAM Project 3.2.1 development and harmonisation of measurement uncertainty principles part (d): Protocol for uncertainty evaluation from validation data (2000) [22] โดยรวมแหล่งที่มาของค่าความไม่แน่นอนต่าง ๆ แสดงด้วยแผนภูมิแกงปลา (รูปที่ 1) จากนั้นคำนวณหาค่าความไม่แน่นอนแต่ละแหล่ง ค่าความไม่แน่นอนรวม และค่าความไม่แน่นอนขยายที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($k=2$)



รูปที่ 1 แผนภูมิแกงปลาแสดงแหล่งความไม่แน่นอนในการวัดปริมาณสารพิเพอร์รีนในตัวอย่างพริกไทย

ค่าความไม่แน่นอนรวม, u_c คำนวณจากสมการ

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

เมื่อ $u(R)$ คือ ค่าความไม่แน่นอนรวมของความเอนเอียง

$u(P)$ คือ ค่าความไม่แน่นอนจากความเที่ยง

C คือ ค่าความเข้มข้นระดับกลาง ที่ใช้ศึกษาความเอนเอียงของวิธี (3 mg/L)

ความไม่แน่นอนขยาย, U ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($k = 2$) คำนวณได้จากสมการ

$$U = ku_c$$

เมื่อ k คือ ค่า Coverage factor ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% มีค่าเท่ากับ 2

u_c คือ ค่าความไม่แน่นอนรวม

จากนั้นคำนวณหาร้อยละความไม่แน่นอน

$$\text{ร้อยละความไม่แน่นอน} = \frac{\text{ความไม่แน่นอนขยาย}}{\text{ความเข้มข้นระดับกลางที่ใช้คำนวณ}} \times 100$$

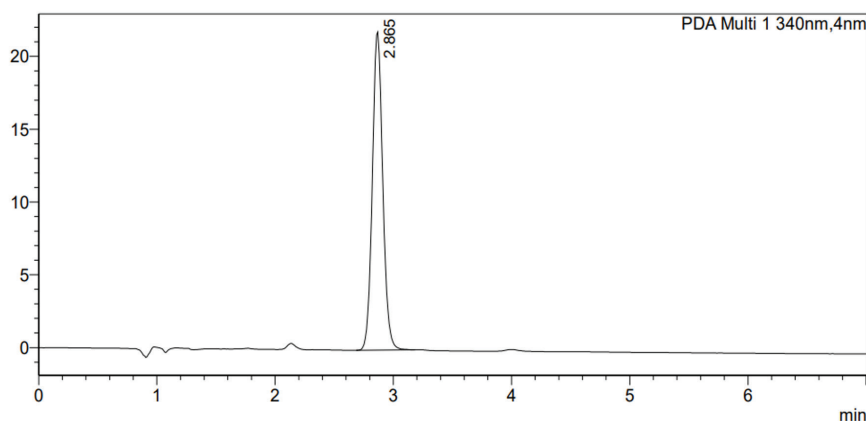
2.5.6 การวิเคราะห์ปริมาณสารพิเพอร์รีนในตัวอย่างพริกไทยดำจากแหล่งต่าง ๆ

เตรียมตัวอย่างสารสกัดพริกไทยดำจำนวน 28 ตัวอย่าง โดยชั่งตัวอย่างจำนวน 0.2 ± 0.0005 กรัม ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร เติมนีโทานอล ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ปิดปากขวดด้วยอะลูมิเนียมฟอยล์และปิดทับด้วยพาราฟิล์ม นำไปสกัดด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง เป็นเวลา 30 นาที กรองสารสกัดที่ได้ลงในขวดสีชาด้วยกระดาษกรองเบอร์ 4 จากนั้นนำสารละลายกรองผ่าน Syringe filter ขนาดรูพรุน 0.22 ไมครอนเมตร ทำการทดสอบ 3 ซ้ำ และนำไปวิเคราะห์ปริมาณพิเพอร์รีนด้วยเทคนิค HPLC แล้วนำมาคำนวณหาปริมาณสารพิเพอร์รีนในหน่วยร้อยละโดยมวล (%w/w)

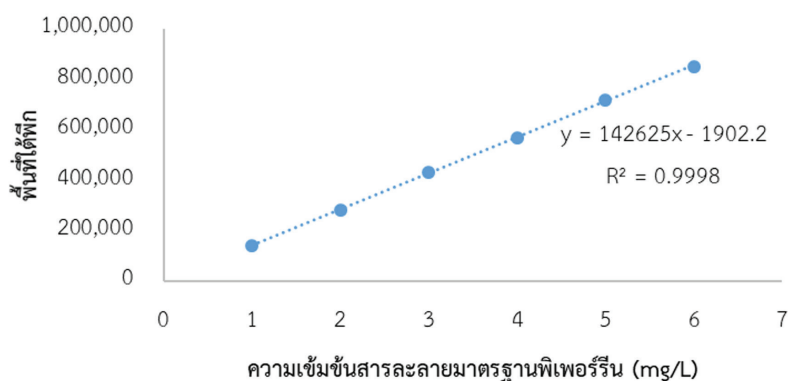
3. ผลและวิจารณ์ (Results and discussion)

3.1 การทดสอบความเป็นเส้นตรง (Linearity)

การทดสอบนี้ได้กำหนดช่วงการวิเคราะห์สารพิเพอร์รีนในช่วงความเข้มข้น 1 - 6 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อนำสารละลายมาตรฐานพิเพอร์รีนที่เตรียมไว้ไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค HPLC ความเข้มข้นละ 3 ซ้ำ จะได้โครมาโทแกรมของพิเพอร์รีนที่ Retention time เท่ากับ 2.86 นาที ดังรูปที่ 2 แล้วเขียนกราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานพิเพอร์รีน และค่าเฉลี่ยพื้นที่ใต้พีค จะได้กราฟมาตรฐานที่มีสมการเส้นตรง $y = 142625x - 1902.2$ และ Coefficient of determination (R^2) = 0.9998 ดังรูปที่ 3



รูปที่ 2 โครมาโตแกรมของสารละลายมาตรฐานพิเพอร์รีน



รูปที่ 3 กราฟมาตรฐานของสารละลายมาตรฐานพิเพอร์รีนความเข้มข้น 1 - 6 มิลลิกรัมต่อลิตร

3.2 การทดสอบความเที่ยง (Precision)

ทดสอบความเที่ยงจากการวิเคราะห์สารละลายมาตรฐานพิเพอร์รีน 3 ระดับความเข้มข้นต่ำ กลาง สูง ได้แก่ 1.00, 3.00 และ 5.00 มิลลิกรัมต่อลิตร และตัวอย่างพริกไทยจำนวน 2 ตัวอย่าง โดยวิเคราะห์แบบ Intra-day precision และแบบ Inter-day precision แล้วนำผลการวิเคราะห์มารายงานผลในรูปของ %Relative standard deviation (%RSD) จากผลการทดลองตารางที่ 3 จะเห็นว่าค่า %RSD ของ Intra-day และ Inter-day precision ของสารละลายมาตรฐานพิเพอร์รีนทั้ง 3 ความเข้มข้น และของตัวอย่างสารสกัดพริกไทยที่วิเคราะห์ได้มีค่า %RSD อยู่ในช่วง 0.36 - 2.50 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 5% [21] แสดงให้เห็นว่าวิธีวิเคราะห์นี้มีความเที่ยงสูง

ตารางที่ 3 แสดงผลการทดสอบความเที่ยง Intra-day และ Inter-day precision ของสารละลายมาตรฐานพิเพอร์รีนและในตัวอย่างสารสกัดพริกไทย (n = 6)

สารละลาย มาตรฐาน พิเพอร์รีน/ ตัวอย่าง (mg/L)	Intra-day (n = 6)						Inter-day (n =18)	
	วันที่ 1		วันที่ 2		วันที่ 3			
	Mean ± SD	%RSD	Mean ± SD	%RSD	Mean ± SD	%RSD	Mean ± SD	%RSD
1.00	1.01± 0.01	1.21	1.01 ± 0.01	1.23	1.02 ± 0.01	1.23	1.01 ± 0.01	0.40
3.00	2.99 ± 0.02	0.65	2.99 ± 0.02	0.69	3.02 ± 0.02	0.75	3.00 ± 0.01	0.49
5.00	5.02 ± 0.03	0.64	5.02 ± 0.03	0.56	5.06 ± 0.02	0.36	5.04 ± 0.02	0.45
Sample 1	4.53 ± 0.08	1.65	4.68 ± 0.08	1.70	4.65 ± 0.09	1.98	4.59 ± 0.07	1.44
Sample 2	3.77 ± 0.09	2.50	3.71 ± 0.05	1.25	3.68 ± 0.04	1.07	3.72 ± 0.09	1.18

3.3 การทดสอบความถูกต้อง (Accuracy)

ความถูกต้องของผลทดสอบ เป็นคุณสมบัติที่แสดงความใกล้เคียงของค่าที่วิเคราะห์ได้ ด้วยวิธีการทดสอบนั้นกับค่าอ้างอิงหรือค่าจริง สำหรับงานวิจัยนี้เนื่องจากไม่สามารถหาสารมาตรฐานอ้างอิงได้ จึงทำการเติมสารมาตรฐานพิเพอร์รีน 3 ความเข้มข้น ที่ระดับความเข้มข้นต่ำ กลาง สูง ได้แก่ 1.00, 3.00 และ 5.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ลงในตัวอย่างก่อนการสกัดและวิเคราะห์หาปริมาณพิเพอร์รีน แล้วจึงคำนวณหาค่าร้อยละการคืนกลับ (%Recovery) พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 100.25 - 101.65% ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ตาม AOAC guidelines for single laboratory (2019) [20] ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 แสดงค่าร้อยละการคืนกลับ (%Recovery) ของสารพิเพอร์รีนในตัวอย่างสารสกัดพริกไทย

ความเข้มข้นของสารพิเพอร์รีนที่เติม (mg/L)	ร้อยละการคืนกลับ (%Recovery)	%RSD
1.00	100.25 $\pm$ 0.23	0.23
3.00	101.01 $\pm$ 1.33	1.31
5.00	101.65 $\pm$ 0.82	0.81

3.4 การทดสอบขีดจำกัดของการตรวจพบ (Limit of detection, LOD) และการประมาณค่าขีดจำกัดของการวัดเชิงปริมาณ (Limit of quantitation, LOQ)

จากการศึกษาขีดจำกัดของการตรวจพบ (LOD) และการประมาณค่าขีดจำกัดของการวัดเชิงปริมาณ (LOQ) ของสารพิเพอร์รีน โดยคำนวณจากสมการในข้อ 2.5.4 เพื่อหาค่า LOD และ LOQ พบว่าเมื่อนำตัวอย่างพริกไทยที่ถูกสกัดพิเพอร์รีน (Sample blank) มาสกัดและวิเคราะห์ขีดจำกัดของการตรวจพบของพิเพอร์รีนเท่ากับ 0.99 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีค่าประมาณขีดจำกัดของการวัดเชิงปริมาณเท่ากับ 1.09 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ผลการศึกษาขีดจำกัดของการตรวจพบ (LOD) และการประมาณค่าขีดจำกัดของการวัดเชิงปริมาณ (LOQ) ของพิเพอร์รีน

ลำดับ	ปริมาณพิเพอร์รีน (mg/L)
1	0.980
2	0.964
3	0.950
4	0.963
5	0.940
6	0.939
7	0.953
8	0.945
9	0.944
10	0.938
เฉลี่ย ($\bar{X}$)	0.952
SD	0.0135
%RSD	1.419
LOD = ($\bar{X} + 3SD$)	0.99
การประมาณค่า LOQ=($\bar{X} + 10SD$)	1.09

จากนั้นพิสูจน์ค่าขีดจำกัดของการวัดเชิงปริมาณ โดยทำการเติมสารละลายมาตรฐานพิเพอร์รีนที่ได้จากการคำนวณที่ระดับความเข้มข้น 1.09 มิลลิกรัมต่อลิตร ลงไปในตัวอย่างพริกไทยที่มีพิเพอร์รีนปริมาณต่ำ จำนวน 7 หลอด และนำไปวิเคราะห์ปริมาณพิเพอร์รีนด้วยเทคนิค HPLC พบว่า ค่าร้อยละการคืนกลับของสารพิเพอร์รีนอยู่ในช่วง 98.95 - 101.01 และมีค่า %RSD เท่ากับ 0.83 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์การยอมรับได้ตาม AOAC guidelines for single laboratory (2019) ที่กำหนดให้ค่าร้อยละการคืนกลับอยู่ในช่วง 92 - 105 และค่า %RSD ≤ 3 แสดงผลดังตารางที่ 6 ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าขีดจำกัดของการวัดเชิงปริมาณของการวิเคราะห์พิเพอร์รีนมีความถูกต้องและมีความเที่ยงที่ยอมรับได้

ตารางที่ 6 การพิสูจน์ขีดจำกัดของการวัดเชิงปริมาณ (LOQ) ของสารพิเพอร์รีนในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร

ความเข้มข้นที่พิสูจน์	ปริมาณพิเพอร์รีน		
	No.	%Recovery	ปริมาณสารพิเพอร์รีนในตัวอย่างที่วิเคราะห์ได้ (mg/L)
ความเข้มข้นที่เติม (1.09 mg/L)	1	100.27	1.08
	2	101.01	1.07
	3	99.57	1.08
	4	99.50	1.09
	5	100.88	1.07
	6	99.15	1.09
	7	98.95	1.09
เฉลี่ย ($\bar{X}$)			1.08
SD			0.0089
%RSD			0.83

3.5 การประมาณค่าความไม่แน่นอนของผลการวัด

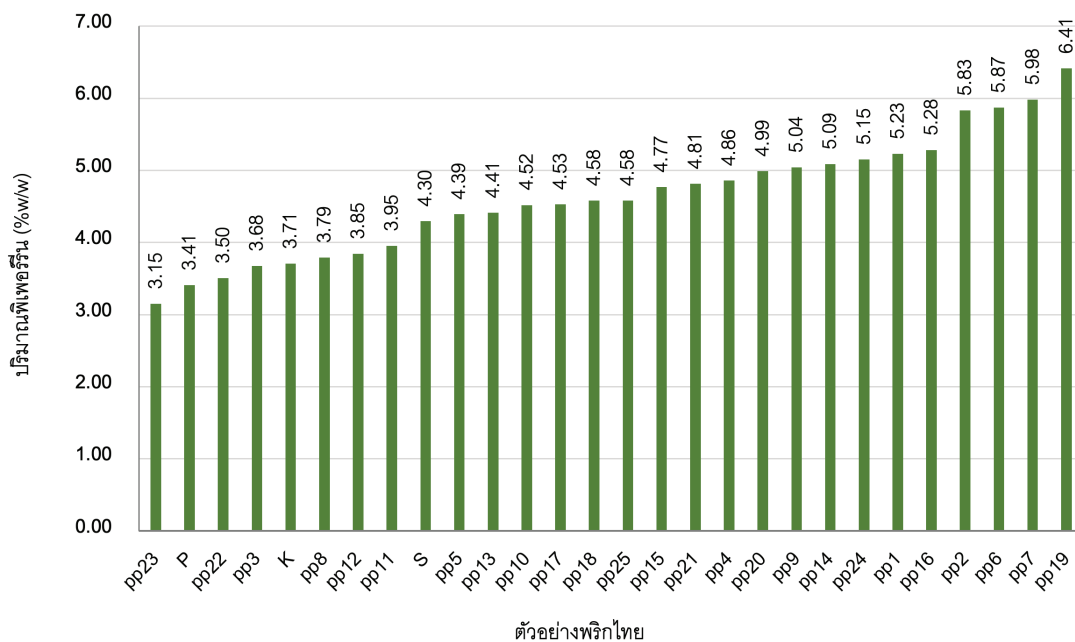
จากผลการทดลอง สามารถประมาณค่าไม่แน่นอนของการวิเคราะห์ปริมาณพิเพอร์รีนในตัวอย่างพริกไทยโดยเทคนิค HPLC โดยค่าความไม่แน่นอนแต่ละแหล่ง ค่าความไม่แน่นอนขยายที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($k = 2$) และร้อยละความไม่แน่นอน แสดงดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 แสดงผลการตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีวิเคราะห์สารพิเพอร์รีนในพริกไทยดำด้วยเทคนิค High performance liquid chromatography

แหล่งของค่าความไม่แน่นอน	ค่าที่คำนวณได้
1. ความไม่แน่นอนจากความเอนเอียง, $u(R)$	0.0124
2. ความไม่แน่นอนจากความเที่ยง, $u(P)$	0.0123
3. ความไม่แน่นอนรวม, u_c (mg/L)	0.0523
4. ความไม่แน่นอนขยาย, U ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($k = 2$)	0.1046 mg/L
5. ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานพิเพอร์รีน	3.0 mg/L
6. ร้อยละความไม่แน่นอน	3.49

3.6 การวิเคราะห์ปริมาณสารพิเพอร์รีนในตัวอย่างพริกไทยดำจากแหล่งต่างๆ

จากการรวบรวมตัวอย่างพริกไทยดำจากแหล่งต่าง ๆ ได้แก่ ตัวอย่างพริกไทยดำทางการค้า 25 ตัวอย่าง และพริกไทยจากเกษตรกรผู้ปลูก 3 ตัวอย่าง รวมทั้งหมด 28 ตัวอย่าง นำมาสกัดและวิเคราะห์ ด้วยเทคนิค HPLC ได้ผลแสดงดังรูปที่ 4 พบว่าตัวอย่างพริกไทยดำทั้ง 28 ตัวอย่าง มีปริมาณสารพิเพอร์รีนอยู่ในช่วงร้อยละ 3.15 ถึง 6.41 โดยน้ำหนัก ($\bar{X}$ = 4.63 %w/w) ซึ่งผ่านเกณฑ์ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) ที่กำหนดปริมาณพิเพอร์รีนในตัวอย่างพริกไทยต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 4 [13] จำนวน 20 ตัวอย่าง คิดเป็นร้อยละ 71.4



รูปที่ 4 ผลการวิเคราะห์ปริมาณสารพิเพอร์รีนในตัวอย่างพริกไทยทั้ง 28 ตัวอย่าง

4. สรุป (Conclusion)

การตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีการวิเคราะห์ปริมาณพิเพอร์รีนในตัวอย่างพริกไทยดำด้วยเทคนิคโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง โดยทำการตรวจสอบคุณลักษณะเฉพาะต่างๆ ได้แก่ ช่วงความเป็นเส้นตรง ความถูกต้อง ความเที่ยง ชีตจำกัดของการตรวจพบและชีตจำกัดของการวัดเชิงปริมาณ และค่าประมาณความไม่แน่นอนของการวัด พบว่าผลที่วิเคราะห์ได้เป็นไปตามเกณฑ์การยอมรับตาม AOAC guidelines for single laboratory, validation of chemical methods for dietary supplements and botanicals แสดงว่าวิธีวิเคราะห์สามารถใช้หาปริมาณพิเพอร์รีนในตัวอย่างพริกไทยดำจากแหล่งต่าง ๆ ได้ และมีความจำเพาะเจาะจงในการตรวจวัดสูง โดยวิธีที่พัฒนาขึ้นนี้มีความน่าเชื่อถือเหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณพิเพอร์รีนในตัวอย่างพริกไทย และสามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการควบคุมคุณภาพพริกไทย หรือเป็นวิธีอ้างอิงในห้องปฏิบัติการวิเคราะห์ทดสอบได้

5. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

ขอขอบคุณงบประมาณสนับสนุนจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์วิจัย และนวัตกรรม และขอบคุณบุคลากรศูนย์วิจัยและพัฒนาวัตถุุดิบและผลิตภัณฑ์ที่ร่วมแรงร่วมใจตลอดการทำวิจัย ขอขอบคุณผู้บังคับบัญชาและเจ้าหน้าที่สถาบันวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีชุมชน กรมวิทยาศาสตร์บริการทุกท่านที่ช่วยสนับสนุนการทำวิจัย และทำให้การดำเนินงานวิจัยสำเร็จตามวัตถุประสงค์

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร สำนักงานปลัดกระทรวงพาณิชย์, กรมศุลกากร. การส่งออกพริกไทยของไทย. 2562.
- [2] อารยา ข้อคำ. สารพฤกษเคมีจากพริกไทยดำและฤทธิ์ทางเภสัชวิทยา. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 2560;1(2):28-39.
- [3] Srinivasan K. Black pepper and its pungent principle-piperine: A review of diverse physiological effects. Crit Rev Food Sci Nutr. 2007;47(8):735-48. doi: 10.1080/10408390601062054.
- [4] Luerueang K, Rochoanapo M, Klangprapun S. Phytochemical composition and pharmacological activities of herbal ingredients in Trikatuk remedy. J Tradit Thai Med Res. 2019;5(2):1-19.
- [5] อุดมลักษณ์ อุ่นจิตต์วรรณะ, สานิตย์ สุขสวัสดิ์, อามรณีย์ เจริญสายใจ, มณี ชิงดวง. วิจัยชนิดและปริมาณสารสำคัญในพริกไทยพันธุ์ต่าง ๆ จากแหล่งต่าง ๆ และอายุแตกต่างกัน. กรุงเทพฯ: สำนักวิจัยและพัฒนาปัจจัยการผลิตทางการเกษตร กรมวิชาการเกษตร; 2547.
- [6] Chopra B, Dhingra AK, Kapoor RP, Prasad DN. Piperine and its various physicochemical and biological aspects: A review. Open Chem J. 2016;3:1-8. doi: 10.2174/1874842201603010075.
- [7] Sozzi GO, Peter KV, Babu KN, Divakaran M. Capers and caperberries. In: Handbook of herbs and spices. 2nd ed. Cambridge: Elsevier; 2012. p. 193-224.
- [8] Pruthi JS. Major spices of India: Crop management and post-harvest technology. India: Allied Publishers; 1993.
- [9] Tavares WS, Cruz I, Petacci F, Freitas SS, Serrão JE, Zanon JC. Insecticide activity of piperine: Toxicity to eggs of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) and *Diatraea saccharalis* (Lepidoptera: Pyralidae) and phytotoxicity on several vegetables. J Med Plants Res. 2011;5(21):5301-6.
- [10] Zarai Z, Boujelbene E, Salem NB, Gargouri Y, Sayari A. Antioxidant and antimicrobial activities of various solvent extracts, piperine and piperic acid from *Piper nigrum*. LWT-Food Sci Technol. 2013;50(2):634-41. doi: 10.1016/j.lwt.2012.07.036
- [11] Bang JS, Oh DH, Choi HM, Sur BJ, Lim SJ, Kim JY, et al. Anti-inflammatory and antiarthritic effects of piperine in human interleukin 1 β -stimulated fibroblast-like synoviocytes and in rat arthritis models. Arthritis Res Ther. 2009;11(2):R49. doi: 10.1186/ar2662.
- [12] กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์, สถาบันวิจัยสมุนไพร. คู่มือการตรวจวิเคราะห์ด้านเคมีของสมุนไพร เล่ม 2. นนทบุรี: กระทรวงสาธารณสุข; 2564. น. 55.
- [13] กระทรวงอุตสาหกรรม. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 4552 (พ.ศ. 2556) เรื่อง ยกเลิกและกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมพริกไทย. ราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 130 ตอนพิเศษ 93 ง, 1 สิงหาคม 2556. 4.
- [14] American Spice Trade Association. ASTA analytical methods, Method 12.1: Piperine content of black and white pepper, their oleoresins and soluble pepper seasonings. 2018. p. 51-54.
- [15] Ministry of Public Health, Department of Medical Sciences, Bureau of Drug and Narcotics. Thai herbal pharmacopoeia. Bangkok: Ministry of Public Health; 2020.
- [16] Upadhyay V, Sharma N, Joshi HM, Malik A, Mishra M, Singh BP, et al. Development and validation of rapid RP-HPLC method for estimation of piperine in *Piper nigrum* L. Int J Herbal Med. 2013;1(4):6-9.
- [17] Shrestha S, Chaudhary N, Sah R, Malakar N. Analysis of piperine in black pepper by high performance liquid chromatography. J Nepal Chem Soc. 2020;41(1):80-6. doi: 10.3126/jncs.v41i1.30492.

- [18] Hamrapurkar PD, Jadhav K, Zine S. Quantitative estimation of piperine in *Piper nigrum* and *Piper longum* using high performance thin layer chromatography. *J Appl Pharm Sci.* 2011;1(3):117-20.
- [19] Banerjee S, Tudu B, Naskar H, Mandal D, Bandyopadhyay R, Das N, et al. Detection of piperine content in black pepper using a molecular imprinted poly(N,N-dimethylacrylamide) embedded graphite electrode: A machine learning based prediction approach. *Microchem J.* 2024;207:111914. doi: 10.1016/j.microc.2024.111914.
- [20] AOAC International. AOAC guidelines for single laboratory validation of chemical methods for dietary supplements and botanicals. Rockville (MD): AOAC International; 2019.
- [21] International Organization for Standardization (ISO). Pepper and pepper oleoresins – Determination of piperine content – Method using high-performance liquid chromatography. ISO 11027:1993. Geneva: ISO; 1993.
- [22] Barwick VJ, Ellison SLR. VAM Project 3.2.1 development and harmonisation of measurement uncertainty principles part (d): Protocol for uncertainty evaluation from validation data version 5.1. LGC/VAM/1998/088. Teddington (UK): LGC (Teddington) Limited; 2000.

ผลของวิธีการสกัดและสายพันธุ์บัวบกต่อปริมาณผลผลิต สารประกอบฟีนอลิกและฤทธิ์ทางชีวภาพ ในการต้านอนุมูลอิสระของสารสกัด

The effect of extraction methods and *Centella asiatica* species on yield,
total phenolic content and antioxidant activity of extract

เจวดี มีสัตย์^{1*}, อภิรตธี ศรีธร¹, ยุทธศักดิ์ สุขการ¹

Rewadee Meesat^{1*}, Apiratree Srithon¹, Yuttasak Subkaree¹

รับบทความ 25 กรกฎาคม 2567 แก้ไขบทความ 8 เมษายน 2568 ยอมรับตีพิมพ์ 8 เมษายน 2568

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเปรียบเทียบวิธีการสกัดสารสำคัญจากบัวบกสายพันธุ์ท้องถิ่น วิธีการสกัดแบ่งได้เป็น 3 วิธีคือการสกัดด้วยน้ำ การสกัดด้วยเอทานอล และการสกัดด้วยเอนไซม์ และสายพันธุ์บัวบกที่ใช้สำหรับการศึกษา คือ สายพันธุ์นครปฐม สายพันธุ์ระยอง และสายพันธุ์อุบลราชธานี สารสกัดจากแต่ละสายพันธุ์จะถูกวัดปริมาณผลผลิต ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกและฤทธิ์ทางชีวภาพในการต้านอนุมูลอิสระด้วย DPPH และการทดสอบความสามารถในการรีดิวซ์เฟอริก (FRAP) วิธีการสกัดด้วยน้ำใช้อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที วิธีการสกัดด้วยเอนไซม์ใช้เอนไซม์เซลลูเลสชนิด Viscozyme L ปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก พีเอช 5.0 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที ส่วนวิธีการสกัดด้วยเอทานอลใช้อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที การศึกษานี้พบว่าวิธีการสกัดและสายพันธุ์บัวบกมีผลต่อปริมาณผลผลิต สารประกอบฟีนอลิก และฤทธิ์ทางชีวภาพในการต้านอนุมูลอิสระ การสกัดด้วยเอนไซม์ให้ปริมาณผลผลิตสารสกัดสูงสุด ตามด้วยการสกัดด้วยน้ำและเอทานอล ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม การสกัดด้วยน้ำและเอทานอลให้สารสกัดที่มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกและฤทธิ์ทางชีวภาพในการต้านอนุมูลอิสระสูงกว่าการสกัดด้วยเอนไซม์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) บัวบกสายพันธุ์ระยองให้ปริมาณผลผลิต ปริมาณสารประกอบฟีนอลิก และฤทธิ์ทางชีวภาพในการต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดสูงกว่าบัวบกสายพันธุ์นครปฐมและสายพันธุ์อุบลราชธานีอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ดังนั้นวิธีการสกัดและสายพันธุ์บัวบกที่เหมาะสมคือวิธีการสกัดด้วยน้ำและบัวบกสายพันธุ์ระยอง โดยให้ปริมาณผลผลิตสารสกัดร้อยละ 35.94 ± 0.54 โดยน้ำหนัก สารสกัดมีสารประกอบฟีนอลิก 36.02 ± 0.51 mg GAE/g ความเข้มข้นที่สามารถต้านอนุมูลอิสระ DPPH ได้ร้อยละ 50 (IC_{50}) เท่ากับ 0.16 ± 0.01 mg/mL และมีความสามารถในการรีดิวซ์เฟอริก (FRAP) เท่ากับ 727.38 ± 27.47 μ mol Fe^{2+} /g สารสกัดจากบัวบกที่ได้สามารถละลายน้ำได้ดีเหมาะต่อการนำไปประยุกต์ใช้เป็นส่วนผสมในอาหารและเครื่องดื่ม

คำสำคัญ: สายพันธุ์บัวบก, การสกัดด้วยน้ำ, การสกัดด้วยเอนไซม์, การสกัดด้วยเอทานอล, ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ

ศูนย์เชี่ยวชาญนวัตกรรมอาหารสุขภาพ (ศนอ.) สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.)

Abstract

This research aims to study the comparison of extraction methods for local Asiatic Pennywort or *Centella asiatica* species. The extract techniques were divided into three methods, water extraction, enzyme extraction and ethanol extraction. The local *Centella asiatica* species, Nakhon Pathom, Rayong, and Ubon Ratchathani species were used as extracted samples. The extracted products were evaluated for extraction yield, total phenolic content (TPC) and antioxidant properties using DPPH assay and ferric reducing antioxidant power (FRAP). The Water extraction method was performed at 95 °C for 60 min and enzyme extraction method was applied Viscozyme L 3% (w/w) at pH 5.0, and 50 °C for 60 min. Additionally, the ethanol extraction method was carried out at 25 °C for 60 min. This study found that the extraction methods and the *C. asiatica* species had a significant effect on the extracted yield, TPC and antioxidant activity ($p < 0.05$). The highest yield could be extracted by the enzyme extraction, follow by the water and ethanol extraction method, respectively. However, the TPC and antioxidant activities of the extract products obtained from the water and ethanol extraction method exhibited significantly higher than those from the enzyme extraction method ($p < 0.05$). The Rayong species gave a significantly higher extraction yield, TPC and antioxidant activity compared to Nakhon Pathom and Ubon Ratchathani species ($p < 0.05$). Thus, the appropriate extraction technique and *C. asiatica* species were the water extraction method and the Rayong specie. The water extraction was used to extract active compounds from the local specie, yielding $35.94 \pm 0.54\%$ (w/w). The TPC was 36.02 ± 0.51 mg GAE/g, while the IC_{50} and FRAP values were 0.16 ± 0.01 mg/mL and 727.38 ± 27.47 μ mol Fe^{2+} /g, respectively. The extract of *Centella asiatica* showed high solubility in water and could be applied as an ingredient for food and drink products.

Keywords: *Centella asiatica* species, Water extraction, Enzyme extraction, Ethanol extraction, Antioxidant activity

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)

บัวบก (*Centella asiatica* L. Urb.) เป็นพืชที่นิยมบริโภคกันอย่างแพร่หลายและนิยมใช้เป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์หลายชนิดทั้งยา อาหารเสริม เครื่องสำอาง และอาหาร [1-3] ทั้งนี้เพราะบัวบกเป็นพืชสมุนไพรที่มีคุณสมบัติหลายอย่าง เช่น รักษาแผล ด้านการอักเสบ ด้านเชื้อจุลินทรีย์ ด้านอนุมูลอิสระ ด้านมะเร็ง ป้องกันแผลในกระเพาะอาหาร ช่วยเพิ่มความจำ สามารถรักษาโรคผิวหนังได้หลายชนิด เช่น โรคเรื้อน โรคสะเก็ดเงิน กลากเกลื้อน และผื่นคัน เป็นต้น รักษาอาการใช้โรคดีซ่าน โรคบิด ท้องเสีย ปวดทางจิต ช่วยเพิ่มการสังเคราะห์คอลลาเจน และต้านริ้วรอย เป็นต้น [1-5] บัวบกมีสารสำคัญหรือสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพหลายชนิด เช่น เอเชียดิโคไซด์ แมดิแคสโซไซด์ กรดเอเชียดิก กรดแมดิแคสซิด โพลีฟีนอล ฟีนอลิโพรพานอยด์ ฟลาโวนอยด์ คาเทชิน นารินจิน รูติน เทอร์ปีนอยด์ ซาโปนิน สเตียรอยด์ เทนิน เบต้าแคโรทีน และวิตามินซี เป็นต้น [1,3-4,6-7]

การสกัดสารสำคัญหรือสารที่มีฤทธิ์ทางชีวภาพจากพืชมีความสำคัญอย่างมากต่ออุตสาหกรรมยาและอาหาร เป็นกระบวนการแรกในการแยกสารสำคัญออกจากพืชเพื่อให้ได้สารสำคัญที่มีความเข้มข้นสูงและมีฤทธิ์ทางชีวภาพสูง นอกจากนั้นกระบวนการสกัดต้องให้ผลผลิตสูง ใช้เวลาน้อย และต้นทุนต่ำ [8-9] ในการสกัดสารสำคัญมีหลายปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการสกัดและคุณภาพของสารสกัด เช่น วิธีการสกัด สารละลายที่ใช้ในการสกัด ชนิดตัวถูบอง อุณหภูมิ พีเอช ปริมาณตัวถูบอง และระยะเวลาการสกัด เป็นต้น [9] วิธีการสกัดมีผลอย่างมากต่อประสิทธิภาพในการสกัดสารสำคัญจากบัวบกและสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การแช่ตัวอย่างบัวบกในตัวทำละลายที่อุณหภูมิ และระยะเวลาต่าง ๆ ตัวอย่างตัวทำละลาย เช่น น้ำ เมทานอล เอทานอล และอะซิโตน เป็นต้น [1,4,9-10] วิธีการนี้จะทำให้เซลล์พืชอ่อนนุ่มทำให้สารสำคัญถูกสกัดหรือละลายออกมากับตัวทำละลายได้ ตัวทำละลายแต่ละชนิดจะมีความเป็นขั้วแตกต่างกันทำให้มีความจำเพาะต่อสารสำคัญแตกต่างกัน ส่งผลให้ในการสกัดได้สารสำคัญและฤทธิ์ทางชีวภาพแตกต่างกัน [4] วิธีการนี้เป็นวิธีดั้งเดิมที่ทำงานง่ายและสะดวก แต่อย่างไรก็ตาม วิธีการนี้อาจจะใช้เวลานาน อุณหภูมิสูง และต้องใช้ตัวทำละลายปริมาณมาก [1,9] นอกจากนั้นตัวทำละลายบางชนิดไม่เหมาะต่อการนำมาสกัดเพื่อใช้เป็นส่วนผสมในอาหาร [8] การคัดเลือกตัวทำละลายจึงมีความสำคัญ การสกัดด้วยเอนไซม์จะเป็นการใช้เอนไซม์กลุ่มเซลลูเลสในการทำลายผนังเซลล์ของพืช โดยเฉพาะโครงสร้างของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสทำให้สามารถสกัดสารสำคัญได้ [11-12] เป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพและให้ผลผลิตการสกัดสูง [12] อีกทั้งเป็นวิธีการที่เหมาะสมต่อการสกัดเพื่อนำไปใช้เป็นวัตถุเจือปนอาหาร นอกจากนั้นยังมีเทคนิคอื่น ๆ ที่สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการสกัด เช่น การใช้คลื่นไมโครเวฟ การใช้คลื่นอัลตราซาวด์ การใช้ความดันสูง เป็นต้น [2,13-15] สายพันธุ์บัวบกเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่สำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพและคุณภาพของสารสกัดจากการศึกษาของประนอม ใจอ้าย [16] พบว่า บัวบกสายพันธุ์ระยองจะให้สารสำคัญ (เอเชียดิโคไซด์) สูงสุด ตามด้วยสายพันธุ์พะเยา สายพันธุ์ราชบุรี สายพันธุ์ตราด สายพันธุ์เชียงราย สายพันธุ์เพชรบุรี สายพันธุ์จันทบุรี สายพันธุ์นครปฐม และสายพันธุ์เลย ตามลำดับ จากการศึกษาของ Bakar และคณะ [17] พบว่าบัวบกสายพันธุ์ Pegaga Kampung ให้สารเอเชียดิโคไซด์สูงกว่าบัวบกสายพันธุ์ Pegaga Nyonya และสายพันธุ์ Pegaga Salad

ดังนั้น งานวิจัยนี้จะศึกษาเปรียบเทียบวิธีการสกัดสารสำคัญด้วยวิธีการสกัดด้วยน้ำ การสกัดด้วยเอนไซม์ และการสกัดด้วยเอทานอล จากบัวบกสายพันธุ์นครปฐม สายพันธุ์ระยอง และสายพันธุ์อุบลราชธานี โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาวิธีการสกัดและสายพันธุ์บัวบกที่เหมาะสมสำหรับการสกัดที่ให้ผลผลิต สารสำคัญ (สารประกอบฟีนอลิก) และฤทธิ์ทางชีวภาพในการต้านอนุมูลอิสระสูง

2. วิธีการวิจัย (Experimental Methods)

2.1 วัตถุดิบบวบก

บวบก (*Centella asiatica* L. Urb.) ที่ใช้ในการศึกษานี้มี 3 สายพันธุ์คือ สายพันธุ์นครปฐม (Nakhon Pathom) สายพันธุ์ระยอง (Rayong) และสายพันธุ์อุบลราชธานี (Ubon Ratchathani) ในการเตรียมใบบวบกทำโดยการนำใบบวบกสดไปล้างทำความสะอาด จากนั้นนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส (Memmert, เยอรมัน) เป็นเวลา 4 - 5 ชั่วโมง แล้วบดให้ละเอียดด้วยเครื่องบดสมุนไพร (Spring Green Evolution PG2500, จีน) และร่อนผ่านตะแกรงขนาด 30 เมช (0.60 มิลลิเมตร) ใส่ถุงซิปล็อคและเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิห้อง

2.2 การศึกษาการสกัดสารสำคัญจากใบบวบก

2.2.1 การสกัดด้วยน้ำ (Water extraction)

นำผงใบบวบกที่ผ่านการบดและร่อนผ่านตะแกรงไปเติมน้ำให้ได้อัตราส่วน 1:20 (ผงใบบวบกต่อน้ำ) แล้วให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส (Memmert, เยอรมัน) เป็นเวลา 60 นาที จากนั้นนำไปกรองแยกกากด้วยการกรองแบบสุญญากาศผ่านผ้ากรองไนลอนขนาด 50 เมช นำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total solid) และคำนวณปริมาณผลผลิตสารสกัด (Extracted yield) ตามสมการที่ 1 วิเคราะห์สารประกอบฟีนอลิก (Total phenolic content) ปริมาณความเข้มข้นของสารสกัดที่มีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH ได้ร้อยละ 50 (IC_{50}) และฤทธิ์ทางชีวภาพในการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี FRAP

$$\text{ปริมาณผลผลิตสารสกัด (ร้อยละ)} = \frac{\text{ปริมาณของแข็งที่ได้จากการสกัด (กรัมแห้ง)} \times 100}{\text{ปริมาณวัตถุดิบเริ่มต้น (กรัมแห้ง)}} \quad (1)$$

2.2.2 การสกัดด้วยเอนไซม์ (Enzyme extraction)

นำผงใบบวบกที่ผ่านการบดและร่อนผ่านตะแกรงไปเติมน้ำให้ได้อัตราส่วน 1:20 (ผงใบบวบกต่อน้ำ) แล้วปรับพีเอชให้ได้ 5.0 ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1.0 โมลาร์ และเติมเอนไซม์เซลลูเลสชนิด Viscozyme L ปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก แล้วนำไปย่อยที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส (Memmert, เยอรมัน) อัตราการเขย่า 100 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 60 นาที จากนั้นนำไปกรองแยกกากด้วยการกรองแบบสุญญากาศผ่านผ้ากรองไนลอนขนาด 50 เมช นำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total solid) และคำนวณปริมาณผลผลิตสารสกัด (Extracted yield) ตามสมการที่ 1 วิเคราะห์สารประกอบฟีนอลิก (Total phenolic content) ปริมาณความเข้มข้นของสารสกัดที่มีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH ได้ร้อยละ 50 (IC_{50}) และฤทธิ์ทางชีวภาพในการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี FRAP

2.2.3 การสกัดด้วยเอทานอล (Ethanol extraction)

นำผงใบบวบกที่ผ่านการบดและร่อนผ่านตะแกรงไปเติมเอทานอลร้อยละ 95 ให้ได้อัตราส่วน 1:20 (ผงใบบวบกต่อเอทานอล) แล้วแช่ไว้ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (อุณหภูมิห้อง) เป็นเวลา 60 นาที จากนั้นนำไปกรองแยกกากด้วยการกรองแบบสุญญากาศผ่านผ้ากรองไนลอนขนาด 50 เมช นำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total solid) และคำนวณปริมาณผลผลิตสารสกัด (Extracted yield) ตามสมการที่ 1 วิเคราะห์สารประกอบฟีนอลิก (Total phenolic content) ปริมาณความเข้มข้นของสารสกัดที่มีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH ได้ร้อยละ 50 (IC_{50}) และฤทธิ์ทางชีวภาพในการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี FRAP

2.3 การวิเคราะห์

2.3.1 การวิเคราะห์ปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total solid; TS)

ทำการอบครุชีเบิ้ลอะลูมิเนียมที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส (Memmert, เยอรมัน) เป็นเวลา 3 ชั่วโมง หรือจนกว่าน้ำหนักจะคงที่ ซึ่งน้ำหนักครุชีเบิ้ลอะลูมิเนียม (W1) จากนั้นดูดสารละลายที่ได้จากการสกัดใบบวบกปริมาณ 10.0 มิลลิลิตร ใส่ลงในครุชีเบิ้ลอะลูมิเนียมข้างต้น นำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส (Memmert, เยอรมัน) เป็นเวลา 16 ชั่วโมง หรือจนกว่าน้ำหนักจะคงที่ แล้วชั่งน้ำหนัก (W2) คำนวณปริมาณของแข็งทั้งหมดออกมาในรูปร้อยละ โดยน้ำหนักต่อปริมาตร (% w/v) ตามสมการที่ 2

$$\text{ปริมาณของแข็งทั้งหมด (ร้อยละ)} = \frac{(W2 - W1) \times 100}{\text{ปริมาตรสารสกัด (มิลลิลิตร)}} \quad (2)$$

2.3.2 การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิก (Total phenolic content; TPC)

วิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิก (Total phenolic contents) ด้วยวิธี Folin-Ciocalteu reagent โดยประยุกต์จากงานวิจัยของ Thamnarathip และคณะ [18] ทำการเจือจางตัวอย่างสารสกัดใบบวบกด้วยน้ำกลั่นให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมแล้วดูดสารละลายตัวอย่างปริมาณ 0.5 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดลอง เติมสารละลาย Folin-Ciocalteu ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยปริมาตรต่อปริมาตร ปริมาณ 0.5 มิลลิลิตร และเติมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต (Sodium carbonate) ความเข้มข้นร้อยละ 7.0 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ปริมาณ 1.5 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันแล้วนำไปบ่มที่อุณหภูมิห้องในที่มืดเป็นเวลา 30 นาที นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 760 นาโนเมตร (SPECORD®200 PLUS, เยอรมัน) โดยใช้ น้ำกลั่นเป็น Blank และใช้สารละลายกรดแกลลิก (Gallic acid) ความเข้มข้น 0.01 - 0.05 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร เป็นสารมาตรฐาน ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดรายงานในรูปของมิลลิกรัมของกรดแกลลิกต่อกรัมสารสกัด (mg Gallic Acid Equivalent, mg GAE/g)

2.3.3 การวิเคราะห์ความสามารถในการกำจัดอนุมูลอิสระ (DPPH radical scavenging assay)

วิเคราะห์ความสามารถในการกำจัดอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH radical scavenging assay โดยประยุกต์จากงานวิจัยของ Chen และคณะ [19] ทำการเจือจางตัวอย่างสารสกัดใบบวบกด้วยน้ำกลั่นให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมประมาณ 0.02 - 0.30 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตรแล้ว นำไปศึกษาความสามารถในการกำจัดอนุมูลอิสระโดยการดูดสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ (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 (SPECORD®200 PLUS, เยอรมัน) โดยใช้สารละลายบัฟเฟอร์เป็น Blank คำนวณความสามารถในการกำจัดอนุมูลอิสระ (ร้อยละ) ในแต่ละความเข้มข้นของสารละลายตัวอย่าง ตามสมการที่ 3 จากนั้นหาปริมาณความเข้มข้นของสารละลายตัวอย่าง (ในหน่วยมิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร) ที่สามารถกำจัดอนุมูลอิสระ DPPH ได้ร้อยละ 50 (IC₅₀)

$$\text{ความสามารถในการกำจัดอนุมูลอิสระ (ร้อยละ)} = \frac{(\text{Abs (DPPH)} - \text{Abs (sample)}) \times 100}{\text{Abs (DPPH)}} \quad (3)$$

โดย Abs (DPPH) เป็นค่าการดูดกลืนแสงของ DPPH ผสมกับบัฟเฟอร์ และ Abs (sample) เป็นค่าการดูดกลืนแสงของ DPPH ผสมกับตัวอย่าง

2.3.4 ความสามารถในการรีดิวซ์เฟอร์ริก (Ferric reducing antioxidant power; FRAP)

การวิเคราะห์ความสามารถในการรีดิวซ์เฟอร์ริก (FRAP) ประยุกต์จาก Thamnarathip และคณะ [18] ทำการเจือจางตัวอย่าง (สารสกัดจากใบบัวบก) ให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมแล้วดูดสารละลายตัวอย่างปริมาณ 100 ไมโครลิตร ใส่ในหลอดทดลอง จากนั้นเติมสารละลาย FRAP ปริมาณ 3,000 ไมโครลิตร บ่มที่อุณหภูมิห้องในที่มืดเป็นเวลา 30 นาที แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 593 นาโนเมตร (SPECORD®200 PLUS, เยอรมัน) โดยใช้น้ำกลั่นเป็น Blank และใช้สารละลาย $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ความเข้มข้น 100 - 1400 ไมโครโมลาร์ เป็นสารมาตรฐาน คำนวณผลที่ได้ให้แสดงออกมาในรูปไมโครโมล Fe^{2+} ต่อกรัม ($\mu\text{mol Fe}^{2+}/\text{g}$) สำหรับสารละลาย FRAP ให้เตรียมเมื่อต้องการใช้โดยการผสมสารละลาย Acetate buffer (300 mM, pH 3.6) กับสารละลาย TPTZ (10 mM) และสารละลาย $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (20 mM) ในอัตราส่วน 10:1:1 โดยปริมาตร จากนั้นนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ก่อนนำไปใช้

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)

ในการศึกษาผลของวิธีการสกัด (การสกัดด้วยน้ำ การสกัดด้วยเอทานอล และการสกัดด้วยเอทานอล) และสายพันธุ์บัวบก (สายพันธุ์นครปฐม สายพันธุ์ระยอง และสายพันธุ์อุบลราชธานี) ต่อปริมาณผลผลิต สารประกอบฟีนอลิก และฤทธิ์ทางชีวภาพในการต้านอนุมูลอิสระ บัวบกทั้ง 3 สายพันธุ์ จะถูกนำมาล้างทำความสะอาด อบ บด และร่อนผ่านตะแกรงขนาด 30 เมช (0.60 มิลลิเมตร) ก่อนนำไปสกัดสารสำคัญ การสกัดด้วยน้ำจะใช้อัตราส่วนผงบัวบกต่อน้ำ 1:20 และต้มที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที การสกัดด้วยเอทานอลจะใช้อัตราส่วนผงบัวบกต่อน้ำ 1:20 ย่อยด้วยเอทานอลเกรด Viscozyme L ปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ที่พีเอช 5.0 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที การสกัดด้วยเอทานอลจะใช้อัตราส่วนผงบัวบกต่อเอทานอล 1:20 แช่ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที จากการศึกษาพบว่าวิธีการสกัดมีผลต่อปริมาณผลผลิต ปริมาณสารประกอบฟีนอลิก และฤทธิ์ทางชีวภาพในการต้านอนุมูลอิสระ (รูปที่ 1 - 4) วิธีการสกัดด้วยเอทานอลจะให้ปริมาณผลผลิต ($37.91 \pm 2.23 - 48.39 \pm 0.46\%$, w/w) สูงกว่าการสกัดด้วยน้ำ ($31.22 \pm 0.30 - 35.94 \pm 0.54\%$, w/w) และการสกัดด้วยเอทานอล ($11.09 \pm 0.90 - 15.12 \pm 0.32\%$, w/w) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) (รูปที่ 1) ทั้งนี้เพราะในการสกัดด้วยเอทานอลจะใช้เอทานอลเกรด Viscozyme L ซึ่งเป็นเอทานอลเชิงซ้อนประกอบด้วยเอทานอลหลายชนิด เช่น เซลลูโลส อะราบินอส เพคตินัส เพนโตซาน และไซลาลิน เป็นต้น โดยเอทานอลเกรดและไซลาลินสามารถย่อยเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสที่เป็นโครงสร้างหลักของผนังเซลล์พืช [12] เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสเมื่อถูกย่อยจะละลายน้ำและกลายเป็นส่วนหนึ่งของสารสกัด นอกจากนั้นเมื่อโครงสร้างของผนังเซลล์พืชถูกทำลายจะทำให้โครงสร้างอื่น ๆ ที่สามารถละลายน้ำได้ เช่น คาร์โบไฮเดรต (แป้งที่ละลายได้ในน้ำร้อน น้ำตาล และเส้นใยอาหารละลายน้ำ) โปรตีน เกลือ รวมถึงสารสำคัญที่มีฤทธิ์ทางชีวภาพ เช่น สารประกอบฟีนอลิก เบต้าแคโรทีน และวิตามิน เป็นต้น จะละลายน้ำและถูกสกัดออกมาได้เพิ่มขึ้นและกลายเป็นส่วนหนึ่งของสารสกัดด้วยเช่นเดียวกัน ส่งผลให้การสกัดด้วยเอทานอลได้ปริมาณผลผลิตสารสกัดสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการสกัดด้วยน้ำและการสกัดด้วยเอทานอล สำหรับการสกัดด้วยน้ำจะให้ผลผลิตสารสกัดต่ำกว่าการสกัดด้วยเอทานอล แต่สูงกว่าการสกัดด้วยเอทานอล ทั้งนี้เพราะองค์ประกอบของเซลล์พืชโดยส่วนใหญ่ เช่น คาร์โบไฮเดรต (แป้ง น้ำตาล และเส้นใยอาหารละลายน้ำ) โปรตีน เกลือ รวมถึงสารสำคัญที่มีฤทธิ์ทางชีวภาพบางชนิดจะละลายน้ำได้ดีกว่าละลายในเอทานอล นอกจากนั้นการสกัดด้วยน้ำในครั้งนี้จะใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส ความร้อนสามารถช่วยเพิ่มการละลายขององค์ประกอบต่าง ๆ และสามารถ

ทำลายผนังเซลล์พืชได้บางส่วน ส่งผลให้องค์ประกอบของเซลล์พืชถูกสกัดออกมาได้มากขึ้น อย่างไรก็ตาม การใช้ความร้อนในระดับอุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส ไม่สามารถทำลายผนังเซลล์พืชโดยเฉพาะโครงสร้างของเซลล์ลูโลสและเฮมิเซลล์ลูโลสได้เท่ากับการใช้เอนไซม์ ทำให้การสกัดด้วยน้ำให้ผลผลิตต่ำกว่าการสกัดด้วยเอนไซม์ ส่วนการสกัดด้วยเอทานอลจะให้ผลผลิตต่ำสุดและต่ำกว่าการสกัดด้วยเอนไซม์และการสกัดด้วยน้ำมากกว่า 2 เท่าตัว สอดคล้องกับการศึกษาของ Binh และ Oanh [12] ซึ่งพบว่าการสกัดด้วยเอนไซม์ Viscozyme จะให้ผลผลิตสูงกว่าการสกัดด้วยเอทานอล 2 เท่า ทั้งนี้เพราะในเซลล์พืชมีองค์ประกอบจำนวนน้อยที่สามารถละลายในเอทานอลได้ดี เช่น ไขมัน สารสี และสารสำคัญที่มีฤทธิ์ทางชีวภาพบางชนิด เป็นต้น นอกจากนั้นในการสกัดครั้งนี้ใช้เอทานอลที่มีความเข้มข้นร้อยละ 95 และแช่ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (อุณหภูมิห้อง) โดยจากการศึกษาของ Rahman และคณะ [4] ระบุว่าเอทานอลความเข้มข้นสูงมีความสามารถในการสกัดสารจากพืชได้ต่ำกว่าเอทานอลความเข้มข้นต่ำและน้ำ ในระหว่างการสกัดตัวทำละลายจะแพร่เข้าไปในวัตถุดิบและละลายสารที่มีลักษณะความเป็นขี้เหมือนกัน น้ำมีความเป็นขี้สูงกว่าเอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 100 (Absolute ethanol) จึงละลายองค์ประกอบของเซลล์พืชได้มากกว่า อีกทั้งการสกัดด้วยเอทานอลในครั้งนี้จะแช่ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ซึ่งจะละลายองค์ประกอบของเซลล์พืชได้ต่ำกว่าการใช้อุณหภูมิ 50 และ 95 องศาเซลเซียส นี่จึงเป็นเหตุผลให้การสกัดด้วยเอทานอลได้ผลผลิตต่ำสุด

แต่อย่างไรก็ตาม การสกัดด้วยน้ำและการสกัดด้วยเอทานอลจะให้สารสกัดที่มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิก (27.40 ± 0.77 - 36.02 ± 0.51 และ 26.22 ± 0.51 - 36.84 ± 0.56 mg GAE/g) สูงกว่าการสกัดด้วยเอนไซม์ (13.29 ± 0.64 - 18.01 ± 0.37 mg GAE/g) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) (รูปที่ 2) ทั้งนี้เพราะสารประกอบฟีนอลิก เช่น โพลีฟีนอล ฟลาโวนอยด์ และแทนนิน เป็นต้น สามารถละลายได้ดีทั้งในน้ำและเอทานอล [4] นอกจากนี้ในการสกัดด้วยน้ำจะใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส ความร้อนจะช่วยเพิ่มการละลายหรือการสกัดสารประกอบฟีนอลิกได้เพิ่มขึ้นด้วย ทำให้ในการสกัดที่ได้จากการสกัดด้วยน้ำมีสารประกอบฟีนอลิกสูง ส่วนการสกัดด้วยเอทานอลเนื่องจากมีองค์ประกอบของเซลล์พืชที่ละลายในเอทานอลได้น้อยแต่สารประกอบฟีนอลิกยังคงละลายได้ดีในเอทานอล ทำให้การสกัดด้วยเอทานอลได้สารสกัดที่มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกสูงแต่มีผลผลิตสารสกัดต่ำ (รูปที่ 1) สำหรับการสกัดด้วยเอนไซม์จะใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส สารประกอบฟีนอลิกละลายได้น้อยกว่าที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส นอกจากนั้นการสกัดด้วยเอนไซม์จะมีองค์ประกอบอื่น ๆ โดยเฉพาะองค์ประกอบที่เกิดจากการย่อยของเอนไซม์เซลล์ลูโลสและเฮมิเซลล์ลูโลสทำให้สารสกัดที่ได้มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกต่ำ อย่างไรก็ตาม เมื่อคำนวณปริมาณผลผลิตของสารประกอบฟีนอลิกเทียบกับปริมาณวัตถุดิบเริ่มต้นที่ใช้พบว่าการสกัดด้วยน้ำจะให้ผลผลิตสารประกอบฟีนอลิกสูงสุด (8.64 ± 0.33 - 12.95 ± 0.25 mg GAE/g) ตามด้วยการสกัดด้วยเอนไซม์ (5.66 ± 0.32 - 8.71 ± 0.19 mg GAE/g) และการสกัดด้วยเอทานอล (3.04 ± 0.25 - 5.29 ± 0.28 mg GAE/g) ตามลำดับ ดังนั้นในการศึกษานี้บ่งบอกได้ว่าการสกัดด้วยน้ำมีประสิทธิภาพในการสกัดสารประกอบฟีนอลิกจากบัวบกมากกว่าการสกัดด้วยเอนไซม์และเอทานอลเพราะให้ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกสูงและผลผลิตสูง ในการศึกษาครั้งนี้มีแนวโน้มสอดคล้องกับการศึกษาของ Riza และคณะ [10] ระบุว่า การสกัดด้วยน้ำจะให้สารสกัดที่มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิก (251.88 ± 0.96 mg GAE/g) สูงกว่าการสกัดด้วยเอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 70 (172.43 ± 0.98 mg GAE/g) และการสกัดด้วยเมทานอล (95.77 ± 0.95 mg GAE/g) และการศึกษาของ Rahman และคณะ [4] ซึ่งพบว่าการสกัดด้วยน้ำให้โพลีฟีนอลและฟลาโวนอยด์สูงกว่าการสกัดด้วยเอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 100 อย่างไรก็ตาม การศึกษาครั้งนี้จะให้ผลแตกต่างจากการศึกษาอื่น ๆ ในหลายงานวิจัยเมื่อใช้เอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 50 ในการสกัด ซึ่งจะให้สารประกอบฟีนอลิกสูงกว่าการสกัดด้วยน้ำ เช่น จากการศึกษาของ Rahmawati และคณะ [2] พบว่าการสกัดด้วยเอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 50 จะให้ปริมาณสารประกอบฟีนอลิก (52.128 mg GAE/g) สูงกว่าการสกัดด้วยน้ำ (45.654 mg GAE/g) การศึกษาของ Kandasamy และคณะ [7] พบว่าการสกัดด้วยเอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 50 จะให้ปริมาณสารประกอบฟีนอลิก (106.2 ± 7.5 mg GAE/g) สูงกว่าการสกัดด้วยน้ำ (34.4 ± 1.1 mg GAE/g) และการศึกษาของ Rahman และคณะ [4] พบว่าการสกัดด้วยเอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 50 จะให้ปริมาณสารโพลีฟีนอลและฟลาโวนอยด์สูงกว่าการสกัดด้วยน้ำ ทั้งนี้เพราะระดับความเป็น

ตัวของสารประกอบฟีนอลิกแต่ละชนิดมีความแตกต่างจึงละลายได้ดีในตัวทำละลายที่แตกต่างกัน เช่น สารโพลีฟีนอลและฟลาโวนอยด์ละลายในสารที่มีความเป็นขั้วสูง เช่น น้ำ ได้ดีกว่าสารที่มีความเป็นขั้วต่ำ เช่น เอทานอล แต่จะละลายในสารที่มีความเป็นขั้วปานกลาง เช่น เอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 50 ได้สูงสุด ส่วนแทนนินจะละลายได้ดีในสารที่มีความเป็นขั้วต่ำ เช่น เอทานอล [4] นอกจากนี้ในการศึกษาแต่ละงานวิจัยใช้ตัวบ่งชี้ต่างสายพันธุ์ทำให้มีองค์ประกอบและชนิดของสารประกอบฟีนอลิกแตกต่างกัน สารประกอบฟีนอลิกเป็นสารสำคัญที่มีความสามารถเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ทำให้สารประกอบฟีนอลิกมีความสามารถในการเป็นตัวรีดิวซ์ (Reducing agents) ตัวให้ไฮโดรเจน (Hydrogen donors) ตัวยับยั้งการทำงานของออกซิเจนเดี่ยว (Singlet oxygen quenchers) และตัวจับประจุโลหะ (Metal chelators) [4] หรือเป็นสารที่มีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ [10] โดยกลไกการต้านอนุมูลอิสระของสารประกอบฟีนอลิกเริ่มต้นจากแยกตัวออกมาเป็นไอออนประจุลบ (Anion) และโปรตอน (Proton) หลังจากนั้นจึงทำปฏิกิริยากับสารอนุมูลอิสระเกิดเป็นสารประกอบของอนุมูลอิสระกับฟีนอล สารสกัดที่มีสารประกอบฟีนอลิกสูงจึงมีแนวโน้มที่มีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระสูงด้วย [4]

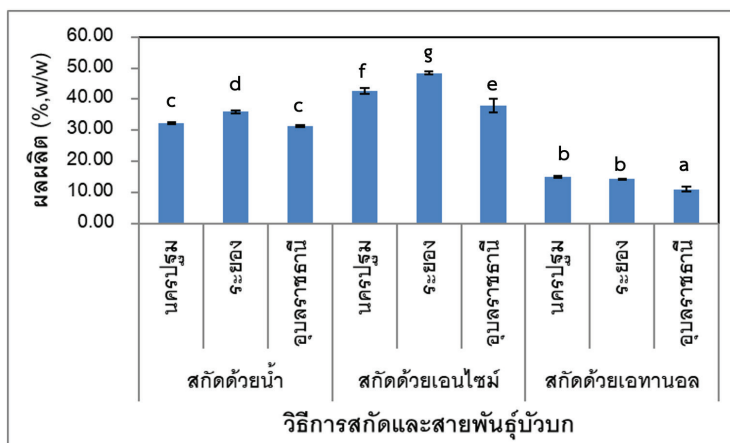
การสกัดด้วยน้ำและการสกัดด้วยเอทานอลนอกจากจะให้สารสกัดที่มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกสูงกว่าการสกัดด้วยเฮกซะแล้ว ยังให้ฤทธิ์ทางชีวภาพในการต้านอนุมูลอิสระสูงกว่าด้วย จากการวิเคราะห์ฤทธิ์ทางชีวภาพในการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธีการวัดปริมาณความเข้มข้นของสารสกัดที่มีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH ได้ร้อยละ 50 หรือ IC_{50} ผลแสดงในรูปที่ 3 โดยสารสกัดที่มีค่า IC_{50} ต่ำกว่าจะมีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระสูงกว่าเนื่องจากใช้ปริมาณสารสกัดที่ความเข้มข้นต่ำกว่าในการยับยั้งอนุมูลอิสระได้ร้อยละ 50 จากรูปที่ 3 จะเห็นได้ว่าสารสกัดที่ได้จากการสกัดด้วยน้ำและการสกัดด้วยเอทานอลจะให้ค่า IC_{50} (0.16 - 0.27 mg/mL และ 0.24 - 0.30 mg/mL) ต่ำกว่าสารสกัดที่ได้จากการสกัดด้วยเฮกซะ (0.35 - 0.63 mg/mL) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) นั้นหมายความว่าสารสกัดที่ได้จากการสกัดด้วยน้ำและการสกัดด้วยเอทานอลมีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระสูงกว่าสารสกัดที่ได้จากการสกัดด้วยเฮกซะ และในบวบกบางสายพันธุ์ (สายพันธุ์นครปฐมและสายพันธุ์ระยอง) สารสกัดที่ได้จากการสกัดด้วยน้ำมีค่า IC_{50} (0.16 - 0.24 mg/mL) ต่ำกว่าการสกัดด้วยเอทานอล (0.24 - 0.30 mg/mL) บ่งบอกได้ว่าการสกัดด้วยน้ำเป็นวิธีการสกัดที่ให้สารสกัดที่มีฤทธิ์ทางชีวภาพในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH ดีกว่าการสกัดด้วยเอทานอลและเฮกซะ ในการศึกษาครั้งนี้สอดคล้องกับการศึกษาของ Riza และคณะ [10] ระบุว่า การสกัดด้วยน้ำจะให้สารสกัดที่มีฤทธิ์ทางชีวภาพในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH (IC_{50} เท่ากับ $24.09 \pm 0.01 \mu\text{g/mL}$) สูงกว่าการสกัดด้วยเอทานอลร้อยละ 70 (IC_{50} เท่ากับ $54.22 \pm 0.27 \mu\text{g/mL}$) และการสกัดด้วยเมทานอล (IC_{50} เท่ากับ $113.91 \pm 0.01 \mu\text{g/mL}$) และการศึกษาของ Rahman และคณะ [4] ซึ่งพบว่าสารสกัดที่ได้จากการสกัดด้วยน้ำมีฤทธิ์ทางชีวภาพในการต้านอนุมูลอิสระ (IC_{50} เท่ากับ $10.23 \pm 1.20 \mu\text{g/mL}$) สูงกว่าการสกัดด้วยเอทานอลร้อยละ 100 (IC_{50} เท่ากับ $35.56 \pm 1.24 \mu\text{g/mL}$) นอกจากนี้จากการศึกษาประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดด้วยวิธีการรีดิวซ์เฟอร์ริก (FRAP) จะให้ผลในลักษณะเช่นเดียวกับการต้านอนุมูลอิสระ DPPH โดยสารสกัดที่ได้จากการสกัดด้วยน้ำและการสกัดด้วยเอทานอลมีความสามารถในการรีดิวซ์เฟอร์ริก ($510.38 \pm 2.43 - 727.38 \pm 27.47$ และ $613.95 \pm 54.03 - 768.66 \pm 1.97 \mu\text{mol Fe}^{2+}/\text{g}$) สูงกว่าการสกัดด้วยเฮกซะ ($229.89 \pm 11.49 - 396.55 \pm 29.18 \mu\text{mol Fe}^{2+}/\text{g}$) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) อย่างไรก็ตามสารสกัดที่ได้จากการสกัดด้วยเอทานอลมีแนวโน้มมีความสามารถในการรีดิวซ์เฟอร์ริก (FRAP) สูงกว่าสารสกัดที่ได้จากการสกัดด้วยน้ำโดยเฉพาะการสกัดบวบกสายพันธุ์นครปฐม (รูปที่ 4) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะสารสกัดที่ได้จากการสกัดด้วยเอทานอลมีชนิดสารสำคัญแตกต่างจากสารสกัดที่ได้จากการสกัดด้วยน้ำทำให้มีฤทธิ์ทางชีวภาพในการต้านอนุมูลอิสระแตกต่างกัน สารสกัดที่ได้จากการสกัดด้วยน้ำมีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH ได้ดีกว่าสารสกัดที่ได้จากการสกัดด้วยเอทานอล ส่วนสารสกัดที่ได้จากการสกัดด้วยเอทานอลมีความสามารถในการรีดิวซ์เฟอร์ริก (FRAP) ได้ดีกว่าสารสกัดที่ได้จากการสกัดด้วยน้ำ โดยความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH จะเป็นการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธีการให้ H^+ กับสารอนุมูลอิสระ DPPH ดังนั้นสารที่มีความสามารถในการให้ H^+ จะมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH ได้ดี ส่วนความสามารถในการรีดิวซ์เฟอร์ริก (FRAP) จะเป็นการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธีการรีดิวซ์ Fe^{3+} เป็น Fe^{2+} ดังนั้นสาร

มีความสามารถในการให้ e^- ได้ดีจะมีความสามารถในการรีดิวซ์ฟอริก (FRAP) ได้ดี สารสำคัญที่มีฤทธิ์ทางชีวภาพในการต้านอนุมูลอิสระของบัวบกนอกจากจะมีสารประกอบฟีนอลิกแล้วยังมีสารกลุ่มอื่น ๆ ด้วย เช่น เอเซียติโคไซด์ เมดิแคสโซไซด์ กรดเอเซียติก และกรดเมดิแคสซิก เบต้าแคโรทีน และวิตามินซี เป็นต้น [1,4,6] น้ำและเอทานอลมีความเป็นขั้วต่างกัน จึงสกัดได้สารสำคัญแตกต่างกันเพราะสารสำคัญแต่ละชนิดจะมีความจำเพาะต่อความเป็นขั้วของตัวทำละลาย เช่น โพลีฟีนอลและฟลาโวนอยด์จะถูกสกัดได้ดีด้วยสารที่มีขั้วปานกลาง เช่น เอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 50 แทนนินและเบต้าแคโรทีนจะถูกสกัดได้ดีด้วยสารที่มีขั้วต่ำ เช่น เอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 100 ส่วนวิตามินซีจะถูกสกัดได้ดีด้วยสารทั้งสองชนิดทั้งที่มีขั้วสูงและขั้วต่ำ [4] ดังนั้น จากการศึกษาวิธีการสกัดสารสำคัญจากบัวบกในครั้งนี้นี้สามารถสรุปได้ว่าการสกัดด้วยน้ำเป็นวิธีการสกัดที่ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการสกัดด้วยเอโนไซม์และการสกัดด้วยเอทานอล เนื่องจากการสกัดด้วยน้ำเป็นวิธีการสกัดที่ให้ผลผลิตสูง อีกทั้งสารสกัดที่ได้มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกและฤทธิ์ทางชีวภาพในการต้านอนุมูลอิสระสูง นอกจากนั้นวิธีการสกัดด้วยน้ำเป็นวิธีการที่ใช้ต้นทุนต่ำและเป็นวิธีที่ได้สารสกัดที่เหมาะสมต่อการนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัตถุดิบอาหาร

สายพันธุ์บัวบก (*C. asiatica*) มีผลต่อปริมาณผลผลิต ปริมาณสารประกอบฟีนอลิก และฤทธิ์ทางชีวภาพในการต้านอนุมูลอิสระ (รูปที่ 1-4) บัวบกสายพันธุ์ระยองจะให้ผลผลิตสูงกว่าสายพันธุ์นครปฐมและสายพันธุ์อุบลราชธานีเมื่อสกัดด้วยน้ำและเอโนไซม์ แต่ไม่แตกต่างจากสายพันธุ์นครปฐมเมื่อใช้วิธีการสกัดด้วยเอทานอล (รูปที่ 1) บัวบกสายพันธุ์ระยองจะให้สารสกัดที่มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกสูงกว่าสายพันธุ์นครปฐมและสายพันธุ์อุบลราชธานีเมื่อสกัดด้วยน้ำและเอทานอลแต่ไม่แตกต่างจากสายพันธุ์อุบลราชธานีเมื่อสกัดด้วยเอโนไซม์ (รูปที่ 2) บัวบกสายพันธุ์ระยองจะให้สารสกัดที่มีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH และ FRAP สูงกว่าสายพันธุ์นครปฐมและสายพันธุ์อุบลราชธานีเมื่อสกัดด้วยน้ำและเอโนไซม์ (รูปที่ 3-4) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะบัวบกแต่ละสายพันธุ์มีองค์ประกอบทางเคมี เช่น คาร์โบไฮเดรต (แป้ง น้ำตาล และเส้นใยอาหารละลายน้ำ) โปรตีน ไขมัน รวมถึงสารสำคัญที่มีฤทธิ์ทางชีวภาพ เช่น สารประกอบฟีนอลิก เบต้าแคโรทีน และวิตามิน เป็นต้น แตกต่างกัน บัวบกสายพันธุ์ระยองอาจจะมีองค์ประกอบทางเคมีที่สามารถละลายน้ำได้สูงกว่าบัวบกสายพันธุ์นครปฐมและสายพันธุ์อุบลราชธานี แต่มีองค์ประกอบที่สามารถละลายในเอทานอลได้ใกล้เคียงกับสายพันธุ์นครปฐม การศึกษาครั้งนี้สอดคล้องกับการศึกษาของประนอม ใจอ้าย [16] ซึ่งพบว่าสายพันธุ์ระยองจะให้สารเอเซียติโคไซด์ (Asiaticoside) สูงสุด รองลงมาคือ สายพันธุ์พะเยา สายพันธุ์ราชบุรี สายพันธุ์ตรวด สายพันธุ์เชียงราย สายพันธุ์เพชรบุรี สายพันธุ์จันทบุรี สายพันธุ์นครปฐม และสายพันธุ์เลย ตามลำดับ ดังนั้นจากการศึกษาสายพันธุ์บัวบกในครั้งนี้นี้สามารถสรุปได้ว่าบัวบกสายพันธุ์ระยองเป็นสายพันธุ์บัวบกที่ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับสายพันธุ์นครปฐมและสายพันธุ์อุบลราชธานี เนื่องจากบัวบกสายพันธุ์ระยองให้ปริมาณผลผลิต ปริมาณสารประกอบฟีนอลิก และฤทธิ์ทางชีวภาพในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH และ FRAP สูงสุด

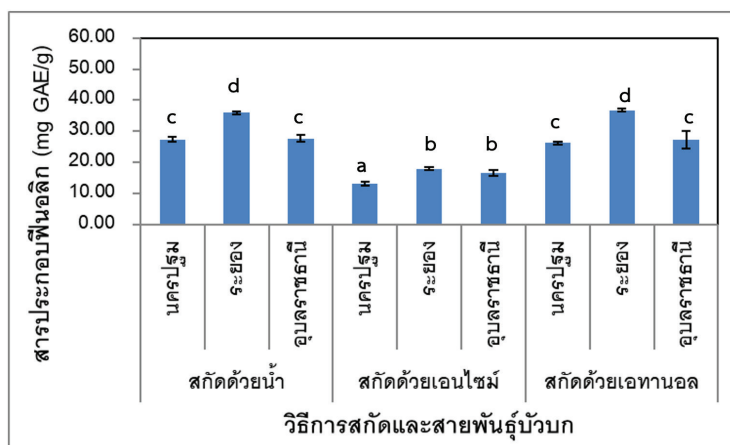
จากการศึกษาในครั้งนี้นี้สามารถสรุปได้ว่า การสกัดด้วยน้ำ และบัวบกสายพันธุ์ระยอง เป็นวิธีการสกัดและสายพันธุ์บัวบกที่ดีที่สุดสำหรับการสกัดสารสำคัญ วิธีการนี้จะให้ผลผลิต $35.94 \pm 0.54\%$ (w/w) สารสกัดมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิก 36.02 ± 0.51 mg GAE/g ปริมาณความเข้มข้นที่มีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH ได้ร้อยละ 50 หรือ IC_{50} เท่ากับ 0.16 ± 0.01 mg/mL และความสามารถในการรีดิวซ์ (FRAP) เท่ากับ 727.38 ± 27.47 $\mu\text{mol Fe}^{2+}/\text{g}$ โดยปริมาณผลผลิตที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้จะต่ำกว่าการศึกษาของ Kandasamy และคณะ [7] ที่ให้ปริมาณผลผลิต $60.1 \pm 1.12\%$ สารสกัดที่ได้มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกสูงกว่าการศึกษาของ Pittella และคณะ [20] ซึ่งให้สารประกอบฟีนอลิก 26.6 mg GAE/g ใกล้เคียงกับการศึกษาของ Kandasamy และคณะ [7] ซึ่งให้สารประกอบฟีนอลิก 34.4 ± 1.1 mg GAE/g แต่ต่ำกว่าจากการศึกษาของ Riza และคณะ [10] และ Rahmawati และคณะ [2] ที่ให้ปริมาณสารประกอบฟีนอลิก 251.88 ± 0.96 และ 45.654 mg GAE/g ตามลำดับ มีฤทธิ์ทางชีวภาพในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH ต่ำกว่าการศึกษาของ Riza และคณะ [10], Rahman และคณะ [4], Pittella และคณะ [20] และ Kandasamy และคณะ [7] ทั้งนี้อาจเป็นเพราะหลายปัจจัย สายพันธุ์บัวบกซึ่งบัวบกแต่ละสายพันธุ์มีองค์ประกอบทางเคมีและสารสำคัญที่มีฤทธิ์ทางชีวภาพต่างกัน [5,21] การเตรียมวัตถุดิบซึ่งการศึกษาของ Kandasamy และคณะ [7] ระบุว่าเตรียมวัตถุดิบด้วยวิธีการทำแห้ง

แบบแช่เยือกแข็ง (Freeze drying) จะให้ผลผลิตและฤทธิ์ทางชีวภาพดีกว่าการอบด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ระยะเวลาการสกัดโดยในการสกัดโดยส่วนใหญ่จะใช้ระยะเวลาในการสกัดนาน เช่น จากการศึกษาของ Riza และคณะ [10], Pittella และคณะ [20] และ Kandasamy และคณะ [7] ซึ่งใช้ระยะเวลาในการสกัดประมาณ 24 ถึง 48 ชั่วโมง ทั้งนี้ประสิทธิภาพในการสกัดสารสำคัญจากพืชนอกจากจะขึ้นอยู่กับวิธีการสกัดและสายพันธุ์บัวบกแล้วยังมีปัจจัยอื่น ๆ เช่น ระยะเวลาการเก็บเกี่ยว การเตรียมวัตถุดิบ Kandasamy และคณะ [7] ปริมาณวัตถุดิบที่ใช้ในการสกัด อุณหภูมิ ระยะเวลา ขนาดวัตถุดิบ [8] เป็นต้น นอกจากนั้นยังมีเทคนิคอื่น ๆ เช่น การใช้คลื่นไมโครเวฟ การใช้คลื่นอัลตราซาวด์ การใช้ความดันสูง เป็นต้น [2,13-15]



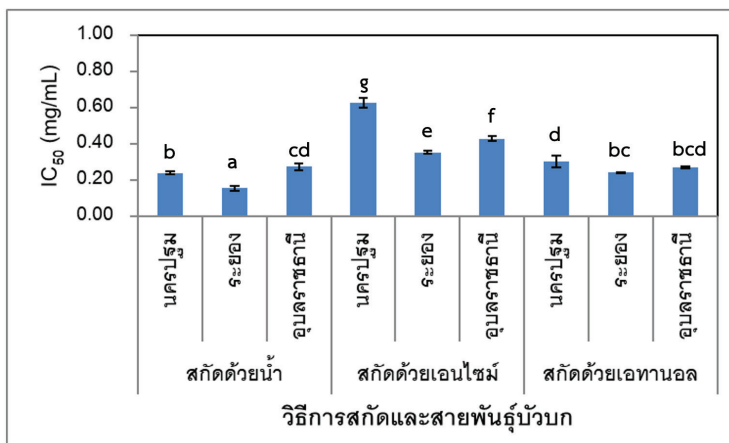
รูปที่ 1 ปริมาณผลผลิต (%Yield) ของสารสกัดที่ได้จากการสกัดบัวบกสายพันธุ์นครปฐม สายพันธุ์ระยอง และสายพันธุ์อุบลราชธานี ด้วยวิธีการสกัดด้วยน้ำ การสกัดด้วยเอโนไซม์ และการสกัดด้วยเอทานอล

หมายเหตุ : a, b และ c.... แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ของผลผลิตที่ได้จากการสกัดบัวบกแต่ละสายพันธุ์ด้วยวิธีการต่าง ๆ



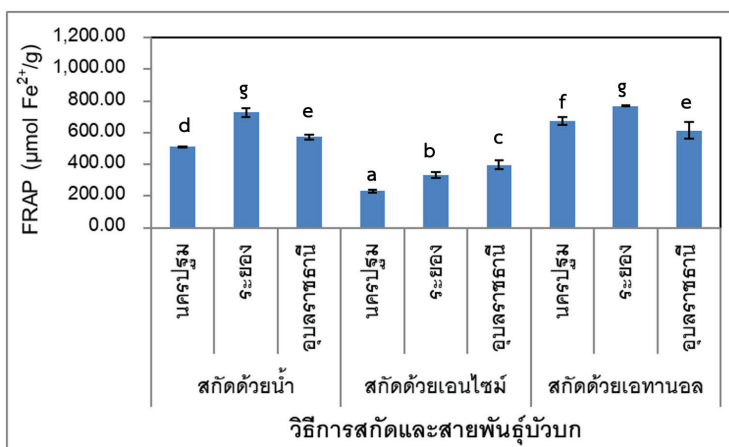
รูปที่ 2 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิก (TPC) ของสารสกัดที่ได้จากการสกัดบัวบกสายพันธุ์นครปฐม สายพันธุ์ระยอง และสายพันธุ์อุบลราชธานี ด้วยวิธีการสกัดด้วยน้ำ การสกัดด้วยเอโนไซม์ และการสกัดด้วยเอทานอล

หมายเหตุ : a, b และ c.... แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ของปริมาณสารประกอบฟีนอลิกที่ได้จากการสกัดบัวบกแต่ละสายพันธุ์ด้วยวิธีการต่าง ๆ



รูปที่ 3 ปริมาณความเข้มข้นสารสกัดที่สามารถต้านอนุมูลอิสระ DPPH ได้ร้อยละ 50 (IC₅₀) ของสารสกัดที่ได้จากการสกัดบวบก สายพันธุ์นครปฐม สายพันธุ์ระยอง และสายพันธุ์อุบลราชธานี ด้วยวิธีการสกัดด้วยน้ำ การสกัดด้วยเอทานอล และการสกัดด้วยเอทานอล

หมายเหตุ : a, b และ c.... แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ของปริมาณ IC₅₀ ที่ได้จากการสกัดบวบกแต่ละสายพันธุ์ ด้วยวิธีการต่าง ๆ



รูปที่ 4 ความสามารถในการรีดิวส์เฟอร์ริก (FRAP) ของสารสกัดที่ได้จากการสกัดบวบกสายพันธุ์นครปฐม สายพันธุ์ระยอง และสายพันธุ์อุบลราชธานี ด้วยวิธีการสกัดด้วยน้ำ การสกัดด้วยเอทานอล และการสกัดด้วยเอทานอล

หมายเหตุ : a, b และ c.... แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ของปริมาณ FRAP ที่ได้จากการสกัดบวบกแต่ละสายพันธุ์ ด้วยวิธีการต่าง ๆ

4. สรุปผลการทดลอง (Conclusion)

วิธีการสกัดและสายพันธุ์บัวบกมีผลต่อปริมาณผลผลิต สารประกอบฟีนอลิก และฤทธิ์ทางชีวภาพในการต้านอนุมูลอิสระ การสกัดด้วยเอทานอลจะให้ปริมาณผลผลิตสูงสุดตามด้วยการสกัดด้วยน้ำและการสกัดด้วยเอทานอล ตามลำดับ แต่การสกัดด้วยน้ำและการสกัดด้วยเอทานอลจะให้สารสกัดที่มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกและฤทธิ์ทางชีวภาพในการต้านอนุมูลอิสระสูงกว่าการสกัดด้วยเอทานอล บัวบกสายพันธุ์ระยองให้ปริมาณผลผลิต สารประกอบฟีนอลิก และฤทธิ์ทางชีวภาพในการต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดสูงกว่าบัวบกสายพันธุ์นครปฐมและสายพันธุ์อุบลราชธานี วิธีการสกัดและสายพันธุ์บัวบกที่ดีที่สุด คือ การสกัดด้วยน้ำ และบัวบกสายพันธุ์ระยอง ตามลำดับ วิธีการนี้จะให้ผลผลิตสารสกัดร้อยละ 35.94 ± 0.54 โดยน้ำหนัก เป็นสารสกัดที่มีสารสำคัญและฤทธิ์ทางชีวภาพในการต้านอนุมูลอิสระ นอกจากนั้นเป็นสารสกัดที่ละลายน้ำได้มีโอกาสสามารถนำไปพัฒนาเป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์อาหารและเครื่องดื่ม

5. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณศูนย์เชี่ยวชาญนวัตกรรมอาหารสุขภาพ (ศนอ.) สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) ที่กรุณาเอื้อเพื่อให้ใช้สถานที่สำหรับการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] Idris FN, Nadzir MM. Comparative studies on different extraction methods of *Centella asiatica* and extracts bioactive compounds effect on antimicrobial activity. *Antibiotics*. 2021;10(4):457.
- [2] Rahmawati A, Fachri BA, Safitri RA. Comparison of extraction solvents used for the extraction of total phenolic content from pegagan (*Centella asiatica* L) using microwave-assisted extraction. *AIP Conf Proc*. 2022;2493(1):1-9.
- [3] Yasurin P, Sriariyanun M, Phusantisampan T. The bioavailability activity of *Centella asiatica*. *KMUTNB Int J Appl Sci Technol*. 2016;9(1):1-9.
- [4] Rahman M, Hossain S, Rahaman A, Fatima N, Nahar T, Uddin B, et al. Antioxidant activity of *Centella asiatica* (Linn.) Urban: Impact of extraction solvent polarity. *J Pharmacogn Phytochem*. 2013;1(6):27-32.
- [5] จันทพร ทองเอกแก้ว. บัวบก: สมุนไพรมากคุณประโยชน์. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี*. 2556;15(3):70-5.
- [6] จตุพร พลศรีดา. บัวบก. *จดหมายข่าว กลุ่มงานเภสัชกรรม โรงพยาบาลสมเด็จพระยุพราชสว่างดินแดน จังหวัดสกลนคร*. 2556;4(54):1.
- [7] Kandasamy A, Aruchamy K, Rangasamy P, Varadhaiyan D, Gowri C, Oh TH, et al. Phytochemical analysis and antioxidant activity of *Centella asiatica* extracts: An experimental and theoretical investigation of flavonoids. *Plants*. 2023;12(20):3547.
- [8] Borhan MZ, Ahmad R, Rusop M, Abdullah S. Green extraction: Enhanced extraction yield of asiatic acid from *Centella asiatica* (L.) nanopowders. *J Appl Chem*. 2013;(1):460168.
- [9] Mohapatra P, Ray A, Jena S, Nayak S, Mohanty S. Influence of extraction methods and solvent system on the chemical composition and antioxidant activity of *Centella asiatica* L. leaves. *Biocatal Agric Biotechnol*. 2021;33:101971.
- [10] Riza A, Ilyas S, Sjamsudin E, Delyuzar D. Effect of extraction method and solvent type on total phenolics content, total flavonoid and antioxidant activity of pegagan extract (*Centella asiatica* (Linn.) Urban). *Bioscientia Medicina: J Biomed Transl Res*. 2024;8(1):3873-81.

- [11] Wang CX, Han W, Fan L, Wang CL. Enzymatic pretreatment and microwave extraction of asiaticoside from *Centella asiatica*. J Biomed Sci Eng. 2009;2:526-31.
- [12] Binh NT, Oanh HN. Optimization of the treatment and extraction procedures for *Centella asiatica* (L.) Urban. Int J Pharm Sci Invest. 2017;6(6):15-21.
- [13] Rahmawati A, Fachri BA, Oktavia S, Abrori F. Extraction bioactive compound of pegagan (*Centella asiatica* L.) using solvent-free microwave-assisted extraction. International conference on chemical and material engineering. 2021;1053:1-7.
- [14] Thong-on W, Pathomwichaiwat T, Boonsith S, Koo-amornpattana W, Prathanturug S. Green extraction optimization of triterpenoid glycoside-enriched extract from *Centella asiatica* (L.) Urban using response surface methodology (RSM). Sci Rep. 2021;11(1):22026.
- [15] Kim WJ, Kim J, Veriansyah B, Kim JD, Lee YW, Oh SG, et al. Extraction of bioactive components from *Centella asiatica* using subcritical water. J Supercritical Fluids. 2009;48(3):211-6.
- [16] ประพนธ์ ใจอ้าย. รายงานการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตบัวบก. กรุงเทพฯ: กรมวิชาการเกษตร; 2556.
- [17] Bakar INA, Ibrahim MF, Hakiman M, Abd-Aziz S, Prasongsuk S, Tin LCY, et al. Characterization of asiaticoside concentration, total phenolic compounds, and antioxidant activity of different varieties of *Centella asiatica* (L.) and essential oil extraction using hydro-distillation with enzyme assisted. Biocatal Agric Biotechnol. 2022;44:102474.
- [18] Thamnarathip P, Jangchud K, Nitisinprasert S, Vardhanabhuti B. Identification of peptide molecular weight from rice bran protein hydrolysate with high antioxidant activity. J Cereal Sci. 2016;69:329-35.
- [19] 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.
- [20] Pittella F, Dutra RC, Junior DD, Lopes MTP, Barbosa NR. Antioxidant and cytotoxic activities of *Centella asiatica* (L) Urb. Int J Mol Sci. 2009;10(9):3713-21.
- [21] Ogunka-Nnoka CU, Igwe FU, Agwu J, Peter OJ, Wolugbom PH. Nutrient and phytochemical composition of *Centella asiatica* leaves. Med Aromat Plants. 2020;9(2):1-7.

การประกันคุณภาพการผลิตและทดสอบประสิทธิภาพ เจลแอลกอฮอล์เพื่อสุขอนามัยสำหรับมือ

Quality assurance for the production and performance testing of alcohol gel for hand sanitizers

นุศรา ยินยอม¹, ศิริวรรณ วิชัย²
Nusara Yinyom¹, Siriwan Wichai²

รับบทความ 14 มกราคม 2568 แก้ไขบทความ 30 พฤษภาคม 2568 ยอมรับตีพิมพ์ 30 พฤษภาคม 2568

บทคัดย่อ

ผลิตภัณฑ์ที่มีแอลกอฮอล์เป็นส่วนประกอบเพื่อสุขอนามัยสำหรับมือที่มีปริมาณแอลกอฮอล์ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 65 โดยน้ำหนัก มีความต้องการเพิ่มมากขึ้นจนถึงปัจจุบัน แต่พบปัญหาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ไม่คงที่ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประกันคุณภาพการผลิตเจลแอลกอฮอล์และทดสอบประสิทธิภาพเครื่องมือวัดปริมาณแอลกอฮอล์ในสถานประกอบการ ผลการศึกษาพบว่าการควบคุมจุดวิกฤต 2 จุด โดยจุดที่ 1 เป็นการตรวจสอบคุณภาพวัตถุดิบหลัก ได้แก่ แอลกอฮอล์ แพลงสภาพ สารก่อเจล และน้ำบริสุทธิ์ จากเอกสารรับรองผลการวิเคราะห์เพื่อให้แน่ใจว่าสอดคล้องกับเกณฑ์ยอมรับ จุดที่ 2 การวัดปริมาณแอลกอฮอล์ของผลิตภัณฑ์ก่อนการบรรจุด้วยไฮโดรมิเตอร์วัดแอลกอฮอล์ที่มีความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 1.25 โดยต้องเตรียมตัวอย่างเจลด้วย 5M HCl ก่อนการวัด จุดควบคุมอื่นคือการควบคุมความแม่นยำและความเที่ยงของเครื่องชั่ง ความสะอาดและความเป็นกลางของเครื่องแก้วและอุปกรณ์บั่นผสม โดยกระบวนการทั้งหมดสามารถทวนสอบย้อนกลับได้ผ่านระบบบันทึกข้อมูลแบบดิจิทัลโดยใช้โปรแกรมตารางคำนวณ เช่น Microsoft Excel เพื่อรองรับความสามารถในการทำซ้ำของกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีความคงตัว ค่าพีเอช 5.8 ปริมาณเอทานอลเท่ากับร้อยละ 77 โดยปริมาตร สามารถลดปริมาณเชื้อมาตรฐานในเวลาสัมผัสเชื้อ 1 นาที ได้ค่า log reduction ≥ 5 ดังนั้น การประกันคุณภาพการผลิตเจลแอลกอฮอล์ตามกระบวนการดังกล่าวสามารถยืนยันประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์ได้ตามกฎหมาย

คำสำคัญ: เอทานอล, เครื่องสำอาง, เครื่องวัดแอลกอฮอล์, จุดวิกฤต

¹กลุ่มงานวิเคราะห์ชีวภาพ ฝ่ายมาตรวิทยาเคมีและชีวภาพ สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ, อำเภอคลองหลวง ปทุมธานี 12120 ประเทศไทย

²ภาควิชาจุลชีววิทยาและปรสิตวิทยา คณะวิทยาศาสตร์การแพทย์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อำเภอเมือง พิษณุโลก 65000 ประเทศไทย

Abstract

The demand for alcohol-based hand sanitizers containing at least 65% alcohol by weight has increased. However, the quality of these products has often been inconsistent. This research aims to ensure the quality of alcohol gel production and to test the efficiency of alcohol measurement devices in the factory. Two critical control points (CCPs) have been identified. The first critical control point (CCP1) involved verifying the quality of the main raw materials - denatured alcohol, gelling agents, and pure water by utilizing the certificate of analysis results to ensure compliance with acceptance criteria. The second critical control point (CCP2) was to measure the alcohol content before packaging using an alcohol hydrometer with an accuracy of no more than 1.25%. This measurement required a sample prepared with 5M hydrochloric acid (HCl). Additional control points include the accuracy and precision of the balances, as well as the cleanliness and neutrality of the glassware and mixing equipment. All processes were traceable via a digital data recording system, implemented using spreadsheet software (e.g. Microsoft Excel), to ensure reproducibility. The final product could be stable, with a pH of 5.8 and an ethanol content of 77% by volume. The product was considered bactericidal effective when log reduction (lg R) of the reference bacterial amount after one minute contact time was ≥ 5 . This quality assurance process in alcohol gel production ensures compliance with legal standards and guarantees product effectiveness.

Keywords: Ethanol, Cosmetics, Alcohol meter, Critical control point

¹Bio Analysis group, Chemical Metrology & Biometry Department, National Institute of Metrology (Thailand), Klong Luang, Pathumthani 12120 Thailand

²Department of Microbiology and Faculty of Medical Science, Naresuan University, Phitsanulok, 65000 Thailand

*Corresponding author e-mail address: siriwanwichai@nu.ac.th

1. บทนำ (Introduction)

สถานการณ์แพร่ระบาดของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 (COVID-19) มีสาเหตุมาจากการติดเชื้อไวรัส SARS-CoV-2 ได้ระบาดอย่างรวดเร็วไปทั่วโลก รวมทั้งในประเทศไทย ศูนย์ควบคุมโรคของสหรัฐอเมริกา (Center of Disease Control: CDC) แนะนำให้เลือกใช้แอลกอฮอล์เพื่อสุขอนามัยสำหรับมือที่มีความเข้มข้นของแอลกอฮอล์อย่างน้อยร้อยละ 60 - 95 โดยปริมาตร [1] มีรายงานการศึกษาคุณภาพของเครื่องสำอางที่มีส่วนผสมของแอลกอฮอล์เพื่อสุขอนามัยสำหรับมือที่ได้รับบริจาคในสถานการณ์ระบาดของเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 เป็นการศึกษาเชิงปริมาณย้อนหลังระหว่างวันที่ 1 มิถุนายน ถึง 30 พฤศจิกายน 2563 พบว่า กลุ่มตัวอย่างผ่านมาตรฐาน ร้อยละ 47.62 ไม่ผ่านมาตรฐาน ร้อยละ 36.90 โดยพบตัวอย่างที่มีความเข้มข้นของเอทิลแอลกอฮอล์น้อยกว่าร้อยละ 70 โดยปริมาตร ร้อยละ 33.33 พบเมทิลแอลกอฮอล์ซึ่งเป็นสารที่ห้ามใช้ในเครื่องสำอางเป็นส่วนประกอบ ร้อยละ 3.57 [2] และจากรายงานของศูนย์ทดสอบฉลาดซื้อ ที่ได้สุ่มเก็บตัวอย่างผลิตภัณฑ์แอลกอฮอล์ล้างมือและนำส่งตรวจวิเคราะห์ความเข้มข้นของแอลกอฮอล์ตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข เรื่อง กำหนดลักษณะของเครื่องสำอางที่มีส่วนผสมของแอลกอฮอล์เพื่อสุขอนามัยสำหรับมือ ที่ห้ามผลิต นำเข้า หรือขาย พ.ศ. 2563 กำหนดให้เครื่องสำอางที่มีส่วนผสมของแอลกอฮอล์ที่มีวัตถุประสงค์เพื่อทำความสะอาดมือโดยไม่ใช้น้ำ ที่มีความเข้มข้นของแอลกอฮอล์ต่ำกว่าร้อยละ 70 โดยปริมาตร เป็นเครื่องสำอางที่ห้ามผลิต นำเข้า หรือจำหน่าย [3] ผลการวิเคราะห์พบว่าผลิตภัณฑ์แอลกอฮอล์ทำความสะอาดมือที่ผ่านมาตรฐาน ที่มีความเข้มข้นของแอลกอฮอล์ตั้งแต่น้อยกว่าร้อยละ 70 ขึ้นไป จำนวน 13 ตัวอย่าง (ประมาณร้อยละ 33) และไม่ผ่านมาตรฐาน 26 ตัวอย่าง (ประมาณร้อยละ 67) นอกจากนี้ยังพบ 1 ตัวอย่าง มีส่วนผสมของเมทานอล (Methanol) หรือ เมทิลแอลกอฮอล์ (Methyl alcohol) ซึ่งเป็นแอลกอฮอล์ชนิดห้ามใช้ในการผลิตเครื่องสำอางอีกด้วย [4] การตรวจพบผลิตภัณฑ์เจลแอลกอฮอล์ที่ไม่ผ่านมาตรฐานดังกล่าวส่วนหนึ่งมาจากกระบวนการผลิตที่ไม่มีการควบคุมคุณภาพ

การประกันคุณภาพการผลิตเจลแอลกอฮอล์

กระบวนการผลิตเจลแอลกอฮอล์ให้มีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโดยใช้หลักการบริหารงานคุณภาพและการวิเคราะห์จุดวิกฤตและเฝ้าระวังเป็นการควบคุมคุณภาพในแต่ละขั้นตอนการผลิต โดยทั่วไปเจลแอลกอฮอล์มีส่วนประกอบของปริมาณเอทานอลไม่น้อยกว่าร้อยละ 70 สารที่สร้างเนื้อเจล เช่น คาร์โบเมอร์ สารให้ความชุ่มชื้นลดการแห้งของผิว เช่น สารสกัดว่านหางจระเข้ และกลีเซอรอล ตลอดจนสีและกลิ่น โดยมีกระบวนการผลิตเริ่มต้นด้วยการตรวจสอบคุณภาพวัตถุดิบ การควบคุมคุณภาพเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องในกระบวนการผลิต ควบคุมกระบวนการผลิตอย่างมีประสิทธิภาพ โดยการเฝ้าระวังจุดวิกฤต การทดสอบผลิตภัณฑ์ทั้งด้านกายภาพและเคมี ที่สำคัญคือการวัดปริมาณเอทานอลด้วยเครื่องมือวัดที่มีความถูกต้อง เชื่อถือได้ โดยกระบวนการทั้งหมดสามารถทวนสอบย้อนกลับได้ผ่านระบบการบันทึกข้อมูลแบบดิจิทัล โดยใช้โปรแกรมตารางคำนวณ Microsoft Excel

วัตถุดิบในการผลิตเจลแอลกอฮอล์

เอทิลแอลกอฮอล์และไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ สามารถฆ่าเชื้อแบคทีเรียแกรมบวกและลบ รวมทั้งเชื้อราและไวรัส เอทานอลจะขับน้ำออกจากเซลล์จุลินทรีย์ แล้วเซลล์จะดูดซึมแอลกอฮอล์เข้าไป ทำให้เกิดการละลายไขมันที่อยู่ในเยื่อหุ้มเซลล์ ส่งผลให้เยื่อหุ้มเซลล์ถูกทำลายและโปรตีนเสียสภาพอย่างรวดเร็ว เป็นการรบกวนเมตาบอลิซึมของเซลล์จนกระทั่งจุลินทรีย์ถูกทำลายในที่สุด เอทานอลที่ความเข้มข้นร้อยละ 70 สามารถแพร่ผ่านเยื่อหุ้มเซลล์จุลินทรีย์ได้ดี ไม่ระเหยเร็วเกินไปและมีปริมาณน้ำเพียงพอที่จุลินทรีย์จะดูดซึมเข้าไปเพื่อทำลายเซลล์ ขณะที่แอลกอฮอล์ร้อยละ 95 จะระเหยเร็วเกินไปและมีปริมาณน้ำไม่เพียงพอที่จะดูดซึมเข้าเยื่อหุ้มเซลล์ ในทางกลับกันหากมีความเข้มข้นของแอลกอฮอล์น้อยเกินไปจะทำให้ประสิทธิภาพในการทำลายจุลินทรีย์ลดน้อยลง ประสิทธิภาพในการทำละลายเชื้อได้ดีเมื่อมีความเข้มข้นร้อยละ 60 - 90 โดยปริมาตร และประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อจะลดลงอย่างชัดเจนเมื่อความเข้มข้นต่ำกว่าร้อยละ 50 โดยปริมาตร [5]

แอลกอฮอล์แปลงสภาพที่ใช้ในการผลิตเจลแอลกอฮอล์ จากองค์การสุราที่ได้แปลงสภาพแอลกอฮอล์เป็นสูตรต่างๆ ตามวัตถุประสงค์การนำไปใช้ทางด้านเภสัชกรรม อาหาร อุตสาหกรรม และเชื้อเพลิง โดยการควบคุมคุณภาพตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.640-2553 [6] และในประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6460 (พ.ศ. 2564) กำหนดมาตรฐาน

ผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ผลิตภัณฑ์ที่มีส่วนผสมของแอลกอฮอล์เพื่อสุชนอนามัยสำหรับมือ [7] นอกจากนั้นกรมสรรพสามิตได้ออกประกาศให้ใช้สุราสามทับแปลงสภาพสำหรับผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดมือที่มีแอลกอฮอล์เป็นส่วนประกอบ ซึ่งในการแปลงสภาพกำหนดให้ใช้สารต่าง ๆ กัน ได้แก่ Isopropyl alcohol, Tertiary butyl alcohol, Bitrex, Glycerol/Glycerin [8] นอกจากนั้นมีแอลกอฮอล์แปลงสภาพบางส่วนมาจากโรงงานอื่นที่ไม่ใช่ของการสุราหรือนำเข้าจากต่างประเทศ เมื่อแหล่งของวัตถุดิบต่างกัน หรือวัตถุดิบแหล่งเดียวกันแต่ต่างสูตร ส่งผลให้ได้วัตถุดิบมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันในแต่ละรอบการผลิต แนวทางการแก้ปัญหาคือกำหนดวิธีปฏิบัติในการตรวจสอบคุณภาพแอลกอฮอล์แปลงสภาพโดยการตรวจสอบเอกสารรายงานผลวิเคราะห์คุณภาพ (Certification of analysis) และอาจจำเป็นต้องขอข้อมูลจากผู้ผลิตเพิ่มเติมในกรณีที่มีข้อมูลที่ได้มาไม่สมบูรณ์

สารก่อเจล เป็นสารกลุ่ม Carbomer ซึ่งเป็นสารก่อเจลสังเคราะห์ (Synthetic gelling agent) สังเคราะห์จากการตกตะกอนในกระบวนการ Polymerization ในตัวทำละลาย Benzene หรืออาจสังเคราะห์ในลักษณะ Benzene-free process แบ่งออกเป็นหลายเกรดจากหลายผู้ผลิต เช่น Carbomer copolymer, Carbomer homopolymer และ Carbomer interpolpolymer [9] จึงมีคุณสมบัติต่างกัน นอกจากนั้นพบว่าสารชนิดเดียวกัน เกรดเดียวกัน ต่างกันที่ประเทศผู้ผลิต จะมีคุณสมบัติแตกต่างกัน แนวทางการแก้ปัญหา คือ กำหนดวิธีปฏิบัติในการตรวจสอบคุณภาพของ Carbomer โดยการตรวจสอบเอกสารรายงานผลวิเคราะห์คุณภาพ

น้ำบริสุทธิ์ที่ใช้ในกระบวนการผลิตได้ตามมาตรฐานน้ำดื่มของประเทศไทย [10] มีพีเอชเป็นกลาง ช่วยปรับความเป็นเจลของผลิตภัณฑ์และทำให้ค่าพีเอชของเจลแอลกอฮอล์ได้ตามมาตรฐานที่กำหนด ส่วนวัตถุดิบอื่น ๆ เช่น สารให้ความชุ่มชื้นลดการแห้งของผิว สี และกลิ่น ต้องตรวจสอบเอกสารจากผู้ผลิตเช่นเดียวกันและบันทึกเป็นเอกสารที่ทวนสอบได้

เครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆที่เกี่ยวข้องในกระบวนการผลิต

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตเจลแอลกอฮอล์ได้แก่ เครื่องชั่ง เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง อุปกรณ์ในการบ่มผสม เครื่องแก้ว ต้องมีประสิทธิภาพก่อนการใช้งาน โดยการทดสอบความแม่นยำและความเที่ยงของเครื่องชั่งและเครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง นอกจากนั้นการตรวจสอบความสะอาดและมีพีเอชเป็นกลางของอุปกรณ์ในการบ่มผสมและเครื่องแก้วเป็นสิ่งที่สำคัญเช่นเดียวกัน การตรวจสอบทั้งหมดต้องบันทึกเป็นเอกสารที่ทวนสอบได้ในทุกรอบการผลิต

การตรวจสอบทางกายภาพและเคมีของผลิตภัณฑ์

การตรวจสอบลักษณะทางกายภาพและเคมีของผลิตภัณฑ์ก่อนการบรรจุและบันทึกรายละเอียดของผลิตภัณฑ์สุดท้ายได้แก่ ความหนืด ลักษณะของเนื้อเจล สี กลิ่น การกระจายตัวบนผิวหนัง ความใส พีเอช และการประเมินความคงตัวทางกายภาพ ด้วยเทคนิค Freeze-thaw cycling ที่อุณหภูมิ 50 °C และ 4 °C [11] แล้วสังเกตลักษณะการตกตะกอน การหดตัวหรือการไหล ข้อมูลทั้งหมดต้องบันทึกเป็นเอกสารที่ทวนสอบได้

การทดสอบปริมาณแอลกอฮอล์

ผลิตภัณฑ์เจลแอลกอฮอล์ต้องมีความเข้มข้นของแอลกอฮอล์ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 65 โดยน้ำหนัก หากผู้ผลิตสามารถดำเนินการทดสอบด้วยวิธีการที่เหมาะสม สะดวก รวดเร็ว และมีความถูกต้องเชื่อถือได้ โดยเลือกใช้เครื่องมือวัดในสถานประกอบการจะทำให้ควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์ได้ การวัดปริมาณเอทานอลที่เป็นสารละลายสามารถใช้เครื่องมือวัดได้หลากหลายชนิด เช่น Alcohol meter, Alcohol refractometer, Hydrometer เป็นต้น และมีความถูกต้องได้เมื่อใช้อย่างถูกวิธีและมีการทวนสอบอย่างเหมาะสมด้วยสารละลายเอทานอลมาตรฐาน นอกจากนั้น WHO (2010) [12] แนะนำว่าในกรณีที่เป็นของเหลว ผู้ประกอบการสามารถใช้เครื่องมือวัดดังกล่าวข้างต้นได้ แต่หากเป็นเจลแอลกอฮอล์นั้นไม่สามารถใช้ได้เนื่องจากเป็น Viscous mixture (เป็นส่วนผสมที่หนืดมาก) โดยทั่วไปการวัดปริมาณเอทานอลที่ถูกต้องที่สุดคือการใช้เครื่อง GC และ HPLC ซึ่งต้องผ่านการเตรียมตัวอย่างหลายขั้นตอนจึงจะสามารถวัดด้วยเครื่อง GC และ HPLC ได้ อย่างไรก็ตามมีรายงานวิธีการวัดปริมาณเอทานอลในเจลแอลกอฮอล์ที่มีประสิทธิภาพและรวดเร็ว โดยการเตรียมตัวอย่างด้วย Ultrasonic bath หรือกลไกการคั่นตัวของสารก่อเจลด้วยการปรับพีเอช ก่อนนำไปวิเคราะห์ด้วย GC-FID [13] พบว่าวิธีการเตรียมตัวอย่างดังกล่าวทำให้ได้ตัวอย่างที่มีความเป็นเนื้อเดียวกันและนำไปวิเคราะห์ต่อได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงประยุกต์ใช้วิธีการคั่นตัวของสารก่อเจล

ในการเตรียมตัวอย่างเจลแอลกอฮอล์ ก่อนนำไปวัดด้วยเครื่องมือวัดที่มีจำหน่ายทั่วไป ได้แก่ ไฮโดรมิเตอร์สำหรับวัดแอลกอฮอล์ เป็นต้น และตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีการวัดที่พัฒนาขึ้นเทียบกับวิธีมาตรฐาน เมื่อได้วิธีการวัดที่มีประสิทธิภาพ ผู้ประกอบการจะสามารถการควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์เจลแอลกอฮอล์ให้มีปริมาณเอทานอลตามที่กฎหมายกำหนดได้อย่างรวดเร็ว มีค่าใช้จ่ายน้อยเมื่อเทียบกับการส่งตัวอย่างทดสอบที่ห้องปฏิบัติการทดสอบที่ต้องใช้เวลานานและมีค่าใช้จ่ายสูง กำหนดให้ทดสอบผลิตภัณฑ์ทุกรอบการผลิตและออกรายงานผลเบื้องต้น ซึ่งแอลกอฮอล์เข้มข้นร้อยละ 60 - 90 โดยปริมาตร เทียบเท่ากับแอลกอฮอล์ความเข้มข้นร้อยละ 52.1 - 85.8 โดยน้ำหนัก ดังนั้นความเข้มข้นของแอลกอฮอล์ที่มีประสิทธิภาพและถูกต้องสอดคล้องกับกฎหมายกำหนดต้องมีแอลกอฮอล์เข้มข้นร้อยละ 70 - 90 โดยปริมาตรซึ่งเทียบเท่ากับแอลกอฮอล์เข้มข้นร้อยละ 62.4 - 85.8 โดยน้ำหนัก [14] ข้อมูลที่ได้บันทึกเป็นเอกสารที่ทวนสอบได้

การทดสอบประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อของผลิตภัณฑ์เจลแอลกอฮอล์ล้างมือ

ประสิทธิภาพเชิงปริมาณในการฆ่าเชื้อแบคทีเรียของเจลทามืออ้างอิงวิธีมาตรฐาน European Standard EN 1276:2009 โดยการทดสอบกับแบคทีเรียสายพันธุ์มาตรฐาน ที่อุณหภูมิ 34 °C ในสภาวะที่มี Bovine Albumin Fraction V ในเวลาทดสอบ 1 นาที เชื้อมาตรฐาน 4 ชนิด ได้แก่ *Staphylococcus aureus* ATCC 6538, *Escherichia coli* ATCC 10536, *Enterococcus hirae* ATCC 10541 และ *Pseudomonas aeruginosa* ATCC 15442 ผลิตภัณฑ์ที่สามารถลดปริมาณเชื้อได้ในเวลาสัมผัสเชื้อ 1 นาที ต้องมีค่า log reduction ($\lg R$) ≥ 5 ตามประกาศสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา เรื่องวิธีการทดสอบและเกณฑ์ตัดสินผลการทดสอบประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์ที่มีแอลกอฮอล์เป็นส่วนประกอบเพื่อสุขอนามัยสำหรับมือ พ.ศ.2562 [15]

การจัดทำฐานข้อมูลของกระบวนการผลิต

การจัดทำฐานข้อมูลโดยใช้โปรแกรม Excel เพื่อให้สามารถทวนสอบผลิตภัณฑ์ในแต่ละรอบการผลิตที่แสดงถึงการควบคุมคุณภาพในทุกขั้นตอน ตั้งแต่การตรวจรับและทวนสอบคุณภาพวัตถุดิบ การทดสอบประสิทธิภาพเครื่องมือ ผลการทดสอบผลิตภัณฑ์เบื้องต้น ดังนั้นในแบบบันทึกการผลิตของแต่ละรอบการผลิต (Lot No.) สามารถเชื่อมโยงข้อมูลได้ครบถ้วน เป็นการประกันคุณภาพการผลิตเจลแอลกอฮอล์ได้อย่างสมบูรณ์

ดังนั้นการศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อประกันคุณภาพการผลิตเจลแอลกอฮอล์และทดสอบประสิทธิภาพเครื่องมือวัดปริมาณแอลกอฮอล์ในสถานประกอบการซึ่งจะเป็นแนวทางในการผลิตเจลแอลกอฮอล์ตามกฎหมายสำหรับผู้ประกอบการ

2. วิธีการวิจัย (Experimental methods)

2.1 ตัวอย่างเจลแอลกอฮอล์ สูตรการผลิต ขั้นตอนการผลิต

2.1.1 เจลแอลกอฮอล์ที่ผลิตโดยวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม จากสูตรที่ประกอบด้วยเอทิลแอลกอฮอล์ 95% ปริมาณ 80.00 กรัม คาร์โบเมอร์ 0.30 กรัม โพวพิลีนไกลคอล 0.50 กรัม สารสกัดว่านหางจระเข้ 0.50 กรัม ไตรเอทาโนลามีน 0.04 กรัม น้ำบริสุทธิ์ 18.66 กรัม

2.1.2 ขั้นตอนการผลิตดำเนินการตามวิธีใน Phase A, B, C และ D ตามลำดับดังนี้

Phase A ชั่งคาร์โบเมอร์แล้วโปรยลงในน้ำบริสุทธิ์

Phase B ชั่งเอทิลแอลกอฮอล์ เติมลงใน Phase A ปั่นผสมให้เข้ากัน

Phase C ชั่งสารสกัดว่านหางจระเข้ โพวพิลีนไกลคอล ปั่นผสมให้เข้ากัน

Phase D ชั่งไตรเอทาโนลามีน เติมลงไปในขณะที่ปั่น สารจะเข้มข้นขึ้นจนกลายเป็นเนื้อเจล

2.1.3 การบรรจุและชั่งน้ำหนัก

2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

2.2.1 เครื่องมือ ได้แก่ ไฮโดรมิเตอร์วัดแอลกอฮอล์ ช่วงร้อยละ 40 - 70 และร้อยละ 70 - 100 บริษัท Worldchemical Group เครื่อง Gas chromatography ยี่ห้อ SHIMADZU รุ่น Nexis GC2023 ตู้บ่มเชื้อ Contherm digital series เครื่องชั่ง Precisa S/N64641 เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง Mettler toledo รุ่น F20 เทอร์โมมิเตอร์ บริษัท Worldchemical group

ตู่มน้ำหนัก Mettler toledo class E2 และเครื่องปั่นผสม Mass product by: PESMIX

2.2.2 กระบอบกตวง บีกเกอร์ ขวดพลาสติก

2.3 สารเคมี

2.3.1 วัตถุติดป้ายละลายเดียวเช่นเดียวกับข้อ 2.1 และกรดไฮโดรคลอริก Bromothymol blue 0.04% สีย้อมอาหาร Brilliant BLUE FCF

2.4 วิธีดำเนินงาน

2.4.1 การวิเคราะห์กระบวนการผลิต กำหนดจุดวิกฤต เพื่อออกแบบระบบประกันคุณภาพการผลิตเจลแอลกอฮอล์ ประกอบด้วยขั้นตอนดังนี้

2.4.1.1 การตรวจสอบวัตถุดิบหลักจากเอกสารรับรองผลการวิเคราะห์โดยผู้ผลิตและกำหนดคุณลักษณะของวัตถุดิบและเกณฑ์การยอมรับของเอทานอล สารก่อเจล และน้ำบริสุทธิ์

2.4.1.2 การตรวจสอบประสิทธิภาพของเครื่องมือ เครื่องแก้ว และกำหนดวิธีปฏิบัติและเกณฑ์การยอมรับ

2.4.1.3 การควบคุมกระบวนการผลิตอย่างมีประสิทธิภาพ ตามลำดับขั้นตอนที่ชัดเจน

2.4.1.4 การประเมินคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ได้แก่ ความหนืด ความเป็นเจล พิเศษ และความคงตัว กำหนดวิธีปฏิบัติและเกณฑ์การยอมรับ

2.4.2 การผลิตตามกระบวนการประกันคุณภาพ โดยการกำหนดจุดวิกฤตที่ต้องควบคุมคุณภาพ 2 จุด ได้แก่ จุดที่ 1 วัตถุดิบ เป็นการตรวจสอบคุณภาพวัตถุดิบหลัก ได้แก่ แอลกอฮอล์แปลงสภาพ สารก่อเจล และน้ำบริสุทธิ์จากเอกสารรับรองผลการวิเคราะห์จากผู้ผลิต จุดที่ 2 การวัดปริมาณแอลกอฮอล์ของผลิตภัณฑ์ก่อนการบรรจุด้วยเครื่องมือวัดที่มีความคลาดเคลื่อนไม่เกินเกณฑ์ที่กำหนด และบันทึกลงในฐานข้อมูลโดยใช้โปรแกรม Excel เพื่อให้สามารถทวนสอบผลิตภัณฑ์ในแต่ละรอบการผลิตได้

2.4.3 การทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องมือวัดปริมาณแอลกอฮอล์ โดยการเตรียมตัวอย่างเจลตามวิธีที่อ้างอิงในเอกสาร Revista IPT | Tecnologia e Inovação (v.4, n.14, ago., 2020) [13] ด้วยการชั่งตัวอย่าง 10 กรัม เติมน้ำกลั่นให้มีปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน นำไปวัดด้วยไฮโดรมิเตอร์วัดแอลกอฮอล์ เปรียบเทียบกับการวัดด้วยเครื่อง GC: Flame ionization detector (FID) ยี่ห้อ SHIMADZU รุ่น Nexis GC-2030 ของสถานบริการวิชาการด้านวิทยาศาสตร์การแพทย์ คณะวิทยาศาสตร์การแพทย์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ตลอดจนเขียนวิธีปฏิบัติการทดสอบปริมาณเอทานอลในเจลแอลกอฮอล์

2.4.4 การทดสอบประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อ โดยห้องปฏิบัติการทดสอบเครื่องสำอางและเครื่องมือแพทย์ สำนักเครื่องสำอางและวัตถุอันตราย กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ กระทรวงสาธารณสุข

3. ผลและวิจารณ์ (Results and discussion)

3.1 การผลิตเจลแอลกอฮอล์ของวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม ตามสูตรที่ประกอบด้วยเอทิลแอลกอฮอล์ 95% ปริมาณ 80.00 กรัม คาร์โบเมอร์ 0.30 กรัม โพพิลีนไกลคอล 0.50 กรัม สารสกัดว่านหางจระเข้ 0.50 กรัม ไตรเอทาโนลามีน 0.04 กรัม น้ำบริสุทธิ์ 18.66 กรัม มีขั้นตอนการผลิตโดยการชั่งคาร์โบเมอร์แล้วโปรยลงในน้ำบริสุทธิ์เป็นวิธีที่ช่วยให้คาร์โบเมอร์ค่อย ๆ ละลายและพองตัวในน้ำ ทำให้กระจายตัวได้ดีและสม่ำเสมอจากนั้นเติมเอทิลแอลกอฮอล์ลงไป ปั่นผสมให้เข้ากัน ก่อนเติมสารสกัดว่านหางจระเข้ โพพิลีนไกลคอล ปั่นผสมให้เข้ากันและละลายเป็นเนื้อเดียวกันจากนั้นเติมไตรเอทาโนลามีนเพื่อให้สร้างเนื้อเจลในขั้นตอนสุดท้าย ทั้งนี้การผลิตด้วยกระบวนการดังกล่าวมีปัญหาหากไม่สามารถสกัดวัตถุดิบไว้มากพอเนื่องจากวัตถุดิบหลักที่สำคัญได้แก่เอทานอลและสารก่อเจลมาจากหลายแหล่งและมีคุณภาพต่างกัน

3.2 การผลิตเจลแอลกอฮอล์ตามกระบวนการประกันคุณภาพ โดยใช้หลักการบริหารงานคุณภาพและการวิเคราะห์จุดวิกฤตและเฝ้าระวัง เริ่มต้นด้วยการตรวจสอบคุณภาพวัตถุดิบหลัก กำหนดคุณภาพเครื่องมือและอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องในกระบวนการผลิต ควบคุมกระบวนการผลิตอย่างมีประสิทธิภาพโดยการเฝ้าระวังจุดวิกฤต และการทดสอบ

ผลิตภัณฑ์ โดยกระบวนการทั้งหมดต้องทวนสอบได้ในระบบฐานข้อมูลด้วยโปรแกรม Excel

3.2.1 การตรวจสอบเอกสารรับรองผลการวิเคราะห์โดยผู้ผลิต และเกณฑ์การยอมรับของเอทานอล สารก่อเจลงและน้ำบริสุทธิ์ ดังตารางที่ 1, 2 และ 3

ตารางที่ 1 กำหนดคุณลักษณะเฉพาะของเอทานอลที่ใช้งานทางด้านเภสัชกรรมและเกณฑ์การยอมรับ [6]

ที่	คุณลักษณะ	เกณฑ์การยอมรับ
1	ปริมาณเอทานอลที่ 20 °C % (v/v)	95.1 - 96.9
2	ความหนาแน่นสัมพัทธ์ (g/mL)	0.805 - 0.812
3	ความเป็นกรดหรือความเป็นด่าง (1) ความเป็นกรด ค่ามวลในรูปของ acetic acid mg/kg ไม่เกิน (2) ความเป็นด่าง	30 ไม่เป็นด่างต่อฟีนอล์ฟทาเลอิน
4	ค่าความดูดกลืนแสง (1) ที่ความยาวคลื่น 240 nm ไม่เกิน (2) ที่ความยาวคลื่น 250 - 260 nm ไม่เกิน (3) ที่ความยาวคลื่น 270 - 340 nm ไม่เกิน	0.40 0.30 0.10
5	สิ่งแปลกปลอมที่ระเหยได้ (1) methanol ml/kl ไม่เกิน (2) acetaldehyde ml/kl ไม่เกิน (3) benzene ml/kl ไม่เกิน (4) สิ่งแปลกปลอมอื่นทั้งหมดคำนวณในรูป 4-Methylpentan-2-ol ml/kl ไม่เกิน	200 10 2 300
6	ส่วนที่เหลือจากการระเหย mg/l ไม่เกิน	25

แอลกอฮอล์แปลงสภาพที่ใช้ในการผลิตเจลแอลกอฮอล์ได้จากองค์การสุราที่ได้แปลงสภาพแอลกอฮอล์เป็นสูตรการนำไปใช้ทางด้านเภสัชกรรม รวมทั้งกรมสรรพสามิตได้ออกประกาศให้ใช้สุราสามทับแปลงสภาพสำหรับนำมาผลิตผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดมือที่มีแอลกอฮอล์เป็นส่วนประกอบ และมีแอลกอฮอล์แปลงสภาพบางส่วนมาจากโรงงานอื่นที่ไม่ใช่องค์การสุรา ขั้นตอนนี้ต้องตรวจสอบเอกสารรายงานผลวิเคราะห์คุณภาพจากผู้ผลิต และกำหนดเกณฑ์การยอมรับดังตารางที่ 1 และอาจจำเป็นต้องขอข้อมูลจากผู้ขายเพิ่มเติมในกรณีที่ข้อมูลที่ได้มาไม่สมบูรณ์

ตารางที่ 2 เกณฑ์ยอมรับในการตรวจสอบวัตถุดิบสารก่อเจลง ซึ่งเป็นสารกลุ่ม Carbomer ซึ่งเป็นสารก่อเจลงสังเคราะห์ (Synthetic gelling agent) มีหลายเกรดจากหลายผู้ผลิต จึงมีคุณสมบัติต่างกัน นอกจากนั้นพบว่าสารชนิดเดียวกัน เกรดเดียวกัน ต่างกันที่ประเทศผลิต จะมีคุณสมบัติต่างกันด้วย ดังนั้นการตรวจสอบเอกสารรายงานผลวิเคราะห์คุณภาพจึงเป็นสิ่งจำเป็น และอาจจำเป็นต้องขอข้อมูลจากผู้ขายเพิ่มเติมในกรณีที่ข้อมูลที่ได้มาไม่สมบูรณ์

ตารางที่ 2 กำหนดคุณลักษณะเฉพาะของสารก่อเจลง Carbomer 940 และเกณฑ์การยอมรับ [9]

ที่	คุณลักษณะ	เกณฑ์การยอมรับ
1	Aqueous viscosity (mPa-s)	40,000 - 60,000
2	Loss on drying %	NMT 2.0 (not more than)
3	Heavy metal %	NMT 0.002 (not more than)
4	Benzene %	NMT 0.5 (not more than)

ตารางที่ 3 ลักษณะเฉพาะของน้ำบริสุทธิ์ในการผลิตเจลแอลกอฮอล์ สามารถใช้น้ำดื่มที่ได้รับการรับรองมาตรฐานน้ำดื่มและผลิตจากโรงงานที่ได้รับการยอมรับ ดังนั้นต้องขอข้อมูลการผลิตน้ำดื่มและการรับรองคุณภาพ ตลอดจนเก็บในภาชนะที่ปิดสนิท

ตารางที่ 3 กำหนดคุณลักษณะเฉพาะของน้ำบริสุทธิ์และเกณฑ์การยอมรับ [10]

ที่	คุณลักษณะ	เกณฑ์การยอมรับ
1	เป็นน้ำดื่มที่ผ่านกระบวนการ Reverse osmosis และฆ่าเชื้อโรคด้วย UV และ Ozone	ได้รับการรับรองมาตรฐานน้ำดื่ม
2	ค่าพีเอช	5.5 - 7.5
3	ค่า conductivity	<2 umhos/cm ที่ 25 °C
4	Total chlorine residue	<0.10 mg/l

3.2.2 การตรวจสอบประสิทธิภาพของเครื่องมือ เครื่องแก้ว กำหนดวิธีปฏิบัติและเกณฑ์การยอมรับ โดยเครื่องมือที่สำคัญได้แก่ เครื่องชั่ง และอุปกรณ์ปั่นผสม โดยเครื่องชั่งใช้วิธีการตรวจสอบความแม่นยำและความเที่ยงด้วยด้วยตุ้มน้ำหนักมาตรฐานที่ได้รับการสอบเทียบ ส่วนเครื่องแก้วและอุปกรณ์ปั่นผสมต้องล้างให้สะอาดและมีค่าพีเอชเป็นกลางหลังการล้าง

3.2.2.1 วิธีปฏิบัติในการตรวจสอบประสิทธิภาพเครื่องแก้วและอุปกรณ์ปั่นผสม

- (1) ล้างทำความสะอาดเครื่องแก้วและอุปกรณ์ปั่นผสมหลังการใช้งาน แล้วล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ 2 ครั้ง
- (2) ทดสอบความเป็นกรด-ด่าง โดยหยด Bromothymol blue 0.04% 2 - 3 หยดลงบนเครื่องแก้วที่ต้องการทดสอบ สังเกตสีของอินดิเคเตอร์ ถ้ามีสีเหลืองแสดงว่าเป็นกรด สีเขียวปนน้ำเงินแสดงว่าเป็นกลางและสีน้ำเงินแสดงว่าเป็นด่าง เครื่องแก้วและอุปกรณ์ในการปั่นผสมต้องมีความเป็นกลางหลังการล้างทุกครั้ง ถ้าพบว่ามีความเป็นกรดหรือเป็นด่างต้องล้างทำความสะอาดและล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์จนกระทั่งผลการทดสอบเป็นกลางจึงจะสามารถนำไปใช้ได้

3.2.3 การควบคุมกระบวนการผลิตอย่างมีประสิทธิภาพ และจุดวิกฤตที่ต้องควบคุม

- (1) ตรวจสอบคุณภาพวัตถุดิบให้สอดคล้องกับคุณลักษณะตามที่กำหนด ขั้นตอนนี้เป็นจุด CCP1
- (2) บันทึกข้อมูลของวัตถุดิบแต่ละชนิดลงในแบบบันทึกในตารางที่ 4
- (3) Phase A ชั่ง Carbopol 940 น้ำหนัก 0.30 กรัม ปรายลงในน้ำบริสุทธิ์ 18.66 กรัม ทิ้งไว้ 30 นาที จะกลายเป็นเจลเหลว ไม่เป็นก้อน
- (4) Phase B ตวงเอทานอลร้อยละ 95 ปริมาตร 80.00 กรัม เติมลงใน Phase A ปั่นผสมให้เข้ากัน
- (5) Phase C ชั่ง Aloe vera 0.50 กรัม Propylene glycol 0.50 กรัม และ สี Brilliant blue FCF 0.0001 กรัม เติม Phase C ลงไปในขณะปั่นที่ละลายการเพื่อให้กระจายตัวได้ดี
- (6) Phase D ชั่ง Triethanolamine (TEA) 0.04 กรัม เติมลงไปในเครื่องขณะปั่น สารจะเข้มข้นขึ้นจนกลายเป็นเนื้อเจล
- (7) ตรวจวัดปริมาณแอลกอฮอล์ของผลิตภัณฑ์เบื้องต้น ขั้นตอนนี้เป็นจุด CCP2 ต้องควบคุมให้มีปริมาณแอลกอฮอล์เท่ากับ ร้อยละ 70 ± 5 โดยปริมาตร รายละเอียดในข้อ 3.3
- (8) การบรรจุ ต้องบรรจุทันทีหรือไม่เกิน 1 ชั่วโมง

3.2.4 การประเมินคุณภาพของผลิตภัณฑ์เบื้องต้น ได้แก่ ความหนืด ความเป็นเจล พีเอช ความคงตัว และเกณฑ์การยอมรับ บันทึกผลลงในแบบบันทึกในตารางที่ 4

3.2.5 ฐานข้อมูลการทวนสอบผลิตภัณฑ์โดยใช้โปรแกรม Excel เพื่อให้สามารถทวนสอบผลิตภัณฑ์ในแต่ละรอบการผลิตที่แสดงถึงการควบคุมคุณภาพในทุกขั้นตอน ตั้งแต่การตรวจรับและทวนสอบคุณภาพวัตถุดิบ การทดสอบประสิทธิภาพเครื่องมือ ผลการประเมินคุณภาพผลิตภัณฑ์ สามารถเชื่อมโยงข้อมูลได้ครบถ้วนจึงเป็นการประกันคุณภาพการผลิตเจลแอลกอฮอล์ได้อย่างสมบูรณ์ในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 การจัดทำฐานข้อมูลทวนสอบผลิตภัณฑ์โดยใช้โปรแกรม Excel

Alcohol gel: MLN product		Lot No. 01		MFG Date: 26/08/2020		MFG By: BUNYAGORN		
Temperature: 25 °C								
QC Instruments: ☐ Balances ☐ Alcohol meter ☐ Glassware ☐ Homogenizer								
Raw materials:				Volume production: 10300 mL				
Phase	No.	Lot no.	Trade name	INCI	unit	%(w/v)	Require	Record
A	A1	A26	Water	Water (Siam brand)	g	18.66	1921.27	1923
	A2		Carbopol 940	Carbomer	g	0.30	30.90	30.93
B	B	2C080720	Alcohol 95%	Ethyl alcohol	g	80.00	8240.00	8240
C	C1	357842	Aloe vera	Aloe barbadense leaf juice	g	0.50	51.50	52
	C2	587422019	Propylene glycol	Propylene glycol	g	0.50	51.50	52
	C3	9040401	Colour	Brilliant blue FCF (INS No.133)	g	0.0001	0.0103	0.01
D	D	R014J7J20B	TEA	Triethanolamine	g	0.04	4.12	4.12
Quality check :								
ที่	คุณลักษณะ			เกณฑ์ยอมรับ		ผลการตรวจสอบ		
1	ความหนืด และเหนียว			หนืดแต่ไม่เหนียวเหนอะหนะ (มากกว่า 8,000 centipoise, cP)				
2	เนื้อเจล ความคงตัว การจับกันเป็นก้อน/ตกตะกอน การกระจายตัวบนผิวหนัง			ใส ไม่แยกชั้น ไม่จับกันเป็นก้อน/ไม่ตกตะกอน กระจายได้ดี				
3	สีและกลิ่น			ไม่มีการเปลี่ยนแปลง				
4	พีเอช			5 - 6				
5	ความคงตัวจาก Freeze-thaw cycling ที่อุณหภูมิ 50 °C และ 4 °C การตกตะกอนและการหดตัว			ไม่ตกตะกอน ไม่หดตัว				

3.3 การทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องวัดปริมาณแอลกอฮอล์ ด้วยไฮโดรมิเตอร์วัดแอลกอฮอล์ที่มีจำหน่ายทั่วไป โดยวิธีการเตรียมตัวอย่างเจลให้คืนตัวด้วย 5M HCl ก่อนการนำไปวัด เริ่มต้นด้วยการชั่งตัวอย่าง 100 กรัม จำนวน 10 ตัวอย่าง เติม 5M HCl จำนวน 7 หยดในแต่ละตัวอย่าง ได้พีเอชเท่ากับ 2.57 ตั้งทิ้งไว้ 15 นาที เปรียบเทียบกับ Control ที่เป็น Ethanol ร้อยละ 95 และ Gel control ที่ไม่มีเอทานอล ผลการตรวจวัดได้ปริมาณแอลกอฮอล์เฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 77.5 เมื่อเปรียบเทียบกับผลการตรวจวิเคราะห์ปริมาณด้วยเครื่อง GC: Flame ionization detector (FID) ยี่ห้อ SHIMADZU รุ่น Nexis GC-2030 ของสถานบริการวิชาการด้านวิทยาศาสตร์การแพทย์ คณะวิทยาศาสตร์การแพทย์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ผ่านการทดสอบความใช้ได้ของวิธี (Method validation) จากการหาค่าความจำเพาะของวิธี (Selectivity) ผลกระทบจาก Matrix ค่าวนค่าร้อยละ Recovery, Linearity, Accuracy และ Precision จนกระทั่งพิสูจน์ได้ว่าวิธีที่ใช้ทดสอบสามารถหาปริมาณเอทานอลในเจลแอลกอฮอล์ได้ พบว่าตัวอย่างมีปริมาณเอทานอลเท่ากับร้อยละ 77.01 ดังนั้นความคลาดเคลื่อนของการวัดปริมาณเอทานอลด้วยไฮโดรมิเตอร์เทียบกับเครื่อง GC มีค่าเท่ากับร้อยละ 0.49 (77.5 - 77.01)

เจลแอลกอฮอล์ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมและกรมสรรพสามิต กำหนดให้มีค่าเอทานอลไม่ต่ำกว่าร้อยละ 70 โดยปริมาตร [6,7] และหากผู้ประกอบการต้องการกำหนดไว้ที่ร้อยละ 75 โดยปริมาตร ดังนั้นเจลแอลกอฮอล์ควรต้องมีปริมาณเอทานอลอยู่ในช่วงร้อยละ 75 ± 5 และเครื่องมือวัดควรมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน $5/4 = 1.25$ เมื่อใช้เกณฑ์ TAR (Test accuracy ratio) จากข้อมูลดังกล่าวการหาปริมาณเอทานอลในเจลด้วยวิธีการเตรียมตัวอย่างโดยการเติม 5M HCl และเมื่อวัดด้วยไฮโดรมิเตอร์วัดแอลกอฮอล์ ปริมาณเอทานอลที่วัดได้มีความคลาดเคลื่อนร้อยละ 0.49 (น้อยกว่าร้อยละ 1.25) จึงเป็นค่าที่ยอมรับได้ แสดงว่าเครื่องไฮโดรมิเตอร์มีประสิทธิภาพในการวัดปริมาณเจลแอลกอฮอล์เมื่อเตรียมตัวอย่างด้วยวิธีการคืนตัวของเจลด้วยการปรับพีเอช ดังนั้นวิธีนี้สามารถใช้ในการตรวจสอบปริมาณแอลกอฮอล์ในผลิตภัณฑ์ได้อย่างรวดเร็ว ถูกต้องและเชื่อถือได้ รายละเอียดขั้นตอนการทดสอบแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 แสดงขั้นตอนวิธีทดสอบปริมาณเอทานอลในเจลแอลกอฮอล์ด้วยไฮโดรมิเตอร์วัดแอลกอฮอล์

ที่	รายละเอียด
1	เตรียมตัวอย่าง และอุปกรณ์ ได้แก่ ตัวอย่างเจลแอลกอฮอล์ 100 กรัม เครื่องวัดปริมาณแอลกอฮอล์ ไฮโดรมิเตอร์ ช่วงร้อยละ 40 - 70 และร้อยละ 70 - 100 ขวดดูแรน ขนาด 125 มิลลิลิตร แท่งแก้วคนสาร 5M HCl หลอดหยด กระบอกตวงแก้วขนาด 100 มิลลิลิตร
2	เติมตัวอย่างเจลแอลกอฮอล์ที่ต้องการทดสอบลงในขวดดูแรน วัดปริมาตรที่วัดให้ได้ 100 มิลลิลิตร
3	หยด 5M HCl ด้วยหลอดหยดจำนวน 5 หลอด คนผสมให้เข้ากัน สังเกตได้ว่าเจลจะละลายเป็นของเหลว
4	หยด 5M HCl ลงไปอีก 2 หยด คนผสมให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ 15 นาที
5	เทสารละลายแอลกอฮอล์ลงในกระบอกตวง ให้ได้ปริมาตร 100 มิลลิลิตร
6	วัดปริมาณเอทานอลโดยจุ่มไฮโดรมิเตอร์วัดแอลกอฮอล์ ลงไปในกระบอกตวง
7	อ่านค่าตามคู่มือเครื่อง และบันทึกปริมาณเอทานอลที่วัดได้ หน่วยเป็นร้อยละโดยปริมาตร

3.4 การทดสอบประสิทธิภาพเชิงปริมาณในการฆ่าเชื้อแบคทีเรียของเจลตามวิธีมาตรฐาน European standard EN 1276:2009 โดยห้องปฏิบัติการทดสอบเครื่องสำอางและเครื่องมือแพทย์ สำนักเครื่องสำอางและวัตถุอันตราย กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ กระทรวงสาธารณสุข ทดสอบกับเชื้อมาตรฐาน 4 ชนิด ได้แก่ *Staphylococcus aureus* ATCC 6538, *Escherichia coli* ATCC 10536, *Enterococcus hirae* ATCC 10541 และ *Pseudomonas aeruginosa* ATCC 15442 พบว่าเจลแอลกอฮอล์ สามารถลดปริมาณเชื้อได้ในเวลาสัมผัสเชื้อ 1 นาที มีค่า log reduction (lg R) เท่ากับ 7.5, 7.4, 7.4 และ 7.6 ตามลำดับ ซึ่งมีค่ามากกว่า 5log ผ่านตามเกณฑ์ประกาศสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา เรื่องวิธีการทดสอบและเกณฑ์ตัดสินผลการทดสอบประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์ที่มีแอลกอฮอล์เป็นส่วนประกอบ

เพื่อสุขอนามัยสำหรับมือ พ.ศ.2562 และเปรียบเทียบกับรายงานการประเมินคุณภาพผลิตภัณฑ์เจลแอลกอฮอล์ที่มีสูตรประกอบด้วยแอลกอฮอล์แปลงสภาพ สารสกัดว่านหางจระเข้ และไตรเอทานอลามีน สามารถลดปริมาณเชื้อทั้ง 4 สายพันธุ์ได้มีค่ามากกว่า 5log เช่นเดียวกัน [15]

การผลิตเจลแอลกอฮอล์โดยการควบคุมคุณภาพในขั้นตอนการผลิตและเฝ้าระวังจุดวิกฤต และการทดสอบปริมาณแอลกอฮอล์ในแต่ละรอบการผลิตด้วยวิธีการวัดและเครื่องมือวัดที่มีประสิทธิภาพ ข้อมูลการผลิตและการทดสอบทั้งหมดจัดทำเป็นฐานข้อมูลที่สามารถทวนสอบได้ เป็นกระบวนการประกันคุณภาพการผลิตเจลแอลกอฮอล์

4. สรุป (Conclusion)

การควบคุมคุณภาพในขั้นตอนการผลิตเจลแอลกอฮอล์เพื่อสุขอนามัยสำหรับมือที่มีปริมาณแอลกอฮอล์ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 65 โดยน้ำหนักและทดสอบประสิทธิภาพผลิตภัณฑ์ด้วยเครื่องมือวัดปริมาณแอลกอฮอล์ที่มีประสิทธิภาพ พบว่าการควบคุมจุดวิกฤต 2 จุดได้แก่ การตรวจสอบคุณภาพวัตถุดิบหลัก แอลกอฮอล์แปลงสภาพ สารก่อกวน และน้ำบริสุทธิ์จากเอกสารรับรองผลการวิเคราะห์ให้สอดคล้องกับเกณฑ์ยอมรับ จุดที่ 2 การวัดปริมาณแอลกอฮอล์ของผลิตภัณฑ์ก่อนการบรรจุด้วยเครื่องมือวัดแอลกอฮอล์ที่มีความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 1.25 โดยต้องเตรียมตัวอย่างเจลให้คั่นตัวด้วย 5M HCl ก่อนการวัด การควบคุมประสิทธิภาพของเครื่องมือ เครื่องแก้วและอุปกรณ์บนผสม กระบวนการทั้งหมดต้องทวนสอบได้ในระบบฐานข้อมูลด้วยโปรแกรม Excel ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความคงตัว มีค่าพีเอช 5.8 ปริมาณเอทานอลเท่ากับร้อยละ 77 โดยปริมาตร สามารถลดปริมาณเชื้อมาตรฐานในเวลาสัมผัสเชื้อ 1 นาที ได้ค่า log reduction ≥ 5 สรุปได้ว่าการประกันคุณภาพการผลิตแอลกอฮอล์เจลตามขั้นตอนดังกล่าวสามารถยืนยันประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์ได้ตามกฎหมายสามารถใช้เป็นแนวทางการผลิตสำหรับผู้ประกอบการหรือประยุกต์ใช้แนวทางการประกันคุณภาพดังกล่าวสำหรับผลิตผลิตภัณฑ์อื่นได้

5. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

งานวิจัยนี้ได้รับงบประมาณสนับสนุนจากโครงการสนับสนุนการเคลื่อนย้ายบุคลากรวิจัยในสถาบันอุดมศึกษาไปปฏิบัติงาน เพื่อแก้ไขปัญหาและเพิ่มขีดความสามารถในการผลิตให้กับภาคอุตสาหกรรม (Talent mobility) ประจำปีงบประมาณ 2563 ชื่อโครงการ การประกันคุณภาพผลิตภัณฑ์เครื่องสำอางที่มีส่วนผสมของแอลกอฮอล์เพื่อสุขอนามัยสำหรับมือ สำหรับวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม (SME) และปีงบประมาณ 2564 ชื่อโครงการ การทดสอบปริมาณเอทานอลในเจลแอลกอฮอล์ที่รวดเร็วและมีประสิทธิภาพและอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ สำหรับผู้ผลิตวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม (SME)

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Boyce JM, Pittet D. Guideline for hand hygiene in health-care settings: Recommendations of the Healthcare Infection Control Practices Advisory Committee and the HICPAC/SHEA/APIC/IDSA hand hygiene task force. MMWR [Internet]. 2002 [cited 2025 Mar 10];51(RR-16):1-45. Available from: <https://www.cdc.gov/mmwr/preview/mmwrhtml/rr5116a1.htm>
- [2] Choorich A. Quality of alcohol-based hand sanitiser for donated during the coronavirus disease (COVID-19) pandemic. Thai Food and Drug Journal. 29(3):62-73.

- [3] กระทรวงสาธารณสุข. ประกาศกระทรวงสาธารณสุข เรื่อง กำหนดลักษณะของเครื่องสำอางที่มีส่วนผสมของแอลกอฮอล์เพื่อสุขอนามัยสำหรับมือที่ห้ามผลิต นำเข้า หรือขาย พ.ศ. 2563. ราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 137 ตอนพิเศษ 54 ง, 9 มีนาคม 2563. 6
- [4] กองบรรณาธิการนิตยสารฉลาดซื้อ. ผลทดสอบเจลแอลกอฮอล์. นิตยสารฉลาดซื้อ [อินเทอร์เน็ต]. 2563 [เข้าถึงเมื่อ 13 มกราคม 2568]. เข้าถึงได้จาก: <https://www.chaladsue.com/article/3420>
- [5] U.S. Food and Drug Administration. Is your hand sanitizer on FDA's list of products you should not use? [Internet]. 2020 [cited 2025 Jan 13]. Available from: <https://www.fda.gov/drugs/drug-safety-and-availability/fda-updates-hand-sanitizers-consumers-should-not-use#products>
- [6] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม.(สมอ) มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เอทานอลใช้ทางเภสัชกรรม. มอก. 640 เล่ม 1-2553. กรุงเทพฯ: สมอ.; 2553.
- [7] กระทรวงอุตสาหกรรม. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6460 (พ.ศ. 2564) เรื่อง กำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ผลิตภัณฑ์ที่มีส่วนผสมของแอลกอฮอล์เพื่อสุขอนามัยสำหรับมือ. ราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 139 ตอนพิเศษ 78 ง, 4 เมษายน 2565. 31.
- [8] กรมสรรพสามิต. ประกาศกรมสรรพสามิต เรื่อง หลักเกณฑ์วิธีการ และเงื่อนไขการขอใช้สิทธิเสียภาษีในอัตราภาษีศูนย์สำหรับสุราสามทับที่นำไปทำการแปลงสภาพ เพื่อใช้ในการทำผลิตภัณฑ์ทำความสะอาด. ราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 140 ตอนพิเศษ 187 ง, 7 สิงหาคม 2566. 14-19.
- [9] Rodrigues GBC, de Oliveira Filho JG, Jakelaitis A, da Silva EC, Placido GR, de Oliveria Marcionilio SML, et al. Hand sanitizer gel formulations: Influence of polymer type on the rheological properties. Research Society and Development. 2024;13(4):e6313445531. doi: 10.33448/rsd-v13i4.45531.
- [10] กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์, สำนักคุณภาพและความปลอดภัยอาหาร. คู่มือมาตรฐานน้ำดื่มประเทศไทย. นนทบุรี: กระทรวงสาธารณสุข; 2562.
- [11] Adelnia H, Ensandoost R, Moonshi SS, GavGANI JN, Vasafi EI, Ta HT. Freeze/thawed polyvinyl alcohol hydrogels: Present, past and future. European Polymer Journal. 2021;164(11):110974. doi: 10.1016/j.eurpolymj.2021.110974.
- [12] World Health Organization. Guide to local production: WHO-recommended handrub formulations [Internet]. 2009 [cited 2025 Jan 13]. Available from: <https://www.who.int/publications/i/item/WHO-IER-PSP-2010.5>
- [13] Lacerda JP, Oliveira SS, Marcante A. A rapid and effective method for determination of ethanol content sanitizers (Alcohol gel). Revista IPT Tecnologia e Inovação. 2020;4(14):57-64. doi: 10.34033/2526-5830-v4n14-4.
- [14] คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล. ไวรัสโคโรนาสายพันธุ์ใหม่ 2019 กับแอลกอฮอล์ฆ่าเชื้อโรค [อินเทอร์เน็ต]. 2563 [เข้าถึงเมื่อ 13 มกราคม 2568]. เข้าถึงได้จาก: <https://pharmacy.mahidol.ac.th/th/knowledge/article/482>
- [15] สุวรรณ เจริญกิจ, ปรีชา ปิ่นนิล, กนกกร กรี่เหลียง, สิริวรรณ อ้นเกตุ. ประสิทธิภาพเชิงปริมาณในการฆ่าเชื้อแบคทีเรียของเจลตามือในประเทศไทย ชนิดที่มีแอลกอฮอล์เป็นส่วนประกอบ เมื่อทดสอบด้วย Modified EN 1276: 2009 method. วารสารกรมวิทยาศาสตร์การแพทย์. 2562;61(2):60-72.

คำแนะนำในการจัดทำต้นฉบับ วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ กรมวิทยาศาสตร์บริการ Bulletin of Applied Sciences

บทความที่ส่งตีพิมพ์จะต้องไม่เคยตีพิมพ์หรืออยู่ในระหว่างการพิจารณาเพื่อตีพิมพ์ในวารสารอื่น บทความที่เสนอมาเพื่อตีพิมพ์อาจเขียนเป็นภาษาไทยหรือภาษาอังกฤษก็ได้ แต่บทความต้องมีทั้งสองภาษา ทั้งนี้บทความทุกเรื่องจะได้รับการพิจารณาตรวจแก้จากผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาที่เกี่ยวข้อง และกองบรรณาธิการขอสงวนสิทธิ์ในการตรวจแก้ไขต้นฉบับและพิจารณาตีพิมพ์ตามลำดับก่อนหลัง

ความรับผิดชอบ

บทความที่ตีพิมพ์ในวารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ กรมวิทยาศาสตร์บริการ ถือเป็นผลงานทางวิชาการ และเป็นความเห็นส่วนตัวของผู้เขียน ไม่ใช่ความเห็นของกรมวิทยาศาสตร์บริการ หรือกองบรรณาธิการ ผู้เขียนต้องรับผิดชอบต่อบทความของตน และบทความที่ตีพิมพ์ในเล่มนี้ไม่เคยพิมพ์ในวารสารใดมาก่อน และจะไม่นำไปเพื่อพิจารณาตีพิมพ์ในวารสารอื่นภายใน 60 วัน

1. การเตรียมต้นฉบับและการส่งต้นฉบับ

1.1 บทความวิจัย (Research article) ประกอบด้วยหัวข้อ ดังนี้

1.1.1 ชื่อเรื่อง:

ชื่อเรื่องต้องมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ตัวอักษร Cordia New ขนาด 18 ตัวหนา จัดวางข้อความชื่อเรื่องตรงกึ่งกลางหน้ากระดาษ โดยชื่อเรื่องภาษาอังกฤษเฉพาะคำขึ้นต้น ให้พิมพ์ตัวใหญ่

1.1.2 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 หงษ์ศรี¹, ธีรวัธ อาจสำอางค์²

Jarawee Leksuksri¹, Korpong Hongsri¹, 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

1.1.3 บทคัดย่อ (Abstract)

บทคัดย่อต้องมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ตัวอักษร Cordia New ขนาด 14 ตัวปกติ เนื้อหาในคัดย่อควรระบุวัตถุประสงค์ ผลการวิจัย และบทสรุปโดยย่อ

1.1.4 คำสำคัญ (Keywords)

คำสำคัญต้องมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ระบุคำสำคัญหรือวลีสั้น ๆ จำนวน 3 - 5 คำ คำที่ 1, คำที่ 2, คำที่ 3 ตัวอักษร Cordia New ขนาด 12 ตัวปกติ

1.1.5 เนื้อเรื่อง

1.1.5.1 บทนำ (Introduction)

หัวข้อบทนำ ตัวอักษร Cordia New ขนาด 16 ตัวหนา จัดชิดขอบด้านซ้าย หัวข้อย่อย ตัวอักษร Cordia New ขนาด 14 ตัวหนา เนื้อหา ตัวอักษร Cordia New ขนาด 14 ตัวปกติ

1.1.5.2 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

1.1.5.3 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

1.1.5.4 สรุป (Conclusion)

หัวข้อสรุป ตัวอักษร Cordia New ขนาด 16 ตัวหนา จัดชิดขอบด้านซ้าย เนื้อหา ตัวอักษร Cordia New ขนาด 14 ตัวปกติ

1.1.5.5 กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

หัวข้อกิตติกรรมประกาศ ตัวอักษร Cordia New ขนาด 16 ตัวหนา จัดชิดขอบด้านซ้าย เนื้อหา ตัวอักษร Cordia New ขนาด 14 ตัวปกติ

1.1.5.6 เอกสารอ้างอิง (References)

การเขียนเอกสารอ้างอิงให้ใช้ระบบเรียงตามตัวเลข ใส่หมายเลขในวงเล็บเหลี่ยม [] เรียงตามลำดับการอ้างอิงในเรื่อง เอกสารอ้างอิงทุกฉบับจะต้องมีการอ้างอิงหรือกล่าวถึงในบทความ กรณีที่มีการอ้างอิงมากกว่า 1 รายการ ให้จัดเรียงดังนี้ รายการลำดับต่อเนื่องกันให้ใช้เครื่องหมายยัติภังค์ (-) คั่น เช่น [1-3] รายการลำดับไม่ต่อเนื่องกันให้ใช้เครื่องหมายจุลภาค (,) คั่น เช่น [1,3,5] รายการมีทั้งที่ลำดับต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่องกันให้ใช้เครื่องหมายยัติภังค์ (-) และเครื่องหมายจุลภาค (,) ร่วมกัน เช่น [1-2,4]

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

1.1.6.1 ตาราง : ให้ระบุลำดับที่ของตาราง หัวตารางให้จัดชิดขอบด้านซ้าย ชื่อตารางให้อยู่ด้านบนของตาราง

1.1.6.2 รูป : ให้ระบุลำดับที่ของรูป คำบรรยายรูปภาพให้อยู่ใต้รูปภาพ และจัดกึ่งกลางคอลัมน์ กรณีเป็นรูปถ่าย ความละเอียดของรูปไม่ต่ำกว่า 300 dpi

1.2 บทความวิชาการ (Academic article) ประกอบด้วยหัวข้อ ดังนี้

1.2.1 ชื่อเรื่อง

ชื่อเรื่องต้องมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ตัวอักษร Cordia New ขนาด 18 ตัวหนา จัดวางข้อความชื่อเรื่องตรงกึ่งกลางหน้ากระดาษ โดยชื่อเรื่องภาษาอังกฤษเฉพาะคำขึ้นต้น ให้พิมพ์ตัวใหญ่

1.2.2 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 หงษ์ศรี¹,ธีรวัธ อาจสำอางค์²

Jarawee Leksuksri¹, Korpong Hongsi¹, 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

1.2.3 บทคัดย่อ (Abstract)

บทคัดย่อต้องมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ตัวอักษร Cordia New ขนาด 14 ตัวปกติ เนื้อหาในคัดย่อควรระบุวัตถุประสงค์ ผลการวิจัย และบทสรุปโดยย่อ

1.2.4 คำสำคัญ (Keywords)

คำสำคัญต้องมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ระบุคำสำคัญหรือวลีสั้น ๆ จำนวน 3 - 5 คำ คำที่ 1, คำที่ 2, คำที่ 3 ตัวอักษร Cordia New ขนาด 12 ตัวปกติ

1.2.5 เนื้อเรื่อง แบ่งเป็นส่วนต่าง ๆ ดังนี้

1.2.5.1 บทนำ (Introduction)

หัวข้อบทนำ ตัวอักษร Cordia New ขนาด 16 ตัวหนา จัดชิดขอบด้านซ้าย หัวข้อย่อย ตัวอักษร Cordia New ขนาด 14 ตัวหนา เนื้อหา ตัวอักษร Cordia New ขนาด 14 ตัวปกติ

1.2.5.2 เนื้อหา นำเสนอตามหัวข้อหรือประเด็นที่ผู้นิพนธ์กำหนดเพื่อแสดงรายละเอียดของเรื่อง

1.2.5.3 สรุป (Conclusion) กล่าวถึงสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ ของเรื่องที่เขียนเพื่อให้ผู้อ่านเข้าใจ

1.2.5.4 กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement) กล่าวถึงบุคคล หรือหน่วยงานที่ให้การสนับสนุนการศึกษา

1.2.5.5 เอกสารอ้างอิง (References) ต้องอ้างอิงในระบบ Vancouver ใช้ระบบเรียงตามตัวเลข โดยใส่หมายเลขในวงเล็บเหลี่ยม [] เรียงตามลำดับการอ้างอิงในเรื่อง เอกสารอ้างอิงทุกฉบับจะต้องมีการอ้างอิงหรือกล่าวถึงในบทความ

2. การเขียนเอกสารอ้างอิงตามระบบ Vancouver

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

2.2 การอ้างอิงท้ายเล่ม (Reference) เป็นการนำรายการอ้างอิงในเนื้อหา มารวบรวมไว้ในส่วนท้ายของบทความ ภายใต้หัวข้อ เอกสารอ้างอิง (References) โดยจัดเรียงตัวเลขตามลำดับ 1, 2, 3...ในเครื่องหมายวงเล็บเหลี่ยม [] ซึ่งตัวเลขต้องสอดคล้องกับลำดับตัวเลขของการอ้างอิงในเนื้อหา ข้อมูลที่นำมาเขียนเอกสารอ้างอิงจะแตกต่างกันตามประเภทของเอกสารที่นำมาอ้างอิง เช่น หนังสือ บทความวารสาร วิทยานิพนธ์ เอกสารประกอบการประชุม หนังสืออิเล็กทรอนิกส์ เอกสารจากอินเทอร์เน็ต สหิทธิบัตร มาตรฐาน เป็นต้น

2.3 รูปแบบการเขียนเอกสารอ้างอิงเอกสารประเภทต่าง ๆ

2.3.1 หนังสือ (Book)

2.3.1.1 ผู้แต่งคนไทยให้ใช้ชื่อและนามสกุล เช่น จิตตกานต์ อินเพียง.

2.3.1.2 ผู้แต่งชาวต่างชาติให้ใช้ชื่อสกุล ตามด้วยอักษรย่อชื่อตัวและชื่อกลาง เช่น Muller AC.

(1) ผู้แต่งไม่เกิน 6 คน เช่น Peng Q, Zhou M. ให้ใช้เครื่องหมายจุลภาค (,) คั่น

(2) ผู้แต่งมากกว่า 6 คน ให้ใช้ชื่อ 6 คนแรก ตามด้วย “และคณะ.” หรือ “et al.” โดยใช้เครื่องหมายจุลภาค (,) คั่น เช่น Muller AC, Hachimura K, Hara S, Ogiso T, Aida M, Yasuoka K, et al.

2.3.1.3 นิติบุคคล ให้ใช้ชื่อหน่วยงานใหญ่และตามด้วยหน่วยงานย่อย เช่น มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, คณะวิทยาศาสตร์.

2.3.1.4 ไม่ปรากฏชื่อผู้แต่ง ให้ใช้ชื่อหนังสือแทนในตำแหน่งชื่อผู้แต่ง

2.3.1.5 หนังสือที่มีเฉพาะบรรณาธิการ ให้ใช้ชื่อบรรณาธิการในตำแหน่งชื่อผู้แต่ง ตามด้วยจุลภาค และคำว่า บรรณาธิการ editor หรือ editors

2.3.1.6 หนังสือที่มีทั้งผู้แต่งและบรรณาธิการหรือผู้แปล ให้ใช้ชื่อบรรณาธิการ/ผู้แปลไว้หลังชื่อหนังสือหรือครั้งที่พิมพ์ ตามด้วยจุลภาค และคำว่า บรรณาธิการ editor editors หรือผู้แปล translator translators

2.3.1.7 ชื่อหนังสือภาษาไทยให้ใช้ตามที่ปรากฏ ส่วนชื่อภาษาอังกฤษให้ใช้อักษรตัวใหญ่เฉพาะคำแรกของชื่อ (ชื่อเฉพาะให้ใช้อักษรตัวใหญ่) เช่น Nanotechnology research methods for foods and bioproducts, The availability of solar energy in Thailand

2.3.1.8 ครั้งที่พิมพ์ ให้ระบุการพิมพ์ครั้งที่ 2 เป็นต้นไป เช่น พิมพ์ครั้งที่ 3. 2nd ed. 3rd ed. 4th ed. โดยไม่ทำด้วย

2.3.1.9 หนังสือชุดที่มีหลายเล่มจบ ให้ใส่จำนวนเล่มทั้งหมด เช่น 5 เล่ม 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, ขวดี นพรัตน์. โลหิตวิทยา (Hemato-Book). พิมพ์ครั้งที่ 2. สงขลา: ภาควิชาพยาธิวิทยา คณะแพทยศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์; 2563.

[2] พงษ์ธร แซ่ฮุย. 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.

2.3.2 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 เพื่อฟื้นเฟื่องเกษตรกรรม. ใน: ธีระ กลลดาเรืองไกร, บรรณาธิการ. การบริหารความต่อเนื่องในภาวะฉุกเฉินของโรงพยาบาล. กรุงเทพฯ: คณะแพทยศาสตร์ ศิริราชพยาบาล มหาวิทยาลัยมหิดล; 2562. หน้า 33-60.

[2] กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์. วิธีมาตรฐานทางเคมีสำหรับการวิเคราะห์อาหารของกรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ DMSc F1074: การวิเคราะห์ปริมาณอะคริลาไมด์ในอาหารโดย LC/MS-MS. ใน: วิธีมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์อาหาร เล่มที่ 5. นนทบุรี: กรม; 2560. หน้า 41-46.

2.3.3 บทความวารสาร (Journal Article)

2.3.3.1 วารสารภาษาไทย ให้เขียนชื่อเต็ม

2.3.3.2 วารสารภาษาอังกฤษ ใช้เขียนชื่อย่อของวารสารตามแบบของ index medicus (<http://cassi.cas.org>) หรือ(<http://www2.bg.am.poznan.pl/czasopisma/medicus.php?lang=eng>)

2.3.3.3 หากเป็นวารสารชื่อสั้น ๆ คำเดียว มักจะไม่ย่อชื่อวารสาร

2.3.3.4 เลขหน้าสุดท้ายให้ใส่เฉพาะเลขที่ไม่ซ้ำกับเลขหน้าแรก ยกเว้นเลขโรมันหรือเลขที่มีตัวอักษรต่อท้าย เช่น หน้า 4-12 ให้ระบุ 4-12.

หน้า 22-28 ให้ระบุ 22-8.

หน้า 1012A-1045A ให้ระบุ 1012A-1045A.

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

ตัวอย่าง

[1] จิตตกานต์อินทิยง. 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.

2.3.4 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 ประภานภสินธุ์. เปรียบเทียบเทคนิคการสกัดสารแคปไซซินในพริกพันธุ์ต่าง ๆ [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต]. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์; 2544.

2.3.5 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] มณฑนา เอื้อวิทยา, ผู้ประดิษฐ์; บริษัทมหาชนพาณิชย์เชียงใหม่ จำกัด, ผู้ขอรับสิทธิบัตร. องค์ประกอบสมุนไพรรากกวาวเครือ. 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.

2.3.6 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.

2.3.7 เอกสารด้านกฎหมายที่ประกาศในราชกิจจานุเบกษา

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.

2.3.8 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

2.3.9 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>

2.3.10 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 คุณค่าทางโภชนาการและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของเชอร์รี่บดหมัก. 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>

2.3.11 บทความวารสารที่มีหมายเลข Digital Object Identifier (DOI)

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

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 ปราศจากการปลุกปั่นยักย้ายถ่ายเท (Manipulate) อันเปลี่ยนแปลงหรือละเลยผลการศึกษาโดยไม่อธิบายหรือไม่นำเสนออย่างถูกต้องตามข้อมูลในแบบลงข้อมูล
- รายชื่อคณะผู้นิพนธ์เป็นตามความเป็นจริง และเป็นผู้มีส่วนร่วมทางปัญญา (Intellectual contribution) ต่อบทความวิชาการ
- มีการให้ URLs ที่เข้าถึงได้ สำหรับเอกสารอ้างอิงจากอินเทอร์เน็ต
- ไฟล์บทความอยู่ในรูปแบบ Microsoft word การกระจายตัวอักษรให้ขอบขามีขนาดเท่ากัน โดยเลือกการจัดตำแหน่งการกระจายแบบไทย (Thai distributed) ใช้ระยะห่างบรรทัดปกติ (Single-spaced) ใช้ตัวอักษรแบบ Cordia New ทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ และจัดเตรียมบทความตามข้อกำหนด ทั้งในด้านของรูปแบบและการเขียนเอกสารอ้างอิงแบบ Vancouver ตามคำแนะนำสำหรับผู้นิพนธ์ (Author guidelines)
- การทำงานผ่านระบบวารสารออนไลน์ ทางวารสารจะติดต่อและแจ้งข้อความต่าง ๆ ผ่านอีเมล ของท่านที่ได้กรอกเข้าสู่ระบบเป็นหลัก เพื่อให้เข้ามารับ-ส่ง ข้อมูลผ่านในระบบเว็บไซต์วารสาร (การตอบกลับไม่ใช้การ Reply เมล) ดังนั้นขอให้ตรวจสอบกล่องจดหมายของท่านว่าได้รับอีเมลของวารสาร หากไม่ได้รับอีเมลใด ๆ หลังจากส่งบทความนี้แล้ว (บางครั้งอาจตกอยู่ใน Spam/Junk mail) กรุณาติดต่อที่ tci.thai@gmail.com หรือ bas@dss.go.th
- กรุณาให้ชื่อและหมายเลขโทรศัพท์มือถือของท่านไว้ในข้อความถึงบรรณาธิการ (Comment for editor) และกดบันทึก รวมถึงหากมีข้อสงสัยสามารถสอบถามได้ในช่องทางดังกล่าว

นโยบายส่วนบุคคล

ชื่อและที่อยู่อีเมล หรือข้อมูลส่วนบุคคล ที่กรอกในเว็บไซต์วารสารนี้จะใช้สำหรับวัตถุประสงค์ที่ระบุไว้ในงานวารสารเท่านั้นและจะไม่เปิดเผยเพื่อวัตถุประสงค์ในกิจกรรมอื่น ๆ หรือให้กับบุคคลหรือหน่วยงานอื่นใดทราบ

การคุ้มครองข้อมูลส่วนบุคคล

1. วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ กรมวิทยาศาสตร์บริการ จะเคร่งครัดกรณีบทความมีการคัดลอก การนำเสนอรูปภาพ หรือการนำผลงานผู้อื่นมาเป็นส่วนหนึ่งของบทความเพื่อตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสาร

2. วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ กรมวิทยาศาสตร์บริการ จะไม่เปิดเผยรายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ ให้แก่ผู้นิพนธ์หรือบุคคลอื่น

กรมวิทยาศาสตร์บริการให้ความสำคัญกับการคุ้มครองข้อมูลส่วนบุคคลอย่างเคร่งครัดและปฏิบัติตามกฎหมายและข้อบังคับทั้งหมดเกี่ยวกับการปกป้องข้อมูลส่วนบุคคลของท่าน ท่านสามารถอ่านรายละเอียดนโยบายและแนวปฏิบัติในการคุ้มครองข้อมูลส่วนบุคคล ได้ที่ <https://ph03.tci-thaijo.org/index.php/BAS/about/privacy>

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 bas@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 Junlar¹, 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://ph03.tci-thaijo.org/index.php/BAS/about/privacy>

ดรราชনীคำสำคัญ

	หน้า		หน้า
ก		ฤ	
กรดไฮโดรคลอริก	40	ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ	66
กระดาส้มผัสอาหาร	25		
กล้องถ่ายภาพเคลื่อนไหวกว้างเร็วสูง	12	ส	
การย่อยด้วยไมโครเวฟ	25	สายพันธุ์บัวบก	66
การสกัดด้วยน้ำ	66		
การสกัดด้วยเอทานอล	66	อ	
การสกัดด้วยเอโนไซม์	66	อะเวละเบิดคลอรีน	40
		อินดิกทีฟลิคัฟเฟิลพลาสมาแมสสเปกโตรเมตรี	25
ค		เอทานอล	79
เครื่องวัดแอลกอฮอล์	79	แยกที่ฟอกออกซิเจน	40
เครื่องสำอาง	79		
แคดเมียม	25		
โครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง	52		
จ			
จุดวิกฤต	79		
ด			
ดินคั่วน้อย	12		
ท			
เทคนิคสารโดว์กราฟ	12		
ป			
ปากกระบอกปืน	12		
ผ			
ผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดและฆ่าเชื้อ	40		
พ			
พริกไทยดำ	52		
พีเพอร์รีน	52		

Keyword index

	Page		Page
A		M	
Active oxygen	41	Microwave digestion	26
Alcohol meter	80		
Antioxidant activity	67	P	
Available chlorine	41	Paper for food contact	26
		Piperine	53
B			
Black pepper	53	S	
		Shadowgraph technique	13
C		Smokeless powder	13
Cadmium	26		
<i>Centella asiatica</i> species	67	W	
Cleaning and disinfecting products	41	Water extraction	67
Cosmetics	80		
Critical control point	80		
E			
Enzyme extraction	67		
Ethanol	80		
Ethanol extraction	67		
G			
Gun muzzle	13		
H			
High performance liquid chromatography	53		
High speed video camera	13		
Hydrochloric acid	41		
I			
Inductively coupled plasma mass spectrometry	26		

ดรราชินีผู้แต่ง

	หน้า		หน้า
ข		ว	
กรรมนิภา ตีวินิจ	40	วรรณรัตน์ บุรณะกุล	25
		วีรภัทร รามณี	25
ข		วีระ สอนไธสง	25
ขนิษฐ พานชูวงศ์	40	วุฒิชัย สิทธิวงษ์	12
จ		ศ	
จิตติไล เวฬุวนารักษ์	25	ศิริวรรณ วิชัย	79
ด		ส	
ดาร์ตัน พัฒนะกุลกำจร	40	สุบงกช ททรัพย์แดง	52
ถ		ห	
ถนัชชา ทองระย้า	40	หนึ่งฤทัย แสงแสงสีรุ้ง	40
ธิดารัตน์ เครือเทียน	52	อ	
น		อภิรตรี ศรีธร	66
นุจรินทร์ พลหงษ์	25		
นุศรา ยินยอม	79		
เนตรศิรินทร์ กฤษวงค์	25		
ป			
ปัทมาพร จิตปรีดา	52		
ย			
ยุทธศักดิ์ สุปการี	66		
ร			
เรวดี มีสัตย์	66		

Author index

	Page		Page
A		V	
Apiratree Srithon	66	Veerapat Ramanee	25
D		W	
Darat Phathanakunkamchon	40	Warunrat Buranakul	25
		Weera Suanthaisong	25
J		Wuttichai Sittiwong	12
Jitwilai Waluvanarak	25		
K		Y	
Kannika Deevinij	40	Yuttasak Subkaree	66
Khanit Panchoowong	40		
N			
Netsirin Gissawong	25		
Neungrutai Saesaengseerung	40		
Nootjarin Phonhong	25		
Nusara Yinyom	79		
P			
Pattamaporn Jitpreeda	52		
R			
Rewadee Meesat	66		
S			
Siriwan Wichai	79		
Subongkoch Subtaeng	52		
T			
Thanatcha Tongraya	40		
Thidarat Kruatian	52		

[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 on the paper.

[illegible]

[illegible]

[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