



วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์
กรมวิทยาศาสตร์บริการ

BULLETIN OF APPLIED SCIENCES



ปีที่ 14 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม – ธันวาคม 2568

Vol. 14 No. 2 July - December 2025

ISSN 2822-1532 (Print)

ISSN 2822-1540 (Online)





**วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์
กรมวิทยาศาสตร์บริการ
BULLETIN OF APPLIED SCIENCES**

ปีที่ 14 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม - ธันวาคม 2568

Vol. 14 No. 2 July - December 2025

วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ กรมวิทยาศาสตร์บริการ

Bulletin of Applied Sciences

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

ปีที่ 14 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม – ธันวาคม 2568, Vol. 14 No. 2 July - December 2025

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

วัตถุประสงค์

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

เจ้าของ

กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม

นโยบายการจัดพิมพ์

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

บรรณาธิการวิชาการ

ดร. ภูวดิ ตูจินดา

ผู้อำนวยการสถาบันเทคโนโลยีดิจิทัลวิทยาศาสตร์บริการ
กรมวิทยาศาสตร์บริการ

บรรณาธิการจัดการ

นางสาวอุดมลักษณ์ เวียนงาม

ผู้อำนวยการหอสมุดวิทยาศาสตร์ ดร.ตัว ลพานุกรม
สถาบันเทคโนโลยีดิจิทัลวิทยาศาสตร์บริการ
กรมวิทยาศาสตร์บริการ

กองบรรณาธิการ

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

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
สมาคมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอาหารแห่งประเทศไทย
(FoSTAT)

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

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

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

ดร. ลดา พันธุ์สุพมธนา
 ดร. วราวุฒิ ศุภมิตรมงคล
 ดร. สัญชัย ยอดมณี
 ดร. อองอาจ ธเนศนิตย
 ดร. อนุพงษ์ จูมแพง
 นายชาติรี วงษ์แก้ว
 นายวีระ ตูลาสมบัติ
 ดร. จิรวัฒน์ สลุดอยู่
 ดร. จิราภรณ์ ทรัพย์ประไพ
 ดร. จิโรจ ไชยสาร
 ดร. วรพล นันสุ
 ดร. ศิรินาถ บุญโพธิ์

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

ฝ่ายบริหารจัดการ

นางสาวจอย ผิวสะอาด
 นางสาวอรัญพร วายุภักตร์
 นางสาวทิพย์วาทิ กรรัมย์

กรมวิทยาศาสตร์บริการ
 กรมวิทยาศาสตร์บริการ
 กรมวิทยาศาสตร์บริการ

ฝ่ายเผยแพร่ประชาสัมพันธ์

นายอภิวัฒน์ ช้างรบ
 นางสาวณิชา จันทร์ขอนแก่น

กรมวิทยาศาสตร์บริการ
 กรมวิทยาศาสตร์บริการ

การจัดพิมพ์และเผยแพร่

จัดพิมพ์ปีละ 2 ฉบับ กำหนดออกเผยแพร่เดือน มกราคม - มิถุนายน และ กรกฎาคม - ธันวาคม

จำนวนพิมพ์

150 เล่ม

ค่าธรรมเนียมการตีพิมพ์

ไม่มีค่าใช้จ่ายสำหรับการตีพิมพ์ในวารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ กรมวิทยาศาสตร์บริการ

สำนักงานวารสาร

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

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

พิมพ์ที่

บริษัท ชัคเซสส์บลิตเคชั่น จำกัด

34 ซอยลาซาล 22 ถนนสุขุมวิท 105 แขวงบางนา เขตบางนา กรุงเทพมหานคร 10260

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

บทบรรณาธิการ

วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ กรมวิทยาศาสตร์บริการ (Bulletin of Applied Sciences) ฉบับนี้ได้ผ่านการรับรองคุณภาพวารสารวิชาการเพื่อเข้าสู่ฐานข้อมูล TCI ใน “วารสารกลุ่มที่ 1” มีวัตถุประสงค์เพื่อเผยแพร่ผลงานวิชาการ ผลงานวิจัย ให้เป็นที่ประจักษ์แก่ภาครัฐ ภาคเอกชน นักวิชาการ ผู้ประกอบการ และประชาชนทั่วไป มุ่งเน้นให้สามารถนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์ในทางวิชาการ ตลอดจนอ้างอิงในการประกอบกิจการภาคการผลิตและอุตสาหกรรมได้ วารสารได้จัดให้มีระบบ Peer review จากผู้ทรงคุณวุฒิที่มีความเชี่ยวชาญหลากหลายสาขาวิชา และมีการปรับปรุงรูปแบบให้น่าสนใจ ตลอดจนมุ่งเน้นให้เนื้อหาที่มีความเข้มข้นทางวิชาการมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยในวารสารฉบับนี้มีบทความที่น่าสนใจมากมาย ได้แก่ การตรวจสอบระหว่างการใช้งานเครื่องชั่งน้ำหนักอิเล็กทรอนิกส์ตามวิธีการของหน่วยงานรับรองระบบงานของประเทศออสเตรเลีย (NATA), การประเมินประสิทธิภาพ ความพึงพอใจ และต้นทุน การใช้งานปากกาจันตึงไฟฟ้าแบบพกพา ร่วมกับแท่งเทียนไขปาล์ม ในกระบวนการผลิตผ้าบาติก, การศึกษาความชื้นสมดุลและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ สมุนไพรฟ้าทะลายโจร, การออกแบบและพัฒนาระบบฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้านด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตแบบอัตโนมัติ, การพัฒนาเทคนิคการวิเคราะห์หอยต่างของงานพิมพ์ด้วยภาพถ่ายโดยใช้การวิเคราะห์ภาพเพื่อประเมินคุณภาพงานพิมพ์ อย่างแม่นยำในอุตสาหกรรมกระดาษ และการออกแบบและทดสอบเบื้องต้นเซนเซอร์ตรวจวัดฝุ่นละอองโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ค่าความนำทางไฟฟ้า

กองบรรณาธิการวารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ กรมวิทยาศาสตร์บริการ ขอขอบคุณผู้พิมพ์ทุกท่านที่ส่งบทความ มาให้พิจารณาตีพิมพ์เผยแพร่องค์ความรู้และงานวิจัย ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการปฏิบัติงานด้านการพัฒนาวิทยาศาสตร์วิจัย และนวัตกรรมของประเทศ ขอขอบพระคุณผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่านสำหรับการพิจารณาบทความ (Peer review) โดยได้ให้ข้อเสนอแนะในการปรับปรุงแก้ไขบทความต่าง ๆ ให้มีความถูกต้องทางวิชาการ และอ่านได้เข้าใจง่ายขึ้น และขอขอบพระคุณทุกท่านที่มีส่วนในการจัดทำวารสารฉบับนี้ให้เสร็จสมบูรณ์ด้วยดี กองบรรณาธิการหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวารสารฉบับนี้ จะเป็นประโยชน์สำหรับผู้อ่านทุกท่านในการเสริมสร้างองค์ความรู้ทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อพัฒนางาน หรือช่วยแก้ปัญหาที่พบในการปฏิบัติงานได้ และขอขอบคุณผู้อ่านที่ได้ให้ความสนใจติดตามวารสารนี้อย่างต่อเนื่อง โปรดติดตามความรู้และงานวิจัยดี ๆ จากวารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ กรมวิทยาศาสตร์บริการ ฉบับต่อไป

ดร.ภูวดี ผู้จินดา
บรรณาธิการวิชาการ

จริยธรรมการตีพิมพ์

วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ กรมวิทยาศาสตร์บริการ (Bulletin of Applied Science)

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

บทบาทและหน้าที่ของกองบรรณาธิการ

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

11. บรรณาธิการเป็นผู้ควบคุมและให้ความสำคัญต่อการตีพิมพ์เป็นรูปเล่มของวารสารในแต่ละฉบับ รวมถึงการเผยแพร่ทางเว็บไซต์วารสาร ให้มีความถูกต้อง สมบูรณ์ และออกตรงตามกำหนดเวลา อย่างเคร่งครัด

บทบาทและหน้าที่ของผู้นิพนธ์

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

บทบาทและหน้าที่ของผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ

1. ผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความพิจารณาความถูกต้อง คุณภาพและความน่าสนใจของเนื้อหาของบทความภายใต้หลักการและเหตุผลทางวิชาการ ด้วยใจเป็นกลาง และปราศจากอคติ หรือความคิดเห็นส่วนตัว ตลอดจนประโยชน์ที่ผู้อ่านบทความจะได้รับ และพร้อมจะให้คำติชม ข้อเสนอแนะ และแนวทางแก้ไขปรับปรุงบทความที่สร้างสรรค์ และชัดเจนในเชิงประจักษ์ รวมทั้งไม่มีส่วนได้ส่วนเสียกับผู้นิพนธ์
2. ผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความต้องตระหนักว่าตนเองมีความรู้ความเข้าใจในเนื้อหาของผลงานทางวิชาการที่ประเมินอย่างแท้จริง หากไม่มีความเชี่ยวชาญเนื้อหาในระดับที่มากพอจะพิจารณาบทความเรื่องนั้น ๆ ได้อย่างมีคุณภาพ ผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความควรแจ้งปฏิเสธการประเมินบทความให้กองบรรณาธิการได้ทราบ
3. ผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความต้องรักษาระยะเวลาประเมินตามกรอบเวลาที่กำหนด หากไม่สามารถส่งข้อเสนอแนะบทความได้ทันตามเวลาที่กองบรรณาธิการได้กำหนดไว้ ผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความควรแจ้งให้กองบรรณาธิการได้ทราบ พร้อมทั้งควรแจ้งกำหนดเวลาใหม่ในการส่งคืนข้อเสนอแนะบทความ
4. ผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความต้องไม่แสวงหาประโยชน์จากบทความที่ตนเองได้ประเมิน และไม่เปิดเผยข้อมูลบทความให้ผู้ที่ไม่มีส่วนเกี่ยวข้องได้รับรู้
5. หากผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความตรวจสอบพบว่าบทความที่ประเมินมีการคัดลอกผลงานชิ้นอื่น ๆ ต้องแจ้งให้บรรณาธิการทราบทันที

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

การคุ้มครองข้อมูลส่วนบุคคล

1. วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ กรมวิทยาศาสตร์บริการ จะเคร่งครัดการเก็บบทความมีการคัดลอก การนำเสนอรูปภาพหรือการนำผลงานผู้อื่นมาเป็นส่วนหนึ่งของบทความเพื่อตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสาร
2. วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ กรมวิทยาศาสตร์บริการ จะไม่เปิดเผยรายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความให้แก่ผู้นิพนธ์หรือบุคคลอื่น

Publication ethics

Bulletin of Applied Sciences (Bull Appl Sci.), 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. After publication in Bulletin of Applied Sciences, 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 journal
2. Bulletin of Applied Sciences journal will not reveal name and personal information of reviewers.

1

การตรวจสอบระหว่างการใช้งานเครื่องชั่งน้ำหนักอิเล็กทรอนิกส์ตามวิธีการ
ของหน่วยงานรับรองระบบงานของประเทศออสเตรเลีย (NATA)
จิตตกานต์ อินทรีย์

2

การประเมินประสิทธิภาพ ความพึงพอใจ และต้นทุน การใช้งานปากกาจันตัง
ไฟฟ้าแบบพกพา ร่วมกับแท่งเขียนไฮปาล์ม ในกระบวนการผลิตผ้าบาติก
อาภาพร สีนุสาร, สมพร สีนเจริญโกศัย, การ์ตูน เพ็ญพรหม

3

การศึกษาความขึ้นสมดุลและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมุนไพร
ฟ้าทะลายโจร
จินตนา แสงสุข, สราวุธ นิยมเนียร

4

การออกแบบและพัฒนาระบบฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้านด้วยรังสี
อัลตราไวโอเล็ตแบบอัตโนมัติ
อาภาพร สีนุสาร, อนุชา สีนุสาร

5

การพัฒนาเทคนิคการวิเคราะห์รอยต่างของงานพิมพ์ด้วยภาพถ่ายโดยใช้
การวิเคราะห์ภาพเพื่อประเมินคุณภาพงานพิมพ์อย่างแม่นยำในอุตสาหกรรม
กระดาษ
ศิริลักษณ์ บ้องเกียรติชัย, โกสินทร์ หาชะวี, วโรตม์ พรหมบุญ

6

การออกแบบและทดสอบเบื้องต้นเซนเซอร์ตรวจวัดฝุ่นละอองโดยใช้เทคนิค
การวิเคราะห์ค่าความนำทางไฟฟ้า
วิสาขน์ภัสตร์ รัตนจันทร์, อีรชิตี หล้าวงษ์, วิสูตร อาสนวิจิตร, วนัสสุดา คำพุ่ม,
พานิช อินต๊ะ

1

Intermediate check of electronic balances according to National Association of Testing Authorities, Australia (NATA) Method 12
Jittakant Intiang

2

Portable electric canting pen with palm wax sticks: Efficiency, user satisfaction and cost analysis for batik fabric production 20
Apaporn Sinthusarn, Somphon Sincharoenpokai, Kartoon Pengprom

3

The study of equilibrium moisture content and mathematical of *Andrographis paniculate* herb 34
Jintana Sansuk, Sarawut Nabnean

4

Design and development of automatic village water disinfection system using ultraviolet radiation 44
Apaporn Sinthusarn, Anucha Sinthusarn

5

Development of an image analysis-based technique for precise evaluation of print mottle in the paper industry 56
Siriluk Pongkeatchai, Kosin Hachawee, Warot Promboon

6

Design and preliminary testing of a particulate matter sensor using electrical conductivity analysis technique 69
Wisapapat Rattanachan, Theerachot Lawong, Visut Asanavijit, Wanasuda Khamput, Panich Intra

การตรวจสอบระหว่างการใช้งานเครื่องชั่งน้ำหนักอิเล็กทรอนิกส์ตามวิธีการ ของหน่วยงานรับรองระบบงานของประเทศออสเตรเลีย (NATA) Intermediate check of electronic balances according to National Association of Testing Authorities, Australia (NATA) Method

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

รับบทความ 1 มกราคม 2568 แก้ไขบทความ 29 ตุลาคม 2568 ยอมรับตีพิมพ์ 7 พฤศจิกายน 2568

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะนำเสนอผลการเปรียบเทียบวิธีการตรวจสอบระหว่างการใช้งานเครื่องชั่งน้ำหนักอิเล็กทรอนิกส์ตามวิธีต่าง ๆ พร้อมนำเสนอตัวอย่างการดำเนินงานตามวิธีของหน่วยงานรับรองระบบงานของประเทศออสเตรเลีย (National Association of Testing Authorities, Australia) หรือ เรียกว่า NATA ซึ่งจะเป็นการตรวจสอบเครื่องชั่งน้ำหนักอิเล็กทรอนิกส์ทั้งในส่วนของค่าความถูกต้องแม่นยำและค่าความเที่ยงตรง โดยทำการตรวจสอบทั้งหมด 2 หัวข้อ ได้แก่ การตรวจสอบที่ค่าน้ำหนักจุดเดียว (Single point check) และการตรวจสอบความสามารถในการทำซ้ำ (Repeatability check) โดยนำผลการตรวจสอบระหว่างการใช้งานที่ได้มาพิจารณาเปรียบเทียบกับผลการสอบเทียบของเครื่องชั่งน้ำหนักอิเล็กทรอนิกส์เพื่อให้เกิดความมั่นใจในสถานะผลการสอบเทียบและยืนยันว่าการทำงานของเครื่องชั่งน้ำหนักอิเล็กทรอนิกส์ยังคงมีความน่าเชื่อถือถูกต้องต่อไป โดยในบทความนี้ได้นำเสนอตัวอย่างการตรวจสอบเครื่องชั่งน้ำหนักอิเล็กทรอนิกส์ที่มีค่าความสามารถในการชั่งน้ำหนักสูงสุด 500 g มีค่าความละเอียด 0.0001 g โดยใช้ตุ้มน้ำหนักขนาด 500 g ที่ได้รับการสอบเทียบมาทำการตรวจสอบ จากผลการตรวจสอบทั้ง 2 หัวข้อพบว่าผ่านเกณฑ์ทั้ง 2 หัวข้อ

คำสำคัญ: การตรวจสอบระหว่างการใช้งาน, เครื่องชั่งน้ำหนักอิเล็กทรอนิกส์, วิธีการของ NATA, การตรวจสอบที่ค่าน้ำหนักจุดเดียว, การตรวจสอบความสามารถในการทำซ้ำ

¹ศูนย์ห้องปฏิบัติการอ้างอิงการสอบเทียบ สถาบันห้องปฏิบัติการอ้างอิงแห่งชาติ กรมวิทยาศาสตร์บริการ จังหวัดกรุงเทพมหานคร 10400 ประเทศไทย

Abstract

This article aimed to present the comparison of the various intermediate check methods for the electronic balance and showed the example of the procedure based on the guideline provided by the National Association of Testing Authorities, Australia (NATA). The process included two specific checks which cover both the single point check for accuracy performance and the repeatability check for precision performance. The intermediate check results were then compared with the calibration results of the electronic balance to ensure confidence in the calibration status and confirm that the electronic balance continues to operate reliably and accurately. The intermediate check of the electronic balance with a maximum capacity of 500 g with readability of 0.0001 g was conducted by using a calibrated 500 g weight. The results of both checks showed that the electronic balance's performance still met the specified criteria.

Keywords: Intermediate check, Electronic balances, NATA method, Single point check, Repeatability check

¹Reference Calibration Laboratory Center, National Institute of Reference Laboratories, Department of Science Service, Bangkok 10400, Thailand

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

1. บทนำ (Introduction)

เครื่องชั่งน้ำหนักอิเล็กทรอนิกส์เป็นเครื่องมือวัดที่สำคัญและใช้งานกันอย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรมหลายด้าน โดยเฉพาะในทางการแพทย์ อาหาร และปิโตรเคมี ซึ่งมีความต้องการค่าน้ำหนักที่มีความถูกต้องแม่นยำอย่างสูง เนื่องจากส่งผลกระทบต่อคุณภาพชีวิตและความปลอดภัยของประชาชน เครื่องชั่งน้ำหนักอิเล็กทรอนิกส์ส่วนใหญ่ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการที่มีการควบคุมการทำงานตามระบบคุณภาพ ISO/IEC 17025 นั้น ส่วนใหญ่จะได้รับการสอบเทียบจากห้องปฏิบัติการสอบเทียบที่น่าเชื่อถือตามระยะเวลาสอบเทียบที่กำหนดไว้ เช่น ปีละครั้ง ซึ่งระหว่างการใช้งานเครื่องชั่งน้ำหนักดังกล่าว ห้องปฏิบัติการต้องมีการควบคุมให้เกิดความมั่นใจว่าผลการใช้งานเครื่องชั่งยังคงน่าเชื่อถือ มีความถูกต้อง กระบวนการดังกล่าวเรียกว่าการตรวจสอบระหว่างการใช้งาน [1]

ในเอกสาร NATA [2] ได้มีการกล่าวถึงแนวทางการตรวจสอบค่าความถูกต้องแม่นยำและการตรวจสอบค่าความเที่ยงตรงของเครื่องชั่ง โดยมีการนำค่าจากรายงานผลการสอบเทียบเครื่องชั่งมาใช้เป็นเกณฑ์ นอกจากนี้ยังมีการหาค่าขอบเขตประสิทธิภาพการทำงาน (Limit of performance) ซึ่งเป็นค่าผิดพลาดของการวัดสูงสุดของเครื่องชั่งในกรณีที่เกิดการตรวจสอบจากแนวทางขั้นต้นไม่ผ่านเกณฑ์เพื่อทำการพิจารณาประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องชั่ง ณ ข้อมูลที่เป็นปัจจุบันล่าสุด

ในเอกสารมาตรฐาน UKAS Lab 14 [3] ได้มีการอธิบายเกี่ยวกับการตรวจสอบเครื่องชั่งตามระยะเวลาหรือก่อนใช้งาน โดยมีการแนะนำให้ใช้ตุ้มน้ำหนักก่อนเดียวที่มีขนาดใกล้เคียงกับค่าน้ำหนักที่ใช้งานประจำและเป็นตุ้มน้ำหนักที่ได้รับการสอบเทียบมาแล้ว สำหรับในกรณีที่ตุ้มน้ำหนักไม่ได้รับการสอบเทียบก็สามารถนำมาใช้ได้ แต่ต้องเป็นตุ้มน้ำหนักที่เก็บรักษาไว้ใช้งานเฉพาะการตรวจสอบนี้เท่านั้น และต้องทำการชั่งตุ้มน้ำหนักนี้ทันทีภายหลังเสร็จสิ้นการสอบเทียบเพื่อนำค่าน้ำหนักที่ชั่งได้นี้มาใช้เป็นค่าน้ำหนักอ้างอิงในการพิจารณาว่าเครื่องชั่งยังสามารถอ่านค่าน้ำหนักได้เท่าเดิม ในขณะที่ชั่งตุ้มน้ำหนักก่อนเดิม สำหรับการตรวจสอบตามมาตรฐานนี้ผู้ใช้งานเครื่องชั่งจะต้องกำหนดขอบเขตควบคุมหรือขอบเขตค่าผิดพลาดที่ยอมรับได้สำหรับการใช้งานเครื่องชั่ง

นอกจากนี้ในเอกสาร OIML [4] ยังกล่าวถึงการตรวจสอบระหว่างการใช้งานของเครื่องชั่ง NAWI (Non-automatic weighing instruments) ที่ใช้งานตามเอกสารมาตรฐาน USP Chapter 35 [5] โดยที่ค่าความถูกต้องแม่นยำของตุ้มน้ำหนักที่ใช้ตรวจสอบไม่มีความสำคัญ ดังนั้นสามารถใช้วัตถุที่มีความมวลคงที่และมีค่าน้ำหนักไม่เกินค่าความสามารถสูงสุดของเครื่องชั่งแทนการใช้ตุ้มน้ำหนักได้ การตรวจสอบควรดำเนินการก่อนการใช้งานครั้งแรกของวันที่มีการใช้งานเครื่องชั่งหรือภายหลังการดำเนินการที่กระทบต่อผลการสอบเทียบหรือมีการปรับแต่งเครื่องชั่ง สำหรับเครื่องชั่งวิเคราะห์ (Analytical balances) และเครื่องชั่งระดับไมโครกรัม (Microbalances) ค่าความแปรปรวนของค่าที่อ่านได้จากการชั่งตุ้มน้ำหนักทดสอบหลาย ๆ ครั้ง ควรมีค่าไม่เกิน ± 0.2 mg และ 0.1% ของน้ำหนักที่ชั่งตามลำดับ สำหรับเครื่องชั่งที่ใช้งานในกรณีอื่นจะต้องทำการกำหนดขอบเขตควบคุมโดยผู้ใช้งานเครื่องชั่งเหมือนวิธีของ UKAS Lab 14

อย่างไรก็ตามยังมีแนวทางการตรวจสอบระหว่างการใช้งานเครื่องชั่งอื่น ๆ ที่มีการพิจารณาจากขอบข่ายการได้รับการรับรองของห้องปฏิบัติการ ยกตัวอย่างเช่น ห้องปฏิบัติการที่ได้รับการรับรองสำหรับการสอบเทียบเครื่องชั่ง NAWI ระยะเวลาในการตรวจสอบระหว่างการใช้งานเครื่องชั่งควรดำเนินการระหว่างช่วงระยะเวลาการสอบเทียบ ตัวอย่างเช่น ถ้าช่วงระยะเวลาการสอบเทียบเป็นทุก ๆ 2 ปี ระยะเวลาในการตรวจสอบระหว่างการใช้งานเครื่องชั่งควรเป็นทุก ๆ 1 ปี เป็นต้น โดยมีขั้นตอนการดำเนินการกิจกรรมคล้ายการสอบเทียบ แต่จำนวนจุดสอบเทียบน้อยกว่าการสอบเทียบตามแผนประจำปี เช่น สอบเทียบเพียง 3 จุดสอบเทียบก็เพียงพอ จากนั้นใช้สถิติ E_n (E_n score) ซึ่งเป็นสถิติที่ใช้ในการประเมินผลการเปรียบเทียบระหว่างค่าข้อมูล 2 ค่า ว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ [6] โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างผลการสอบเทียบที่ได้จากการตรวจสอบระหว่างการใช้งานกับค่าที่รายงานในผลการสอบเทียบตามแผนประจำปี สำหรับการตรวจสอบระหว่างการใช้งานเครื่องชั่งในห้องปฏิบัติการทางการแพทย์ที่ได้รับการรับรองนั้น การดำเนินการขึ้นอยู่กับความต้องการของห้องปฏิบัติการ ในกรณีที่เครื่องชั่งไม่ได้มีการกำหนดระยะเวลาที่แน่นอนในการตรวจสอบ จะนำตุ้มน้ำหนักที่เตรียมไว้สำหรับตรวจสอบระหว่างการใช้งานเครื่องชั่งไปทำการชั่งซ้ำหลาย ๆ ครั้งบนเครื่องชั่ง และคำนวณหาค่าเฉลี่ย โดยค่าเฉลี่ยที่ได้ควรมีค่าอยู่ในช่วงระหว่างผลรวมของค่ามวลสัญญาณนิยมของตุ้มน้ำหนักที่ใช้ตรวจสอบหัวข้อนี้

กับค่าความไม่แน่นอน แต่ในกรณีที่เครื่องซึ่งถูกตรวจสอบเป็นประจำทุกวันด้วยตุ้มน้ำหนักก่อนเดิม สามารถพิจารณาผลการตรวจสอบโดยใช้แผนภูมิควบคุมหรือการพิจารณาหาความเอนเอียง (Bias) โดยควรมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่ากำหนดที่ยอมรับได้ของผู้ผลิต แต่หากไม่มีข้อมูลดังกล่าวห้องปฏิบัติการจะต้องกำหนดค่านี้เอง รวมถึงการกำหนดค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ใช้ในการกำหนดค่าในแผนภูมิควบคุมด้วย [7]

จากการเปรียบเทียบวิธีการตรวจสอบระหว่างการใช้งานเครื่องซึ่งพบว่าแต่ละแนวทางมีจุดเด่นและข้อจำกัดที่ต่างกัน โดยวิธีการของ NATA มีความน่าเชื่อถือและเป็นระบบที่สุดเนื่องจากใช้ตุ้มน้ำหนักที่ผ่านการสอบเทียบและมีการเชื่อมโยงผลการตรวจสอบระหว่างการใช้งานกับรายงานผลการสอบเทียบที่ได้รับการรับรอง ทำให้มั่นใจได้ว่าค่าที่ใช้งานยังมีความถูกต้องแม่นยำและเที่ยงตรง วิธีนี้จึงเหมาะกับห้องปฏิบัติการที่อยู่ภายใต้ระบบคุณภาพ ISO/IEC 17025 ที่ต้องการหลักฐานชัดเจนในการยืนยันความน่าเชื่อถือของผลการตรวจสอบดังกล่าว

2. วิธีการวิจัย (Experimental methods)

การตรวจสอบเครื่องซึ่งน้ำหนักระหว่างการใช้งานตามแนวทางของ NATA นี้ จะทำการตรวจสอบทั้งหมด 2 หัวข้อ ได้แก่ การตรวจสอบที่ค่าน้ำหนักจุดเดียว (Single point check) และการตรวจสอบความสามารถในการทำซ้ำ (Repeatability check)

2.1 การตรวจสอบที่ค่าน้ำหนักจุดเดียว (Single point check)

การตรวจสอบหัวข้อนี้เป็นการตรวจสอบค่าความถูกต้องแม่นยำ (Accuracy) ของเครื่องซึ่งน้ำหนักว่าไม่ได้มีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างมีนัยสำคัญนับตั้งแต่ทำการสอบเทียบครั้งล่าสุด สำหรับตุ้มน้ำหนักที่ใช้ตรวจสอบหัวข้อนี้ควรมีค่ามวลใกล้เคียงกับความสามารถในการชั่งสูงสุด (โดยทั่วไปต้องไม่น้อยกว่า 80%) ของช่วงที่ต้องการใช้งานของเครื่องซึ่งน้ำหนักที่กำลังตรวจสอบ ยกตัวอย่างเช่น เครื่องซึ่งน้ำหนักที่ต้องการใช้งานถึง 500 g ให้เลือกใช้ตุ้มน้ำหนักที่มีค่ามวล 500 g ในการตรวจสอบหัวข้อดังกล่าว ในกรณีที่เครื่องซึ่งมีการใช้งานหลายช่วงควรทำการตรวจสอบให้ครบทุกช่วงการใช้งาน ตุ้มน้ำหนักที่ใช้ตรวจสอบในหัวข้อนี้ต้องได้รับการสอบเทียบและมีค่าความไม่แน่นอนน้อยกว่า 2.26 เท่าของความสามารถในการชั่งซ้ำ (Repeatability) ของเครื่องซึ่งที่ได้มาจากรายงานการสอบเทียบ (s_r) ยกตัวอย่างเช่น ค่าความสามารถในการชั่งซ้ำในรายงานผลการสอบเทียบเครื่องซึ่ง (s_r) มีค่าเท่ากับ 0.001 g ตุ้มน้ำหนักที่นำมาใช้ตรวจสอบหัวข้อนี้ต้องมีค่าความไม่แน่นอนที่ได้จากการสอบเทียบน้อยกว่า 0.00226 g (ได้มาจาก 2.26×0.001 g) วิธีการนี้โดยทั่วไปทำการตรวจสอบเดือนละครั้ง และระยะเวลาการสอบเทียบสามารถขยายเวลาออกไปได้มากกว่า 1 ปี โดยมีขั้นตอนตามเอกสาร NATA ดังต่อไปนี้

- 2.1.1 ทำการ Tare เครื่องซึ่งน้ำหนัก และบันทึกค่าน้ำหนักขณะไม่มีการชั่งเป็น z_1
- 2.1.2 วางตุ้มน้ำหนักที่ใช้ตรวจสอบ (M) บนจานชั่งน้ำหนัก และบันทึกค่าน้ำหนักเป็น m_1
- 2.1.3 นำตุ้มน้ำหนักที่ใช้ตรวจสอบ (M) ออกจากจานชั่งน้ำหนัก ไม่ต้องกด Tare เครื่องซึ่งน้ำหนัก
- 2.1.4 วางตุ้มน้ำหนักที่ใช้ตรวจสอบ (M) บนจานชั่งน้ำหนักในตำแหน่งเดิมอีกครั้ง และบันทึกค่าน้ำหนักเป็น m_2
- 2.1.5 นำตุ้มน้ำหนักที่ใช้ตรวจสอบ (M) ออกจากจานชั่งน้ำหนัก และบันทึกค่าน้ำหนักขณะไม่มีการชั่งเป็น z_2

ทำการคำนวณหาค่าแก้ (M) ในแต่ละรอบของการชั่งตามสมการ (1) และ สมการ (2)

$$C_1 = M - (m_1 - z_1) \quad (1)$$

$$C_2 = M - (m_2 - z_2) \quad (2)$$

จากนั้นทำการคำนวณหาค่าแก้ของการตรวจสอบ ($C_{\text{User-Check Correction}}$) ตามสมการ (3)

$$C_{\text{User-Check Correction}} = (C_1 + C_2) / 2 \quad (3)$$

จากนั้นทำการคำนวณหาผลต่างระหว่างค่าแก้ของการตรวจสอบ ($C_{\text{User-Check Correction}}$) กับค่าแก้จากใบรายงานผลการสอบเทียบเครื่องชั่ง ณ จุดน้ำหนักที่ตรวจสอบ $C_{\text{Calibration report correction}}$ ตามสมการ (4)

$$\Delta C = C_{\text{User-Check Correction}} - C_{\text{Calibration report correction}} \quad (4)$$

ทำการตรวจสอบค่าผลต่างที่ได้ต้องมีค่าสอดคล้องกับสมการ (5)

$$|\Delta C| \leq \sqrt{\{U^2 + (1.6s_r)^2 + U_M^2\}} \quad (5)$$

โดยที่ U คือ ค่าความไม่แน่นอนของค่าแก้จากใบรายงานผลการสอบเทียบเครื่องชั่ง ณ จุดน้ำหนักที่ตรวจสอบ
 U_M คือ ค่าความไม่แน่นอนของตุ้มน้ำหนักที่ใช้ตรวจสอบ

ต่อไปนี้เป็นตัวอย่างผลการตรวจสอบที่ค่าน้ำหนักจุดเดียว (Single point check) ของเครื่องชั่งน้ำหนัก A ที่มีค่าความสามารถในการชั่งน้ำหนักสูงสุด 500 g และมีค่าความละเอียด 0.0001 g มีรายงานผลการสอบเทียบเครื่องชั่งที่น้ำหนักทดสอบ 500 g ดังตารางที่ 1 โดยตุ้มน้ำหนักที่ใช้ตรวจสอบเป็นตุ้มน้ำหนัก Class E2 ขนาด 500 g ผลการสอบเทียบดังตารางที่ 2 และผลการตรวจสอบที่ค่าน้ำหนักจุดเดียว (Single point check) ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 1 ผลการสอบเทียบเครื่องชั่งน้ำหนัก A ที่น้ำหนักทดสอบ 500 g

น้ำหนักทดสอบ	ค่าแก้	ค่าความไม่แน่นอน (95%)
500 g	+ 0.5 mg	± 0.50 mg

ตารางที่ 2 ผลการสอบเทียบตุ้มน้ำหนักที่ใช้ตรวจสอบขนาด 500 g

ค่าที่ระบุ	ค่ามวลจริงสัญญาณนิยม (M)	ค่าความไม่แน่นอนที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (U_M)
500 g	500 g – 0.51 mg	± 0.025 mg

ตารางที่ 3 ผลการตรวจสอบที่ค่าน้ำหนักจุดเดียว (Single point check) ของเครื่องชั่งน้ำหนัก A

ครั้งที่	z (g)	m (g)
1	0.0000	499.9987
2	0.0000	499.9990

จากนั้นทำการคำนวณหาค่าดังต่อไปนี้

$$C_1 = 499.99949 - (499.9987 - 0.0000) = 0.00079 \text{ g}$$

$$C_2 = 499.99949 - (499.9990 - 0.0000) = 0.00049 \text{ g}$$

$$C_{\text{User-Check Correction}} = (C_1 + C_2) / 2 = 0.00064 \text{ g}$$

$$\Delta C = 0.00064 \text{ g} - 0.0005 \text{ g} = 0.00014 \text{ g}$$

$$|\Delta C| \leq \sqrt{\{0.0005^2 + (1.6 \times 0.0001)^2 + 0.00025^2\}} = 0.0006 \text{ g}$$

จากผลการตรวจสอบ พบว่า ค่าที่ได้ 0.00014 g มีค่าน้อยกว่าเกณฑ์กำหนด 0.0006 g ถือว่าผลการตรวจสอบผ่าน

2.2 การตรวจสอบความสามารถในการทำซ้ำ (Repeatability check)

การตรวจสอบหวัชข้อนี้เป็นการตรวจสอบค่าความเที่ยงตรง (Precision) ของเครื่องชั่งน้ำหนัก สำหรับตม้มน้ำหนักที่ใช้ตรวจสอบหวัชข้อนี้ควรมีค่ามวลใกล้เคียงกับค่าสูงสุดของช่วงใช้งานของเครื่องชั่งน้ำหนักที่กำลังตรวจสอบ ยกตัวอย่างเช่น เครื่องชั่งน้ำหนักที่ต้องการใช้งานถึง 500 g ให้เลือกใช้ตม้มน้ำหนักที่มีค่ามวล 500 g ในการตรวจสอบหวัชข้อดังกล่าว ในกรณีที่เครื่องชั่งมีการใช้งานหลายช่วงควรทำการตรวจสอบให้ครบทุกช่วงการใช้งาน ตม้มน้ำหนักที่ใช้ตรวจสอบในหวัชข้อนี้ไม่จำเป็นต้องได้รับการสอบเทียบ วิธีการนี้โดยทั่วไปทำการตรวจสอบทุก ๆ 6 เดือน โดยมีขั้นตอนการตรวจสอบดังต่อไปนี้

2.2.1 ทำการ Tare เครื่องชั่งน้ำหนัก และบันทึกค่าน้ำหนักขณะไม่มีการชั่งเป็น z_1

2.2.2 วางตม้มน้ำหนักที่ใช้ตรวจสอบ (M) บนจานชั่งน้ำหนัก และบันทึกค่าน้ำหนักเป็น m_1

2.2.3 นำตม้มน้ำหนักที่ใช้ตรวจสอบ (M) ออกจากจานชั่งน้ำหนัก และบันทึกค่าน้ำหนักขณะไม่มีการชั่งเป็น z_2

2.2.4 ไม่ต้องทำการ Tare เครื่องชั่งน้ำหนัก วางตม้มน้ำหนักที่ใช้ตรวจสอบ (M) บนจานชั่งน้ำหนักในตำแหน่งเดิมอีกครั้ง และบันทึกค่าน้ำหนักเป็น m_2

2.2.5 นำตม้มน้ำหนักที่ใช้ตรวจสอบ (M) ออกจากจานชั่งน้ำหนัก และบันทึกค่าน้ำหนักขณะไม่มีการชั่งเป็น z_3

2.2.6 ทำซ้ำข้อ 2.2.4 และ 2.2.5 จนครบ 10 ครั้ง

ทำการคำนวณหาผลต่าง (r_i) ระหว่างค่าน้ำหนักขณะทำการชั่งกับค่าน้ำหนักขณะไม่มีการชั่งตามสมการ (6)

$$r_i = m_i - z_i \quad (6)$$

คำนวณหาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ($S_{\text{user check}}$) ตามสมการ (7)

$$S_{\text{user check}} = \sqrt{[\sum(r_i - R)^2 / (n-1)] \times 2 \times s_r} \quad (7)$$

โดยที่ i คือ จำนวนครั้งที่ชั่งซ้ำมีค่าตั้งแต่ 1 ถึง 10

R คือ ค่าเฉลี่ยของ r_i

n คือ จำนวนครั้งที่ชั่งซ้ำทั้งหมด (ในที่นี้ = 10)

ทำการตรวจสอบค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ($S_{\text{user check}}$) ต้องมีค่าน้อยกว่า 2 เท่าของค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากรายงานผลการสอบเทียบเครื่องชั่ง s_r ถึงจะถือว่าผลการตรวจสอบผ่านเกณฑ์

ต่อไปนี้เป็นตัวอย่างของผลการตรวจสอบความสามารถในการทำซ้ำ (Repeatability check) ของเครื่องชั่งน้ำหนัก A ตม้มน้ำหนักที่ใช้ตรวจสอบหวัชข้อนี้มีขนาด 500 g ผลการตรวจสอบแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการตรวจสอบความสามารถในการทำซ้ำ (Repeatability check) ของเครื่องชั่งน้ำหนัก A

ครั้งที่	z (g)	m (g)	r (g)
1	0.0000	499.9988	499.9988
2	0.0000	499.9986	499.9986
3	0.0000	499.9987	499.9987
4	0.0000	499.9989	499.9989
5	0.0000	499.9990	499.9990
6	0.0000	499.9989	499.9989
7	0.0000	499.9988	499.9988
8	0.0000	499.9987	499.9987
9	0.0000	499.9987	499.9987
10	0.0000	499.9987	499.9987
S _{user check}			0.0001

จากผลการตรวจสอบพบว่าค่า S_{user check} ที่ได้ 0.0001 g มีค่าน้อยกว่า 2 เท่าของค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากรายงานผลการสอบเทียบเครื่องชั่ง (s) 0.0002 g (ได้มาจาก 2×0.0001 g) ถือว่าผลการตรวจสอบผ่านเกณฑ์

4. สรุป (Conclusion)

จากวิธีการตรวจสอบเครื่องชั่งน้ำหนักอิเล็กทรอนิกส์ตามแนวทางของ NATA ที่อธิบายมาข้างต้นนั้นเป็นการตรวจสอบพฤติกรรมของเครื่องชั่งน้ำหนักอิเล็กทรอนิกส์ทั้งค่าความถูกต้องแม่นยำ (Accuracy) และค่าความเที่ยงตรง (Precision) โดยเป็นการตรวจสอบเพื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากรายงานผลการสอบเทียบโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้มั่นใจในสถานะการสอบเทียบว่ายังคงสามารถใช้ได้ในรายงานผลการสอบเทียบดังกล่าวได้ ซึ่งจากตัวอย่างผลการตรวจสอบเครื่องชั่ง A พบว่า ผลการตรวจสอบทั้ง 2 หัวข้อผ่านเกณฑ์ที่กำหนดไว้ ซึ่งหมายความว่าพฤติกรรมของเครื่องชั่งยังคงเหมือนเดิมไม่เปลี่ยนแปลงไปจากที่ได้รับการสอบเทียบครั้งล่าสุด ทำให้สามารถใช้ค่าแก้และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่รายงานในผลการสอบเทียบเครื่องชั่งดังกล่าวได้ต่อไปจนกว่าจะครบกำหนดสอบเทียบตามแผน สำหรับการตรวจสอบที่ค่าน้ำหนักจุดเดียว (Single point check) นี้ให้ทำการตรวจสอบเดือนละ 1 ครั้ง และการตรวจสอบความสามารถในการทำซ้ำ (Repeatability check) ให้ทำการตรวจสอบทุก ๆ 6 เดือน ซึ่งในเอกสารแนะนำการกำหนดช่วงระยะเวลาสอบเทียบของ NATA ได้กล่าวไว้ว่า ในกรณีที่มีการตรวจสอบเครื่องชั่งน้ำหนักอิเล็กทรอนิกส์ตาม 2 หัวข้อนี้ ผู้ใช้งานเครื่องชั่งน้ำหนักอิเล็กทรอนิกส์สามารถกำหนดช่วงระยะเวลาสอบเทียบเครื่องชั่งน้ำหนักอิเล็กทรอนิกส์เป็น 3 ปีครึ่งได้ [8-9]

ในกรณีที่พบว่าไม่ผ่านเกณฑ์ใดเกณฑ์หนึ่ง จะต้องมีการตรวจสอบสภาวะแวดล้อม เช่น กระแสลม ความแปรปรวนของอุณหภูมิ เป็นต้น ว่าปกติหรือไม่และดำเนินการแก้ไข เช่น ในส่วนของผลกระทบเนื่องจากกระแสลมอาจพิจารณาติดตั้งเครื่องชั่งในบริเวณที่ไม่ได้รับผลกระทบจากกระแสลม แต่หากดำเนินการไม่ได้ให้จัดหาที่กำบังลมมาใช้ และในส่วนของความแปรปรวนของอุณหภูมิสามารถลดผลกระทบได้โดยการติดตั้งเครื่องชั่งในตำแหน่งที่ห่างจากหน้าต่างที่มีแสงแดดส่องถึง และให้พิจารณาถึงผลกระทบของความผิดพลาดของเครื่องชั่งเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (Sensitivity

to temperature drift) ซึ่งอ้างอิงได้จากคุณลักษณะของผู้ผลิต หลังจากนั้นทำการตรวจสอบทั้ง 2 หัวข้อซ้ำ หากพบว่าผลการตรวจสอบยังไม่ผ่านเกณฑ์ให้ดำเนินการหยุดการใช้งานเครื่องชั่ง ทำการซ่อมแซมหรือปรับแต่งแก้ไข และทำการสอบเทียบเครื่องชั่งใหม่ รวมทั้งพิจารณาผลการทดสอบก่อนหน้านี้ว่าได้รับผลกระทบจากความผิดพลาดของเครื่องชั่งหรือไม่

5. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณกรมวิทยาศาสตร์บริการที่ให้ความรู้และประสบการณ์ในการทำงาน ตลอดจนเครื่องมือวิทยาศาสตร์ที่ใช้ประกอบในการเก็บรวบรวมข้อมูล รวมทั้งเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการสอบเทียบที่ให้ความช่วยเหลือด้านเครื่องมือและข้อมูลประกอบการเขียนบทความ

6. เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] International Organization for Standardization (ISO). General requirements for the competence of testing and calibration laboratories. ISO/IEC 17025:2017(E). Geneva: ISO; 2017.
- [2] National Association of Testing Authorities (NATA). General accreditation guidance – User checks and maintenance of laboratory balances. Australia: NATA; 2018.
- [3] United Kingdom Accreditation Service (UKAS). Guidance on the calibration of weighing machines used in testing and calibration laboratories. UKAS LAB 14. United Kingdom: UKAS; 2022.
- [4] Vălcu A. Monitoring the validity of reported results in weighing operations according to ISO/IEC 17025:2017. OIML Bulletin. 2021;LXII(2):5-11.
- [5] The United States Pharmacopeial Convention (USP). <1251> Weighing on an analytical balance / General information. USP 35. United States of America: USP; 2012.
- [6] International Organization for Standardization (ISO). Conformity assessment – General requirements for the competence of proficiency testing providers. ISO/IEC 17043:2023(E). Geneva: ISO; 2023.
- [7] Vălcu A, Călin A. Ensuring the validity of results by intermediate checks in the field of mass measurements. J Phys : Conf Ser. 2018;1065(4):1-4. doi: 10.1088/1742-6596/1065/4/042033.
- [8] National Association of Testing Authorities (NATA). Specific accreditation guidance: Calibration reference equipment table. Australia: NATA; 2020.
- [9] National Association of Testing Authorities (NATA). General accreditation guidance: General equipment table. Australia: NATA; 2023.

การประเมินประสิทธิภาพ ความพึงพอใจ และต้นทุน การใช้งานปากกาจันตึงไฟฟ้าแบบพกพา ร่วมกับแท่งเทียนไขปาล์ม ในกระบวนการผลิตผ้าบาติก

2

Portable electric canting pen with palm wax sticks: Efficiency,
user satisfaction and cost analysis for batik fabric production

อาภาพร สินธุสาร^{1*}, สมพร สินเจริญโกศัย¹, การ์ตูน เพ็ญพร¹

Apaporn Sinthusarn^{1*}, Somphon Sincharoenpokai¹, Kartoon Pengprom¹

รับบทความ 26 กุมภาพันธ์ 2568 แก้ไขบทความ 24 ตุลาคม 2568 ยอมรับตีพิมพ์ 29 ตุลาคม 2568

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินประสิทธิภาพ ความพึงพอใจ และต้นทุน การใช้งานปากกาจันตึงไฟฟ้าแบบพกพาร่วมกับแท่งเทียนไขปาล์ม ในกระบวนการผลิตผ้าบาติก ซึ่งเป็นนวัตกรรมที่คณะผู้วิจัยได้ประดิษฐ์ขึ้นเพื่อแก้ปัญหาในกระบวนการผลิตขั้นตอนการเขียนเทียนลงบนผืนผ้าบาติก โดยเริ่มจากการออกแบบวิธีดำเนินการวิจัย การกำหนดประชากรและกลุ่มเป้าหมาย รวมทั้งเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย การทดลองใช้งานและการเก็บรวบรวมข้อมูล การอภิปรายและสรุปผลการดำเนินงาน ผลจากการวิจัยสรุปได้ว่า ปากกาจันตึงไฟฟ้าแบบพกพาและแท่งเทียนไขปาล์มมีประสิทธิภาพการใช้งานเขียนเทียนบนผืนผ้าบาติก โดยภาพรวมมีระดับความเหมาะสมและความเป็นไปได้มากเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้งานกับจันตึงแบบเดิม พบว่า ปากกาจันตึงไฟฟ้าแบบพกพา มีการใช้งานที่เหมาะสมมากกว่าจันตึงแบบเดิม ในระดับความคิดเห็นมากที่สุด ในส่วนของการทดสอบการใช้งานจริงพบว่า ปากกาจันตึงไฟฟ้าแบบพกพาใช้เวลาการเขียนเทียนนานกว่าการใช้จันตึงแบบเดิมเล็กน้อย ซึ่งเป็นเพราะเริ่มทดสอบใช้งานในครั้งแรก จึงไม่มีความถนัดในการใช้งานและไม่คุ้นเคยกับระบบการควบคุมอุณหภูมิของปากกาจันตึงไฟฟ้าแบบพกพา ผลวิเคราะห์ความพึงพอใจต่อการใช้งานโดยรวมอยู่ในระดับมากที่สุด ($\bar{x} = 4.25 \pm 0.65$) หรือคิดเป็นร้อยละ 85 การวิเคราะห์ต้นทุนและข้อจำกัดในการเขียนเทียนโดยปากกาจันตึงไฟฟ้าแบบพกพา พบว่า สามารถลดต้นทุนการใช้พลังงานได้ถึง 155 เท่า ลดต้นทุนวัสดุลงกว่าร้อยละ 36 และลดระยะเวลาการผลิตผ้าบาติกลงถึงร้อยละ 40 นอกจากนี้ยังลดข้อจำกัดด้านแรงงาน ช่วยให้เกิดความสะดวก มีความปลอดภัย และจัดซื้อวัสดุไขปาล์มเพื่อผลิตแท่งเทียนได้ง่าย ผลการวิจัยนี้สามารถช่วยให้ผู้ประกอบการบาติกมีความปลอดภัยและคุณภาพชีวิตดีขึ้น ยกเว้นการผลิตผ้าบาติกของประเทศ สร้างสรรค์และต่อยอดผลงานอย่างต่อเนื่องและยั่งยืน

คำสำคัญ: ประสิทธิภาพ, ความพึงพอใจ, ต้นทุน, ปากกาจันตึงไฟฟ้า, แท่งเทียนไขปาล์ม

¹สถาบันวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีชุมชน กรมวิทยาศาสตร์บริการ จังหวัดกรุงเทพมหานคร 10400 ประเทศไทย

Abstract

This research aimed to evaluate the efficiency, user satisfaction, and cost analysis of a portable electric canting pen used in conjunction with palm wax sticks in the batik fabric production process. This innovation, developed by the research team, was designed to address limitations in the traditional wax-drawing stage of batik making. The study began with the design of research methodology, identification of the population and target groups, selection of research instruments, experimental trials, data collection, followed by analytical discussions and conclusions. The research findings indicate that the portable electric canting pen and palm wax sticks demonstrated high efficiency in wax application on batik fabric, with overall suitability and feasibility rated at a high level. When compared to traditional canting tools, the electric version received the highest level of user preference. Although the initial field tests showed that the electric canting pen took slightly longer to operate, this was attributed to users' unfamiliarity with the device and its temperature control system during the first use. The overall satisfaction score was at the highest level ($\bar{x} = 4.25 \pm 0.65$), equivalent to 85 percent. Cost and constraint analysis revealed that the innovation reduced energy consumption by up to 155 times, decreased material costs by over 36 percent, and shortened batik production time by approximately 40 percent. Additionally, it alleviated labor constraints, enhanced operational convenience and safety, and allowed for easy procurement of palm wax materials for stick production. This research outcome is expected to improve the safety and quality of life of batik artisans, elevate the national standard of batik production, and promote sustained and creative development of the craft sector.

Keywords: Efficiency, User satisfaction, Cost analysis, Portable electric canting pen, Palm wax sticks

¹Institute of Community Science Technology, Department of Science Service, Bangkok 10400, Thailand

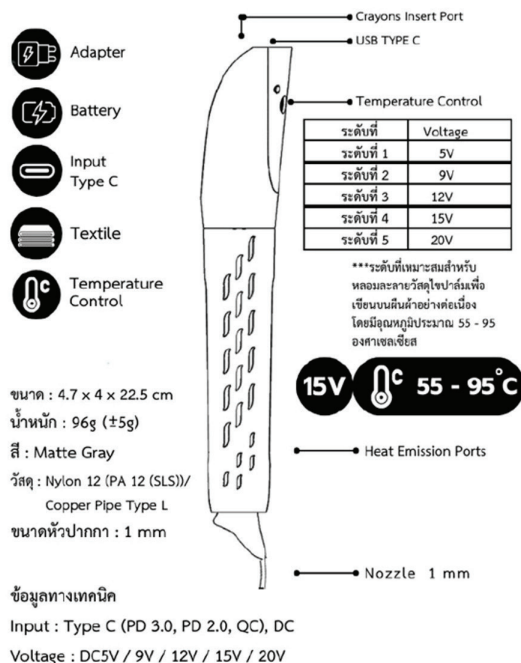
*Corresponding author e-mail address: apaporn@dss.go.th

1. บทนำ (Introduction)

ผ้าบาติกเป็นงานศิลปะที่ประสบความสำเร็จอย่างสูงสุดในชาว บาหลี ในช่วงศตวรรษที่ 13 ซึ่งการทำบาติกเป็นงานอดิเรกของสตรีชั้นสูง ปรากฏเป็นเครื่องแต่งกายเป็นครั้งแรกของคนชั้นสูง และนำไปใช้เป็นเครื่องแต่งกายของข้าราชการในราชสำนัก [1] บาติกเป็นงานหัตถศิลป์ที่มีกระบวนการผลิตหลายขั้นตอนก่อให้เกิดคุณค่าภูมิปัญญาท้องถิ่น การเขียนเทียนวาดลวดลาย และการลงสีบนผืนผ้าบาติกจำเป็นต้องอาศัยผู้ที่มีทักษะประสบการณ์ผนวกกับความคิดเชิงสร้างสรรค์ เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์สินค้าที่มีเอกลักษณ์สร้างเสน่ห์ดึงดูดนักท่องเที่ยวและเพิ่มมูลค่าเศรษฐกิจในพื้นที่ ในปัจจุบันกระบวนการผลิตผ้าบาติกยังไม่เปลี่ยนแปลงจากในอดีต ด้วยยังไม่มีเทคโนโลยีและนวัตกรรมที่เหมาะสมในการผลิต โดยเฉพาะขั้นตอนการเขียนเทียนลงบนผืนผ้าซึ่งยังคงใช้ปากกาจันตังแบบเดิม (Canting หรือ Tjanting) [2] ตักน้ำเทียนร้อนเพื่อนำมาเขียนเขียนตามลวดลายที่ร่างแบบไว้ และมักมีปัญหาระงืดตัวของน้ำเทียน ส่งผลให้เกิดการอุดตันและต้องเติมน้ำเทียนที่ร้อนบ่อยครั้ง ทำให้การทำงานไม่ต่อเนื่อง ใช้เวลานาน ผู้ประกอบการบาติกจึงต้องมีความอดทนในการทำงานเพื่อให้ได้ผ้าบาติกที่มีลวดลายสวยงามและคุณภาพสูง นอกจากนี้กระบวนการผลิตมักทำภายในบริเวณที่พักอาศัยและไม่มีระบบการจัดการด้านความปลอดภัยและด้านสุขภาพที่เหมาะสม ทำให้เกิดควันของเทียนบาติกกระจายไปทั่วพื้นที่ทำงาน ผู้ประกอบการผ้าบาติกจึงต้องสัมผัสหรือสูดดมควันเข้าไป ก่อให้เกิดปัญหาต่อสุขภาพในระยะยาว เช่น อาการระคายเคืองจมูก นอนไม่หลับ เหนื่อยล้า สมาธิสั้น บ้านหมุน เวียนศีรษะ [3-4] ระบบทางเดินหายใจและการเต้นของหัวใจที่ผิดปกติ [5] อีกทั้งการทำงานที่ต้องมีหม้อต้มเทียนบาติก อยู่ใกล้ในบริเวณเดียวกัน อาจเกิดอุบัติเหตุต่อผู้ประกอบการผ้าบาติกได้

คณะผู้วิจัยได้ประดิษฐ์ปากกาจันตังไฟฟ้าแบบพกพาและพัฒนาเทียนจากไขพาล์มซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้แทนเทียนบาติก เพื่อแก้ปัญหกระบวนการผลิตให้กับผู้ประกอบการบาติก มีลักษณะเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้ากึ่งอัตโนมัติที่อาศัยพลังงานไฟฟ้าในการหลอมละลายเทียนจากไขพาล์ม และออกแบบให้สะดวกต่อผู้ใช้งานในการเขียนเทียนบนผืนผ้าบาติกโดยสามารถปรับระดับความร้อนด้วยการปรับแรงดันไฟฟ้าที่แผงวงจรควบคุมแรงดันไฟฟ้า ทำให้การเขียนลวดลายบนผืนผ้ามีความต่อเนื่องและมีคุณภาพ ซึ่งการใช้งานร่วมกับเทียนจากไขพาล์มที่ได้รับการพัฒนาจะสามารถกันสลายวัสดุประเภทผ้าได้เทียบเท่ากับเทียนบาติก ไม่มีกลิ่นควันเทียนเนื่องจากการเผาไหม้ที่สะอาด และไม่มีกลิ่นน้ำมันจากการระเหยของสารพิษเหมือนกับเทียนบาติก [6] จึงมีความปลอดภัยในการใช้งาน ลดโอกาสการเกิดปัญหาสุขภาพ อีกทั้งสามารถหาซื้อได้ง่ายและลดต้นทุนการผลิตให้กับผู้ประกอบการบาติกได้

Drawing a better world for the future.



รูปที่ 1 ปากกาจันตังไฟฟ้าแบบพกพา



รูปที่ 2 วัสดุเหียนจากไขปาล์ม

การพัฒนานวัตกรรมหรือสิ่งประดิษฐ์มีแนวทางการดำเนินงานดังนี้ ขั้นตอนที่ 1 การออกแบบ (Design) เป็นการศึกษาข้อมูล แนวคิดทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อนำมาใช้ในการออกแบบแนวคิดในการพัฒนานวัตกรรมหรือสิ่งประดิษฐ์ โดยเริ่ม การร่างแบบโครงสร้าง/ผัง/ระบบ ของนวัตกรรมหรือสิ่งประดิษฐ์ การกำหนดกลุ่มตัวอย่าง/กลุ่มเป้าหมาย เครื่องมือที่ใช้ ในการประเมินความเหมาะสมและความเป็นไปได้ ขั้นตอนที่ 2 การสร้างหรือพัฒนานวัตกรรม (Development) ดำเนินการ จัดเตรียมวัสดุ/อุปกรณ์ และสร้างหรือพัฒนานวัตกรรม สิ่งประดิษฐ์ และปรับปรุงตามความคิดเห็นของผู้ประเมิน หรือผู้เชี่ยวชาญ และขั้นตอนที่ 3 การนำไปใช้และทดสอบหาประสิทธิภาพนวัตกรรม (Implement and performance test) โดยการทดลองใช้กับประชากร กลุ่มตัวอย่างหรือกลุ่มเป้าหมาย เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลและประเมินการทำงานของนวัตกรรม หรือสิ่งประดิษฐ์ ซึ่งการประเมินประสิทธิภาพสามารถพิจารณาได้จากนวัตกรรมหรือสิ่งประดิษฐ์นั้นสามารถแก้ปัญหา เช่น ลดต้นทุนการผลิต และสามารถเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์ตามที่กำหนดไว้หรือตามที่นิยามไว้ มีการเปรียบเทียบ ก่อนใช้ - หลังใช้ โดยคำนวณความแตกต่างออกมาเป็นร้อยละ และการเปรียบเทียบกับเกณฑ์ เช่น ลดเวลา ลดต้นทุน หรือลดแรงงาน รวมทั้งการหาค่าเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความคิดเห็นและความพึงพอใจ [7]

จากการที่คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการประดิษฐ์ปากกาจันตังไฟฟ้าแบบพกพาและพัฒนาเหียนจากไขปาล์มแล้ว จึงดำเนินการ ศึกษาวิจัยต่อในขั้นตอนการนำไปใช้และทดสอบหาประสิทธิภาพนวัตกรรม โดยมีวัตถุประสงค์ในการประเมินประสิทธิภาพ ความพึงพอใจ และต้นทุน การใช้งานปากกาจันตังไฟฟ้าแบบพกพาที่ประดิษฐ์ขึ้นร่วมกับแท่งเหียนไขปาล์ม และมีขอบเขต การศึกษาเป็นกลุ่มผู้ประกอบการบาติกในพื้นที่ภาคใต้ จำนวน 67 คน เพื่อนำไปสู่การพัฒนาและปรับปรุงประสิทธิภาพ การใช้งาน สามารถลดโอกาสการเกิดปัญหาสุขภาพจากกระบวนการผลิตแบบเดิม ลดต้นทุนด้านการผลิต สามารถสืบทอด การสร้างสรรค์ผลงานอัตลักษณ์ในพื้นที่ เพิ่มโอกาสและทางเลือกใหม่สำหรับผู้ประกอบการผ้าบาติกของประเทศ รองรับ ความเปลี่ยนแปลงที่รวดเร็วและการปรับตัวสู่สังคมยุคใหม่ตามแนวทางการพัฒนาเศรษฐกิจสีเขียว รวมทั้งให้ทันต่อ การแข่งขันในตลาด และก้าวสู่การเป็นซอฟต์แวร์ที่โดดเด่นของไทย

2. วิธีการวิจัย (Experimental methods)

2.1 ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

กลุ่มเป้าหมายที่ใช้ในการศึกษาวิจัย เป็นผู้ประกอบการที่ดำเนินการผลิตและจัดจำหน่ายผ้าบาติกในพื้นที่จังหวัด ปัตตานีและจังหวัดสตูล จำนวน 67 คน

2.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

2.2.1 แบบสอบถาม เพื่อประเมินในหัวข้อต่าง ๆ ดังนี้

2.2.1.1 การประเมินความเหมาะสมและความเป็นไปได้ แบ่งเป็น

- (1) แบบโครงสร้างของปากกาจันตึงไฟฟ้าแบบพกพา จำนวน 10 ข้อ
- (2) ระบบการใช้งานปากกาจันตึงไฟฟ้าแบบพกพา จำนวน 5 ข้อ
- (3) วัสดุแท่งเทียนจากไขปาล์ม จำนวน 5 ข้อ

2.2.1.2 การนำไปใช้และทดสอบหาประสิทธิภาพนวัตกรรม จำนวน 15 ข้อ

2.2.1.3 การเปรียบเทียบการใช้งานปากกาจันตึงไฟฟ้าแบบพกพากับจันตึงแบบเดิม แบ่งเป็น

- (1) การใช้งาน จำนวน 8 ข้อ
- (2) ผลกระทบต่อสุขภาพและความปลอดภัย จำนวน 5 ข้อ
- (3) ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม จำนวน 3 ข้อ

2.2.2 การกำหนดเกณฑ์การประเมินแต่ละรายการ มีระดับผลการประเมิน (Rating scale) และการแปลความหมาย จำนวน 5 ระดับ ดังนี้

ระดับ 5 ค่าเฉลี่ย 4.21-5.00 แปลความหมาย มากที่สุด

ระดับ 4 ค่าเฉลี่ย 3.41-4.20 แปลความหมาย มาก

ระดับ 3 ค่าเฉลี่ย 2.61-3.40 แปลความหมาย ปานกลาง

ระดับ 2 ค่าเฉลี่ย 1.81-2.60 แปลความหมาย น้อย

ระดับ 1 ค่าเฉลี่ย 1.00-1.80 แปลความหมาย น้อยที่สุด

2.2.3 ผืนผ้าที่วาดลวดลายมาตรฐาน สำหรับใช้ในการทดสอบการเขียนเทียนบาติกของผลิตภัณฑ์



รูปที่ 3 ผืนผ้าที่วาดลวดลายมาตรฐาน

2.3 การทดลองใช้งานและการเก็บรวบรวมข้อมูล

ดำเนินการวิจัยกับกลุ่มเป้าหมาย โดยใช้เครื่องมือวิจัยที่กำหนดไว้ และรวบรวมผลการวิจัย

2.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

โดยใช้สถิติเชิงพรรณนา (Descriptive statistics) ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ในการวิเคราะห์ข้อมูลผลการวิจัย

2.5 การอภิปรายผลและสรุปผลการดำเนินงาน

3. ผลและวิจารณ์ (Results and discussion)

กลุ่มเป้าหมาย จำนวน 67 คน ทำการทดลองใช้ปากกาจันตึงไฟฟ้าแบบพกพา เขียนเขียนลงบนผืนผ้าที่วาดลวดลายมาตรฐาน และดำเนินการทำแบบสอบถาม มีผลการประเมินในแต่ละหัวข้อดังนี้

3.1 ผลการประเมินความเหมาะสม และความเป็นไปได้

ผลการประเมินความเหมาะสมและความเป็นไปได้ของปากกาจันตึงไฟฟ้าแบบพกพา ในภาพรวมของหัวข้อเรื่อง โครงสร้างและระบบการใช้งานของปากกาจันตึงไฟฟ้าแบบพกพา และวัสดุแท่งเขียนไขปาล์ม พบว่า ระดับความคิดเห็นเกี่ยวกับความเหมาะสมภาพรวมอยู่ในระดับความเหมาะสมมาก ($\bar{x} = 4.16 \pm 0.88$) ระดับความคิดเห็นเกี่ยวกับความเป็นไปได้ภาพรวมอยู่ในระดับความเป็นไปได้มาก ($\bar{x} = 4.14 \pm 0.81$) โดยมีผลการประเมินในแต่ละหัวข้อเรื่องดังนี้

3.1.1 โครงสร้างปากกาจันตึงไฟฟ้าแบบพกพา

จากตารางที่ 1 พบว่า ระดับความคิดเห็นเกี่ยวกับความเหมาะสมของโครงสร้างปากกาจันตึงไฟฟ้าแบบพกพา ภาพรวมอยู่ในระดับความเหมาะสมมาก ($\bar{x} = 4.16 \pm 0.86$) โดยมีความคิดเห็นเกี่ยวกับความเหมาะสมมากที่สุดในเรื่องน้ำหนักเบา แข็งแรง รองลงมาเป็นเรื่องช่องเสียบแบตเตอรี่/ปลั๊กไฟ รูปร่างทันสมัย และสีของปากกาตามลำดับ ในส่วนของระดับความคิดเห็นเกี่ยวกับความเป็นไปได้ของโครงสร้างปากกาจันตึงไฟฟ้าแบบพกพา ภาพรวมอยู่ในระดับความเป็นไปได้มาก ($\bar{x} = 4.16 \pm 0.84$) โดยมีความคิดเห็นเกี่ยวกับความเป็นไปได้มากที่สุดในเรื่องสีของปากกา รองลงมาเป็นเรื่องช่องเสียบแบตเตอรี่/ปลั๊กไฟ และน้ำหนักเบา แข็งแรง ตามลำดับ

3.1.2 ระบบการใช้งานปากกาจันตึงไฟฟ้าแบบพกพา

จากตารางที่ 1 พบว่า ระดับความคิดเห็นเกี่ยวกับความเหมาะสมของระบบการใช้งานปากกาจันตึงไฟฟ้าแบบพกพา ภาพรวมอยู่ในระดับความเหมาะสมมาก ($\bar{x} = 4.14 \pm 0.95$) โดยมีความคิดเห็นเกี่ยวกับความเหมาะสมมากที่สุดในเรื่องความปลอดภัยในการใช้งาน และการต่อประกอบมีความสะดวก ในส่วนของระดับความคิดเห็นเกี่ยวกับความเป็นไปได้ของระบบการใช้งานปากกาจันตึงไฟฟ้าแบบพกพา ภาพรวมอยู่ในระดับความเป็นไปได้มาก ($\bar{x} = 4.12 \pm 0.82$) โดยมีความคิดเห็นเกี่ยวกับความเป็นไปได้มากที่สุดในเรื่องความปลอดภัยในการใช้งาน และความร้อนของบริเวณด้ามปากกาจันตึงไฟฟ้าแบบพกพาไม่มีความเหมาะสม

3.1.3 วัสดุแท่งเขียนจากไขปาล์ม

จากตารางที่ 1 พบว่า ระดับความคิดเห็นเกี่ยวกับความเหมาะสมของวัสดุแท่งเขียนจากไขปาล์ม ภาพรวมอยู่ในระดับความเหมาะสมมาก ($\bar{x} = 4.19 \pm 0.86$) โดยมีความคิดเห็นเกี่ยวกับความเหมาะสมมากที่สุดในเรื่องเกล็ดเขียนหลอมง่าย ทำให้ผลิตแท่งเขียนได้รวดเร็ว รองลงมาเป็นเรื่อง ขนาดของแท่งเขียนน้ำหนักพอเหมาะ และแม่พิมพ์แท่งเขียนมีขนาดเหมาะสม ตามลำดับ ในส่วนของระดับความคิดเห็นเกี่ยวกับความเป็นไปได้ของวัสดุแท่งเขียนจากไขปาล์ม ภาพรวมอยู่ในระดับความเป็นไปได้มาก ($\bar{x} = 4.14 \pm 0.77$) โดยมีความคิดเห็นเกี่ยวกับความเป็นไปได้มากที่สุดในเรื่องเกล็ดเขียนหลอมง่าย ทำให้ผลิตแท่งเขียนได้รวดเร็ว

ตารางที่ 1 ผลการประเมินความเหมาะสม (Propriety) และความเป็นไปได้ (Feasibility) ปากกาจันตึงไฟฟ้าแบบพกพา

รายการประเมิน	ความเหมาะสม (Propriety)		การแปลผล	ความเป็นไปได้ (Feasibility)		การแปลผล
	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	
ภาพรวมโครงสร้างและระบบการใช้งานของปากกาจันตึงไฟฟ้าแบบพกพาและวัสดุแท่งเขียน						
ผลการประเมินรวม	4.16	0.88	มาก	4.14	0.81	มาก

รายการประเมิน	ความเหมาะสม (Propriety)		การแปลผล	ความเป็นไปได้ (Feasibility)		การแปลผล
	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	
หัวข้อ 1 โครงสร้างของปากกาจันตึงไฟฟ้าแบบพกพา						
ผลการประเมินรวม หัวข้อ 1	4.16	0.86	มาก	4.16	0.84	มาก
1. รูปร่างทันสมัย	4.27	0.74	มากที่สุด	4.12	0.86	มาก
2. ขนาด พกพาสะดวก	4.19	0.83	มาก	4.12	0.86	มาก
3. ถนัดมือในขณะใช้งาน	3.85	1.04	มาก	3.93	0.89	มาก
4. น้ำหนักเบา แข็งแรง	4.40	0.69	มากที่สุด	4.25	0.80	มากที่สุด
5. ขนาดของช่องน้ำเขียนที่ส่วนหัวปากกา	3.88	0.92	มาก	4.04	0.82	มาก
6. ช่องใส่แท่งเทียน	4.21	0.76	มาก	4.19	0.76	มาก
7. ช่องเสียบแบตเตอรี่ USB TYPE C / ปลั๊กไฟ	4.33	0.80	มากที่สุด	4.27	0.86	มากที่สุด
8. การควบคุมอุณหภูมิ	4.06	0.94	มาก	4.18	0.85	มาก
9. ช่องระบายความร้อน	4.15	0.82	มาก	4.16	0.84	มาก
10. สีของปากกา	4.25	0.76	มากที่สุด	4.31	0.76	มากที่สุด
หัวข้อ 2 ระบบการใช้งาน						
ผลการประเมินรวม หัวข้อ 2	4.14	0.95	มาก	4.12	0.82	มาก
1. การต่อประกอบมีความสะดวก	4.37	0.77	มากที่สุด	4.16	0.78	มาก
2. ระยะเวลาของน้ำเขียนเหมาะสมในการเริ่มต้นใช้งาน	3.94	1.09	มาก	3.96	0.90	มาก
3. การไหลของน้ำเขียนต่อเนื่อง	3.70	1.04	มาก	3.99	0.92	มาก
4. ความร้อนของบริเวณด้ามปากกาเหมาะสม	4.21	0.86	มาก	4.22	0.75	มากที่สุด
5. มีความปลอดภัยในการใช้งาน	4.46	0.74	มากที่สุด	4.28	0.66	มากที่สุด
หัวข้อ 3 วัสดุแท่งเทียนจากไขปาล์ม						
ผลการประเมินรวม หัวข้อ 3	4.19	0.86	มาก	4.14	0.77	มาก
1. ขนาดของแท่งเทียนมีความเหมาะสม	4.15	0.83	มาก	4.15	0.72	มาก
2. ขนาดของแท่งเทียนน้ำหนักพอเหมาะ	4.25	0.78	มากที่สุด	4.16	0.78	มาก

รายการประเมิน	ความเหมาะสม (Propriety)		การแปลผล	ความเป็นไปได้ (Feasibility)		การแปลผล
	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	
3. ขนาดของแท่งเทียนมีความแข็งแรงพอเหมาะ	4.03	0.93	มาก	4.03	0.77	มาก
4. แก๊สดีเทียนหลอมง่าย ทำให้ผลิตแท่งเทียนได้รวดเร็ว	4.27	0.82	มากที่สุด	4.24	0.65	มากที่สุด
5. แม่พิมพ์แท่งเทียนมีขนาดเหมาะสม	4.22	0.89	มากที่สุด	4.12	0.87	มาก

3.2 ผลการประเมินประสิทธิภาพนวัตกรรม

จากตารางที่ 2 พบว่า ผลการประเมินประสิทธิภาพการใช้งานปากกาจันตึงไฟฟ้าแบบพกพาเขียนเทียนลงบนผืนผ้าในภาพรวมพบว่า ระดับความคิดเห็นเกี่ยวกับการใช้งานปากกาจันตึงไฟฟ้าแบบพกพามีประสิทธิภาพมากที่สุด ($\bar{x} = 4.27 \pm 0.78$) โดยมีความคิดเห็นเกี่ยวกับการใช้งานที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดในเรื่อง ไม่มีกลิ่นควันรบกวนขณะทำงานมีความปลอดภัยในการใช้งาน การต่อกับอุปกรณ์ชาร์จไฟฟ้าใช้งานได้ง่ายสะดวก เพิ่มปริมาณผลงาน/ผลิตภัณฑ์ ลดต้นทุนการผลิต ลดระยะเวลาการทำงาน การฝังตัวของเทียนบนเนื้อผ้า และความร้อนบริเวณด้ามจับปากกาพอไม่เป็นปัญหาในการใช้งาน ตามลำดับ

ตารางที่ 2 ผลการประเมินประสิทธิภาพการใช้งานปากกาจันตึงไฟฟ้าแบบพกพา

รายการประเมิน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	การแปลผล
ผลการประเมินรวม	4.27	0.78	มากที่สุด
1. ลดระยะเวลาการทำงาน	4.33	0.74	มากที่สุด
2. ลดแรงงาน	4.19	0.93	มาก
3. ลดต้นทุนการผลิต	4.36	0.80	มากที่สุด
4. เพิ่มปริมาณผลงาน/ผลิตภัณฑ์	4.36	0.75	มากที่สุด
5. การต่อกับอุปกรณ์ชาร์จไฟฟ้า ใช้งานได้ง่าย สะดวก	4.39	0.71	มากที่สุด
6. ระบบการควบคุมความร้อนของแท่งเทียน ใช้งานได้ง่าย สะดวก	4.19	0.80	มาก
7. ความร้อนบริเวณด้ามจับปากกาพอไม่เป็นปัญหาในการใช้งาน	4.24	0.75	มากที่สุด
8. มีความปลอดภัยในการใช้งาน	4.48	0.65	มากที่สุด
9. ไม่มีกลิ่น ควัน รบกวนขณะทำงาน	4.79	0.41	มากที่สุด
10. การควบคุมการเขียนเส้นเทียนทำได้ง่าย	4.16	0.82	มาก
11. เส้นเทียนที่ปรากฏมีความต่อเนื่อง	4.00	0.75	มาก
12. ระยะเวลาและการไหลตัวของเส้นเทียนเหมาะสม	4.03	0.79	มาก

รายการประเมิน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	การแปลผล
13. ขนาดเส้นเทียนที่ปรากฏสามารถกันสได้ดี	4.10	0.83	มาก
14. การฝังตัวของเทียนบนเนื้อผ้า	4.27	0.66	มากที่สุด
15. การผลิตแท่งเทียนทำได้ง่าย สะดวก รวดเร็ว	4.16	0.75	มาก

3.3 ผลการเปรียบเทียบการใช้งานปากกาจันตึงไฟฟ้าแบบพกพากับจันตึงแบบเดิม

ผลการเปรียบเทียบการใช้งานปากกาจันตึงไฟฟ้าแบบพกพากับจันตึงแบบเดิม ในภาพรวมทุกด้าน ได้แก่ ด้านการผลิตผลิตภัณฑ์ผ้าบาติก ด้านสุขภาพและความปลอดภัย และด้านสิ่งแวดล้อม พบว่า ปากกาจันตึงไฟฟ้าแบบพกพา มีการใช้งานที่ดีและเหมาะสมมากกว่าจันตึงแบบเดิม อย่างมีนัยสำคัญทาง สถิติที่ระดับ 0.05 โดยมีผลการประเมินในแต่ละด้านดังนี้

3.3.1 ด้านการผลิตผลิตภัณฑ์ผ้าบาติก

จากตารางที่ 3 ผลการประเมินรวม ในหัวข้อ 1 ด้านการผลิตผลิตภัณฑ์ผ้าบาติก พบว่า ปากกาจันตึงไฟฟ้าแบบพกพามีใช้งานที่เหมาะสมมากกว่าจันตึงแบบเดิม อย่างมีนัยสำคัญทาง สถิติที่ระดับ 0.05 แสดงว่าปากกาจันตึงไฟฟ้าแบบพกพาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตผ้าบาติกได้จริง ในรายการประเมินเรื่อง ความแม่นยำและความละเอียดของลวดลาย ความสะดวกในการเติมน้ำเทียน ความสามารถในการลดระยะเวลาในการผลิตผ้าบาติก ช่วยทุ่นแรงในการทำงานผลิตผ้าบาติกได้ มีความเหมาะสมต่อกลุ่มผู้สูงอายุ/เด็ก สามารถช่วยลดต้นทุนการผลิตผ้าบาติกได้ และประสิทธิภาพในการใช้งานในระยะยาว

3.3.2 ด้านสุขภาพและความปลอดภัย

จากตารางที่ 3 ผลการประเมินรวม ในหัวข้อ 2 ด้านสุขภาพและความปลอดภัย พบว่า ปากกาจันตึงไฟฟ้าแบบพกพาและจันตึงแบบเดิม มีการประเมินด้านนี้ไม่แตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทาง สถิติที่ระดับ 0.05 แสดงว่า การใช้งานปากกาจันตึงไฟฟ้าแบบพกพาไม่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพและให้ผลเทียบเท่ากับการใช้จันตึงแบบเดิมในด้านความปลอดภัย

3.3.3 ด้านสิ่งแวดล้อม

จากตารางที่ 3 ผลการประเมินรวม ในหัวข้อ 3 ด้านสิ่งแวดล้อม พบว่า ปากกาจันตึงไฟฟ้าแบบพกพามีใช้งานที่เหมาะสมมากกว่าจันตึงแบบเดิม อย่างมีนัยสำคัญทาง สถิติที่ระดับ 0.05 แสดงว่า ปากกาจันตึงไฟฟ้าแบบพกพาเป็นเทคโนโลยีที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่า ในรายการประเมินเรื่อง ลดการพึ่งพาสถูสัเคราะห์ที่ใช้ผลิตผ้าบาติก เช่น ปิโตรเคมี ลดของเสียในกระบวนการผลิตผ้าบาติก และความสะดวกในการทำความสะดวกผลิตภัณฑ์

ตารางที่ 3 ผลการประเมินการเปรียบเทียบการใช้งานปากกาจันตึงไฟฟ้าแบบพกพากับจันตึงแบบดั้งเดิม

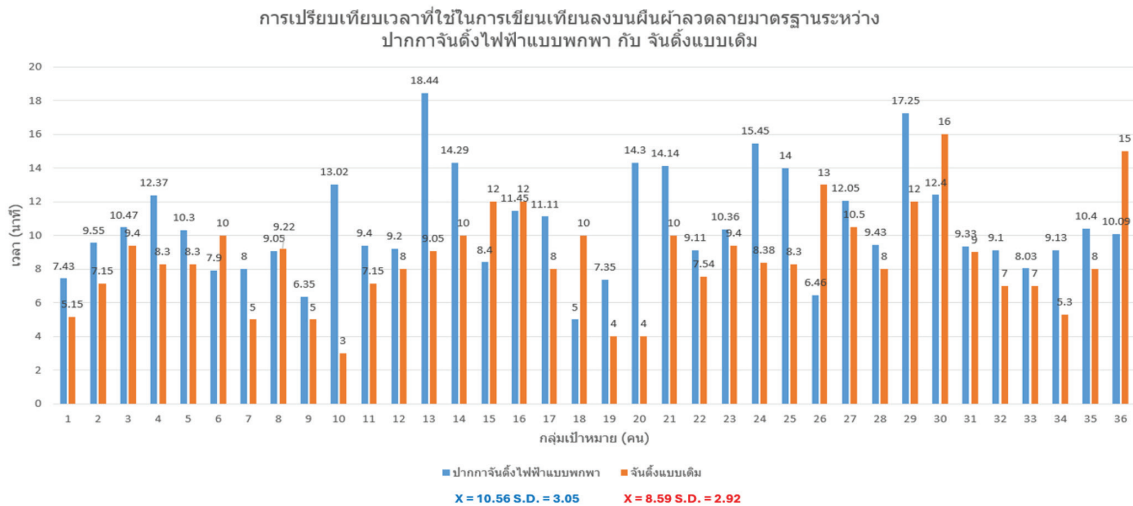
รายการประเมิน	การผลิตด้วยจันตึงแบบเดิม		การผลิตด้วยปากกาจันตึงไฟฟ้าแบบพกพา		ค่า t	ค่า sign	การแปลผล
	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน			
ภาพรวมการประเมินการเปรียบเทียบการใช้งานปากกาจันตึงไฟฟ้าแบบพกพากับจันตึงแบบดั้งเดิม							
ผลการประเมินรวม	3.84	1.03	4.29	0.85	5.96	0.000	แตกต่าง

รายการประเมิน	การผลิตด้วยจันตึงแบบเดิม		การผลิตด้วยปากกาจันตึงไฟฟ้าแบบพกพา		ค่า t	ค่า sign	การแปลผล
	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน			
หัวข้อ 1 ด้านการผลิตผลิตภัณฑ์ผ้าบาติก							
ผลการประเมินรวม หัวข้อ 1	3.93	0.95	4.36	0.73	4.02	0.000	แตกต่าง
1. ความแม่นยำและความละเอียดของลวดลาย	3.93	0.88	4.24	0.76	2.38	0.019	แตกต่าง
2. ความสะดวกในการเติมน้ำเขียน	3.93	0.97	4.32	0.75	3.03	0.003	แตกต่าง
3. ความสามารถในการลดระยะเวลาในการผลิตผ้าบาติก	3.97	0.87	4.37	0.78	2.99	0.004	แตกต่าง
4. ความสามารถในการลดขั้นตอนในการผลิตผ้าบาติก	4.09	0.85	4.36	0.77	1.94	0.057	ไม่แตกต่าง
5. ช่วยทุ่นแรงในการทำงานผลิตผ้าบาติกได้	3.97	0.95	4.42	0.78	3.27	0.002	แตกต่าง
6. เหมาะสมต่อกลุ่มผู้สูงอายุ/เด็ก	3.63	1.15	4.43	0.72	4.80	0.000	แตกต่าง
7. สามารถช่วยลดต้นทุนการผลิตผ้าบาติกได้	3.88	0.99	4.43	0.61	4.14	0.000	แตกต่าง
8. ประสิทธิภาพในการใช้งานในระยะยาว	4.00	0.98	4.33	0.70	2.37	0.021	แตกต่าง
หัวข้อ 2 ด้านสุขภาพและความปลอดภัย							
ผลการประเมินรวม หัวข้อ 2	3.79	1.11	4.06	1.07	1.86	0.067	ไม่แตกต่าง
1. ระดับความเมื่อยล้าของกล้ามเนื้อจากการใช้งาน	3.76	1.05	4.04	1.05	1.66	0.102	ไม่แตกต่าง
2. ความรู้สึกระคายเคืองจากความร้อนหรือการสัมผัสผลิตภัณฑ์	3.82	1.06	4.10	1.00	1.61	0.113	ไม่แตกต่าง
3. ระดับความสะดวกในการจับและควบคุมอุปกรณ์	3.88	1.01	4.01	1.02	0.86	0.393	ไม่แตกต่าง
4. กลิ่นน้ำมันจากเทียนที่ใช้ในการเขียนผ้าบาติกส่งผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจ เช่น การระคายเคืองหรือเกิดอาการแพ้	3.75	1.26	4.10	1.14	1.60	0.114	ไม่แตกต่าง
5. คิว้นที่เกิดจากเทียนที่ใช้ในการเขียนผ้าบาติกส่งผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจ เช่น การระคายเคืองหรือเกิดอาการแพ้	3.76	1.21	4.07	1.16	1.41	0.163	ไม่แตกต่าง
หัวข้อ 3 ด้านสิ่งแวดล้อม							
ผลการประเมินรวม หัวข้อ 3	3.66	1.04	4.48	0.66	6.88	0.000	แตกต่าง
1. ลดการพึ่งพาวัสดุสังเคราะห์ที่ใช้ผลิตผ้าบาติก เช่น ปิโตรเคมี	3.55	1.05	4.49	0.64	6.67	0.000	แตกต่าง
2. ลดของเสียในกระบวนการผลิตผ้าบาติก	3.66	1.05	4.45	0.70	5.84	0.000	แตกต่าง
3. ความสะดวกในการทำความสะอาดผลิตภัณฑ์	3.73	1.07	4.52	0.70	5.99	0.000	แตกต่าง

3.4 ผลการทดสอบการใช้งานปากกาจันตึงไฟฟ้าแบบพกพาเปรียบเทียบกับจันตึงแบบเดิม

จากแผนภูมิที่ 1 พบว่า กลุ่มเป้าหมาย จำนวน 36 คน มีการใช้งานจันตึงแบบเดิมในการเขียนเทียนลงบนผืนผ้าที่วาดลวดลายมาตรฐาน ด้วยเวลาเฉลี่ยที่น้อยกว่าการใช้ปากกาจันตึงไฟฟ้าแบบพกพา โดยมีเวลาเฉลี่ย 8.59 ± 2.92 นาที

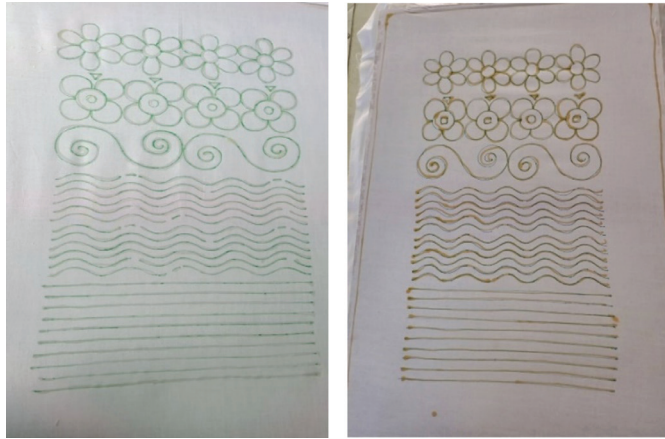
แผนภูมิที่ 1 การเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการเขียนเทียนลงบนผืนผ้าลวดลายมาตรฐานระหว่างปากกาจันตึงไฟฟ้าแบบพกพากับจันตึงแบบเดิม



และจากตารางที่ 4 พบว่า กลุ่มเป้าหมาย จำนวน 28 คน มีความพึงพอใจการใช้งานปากกาจันตึงไฟฟ้าแบบพกพาในระดับมากที่สุด ($\bar{x} = 4.25 \pm 0.65$) หรือคิดเป็นร้อยละ 85

ตารางที่ 4 ผลความพึงพอใจการทดสอบการใช้งานปากกาจันตึงไฟฟ้าแบบพกพา

กลุ่มเป้าหมาย	ระดับความพึงพอใจ (1 – 5) เรียงจากน้อยไปหามาก				
	1	2	3	4	5
จำนวน 28 คน	-	-	3	15	10
ค่าเฉลี่ย	4.25				
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.65				



ปากกาจันตึงไฟฟ้าแบบพกพา

จันตึงแบบดั้งเดิม

รูปที่ 4 เปรียบเทียบการใช้งานปากกาจันตึงไฟฟ้าแบบพกพากับจันตึงแบบดั้งเดิมบนผืนผ้าที่วาดลวดลายมาตรฐาน



รูปที่ 5 กลุ่มเป้าหมายร่วมทดสอบการใช้งานปากกาจันตึงไฟฟ้าแบบพกพา

3.5 ผลการวิเคราะห์ต้นทุนและข้อจำกัดการใช้งาน

3.5.1 ต้นทุนในกระบวนการผลิต

จากตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์ต้นทุนในกระบวนการผลิตผ้าบาติกในรายการการใช้พลังงาน วัสดุเทียน และเวลาการผลิต พบว่า การใช้ปากกาจันตึงไฟฟ้าแบบพกพาสามารถลดต้นทุนการผลิตได้มากกว่าการใช้จันตึงแบบเดิม โดยมีค่าใช้จ่ายที่เป็นค่าไฟในอัตรา 0.0225 บาทต่อชั่วโมง ทำให้ลดต้นทุนการใช้พลังงานได้ 155 เท่า และค่าเทียนจาก ไขปาล์ม 99 บาทต่อกิโลกรัม ช่วยลดต้นทุนวัสดุเทียนลงกว่าร้อยละ 36 รวมทั้งใช้เวลาในการผลิตในส่วนของการหลอม เท่งเทียนเพียง 3 – 5 นาที จึงลดระยะเวลาการผลิตผ้าบาติกลงถึงร้อยละ 40 ทำให้การผลิตได้รวดเร็วขึ้น

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์ต้นทุนในกระบวนการผลิต

กลุ่มเป้าหมาย	การเขียนเทียน			
	จันตึงแบบเดิม		ปากกาจันตึงไฟฟ้าแบบพกพา	
การใช้พลังงาน	ค่าแก๊ส	3.50 บาทต่อชั่วโมง	ค่าไฟ	0.0225 บาทต่อชั่วโมง
วัสดุเทียน	เทียนบาติก	190 บาทต่อกิโลกรัม	เทียนจากไขปาล์ม	99 บาทต่อกิโลกรัม
เวลาการผลิต	ต้มเทียน	20 - 60 นาที	หลอมเท่งเทียน	3 - 5 นาที

3.5.2 ข้อจำกัดด้านการใช้งาน

ปากกาจันตึงไฟฟ้าแบบพกพา สร้างความสะดวกและมีความคล่องตัวในการใช้งาน เนื่องจากไม่ต้องมีการต็มเทียนในหม้อต็มเทียน อีกทั้งยังสามารถลดการเกิดอุบัติเหตุเนื่องจากการต็มเทียนในสถานที่ใกล้กับผู้เขียนเทียน แต่ยังคงต้องพัฒนาต่อไปเพื่อให้เกิดความเหมาะสมกับการใช้งานและมีประสิทธิภาพดีขึ้น ในส่วนของแท่งเทียนไขปาล์ม เป็นวัสดุธรรมชาติ ขณะใช้งานไม่มีกลิ่นและควันที่อันตรายต่อสุขภาพ มีความปลอดภัยกว่าเทียนบาติซึ่งเป็นวัสดุสังเคราะห์จากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี ซึ่งในขณะใช้งานจะมีกลิ่นและควันที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพในระยะยาว อีกทั้งแท่งเทียนไขปาล์ม หาซื้อได้ง่ายและมีราคาถูกกว่าเทียนบาติ ทั้งนี้อาจพัฒนาขนาดของแท่งเทียนไขปาล์มให้มีความยาวเพิ่มเพื่อให้สามารถใช้งานได้ต่อเนื่องและยาวนานขึ้น

3.6 การอภิปรายผล

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการใช้งานปากกาจันตึงไฟฟ้าแบบพกพาร่วมกับแท่งเทียนไขปาล์ม สำหรับเขียนเทียนบนผืนผ้าบาติ ซึ่งผลการวิจัยสามารถนำมาอภิปรายผลได้ดังนี้ ด้านความเหมาะสมและความเป็นไปได้ พบว่า กลุ่มเป้าหมายให้ความสำคัญมากที่สุดในเรื่องน้ำหนักเบาแข็งแรงของโครงสร้าง ความปลอดภัยของระบบการใช้งานของปากกาจันตึงไฟฟ้าแบบพกพา และเรื่องกลิ่นดีเยี่ยมหลอมง่ายทำให้ผลิตแท่งเทียนได้รวดเร็ว ด้านประสิทธิภาพของนวัตกรรม พบว่า กลุ่มเป้าหมายมีความเห็นว่าประสิทธิภาพการใช้งานปากกาจันตึงไฟฟ้าแบบพกพาร่วมกับแท่งเทียนไขปาล์มมีประสิทธิภาพมากที่สุดในเรื่องไม่มีกลิ่น ควัน รบกวนขณะทำงาน การเปรียบเทียบการใช้งานปากกาจันตึงไฟฟ้าแบบพกพาและแบบเดิม พบว่า ด้านการผลิตผลิตภัณฑ์ผ้าบาติ ปากกาจันตึงไฟฟ้าแบบพกพาให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าเกือบทุกรายการที่ใช้ในการประเมิน โดยเฉพาะด้านประสิทธิภาพการผลิต ความแม่นยำ และความเหมาะสมในการใช้งาน ด้านสุขภาพและความปลอดภัย พบว่ายังไม่มียังไม่มีผลต่อความเมื่อยล้า หรือความร้อนที่สัมผัสอย่างแตกต่างจากจันตึงแบบเดิม และด้านสิ่งแวดล้อม มีข้อได้เปรียบเด่นชัดในเรื่องการลดของเสีย และความสะดวกในการดูแลรักษา สำหรับการทดสอบการใช้งานปากกาจันตึงไฟฟ้าแบบพกพาและแบบเดิม ในการเขียนเทียนลงบนผืนผ้ามาตรฐาน พบว่า กลุ่มเป้าหมายใช้เวลาในการเขียนเทียนด้วยปากกาจันตึงไฟฟ้าแบบพกพานานกว่าการใช้จันตึงแบบเดิมเล็กน้อย ซึ่งอาจเป็นเพราะเริ่มการใช้งานในครั้งแรก จึงไม่มีความถนัดในการใช้งานและไม่คุ้นเคยกับระบบการควบคุมอุณหภูมิหลอมเทียนของปากกาจันตึงไฟฟ้าแบบพกพา การวิเคราะห์ต้นทุนและข้อจำกัดการใช้งาน พบว่า การใช้งานปากกาจันตึงไฟฟ้าแบบพกพาร่วมกับแท่งเทียนไขปาล์ม สามารถลดต้นทุนค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิงและค่าวัสดุเทียน รวมทั้งลดระยะเวลาการผลิตได้ การใช้งานยังมีความสะดวกคล่องตัวเพิ่มขึ้น มีความปลอดภัยในการทำงาน และวัสดุเทียนสามารถจัดซื้อได้ง่าย ซึ่งในอนาคตหากผู้ประกอบการบาติของประเทศมีการใช้งานปากกาจันตึงไฟฟ้าแบบพกพาร่วมกับแท่งเทียนไขปาล์มจะทำให้คุณภาพชีวิตดีขึ้น สามารถยกระดับผลิตภัณฑ์ผ้าบาติ พัฒนาศักยภาพให้กับผู้ประกอบการในการผลิตสินค้าเชิงสร้างสรรค์ เพิ่มมูลค่าและสร้างรายได้มากขึ้น

4. สรุป (Conclusion)

ปากกาจันตึงไฟฟ้าแบบพกพาและแท่งเทียนไขปาล์ม มีประสิทธิภาพการใช้งานเขียนเทียนบนผืนผ้าบาติ โดยภาพรวมมีระดับความเหมาะสมและความเป็นไปได้มาก ในเรื่องโครงสร้างและระบบการใช้งานของปากกาจันตึงไฟฟ้าแบบพกพารวมทั้งการนำวัสดุไขปาล์มมาใช้เป็นแท่งเทียน การใช้งานมีประสิทธิภาพในภาพรวมระดับมากที่สุด ทั้งในเรื่องไม่มีกลิ่น ควัน รบกวนขณะทำงาน มีความปลอดภัย สามารถต่อกับอุปกรณ์ชาร์จไฟฟ้า ใช้งานได้ง่าย สะดวก ทำให้เพิ่มปริมาณการผลิต และสามารถลดต้นทุนการผลิตได้ เมื่อเปรียบเทียบการใช้งานกับจันตึงแบบเดิม พบว่า การใช้ปากกาจันตึงไฟฟ้าแบบพกพามีศักยภาพสูงในการพัฒนาอุตสาหกรรมผ้าบาติเชิงนวัตกรรม ช่วยยกระดับคุณภาพการผลิต ลดผลกระทบสิ่งแวดล้อม และส่งเสริมการใช้เทคโนโลยีที่เหมาะสมกับผู้ประกอบการรายย่อยและกลุ่มชุมชน ในส่วนของการทดสอบการใช้งานจริง พบว่า ปากกาจันตึงไฟฟ้าแบบพกพาใช้เวลาการเขียนเทียนนานกว่าการใช้จันตึงแบบเดิมเล็กน้อย ซึ่งเป็นเพราะเริ่มใช้งานในครั้งแรก จึงไม่มีความถนัดในการใช้งานและไม่คุ้นเคยกับระบบการควบคุมอุณหภูมิหลอมเทียนของปากกาจันตึงไฟฟ้า

แบบพกพา ผลวิเคราะห์ความพึงพอใจต่อการใช้งานโดยรวมอยู่ในระดับมากที่สุด ($\bar{x} = 4.25 \pm 0.65$) หรือคิดเป็นร้อยละ 85 การวิเคราะห์ต้นทุนและข้อจำกัดในการเขียนเทียนโดยปากกาจันตึงไฟฟ้าแบบพกพา พบว่า โดยสามารถลดต้นทุนการใช้งานได้ถึง 155 เท่า ลดต้นทุนวัสดุลงกว่าร้อยละ 36 และลดระยะเวลาการผลิตผ้าบาติกลงถึงร้อยละ 40 นอกจากนี้ยังลดข้อจำกัดด้านแรงงาน ช่วยให้เกิดความสะดวก เพิ่มความปลอดภัยจากการทำงานของผู้ประกอบการ เป็นการเปิดโอกาสสำหรับคนรุ่นใหม่ให้เข้ามามีส่วนร่วมในงานหัตถศิลป์ นอกจากนี้ยังช่วยลดปัจจัยเสี่ยงด้านสุขภาพที่อาจส่งผลกระทบต่อในระยะยาว

ในการดำเนินงานวิจัยมีข้อจำกัดในการนำหัวปากกาจันตึงมาประกอบเป็นแท่งปากกาสำหรับใช้ไฟฟ้าในการหลอมแท่งเทียน เนื่องจากประเทศไทยไม่มีการผลิตปากกาจันตึงเพื่อจำหน่าย ร้านค้าที่จำหน่ายวัสดุและอุปกรณ์สำหรับผลิตภัณฑ์บาติกจำเป็นต้องนำเข้าจากประเทศอินโดนีเซียและมาเลเซีย ซึ่งมีราคาแพงและไม่มีการสต็อกสินค้าไว้ในจำนวนมาก ทำให้ใช้เวลาการสั่งซื้อค่อนข้างนาน คณะผู้วิจัยจึงดำเนินการออกแบบและผลิตหัวปากกาจันตึงโดยใช้ท่อทองแดงซึ่งมีจำหน่ายได้ในประเทศมาดัดแปลงประยุกต์ใช้งานแทน และได้ทดสอบประสิทธิภาพการใช้งานแล้วพบว่าสามารถใช้งานได้ดี ทั้งนี้ปากกาจันตึงไฟฟ้าแบบพกพา สามารถใช้งานสร้างสรรค์ได้กับผลิตภัณฑ์อื่น ๆ เช่น กระดาษ เซรามิก แก้ว ผลิตภัณฑ์ผ้าเขียนเทียนของภาคเหนือ เป็นต้น ดังนั้นจึงเป็นอุปกรณ์ที่ประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย สร้างมูลค่าเพิ่มในผลิตภัณฑ์สร้างสรรค์กระตุ้นจินตนาการของคนรุ่นใหม่ให้สามารถสร้างสรรค์ผลงานได้อย่างไม่จำกัด

5. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

ผู้นิพนธ์บทความวิจัยขอขอบคุณบุคลากรสถาบันวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีชุมชน กรมวิทยาศาสตร์บริการ ที่ให้ความร่วมมือสนับสนุนงานวิจัยนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] นฤมล ปิ่นวิสุทธิ. สร้างสรรค์งานศิลปะบนผืนผ้า (มัดย้อม-บาติก). กรุงเทพฯ: โอเดียนสโตร์; 2555.
- [2] วินัย อุดมทรัพย์. การทำผ้าบาติก. วารสารวิชาการสถาปัตยกรรมและศิลปกรรม สถาบันเทคโนโลยีเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2547;4(1):45-54.
- [3] Agency for Toxic Substances and Disease Registry. Public health statement for toluene [Internet]. 2015 [cited 2025 Jan 31]. Available from: <https://www.atsdr.cdc.gov/ToxProfiles/tp56-c1-b.pdf>
- [4] Vincentius NS, Setyaningrum CTS, Sutarni S. Prevalensi vertigo pada pembatik di Kecamatan Lendah, Kabupaten Kulon Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta [Undergraduate thesis]. Yogyakarta: Universitas Gadjah Mada; 2018.
- [5] Kurnia SAN, Hardian STA. Hubungan antara paparan asap pembakaran lilin batik dengan gambaran EKG pengrajin batik tulis. Media Medika Muda. 2015;4(4):1484-94.
- [6] PetroNaft Co. How to increase candle wax melting point? [Internet]. 2025 [cited 2025 Oct 9]. Available from: https://www.petronaftco.com/increase-candle-wax-melting-point/?utm_source=chatgpt.com
- [7] สถาบันการอาชีวศึกษาภาคเหนือ 3, อาชีวศึกษาบัณฑิต. คู่มือการเขียนรายงานและการจัดพิมพ์รายงานการวิจัยสำหรับอาจารย์และนักศึกษาระดับปริญญาตรี หลักสูตรเทคโนโลยีบัณฑิต (ทล.บ.). พิษณุโลก: สถาบันการอาชีวศึกษาภาคเหนือ 3; 2564.

การศึกษาความชื้นสมดุลและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของสมุนไพรฟ้าทะลายโจร

The study of equilibrium moisture content and mathematical of *Andrographis paniculate* herb

จินตนา แสนสุข¹, สราวุธ นิยมเนียร^{2*}Jintana Sansuk¹, Sarawut Nabnean^{2*}

รับบทความ 24 เมษายน 2568 แก้ไขบทความ 25 กรกฎาคม 2568 ยอมรับตีพิมพ์ 1 สิงหาคม 2568

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาความชื้นสมดุลของสมุนไพรฟ้าทะลายโจร ใช้ตัวอย่างสมุนไพรฟ้าทะลายโจรที่ปลูกในจังหวัดลพบุรี โดยใช้อุปกรณ์ 3 ชุด ได้แก่ ตู้อบไฟฟ้าควบคุมอุณหภูมิที่ติดตั้งขดลวดให้ความร้อนด้วยไฟฟ้าขนาด 1,500 วัตต์ กล้องบรรจุตัวอย่าง มีฝาปิดป้องกันอากาศไหลผ่าน จำนวน 6 กล้อง แต่ละกล้องบรรจุสารละลายเกลืออิ่มตัวเพื่อควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่อยู่ภายในกล้อง อุณหภูมิของอากาศที่ใช้ในการทดลองสำหรับหาค่าความชื้นสมดุลของสมุนไพรฟ้าทะลายโจร เท่ากับ 30 °C, 40 °C และ 50 °C มีค่าวอเตอร์แอกทิวิตี ระหว่าง 0.112 – 0.966 จะได้กราฟ sorption ไอโซเทอม มีความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่าวอเตอร์แอกทิวิตี จากนั้นได้ศึกษาหาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างค่าความชื้นสมดุลกับค่าวอเตอร์แอกทิวิตี ทำการเปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 6 แบบจำลอง จากผลการทดลอง พบว่า แบบจำลอง Modified Halsey มีสมรรถนะที่ดีที่สุดสำหรับอธิบายความชื้นสมดุลของสมุนไพรฟ้าทะลายโจร โดยมีค่า R² เฉลี่ยเท่ากับ 0.992 และมีค่า RMSD และ MBD เท่ากับ 8.667% และ 1.190% ตามลำดับ

คำสำคัญ: ความชื้นสมดุล, ค่าวอเตอร์แอกทิวิตี, สมุนไพรฟ้าทะลายโจร, ความชื้นสัมพัทธ์, แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

¹สาขาวิทยาศาสตร์ศึกษา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี อำเภอเมือง จังหวัดลพบุรี 15000 ประเทศไทย

²สาขาวิชาวิทยาศาสตร์วิชาเอกฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี อำเภอเมือง จังหวัดลพบุรี 15000 ประเทศไทย

Abstract

This research investigates the equilibrium moisture content of *Andrographis paniculata*. The samples used in this research were *Andrographis paniculata* plants cultivated in Lopburi Province. Three sets of equipment. The setup includes an electric oven with a 1,500 att electric heater, six airtight sample containers to prevent air exchange, each containing a saturated salt solution to control the relative humidity inside the containers. The air temperatures used in the experiments to determine the equilibrium moisture content of *Andrographis paniculata* were 30 °C, 40 °C, and 50 °C, with water activity values ranging 0.112 – 0.966. The sorption isotherm curves obtained displayed an inverse relationship with temperature at constant water activity. Subsequently, the mathematical relationship between the equilibrium moisture content and water activity was studied. Six mathematical models were compared. The results revealed that the Modified Halsey model showed the best fit to the experimental data in describing the equilibrium moisture content of *Andrographis paniculata*, with an average R^2 value of 0.992, and RMSD and MBD are 8.667% and 1.190% respectively.

Keywords: Equilibrium moisture content, Water activity, *Andrographis paniculata*, Relative humidity, Mathematical models

¹Division of Science Education, Faculty of Science and Technology, Thepsatri Rajabhat University, Lopburi 15000, Thailand

²Division of Science, Major in Physics, Faculty of Science and Technology, Thepsatri Rajabhat University, Lopburi 15000, Thailand

*Corresponding author e-mail address: sarawut.n@lawasri.tru.ac.th

1. บทนำ (Introduction)

ประเทศไทยเป็นประเทศที่ประชากรส่วนใหญ่ประกอบอาชีพเกษตรกรรม ทำให้มีผลผลิตทางการเกษตรจำนวนมาก ทั้งผัก ผลไม้ และสมุนไพร เนื่องจากตั้งอยู่ในภูมิประเทศ และมีภูมิอากาศเอื้ออำนวยต่อการเจริญเติบโตของพืชสมุนไพร [1] ซึ่งผลผลิตที่ได้มีทั้งนำมาบริโภคสด นำไปแปรรูปเพื่อยืดอายุผลผลิต และเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับผลผลิตนั้น ๆ ผลผลิตทางการเกษตรมักประสบปัญหาการเสื่อมคุณภาพหรือเน่าเสียภายหลังการเก็บเกี่ยว หากไม่ได้รับการจัดการอย่างเหมาะสม เนื่องจากมีความชื้นสูง เกษตรกรจึงนำผลผลิตมาแปรรูปโดยการตากแห้ง ซึ่งเป็นทางเลือกหนึ่งสามารถทำได้ตั้งแต่ระดับครัวเรือน ไปจนถึงระดับอุตสาหกรรม แต่การตากแห้งมีข้อเสียคือ ปัญหาในเรื่องของการปนเปื้อนของฝุ่นละออง แมลง หรือนกที่มากทำลายผลิตภัณฑ์ ซึ่งจะส่งผลเสียต่อผลิตภัณฑ์เป็นอย่างมาก [2]

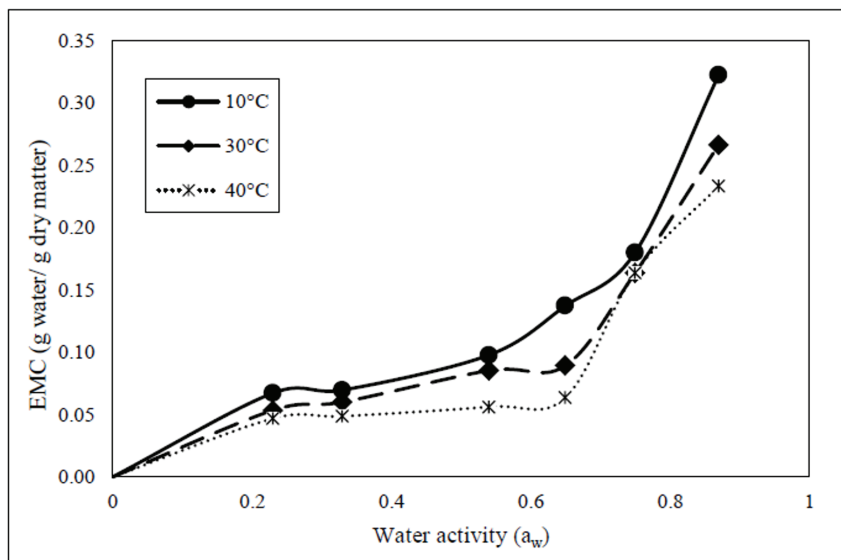
ในช่วงสถานการณ์การแพร่ระบาดของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 (COVID-19) มีการนำสมุนไพรฟ้าทะลายโจรมาช่วยในการรักษา [3-5] เนื่องจากฟ้าทะลายโจรเป็นสมุนไพรที่ถูกบรรจุอยู่ในบัญชียาหลักแห่งชาติ เป็นสมุนไพรที่มีความต้องการตามแผนแม่บทแห่งชาติ เป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน [1] ในบางพื้นที่จึงมีการปลูกสมุนไพรฟ้าทะลายโจรเป็นจำนวนมาก ซึ่งในจังหวัดลพบุรี มีการปลูกสมุนไพรแบบเกษตรอินทรีย์ ณ ไร่นาพรสวรรค์กว่า 70 ไร่ ให้เกษตรกรจำนวน 25 ราย ปลูกสมุนไพร 2 ชนิด คือ ฟ้าทะลายโจร และขมิ้นชัน เพื่อผลิตวัตถุดิบสมุนไพรที่มีคุณภาพสำหรับผลิตยาสมุนไพร เมื่อเก็บเกี่ยวผลผลิตตากแห้ง จากนั้นนำไปเก็บไว้ในโรงเรือน ซึ่งยังไม่มีข้อมูลชัดเจนเกี่ยวกับระยะเวลาการจัดเก็บที่เหมาะสม ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อความเสี่ยงของการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ จึงส่งผลให้ผลผลิตเกิดความเสียหายไม่สามารถจำหน่ายได้ และยังมีข้อมูลเชิงวิชาการเกี่ยวกับความชื้นที่เหมาะสมต่อการจัดเก็บสมุนไพรฟ้าทะลายโจร

วัตถุประสงค์หลักของการอบแห้ง คือ ลดความชื้นเพื่อรักษาคุณสมบัติทางยาของสมุนไพร และเพื่อรักษาวัตถุดิบไว้เป็นระยะเวลานาน [6] ความชื้นจะมีผลมากที่สุดต่อการเก็บรักษาผลผลิตจากสมุนไพร คุณภาพสมุนไพรที่เก็บรักษาไว้นั้นอยู่กับความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นสมดุล (Equilibrium moisture content, EMC) ของผลิตภัณฑ์นั้น และค่าวอเตอร์แอกทิวิตี (Water activity, a_w) [6]

1.1 ความชื้นสมดุล

ผลผลิตทางการเกษตรจัดเป็นวัสดุประเภทไฮโกรสโคปิก (Hygroscopic) [7] โดยมีสมบัติดูดและคายความชื้นจากอากาศบริเวณโดยรอบ ด้วยกระบวนการถ่ายเทความชื้นระหว่างวัสดุทางการเกษตรกับอากาศโดยรอบ จนกระทั่งมีความดันไอของวัสดุทางการเกษตรเท่ากับค่าความดันไอของอากาศ จึงหยุดการถ่ายเทความชื้น เรียกสภาวะสมดุลกับอากาศแวดล้อมนี้ว่า ความชื้นสมดุล [8]

ความชื้นสมดุลจะแปรผันตามอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศโดยรอบวัสดุนั้น นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุอีกด้วย [6] ถ้านำความชื้นสมดุลมาเขียนกราฟกับความชื้นสัมพัทธ์ที่อุณหภูมิคงที่ จะได้กราฟซอร์ปชันไอโซเทอม (Sorption isotherm) [7] โดยเส้นอุณหภูมิสูงจะอยู่ล่างสุด ดังรูปที่ 1 ไอโซเทอมการดูดซับความชื้นของใบหูกเห็บเทศ (*C. alata*) แสดงลักษณะเป็นแบบ Sigmoid ซึ่งจัดอยู่ในประเภทไอโซเทอมของ Brunauer, Emmet และ Teller (BET) ประเภทที่ II ไอโซเทอมประเภทที่ II และ III นั้น มักพบในผลผลิตทางการเกษตร การอบแห้งจะมีประสิทธิภาพสูงสุด เมื่อทราบความชื้นสมดุล ซึ่งเป็นตัวแปรที่สำคัญในการกำหนดสภาวะของอากาศแวดล้อมขณะนั้น ความชื้นสมดุลของผลผลิตทางการเกษตรส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับชนิดของผลผลิต อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ [8-9] ประเทศต่าง ๆ จึงมีงานวิจัยเกี่ยวกับความชื้นสมดุลกับผลผลิตทางการเกษตรเพื่อประโยชน์ในทางเศรษฐกิจ



รูปที่ 1 ผลของอุณหภูมิต่อไอโซเทอมการดูดซับความชื้นของใบชุมเห็ดเทศ (*C. alata*) ที่ผ่านการอบแห้ง [6]

สำหรับประเทศไทย มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาค่าความชื้นสมดุลของผลผลิตทางการเกษตรมีจำนวนไม่มาก โดยเฉพาะการหาความชื้นสมดุลของสมุนไพรฟ้าทะลายโจร ซึ่งมีความสำคัญในทางการแพทย์ที่ช่วยในการรักษาผู้ป่วยโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 มีการนำมาใช้เป็นส่วนหนึ่งในการรักษาผู้ป่วย ทั้งนี้ จากการศึกษาข้อมูลเบื้องต้นพบว่า ยังไม่มีงานวิจัยใดที่รายงานค่าความชื้นสมดุลของสมุนไพรฟ้าทะลายโจร ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ คือ 1) เพื่อศึกษาความชื้นสมดุลของสมุนไพรฟ้าทะลายโจร และ 2) เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ของตัวแปรต่าง ๆ เพื่อหาแบบจำลองที่เหมาะสมกับสมุนไพรฟ้าทะลายโจร

ซึ่งผลการศึกษานี้จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการควบคุมกระบวนการอบแห้ง และกำหนดสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมในการจัดเก็บสมุนไพร เพื่อคงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ และยืดอายุการเก็บรักษาให้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในทางการแพทย์และเชิงอุตสาหกรรมได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2. วิธีการวิจัย (Experimental methods)

2.1 การเตรียมตัวอย่างสมุนไพรฟ้าทะลายโจร

ในการศึกษาครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ดำเนินการทดลองเพื่อหาค่าความชื้นสมดุลของสมุนไพรฟ้าทะลายโจรที่คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี อำเภอเมือง จังหวัดลพบุรี โดยใช้ตัวอย่างสมุนไพรฟ้าทะลายโจรที่ปลูกในพื้นที่อำเภอเมือง จังหวัดลพบุรี การเตรียมตัวอย่างใช้สมุนไพรฟ้าทะลายโจรทั้งต้น ซึ่งประกอบด้วยส่วนของใบ ลำต้น และกิ่ง นำมาทำความสะอาดด้วยน้ำสะอาด เพื่อขจัดสิ่งสกปรกหรือสารปนเปื้อนที่อาจมีอยู่ แล้วผึ่งให้สะเด็ดน้ำในอุณหภูมิห้อง ก่อนทำการชั่งมวลเริ่มต้นของตัวอย่างแต่ละชุด โดยใช้ตัวอย่างสมุนไพรฟ้าทะลายโจรในปริมาณ 15 กรัมต่อหน่วยทดลอง

2.2 การใช้สารละลายเกลือควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ

ผู้วิจัยได้เตรียมสารละลายเกลืออิ่มตัวโดยนำสารแต่ละชนิดมาละลายน้ำ พร้อมให้ความร้อนและกวนสารละลายอย่างสม่ำเสมอด้วยเครื่องให้ความร้อนและกวนสาร (Hot plate stirrer) โดยควบคุมอุณหภูมิของสารละลายให้คงที่ที่ 30 °C, 40 °C และ 50 °C ตามลำดับ เพื่อให้ได้สารละลายเกลืออิ่มตัวในแต่ละระดับอุณหภูมิที่ต้องการ เมื่อได้สารละลายเกลืออิ่มตัวแล้ว จึงนำไปบรรจุในภาชนะปิดสนิทชนิดซูเปอร์ล็อก (Super lock) และจัดวางตะแกรงไว้เหนือผิวหน้าของสารละลาย ผิวหน้าของสารละลายโดยตรง แล้วปิดฝาภาชนะซูเปอร์ล็อก (Super lock) ให้สนิท เพื่อป้องกันการแลกเปลี่ยนอากาศกับสภาพแวดล้อมภายนอก

การควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศขณะทำการทดลอง เราสามารถใช้สารละลายกรด หรือสารละลายเกลืออิมิตัวได้ กรดซัลฟูริก และกรดไฮโดรคลอริก ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ สามารถควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศได้ระหว่าง 0 – 100% [11] แต่โดยทั่วไปไม่นิยมใช้กรด เพราะอันตรายมากกว่าการใช้สารละลายเกลืออิมิตัว ความชื้นสัมพัทธ์มีการเปลี่ยนแปลงในขณะที่ทำการทดลอง และการใช้สารละลายเกลืออิมิตัวสามารถควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ได้ดีกว่าสารละลายกรดเพราะความชื้นสัมพัทธ์เหนือสารละลายไม่เปลี่ยนแปลงในขณะที่ทำการทดลอง ซึ่งสามารถเลือกใช้เกลือชนิดต่าง ๆ ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ได้ระหว่าง 10 – 97% หรือค่าวอเตอร์แอกทิวิตี อยู่ในช่วง 0.112 – 0.9660 ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงรายชื่อเกลือและค่าวอเตอร์แอกทิวิตีที่ได้จากสารละลายอิมิตัวของเกลือที่อุณหภูมิต่าง ๆ [12]

สารละลายเกลือ	ค่าวอเตอร์แอกทิวิตี		
	อุณหภูมิ 30 °C	อุณหภูมิ 40 °C	อุณหภูมิ 50 °C
LiCl	0.112	0.112	0.112
MgCl ₂ ·6H ₂ O	0.328	0.321	0.314
Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	0.520	0.492	0.463
NaCl	0.756	0.754	0.745
KNO ₃	0.907	0.879	0.850
K ₂ SO ₄	0.966	0.962	0.958

2.3 การหาค่าความชื้นสมดุลของสมุนไพรฟ้าทะลายโจร

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ศึกษาหาค่าความชื้นสมดุลของสมุนไพรฟ้าทะลายโจรด้วยวิธีการทดลองแบบสมดุลนิ่ง (Static method) คือ วิธีการหาความชื้นสมดุลของวัสดุ โดยใช้ภาชนะแบบปิดควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ภายในด้วยสารละลายเกลืออิมิตัว แล้วสังเกตการเปลี่ยนแปลงของมวลตัวอย่างวัสดุเป็นระยะโดยการนำไปชั่งน้ำหนัก จนกระทั่งน้ำหนักของวัสดุคงที่ ซึ่งภาวะดังกล่าวถือว่าเป็นสภาวะสมดุล ประกอบด้วยขั้นตอนดังนี้

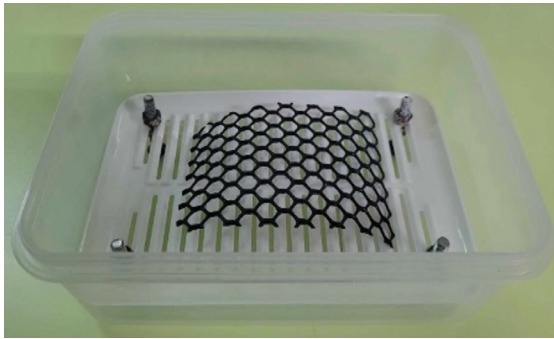
2.3.1 นำสมุนไพรฟ้าทะลายโจร ทั้งต้นที่ชั่งน้ำหนักก่อนการทดลองไปใส่ในภาชนะแบบปิดหรือกล่องซูเปอร์ล็อก (Super lock) โดยทำตะแกรงไว้ด้านบนสำหรับวางตัวอย่าง (ดังรูปที่ 2) สารละลายเกลืออิมิตัวอยู่ด้านล่าง ไม่ให้ตัวอย่างสมุนไพรฟ้าทะลายโจรสัมผัสกับสารละลายเกลืออิมิตัว

2.3.2 ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์โดยใช้สารละลายเกลืออิมิตัว จำนวน 6 ชนิด ดังตารางที่ 1 [10]

2.3.3 การจัดระบบดังกล่าวเป็นการควบคุมทั้งอุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในกล่องตัวอย่างไว้ในตู้ควบคุมอุณหภูมิ (ดังรูปที่ 3) จากนั้นปล่อยให้ตัวอย่างเกิดการแลกเปลี่ยนความชื้นกับอากาศ จนเข้าสู่สภาวะสมดุล กล่าวคือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักตัวอย่างคงที่ จึงสามารถวัดค่าความชื้นสมดุลได้จำนวน 18 ค่า โดยใช้ระยะเวลาในการทดลองทั้งสิ้น 4 สัปดาห์

2.3.4 จากนั้นนำตัวอย่างสมุนไพรฟ้าทะลายโจรเข้าสู่กระบวนการอบแห้งในตู้อบแห้งที่อุณหภูมิ 103 °C เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง ตามมาตรฐานของ AOAC เพื่อหามวลแห้งของตัวอย่าง ซึ่งใช้ในการคำนวณหาค่าความชื้นสมดุลในลำดับต่อไป

2.3.5 นำตัวอย่างสมุนไพรฟ้าทะลายโจรที่ผ่านการอบแห้งแล้วมาชั่งน้ำหนัก โดยถือว่ามวลที่ได้เป็นมวลของของแข็ง ซึ่งเป็นองค์ประกอบของวัสดุขึ้น จากนั้นหาผลต่างระหว่างมวลของตัวอย่างสมุนไพรฟ้าทะลายโจรขณะทำการทดลองกับมวลของของแข็งดังกล่าว ซึ่งผลต่างที่ได้ถือเป็นมวลของน้ำในตัวอย่าง สมการนี้สามารถนำไปใช้ในการคำนวณหาค่าความชื้นสมดุล (Equilibrium moisture content: EMC) ของวัสดุนั้นได้



รูปที่ 2 กล่องซูเปอร์ล็อก (Super lock) บรรจุสารละลายเกลืออิมิตัวสำหรับใส่สารละลายฟ้าทะลายโจร



รูปที่ 3 ตู้อบไฟฟ้าควบคุมอุณหภูมิในการทดลอง

2.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การศึกษาความขึ้นสมดุลของผลผลิตทางการเกษตร โดยทั่วไปมีการนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาประยุกต์ใช้อธิบายความสัมพันธ์ของค่าความขึ้นสมดุลของวัสดุนั้นกับค่าความขึ้นสัมพัทธ์ของอากาศหรือค่าวอเตอร์แอกทิวิตีตามอุณหภูมิที่กำหนด โดยสมการที่ใช้ทำนายค่าความขึ้นสมดุลของผลผลิตแต่ละชนิดจะมีรูปแบบที่ต่างกัน สำหรับการศึกษานี้ได้เลือกใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อนำมาใช้ในการหาความขึ้นสมดุลของสมุนไพรฟ้าทะลายโจร [13] ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แบบจำลองคณิตศาสตร์จำนวน 6 แบบจำลอง [12]

ลำดับที่	แบบจำลอง	สมการทางคณิตศาสตร์
1	GAB	$M_e = \frac{ABCa_w}{(1-Ca_w)(1-Ca_w+BCa_w)} \quad (1)$
2	Modified GAB	$M_e = \frac{AB \left(\frac{C}{T}\right) a_w}{(1-Ba_w) \left(1-Ba_w + \frac{C}{T} Ba_w\right)} \quad (2)$
3	Modified Oswin	$M_e = (A+BT) \left[\frac{a_w}{(1-a_w)} \right]^{1/C} \quad (3)$
4	Modified Handerson	$M_e = \left[\frac{-\ln(1-a_w)}{A(T+B)} \right]^{1/C} \quad (4)$
5	Modified Halsey	$M_e = \left[-\frac{\exp(A+BT)}{\ln(a_w)} \right]^{1/C} \quad (5)$
6	Modified Chung-Pfost	$M_e = -\frac{1}{C} \ln \left[\frac{-(T+B)}{A} \ln a_w \right] \quad (6)$

หมายเหตุ : M_e คือ ความขึ้นสมดุล [% , db], T คือ อุณหภูมิ, a_w คือ ค่าวอเตอร์แอกทิวิตี, [-], A , B , C คือ ค่าคงที่ของสมการ

ค่าความชื้นสมดุลที่ได้จากการทดลองกับค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่อุณหภูมิ 30 °C, 40 °C และ 50 °C โดยใช้วิธีการทางสถิติจากการวิเคราะห์เชิงถดถอย (Regression analysis) รากที่สองของค่าเฉลี่ยความแตกต่างยกกำลังสอง (Root mean square difference, RMSD) ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (Coefficient of determination, R^2) และค่าความเอนเอียงเฉลี่ย (Mean bias difference, MBD)

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N M_{eq(mod,i)} - M_{eq(meas,i)}}{\sqrt{\sum_{i=1}^N M_{eq(mod,i)} - M_{eq(meas,i)}^2}} \quad (7)$$

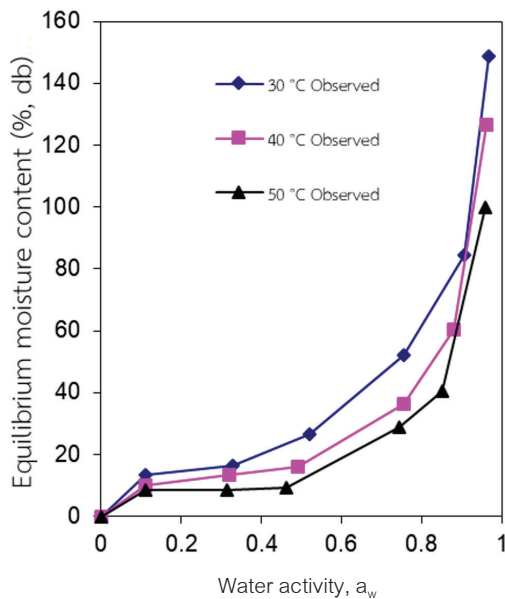
$$RMSD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N M_{eq(mod,i)} - M_{eq(meas,i)}^2}{N}} \quad (8)$$

$$MBD = \frac{\frac{\sum_{i=1}^N M_{eq(mod,i)} - M_{eq(meas,i)}}{N}}{\frac{\sum_{i=1}^N M_{eq(meas,i)}}{N}} \quad (9)$$

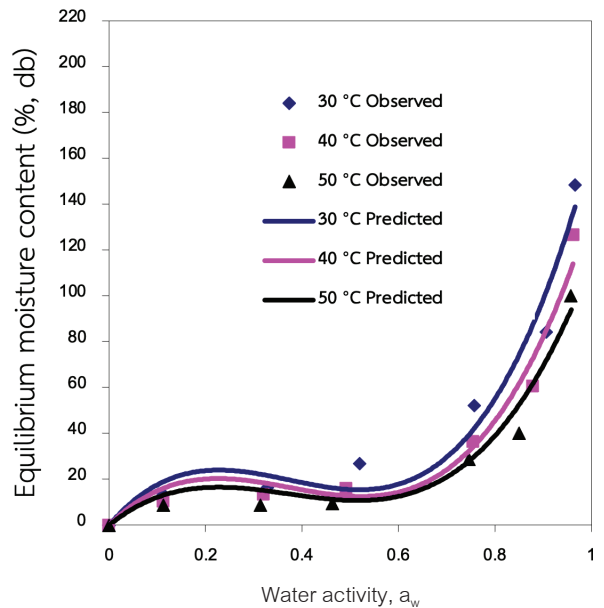
เมื่อ $M_{eq(mod,i)}$	คือ ความชื้นสมดุลของสเมทไฟฟ้ทละลายโจรจากแบบจำลองข้อมูลที i (% , db)
$M_{eq(meas,i)}$	คือ ความชื้นสมดุลของสเมทไฟฟ้ทละลายโจรจากการทดลองที i (% , db)
N	คือ จำนวนข้อมูล
i	คือ ลำดับทีของข้อมูล

3. ผลและวิจารณ์ (Results and discussion)

ผลการศึกษาค่าความชื้นสมดุลของสเมทไฟฟ้ทละลายโจรที่อุณหภูมิ 30 °C, 40 °C และ 50 °C มีค่าวอเตอร์แอกทิวิตีในช่วง 0.112 – 0.966 (ดังรูปที่ 4) เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ และค่าวอเตอร์แอกทิวิตีมีลักษณะเป็นกราฟแบบซิกมอยด์ประเภทที่ II (Sigmoid type II isotherm) ซึ่งเป็นลักษณะที่พบได้ทั่วไปในพืชสเมทไฟฟ้ท และผลิตภัณฑ์เกษตรทีมีเส้นใยสูง โดยเส้นโค้งมีลักษณะเรียงลำดับเป็นเส้นไฮเพอโบลิกโดยเส้นที่อยู่ด้านบนแสดงค่าทีอุณหภูมิต่ำ ขณะที่เส้นที่อยู่ด้านล่างแสดงค่าทีอุณหภูมิสูงกว่า ซึ่งบ่งชี้ได้ว่าความสามารถในการดูดซับความชื้นของวัสดุเพิ่มขึ้น เมื่อค่าวอเตอร์แอกทิวิตีเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม อัตราการเพิ่มจะช้าลงในช่วงกลางของกราฟ ก่อนทีจะเพิ่มขึ้นอีกครั้งช่วงปลายกราฟ ทำให้เกิดลักษณะของเส้นกราฟแบบซิกมอยด์อย่างชัดเจน ลักษณะของกราฟซอร์บชันไฮเพอโบลิกของสเมทไฟฟ้ทละลายโจรมีลักษณะสอดคล้องกับซอร์บชันไฮเพอโบลิกของผลิตภัณฑ์เกษตร และพืชสเมทไฟฟ้ทชนิดอื่น



รูปที่ 4 ซอร์บชันไอโซเทอมของสมุนไพรฟ้าทะลายโจร



รูปที่ 5 การเปรียบเทียบค่าความชื้นสมดุลของสมุนไพรฟ้าทะลายโจรกับค่าวอเตอร์แอคติวิตีของผลที่ได้จากการทดลองเทียบกับแบบจำลองซอร์บชันไอโซเทอมของ Modified Halsey

ผู้วิจัยได้หาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างความชื้นสมดุลกับค่าวอเตอร์แอคติวิตี โดยวิเคราะห์และเปรียบเทียบแบบจำลองซอร์บชันไอโซเทอม จำนวน 6 แบบจำลอง กับค่าความชื้นสมดุลที่ได้จากการทดลองในแต่ละระดับอุณหภูมิพบว่า แบบจำลอง Modified Halsey มีค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลองมากที่สุด แบบจำลอง Modified Halsey มีประสิทธิภาพสูงในการอธิบายการดูดความชื้นในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ปานกลางถึงสูง (a_w ระหว่าง 0.2 – 0.94) ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมการดูดซับความชื้นของพืชสมุนไพรทั่วไป ผลการวิเคราะห์เชิงสถิติ พบว่า แบบจำลองนี้มีค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.992 ค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความแตกต่างยกกำลังสอง (RMSE) เท่ากับ 8.667 และค่าความเอนเอียงเฉลี่ย (MBD) เท่ากับ 1.190 แสดงให้เห็นว่าแบบจำลอง Modified Halsey มีความเหมาะสมที่ใช้สำหรับทำนายค่าความชื้นสมดุลของสมุนไพรฟ้าทะลายโจรที่อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในช่วงต่าง ๆ

ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการหาค่าความชื้นสมดุลของสมุนไพรฟ้าทะลายโจร (ดังตารางที่ 3) สำหรับรูปที่ 5 เป็นการเปรียบเทียบค่าความชื้นสมดุลของสมุนไพรฟ้าทะลายโจรกับค่าวอเตอร์แอคติวิตีของผลที่ได้จากการทดลองโดยใช้แบบจำลอง Modified Halsey ทั้งนี้ผลการศึกษามีความสอดคล้องกับรายงานการวิจัยเกี่ยวกับการทดลองหาค่าความชื้นสมดุลของใบ และดอกคาร์โมมายล์ ซึ่งเป็นพืชสมุนไพรเฉพาะถิ่นที่พบในแอฟริกาเหนือ โดยพบว่าแบบจำลอง Peleg และ Halsey มีความเหมาะสมที่ใช้ในการอธิบายลักษณะกราฟของซอร์บชันไอโซเทอมได้อย่างเหมาะสมที่สุด [14]

การทราบลักษณะของความชื้นสมดุลของสมุนไพรฟ้าทะลายโจรมีความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากสามารถนำไปใช้ในการกำหนดค่าความชื้นที่ปลอดภัย ออกแบบเงื่อนไขในการอบแห้งให้เหมาะสม และควบคุมสภาพแวดล้อมในการจัดเก็บให้มีประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งจะช่วยยืดอายุการเก็บรักษาและคงคุณภาพของสมุนไพรฟ้าทะลายโจรไว้ได้อย่างเหมาะสม

ตารางที่ 3 พารามิเตอร์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ความชื้นสมดุลของสมุนไพรฟ้าทะลายโจร

Model	ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง			R^2	RMSD(%)	MBD(%)
	A	B	C			
GAB	9.514	545.625	0.962	0.957	19.667	-0.195
Modified GAB	631.478	0.989	2.787	0.852	637.800	459.481
Modified Oswin	37.399	-0.378	1.819	0.992	13.362	7.522
Modified Handerson	0.001	34.291	0.781	0.980	17.333	2.856
Modified Halsey	5.619	-0.026	1.630	0.992	8.667	1.190
Modified Chung-Pfost	0.036	-10.045	51.460	0.892	27.259	5.365

หมายเหตุ : A, B, C คือ ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง

4. สรุป (Conclusion)

การศึกษาค่าความชื้นสมดุลของสมุนไพรฟ้าทะลายโจรที่อุณหภูมิ 30 °C, 40 °C และ 50 °C มีค่าพารามิเตอร์เอกทวิติระหว่าง 0.112 – 0.966 โดยกราฟซอร์บชันไอโซเทอมแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่าพารามิเตอร์เอกทวิติในการวิเคราะห์ผลผู้วิจัยได้ทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จำนวน 6 แบบจำลอง โดยนำแบบจำลองทั้งหมดมาคำนวณค่าความชื้นสมดุล และเปรียบเทียบกับค่าความชื้นสมดุลที่ได้จากการทดลอง ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติพบว่าแบบจำลอง Modified Halsey มีสมรรถนะดีที่สุดในการหาค่าความชื้นสมดุลของสมุนไพรฟ้าทะลายโจร โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.992 ค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยของความแตกต่างยกกำลังสอง (RMSD) เท่ากับ 8.667 และค่าความเอนเอียงเฉลี่ย (MBD) เท่ากับ 1.190 รองลงมาคือ แบบจำลอง Modified Oswin มีค่า R^2 เท่ากับ 0.992 ค่า RMSD เท่ากับ 13.362 และค่า MBD เท่ากับ 7.522 โดยแบบจำลองทั้งสองนี้สามารถนำมาวิเคราะห์ค่าความชื้นสมดุลของสมุนไพรฟ้าทะลายโจรได้อย่างมีประสิทธิภาพ การศึกษาค่าความชื้นสมดุลของสมุนไพรฟ้าทะลายโจร สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการกำหนดค่าความชื้นที่เหมาะสม สำหรับกระบวนการอบแห้ง และการเก็บรักษาลักษณะสมบัติสมุนไพรฟ้าทะลายโจร เพื่อรักษาคุณภาพและสรรพคุณของสารสำคัญที่พบในสมุนไพรฟ้าทะลายโจรให้คงอยู่ ลดความเสี่ยงจากการเจริญเติบโตของเชื้อรา ป้องกันการเสื่อมสภาพ และยืดอายุการเก็บรักษาลักษณะสมบัติสมุนไพรฟ้าทะลายโจรได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ศูนย์วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และเครื่องมือวิทยาศาสตร์ในการดำเนินการทดลอง ตลอดจนขอขอบคุณ คุณพิมพ์ธนา ภาสุย ที่ให้การสนับสนุนตัวอย่างสมุนไพรฟ้าทะลายโจรเพื่อใช้ในการวิจัยในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] อุษณา ลิ้มเกรียงไกร. การพัฒนาวัสดุอ้างอิงรับรองสำหรับการวัดปริมาณธาตุบางชนิดในผงฟ้าทะลายโจร. วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ กรมวิทยาศาสตร์บริการ. 2566;12(1):15-26. doi: 10.60136/bas.v12.2023.399.
- [2] นพมาศ ประทุมสูตร, ทวีเดช หมั่นภูเขียว. การศึกษาแบบจำลองการอบแห้งชั้นบางของพริกขี้หนู. Journal of Applied Research on Science and Technology (JARST). 2564;20(2):137-46. doi: 10.14456/jarst.2021.12.

- [3] กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์. กรมวิทยาศาสตร์ฯ ผลิตสารมาตรฐานฟ้าทะลายโจรและสารมาตรฐานฟลาโวนอยด์พร้อมจำหน่าย แก่หน่วยงานรัฐ เอกชน เพื่อใช้ในการวิเคราะห์และวิจัยเภสัชภัณฑ์ [อินเทอร์เน็ต]. 2565 [เข้าถึงเมื่อ 12 มีนาคม 2566]. เข้าถึงได้จาก: <https://www.dmsc.moph.go.th/th/detailAll/2120/nw/25>
- [4] จุฑามาศ สัตยวิวัฒน์. ฟ้าทะลายโจร: งานวิจัยบูรณาการสู่การใช้รักษาโรคติดเชื้อโควิด-19. The Journal of Chulabhorn Royal Academy. 2565;4(1):1-14.
- [5] ธรรมรัตน์ บุญสูง, สันต์ ใจยอดศิลป์, สมวงศ์ ใจยอดศิลป์, ขวัญศรี สราญกวิน, สุภัทสรณ์ แก้วกลิน. การศึกษาปริมาณ แอนโดรกราโฟไลด์ในส่วนต่าง ๆ ของฟ้าทะลายโจรในระยะเก็บเกี่ยวที่ต่างกันจากอำเภอมวกเหล็ก จังหวัดสระบุรี. วารสารการแพทย์แผนไทยและการแพทย์ทางเลือก. 2565;20(1):141-9.
- [6] Jolkil M, Shaari AR, Razak NA. Moisture adsorption isotherm of dried *Cassia alata* herbal leaves at different temperatures. Mater Sci Eng. 2020;932(1):012036. doi: 10.1088/1757-899X/932/1/012036.
- [7] Oduola AA, Luthra K, Atungulu GG. Determination of moisture sorption isotherms of industrial hemp (*Cannabis sativa* L.) flower and leaf composite powders. Ind Crops Prod. 2022;186:115201. doi: 10.1016/j.indcrop.2022.115201.
- [8] เพ็ญพร นิ่มนวล, นภาลย์ เหล่ามะลอ, สราวุฒิ แนนเนียร. การศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ความชื้นสมดุลของ กัญชาน้ำว่า. วารสารวิชาการคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี. 2565;17(1):50-8.
- [9] Getahun E, Gabbiye N, Delele MA, Fanta SW, Gebrehiwot MG, Vanierschot M. Effect of maturity on the moisture sorption isotherm of chili pepper (*Mareko Fana variety*). Heriyon. 2020;6:1-14. doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e04608.
- [10] Meriama F, Said B, Akil L, Ahmed M, Houcine M, Abdelkrim D, et al. Experimental determination and modeling of the moisture sorption isotherms and isosteric heat of tobacco leaves. I2M. 2021;20(5):269-77. doi: 10.18280/i2m.200504.
- [11] Zhang X, Zillig W, Kunzel HM, Zhang X, Mitterer C. Evaluation of moisture sorption models and modified Mualem model for prediction of desorption isotherm for wood materials. Build Sci. 2015;92(1):387-95. doi: 10.1016/j.buildenv.2015.05.021.
- [12] เสริม จันทรฉาย. เทคโนโลยีการอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์. นครปฐม: เพชรเกษมการพิมพ์; 2560.
- [13] ธวัชอรณัญช์ มุสิกะไชย, ยุทธนา ภูริวงษ์กุล, สุภวรรณ ภูริวงษ์กุล. การศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ความชื้นสมดุลของกัญชงไทย. NUEJ. 2561;13(1):25-32.
- [14] Saad A, Touati B, Seghir A, Abdenebi A. Thermodynamic properties and moisture sorption isotherms of *Matricaria pubescens* leaves. AgricEngInt: CIGR Journal. 2022;24(2):291-300.

การออกแบบและพัฒนาระบบฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้าน ด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตแบบอัตโนมัติ

Design and development of automatic village water disinfection system using ultraviolet radiation

อาภาพร สินธุสาร¹, อนุชา สินธุสาร¹

Apaporn Sinthusam¹, Anucha Sinthusam¹

รับบทความ 29 เมษายน 2568 แก้ไขบทความ 29 กรกฎาคม 2568 ยอมรับตีพิมพ์ 1 สิงหาคม 2568

บทคัดย่อ

น้ำประปาหมู่บ้านของประเทศส่วนใหญ่ยังพบปัญหาด้านการปนเปื้อนของเชื้อโรค ทำให้คุณภาพน้ำไม่ได้มาตรฐานตามเกณฑ์น้ำประปาดื่มได้ของกรมอนามัย การศึกษาวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาระบบฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้านด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตแบบอัตโนมัติในระดับห้องปฏิบัติการ และเพื่อเป็นองค์ความรู้ในการพัฒนาต่อยอดสำหรับการนำไปใช้ทดแทนสารละลายคลอรีนสำหรับการฆ่าเชื้อโรคในระบบประปาหมู่บ้านของประเทศ โดยเน้นให้ระบบมีการใช้งานไม่ซับซ้อน ประสิทธิภาพดี ต้นทุนต่ำ และมีความปลอดภัย มีวิธีการวิจัยเริ่มจากขั้นตอนการวิเคราะห์ปัญหา การออกแบบ การสร้างและพัฒนา การทดลองใช้งานในระดับห้องปฏิบัติการ และตรวจสอบคุณภาพน้ำทางจุลชีววิทยา ผลจากการวิจัยสรุปได้ว่า การออกแบบและพัฒนาระบบฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้านด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตแบบอัตโนมัติ โดยใช้หลอดผลิตรังสีอัลตราไวโอเลต ชนิดไอปรอทแรงดันต่ำ ขนาดกำลังไฟ 18 วัตต์ เมื่อคำนวณตามสูตร Keitz formula พบว่า ความเข้มรังสีอัลตราไวโอเลต (E_{UV}) ที่ผลิตจากระบบฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้านด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตแบบอัตโนมัติ มีค่าเท่ากับ 27.6 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร (mW/cm^2) หากใช้เวลาในการฆ่าเชื้อโรค 1 วินาที จะมีปริมาณรังสีอัลตราไวโอเลต (UV dose) เท่ากับ 27.6 มิลลิวัตต์.วินาทีต่อตารางเซนติเมตร ($mW.s/cm^2$) ซึ่งมีค่าสูงกว่าปริมาณรังสีอัลตราไวโอเลตที่สามารถทำให้โอ.โคไลและเชื้อโรคส่วนใหญ่ ลดลงร้อยละ 99 (2-log หรือ D_{99}) การทดลองใช้งานระบบฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้านด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตแบบอัตโนมัติ ที่พัฒนาและออกแบบในห้องปฏิบัติการ พบว่า ตัวอย่างน้ำดิบที่ตกตะกอนแล้ว มีค่าความขุ่น เท่ากับ 1.37 เอ็นทียู และความเป็นกรดและด่าง เท่ากับ 6.7 เมื่อได้รับรังสีอัลตราไวโอเลตเวลามากกว่า 5 นาทีขึ้นไป ไม่พบโคลิฟอร์มแบคทีเรียในตัวอย่างน้ำ ดังนั้นจึงสามารถขยายผลโดยการออกแบบและคำนวณปริมาณรังสีอัลตราไวโอเลตที่เหมาะสมกับปริมาณและอัตราการไหล รวมทั้งคุณภาพน้ำดิบสำหรับการผลิตน้ำประปาหมู่บ้าน เพื่อพัฒนาเป็นระบบฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้านด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตแบบอัตโนมัติที่มีประสิทธิภาพสำหรับนำไปติดตั้งร่วมกับการผลิตน้ำประปาหมู่บ้านในบริเวณหอดังสูงก่อนปล่อยน้ำสู่ท่อจ่ายน้ำประปาหมู่บ้านเพื่อส่งน้ำให้แก่ประชาชน ช่วยลดปริมาณเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้าน และทำให้มีคุณภาพอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานน้ำประปาดื่มได้ของกรมอนามัย

คำสำคัญ: ระบบฆ่าเชื้อโรค, น้ำประปาหมู่บ้าน, รังสีอัลตราไวโอเลต

¹สถาบันวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีชุมชน กรมวิทยาศาสตร์บริการ จังหวัดกรุงเทพมหานคร 10400 ประเทศไทย

Abstract

Most village water supply systems in the country continue to face problems related to microbial contamination, resulting in water quality that does not meet the potable water standards set by the Department of Health. This research was conducted with the objective of designing and developing an automatic Ultraviolet radiation (UV) disinfection system for village water supply at the laboratory scale. It also aims to contribute knowledge that can be further developed for replacing chlorine solutions traditionally used for disinfection in rural water supply systems. The design emphasizes simplicity, high efficiency, low cost, and safety. The research methodology involved problem analysis, design, construction and development, laboratory testing, and microbiological water quality assessment. The results of the study indicated that the design and development of the automatic UV disinfection system, using a low-pressure mercury UV lamp with a power of 18 watts, produced UV irradiance (E_{UV}) calculated by the Keitz formula at 27.6 milliwatts per square centimeter (mW/cm^2). With an exposure time of 1 second, the UV dose reached 27.6 milliwatt-seconds per square centimeter ($mW \cdot s/cm^2$), which is higher than the dose required to reduce *E. coli* and most pathogens by 99% (2-log or D_{99}). Laboratory testing of the developed system revealed that, when treating settled raw water with a turbidity of 1.37 NTU and pH of 6.7, UV exposure of more than 5 minutes resulted in no detectable coliform bacteria in the water samples. Therefore, this system can be scaled up through design and calculation of the appropriate UV dose relative to water volume, flow rate, and raw water quality for use in village water supply systems. The system can be installed at elevated water tanks prior to distribution, helping reduce microbial contamination and enabling water to meet potable standards as defined by the Department of Health.

Keywords: Disinfection system, Village water supply, Ultraviolet radiation

¹Institute of Community Science Technology, Department of Science Service, Bangkok 10400, Thailand

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

1. บทนำ (Introduction)

ข้อมูลผลสำรวจของศูนย์ควบคุมโรคติดต่อ ประเทศสหรัฐอเมริกา (CDC) ที่ให้คำแนะนำสำหรับผู้ที่จะเดินทางไป 244 ประเทศทั่วโลก แจ้งว่ามีเพียง 56 ประเทศที่น้ำประปาสามารถดื่มได้ ในขณะที่อีก 188 ประเทศ ซึ่งรวมถึงประเทศไทย แนะนำให้หลีกเลี่ยงการดื่มน้ำประปา [1] ทั้งนี้เนื่องจากการอนามัยโลกและการสาธารณสุขของแต่ละประเทศได้กำหนดเกณฑ์คุณภาพน้ำดื่ม โดยกำหนดปริมาณสารที่ปนเปื้อนในน้ำให้มีได้แต่ต้องไม่เกินเกณฑ์ที่กำหนด ประเทศไทยโดยกรมอนามัยได้ประกาศเกณฑ์คุณภาพน้ำประปาดื่มได้ พ.ศ. 2563 หมายถึงน้ำประปาที่มีการควบคุมคุณภาพตั้งแต่ระบบผลิตจนถึงบ้านผู้ใช้น้ำ โดยกำหนดคุณภาพน้ำประปาทางกายภาพ เคมีทั่วไป โลหะหนักทั่วไป และแบคทีเรีย ได้แก่ โคลิฟอร์มแบคทีเรีย และอี.โคไล ซึ่งเป็นเชื้อก่อโรคที่ระบุไว้ในประกาศฉบับนี้ [2] ทั้งนี้ประเทศไทยสามารถผลิตน้ำประปาที่สามารถดื่มได้ แต่ยังไม่สามารถครอบคลุมได้ทั่วทั้งประเทศ โดยเฉพาะระบบประปาหมู่บ้านส่วนใหญ่ พบว่า น้ำประปาที่ผลิตได้ยังไม่สามารถดื่มได้อย่างปลอดภัย

ประเทศไทยได้จัดทำแผนแม่บทการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำ 20 ปี (พ.ศ. 2561-2580) สำหรับใช้เป็นกรอบแนวทางการพัฒนาและเพิ่มประสิทธิภาพการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำของประเทศ ในส่วนของแผนแม่บทด้านที่ 1 การจัดการน้ำ อุบโภคบริโภค มีเป้าประสงค์จัดหาน้ำสะอาดเพื่อการอุปโภคบริโภคแก่ชุมชน ครบทุกหมู่บ้านหรือทุกครัวเรือน ชุมชนเมือง แหล่งท่องเที่ยวสำคัญ และพื้นที่เศรษฐกิจพิเศษ รวมทั้งการจัดหาแหล่งน้ำสำรองในพื้นที่ซึ่งขาดแคลนแหล่งน้ำต้นทุน พัฒนา น้ำดื่มให้ได้มาตรฐานในราคาที่เหมาะสม และการประหยัดน้ำโดยลดการใช้น้ำภาคครัวเรือน ภาคบริการ และภาคราชการ [3] ซึ่งแผนแม่บทด้านที่ 1 นี้มีความสอดคล้องตรงกับเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน (SDGs) เป้าหมายที่ 6 การเข้าถึงการใช้น้ำสะอาดและสุขาภิบาลที่ดี ทั้งนี้ หลายหน่วยงานราชการได้นำแผนไปปฏิบัติงานเพื่อให้บรรลุเป้าหมายที่กำหนดไว้อย่างไรก็ดี การผลิตน้ำเพื่อการอุปโภคบริโภคในภูมิภาคต่าง ๆ ของประเทศไทยยังไม่มีคุณภาพมาตรฐานที่ดีพอ โดยเฉพาะพื้นที่ที่อยู่นอกเขต การให้บริการของการประปาส่วนภูมิภาค หมู่บ้านชุมชนมีการใช้น้ำจากระบบประปาหมู่บ้านที่ออกแบบโดยกรมทรัพยากรน้ำ ซึ่งรูปแบบระบบประปาหมู่บ้านจะเป็นไปตามความเหมาะสมของแหล่งน้ำที่จะใช้ในการผลิตและขนาดของครัวเรือนในชุมชน โดยส่วนใหญ่แบ่งเป็นระบบประปาแบบใช้น้ำบาดาลและน้ำผิวดิน สำหรับระบบประปาหมู่บ้านแบบผิวน้ำขนาดใหญ่ มีขั้นตอนการปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบโดยการตกตะกอนด้วยสารละลายสารส้มและกรองตะกอน นำน้ำเข้าสู่ถังเก็บน้ำใสและฆ่าเชื้อโรคด้วยสารละลายคลอรีน จากนั้นสูบน้ำขึ้นสู่หอถังสูงแล้วจึงจ่ายน้ำเข้าสู่ท่อจ่ายน้ำประปาหมู่บ้าน ซึ่งในขั้นตอนการทำให้ น้ำประปาสามารถดื่มได้จำเป็นต้องมีการควบคุมดูแลระบบการผลิตน้ำอย่างต่อเนื่อง ตั้งแต่การเติมสารส้มเพื่อตกตะกอน เพื่อควบคุมความขุ่นของน้ำให้เป็นไปตามมาตรฐานน้ำประปา การฆ่าเชื้อโรคด้วยสารละลายคลอรีน โดยเตรียมความเข้มข้น สารละลายคลอรีนให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมเพื่อประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคตลอดท่อส่งน้ำต้นทางจนถึงปลายทาง และจำเป็นต้องมีการตรวจวัดคุณภาพน้ำอย่างสม่ำเสมอเพื่อให้ระบบการผลิตน้ำประปาหมู่บ้านได้น้ำที่มีคุณภาพเป็นไปตามเกณฑ์คุณภาพน้ำประปาดื่มได้ของกรมอนามัย

ระบบประปาหมู่บ้านส่วนใหญ่ของประเทศยังไม่สามารถผลิตน้ำประปาให้เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำประปาดื่มได้ของกรมอนามัย จากผลการรายงานสรุปสถานการณ์คุณภาพน้ำบริโภคในครัวเรือน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2565 ของกรมอนามัย พบว่า คุณภาพน้ำด้านชีวภาพ ที่ใช้พารามิเตอร์ด้านแบคทีเรียเป็นตัวบ่งชี้ นั้น พบการปนเปื้อนสูงมากที่สุด โคลิฟอร์มแบคทีเรีย ร้อยละ 54 อี.โคไล ร้อยละ 31 คุณภาพทางด้านกายภาพพบความขุ่น ร้อยละ 11 [4] ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ยังมีการปนเปื้อนของแร่ธาตุและเชื้อโรคที่มีค่าเกินเกณฑ์มาตรฐาน ในส่วนของปัญหาการปนเปื้อนของเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้านนั้น สาเหตุที่พบมาจากผู้ควบคุมการผลิตระบบน้ำประปาหมู่บ้านไม่มีความเชี่ยวชาญในการเตรียมความเข้มข้น สารละลายคลอรีนที่เหมาะสมกับการฆ่าเชื้อโรคที่ปนเปื้อนในน้ำและต้องให้มีปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือไว้ในน้ำตามข้อแนะนำของกรมอนามัย อีกทั้งบางพื้นที่ยังขาดแคลนสารละลายคลอรีนสำหรับใช้งาน จึงทำให้คุณภาพน้ำประปาหมู่บ้านไม่สามารถดื่มได้ ส่งผลกระทบต่อคุณภาพชีวิตของประชาชนและไม่สามารถขับเคลื่อนประเทศให้เป็นไปตามเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน (SDGs)

จากปัญหาดังกล่าว คณะผู้วิจัยมีแนวคิดในการออกแบบและพัฒนาระบบฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้านด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตแบบอัตโนมัติที่เหมาะสมกับระบบประปาหมู่บ้าน แบบผิวดินขนาดใหญ่ การฆ่าเชื้อโรคด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตเป็นกระบวนการทางกายภาพที่ปราศจากสารเคมี ถือได้ว่าเป็นเทคโนโลยีที่มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ระบบนิเวศ และมนุษย์ เทคโนโลยีนี้มีคุณค่ามากต่อการพัฒนาอย่างยั่งยืน มีการนำมาใช้อย่างแพร่หลายทั่วโลก งานวิจัยดังกล่าวจึงมีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) ออกแบบและพัฒนาระบบฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้านด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตแบบอัตโนมัติ และ 2) ทดลองใช้งานระบบในห้องปฏิบัติการ โดยมุ่งหวังให้ระบบฆ่าเชื้อโรคดังกล่าว สามารถขยายผลทดแทนการใช้สารละลายคลอรีนในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้านได้ มีการใช้งานไม่ซับซ้อนและประสิทธิภาพดี ต้นทุนต่ำ มีความปลอดภัย ซึ่งจะทำให้ผู้ควบคุมการผลิตน้ำประปาหมู่บ้านสามารถเรียนรู้และสะดวกต่อการใช้งานในพื้นที่ และสิ่งสำคัญสามารถขยายผลให้มีการนำไปใช้กับระบบประปาหมู่บ้านได้ทั่วประเทศ เป็นการนำวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและนวัตกรรมสู่การดูแลประชาชน ทำให้ทุกพื้นที่ในประเทศไทยมีน้ำสะอาดเพื่อการอุปโภคบริโภคและเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำดื่มของกรมอนามัย สร้างคุณภาพชีวิตที่ดี เป็นสังคมแห่งความสุขและยั่งยืนตลอดไป

2. วิธีการวิจัย (Experimental methods)

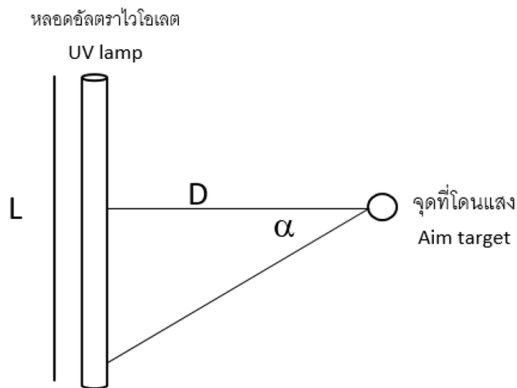
2.1 การวิเคราะห์ปัญหา (Analysis)

จากรายงานสรุปสถานการณ์คุณภาพน้ำบริโภคในครัวเรือน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2565 โดยกรมอนามัยระบุว่ากลุ่มตัวอย่างน้ำประปาหมู่บ้านจำนวน 863 ตัวอย่าง มีเพียงร้อยละ 34.4 ที่สามารถนำมาเป็นน้ำบริโภคในครัวเรือนได้จำนวนร้อยละ 54.2 จำเป็นต้องปรับปรุงคุณภาพก่อนที่จะนำมาบริโภค เช่น การกรอง การต้มและการเติมคลอรีน เพราะมีสี ความขุ่นและแบคทีเรียเกินค่าที่กำหนด และจำนวนร้อยละ 11.4 มีคุณภาพน้ำไม่เหมาะสมที่จะนำมาบริโภคในครัวเรือน เพราะมีปริมาณของแข็งละลายน้ำทั้งหมด ความกระด้าง เหล็ก ฟลูออไรด์ แมงกานีส สารหนู คลอไรด์ ตะกั่ว ไนเตรต สังกะสี และทองแดงเกินค่ามาตรฐานที่กำหนด ทั้งนี้จากการสุ่มประเมินคุณภาพน้ำบริโภคในครัวเรือนที่ประชาชนใช้เป็นน้ำบริโภคหลักในครัวเรือน ได้แก่ น้ำประปา (ที่ผลิตจากการประปานครหลวง การประปาส่วนภูมิภาค องค์การปกครองส่วนท้องถิ่น และหมู่บ้าน) น้ำดื่มบรรจุถัง 20 ลิตร น้ำตู้หยอดเหรียญ น้ำฝน น้ำบาดาล น้ำบ่อตื้น และน้ำประปาภูเขา โดยเปรียบเทียบกับเกณฑ์น้ำประปาดื่มได้กรมอนามัย พ.ศ. 2563 จำนวนประมาณ 1,500 ตัวอย่าง พบว่า น้ำประปาหมู่บ้านมีคุณภาพน้ำได้มาตรฐาน เพียงร้อยละ 20 ซึ่งต่ำกว่าคุณภาพน้ำของการประปาส่วนภูมิภาคและการประปานครหลวงถึง 4 เท่า [4]

ปัญหาคุณภาพน้ำประปาหมู่บ้านในหลายพื้นที่ของประเทศไทยจึงสะท้อนให้เห็นถึงความเหลื่อมล้ำด้านโครงสร้างขั้นพื้นฐานและกระบวนการบริหารจัดการในระดับชุมชนที่ยังขาดองค์ความรู้และทรัพยากรอย่างเพียงพอ การนำวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและนวัตกรรม มาใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้จึงเป็นส่วนสำคัญที่จะช่วยให้ประชาชนมีน้ำบริโภคที่มีคุณภาพเหมาะสมตามเกณฑ์มาตรฐาน และสร้างความเชื่อมั่นในคุณภาพน้ำประปาให้แก่ประชาชน และเป็นความจำเป็นเร่งด่วนในการยกระดับคุณภาพชีวิตของประชาชนในพื้นที่ชนบททั่วประเทศ

2.2 การออกแบบ (Design) การสร้างและพัฒนา (Development)

การหาปริมาณความเข้มรังสีอัลตราไวโอเลตของหลอดผลิตรังสีอัลตราไวโอเลตสามารถใช้เครื่องมือวัด (UV meter) หรือใช้สูตรคำนวณสมการของ Keitz formula [5] ที่เป็นการคำนวณเบื้องต้นจากข้อมูลของผลิตภัณฑ์หลอดผลิตรังสีอัลตราไวโอเลต และข้อมูลในการติดตั้งสำหรับใช้งาน ตามรูปภาพพื้นฐานสำหรับสูตรคำนวณ



รูปที่ 1 ภาพสำหรับสูตรคำนวณสมการ Keitz formula

สมการ Keitz formula

$$E_{uv} = \frac{P_{uv}(2\alpha + \sin 2\alpha)}{2LD\pi^2}$$

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{L}{2D}$$

- เมื่อ P_{uv} หมายถึง กำลังไฟฟ้าของหลอดผลิตรังสีอัลตราไวโอเล็ต หน่วยเป็น วัตต์ (W)
 L หมายถึง ระยะห่างขั้วหลอดผลิตรังสีอัลตราไวโอเล็ต หน่วยเป็น เมตร (m)
 D หมายถึง ระยะห่างของจุดที่ต้องการให้โดนรังสี หน่วยเป็น เมตร (m)
 E_{uv} หมายถึง ความเข้มรังสีอัลตราไวโอเล็ต หน่วยเป็น วัตต์ต่อตารางเมตร (W/m^2)
 α หมายถึง ครึ่งหนึ่งของมุมที่รับโดยหลอดอัลตราไวโอเล็ต หน่วยเป็น เรเดียน

สูตรคำนวณปริมาณรังสีอัลตราไวโอเล็ต

$$D = It$$

- เมื่อ D หมายถึง ปริมาณรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV dose) หน่วย $mW-s/cm^2$ หรือ $W-s/m^2$ หรือ mJ/cm^2
 I หมายถึง ความเข้มของรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV intensity) หน่วย mW/cm^2 หรือ W/m^2
 t หมายถึง ระยะเวลาสัมผัสรังสีอัลตราไวโอเล็ต (Exposure time) หน่วย วินาที (s)

การแปลงหน่วย $1 W/m^2$ เท่ากับ $0.1 mW/cm^2$

ความเข้มรังสีอัลตราไวโอเล็ตต้องมีปริมาณที่สามารถฆ่าเชื้อโรคได้ โดยสามารถตรวจสอบข้อมูลปริมาณรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่เหมาะสมตามตารางปริมาณความเข้มรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่สามารถทำลายเชื้อโรคได้ แยกแต่ละประเภทเชื้อโรค ทั้งนี้ 1-log หรือ D_{90} หมายถึง ค่าปริมาณความเข้มรังสีอัลตราไวโอเล็ต ที่ทำให้จำนวนเชื้อโรคตั้งต้นลดลงร้อยละ 90 ดังนั้น 2-log ลดลงร้อยละ 99, 3-log ลดลงร้อยละ 99.9 และ 4-log ลดลงร้อยละ 99.99

ตารางที่ 1 Log reduction แสดงปริมาณความเข้มรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่สามารถทำลายเชื้อโรค [6]

Log reduction	Reduction factor	%Reduced
1	10	90%
2	100	99%
3	1,000	99.9%
4	10,000	99.99%
5	100,000	99.999%
6	1,000,000	99.9999%

ตารางที่ 2 แสดงปริมาณความเข้มรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่สามารถทำลายเชื้อโรคได้ [7]

Micro-organisms	Dosage of Ultraviolet radiation (UV dose) in mWsec / cm ² needed to kill the selected micro-organisms	
Bacteria	90% (1 log reduction)	99% (2 log reduction)
<i>Bacillus subtilis</i>	5.8	11
<i>Escherichia coli</i>	3	6.6
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	5.5	10.5
<i>Pseudomonas fluorescens</i>	3.5	6.6
<i>Salmonella enteritidis</i>	4	7.6
<i>Salmonella paratyphi</i> - Enteric fever	3.2	6.1
<i>Salmonella typhosa</i> - Typhoid fever	2.1	4.1
<i>Salmonella typhimurium</i>	8	15.2
<i>Sarcina lutea</i>	19.7	26.4
<i>Shigella dysenteriae</i> - Dysentery	2.2	4.2
<i>Shigella flexneri</i> - Dysentery	1.7	3.4
<i>Shigella paradysenteriae</i>	1.68	3.4
<i>Staphylococcus aerus</i>	2.6	6.6
<i>Vibrio comma</i> - Cholera	3.4	6.5
Virus	90% (1 log reduction)	99% (2 log reduction)
Bacteriophage - <i>E.coli</i>	2.6	6.6
Infectious Hepatitis	5.8	8
Poliovirus - Poliomyelitis	3.15	6.6

การออกแบบและพัฒนาระบบฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้านด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตในระดับห้องปฏิบัติการ ได้ใช้หลอดรังสีอัลตราไวโอเลต ขนาดกำลังไฟฟ้า 18 วัตต์ ชนิดโอปรอทแรงดันต่ำ เนื่องจากเป็นหลอดรังสีอัลตราไวโอเลตสำหรับใช้งานฆ่าเชื้อทั่วไป จึงมีความเหมาะสมสำหรับการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ และราคาไม่แพง อายุการใช้งาน 9000 ชั่วโมง ขนาดความยาวหลอดเหมาะสมกับความลึกของระดับน้ำในภาชนะที่ใช้ในการทดลองขนาดบรรจุ 80 ลิตร โดยออกแบบระบบฆ่าเชื้อให้เป็นแบบอัตโนมัติ มีการใช้อุปกรณ์ควบคุมเปิดปิดการทำงานด้วยการกำหนดเวลา (Timer) เชื่อมต่อเข้ากับสายไฟฟ้าของหลอดรังสีอัลตราไวโอเลต และทำเป็นชุดอุปกรณ์สำหรับการติดตั้งหลอดรังสีอัลตราไวโอเลตที่สามารถป้องกันรังสีอัลตราไวโอเลตได้ รวมทั้งมีการควบคุมป้องกันกระแสไฟรั่วไหล เพื่อป้องกันอันตรายจากกระแสไฟฟ้า

2.3 การทดลองใช้งานระบบฆ่าเชื้อโรคด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตแบบอัตโนมัติในห้องปฏิบัติการ

2.3.1 ตัวอย่างน้ำดิบ อุปกรณ์ และสารเคมี

2.3.1.1 ตัวอย่างน้ำดิบจากแหล่งน้ำธรรมชาติ

2.3.1.2 สารละลายสารส้ม เข้มข้นร้อยละ 10

2.3.1.3 เครื่องวัดความขุ่น (ยี่ห้อ HACH รุ่น 2100N Turbidimeter)

2.3.1.4 เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (ยี่ห้อ Thermo Scientific รุ่น ORION 2 STAR)

2.3.1.5 ชุดตรวจโคลิฟอร์มแบคทีเรีย อ.11 ของกรมอนามัย

2.3.1.6 หลอดผลิตรังสีอัลตราไวโอเลต ประเภทแรงดันโอปรอทต่ำ ขนาดกำลังไฟ 18 วัตต์ เส้นผ่าศูนย์กลาง

5.5 เซนติเมตร จำนวน 1 หลอด ความยาวของหลอด (L) 0.16 เมตร ความยาวระยะห่างจากจุดที่ต้องการให้โดนแสง (D) 0.0225 เมตร ประสิทธิภาพการเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าเป็นความเข้มแสงอัลตราไวโอเลต ร้อยละ 35

2.3.1.7 ภาชนะบรรจุน้ำ เป็นถังพลาสติก พร้อมก๊อกน้ำ ขนาดบรรจุ 80 ลิตร

2.3.1.8 ชุดอุปกรณ์สำหรับการติดตั้งหลอดรังสีอัลตราไวโอเลต ประกอบด้วย ท่อพีวีซีขนาด 4 นิ้ว ความยาวไม่น้อยกว่า 40 เซนติเมตร

2.3.2 ขั้นตอนการทดลอง

2.3.2.1 นำตัวอย่างน้ำดิบ ปริมาตร 80 ลิตร ใส่ลงในภาชนะบรรจุน้ำ

2.3.2.2 ตรวจวัดค่าความขุ่น ความเป็นกรดและด่าง (pH) ในตัวอย่างน้ำดิบ

2.3.2.3 เติมสารละลายสารส้ม เข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ใส่ลงในน้ำดิบ จำนวนปริมาตร 48 มิลลิลิตร คนให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ รอจนตะกอนที่เกิดขึ้นตกลงก้นภาชนะบรรจุน้ำ

2.3.2.4 ตรวจวัดค่าความขุ่น ความเป็นกรดและด่าง (pH) หลังจากเติมสารละลายสารส้ม

2.3.2.5 นำหลอดผลิตรังสีอัลตราไวโอเลต ขนาด 18 วัตต์ มาติดกับชุดท่อพีวีซีสำหรับครอบคุมแสงติดตั้งตำแหน่งท่อจ่ายน้ำออก ของภาชนะบรรจุน้ำ

2.3.2.6 เปิดสวิตช์ไฟเพื่อให้หลอดผลิตรังสีอัลตราไวโอเลตทำงาน และเก็บตัวอย่างน้ำตามช่วงเวลา 0, 5, 10, 20 นาที

2.3.2.7 ตรวจสอบโคลิฟอร์มแบคทีเรียในตัวอย่างน้ำ (ข้อ 6) ด้วยชุดตรวจโคลิฟอร์มแบคทีเรีย อ.11 ของกรมอนามัย

2.4 การอภิปรายผลและสรุปผลการดำเนินงาน

3. ผลและวิจารณ์ (Results and discussion)

3.1 ผลการวิเคราะห์ปัญหา

ปัญหาคุณภาพน้ำประปาหมู่บ้านในปัจจุบันที่ยังไม่ได้มาตรฐานสำหรับการนำมาบริโภคนั้น ส่วนหนึ่งมาจากกระบวนการบริหารจัดการในระดับชุมชนที่ยังขาดองค์ความรู้และทรัพยากรอย่างเพียงพอ ซึ่งกรมทรัพยากรน้ำได้จัดทำเอกสารเผยแพร่เรื่อง คู่มือผู้ควบคุมการผลิตน้ำประปา ระบบประปาผิวดิน รูปแบบของกรมทรัพยากรน้ำ [8] เพื่อให้ความรู้

แก่ผู้ควบคุมการผลิตและผู้บริหารกิจการระบบประปา ในการควบคุมการผลิตอย่างมีประสิทธิภาพและการบำรุงรักษา ระบบประปาอย่างถูกต้อง ซึ่งมีรายละเอียดของการเตรียมและปรับตั้งอัตราการจ่ายสารละลายคลอรีนที่เหมาะสมสำหรับ แหล่งน้ำดิบของระบบประปาหมู่บ้าน โดยผู้ควบคุมการผลิตน้ำประปาเป็นผู้ปฏิบัติหน้าที่เตรียมสารละลายคลอรีนดังกล่าว ดังนั้นผู้ควบคุมการผลิตและผู้บริหารกิจการระบบประปา จำเป็นต้องมีทักษะความเชี่ยวชาญในการคำนวณและการเตรียม สารละลายคลอรีนที่เหมาะสมกับคุณภาพน้ำดิบ ปริมาณและอัตราการไหลของน้ำ รวมทั้งต้องให้มีปริมาณคลอรีนอิสระ คงเหลือไว้ในน้ำตามข้อแนะนำของกรมอนามัย เพื่อให้ได้น้ำประปาที่สะอาดตามเกณฑ์มาตรฐานน้ำบริโภคของกรมอนามัย การวิจัยพัฒนาและออกแบบระบบฆ่าเชื้อโรคด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตแบบอัตโนมัติ สามารถใช้งานทดแทนการเติมสารละลาย คลอรีนเพื่อฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปา โดยระบบมีการทำงานแบบอัตโนมัติ ไม่ต้องใช้สารเคมีและไม่ต้องกังวลถึงปริมาณ คลอรีนอิสระที่ตกค้างในน้ำในปริมาณที่มากเกินไปเกินเกณฑ์มาตรฐาน ซึ่งเป็นอันตรายต่อสุขภาพของผู้บริโภคน้ำได้ จึงช่วย ทำให้ผู้ควบคุมการผลิตและผู้บริหารกิจการระบบประปา ใช้งานระบบนี้ได้อย่างสะดวกและสร้างความมั่นใจให้กับประชาชน ผู้ใช้น้ำประปาหมู่บ้านด้านความปลอดภัย ตามเกณฑ์คุณภาพน้ำประปาดื่มได้ของกรมอนามัย

3.2 ผลการออกแบบ (Design) การสร้างและพัฒนานวัตกรรม (Development)

การออกแบบระบบฆ่าเชื้อโรคด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตแบบอัตโนมัติ เพื่อใช้ทดลองในห้องปฏิบัติการ สามารถ คำนวณความเข้มรังสีอัลตราไวโอเลต โดยหลอดผลิตรังสีอัลตราไวโอเลต ชนิดไอปรอทแรงดันต่ำ ขนาดกำลังไฟ 18 วัตต์ กว้าง 5.5 เซนติเมตร ใส่น้ำยาว 16 เซนติเมตร ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าเป็นความเข้มรังสีอัลตราไวโอเลต ร้อยละ 35 ติดตั้งหลอดไฟรังสีอัลตราไวโอเลต ภายในท่อพีวีซี เส้นผ่าศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร ระยะห่างระหว่างหลอดกับ ผังท่อพีวีซี 2.25 เซนติเมตร

คำนวณผลตาม สมการ Keitz formula

$$E_{uv} = \frac{P_{uv} (2\alpha + \sin 2\alpha)}{2LD\pi^2}$$

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{L}{2D}$$

แทนค่า

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{0.16}{2 \times 0.0225} = 1.297$$

$$E_{uv} = \frac{6.3(2 \times 1.297 + \sin 2 \times 1.297)}{2 \times 0.16 \times 0.0225 \times \pi^2}$$

$$= 27.6 \text{ mW/cm}^2$$

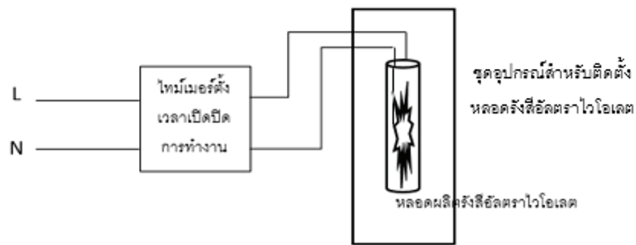
ผลการออกแบบระบบฆ่าเชื้อโรคด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตแบบอัตโนมัติ สำหรับใช้ทดลองในห้องปฏิบัติการ โดย ใช้หลอดผลิตรังสีอัลตราไวโอเลต ขนาดกำลังไฟ 18 วัตต์ เมื่อคำนวณตามสูตร Keitz formula พบว่า ความเข้มรังสี อัลตราไวโอเลตที่ผลิตจากระบบฆ่าเชื้อโรค มีค่าเท่ากับ 27.6 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร (mW/cm²) หากใช้เวลาใน การฆ่าเชื้อโรค 1 วินาที จะมีปริมาณรังสีอัลตราไวโอเลต เท่ากับ 27.6 มิลลิวัตต์วินาทีต่อตารางเซนติเมตร (mW.s/cm²) ซึ่งเมื่ออ้างอิงจากตารางที่ 2 พบว่า มีค่าสูงกว่าปริมาณรังสีอัลตราไวโอเลตที่สามารถทำให้โคไลลดลง ที่ 6.6 มิลลิวัตต์วินาที ต่อตารางเซนติเมตร หรือร้อยละ 99 (2-log หรือ D₉₉)

ระบบฆ่าเชื้อโรคด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตแบบอัตโนมัติ ประกอบด้วย

3.2.1 หลอดผลิตรังสีอัลตราไวโอเลต ขนาดกำลังไฟ 18 วัตต์

3.2.2 ชุดอุปกรณ์สำหรับติดตั้งหลอดรังสีอัลตราไวโอเลต

3.2.3 ระบบตั้งเวลา เปิดปิดการทำงาน



รูปที่ 2 แผนภาพระบบฆ่าเชื้อโรคด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตแบบอัตโนมัติ



รูปที่ 3 หลอดผลิตรังสีอัลตราไวโอเลต
ประเภทแรงดันไอปรอทต่ำ ขนาดกำลังไฟ 18 วัตต์



รูปที่ 4 ระบบฆ่าเชื้อโรคด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต
แบบอัตโนมัติ (ต้นแบบทดลองในห้องปฏิบัติการ)

3.3 ผลการทดลองใช้งานระบบฆ่าเชื้อโรคด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตแบบอัตโนมัติในห้องปฏิบัติการ

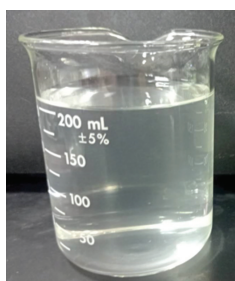
ผลการทดลองใช้งานระบบฆ่าเชื้อโรคด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตแบบอัตโนมัติในห้องปฏิบัติการ พบว่า น้ำดิบผ่านการตกตะกอน มีค่าความขุ่นลดลงจากค่า 125 เอ็นทียู เหลือเพียง 1.37 เอ็นทียู ค่าความเป็นกรดและด่าง เท่ากับ 6.7 และเมื่อผ่านระบบฆ่าเชื้อโรคด้วยแสงอัลตราไวโอเลตแบบอัตโนมัติ ในช่วงเวลา 5 นาทีเป็นต้นไป ไม่พบโคลิฟอร์มแบคทีเรีย ซึ่งผลการตรวจสอบมีค่าเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำประปาบริโภคได้ของกรมอนามัย

ตารางที่ 3 ผลทดสอบความเป็นกรดและด่าง และความขุ่น ของตัวอย่างน้ำดิบที่ผ่านการทดลองในห้องปฏิบัติการ

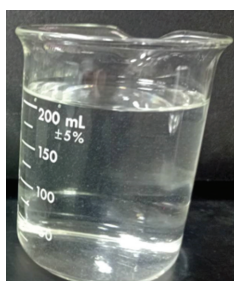
ลำดับ	รายการทดสอบคุณภาพน้ำ	หน่วยวัด	ค่ามาตรฐาน	ผลทดสอบ	
				น้ำดิบ	น้ำดิบที่ผ่านการตกตะกอน
1	ความขุ่น (Turbidity)	เอ็นทียู	ไม่เกิน 5	125	1.37
2	ความเป็นกรดและด่าง (pH)	-	6.5 – 8.5	7.6	6.7

ตารางที่ 4 ผลทดสอบโคลิฟอร์มแบคทีเรียของตัวอย่างน้ำดิบที่ผ่านการทดลองในห้องปฏิบัติการ ด้วยชุดตรวจโคลิฟอร์มแบคทีเรีย อ.11 ของกรมอนามัย

ช่วงเวลาที่ผ่านระบบฆ่าเชื้อโรคด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตแบบอัดโนมิตี (นาท)	ผลทดสอบ	ข้อแนะนำ
0	สีเหลืองมีความขุ่น (+)	พบโคลิฟอร์มแบคทีเรีย
5	สีแดงจางเล็กน้อย (-)	ไม่พบโคลิฟอร์มแบคทีเรีย
10	สีแดงจางเล็กน้อย (-)	ไม่พบโคลิฟอร์มแบคทีเรีย
20	สีแดงจางเล็กน้อย (-)	ไม่พบโคลิฟอร์มแบคทีเรีย



รูปที่ 5 ตัวอย่างน้ำดิบ



รูปที่ 6 ตัวอย่างน้ำดิบผ่านเครื่องกรอง



รูปที่ 7 ผลการตรวจโคลิฟอร์มแบคทีเรียด้วยชุดตรวจโคลิฟอร์มแบคทีเรีย อ.11 ของกรมอนามัย

3.4 การอภิปรายผล

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาระบบฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้านด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตแบบอัดโนมิตีและทดสอบการใช้งานเบื้องต้นในห้องปฏิบัติการ ซึ่งผลการวิจัยสามารถอภิปรายผลได้ดังนี้

3.4.1 การฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้านของประเทศไทยใช้สารละลายคลอรีนยังพบปัญหา ไม่สามารถควบคุมคุณภาพน้ำประปาหมู่บ้านให้เป็นไปตามมาตรฐานน้ำประปาดื่มได้ของกรมอนามัย จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาวิจัยกระบวนการฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้านให้มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น ซึ่งระบบฆ่าเชื้อโรคด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตแบบอัดโนมิตีที่ดำเนินการออกแบบและพัฒนาสามารถผลิตปริมาณรังสีอัลตราไวโอเลต เท่ากับ 27.6 มิลลิวัตต์.วินาทีต่อตารางเซนติเมตร (mW.s/cm^2) ทำให้จำนวนโค.ไคและเชื้อโรคส่วนใหญ่ ลดลงร้อยละ 99 (2-log หรือ D_{99}) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองใช้งานระบบฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้านด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตแบบอัดโนมิตี ในตัวอย่างน้ำดิบที่ผ่านการตกตะกอนแล้ว มีความขุ่น เท่ากับ 1.37 เอ็นทียู และความเป็นกรดและด่าง เท่ากับ 6.7 โดยค่าตามมาตรฐานน้ำประปาดื่มได้ของกรมอนามัย คือ ความขุ่น น้อยกว่า 5 เอ็นทียู และค่าความเป็นกรดและด่าง ระหว่าง 6.5 – 8.5 และเมื่อได้รับรังสีอัลตราไวโอเลตเวลามากกว่า 5 นาทีขึ้นไป ไม่พบโคลิฟอร์มแบคทีเรียในตัวอย่างน้ำ ดังนั้นการนำระบบฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้านด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตแบบอัดโนมิตีไปใช้งานจริงในพื้นที่ต่าง ๆ ในชนบทและถิ่นทุรกันดาร จึงมีความเป็นไปได้ที่จะทำระบบประปาหมู่บ้านของประเทศไทยมีคุณภาพน้ำเป็นไปตามมาตรฐานน้ำประปาดื่มได้ของกรมอนามัย ทั้งนี้ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในเรื่องความคุ้มค่าจากการใช้ระบบฆ่าเชื้อโรคและแนวทางการขยายผลการใช้งานเชิงพื้นที่ เพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับเสนอแนะให้กับหน่วยงานที่เกี่ยวข้องต่อไป

3.4.2 ในการทดลองประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโรคในน้ำดิบตัวอย่างด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตในห้องปฏิบัติการ คณะผู้วิจัยได้จำลองการทดลองให้ใกล้เคียงลักษณะการเก็บน้ำในหลอดสูง มีปริมาณน้ำและกำลังไฟฟ้าของหลอดรังสีอัลตราไวโอเลตที่เหมาะสม เพื่อเป็นข้อมูลให้สามารถขยายผลการคำนวณจำนวนหลอดรังสีอัลตราไวโอเลตและกำลังไฟฟ้า

สำหรับการติดตั้งระบบฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้านด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตแบบอัตโนมัติบนหอถังสูงต่อไป โดยมีข้อจำกัดของการทดลองในด้าน (1) เวลาสำหรับการตรวจสอบเชื้อโรค ซึ่งต้องใช้เวลาน้อย 24 ชั่วโมง ตามวิธีการเปรียบเทียบกับสีสารละลายของชุดตรวจโคลิฟอร์มแบคทีเรีย อ.11 ของกรมอนามัย ทำให้ต้องวางแผนการทดลองให้เหมาะสม และ (2) การใช้งานหลอดรังสีอัลตราไวโอเลตที่ต้องมีความระมัดระวังสูง จากการได้รับรังสีอัลตราไวโอเลตในขณะที่ทำการทดลอง และกรณีหลอดรังสีอัลตราไวโอเลตชำรุดเสียหาย ซึ่งจะทำให้ไอปรอทรั่วไหลออกมา จึงจำเป็นต้องจัดทำชุดอุปกรณ์สำหรับติดตั้งและครอบหลอดรังสีอัลตราไวโอเลตเพื่อป้องกันและทำให้เกิดความสะดวกในการทดลอง การทำความสะอาด และการตรวจสอบขณะใช้งาน ซึ่งโดยทั่วไปหลอดรังสีอัลตราไวโอเลตจะมีอายุการใช้งาน 9000 ชั่วโมงหรือ 1 ปีโดยประมาณ

3.4.3 ปัจจุบันในประเทศไทยมีการใช้ระบบฆ่าเชื้อด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตในระบบกรองน้ำเพื่อดื่มทั่วไปในระดับครัวเรือนและเชิงพาณิชย์ แต่ยังไม่มีการนำมาใช้กับระบบประปาหมู่บ้าน ซึ่งมีท่อจ่ายน้ำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว ส่วนต่างประเทศในทวีปยุโรปมีการนำมาใช้ตั้งแต่ ครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ.1910 ที่เมืองมาร์กเซย ประเทศฝรั่งเศส นอกจากนี้ในประเทศสหรัฐอเมริกา หรือในเอเชียอย่างสาธารณรัฐประชาชนจีน มีการนำระบบฆ่าเชื้อด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตมาใช้อย่างแพร่หลาย โดยติดตั้งระบบฆ่าเชื้อโรคทั้งในโรงผลิตน้ำประปาและโรงบำบัดน้ำเสีย และมีอุปกรณ์ระบบฆ่าเชื้อด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตจำหน่ายทั้งในระดับครัวเรือนและระดับชุมชนเมือง [9] ผลงานวิจัยนี้จึงเป็นข้อมูลที่สามารถนำไปใช้ในการขยายผลการติดตั้งระบบฆ่าเชื้อโรคให้กับระบบประปาหมู่บ้านในพื้นที่ต่าง ๆ ตามที่มีการใช้งานในต่างประเทศ เพื่อแทนการใช้สารละลายคลอรีน ซึ่งยังคงเป็นปัญหาในกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำประปาในระดับชุมชนของประเทศในปัจจุบัน

4. สรุป (Conclusion)

ปัญหาในระบบประปาหมู่บ้านส่วนใหญ่ของประเทศยังไม่สามารถผลิตน้ำประปาให้เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานน้ำประปาดื่มได้ของกรมอนามัย ได้แก่ แหล่งน้ำดิบที่มีคุณภาพต่ำ กระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำที่ไม่มีมาตรฐาน และการขาดแคลนบุคลากรที่มีความรู้ในการดูแลระบบประปาหมู่บ้าน การศึกษานี้จึงต้องการออกแบบและพัฒนาระบบฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้านด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตแบบอัตโนมัติ เพื่อแก้ไขปัญหาการปนเปื้อนเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้าน อันเกิดจากกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำและการขาดแคลนทรัพยากรบุคคลดังกล่าว

ระบบฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้านด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตแบบอัตโนมัติที่ได้จากงานวิจัยนี้ เป็นแบบเบื้องต้นสำหรับการทดลองในห้องปฏิบัติการ โดยให้หลอดผลิตรังสีอัลตราไวโอเลต ชนิดไอปรอทแรงดันต่ำ ขนาดกำลังไฟ 18 วัตต์ เมื่อคำนวณตามสูตร Keitz formula พบว่า ความเข้มรังสีอัลตราไวโอเลตที่ผลิตจากระบบฆ่าเชื้อโรค มีค่าเท่ากับ 27.6 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร (mW/cm^2) หากใช้เวลาในการฆ่าเชื้อโรค 1 วินาที จะมีปริมาณรังสีอัลตราไวโอเลต เท่ากับ 27.6 มิลลิวัตต์.วินาทีต่อตารางเซนติเมตร ($\text{mW.s}/\text{cm}^2$) ซึ่งมีค่าสูงกว่าปริมาณรังสีอัลตราไวโอเลตที่สามารถทำให้โอ.โคไล และเชื้อโรคส่วนใหญ่ ลดลงร้อยละ 99 (2-log หรือ D_{99}) การทดลองใช้งานระบบฆ่าเชื้อโรคด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตที่พัฒนาและออกแบบในห้องปฏิบัติการ พบว่า ตัวอย่างน้ำดิบที่ตกตะกอนแล้ว มีค่าความขุ่น เท่ากับ 1.37 เอ็นทียู และความเป็นกรดและด่าง เท่ากับ 6.7 เมื่อได้รับรังสีอัลตราไวโอเลตเวลามากกว่า 5 นาทีขึ้นไป ไม่พบโคลิฟอร์มแบคทีเรียในตัวอย่างน้ำ ดังนั้นผลการทดสอบระบบฆ่าเชื้อโรคในระดับห้องปฏิบัติการสามารถใช้ฆ่าเชื้อโรคในตัวอย่างน้ำดิบได้

จากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ช่วยให้สามารถขยายผลทำการศึกษาระดับระบบประปาหมู่บ้านได้ต่อไป โดยคณะผู้วิจัยมีแนวคิดในการใช้หลอดรังสีอัลตราไวโอเลตที่มีปริมาณความเข้มรังสีที่เหมาะสมกับปริมาณการใช้น้ำของชุมชน และใช้วัสดุอุปกรณ์ที่ทนทานต่อแรงดันน้ำสูงเพื่อรองรับการใช้งานแบบในน้ำได้ปลอดภัยและป้องกันการแตกของหลอดรังสีอัลตราไวโอเลตเนื่องจากภายในบรรจุไอปรอทไว้ ทำการตั้งติดระบบตั้งเวลาทำงานแบบอัตโนมัติเพื่อเพิ่มความสะดวกในการใช้งานและรักษาอายุการใช้งานของหลอดรังสีอัลตราไวโอเลต รวมทั้งกำหนดคุณภาพน้ำประปาที่ระบบประปาผลิตได้ต้องมีค่าความขุ่นเกิน 5 เอ็นทียู ซึ่งเป็นค่าความขุ่นตามมาตรฐานน้ำประปาดื่มได้ของกรมอนามัย โดยทำการติดตั้งระบบฆ่าเชื้อโรคร่วมกับการผลิตน้ำประปาหมู่บ้าน ในบริเวณหอถังสูงก่อนปล่อยน้ำสู่ท่อจ่ายน้ำประปาหมู่บ้านเพื่อจ่ายน้ำ

ให้แก่ประชาชน พร้อมทั้งวางแผนการฝึกอบรมถ่ายทอดเทคโนโลยีเพื่อให้ประดิษฐ์ใช้งานได้เองของชุมชนในพื้นที่ ซึ่งจะเป็นการช่วยเสริมสร้างศักยภาพความสามารถพึ่งตนเองของชุมชน เพื่อยกระดับด้านสุขภาพอนามัยของชุมชนให้ดีขึ้น และสามารถขยายผลไปในพื้นที่อื่น ๆ ทั่วประเทศต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

ผู้นิพนธ์บทความวิจัย ขอขอบคุณบุคลากรสถาบันวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีชุมชน กรมวิทยาศาสตร์บริการ ที่ให้ความร่วมมือสนับสนุนงานวิจัยนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] AMARC. ทำไมเราถึงดื่มน้ำประปา (ยัง) ไม่ได้ [อินเทอร์เน็ต]. 2566 [เข้าถึงเมื่อ 19 ธันวาคม 2567]. เข้าถึงได้จาก: <https://www.amarc.co.th/en/amarc-en-article-tap-water/>
- [2] กรมอนามัย. ประกาศกรมอนามัย เรื่อง เกณฑ์คุณภาพน้ำประปาดื่มได้ พ.ศ. 2563 [อินเทอร์เน็ต]. 2563 [เข้าถึงเมื่อ 19 ธันวาคม 2567]. เข้าถึงได้จาก: <https://laws.anamai.moph.go.th/th/practices/201133>
- [3] สำนักงานทรัพยากรน้ำแห่งชาติ. ประกาศสำนักงานทรัพยากรน้ำแห่งชาติ เรื่อง แผนแม่บทการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำ 20 ปี (พ.ศ. 2561-2580). ราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 136 ตอนพิเศษ 234 ง, 18 กันยายน 2562. 11.
- [4] กรมอนามัย, สำนักสุขาภิบาลอาหารและน้ำ. รายงานสรุปสถานการณ์คุณภาพน้ำบริโภคในครัวเรือน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2565. กรุงเทพฯ: สำนักสุขาภิบาลอาหารและน้ำ; 2565.
- [5] สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ. คำแนะนำสำหรับการใช้หลอดยูวี ทำลายเชื้อโควิด 19 [อินเทอร์เน็ต]. 2563 [เข้าถึงเมื่อ 12 ธันวาคม 2567]. เข้าถึงได้จาก: <https://www.nimt.or.th/main/>
- [6] Caroline Kochelek. Misleading math: Kill claims and log reduction [Internet]. 2019 [cited 2024 Dec 12]. Available from: <https://infectioncontrol.tips/2019/06/17/kill-claims-and-log-reduction/>
- [7] Paidalwar AA, Khedikar IP. Overview of water disinfection by UV technology – A review. Int J Sci Technol Eng. 2016;2(09):213-9. doi: 10.13140/RG.2.2.30976.25608.
- [8] กรมทรัพยากรน้ำ, สำนักบริหารจัดการน้ำ. คู่มือผู้ควบคุมการผลิตน้ำประปา ระบบประปาผิวดิน รูปแบบของกรมทรัพยากรน้ำ. กรุงเทพฯ: สำนักบริหารจัดการน้ำ; 2553.
- [9] Sun W, Ao X, Lu D, Zhang Y, Xue Y, He S, et al. Ultraviolet technology application in urban water supply and wastewater treatment in China: Issues, challenges and future directions. Water Research X. 2024;23:1-8. doi: 10.1016/j.wroa.2024.100225.

การพัฒนาเทคนิคการวิเคราะห์รอยต่างของงานพิมพ์ด้วยภาพถ่าย โดยใช้การวิเคราะห์ภาพ เพื่อประเมินคุณภาพงานพิมพ์อย่างแม่นยำ ในอุตสาหกรรมกระดาษ

Development of an image analysis-based technique for precise evaluation of print mottle in the paper industry

ศิริลักษณ์ บ่องเกียรติชัย¹, โกสินทร์ หาชะวี¹, วโรตม์ พรหมบุญ²

Siriluk Pongkeatchai¹, Kosin Hachawee¹, Warot Promboon²

รับบทความ 19 พฤษภาคม 2568 แก้ไขบทความ 10 พฤศจิกายน 2568 ยอมรับตีพิมพ์ 11 พฤศจิกายน 2568

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งพัฒนาเทคนิคการประเมินรอยต่างของงานพิมพ์ (Print mottle) ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญที่กระทบต่อคุณภาพงานพิมพ์ โดยเฉพาะบริเวณที่พิมพ์พื้นทึบ เทคนิคที่นำเสนอใช้การประมวลผลภาพถ่ายร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สอดคล้องกับการรับรู้ของสายตามนุษย์ (Human visual system) เพื่อให้การประเมินมีความแม่นยำและสม่ำเสมอกว่าการตรวจด้วยสายตา การทดลองประกอบด้วย (1) การสร้างภาพจำลอง และ (2) การใช้ตัวอย่างงานพิมพ์จริงจากโรงพิมพ์ นำภาพพิมพ์ตัวอย่างมาวิเคราะห์ด้วยหลายเทคนิคแล้วเปรียบเทียบค่าความสัมพันธ์ (Correlation) กับการประเมินของผู้เชี่ยวชาญ ผลการวิเคราะห์ด้วยหลายเทคนิคพบว่าเทคนิคตัวกรองแบนด์พาส (Bandpass filtering) และเทคนิคมอดิฟายด์สัมประสิทธิ์การแปรผัน (Modified coefficient of variation) ให้ค่าความสัมพันธ์กับการประเมินของผู้เชี่ยวชาญต่ำกว่า 0.8 ขณะที่เทคนิคไทล์เซลล์ (Tile cell method) ให้ค่า 0.8-0.9 แต่เทคนิคอินทิเกรชันโมเดลแบบง่าย (Integration simple model) ให้ค่าสูงมากกว่า 0.9 ซึ่งแสดงถึงค่ามีความใกล้เคียงกับการประเมินด้วยสายตามนุษย์มากที่สุด อีกทั้งเทคนิคที่พัฒนาขึ้นยังสามารถใช้งานได้กับอุปกรณ์ทั่วไป เช่น เครื่องสแกนเนอร์และซอฟต์แวร์วิเคราะห์ภาพ จึงเหมาะสำหรับการควบคุมคุณภาพงานพิมพ์ในกระบวนการผลิตกระดาษและบรรจุภัณฑ์

คำสำคัญ: รอยต่างของงานพิมพ์, ดัชนีความไม่สม่ำเสมอของงานพิมพ์, รีเฟลกแดนซ์, คุณภาพงานพิมพ์

¹หน่วยงานวิจัยบรรจุภัณฑ์ ศูนย์พัฒนานวัตกรรมและเทคโนโลยี บริษัท เอสซีจี แพคเกจจิ้ง จำกัด (มหาชน) จังหวัดราชบุรี 70110 ประเทศไทย

²นักวิจัยอิสระ

Abstract

This research aims to develop a technique for evaluating print mottle, a critical defect that affects print quality, particularly in solid-printed areas. The proposed method combines image processing with a mathematical model aligned with the human visual system (HVS) to achieve greater accuracy and consistency than visual inspection alone. The experimental work comprised (1) the creation of simulated images and (2) the use of actual printed samples obtained from commercial printing facilities. These samples were analyzed using multiple techniques, and the resulting measurements were compared with expert visual assessments to determine correlation values. The results indicate that bandpass filtering and the modified coefficient of variation yielded correlations below 0.8, while the tile cell method achieved correlations in the range of 0.8-0.9. In contrast, an integration model in the form of a simple model achieved the higher correlation values of more than 0.9, indicating the closest alignment with human visual assessment. Furthermore, the proposed approach can be implemented using common equipment such as flatbed scanners and image-analysis software, making it highly suitable for quality control in paper and packaging production processes.

Keywords: Print mottling, Mottle index, Reflectance, Print quality

¹Packaging Research, Innovation and Product Development Center, SCG Packaging PLC, Ratchaburi 70110, Thailand

²Independent Researcher

*Corresponding author e-mail address: sirilukp@scg.com

1. บทนำ (Introduction)

ในอุตสาหกรรมภาพพิมพ์เชิงพาณิชย์ที่มีการแข่งขันสูง ความสมบูรณ์ของภาพพิมพ์และความคมชัดของสีเป็นองค์ประกอบสำคัญที่ส่งผลต่อการรับรู้คุณภาพโดยผู้บริโภค ความผิดปกติของภาพพิมพ์ที่พบได้บ่อยคือ “รอยด่าง (Print mottle)” ซึ่งเกิดจากความไม่สม่ำเสมอของการกระจายหมึกบนพื้นผิวกระดาษ ปัญหานี้ไม่ได้เป็นเพียงข้อจำกัดทางเทคนิค แต่ยังส่งผลต่อความน่าเชื่อถือของแบรนด์และมูลค่าสินค้า ที่ผ่านมามีผลงานวิจัยที่ศึกษาปัญหาการรอยด่างของงานพิมพ์ (Print mottle) หลากหลายประเภท ทั้งรอยด่างจากพรินเตอร์ (Printer mottle), รอยด่างจากร่องดักหมึก (Ink trap mottle), รอยด่างจากแบคแทรพ (Back-trap mottle), รอยด่างจากวอเตอร์อินเทอร์เฟียร์เรนซ์ (Water interference mottle) และรอยด่างจากเพลนเพเปอร์ (Plain paper mottle) หรือรอยด่างจากความมันวาว (Gloss mottle) [1-6] ซึ่งสาเหตุของปัญหาดังกล่าวเกี่ยวข้องกับชนิดหมึกพิมพ์ ชนิดกระดาษ และสภาวะการพิมพ์ ที่ไม่เหมาะสม

การประเมินรอยด่างจากงานพิมพ์ส่วนใหญ่อาศัยการตรวจสอบด้วยสายตามนุษย์ ซึ่งมีความแปรปรวนสูงเนื่องจากอคติส่วนบุคคลและความล่าช้าในการประเมิน ด้วยเหตุนี้จึงมีการศึกษาและพัฒนาวิธีการประเมินรอยด่างจากงานพิมพ์ที่ใช้เทคนิคการประมวลผลภาพถ่าย (Image-based assessment) ร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สะท้อนลักษณะการรับรู้ของสายตามนุษย์

เริ่มจากปี ค.ศ. 2000-2009 มีการประเมินเกรนินเนส (Graininess) และรอยด่าง (Mottle) โดยการใช้ค่าความถี่ผ่านการแบ่ง Tile cell เป็นเกณฑ์ [7] จากนั้น มีความพยายามคำนวณค่าดัชนีรอยด่าง (Mottle index) ผ่านค่ามีนรีเฟล็กแตนซ์ (Mean reflectance) โดยพิจารณาปัจจัยที่เกี่ยวข้องของหลายปัจจัย เช่น ค่าโคเซเนสออฟแวริเอชัน (Coarseness of variation) และแมกนิจูดออฟแวริเอชัน (Magnitude of variation) จากการกรองสัญญาณภาพตามความถี่ที่สนใจ ต่อมาได้มีการศึกษาที่พิจารณการใช้เวตติ้งฟังก์ชัน (Weighting function) ในช่วงความถี่ที่สอดคล้องกับความสามารถในการมองเห็นความแปรปรวนของการพิมพ์ (Print variation) ของคนโดยพิจารณาจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สอดคล้องกับการรับรู้ของสายตามนุษย์ (Human visual system หรือ HVS) [8] แต่ผลการประเมินก็ยังไม่สอดคล้องกับสายตามนุษย์ ต่อมาในช่วงปี ค.ศ. 2010-2020 มีการวิเคราะห์ด้วยคลื่นเวฟเลต (Wavelet) การตรวจสอบลักษณะทางสถิติของภาพ เช่น ค่าเอนโทรปี (Entropy) หรือฮิสโตแกรมเบสฟีเชอร์ (Histogram-based features) รวมถึงการใช้โครงข่ายประสาทเทียมเพื่อจำแนกรอยด่างและการใช้โมเดลฟิสิกส์ในการแยกความถี่ของความเปรียบต่างของภาพ (Spatial contrast sensitivity model) เพื่อสร้างตัวบ่งชี้ที่สอดคล้องกับการรับรู้ของมนุษย์ [9-12] แต่อย่างไรก็ตาม แต่ละแนวทางยังมีข้อจำกัดทั้งในด้านความแม่นยำ ความสามารถในการนำไปใช้จริง หรือความไวต่อเงื่อนไขของแหล่งกำเนิดภาพ และยังต้องอาศัยเครื่องมือเฉพาะทางหรือซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ที่มีต้นทุนสูง

การศึกษาหลักการวิเคราะห์รอยด่างงานพิมพ์ด้วยภาพถ่าย (Image-based technique) และข้อจำกัดของการวิเคราะห์รอยด่างวิธีต่าง ๆ เพื่อปรับปรุงแบบจำลองการวิเคราะห์ให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่สอดคล้องกับสายตามนุษย์และเหมาะสมกับกระดาษและปัญหาที่เกิดขึ้นจริง มีการตรวจสอบค่าความสัมพันธ์ของผลการวิเคราะห์จากภาพถ่ายเปรียบเทียบกับ การประเมินด้วยสายตา สามารถให้ผลการตรวจสอบความไม่สม่ำเสมอของงานพิมพ์ที่มีความแม่นยำมากขึ้นโดยการปรับแต่งภาพและคัดกรองข้อมูลที่ผิดปกติออกก่อนขั้นตอนการวิเคราะห์ความไม่สม่ำเสมอของสีของภาพ นอกจากนี้ยังสามารถใช้อุปกรณ์ เครื่องมือ หรือโปรแกรมวิเคราะห์ภาพถ่ายที่มีอยู่ทั่วไปในการตรวจสอบความไม่สม่ำเสมอของงานพิมพ์

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเทคนิคการวิเคราะห์รอยด่างของงานพิมพ์ (Print mottle) ที่ไม่เพียงมีความถูกต้องและความแม่นยำสูง (ค่า Correlation เทียบกับการประเมินด้วยสายตามนุษย์มากกว่า 0.8) แต่ยังสามารถทำงานร่วมกับอุปกรณ์ที่มีอยู่ทั่วไปในโรงงาน ตัวอย่างเช่น สแกนเนอร์และกล้องดิจิทัลทั่วไป โดยเน้นการพัฒนาอัลกอริทึมที่ผสานระหว่างการแยกความถี่ภาพ (Frequency decomposition) และการชั่งน้ำหนักตามการตอบสนองของระบบการมองเห็นของมนุษย์ ซึ่งเป็นแนวทางใหม่ที่จะช่วยลดความคลาดเคลื่อนระหว่างผลการวิเคราะห์กับการประเมินของผู้เชี่ยวชาญ

2. วิธีการวิจัย (Experimental Methods)

2.1 ขั้นตอนการเตรียมภาพตัวอย่าง

ขั้นตอน	รายละเอียดของชุดภาพตัวอย่าง	วัตถุประสงค์หลัก
2.1.1 การสร้างและพิมพ์ภาพดิจิทัล	ชุดที่ 1: ภาพโทนสีเทา 9 ภาพ (ImageJ และ Laser printer HP2605) ปรับ Gaussian noise ในระดับที่แตกต่างกันอย่างเด่นชัด (ด้วยค่า Mean และ SD ที่ต่างกัน) โดยกำหนดให้ค่าความเข้มสีเฉลี่ยเท่ากันทุกภาพ (เพื่อตัดปัจจัยความเข้มสี) (ดังรูปที่ 1)	คัดกรองวิธีวิเคราะห์ต่าง ๆ ในเบื้องต้น โดยเน้นที่ผลของระดับนอยส์ (Noise)
	ชุดที่ 2: ภาพที่มีการกำหนด Gaussian noise ในระดับต่าง ๆ กัน (Mean, SD) รวมทั้งกำหนด Mean gray value ในระดับต่าง ๆ กัน (164, 174 และ 184) (ดังรูปที่ 2)	ศึกษาผลของความเข้มสีของภาพ (Mean gray intensity หรือ Mean reflectance) ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่กระทบต่อผลการประเมิน
2.1.2 การเตรียมตัวอย่างงานพิมพ์จริงจากโรงพิมพ์	ชุดที่ 3: ภาพที่ผ่านการพิมพ์ Offset ในบริเวณที่พิมพ์พื้นตาสีเทา (Gray print) และสีน้ำเงิน (Blue print) (ดังรูปที่ 3)	ใช้ตัวอย่างงานพิมพ์จริง เพื่อให้ผลการวิเคราะห์มีความสอดคล้องกับการใช้งานจริง

2.2 การวิเคราะห์ Print mottle และการประเมินความสอดคล้อง

2.2.1 การเก็บข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์

2.2.1.1 การประเมินคุณภาพด้วยสายตามนุษย์: ดำเนินการโดยใช้ผู้ประเมิน 5 ท่าน เพื่อสร้างค่าอ้างอิงสำหรับการประเมินการรับรู้ความแปรปรวนของการพิมพ์ของมนุษย์

2.2.1.2 การเก็บภาพด้วยเครื่องสแกนเนอร์: ใช้เครื่อง CanoScan 4400F ที่ความละเอียด 600 dpi เพื่อให้ได้ข้อมูลภาพดิจิทัลสำหรับนำไปวิเคราะห์ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์

2.2.2 การวิเคราะห์ Print mottle ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ (รวม 47 วิธี)

กลุ่มวิธี	รายละเอียด	จำนวนวิธี
ก. วิธีจากเครื่องมือวิเคราะห์ทางการค้า (ISO/IEC 13660:2001)	ใช้หลักการ Tile cell กำหนด Cell size 4 ขนาด: 0.420 mm, 0.635 mm, 1.27 mm (ตามมาตรฐาน) และ 2.54 mm และในแต่ละ Cell size จะใช้ค่า Mottle ของสีที่ต่างกัน 7 สีในการประเมิน	4x7=28 วิธี
ข. วิธีที่พัฒนาขึ้นเอง (PRECISEPRO: Versatile image analyzer)	ใช้หลักการ Tile cell, Bandpass method, Integration model และ Mottle index กำหนดสภาวะการวิเคราะห์ต่าง ๆ กัน รวม 19 วิธี โดยมีการนำหลักการ Modified COV (Modified coefficient of variation) และ CSF (Contrast sensitivity function) มาประยุกต์ใช้เพื่อปรับปรุงความสอดคล้องกับการประเมินด้วยสายตามนุษย์	19 วิธี

2.2.3 การเปรียบเทียบและการสรุปผล

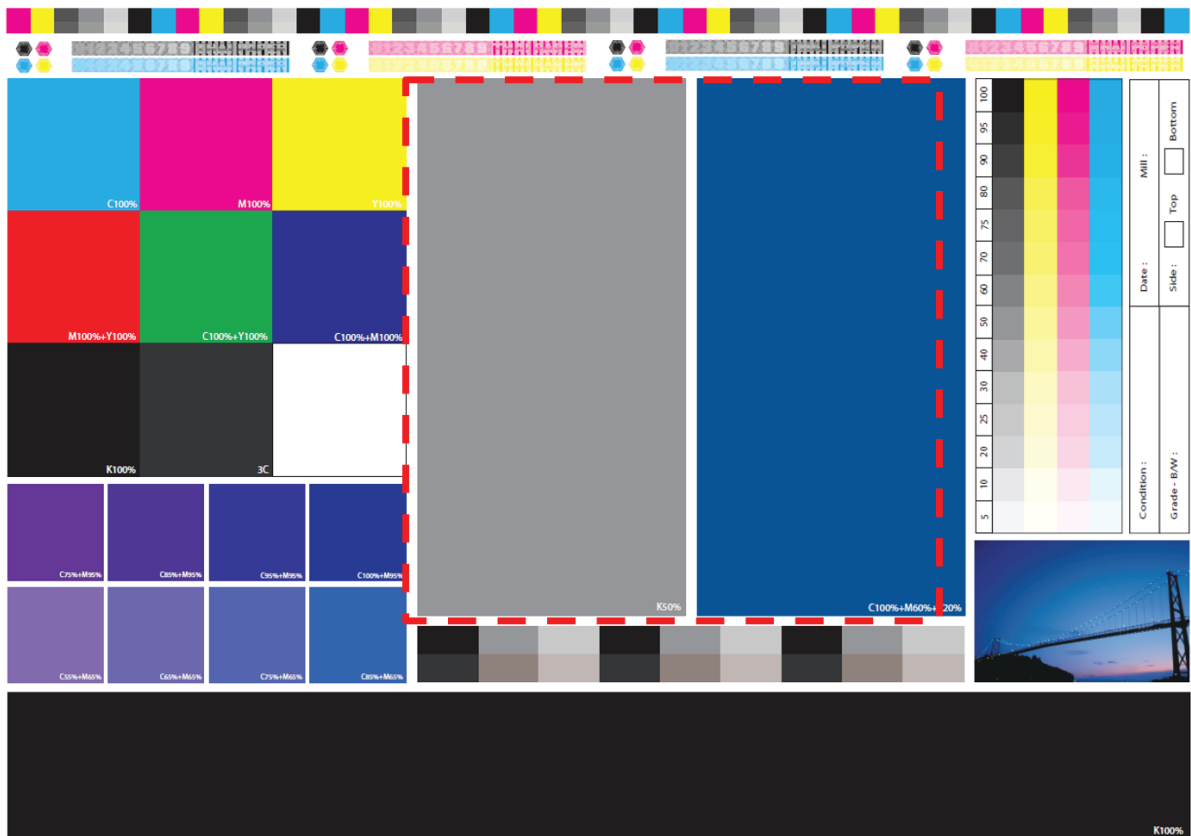
การเปรียบเทียบค่า Correlation โดยคำนวณค่าสหสัมพันธ์ระหว่างผลการวิเคราะห์ Print mottle ที่ได้จากเครื่องมือที่ใช้สมการทางคณิตศาสตร์ (รวม 47 วิธี) กับค่าการประเมินที่ได้จากสายตาของมนุษย์ เพื่อระบุวิธีการทางคณิตศาสตร์ที่สามารถทำนายความรู้สึกของมนุษย์ได้อย่างแม่นยำที่สุด



รูปที่ 1 ภาพสร้างจากคอมพิวเตอร์ (ชุดที่ 1) เพื่อให้เกิด Mottle ระดับที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน
(Simulated image/Different variation (Noise)/ Same mean gray level (Reflectance))



รูปที่ 2 ภาพสร้างจากคอมพิวเตอร์ (ชุดที่ 2) เพื่อให้เกิด Intensity variation (Noise) และ Mean gray value ในระดับที่แตกต่างกัน (Simulated image/Different variation (Noise)/Different mean gray level (Reflectance))



รูปที่ 3 ภาพงานพิมพ์ Offset (ชุดที่ 3)

3. ผลและวิจารณ์ (Results and discussion)

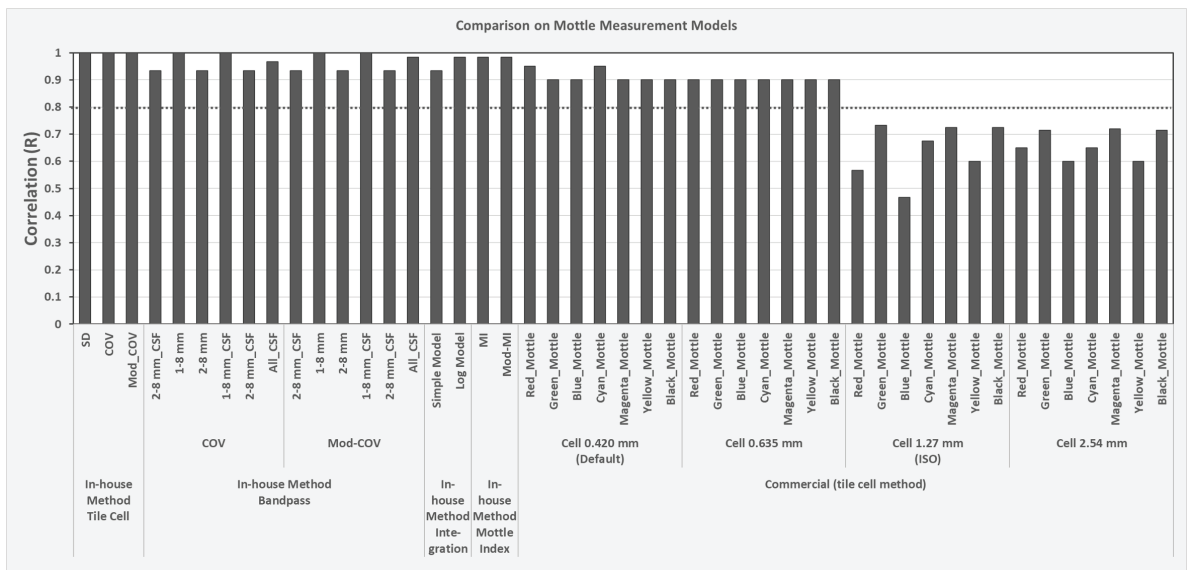
3.1 การเปรียบเทียบวิธีการวิเคราะห์ Print mottle สำหรับตัวอย่างภาพที่สร้างขึ้นด้วยคอมพิวเตอร์ (ตัวอย่างชุดที่ 1)

จากรูปที่ 4 การประเมิน Print mottle โดยวิธีการที่พัฒนาขึ้นเองซึ่งใช้เครื่องมือ PRECISEPRO: Versatile image analyzer ที่ใช้หลักการ Tile cell, Bandpass, Integration model และ Mottle index ให้ผลการประเมินสอดคล้องกับการประเมินด้วยสายตามนุษย์ โดยที่ค่า R มากกว่า 0.9 ส่วนการประเมินโดยเครื่องมือวิเคราะห์ทางการค้าที่ใช้หลักการ Tile cell ให้ Correlation ค่อนข้างดี ($R \sim 0.9$) เมื่อใช้ Cell size 0.420 และ 0.635 mm แต่หากใช้ Cell size ตามมาตรฐาน ISO/IEC 13660:2001 (1.27 mm) ค่า Correlation ได้น้อยกว่า 0.8 จากผลการทดลองเพื่อคัดกรองวิธีวิเคราะห์ต่าง ๆ ในเบื้องต้น โดยเน้นที่ผลของระดับนอยส์ (Noise) คือ Gaussian noise ในระดับที่แตกต่างกันอย่างเด่นชัด (ด้วยค่า Mean และ SD ที่ต่างกัน) โดยกำหนดให้ค่าความเข้มสีเฉลี่ยเท่ากันทุกภาพสรุปได้ว่าวิธีการที่พัฒนาขึ้นเองซึ่งใช้เครื่องมือ PRECISEPRO: Versatile image analyzer ให้ผลการประเมินสอดคล้องกับการประเมินด้วยสายตามนุษย์ โดยเฉพาะวิธี Tile cell ซึ่งให้ค่า Correlation = 1 และการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ทางการค้าที่ใช้หลักการ Tile cell จะต้องใช้ Cell size ที่มีขนาดเล็กกว่าขนาดมาตรฐานของ ISO/IEC 13660:2001 จึงจะให้ค่า Correlation มากกว่า 0.8 ซึ่งสอดคล้องกับคำแนะนำจากบริษัทผู้ผลิตเครื่องมือดังกล่าว

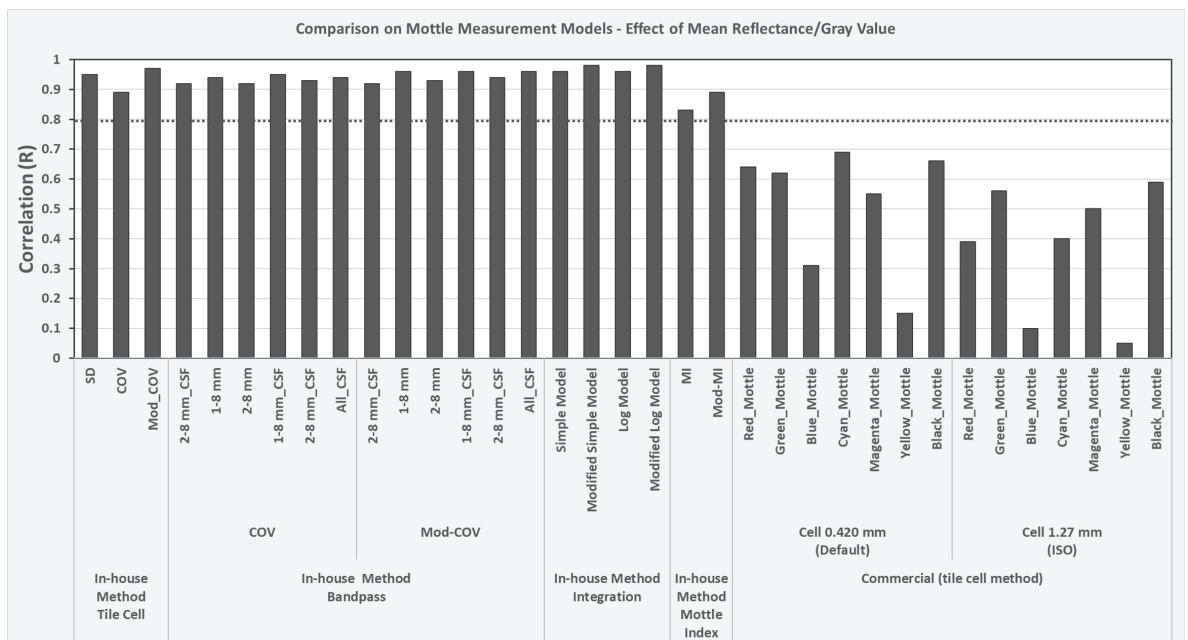
3.2 การเปรียบเทียบวิธีการวิเคราะห์ Print mottle สำหรับตัวอย่างภาพที่สร้างขึ้นด้วยคอมพิวเตอร์ (ตัวอย่างชุดที่ 2)

จากผลการทดลองที่แสดงในรูปที่ 5 วิธีการที่พัฒนาขึ้นเองซึ่งใช้เครื่องมือ PRECISEPRO: Versatile image analyzer ให้ผลประเมินสอดคล้องกับการประเมินด้วยสายตามนุษย์ โดยเฉพาะวิธี Tile cell (ที่ใช้ค่า Modified COV) และ

Integration model (แบบ Modified simple model และ Modified log model) ให้ค่า Correlation มากกว่า 0.97 ในขณะที่ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ทางการค้าที่ใช้หลักการ Tile cell (Cell size 0.42, 1.27 mm) ไม่สอดคล้องกับการประเมินด้วยสายตาตามมนุษย์ มี Correlation ต่ำกว่า 0.7 ซึ่งไม่เหมาะสมในการนำมาวิเคราะห์ Print mottle ในกรณีตัวอย่างที่มีความเข้มสี (Mean gray level) แตกต่างกัน ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่กระทบต่อผลการประเมินที่ทำให้ค่า Variance หรือ Standard deviation ของภาพเปลี่ยนไปโดยไม่เกี่ยวกับความไม่สม่ำเสมอจริง นอกจากนี้การใช้ Modified COV และ CSF function ทำให้ผลการประเมินทุกวิธีการสอดคล้องกับผลประเมินด้วยสายตาตามมนุษย์มากขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 1 และ 2 พบว่าสามารถปรับปรุงค่า Correlation ให้มีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 4 ค่า Correlation (R) ระหว่างผลการวิเคราะห์ Print mottle ด้วยวิธีการต่าง ๆ เปรียบเทียบกับผลประเมินด้วยสายตาตามมนุษย์ของตัวอย่างชุดที่ 1



รูปที่ 5 ค่า Correlation (R) ระหว่างผลการวิเคราะห์ Print mottle ด้วยวิธีการต่าง ๆ เปรียบเทียบกับผลประเมินด้วยสายตาตามมนุษย์ของตัวอย่างชุดที่ 2

ตารางที่ 1 ค่า Correlation (R) ระหว่างผลการวิเคราะห์ Print mottle ด้วยวิธีการต่าง ๆ ที่ศึกษาผลการใช้ COV และ Modified COV ช่วยในการประเมิน Print mottle เพื่อให้ค่า Correlation สูงขึ้น

Method		Correlation (R)		%Different
		COV (SD/Mean)	Modified COV (SD/Sqrt(Mean))	
Tile cell		0.886	0.968	9.3%
Bandpass	1-2 mm	0.942	0.955	1.4%
	2-8 mm	0.92	0.929	1.0%
	1-2 mm+CSF	0.946	0.959	1.4%
	2-8 mm+CSF	0.931	0.936	0.6%
Integration model	Simple integration	0.959	0.980	2.2%
	Log integration	0.962	0.978	1.6%
Mottle index		0.825	0.886	7.4%

ตารางที่ 2 ค่า Correlation (R) ระหว่างผลการวิเคราะห์ Print mottle ด้วยวิธีการต่าง ๆ ที่ศึกษาผลการใช้ CSF ช่วยในการประเมิน Print mottle เพื่อให้ค่า Correlation สูงขึ้น

Method		Correlation (R)		%Different
		without CSF	with CSF	
Bandpass 1-8 mm	COV	0.942	0.946	0.4%
	Modified COV	0.955	0.959	0.4%
Bandpass 2-8 mm	COV	0.920	0.931	1.1%
	Modified COV	0.929	0.930	0.7%

3.3 การเปรียบเทียบวิธีการวิเคราะห์ Print mottle สำหรับตัวอย่างที่ผ่านการพิมพ์ระบบ Offset (ตัวอย่างชุดที่ 3)

จากตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ Print mottle ด้วยสายตามนุษย์และจากรูปที่ 6-7 แสดงค่า Correlation ระหว่างผลการวิเคราะห์ Print mottle จากวิธีการต่าง ๆ เทียบกับการประเมินด้วยสายตามนุษย์และใช้ตัวอย่างงานพิมพ์จริง เพื่อให้ผลการวิเคราะห์มีความสอดคล้องกับการใช้งานจริง

ผลการวิเคราะห์บริเวณพื้นพิมพ์สีเทาจากรูปที่ 6 พบว่า มีวิธีที่ให้ Correlation มากกว่า 0.8 ได้แก่

3.3.1 วิธี Tile cell method (SD และ Modified COV)

3.3.2 วิธี Integration model (Simple model และ Log model)

3.3.3 วิธี Mottle index (Modified COV)

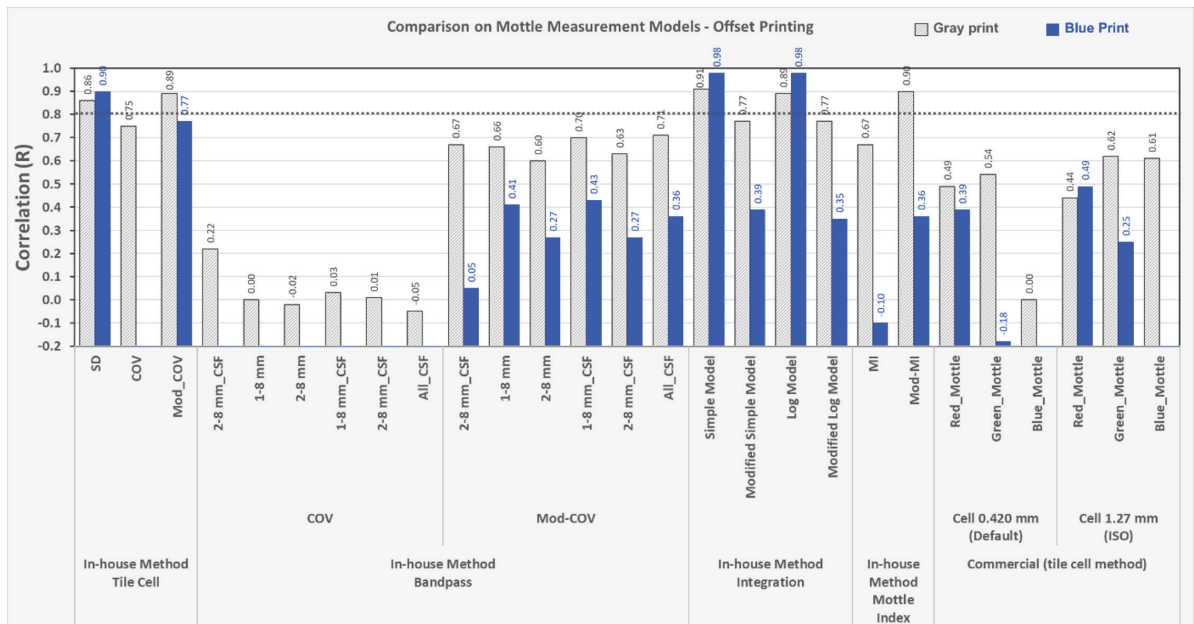
และพบว่าวิธีที่ให้ Correlation ต่ำกว่า 0.5 ซึ่งไม่เหมาะสมกับการนำมาใช้ได้แก่ ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ทางการค้าที่ใช้หลักการ Tile cell (Cell size 0.42, 1.27 mm)

วิธีการที่พัฒนาขึ้นเองที่ใช้เครื่องมือ PRECISEPRO: Versatile image analyzer ที่มีการผสมการแยกความถี่ภาพ (Frequency decomposition) ซึ่งการแยกความถี่จะช่วยให้แยกโครงสร้างของ Mottle ที่สายตามนุษย์มองเห็นได้จริงออกจาก Noise ที่ไม่เกี่ยวข้อง และการชั่งน้ำหนักตามการตอบสนองของระบบการมองเห็นของมนุษย์ (Weighting function) โดยสายตามนุษย์ไม่ได้ตอบสนองต่อทุก Spatial frequency เท่ากัน โดยเฉพาะวิธี Integration model (แบบ Simple model) ให้ค่า Correlation มากกว่า 0.9 และผลการวิเคราะห์บริเวณที่พิมพ์พื้นสีเทา (Gray print) จะให้ Correlation กับสายตามนุษย์สูงกว่าการวิเคราะห์บริเวณที่พิมพ์สีน้ำเงิน (Blue print) ส่วนผลการวิเคราะห์บริเวณพิมพ์พื้นสีน้ำเงินพบว่า มีเพียงวิธี Tile cell (SD) และ Integration model (Simple model และ Log model) เท่านั้นที่ให้ค่า Correlation มากกว่า 0.8 ซึ่งยังสอดคล้องกับการประเมินด้วยสายตามนุษย์

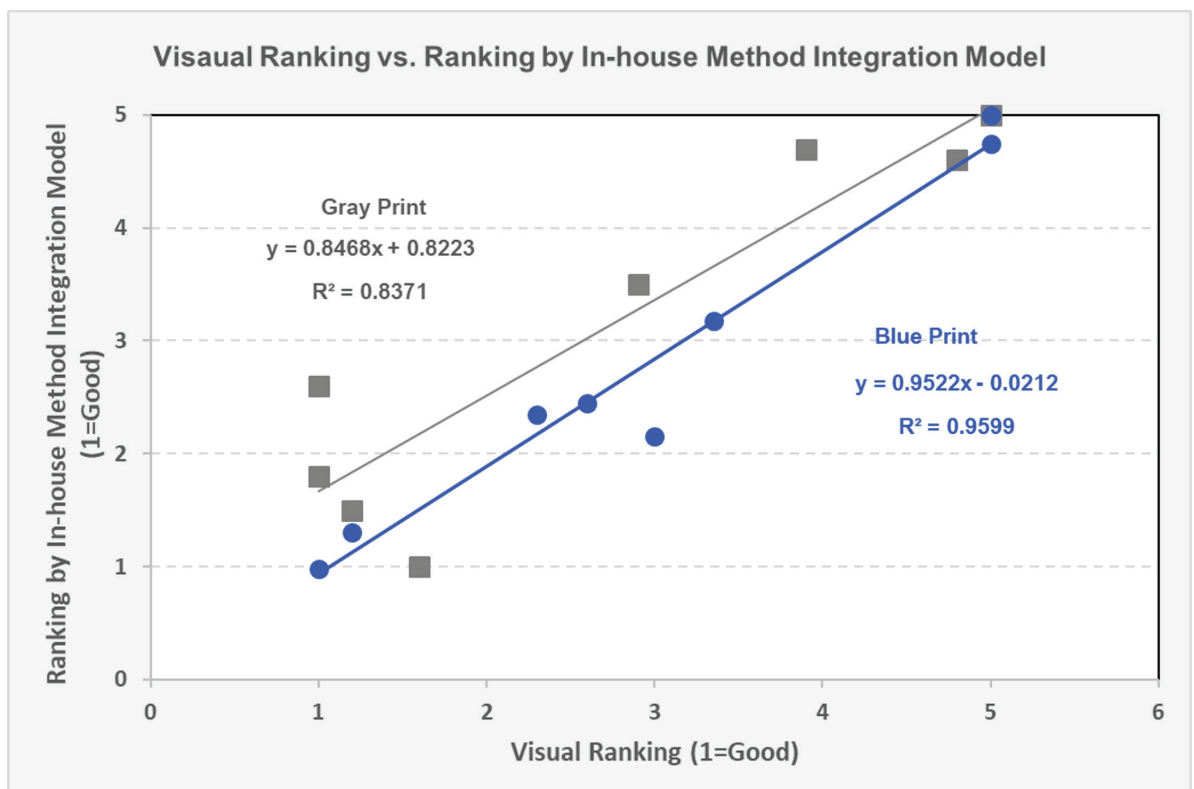
ตารางที่ 3 ผลการประเมิน Print mottle ด้วยสายตามนุษย์ โดยผู้ชำนาญงานพิมพ์ของตัวอย่างชุดที่ 3

Color	Printing house	Side	Visual assessment score						
			No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	Mottle rank
Blue C95M60	D-1	Top	4	3	3	2	5	3	3.33
	D-1	Bottom	4	3	3	2	3	3	3.00
	D-2	Top	1	2	2	1	1	3	1.67
	D-2	Bottom	2	2	1	1	1	2	1.50
	E-1	Top	5	3	5	5	4	5	4.50
	E-2	Bottom	5	3	5	5	5	4	4.50
	E-1	Top	3	2	1	3	3	3	2.50
	E-2	Bottom	3	2	1	3	4	3	2.67
Gray K100	D-1	Top	4	4	4	4	4	4	4.00
	D-1	Bottom	4	3	3	4	1	4	3.17
	D-2	Top	1	2	2	1	1	2	1.50
	D-2	Bottom	2	2	2	1	1	2	1.67
	E-1	Top	5	4	5	5	5	5	4.83
	E-2	Bottom	5	5	5	5	5	5	5.00
	E-1	Top	3	1	1	1	1	2	1.50
	E-2	Bottom	3	1	1	1	4	2	2.00

หมายเหตุ: คะแนน 1 = เกิด Mottle น้อย, คะแนน 5 = เกิด Mottle มาก, Error bar แสดงช่วง 95% Confidence interval of mean (N=9)



รูปที่ 6 ค่า Correlation (R) ระหว่างผลการวิเคราะห์ Print mottle ด้วยวิธีการต่าง ๆ
เปรียบเทียบกับผลประเมินด้วยสายตาตามมนุษย์ของตัวอย่างชุดที่ 3



รูปที่ 7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระดับการเกิด Mottle ที่วิเคราะห์ด้วยสายตาตามมนุษย์
เปรียบเทียบกับวิธีการที่พัฒนาขึ้นเองซึ่งใช้เครื่องมือ PRECISEPRO: Versatile image analyzer แบบ Integration model

4. สรุป (Conclusion)

การประเมินรอยต่างของงานพิมพ์ (Print mottle) ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพที่พัฒนาขึ้นเองโดยใช้เครื่องมือ PRECISEPRO: Versatile image analyzer เปรียบเทียบกับการประเมินด้วยสายตาตามมนุษย์ เพื่อทดสอบความแม่นยำและความสอดคล้องของผลลัพธ์ในระดับที่ยอมรับได้ พบว่า เทคนิคที่พัฒนาขึ้น ได้แก่ Tile cell (SD, Modified COV), Band pass และ Integration model สามารถประเมินรอยต่างของงานพิมพ์จากการวิเคราะห์ภาพพิมพ์ที่ถูกจำลองขึ้น โดยที่ภาพมีผลกระทบจาก Mean reflectance ได้อย่างใกล้เคียงกับการประเมินของสายตาตามมนุษย์ แสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องสูงกับการประเมินด้วยสายตา และเมื่อทดสอบกับภาพจากกระบวนการพิมพ์จริง ซึ่งมีความแปรปรวนของภาพมากกว่าแบบจำลอง พบว่า การวิเคราะห์บนพื้นพิมพ์สีเทาให้ผลที่เชื่อถือได้มากกว่าพื้นพิมพ์สีน้ำเงิน ทั้งนี้ เทคนิคที่ยังคงให้ผลสอดคล้องในระดับสูงคือ Tile cell (SD) และ Integration model (Simple model และ Log model) โดยเฉพาะเทคนิค Integration model แบบ Simple model มีศักยภาพสูงสุดในการประเมินรอยต่างของงานพิมพ์อย่างแม่นยำและสอดคล้องกับสายตาของมนุษย์ จึงเหมาะสมที่จะนำไปใช้เป็นเครื่องมือในงานควบคุมคุณภาพการพิมพ์ในอุตสาหกรรมกระดาษ โดยใช้อุปกรณ์และเครื่องมือทั่วไป เพื่อทดแทนหรือสนับสนุนการตรวจสอบด้วยสายตาในกระบวนการพิมพ์จริง

5. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

การดำเนินงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรมสำหรับวิเคราะห์ภาพที่พัฒนาขึ้นโดยศูนย์พัฒนานวัตกรรมและผลิตภัณฑ์ บริษัทเอสซีจี แพคเกจจิ้ง จำกัด (มหาชน) ภายใต้แบรนด์ PRECISEPRO

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Canet C, Gadbois S, Lapointe K, Marleau J, Martineau M, Turgeon J. Influence of mottle on color reproduction. Research Gate Publication. 2002;14:23-5. Available from: https://www.researchgate.net/publication/316693555_Influence_of_mottle_on_color_reproduction
- [2] Sappi. On-press troubleshooting tips for solving problems on press and documenting complaints [Internet]. 2005 [cited 2020 Dec 15]. Available from: <https://mediahub.sappi.com/m/3eb48f94b861faf7/original/On-Press-Troubleshooting.pdf>
- [3] Sandreuter NP. Predicting print mottle: A method of differentiating between three types of mottle. TAPPI Journal. 1994;77(7):173-84. Available from: <https://imisrise.tappi.org/TAPPI/Products/94/JUL/94JUL173.aspx>
- [4] Drake D, Rosenberger R, Clark D. Back-trap and half-tone mottle measurement with stochastic frequency distribution analysis. In: TAPPI Coating Conference; Proceeding. 2001:1-7. Available from: <https://imisrise.tappi.org/TAPPI/Products/CTG/CTG01243.aspx>
- [5] Xiang Y, Bousfield DW, Coleman P, Osgood A. The cause of backtrap mottle: Chemical or physical. In: TAPPI Coating Conference; Proceeding. 2000:45-58. Available from: <https://imisrise.tappi.org/TAPPI/Products/CTG/CTG0045.aspx>
- [6] Louman HW, Mottling and wettability. In: TAPPI Coating Conference; Proceeding. 1991:505-519. Available from: <https://imisrise.tappi.org/TAPPI/Products/CTG/CTG91505.aspx>
- [7] International Organization for Standardization (ISO) / International Electrotechnical Commission (IEC). Image quality measurement for printed documents. ISO/IEC 13660:2022. Geneva: ISO/IEC; 2022. Available from: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-iec:13660:en>

- [8] Fahlcrantz CM. On the evaluation of print mottle [Doctoral thesis]. Stockholm: KTH Royal Institute of Technology; 2005. Available from: <http://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:14329/SPIKBLAD.pdf>
- [9] Fahlcrantz CM, Johansson PA. A comparison of different print mottle evaluation models. Technical Association of the Graphic Arts. 2006;2:140-60. Available from: [https://www.printing.org/docs/default-source/taga-abstracts-\(member-only\)/t040511.pdf?sfvrsn=455aab4d_2](https://www.printing.org/docs/default-source/taga-abstracts-(member-only)/t040511.pdf?sfvrsn=455aab4d_2)
- [10] Navarro PJ, Fernández-Isla C, Alcover PM, Suardíaz J. Defect detection in textures through the use of entropy as a means for automatically selecting the wavelet decomposition level. Sensors. 2016;16(8):1178-98. doi: 10.3390/s16081178.
- [11] Su Z, Gao M, Li P, Jing J, Zhang H. Digital printing defect classification algorithm based on convolutional neural network. Laser Optoelectron Prog. 2020;57(24):241011. doi: 10.3788/LOP57.241011.
- [12] Zhang X, Liu Y, Wang Y. An objective model for evaluating print mottle based on human vision. Color Research & Application. 2012;37(6):429-38.

การออกแบบและทดสอบเบื้องต้นเซนเซอร์ตรวจวัดฝุ่นละออง โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ค่าความนำทางไฟฟ้า

Design and preliminary testing of a particulate matter sensor using electrical conductivity analysis technique

วิสาณภัตต์ รัตนจันทร์¹,ธีรโชติ หล้าวงษ์², วิสูตร อาสนวิจิตร¹, วณัสสุดา คำพุ่ม¹, พานิช อินต๊ะ¹
Wisanapat Rattanachan¹, Theerachot Lawong², Visut Asanavijit¹, Wanasuda Khamput¹, Panich Intra¹
รับบทความ 19 พฤษภาคม 2568 แก้ไขบทความ 16 กันยายน 2568 ยอมรับตีพิมพ์ 20 กันยายน 2568

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้ได้นำเสนอการออกแบบและทดสอบเบื้องต้นเซนเซอร์ตรวจวัดฝุ่นละอองที่อาศัยหลักการการวิเคราะห์ค่าความนำไฟฟ้าของอนุภาคที่ใช้วัสดุอุปกรณ์ภายในประเทศ เซนเซอร์พัฒนาขึ้นประกอบด้วย หัวเซนเซอร์ แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงแบบกระแสตรง วงจรรขยายสัญญาณและผสมสัญญาณ วงจรแปลงผันสัญญาณแอนะล็อกไปเป็นดิจิทัลและระบบการบันทึกและประมวลผลข้อมูล หัวเซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วยอิเล็กโทรดเข็มปลายแหลมวางซ้อนกันร่วมกันอิเล็กโทรดแบบ T-pipe อิเล็กโทรดเข็มจะต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟแรงดันสูงในขณะที่อิเล็กโทรดแบบ T-pipe เชื่อมต่อกับวงจรรขยายสัญญาณและผสมสัญญาณ และส่งผ่านตัวแปลงผันสัญญาณแอนะล็อกไปเป็นสัญญาณดิจิทัลเพื่อส่งข้อมูลแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ไปยังระบบการบันทึกและประมวลผลข้อมูล ในการวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบคุณลักษณะของกระแสและแรงดันของเซนเซอร์และการทดสอบการวัดเปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าของเซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้นกับความเข้มข้นเชิงมวลอนุภาคของเครื่องวัดวิธีเทียบเคียง ซึ่งผลการทดสอบที่ได้เป็นที่น่าพอใจ ผลการวัดเปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าของเซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้นกับความเข้มข้นเชิงมวลอนุภาคของเครื่องวัดวิธีเทียบเคียงมีสหสัมพันธ์ที่เป็นเชิงเส้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าต้นแบบเซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้นมานี้สามารถประยุกต์ใช้ในการวัดฝุ่นละอองจากไอเสียของรถยนต์ที่มีความเข้มข้นสูงแบบเวลาจริง

คำสำคัญ: อนุภาค, ฝุ่นละออง, เซนเซอร์, ความนำไฟฟ้า

¹หน่วยวิจัยสนามไฟฟ้าประยุกต์ในงานวิศวกรรม วิทยาลัยเทคโนโลยีและสหวิทยาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา จังหวัดเชียงใหม่ 50220 ประเทศไทย

²คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา จังหวัดเชียงใหม่ 50220 ประเทศไทย

Abstract

This research article presents the design and preliminary testing of a particulate matter sensor that employs the principle of analyzing particle conductivity using readily available household equipment materials. The sensor comprises a sensor head, a DC high-voltage power supply, a signal amplifier, and signal mixing circuits. These components collectively convert an analog-to-digital signal, record the data, and process it. The sensor head features a needle electrode that overlaps with a T-pipe electrode. The needle electrode is connected to a high-voltage power supply, while the T-pipe electrode is connected to the signal amplifier and mixing circuit. This connection transmits the analog converter to a digital signal, which is then transmitted to the recording and processing system for data storage and processing. In this research, the sensor's current and voltage measurement properties were compared to those of a comparable method detector that measures particle mass concentration. The results were satisfactory, indicating a linear correlation between the current of the developed sensor and the particle mass concentration of the comparative method detector. This suggests that the developed sensor prototype can be effectively utilized to measure high-concentration exhaust dust in real time.

Keywords: Particle, Particulate matter, Sensor, Conductivity

¹Research Unit of Applied Electric Field in Engineering, College of Integrated Science and Technology, Rajamangala University of Technology Lanna, Chiang Mai 50220, Thailand

²Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Lanna, Chiang Mai 50220, Thailand

*Corresponding author e-mail address: panich.intra@rmutl.ac.th

1. บทนำ (Introduction)

ในปัจจุบันมีความสนใจมากขึ้นเกี่ยวกับภัยสุขภาพและผลกระทบจากฝุ่นละออง (Particulate matter) หรือ PM จึงทำให้มีการเข้มงวดมากขึ้นในการปลดปล่อย PM จากรถยนต์ส่วนบุคคลและรถบรรทุกให้เป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ ที่ผ่านมานักวิจัยทางการแพทย์โดยทั่วไปได้ยอมรับว่าอนุภาคของฝุ่นละอองที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 1 ไมครอน (μm) เป็นอันตรายต่อสุขภาพมากเพราะอนุภาคขนาดเล็กเหล่านี้สามารถผ่านทะลุระบบกรองธรรมชาติ (Natural filtration system) ของระบบทางเดินหายใจของมนุษย์ (Human respiratory system) ได้ [1] โดยแหล่งที่มาของการปล่อยอนุภาคขนาดเล็กส่วนใหญ่จะมาจากกระบวนการเผาไหม้ของเครื่องยนต์สันดาปภายใน (Internal combustion engine) ของรถยนต์งานเบา และงานหนัก (Light and heavy-duty vehicles) การปลดปล่อยอนุภาคจากท่อไอเสียของเครื่องยนต์สันดาปภายในมีความเข้มข้นสูง โดยงานวิจัยของ Yang et al. [2] ได้รายงานค่าปัจจัยการปลดปล่อย (Emission factors) หรือค่า EF ของก๊าซมลพิษและ PM_{2.5} จากไอเสียของรถยนต์รุ่นปี 2008 – 2012 พบว่ารถ Gasoline Sedan, Gasoline SUV, Gasoline Light truck, Diesel SUV, Diesel Light truck และ Diesel Heavy truck มีปัจจัยการปลดปล่อย PM_{2.5} จากไอเสียประมาณ 1.25, 3.28, 0.64, 2, 13 และ 31 mg/km ตามลำดับ ถ้าหากคิดเป็นค่าเฉลี่ยของปัจจัยการปลดปล่อย PM_{2.5} จากไอเสียของรถทุกชนิดจะได้ประมาณ 8.52 mg/km

การปรับปรุงเทคโนโลยีการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซลในปัจจุบันยังมีผลทำให้ขนาดของอนุภาค (Particulate size) ที่ปล่อยออกมามีผลอย่างมาก แต่การลดลงของขนาดอนุภาคมีผลทำให้อนุภาคมวลรวม (Total particulate mass) ลดลงและจำนวนของอนุภาค (Particulate number) ที่ปล่อยออกมามีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมาก แต่การลดลงของอนุภาคมวลรวมได้มีผลกระทบต่อความน่าเชื่อถือ (Reliably) ของการวัดการปล่อยของ PM ด้วยเครื่องมือวัดควันดำระบบวัดความทึบแสง (Smoke opacity meter) ที่มีการใช้งานในปัจจุบันเนื่องจากทำให้ค่าความทึบแสงของอนุภาคลดลงไปด้วย และสำหรับกระบวนการวัดของ Gravimetric ในปัจจุบันการชั่งตัวอย่างไอเสียบนกระดาษกรอง (Filter paper) อาจทำไม่ได้ เพราะจำเป็นต้องใช้เวลานานในการเก็บตัวอย่างมวลให้เพียงพอที่จะวัดได้อย่างถูกต้อง ปัญหาของขนาดและจำนวนของอนุภาคเหล่านี้จึงมีความสำคัญและจำเป็นอย่างมากในการตรวจวัดและการควบคุมการปล่อยอนุภาคจากไอเสียของเครื่องยนต์ โดยเครื่องยนต์ที่มีการปล่อยอนุภาคที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว (Transients engine) ได้เข้ามามีบทบาทเพิ่มมากขึ้น จึงทำให้วิธีการกระดาษกรองไม่สามารถใช้ได้เนื่องจากไม่สามารถวัดด้วยเวลาจริง (Real time) ได้

ในปัจจุบันเครื่องมือในการตรวจวัด PM จากไอเสียของเครื่องยนต์ที่มีการใช้งานอยู่ยังมีราคาสูง [3-10] และมีระบบที่ซับซ้อนในการติดตั้งและใช้งานในระดับภาคสนาม ไม่สามารถติดตั้งกับรถยนต์เพื่อศึกษาค่า EF ตามลักษณะการขับเคลื่อนของการจราจรจริงได้ สำหรับหน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับการตรวจวัดควันทายมีจำนวนเครื่องมือที่จำกัด ทำให้ไม่สามารถขยายหรือเพิ่มจุดตรวจวัดได้มากขึ้น นอกจากนี้เครื่องมือวัดดังกล่าว ยังมีความต้องการในการศึกษาในรายวิชาการควบคุมมลภาวะจากรถยนต์ (Automotive emission control) และเครื่องยนต์สันดาปภายใน (Internal combustion engines) ในสถานศึกษาที่มีการเปิดสอนในสาขาวิชาช่างยนต์วิศวกรรมเครื่องกลและยานยนต์ และยังเป็นในการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการพัฒนาในเรื่องของการเผาไหม้ การปรับปรุงเชื้อเพลิง การพัฒนาน้ำมันหรือพลังงานทางเลือกใหม่ที่ไม่มีความเสี่ยงต่อสิ่งแวดล้อม

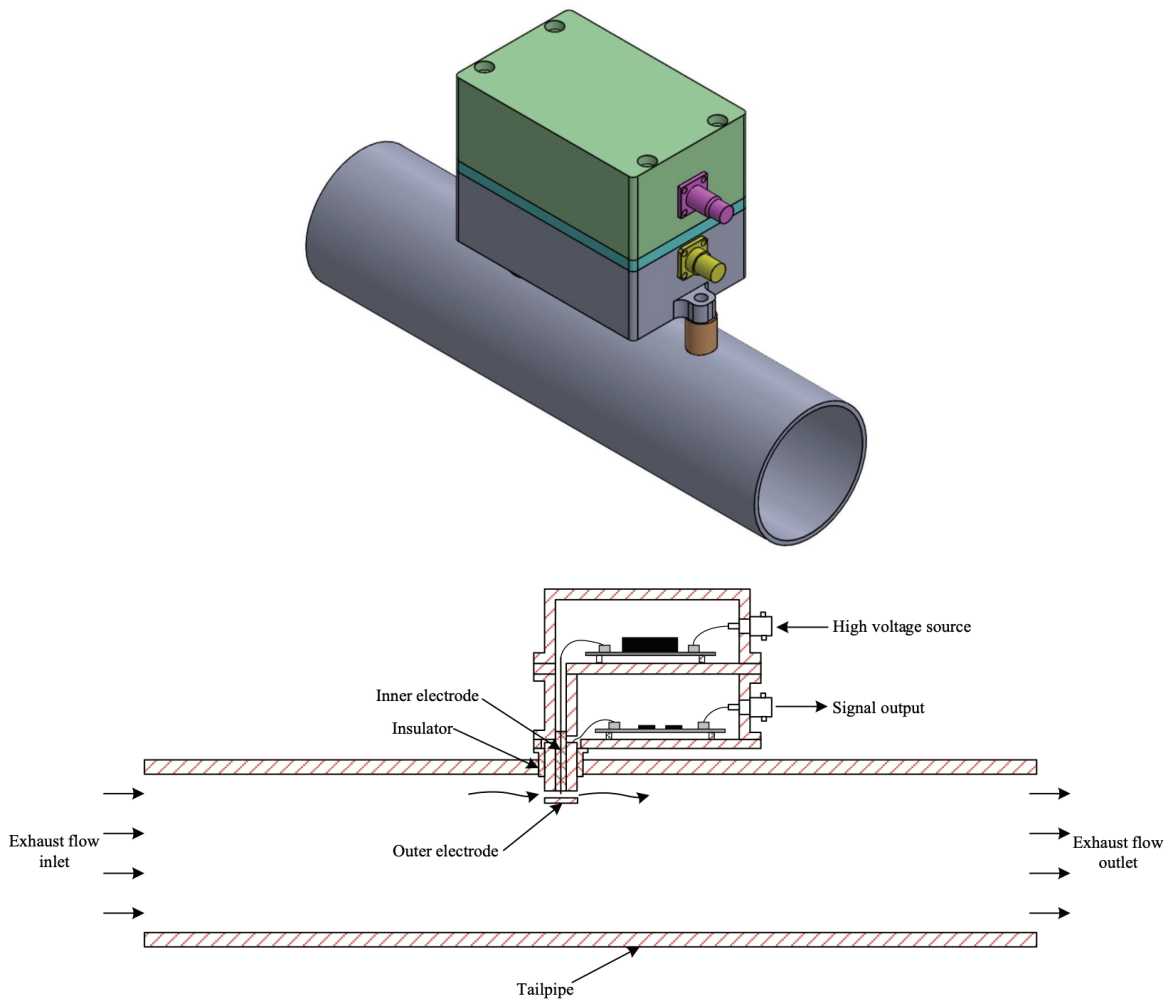
ดังนั้น เครื่องวัดที่มีราคาถูก ใช้งานง่าย และมีขนาดเล็กกว่าจึงมีความต้องการพัฒนา ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการออกแบบและทดสอบเบื้องต้นเซนเซอร์ตรวจวัดฝุ่นละอองที่อาศัยหลักการการวิเคราะห์ค่าความนำไฟฟ้า (Electrical conductivity) ของอนุภาคเพื่อให้สามารถประยุกต์ใช้ในการวัดฝุ่นละอองจากไอเสียของรถยนต์ที่มีความเข้มข้นและอุณหภูมิสูงแบบเวลาจริงและเคลื่อนย้ายได้ ใช้วัสดุอุปกรณ์ภายในประเทศ สามารถทดแทนและลดการนำเข้าเครื่องมือจากต่างประเทศ การวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อหน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับการตรวจวัดควันทาย เช่น กองบังคับการตำรวจจราจรและตำรวจทางหลวงสำนักงานขนส่งจังหวัด กรมการขนส่งทางบกและสถานตรวจสภาพรถเอกชน (ตรอ.) ซึ่งมีหน้าที่โดยตรงในการบังคับ ควบคุม และตรวจจับควันทายของรถ กลุ่มนักวิจัย นักวิชาการหรือบริษัทที่พัฒนาในเรื่องของการเผาไหม้ การปรับปรุงเชื้อเพลิง การพัฒนาน้ำมันหรือพลังงานทางเลือกใหม่ที่ไม่มีความเสี่ยงต่อสิ่งแวดล้อม อุปกรณ์วัดการปล่อยอนุภาคจากไอเสียของเครื่องยนต์ และองค์การขนส่งมวลชนและกลุ่มบริษัทขนส่ง เช่น องค์การขนส่งมวลชนกรุงเทพ (ขสมก.) สหกรณ์เดินรถ รวมถึงเป็น

เครื่องมือที่ใช้เพื่อศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการระบายมลพิษอากาศจากไอเสียของรถยนต์ประเภทต่างๆ แบบเวลาจริงตามลักษณะการขับเคลื่อนของรถในสภาพการจราจรจริงหรือการขับเคลื่อนตามวงจรการขับเคลื่อน (Driving Cycle) แบบต่างๆ สามารถนำไปใช้ในการพัฒนา EF สำหรับรถประเภทต่างๆ ตามสภาพของประเทศไทยสามารถนำไปใช้ในการหาอัตราการระบายฝุ่นจากภาคการจราจรตามลักษณะการขับเคลื่อนของการจราจรในแต่ละพื้นที่ได้

2. วิธีการวิจัย (Experimental methods)

ในการออกแบบเซนเซอร์ได้ประยุกต์ใช้องค์ความรู้ที่อาศัยหลักการการวิเคราะห์ค่าความนำไฟฟ้า (Electrical conductivity) ของอนุภาคของฝุ่นละอองภายใต้สนามไฟฟ้าสถิตระหว่างอิเล็กโทรดสองขั้ว ลักษณะโครงสร้างของเซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้นนี้แสดงในรูปที่ 1 เซนเซอร์พัฒนาขึ้นประกอบด้วย หัวเซนเซอร์ (Sensor head) แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงแบบกระแสตรง (DC high voltage power supply) วงจรขยายสัญญาณและผสมสัญญาณ (Electrometer) วงจรแปลงผันสัญญาณแอนะล็อกไปเป็นดิจิทัล (Analog to digital converter) และระบบการบันทึกและประมวลผลข้อมูล (Data acquisition system) โดยหัวเซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้นมีขนาดประมาณหัวเทียนยานยนต์มาตรฐาน (Standard automotive spark plug) หรือเซนเซอร์ออกซิเจน (Oxygen sensor) ประกอบด้วยอิเล็กโทรดเข็มปลายแหลมวางซ้อนกันร่วมกันอิเล็กโทรดแบบ T-pipe โดยอิเล็กโทรดเข็มปลายแหลมทำมาจากสแตนเลสที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 mm อิเล็กโทรดเข็มมีมุมของปลายแหลมประมาณ 10 องศา ส่วนอิเล็กโทรดด้านนอกของเซนเซอร์นี้จะมีลักษณะเป็น T-pipe ทำจากสแตนเลสที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 6 mm ฉนวนไฟฟ้า PTFE ใช้ยึดอิเล็กโทรดเข็มกับอิเล็กโทรดแบบ T-pipe ซึ่งอิเล็กโทรดเข็มจะต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟแรงดันสูงในขณะที่อิเล็กโทรดแบบ T-pipe เชื่อมต่อกับวงจรขยายสัญญาณและผสมสัญญาณ เซนเซอร์นี้ใช้การนำไฟฟ้าที่จำกัดของเศษส่วนฝุ่นละออง (Fraction of particulate matter) กลไกทั่วไปที่ควบคุมพฤติกรรมของเซนเซอร์นี้คือการก่อตัวของฝุ่นละอองที่ช่องนำไฟฟ้า (Electrically conductive channel) ที่มีกระแสไหลระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสองของเซนเซอร์ ฝุ่นละอองทำหน้าที่เหมือนความต้านทานระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสอง ซึ่งค่าความต้านทานระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสองที่เปลี่ยนแปลงนี้จะสัมพันธ์กับค่ากระแสไฟฟ้า ขนาดของกระแสที่ได้จากเซนเซอร์อยู่ในช่วง 10^{-9} ถึง 10^{-3} A

สมมติฐานเบื้องต้นสำหรับกลไกทางกายภาพที่ควบคุมพฤติกรรมของเซนเซอร์คือเศษส่วนของฝุ่นละอองที่ช่องนำไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสองของเซนเซอร์ที่ส่งผลต่อการไหลของกระแสไฟฟ้า การอาศัยพลังงานผกผัน (Inverse power) ของสัญญาณเซนเซอร์ระหว่างอิเล็กโทรดคือกลไกการแพร่กระจาย (Diffusion mechanism) และล่องลอยหรือเคลื่อนที่ (Drift) ตามแนวสนามไฟฟ้าของแรง แรงดันไฟฟ้าที่ปรากฏอิเล็กโทรดทำให้อนุภาคที่มีประจุ (Charged particles) เคลื่อนที่ไปตามเส้นสนามไฟฟ้าไปยังอิเล็กโทรดสัญญาณ (Signal electrode) ที่เป็นกลางทางไฟฟ้า โดยมีการเสนอสมมติฐานการแพร่กระจายแบบล่องลอย (Drift-diffusion hypothesis) เพื่ออธิบายกลไกที่ควบคุมพฤติกรรมของเซนเซอร์ตามสมมติฐานนี้มี 3 ทางที่เป็นไปได้สำหรับอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าจะไปถึงอิเล็กโทรดสัญญาณ ประการแรกคือ อนุภาคที่มีประจุบวก (Positively charged particles) เกิดจากการชนกันของอนุภาคที่มีประจุเป็นกลาง (Charge neutral particles) กับอิเล็กโทรดแรงดันไฟฟ้าสูงบวก จากนั้นประจุแพร่กระจายระหว่างอนุภาคผ่านการชนกันของอนุภาคกับอนุภาค (particle-to-particle collisions) ประการที่สองคือ อนุภาคที่มีประจุตามธรรมชาติ (Naturally charged particles) กระจายไปยังอิเล็กโทรดสัญญาณเนื่องจากการไล่ระดับความเข้มข้น (Concentration gradients) ระหว่างอิเล็กโทรดเซนเซอร์ทั้งสอง และสุดท้ายคือ การส่งประจุ (Charge transport) เกิดขึ้นระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสองเนื่องจากการล่องลอยของอนุภาคที่มีประจุเนื่องจากแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ อิเล็กตรอนจะถูกสกัดเมื่ออนุภาคที่มีประจุเหล่านี้ชนกับอิเล็กโทรดสัญญาณ ฟลักซ์สุทธิ (Net flux) ของประจุเนื่องจากการแพร่กระจายสามารถแสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ลักษณะโครงสร้างของเซนเซอร์ตรวจจับฝุ่นละอองของเทคนิคการวิเคราะห์ค่าความนำทางไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น

$$\Lambda_{diffusion} = u[n_c(X_{2o} - \Delta X_2) - n_c(X_{2o} + \Delta X_2)] \quad (1)$$

โดยที่ n_c คือ จำนวนความหนาแน่น (Density) ของอนุภาคที่มีประจุ และ u คือความเร็ว (Velocity) ของอนุภาคเนื่องจากการเคลื่อนที่แบบ Brownian การเคลื่อนที่ของแต่ละอนุภาคสามารถอธิบายได้ด้วยสมการ Langevin ดังแสดงในสมการที่ 2

$$m \frac{du}{dt} = -\zeta u + F(t) \quad (2)$$

โดยที่ u คือ ความเร็วทันที (Instantaneous velocity) ของอนุภาค ในเทอม ζu ให้แรงลาก (Drag force) ของกฎของ Stokes $\zeta = 6\pi\mu R$ โดยที่ R คือ รัศมีของอนุภาค และ μ คือ ความหนืดของอากาศ (Air viscosity) การใช้อนุกรมเทย์เลอร์ (Taylor series) ในสมการ 1 จะได้สมการที่ 3

$$\begin{aligned}
n_c(X_{2o} - \Delta X) &= n_c(X_{2o}) - \frac{dn_c}{dX_2} \Delta X_2 \\
n_c(X_{2o} - \Delta X) &= n_c(X_{2o}) + \frac{dn_c}{dX_2} \Delta X_2 \\
\therefore [n_c(X_{2o} - \Delta X_2) - n_c(X_{2o} + \Delta X_2)] &= -2 \frac{dn_c}{dX_2} \Delta X_2 \\
\therefore \Lambda_{diffusion} &= -2 \frac{dn_c}{dX_2} \cdot \Delta X_2 \cdot u
\end{aligned} \tag{3}$$

$\Delta X = \lambda$ โดยที่ λ คือ เส้นทางอิสระเฉลี่ย (Mean free path) ของอนุภาคที่มีประจุ เช่น ระยะทางเฉลี่ยที่อนุภาคที่มีประจุเดินทางก่อนชนกับอนุภาคอื่น โดยองค์ประกอบการแพร่กระจาย (Diffusion component) สามารถแสดงเป็นสมการที่ 4

$$\Lambda_{diffusion} = -\beta_c u \lambda \frac{dn_c}{dX_2} \tag{4}$$

องค์ประกอบการล่องลอย (Drift component) สามารถแสดงเป็นสมการที่ 5

$$\Lambda_{drift} = -\mu_c n_c E \tag{5}$$

โดยที่ E คือ ความแรงของสนามไฟฟ้า n_c คือ จำนวนความหนาแน่นของอนุภาคที่มีประจุและ μ_c คือ การเคลื่อนที่ทางไฟฟ้าของอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้า ดังนั้น ฟลักซ์ทั้งหมด (Total flux) ของอนุภาคที่มีประจุ ดังแสดงในสมการที่ 7

$$\Lambda_{total} = \Lambda_{diffusion} + \Lambda_{drift} \tag{6}$$

$$\therefore \Lambda_{total} = -\beta_c u \lambda \frac{dn_c}{dX_2} - \mu_c n_c E \tag{7}$$

สัญญาณเชิงเส้นของเซนเซอร์ขึ้นอยู่กับความยาวของอิเล็กโทรดที่เกิดจากการเพิ่มขึ้นของพื้นที่สะสม (Collection area) สำหรับอนุภาคที่มีประจุที่ไปถึงอิเล็กโทรดสัญญาณ สัญญาณเชิงเส้นที่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นอาจเกิดจากการเพิ่มขึ้นของพาหะประจุ (Charge carriers) เชิงเส้นของแรงดันไฟฟ้าที่ใช้สามารถอธิบายได้จากสมการที่ควบคุม (สมการที่ 5) สำหรับการล่องลอยของอนุภาคที่มีประจุในสนามไฟฟ้า ความเข้มของสนามไฟฟ้าถูกกำหนดให้เป็นสมการที่ 8

$$E = \frac{V_0}{S} \tag{8}$$

โดยที่ V_0 คือ แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ และ S คือ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด ความต้านทานของช่องนำไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสองสามารถหาได้โดยใช้กฎของโอห์ม ดังแสดงในสมการที่ 9

$$V_0 = IR \tag{9}$$

โดยที่ V_0 คือ แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ I คือ กระแสที่วัดได้ และ R คือ ความต้านทานของช่องนำไฟฟ้าที่เกิดจากฝุ่นละอองระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสองของเซนเซอร์ ความต้านทาน (ρ) ของช่องถูกกำหนดในสมการที่ 10

$$\rho = \frac{RA}{S} \tag{10}$$

โดยที่ A คือ พื้นที่ผิว (Surface area) ของอิเล็กโทรดเซนเซอร์ และ S คือ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสอง การนำไฟฟ้า (σ) ของช่องนำไฟฟ้า ดังแสดงในสมการที่ 11

$$\sigma = \frac{I}{\rho} \quad (11)$$

ถ้านิยามค่าการนำไฟฟ้าใหม่เพื่อรวมค่าความเข้มข้นของอนุภาคฝุ่นละอองเข้าไป ตั้งแต่การส่งอิเล็กตรอนระหว่างอิเล็กโทรดเซนเซอร์สองตัวเกิดขึ้นผ่านอนุภาคฝุ่นละอองเหล่านี้ ซึ่งเป็นความเข้มข้นของอนุภาคฝุ่นละอองที่กำหนดค่าการนำไฟฟ้าของช่องนำไฟฟ้า การนำไฟฟ้าที่เป็นฟังก์ชันของมวลเฉพาะ (σ') สามารถกำหนดให้เป็นสมการที่ 12

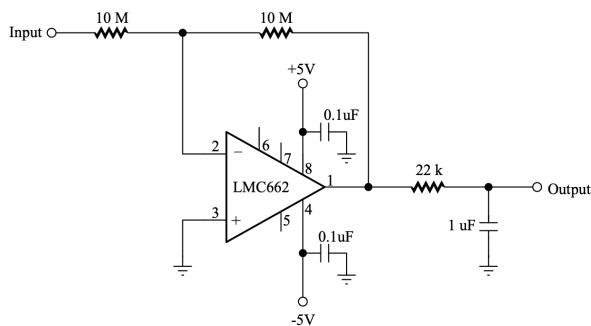
$$\sigma' = \frac{S}{RA \cdot C} \quad (12)$$

โดยที่ C คือความเข้มข้นของฝุ่นละอองในหน่วย g/m^3

ในการวิจัยนี้ใช้วงจรแปลงกระแสเป็นแรงดันไฟฟ้า (Current to voltage converter circuit) ที่สร้างขึ้นเองในการขยายสัญญาณ เอาต์พุตของตัวแปลงกระแสเป็นแรงดันไฟฟ้าจะถูกผสมสัญญาณและส่งผ่านตัวแปลงผันสัญญาณแอนะล็อกไปเป็นสัญญาณดิจิทัล (Analog to digital converter) เพื่อส่งข้อมูลแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ไปยังระบบการบันทึกและประมวลผลข้อมูล เพื่อประมวลผลข้อมูลที่ได้จากนั้นนำไปแสดงผลการวัดและบันทึกลงหน่วยความจำสำหรับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ออกแบบขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2 วงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ออกแบบประกอบด้วยวงจรแปลงผันกระแสไฟฟ้าเป็นแรงดันไฟฟ้า (Current-to-voltage converter circuit) โดยวงจรนี้ถูกสร้างขึ้นโดยวงจรขยายแบบป้อนกลับชั่วลบ (Negative feedback amplifier) ออปแอมป์ (Opamp) ที่ใช้สำหรับวงจรอิเล็กทรอนิกส์จะมีอัตราขยายสูงมาก ๆ หรือที่มีกระแสไบอัสอินพุตระดับต่ำมาก ๆ (Ultra-low bias current input) ในการศึกษานี้ได้เลือกออปแอมป์เบอร์ LMC662 ที่ถูกออกแบบมาใช้ในการวัดกระแสไฟฟ้าระดับต่ำมาก ๆ โดยมีกระแสไบอัสอินพุตระดับต่ำมาก ๆ คือ 40 fA หรือ 40×10^{-15} แอมป์และสัญญาณรบกวนทางด้านอินพุตเนื่องจากการเหนี่ยวนำต่ำ ($400 \text{ } \mu\text{A}$) ค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรนี้ V_o สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 13

$$V_o = I_i R_f \quad (13)$$

เมื่อ I_i คือ กระแสไฟฟ้าทางด้านทางเข้า R_f คือ ความต้านทานป้อนกลับของออปแอมป์ จากสมการที่ 13 ค่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากวงจรนี้ คือ 0.1 V ต่อ 20 nA ในการศึกษาใช้วงจรกรองความถี่แบบ RC low-pass เพื่อตัดสัญญาณรบกวนความถี่สูงและเพื่อป้องกันการแกว่งของเอาต์พุตของวงจรขยาย ซึ่งการตัดสัญญาณความถี่ (Cut-off frequency) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 14



รูปที่ 2 ลักษณะโครงสร้างของวงจรอิเล็กทรอนิกส์

$$\text{Cut-off-frequency} = \frac{1}{2\pi RC} \quad (14)$$

เมื่อ R คือ ค่าความต้านทานตัวต้านทาน และ C คือ ความจุของตัวเก็บประจุจากวงจร ใช้ตัวต้านทานขนาด $22 \text{ k}\Omega$ และตัวเก็บประจุขนาด $1 \text{ }\mu\text{F}$ จะได้การตัดสัญญาณความถี่สูงที่ 7.23 Hz สำหรับค่าคงตัวของเวลา (Time constant) t ของวงจรนี้สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 15

$$t = RC \quad (15)$$

ดังนั้น ค่าคงตัวของเวลาของวงจรนี้จะมีค่าประมาณ 22 ms ซึ่งตามที่ได้กำหนดไว้ในความต้องการของการออกแบบวงจรเบื้องต้น คือ 1 min ซึ่งเร็วกว่าที่กำหนดไว้

คุณสมบัติของเซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้นนี้ได้แสดงไว้ในตารางที่ 1 โดยเซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถประมวลผลได้ในเวลา (Sensitivity) อันสั้นใกล้เคียงเวลาจริง จึงทำให้ได้เซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้นมีข้อได้เปรียบดังต่อไปนี้

(1) เนื่องจากอาศัยหลักการวัดค่าความนำไฟฟ้า (Electrical conductivity) ของอนุภาคของฝุ่นละอองภายใต้สนามไฟฟ้าสถิต จึงทำให้เทคโนโลยีที่นำเสนอนี้สามารถวัดฝุ่นละอองได้ทั้งอนุภาคมวลรวมและความเข้มข้นเชิงจำนวนในเวลาเดียวกันได้ด้วยเวลาจริงโดยมีเวลาในการวัดและประมวลผล < 1 วินาที สามารถรายงานผลได้ทันที

(2) มีความง่ายในการใช้งาน มีการบำรุงรักษาต่ำ เนื่องจากการสะสมตัวของอนุภาคฝุ่นละอองที่หัวเซนเซอร์น้อย และสามารถถอดล้างหรือทำความสะอาดได้ง่ายโดยใช้น้ำสะอาดและเป่าให้แห้ง

(3) ด้วยคุณสมบัติของค่าความนำไฟฟ้าของอนุภาคฝุ่นละออง จึงทำให้สามารถวัดค่าความนำไฟฟ้าได้ที่อุณหภูมิของแก๊สสูงถึง $600 \text{ }^{\circ}\text{C}$ โดยไม่จำเป็นต้องมีระบบเจือจาง (Dilution system) หรือระบบทำความเย็น (Cooling system) ที่ซับซ้อน

(4) ระบบที่พัฒนาขึ้นมีขนาดเล็กกว่า หนาน อุปกรณ์ไม่ซับซ้อน จึงทำให้สิ้นเปลืองพลังงานน้อยกว่า โดยสามารถให้พลังงานจากแบตเตอรี่ได้ และเหมาะสำหรับงานตรวจวัดนอกสถานที่เพื่อศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการระบายมลพิษอากาศจากไอเสียของรถยนต์ประเภทต่าง ๆ แบบเวลาจริงตามลักษณะการขับเคลื่อนของรถในสภาพการจราจรจริงหรือการขับเคลื่อนตามวงจรการขับเคลื่อน (Driving cycle) แบบต่าง ๆ

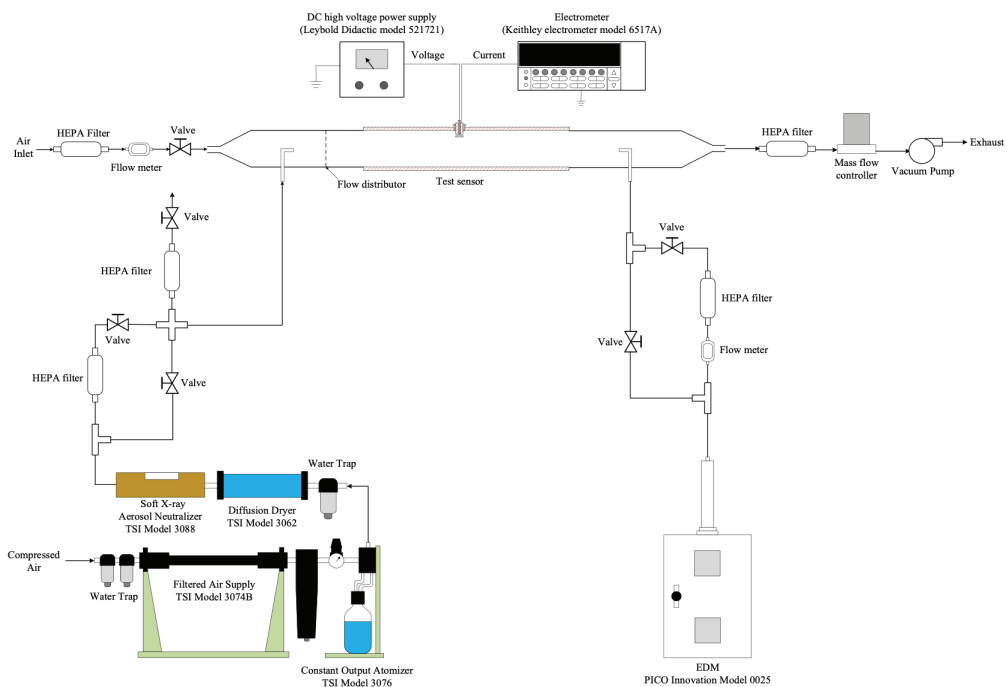
(5) เครื่องมือวัดฝุ่นละอองจากท่อไอเสียของเครื่องยนต์ที่เหมาะสมกับงานตรวจวัดควันดำและการตรวจสภาพการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ที่มีราคาถูก

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของเซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้น

	คุณสมบัติ
เทคนิคการวัด	การวิเคราะห์ความนำไฟฟ้า
ขนาดฝุ่นละออง	TSP
ความเข้มข้นเชิงมวล	$1 - 100 \text{ mg/m}^3$
เวลาในการประมวลผล	$< 1 \text{ s}$
ความเร็วการไหล	$0.1 - 5 \text{ m/s}$
อุณหภูมิทำงาน	$20 - 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$
อุณหภูมิแก๊ส	$\sim 250 \text{ }^{\circ}\text{C}$

	คุณสมบัติ
ขนาดมิติ	ขนาดมิติเล็กกว่า
น้ำหนัก	< 3 kg

รูปที่ 3 แสดงแผนภาพการทดสอบเซนเซอร์ตรวจวัดฝุ่นละอองของเทคนิคการวิเคราะห์ค่าความนำทางไฟฟ้า ในการวิจัยนี้ ได้ทำการแบ่งเป็น 2 ทดสอบ คือ 1) การทดสอบคุณลักษณะของกระแสและแรงดัน (Current-voltage characteristic) ของเซนเซอร์ วัสดุและอุปกรณ์ในการทดลองประกอบด้วย หัวเซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้น แหล่งพลังงานไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงแบบปรับได้ (Leybold Didactic โมเดล 521721) และอิเล็กโตรมิเตอร์ (รุ่น 6517A, Keithley Instruments, Inc., Cleveland, OH, USA) ในการทดสอบนี้ แรงดันไฟฟ้าบวกระหว่าง 2.8 kV ถึง 3.1 kV (เป็นช่วงนำกระแสและไม่เกิดเบรกดาวน) ถูกจ่ายให้กับอิเล็กโตรดแบบเข็มของหัวเซนเซอร์ด้วยแหล่งพลังงานไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงแบบปรับได้และกระแสไฟฟ้าของหัวเซนเซอร์ถูกวัดโดยตรงด้วยอิเล็กโตรมิเตอร์ผ่านทางอิเล็กโตรดแบบ T-pipe ซึ่งมีการต่อสายดินทางไฟฟ้า (Electrical ground) โดยความเร็วการไหลของอากาศสะอาดที่ปราศจากอนุภาค (Clean air) ที่ใช้ในการทดสอบในแต่ละแรงดันไฟฟ้าต่าง ๆ คือ 1.75, 2.92 และ 4.09 m/s ความชื้นสัมพัทธ์แวดล้อมขณะทดสอบไม่เกิน 60%RH และอุณหภูมิแวดล้อมขณะทดสอบควบคุมที่ไม่เกิน 25 °C ดังแสดงในตารางที่ 2 และ 2) การทดสอบการวัดเทียบความเข้มข้นเชิงมวลอนุภาคกับเครื่องวัดฝุ่นวิธีเทียบเคียง เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากเซนเซอร์และความเข้มข้นเชิงมวลที่วัดได้จากเครื่องวัดฝุ่นวิธีเทียบเคียง วัสดุและอุปกรณ์ในการทดลองประกอบด้วย อนุภาคน้ำมัน (Paraffin oil) อนุภาคเกลือ (NaCl) แหล่งกำเนิดละอองลอยแบบอะตอมไมเซอร์ (Atomizer aerosol generator) แหล่งจ่ายอากาศสะอาด (Filtered air supply) เครื่องอัดอากาศ (Air compressor) ตัวไล่ความชื้นแบบแพร์ (Diffusion dryer) ตัวทำให้ละอองลอยเป็นกลาง (Aerosol neutralizer) ชุดวาล์วปรับความเข้มข้น (Concentration adjustment valve) มาตรวัดการไหล (Flow meter) ตัวกรองอนุภาคประสิทธิภาพสูง (HEPA filter) อิเล็กโตรมิเตอร์ (Electrometer) แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงแบบปรับค่าได้ (Adjustable DC high voltage power supply) และเครื่องวัดฝุ่นวิธีเทียบเคียง



รูปที่ 3 แผนภาพการทดสอบเซนเซอร์ตรวจวัดฝุ่นละอองของเทคนิคการวิเคราะห์ค่าความนำทางไฟฟ้า

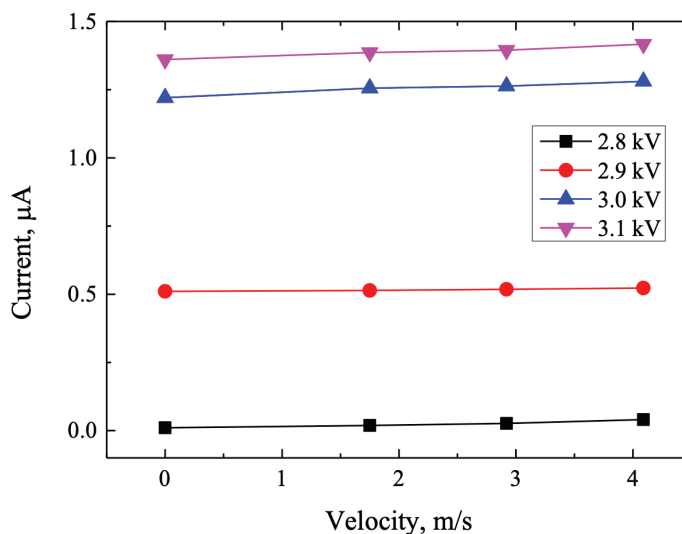
ในการทดสอบนี้ใช้อุณหภูมิและความชื้นในการทดสอบ ค่าคงตัวไดอิเล็กทริก (Dielectric constant) ของอนุภาคน้ำมันและอนุภาคเกลือ คือ 2.1 – 2.3 และ 5.9 – 6.1 ตามลำดับ ทำการจ่ายอนุภาคน้ำมัน/อนุภาคเกลือจากแหล่งกำเนิดละอองลอยแบบอะตอมไมเซอร์ (Model 3076, TSI Inc., St. Paul, MN, USA) จากนั้นอนุภาคจะผ่านเข้าไปยังตัวไล่ความชื้นแบบแพร์ (Model 3062, TSI Inc., St. Paul, MN, USA) เพื่อกำจัดละอองน้ำและความชื้นออก หลังจากตัวไล่ความชื้น อนุภาคจะถูกทำให้มีสมดุลประจุบ็อลทซ์มันน์ (Boltzmann equilibrium charge equivalent) ด้วยตัวทำให้ละอองลอยเป็นกลางแบบ Soft X-ray (Model 3088, TSI Inc., St. Paul, MN, USA) โดยความเข้มข้นของอนุภาคสามารถปรับได้ด้วยชุดปรับความเข้มข้น (Dilutor) ด้านหลังตัวไล่ความชื้น อนุภาคเกลือและอนุภาคน้ำมันจากแหล่งกำเนิดละอองลอยอะตอมไมเซอร์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมัธยฐาน (Count Median Diameter, CMD) เท่ากับ 57.4 นาโนเมตร และ 263 นาโนเมตร ตามลำดับ และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอากาศพลศาสตร์มัธยฐานมวล (Mass median aerodynamic diameter, MMAD) ของอนุภาคเกลือเท่ากับ 264.1 นาโนเมตร และอนุภาคน้ำมันเท่ากับ 610 นาโนเมตร โดยอนุภาคเกลือที่มีค่า Geometric standard deviation ของ CMD และ MMAD ประมาณ 1.83 และ 1.84 ตามลำดับ และอนุภาคน้ำมันที่มีค่า Geometric standard deviation ของ CMD และ MMAD ประมาณ 1.85 และ 1.88 ตามลำดับ จากนั้นจ่ายอนุภาคในช่วงความเข้มข้น 0 – 70 mg/m³ ให้กับเซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้นพร้อมกับเครื่องตรวจวัดฝุ่นอ้างอิงพร้อมกันด้วยการเก็บตัวอย่างแบบไอโซไคเนติก (Isokinetic sampling) ดังแสดงในรูปที่ 3 ในการศึกษาที่ใช้เครื่องวัดฝุ่นวิธีเทียบเคียงหลักการไฟฟ้าสถิต (EDM, PICO Innovation model 0025) ซึ่งเป็นเครื่องมือวัดฝุ่นแบบเทียบเคียงที่ได้มาตรฐาน มอก. 3030-2563 การควบคุมความเร็วการไหลของอากาศในการทดสอบใช้ตัวควบคุมอัตราการไหลเชิงมวล (Mass flow controller) และปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump) ความเร็วการไหลที่ใช้ในการทดสอบอยู่ในช่วง 0 – 5 m/s ความชื้นสัมพัทธ์แวดล้อมขณะทดสอบไม่เกิน 60%RH และอุณหภูมิแวดล้อมขณะทดสอบควบคุมที่ไม่เกิน 25 °C ทำการวัดและบันทึกค่ากระแสไฟฟ้าและความเข้มข้นเชิงมวลที่วัดได้ นำค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าและความเข้มข้นเชิงมวลที่วัดได้จากเซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้นและจากเครื่องวัดฝุ่นอ้างอิงมาหาค่าสหสัมพันธ์แบบเพียร์สัน ดังตารางที่ 2 แสดงช่วงและค่าของตัวแปรที่ทดสอบในการวิจัยนี้

ตารางที่ 2 ช่วงและค่าของตัวแปรที่ทดสอบ

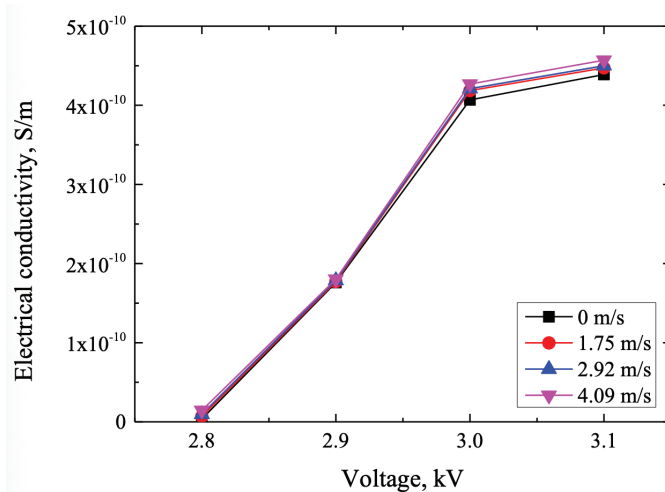
ตัวแปร	ช่วงการวิเคราะห์
ชนิดอนุภาค	อนุภาคน้ำมัน และ อนุภาคเกลือ
ค่าคงตัวไดอิเล็กทริกอนุภาคน้ำมัน	2.1 – 2.3
ค่าคงตัวไดอิเล็กทริกอนุภาคเกลือ	5.9 – 6.1
MMAD อนุภาคน้ำมัน	264.1 nm
MMAD อนุภาคเกลือ	610 nm
ความเข้มข้นของอนุภาค	0 – 70 mg/m ³
แรงดันไฟฟ้า	2.8, 2.9, 3.0 และ 3.1 kV
ความเร็วของของไหล	1.75, 2.92 และ 4.09 m/s
ความชื้นสัมพัทธ์แวดล้อมขณะทดสอบ	< 60%RH
ความดันอากาศขณะทดสอบ	1 atm
อุณหภูมิแวดล้อมขณะทดสอบ	~25 °C

3. ผลและวิจารณ์ (Results and discussion)

รูปที่ 4 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้กับความเร็วการไหลของอากาศสะอาดที่ปราศจากอนุภาค คือ 1.75, 2.92 และ 4.09 m/s ที่แรงดันไฟฟ้า 2.8, 2.9, 3.0 และ 3.1 kV ตามลำดับ ในการทดลองนี้จะเป็นการศึกษาคุณลักษณะของกระแสและแรงดันของเซนเซอร์จะทำให้ทราบถึงช่วงของกระแสที่วัดได้และแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับอิเล็กโทรด จากรูปเห็นว่ากระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลของอากาศเล็กน้อย การเพิ่มขึ้นของกระแสนี้อาจเนื่องมาจากการไหลของอากาศทำให้เกิดการล่องลอยของประจุไฟฟ้าไปถึงอิเล็กโทรดสัญญาณด้วยแรงของของไหลที่เกิดขึ้นที่ช่องนำไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสอง และการเพิ่มขึ้นของแรงดันไฟฟ้ายังส่งผลทำให้กระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตาม เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้นทำให้สนามไฟฟ้าระหว่างช่องนำไฟฟ้าสูงขึ้นตามสมการที่ 8 และสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงค่าความนำไฟฟ้าที่ช่องนำไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าที่อัตราการไหลของอากาศสะอาดต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 5 แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้อิเล็กโทรดสูงขึ้น มีผลต่อความสามารถในการเคลื่อนที่ทางไฟฟ้าของประจุไฟฟ้า จึงทำให้ประจุไฟฟ้ามีความเร็วในการเคลื่อนที่ไปตามเส้นสนามไฟฟ้าไปยังอิเล็กโทรดสัญญาณสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้อยู่ในช่วง 0.01 - 1.3 μA ที่สอดคล้องกับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับอิเล็กโทรดในช่วง 2.8 - 3.1 kV ที่แรงดันไฟฟ้า 2.8 kV กระแสที่วัดได้ 0.010, 0.0191, 0.0264 และ 0.040 μA สำหรับความเร็วของของไหล 1.75, 2.92 และ 4.09 m/s ตามลำดับ ที่แรงดันไฟฟ้า 2.9 kV กระแสที่วัดได้ 0.510, 0.513, 0.518 และ 0.522 μA สำหรับความเร็วของของไหล 1.75, 2.92 และ 4.09 m/s ตามลำดับ ที่แรงดันไฟฟ้า 3.0 kV กระแสที่วัดได้ 1.220, 1.255, 1.263 และ 1.280 μA สำหรับความเร็วของของไหล 1.75, 2.92 และ 4.09 m/s ตามลำดับ และที่แรงดันไฟฟ้า 3.1 kV กระแสที่วัดได้ 1.360, 1.386, 1.394 และ 1.416 μA สำหรับความเร็วของของไหล 1.75, 2.92 และ 4.09 m/s ตามลำดับ

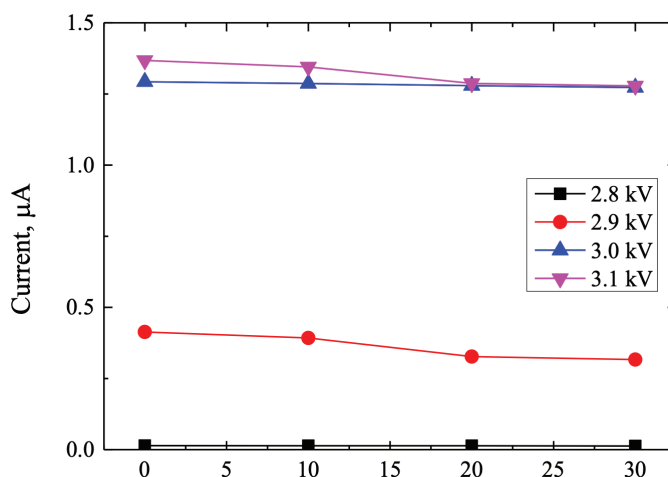


รูปที่ 4 การเปลี่ยนแปลงค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้กับอัตราการไหลของอากาศสะอาดที่แรงดันไฟฟ้าต่าง ๆ



รูปที่ 5 การเปลี่ยนแปลงค่าความนำไฟฟ้าที่ช่องนำไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าที่อัตราการไหลของอากาศสะอาดต่าง ๆ

รูปที่ 6 แสดงการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าต่อเวลาในช่วง 0 – 30 นาทีที่ความเร็วการไหลอากาศ 0 m/s แรงดันไฟฟ้า 2.8, 2.9, 3.0 และ 3.1 kV ตามลำดับ ในการทดลองนี้จะเป็นการศึกษาถึงความเสถียรภาพของกระแสไฟฟ้าที่เวลาเปลี่ยนไป จากรูปทำให้เห็นว่าค่ากระแสไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยที่เวลานานขึ้นคือมีค่าลดลงเล็กน้อย โดยที่แรงดันไฟฟ้า 2.8 kV กระแสเฉลี่ยที่วัดได้ คือ 0.014, 0.013, 0.013 และ 0.012 μA ที่เวลา 0, 10, 20 และ 30 min ตามลำดับที่แรงดันไฟฟ้า 2.9 kV กระแสเฉลี่ยที่วัดได้ คือ 0.413, 0.392, 0.327 และ 0.316 μA ที่เวลา 0, 10, 20 และ 30 min ตามลำดับ ที่แรงดันไฟฟ้า 3.0 kV กระแสเฉลี่ยที่วัดได้ คือ 1.292, 1.286, 1.279 และ 1.272 μA ที่เวลา 0, 10, 20 และ 30 min ตามลำดับ และที่แรงดันไฟฟ้า 3.1 kV กระแสเฉลี่ยที่วัดได้ คือ 1.367, 1.344, 1.287 และ 1.278 μA ที่เวลา 0, 10, 20 และ 30 min ตามลำดับ การเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าเล็กน้อยนี้อาจเกิดจากเสถียรภาพของแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงที่จ่ายให้กับอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งการลดลงของกระแสไฟฟ้านี้ไม่มีผลต่อการวัดอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากมีค่าน้อยกว่าค่ากระแสไฟฟ้าต่อมวลที่ต้องการวัด

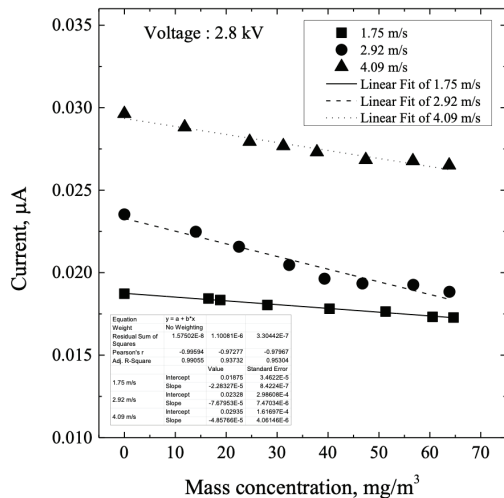


รูปที่ 6 การเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าต่อเวลาในช่วง 0 – 30 นาทีที่แรงดันไฟฟ้าต่าง ๆ

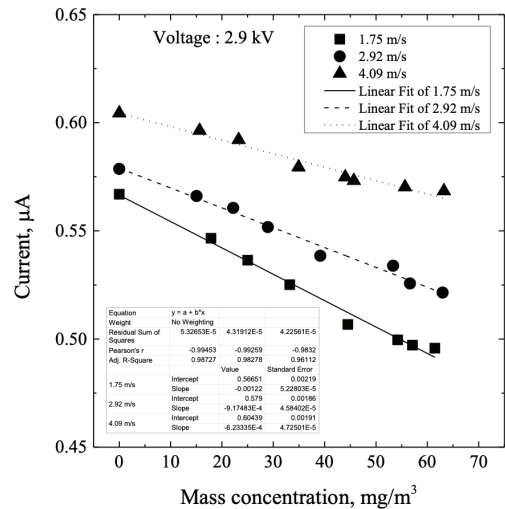
รูปที่ 7 และ 8 แสดงความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากเซนเซอร์ต้นแบบในหน่วย μA เทียบกับความเข้มข้นเชิงมวลของอนุภาคที่วัดได้จากเครื่องวัดฝุ่นเทียบเคียงในหน่วย mg/m^3 เพื่อศึกษาผลของอัตราการไหลและแรงดันไฟฟ้าต่อค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้เทียบกับความเข้มข้นเชิงมวลของอนุภาคน้ำมันและอนุภาคเกลือ ในการวิจัยนี้ได้ทดสอบที่ความเข้มข้นเชิงมวลของอนุภาคน้ำมันและอนุภาคเกลือในช่วง $0 - 70 \text{ mg}/\text{m}^3$ ที่ความเร็วของของไหล 1.75, 2.92 และ 4.09 m/s และแรงดันไฟฟ้า 2.8, 2.9, 3.0 และ 3.1 kV ตามลำดับ จากรูปพบว่าค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากเซนเซอร์ต้นแบบมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นเชิงมวลของอนุภาคสูงขึ้น เนื่องจากการกีดขวางของอนุภาคฝุ่นละอองที่ช่องนำไฟฟ้าที่มีกระแสไหลระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสองของเซนเซอร์ อนุภาคฝุ่นละอองทำหน้าที่เหมือนฉนวนไฟฟ้าจึงทำให้เกิดความต้านทานระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสอง ซึ่งค่าความต้านทานระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสองที่เปลี่ยนแปลงนี้จะสัมพันธ์กับค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้ ดังนั้น ที่ความเข้มข้นของอนุภาคสูงมีผลทำให้ความต้านทานที่ช่องนำไฟฟ้าที่อิเล็กโทรดทั้งสองสูงขึ้นทำให้กระแสไฟฟ้าที่วัดได้ลดลง โดยที่ค่าความเข้มข้นเชิงมวลเดียวกันอนุภาคน้ำมันมีความต้านทานของการลดลงของกระแสไฟฟ้าที่ช่องนำไฟฟ้ามากกว่าอนุภาคเกลือ เนื่องจากอนุภาคน้ำมันมีค่าคงตัวไดอิเล็กทริกต่ำกว่าจึงมีความต้านทานทางไฟฟ้าสูงกว่าส่วนอนุภาคเกลือมีค่าคงตัวไดอิเล็กทริกสูงกว่าจึงมีความต้านทานทางไฟฟ้าต่ำกว่า

จากรูปแสดงให้เห็นว่าค่าความเข้มข้นเชิงมวลเดียวกัน เมื่ออัตราการไหลสูงขึ้นมีผลทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากเซนเซอร์ต้นแบบสูงขึ้นทั้งอนุภาคน้ำมันและอนุภาคเกลือเนื่องจากที่อัตราการไหลสูงมีผลต่อความเร็วของอนุภาค (Particle velocity) ที่ไหลผ่านช่องนำไฟฟ้าของอิเล็กโทรดทั้งสองสูงขึ้น อนุภาคที่ไหลผ่านช่องนำไฟฟ้าอย่างรวดเร็วจึงมีผลทำให้ค่าความต้านทานระหว่างช่องนำไฟฟ้าของอิเล็กโทรดทั้งสองลดลงและกระแสที่ไหลผ่านช่องนำไฟฟ้าสูงขึ้นตาม จากรูปยังสังเกตได้ว่าที่ค่าความเข้มข้นเชิงมวลเดียวกันเมื่อแรงดันไฟฟ้าสูงขึ้น ค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากเซนเซอร์ต้นแบบมีค่าลดลงเนื่องจากที่ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงขึ้นมีผลต่อความเร็วในการเคลื่อนที่ทางไฟฟ้า (Electrical mobility) ของอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าที่ช่องนำไฟฟ้าโดยอนุภาคที่มีประจุบวกเกิดจากการชนกันของอนุภาคที่ประจุเป็นกลางกับอิเล็กโทรดแรงดันไฟฟ้าสูงบวก จากนั้นประจุแพร่กระจายระหว่างอนุภาคผ่านการชนกันของอนุภาคกับอนุภาค หรืออนุภาคที่มีประจุตามธรรมชาติกระจายไปยังอิเล็กโทรดสัญญาณเนื่องจากการไล่ระดับความเข้มข้นระหว่างอิเล็กโทรดเซนเซอร์ทั้งสอง และเกิดจากการส่งประจุเกิดขึ้นระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสองเนื่องจากการล่องลอยของอนุภาคที่มีประจุเนื่องจากแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับอิเล็กโทรดอิเล็กตรอนจะถูกสกัดเมื่ออนุภาคที่มีประจุเหล่านี้ชนกับอิเล็กโทรดสัญญาณ ซึ่งทั้งหมดนี้มีผลต่อความต้านทานของช่องนำไฟฟ้าที่สอดคล้องกับกระแสไฟฟ้าที่วัดได้

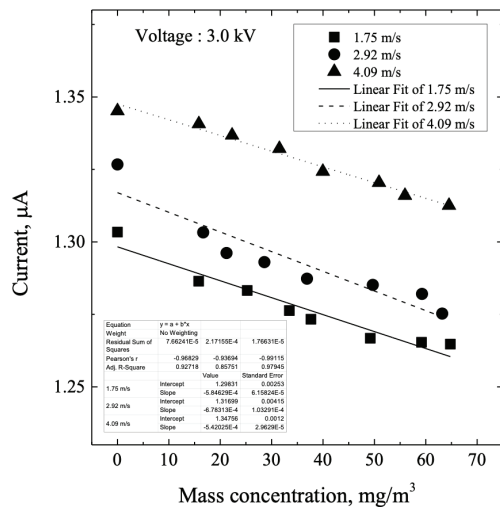
จากผลการวัดเปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากเซนเซอร์ต้นแบบที่พัฒนาขึ้นกับความเข้มข้นเชิงมวลอนุภาคของเครื่องวัดฝุ่นวิธีเทียบเคียงที่แรงดันไฟฟ้าและอัตราการไหลต่าง ๆ ของทั้งอนุภาคน้ำมันและอนุภาคเกลือ พบว่าค่าสหสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่วัดได้กับความเข้มข้นเชิงมวลอนุภาคที่วัดได้มีลักษณะเป็นเชิงเส้น โดยอนุภาคน้ำมันที่แรงดันไฟฟ้า 2.8 kV มีค่า R^2 เท่ากับ 0.99055, 0.93732 และ 0.95304 ค่า Intercept เท่ากับ 0.01875, 0.02328 และ 0.02935 และค่า Slope เท่ากับ -2.2832×10^{-5} , -7.67953×10^{-5} และ -4.85766×10^{-5} ที่ความเร็วของของไหล 1.75, 2.92 และ 4.09 m/s ตามลำดับ ที่แรงดันไฟฟ้า 2.9 kV มีค่า R^2 เท่ากับ 0.98727, 0.98278 และ 0.96112 ค่า Intercept เท่ากับ 0.56651, 0.579 และ 0.60439 และ ค่า Slope เท่ากับ -1.220×10^{-3} , -9.17483×10^{-4} และ -6.23335×10^{-4} ที่ความเร็วของของไหล 1.75, 2.92 และ 4.09 m/s ตามลำดับ ที่แรงดันไฟฟ้า 3.0 kV มีค่า R^2 เท่ากับ 0.92718, 0.85751 และ 0.97945



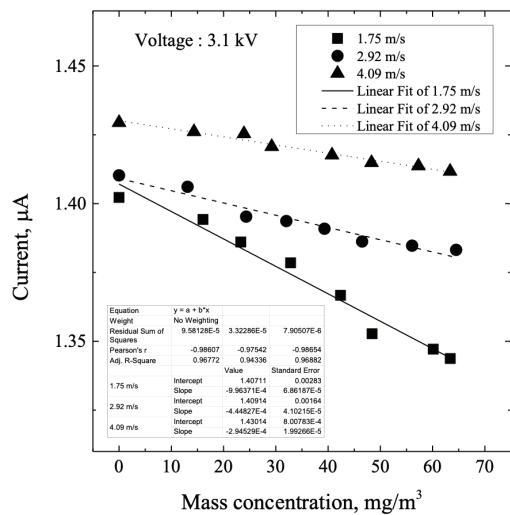
(ก) 2.8 kV



(ข) 2.9 kV

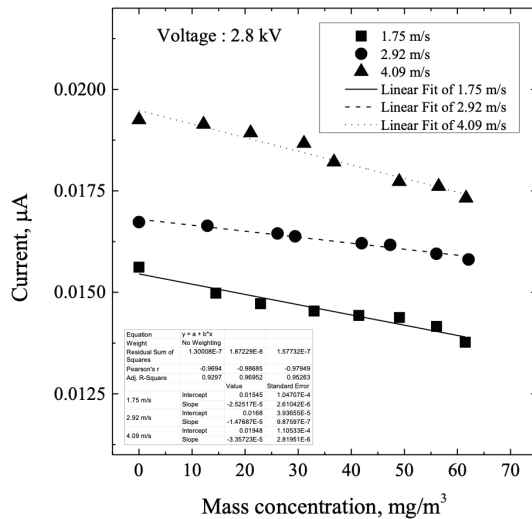


(ค) 3.0 kV

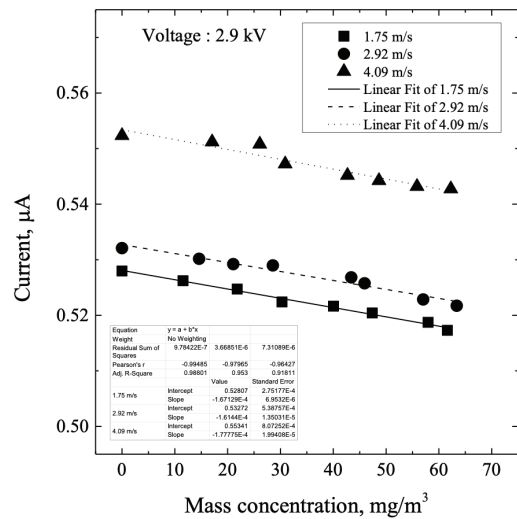


(ง) 3.1 kV

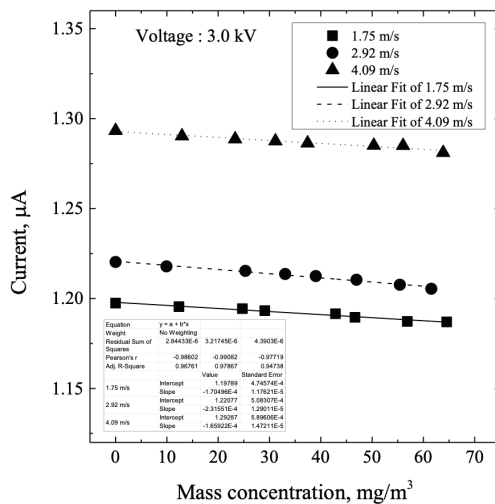
รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากเซนเซอร์เทียบกับความเข้มข้นเชิงมวลของอนุภาคน้ำมันที่วัดได้จากเครื่องวัดฝุ่นเทียบเคียง



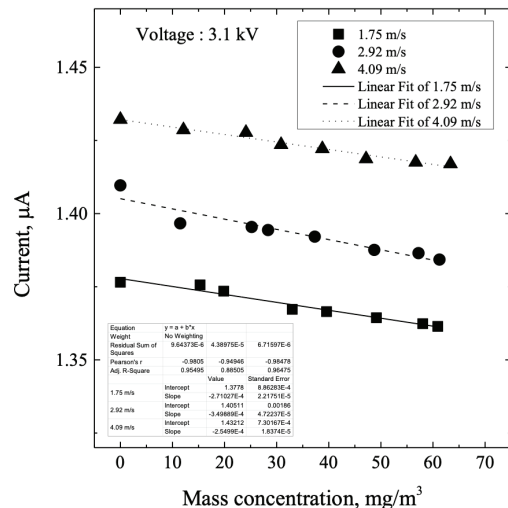
(ก) 2.8 kV



(ข) 2.9 kV



(ค) 3.0 kV



(ง) 3.1 kV

รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากเซนเซอร์เทียบกับความเข้มข้นเชิงมวลของอนุภาคเกลือที่วัดได้จากเครื่องวัดฝุ่นเทียบเคียง

ค่า Intercept เท่ากับ 1.29831, 1.31699 และ 1.34756 และ ค่า Slope เท่ากับ -5.84629×10^{-4} , -6.78313×10^{-4} และ -5.42025×10^{-4} ที่ความเร็วของของไหล 1.75, 2.92 และ 4.09 m/s ตามลำดับ และที่แรงดันไฟฟ้า 3.1 kV มีค่า R^2 เท่ากับ 0.96772, 0.94336 และ 0.96882 ค่า Intercept เท่ากับ 1.40711, 1.40914 และ 1.43014 และ ค่า Slope เท่ากับ -9.96371×10^{-4} , -4.44827×10^{-4} และ -2.94529×10^{-4} ที่ความเร็วของของไหล 1.75, 2.92 และ 4.09 m/s ตามลำดับ ส่วนอนุภาคเกลือที่แรงดันไฟฟ้า 2.8 kV มีค่า R^2 เท่ากับ 0.9297, 0.96952 และ 0.95263 ค่า Intercept เท่ากับ 0.01545, 0.0168 และ 0.01948 และค่า Slope เท่ากับ -2.52517×10^{-5} , -1.47687×10^{-5} และ -3.35723×10^{-5} ที่ความเร็วของของไหล 1.75, 2.92 และ 4.09 m/s ตามลำดับ ที่แรงดันไฟฟ้า 2.9 kV มีค่า R^2 เท่ากับ 0.98801, 0.953 และ 0.91811 ค่า Intercept เท่ากับ 0.52807, 0.53272 และ 0.55341 และค่า Slope เท่ากับ -1.67129×10^{-4} , -1.6144×10^{-4} และ -1.77775×10^{-4} ที่ความเร็วของของไหล 1.75, 2.92 และ 4.09 m/s ตามลำดับ ที่แรงดันไฟฟ้า 3.0 kV มีค่า R^2 เท่ากับ 0.96761, 0.97867 และ 0.94738 ค่า Intercept เท่ากับ 1.19789, 1.22077 และ 1.29287 และค่า Slope เท่ากับ -1.70496×10^{-4} , -2.31551×10^{-4} และ -1.65922×10^{-4} ที่ความเร็วของของไหล 1.75, 2.92 และ 4.09 m/s ตามลำดับ และที่แรงดันไฟฟ้า

3.1 kV มีค่า R^2 เท่ากับ 0.95495, 0.88505 และ 0.96475 ค่า Intercept เท่ากับ 1.3778, 1.40511 และ 1.43212 และค่า Slope เท่ากับ -2.71027×10^{-4} , -3.49889×10^{-4} และ -2.5499×10^{-4} ที่ความเร็วของของไหล 1.75, 2.92 และ 4.09 m/s ตามลำดับ

ตารางที่ 3 ความไวเฉลี่ยของเซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้น

อนุภาคน้ำมัน			
แรงดันไฟฟ้า (kV)	Mean sensitivity ($\mu\text{A}/\text{mg}/\text{m}^3$)		
	1.75 m/s	2.92 m/s	4.09 m/s
2.8	2.283×10^{-5}	7.680×10^{-5}	4.857×10^{-5}
2.9	1.220×10^{-3}	9.175×10^{-4}	6.233×10^{-4}
3.0	5.846×10^{-4}	6.783×10^{-4}	5.420×10^{-4}
3.1	9.964×10^{-4}	4.448×10^{-4}	2.945×10^{-4}
อนุภาคเกลือ			
แรงดันไฟฟ้า (kV)	Mean sensitivity ($\mu\text{A}/\text{mg}/\text{m}^3$)		
	1.75 m/s	2.92 m/s	4.09 m/s
2.8	2.525×10^{-5}	1.477×10^{-5}	3.357×10^{-5}
2.9	1.671×10^{-4}	1.614×10^{-4}	1.778×10^{-4}
3.0	1.705×10^{-4}	2.315×10^{-4}	1.660×10^{-4}
3.1	2.710×10^{-4}	3.498×10^{-4}	2.550×10^{-4}

จาก Curve fitting ในรูปที่ 7, 8 และข้อมูลตารางที่ 3 พบว่า อนุภาคน้ำมันที่แรงดันไฟฟ้า 2.8 kV มีความไวเฉลี่ย (Mean sensitivity) ของเซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้นคือ 2.283×10^{-5} , 7.680×10^{-5} และ $4.857 \times 10^{-5} \mu\text{A}$ ต่อ $1 \text{ mg}/\text{m}^3$ ที่ความเร็วของของไหล 1.75, 2.92 และ 4.09 m/s ตามลำดับ ที่แรงดันไฟฟ้า 2.9 kV มีความไวเฉลี่ยของเซนเซอร์ คือ 1.220×10^{-3} , 9.175×10^{-4} และ $6.233 \times 10^{-4} \mu\text{A}$ ต่อ $1 \text{ mg}/\text{m}^3$ ที่ความเร็วของของไหล 1.75, 2.92 และ 4.09 m/s ตามลำดับ ที่แรงดันไฟฟ้า 3.0 kV มีความไวเฉลี่ยของเซนเซอร์ คือ 5.846×10^{-4} , 6.783×10^{-4} และ $5.420 \times 10^{-4} \mu\text{A}$ ต่อ $1 \text{ mg}/\text{m}^3$ ที่ความเร็วของของไหล 1.75, 2.92 และ 4.09 m/s ตามลำดับ และที่แรงดันไฟฟ้า 3.1 kV มีความไวเฉลี่ยของเซนเซอร์ คือ 9.964×10^{-4} , 4.448×10^{-4} และ $2.945 \times 10^{-4} \mu\text{A}$ ต่อ $1 \text{ mg}/\text{m}^3$ ที่ความเร็วของของไหล 1.75, 2.92 และ 4.09 m/s ตามลำดับ ส่วนอนุภาคเกลือที่แรงดันไฟฟ้า 2.8 kV มีความไวเฉลี่ยของเซนเซอร์คือ 2.525×10^{-5} , 1.477×10^{-5} และ $3.357 \times 10^{-5} \mu\text{A}$ ต่อ $1 \text{ mg}/\text{m}^3$ ที่ความเร็วของของไหล 1.75, 2.92 และ 4.09 m/s ตามลำดับ ที่แรงดันไฟฟ้า 2.9 kV มีความไวเฉลี่ยของเซนเซอร์ คือ 1.671×10^{-4} , 1.614×10^{-4} และ $1.778 \times 10^{-4} \mu\text{A}$ ต่อ $1 \text{ mg}/\text{m}^3$ ที่ความเร็วของของไหล 1.75, 2.92 และ 4.09 m/s ตามลำดับ ที่แรงดันไฟฟ้า 3.0 kV มีความไวเฉลี่ยของเซนเซอร์ คือ 1.705×10^{-4} , 2.315×10^{-4} และ $1.660 \times 10^{-4} \mu\text{A}$ ต่อ $1 \text{ mg}/\text{m}^3$ ที่ความเร็วของของไหล 1.75, 2.92 และ 4.09 m/s ตามลำดับ และที่แรงดันไฟฟ้า 3.1 kV มีความไวเฉลี่ยของเซนเซอร์ คือ 2.710×10^{-4} , 3.498×10^{-4} และ $2.550 \times 10^{-4} \mu\text{A}$ ต่อ $1 \text{ mg}/\text{m}^3$ ที่ความเร็วของของไหล 1.75, 2.92 และ 4.09 m/s ตามลำดับ

4. สรุป (Conclusion)

บทความวิจัยนี้ได้ออกแบบและทดสอบเบื้องต้นแบบเซนเซอร์ตรวจวัดฝุ่นละอองหลักการการวิเคราะห์ค่าความนำไฟฟ้าที่ใช้วัสดุอุปกรณ์ภายในประเทศ เซนเซอร์นี้ใช้การนำไฟฟ้าที่จำกัดของเศษส่วนฝุ่นละอองกลไกทั่วไปที่ควบคุมพฤติกรรมของเซนเซอร์นี้คือการก่อตัวของฝุ่นละอองที่ช่องนำไฟฟ้าที่มีกระแสไหลระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสองของเซนเซอร์ ฝุ่นละอองทำหน้าที่เหมือนความต้านทานระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสอง ซึ่งค่าความต้านทานระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสองที่เปลี่ยนแปลงนี้จะสัมพันธ์กับค่ากระแสไฟฟ้า โดยเซนเซอร์พัฒนาขึ้นประกอบด้วย หัวเซนเซอร์ แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงแบบกระแสตรง วงจรขยายสัญญาณและผลสมสัญญาณ วงจรแปลงผันสัญญาณแอนะล็อกไปเป็นดิจิทัลและระบบการบันทึกและประมวลผลข้อมูลหัวเซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้นมีประกอบด้วยอิเล็กโทรดเติมปลายแหลมวางซ้อนกันอีเล็กโทรดแบบ T-pipe อิเล็กโทรดเข็มจะต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟแรงดันสูงในขณะที่อิเล็กโทรดแบบ T-pipe เชื่อมต่อกับวงจรขยายสัญญาณและผลสมสัญญาณ และส่งผ่านตัวแปลงผันสัญญาณแอนะล็อกไปเป็นสัญญาณดิจิทัล เพื่อส่งข้อมูลแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ไปยังระบบการบันทึกและประมวลผลข้อมูล เพื่อศึกษาผลของอัตราการไหลและแรงดันไฟฟ้าต่อค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้เทียบกับความเข้มข้นเชิงมวลของอนุภาคในการวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบเบื้องต้นเซนเซอร์ต้นแบบ 2 ส่วนหลัก คือ คุณลักษณะของกระแสและแรงดันของเซนเซอร์และการทดสอบการวัดเปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าของเซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้นกับความเข้มข้นเชิงมวลอนุภาคของเครื่องวัดวิธีเทียบเคียงกับอนุภาคน้ำมันและอนุภาคเกลือในช่วง $0 - 70 \text{ mg/m}^3$ ที่ความเร็วการไหล 1.75, 2.92 และ 4.09 m/s ที่แรงดันไฟฟ้า 2.8, 2.9, 3.0 และ 3.1 kV ตามลำดับ ซึ่งผลการทดสอบที่ได้เป็นที่น่าสนใจ ผลการวัดเปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าของเซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้นกับความเข้มข้นเชิงมวลอนุภาคของเครื่องวัดฝุ่นวิธีเทียบเคียงมีสหสัมพันธ์ที่เป็นเชิงเส้น จากผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าต้นแบบเซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้นมานี้สามารถประยุกต์ใช้ในการวัดฝุ่นละอองจากไอเสียของรถยนต์ที่มีความเข้มข้นสูงแบบเวลาจริงได้

5. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยและนวัตกรรมจากโครงการวิจัยทุนงานมูลฐาน (Fundamental Fund; FF) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2568 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และผู้วิจัยขอขอบคุณส่วนบุญส่วนกุศลจากผลงานวิจัยนี้ให้กับ นางเอ้ย กันตะ และ อ้ายเล็ก ผู้ล่งลับ

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] United States Environmental Protection Agency (EPA). Health assessment document for engine diesel exhaust. EPA/600/8-90/057F [Internet]. Springfield (VA): United States Environmental Protection Agency; 2002 [cited 2025 Mar 5]. Available from: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockkey=300055PV.txt>
- [2] Yang HH, Dhital NB, Wang LC, Hsieh YS, Lee KT, Hsu YT, et al. Chemical characterization of fine particulate matter in gasoline and diesel vehicle exhaust. Aerosol Air Qual Res. 2019;19(6):1439-49. doi: 10.4209/aaqr.2018.12.0495.
- [3] Mehta D. The development of a nephelometer system for time-resolved particulate measurements from direct injection spark ignition engines [master's thesis]. Austin (TX): The University of Texas at Austin; 2000.
- [4] Witze PO. Diagnostics for the measurement of particulate matter emissions from reciprocating engines. In: Proceedings of the Fifth International Symposium on Diagnostics and Modeling of Combustion in Internal Combustion Engines (COMODIA 2001); 2001 Jul 1-4; Nagoya, Japan.
- [5] Okrent DA. Optimization of a third generation TEOM monitor for measuring diesel particulate in real time. SAE Technical Paper. 1998;980409. doi: 10.4271/980409.

- [6] United States Environmental Protection Agency (EPA). Procedures for cascade impactor calibration and operation in process streams. EPA/600/2-77-004 [Internet]. Springfield (VA): United States Environmental Protection Agency; 1977 [cited 2025 Mar 5]. Available from: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockkey=300055PV.txt>
- [7] Smallwood GJ, Snelling DR, Neill WS, Liu F, Bachalo WD, Gülder ÖL. Laser-induced incandescence measurements of particulate matter emissions in the exhaust of a diesel engine. In: Proceedings of the Fifth International Symposium on Diagnostics and Modeling of Combustion in Internal Combustion Engines (COMODIA 2001); 2001 Jul 1-4; Nagoya, Japan.
- [8] Allan W, Freeman R, Pucher G, Faux D, Bardon M, Gardiner D. Development of a smoke sensor for diesel engines. SAE Technical Paper. 2003;2003-01-3084 doi: 10.4271/2003-01-3084.
- [9] Goyen Controls Co Pty Ltd. Pentair [Internet]. 2010 [cited 2025 Apr 2]. Available from: <http://www.cleanairsystems.com>
- [10] Roessler DM, Faxvog FR. Opacity of black smoke: Calculated variation with particle size and refractive index. Appl Opt. 1979;18(9):1399-403. doi: 10.1364/AO.18.001399.

คำแนะนำในการจัดทำต้นฉบับ

วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ วิศวกรรมศาสตร์บริการ

Bulletin of Applied Sciences

บทความที่ส่งตีพิมพ์จะต้องไม่เคยตีพิมพ์หรืออยู่ในระหว่างการพิจารณาเพื่อตีพิมพ์ในวารสารอื่น บทความที่เสนอมาเพื่อตีพิมพ์อาจเขียนเป็นภาษาไทยหรือภาษาอังกฤษก็ได้ แต่บทความต้องมีทั้งสองภาษา ทั้งนี้บทความทุกเรื่องจะได้รับการพิจารณาตรวจแก้จากผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาที่เกี่ยวข้อง และกองบรรณาธิการขอสงวนสิทธิ์ในการตรวจแก้ไขต้นฉบับและพิจารณาตีพิมพ์ตามลำดับก่อนหลัง

ความรับผิดชอบ

บทความที่ตีพิมพ์ในวารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ วิศวกรรมศาสตร์บริการ ถือเป็นผลงานทางวิชาการ และเป็นความเห็นส่วนตัวของผู้เขียน ไม่ใช่ความเห็นของวิศวกรรมศาสตร์บริการ หรือกองบรรณาธิการ ผู้เขียนต้องรับผิดชอบต่อบทความของตน และบทความที่ตีพิมพ์ในเล่มนี้ไม่เคยพิมพ์ในวารสารใดมาก่อน และจะไม่นำไปเพื่อพิจารณาตีพิมพ์ในวารสารอื่นภายใน 60 วัน

1. การเตรียมต้นฉบับและการส่งต้นฉบับ

1.1 บทความวิจัย (Research article) ประกอบด้วยหัวข้อ ดังนี้

1.1.1 ชื่อเรื่อง:

ชื่อเรื่องต้องมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ตัวอักษร Cordia New ขนาด 18 ตัวหนา จัดวางข้อความชื่อเรื่องตรงกึ่งกลางหน้ากระดาษ โดยชื่อเรื่องภาษาอังกฤษเฉพาะคำขึ้นต้น ให้พิมพ์ตัวใหญ่

1.1.2 ชื่อผู้วิจัย ผู้วิจัยร่วม

ชื่อผู้วิจัย ผู้วิจัยร่วม ต้องมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ตัวอักษร Cordia New ขนาด 12 ตัวปกติ จัดวางข้อความชื่อผู้วิจัย ผู้วิจัยร่วมกึ่งกลางหน้ากระดาษ ใช้เลข 1,2,3....โดยยกกำลังแสดงตรงชื่อ และเป็นเลขเดียวกันเพื่อแสดงที่อยู่ และ e-mail address

ตัวอย่าง

จารวี เล็กสุขศรี¹, ก่อพงศ์ หงษ์ศรี¹,ธีรวัธ อาจสำอางค์²

Jarawee Leksuksri¹, Korpong Hongsri¹, Theerat Ardsamang²

¹กองวัสดุวิศวกรรม วิศวกรรมศาสตร์บริการ จังหวัดกรุงเทพมหานคร 10400 ประเทศไทย

²ภาควิชาวนผลิตภัณฑ์ คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จังหวัดกรุงเทพมหานคร 10900 ประเทศไทย

¹Engineering Materials Division, Department of Science Service, Bangkok 10400, Thailand

²Department of Forest Products, Faculty of Forestry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

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

1.1.3 บทคัดย่อ (Abstract)

บทคัดย่อต้องมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ตัวอักษร Cordia New ขนาด 14 ตัวปกติ เนื้อหาในคัดย่อควรระบุวัตถุประสงค์ ผลการวิจัย และบทสรุปโดยย่อ

1.1.4 คำสำคัญ (Keywords)

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

1.1.5 เนื้อเรื่อง

1.1.5.1 บทนำ (Introduction)

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

1.1.5.2 วิธีการวิจัย (Experimental methods)

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

1.1.5.3 ผลและวิจารณ์ (Results and Discussion)

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

1.1.5.4 สรุป (Conclusion)

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

1.1.5.5 กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

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

1.1.5.6 เอกสารอ้างอิง (References)

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

1.1.6 ตาราง (Table) และรูป (Figure)

1.1.6.1 ตาราง : ให้ระบุลำดับที่ของตาราง หัวตารางให้จัดชิดขอบด้านซ้าย ชื่อตารางให้อยู่ด้านบนของตาราง ตัวอักษร Cordia New ขนาด 14 ตัวปกติ

1.1.6.2 รูป : ให้ระบุลำดับที่ของรูป คำบรรยายรูปภาพให้อยู่ใต้รูปภาพ และจัดกึ่งกลางคอลัมน์ ตัวอักษร Cordia New ขนาด 12 ตัวปกติ กรณีเป็นรูปถ่าย ความละเอียดของรูปไม่ต่ำกว่า 300 dpi

1.2 บทความวิชาการ (Academic article) ประกอบด้วยหัวข้อ ดังนี้

1.2.1 ชื่อเรื่อง

ชื่อเรื่องต้องมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ตัวอักษร Cordia New ขนาด 18 ตัวหนา จัดวางข้อความชื่อเรื่องตรงกึ่งกลางหน้ากระดาษ โดยชื่อเรื่องภาษาอังกฤษเฉพาะคำขึ้นต้น ให้พิมพ์ตัวใหญ่

1.2.2 ชื่อผู้วิจัย ผู้วิจัยร่วม

ชื่อผู้วิจัย ผู้วิจัยร่วม ต้องมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ตัวอักษร Cordia New ขนาด 12 ตัวปกติ จัดวางข้อความชื่อผู้วิจัย ผู้วิจัยร่วมกึ่งกลางหน้ากระดาษ ใช้เลข 1,2,3....โดยยกกำลังแสดงตรงชื่อ และเป็นเลขเดียวกันเพื่อแสดงที่อยู่ และ e-mail address

ตัวอย่าง

จารวี เล็กสุขศรี¹, ก่อพงศ์ หงษ์ศรี¹,ธีรวัธ อาจสำอางค์²

Jarawee Leksuksri¹, Korpong Hongsri¹, Theerat Ardsamang²

¹กองวัสดุวิศวกรรม กรมวิทยาศาสตร์บริการ จังหวัดกรุงเทพมหานคร 10400 ประเทศไทย

²ภาควิชาวนผลิตภัณฑ์ คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จังหวัดกรุงเทพมหานคร 10900 ประเทศไทย

¹Engineering Materials Division, Department of Science Service, Bangkok 10400, Thailand

²Department of Forest Products, Faculty of Forestry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

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

1.2.3 บทคัดย่อ (Abstract)

บทคัดย่อต้องมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ตัวอักษร Cordia New ขนาด 14 ตัวปกติ เนื้อหาในบทคัดย่อควรระบุวัตถุประสงค์ ผลการวิจัย และบทสรุปโดยย่อ

1.2.4 คำสำคัญ (Keywords)

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

1.2.5 เนื้อเรื่อง แบ่งเป็นส่วนต่าง ๆ ดังนี้

1.2.5.1 บทนำ (Introduction)

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

1.2.5.2 เนื้อหา นำเสนอตามหัวข้อหรือประเด็นที่ผู้นิพนธ์กำหนดเพื่อแสดงรายละเอียดของเรื่อง

1.2.5.3 สรุป (Conclusion) กล่าวถึงสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ ของเรื่องที่เขียนเพื่อให้ผู้อ่านเข้าใจ

1.2.5.4 กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement) กล่าวถึงบุคคล หรือหน่วยงานที่ให้การสนับสนุนการศึกษา

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

2. การเขียนเอกสารอ้างอิงตามระบบ Vancouver

2.1 การอ้างอิงในเนื้อหา (In-text citation) เมื่อนำผลงานของบุคคลอื่น ไม่ว่าบางส่วน หรือทั้งหมด มาอ้างอิง ในบทความ ให้ใส่ตัวเลขตามลำดับของการอ้างอิง ในเครื่องหมายวงเล็บเหลี่ยม [] หลังชื่อผู้เขียน หรือหลังข้อความที่อ้างอิง และใช้เลขลำดับเดิมในกรณีที่มีการอ้างอิงซ้ำทุกครั้ง ส่วนเอกสารอ้างอิงท้ายบท จัดเรียงตัวเลขตามลำดับของการอ้างอิง ในเนื้อหา กรณีที่มีการอ้างอิงหลายรายการพร้อมกัน ในกรณีที่ตัวเลขลำดับการอ้างอิง เป็นลำดับที่ต่อเนื่องกันให้ใช้เครื่องหมายยัติภังค์ (-) คั่นระหว่างตัวเลข เช่น [1-3] แต่ถ้าตัวเลขลำดับการอ้างอิง ไม่ต่อเนื่องกันให้ใช้เครื่องหมายจุลภาค (,) คั่นระหว่างตัวเลข เช่น [2,4]

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

2.3 รูปแบบการเขียนเอกสารอ้างอิงเอกสารประเภทต่าง ๆ

2.3.1 หนังสือ (Book)

2.3.1.1 ผู้แต่งคนไทยให้ใช้ชื่อและนามสกุล เช่น จิตตกานต์ อินเพียง.

2.3.1.2 ผู้แต่งชาวต่างชาติให้ใช้ชื่อสกุล ตามด้วยอักษรย่อชื่อตัวและชื่อกลาง เช่น Muller AC.

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

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

2.3.1.3 นิติบุคคล ให้ใช้ชื่อหน่วยงานใหญ่และตามด้วยหน่วยงานย่อย เช่น มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, คณะวิทยาศาสตร์.

2.3.1.4 ไม่ปรากฏชื่อผู้แต่ง ให้ใช้ชื่อหนังสือแทนในตำแหน่งชื่อผู้แต่ง

2.3.1.5 หนังสือที่มีเฉพาะบรรณาธิการ ให้ใช้ชื่อบรรณาธิการในตำแหน่งชื่อผู้แต่ง ตามด้วยจุลภาค และคำว่า บรรณาธิการ editor หรือ editors

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

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

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

2.3.1.9 หนังสือชุดที่มีหลายเล่มจบ ให้ใส่จำนวนเล่มทั้งหมด เช่น 5 เล. หรือ 5 vol. (ย่อมาจาก volume) อ้างอิงเพียงเล่มใดเล่มหนึ่ง โดยใส่ไว้หลังชื่อเรื่องหรือครั้งที่พิมพ์ เช่น เล่ม 5. หรือ Vol. 5.

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

ตัวอย่าง

[1] จำนงค์ นพรัตน์, ขวดี นพรัตน์. โลหิตวิทยา (Hemato-Book). พิมพ์ครั้งที่ 2. สงขลา: ภาควิชาพยาธิวิทยา คณะแพทยศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์; 2563.

[2] พงษ์ธร เชื้อย. สารเคมียาง. ปทุมธานี: ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ; 2548.

[3] Padua GW, Wang Q, editors. Nanotechnology research methods for foods and bioproducts. Ames (IA): Wiley-Blackwell; 2012.

[4] Hubschmann HJ. Handbook of GC-MS: Fundamentals and applications. 3rd ed. Weinheim: Wiley-VCH; 2015.

2.3.2 บทหนึ่งในหนังสือ (Chapter in book)

รูปแบบ: ชื่อผู้แต่ง.✓ ชื่อบทความ.✓ ใน: หรือ In:✓ ชื่อบรรณาธิการ, บรรณาธิการ.✓ ชื่อหนังสือ.

ครั้งที่พิมพ์.✓ สถานที่พิมพ์.✓ สำนักพิมพ์.✓ ปีพิมพ์.✓ น. หรือ p. เลขหน้าเริ่มต้น-เลขหน้าสุดท้าย.

ตัวอย่าง

[1] นงลักษณ์ ลิ้มกุล.การบริหารความต่อเนื่อง เพื่อฟื้นเฟื่องเกษตรกรรม. ใน: ธีระ กลลดาเรืองไกร, บรรณาธิการ. การบริหารความต่อเนื่องในภาวะฉุกเฉินของโรงพยาบาล. กรุงเทพฯ: คณะแพทยศาสตร์ ศิริราชพยาบาล มหาวิทยาลัยมหิดล; 2562. หน้า 33-60.

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

2.3.3 บทความวารสาร (Journal Article)

2.3.3.1 วารสารภาษาไทย ให้เขียนชื่อเต็ม

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

2.3.3.3 หากเป็นวารสารชื่อสั้น ๆ คำเดียว มักจะไม่ย่อชื่อวารสาร

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

หน้า 22-28 ให้ระบุ 22-8.

หน้า 1012A-1045A ให้ระบุ 1012A-1045A.

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

ตัวอย่าง

[1] จิตตกานต์อินทิยัง. การปรับตั้งเครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ (ตอนที่ 1). UPDATE สมท.สาร. 2549 มกราคม-มีนาคม;11(1):13-6.

[2] Intiang J, Sirichote W, Boonsanit S. Development of automatic calibration system for electronic balances. Bull Appl Sci. 2019;8(8):40-7.

2.3.4 วิทยานิพนธ์ (Thesis/Dissertation)

ประเภท/ระดับปริญญา เช่น วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต dissertation thesis ฯลฯ

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

ตัวอย่าง

[1] Kaplan SJ. Post-hospital home health care: the elderly's access and utilization [dissertation]. St. Louis (MO): Washington University; 1995.

[2] Tesema BH. Tannery solid waste generation rate and preparation of leather board from chrome shaving waste and plant fibers "a wealth from waste approach for leather industry" [thesis]. Addis Ababa: Ethiopia; 2018.

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

2.3.5 สิทธิบัตร (Patent)

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

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

ตัวอย่าง

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

2.3.6 มาตรฐาน (Standards)

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

ตัวอย่าง

- [1] British Standard Institution (BSI). Foodstuffs-determination of sucralose-high performance liquid chromatographic method. BS EN 16155:2012. London: 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.

2.3.7 เอกสารด้านกฎหมายที่ประกาศในราชกิจจานุเบกษา

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

ตัวอย่าง

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

2.3.8 เอกสารอิเล็กทรอนิกส์ (รูปแบบทั่วไป)

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

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

2.3.9 หนังสืออิเล็กทรอนิกส์ (E-Book)

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

ตัวอย่าง

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

2.3.10 บทความวารสารอิเล็กทรอนิกส์ (e-Journal)

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

ตัวอย่าง

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

2.3.11 บทความวารสารที่มีหมายเลข Digital Object Identifier (DOI)

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

ตัวอย่าง

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

ข้อแนะนำการส่งบทความ

รายการตรวจสอบก่อนส่งบทความ

ในขั้นตอนการส่งบทความ ผู้นิพนธ์ต้องตรวจสอบและปฏิบัติตามข้อกำหนดรายการตรวจสอบการส่งทุกข้อ ดังต่อไปนี้ และบทความอาจถูกส่งคืนให้กับผู้แต่งกรณีที่ไม่ปฏิบัติตามข้อกำหนดทั้งหมด

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

นโยบายส่วนบุคคล

ชื่อและที่อยู่อีเมล หรือข้อมูลส่วนบุคคล ที่กรอกในเว็บไซต์วารสารนี้จะใช้สำหรับวัตถุประสงค์ที่ระบุไว้ในงานวารสารเท่านั้นและจะไม่เปิดเผยเพื่อวัตถุประสงค์ในกิจกรรมอื่น ๆ หรือให้กับบุคคลหรือหน่วยงานอื่นใดทราบ

การคุ้มครองข้อมูลส่วนบุคคล

1. วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ กรมวิทยาศาสตร์บริการ จะเคร่งครัดกรณีบทความมีการคัดลอก การนำเสนอรูปภาพ หรือการนำผลงานผู้อื่นมาเป็นส่วนหนึ่งของบทความเพื่อตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสาร

2. วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ กรมวิทยาศาสตร์บริการ จะไม่เปิดเผยรายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ ให้แก่ผู้นิพนธ์หรือบุคคลอื่น

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

Submission Guidelines

Submission preparation checklist

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

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

Author guidelines

Manuscript preparation and submission

For Research and Academic article

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

Example

Pranee Junlar¹, Nithiwach Nawaukkaratharnant²

¹Division of Engineering Materials, Department of Science Service, Bangkok 10400, Thailand

²Metallurgy and Materials Science Research Institute, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand

*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:
 - Table:
 - >> Use Cordia New style, regular, size 14
 - >> Every table must have a caption that includes the table number on the top of the table, with left align.
 - Figure:
 - >> Use Cordia New style, regular, size 12
 - >> 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).
- 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 Bulletin of Applied Sciences website, we collect and use your personal information (name, email, and other personal data) to facilitate efficiency and productivity in journal publishing process. The journal is dedicated to protecting your personal information and does not share your personal data with anyone outside the organization.

1. The journal is strictly concerned about plagiarism and unacknowledged others' work applies not only to text, but also to illustrations/graphs of the submitted manuscript.
2. The journal 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		ป	
การตรวจสอบความสามารถในการทำซ้ำ	12	ประสิทธิภาพ	20
การตรวจสอบที่ค่าน้ำหนักจุดเดียว	12	ปากกาจันตึงไฟฟ้า	20
การตรวจสอบระหว่างการใช้งาน	12		
		ฝ	
ค		ฝุ่นละออง	69
ความชื้นสัมมูล	34		
ความชื้นสัมพัทธ์	34	ร	
ความนำไฟฟ้า	69	รอยต่างของงานพิมพ์	56
ความพึงพอใจ	20	ระบบฆ่าเชื้อโรค	44
ค่าวอเตอร์เอกทิวิตี	34	รังสีอัลตราไวโอเลต	44
คุณภาพงานพิมพ์	56	รีเฟลกแดนซ์	56
เครื่องชั่งน้ำหนักอิเล็กทรอนิกส์	12		
		ว	
ช		วิธีการของ NATA	12
เซนเซอร์	69		
		ส	
ด		สมุนไพรรักษาแผลไฟไหม้	34
ดัชนีความไม่สม่ำเสมอของงานพิมพ์	56		
		อ	
ต		อนุภาค	69
ต้นทุน	20		
ท			
แท่งเทียนไขปาล์ม	20		
น			
น้ำประปาหมู่บ้าน	44		
บ			
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	34		

Keyword index

	Page		Page
A		R	
<i>Andrographis paniculata</i>	35	Reflectance	57
		Relative humidity	35
C		Repeatability check	13
Conductivity	70		
Cost analysis	21	S	
		Sensor	70
D		Single point check	13
Disinfection system	45		
		U	
E		Ultraviolet radiation	45
Efficiency	21	User satisfaction	21
Electronic balances	13		
Equilibrium moisture content	35	V	
		Village water supply	45
I			
Intermediate check	13	W	
		Water activity	35
M			
Mathematical models	35		
Mottle index	57		
N			
NATA method	13		
P			
Palm wax sticks	21		
Particle	70		
Particulate matter	70		
Portable electric canting pen	21		
Print mottling	57		
Print quality	57		

ดรรชนีผู้แต่ง

	หน้า
ก	
การ์ตูน เฟื่องพรม	20
โกสินทร์ หาชะวี	56
จ	
จิตตกานต์ อินทรีย์	12
จินตนา แสนสุข	34
ฉ	
ธีรโชติ หล้าวงษ์	69
พ	
พานิช อินต๊ะ	69
ว	
วนัสสุตา คำพุฒ	69
วโรตม์ พรหมบุญ	56
วิสาขน์ภัสร์ รัตนจันทร์	69
วิสูตร อาสนวิจิตร	69
ศ	
ศิริลักษณ์ ป้องเกียรติชัย	56
ส	
สมพร สิ้นเจริญโกคัย	20
สราวุฒิ แนนเนียร	34
อ	
อนุชา สิ้นธุสาร	44
อภาพร สิ้นธุสาร	20, 44

Author index

	Page
A	
Anucha Sinthusarn	44
Apaporn Sinthusarn	20, 44
J	
Jintana Sansuk	34
Jittakant Intiang	12
K	
Kartoon Pengprom	20
Kosin Hachawee	56
P	
Panich Intra	69
S	
Sarawut Nabnean	34
Siriluk Pongkeatchai	56
Somphon Sincharoenpokai	20
T	
Theerachot Lawong	69
V	
Visut Asanavijit	69
W	
Wanasuda Khamput	69
Warot Promboon	56
Wisapat Rattanachan	69

[illegible]

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

[illegible]

[illegible]

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

[illegible]

[illegible]

[illegible]

[illegible]

[illegible]

[illegible]

[illegible]

[illegible]



กรมวิทยาศาสตร์บริการ
กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม
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