



วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์

กรมวิทยาศาสตร์บริการ

BULLETIN OF APPLIED SCIENCES



ปีที่ 13 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม – ธันวาคม 2567

Vol. 13 No. 2 July – December 2024

ISSN 2822-1532 (Print)

ISSN 2822-1540 (Online)





**วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์
กรมวิทยาศาสตร์บริการ
BULLETIN OF APPLIED SCIENCES**

ปีที่ 13 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม - ธันวาคม 2567

Vol. 13 No. 2 July - December 2024

วารสารฉบับนี้ผ่านเกณฑ์ประเมินคุณภาพวารสาร กลุ่มที่ 2
ของศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (Thai-Journal Citation Index Centre : TCI)

วัตถุประสงค์	1. เพื่อเผยแพร่ผลงานวิชาการ ผลงานวิจัย ของนักวิจัย นักวิทยาศาสตร์ให้เป็นที่ยอมรับแก่ภาครัฐ ภาคเอกชน นักวิชาการ ผู้ประกอบการและประชาชนทั่วไป 2. เพื่อให้สามารถนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์ในทางวิชาการ การอ้างอิง และการประกอบกิจการ ภาคการผลิตและอุตสาหกรรม	
เจ้าของ	กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม	
นโยบายการจัดพิมพ์	วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ กรมวิทยาศาสตร์บริการ รับผิดชอบต่อความวิจัย บทความวิชาการ และ บทความปริทัศน์ จากผู้เขียนทั้งภายในและภายนอกหน่วยงานในสาขาเคมี ฟิสิกส์ เทคโนโลยีชีวภาพ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร วัสดุศาสตร์ มาตรวิทยา วิศวกรรมศาสตร์ หรือ วิทยาศาสตร์ประยุกต์	
หัวหน้ากองบรรณาธิการ	นพ. รุ่งเรือง กิจผาติ	อธิบดีกรมวิทยาศาสตร์บริการ
บรรณาธิการวิชาการ	ดร. อรสา อ่อนจันทร์	นักวิทยาศาสตร์เชี่ยวชาญ กรมวิทยาศาสตร์บริการ
บรรณาธิการจัดการ	นางสาวปัทมา นพรัตน์	ผู้อำนวยการกองหอสมุดและศูนย์สารสนเทศวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กรมวิทยาศาสตร์บริการ
กองบรรณาธิการ	ศ.ดร. ดวงดาว อัจฉรงค์ ศ.ดร. ภาวิณี ชินะโชติ รศ.ดร. กรรณิการ์ สหะโร รศ.ภญ.ดร. จิตติมา ลักนากุล รศ.ดร. จุฑา จักรมณี รศ.ดร. ธีร เชาวนนท์ปัญญา รศ.ดร. นภาพร ยิ่งวิเศษ รศ.ดร. นุเรศ เชื้อสุวรรณ รศ.ดร. นาทิพย์ วิภาวิน รศ.ดร. พิมพ์า หอมนิรันดร์ รศ.ดร. ภัทธินฤณ วุฒิจิตติพล รศ.ดร. วิภารัตน์ เชื้อชวด ชัยสิทธิ์ รศ.ดร. วิษณุ เพชรภา รศ.ดร. วิธนา สาคิตปัตติพันธ์ รศ.ดร. อติทยา ศิริปัญญาพนธ์ รศ.ดร. อรทัย จงประทีป ผศ.ดร. ชัยรัตน์ ตั้งดวงดี ผศ.ดร. เทอดเกียรติ ลิ้มปิที่ปรากฏ ผศ.ดร. ปริญดา เพ็ญโรจน์ ผศ.ดร.ทพญ. ปิยะนารถ เอกวรพจน์ ผศ.ดร. พิระวัฒน์ นันทวรวงค์ ผศ.ดร. พุทธิรักษา วรานุสุภากุล ผศ.ดร. ยาวภา หล่อเจริญผล ผศ.ดร. รักฤดี สารธิมา ผศ.ดร. รัฐภูมิ ปรัชชาตปรีชา ผศ. สมพร ชัยอารีย์กิจ ดร. นงนภัส ดวงดี	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สมาคมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอาหารแห่งประเทศไทย (FoSTAT) มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมมาธิราช มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ มหาวิทยาลัยนเรศวร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง มหาวิทยาลัยมหิดล มหาวิทยาลัยมหิดล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี มหาวิทยาลัยศิลปากร มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ดร. นุชนาฏ ณะระนอง
ดร. ประสาร คิตดี
ดร. มาณพ สิทธิเดช

นักวิชาการอิสระ
กรมพัฒนาฝีมือแรงงาน
อดีตอัครราชทูตที่ปรึกษาฝ่ายวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
ประจำสถานเอกอัครราชทูต ณ กรุงบรัสเซลส์
ประเทศเบลเยียม

ดร. ลดา พันธุ์สุพมธนา
ดร. วราวุฒิ ศุภมิตรมงคล
ดร. สัมพันธ์ ยอดมณี
ดร. ่องอาจ ธเนศนิตย
ดร. อนุพงษ์ จุ่มแพง
นายชาติรี วงษ์แก้ว
นายวีระ ตูลาสมบัติ
ดร. กนิษฐ์ ตะปะสา
ดร. จิราภรณ์ บุราคร
ดร. กรธรรม สติรกุล
นางวรรณิ์ อุโพบูรณ์

นักวิชาการอิสระ
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
มหาวิทยาลัยราชภัฏภูเก็ต
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยบูรพา
นักวิชาการอิสระ
นักวิชาการอิสระ
กรมวิทยาศาสตร์บริการ
กรมวิทยาศาสตร์บริการ
กรมวิทยาศาสตร์บริการ
กรมวิทยาศาสตร์บริการ

ผู้ช่วยกองบรรณาธิการ

ดร. จุฑาทิพย์ ลาภวิบูลย์สุข
ดร. อรพรรณ อภิรักษานันต์
นางสาวกมลชนก ศรีไทย
นางสาวกิตติยา ปลื้มใจ
นางสาวชวีภัทร ปาโมกษ์
นางสาวประภัสสร ศิลปศาสตร์ดำรง
นายวรวิทย์ มะโนชาติ
นายสายันท์ เกลียงสิน
นางสาวสุรรัตน์ ยอดเกื้อน

กรมวิทยาศาสตร์บริการ
กรมวิทยาศาสตร์บริการ
กรมวิทยาศาสตร์บริการ
กรมวิทยาศาสตร์บริการ
กรมวิทยาศาสตร์บริการ
กรมวิทยาศาสตร์บริการ
กรมวิทยาศาสตร์บริการ
กรมวิทยาศาสตร์บริการ
กรมวิทยาศาสตร์บริการ

เลขานุการ ฝ่ายบริหารจัดการ

นางสาวอุดมลักษณ์ เวียงงาม
นางสาวอุดมลักษณ์ เวียงงาม
นางสาวทิพย์วาทิ กกรัมย์
นางสาวอรัชพร วายุภักตร์

นางสาวจอย ผิวงสะอาด
นางสาวอุศนา มหานิตพงษ์

ฝ่ายเผยแพร่ประชาสัมพันธ์

นางสาวพรทิพย์ เส้นสด

ฝ่ายเว็บไซต์วารสาร

นางสาวพรพรชล รัตนปานิ

การจัดพิมพ์และเผยแพร่

จัดพิมพ์ปีละ 2 ฉบับ กำหนดออกเผยแพร่เดือน มกราคม-มิถุนายน และ กรกฎาคม-ธันวาคม

จำนวนพิมพ์

150 เล่ม

ค่าธรรมเนียมการตีพิมพ์

ไม่มีค่าใช้จ่ายสำหรับการตีพิมพ์ในวารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ กรมวิทยาศาสตร์บริการ

สำนักงานวารสาร

กองหอสมุดและศูนย์สารสนเทศวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม
75/7 ถนนพระรามที่ 6 เขตราชเทวี กรุงเทพฯ 10400
โทรศัพท์ 0 2201 7000 ต่อ 7260, 7288 เว็บไซต์ <https://ph03.tci-thaijo.org/index.php/BAS>
e-mail: bas@dss.go.th

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

พิมพ์ที่

บริษัท ชัคเซสส์ปับลิเคชั่น 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 2” มีวัตถุประสงค์เพื่อเผยแพร่ผลงานวิชาการ ผลงานวิจัย ให้เป็นที่ประจักษ์แก่ภาครัฐ ภาคเอกชน นักวิชาการ ผู้ประกอบการ และประชาชนทั่วไป มุ่งเน้นให้สามารถนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์ในทางวิชาการ ตลอดจนอ้างอิงในการประกอบกิจการภาคการผลิต และอุตสาหกรรมได้ วารสารได้จัดให้มีระบบ Peer reviews จากบรรณาธิการทั้งในและนอกองค์กรจากหลากหลายสาขาวิชา และมีการปรับปรุงรูปแบบให้น่าสนใจ ตลอดจนมุ่งเน้นให้เนื้อหาที่มีความเข้มข้นทางวิชาการมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยในวารสารฉบับนี้มีบทความที่น่าสนใจมากมาย ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีกายภาพของไข่เค็มในระหว่างกระบวนการทอด, ผลของปริมาณแป้งข้าวทับทิมชุมแพที่ใช้ทดแทนแป้งมันสำปะหลังบางส่วนต่อคุณลักษณะของข้าวเกรียบ, การกำจัดยาโคลิสตินในน้ำโดยการดูดซับด้วยเกล็ดถ่านกัมมันต์ที่ดัดแปรด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์, การประเมินสมบัติของแหล่งน้ำธรรมชาติภาคกลางและภาคเหนือสำหรับการทดสอบการสลายตัวของชีวภาพตามมาตรฐานสากล OECD 301A, การนำน้ำกลับคืนมาจากการบำบัดน้ำระบายทิ้งเข้มข้นจากระบบแยกเกลือจากน้ำขนาดเล็กในจังหวัดนครราชสีมา และการตรวจวิเคราะห์ปริมาณตะกั่วในกระดาศัสมัสด้านอาหารด้วยเทคนิคอินดักทีฟฟลูออโรสเปกโตรเมตรี

กองบรรณาธิการวารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ กรมวิทยาศาสตร์บริการ ขอขอบคุณผู้สนับสนุนทุกท่านที่ส่งบทความมาให้พิจารณาตีพิมพ์เผยแพร่องค์ความรู้และงานวิจัย ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการปฏิบัติงานด้านการพัฒนาวิทยาศาสตร์วิจัย และนวัตกรรมของประเทศ ขอขอบพระคุณผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่านสำหรับการพิจารณาบทความ (Peer review) โดยได้ให้ข้อเสนอแนะในการปรับปรุงแก้ไขบทความต่าง ๆ ให้มีความถูกต้องทางวิชาการ และอ่านได้เข้าใจง่ายขึ้น และขอขอบพระคุณทุกท่านที่มีส่วนในการจัดทำวารสารฉบับนี้ให้เสร็จสมบูรณ์ด้วยดี กองบรรณาธิการหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวารสารฉบับนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับผู้อ่านทุกท่านในการเสริมสร้างองค์ความรู้ทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อพัฒนางาน หรือช่วยแก้ปัญหาที่พบในการปฏิบัติงานได้ และขอขอบคุณผู้อ่านที่ได้ให้ความสนใจติดตามวารสารนี้อย่างต่อเนื่อง โปรดติดตามความรู้ และงานวิจัยดี ๆ จากวารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ กรมวิทยาศาสตร์บริการ ฉบับต่อไปนะคะ

ดร. อรสา อ่อนจันทร์
บรรณาธิการวิชาการ

จริยธรรมการตีพิมพ์

วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ กรมวิทยาศาสตร์บริการ (Bulletin of Applied Sciences)

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

บทบาทและหน้าที่ของกองบรรณาธิการ

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

11. บรรณาธิการเป็นผู้ควบคุมและให้ความสำคัญต่อการตีพิมพ์เป็นรูปเล่มของวารสารในแต่ละฉบับ รวมถึงการเผยแพร่ทางเว็บไซต์วารสาร ให้มีความถูกต้อง สมบูรณ์ และออกตรงตามกำหนดเวลา อย่างเคร่งครัด

บทบาทและหน้าที่ของผู้นิพนธ์

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

บทบาทและหน้าที่ของผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ

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

ในการประเมินบทความรอบที่ 2 ซึ่งผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความจะเป็นผู้พิจารณาการแก้ไขปรับปรุงบทความดังกล่าว เมื่อพิจารณาแล้วเสร็จ ผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความควรแจ้งผลการพิจารณาสุดท้ายให้กองบรรณาธิการได้รับทราบต่อไป เช่น แจ้งเห็นควรตอบรับการตีพิมพ์ หรือแจ้งปฏิเสธการตีพิมพ์ หรือแจ้งข้อเสนอแนะเพิ่มเติมสำหรับการแก้ไขปรับปรุงในรอบที่ 2

การคุ้มครองข้อมูลส่วนบุคคล

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

Publication ethics

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

Duties of Editors

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

Duties of Authors

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

Duties of Reviewers

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

Personal Data Protection

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

1

การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีกายภาพของไข่เค็มในระหว่างกระบวนการชุบสี 12
ปัทมา สุภาผล, ธนวัฒน์ ศิริพิทักษ์โยธิน, สุทธชยา ชื่นวัฒนา, ธัญวลัย วงษ์สุวรรณ,
ชนิษฐา อินทร์ประสิทธิ์

2

ผลของปริมาณแป้งข้าวทับทิมชุมแพที่ใช้ทดแทนแป้งมันสำปะหลังบางส่วน 26
ต่อคุณลักษณะของข้าวเหนียว
จิราภรณ์ บุราคร, ปราณต์ ปิ่นทอง, อดุลรัฐ รัมมะพันธ์, พรประภา ทองใบ,
มนทกานต์ เขี่ยมแก้ว, ณัฐชา ศิริวาริน

3

การกำจัดยาโคลิสตินในน้ำโดยการดูดซับด้วยเกล็ดถ่านกัมมันต์ที่ดัดแปร 35
ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์
สินีนาง ไทยบุญรอด, ชญาณิลห์ หาญวสินโรจน์, อัดถจรีย์ สมัตตะ,
อารีรัตน์ ชณะรัตน์, เอกนรินทร์ ธนายุพงศ์, พัททพงษ์ งามเมืองตึง, พิรกานต์ บรรเจิดกิจ,
เสาวลักษณ์ เฉลียวเลิศอำพล, ณัฐพร พิมพะ

4

การประเมินสมบัติของแหล่งน้ำธรรมชาติภาคกลางและภาคเหนือ 49
สำหรับการทดสอบการสลายตัวทางชีวภาพตามมาตรฐานสากล OECD 301A
นิตยาพร สมภักดิ์, จันทนา พันธุ์พราน, มีรัตน์ ดีเจริญ, นพวรรณ สระแสงตา,
ชาญชัย คหาปนะ, วิทวัส เยื้อย, ศิโรรัตน์ ตั้งสถิตพร, อัญชนา พัฒนสุพงษ์

5

การนำน้ำกลับคืนมาจากการบำบัดน้ำระบายทิ้งเข้มข้นจากระบบแยกเกลือ 61
จากน้ำขนาดเล็กในจังหวัดนครราชสีมา
สรวิทย์ เชื้อสุวรรณ, หทัยรัศมี เตชะปัญญารักษ์, นิรัตน์ ภูทัตหมาก

6

การตรวจวิเคราะห์ปริมาณตะกั่วในกระดาส้มผัสอาหาร 75
ด้วยเทคนิคอินดักทีฟฟลักซ์เพิลพลาสมาแมสสเปกโทรเมตรี
วรุณรัตน์ บุรณะกุล, เนตรศิริพันธ์ กฤษวงค์, วีรภัทร รามณี, นุจรินทร์ พลหงษ์,
จิตติไล เวฬุวนารักษ์, วีระ สอนโสง

1

Changes in physico-chemical properties of salted egg during sous-vide processing 12
Pattama Supaphon, Thanawat Siriphithakyothin, Sutachaya Chuenwatthana,
Thunwalai Wongsawan, Khanittha Inprasit

2

Effect of tapioca flour partial substitution with Chum Phae ruby rice flour on the 26
characteristics of crackers
Jiraporn Burakorn, Pran Pinthong, Anurat Rammaphan, Pornprapa Tongbai,
Montakan Aimkaew, Nattacha Siriwarin

3

Adsorption removal of colistin from aqueous solution using NaOH-modified 35
granular activated carbon
Sineenat Thaiboonrod, Chayanin Hanwarinroj, Attajaree Smata, Areerat Kanarat,
Eknarin Thanayupong, Pitak Ngammuangtueng, Peerakarn Banjerdkij,
Saowaluk Chaleawlert-umpon, Nuttaporn Pimpha

4

Evaluation of natural water properties in the central and northern regions for 49
ready biodegradability testing according to OECD 301A
Nidtayaporn Sompakdee, Jantana Panpran, Mirantee Deecharern,
Nopphawan Srasaengta, Chanchai Kahapana, Witthawat Yueayai,
Sirorat Tungsatitporn, Anchana Pattanasupong

5

Water recovery of brine water treatment from a small-scale desalination system 61
in Nakhon Ratchasima
Saranbhak Chuersuwan, Hathairath Techapanyarak, Nirat Phutadmark

6

Determination of lead in paper for food contact by inductively coupled plasma 75
mass spectrometry
Warunrat Buranakul, Netsirin Gissawong, Veerapat Ramanee, Nootjarin Phonhong,
Jitwilai Waluvanarak, Weera Suanthaisong

การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีกายภาพของไข่เค็ม ในระหว่างกระบวนการซูล์ว Changes in physico-chemical properties of salted egg during sous-vide processing

ปัทมา สุภาผล¹, ธนวัฒน์ ศิริพิทักษ์โยธิน¹, สุทธชยา ชื่นวัฒนา¹,
ธัญวลัย วงษ์สุวรรณ¹, ขนิษฐา อินทร์ประสิทธิ์¹

Pattama Supaphon¹, Thanawat Siripithakyothin¹, Sutachaya Chuenwatthana¹,
Thunwalai Wongsawan¹, Khanittha Inprasit¹

รับบทความ 8 กุมภาพันธ์ 2567 แก้ไขบทความ 20 พฤษภาคม 2567 ยอมรับตีพิมพ์ 20 พฤษภาคม 2567

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติด้านเคมีและด้านกายภาพของไข่เค็มที่ผ่านการดองร่วมกับการใช้เทคนิคซูล์วที่ความเข้มข้นของสารละลายเกลือร้อยละ 28-30 (โดยน้ำหนัก) อุณหภูมิ 50 ± 2 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลาในการดองที่ 0 (ไข่ดิบ), 1, 2, 3, 4, 5 และ 6 วัน พบว่าการใช้เทคนิคซูล์วร่วมกับกระบวนการดองไข่ส่งผลให้ค่าสมบัติด้านเคมีและด้านกายภาพของไข่เค็มที่ระยะเวลาในการดองต่างกัน มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อระยะเวลาในการดองนานขึ้นส่งผลให้ไข่แดงเปลี่ยนจากสีเหลือง-แดง ในไข่ดิบ เป็นสีแดงและมีสีแดงที่เข้มข้น มีความกลมมนสูงขึ้น และมีลักษณะเนื้อสัมผัสที่แข็งขึ้น ในขณะที่ไข่ขาวชั้นในมีความหนืดลดลงและไข่ขาวชั้นนอกและชั้นในมีความชุ่มมากขึ้น จากผลการเปรียบเทียบค่าสีของไข่แดงด้วย Munsell book และการตรวจวัดค่าความสูงของไข่แดงด้วยเครื่องเวอร์เนียร์ คาลิเปอร์ พบว่าไข่แดงมีค่าสีอยู่ในช่วงเหลืองแดง-แดง และมีค่าความสูงอยู่ในช่วง 16.16-26.27 มิลลิเมตร นอกจากนี้ จากผลการตรวจวัดลักษณะเนื้อสัมผัสของไข่แดงด้วยวิธีทดสอบแบบ TPA แสดงให้เห็นว่าระยะเวลาในการดองนานขึ้นส่งผลให้ค่าความแข็ง ค่าความยืดหยุ่น และค่าความเหนียวและความหยุ่นตัว มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ($p < 0.05$) แต่ไม่ส่งผลต่อค่าการยึดเกาะกันภายในเนื้ออาหาร ($p < 0.05$) ในขณะที่เมื่อระยะเวลาในการดองนานขึ้นปริมาณความเข้มข้นของเกลือที่ตรวจวัดได้ในไข่แดงและไข่ขาวมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้น ($p < 0.05$) โดยมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 0.42-0.97 และ 0.42-4.88 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังคงรักษาสีและลักษณะด้านรสชาติและได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (มผช. 27/2550 เรื่องไข่เค็ม) เป็นการเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันทางการค้าและเพิ่มโอกาสทางการตลาดให้แก่ผู้ประกอบการ

คำสำคัญ: ไข่เค็ม, คุณสมบัติทางเคมีกายภาพ, เทคนิคซูล์ว, ออสมิซิส

¹กองเทคโนโลยีชุมชน กรมวิทยาศาสตร์บริการ

Abstract

This research investigated the changes in chemical and physical properties in salted eggs that had been pickled along with employing the sous-vide technique with a salt concentration of 28%-30% (weight per weight) at a temperature of 50 ± 2 degrees Celsius. During the pickling process on day 0 (raw egg), 1, 2, 3, 4, 5, and 6, it was observed that employing the sous-vide technique along with the pickling process led to statistically significant differences in the chemical and physical properties of the salted egg ($p < 0.05$) at different pickling durations. With increased duration of the pickling process, the appearance of the egg yolk changed from yellow-red (raw egg) to red and deeper red. The egg became rounder, more prominent, and firmer while the exterior egg white changed from being transparent to cloudier. According to a color comparison using the Munsell book for the egg yolk and the height values of the egg yolk with a Vernier caliper, it was found that the egg yolk had a color ranging from yellow-red to red and the height ranging between 16.16-26.27 millimeters. In addition, from the results of texture analysis, the egg yolk using the TPA testing method revealed that an increased pickling duration led to a tendency of a significant increase in hardness, springiness, and gumminess values ($p < 0.05$), while cohesiveness value remained unaffected ($p < 0.05$). Additionally, the salt concentration analyzed in both egg yolk and egg white showed a significant increase in quantity ($p < 0.05$) as the pickling duration extended, with values ranging between 0.42-0.97 and 0.42-4.88 percent, respectively. The mentioned changes resulted from the penetration of salt solution into the egg cells and solutions that dissolved in water within the egg cells diffused outward throughout the egg cell membrane along with the water. This resulted in alterations in the chemical and physical properties of the egg. The resulted product met the standards set by the Thai Community Product Standards (TCPS 27/2550 on Salted Eggs). This is to elevate commercial competitiveness and increase marketing opportunities for entrepreneurs.

Keywords: Salted egg, Physico-chemical properties, Sous-vide technique, Osmosis

¹Division of Community Technology, Department of Science Service

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

1. บทนำ (Introduction)

ไข่ดอง (Pickled egg) เป็นผลิตภัณฑ์แปรรูปจากไข่โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของไข่ [1] การดองไข่สามารถทำได้โดยการนำไข่ดิบมาผ่านกระบวนการดองด้วยสารละลายเกลือหรือที่เรียกว่า ไข่เค็ม (Salted egg) ซึ่งเป็นที่นิยมในอุตสาหกรรมและเป็นผลิตภัณฑ์แปรรูปจากไข่ที่มีมาตั้งแต่สมัยโบราณ นิยมบริโภคกันอย่างแพร่หลายในประเทศแถบเอเชียตะวันออกเฉียงและเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ [1-2] ซึ่งในประเทศไทยนิยมนำมารับประทานร่วมกับข้าวต้มหรือโจ๊ก นอกจากนี้ยังนิยมนำไข่แดงมาใช้เป็นส่วนผสมในอุตสาหกรรมเบเกอรี่และขนมอบ [3] ในกระบวนการดองไข่ทำโดยการแช่ไข่ดิบในสารละลายเกลือที่ระยะเวลาประมาณ 15–30 วัน ซึ่งอาศัยหลักการออสโมซิส (Osmosis) และการแพร่ (Diffusion) โดยสารละลายเกลือที่มีความเข้มข้นสูงจะซึมผ่านเปลือกไข่เข้าไปด้านใน ขณะเดียวกันน้ำของไข่จะผ่านเยื่อหุ้มและเปลือกไข่ออกสู่ภายนอก น้ำที่ถูกดึงออกจากวัตถุดิบ จะทำให้ค่าวอเตอร์แอคทิวิตี (Water activity, a_w) ลดลงและสามารถควบคุมการเจริญของจุลินทรีย์ที่ก่อโรค (Pathogen) ได้ ไข่เค็มจึงสามารถเก็บรักษาไว้ได้นานยิ่งขึ้น นอกจากนี้การดองไข่ยังทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติด้านเคมีและด้านกายภาพ รวมถึงคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสของไข่ เช่น การเปลี่ยนสีของไข่แดงและไข่ขาว เกิดสีน้ำตาลของไข่ขาวปฏิกิริยา Maillard เนื่องจากน้ำตาลรีดิวซ์ทำปฏิกิริยากับกรดอะมิโนเมื่อถูกความร้อน ไข่แดงเปลี่ยนโทนสีจากสีส้ม-เหลือง เป็นสีส้มแดง-แดง เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของรงควัตถุ มีเนื้อสัมผัสที่แข็งขึ้นและมีเนื้อสัมผัสเป็นเม็ด ๆ คล้ายเม็ดทราย ซึ่งคุณลักษณะดังกล่าวเป็นเอกลักษณ์เฉพาะของไข่แดงเค็มที่ผู้บริโภคนิยมนำไปใช้ในการประกอบอาหาร ส่วนไข่ขาวดิบจะมีความหนืดลดลง [1-2,4-8] ในปัจจุบันความต้องการของไข่เค็มในท้องตลาดมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่กระบวนการผลิตไข่เค็มแบบดั้งเดิมทั้งแบบไข่เค็มดองและไข่เค็มพอกมีข้อจำกัดในเรื่องของเวลาในการผลิตที่ใช้ระยะเวลาในการดองหรือพอกที่นาน โดยประมาณ 15-30 วัน

ซูสวีด (Sous-vide) มาจากภาษาฝรั่งเศส แปลว่า Under vacuum เทคนิคซูสวีดจึงเป็นการประยุกต์ใช้กับความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเดือดของน้ำในการทำอาหารด้วยภาชนะที่ทนความร้อนและปิดสนิทภายใต้สภาวะสุญญากาศ ก่อนจะนำไปผ่านกระบวนการให้ความร้อนที่อุณหภูมิคงที่และเก็บรักษาภายใต้อุณหภูมิที่ 0-3 องศาเซลเซียส [9-10] ซึ่งการใช้ความร้อนภายใต้สภาวะสุญญากาศจะส่งผลต่อการเร่งสภาวะการซึมผ่านของสารละลายที่มีความเข้มข้นต่างกันได้เร็วขึ้น เนื่องจากพลังงานจลน์ของสารละลายที่สูงขึ้น ทำให้อากาศที่อยู่ในช่องว่างระหว่างเซลล์แพร่ออกมาจนเซลล์ได้รวดเร็ว สารละลายเกลือจึงสามารถแพร่เข้าไปแทนที่ได้รวดเร็วขึ้น [11-12] นอกจากนี้ ยังมีรายงานว่าการผลิตไข่แดงเค็มในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 40-60 องศาเซลเซียส สามารถช่วยให้อัตราการแพร่ของสารละลายเกลือเข้าสู่ไข่แดงเกิดขึ้นเร็วกว่าการผลิตไข่แดงเค็มในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 0-10 องศาเซลเซียส และเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและกายภาพของไข่แดงเร็วกว่า [13] ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการใช้เทคนิคซูสวีดสามารถเป็นแนวทางในการเร่งสภาวะในการดองไข่ ทำให้สารละลายเกลือซึมผ่านรูพรุนของเปลือกไข่และเยื่อหุ้มไข่ของไข่ขาวและไข่แดงได้เร็วขึ้น

ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการพัฒนาเครื่องมือและกระบวนการผลิตเพื่อลดระยะเวลาในการทำไข่เค็มร่วมกับการใช้เทคนิคซูสวีดซึ่งเป็นการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำภายใต้สภาวะสุญญากาศ เพื่อช่วยให้สามารถผลิตไข่เค็มได้ปริมาณมากและรวดเร็วเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีดั้งเดิม ทั้งยังคงรักษาอัตลักษณ์ด้านรสชาติและได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (มผช. 27/2550 เรื่องไข่เค็ม) รวมทั้งเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันทางการค้าและเพิ่มโอกาสทางการตลาดให้แก่ผู้ประกอบการ

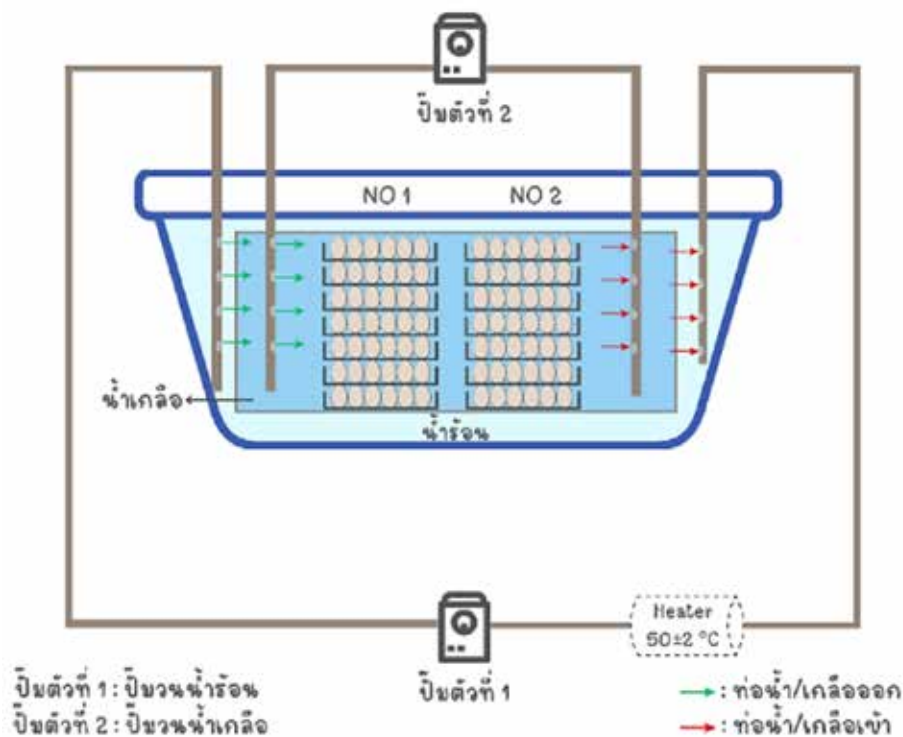
2. วิธีการวิจัย (Experimental methods)

2.1 การเตรียมวัตถุดิบไข่เปิด

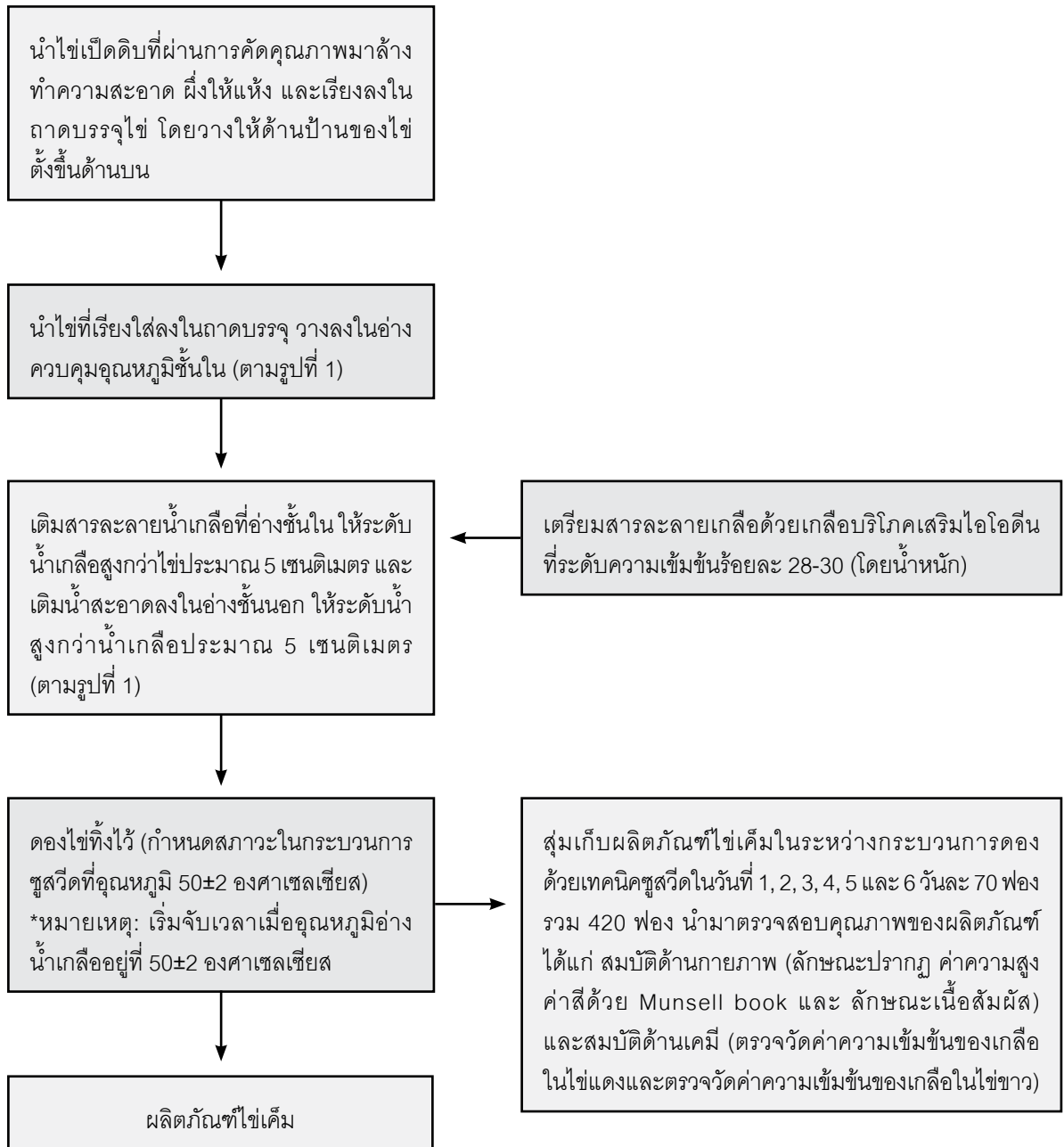
ซื้อไข่เปิดดิบ เบอร์ 1 (น้ำหนัก 65-70 กรัมต่อฟอง) จากร้านค้าในตลาดห้วยขวาง (Huai Kwang Market) กรุงเทพมหานคร โดยเลือกไข่เปิดที่มีลักษณะสด และเปลือกไข่มีสีปกติตามธรรมชาติ สะอาด ผิวเปลือกเรียบ สม่ำเสมอทั้งฟอง และไม่มีรอยบุบร้าวเมื่อมองด้วยตาเปล่า หลังจากนั้นนำมาล้างทำความสะอาดด้วยน้ำสะอาด วางเรียงลงในถาดบรรจุไข่โดยให้ด้านข้างของไข่ตั้งขึ้น โดย 1 ถาดไข่ บรรจุไข่จำนวน 30 ฟอง วางผึ่งให้แห้ง เพื่อนำมาใช้ในการดองไข่ด้วยเทคนิคซูสวีดต่อไป

2.2 กระบวนการดองไข่ด้วยเทคนิคซูสวิด

กระบวนการดองไข่ด้วยเทคนิคซูสวิดทำได้โดยนำไข่เป็ดดิบที่วางเรียงลงในถาดบรรจุไข่จากข้อ 2.1 มาวางลงในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่กรมวิทยาศาสตร์บริการพัฒนาขึ้น โดยอ่างควบคุมอุณหภูมิประกอบด้วย 3 องค์ประกอบหลัก คือ 1. อ่างน้ำ 2 ชั้น (ชั้นในบรรจุสารละลายเกลือ ชั้นนอก บรรจุน้ำร้อน) ทำจากวัสดุที่ทนร้อน ทนต่อการกัดกร่อนของเกลือและมีความปลอดภัย (ไม่มีการเฉีปน และสารเคมีตกค้างในอาหาร) ต่อผู้บริโภค เช่น พลาสติกหรือสแตนเลส ชนิดที่ใสกับอาหารได้ สามารถรองรับการผลิตไข่เค็มได้ 200-540 ฟองต่อรอบการผลิต 2. ระบบทำความร้อน (Heater) ขนาดกำลังไฟฟ้า 1,500 วัตต์ และใช้ระบบท่อกระจายน้ำร้อน ส่งผ่านน้ำร้อนไปอ่างชั้นใน (สารละลายเกลือ) และอ่างชั้นนอก (น้ำร้อน) และถูกควบคุมด้วยโมดูลตั้งค่าอุณหภูมิชนิด PID (Proportional integral derivative) 3. ปัมที่สามารถทนต่อความร้อนและการกัดกร่อนของสารละลายเกลือ ใช้สำหรับการหมุนเวียนน้ำและกระจายน้ำร้อนและสารละลายเกลือ แสดงดังรูปที่ 1 และมีแผนผังกระบวนการผลิตแสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 1 ต้นแบบอ่างควบคุมอุณหภูมิที่กรมวิทยาศาสตร์บริการพัฒนาขึ้น เพื่อใช้ในกระบวนการดองไข่ด้วยเทคนิคซูสวิด



รูปที่ 2 แผนผังกระบวนการผลิตไข่เค็มด้วยเทคนิคชูสวิต

2.3 การตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์ไข่เค็ม

นำไข่เค็มที่ผ่านกระบวนการดองด้วยเทคนิคชูสวิต โดยสุ่มเก็บไข่เค็มในวันที่ 0 (ไข่ดิบ), 1, 2, 3, 4, 5 และ 6 จากข้อ 2.2 มาตรวจสอบสมบัติด้านกายภาพ ได้แก่ ลักษณะปรากฏ ค่าความสูง ค่าสีด้วย Munsell book ลักษณะเนื้อสัมผัสของไข่แดงเค็ม และสมบัติด้านเคมี ได้แก่ การตรวจวัดค่าความเข้มข้นของเกลือในไข่แดงและไข่ขาวของผลิตภัณฑ์ไข่เค็ม โดยมีวิธีการและรายละเอียด ดังนี้

2.3.1 การตรวจสอบลักษณะปรากฏของไข่เค็ม

นำไข่เค็มที่สุ่มเก็บมาสังเกตลักษณะปรากฏของไข่แดงและไข่ขาว จากนั้นบันทึกผลจากการสังเกตด้วยตาเปล่า เพื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงที่ระยะเวลาในการดองแตกต่างกัน

2.3.2 การวัดค่าความสูงของไข่แดงเค็ม

นำไข่เค็มที่สุ่มเก็บมาแยกไข่แดงและไข่ขาวออกจากกัน จากนั้นนำไข่แดงมาวัดค่าความสูงของไข่แดงด้วยเครื่องเวอร์เนียร์คาลิเปอร์ แบบดิจิตอล (Mitutoyo CD6-ASX Digimatic Caliper, Japan) รายงานผลด้วยทศนิยม 2 ตำแหน่ง ในหน่วยมิลลิเมตร (mm)

2.3.3 การวัดค่าสีของไข่แดงเค็ม

นำไข่เค็มที่สุ่มเก็บมา แยกไข่แดงและไข่ขาวออกจากกัน จากนั้นนำไข่แดงที่ได้มาวัดค่าสี ด้วยหนังสือคู่มือเทียบสี (Munsell book of colour matte edition) บันทึกหรัสสี (Hue) ค่าความสว่างของสี (Value) และค่าความเข้มของสี (Chroma)

2.3.4 การตรวจวัดลักษณะเนื้อสัมผัสของไข่แดงเค็ม

นำไข่เค็มที่สุ่มเก็บมา แยกไข่แดงและไข่ขาวออกจากกัน จากนั้นนำไข่แดงที่ได้มาวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัสด้วยเครื่องวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัส (Texture analyzer) ทดสอบด้วยวิธี Texture Profile Analysis (TPA) โดยใช้หัววัดแบบแผ่นแบน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร (Aluminum compression plate 50 mm) ความเร็วของหัววัดเท่ากับ 1 มิลลิเมตรต่อวินาที ใช้ระยะแรงกดร้อยละ 20 ของความสูงตัวอย่าง และรายงานผลเป็นค่าความแข็ง (Hardness), การยึดเกาะกันภายในเนื้ออาหาร (Cohesiveness), ค่าความยืดหยุ่น (Springiness) และค่าความเหนียวและความหยุ่นตัว (Gumminess)

2.3.5 การตรวจวัดค่าปริมาณเกลือในไข่เค็ม

นำไข่เค็มที่ผ่านกระบวนการดองด้วยเทคนิคสุสวิดมาแยกไข่แดงและไข่ขาวออกจากกัน จากนั้นนำมาวิเคราะห์ปริมาณเกลือตามวิธีของ AOAC [14] โดยชั่งไข่แดงและไข่ขาว 1 กรัม เติมสารละลายมาตรฐาน 0.1 N AgNO_3 จำนวน 20 มิลลิลิตร และ เติม HNO_3 จำนวน 10 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปให้ความร้อน 10 นาที หรือจนกระทั่งส่วนผสมทั้งหมดละลายเป็นเนื้อเดียวกัน (ยกเว้นตะกอนของ AgCl) เมื่อครบเวลารอให้สารละลายเย็นตัวลงในอุณหภูมิห้อง หยด Ferric alum indicator ความเข้มข้นร้อยละ 5 จากนั้นนำไปไทเทรตด้วยสารละลายมาตรฐาน 0.1 N KSCN จนกระทั่งสารละลายเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล บันทึกปริมาตรของ KSCN ที่ใช้ และคำนวณหาปริมาณร้อยละของเกลือในตัวอย่าง ดังสมการที่ (1)

$$\text{ร้อยละปริมาณเกลือ} = 5.8 \times [(V_1 \times N_1) - (V_2 \times N_2)] / W \dots \dots \dots (1)$$

โดยที่ V_1 คือ ปริมาตรของ AgNO_3 (มิลลิลิตร)

N_1 คือ ความเข้มข้นของ AgNO_3 (N)

V_2 คือ ปริมาตรของ KSCN (มิลลิลิตร)

N_2 คือ ความเข้มข้นของ KSCN (N)

W คือ น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)

2.4 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p < 0.05$) ด้วยวิธี Duncan's new multiple range test ด้วยโปรแกรม SPSS

3. ผลและวิจารณ์ (Results and discussion)

3.1 ผลการตรวจสอบลักษณะปรากฏของไข่เค็ม

ลักษณะปรากฏของไข่เค็มที่ผ่านกระบวนการดองด้วยเทคนิคสุสวิดที่ระยะเวลาในการดองวันที่ 0 (ไข่ดิบ), 1, 2, 3, 4, 5 และ 6 พบว่าลักษณะปรากฏของไข่แดงและไข่ขาวมีลักษณะที่แตกต่างกัน แสดงดังตารางที่ 1 เมื่อใช้ตัวอย่างระยะเวลาการดองในวันที่ 0 (ไข่ดิบ)

จากการเปลี่ยนของไข่เค็มดิบที่ผ่านกระบวนการดองด้วยเทคนิคสุญญากาศในระยะเวลาการดองที่ต่างกัน จากลักษณะปรากฏสังเกตได้ว่าเมื่อระยะเวลาในการดองนานขึ้น ไข่แดงจะมีสีแดงเข้มขึ้น มีลักษณะกลมมนสูงขึ้น เนื้อสัมผัสแข็งขึ้น ส่วนไข่ขาวชั้นในมีความข้นหนืดลดลงและมีความขุ่นบาง ไข่ขาวชั้นนอกมีความใสและสีเข้มขึ้น การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากการที่สารละลายเกลือซึมผ่านเข้าสู่ภายในเซลล์ไข่ รวมทั้งสารที่ละลายน้ำได้ในไข่ซึมออกจากภายในเซลล์ไข่ผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ (แพร่ออกจากโปรตีนไข่ขาว) สู่ภายนอกเซลล์ทำให้โปรตีนเสียสภาพ เนื่องจากเซลล์สูญเสียน้ำโดยกระบวนการดังกล่าวเกิดขึ้นทั้งในไข่แดงและไข่ขาว [5,9]

3.2 ผลการวัดค่าความสูง (ความนูน) ของไข่แดงเค็ม

ค่าความสูงของไข่แดงที่ผ่านกระบวนการดองด้วยเทคนิคสุญญากาศที่ระยะเวลาในการดองวันที่ 0 (ไข่ดิบ), 1, 2, 3, 4, 5 และ 6 มีความสูงในช่วง 16.16-26.27 มิลลิเมตร โดยการดองไข่วันที่ 3, 4, 5 และ 6 มีความสูงเพิ่มขึ้นจากไข่ดิบ (วันที่ 0) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) และการดองไข่วันที่ 4, 5 และ 6 มีความสูงต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) แสดงดังตารางที่ 2 ซึ่งผลที่ได้มีความสอดคล้องกับลักษณะปรากฏของไข่แดงเค็ม แสดงดังตารางที่ 1 กล่าวคือ ไข่แดงเริ่มมีลักษณะรูปร่างเป็นทรงกลมมนและสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดในวันที่ 3 และความสูงของไข่แดงเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงที่น้อยลงจนกระทั่งสังเกตไม่พบการเปลี่ยนแปลงในช่วงระยะหลังของกระบวนการดอง (ช่วงระยะเวลาในการดองวันที่ 4-6) โดยการเปลี่ยนแปลงลักษณะรูปร่าง ความกลม ความสูง (ความนูน) ของไข่แดง ในระหว่างกระบวนการดองเกิดจากการเปลี่ยนโครงสร้างของโปรตีนภายในไข่แดงส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว [2,15]

ตารางที่ 1 ลักษณะปรากฏของไข่เค็มที่ผ่านกระบวนการดองด้วยเทคนิคสุญญากาศที่ระยะเวลาในการดองต่างกัน

วันที่	ลักษณะปรากฏ	คำอธิบาย
0 (ไข่ดิบ)		ไข่แดง: มีรูปทรงแบนนูน มีสีเหลือง-แดง ไข่ขาว: ไข่ขาวชั้นในมีความข้นหนืด ไข่ขาวชั้นนอกส่วนใสมีความใสและโปร่งแสง
1		ไข่แดง: มีรูปทรงแบนนูน มีสีส้ม-แดงเข้มขึ้น ไข่ขาว: ไข่ขาวชั้นในมีความข้นหนืด ไข่ขาวชั้นนอกส่วนใสมีความใสและโปร่งแสง
2		ไข่แดง: มีรูปทรงกลมมน สูงขึ้น มีสีแดง ไข่ขาว: ไข่ขาวชั้นในมีความข้นหนืด ไข่ขาวชั้นนอกส่วนใสมีความใสและโปร่งแสง
3		ไข่แดง: มีรูปทรงกลม นูน สูง มีสีแดงเข้ม ผิวของไข่เริ่มมีความแข็ง ด้านในของไข่แดงยังคงเป็นของเหลว ไข่ขาว: ไข่ขาวชั้นในมีความข้นหนืดลดลง ไข่ขาวชั้นนอกส่วนใสมีความใสและมีสีเข้มขึ้น

วันที่	ลักษณะปรากฏ	คำอธิบาย
4		ไข่แดง: มีรูปทรงกลม นูน สูง มีสีแดงเข้ม ผิวของไข่มีความแข็ง ด้านในของไข่แดงยังคงเป็นของเหลว ไข่ขาว: ไข่ขาวชั้นในมีความข้นหนืดลดลง ขุ่น ไข่ขาวชั้นนอกส่วนใสมีความใสและมีสีเข้มขึ้น
5		ไข่แดง: มีรูปทรงกลม นูน สูง มีสีแดงเข้ม ผิวของไข่มีความแข็ง ด้านในของไข่แดงยังคงมีของเหลวอยู่เล็กน้อย ไข่ขาว: ไข่ขาวชั้นในมีความข้นหนืดลดลง ขุ่น ไข่ขาวชั้นนอกส่วนใสมีความใสและมีสีเข้มขึ้น
6		ไข่แดง: มีรูปทรงกลม นูน สูง มีสีแดงเข้ม ผิวของไข่มีความแข็ง ด้านในของไข่แดงมีลักษณะเป็นของแข็งกึ่งแข็งกึ่งเหลว ไข่ขาว: ไข่ขาวชั้นในมีความข้นหนืดลดลง ขุ่น ไข่ขาวชั้นนอกส่วนใสมีความใสและมีสีเข้มขึ้น

3.3 ผลการวัดค่าสีของไข่แดงเค็ม

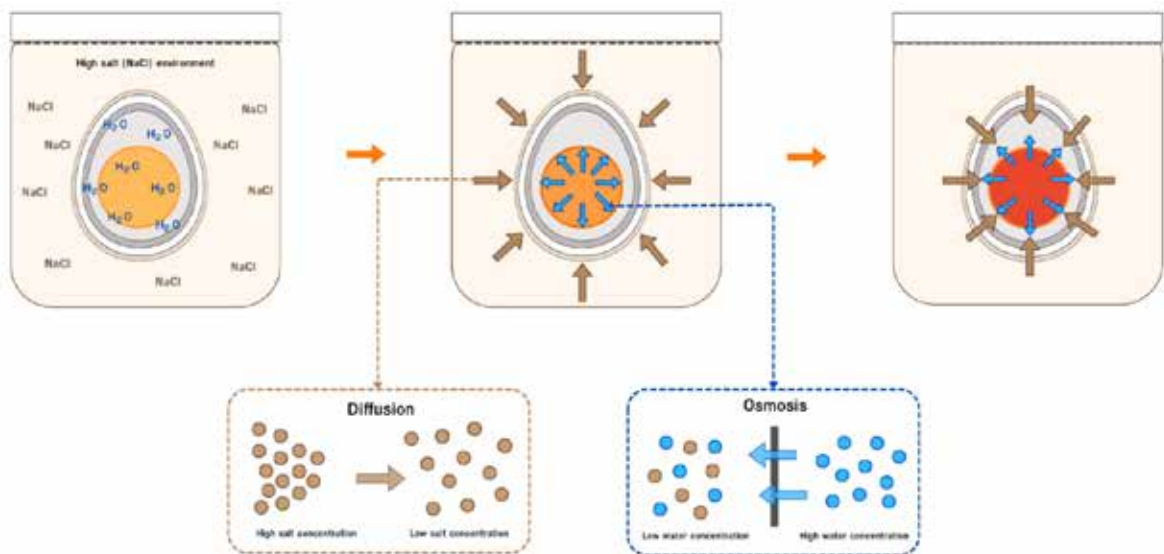
การเทียบค่าสีของไข่แดงด้วย Munsell book ของไข่เค็มที่ผ่านกระบวนการดองด้วยเทคนิคสุสวิด ที่ระยะเวลาในการดองวันที่ 0 (ไข่ดิบ), 1, 2, 3, 4, 5 และ 6 พบว่าค่าสีของไข่แดงมีค่าสีอยู่ในช่วงสีเหลืองแดง-แดง แสดงดังตารางที่ 2 ค่าสีของไข่แดงในวันที่ 0 มีสีอยู่ในช่วงสีเหลือง-แดง โดยมีค่า Hue เท่ากับ 1.25 YR ค่าของ Value เท่ากับ 6 และค่า Chroma เท่ากับ 14 เมื่อระยะเวลาในการดองนานขึ้นส่งผลให้ค่าสีของไข่แดงเปลี่ยนจากช่วงสีเหลืองแดงเป็นสีแดง โดยสีของไข่แดงมีสีแดงที่เข้มขึ้น และคงที่ในระยะเวลาในการดองวันที่ 5 และ วันที่ 6 โดยมีค่า Hue เท่ากับ 8.75 R ค่าของ Value เท่ากับ 5 และค่า Chroma เท่ากับ 16 จากการศึกษาวิจัยรายงานว่าสีของไข่แดงเค็มมีสีอยู่ในช่วงสีส้ม-แดงเข้ม ซึ่งเกิดจากรังควัตถุในกลุ่มแคโรทีนอยด์ 2 กลุ่ม ที่ให้สีเหลือง-ส้ม และ ส้ม-แดง คือ กลุ่มที่ให้สีเหลืองประกอบด้วย ลูทีน (Lutein) และ ซีแซนทีน (Zeaxanthin) และกลุ่มที่ให้สีแดงคือ แอสตาแซนทีน (Astaxanthin) ทำให้สีของไข่แดงที่เทียบค่าสีด้วย Munsell book มีช่วงสีอยู่ในช่วงสีเหลืองแดง-แดง ซึ่งสีของไข่แดงขึ้นกับชนิดและปริมาณของรังควัตถุ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย อาทิเช่น สภาพแวดล้อม และอาหารที่เลี้ยงเป็ด [6,13] นอกจากนี้ในระหว่างกระบวนการดองไข่ด้วยเทคนิคสุสวิด สีของไข่แดงเปลี่ยนจากช่วงสีเหลือง-แดง เป็นสีแดงเข้ม เมื่อระยะเวลาในการดองนานขึ้น เนื่องจากระหว่างกระบวนการดองไข่เกิดกระบวนการออกซิเดชันเป็นการแพร่ของสารละลายเกลือ (น้ำเกลือที่ใช้ในการดองไข่) ที่มีความเข้มข้นสูง ไปยังสารละลายที่มีความเข้มข้นต่ำ (ไข่ขาวและไข่แดง) แสดงดังรูปที่ 3 ส่งผลให้ปริมาณเกลือเพิ่มขึ้น ความชื้นและน้ำ ภายในไข่ลดลง ส่งผลต่อลูทีน (Lutein) ซีแซนทีน (Zeaxanthin) และแอสตาแซนทีน (Astaxanthin) ที่ละลายอยู่ในไขมันในไข่แดง มีความเข้มข้นเพิ่มสูงขึ้น ทำให้สีของไข่แดงเปลี่ยนเป็นสีแดงเข้มและคล้ำขึ้น [8,16-18] การเปลี่ยนแปลงสีของไข่แดงในระหว่างกระบวนการดอง แสดงดังรูปที่ 3

ตารางที่ 2 สมบัติทางเคมีและกายภาพของไข่เค็มหลังผ่านการดองในวันที่ 0, 1, 2, 3, 4, 5 และ 6 ด้วยเทคนิคชูสวีด

วันที่	ความสูงของไข่แดง (มิลลิเมตร)	ค่าสีของไข่แดง	ร้อยละปริมาณเกลือ	
			ไข่แดง	ไข่ขาว
0	17.31±0.78 ^c	1.25 YR 6/14	0.44±0.07 ^d	0.42±0.08 ^e
1	16.16±1.42 ^c	2.5 YR 5/14	0.42±0.05 ^d	1.90±0.50 ^d
2	16.89±2.45 ^c	10 R 5/4	0.71±0.11 ^c	2.15±0.16 ^d
3	23.76±3.45 ^b	8.75 R 5/14	0.82±0.06 ^b	3.28±0.18 ^c
4	25.77±1.50 ^a	8.75 R 5/14	0.97±0.12 ^a	4.12±0.08 ^b
5	26.27±0.96 ^a	8.75 R 5/16	0.95±0.03 ^a	4.00±0.23 ^b
6	26.03±1.80 ^a	8.75 R 5/16	0.91±0.09 ^{ab}	4.88±0.08 ^a

* หมายถึง: แสดงผลเป็นค่าเฉลี่ย (Mean±SD) โดยตัวอักษรในแต่ละคอลัมน์ (a-e) แสดงความแตกต่างของผลทดสอบอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นทางสถิติร้อยละ 95 ($p<0.05$)

: Y หมายถึง สีเหลือง R หมายถึง สีแดง



รูปที่ 3 การเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของไข่เค็มในระหว่างกระบวนการดองด้วยเทคนิคชูสวีด

3.4 ผลการตรวจวัดลักษณะเนื้อสัมผัสของไข่แดงเค็ม

ผลการวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัสด้วยวิธีทดสอบแบบ TPA ของไข่แดงเค็มที่ผ่านกระบวนการดองด้วยเทคนิคชูสวีด ในวันที่ 0 (ไข่ดิบ), 1, 2, 3, 4, 5 และ 6 รายงานผลเป็นค่าความแข็ง (Hardness) ค่าการยึดเกาะกันภายในเนื้ออาหาร (Cohesiveness) ค่าความยืดหยุ่น (Springiness) และค่าความเหนียวและความหยุ่นตัว (Gumminess) แสดงดังรูปที่ 4 พบว่า ค่า Hardness หรือค่าที่บ่งบอกแรงสูงสุดที่เกิดขึ้นระหว่างการกด ซึ่งเทียบได้กับการเคี้ยวครั้งแรกโดยมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) เมื่อระยะเวลาในการดองนานขึ้น โดยเพิ่มขึ้นจาก 0.71 นิวตัน เป็น 5.22 นิวตัน ที่ระยะเวลาการดองในช่วงวันที่ 0 ถึงวันที่ 6 แสดงดังรูปที่ 4(a) ค่า Hardness ที่ระยะเวลาการดองในช่วงวันที่ 0 ถึงวันที่ 3 มีค่าแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) โดยในช่วงเริ่มต้นของระยะการดองสารละลายเกลือที่มี

ความเข้มข้นสูงกว่าจะแพร่ไปในสารละลายที่มีความเข้มข้นต่ำ (ไข่ขาวและไข่แดง) แสดงดังรูปที่ 4 ส่งผลให้ระยะเวลาในการคองระหว่างวันที่ 1 ถึงวันที่ 3 ที่เปลือกนอกของไข่แดงเริ่มมีความแข็งแต่ด้านในยังคงเป็นของเหลว เมื่อระยะเวลาในการคองระหว่างวันที่ 4 ถึงวันที่ 6 การแพร่ของสารละลายเกลือในไข่แดงเพิ่มสูงขึ้นควบคู่กับการลดลงของน้ำภายในไข่ ทำให้ไข่แดงมีการแข็งตัวเพิ่มสูงขึ้น ส่วนที่เป็นของเหลวในไข่แดงมีปริมาณลดลง ส่งผลให้ค่า Hardness เพิ่มขึ้น [8,19-21] นอกจากนี้ปัจจัยหลักดังกล่าวที่ส่งผลให้ค่า Hardness ของไข่แดงเพิ่มขึ้น ปริมาณความชื้นในไข่แดงที่ลดลงอย่างต่อเนื่อง ทำให้เนื้อไข่แดงเกิดการอัดรวมตัวกันแน่นขึ้น ส่งผลให้ค่า Hardness ของไข่แดงเพิ่มขึ้น และทำให้ไข่แดงมีลักษณะเนื้อสัมผัสมีความกระด้างเป็นเนื้อทราย (Gritty) [19,22-23] ซึ่งถือเป็นคุณสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งของผลิตภัณฑ์ไข่เค็มที่ส่งผลต่อการยอมรับของผู้บริโภค [14]

ค่าการยึดเกาะกันภายในเนื้ออาหาร (Cohesiveness) แสดงถึงความสามารถขององค์ประกอบในเนื้ออาหารในการต้านการเสียสภาพจากการกดครั้งที่สอง ซึ่งค่า Cohesiveness ของไข่แดงเค็มที่ผ่านกระบวนการคองด้วยเทคนิคทุสวิดที่ระยะเวลาในการคองที่ต่างกันไม่ส่งผลต่อค่า Cohesiveness อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 0.22-0.37 ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยและสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ai et al. [21] พบว่า ในระหว่างกระบวนการคองไข่เกิดกระบวนการออสโมซิสของสารละลายที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน โมเลกุลของน้ำในเซลล์มีการเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีความเข้มข้นของน้ำมากไปบริเวณที่มีความเข้มข้นของน้ำน้อยผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ และทำให้เกิดแรงดันออสโมซิส (Osmotic pressure) หรือแรงดันในการออสโมซิสระหว่างกระบวนการคองไข่ที่เกิดขึ้นภายนอกและภายในของไข่แดง ซึ่งส่งผลให้ความสามารถในการรักษาโครงสร้างภายในของไข่แดงลดลง จึงทำให้ค่า Cohesiveness มีค่าน้อย

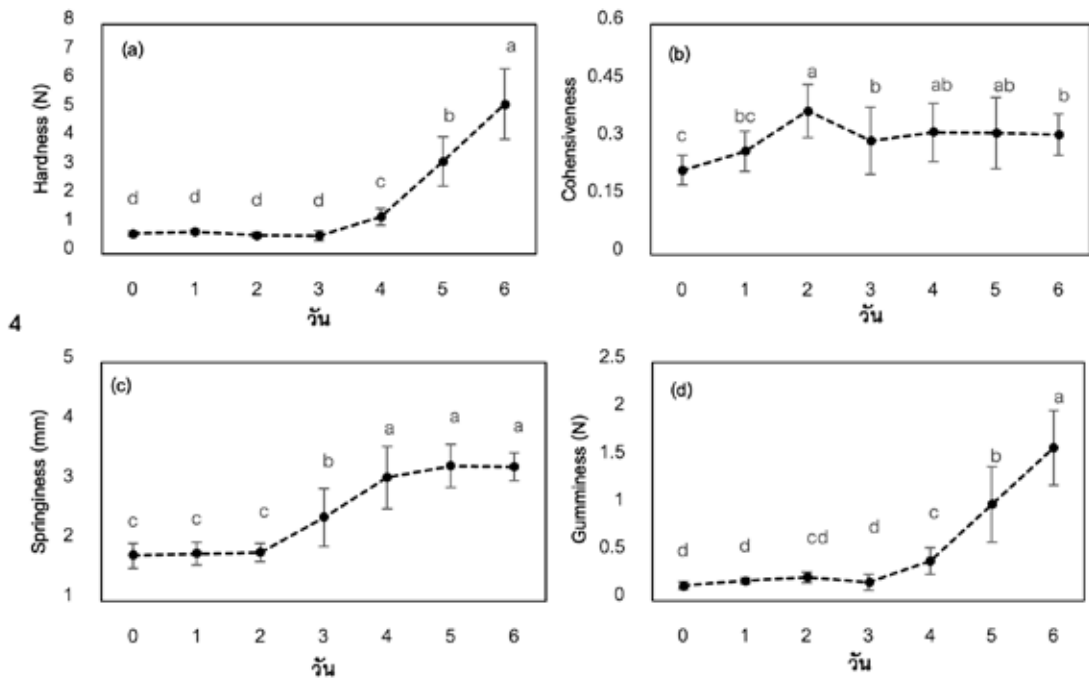
ค่าความยืดหยุ่น (Springiness) แสดงถึงค่าความสามารถในการคืนตัวกลับมาเหมือนเดิมเมื่อมีการถอนแรงออกจากการกดตัวอย่างอาหารที่ทำการทดสอบ จากการตรวจสอบค่า Springiness ของไข่แดง พบว่ามีค่า Springiness เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อระยะเวลาในการคองนานขึ้น โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 1.76-3.27 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 4(c) ค่า Springiness ที่ช่วงระยะเวลาการคองในช่วงวันที่ 0 ถึงวันที่ 2 มีค่า Springiness ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในระยะเวลาการคองวันที่ 3 ($p < 0.05$) จนกระทั่งมีค่าคงที่ระยะเวลาในช่วงการคองวันที่ 4 ถึงวันที่ 6 ในระหว่างกระบวนการตรวจสอบลักษณะเนื้อสัมผัสแบบ TPA ด้วยการกดวัดตัวอย่าง 2 ครั้ง ในการกดวัดตัวอย่างครั้งแรกทำให้โครงสร้างของไข่แดงที่ยึดเกาะกันแตกออกเป็นชั้นแยกจากกัน จากนั้นกดตัวอย่างในครั้งที่ 2 โดยใช้ตัวอย่างที่แตกออกจากกันจากการกดในครั้งที่ 1 ทำให้โครงสร้างที่แตกออกจากกันในครั้งแรกมีการแตกเพิ่มขึ้นและมีขนาดที่เล็กลง จากการเพิ่มสูงขึ้นของค่า Springiness ที่ระยะเวลาในช่วงการคองวันที่ 4 ถึงวันที่ 6 แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างของไข่แดงเค็มมีการแตกออกจากกันออกเป็นชั้นเล็ก ๆ จำนวนเพิ่มสูงขึ้นในระหว่างการทดสอบ เนื่องจากการสูญเสียน้ำ (Dehydration) และการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของไข่แดงที่ทำให้ผิวนอกของไข่แดงมีลักษณะเนื้อสัมผัสที่แข็งหรือของแข็ง [21,24]

ค่าความเหนียวและความหยุ่นตัว (Gumminess) คำนวณได้จากการคูณค่าความแข็งกับค่าการยึดเกาะกันภายในเนื้ออาหาร ($\text{Hardness} \times \text{cohesiveness}$) แสดงถึงพลังงานที่ทำให้อาหารกึ่งแข็ง ซึ่งมีค่าความแข็งน้อยแต่มีพลังงานยึดเกาะกันภายในสูง แตกออกจนสามารถกลืนได้ จากการตรวจสอบค่า Gumminess พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อระยะเวลาในการคองนานขึ้น โดยเพิ่มขึ้นจาก 0.16 นิวตัน เป็น 1.61 นิวตัน ที่ระยะเวลาในช่วงการคองวันที่ 0 ถึงวันที่ 6 แสดงดังรูปที่ 4(d) ค่า Gumminess ที่ระยะเวลาในช่วงการคองวันที่ 0 ถึงวันที่ 2 มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเรื่อย ๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในระยะเวลาการคองวันที่ 4 ถึงวันที่ 6 ($p < 0.05$)

3.5 การตรวจวัดปริมาณเกลือในไข่เค็มที่ผ่านกระบวนการดองด้วยเทคนิคสุสวิต

ผลการตรวจวัดปริมาณเกลือในไข่แดงและไข่ขาวของไข่เค็มดิบที่ผ่านกระบวนการดองด้วยเทคนิคสุสวิตในวันที่ 0 (ไข่ดิบ), 1, 2, 3, 4, 5 และ 6 พบว่าปริมาณเกลือที่วิเคราะห์ได้ในไข่แดงและไข่ขาวมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อระยะเวลาในการดองนานขึ้น แสดงดังตารางที่ 2 ปริมาณเกลือของไข่แดงและไข่ขาวมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 0.44-0.97 และร้อยละ 0.42-4.88 ตามลำดับ ปริมาณเกลือในไข่ขาวมีค่าสูงกว่าในไข่แดงตลอดระยะเวลาการดอง เนื่องจากในระหว่างกระบวนการดองไข่ เกลือจะค่อย ๆ แพร่เข้าไปในไข่ขาว จากนั้นจะเข้าไปในไข่แดงทำให้ปริมาณเกลือที่ตรวจวัดได้ในไข่ขาวมีปริมาณสูงกว่าไข่แดงที่ระยะเวลาการดองในวันเดียวกัน โดยปริมาณเกลือในไข่แดงมีอัตราการเพิ่มขึ้นที่น้อยกว่าในไข่ขาว เนื่องจากปริมาณไขมันที่เป็นส่วนประกอบในไข่แดงทำให้การซึมผ่านของสารละลายยากขึ้น ส่งผลให้ค่าปริมาณเกลือที่ตรวจวัดได้ในไข่แดงมีอัตราการเพิ่มสูงขึ้นที่น้อยกว่าในไข่ขาว [2,25] โดยปริมาณเกลือในไข่แดงสดที่ระยะเวลาการดองในวันที่ 0 มีค่าร้อยละ 0.44 ซึ่งมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระยะเวลาการดองในวันที่ 1 ($p < 0.05$) และปริมาณเกลือมีค่าเพิ่มสูงขึ้นที่ระยะเวลาในการดองในวันที่ 2 และเริ่มคงที่ที่ระยะเวลาการดองในวันที่ 4 ในขณะที่ปริมาณเกลือในไข่ขาวสดระยะเวลาการดองในวันที่ 0 มีค่าร้อยละ 0.42 และมีค่าเพิ่มสูงขึ้นที่ระยะเวลาการดองในวันที่ 1 และมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อระยะเวลาในการดองนานขึ้น จนกระทั่งที่ระยะเวลาการดองในวันที่ 6 ซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละ 4.88

Chenga et al. [15] ได้ศึกษาปริมาณเกลือที่ตรวจวัดได้ในไข่แดงและไข่ขาวภายหลังกระบวนการดองแบบวิธีทั่วไป (ดองน้ำเกลือ) โดยศึกษาผลของกระบวนการดองไข่เค็มที่ความเข้มข้นของสารละลายเกลือร้อยละ 30 (น้ำหนักต่อปริมาตร) ต่อการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของไข่เค็ม พบว่าการดองไข่เค็มที่ระยะเวลาการดอง 6 สัปดาห์ มีปริมาณเกลือในไข่แดงและไข่ขาวอยู่ระหว่างร้อยละ 0.23-2.85 และ 0.23-8.04 ตามลำดับ และที่ระยะเวลาการดองสัปดาห์ที่ 4 มีปริมาณเกลือในไข่แดงเท่ากับร้อยละ 1.08 และ ไข่ขาวเท่ากับร้อยละ 5.11 ตามลำดับ นอกจากนี้ ภูธฤทธิ์ และคณะ [26] ได้ศึกษากระบวนการดองไข่เค็มโดยใช้สารละลายเกลือความเข้มข้นร้อยละ 20 (โดยน้ำหนัก) พบว่าปริมาณเกลือในไข่แดงและไข่ขาวเท่ากับร้อยละ 0.71 และ 6.05 ตามลำดับ ที่ระยะเวลาในการดอง 15 วัน และ Xu et al. [25] ได้รายงานการตรวจวัดปริมาณเกลือในไข่แดงเท่ากับร้อยละ 8.23 และในไข่ขาวเท่ากับร้อยละ 2.25 ในระยะเวลาในการดอง 35 วัน ที่ความเข้มข้นของสารละลายเกลือร้อยละ 30 จากการศึกษาข้างต้นแสดงให้เห็นว่าการใช้เทคนิคสุสวิตร่วมกับกระบวนการดองไข่เค็มส่งผลให้ปริมาณเกลือที่ตรวจวิเคราะห์ได้มีค่าใกล้เคียงกันกับการดองไข่เค็มด้วยวิธีการดองแบบทั่วไปซึ่งใช้ระยะเวลาในการดองที่มากกว่า ด้วยเทคนิคสุสวิตเป็นการใช้ความร้อนที่อุณหภูมิที่คงที่ตลอดกระบวนการดองภายใต้สภาวะสุญญากาศ ซึ่งการใช้ความร้อนเป็นการช่วยเร่งปฏิกิริยาอนุภาคของสารละลายเกลือสามารถเคลื่อนที่ได้รวดเร็วขึ้นจากการได้รับพลังงานจลน์ที่สูงขึ้น ทำให้อัตราการแพร่ของสารละลายเพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้สารละลายเกลือสามารถแพร่เข้าไปในไข่ขาวและไข่แดงได้เร็วกว่าสภาวะปกติ [6,11,25] แสดงดังรูปที่ 3 นอกจากนี้ผลการทดลองในงานวิจัยนี้ยังสอดคล้องกับการรายงานการผลิตไข่แดงเค็มในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 40-60 องศาเซลเซียส สามารถช่วยให้อัตราการแพร่ของสารละลายเกลือเข้าสู่ไข่แดงเกิดขึ้นเร็วกว่าการผลิตไข่แดงเค็มในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 0-10 องศาเซลเซียส และเกิดการเปลี่ยนแปลงของไข่แดงเร็วกว่า [13]



รูปที่ 4 ลักษณะเนื้อสัมผัสของไข่แดงเค็มที่ผ่านกระบวนการดองด้วยเทคนิคซูสวิต ประกอบด้วย

(a) ค่า Hardness (b) ค่า Cohesiveness (c) ค่า Springiness และ (d) ค่า Gumminess

*หมายเหตุ: แสดงผลเป็นค่าเฉลี่ย (Mean±SD) โดยตัวอักษร (a-d) แสดงความแตกต่างของผลทดสอบอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นทางสถิติร้อยละ 95 ($p<0.05$)

4. สรุป (Conclusion)

การใช้เทคนิคซูสวิตในกระบวนการดองไข่เค็ม ร่วมกับอ่างที่กรมวิทยาศาสตร์บริการได้พัฒนาขึ้นส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติด้านทางเคมีและด้านกายภาพของไข่เค็ม ที่ระยะเวลาในการดองในวันที่ 0 (ไข่ดิบ), 1, 2, 3, 4, 5 และ 6 ระยะเวลาในการดองนานขึ้นส่งผลให้ไข่แดงเปลี่ยนจากสีเหลือง-แดง (ไข่ดิบ) เป็นสีแดงและมีสีเข้มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการดองนานขึ้น มีความกลมมนสูงขึ้น และมีลักษณะเนื้อสัมผัสที่แข็งขึ้น ในขณะที่ไข่ขาวชั้นในมีความหนืดลดลงและมีความชุ่มชื้น ส่วนไข่ขาวชั้นนอกมีลักษณะชุ่มชื้น ผลการเปรียบเทียบค่าสีของไข่แดงด้วย Munsell book ไข่แดงมีค่าสีอยู่ในช่วงเหลืองแดง-แดง และค่าความสูงของไข่แดงมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่ระยะเวลาในการดองนานขึ้น ส่งผลให้ค่า Hardness Springiness และ Gumminess มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ส่งผลอย่างไม่มีนัยสำคัญต่อค่า Cohesiveness ปริมาณความเข้มข้นของเกลือที่ตรวจวิเคราะห์ได้ในไข่แดงและไข่ขาวมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) เมื่อระยะเวลาในการดองนานขึ้น โดยมีร้อยละปริมาณเกลือของไข่แดงและไข่ขาวอยู่ระหว่างร้อยละ 0.42-0.97 และ 0.42-4.88 ตามลำดับ เนื่องจากการใช้เทคนิคซูสวิตมีการใช้อุณหภูมิในการเร่งปฏิกิริยา ช่วยให้อนุภาคของสารละลายเกลือสามารถเคลื่อนที่ได้รวดเร็วขึ้นแทรกซึมเข้าไปภายในเซลล์ไข่ได้รวดเร็วขึ้น ส่งผลให้กระบวนการดองไข่เค็มเกิดขึ้นได้เร็วยิ่งขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการดองไข่แบบดั้งเดิม แสดงให้เห็นว่าการผลิตไข่ด้วยเทคนิคซูสวิต ช่วยพัฒนากระบวนการผลิตไข่เค็มให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น เนื่องจากสามารถผลิตได้ปริมาณมากและรวดเร็วเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีดั้งเดิมที่ใช้เวลาในการดอง 15-30 วัน เหลือเพียง 6 วัน โดยสามารถผลิตไข่เค็มได้มากกว่าวิธีดั้งเดิม (วิสาหกิจชุมชนเศรษฐกิจพอเพียงกลุ่มรักษ์ถิ่นเกิดจังหวัดพัทลุง) เฉลี่ย 15,336 ฟอง/ปี และมีกำไรเฉลี่ยต่อเดือนได้มากกว่า 25,052 บาทต่อเดือน (คำนวณจากกำลังการผลิต 420 ฟองต่อรอบการผลิต) และสามารถคงรักษาลักษณะทั่วไปของไข่เค็ม (ภายนอกเปลือก ไม่แตก ร้าวหรือบวม ลักษณะภายในไข่ขาวมีสีขาวปกติ ไข่แดงมีสีเข้ม มีความมันวาว และไม่มีการเน่าเสีย) ด้านรสชาติไข่ขาวมีรสเค็ม ไข่แดงมีรสมัน ทั้งนี้คุณภาพผลิตภัณฑ์เป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน เรื่องไข่เค็ม (มผช. 27/2550) ทั้งนี้ยังช่วยเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันทางการค้าและเพิ่มโอกาสทางการตลาดให้แก่ผู้ประกอบการ

5. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

ผู้นิพนธ์บทความวิชาการขอขอบคุณงบประมาณสนับสนุนการวิจัยจากสำนักงานปลัดกระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม ภายใต้โครงการพัฒนาผลิตภัณฑ์สินค้าชุมชน (ตามแนวทางคูปองวิทย์เพื่อโอท็อป) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2566

6. เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] Li Q, Jin H, Zhang X, Hu G, Lei C, Sun H, et al. Effect of salt penetration and water migration on cooked salted egg yolk gel during storage: physicochemical properties, structural characteristics and flavor changes. *Food Chem.* 2023;404:134510.
- [2] Xu L, Zhao Y, Xu M, Yao Y, Nie X, Du H, et al. Changes in aggregation behavior of raw and cooked salted egg yolks during pickling. *Food Hydrocoll.* 2018;80:68-77.
- [3] ศุภักษร มาแสวง, กุลพร พงษ์ไพโร, อัมพวัน สุขนิล. กระบวนการผลิตและการพัฒนากระบวนการผลิตไข่เค็ม. *วารสารเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร.* 2565;4(1):93-105.
- [4] Tan J, Liu T, Yao Y, Wu N, Du H, Xu M, et al. Changes in physicochemical and antioxidant properties of egg white during the Millard reaction induced by alkali. *LWT.* 2021;143:111151.
- [5] Taichan K, Asavasanti S, Tangduangdee C. Browning kinetics of egg white during high-temperature process. *Bull App Sci.* 2023;12(2):23-34.
- [6] ณัฐมา เหล่ากุลดิลก, นภาพร ปันทอง, สารีกา กิตติพนาไพร, ทิพรรัตน์ ติมะปัญญา, พรพิมล เตาคำ. การประยุกต์ใช้เทคนิคคลื่นอัลตราโซนิกสำหรับการดองไข่เค็มขมิ้น. ใน: การประชุมวิชาการระดับชาติราชภัฏกรุงเทพฯ “ท้องถิ่นก้าวไกล ด้วยวิจัยและนวัตกรรม; วันที่ 12-13 ธ.ค. 2562; [พระนครศรีอยุธยา]. พระนครศรีอยุธยา: มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา; 2562. น. 324-330.
- [7] Kaewmanee T, Benjakul S, Visessanguan W. Effects of salting processes and time on the chemical composition, textural properties, and microstructure of cooked duck egg. *J Food Sci.* 2011;76(2):139-47.
- [8] Li X, Chen S, Yao Y, Wu N, Xu M, Zhao Y, et al. The quality characteristics formation and control of salted eggs: a review. *Foods.* 2022;11(9):2949.
- [9] Schellekens M. New research sous-vide issues in cooking. *Trends Food Sci Technol.* 1996;7:256-62.
- [10] Baldwin DE. Sous vide cooking: a review. *Int J Gastron Food Sci.* 2012;1(1):15-30.
- [11] เสาวภา ยววุฒโธ. การพัฒนาดินสำเร็จรูปในการผลิตไข่เค็ม [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต]. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์; 2538.
- [12] คัดคนัฐ ชื่นวงศ์อรุณ. วิทยาศาสตร์น่ารู้ เรื่อง การแพร่ของสาร (Diffusion) [อินเทอร์เน็ต]. 2563 [เข้าถึงเมื่อ 5 ธันวาคม 2566]. เข้าถึงได้จาก: <https://ngthai.com>
- [13] สุพัฒน์นา โนทะนะ. การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของไข่เค็มด้วยเทคนิคอัลตราโซนิก [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต]. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ; 2552.
- [14] AOAC International. AOAC Official Methods of Analysis. Chloride in Eggs. 17th ed. Washington (DC): AOAC Publication; 2000.
- [15] Cheng S, Zhanga T, Wang X, Song Y, Wang H, Wang H, et al. Influence of salting processes on water and lipid dynamics, physicochemical and microstructure of duck egg. *LWT.* 2018;95:143-9.

- [16] สุภาพร อภิรัตนานุสรณ์. การพอกไข่เค็มไชยาด้วยกากชาเพื่อทดแทนดินจอมปลวกบางส่วน. วารสารวิชาการและวิจัย มทร. พระนคร. 2560;11(1):111-25.
- [17] Chi SP, Tseng KH. Physicochemical properties of salted pickled yolks from duck and chicken eggs. J Food Sci. 1998;63(1):27-30.
- [18] Dang KLM, Le TQ, Songsermpong S. Effect of ultrasound treatment in the mass transfer and physical properties of salted duck eggs. Kasetsart J Nat Sci. 2014;48:942-53.
- [19] ธนาวิทย์ กุลรัตนรักษ์. ผลของการประยุกต์ใช้คลื่นอัลตราซาวด์ต่อคุณสมบัติทางกายภาพและระยะเวลาในการผลิตไข่เค็ม. [รายงานการวิจัยสำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร]. [นครราชสีมา]: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี; 2563.
- [20] Kaewmanee T, Benjakul S, Visessanguan W. Changes in chemical composition, physical properties and microstructure of duck egg as influenced by salting. Food Chem. 2009;122(3):560-9.
- [21] Ai MM, Guo SG, Zhou Q, Wu WL, Jiang AM. The investigation of the changes in physicochemical, texture and rheological characteristics of salted duck egg yolk during salting. LWT. 2017;88(3):119-25.
- [22] Kaewmanee T, Benjakul S, Visessanguan W. Effects of salting processes and time on the chemical composition, textural properties, and microstructure of cooked duck egg. J Food Sci. 2011;74(2):139-47.
- [23] Wang X, Gao Z, Xiao H, Bai J. Enhanced mass transfer of osmotic dehydration and changes in microstructure of pickled salted egg under pulsed pressure. J Food Eng. 2013;117(1):141-50.
- [24] Lau MH, Tang J, Paulson AT. Texture profile and turbidity of 471 gellan/gelatin mixed gels. Food Res Int. 2000;33(8):665-71.
- [25] Xu L, Zhao Y, Xu M, Yao Y, Nie X, Du H, et al. Effects of salting treatment on the physicochemical properties, textural properties, and microstructures of duck eggs. PLoS One. 2017;12(8):e0182912.
- [26] ภูธฤทธิ์ วิทยาพัฒนานุรักษ์ รักษาศิริ, สิริพร คงเกิด, วัชรวิ ปิ่นทอง, มนต์นันท์ นพรัตน์ไมตรี, เสาวภา เขียนงาม, อภิญญา รัตนไชย, และคณะ. การพัฒนาผลิตภัณฑ์ไข่เค็มด้วยสารละลายเกลือปรงรส. แก่นเกษตร. 2565;1:15-22.

ผลของปริมาณแป้งข้าวทับทิมชุมแพที่ใช้ทดแทน แป้งมันสำปะหลังบางส่วนต่อคุณลักษณะของข้าวเกรียบ

Effect of tapioca flour partial substitution with Chum Phae ruby rice flour on the characteristics of crackers

จิราภรณ์ บุราคร, ปราณต์ ปิ่นทอง¹, อนรรฐ รัมมะพันธ์¹, พรประภา ทองใบ¹,
มนทกานต์ เอี่ยมแก้ว¹, ณัฐชา ศิริวาริน¹

Jiraporn Burakorn, Pran Pinthong¹, Anurat Rammaphan¹, Pornprapa Tongbai¹,
Montakan Aimkaew¹, Nattacha Siriwarin¹

รับบทความ 3 ตุลาคม 2566 แก้ไขบทความ 20 พฤษภาคม 2567 ยอมรับตีพิมพ์ 28 พฤษภาคม 2567

บทคัดย่อ

ข้าวทับทิมชุมแพเป็นข้าวเจ้าที่มีเยื่อหุ้มเมล็ดสีแดง ภายหลังการหุงสุกจะมีสีแดงไล่คล้ายกับสีของทับทิม มีคุณค่าทางโภชนาการสูง งานวิจัยนี้ได้นำปลายข้าวทับทิมชุมแพมาบดเป็นผงแป้งข้าวทับทิมชุมแพ จากนั้นนำแป้งข้าวทับทิมชุมแพไปทดแทนแป้งมันสำปะหลังในปริมาณต่าง ๆ ที่ร้อยละ 0 (สูตรควบคุม), 40, 50, 60 และ 70 ของน้ำหนักแป้งมันสำปะหลังทั้งหมด จากนั้นวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพ ประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส และคุณค่าทางโภชนาการ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มระดับการทดแทนแป้งมันสำปะหลังด้วยแป้งข้าวทับทิมชุมแพ คุณลักษณะเนื้อสัมผัสด้านความกรอบมีความแตกต่างกัน ($p \leq 0.05$) โดยการเพิ่มปริมาณแป้งข้าวทับทิมชุมแพทำให้ค่าความกรอบลดลงเมื่อวิเคราะห์ค่าสี พบว่าข้าวเกรียบทดแทนแป้งมันสำปะหลังด้วยข้าวทับทิมชุมแพจะมีสีน้ำตาลอ่อนถึงน้ำตาลอมแดงเมื่อทำการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสด้านความชอบที่มีต่อข้าวเกรียบที่ทดแทนแป้งมันสำปะหลังด้วยแป้งข้าวทับทิมชุมแพ พบว่าผู้ทดสอบให้คะแนนความชอบโดยรวมข้าวเกรียบทับทิมชุมแพสูตรที่ทดแทนแป้งมันสำปะหลังด้วยแป้งข้าวทับทิมชุมแพร้อยละ 40 มากที่สุด การทดแทนแป้งมันสำปะหลังด้วยแป้งข้าวทับทิมชุมแพมีผลต่อคะแนนความชอบในทุกด้าน เมื่อเปรียบเทียบคุณค่าทางโภชนาการข้าวเกรียบทับทิมชุมแพและข้าวเกรียบมันสำปะหลัง พบว่าข้าวเกรียบทับทิมชุมแพมีโปรตีนสูงกว่าข้าวเกรียบมันสำปะหลังกว่า 97.25 เท่า มีธาตุเหล็กมากกว่า 1.93 เท่า และมีใยอาหารมากกว่า 5.29 เท่า มีพลังงานทั้งหมดน้อยกว่า และมีพลังงานจากไขมันน้อยกว่าอีกด้วย แสดงให้เห็นว่าข้าวเกรียบทับทิมชุมแพเหมาะสมที่จะบริโภคเป็นอาหารเพื่อสุขภาพมากกว่าข้าวเกรียบมันสำปะหลัง

คำสำคัญ: ข้าวเกรียบ, แป้งข้าวทับทิมชุมแพ, แป้งมันสำปะหลัง

¹กองผลิตภัณท์อาหารและวัสดุสัมผัสอาหาร กรมวิทยาศาสตร์บริการ

Abstract

Tubtim Chumphae rice has a red seed coat. Cooked Tubtim Chumphae rice have a clear red color similar to the color of ruby which has a high nutritional value. In this research, Tubtim Chumphae rice was ground into powder of Tubtim Chumphae rice flour. Then Tubtim Chumphae rice flour was used to replace various amounts of tapioca flour at 0% (control recipe), 40%, 50%, 60% and 70% of the total weight of tapioca flour. Tubtim Chumphae crackers were analyzed for the physical properties, the sensory characteristic consumer liking and nutritional values. The results showed that an increasing the level of substitution of tapioca flour with Tubtim Chumphae rice flour, crispness were different ($p \leq 0.05$). An increasing Tubtim Chumphae rice flour, the crispness decreased. The results of color values showed that the crackers replacing tapioca flour with Tubtim Chumphae rice flour were light brown to reddish brown. In addition, rice crackers that replaced tapioca flour with Tubtim Chumphae rice flour were evaluated the consumer liking. The panelists gave the highest overall liking for the Tubtim Chumphae rice cracker recipe that replaces 40% of tapioca flour with Tubtim Chumphae rice flour. The comparison of nutritional values of Tubtim Chumphae rice crackers and tapioca crackers found that protein, iron and dietary fiber content in Tubtim Chumphae crackers were 97.25, 1.93 and 5.29 times higher than those in tapioca crackers, respectively. By the way, their energy from fat were less than that in tapioca crackers. Therefore, Tubtim Chumphae crackers are more suitable to be consumed as a health food than tapioca crackers.

Keywords: Cracker, Tubtim Chumphae rice flour, Tapioca flour

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

*Corresponding author e-mail address: montakan.ak@gmail.com, swr.nc@gmail.com

1. บทนำ (Introduction)

ข้าวเกรียบเป็นอาหารว่างชนิดหนึ่งที่นิยมรับประทานกันอย่างแพร่หลายในประเทศไทย โดยข้าวเกรียบที่นิยมรับประทาน ได้แก่ ข้าวเกรียบกุ้ง ข้าวเกรียบปลา ข้าวเกรียบฟักทอง ข้าวเกรียบแครอท ข้าวเกรียบเผือก และข้าวเกรียบเห็ดหอม เป็นต้น การผลิตข้าวเกรียบสามารถจำแนกออกเป็นในระดับอุตสาหกรรม ระดับครัวเรือน หรือผลิตโดยกลุ่มแม่บ้านตามพื้นที่ต่าง ๆ ในประเทศ [1] ส่วนประกอบหลักที่ใช้ในการผลิตข้าวเกรียบจะเป็นแป้ง เช่น แป้งข้าวเจ้า แป้งสาลี และแป้งมันสำปะหลัง แล้วนำมาบดผสมด้วยเนื้อสัตว์หรือผักและเครื่องปรุงรสให้เข้ากัน จากนั้นทำให้สุกและทำให้แห้งก่อนนำไปทอดหรืออบเพื่อรับประทาน ผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบที่วางจำหน่ายแบ่งได้ 2 ประเภทคือ ข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูป หมายถึง ข้าวเกรียบที่ยังไม่ได้ทอดหรืออบ และข้าวเกรียบสำเร็จรูป หมายถึง ข้าวเกรียบที่ทอดหรืออบแล้ว พร้อมที่จะรับประทานได้ [2]

แป้งชนิดต่าง ๆ ที่ใช้ในการผลิตข้าวเกรียบมีผลต่อการพองตัว ความเรียบของผิว และการบิดงอหรือการม้วนตัวของข้าวเกรียบ เนื่องจากปริมาณอะไมโลส อะไมโลเพกทิน โครงสร้าง ขนาดและรูปร่างของเม็ดแป้ง แป้งที่นิยมใช้ผลิตข้าวเกรียบคือแป้งมันสำปะหลัง เนื่องจากมีผลต่อการพองตัวดีกว่าแป้งชนิดอื่น [3] แป้งที่มีปริมาณของอะไมโลเพกทินสูง และอะไมโลสน้อย เช่น แป้งข้าวเหนียว (ร้อยละอะไมโลเพกทินต่ออะไมโลส 100 : 0) แป้งมันสำปะหลัง (ร้อยละอะไมโลเพกทินต่ออะไมโลส 83 : 17) โครงสร้างภายในเม็ดแป้งถูกออกแบบเป็นกึ่งก้านสาขามากกว่า และอุณหภูมิเจลาติไนซ์ต่ำกว่าแป้งจากธัญพืช ทำให้มีการพองตัวมากกว่าจึงเหมาะสำหรับการทำผลิตภัณฑ์ประเภททอดกรอบ [4] อย่างไรก็ตามมีการศึกษาการนำแป้งชนิดต่าง ๆ มาทดแทนแป้งมันสำปะหลังในการผลิตข้าวเกรียบเพื่อเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการ หรือปรับปรุงคุณลักษณะต่าง ๆ ได้แก่ การใช้แป้งข้าวฟ่างร้อยละ 50 ร่วมกับแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และส่วนประกอบอื่น ๆ [5] นอกจากนี้ยังมีการศึกษาการเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการให้กับข้าวเกรียบ ได้แก่ การเสริมโปรตีนจากแป้งถั่วเหลืองพร่องไขมัน [6] การใช้แป้งข้าวสังข์หยด ร้อยละ 40 ในการผลิตข้าวเกรียบ [7] ข้าวเกรียบงาดำเสริมสมุนไพโร โดยใช้แป้งข้าวเจ้าร้อยละ 26.8 [8]

ข้าวทับทิมชุมแพ หรือข้าวพันธุ์ กข69 เป็นข้าวเจ้าที่มีเยื่อหุ้มเมล็ดสีแดง ไรต์ต่อแสง ต้นสูง ภายหลังการหุงสุกจะมีสีแดงคล้ำกับสีของทับทิม (Ruby) มีคุณค่าทางโภชนาการสูง มีปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระที่ประกอบด้วยปริมาณฟีนอลิก 4,661.05 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม และปริมาณฟลาโวนอยด์ 2,989.21 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม และข้าวทับทิมชุมแพมีปริมาณ อะไมโลสต่ำ (ร้อยละ 12.53) [9-10] ในขณะที่แป้งมันสำปะหลังมีปริมาณอะไมโลส (ร้อยละ 19-22) ข้าวทับทิมชุมแพจึงได้รับการส่งเสริมให้เป็นอาหารเพื่อสุขภาพ [11-12] เนื่องจากคุณค่าทางโภชนาการของข้าวทับทิมชุมแพที่สูงกว่าข้าวปกติทั่วไปนั้น จึงมีการพัฒนาผลิตภัณฑ์แปรรูปข้าวทับทิมชุมแพเป็นข้าวแต่น [9] พบว่า ที่อัตราส่วนการผสมข้าวเหนียวร้อยละ 60 ต่อข้าวทับทิมชุมแพ ร้อยละ 40 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมต่อการขึ้นรูปและได้รับการประเมินความพึงพอใจจากผู้บริโภคอยู่ในระดับดีมากทั้งด้านสี กลิ่นรส และรสชาติเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรข้าวทับทิมชุมแพร้อยละ 100 เนื่องจากปริมาณอะไมโลสในแป้งข้าวเป็นอุปสรรคอย่างหนึ่งต่อการพองตัวของข้าวแต่น โดยระหว่างการให้ความร้อนเกิดเจลาติไนซ์ของสตาร์ช อะไมโลสในแป้งข้าวทำให้โครงร่างภายในเม็ดแป้งแข็งแรง จับตัวกันแน่นส่งผลให้ขึ้นรูปยากและติดพิมพ์ และภายหลังการทำแห้งพบว่า ผิวด้านนอกของข้าวแต่นมีลักษณะเป็นฟิล์มใสเคลือบไว้ ทำให้ไอน้ำไม่สามารถดันออกมาได้ผลิตภัณฑ์จึงไม่เกิดการพองตัว [13-14]

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำข้าวหักทับทิมชุมแพที่ได้จากการสีข้าวมาทดแทนแป้งมันสำปะหลังสำหรับแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบ และตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์เพื่อให้เป็นแนวทางในการเพิ่มมูลค่าให้กับปลายข้าวทับทิมชุมแพตลอดจนเป็นทางเลือกให้แก่เกษตรกรผู้ปลูกข้าวทับทิมชุมแพและผู้ประกอบการอาหารพัฒนาผลิตภัณฑ์ในเชิงพาณิชย์ต่อไป

2. วิธีการวิจัย (Experimental methods)

2.1 การเตรียมแป้งข้าวทับทิมชุมแพ

ข้าวหักทับทิมชุมแพ จากสหกรณ์ชุมชนบ้านฝาง อำเภอบ้านฝาง จังหวัดขอนแก่น นำมาเตรียมเป็นแป้งข้าวทับทิมชุมแพ โดยแยกสิ่งเจือปนออก ใส่เมล็ดข้าวลงในเครื่องบดแห้ง (JING GONG YI, JGY-2500B, ประเทศจีน) บดเป็นผงแป้ง นำแป้งที่ได้บรรจุในถุงซิปล็อก เก็บที่อุณหภูมิห้อง (25 ± 2 องศาเซลเซียส) นำมาศึกษาปริมาณแป้งข้าวทับทิมชุมแพ ทดแทนแป้งมันสำปะหลังในผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบ

2.2 การเตรียมข้าวเกรียบทอดแทนแป้งมันสำปะหลังบางส่วนด้วยแป้งข้าวทับทิมชุมแพ

นำแป้งข้าวทับทิมชุมแพไปทดแทนแป้งมันสำปะหลังปริมาณต่าง ๆ ที่ร้อยละ 0 (สูตรควบคุม), 40, 50, 60 และ 70 ของน้ำหนักแห้งแป้งมันสำปะหลังทั้งหมด โดยสูตรที่ไม่มีแป้งข้าวทับทิมชุมแพจะใช้แป้งมันสำปะหลังผสมกับน้ำตาลและเกลือ นวดให้เข้ากันโดยใช้ความร้อน เป็นก้อน นำไปนึ่งให้สุกที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที แช่เย็นที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14 ชั่วโมง นำไปหั่นเป็นชิ้นเล็ก ๆ ความหนาไม่เกิน 2 มิลลิเมตร นำไปอบแห้งในตู้อบลมร้อน (FED, Binder, ประเทศเยอรมนี) ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นนำไปทอดในน้ำมันปาล์มที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส จนข้าวเกรียบสุก พองตัว นำออกมาวางให้สะเด็ดน้ำมัน ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง บรรจุในถุงอลูมิเนียมฟลอยด์ พร้อมเติมแก๊สไนโตรเจนปริมาณ 10 กรัม ปิดปากถุงให้สนิทด้วยเครื่องซีลสุญญากาศ (DZQ-400TE, KS SEALER, ประเทศไทย) เก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง ได้ข้าวเกรียบสูตรพื้นฐาน หลังจากนั้นพัฒนาสูตรตามตารางที่ 1 ได้ข้าวเกรียบ 5 สูตร นำไปศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสด้วยเทคนิค 9-Point Hedonic Scale ดังข้อ 2.3 และ 2.4 จากนั้นคัดเลือกสูตรที่ได้รับการยอมรับจากผู้ทดสอบชิมมากที่สุดไปศึกษาคุณค่าทางโภชนาการต่อไป

ตารางที่ 1 ปริมาณส่วนผสมการพัฒนาลักษณะข้าวเกรียบ

สูตร	แป้งมัน สำปะหลัง (กรัม)	แป้งข้าวทับทิม ชุมแพ (กรัม)	น้ำตาล (กรัม)	เกลือ (กรัม)	น้ำมัน (กรัม)
สูตรที่ 1 (สูตรพื้นฐาน)	100	0	2	1	5
สูตรที่ 2	60	40	2	1	5
สูตรที่ 3	50	50	2	1	5
สูตรที่ 4	40	60	2	1	5
สูตรที่ 5	30	70	2	1	5

2.3 การประเมินคุณภาพทางกายภาพของข้าวเกรียบ

2.3.1 ลักษณะเนื้อสัมผัส

วิเคราะห์เนื้อสัมผัสของข้าวเกรียบด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัส (Stable Micro System, TA-XT Plus, ประเทศอังกฤษ) โดยทดสอบแรงกด (Compression test) วัดค่าความเปราะ (Fracturability) และค่าความกรอบ (Crispness) ใช้หัววัด Crisp Fracture Rig ความเร็วของหัววัด (Test speed และ pre-test speed) 2 มิลลิเมตรต่อวินาที ระยะในการเคลื่อนที่ของหัววัด 5 มิลลิเมตร และ Load cell เท่ากับ 50 กิโลกรัม กดลงตรงกลางของตัวอย่าง วัดค่าจำนวน 8 ซ้ำ

2.3.2 สี

วิเคราะห์ค่าสีของตัวอย่างข้าวเกรียบด้วยเครื่องวัดสี (HunterLab, Minisacn EZ, ประเทศสหรัฐอเมริกา) ระบบ CIE โดยค่า L* แสดงถึงค่าความสว่าง (Lightness) มีค่าตั้งแต่ 0-100 (มืด ถึง สว่าง) ค่า a* แสดงถึงค่าสีเขียว-สีแดง (+a* ถึง -a*) ค่า b* แสดงถึงค่าสีเหลือง-สีน้ำเงิน (+b* ถึง -b*) วัดค่าจำนวน 3 ซ้ำ

2.4 การประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส

ประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสข้าวเกรียบทับทิมชุมแพและข้าวเกรียบมันสำปะหลังด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่นรส รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมของข้าวเกรียบ ด้วยวิธีการให้คะแนนความชอบ 9 ระดับ (9-Points Hedonic Scale) โดยมีค่าคะแนน ดังนี้ 1 = ไม่ชอบมากที่สุด 2 = ไม่ชอบมาก 3 = ไม่ชอบปานกลาง 4 = ไม่ชอบเล็กน้อย 5 = เฉย ๆ 6 = ชอบเล็กน้อย 7 = ชอบปานกลาง 8 = ชอบมาก และ 9 = ชอบมากที่สุด ใช้ผู้ทดสอบชิมเป็นผู้บริโภคทั่วไป จำนวน 60 คน ทดสอบตัวอย่างที่ละ 1 ตัวอย่าง ในหมู่ทดสอบชิมโดยควบคุมอุณหภูมิที่ 23 ± 2 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50-70 จากนั้นคัดเลือกสูตรที่ผู้ทดสอบยอมรับมากที่สุดนำไปวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการต่อไป

2.5 การวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการ

นำตัวอย่างข้าวเกรียบที่ได้รับการยอมรับจากผู้ทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัสไปวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการ ได้แก่ พลังงาน ไขมัน โคเลสเตอรอล โปรตีน คาร์โบไฮเดรต โซเดียม วิตามินเอ วิตามินบี 1 วิตามินบี 2 แคลเซียมและเหล็ก [15-19]

2.6 การวิเคราะห์ทางสถิติ

รายงานค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติโดยวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's New Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ด้วยโปรแกรม SPSS เวอร์ชัน 24

3. ผลและวิจารณ์ (Results and discussion)

3.1 ลักษณะของข้าวเกรียบที่ทดแทนแป้งมันสำปะหลังบางส่วนด้วยแป้งข้าวทับทิมชุมแพเปรียบเทียบกับข้าวเกรียบแป้งมันสำปะหลัง (สูตรควบคุม)

จากการนำแป้งข้าวทับทิมชุมแพทดแทนแป้งมันสำปะหลังในผลิตภัณฑ์ที่ระดับร้อยละ 0, 40, 50, 60 และ 70 ของน้ำหนักแป้งมันสำปะหลัง แสดงลักษณะของผลิตภัณฑ์ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ลักษณะข้าวเกรียบที่ผลิตจากการทดแทนแป้งมันสำปะหลังด้วยแป้งข้าวทับทิมชุมแพ 4 ระดับ และข้าวเกรียบที่ผลิตจากแป้งมันสำปะหลัง (a) ข้าวเกรียบที่ผลิตจากแป้งมันสำปะหลัง (b) ข้าวเกรียบที่ผลิตจากการทดแทนแป้งมันสำปะหลังด้วยแป้งข้าวทับทิมชุมแพร้อยละ 40 (c) ข้าวเกรียบที่ผลิตจากการทดแทนแป้งมันสำปะหลังด้วยแป้งข้าวทับทิมชุมแพร้อยละ 50 (d) ข้าวเกรียบที่ผลิตจากการทดแทนแป้งมันสำปะหลังด้วยแป้งข้าวทับทิมชุมแพร้อยละ 60 (e) ข้าวเกรียบที่ผลิตจากการทดแทนแป้งมันสำปะหลังด้วยแป้งข้าวทับทิมชุมแพร้อยละ 70

3.2 ผลการประเมินคุณภาพทางกายภาพของข้าวเกรียบที่ทดแทนแป้งมันสำปะหลังบางส่วนด้วยแป้งข้าวทับทิมชุมแพเปรียบเทียบกับข้าวเกรียบแป้งมันสำปะหลัง (สูตรควบคุม)

งานวิจัยนี้ได้รายงานการวิเคราะห์เนื้อสัมผัสของตัวอย่างข้าวเกรียบในรูปของค่าความเปราะ (Fracturability) คือแรงกดครั้งแรกซึ่งทำให้ตัวอย่างแตกหัก และความกรอบ (Crispness) คือจำนวนพีคที่เกิดจากการแตกหักในระหว่างการกดตัวอย่าง [19-20] ผลการวิเคราะห์เนื้อสัมผัสของตัวอย่างข้าวเกรียบ (ตารางที่ 2) พบว่า เมื่อทำการทดแทนแป้งมันสำปะหลังด้วยแป้งข้าวทับทิมชุมแพ ค่าความกรอบของข้าวเกรียบมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยมีค่าความกรอบลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณแป้งข้าวทับทิมชุมแพ และค่าความเปราะของตัวอย่างข้าวเกรียบทุกสูตรไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) เนื่องจากแป้งที่มีองค์ประกอบของอะไมโลเพกทินสูง เช่น แป้งข้าวเหนียว (ร้อยละ 100) แป้งมันสำปะหลัง (ร้อยละ 83) จะทำให้ผลิตภัณฑ์หลังการทอดมีลักษณะใสและพองกรอบ อีกทั้งโครงสร้างของอะไมโลเพกทินมีก้านสาขาจำนวนมาก มีผลให้แป้งเกิดการพองตัวและการละลายดีขึ้น นอกจากนี้เมื่อเพิ่มระดับการทดแทนแป้งมันสำปะหลังด้วยแป้งข้าวทับทิมชุมแพทำให้ค่าสีของข้าวเกรียบเปลี่ยนแปลงไปแสดงในตารางที่ 2 พบว่า การเพิ่มปริมาณแป้งข้าวทับทิมชุมแพทำให้ค่าความสว่าง (L^*) ของข้าวเกรียบลดลง ในขณะที่ค่าความเป็นสีแดง

(a*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b*) เพิ่มขึ้น ($p \leq 0.05$) ทั้งนี้อธิบายได้จากการเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard reaction) ที่เกิดขึ้นระหว่างน้ำตาลรีดิวซ์ (Reducing sugar) กับโปรตีนจึงทำให้ผลิตภัณฑ์มีสีน้ำตาลเข้มขึ้น [13] อีกทั้งเนื่องจากธรรมชาติของแป้งข้าวทับทิมชุมแพที่มีสารต้านอนุมูลอิสระที่มีสีแดงเป็นองค์ประกอบ [9-10] ค่าความเป็นสีแดงจึงเพิ่มขึ้นตามปริมาณแป้งข้าวทับทิมชุมแพ

ตารางที่ 2 คุณภาพทางกายภาพของข้าวเกรียบที่ทดแทนแป้งมันสำปะหลังบางส่วนด้วยแป้งข้าวทับทิมชุมแพเปรียบเทียบกับข้าวเกรียบแป้งมันสำปะหลัง (สูตรควบคุม)

คุณภาพทางกายภาพ	ปริมาณแป้งข้าวทับทิมชุมแพ (ร้อยละ)				
	0	40	50	60	70
เนื้อสัมผัส					
ความเปราะ ^{ns} (นิวตัน)	2.02±1.4	1.62±1.6	1.51±0.8	1.51±0.6	1.49±1.0
ความกรอบ	10.5±5.9 ^a	6.00±1.8 ^b	3.88±1.4 ^b	3.50±1.9 ^b	3.25±1.7 ^b
สี					
L*	58.65±0.7 ^a	36.27±1.4 ^b	33.03±0.8 ^c	30.15±1.5 ^d	27.43±1.4 ^e
a*	0.33±0.1 ^d	3.75±0.2 ^c	4.29±0.1 ^b	4.42±0.4 ^b	5.52±0.3 ^a
b*	6.95±1.4 ^d	11.39±0.4 ^c	12.69±0.5 ^b	13.61±0.3 ^b	17.65±0.1 ^a

ตัวอักษรต่างกันในแนวนอน หมายถึง ค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ns หมายถึง ค่าเฉลี่ยไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

3.3 การประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสของข้าวเกรียบที่ทดแทนแป้งมันสำปะหลังบางส่วนด้วยแป้งข้าวทับทิมชุมแพเปรียบเทียบกับข้าวเกรียบแป้งมันสำปะหลัง (สูตรควบคุม)

การประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสของข้าวเกรียบที่ทดแทนแป้งมันสำปะหลังด้วยแป้งข้าวทับทิมชุมแพร้อยละ 0 (สูตรควบคุม), 40, 50, 60 และ 70 ของน้ำหนักแป้งมันสำปะหลังทั้งหมด ด้วยวิธีให้คะแนนความชอบ 9 ระดับ (ดังตารางที่ 3) พบว่าผู้ทดสอบให้คะแนนความชอบในทุกคุณลักษณะของข้าวเกรียบที่ทดแทนแป้งมันสำปะหลังด้วยแป้งข้าวทับทิมชุมแพทั้ง 5 สูตร ได้แก่ ลักษณะปรากฏ สี กลิ่นรส รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมแตกต่างกัน ($p \leq 0.05$) โดยสูตรที่ทดแทนแป้งมันสำปะหลังด้วยแป้งข้าวทับทิมชุมแพร้อยละ 40 ได้คะแนนความชอบโดยรวมมากกว่าสูตรอื่น (7.10 คะแนน) ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ชอบปานกลางเช่นเดียวกับคะแนนความชอบด้านลักษณะปรากฏ สี รสชาติ และเนื้อสัมผัส ในขณะที่คะแนนความชอบด้านกลิ่นรสอยู่ในเกณฑ์ชอบเล็กน้อย (6.7 คะแนน)

ด้านคะแนนความชอบด้านสีและกลิ่นรสของสูตรที่ทดแทนแป้งมันสำปะหลังด้วยแป้งข้าวทับทิมชุมแพร้อยละ 40 ไม่แตกต่างกับสูตรที่ทดแทนแป้งข้าวทับทิมชุมแพร้อยละ 50 และคะแนนความชอบด้านเนื้อสัมผัสไม่แตกต่างกับสูตรควบคุม ($p > 0.05$)

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสร่วมกับคุณภาพทางกายภาพ พบว่าข้าวเกรียบที่ทดแทนแป้งมันสำปะหลังด้วยแป้งข้าวทับทิมชุมแพร้อยละ 40 และ 50 มีความกรอบ และความสว่างน้อยกว่าสูตรควบคุมแต่ผู้ทดสอบก็ให้คะแนนความชอบมากกว่า (ตารางที่ 3) แสดงให้เห็นว่าการทดแทนแป้งมันสำปะหลังด้วยแป้งข้าวทับทิมชุมแพที่ร้อยละ 40, 50, 60 และ 70 มีผลต่อคะแนนความชอบในทุกด้านแต่เมื่อเพิ่มปริมาณการทดแทนแป้งมันสำปะหลังด้วยแป้งข้าวทับทิมชุมแพร้อยละ 60 และ 70 คะแนนความชอบด้านลักษณะปรากฏ สี รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมจะลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับสูตรควบคุม ดังนั้นข้าวเกรียบที่ทดแทน

แป้งมันสำปะหลังด้วยแป้งข้าวทับทิมชุมแพร้อยละ 40 ของน้ำหนักแป้งมันสำปะหลังทั้งหมด เป็นสูตรที่เหมาะสม จึงคัดเลือกสูตรนี้สำหรับการทดลองต่อไป

ตารางที่ 3 การประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสของข้าวเกรียบที่ทดแทนแป้งมันสำปะหลังบางส่วนด้วยแป้งข้าวทับทิมชุมแพเปรียบเทียบกับข้าวเกรียบแป้งมันสำปะหลัง (สูตรควบคุม)

ปริมาณแป้งข้าว ทับทิมชุมแพ (ร้อยละ)	คะแนนความชอบเฉลี่ย					
	ลักษณะ ปรากฏ	สี	กลิ่นรส	รสชาติ	เนื้อสัมผัส	ความชอบ โดยรวม
0	6.8±1.4 ^b	6.2±1.5 ^b	5.5±1.6 ^b	5.2±1.3 ^c	7.1±1.1 ^a	5.6±1.5 ^{bc}
40	7.6±0.9 ^a	7.1±0.8 ^a	6.7±1.6 ^a	7.5±1.0 ^a	7.5±0.8 ^a	7.1±1.1 ^a
50	6.8±1.9 ^b	6.6±2.4 ^{ab}	6.6±2.1 ^a	6.3±2.1 ^b	6.4±1.8 ^b	6.0±2.1 ^b
60	4.8±1.5 ^c	5.3±1.6 ^c	5.4±1.8 ^b	4.9±1.6 ^{cd}	5.5±1.5 ^c	5.1±1.3 ^{cd}
70	4.2±1.1 ^d	4.3±1.6 ^d	5.0±1.3 ^b	4.4±1.3 ^d	4.9±1.0 ^d	4.6±1.0 ^d

ตัวอักษรที่ต่างกันในแนวตั้ง หมายถึง ค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)
ns หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในคอลัมน์เดียวกันไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p > 0.05$)

3.4 ผลคุณค่าทางโภชนาการของข้าวเกรียบที่ทดแทนแป้งมันสำปะหลังบางส่วนด้วยแป้งข้าวทับทิมชุมแพเปรียบเทียบกับข้าวเกรียบแป้งมันสำปะหลัง (สูตรควบคุม)

การวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการของข้าวเกรียบที่ทดแทนแป้งมันสำปะหลังบางส่วนด้วยแป้งข้าวทับทิมชุมแพเปรียบเทียบกับข้าวเกรียบแป้งมันสำปะหลัง (สูตรควบคุม) พบว่าข้าวเกรียบที่ผสมแป้งข้าวทับทิมชุมแพมีโปรตีนสูงกว่าข้าวเกรียบที่ผสมมันสำปะหลังมากกว่า 97.25 เท่า (ตารางที่ 3) มีธาตุเหล็กมากกว่า 1.93 เท่า และมีใยอาหารมากกว่า 5.29 เท่า แต่ทว่ามีพลังงานทั้งหมดและมีพลังงานจากไขมันน้อยกว่า แสดงให้เห็นว่าข้าวเกรียบที่ผสมแป้งข้าวทับทิมชุมแพเหมาะสมที่จะบริโภคเป็นอาหารเพื่อสุขภาพมากกว่าข้าวเกรียบมันสำปะหลัง

ตารางที่ 4 คุณค่าทางโภชนาการของข้าวเกรียบที่ทดแทนแป้งมันสำปะหลังบางส่วนด้วยแป้งข้าวทับทิมชุมแพเปรียบเทียบกับข้าวเกรียบแป้งมันสำปะหลัง (สูตรควบคุม)

รายการทดสอบ	หน่วย	ข้าวเกรียบทับทิมชุมแพ (ปริมาณต่อ 100 กรัม)	ข้าวเกรียบมันสำปะหลัง (ปริมาณต่อ 100 กรัม)
พลังงานทั้งหมด	กิโลแคลอรี	504	592
พลังงานจากไขมัน	กิโลแคลอรี	212	391
ไขมันทั้งหมด	กรัม	23.5	43.4
ไขมันอิ่มตัว	กรัม	13.0	28.7
โคเลสเตอรอล	มิลลิกรัม	0	0.01
โปรตีน (Nx6.25)	กรัม	3.89	0.04
คาร์โบไฮเดรตทั้งหมด	กรัม	69.24	50.40

รายการทดสอบ	หน่วย	ข้าวเกรียบทับทิมชุมแพ (ปริมาณต่อ 100 กรัม)	ข้าวเกรียบมันสำปะหลัง (ปริมาณต่อ 100 กรัม)
ใยอาหาร	กรัม	2.17	0.41
น้ำตาล	กรัม	0	0
โซเดียม	มิลลิกรัม	6.97	3.16
วิตามินเอ	ไมโครกรัม อาร์อี	0	0
วิตามินบี 1	มิลลิกรัม	0.65	0.76
วิตามินบี 2	มิลลิกรัม	0	0
แคลเซียม	มิลลิกรัม	17.7	21.6
เหล็ก	มิลลิกรัม	0.89	0.46

4. สรุป (Conclusion)

จากการศึกษาผลของปริมาณแป้งข้าวทับทิมชุมแพที่ใช้ทดแทนแป้งมันสำปะหลังบางส่วนต่อคุณลักษณะของข้าวเกรียบ โดยทำการทดแทนแป้งมันสำปะหลังด้วยแป้งข้าวทับทิมชุมแพที่มีปริมาณต่าง ๆ ได้แก่ ร้อยละ 0 (สูตรควบคุม), 40, 50, 60 และ 70 ของน้ำหนักแป้งมันสำปะหลังทั้งหมด พบว่า ค่าความกรอบของข้าวเกรียบลดลงเมื่อทดแทนแป้งมันสำปะหลังด้วยแป้งข้าวทับทิมชุมแพ ซึ่งข้าวเกรียบที่ประกอบด้วยแป้งมันสำปะหลังเพียงอย่างเดียวมีค่าความกรอบมากที่สุด (10.5 ± 5.9 นิวตัน) เนื่องจากคุณสมบัติของอะไมโลเพกทินที่มีปริมาณสูงในแป้งมันสำปะหลัง ทำให้ข้าวเกรียบเกิดการพองตัว กรอบ และการละลายของเนื้อสัมผัสที่ดีขึ้น ในขณะเดียวกันค่าความสว่าง (L^*) ของข้าวเกรียบลดลง ค่าความเป็นสีแดง (a^*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) เพิ่มขึ้น เนื่องจากรงควัตถุสีแดงโดยธรรมชาติของแป้งข้าวทับทิมชุมแพรวมถึงผลของปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล ผู้บริโภคให้คะแนนความชอบข้าวเกรียบสูตรแป้งข้าวทับทิมชุมแพร้อยละ 40 มากที่สุด ข้าวเกรียบทับทิมชุมแพมีโปรตีน ธาตุเหล็ก และใยอาหารสูงกว่าข้าวเกรียบมันสำปะหลัง มีพลังงานทั้งหมดและพลังงานจากไขมันน้อยกว่าแสดงให้เห็นว่าข้าวเกรียบทับทิมชุมแพเหมาะสมที่จะบริโภคเป็นอาหารเพื่อสุขภาพมากกว่าข้าวเกรียบมันสำปะหลัง

5. เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] ศรายุทธ์ สมประสงค์. ผลของอุณหภูมิและการใช้น้ำมันทอดซ้ำต่อการดูดซับน้ำมัน เนื้อสัมผัสและสีของข้าวเกรียบกุ้งทอด [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต]. เชียงใหม่: มหาวิทยาลัยเชียงใหม่; 2551.
- [2] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ.). มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ข้าวเกรียบ. มอก. 701-2530. กรุงเทพฯ: สมอ.; 2530.
- [3] อรุณฯ สีหามาลา. การเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการและยืดอายุการเก็บรักษาข้าวเกรียบปลา [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต]. เชียงใหม่: มหาวิทยาลัยเชียงใหม่; 2545.
- [4] สุทธิณี สีสังข์. คุณสมบัติของแป้งที่มีผลต่อการแปรรูปผลิตภัณฑ์สัตว์น้ำ [อินเทอร์เน็ต]. 2563 [เข้าถึงเมื่อ 1 มีนาคม 2567]. เข้าถึงได้จาก: https://www4.fisheries.go.th/local/file_document/20200722153849_1_file.pdf
- [5] ศิวาพร ศิวเวช, สลักจิต สืบพงษ์ศิริ. ข้าวเกรียบข้าวฟ่าง. วารสารอาหาร. 2536;26(4-6):80-7.
- [6] สมชาย ประภาวัต, เพลินจิต ตังคณะกุล, ชิดชม อีรวงะ. การทำข้าวเกรียบเสริมโปรตีนด้วยแป้งผสมของถั่วลิสง ถั่วเหลืองและงา. วารสารโภชนาการ. 2533;24(2):154-6.

- [7] อภิวัน สมบูรณ์दारกุล, ปัญญรัตน์ ลือขจร, จิราพร ศรีสายะ, วนิดา บุรีภักดี. การใช้ข้าวสังข์หยดในผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบข้าว [รายงานการวิจัยคณะศิลปศาสตร์]. สงขลา: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย; 2560.
- [8] อัจฉรา ดลวิทยาคณ. การพัฒนาคุณภาพข้าวเกรียบงาดำเสริมสมุนไพร. วารสารอาหาร. 2550;37(1):83-92.
- [9] ศรายุทธ ชัยพร, สุกัลยา เชิญขวัญ. การพัฒนาแปรรูปข้าวทับทิมชุมแพ (กข69) ของวิสาหกิจชุมชนกลุ่มแม่บ้านโคกสว่าง อำเภอแวงใหญ่ จังหวัดขอนแก่น. วารสารการพัฒนาชุมชนและคุณภาพชีวิต. 2565;10(2):148-58.
- [10] รณชัย ช่างศรี, สุพัฒนา บุรีรัตน์, ธัญวราภรณ์ ปรงช้อง, อโณทัย เพ็ญเรือง, อำนวย พงษ์พันธ์, ธนพัฒน์ รุ่งวัฒนพงษ์, และคณะ. ข้าวเจ้าพันธุ์ กข69 (ทับทิมชุมแพ). วารสารวิชาการข้าว. 2559;7(2):30-46.
- [11] กล้านรงค์ ศรีรอต, กาญจนา กุโรจนวงศ์, วิไล สันติโสภาคศรี. โครงสร้างของอะมิโลส อะมิโลเพกทินและคุณสมบัติของแป้งมันสำปะหลังที่สกัดได้จากเกษตรศาสตร์ 50 ในอายุต่าง ๆ กัน. ใน: การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 36; วันที่ 3-5 ก.พ. 2541; กรุงเทพฯ. [กรุงเทพฯ]: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์; 2541. น. 248.
- [12] Ponglong J, Senggunprai L, Tungsutjarit P, Changsri R, Proongkhong T, Thawornchinsombut S, et al. Hydrolysate and ethanolic extract of Tubtim-Chumphae rice bran improve insulin resistance in high fat-high fructose diet fed rats. Srinagarind Med J. 2018;33(5):59.
- [13] Sriroth K, Piyachomkwan K. Starch technology. Bangkok: Kasetsart University Press; 2007.
- [14] Shaf M, Baba WN, Masoodi FA. Composite four blends: influence of particle size of water chestnut four on nutraceutical potential and quality of Indian fat bread. J Food Meas Charact. 2017;11:1094-105.
- [15] AOAC International. HPLC post-column derivatization environmental food and feed analysis product testing solutions. Mountain View (CA): Pickering Laboratories; 2019.
- [16] AOAC International. Official methods of analysis. Methods 920.87, 922.06, 977.20, 985.29, 985.35, 994.10, and 996.06. Rockville (MD): AOAC International; 2023.
- [17] ASEAN Network of Food Data Systems. ASEAN manual of food analysis. Bangkok: Institute of Nutrition, Mahidol University; 2011.
- [18] AOAC International. Methods of analysis for nutrition labeling. Arlington (VA): AOAC International; 1993.
- [19] ธัญญภรณ์ ศิริเลิศ. การประเมินลักษณะเนื้อสัมผัสในอาหาร. วารสารเทคโนโลยีการอาหาร มหาวิทยาลัยสยาม. 2560;3(1):6-13.
- [20] วีระเดช กนกเมธากุล, นัฐวงศ์ เฟื่องไพบุลย์, รัชฎา ตั้งวงศ์ไชย. การพัฒนาผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบทอดจากกล้วยน้ำว้า. ใน: การประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 22; 25 มี.ค. 2564; ขอนแก่น. [ขอนแก่น]: มหาวิทยาลัยขอนแก่น; 2564. น. 512-524.

การกำจัดยาโคลิสตินในน้ำโดยการดูดซับด้วยเกล็ดถ่านกัมมันต์ ที่ดัดแปรด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์

Adsorption removal of colistin from aqueous solution using NaOH-modified granular activated carbon

สินีนภา ไทยบุญรอด¹, ชญาณิน หานวรินโรจ¹, อรรถจริย สมัตตะ¹, อารีรัตน์ ขณะรัตน์¹,
เอกนรินทร์ ธนายุพงษ์¹, พิทักษ์ งามเมืองตึง¹, พีรกานต์ บรรเจิดกิจ²,
เสาวลักษณ์ เฉลียวเลิศอำพล¹, ณัฐพร พิมพะ¹

Sineenat Thaiboonrod¹, Chayanin Hanwarinroj¹, Attajaree Smata¹, Areerat Kanarat¹,
Eknarin Thanayupong¹, Pitak Ngammuangtueng¹, Peerakarn Banjerdkij²,
Saowaluk Chaleawler-umpon¹, Nuttaporn Pimpha¹

รับบทความ 30 พฤษภาคม 2567 แก้ไขบทความ 4 กันยายน 2567 ยอมรับตีพิมพ์ 2 ตุลาคม 2567

บทคัดย่อ

ปัจจุบันมีการตรวจพบยาปฏิชีวนะปนเปื้อนในแหล่งน้ำมากขึ้นซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งของการเกิดเชื้อดื้อยา โคลิสตินเป็นยาปฏิชีวนะชนิดสุดท้ายที่ใช้รักษาโรคติดเชื้อที่ดื้อต่อยาปฏิชีวนะชนิดอื่นที่ใช้รักษาโรคทั้งในมนุษย์และในสัตว์ แต่ร่างกายของมนุษย์และสัตว์ไม่สามารถดูดซึมยาโคลิสตินได้อย่างสมบูรณ์จึงถูกขับออกและปนเปื้อนอยู่ในสิ่งแวดล้อม งานวิจัยนี้ศึกษาการใช้ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการดัดแปรพื้นผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (m-GAC) ในการดูดซับยาโคลิสตินในน้ำโดยใช้วิธีการดัดแปรพื้นผิวถ่านกัมมันต์ที่ทำได้ง่าย ไม่ซับซ้อน และไม่ต้องกระตุ้นด้วยอุณหภูมิสูง จากนั้นทดสอบการดูดซับยาด้วยวิธีแบบกะที่ความเข้มข้นของยาโคลิสติน 250 มิลลิกรัมต่อลิตร จากผลการดูดซับพบว่าถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการดัดแปรพื้นผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์สามารถดูดซับยาโคลิสตินได้สูงสุด 83.9 มิลลิกรัมต่อกรัมของถ่านกัมมันต์ ซึ่งสูงกว่าถ่านกัมมันต์ที่ไม่ได้ดัดแปรพื้นผิว (GAC, 31 มิลลิกรัมต่อกรัม) อย่างมีนัยสำคัญ ไอโซเทิร์มการดูดซับสอดคล้องกับสมการของฟรุนดลิชและจลนพลศาสตร์การดูดซับสอดคล้องกับปฏิกิริยาอันดับสองเทียม และมีอัตราเร็วในการดูดซับยาโคลิสตินสูงกว่าถ่านกัมมันต์ที่ไม่ได้ดัดแปรพื้นผิว ความเป็นไปได้ของกลไกการดูดซับยาโคลิสตินของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการดัดแปรพื้นผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์คือการดูดซับทางกายภาพ เกิดผ่านแรงดึงดูดแบบไฟฟ้าสถิตและพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่เพิ่มขึ้นหลังจากการดัดแปรพื้นผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ผลการศึกษานี้ได้นำเสนอข้อมูลพื้นฐานในการปรับปรุงประสิทธิภาพถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีที่สามารถนำไปขยายการผลิตได้ เพื่อเป็นประโยชน์กับการนำไปประยุกต์ใช้ในการกำจัดยาโคลิสตินที่ปนเปื้อนในน้ำ และเพื่อลดผลกระทบการเกิดการดื้อยาโคลิสตินของจุลชีพต่อไปได้

คำสำคัญ: การดูดซับ, โคลิสติน, ถ่านกัมมันต์

¹ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

²ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Abstract

Nowadays, antibiotic contamination in water sources is increasingly being detected, contributing to the rise of the causes of drug resistance. Colistin is a last-resort antibiotic used to treat infections that are resistant to other antibiotics in both humans and animals. However, it is not completely adsorbed by both human and animal bodies, leading to its excretion and subsequent environmental contamination. This research studies the use of sodium hydroxide modified granular activated carbon (m-GAC), prepared by a simple and low temperature activation process for the adsorption of colistin in water. Batch adsorption experiment was investigated at a colistin concentration of 250 mg/L. The maximum adsorption capacity of the m-GAC was significantly higher (83.9 mg/g) than the unmodified activated carbon (GAC, 31 mg/g). The adsorption behavior matched well with the Freundlich isotherm, and the pseudo-second-order kinetic model. Additionally, the m-GAC exhibited a higher rate of colistin absorption compared to GAC. The predominant adsorption mechanisms are likely a strong physical adsorption, including electrostatic attraction and hydrogen bonding. The increase in oxygen-containing groups on the surface of m-GAC enhances its adsorption efficiency. This study offers foundational insights for improving the adsorption efficiency of activated carbon on a scalable production level for colistin removal application in water and further aiding in the control of colistin resistance-spread among microorganisms.

Keywords: Adsorption, Colistin, Activated carbon

¹National Nanotechnology Center, National Science and Technology Development Agency

²Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University

^{*}Corresponding author e-mail address: sineenat@nanotec.or.th, saowaluk@nanotec.or.th, nuttaporn@nanotec.or.th

1. บทนำ (Introduction)

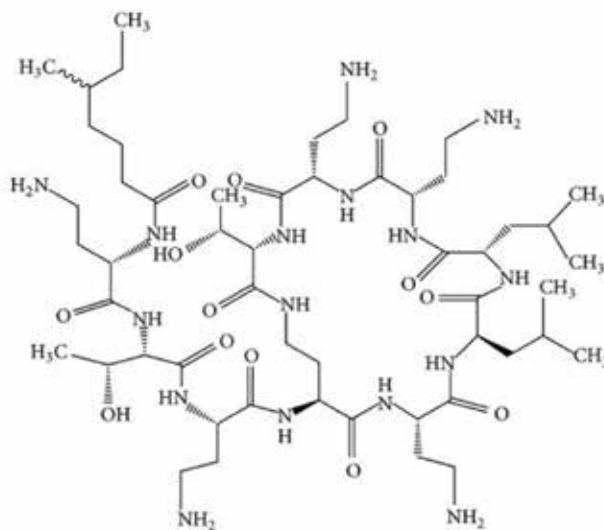
ปัจจุบันมีการตรวจพบยาปฏิชีวนะที่ใช้ในการรักษาพยาบาลและปศุสัตว์ปนเปื้อนในแหล่งน้ำมากขึ้น โดยยาปฏิชีวนะปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมจากกิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์ เช่น อุตสาหกรรมยา น้ำเสียชุมชน ปศุสัตว์ และการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ รวมถึงน้ำชะขยะมูลฝอย น้ำเสียจากโรงพยาบาลถือเป็นแหล่งสำคัญของการปนเปื้อนยาปฏิชีวนะ ดังนั้นโรงบำบัดน้ำเสียรวมจะได้รับน้ำเสียที่มียาปฏิชีวนะดังกล่าว หากไม่มีวิธีเฉพาะในการกำจัดยาปฏิชีวนะเหล่านี้ ยาปฏิชีวนะจะตกค้างอยู่ในสิ่งแวดล้อมและส่งผลกระทบต่ออย่างรุนแรง ถึงแม้ว่าความเข้มข้นยาปฏิชีวนะที่ตรวจพบในสิ่งแวดล้อมจะต่ำมากเมื่อเทียบกับมลพิษหลัก แต่การตกค้างของยาปฏิชีวนะระดับนาโนกรัมถึงไมโครกรัมสามารถส่งผลกระทบต่อเจริญเติบโตของสิ่งมีชีวิตในน้ำได้ นอกจากนี้ยังสามารถกระตุ้นให้เกิดการดื้อยาต้านจุลชีพ (Antimicrobial resistance, AMR) ส่งผลกระทบต่อภาวะแทรกซ้อนที่มากขึ้นในการรักษาผู้ป่วยติดเชื้อในโรงพยาบาล [1] รวมทั้งส่งผลกระทบต่อสุขภาพคน สุขภาพสัตว์ และสิ่งแวดล้อม ก่อให้เกิดการสูญเสียทางเศรษฐกิจทั้งในระดับประเทศและระดับโลก ทั่วโลกมีผู้เสียชีวิตจากการดื้อยาต้านจุลชีพประมาณปีละ 70,000 คน สำหรับประเทศไทยการคาดประมาณจากช่วงปี 2553 มีผู้เสียชีวิตจาก AMR ประมาณปีละ 38,000 ราย คิดเป็นการสูญเสียทางเศรษฐกิจไม่ต่ำกว่า 40,000 ล้านบาท เนื่องจากเชื้อดื้อยาต้านจุลชีพสามารถแพร่กระจายข้ามไปมาระหว่างคน สัตว์ และสิ่งแวดล้อม

อย่างไรก็ตามการแก้ไขปัญหาการดื้อยาต้านจุลชีพเป็นงานที่มีความซับซ้อนอย่างมากเนื่องจากเกี่ยวข้องกับสุขภาพคน สุขภาพสัตว์ และสิ่งแวดล้อม โดยยาปฏิชีวนะที่ตกค้างเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งเสริมให้เชื้อดื้อยาส่งผลกระทบต่อในวงกว้าง ยาปฏิชีวนะที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมไม่ว่าจะเป็นในน้ำใต้ดิน น้ำผิวดิน และน้ำเสีย ถึงแม้จะพบที่ความเข้มข้นต่ำมากแต่ส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิต การบำบัดน้ำเสียโดยทั่วไปแบ่งได้เป็นสองขั้นตอนหลัก ได้แก่ การบำบัดน้ำเสียขั้นต้น (Primary treatment) เป็นการกำจัดของแข็งขนาดใหญ่ออกจากน้ำเสียก่อนที่จะมีการปล่อยเข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสียเพื่อป้องกันการอุดตันของท่อ และไม่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อระบบบำบัดน้ำเสีย และการบำบัดน้ำเสียขั้นที่สอง (Secondary treatment) เป็นการกำจัดน้ำเสียที่เป็นกลุ่มสารอินทรีย์ที่อยู่ในรูปสารละลายหรืออนุภาคคอลลอยด์ ซึ่งโดยทั่วไปมักจะเป็นการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการทางชีววิทยาเนื่องจากต้องอาศัยแบคทีเรียในการย่อยสลายสิ่งสกปรกต่าง ๆ โดยการบำบัดน้ำเสียในปัจจุบันจำเป็นต้องมีการบำบัดถึงขั้นที่สองเพื่อให้ น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วมีคุณภาพตรงตามมาตรฐานน้ำทิ้งที่ทางราชการกำหนด อย่างไรก็ตามน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดมาแล้วสองขั้นตอนนี้พบการปนเปื้อนของยาปฏิชีวนะอยู่ในระดับที่ก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตได้ จึงจำเป็นต้องมีการบำบัดในขั้นที่สามด้วยกระบวนการขั้นสูง (Advanced method) ได้แก่ เทคนิคการแยกด้วยเยื่อกรอง (Membrane separation) การแยกไอออนโดยใช้ไฟฟ้า (Electrodialysis) การใช้ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation process) โดยโอโซน (Ozonation) หรือตัวเร่งปฏิกิริยา การดูดซับ (Adsorption) หรือใช้หลายกระบวนการร่วมกัน [2-3]

เทคนิคการดูดซับเป็นหนึ่งในวิธีการที่ใช้กันแพร่หลายมากที่สุดสำหรับการกำจัดยาปฏิชีวนะ เนื่องจากทำได้ง่าย มีประสิทธิภาพสูง เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้ ลดการปลดปล่อยมลภาวะอื่นเพิ่ม รวมถึงสามารถขยายขนาดทำในปริมาณมากได้ นอกจากนี้ยังสามารถกำจัดยาปฏิชีวนะความเข้มข้นต่ำที่ปนเปื้อนในน้ำเสียได้ [4] วัสดุดูดซับเพื่อใช้กำจัดยาปฏิชีวนะสามารถเลือกได้จากหลายชนิด ได้แก่ วัสดุที่มีคาร์บอนเป็นส่วนประกอบหลัก (เช่น ถ่านกัมมันต์ ท่อนาโนคาร์บอน กราฟีน และถ่านชีวภาพ) ดินเหนียวและแร่ธาตุ เรซินโพลีเมอร์ โลหะออกไซด์ (เช่น อลูมิเนียมออกไซด์ และอนุภาคนาโนแมกนีเซียมออกไซด์) พอลิเมอร์พิมพ์ลายโมเลกุล (Molecular imprinted polymers) ไคโตซานและเจล เป็นต้น ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) เป็นตัวดูดซับที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากเป็นวัสดุคาร์บอนที่มีโครงสร้างรูพรุน และพื้นที่ผิวสูง สามารถเตรียมได้ง่าย จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ราคาไม่แพง นอกจากนี้ยังสามารถปรับแต่งหมู่ฟังก์ชันเคมีบนพื้นผิวเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับได้อีกด้วย [4-6]

โคลิสติน (Colistin) เป็นยาปฏิชีวนะที่มีฤทธิ์ต้านแบคทีเรียแกรมลบ ใช้รักษาโรคติดเชื้อแบคทีเรียแกรมลบที่ดื้อต่อยาปฏิชีวนะชนิดอื่น การใช้ยาโคลิสตินในมนุษย์มีทั้งแบบรับประทานและแบบใช้เฉพาะที่ ตลอดจนการให้ยาทางหลอดเลือดดำและละอองลอย เนื่องจากผู้ร่างกายดูดซึมยาโคลิสตินได้ไม่สมบูรณ์จึงมียาโคลิสตินจำนวนมากถูกขับออก

ทางปัสสาวะและปนเปื้อนออกสู่สิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ยังมีการใช้ยาโคลิสตินในการเลี้ยงสัตว์เพื่อป้องกันและรักษาโรค ส่งผลให้มีการใช้ในปริมาณมาก แต่ยาโคลิสตินถูกดูดซึมในลำไส้ของสัตว์ได้น้อยเช่นกัน ส่วนใหญ่จึงถูกขับออกทางอุจจาระ และปัสสาวะ การปนเปื้อนของโคลิสตินในน้ำทิ้งส่งผลให้ยาปฏิชีวนะสะสมในสิ่งแวดล้อม ไม่ว่าจะเป็นในดิน แหล่งน้ำ หรือ แม่น้ำ ซึ่งก่อให้เกิดการแพร่กระจายของแบคทีเรียดื้อยาที่ควบคุมได้ยาก สร้างผลกระทบต่อระบบนิเวศสัตว์น้ำและความสมดุลทางชีวภาพ หากน้ำที่ปนเปื้อนไม่ได้รับการบำบัดอย่างถูกต้องและเข้าสู่แหล่งน้ำสำหรับใช้ในการอุปโภคบริโภค จะก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพมนุษย์ เนื่องจากโคลิสตินมีความเป็นพิษสูง นอกจากนี้ การปนเปื้อนดังกล่าวยังทำให้เกิดการแพร่กระจายของยีนดื้อยา ซึ่งนำไปสู่การติดเชื้อแบคทีเรียที่ดื้อต่อยาปฏิชีวนะ ส่งผลให้การรักษาโรคติดเชื้อในอนาคตทำได้ยากขึ้น [7-8] ในปี 2558 พบการดื้อยาโคลิสตินในฟาร์มหมูเป็นครั้งแรกของโลก เมื่อศึกษาหาสารพันธุกรรมดื้อยาโคลิสตินทั้งในคนและสัตว์ทำให้พบว่าการส่งสายพันธุกรรมหรือเชื้อดื้อยาข้ามจากสัตว์มาคน และจากคนไปสัตว์ รวมทั้งสัตว์เลี้ยงด้วย หากมีการดื้อยาโคลิสตินหมายความว่าอาจไม่มียาชนิดอื่นใช้รักษาได้ผลอีกแล้ว เนื่องจากยาโคลิสตินเป็นยาชนิดสุดท้ายที่ใช้ในการรักษาเชื้อแบคทีเรียดื้อยาของมนุษย์ [9]



รูปที่ 1 โครงสร้างเคมีของยาโคลิสติน

จากการทบทวนวรรณกรรมการดูดซับยาโคลิสติน พบว่ามีงานวิจัยที่ศึกษาการใช้ซีโอไลต์สองชนิด ได้แก่ ซีโอไลต์จากเถ้าลอย (NaP1_FA) และซีโอไลต์จากเถ้าลอยที่มีคาร์บอนสูง (NaP1_C) ในการดูดซับยาโคลิสตินในน้ำ [10] โดยสังเคราะห์ซีโอไลต์ผ่านปฏิกิริยาระหว่างเถ้าลอยกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในสภาวะที่เหมาะสม จากผลการทดลองพบว่าซีโอไลต์ทั้งสองชนิดสามารถดูดซับโคลิสตินที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ได้มากกว่าร้อยละ 90 ภายในเวลา 2 นาที โดยประสิทธิภาพการกำจัดโคลิสตินสูงสุดเมื่อใช้ NaP1_C ปริมาณ 0.1 กรัมต่อลิตร และ NaP1_FA ปริมาณ 2 กรัมต่อลิตร อย่างไรก็ตามการใช้ซีโอไลต์ในรูปแบบผงยังคงมีข้อจำกัด เช่น การเก็บผงเพื่อใช้ซ้ำหรือกำจัดออกทำได้ยาก เนื่องจากต้องแยกผงออกจากน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้ว อีกทั้งการใช้ตัวดูดซับในรูปแบบผงไม่สามารถนำไปใช้ในระบบกรองน้ำแบบน้ำไหลผ่านได้ และยังมีความเสี่ยงที่ผงดูดซับจะปนเปื้อนน้ำที่ผ่านการบำบัดหากไม่มีการป้องกันที่เพียงพอ นอกจากการบำบัดโคลิสตินด้วยการดูดซับแล้ว ยังมีงานวิจัยที่ศึกษาการย่อยสลายยาโคลิสตินในน้ำโดยปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยโพแทสเซียมเฟอร์เรต (Potassium ferrate (K_2FeO_4 , Fe(VI))) ซึ่งเป็นสารออกซิไดซ์ที่มีความรุนแรง พบว่าสามารถย่อยสลายยาโคลิสติน ความเข้มข้น 30 ไมโครโมลาร์ ได้มากกว่าร้อยละ 90 หลังจากการทำปฏิกิริยา 5 วินาที ผลการทดสอบทางจุลชีววิทยาพบว่าผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการย่อยสลายไม่มีฤทธิ์ต้านเชื้อแบคทีเรียและมีความเป็นพิษต่ำ

[11] อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ไม่ได้อธิบายถึงกลไกการย่อยสลายและไม่ได้ระบุผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น จึงไม่สามารถยืนยันความปลอดภัยของการกำจัดโคลิสตินด้วยวิธีนี้ได้ นอกจากนี้ โพรทอสเต็มเพอร์เรตเป็นสารเคมีที่มีความเป็นพิษสูง ดังนั้นจึงต้องใช้ความระมัดระวังในการขนส่ง การใช้งานและการจัดเก็บ นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่ศึกษาการบำบัดตะกอนทางเภสัชกรรม (Pharmaceutical sludge) ที่มีส่วนประกอบของยาปฏิชีวนะรวมถึงโคลิสติน ด้วยกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพในสภาวะที่ไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic digestion) พบว่าสามารถกำจัดโคลิสตินซัลเฟตได้อย่างสมบูรณ์ [12] อย่างไรก็ตามการบำบัดตะกอนด้วยกระบวนการทางชีวภาพมีข้อจำกัดหลายประการ เช่น ต้องควบคุมสภาวะและสารอาหารให้เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย ใช้เวลายาวนาน และอาจเกิดก๊าซขึ้นระหว่างกระบวนการ ดังนั้นจึงต้องมีการออกแบบและติดตั้งระบบบำบัดที่เหมาะสม ซึ่งมีต้นทุนสูงกว่าการบำบัดด้วยวิธีอื่น

จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่างานวิจัยที่ศึกษาการกำจัดยาโคลิสตินนั้นมีค่อนข้างน้อยและยังไม่พบงานวิจัยที่ศึกษาการกำจัดยาโคลิสตินในน้ำโดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์มาก่อน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนับเป็นครั้งแรกที่มีการศึกษาการใช้ถ่านกัมมันต์รูปแบบเกล็ดดูดซับยาโคลิสติน โดยมุ่งเน้นศึกษาการใช้ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการดัดแปรพื้นผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเป็นวิธีที่ทำได้ง่าย ไม่ซับซ้อน และไม่ต้องกระตุ้นด้วยอุณหภูมิสูง สำหรับดูดซับยาโคลิสตินในน้ำด้วยวิธีการทดสอบการดูดซับแบบกะและศึกษาหลักการดูดซับผ่านไอโซเทิร์มและจลนพลศาสตร์การดูดซับยาโคลิสตินบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์ คณะผู้วิจัยหวังว่าผลการศึกษานี้จะให้ข้อมูลพื้นฐานที่เป็นประโยชน์สำหรับนำไปประยุกต์ใช้ในการกำจัดยาโคลิสตินในน้ำ เพื่อลดผลกระทบจากการดื้อยาโคลิสตินของจุลชีพในอนาคต

2. วิธีการวิจัย (Experimental methods)

2.1 สารเคมี

ถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวในรูปเกล็ด (Granular activated carbon, GAC) ได้จากบริษัท คาร์โบกาญจน์ จำกัด (ไทย) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และยาโคลิสตินซัลเฟต (Colistin sulfate) จาก Sigma-Aldrich (สหรัฐอเมริกา)

2.2 การเตรียมถ่านกัมมันต์ที่ดัดแปรด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ NaOH (NaOH modified granular activated carbon, m-GAC) โดยดัดแปลงจากงานวิจัยที่มีการทำการก่อนหน้านี้ [13]

เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ผสมกับถ่านกัมมันต์จำนวน 5 กรัม ปั่นกวนเป็นเวลา 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง ก่อนนำไปต้มที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ในตู้อบลมร้อน จากนั้นนำถ่านกัมมันต์มาล้างเพื่อปรับสภาพให้เป็นกลางและอบแห้งในตู้อบลมร้อนอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 ชั่วโมง

2.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของวัสดุดูดซับ

2.3.1 ตรวจสอบสัณฐานวิทยาของพื้นผิววัสดุโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดควบคู่กับเครื่องเอ็กซ์เรย์สเปกโทรสโกปีแบบกระจายพลังงาน (Scanning electron microscope coupled with an energy dispersive X-ray spectroscopy, SEM-EDX) ยี่ห้อ Hitachi รุ่น SU8230 (ญี่ปุ่น)

2.3.2 ตรวจสอบพื้นที่ผิวจำเพาะโดยการดูดซับ/คายซับแก๊สไนโตรเจนด้วยวิธีเบรนนอร์ เอ็มเมทท์และเทลเลอร์ (Brunauer-Emmett-Teller, BET) โดยใช้เครื่องวิเคราะห์พื้นผิว (Surface analyzer) ยี่ห้อ Micromeritics รุ่น 3-Flex 3500 (สหรัฐอเมริกา)

2.3.3 วิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (FTIR) ยี่ห้อ Thermo Scientific รุ่น Nicolet iS50 FT-IR (สหรัฐอเมริกา) โดยใช้วิธีบีบตัวอย่างกับโพแทสเซียมโบรไมด์ (KBr)

2.3.4 วิเคราะห์ค่า pH ที่ทำให้ประจุบนพื้นผิวเป็นศูนย์ (Isoelectric point, IEP) โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ห้อนาโน (Zetasizer) ยี่ห้อ Malvern รุ่น ultra (สหราชอาณาจักร) โดยเตรียมถ่านกัมมันต์ 0.01 กรัม กระจายตัวในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.001 โมลาร์ จากนั้นปรับค่า pH ให้อยู่ในช่วง 3-12 ด้วยสารละลายกรดไนตริกและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ทำให้ถ่านกัมมันต์กระจายตัวโดยใช้อ่างอัลตราโซนิกเป็นเวลา 30 นาที ก่อนนำไปวัดค่าศักย์ไฟฟ้า

ซีต้า (Zeta potential) พล็อตกราฟระหว่าง pH กับค่าศักย์ไฟฟ้าซีต้า โดยค่า pH ที่ศักย์ไฟฟ้าซีต้าเป็นศูนย์ถือเป็นจุดไอโซอิเล็กทริก (IEP) [14]

2.3.5 วิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบโดยใช้เครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุ (Elemental analyzer) ยี่ห้อ Leco รุ่น 628 series (สหราชอาณาจักร)

2.4 ทดสอบการดูดซับยาด้วยวิธีแบบกะ (Batch adsorption)

ใช้ตัวดูดซับ (GAC หรือ m-GAC) ปริมาณ 0.5 กรัม ในสารละลายยาโคลิสตินปริมาตร 100 มิลลิลิตร ที่ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/L) บั่นกวนด้วยความเร็ว 300 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้องในสภาวะมืด เก็บตัวอย่างปริมาตร 1.5 มิลลิลิตร ที่ระยะเวลาด่าง ๆ ตั้งแต่ 5 ถึง 2,880 นาที และกรองผ่านตัวกรองในลอนแบบเข็มฉีดยา ขนาด 0.22 ไมครอนเมตร วิเคราะห์หาความเข้มข้นของยาโคลิสตินในสารละลายด้วยเทคนิคลิควิดโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี (Liquid chromatography tandem mass spectrometer, LC-MS/MS ยี่ห้อ Agilent รุ่น 1290 infinity/6495 Triple quad) คำนวณความสามารถในการดูดซับ (q_t , mg/g) โดยใช้สมการ(1):

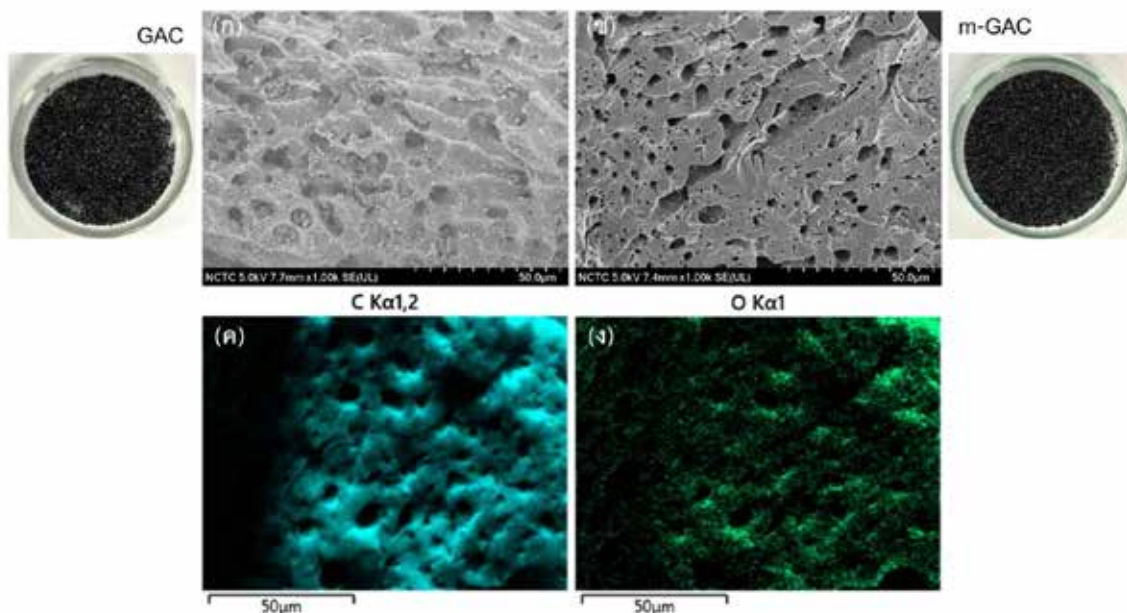
$$q_t = \frac{(C_0 - C_t) V}{m} \quad (1)$$

โดยที่ C_0 คือความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L) ของยาโคลิสตินในสารละลาย, C_t คือความเข้มข้นคงเหลือของยาโคลิสตินในสารละลาย ณ เวลาการดูดซับที่กำหนด (mg/L), V คือปริมาตรของสารละลายยาโคลิสติน (L) และ m คือน้ำหนักของตัวดูดซับ (g)

3. ผลและวิจารณ์ (Results and discussion)

3.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างเคมีของตัวดูดซับ

งานวิจัยนี้ได้ทำการดัดแปรพื้นผิว GAC ด้วยเบสโซเดียมไฮดรอกไซด์ได้เป็น m-GAC รูปที่ 2 แสดงลักษณะพื้นผิวของ GAC และ m-GAC พบว่า พื้นผิวของตัวอย่างทั้งสองมีลักษณะขรุขระและมีโครงสร้างรูพรุนที่ไม่สม่ำเสมอ นอกจากนี้ยังพบว่า GAC ที่ผ่านการดัดแปร (m-GAC) มีรูพรุนที่ขนาดใหญ่และชัดเจนขึ้น จึงมีโอกาสดูดซับยาโคลิสตินจะแพร่เข้าไปในตัวดูดซับได้มากกว่า จากการวิเคราะห์ภาพ SEM ด้วยเทคนิค EDX แสดงให้เห็นว่า m-GAC มีองค์ประกอบของธาตุคาร์บอน ออกซิเจน และโซเดียมอยู่บนพื้นผิวซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ (ตารางที่ 1) ที่แสดงให้เห็นว่า m-GAC มีปริมาณของธาตุออกซิเจนที่สูงกว่า GAC



รูปที่ 2 ภาพ SEM ของ (ก) GAC (ข) m-GAC และภาพการกระจายของธาตุบน m-GAC (ค) ธาตุคาร์บอน (C) และ (ง) ธาตุออกซิเจน (O)

ตารางที่ 1 ร้อยละองค์ประกอบของธาตุ พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และค่า pHPZC ของ GAC และ m-GAC

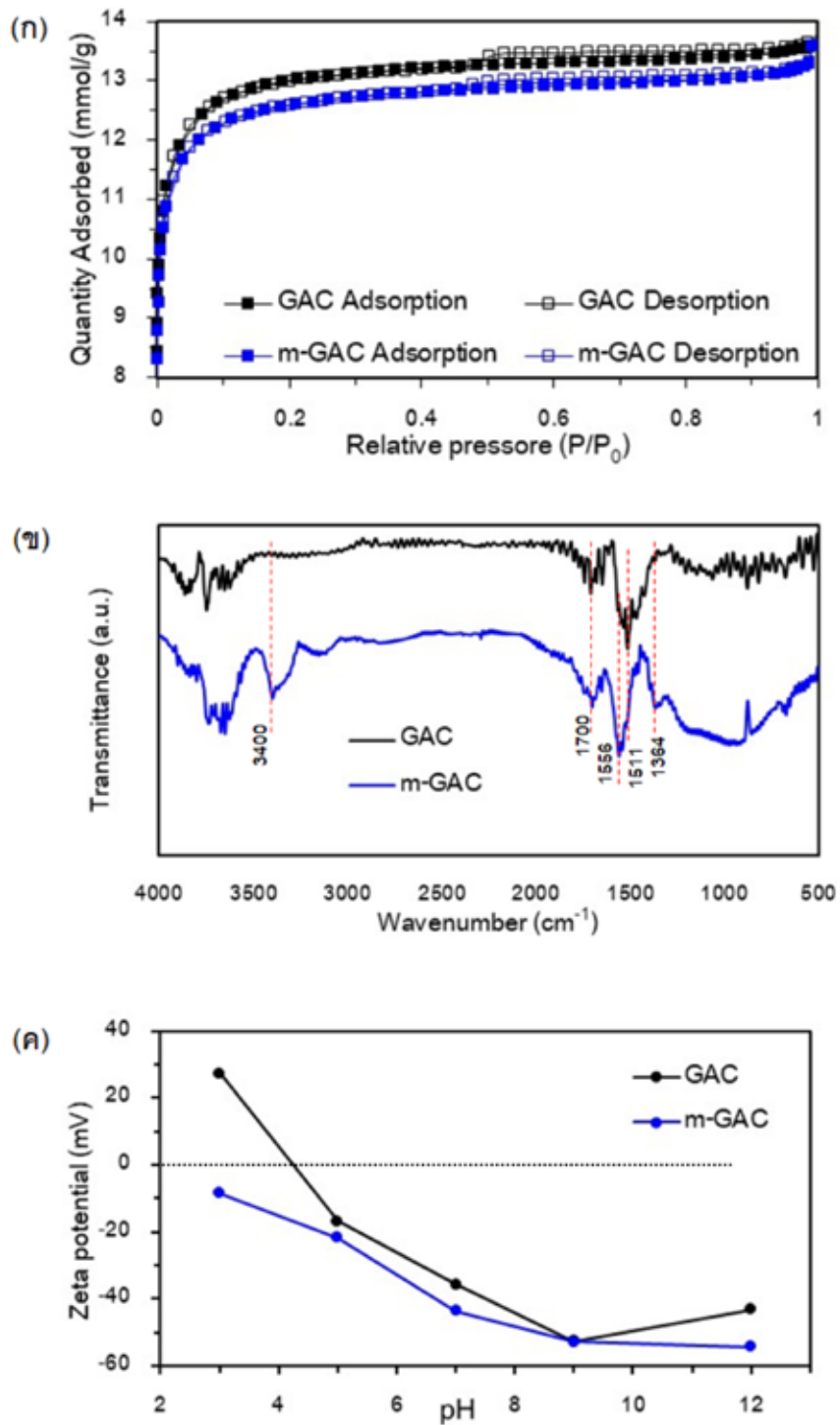
Adsorben	%Element				BET surface area ¹ (m ² /g)	Pore volume ² (cm ³ /g)		Average Pore size (nm)	IEP ³
	C	H	N	O		Micropore	Total pore		
GAC	73.9 (±0.20)	0.10 (±0.06)	0.70 (±0.30)	25.4 (±1.50)	1,145	0.40	0.45	1.64	4.3
m-GAC	68.7 (±0.4)	0.06 (±0.01)	0.80 (±0.04)	30.4 (±6.80)	1,111	0.38	0.45	1.65	<3

¹ คำนวณโดยใช้วิธี Brunauer-Emmett-Teller (BET)

² คำนวณโดยใช้วิธี t-plot

³ Isoelectric point

รูปที่ 3(ก) แสดงไอโซเทอรั่มการดูดซับ/การคายแก๊สไนโตรเจนของตัวดูดซับ GAC และ m-GAC โดยค่าพื้นที่ผิวที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธี BET (S_{BET}) และปริมาตรรูพรุนทั้งหมด (V_t) แสดงในตารางที่ 1 จากผลการทดลองพบว่าโครงสร้างรูพรุนส่วนใหญ่ของตัวดูดซับทั้งสองแบบเป็นแบบไมโครพอร์ (Micropore) ทั้งนี้ลักษณะรูพรุนแบบไมโครพอร์ของตัวดูดซับ GAC (ทางการค้า) โดยทั่วไปเกิดขึ้นจากกระบวนการเตรียมถ่านกัมมันต์ โดยใช้เทคนิคการกักกัมมันต์ด้วยวิธีทางกายภาพหรือทางเคมี ทำให้เกิดโครงสร้างรูพรุนแบบไมโครพอร์ (ขนาด < 0.2 นาโนเมตร) เมื่อนำมาดัดแปรพื้นผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ภายหลัง (Post treatment process) จึงไม่ส่งผลต่อพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนทั้งหมดของถ่านกัมมันต์อย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 3 (ก) ไอโซเทอรัมการดูดซับ/การคายแก๊สไนโตรเจน (ข) สเปกตรัม FTIR และ (ค) ค่าศักย์ไฟฟ้าซีตาของ GAC และ m-GAC

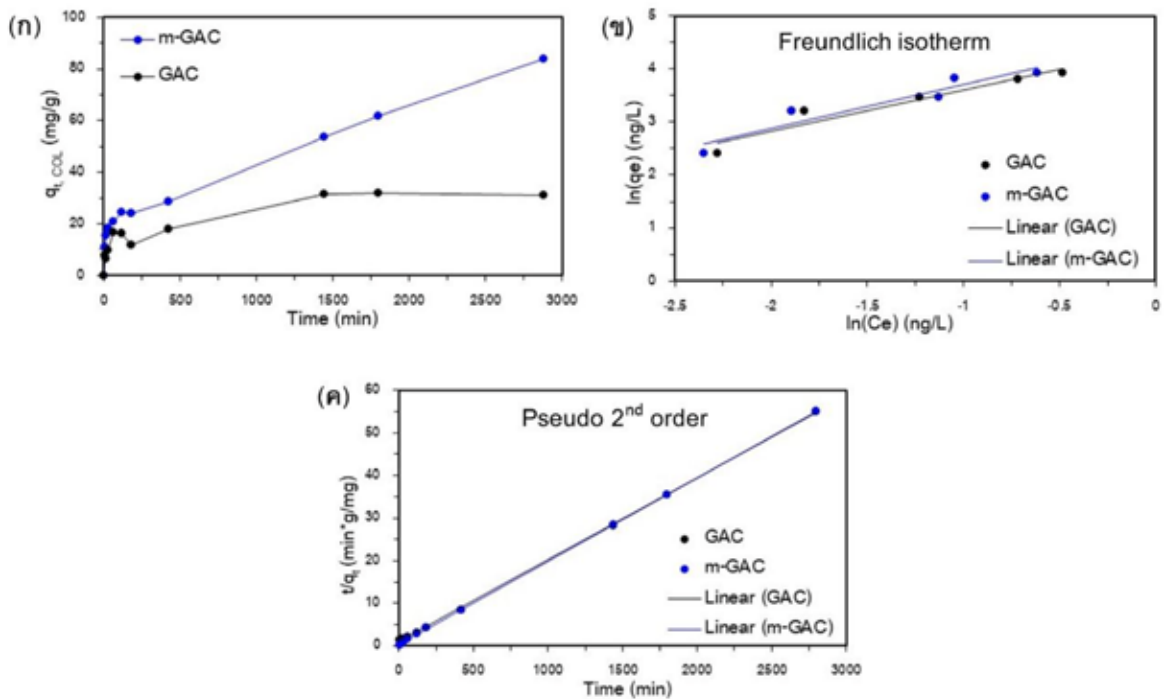
การศึกษาหมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับ GAC และ m-GAC เพื่อบอกอันตรกิริยาที่อาจจะเกิดขึ้นระหว่างตัวดูดซับกับโมเลกุลของยาในกระบวนการดูดซับโดยใช้เทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี จากรูปที่ 3(ข) พบว่า สเปกตรัมของตัวดูดซับทั้งสองชนิดปรากฏพีคที่เลขคลื่น $3200-3600\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นของหมู่ไฮดรอกซิล (OH) ของแอลกอฮอล์หรือจากความชื้นที่อยู่ในตัวอย่าง แต่พบว่าพีคของ m-GAC มีความชัดเจนและมีความเข้มของพีคเพิ่มขึ้น รวมถึงการเกิดพีคชัดเจนที่ตำแหน่ง 3400 cm^{-1} เนื่องจากการมีหมู่ OH มากขึ้นจากการเพิ่มขึ้นของกรดคาร์บอกซิลิก (Carboxylic acid) หลังจากผ่านการดัดแปรด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ [15] ซึ่งสอดคล้องกับพีคที่ตำแหน่ง 1700 cm^{-1} ของหมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl) ที่มีความเข้มสูงขึ้นเช่นกัน นอกจากนี้ยังพบการเลื่อนของพีคที่ตำแหน่ง 1511 ไปเป็น 1556 cm^{-1} (หมู่ $\text{C}=\text{C}$ aromatic) รวมถึงการเกิดพีคใหม่ที่ตำแหน่ง 1364 cm^{-1} และกราฟที่กว้างขึ้นที่ตำแหน่ง 1100 cm^{-1} ซึ่งเป็นของหมู่ $\text{C}-\text{O}$ แสดงให้เห็นว่าเกิดหมู่ฟังก์ชันเคมีที่มีธาตุออกซิเจน ได้แก่ หมู่คาร์บอกซิลและหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวของ GAC ที่ผ่านการดัดแปรด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (m-GAC) [16]

ค่าความเป็นกรด-เบสเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อการดูดซับ เนื่องจากความเป็นกรด-เบสสัมพันธ์กับประจุบนผิวของตัวดูดซับ การศึกษาค่าประจุพื้นผิวเป็นศูนย์ (Isoelectric point, IEP) เพื่อบอกถึงประจุบนพื้นผิวของตัวดูดซับเมื่ออยู่ในสารละลาย pH ต่าง ๆ และใช้ประกอบการอธิบายกลไกการดูดซับได้ รูปที่ 3(ค) แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าซีตาของตัวดูดซับในสารละลายช่วง pH 3-12 พบว่า ค่า IEP ของ m-GAC ต่ำกว่า 3 ขณะที่ค่า IEP ของ GAC เท่ากับ 4.2 แสดงให้เห็นว่า m-GAC มีพื้นผิวที่เป็นประจุลบมากกว่า ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของหมู่ฟังก์ชันที่มีธาตุออกซิเจนเป็นองค์ประกอบหลังกระบวนการดัดแปรพื้นผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์

3.2 ไอโซเทิร์มของการดูดซับ

ไอโซเทิร์มของการดูดซับ (Adsorption isotherm) ใช้อธิบายอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับกับพื้นผิวของตัวดูดซับ รูปที่ 4(ก) แสดงข้อมูลการดูดซับยาโคลิสตินของ GAC และ m-GAC ที่ความเข้มข้น 250 mg/L พารามิเตอร์ของแบบจำลองไอโซเทิร์มทั้งสองแบบสรุปได้ดังตารางที่ 2 จากผลการทดลองพบว่า m-GAC มีความสามารถในการดูดซับยาโคลิสตินได้มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ GAC ณ เวลาเดียวกัน และที่เวลาเพิ่มขึ้น ตัวดูดซับทั้งสองชนิดสามารถดูดซับยาได้มากขึ้น จนถึงเวลา 1500 นาที GAC จะเริ่มอิ่มตัวและไม่สามารถดูดซับยาได้อีก ขณะที่ m-GAC ยังสามารถดูดซับยาต่อไปได้ ที่เวลา 2880 นาที m-GAC สามารถดูดซับยาโคลิสตินได้สูงสุด 83.9 mg/g ผลการศึกษาไอโซเทิร์มของการดูดซับพบว่ามีความสอดคล้องกับแบบจำลองการดูดซับของฟรุนดลิช (ค่า R^2 มากกว่า 0.90) มากกว่าการใช้แบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์ (ค่า R^2 ของ GAC และ m-GAC เท่ากับ 0.702 และ 0.44 ตามลำดับ) ดังแสดงในรูปที่ 4(ข) แสดงให้เห็นว่าการดูดซับยาโคลิสตินบนพื้นผิวของ GAC และ m-GAC เป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer) ซึ่งลักษณะพื้นผิวของตัวดูดซับทั้งสองชนิดที่ได้จากเทคนิค SEM ยังสอดคล้องกับสมมติฐานการดูดซับของฟรุนดลิชที่ว่าพื้นผิวของตัวดูดซับมีลักษณะขรุขระและไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous) อีกด้วย นอกจากโมเลกุลของยาโคลิสตินจะมีอันตรกิริยากับพื้นผิวตัวดูดซับแล้ว ยังสามารถเกิดอันตรกิริยากันเองระหว่างโมเลกุลในชั้นถัดไปด้วย จึงทำให้จำนวนชั้นของการดูดซับมีได้ไม่จำกัด หรืออาจเกิดจากการดูดซับแบบชั้นเดียวที่มาซ้อนทับกันอันเนื่องมาจากโครงสร้างที่ซับซ้อนของโมเลกุลยาโคลิสติน [17-18]

เมื่อพิจารณาค่า $1/n$ ที่ได้จากแบบจำลองการดูดซับของฟรุนดลิชของทั้ง GAC และ m-GAC พบว่ามีค่าน้อยกว่า 1 แสดงว่า ปริมาณพื้นผิวบนตัวดูดซับทั้งสองชนิดมีจำกัดที่จะใช้ในการดูดซับยาโคลิสติน



รูปที่ 4 (ก) กราฟแสดงความสามารถในการดูดซับยาโคลิสตินความเข้มข้น 250 mg/L ที่เวลาต่าง ๆ (ข) กราฟไอโซเทิร์มการดูดซับแบบ Freundlich และ (ค) กราฟจลนพลศาสตร์การดูดซับแบบ Pseudo 2nd order

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ของแบบจำลองไอโซเทิร์มทั้งสองแบบของ GAC และ m-GAC

Adsorbent	Isotherm model						
	Langmuir				Freundlich		
	q_i (mg/g)	q_m (mg/g)	K_L (L/mg)	R^2	n	K_F (L/mg)	R^2
GAC	83.9	123.5	1.2	0.702	1.3	80.2	0.926
m-GAC	32.0	151.5	1.0	0.440	1.2	92.4	0.907

3.3 จลนพลศาสตร์การดูดซับ

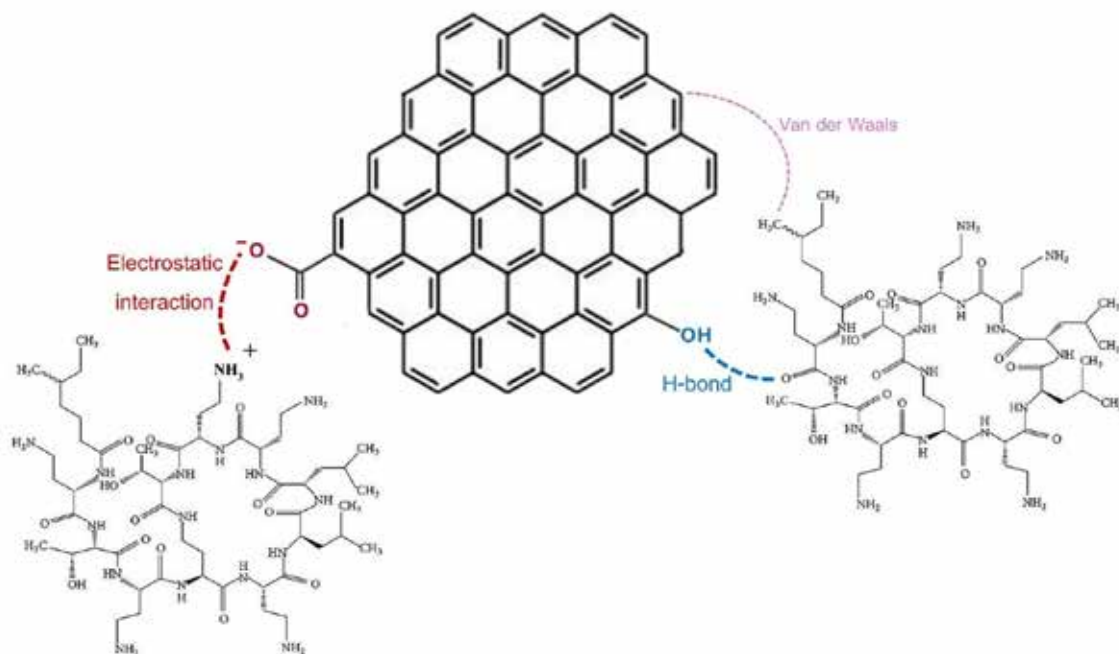
เมื่อนำผลการศึกษาการดูดซับมาศึกษากลไกการดูดซับโดยใช้แบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับ 2 รูปแบบ ได้แก่ สมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order) และสมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo-second order) เพื่อคำนวณค่าคงที่อัตราการดูดซับ (ตารางที่ 3) พบว่าค่า R^2 ของทั้งสมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมและสมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียมไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญและมีค่าใกล้เคียง 1 ทั้งคู่ จึงคาดว่า การดูดซับยาโคลิสตินบนพื้นผิวตัวดูดซับในการทดลองนี้เป็นการดูดซับทางกายภาพแบบแข็งแรงเป็นหลัก นอกจากนี้ยังพบว่า ค่าคงที่การดูดซับ (K_2) ของ m-GAC สูงกว่าค่าของ GAC แสดงให้เห็นว่า m-GAC สามารถดูดซับยาโคลิสตินได้เร็วกว่าการใช้ GAC ที่ไม่ผ่านการดัดแปรซึ่งสอดคล้องกับกราฟการดูดซับยาโคลิสตินของ GAC และ m-GAC ที่ความเข้มข้น 250 mg/L (รูปที่ 4(ก)) พารามิเตอร์ของจลนพลศาสตร์การดูดซับจากทั้งสองสมการแสดงดังตาราง 3

ตารางที่ 3 พารามิเตอร์ของจลนพลศาสตร์การดูดซับจากทั้งสองสมการของ GAC และ m-GAC

Adsorbent	Pseudo-first order			Pseudo-second order		
	q_e (mg/g)	K_1 (1/min)	R^2	q_e (mg/g)	K_2 (g/mg.min)	R^2
GAC	27.80	-0.0050	0.973	52.08	0.021	0.999
m-GAC	16.60	-0.0038	0.935	51.28	0.056	0.993

3.4 กลไกการดูดซับ

ยาโคลิสตินมีค่า pKa ประมาณ 10 [19-20] โครงสร้างโมเลกุลของยาโคลิสตินจะปรากฏอยู่ในรูปประจุบวก (Cationic form) ที่ตำแหน่งของหมู่เอมีน เมื่อทดสอบการดูดซับในสภาวะที่เป็นกลาง (ทั้งนี้ การทดสอบการดูดซับในการศึกษานี้เลือกใช้ค่า pH ของสารละลายยาโคลิสติน ที่ 6.2 โดยอ้างอิงข้อมูลค่า pH ของน้ำเสียในบ่อบำบัดจากโรงพยาบาลพระนั่งเกล้า จังหวัดนนทบุรี ประเทศไทย) จากลักษณะประจุบนพื้นผิวของ m-GAC ที่เป็นลบมากกว่า GAC ที่ pH ดังกล่าว ทำให้อัตราเร็วในการดูดซับโคลิสตินบนพื้นผิวของ m-GAC เร็วกว่า GAC เนื่องจากอาศัยแรงดึงดูดแบบไฟฟ้าสถิต (Electrostatic interaction) และการเกิดพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond) เป็นหลัก [21-22] นอกจากนี้เมื่อพิจารณา ค่า R^2 ของสมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียบกับใกล้เคียง 1 เช่นกัน จึงมีความเป็นไปได้ว่าการดูดซับที่เกิดขึ้นบางส่วนจะอาศัยการดูดซับทางกายภาพแบบอ่อนร่วมด้วย เช่น แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals force) [8,23] กลไกที่เป็นไปได้ในการดูดซับยาโคลิสตินด้วย m-GAC แสดงดังรูปที่ 5 ประกอบด้วยการดูดซับทางกายภาพแบบแข็งแรง (Electrostatic interaction และ Hydrogen bond) และการดูดซับทางกายภาพแบบอ่อน (Van der Waals force) ระหว่างหมู่ฟังก์ชันของโคลิสตินกับหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของ m-GAC สอดคล้องกับงานวิจัยที่ทำศึกษาการดูดซับโคลิสตินด้วยซีโอไลต์ [10]



รูปที่ 5 กลไกที่เป็นไปได้ในการดูดซับยา Colistin โดยใช้ m-GAC

4. สรุป (Conclusion)

ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการดัดแปรพื้นผิวด้วยไฮดรอกไซด์ (m-GAC) มีหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ (หมู่คาร์บอกซิลและไฮดรอกซิล) เพิ่มขึ้น ทำให้ลักษณะประจุรวมของพื้นผิวมีประจุลบ (IEP<3) มากขึ้นเมื่อกระจายตัวอยู่ในน้ำ แม้ว่าลักษณะพื้นผิวหรือรูพรุนไม่ได้เปลี่ยนแปลงไปจากถ่านกัมมันต์เริ่มต้น การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับยาโคลิสตินพบว่า ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการดัดแปรพื้นผิวด้วยไฮดรอกไซด์สามารถดูดซับยาโคลิสตินได้สูงสุด 83.9 มิลลิกรัมต่อกรัมของถ่านกัมมันต์ มีพฤติกรรมดูดซับสอดคล้องกับสมการการดูดซับของฟรุนดลิช คณะผู้วิจัยประเมินความเป็นไปได้ของกลไกการดูดซับยาโคลิสตินของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการดัดแปรพื้นผิวด้วยไฮดรอกไซด์ว่าสามารถเกิดผ่านการดูดซับทางกายภาพแบบแข็งแรง (การเกิดพันธะไฮโดรเจนและแรงดึงดูดแบบไฟฟ้าสถิต) ร่วมกับการดูดซับทางกายภาพแบบอ่อน (แรงแวนเดอร์วาลส์) ทำให้เกิดการดูดซับด้วยอัตราเร็วที่สูงกว่าถ่านกัมมันต์ที่ไม่ได้ดัดแปรพื้นผิวดังนั้นจะเห็นได้ว่า มีความเป็นไปได้ที่จะนำถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการดัดแปรพื้นผิวด้วยไฮดรอกไซด์ไปใช้ในระบบบำบัดน้ำเสียเพื่อดูดซับยาโคลิสตินในน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ ด้วยวิธีการเตรียมที่ง่าย ไม่ซับซ้อน สามารถขยายกำลังการผลิตได้ นอกจากนี้ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดมีความสะดวกในการรวบรวมและกำจัด ไม่แพร่กระจาย และไม่ก่อให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม สามารถใช้งานได้หลายรูปแบบ เช่น ในระบบบำบัดน้ำแบบต่อเนื่อง (Flow-through) หรือแบบกะ (Batch treatment) ซึ่งทำให้สามารถปรับใช้ในระบบการบำบัดน้ำต่าง ๆ ให้เหมาะสมต่อไปได้

5. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ปี 2566 (สัญญาเลขที่ N25A660471), หน่วยบริหารและจัดการทุนด้านการพัฒนากำลังคน และทุนด้านการพัฒนาสถาบันอุดมศึกษา การวิจัยและการสร้างนวัตกรรม (สัญญาเลขที่ B13F670069) และศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) (เลขที่โครงการ P2351315)

6. เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] Chiemchaisri W, Chiemchaisri C, Hamjinda NS, Jeensalute C, Buranapakdee P, Thamlikitkul V. Field investigation of antibiotic removal efficacies in different hospital wastewater treatment processes in Thailand. *Emerging Contam.* 2022;8:329-39. doi: 10.1016/j.emcon.2022.07.002.
- [2] Bhandari G, Chaudhary P, Gangola S, Gupta S, Gupta A, Rafatullah M, et al. A review on hospital wastewater treatment technologies: current management practices and future prospects. *JWPE.* 2023;56:104516. doi: 10.1016/j.jwpe.2023.104516.
- [3] Verlicchi P, Al Aukidya M, Zambelloa E. What have we learned from worldwide experiences on the management and treatment of hospital effluent? — an overview and a discussion on perspectives. *Sci Total Environ.* 2015;514:467-91. doi: 10.1016/j.scitotenv.2015.02.020.
- [4] Xiang Y, Xu Z, Wei Y, Zhou Y, Yang X, Yang Y, et al. Carbon-based materials as adsorbent for antibiotics removal: mechanisms and influencing factors. *JEM.* 2019;237:128-38. doi: 10.1016/j.jenvman.2019.02.068.
- [5] Yu F, Li Y, Han S, Ma J. Adsorptive removal of antibiotics from aqueous solution using carbon materials. *Chemosphere.* 2016;153:365-85. doi: 10.1016/j.chemosphere.2016.03.083.
- [6] Ahmed MB, Zhou JL, Ngo HH, Guo W. Adsorptive removal of antibiotics from water and wastewater: progress and challenges. *Sci Total Environ.* 2015;532:112-26. doi: 10.1016/j.scitotenv.2015.05.130.

- [7] Sharma E, Chen Y, Kelso C, Sivakumar M, Jiamg G. Navigating the environmental impacts and analytical methods of last-resort antibiotics: colistin and carbapenems. *SEH*. 2024;2(1):100058. doi: 10.1016/j.seh.2024.100058.
- [8] Peng L, Peng C, Fu S, Qiu Y. Adsorption-desorption and degradation of colistin in soils under aerobic conditions. *Ecotoxicol Environ Saf*. 2022;243:113989. doi: 10.1016/j.ecoenv.2022.113989.
- [9] ศูนย์วิชาการเฝ้าระวังและพัฒนาระบบยา (กพย.). สยองสูตรอาหารฟาร์มหมูให้กิน "โคลิสติน" ตัวแพร่ยีนดื้อยา [อินเทอร์เน็ต] 2560 [เข้าถึงเมื่อ 15 พฤษภาคม 2567]. เข้าถึงได้จาก: https://www.thaidrugwatch.org/news_detail.php?n_no=1373
- [10] Bajda T, Grela A, Pamuła J, Kuc J, Klimek A, Matusik J, et al. Using zeolite materials to remove pharmaceuticals from water. *Materials*. 2024;17(15):3848. doi: 10.3390/ma17153848.
- [11] Wang L, Lv S, Wang X, Liu B, Wang Z. Ferrate (VI) oxidation is an effective and safe way to degrade residual colistin-a last resort antibiotic in wastewater. *Front Vet Sci*. 2021;8:773089. doi:10.3389/fvets.2021.773089.
- [12] Yin F, Wang D, Li Z, Ohlsen T, Hartwig P, Czekalla S. Study on anaerobic digestion treatment of hazardous colistin sulphate contained pharmaceutical sludge. *Bioresource Technol*. 2015;177:188-93. doi: 10.1016/j.biortech.2014.11.091.
- [13] Dehkordi SSR, Delavar Q, Ebrahim HA, Partash SS. CO₂ adsorption by coal-based activated carbon modified with sodium hydroxide. *Mater Today Commun*. 2022;33:104776. doi: 10.1016/j.mtcomm.2022.104776.
- [14] Ntakirutimana S, Tan W, Wang T. Enhanced surface activity of activated carbon by surfactants synergism. *RSC Adv*. 2019;9:26519-31. doi: 10.1039/c9ra04521j.
- [15] Hafizuddin MS, Lee CL, Chin KL, H'ng PS, Khoo PS, Rashid U. Fabrication of highly microporous structure activated carbon via surface modification with sodium hydroxide. *Polymers*. 2021;13(22):3954. doi: 10.3390/polym13223954.
- [16] Kristianto H, Arie AA, Susanti RF, Halim M, Lee JK. The effect of activated carbon support surface modification on characteristics of carbon nanospheres prepared by deposition precipitation of Fe-catalyst. *IOP Conf Ser: Mater Sci Eng*. 2017;162:012034. doi: 10.1088/1757-899X/162/1/012034.
- [17] ดรณิ์ สุขชิต, ปันดดา ศรีแก้ว, จุฑามาศ นาทองห่อ, สายสมร ลำลอง, มาลี ประจวบสุข, สมจินตนา ทวีพานิชย์ และคณะ. การดูดซับสีย้อมบิลเลี่ยน กรีน ด้วยซีโอไลต์ เอ ที่เตรียมจากเถ้าขาน้อย. ใน: การประชุมวิชาการระดับชาติ มอบ. วิจัย ครั้งที่ 16; วันที่ 11-12 ก.ค. 2565; อุบลราชธานี. [อุบลราชธานี]: มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี; 2565. น. 185-194.
- [18] วรวิทย์ จันทร์สุวรรณ, สิริรัตน์ พานิช. การกำจัดโลหะหนักจากสารละลายโดยตัวดูดซับจากวัสดุชีวภาพ [รายงานวิจัย]. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร; 2563.
- [19] Drider D, Boukherroub R, Devendec LL, Belguesmia Y, Hazime N, Mourand G, et al. Impact of colistin and colistin-loaded on alginate nanoparticles on pigs infected with a colistin-resistant enterotoxigenic *Escherichia coli* strain. *Vet Microbiol*. 2022;266:109359. doi: 10.1016/j.vetmic.2022.109359.
- [20] Ma Z, Wang J, Nation LR, Li J, Turnidge JD, Coulthard K, et al. Renal disposition of colistin in the isolated perfused rat kidney. *Antimicrob Agents Chemother*. 2009;53(7):2857-64. doi: 10.1128/AAC.00030-09.
- [21] Dutta J, Mala AA. Removal of antibiotic from the water environment by the adsorption technologies: a review. *Water Sci Technol*. 2020;82(3):401-26. doi: 10.2166/wst.2020.335.

- [22] Cruz AC, Rivas-Sanchez A, Gallareta-Olivares G, González-González RB, Cárdenas-Alcaide MF, Iqbal HMN, et al. Carbon-based materials: adsorptive removal of antibiotics from water. *Water Emerging Contam Nanoplast*. 2023;2(2):1-17. doi: 10.20517/wecn.2022.19.
- [23] Davis CA, Janssen E. M-L. Environmental fate processes of antimicrobial peptides daptomycin, bacitracins, and polymyxins. *Environ Int*. 2020;134:105271. doi: 10.1016/j.envint.2019.105271.

การประเมินสมบัติของแหล่งน้ำธรรมชาติภาคกลางและภาคเหนือ สำหรับการทดสอบการสลายตัวทางชีวภาพตามมาตรฐานสากล OECD 301A

Evaluation of natural water properties in the central and northern regions for ready biodegradability testing according to OECD 301A

นิตยาพร สมภักดิ์ย์¹, จันทนา พันธุ์พราน¹, มिरันตี ดีเจริญ¹, นพวรรณ สระแสงตา¹,
ชาญชัย คหาปนะ¹, วิทวัส เยื่อใย¹, ศิริรัตน์ ตั้งสถิตพร¹, อัญชนา พัฒนสุพงษ์¹
Nidtayaporn Sompakdee¹, Jantana Panpran¹, Mirantee Deecharem¹, Nopphawan Srasaengta¹,
Chanchai Kahapana¹, Witthawat Yueayai¹, Sirorat Tungsatitporn¹, Anchana Pattanasupong¹
รับบทความ 31 พฤษภาคม 2567 แก้ไขบทความ 7 ตุลาคม 2567 ยอมรับตีพิมพ์ 7 ตุลาคม 2567

บทคัดย่อ

ประเมินสมบัติของแหล่งน้ำธรรมชาติสำหรับทดสอบการสลายตัวทางชีวภาพของเคมีภัณฑ์ตามมาตรฐาน OECD guideline for testing of chemicals, OECD 301A รวมการตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีทดสอบ โดยใช้ตัวอย่างน้ำธรรมชาติ เป็นกล้ำเชื้อ ซึ่งเก็บรวบรวมจากพื้นที่ภาคกลาง 3 จังหวัด ได้แก่ จังหวัดนครปฐม สมุทรสาคร และราชบุรี พื้นที่ภาคเหนือ 5 จังหวัด ได้แก่ จังหวัดกำแพงเพชร ลำปาง พะเยา พิจิตร และนครสวรรค์ โดยใช้สาร Sodium benzoate เป็นสารอ้างอิง ทั้งนี้ตัวอย่างน้ำธรรมชาติมีคุณภาพตามเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน อีกทั้งยังเป็นไปตามข้อกำหนดมาตรฐาน OECD 301A นอกจากนี้ ค่าเฉลี่ยร้อยละการสลายตัวทางชีวภาพของสารอ้างอิง ในตัวอย่างน้ำธรรมชาติทั้ง 2 พื้นที่ ตลอดระยะเวลาการศึกษามีค่าร้อยละ 86.13-97.53 ซึ่งสอดคล้องตามเกณฑ์ที่ระบุในมาตรฐาน OECD 301A ต้องมีค่าไม่น้อยกว่าร้อยละ 70 ภายในระยะเวลา 28 วัน กล่าวได้ว่าน้ำธรรมชาติทั้ง 2 พื้นที่ มีสมบัติที่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้ประเมินการสลายตัวทางชีวภาพของเคมีภัณฑ์ตามมาตรฐาน OECD 301A โดยวิธีการทดสอบในครั้งนี้ จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ประกอบการด้านผลิตภัณฑ์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมทั้งภายในและต่างประเทศที่ต้องการพัฒนาสมบัติผลิตภัณฑ์ด้านการสลายตัวทางชีวภาพให้ได้คุณภาพตามมาตรฐานสากล

คำสำคัญ: เคมีภัณฑ์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม, ไฮเดียมเบนโซเอต, การสลายตัวทางชีวภาพ, ไอซีซีดี 301A

¹ห้องปฏิบัติการทดสอบการสลายตัวทางชีวภาพของวัสดุ ศูนย์พัฒนาและวิเคราะห์สมบัติของวัสดุ
สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

Abstract

The evaluation of natural water properties for chemical compounds biodegradation test according to the OECD 301A including the verification of test method validity. The test method was using the natural water as the inoculum which collected from 3 provinces of central region, namely Nakhon Pathom, Samut Sakhon, and Ratchaburi, including 5 provinces of northern region, namely Kamphaeng Phet, Lampang, Phayao, Phichit and Nakhon Sawan. The quality of the collected natural water does not exceed surface water quality standards and still meets the OECD 301A standards requirement. In addition, the average biodegradation percentage of Sodium benzoate as the reference compound in the both of region were 86.13-97.53 throughout the study period, that achieve to the criteria according to OECD 301A, indicated that the biodegradation percentage of reference compound not less than 70% within 28 days test period. Therefore, it can be mentioned that the natural water from both areas are suitable for chemical compounds biodegradation testing according to the OECD 301A. Through this testing method, entrepreneurs in environmentally friendly products, both domestically and internationally, can benefit. It aids those aiming to enhance product properties related to biodegradation, ensuring compliance with international quality standards.

Keywords: Environmentally friendly chemicals, Sodium benzoate, Biodegradation, OECD 301A

¹Material Biodegradation Testing Laboratory, Material Properties Analysis and Development Centre, Thailand Institute of Scientific and Technological Research

^{*}Corresponding author e-mail address: anchana@tistr.or.th

1. บทนำ (Introduction)

จากการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของจำนวนประชากรโลก ทำให้ทรัพยากรธรรมชาติถูกใช้ไปอย่างไม่คำนึงถึงปริมาณและวิธีการใช้ที่เหมาะสม และเมื่อทรัพยากรธรรมชาติที่มีอยู่จำกัดมีปริมาณลดลง มนุษย์จึงพยายามพัฒนาความรู้และนำวิทยาการใหม่ ๆ มาใช้ในการผลิตอาหาร สินค้าอุปโภคบริโภค เพื่อประโยชน์ของผู้ผลิตและผู้บริโภคทั้งจากภาคครัวเรือนภาคเกษตรและอุตสาหกรรม ก่อให้เกิดปัญหาการปนเปื้อนของสารเคมีอันตรายในสิ่งแวดล้อมทั้งทางบกและทางน้ำ ดังรายงานของสถาบันจัดการน้ำระหว่างประเทศ (International Water Management Institute) ที่ว่าในรอบ 10 ปีที่ผ่านมาประชากรมากกว่า 5 ล้านคนตายด้วยโรคที่เกิดจากน้ำไม่สะอาด และประมาณการว่าปี ค.ศ. 2025 ประชากร 4 พันล้านคน ใน 48 ประเทศ (2 ใน 3 ของประชากรโลก) จะเผชิญกับปัญหาความขาดแคลนน้ำ [1] นำไปสู่ความเสี่ยงต่อความเสื่อมโทรมของสิ่งแวดล้อมและเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตโดยรอบ อีกทั้งยังมีแนวโน้มรุนแรงเพิ่มขึ้น ทำให้หลายประเทศทั่วโลก อาทิ สหรัฐอเมริกา ญี่ปุ่น และกลุ่มประเทศยุโรปตื่นตัวกับปัญหาดังกล่าว แนวทางหนึ่งในการป้องกันและฟื้นฟูสิ่งแวดล้อม คือ การใช้ผลิตภัณฑ์ที่สลายตัวได้ทางชีวภาพตลอดจนลดการใช้สารเคมีที่ย่อยสลายทางชีวภาพได้ยากในส่วนผสมของสินค้าอุปโภคบริโภคที่มีปริมาณการใช้งานสูง อาทิ ผลิตภัณฑ์ดูแลร่างกาย ผลิตภัณฑ์ทำความสะอาด จะเป็นส่วนสำคัญในการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของผู้บริโภค รวมถึงเป็นการแก้ปัญหาการสะสมของสารอันตรายตกค้างในสิ่งแวดล้อม ทั้งนี้ ผลิตภัณฑ์ดังกล่าวจำเป็นต้องผ่านการทดสอบสมบัติการสลายตัวได้ทางชีวภาพด้วยวิธีการที่ได้รับการยอมรับในระดับสากลเพื่อเป็นข้อมูลที่ยืนยันถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ก่อนนำไปใช้ [2]

ปัจจุบันการทดสอบความสามารถในการสลายตัวทางชีวภาพเป็นตัวแปรสำคัญในข้อบังคับระหว่างประเทศหลายฉบับที่เกี่ยวกับเคมีภัณฑ์ เช่น ระเบียบข้อบังคับของสหภาพยุโรป Regulation on the Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals (REACH) [3] และระเบียบ Regulation on the Classification, Labelling and Packaging of Substances and Mixtures (CLP) ของยุโรป [4] เป็นต้น ซึ่งมีการกำหนดมาตรฐานภายใต้องค์กรระหว่างประเทศ อาทิ Organization for Economic Co-operation and Development (OECD) และ International Organization for Standardization (ISO) ทั้งนี้ การทดสอบการสลายตัวทางชีวภาพของเคมีภัณฑ์ตามมาตรฐาน OECD guideline for testing of chemicals, OECD 301 (Ready biodegradability) เป็นหนึ่งในมาตรฐานสำหรับตรวจสอบความสามารถในการสลายตัวทางชีวภาพของสารอินทรีย์ในสิ่งแวดล้อมทางน้ำภายใต้สภาวะที่มีอากาศ ซึ่งมี 6 หัวข้อการทดสอบย่อย (A-F) โดยแต่ละหัวข้อการทดสอบจะมีวิธีการวัดผลที่แตกต่างกัน เช่น การวัดปริมาณอินทรีย์คาร์บอนที่ละลายน้ำ (Dissolved organic carbon; DOC) การวัดปริมาณออกซิเจนที่ถูกใช้ไป (Oxygen consumption) เป็นต้น ทั้งนี้ การเลือกใช้แต่ละหัวข้อการทดสอบขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ ได้แก่ สมบัติการละลายน้ำ การระเหยได้ และการถูกดูดซับ โดยหัวข้อการทดสอบตามมาตรฐาน OECD guideline for testing of chemicals, OECD 301 หัวข้อย่อย A (OECD 301A: DOC Die-away) ใช้หลักการตรวจวัดปริมาณอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยกลุ่มจุลินทรีย์ มาตรฐานระบุว่าค่าการสลายตัวทางชีวภาพจะต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 70 ภายในระยะเวลาการทดสอบ 28 วัน [5] ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้ทดสอบเคมีภัณฑ์ได้หลายประเภท อาทิ 4,4'-Diaminodiphenylmethane เป็นสารตั้งต้นในการผลิตสีย้อมสำหรับกระดาษ เครื่องหนัง และสิ่งทอ [6] Aniline เป็นสารที่ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตยาง ยา หมึก น้ำยาล้างรูป เรซิน น้ำหอม น้ำยาขัดรองเท้า ใช้เป็นตัวทำละลายสี [7] Alkyl betaines เป็นสารลดแรงตึงผิวที่นิยมใช้ในผงซักฟอก Cocamidopropyl betaine สารลดแรงตึงผิวที่ใช้ผสมในแชมพูหรือสบู่ [8] เป็นต้น

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินสมบัติของแหล่งน้ำธรรมชาติบริเวณภาคกลางและภาคเหนือของประเทศไทยในการใช้เป็นกิลล์เชื้อ (Inoculum) สำหรับการพัฒนาและตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีทดสอบการสลายตัวทางชีวภาพของเคมีภัณฑ์ โดยใช้สารโซเดียมเบนโซเอตที่เป็นสารอ้างอิงเชิงบวกตามระบุในมาตรฐาน OECD guideline for testing of chemicals, OECD 301A ซึ่งเป็นการขยายผลความสำเร็จในการพัฒนาวิธีทดสอบการสลายตัวทางชีวภาพตามมาตรฐาน OECD guideline for testing of chemicals, OECD 301A [5] จากพื้นที่จังหวัดนนทบุรี ปทุมธานี และพระนครศรีอยุธยา [2] ไปยังพื้นที่อื่นของประเทศไทย ดังนั้น ความสำเร็จของการพัฒนาวิธีการทดสอบนี้ จะเป็นประโยชน์ต่อนักวิจัยและผู้ประกอบการ

ในการบ่งชี้สมบัติของเคมีภัณฑ์ที่สลายตัวทางชีวภาพในสิ่งแวดล้อมทางน้ำ รวมถึงยกระดับมาตรฐานและความสามารถในการแข่งขันของผู้ประกอบการไทยในตลาดการค้าสากล

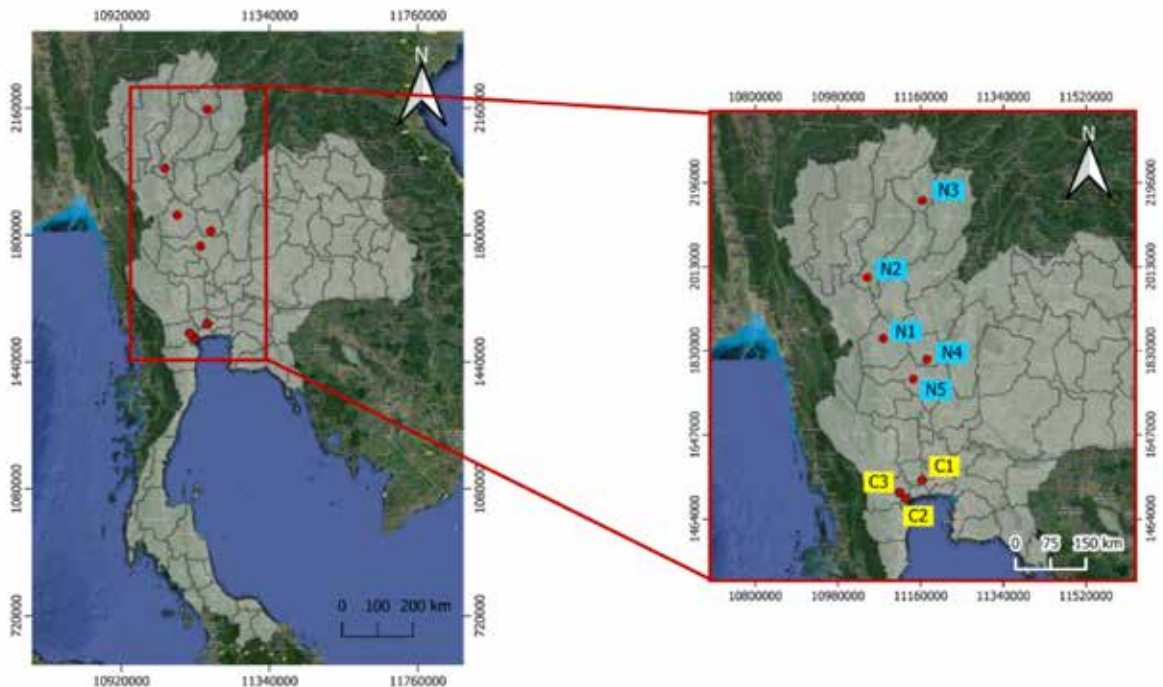
2. วิธีการวิจัย (Experimental methods)

2.1 ตัวอย่างน้ำธรรมชาติ

ตัวอย่างน้ำธรรมชาติในพื้นที่ภาคกลาง 3 แหล่ง (จุด C1–C3) เก็บตัวอย่าง 3 ครั้ง ในระยะเวลา 1 ปี ระหว่างเดือนตุลาคม 2565 ถึงเมษายน 2566 และขยายจุดเก็บไปยังพื้นที่ภาคเหนือ 5 แหล่ง (จุด N1–N5) ในเดือนพฤษภาคม 2566 เวลาการเก็บอยู่ในช่วงระหว่าง 10.00–14.00 น. อุณหภูมิอากาศอยู่ในช่วงระหว่าง 28–36 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิน้ำอยู่ในช่วงระหว่าง 28–32 องศาเซลเซียส (ตารางที่ 1 และรูปที่ 1)

ตารางที่ 1 แหล่งเก็บตัวอย่างน้ำธรรมชาติและพิกัดทางภูมิศาสตร์

ภูมิภาค	รหัส	แหล่งเก็บตัวอย่าง	จังหวัด	พิกัดทางภูมิศาสตร์		ช่วงเวลาการเก็บตัวอย่าง
				ละติจูด	ลองจิจูด	
กลาง	C1	แม่น้ำท่าจีน	นครปฐม	13.7718	100.2832	ครั้งที่ 1 เดือนตุลาคม 2565 ครั้งที่ 2 เดือนมกราคม 2566 ครั้งที่ 3 เดือนเมษายน 2566
	C2	แม่น้ำแม่กลอง	สมุทรสาคร	13.4235	99.9605	
	C3	แม่น้ำแม่กลอง	ราชบุรี	13.53822	99.83958	
เหนือ	N1	แม่น้ำปิง	กำแพงเพชร	16.4514	99.5193	เดือนพฤษภาคม 2566
	N2	แม่น้ำวัง	ลำปาง	17.7234	99.1955	
	N3	แม่น้ำยม	พะเยา	19.0161	100.2861	
	N4	แม่น้ำน่าน	พิจิตร	16.0585	99.8870	
	N5	แม่น้ำเจ้าพระยา	นครสวรรค์	15.6857	100.1107	



รูปที่ 1 จุดเก็บตัวอย่างน้ำธรรมชาติ

2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

- 2.2.1 เครื่องชั่งความละเอียด 4 ตำแหน่ง (Balance) ยี่ห้อ Sartorius รุ่น BSA224S-CW
- 2.2.2 ตู้อบความร้อน (Oven) ยี่ห้อ Memmert รุ่น UNE 500
- 2.2.3 เครื่องนึ่งฆ่าเชื้อแรงดันไอน้ำ (Autoclave) ยี่ห้อ Tomy รุ่น SX-500 และรุ่น SX-700
- 2.2.4 กล้องจุลทรรศน์สเตอริโอชนิด 2 ตา (Microscope) ยี่ห้อ Olympus รุ่น SZ 51-SET
- 2.2.5 เครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH meter) ยี่ห้อ Sartorius รุ่น PP-20
- 2.2.6 เครื่องวัดปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (DO meter) ยี่ห้อ WTW รุ่น MULTI 3630 IDS
- 2.2.7 เครื่องวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์รวมในสารละลาย (Total organic carbon analyzer) ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น TOC-L

2.3 สารเคมี

- 2.3.1 Ammonium chloride เกรดวิเคราะห์ (Analytical reagent grade) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 100.0 ยี่ห้อ Merck ผลิตจากประเทศเยอรมนี
- 2.3.2 Calcium chloride dehydrate เกรดวิเคราะห์ (Analytical reagent grade) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.5 ยี่ห้อ Merck ผลิตจากประเทศเยอรมนี
- 2.3.3 Dipotassium hydrogen orthophosphate เกรดวิเคราะห์ (Analytical reagent grade) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.2 ยี่ห้อ Sigma Aldrich ผลิตจากประเทศเยอรมนี
- 2.3.4 Disodium hydrogen orthophosphate dehydrate เกรดวิเคราะห์ (Analytical reagent grade) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 100.0 ยี่ห้อ Sigma Aldrich ผลิตจากประเทศเยอรมนี
- 2.3.5 Iron (III) chloride hexahydrate เกรดวิเคราะห์ (Analytical reagent grade) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 ยี่ห้อ Merck ผลิตจากประเทศเยอรมนี

- 2.3.6 Magnesium sulphate heptahydrate เกรดวิเคราะห์ (Analytical reagent grade) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 ยี่ห้อ Merck ผลิตจากประเทศเยอรมนี
- 2.3.7 Potassium dihydrogen orthophosphate เกรดวิเคราะห์ (Analytical reagent grade) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.8 ยี่ห้อ Merck ผลิตจากประเทศเยอรมนี
- 2.3.8 Potassium hydrogen phthalate orthophosphate เกรดวิเคราะห์ (Analytical reagent grade) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.7 ยี่ห้อ Merck ผลิตจากประเทศเยอรมนี
- 2.3.9 Sodium benzoate เกรดวิเคราะห์ (Analytical reagent grade) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 100.0 ยี่ห้อ Sigma Aldrich ผลิตจากประเทศเยอรมนี
- 2.3.10 Sodium carbonate เกรดวิเคราะห์ (Analytical reagent grade) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 100.0 ยี่ห้อ Merck ผลิตจากประเทศเยอรมนี
- 2.3.11 Sodium hydrogen carbonate เกรดวิเคราะห์ (Analytical reagent grade) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 100.0 ยี่ห้อ Merck ผลิตจากประเทศเยอรมนี

2.4 วิธีดำเนินงาน

2.4.1 การเก็บตัวอย่างน้ำธรรมชาติ

เก็บตัวอย่างน้ำธรรมชาติในพื้นที่ภาคกลาง 3 แหล่ง และพื้นที่ภาคเหนือ 5 แหล่ง ด้วยวิธีการเก็บน้ำผิวดินแบบจ้วง ที่ระดับความลึกประมาณ 30 เซนติเมตร [9] ทำการวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำ ปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำ และปริมาณแบคทีเรียรวม (ตารางที่ 2)

ตารางที่ 2 การวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้น

รายการวิเคราะห์	วิธีวิเคราะห์
1. ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)	วัดค่าโดยหลักการทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical) ด้วยเครื่อง pH Meter
2. ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (Dissolved oxygen)	วัดค่าโดยหลักการทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical) ด้วยเครื่อง DO Meter
3. ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำ (Dissolved organic carbon: DOC)	วิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนทั้งหมดและคาร์บอนอินทรีย์ในสารละลาย โดยใช้เครื่อง Total organic carbon analyzer
4. ปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำ (Suspended solids: SS)	กรองผ่านกระดาษกรอง GF/C ตามวิธี APHA, AWWA and WEF; 2017 [10]
5. ปริมาณแบคทีเรียรวม (Total bacteria count)	Total plate count [11]

2.4.2 การทดสอบการสลายตัวของชีวภาพตามมาตรฐาน OECD guideline for testing of chemicals, OECD 301A [5]

การสลายตัวของชีวภาพตามมาตรฐานสากล OECD 301A เป็นการตรวจวัดปริมาณอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำ (Dissolved Organic Carbon: DOC) ที่คงเหลือในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ ดำเนินการทดสอบโดยใช้ตัวกลางที่ประกอบด้วยกล้ำเชื้อจากแหล่งน้ำธรรมชาติ (ผ่านการบ่มเลี้ยงที่อุณหภูมิ 22 ± 2 องศาเซลเซียส มีการให้อากาศอย่างต่อเนื่อง เป็นเวลา 7 วัน) และอาหารเหลวสังเคราะห์ Mineral medium (ตารางที่ 3) อัตราส่วน 1:4 แล้วเติมสารโซเดียมเบนโซเอตที่ระดับความเข้มข้น DOC 10–40 มิลลิกรัมต่อลิตร บ่มเลี้ยงในระบบปิด โดยทำการกวน

อย่างต่อเนื่อง ภายใต้สภาวะควบคุมอุณหภูมิ 22 ± 2 องศาเซลเซียส ตลอดระยะเวลาการทดสอบ 28 วัน ทำการทดสอบ 3 ซ้ำต่อชุดทดสอบ แสดงผลเป็นค่าร้อยละการสลายตัวของสารโซเดียมเบนโซเอต โดยคำนวณจากปริมาณ DOC คงเหลือเทียบกับปริมาณ DOC ของชุดควบคุม

2.4.3 การคำนวณค่าร้อยละการสลายตัวของสารชีวภาพตามมาตรฐาน OECD guideline for testing of chemicals, OECD 301A [5]

$$D_t = \left[1 - \frac{C_t - C_{bl(t)}}{C_0 - C_{bl(0)}} \right] \times 100$$

D_t = ร้อยละการสลายตัวของชีวภาพ

C_0 = ค่าเฉลี่ยปริมาณ DOC ในชุดทดสอบสารอ้างอิง (mg/L) ณ ช่วงเวลาที่ 0

C_t = ค่าเฉลี่ยปริมาณ DOC ในชุดทดสอบสารอ้างอิง (mg/L) ณ ช่วงเวลาที่ n

$C_{bl(0)}$ = ค่าเฉลี่ยปริมาณ DOC ในชุดควบคุม (mg/L) ณ ช่วงเวลาที่ 0

$C_{bl(t)}$ = ค่าเฉลี่ยปริมาณ DOC ในชุดควบคุม (mg/L) ณ ช่วงเวลาที่ n

ตารางที่ 3 องค์ประกอบอาหารเหลวสังเคราะห์ Minimal medium ตามมาตรฐาน OECD guideline for testing of chemicals, OECD 301A [5]

องค์ประกอบ	ความเข้มข้น (g/L)
(a) Potassium dihydrogen orthophosphate, KH_2PO_4 Dipotassium hydrogen orthophosphate, K_2HPO_4 Disodium hydrogen orthophosphate dehydrate, $Na_2HPO_4 \cdot 2H_2O$ Ammonium chloride, NH_4Cl (Dissolve in water and make up to 1 L The pH of the solution should be 7.4)	8.50 21.75 33.40 0.50
(b) Calcium chloride, anhydrous, $CaCl_2$ Or Calcium chloride dehydrate, $CaCl_2 \cdot 2H_2O$ (Dissolve in water and make up to 1 L)	27.50 36.40
(c) Magnesium sulphate heptahydrate, $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ (Dissolve in water and make up to 1 L)	22.50
(d) Iron (III) chloride hexahydrate, $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ (Dissolve in water and make up to 1 L)	0.25

2.4.4 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วิเคราะห์ค่าความแปรปรวนโดยใช้ ANOVA (One-Way Analysis of Variance) และทดสอบความแตกต่างทางสถิติด้วยวิธี Duncan Multiple Rang Test (DMRT) โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS 26.0 (SPSS Inc, Chicago, Illinois)

3. ผลและวิจารณ์ (Results and discussion)

3.1 สมบัติเบื้องต้นของตัวอย่างน้ำธรรมชาติ

การตรวจสอบสมบัติเบื้องต้นทางกายภาพ เคมี และชีวภาพของตัวอย่างน้ำธรรมชาติที่เก็บรวบรวมจากพื้นที่ภาคกลาง 3 แหล่งโดยเก็บตัวอย่าง 3 ครั้ง ในระยะเวลา 1 ปี ระหว่างเดือนตุลาคม 2565 ถึงเมษายน 2566 และทำการขยายจุดเก็บไปยังพื้นที่ภาคเหนือ 5 แหล่ง เดือนพฤษภาคม 2566 พบว่า ตัวอย่างน้ำธรรมชาติในพื้นที่ภาคกลางมีค่าความเป็นกรด-ด่างเฉลี่ยอยู่ในช่วงระหว่าง 7.80–8.02 ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ 3.92–4.44 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำ 5.84–7.40 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำ 7.85–6.12 มิลลิกรัมต่อลิตร และปริมาณแบคทีเรียรวม 4–5 สลือกโคโลนีต่อมิลลิลิตร โดยสมบัติเบื้องต้นทางกายภาพ เคมี และชีวภาพของตัวอย่างน้ำธรรมชาติในพื้นที่ภาคกลาง 3 แหล่ง แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) (ตารางที่ 4) นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบตัวอย่างน้ำธรรมชาติในพื้นที่ภาคกลางและภาคเหนือ พบว่า มีค่าเฉลี่ยความเป็นกรด-ด่าง 7.90–9.00 ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ 4.23–7.83 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำ 4.75–6.55 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำ 7.06–11.48 มิลลิกรัมต่อลิตร และปริมาณแบคทีเรียรวม 4–5 สลือกโคโลนีต่อมิลลิลิตร โดยค่าความเป็นกรด-ด่าง และปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ในขณะที่ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำ ปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำ และปริมาณแบคทีเรียรวม แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) (ตารางที่ 5)

ทั้งนี้ คณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ประกาศมาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน แบ่งออกเป็น 5 ประเภทตามลักษณะการใช้ประโยชน์ของแหล่งน้ำ โดยประเภทที่ 2, 3 และ 4 สามารถใช้ในการอุปโภคและบริโภค โดยต้องผ่านการฆ่าเชื้อโรคตามปกติก่อน และผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำทั่วไปก่อน [12] จากการประเมินคุณภาพตัวอย่างน้ำธรรมชาติ 8 แหล่ง เปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานน้ำผิวดินประเภทที่ 2, 3 และ 4 พบว่า ตัวอย่างน้ำธรรมชาติในพื้นที่ภาคกลางและภาคเหนือ มีค่าความเป็นกรด-ด่าง สอดคล้องตามเกณฑ์มาตรฐานน้ำผิวดินทั้ง 3 ประเภท ในส่วนของปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ ภาคกลางมีคุณภาพน้ำสอดคล้องกับประเภทที่ 3 และ 4 ทั้งยังสอดคล้องกับกรมควบคุมมลพิษ ที่ทำการตรวจติดตามคุณภาพแม่น้ำท่าจีนอย่างต่อเนื่อง ภายใต้แผนปฏิบัติการยกระดับคุณภาพน้ำลุ่มน้ำท่าจีน ปี พ.ศ. 2562–2570 ในพื้นที่ 4 จังหวัด ได้แก่ จังหวัดชัยนาท สุพรรณบุรี นครปฐม และสมุทรสาคร พบว่าคุณภาพน้ำไม่เป็นไปตามมาตรฐานคุณภาพน้ำที่กำหนด โดยน้ำมีความสกปรก และความสามารถในการรองรับน้ำเสียของกลุ่มแม่น้ำท่าจีนลดลงเนื่องมาจากการรับน้ำเสียจากแหล่งชุมชน อุตสาหกรรม และการเกษตร [13] ในขณะที่ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำตัวอย่างน้ำธรรมชาติภาคเหนือมีคุณภาพน้ำสอดคล้องกับประเภทที่ 2 ซึ่งมีคุณภาพดีกว่า

วิธีการทดสอบมีการระบุเกณฑ์สมบัติเบื้องต้นของตัวอย่างน้ำ สำหรับใช้เป็นกล่าเชื้อในการทดสอบ โดยต้องมีปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำไม่เกิน 30 มิลลิกรัมต่อลิตร และปริมาณแบคทีเรียรวม 4–5 สลือกโคโลนีต่อมิลลิลิตร สอดคล้องตามมาตรฐาน OECD guideline for testing of chemicals, OECD 301A [5] ดังนั้น จากการตรวจสอบสมบัติเบื้องต้นของตัวอย่างน้ำธรรมชาติ 8 แหล่ง ในพื้นที่ภาคกลางบริเวณแม่น้ำท่าจีนและแม่กลอง พื้นที่ภาคเหนือบริเวณแม่น้ำปิง วัง ยม น่านและเจ้าพระยา มีค่าเป็นไปตามเกณฑ์กำหนดที่ระบุในมาตรฐาน OECD guideline for testing of chemicals, OECD 301A [5] จึงกล่าวได้ว่า ตัวอย่างน้ำธรรมชาติในพื้นที่ดังกล่าวมีความเหมาะสม สามารถนำมาใช้เป็นกล่าเชื้อในการทดสอบได้

ตารางที่ 4 สมบัติเบื้องต้นของตัวอย่างน้ำธรรมชาติในพื้นที่ภาคกลาง

รายการวิเคราะห์	เกณฑ์ ¹	ครั้งที่ 1 ² (ต.ค. 65)	ครั้งที่ 2 ² (ม.ค. 66)	ครั้งที่ 3 ² (เม.ย. 66)	p-value
1. ค่าความเป็นกรด-ด่าง	ไม่ระบุ	8.02±0.16	7.80±0.03	7.88±0.06	0.193
2. ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร)		4.33±1.24	3.92±1.96	4.44±2.09	0.093
3. ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร)		7.40±3.66	5.84±4.16	6.37±1.32	0.837
4. ปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	≤30	10.47±5.12	7.85±5.39	16.12±15.02	0.592
5. ปริมาณแบคทีเรียรวม (ลือกโคโลนีต่อมิลลิลิตร)	4-5	4.33±0.58	4.67±0.58	4.33±0.58	0.729

หมายเหตุ ¹ เกณฑ์ระบุตามมาตรฐาน OECD guideline for testing of chemicals, OECD 301A [5]

² ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n = 27)

ตารางที่ 5 สมบัติเบื้องต้นของตัวอย่างน้ำธรรมชาติในพื้นที่ภาคกลางและภาคเหนือ

รายการวิเคราะห์	เกณฑ์ ¹	ภาคกลาง ²	ภาคเหนือ ²	p-value
1. ค่าความเป็นกรด-ด่าง	ไม่ระบุ	7.90±0.13	9.00±0.06	0.000 ³
2. ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร)		4.23±1.58	7.83±0.13	0.000 ³
3. ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร)		6.55±2.93	4.75±2.86	0.289
4. ปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	≤30	11.48±9.14	7.06±6.82	0.366
5. ปริมาณแบคทีเรียรวม (ลือกโคโลนีต่อมิลลิลิตร)	4-5	4.44±0.53	4.80±0.45	0.228

หมายเหตุ ¹ เกณฑ์ระบุตามมาตรฐาน OECD guideline for testing of chemicals, OECD 301A [5]

² ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n = 27)

3.2 การสลายตัวทางชีวภาพของสารอ้างอิง

การทดสอบการสลายตัวทางชีวภาพของสารโซเดียมเบนโซเอต ซึ่งใช้เป็นสารอ้างอิง ภายในระยะเวลาการทดสอบ 28 วัน โดยใช้ตัวอย่างน้ำธรรมชาติในพื้นที่ภาคกลางและขยายจุดเก็บไปยังพื้นที่ภาคเหนือ 5 แห่ง เพื่อพัฒนาและตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีการทดสอบ (Vilified method) ตามมาตรฐาน OECD 301A พบว่า ตัวอย่างน้ำธรรมชาติจังหวัดนครปฐม มีค่าเฉลี่ยร้อยละการสลายตัวทางชีวภาพอยู่ในช่วง 87.96–97.53 โดยตัวอย่างน้ำที่เก็บในเดือนมกราคม 2566 (ครั้งที่ 2) มีความแตกต่างจากเดือนตุลาคม 2565 (ครั้งที่ 1) และเดือนเมษายน 2566 (ครั้งที่ 3) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ในขณะที่ตัวอย่างน้ำธรรมชาติจังหวัดสมุทรสาคร มีค่าเฉลี่ยร้อยละการสลายตัวทางชีวภาพของสารอ้างอิงอยู่ในช่วง 86.13–91.04 และจังหวัดราชบุรี 89.53–93.36 ซึ่งแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

เมื่อเปรียบเทียบตามแหล่งน้ำธรรมชาติที่เก็บในช่วงเวลาเดียวกัน พบว่า ค่าเฉลี่ยร้อยละการสลายตัวทางชีวภาพอยู่ในช่วง 86.13–97.53 ซึ่งแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) (ตารางที่ 6) เนื่องจากตัวอย่างน้ำธรรมชาติที่นำมาใช้เป็นกล้ำเชื้อในการทดสอบ มีคุณสมบัติสอดคล้องตามเกณฑ์กำหนดที่ระบุในมาตรฐาน OECD 301A (ตารางที่ 4) ทั้งนี้ยังพบว่าตัวอย่างน้ำที่เก็บในเดือนมกราคม 2566 มีค่าเฉลี่ยร้อยละการสลายตัวทางชีวภาพน้อยกว่าตัวอย่างน้ำที่เก็บในเดือนตุลาคม 2565 และเดือนเมษายน 2566 ซึ่งมีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับค่าปริมาณออกซิเจนละลายน้ำของตัวอย่างน้ำธรรมชาติที่เก็บในเดือนมกราคม 2566 ที่มีค่าน้อยกว่าเดือนตุลาคม 2565 และเดือนเมษายน 2566 เนื่องจากปริมาณออกซิเจนในน้ำมีความสำคัญต่อกิจกรรมของสิ่งมีชีวิตในน้ำ [10] อีกทั้งการทดสอบนี้เป็นการใช้จุลินทรีย์ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะมีอากาศ ดังนั้น ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำที่เพียงพอและเหมาะสมต่อการหายใจของจุลินทรีย์จึงเป็นปัจจัยสำคัญเพื่อให้เกิดกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบตัวอย่างน้ำธรรมชาติในพื้นที่ภาคกลางและภาคเหนือ พบว่า ค่าเฉลี่ยร้อยละการสลายตัวทางชีวภาพอยู่ในช่วง 91.83–95.79 ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) (ตารางที่ 7)

จากผลการศึกษาข้างต้นกล่าวได้ว่า ตัวอย่างน้ำธรรมชาติในพื้นที่ภาคกลางและภาคเหนือ จำนวน 8 แหล่ง แม้ว่า มีสมบัติทางกายภาพ เคมี และชีวภาพบางประการแตกต่างกันทางสถิติ แต่มีสมบัติสอดคล้องตามเกณฑ์ระบุในมาตรฐาน OECD guideline for testing of chemicals, OECD 301A จึงมีความเหมาะสมสามารถนำไปเป็นกล้ำเชื้อ สำหรับการทดสอบการสลายตัวทางชีวภาพโดยใช้สารโซเดียมเบนโซเอตเป็นสารอ้างอิง ส่งผลให้ร้อยละการสลายตัวทางชีวภาพของสารอ้างอิงมีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย โดยยังมีค่าสอดคล้องตามเกณฑ์ระบุในมาตรฐาน OECD guideline for testing of chemicals, OECD 301A ที่กำหนดค่าร้อยละการสลายตัวทางชีวภาพของสารอ้างอิงต้องไม่น้อยกว่า 70 ภายในระยะเวลาการทดสอบ 28 วัน สอดคล้องกับงานวิจัยของ Fang Mei และคณะ [6] ที่รายงานค่าร้อยละการสลายตัวทางชีวภาพของสารโซเดียมเบนโซเอต 98.9 ภายในระยะเวลาทดสอบ 28 วัน เมื่อทดสอบตามมาตรฐาน OECD guideline for testing of chemicals, OECD 301A ซึ่งทำการตรวจวัดปริมาณ DOC คงเหลือเทียบกับปริมาณ DOC ของชุดควบคุม

ตารางที่ 6 ร้อยละการสลายตัวทางชีวภาพของสารอ้างอิงโดยใช้ตัวอย่างน้ำธรรมชาติในพื้นที่ภาคกลาง

จุดเก็บ	จังหวัด	เกณฑ์ ^{/1}	ร้อยละการสลายตัวทางชีวภาพ ^{/2}			ช่วงเวลากการเก็บตัวอย่าง
			ครั้งที่ 1 (ต.ค. 65)	ครั้งที่ 2 (ม.ค. 66)	ครั้งที่ 3 (เม.ย. 66)	
C1	นครปฐม	ร้อยละ 70	97.07b±0.37	87.96a±2.96	97.53b±1.98	0.002 ^{/3}
C2	สมุทรสาคร		90.68±5.50	86.13±2.27	91.04±1.25	0.242
C3	ราชบุรี		93.36±7.65	89.53±1.90	93.14±4.78	0.634
p-value			0.409	0.300	0.099	

หมายเหตุ ¹เกณฑ์ระบุตามมาตรฐาน OECD guideline for testing of chemicals, OECD 301A [5]
²ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n = 27)
³ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กแตกต่างกันในแนวนอน แสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p< 0.05$)

ตารางที่ 7 ร้อยละการสลายตัวทางชีวภาพของสารอ้างอิงโดยใช้ตัวอย่างน้ำธรรมชาติในพื้นที่ภาคกลางและภาคเหนือ

ตัวอย่างน้ำธรรมชาติ	เกณฑ์ ^{/1}	ร้อยละการสลายตัวทางชีวภาพ ^{/2}
1. ภาคกลาง	ร้อยละ 70	91.83±4.91
2. ภาคเหนือ		95.79±4.49
p-value		0.014 ^{/3}

หมายเหตุ ^{1/} เกณฑ์ระบุตามมาตรฐาน OECD guideline for testing of chemicals, OECD 301A [5]

^{2/} ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n = 42)

^{3/} มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05)

4. สรุป (Conclusion)

แหล่งน้ำธรรมชาติในเขตพื้นที่ภาคกลางและภาคเหนือของประเทศไทยจำนวน 8 แหล่ง ได้แก่ แม่น้ำท่าจีน จังหวัดนครปฐม แม่น้ำแม่กลอง จังหวัดสมุทรสงคราม และจังหวัดราชบุรีในพื้นที่ภาคกลาง แม่น้ำปิง จังหวัดกำแพงเพชร แม่น้ำวัง จังหวัดลำปาง แม่น้ำยม จังหวัดพะเยา แม่น้ำน่าน จังหวัดพิจิตร และแม่น้ำเจ้าพระยา จังหวัดนครสวรรค์ในพื้นที่ภาคเหนือ มีสมบัติเบื้องต้นสอดคล้องตามเกณฑ์ระบุในมาตรฐาน OECD guideline for testing of chemicals, OECD 301A จึงมีความเหมาะสมและสามารถนำไปเป็นกล้ำเชื้อสำหรับการทดสอบได้ เมื่อทำการตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีโดยทดสอบการสลายตัวทางชีวภาพของสารโซเดียมเบนโซเอตซึ่งเป็นสารอ้างอิง มีค่าไม่น้อยกว่าร้อยละ 70 ภายในระยะเวลาการทดสอบ 28 วัน สอดคล้องตามเกณฑ์ระบุในมาตรฐาน OECD guideline for testing of chemicals, OECD 301A การศึกษาในลำดับถัดไป จะทำการขยายพื้นที่แหล่งเก็บตัวอย่างน้ำธรรมชาติ อาทิ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ เพื่อตรวจสอบและรวบรวมสมบัติเบื้องต้นของตัวอย่างแหล่งน้ำธรรมชาติ ที่มีความเหมาะสมและสอดคล้องตามเกณฑ์ข้อกำหนดที่ระบุในมาตรฐานสำหรับนำมาใช้เป็นกล้ำเชื้อ พร้อมทั้งตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีโดยทดสอบการสลายตัวทางชีวภาพของสารอ้างอิง สามารถช่วยยืนยันความถูกต้องและเชื่อถือได้ของวิธีการทดสอบ ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อความถูกต้องในการทดสอบการสลายตัวทางชีวภาพของตัวอย่างเคมีภัณฑ์

5. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

งานวิจัยนี้ได้รับงบประมาณสนับสนุนจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม (ววน.)

6. เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] จาตุรงค์ กอบแก้ว. รายงานสถานการณ์น้ำของโลก [อินเทอร์เน็ต]. 2563 [เข้าถึงเมื่อ 15 พฤษภาคม 2565]. เข้าถึงได้จาก: <https://www.salika.com/2020/12/02/world-water-crisis>.
- [2] จันทนา พันธุ์พราน, มິรันตี ดีเจริญ, สุทธิดา คงเจ้ย, ชาลุชัย คหาปนะ, อัญชญา พัฒนสุพงษ์. การประเมินสมบัติของแหล่งน้ำธรรมชาติสำหรับการทดสอบการสลายตัวทางชีวภาพตามมาตรฐานสากล OECD 301A. ใน: งานประชุมวิชาการระดับชาติด้านวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และนวัตกรรม ครั้งที่ 5; วันที่ 19 ส.ค. 2565; กรุงเทพฯ. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร; 2565. น. 296-301.
- [3] European Chemicals Agency (ECHA). The European Parliament and the Council of the European Union, directive 2006/121/EC of the European Parliament and of the Council of 18 December 2006 amending Council Directive 67/548/EEC on the approximation of laws, regulations and administrative provisions

- relating to the classification, packaging and labelling of dangerous substances in order to adapt it to Regulation (EC) No 1907/2006 concerning the registration, evaluation, authorization and restriction of chemicals (REACH) and establishing a European chemicals agency. 2006.
- [4] European Parliament. Regulation (EC) No 1272/2008 of the European Parliament and of the Council of 16 December 2008 on classification, labelling and packaging of substances and mixtures, amending and repealing Directives 67/548/EEC and 1999/45/EC, and amending Regulation (EC) No 1907/2006. 2008.
- [5] The Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). OECD guideline for testing of chemicals: Ready biodegradability. OECD 301, adopted by the Council on 17th July 1992. Paris: OECD; 1992.
- [6] Fang MC, Zhen LY, Nian LW, Ping SG, Qu ZG, Ying XM, et al. A comparative study of biodegradability of a carcinogenic aromatic amine (4,4-Diaminodiphenylmethane) with OECD 301 test methods. *Ecotoxicol Environ Saf.* 2015;111:123-30.
- [7] Reuschenbach P, Pagga U, Strotmann U. A critical comparison of respirometric biodegradation tests based on OECD 301 and related test methods. *Water Res.* 2003;37:1571-82.
- [8] Comber SDW, Painter H, Reynolds P. Cationic and amphoteric surfactant primary biodegradability ring test. European Union; ETD/98/502063, WRc Ref: CO 4909. 2000.
- [9] กรมควบคุมมลพิษ. วิธีการปฏิบัติสำหรับการเก็บตัวอย่างน้ำจากแหล่งน้ำ [อินเทอร์เน็ต]. 2563 [เข้าถึงเมื่อ 17 พฤษภาคม 2567]. เข้าถึงได้จาก: <https://www.pcd.go.th/publication/4209>.
- [10] APHA, AWWA, WEF. Standard methods for the examination of water and wastewater. 23rd ed. Washington (DC): American Public Health Association; 2017. Part 2540D.
- [11] นางลักษณ สุวรรณพินิจ, ปรีชา สุวรรณพินิจ. จุลชีววิทยาทั่วไป. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2547.
- [12] กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. พระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535 กฎ ประกาศ และระเบียบที่เกี่ยวข้องด้านการควบคุมมลพิษ เรื่อง กำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน. ราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 111 ตอนพิเศษ 16 ง, 24 กุมภาพันธ์ 2537. 234-240.
- [13] ธีระพงษ์ บุญทองล้วน. การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงคุณภาพน้ำแม่น้ำเพชรบุรี ระหว่างปี 2549-2558 [อินเทอร์เน็ต]. 2560 [เข้าถึงเมื่อ 20 พฤษภาคม 2567]. เข้าถึงได้จาก: <http://lib.mnre.go.th/lib/achievement/a251.pdf>.

การนำน้ำกลับคืนมาจากการบำบัดน้ำระบายน้ำทิ้งเข้มข้นจากระบบแยกเกลือจากน้ำขนาดเล็กในจังหวัดนครราชสีมา

Water recovery of brine water treatment from a small-scale desalination system in Nakhon Ratchasima

สรวิศศักดิ์ เชื้อสุวรรณ¹, หทัยรัศมี เตชะปัญญารักษ์¹, นิรัตน์ ภูทัตหมาก²

Saranbhak Chuersuwan¹, Hathairath Techapanyarak¹, Nirat Phutadmark²

รับบทความ 29 กุมภาพันธ์ 2567 แก้ไขบทความ 30 ตุลาคม 2567 ยอมรับตีพิมพ์ 30 ตุลาคม 2567

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการนำน้ำกลับคืนมาจากการบำบัดน้ำระบายน้ำทิ้งเข้มข้นที่ปล่อยออกจากเครื่องแยกเกลือเข้าสู่ชุดกลั่นแสงอาทิตย์ โดยออกแบบให้สามารถกักเก็บอุณหภูมิภายในชุดกลั่นที่เอื้อต่อการเปลี่ยนสถานะของน้ำระบายน้ำทิ้งเข้มข้นที่กักเก็บอยู่ภายในชุดกลั่น ไอน้ำลอยตัวสูงขึ้นไปกระทบกับแผ่นกระจกใสที่เย็นกว่าด้านบน ทำให้เกิดการกลั่นตัวเป็นหยดน้ำก่อนไหลตามความลาดเอียงลงสู่รางรับน้ำและนำกลับไปใช้ใหม่ ชุดกลั่นแสงอาทิตย์มีขนาดกว้าง 1 เมตร ลึก 1 เมตร สูง 0.5 เมตร มุมลาดเอียง 25 องศา ช่วยให้หยดน้ำไหลลงตามแนวลาดเอียงของกระจกโปร่งแสงได้โดยไม่หยดกลับลงไปในถาดของน้ำระบายน้ำทิ้งเข้มข้นที่ด้านล่างบรรจุเกลือดำ ซึ่งเลือกใช้เป็นตัวดูดซับด้านล่างของถาดกักเก็บน้ำระบายน้ำทิ้งเข้มข้น เนื่องจากเป็นวัสดุสีดำช่วยดูดกลืนพลังงานความร้อนได้ดีหาได้ง่ายในท้องถิ่น และไม่เน่าเสียเมื่อใช้กักเก็บกับน้ำระบายน้ำทิ้งเข้มข้นผลทดสอบการใช้งานของชุดต้นแบบในช่วงฤดูฝนและต้นฤดูหนาวพบว่า ค่าเฉลี่ยการนำน้ำกลับคืนประมาณ 150 มิลลิลิตรต่อวันต่อชุด ระดับอุณหภูมิภายในชุดกลั่นอยู่ในช่วง 30-70.1 องศาเซลเซียส ช่วง 14.00 น. มีอุณหภูมิสูงกว่าช่วงเวลาอื่น โดยมีค่าเฉลี่ยอุณหภูมิ 70.1 องศาเซลเซียส ซึ่งระดับของอุณหภูมิภายในชุดกลั่นแสงอาทิตย์มีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณน้ำที่กลั่นได้ ความสามารถในการนำน้ำกลับคืนของชุดกลั่นต้นแบบอยู่ในช่วง 1,092-1,265 มิลลิลิตรต่อวันต่อชุด โดยค่าต่ำเกิดขึ้นในช่วงฤดูฝน และค่าสูงเกิดขึ้นในช่วงต้นฤดูหนาว อัตราการนำน้ำกลับคืน 45-55 มิลลิลิตรต่อตารางเมตรต่อวัน ชุดกลั่นแสงอาทิตย์เป็นทางเลือกที่เข้ามาช่วยลดผลกระทบจากน้ำระบายน้ำทิ้งเข้มข้นของเครื่องแยกเกลือออกจากน้ำที่เป็นปัญหาการกำจัดค่าความเค็มที่อาจส่งผลกระทบต่อระยะยาวกับแหล่งน้ำที่ระบายออกได้ เป็นวิธีประหยัด ไม่เป็นภาระกับผู้ดูแลและงบประมาณ ปริมาณน้ำที่ได้นำกลับคืนมาได้เป็นน้ำกลั่นมีความจืดจึงนำกลับมาใช้ประโยชน์ซ้ำได้ซึ่งเป็นการสนับสนุนการใช้งานเครื่องแยกเกลือออกจากน้ำขนาดเล็กที่นำมาใช้งานบรรเทาปัญหาน้ำมีความเค็มให้กับพื้นที่ได้

คำสำคัญ: การนำน้ำกลับคืนมา, การบำบัด, น้ำระบายน้ำทิ้งเข้มข้น, การกลั่นแสงอาทิตย์, การแยกเกลือจากน้ำ, นครราชสีมา

¹โปรแกรมวิทยาศาสตร์ โครงการภาคภาษาอังกฤษ โรงเรียนสามเสนวิทยาลัย พญาไท กรุงเทพฯ ประเทศไทย

²กองวิจัย พัฒนาและอุทกวิทยา กรมทรัพยากรน้ำ พญาไท กรุงเทพฯ ประเทศไทย

Abstract

This study aims to recover water from treating brine water of a small-scale desalination using a solar still. The design focuses on keeping temperatures inside at conditions suitable for water evaporation from the brine water basin. Water vapor rises and condenses into water droplets on the transparent glass cover, moving down the slope into a channel and collecting outside. The solar still is 1.0 m x 1.0 m x 0.5 m (width x depth x height) with a 25-degree slope for a transparent glass cover on top. This slope allows the water droplet to move down without reentering into the brine water basin below. The brine water was placed on top of the carbonized rice hull. The black residues can absorb heat energy by being a dark color, locally available, environmentally friendly, and stable. The test results during rainy and early winter months showed that the prototype solar still produced the average recovery water of 150 mL/day/set, with the hourly temperatures inside the chamber ranging from 30 to 70.1 Celsius. The highest inside temperature occurred at 2 PM, with an average of 70.1 Celsius. A correlation was observed between temperature and the amount of distilled water. Water recovery from the prototype ranged from 1,090 to 1,256 mL/day. Low recovery occurred in the rainy months. Estimation of water recovery rates in Nakhon Ratchasima ranged from 45 to 55 mL/m²/day. The solar still provides an alternative to recover water and mitigate the direct impact of brine water discharge from the small-scale desalination in Nakhon Ratchasima from possible effect of salinity water discharge. The method is economical, less burdensome to the caretaker, and low budget. The recovery water is freshwater; thus, it can be reused and has no long-term impact. The use of solar still is an auxiliary device that can be used with small-scale desalination in areas with saline water.

Keywords: Water recovery, Treatment, Brine water, Solar still, Desalination, Nakhon Ratchasima

¹Science Major, English Program, Samsen Wittayalai, Phayathai, Bangkok, Thailand

²Research, Development and Hydrology, Department of Water Resources, Phayathai, Bangkok, Thailand

*Corresponding author: saranbhak@gmail.com

1. Introduction

The widespread distribution of saline soil in northeast Thailand negatively impacts cultivation, livelihood, and the local economy due to low productivity and unsuitability for agriculture, especially in Nakhon Ratchasima province. Saline soil is soil that contains excessive amounts of water-soluble salts. Saline soil was estimated to cover about 30 percent of the total area in Nakhon Ratchasima [1], which is the province with the largest land area in Thailand, approximately 20,494 km² [2]. Economic crops in the province include rice, corn feed, cassava, and sugar cane. Apart from the low productivity of agricultural products, salt contents in soil cause higher salinity in groundwater and surface water than in other areas of the northeast region. As a result, the water supply production in a village mainly relies on surface water. It has difficulty removing salinity from the process, especially during the dry season, because the conventional sand filtration in the village water supply is used for turbidity removal.

The Department of Water Resources has built water treatment plants for village water supply throughout Thailand based mostly on sand filtration. The treatment plants in Nakhon Ratchasima, especially in Dan Kun Thot District, use sand filtration as a process to remove turbidity. The village water supply system cannot remove accumulated salinity from surface water during the dry season. In 2021-2022, the Department of Water Resources installed a prototype system to remove salinity in treated water supply using a membrane filtration technology as a part of a research project supported by funding from Thailand Research and Innovation (TSRI). The system is a small-scale desalination powered by solar panels. It is capable of lowering salinity in the water supply. The use of membrane technology produces brine water as a discharge and requires attention before disposal into the environment because the brine water has a high concentration of dissolved ions. Most large desalination plants are located near the sea, which is suitable for discharging the brine water back into deep water to avoid negative impact near shore. With a limited option of disposal of brine water on land or water in the area, this research proposed a brine water treatment system for a small-scale desalination system using a solar still system in Dan Kun Thot District, Nakhon Ratchasima. The system could treat brine water generated during desalination to lower the impact of brine water discharge and recover water as a product. The recovered water can be reused for other purposes, thus reducing water waste in the system.

Solar still is a simple water purification technique [3]. It uses energy from the sun to heat the water inside a closed chamber, allowing trapped heat to raise the temperature and evaporate the water into water vapor [4]. Rising water vapor accumulates on a transparent glass cover and forms water droplets through condensation on a cooler glass surface. The glass is built with a slope to facilitate water collection and prevent the water droplets from dripping back into the water reservoir. The collected water is usually clean and can be used as recovery water. The direct use of solar still is the desalination of seawater. However, it provides a low yield [3] and requires strong sunlight [5-6]. These limitations are not of concern in our case because the proposed solar still is for treating brine water from a small desalination in a village.

2. Material and Methods

2.1 Study area

The study area is Ban Nong Krathiam Tai, located in Tambol Nong Bua Takiat, Dan Kun Thot District, Nakhon Ratchasima (Figure 1). The village comprises 139 households with a population of 625 as of July 2020 [7]. Approximately 96 percent of the household in Dan Kun Thot District are farmers (Dan Kun Thot District Agriculture Office, n.d.). Almost all villagers are farmers. Rice, sugar cane, and cassava are the main crops commonly grown in the area. However, a large area in Tambol Nong Bua Takiet has a high salt level in the soil, as classified by the Department of Land Development.

2.2 Description of the small-scale desalination system in Dan Kun Thot District

The small-scale desalination system was installed at a water treatment plant as a research prototype by the Department of Water Resources in 2022. This plant uses raw water from a nearby pond, storing surface water from Lam Chiang Krai. Surface water is transported via an electric pump and sent into the process of removing turbidity in surface water with conventional water treatment. The final product is clear water, which is disinfected with a chlorine solution before being pumped to a water tower ready for service.



Figure 1 Location of the study area in Ban Nong Krathiam Tai, Dan Kun Thot District, Nakhon Ratchasima. The star symbol represents the village water treatment plant installing the small-scale desalination system.

However, the treated water has high salinity during the dry season due to less dilution of fresh water, causing complaints and discomfort because of the high salinity in the water supply. The Department of Water Resources planned and tested an alternative system to remove salt molecules, which is the small-scale desalination system. The system is capable of removing salt content in the water supply at the rate of at least 6 m³/day. Currently, it is used as an auxiliary system to partially dilute treating water during the dry season and operated about 2 hours daily. The actual volume of brine water was stored in a 2000L tank waiting for recovery. Water samples were taken from the tank for the experiments.

The small-scale desalination system only caters to a limited portion of the village's water supply. The system utilizes a reverse osmosis process to remove the salt content from the water at a capacity of 6 m³ per day. As a result, it is unable to meet the water demand for the entire village. However, it serves as a research prototype for the Department of Water Resources to explore the potential for water recovery in Nakhon Ratchasima. The small-scale desalination consists of three main components: pre-treatment of hardness with ion exchange, high-pressure pump, and membrane (Figure 2).

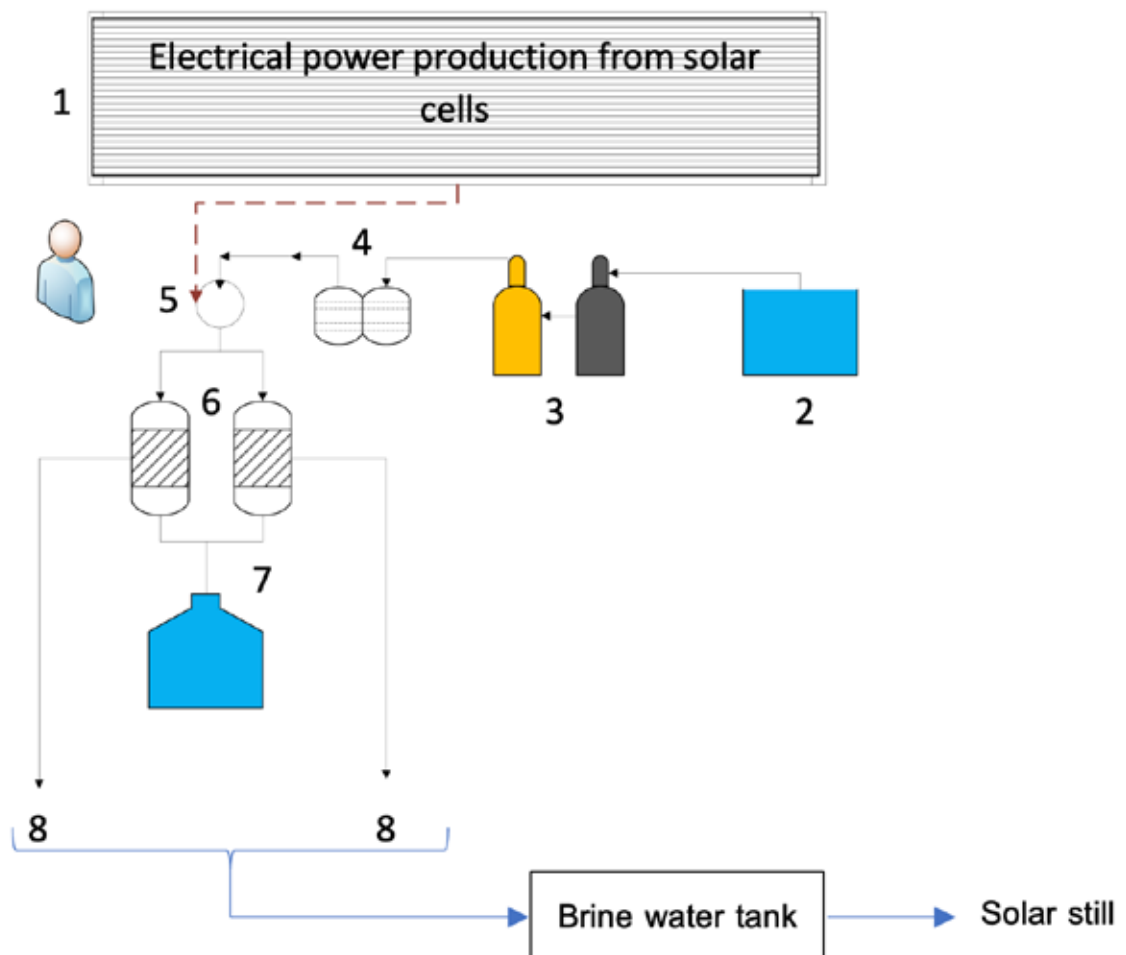


Figure 2 Schematic diagram of the small-scale desalination at Ban Nong Krathiam Tai, Dan Kun Thot District, Nakhon Ratchasima: 1 is the energy production from the solar panels, 2 is the water storage tank from clean village water supply, 3 is the pre-treatment, 4 is the dual filter, 5 is the high-pressure pump, 6 is the membrane housing units, 7 is the treated water storage tank, and 8 is the discharge of brine water.

The village water supply is pre-treated to remove residue chlorine in the pre-treatment tanks, and the dual filter removes suspended solids before entering the membrane. The system applies pressure to the feed water, forcing it through the membrane to separate the salt and other impurities from the water. The brine water, which contains concentrated salt and other byproducts, is the primary concern regarding its treatment and disposal. To evaluate water recovery, the solar still was evaluated (Figure 3).

2.3 The design of the prototype solar still

The design of the solar still was based on parameters recommended by literature [8-11] and local conditions. The body is similar to a rectangular shape but cut diagonally in half to form a slope for transparent glass. The solar still has 1.0 m in width, 1.0 m in depth, and 0.5 m in height (Figure 3). The surface area for brine water storage is 1 m², and the water level is set at 0.06 m. The total storage of water is 60 liters. The slope of the transparent glass is 25 degrees. Details are in Table 1 and Figures 4.

2.4 Evaluation of water recovery and treatment of brine water of the solar still

A prototype solar still was built by the Department of Water Resources according to the proposed design. The evaluation of water recovery and treatment of brine water was carried out using brine water collected from the discharge of the small-scale desalination in Dan Kun Thot District.

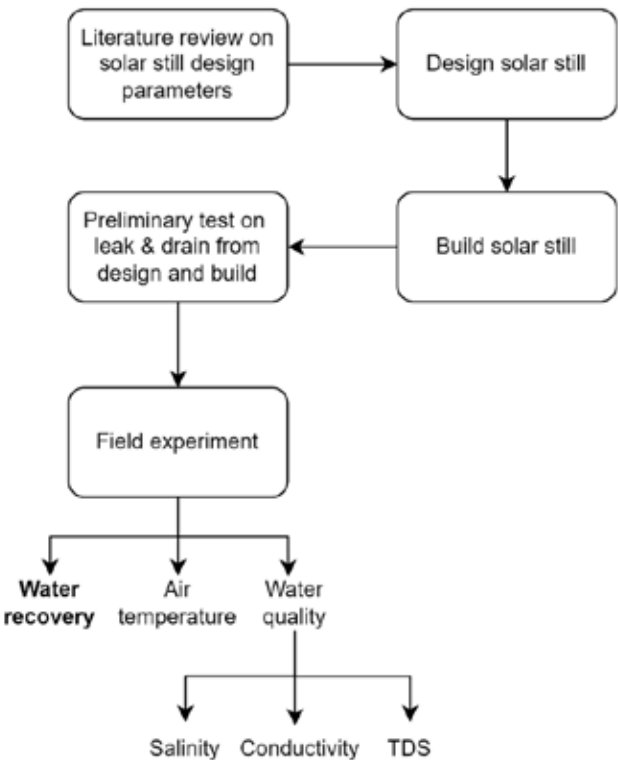


Figure 3 Steps in research on water recovery from the small-scale desalination

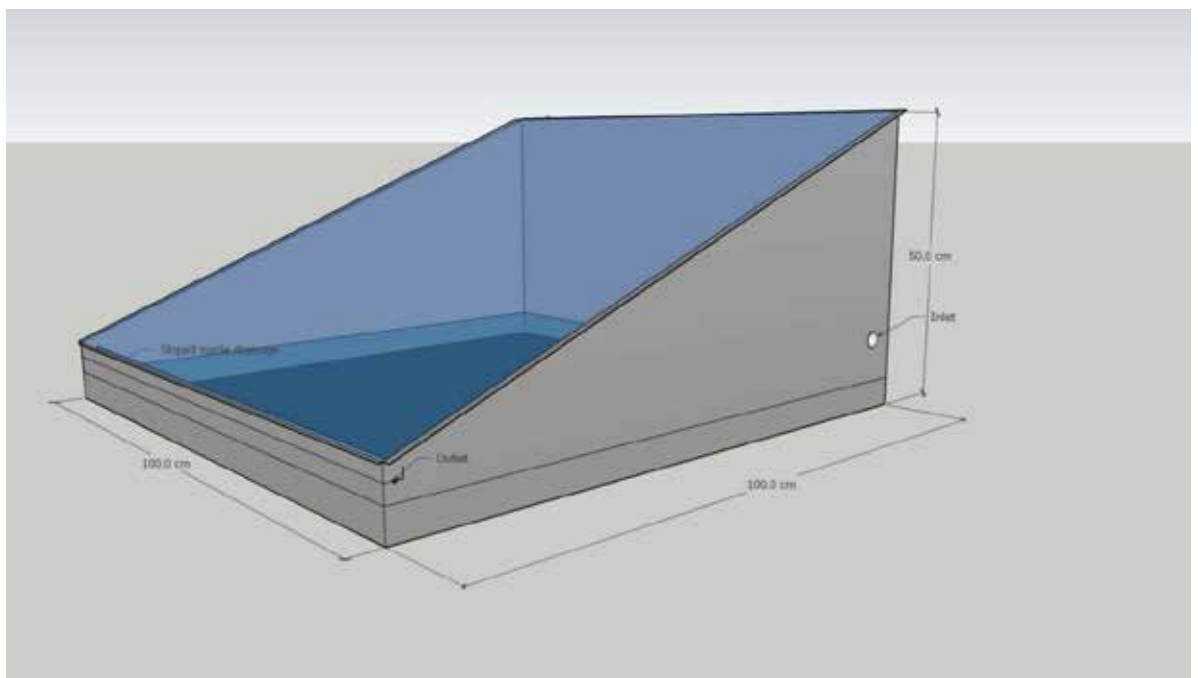
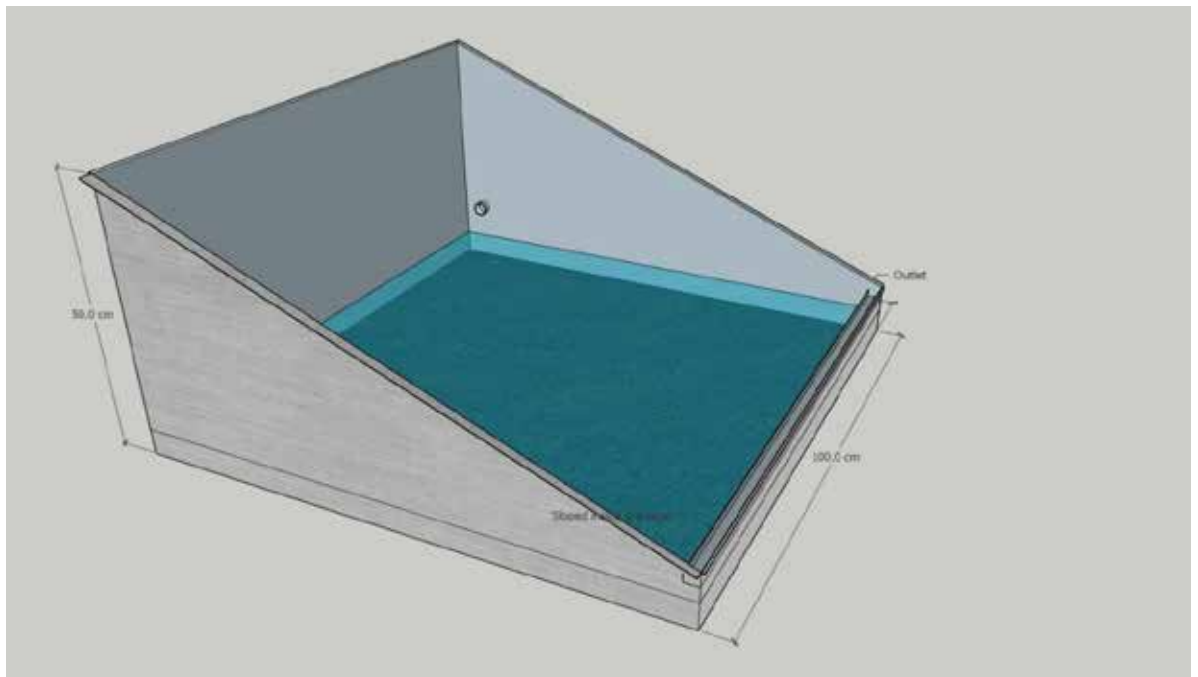


Figure 4 Drawing design of prototype solar still for water recovery and treatment of brine water: inside configuration without glass cover (top); carbonized rice hulls in dark color submerged in brine water (light color); drain channel at the lower end, outside configuration with glass cover (bottom)

Table 1 Parameters used in the design of a solar still for water recovery and treatment of brine water from small-scale desalination in Nakhon Ratchasima

Design parameters	Design values
Width x Depth x Height	1 m x 1 m x 0.5 m
The surface area of distillation	1 m ²
Height of brine water basin	0.06 m
Total brine water volume	60 L
The slope of the transparent glass cover	25 degrees
Thickness of the transparent glass cover	0.5 cm
Heat-absorbing material	Carbonized black rice husk granules (0.02 m in depth)
Height of heat-absorbing material	2 cm
Material of construction	Aluminum

Water salinity, conductivity, and total dissolved solids (TDS) were measured from the brine water and recovery water using water quality sensors (YSI Pro30 and ProDSS, YSI Inc., OH, USA). The temperature inside the solar still was measured by a thermometer.

Recovery water from the solar still was hourly collected via silicone tubing for every experiment. The experiment was repeated 10 times. An electronic balance was used to weight the water volume (ENTRIS 423i-1S, Sartorius Lab Instruments, GmbH, Goettingen, Germany). Water quality was performed when the volume of recovery water reached 300 ml. Standard solutions were used to calibrate the instrument according to protocol recommended by the manufacturer (YSI Inc., OH, USA).

3. Results and discussion

3.1 Performance of the solar still design on water recovery

The solar still design with a 25-degree slope of the transparent glass allowed the water vapor to condense on the glass surface and helped prevent the formed water droplet from moving downward without dripping back into the brine water basin. The slope is sufficient for the prototype to perform three functions: heat trap, condensation surface, and water droplet formation. The surface area of 1 m² exposed brine water to sunlight, which was large enough to recover water from brine water discharged of the small-scale desalination used in the village. With a 0.06 m height of brine water level, the recovery capacity was 60 L in each batch. The prototype held temperatures inside the chamber between 27.9 and 71.4 Celsius during the rainy and early winter months. High temperatures inside the chamber accelerated evaporation of water from the brine water.

Using carbonized rice hulls was an excellent material to facilitate the absorption of solar radiation inside the solar still. It has a dark color that is good for heat absorption, stable, cheap, and ubiquitous. The carbonized rice hull did not become waste after use because it can be mixed with soil or diluted with rice hulls and used as a soil amendment in the areas [12]. The estimated cost to build a solar still was about 2,128 Baht, excluding labor. About 92 percent were the cost of a sheet of stainless steel and glass cover.

3.2 Water recovery from brine water treatment of the solar still

A solar still prototype was built and tested by the Department of Water Resources in Nakhon Ratchasima. Two testing periods were between the rainy season in August and September and the early winter months in October and November 2023 (Figure 5).



Figure 5 The prototype solar still was tested for water recovery and treatment of brine water from a small-scale desalination. Digital thermometer was placed inside (arrow).

Recovery water volume was collected and measured. The highest water recovery occurred at 2 PM in rainy and early winter months (Figure 6), as high as 71.4 Celsius, coinciding with a higher 2.2 mL water recovery during this afternoon hour. A similar pattern of temperature levels inside the solar still was observed in both periods, low at night and early morning. However, lower temperatures occurred in the rainy season due to cloudy and occasional rain.

The total volume of distilled water ranged from 1014–1185 mL/day during the rainy and early winter months. Lower daily water recovery occurred in the rainy season, or about 170 mL less. However, the distilled water from solar still in other studies was higher in other literature, with maximum of 3070 mL/day [10,13-15].

Temperature is clearly a factor of water recovery in the prototype solar still experiment. The relationship between distilled water and temperatures was relatively strong in rainy and early winter months, with the r^2 of 0.84–0.87 (Figures 7 and 8). The prototype solar still could remove brine water and produce distilled water at the rate of 1.0 mL/hour on average under the temperature ranges found during the experiment. However, if the prototype could keep a higher temperature inside the chamber, the water removal rate would be faster. Thus, the design should focus on conditions that can sustain high temperatures. Using trapped heat inside a closed chamber is a treatment method for brine water and is capable of recovering the water for further use.

3.3 Characteristic of recovery water

Brine water from a desalination process is known to have high total dissolved solids (TDS) and conductivity [8]. This project measured both water parameters from brine water discharged from the small-scale desalination and compared it with the recovery water collected from the prototype solar still. Water salinity was also measured because it is the focus of water treatment and recovery in this project. The conductivity of brine water ranged from 3921 to 4518 $\mu\text{S}/\text{cm}$ and TDS between 2295 and 2711 mg/L. Salinity in brine water ranged from 1.9 to 2.1 ppt.

Recovery water collected from the prototype solar still was measured in the same manner, and the results showed that lower concentrations of all three parameters were observed in both seasons (Figures 9 and 10). Conductivity was between 4.3 and 5.2 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (99% reduction), while TDS remained low at 3.1 to 4.3 mg/L (99% reduction). Salinity was not detected. These numbers were lower than the limits set by the Royal Irrigation Department's discharges into the irrigation water, conductivity less than 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ for conductivity, and less than 1300 mg/L for TDS [16]. Tap water usually has conductivity between 500 and 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$ [17]. The recovery water was formed from the condensation process using heat energy trapped inside the solar still chamber.

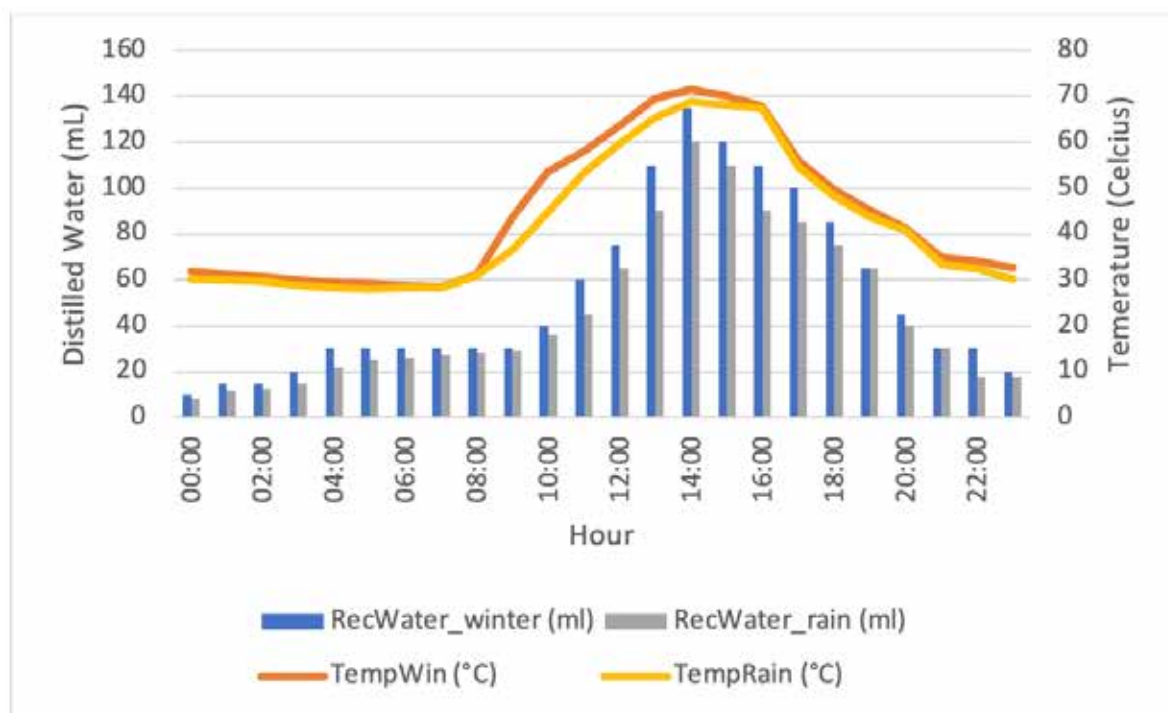


Figure 6 Hourly temperatures (Celsius) inside the solar still and water recovery as distilled water (mL) during rainy and early winter months in Nakhon Ratchasima.

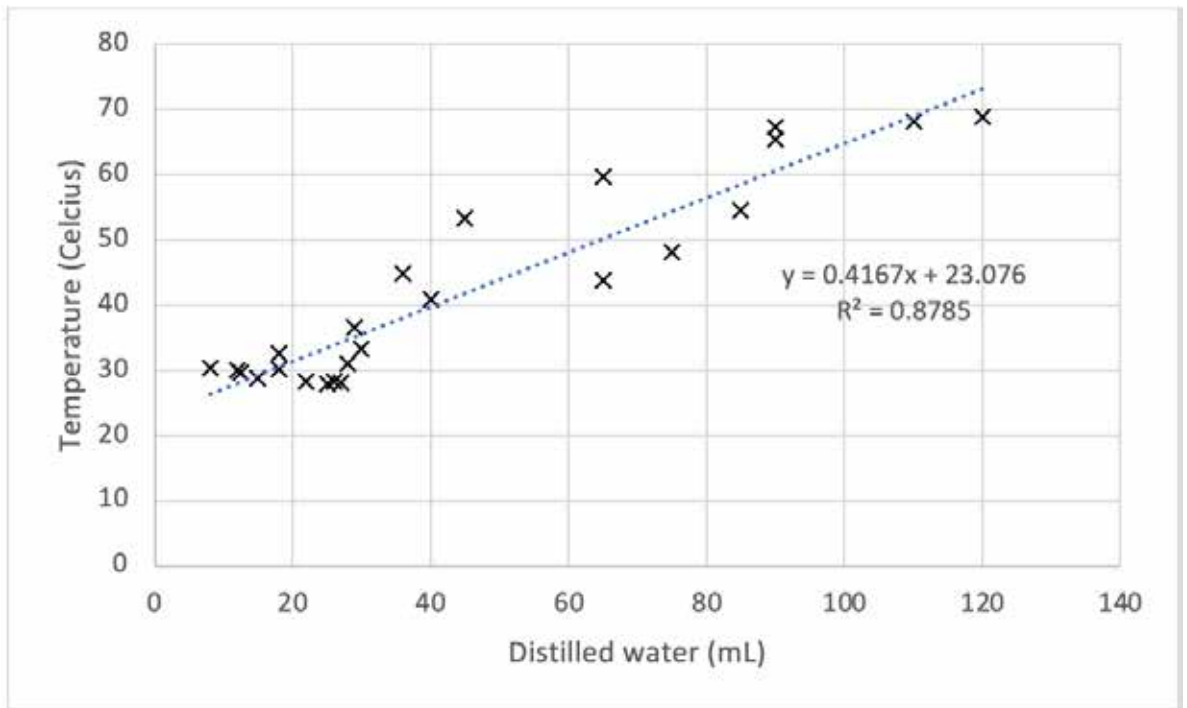


Figure 7 Temperatures inside the chamber of the solar still and distilled water produced in rainy months.

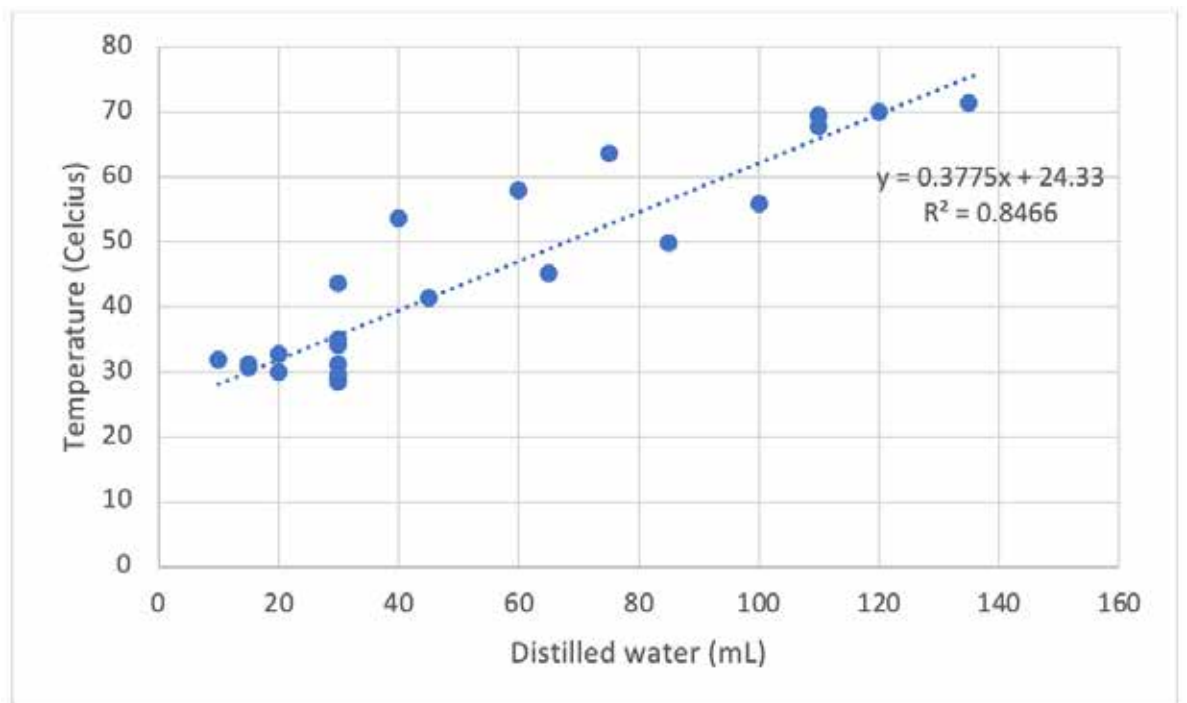


Figure 8 Temperatures inside the chamber of the solar still and distilled water produced in the early winter months.

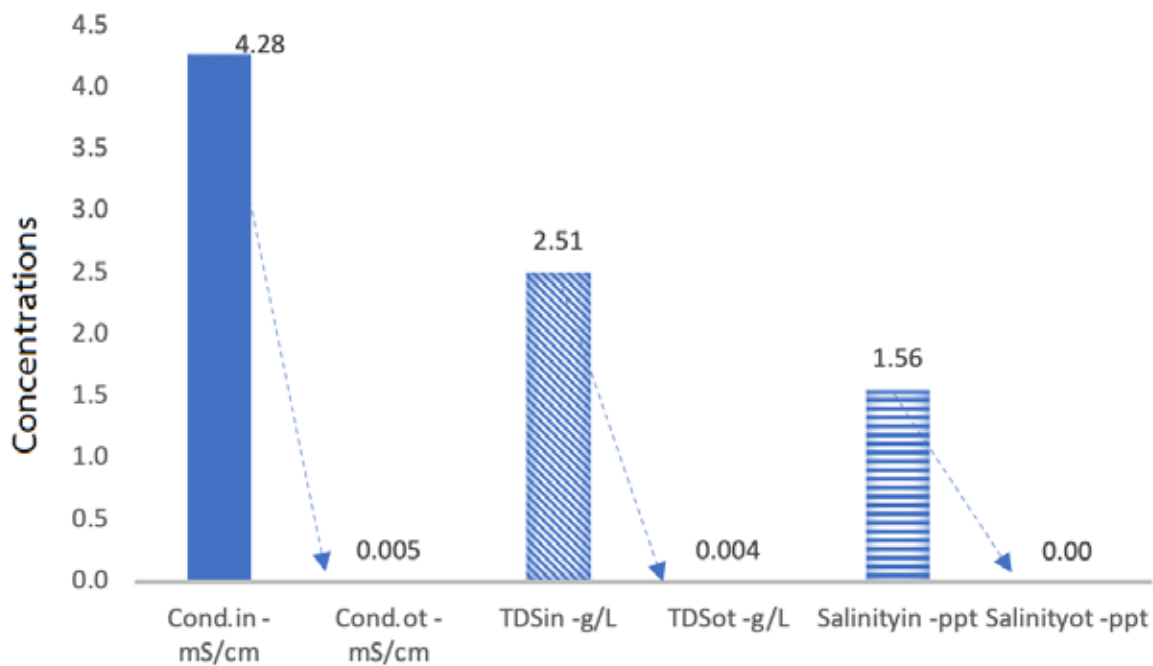


Figure 9 Conductivity (mS/cm), TDS (g/L) and salinity (ppt) of brine water (in) and recovery water (ot) during early winter months. Units were adjusted to reduce the effect of large differences in numbers.

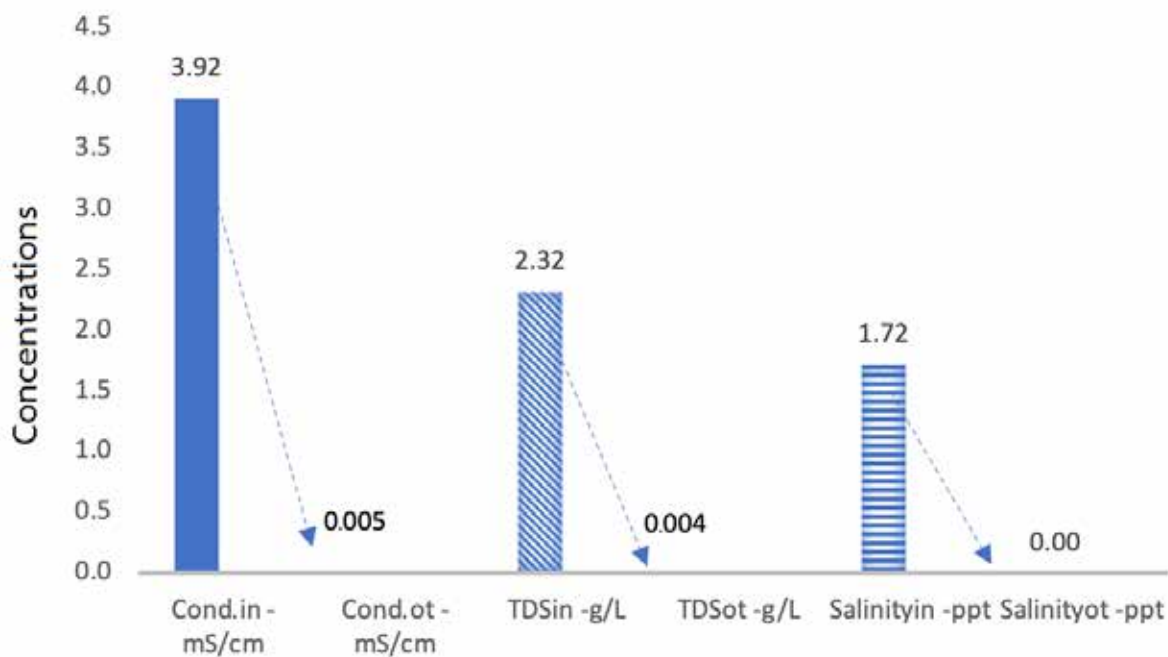


Figure 10 Conductivity (mS/cm), TDS (g/L) and salinity (ppt) of brine water (in) and recovery water (ot) during early rainy months. Units were adjusted to reduce the effect of large differences in numbers.

4. Conclusions

The design of a prototype solar still was used and evaluated water recovery and treatment of brine water discharged from a small-scale desalination in Ban Nong Kratiem Tai, Dan Kun Thot District, Nakhon Ratchasima. The prototype can recover water as a product and treat the brine water as well. The slope of 25 degrees was enough to prevent water formed on the glass surface from reentering the brine water container. At the same time, the water was able to flow down along the glass surface and collected in a draining channel as clean water. The prototype has a surface area of 1 m² and is capable of water recovery at 1014–1185 mL/day in rainy and early winter months. Based on these numbers, our calculations on water recovery were 12–20 days if a set of five solar stills was used as a batch of 60 L of brine water during these months. The highest temperature inside the chamber reached 70.1 Celsius, and 22 mL was the maximum water recovery at 2 PM. Maintaining high temperatures inside the solar still chamber are the main factors in water recovery as well as treatment.

The carbonized rice hull was suitable as a substrate inside the solar still as heat-absorbing material. It is also a very economical way of utilizing agricultural waste in this experiment because it is available locally, does not degrade over four months under brine water, and is biologically inert. for safe disposal in the area. Salt remaining in carbonized rice hulls may be of concern, but the study area already has widespread natural deposits of salts. Dilution with soil or rice hulls before disposal in soils may be possible. Future analysis of salts may provide insight information for extraction of valuable trace elements if there is enough sodium or lithium within salts. Recovery water had low conductivity and TDS, while water salinity was not detected because the water was the product of the condensation process inside the solar still. The results suggested that the prototype solar still was capable of water recovery and treatment of brine water discharged from the small-scale desalination. However, the rate of water recovery and treatment was less than those reported in the literature. This issue could be improved by adding a series of the solar still to recover and treat the brine water at the same time, testing a new design of the chamber size and slope for better heat accumulation, and painting the chamber with black.

This research estimated the low end of water recovery to estimate reasonable yields during rainy and early winter months in Nakhon Ratchasima. Further long-term tests during summer months may provide a higher rate of water recovery due to strong solar radiation. Replacing the small-scale desalination with a large-scale array of solar still would be very challenging to accomplish due to slow recovery or production of water to meet the demand in the village. Solar still should co-exist and work in tandem in the area with high salinity soil like Dan Kun Thot District. All the future improvements are important for keeping high temperatures in the solar still. With a limited option of disposal of brine water on land or water in the area, this research finds that the solar still is a decent method for water recovery and treatment of brine water from the small-scale desalination used in Dan Kun Thot District, Nakhon Ratchasima.

5. Acknowledgement

The authors would like to thank the Department of Water Resources, Ministry of Natural Resources and Environment for all their support and guidance. The funding from Thailand Research and Innovation (TSRI) was allocated to the Department of Water Resources as a research grant in 2022. We are very appreciative of Mr. Pin Mongkuntod, the caretaker of the water treatment plant at Ban Nong Katiam Tai for water samples.

We are very thankful for our teachers for guiding us through this science journey and for encouraging us to write this manuscript.

6. References

- [1] Department of Land Development. Map of salty and acidic soil [Internet]. 2023 [cited 2023 Dec 22]. Available from: http://r03.ldd.go.th/P64/Soil_S_nma.html
- [2] Office of Natural Resource and Environment Nakhon Ratchasima. Five years plan on natural resource and environment Nakhon Ratchasima province (B.C. 2022–2026). Nakhon Ratchasima: Office of Natural Resource and Environment Nakhon Ratchasima; 2022.
- [3] Mohammed AH, Attalla M, Shmroukh AN. Comparative study on the performance of solar still equipped with local clay as an energy storage material. *Environ Sci Pollut Res Int*. 2022;29(49):74998-5012.
- [4] Aybar HS. A review of desalination by solar still. In: Rizzuti L, Ettouney HM, Cipollina A, editors. *Solar desalination for the 21st century*. USA: Springer; 2007. p. 207-214.
- [5] Hermosillo JJ, Arancibia-Bulnes CA, Estrada CA. Water desalination by air humidification: mathematical model and experimental study. *Solar Energy*. 2012;86(4):1070-6.
- [6] Zhang W, Mossad M, Zou L. A study of the long-term operation of capacitive deionisation in inland brackish water desalination. *Desalination*. 2013;320:80-5.
- [7] Nong Bua Takiat Municipality. General information [Internet]. 2023 [cited 2023 Dec 22]. Available from: https://www.nongbuatakiat.go.th/data.php?content_id=6
- [8] Abu-Hijleh BA. Enhanced solar still performance using water film cooling of the glass cover. *Desalination*. 1996;107(3):235-44.
- [9] Dev R, Tiwari GN. Characteristic equation of a passive solar still. *Desalination*. 2009;245(1-3):246-65.
- [10] Elango T, Murugavel KK. The effect of the water depth on the productivity for single and double basin double slope glass solar stills. *Desalination*. 2015;359:82-91.
- [11] Al-Garni AZ. Enhancing the solar still using immersion type water heater productivity and the effect of external cooling fan in winter. *Appl Sol Energy*. 2012;48(3):193-200.
- [12] Jeon WT, Seong KT, Lee JK, Oh IS, Lee YH, Ok YS. Effects of green manure and carbonized rice husk on soil properties and rice growth. *Korean J Soil Sci Fert*. 2010;43(4):484-9.
- [13] Khalifa AJN, Hamood AM. Experimental validation and enhancement of some solar still performance correlations. *Desalin Water Treat*. 2009;4(1-3):311-5.
- [14] Rajamanickam RR, Ragupathy A. Influence of water depth and internal heat and mass transfer in a double slope solar still. *Energy Procedia*. 2012;14:1701-8.
- [15] Taghvaei H, Taghvaei H, Jafarpur K, Estahbanati MK, Feilizadeh M, Feilizadeh M, et al. A thorough investigation of the effects of water depth on the performance of active solar stills. *Desalination*. 2014;347:77-85.
- [16] The Royal Irrigation Department. Water quality of discharges into irrigation water. The Royal Irrigation Department's Order No. 18/2018; 2018.
- [17] National Institute of Metrology Thailand (NIMT). Conductivity and applications in industry [Internet]. 2019 [cited 2024 Sep 15]. Available from: https://www.mhesi.go.th/images/2563/pusit/nimt/Metro-Vol21.W01.2019_Electrolytic_conductivity.pdf

การตรวจวิเคราะห์ปริมาณตะกั่วในกระดาษสัมผัสอาหาร ด้วยเทคนิคอินดักทีฟพลาสมาแมสสเปกโตรเมตรี

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

วรุณรัตน์ บุรณะกุล¹, เนตรศิรินทร์ กฤษวงษ์¹, วีรภัทร รามณี¹, นุจรินทร์ พลหงษ์,
จิตติไล เวฬุวนารักษ์¹, วีระ สวนโธสง^{1*}

Warunrat Buranakul¹, Netsirin Gissawong¹, Veerapat Ramanee¹, Nootjarin Phonhong¹,
Jitwilai Waluvanarak¹, Weera Suanthaisong^{1*}

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

บทคัดย่อ

การศึกษานี้เป็นการตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีทดสอบหาปริมาณตะกั่วที่ปนเปื้อนในกระดาษสัมผัสอาหาร โดยย่อตัวอย่างกระดาษด้วยไมโครเวฟในสภาวะที่เป็นกรด จากนั้นตรวจวัดปริมาณตะกั่วด้วยเครื่องอินดักทีฟพลาสมาแมสสเปกโตรมิเตอร์ และได้ทำการศึกษาคุณลักษณะเฉพาะที่แสดงสมบัติของวิธีทดสอบ ได้แก่ ความสัมพันธ์เชิงเส้น (Linearity) ขีดจำกัดการตรวจหา (Limit of detection, LOD) ขีดจำกัดการวัดปริมาณ (Limit of quantitation, LOQ) ความเอนเอียง (Bias) ความเที่ยง (Precision) และผลกระทบจากองค์ประกอบของตัวอย่าง (Matrix effect) โดยกำหนดให้ค่าความไม่แน่นอนเป้าหมายของวิธีต้องไม่เกินร้อยละ ± 15 จากการศึกษาพบว่าค่าขีดจำกัดการตรวจหาและขีดจำกัดการวัดปริมาณเท่ากับ 0.043 mg/kg และ 0.40 mg/kg ตามลำดับ ช่วงการใช้งานของวิธีทดสอบอยู่ในช่วง 0.40–4.0 mg/kg ค่าความเอนเอียงของวิธีประเมินจากค่าคืนกลับของสารมาตรฐานที่เติมลงไปในตัวอย่งกระดาษที่ไม่มีปริมาณตะกั่วที่ระดับความเข้มข้น ต่ำ กลาง และสูง ของช่วงการใช้งานของวิธี มีค่าร้อยละของค่าคืนกลับ 97.0–103.2 ความเที่ยงของการทดสอบโดยวิธีเติมสารละลายมาตรฐานความเข้มข้นเดียวกับการศึกษาความเอนเอียง มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์น้อยกว่าร้อยละ 10 และผลการตรวจยืนยันผลกระทบจากองค์ประกอบของตัวอย่าง โดยการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นและปริมาณที่ตรวจวัดได้เฉลี่ยในสารละลายตัวอย่างกระดาษ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเข้าใกล้ 1 แสดงว่าไม่มีผลกระทบจากองค์ประกอบของตัวอย่าง และเมื่อนำข้อมูลจากการศึกษาความเอนเอียงและความเที่ยงมาใช้ในการประเมินค่าความไม่แน่นอนของการวัด พบว่าได้ค่าความไม่แน่นอนร้อยละ ± 15 ของปริมาณที่ตรวจวัดได้ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังนั้นสรุปว่าวิธีนี้สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วในผลิตภัณฑ์กระดาษคราฟท์ให้ผลการวัดมีความแม่นยำ ความเที่ยง น่าเชื่อถือ และเหมาะกับการใช้งานตามวัตถุประสงค์

คำสำคัญ: อินดักทีฟพลาสมาแมสสเปกโตรเมตรี, กระดาษสัมผัสอาหาร, ตะกั่ว, การย่อยด้วยไมโครเวฟ

¹กลุ่มผลิตภัณฑ์โลหะ กองเคมีภัณฑ์และผลิตภัณฑ์อุปโภค กรมวิทยาศาสตร์บริการ

Abstract

This study aimed at the method validation for determination of lead contamination in paper for food contact materials (FCMs). They were digested with acid and using the microwave digestion. Then the amount of lead in the solution was determined by inductively coupled plasma mass spectrometer and the performance characteristics which are linearity, limit of determination (LOD), limit of quantitation (LOQ), bias, precision and matrix effect were studied. The target uncertainty associated with the quantification of lead in paper, should be no bigger than $\pm 15\%$. From the study, it was found that LOD and LOQ are 0.043 mg/kg and 0.40 mg/kg, respectively, while working range of this method was 0.40–4.0 mg/kg. The method bias was evaluated from the recoveries of the standard substance added to the lead-free paper at 3 concentration levels (low, medium and high) of the working range under repeatability conditions. It showed that the recoveries were 97.0–103.2%. The precision study, the same concentration of the bias study was added to the samples showed that the relative standard deviation was less than 10% and the matrix effect was investigated by considering the relationship between the concentration and the amount of lead in the paper sample solution. It was found that the coefficient of determination, R^2 approached 1. This indicates that there is no matrix effect. The information obtained from the bias and precision can be used to estimate measurement uncertainty. It was found that the expanded uncertainties of this method at the confidence level of 95% was $\pm 15\%$. Therefore, the proposed method for determination of lead in paper is accurate, precise, reliable, and fit for the intended use.

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

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

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

1. บทนำ (Introduction)

ในปัจจุบันเศรษฐกิจชีวภาพ เศรษฐกิจหมุนเวียน และเศรษฐกิจสีเขียว (Bio-Circular-Green Economy, BCG) เป็นเศรษฐกิจแนวใหม่ที่ทุกประเทศกำลังให้ความสำคัญ เนื่องจากเป็นเศรษฐกิจที่มุ่งเน้นการลดปัญหาของโลกร้อนที่กำลังบั่นทอนทรัพยากรของโลก ซึ่งเป็นแนวทางการช่วยขับเคลื่อนเศรษฐกิจด้วยวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและนวัตกรรม นวัตกรรมที่เกี่ยวข้องกับเศรษฐกิจหมุนเวียน เช่น บรรจุภัณฑ์กระดาษใส่อาหารที่ถูกคิดค้นและออกแบบขึ้นมาเพื่อใช้ทดแทนกล่องโฟมและกล่องพลาสติก หรือบรรจุภัณฑ์อาหารที่ไม่สามารถย่อยสลายหรือย่อยสลายได้ยากตามธรรมชาติ ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายกับธุรกิจอาหารทุกแห่งทั่วโลก เนื่องจากมีข้อดีหลายประการ เช่น ย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม สามารถสัมผัสอาหารได้โดยตรง สามารถนำไปรีไซเคิลได้ 100% อย่างไรก็ตามบรรจุภัณฑ์กระดาษสำหรับใส่อาหารที่ไม่ได้มาตรฐานอาจมีการปนเปื้อนสารอันตราย เช่น ตะกั่ว ที่สามารถแพร่กระจายเข้าสู่อาหาร การปนเปื้อนโลหะหนักดังกล่าวในบรรจุภัณฑ์กระดาษเกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุ ได้แก่ จากกระบวนการผลิตที่ยังคงมีสารเคมีตกค้าง จากกระบวนการพิมพ์บนบรรจุภัณฑ์หรือการใช้หมึกพิมพ์ที่อาจมีตะกั่วจากสี หรือส่วนผสมอื่น ๆ ของหมึกพิมพ์ตกค้างอยู่ และจากกระบวนการแปรสภาพเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ โดยกระบวนการรีไซเคิลอาจจะมีโลหะหนักปนเปื้อนมากกว่าบรรจุภัณฑ์ที่ทำจากเยื่อกระดาษใหม่ เพราะในกระบวนการผลิตกระดาษไม่สามารถกำจัดโลหะหนักออกจากกระดาษที่ผ่านการใช้แล้วได้อย่างสมบูรณ์ หากผู้บริโภคได้รับสารตะกั่วจะทำให้ร่างกายอ่อนเพลีย เบื่ออาหาร น้ำหนักลด ปวดเกร็งท้อง และส่งผลต่อพัฒนาการทางด้านสมอง ดังนั้นมาตรฐานบรรจุภัณฑ์กระดาษใส่อาหารจึงมีความสำคัญ ดังจะเห็นได้จากแต่ละประเทศต่างมีมาตรการหรือกฎหมายเกี่ยวกับมาตรฐานบรรจุภัณฑ์อาหารที่เข้มงวด โดยเฉพาะสหภาพยุโรปมีกฎหมายที่เกี่ยวกับวัสดุสัมผัสอาหารที่เข้มงวดมาก ซึ่งครอบคลุมวัสดุสัมผัสอาหาร 17 ประเภท ซึ่งหนึ่งในนั้นคือกระดาษ

สำหรับประเทศไทยในขณะนี้มีความมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง คือ มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมซึ่งกำหนดโดยคณะกรรมการวิชาการของสำนักงานมาตรฐานอุตสาหกรรม ได้แก่ มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระดาษสัมผัสอาหาร (มอก. 2948) [1] และมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระดาษสัมผัสอาหาร สำหรับปรุงอาหารด้วยความร้อน (มอก. 3438) [2] ซึ่งมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) ทั้งสองฉบับ กำหนดปริมาณตะกั่วที่จะละลายออกมาจากสารเคมีที่เคลือบอยู่บนกระดาษได้ไม่เกิน 3.0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เมื่อวิเคราะห์ตามวิธีมาตรฐาน 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]

การทดสอบตามวิธีมาตรฐาน BS EN 12498 เป็นวิธีวิเคราะห์ปริมาณตะกั่วที่ละลายออกมาจากสารที่ปนเปื้อนในเนื้อกระดาษ ด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลายที่เป็นกลางตามลักษณะการใช้งานของผลิตภัณฑ์ เช่น บรรจุภัณฑ์กระดาษที่สัมผัสหรือปรุงอาหารด้วยความร้อน ให้ทดสอบตามวิธีมาตรฐาน BS EN 647: Paper and board intended to come into contact with foodstuffs - Preparation of a hot water extract [4] ส่วนบรรจุภัณฑ์กระดาษที่สัมผัสหรือปรุงอาหารที่ไม่ใช้ความร้อน ให้ทดสอบตามวิธีมาตรฐาน BS EN 645: Paper and board intended to come into contact with foodstuffs - Preparation of a cold water extract [5] ซึ่งทั้งสองวิธีดังกล่าวยังมีข้อจำกัดที่ก่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนของการวัดเชิงระบบของวิธีการวิเคราะห์ (Method bias) เนื่องจากบรรจุภัณฑ์กระดาษมีคุณสมบัติเป็นตัวดูดซับ ส่งผลให้ค่าความโอนเียงของวิธีทดสอบตามมาตรฐาน BS EN 12498 ซึ่งประเมินจากค่าคืนกลับของปริมาณตะกั่วในสารละลายที่สกัดได้จากตัวอย่างกระดาษกราฟที่ตามมาตรฐานดังกล่าวเปรียบเทียบกับปริมาณตะกั่วที่ทราบความเข้มข้นที่แท้จริง มีค่าคืนกลับน้อยกว่าร้อยละ 50 [6] ดังนั้นการศึกษานี้เป็นการพัฒนาวิธีทดสอบสำหรับประเมินคุณภาพผลิตภัณฑ์กระดาษโดยตรวจสอบคุณลักษณะความปลอดภัยเกี่ยวกับปริมาณตะกั่วที่ปนเปื้อนอยู่ในบรรจุภัณฑ์กระดาษด้วยการย่อยตัวอย่างกระดาษด้วยไมโครเวฟในสภาวะที่เป็นกรด จากนั้นวัดปริมาณตะกั่วด้วยเครื่องอินดักทีฟพลาสมาแมสสเปกโตรมิเตอร์ ซึ่งมุ่งเน้นพัฒนาให้เป็นวิธีที่ให้ผลการวัดที่ถูกต้อง แม่นยำ ประหยัดเวลาและสารเคมี เป็นไปตามเกณฑ์การยอมรับตามวิธีมาตรฐาน BS EN 12498 โดยทำการศึกษาคคุณลักษณะเฉพาะที่แสดงสมบัติของวิธีทดสอบ ได้แก่ ช่วงการใช้งานของเครื่องมือ (Instrument working range) ขีดจำกัดการตรวจหา (LOD) ขีดจำกัดการวัดปริมาณ (LOQ) ความโอนเียง (Bias) และความเที่ยงระหว่างกลาง (Intermediate

precision) อ้างอิงแนวทางตามเอกสาร The fitness for purpose of analytical methods. a laboratory guide to method validation and related topics [7] และการประมาณค่าความไม่แน่นอนของการวัด ตามเอกสาร 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. กระดาษสัมผัสอาหาร หมายถึง กระดาษที่ผลิตจากเยื่อบริสุทธิ์ เยื่อไม่ธรรมชาติ ไม่ผ่านการฟอกขาว ไม่มีการเคลือบผิวด้วยวัสดุป้องกันการดูดซับ ขึ้นรูปเยื่อกระดาษเป็นภาชนะ แล้วนำไปทำให้แห้ง

2.1.2. ตัวอย่างที่ใช้ศึกษา คือ กระดาษคราฟท์ที่ไม่มีการปนเปื้อนปริมาณตะกั่วหรือมีปริมาณตะกั่วไม่เกิน 0.0040 mg/kg (0.020 µg/L) ที่สุ่มมาจากกลุ่มกระดาษที่ผลิตขึ้นมาในช่วงเวลาเดียวกัน

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 TOPWave 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% แล้วล้างออกด้วยน้ำ

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

2.3. สารเคมี สารละลาย และวิธีเตรียม

2.3.1. สารเคมี

2.3.1.1. น้ำปราศจากไอออนบริสุทธิ์ ความต้านทานไฟฟ้า 18.2 MΩ/cm

2.3.1.2. กรดไนตริกเข้มข้น (HNO₃) 65% w/v ความถ่วงจำเพาะ 1.40 Analytical Reagent Grade ยี่ห้อ Merck

2.3.1.3. สารละลายกรดไนตริก 2% v/v

เตรียมโดยตวงน้ำปราศจากไอออน 980 mL และตวงกรดไนตริก 20 mL ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 2,000 mL จากนั้นผสมให้เข้ากัน

2.3.2. สารละลายมาตรฐาน

2.3.2.1. สารละลายมาตรฐานตะกั่ว (Pb) ความเข้มข้น 1,000±24 mg/L ยี่ห้อ AccuStandard สอบกลับได้ ไปยัง NIST RM 3128

2.3.2.2. สารละลายมาตรฐานตะกั่ว (Pb) ความเข้มข้น 1,000±3 mg/L ยี่ห้อ High-Purity สอบกลับได้ ไปยัง NIST RM 3128 คนละแหล่งกับสารละลายมาตรฐานตะกั่วในข้อ 2.3.2.1

2.3.2.3. สารละลายมาตรฐานตะกั่วความเข้มข้น 10.0 mg/L และ 0.10 mg/L

เตรียมโดยปิเปตสารละลายมาตรฐานตะกั่วในข้อ 2.3.2.1 ปริมาตรตามตารางที่ 1 ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 100 mL จากนั้นปรับปริมาตรด้วยกรดไนตริกความเข้มข้น 2% v/v จนถึงขีดวัดปริมาตร

ตารางที่ 1 วิธีการเตรียมสารละลายมาตรฐานตะกั่วความเข้มข้น 10.0 mg/L และ 0.10 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

2.3.2.4. สารละลายมาตรฐานตะกั่วสำหรับสร้างกราฟมาตรฐาน

เตรียมโดยปิเปตสารละลายมาตรฐานตะกั่ว ในข้อ 2.3.2.3 ปริมาตร ตามตารางที่ 2 ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 100 mL จากนั้นปรับปริมาตรด้วยกรดไนตริกความเข้มข้น 2% v/v จนถึงขีดวัดปริมาตร

ตารางที่ 2 วิธีการเตรียมสารละลายมาตรฐานตะกั่วสำหรับสร้างกราฟมาตรฐาน

No.	Start conc. of Standard, mg/L	Volume of Pipette, mL	Final conc. of Standard, µg/L
Cal-1	0.10	2	2.0
Cal-2	0.10	5	5.0
Cal-3	0.10	10	10.0
Cal-4	0.10	20	20.0

2.4. วิธีดำเนินงาน

2.4.1. การเตรียมตัวอย่าง

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

2.4.1.2. เติมกรดไนตริกเข้มข้น (HNO_3) 65% w/v ในข้อ 2.3.1.2 ปริมาตร 10 mL รอประมาณ 1 ชั่วโมง จนกระทั่งไม่มีปฏิกิริยาระหว่างตัวอย่างกับกรด

2.4.1.3. นำเข้าเครื่องย่อยสลายตัวอย่างด้วยระบบไมโครเวฟ

2.4.1.4. ตั้งพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับการย่อยตัวอย่าง เช่น อุณหภูมิ ความดัน เวลา และพลังงาน ดังแสดงในตารางที่ 3 ซึ่งอ้างอิงมาจากคู่มือการใช้งานเครื่องไมโครเวฟ ยี่ห้อ Analytik Jena AG รุ่น TOPwave

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

2.4.1.5. เมื่อตัวอย่างย่อยสมบูรณ์แล้ว นำออกมาตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นถ่ายสารละลายที่ย่อยได้ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 mL ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนจนถึงขีดวัดปริมาตร

2.4.1.6. กรองสารละลายตัวอย่างด้วยกระดาษกรองเบอร์ 6 หรือเบอร์ 42 แล้วเก็บสารละลายที่กรองแล้วลงในขวดพลาสติกที่มีฝาปิด

2.4.1.7. นำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วด้วยเครื่องอินดักทีฟลิคฟิเลพลาสมาแมสสเปกโตรมิเตอร์ในข้อ 2.2.1 โดยเทียบกับกราฟมาตรฐานของสารละลายมาตรฐานตะกั่วในข้อ 2.3.2.4 และใช้พารามิเตอร์สำหรับการทดสอบตามตารางที่ 4

ตารางที่ 4 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ตะกั่วด้วยเครื่อง ICP-MS [10]

พารามิเตอร์	รายละเอียด
Mass	207.977
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 โดยเลือกพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับการทดสอบตามตารางที่ 4 และหลังจากการปรับตั้งค่าต่าง ๆ เรียบร้อยแล้ว ค่า Intensity, Background, Oxide และ Doubly charged ion ต้องอยู่ในช่วงที่กำหนดของเครื่องมือตามตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ค่ามาตรฐานที่กำหนดของเครื่อง ICP-MS [10]

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)

วัดค่ามวลต่อประจุของสารละลายมาตรฐานตะกั่วในข้อ 2.3.2.4 จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายและค่ามวลต่อประจุ

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

ทำการทดสอบปริมาณตะกั่วในสารละลายตัวอย่างกระดาศที่ไม่มีตะกั่ว หรือมีตะกั่วปริมาณน้อย ๆ ประมาณ 1-5 เท่าของค่าขีดจำกัดการตรวจหาของเครื่องมือ (IDL) จำนวน 10 ซ้ำ ด้วยเครื่อง ICP-MS ใช้ข้อมูลขีดจำกัดการตรวจหา (LOD) มาคำนวณค่าประมาณขีดจำกัดการวัดเชิงปริมาณ (LOQ) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 10 เท่าของค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) และยืนยัน LOQ ด้วยการทดสอบปริมาณตะกั่วในสารละลายตัวอย่างกระดาศที่มีการเติมสารละลายมาตรฐานตะกั่วที่ความเข้มข้นที่ประเมินได้จากขีดจำกัดการตรวจหา หรือที่ความเข้มข้นที่สามารถพิสูจน์ความแม่นยำและความเที่ยงอยู่ในเกณฑ์การยอมรับ จำนวน 10 ซ้ำ

2.4.5. การหาค่าความเอนเอียง (Bias)

ทำการทดสอบปริมาณตะกั่วในสารละลายตัวอย่างกระดาศที่มีการเติมสารละลายมาตรฐานตะกั่วที่ความเข้มข้นต่ำ กลาง และสูง ของช่วงการใช้งานของวิธีทดสอบ จำนวนความเข้มข้นละ 10 ซ้ำ

2.4.6. การศึกษาผลกระทบจากองค์ประกอบของตัวอย่าง (Matrix effect)

ใช้ข้อมูลจากค่าความเอนเอียงในข้อ 2.4.5 มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานที่เติมกับปริมาณที่ตรวจวัดได้เฉลี่ยในตัวอย่าง

2.4.7. การหาค่าความเที่ยง (Precision)

ทำการทดสอบปริมาณตะกั่วในสารละลายตัวอย่างกระดาศที่มีการเติมสารละลายมาตรฐานตะกั่วที่ความเข้มข้นต่ำ กลาง และสูง ของช่วงของการใช้งานของวิธีทดสอบ อย่างน้อยความเข้มข้นละ 10 ซ้ำ ภายใต้เงื่อนไข Intermediate Precision Condition โดยมีการเปลี่ยนแปลงเวลาและวันที่ทดสอบ

2.4.8. ประเมินค่าความไม่แน่นอนของการวัด (Uncertainty of measurement)

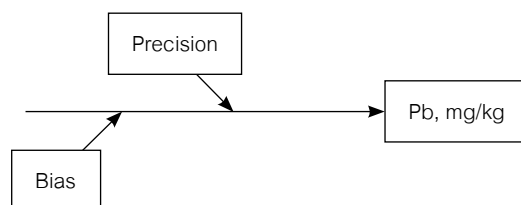
หลังจากการตรวจสอบความใช้ได้ของวิธี ข้อมูลที่ได้จากการตรวจสอบความเอนเอียง และความเที่ยง นำมาใช้ในการประมาณค่าความไม่แน่นอน โดยถือเป็นแหล่งของค่าความไม่แน่นอนที่สำคัญ ซึ่งมีขั้นตอนการประมาณค่าความไม่แน่นอนของการวัด ดังนี้

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 คำนวณค่าความไม่แน่นอนจากการทดสอบความไอนเดียว

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

จากสูตร

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

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

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

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

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

และพิจารณาผลการทดสอบว่ามีนัยสำคัญหรือไม่ ตามกรณีดังนี้

- 1) $t_{cal} < t_{crit}$ ผลการวัดไม่มีนัยสำคัญ ไม่ต้องนำค่าคืนกลับไปแก้ค่าผลการวัด แต่ยังคงนำค่าความไม่แน่นอนของค่าคืนกลับเฉลี่ยของผลการวัด ($u(\bar{R}_m)$) ไปคำนวณค่าความไม่แน่นอนของผลการทดสอบ
- 2) $t_{cal} > t_{crit}$ ผลการวัดมีนัยสำคัญให้นำค่าคืนกลับไปแก้ค่าผลการวัด 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 $u(\bar{R}_s)$

$$u(\bar{R}_s) = \text{ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าคืนกลับ}$$

ค) คำนวณค่าความไม่แน่นอนรวมของความเอนเอียง $u(R)$

จากสูตร, เมื่อกำหนดให้ $R = R_m$ และ $R_s = 1$

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

2.4.8.4. คำนวณค่าความไม่แน่นอนจากการทดสอบความเที่ยง

กรณีที่ทดสอบตัวอย่างที่มีความเข้มข้นของธาตุที่ต้องการทดสอบน้อยกว่า 5 ความเข้มข้น ผู้ทดสอบต้องใช้ดุลยพินิจพิจารณาว่าค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงกับความเข้มข้นหรือไม่ ถ้ามีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง คำนวณค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์รวม (RSD_{pool}) โดยใช้สมการ

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

ซึ่งค่า RSD_{pool} ที่คำนวณได้ คือ ค่าความไม่แน่นอนจากการทดสอบความเที่ยง ($u(P)/P$) ของผลการวัด หากค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานไม่มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงกับความเข้มข้น สามารถเลือกค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ที่มีค่ามากที่สุดเป็นค่าความไม่แน่นอนจากการทดสอบความเที่ยงของผลการวัด

2.4.8.5. ค่าความไม่แน่นอนรวม (u_c)

เมื่อได้แหล่งของความไม่แน่นอนต่างๆ 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) เพื่อระดับความเชื่อมั่น โดยทั่วไปใช้ k เท่ากับ 2 เพื่อแสดงระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

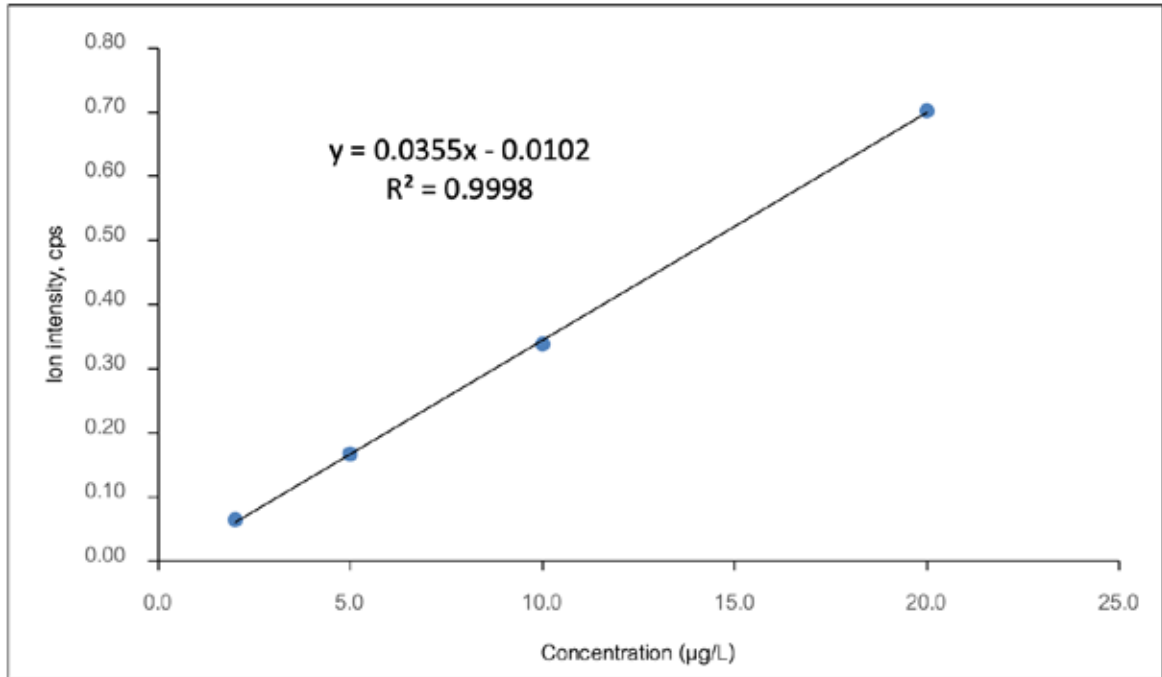
$$U = u_c \times 2$$

หลังจากได้ค่าความไม่แน่นอนของผลการวัดแล้ว ห้องปฏิบัติการต้องพิจารณาว่าค่าความไม่แน่นอนนี้เป็นไปตามวัตถุประสงค์การใช้งานหรือไม่

3. ผลและวิจารณ์ (Results and discussion)

3.1. ช่วงการใช้งานของเครื่องมือ (Instrument working range)

จากการศึกษาการหาปริมาณตะกั่วโดยใช้กราฟมาตรฐานที่สร้างจากสารละลายมาตรฐาน พบว่ามีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination, R^2) เข้าใกล้ 1 ดังรูปที่ 2 แสดงให้เห็นว่าช่วงการใช้งานของเครื่องมือ มีค่าอยู่ในช่วง 2.0–20.0 µg/L และขีดจำกัดการตรวจหาของเครื่องมือ (Instrument of detection, IDL) ที่คำนวณจาก 3 เท่าของค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลการวัด Calibration blank (10 ซ้ำ) เท่ากับ 0.020 µg/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 โดยทำการทดสอบสารละลายตัวอย่างที่ไม่มีส่วนประกอบของธาตุตะกั่ว (Sample blank) หรือมีตะกั่วปริมาณน้อย ๆ ประมาณ 1–5 เท่าของค่าขีดจำกัดการตรวจหาของเครื่องมือ (IDL) จำนวน 10 ซ้ำ แล้วประเมินขีดจำกัดการตรวจหา (LOD) และ ขีดจำกัดการวัดปริมาณ (LOQ) ได้จากสมการดังต่อไปนี้

กรณีที่ 1 ทดสอบ Sample blank

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

$$\text{ขีดจำกัดการตรวจวัดปริมาณ, LOQ} = \bar{X}_{\text{sample blank}} + 10 \text{ SD}$$

กรณีที่ 2 ทดสอบตัวอย่างที่มีปริมาณตะกั่วประมาณ 1-5 เท่าของค่า IDL

$$\text{ขีดจำกัดการตรวจหา, LOD} = 3 \text{ SD}$$

$$\text{ขีดจำกัดการตรวจวัดปริมาณ, LOQ} = 10 \text{ SD}$$

เมื่อ $\bar{X}$ คือ ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของตะกั่วที่ตรวจวัดได้

SD คือ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ $n = 10$

พบว่าขีดจำกัดการตรวจหาและค่าประมาณขีดจำกัดการวัดปริมาณของตะกั่วมีค่าเท่ากับ 0.043 mg/kg และ 0.14 mg/kg ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ขีดจำกัดการตรวจหาและค่าประมาณขีดจำกัดการวัดปริมาณตะกั่ว

รายการ	ปริมาณที่ตรวจวัดได้เฉลี่ยที่ปรับแก้, µg/L	ปริมาณที่ตรวจวัดได้เฉลี่ย, mg/kg
Sample blank ($\bar{X}_{\text{sample blank}}$)	-	-
SD	0.0715	0.0142
3SD (LOD)	0.215	0.043
10SD (LOQ)	0.72	0.14

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

3.3. การยืนยันขีดจำกัดการวัดปริมาณ (Limit of quantitation, LOQ)

3.3.1. ตรวจยืนยัน LOQ ที่ความเข้มข้น 0.20 mg/kg (1.0 µg/L) ซึ่งเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับค่าที่ประเมินได้จากค่าขีดจำกัดการตรวจหา

พบว่าร้อยละค่าคืนกลับเท่ากับ 124.4 และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์เท่ากับ 7.3 ดังนั้นผลการตรวจยืนยัน LOQ ที่ความเข้มข้น 0.20 mg/kg ให้ค่าความแม่นยำไม่อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับ (80–110%) ส่วนความเที่ยงอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ (น้อยกว่า 10%) [11]

3.3.2. เลือกพิสูจน์ความแม่นยำและความเที่ยงที่ความเข้มข้น 0.40 mg/kg (2.0 µg/L)

พบว่าร้อยละค่าคืนกลับเท่ากับ 103.2 และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์เท่ากับ 6.8 อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ดังนั้นขีดจำกัดการวัดปริมาณตะกั่วเท่ากับ 0.40 mg/kg ที่ให้ผลการวัดถูกต้องและมีความเที่ยงที่สามารถรายงานผลเป็นตัวเลขได้

3.4. การศึกษาความเอนเอียง (Bias)

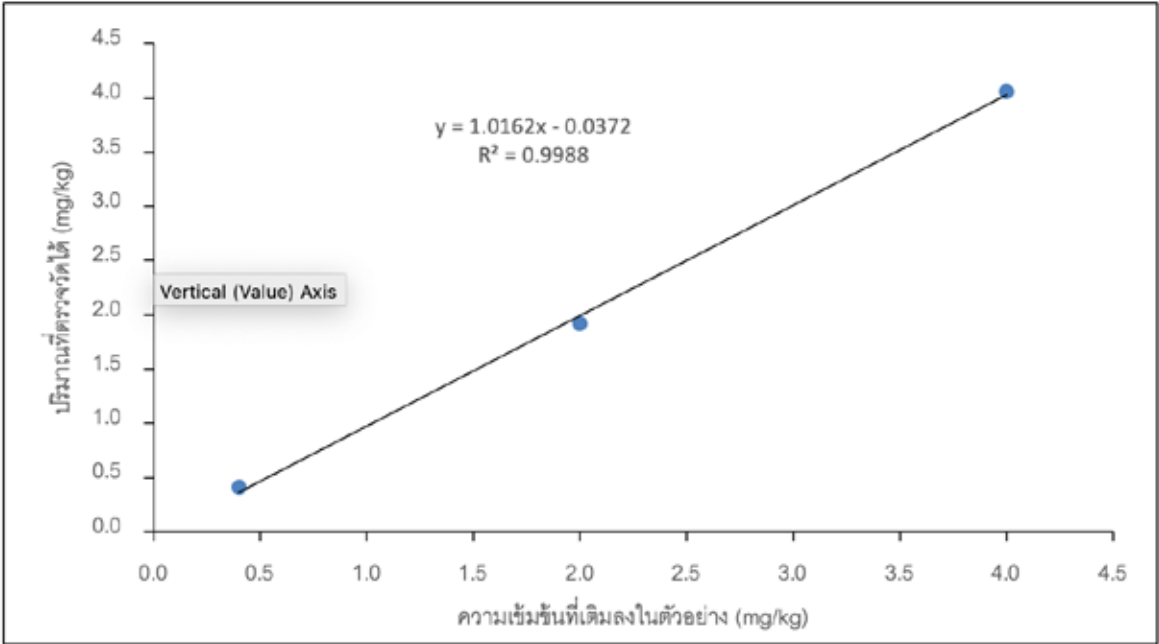
ความเอนเอียง คือผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของค่าที่วัดได้กับค่าจริงหรือค่าอ้างอิง ซึ่งค่าความเอนเอียงนี้เป็นค่าที่ใช้ประเมินความแม่นยำของผลการวัดจากการเติมสารละลายมาตรฐานตะกั่วลงไปในตัวอย่่างกระดาศที่ความเข้มข้น 0.40 mg/kg (2.0 µg/L, ความเข้มข้นต่ำ) 2.0 mg/kg (10.0 µg/L, ความเข้มข้นกลาง) และ 4.0 mg/kg (20.0 µg/L, ความเข้มข้นสูง) ของช่วงการใช้งานของวิธี ภายใต้การวิเคราะห์ห้ซ้ำแบบ Repeatability แล้วสรุปความเอนเอียงรวมจากผลการคำนวณค่าคืนกลับ พบว่าร้อยละค่าคืนกลับอยู่ในช่วง 97–103.2% แสดงดังตารางที่ 7 สรุปได้ว่าร้อยละค่าคืนกลับที่ประเมินจากการเติมสารละลายมาตรฐานตะกั่วที่ความเข้มข้น 10 µg/L และ 20 µg/L ลงในตัวอย่างกระดาศสัมผัสอาหารที่ผลิตจากกระดาศคราฟท์อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับ คือ 90–103% (ที่ความเข้มข้น 15 µg/L) ส่วนร้อยละค่าคืนกลับที่ประเมินจากการเติมสารละลายมาตรฐานตะกั่วที่ความเข้มข้น 2.0 µg/L ค่าคืนกลับไม่อยู่ในเกณฑ์ดังกล่าว เนื่องจากความคลาดเคลื่อนเชิงระบบที่ความเข้มข้นต่ำมีค่ามากกว่าที่ความเข้มข้นสูง

ตารางที่ 7 ร้อยละค่าคืนกลับที่ความเข้มข้นต่ำ กลาง สูง ที่ครอบคลุมช่วงการใช้งานของวิธีทดสอบ

Spiked sample, µg/L	ค่าอ้างอิง, mg/kg	ปริมาณที่ตรวจวัดได้เฉลี่ย, mg/kg	ค่าคืนกลับเฉลี่ย, %	SD	% RSD
2.0 (ค่าต่ำ)	0.40	0.413	103.2	0.028	6.8
10.0 (ค่ากลาง)	2.00	1.940	97.0	0.051	2.6
20.0 (ค่าสูง)	4.00	4.099	102.5	0.11	2.7
เกณฑ์การยอมรับที่ความเข้มข้น 15 µg/L [3]		-	97-103		

3.5. ผลกระทบจากองค์ประกอบของตัวอย่าง (Matrix effect)

เป็นการศึกษาผลกระทบจากองค์ประกอบของตัวอย่างกระดาด โดยนำข้อมูลจากค่าความโอนเอียงมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานตะกั่วที่เติมลงในตัวอย่างกับปริมาณที่ตรวจวัดได้เฉลี่ยของตัวอย่าง แสดงดังรูปที่ 3 ความชันจะต้องไม่แตกต่างจาก 1 อย่างมีนัยสำคัญ แสดงว่าไม่มีผลกระทบจากองค์ประกอบของตัวอย่าง



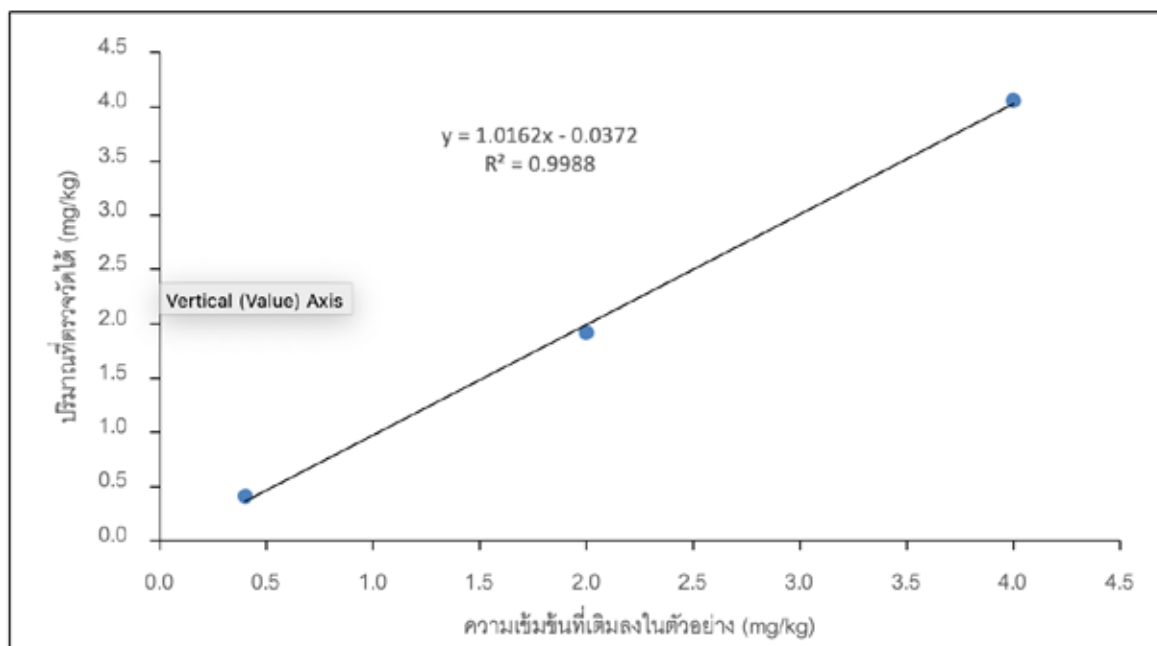
รูปที่ 3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นและปริมาณที่ตรวจวัดได้เฉลี่ยในสารละลายตัวอย่าง

3.6. ความเที่ยง (Precision)

ความเที่ยง คือความใกล้เคียงของผลทดสอบซ้ำของตัวอย่างเดียวกัน ในกรณีนี้ทดสอบสารละลายที่มีการเติมสารละลายมาตรฐานตะกั่ว ที่ความเข้มข้นต่ำ กลาง และสูง โดยมีการเปลี่ยนแปลงเวลาและวันที่ ซึ่งความเที่ยงของผลการวัดประเมินจากค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (RSD) แสดงดังตารางที่ 8 และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน แสดงดังรูปที่ 4

ตารางที่ 8 ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ที่ความเข้มข้นต่ำ กลาง สูง ที่ครอบคลุมช่วงการใช้งานของวิธีทดสอบ

Spiked sample, µg/L	ค่าอ้างอิง, mg/kg	ปริมาณที่ตรวจวัดได้เฉลี่ย, mg/kg	SD, mg/kg	%RSD
2.0 (ค่าต่ำ)	0.40	0.406	0.0382	9.4
10.0 (ค่ากลาง)	2.00	2.034	0.106	5.2
20.0 (ค่าสูง)	4.00	4.154	0.143	3.4
เกณฑ์การยอมรับ [10]		-	-	≤10
จำนวนการวิเคราะห์ซ้ำ n = 10		-	-	-



รูปที่ 4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

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, $u(R)$	0.037
1.1	ค่าความไม่แน่นอนของค่าคืนกลับเฉลี่ยของผลการวัด, ($u(\bar{R}_m)$)	0.00804
	ค่าความไม่แน่นอนของค่าคืนกลับเฉลี่ยของผลการวัด, ($u(\bar{R}_m)$)	0.0170
	ปริมาณเฉลี่ยที่ตรวจวัดได้ในตัวอย่าง ($\bar{m}_{obs}$), mg/kg	1.940

ตารางที่ 9 ค่าความไม่แน่นอนขยายที่คำนวณได้จากค่าความไม่แน่นอนเป้าหมายที่กำหนดไว้ (ต่อ)

ลำดับ	แหล่งของค่าความไม่แน่นอน	ค่าที่ได้
	ปริมาณที่เติมลงในตัวอย่าง (m_{spike}), mg/kg	2.0
	ค่าคืนกลับเฉลี่ยของปริมาณที่ตรวจวัดได้ ($\bar{R}_m$)	0.970
	ความแปรปรวนของปริมาณที่ตรวจวัดได้ ($S^2_{m_{\text{spike}}}$), mg^2/kg^2	0.0025
	จำนวนของการวิเคราะห์ซ้ำ (n)	10
	$u(m_{\text{spike}})/m_{\text{spike}}$	0.0015
	t_{cal}	3.73
	$t_{\text{crit}}(0.025,9)$	2.226
	1.2 ค่าความไม่แน่นอนของค่าคืนกลับเฉลี่ยของผลการวัดที่ครอบคลุมช่วงการใช้งาน $u(\bar{R}_m) = \text{SD}$	0.0340
2	ความเที่ยง, $u(P)/P = \text{RSD}_{\text{pool}}$	0.065
3	ความไม่แน่นอนรวม, u_c , mg/kg	0.15
4	ความไม่แน่นอนขยาย (U) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($k = 2$), mg/kg	0.30
5	ความไม่แน่นอนขยายคิดเป็นร้อยละ	15.0

4. สรุป (Conclusion)

การศึกษานี้มุ่งเน้นพัฒนาวิธีทดสอบหาปริมาณตะกั่วที่ปนเปื้อนในกระดาษสัมผัสอาหารที่ผลิตจากกระดาษคราฟท์โดยย่อตัวอย่างด้วยไมโครเวฟ เพื่อประเมินคุณภาพผลิตภัณฑ์กระดาษที่ใช้สัมผัสอาหารให้เป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม และให้เป็นวิธีที่ให้ผลการวัดที่มีความแม่นยำ ความเที่ยง รวดเร็ว ประหยัดเวลาและสารเคมี เป็นไปตามเกณฑ์การยอมรับตามวิธีมาตรฐาน 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 โดยทำการตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีทดสอบ พบค่าขีดจำกัดการตรวจหา (LOD) และค่าขีดจำกัดการวัดปริมาณ (LOQ) เท่ากับ 0.043 mg/kg และ 0.40 mg/kg ตามลำดับ ช่วงการใช้งานของวิธีทดสอบอยู่ในช่วง 2.0–20.0 $\mu\text{g/L}$ ร้อยละค่าคืนกลับอยู่ในช่วง 97.0–103.2 ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์อยู่ในช่วงร้อยละ 3.4–9.4 และค่าความไม่แน่นอนขยายคิดเป็นร้อยละ ± 15.0 ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เป็นไปตามเกณฑ์การยอมรับที่วิธีมาตรฐาน BS EN 12498 กำหนด และจากการศึกษาผลกระทบจากองค์ประกอบของตัวอย่าง (Matrix effect) จากความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่เติมและปริมาณที่ตรวจวัดได้เฉลี่ยในสารละลายตัวอย่างกระดาษ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination, R^2) เข้าใกล้ 1 แสดงว่าไม่มีผลกระทบจากองค์ประกอบของตัวอย่าง ดังนั้นวิธีที่พัฒนาขึ้นสามารถนำมาใช้เทียบเคียงได้กับวิธีมาตรฐาน BS EN 12498 ที่มีข้อกำหนดในเรื่องคุณสมบัติของตัวอย่างที่เป็นตัวดูดซับ และมีความเหมาะสมกับการใช้งานตามวัตถุประสงค์

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 hot water extract. BS EN 647:1994. London: BSI; 1994.
- [5] 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.
- [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

คำแนะนำในการจัดทำต้นฉบับ วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ กรมวิทยาศาสตร์บริการ Bulletin of Applied Sciences

บทความที่ส่งตีพิมพ์จะต้องไม่เคยตีพิมพ์หรืออยู่ในระหว่างการพิจารณาเพื่อตีพิมพ์ในวารสารอื่น บทความที่เสนอมาเพื่อตีพิมพ์อาจเขียนเป็นภาษาไทยหรือภาษาอังกฤษก็ได้ แต่บทความต้องมีทั้งสองภาษา ทั้งนี้บทความทุกเรื่องจะได้รับการพิจารณาตรวจแก้ไขจากผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาที่เกี่ยวข้อง และกองบรรณาธิการขอสงวนสิทธิ์ในการตรวจแก้ไขต้นฉบับ และพิจารณาตีพิมพ์ตามลำดับก่อนหลัง

ความรับผิดชอบ

บทความที่ตีพิมพ์ในวารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ กรมวิทยาศาสตร์บริการ ถือเป็นผลงานทางวิชาการ และเป็นความเห็นส่วนตัวของผู้เขียน ไม่ใช่ความเห็นของกรมวิทยาศาสตร์บริการ หรือกองบรรณาธิการ ผู้เขียนต้องรับผิดชอบต่อบทความของตน และบทความที่ตีพิมพ์ในเล่มนี้ไม่เคยพิมพ์ในวารสารใดมาก่อน และจะไม่นำไปเพื่อพิจารณาตีพิมพ์ในวารสารอื่นภายใน 60 วัน

การเตรียมต้นฉบับและการส่งต้นฉบับ

1) บทความวิจัย (Research article) ประกอบด้วยหัวข้อ ดังนี้

- **ชื่อเรื่อง** : ชื่อเรื่องต้องมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ตัวอักษร Cordia New ขนาด 18 ตัวหนา จัดวางข้อความชื่อเรื่องตรงกึ่งกลางหน้ากระดาษ โดยชื่อเรื่องภาษาอังกฤษเฉพาะคำขึ้นต้น ให้พิมพ์ตัวใหญ่
- **ชื่อผู้วิจัย ผู้วิจัยร่วม** : ชื่อผู้วิจัย ผู้วิจัยร่วม ต้องมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ตัวอักษร Cordia New ขนาด 12 ตัวปกติ จัดวางข้อความชื่อผู้วิจัย ผู้วิจัยร่วมกึ่งกลางหน้ากระดาษ ใช้เลข 1, 2, 3.... โดยยกกำลังแสดงตรงชื่อ และเป็นเลขเดียวกันเพื่อแสดงที่อยู่ และ e-mail address

ตัวอย่าง

จารวี เล็กสุศรี¹, กอพงศ์ 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

- **บทคัดย่อ (Abstract)** : บทคัดย่อต้องมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ตัวอักษร Cordia New ขนาด 14 ตัวปกติ เนื้อหาในคัดย่อ ควรระบุวัตถุประสงค์ ผลการวิจัย และบทสรุปโดยย่อ
- **คำสำคัญ (Keywords)** : คำสำคัญต้องมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ระบุคำสำคัญหรือวลีสั้น ๆ จำนวน 3-5 คำ คำที่ 1, คำที่ 2, คำที่ 3 ตัวอักษร Cordia New ขนาด 12 ตัวปกติ
- **เนื้อเรื่อง** แบ่งเป็นส่วนต่าง ๆ ดังนี้

1. **บทนำ (Introduction)** : หัวข้อบทนำ ตัวอักษร Cordia New ขนาด 16 ตัวหนา จัดชิดขอบด้านซ้าย หัวข้อย่อย ตัวอักษร Cordia New ขนาด 14 ตัวหนา เนื้อหา ตัวอักษร Cordia New ขนาด 14 ตัวปกติ
2. **วิธีการวิจัย (Experimental methods)** : หัวข้อวิธีการวิจัย ตัวอักษร Cordia New ขนาด 16 ตัวหนา จัดชิดขอบด้านซ้าย หัวข้อย่อย ตัวอักษร Cordia New ขนาด 14 ตัวหนา เนื้อหา ตัวอักษร Cordia New ขนาด 14 ตัวปกติ
3. **ผลและวิจารณ์ (Results and discussion)** : หัวข้อผลและวิจารณ์ ตัวอักษร Cordia New ขนาด 16 ตัวหนา จัดชิดขอบด้านซ้าย หัวข้อย่อย ตัวอักษร Cordia New ขนาด 14 ตัวหนา เนื้อหา ตัวอักษร Cordia New ขนาด 14 ตัวปกติ
4. **สรุป (Conclusion)** : หัวข้อสรุป ตัวอักษร Cordia New ขนาด 16 ตัวหนา จัดชิดขอบด้านซ้าย เนื้อหา ตัวอักษร Cordia New ขนาด 14 ตัวปกติ
5. **กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)** : หัวข้อกิตติกรรมประกาศ ตัวอักษร Cordia New ขนาด 16 ตัวหนา จัดชิดขอบด้านซ้าย เนื้อหา ตัวอักษร Cordia New ขนาด 14 ตัวปกติ
6. **เอกสารอ้างอิง (References)** : การเขียนเอกสารอ้างอิงให้ใช้ระบบเรียงตามตัวเลข ใส่หมายเลขในวงเล็บเหลี่ยม [] เรียงตามลำดับการอ้างอิงในเรื่อง เอกสารอ้างอิงทุกฉบับจะต้องมีการอ้างอิงหรือกล่าวถึงในบทความกรณีที่มีการอ้างอิงมากกว่า 1 รายการ ให้จัดเรียงดังนี้ รายการลำดับต่อเนื่องกันให้ใช้เครื่องหมาย - คั่น เช่น [1-3] รายการลำดับไม่ต่อเนื่องกันให้ใช้เครื่องหมาย , คั่น เช่น [1,3,5] รายการมีทั้งที่ลำดับต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่องกันให้ใช้เครื่องหมาย - และ , ร่วมกัน เช่น [1-2,4]
- **ตาราง (Table) และรูป (Figure)** : ตัวอักษร Cordia New ขนาด 12 ตัวปกติ
 1. ตาราง : ให้ระบุลำดับที่ของตาราง หัวตารางให้จัดชิดขอบด้านซ้าย ชื่อตารางให้อยู่ด้านบนบนของตาราง
 2. รูป : ให้ระบุลำดับที่ของรูป คำบรรยายรูปภาพให้อยู่ใต้รูปภาพ และจัดกึ่งกลางคอลัมน์ กรณีเป็นรูปถ่ายความละเอียดของรูปไม่ต่ำกว่า 300 dpi

2) บทความวิชาการ (Academic article) ประกอบด้วยหัวข้อ ดังนี้

- **ชื่อเรื่อง** : ชื่อเรื่องต้องมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ตัวอักษร Cordia New ขนาด 18 ตัวหนา จัดวางข้อความชื่อเรื่องตรงกึ่งกลางหน้ากระดาษ โดยชื่อเรื่องภาษาอังกฤษเฉพาะคำขึ้นต้น ให้พิมพ์ตัวใหญ่
- **ชื่อผู้วิจัย ผู้วิจัยร่วม** : ชื่อผู้วิจัย ผู้วิจัยร่วม ต้องมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ตัวอักษร Cordia New ขนาด 12 ตัวปกติ จัดวางข้อความชื่อผู้วิจัย ผู้วิจัยร่วมกึ่งกลางหน้ากระดาษ ใช้เลข 1, 2, 3... โดยยกกำลังแสดงตรงชื่อ และเป็นเลขเดียวกันเพื่อแสดงที่อยู่ และ e-mail address

ตัวอย่าง

จารวี เล็กสุขศรี¹, ก่อพงศ์ หงษ์ศรี¹,ธีรัตน์ 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

- **บทคัดย่อ (Abstract)** : บทคัดย่อต้องมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ตัวอักษร Cordia New ขนาด 14 ตัวปกติ เนื้อหาในคัดย่อ ควรระบุวัตถุประสงค์ ผลการวิจัย และบทสรุปโดยย่อ

- **คำสำคัญ (Keywords):** คำสำคัญต้องมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ระบุคำสำคัญหรือวลีสั้น ๆ จำนวน 3-5 คำ คำที่ 1, คำที่ 2, คำที่ 3 ตัวอักษร Cordia New ขนาด 12 ตัวปกติ
- **เนื้อเรื่อง** แบ่งเป็นส่วนต่าง ๆ ดังนี้
 1. **บทนำ (Introduction):** หัวข้อบทนำ ตัวอักษร Cordia New ขนาด 16 ตัวหนา จัดชิดขอบด้านซ้าย หัวข้อย่อย ตัวอักษร Cordia New ขนาด 14 ตัวหนา เนื้อหา ตัวอักษร Cordia New ขนาด 14 ตัวปกติ
 2. **เนื้อหา :** นำเสนอตามหัวข้อหรือประเด็นที่ผู้นิพนธ์กำหนดเพื่อแสดงรายละเอียดของเรื่อง
 3. **สรุป (Conclusion):** กล่าวถึงสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ ของเรื่องที่เขียนเพื่อให้ผู้อ่านเข้าใจ
 4. **กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement):** กล่าวถึงบุคคล หรือหน่วยงานที่ให้การสนับสนุนการศึกษา
 5. **เอกสารอ้างอิง (References):** ต้องอ้างอิงในระบบ Vancouver ใช้ระบบเรียงตามตัวเลข โดยใส่หมายเลขในวงเล็บเหลี่ยม [] เรียงตามลำดับการอ้างอิงในเรื่อง เอกสารอ้างอิงทุกฉบับจะต้องมีการอ้างอิงหรือกล่าวถึงในบทความ

การเขียนเอกสารอ้างอิงตามระบบ Vancouver

รูปแบบการเขียนเอกสารอ้างอิงแบบ Vancouver ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ

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

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

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

รูปแบบการเขียนเอกสารอ้างอิงประเภทต่าง ๆ

หนังสือ (Book)

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

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

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

ตัวอย่าง

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

บทหนึ่งในหนังสือ (Chapter in book)

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

ตัวอย่าง

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

บทความวารสาร (Journal article)

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

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

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

ตัวอย่าง

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

วิทยานิพนธ์ (Thesis/Dissertation)

ประเภท/ระดับปริญญา เช่น วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต dissertation thesis ฯลฯ

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

ตัวอย่าง

- [1] Kaplan SJ. Post-hospital home health care: the elderly's access and utilization [dissertation]. St. Louis, MO: Washington University; 1995.
[2] Tesema BH. Tannery solid waste generation rate and preparation of leather board from chrome shaving waste and plant fibers "a wealth from waste approach for leather industry" [thesis]. Addis Ababa: Ethiopia; 2018.
[3] ประเสริฐ ประภานภสินธุ์. เปรียบเทียบเทคนิคการสกัดสารแคปไซซินในพริกพันธุ์ต่าง ๆ [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต]. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์; 2544.
[4] นิจจรา พูลธรรม. เค้าโครงความเผ็ดและกลิ่นของพริกแห้ง [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรดุษฎีบัณฑิต]. สงขลา: มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์; 2557.

สิทธิบัตร (Patent)

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

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

ตัวอย่าง

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

มาตรฐาน (Standards)

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

ตัวอย่าง

- [1] British Standard Institution (BSI). Foodstuffs-determination of sucralose-high performance liquid chromatographic method. BS EN 16155:2012. London: 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: ISO; 2019.
- [3] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ.). มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม วิธีทดสอบตะกั่วและแคดเมียมที่ละลายจากภาชนะเซรามิก ภาชนะเซรามิกแก้ว และภาชนะแก้วที่ใช้กับอาหาร. มอก. 32-2546. กรุงเทพฯ: สมอ.; 2546.

กฎหมายที่ประกาศในราชกิจจานุเบกษา

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

ตัวอย่าง

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

เอกสารอิเล็กทรอนิกส์ (รูปแบบทั่วไป)

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

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

หนังสืออิเล็กทรอนิกส์ (E-Book)

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

ตัวอย่าง

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

บทความวารสารอิเล็กทรอนิกส์ (e-Journal)

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

ตัวอย่าง

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

บทความวารสารที่มีหมายเลข Digital Object Identifier (DOI)

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

ตัวอย่าง

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

ข้อแนะนำการส่งบทความ

รายการตรวจสอบก่อนส่งบทความ

ในขั้นตอนการส่งบทความ ผู้นิพนธ์ต้องตรวจสอบและปฏิบัติตามข้อกำหนดรายการตรวจสอบการส่งทุกข้อ ดังต่อไปนี้ และบทความอาจถูกส่งคืนให้กับผู้แต่งกรณีที่ไม่ปฏิบัติตามข้อกำหนดทั้งหมด

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

นโยบายส่วนบุคคล

ชื่อและที่อยู่อีเมล หรือข้อมูลส่วนบุคคล ที่กรอกในเว็บไซต์วารสารนี้จะใช้สำหรับวัตถุประสงค์ที่ระบุไว้ในงานวารสารเท่านั้นและจะไม่เปิดเผยเพื่อวัตถุประสงค์ในกิจกรรมอื่น ๆ หรือให้กับบุคคลหรือหน่วยงานอื่นใดทราบ

การคุ้มครองข้อมูลส่วนบุคคล

1. วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ กรมวิทยาศาสตร์บริการ จะเคร่งครัดกรณีบทความมีการคัดลอก การนำเสนอรูปภาพ หรือการนำผลงานผู้อื่นมาเป็นส่วนหนึ่งของบทความเพื่อตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสาร

2. วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ กรมวิทยาศาสตร์บริการ จะไม่เปิดเผยรายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ ให้แก่ผู้นิพนธ์หรือบุคคลอื่น

กรมวิทยาศาสตร์บริการให้ความสำคัญกับการคุ้มครองข้อมูลส่วนบุคคลอย่างเคร่งครัดและปฏิบัติตามกฎหมาย และข้อบังคับทั้งหมดเกี่ยวกับการปกป้องข้อมูลส่วนบุคคลของท่าน 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 passachon@dss.go.th
- Authorship list should be honestly reflected their intellectual contributions to the work.
- Provide authors, name and mobile phone number in "Comment for Editor" and save. For inquiries, please also send to "Comment for Editor".

Author guidelines

Manuscript preparation and submission

For Research and Academic article

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

Example

Pranee Junlar^{1*}, Nithiwach Nawaukkaratharnant²

¹Division of Engineering Materials, Department of Science Service

²Metallurgy and Materials Science Research Institute, Chulalongkorn University

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

Research article

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

Academic article

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

Copyright notice

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

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

Privacy statement

Personal data protection

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

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

Department of Science Service is aware of Personal Data Protection Act (PDPA) requirements and comply with PDPA law. Information about policy and personal data management guideline, please visit <https://ph03.tci-thaijo.org/index.php/BAS/about/privacy>

ดรราชনীคำสำคัญ

	หน้า		หน้า
ก		น	
กระดาดขี้สับผัสดอาหาร	75	นครราชสีมา	61
การกลั่นแสงอาทิตย์	61	น้ำระบายทิ้งเข้มข้น	61
การดูดซับ	35		
การนำน้ำกลับคืนมา	61	ป	
การบำบัด	61	แป้งข้าวทับทิมชุมแพ	26
การย่อยด้วยไมโครเวฟ	75	แป้งมันสำปะหลัง	26
การแยกเกลือจากน้ำ	61		
การสลายตัวทางชีวภาพ	49	อ	
		ออสโมซิส	12
ข		อินดักทีฟลีคัพเพิลพลาสมาแมสสเปกโทรเมตรี	75
ข้าวเกรียบ	26	ไออีซีดี 301A	49
ไข่เค็ม	12		
ค			
คุณสมบัติทางเคมีกายภาพ	12		
เคมีภัณฑ์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม	49		
โคลิสติน	35		
ช			
โซเดียมเบนโซเอต	49		
ด			
ตะกั่ว	75		
ถ			
ถ่านกัมมันต์	35		
ท			
เทคนิคชุดชีวิต	12		

Keyword index

	Page		Page
A		O	
Activated carbon	36	OECD 301A	13
Adsorption	36	Osmosis	50
B		P	
Biodegradation	50	Paper for food contact	76
Brine water	62	Physico-chemical properties	13
C		S	
Colistin	36	Salted egg	13
Cracker	27	Sodium benzoate	50
D		Solar still	62
Desalination	62	Sous-vide technique	13
E		T	
Environmentally friendly chemicals	50	Tapioca flour	27
I		Treatment	62
Inductively coupled plasma mass spectrometry	76	Tubtim Chumphae rice flour	27
L		W	
Lead	76	Water recovery	62
M			
Microwave digestion	76		
N			
Nakhon Ratchasima	62		

ดรรชนีผู้แต่ง

	หน้า		หน้า
ข		พ	
ขนิษฐา อินทร์ประสิทธิ์	12	พรประภา ทองใบ	26
		พิทักษ์ งามเมืองตั้ง	35
จ		พีรกานต์ บรรเจิดกิจ	35
จันทนา พันธุ์พรวาน	49		
จิตวิไล เวฬุณารักษ์	75	ม	
จิราภรณ์ บุราคร	26	มนทกานต์ เอี่ยมแก้ว	26
		มีรันตี ดีเจริญ	49
ช			
ชญาณิลห์ หาญวลินโรจน์	35	ว	
ชาญชัย คหาปนะ	49	วรุณรัตน์ บุรณะกุล	75
		วิฑูรย์ เยื่อใย	49
ณ		วีรภัทร รามณี	75
ณัฐพร พิมพะ	35	วีระ สอนโสดง	75
ณัฐชา ศิริวาริน	26		
		ศ	
ฉ		ศิริรัตน์ ตั้งสถิตพร	49
ฉนวัฒน์ ศิริพิทักษ์โยธิน	12		
ฉัญฉัย วงษ์สุวรรณ	12	ส	
		สรัลภาค เชื้อสุวรรณ	61
น		สินีนาง ไทบุญรอด	35
นพวรรณ สระแสงตา	49	สุทธยา ชื่นวัฒนา	12
นิตยาพร สมภักดิ์	49	เสาวลักษณ์ เฉลียวเลิศอำพล	35
นริศน์ ภูทัดหมาก	61		
นุจรินทร์ พลหงษ์	75	ห	
เนตรศรีรินทร์ ฤกษ์วงศ์	75	หทัยรัศมี เตชะปัญญารักษ์	61
ป		อ	
ปรานต์ ปิ่นทอง	26	อณัฐ รัสมะพันธ์	26
ปัทมา สุภาพล	12	อัญชนา พัฒนสุพงษ์	49
		อัครจรรย์ สมัตตะ	35
		อารีรัตน์ ชณะรัตน์	35
		เอกนรินทร์ ธนาบุญวงศ์	35

Author index

	Page		Page
A		Nootjarin Phonhong	75
Anchana Pattanasupong	49	Nopphawan Srasaengta	49
Anurat Rammaphan	26	Nuttaporn Pimpha	35
Areerat Kanarat	35		
Attajaree Smata	35	P	
		Pattama Supaphon	12
C		Peerakarn Banjerdki	35
Chanchai Kahapana	49	Pitak Ngammuangtueng	35
Chayanin Hanwarinroj	35	Pornprapa Tongbai	26
		Pran Pinthong	26
E		S	
Eknarin Thanayupong	35	Saowaluk Chaleawler-umpon	35
		Saranbhak Chuersuwan	61
H		Sineenat Thaiboonrod	35
Hathairath Techapanyarak	61	Sirorat Tungsatitporn	49
		Sutachaya Chuenwatthana	12
J		T	
Jantana Panpran	49	Thanawat Siriphithakyothin	12
Jiraporn Burakorn	26	Thanwalai Wongsawan	12
Jitwilai Waluvanarak	75		
K		V	
Khanittha Inprasit	12	Veerapat Ramanee	75
		W	
M		Warunrat Buranakul	75
Mirantee Deecharern	49	Weera Suanthaisong	75
Montakan Aimkaew	26	Witthawat Yueayai	49
N			
Nattacha Siriwarin	26		
Netsirin Gissawong	75		
Nidtayaporn Sompakdee	49		
Nirat Phutadmark	61		

[illegible]

This image shows a blank sheet of white paper with ten horizontal dashed lines spaced evenly apart, typical of primary-ruled notebook paper. The lines are light gray and extend across the full width of the page. There are no margins, text, or other markings on the paper.

[illegible]

[illegible]

[illegible]

[illegible]

[illegible]

[illegible]

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



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