



วารสารผลงานวิชาการ
กรมวิทยาศาสตร์บริการ

BULLETIN OF APPLIED SCIENCES

ISSN : 2286-7708 (Printed)

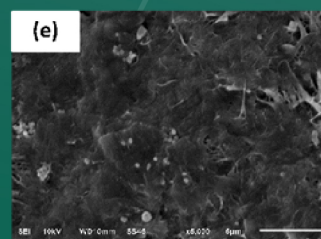
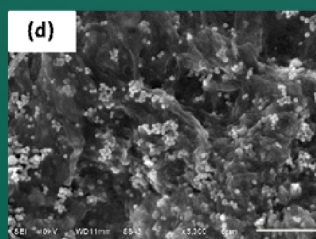
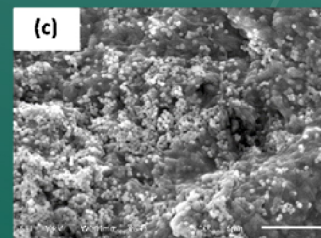
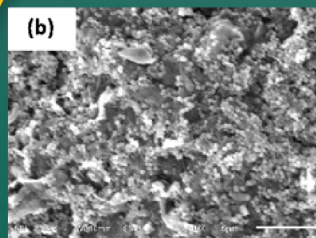
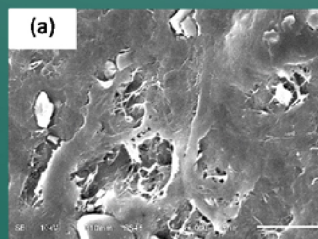
ISSN : 2697-5262 (Online)

ปีที่ 10 ฉบับที่ 10 สิงหาคม 2564
Volume 10 Number 10
August 2021



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

การพัฒนาผ้าสมานแผลด้วยอนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟลากลอส
Development of wound healing cloth containing bioactive glass nanoparticles



รูป : สัณฐานวิทยาของอนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟลากลอสเมื่อผสมกับเซลลูโลส



วารสารผลงานวิชาการ กรมวิทยาศาสตร์บริการ

Bulletin of Applied Sciences

ปีที่ 10 ฉบับที่ 10 สิงหาคม 2564

Volume 10 Number 10 August 2021



วารสารผลงานวิชาการ
กรมวิทยาศาสตร์บริการ
BULLETIN OF APPLIED SCIENCES

ปีที่ 10 ฉบับที่ 10 สิงหาคม 2564 (Volume 10 Number 10 August 2021)

วารสารผลงานวิชาการ กรมวิทยาศาสตร์บริการ จัดทำขึ้นเพื่อเป็นวารสารเผยแพร่ผลงานวิชาการของนักวิจัย นักวิทยาศาสตร์ให้เป็นที่ยอมรับแก่ภาครัฐ ภาคเอกชน นักวิชาการ ผู้ประกอบการและประชาชนทั่วไป รวมถึงสามารถนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์ในทางวิชาการ การอ้างอิง และการประกอบกิจการภาคการผลิตและอุตสาหกรรม

เจ้าของ	กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม	
นโยบายการจัดพิมพ์	วารสารผลงานวิชาการ กรมวิทยาศาสตร์บริการ Bulletin of Applied Sciences รับผิดชอบต่อความวิจัย บทความวิชาการ และบทความปริทัศน์ จากผู้เขียนทั้งภายในและภายนอกหน่วยงาน ในสาขาเคมี ฟิสิกส์ เทคโนโลยีชีวภาพ วิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยีทางอาหาร วัสดุศาสตร์ มাত্রวิทยา สารสนเทศศาสตร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ วิศวกรรมศาสตร์ หรือ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง	
ที่ปรึกษากองบรรณาธิการ	นายปฐม สวรรค์ปัญญาเลิศ	อธิบดีกรมวิทยาศาสตร์บริการ
หัวหน้ากองบรรณาธิการ	นางสาวนรินทร์นาถ แจ่มทอง	รองอธิบดีกรมวิทยาศาสตร์บริการ
กองบรรณาธิการ		รักษาราชการแทนผู้อำนวยการกองหอสมุดและ ศูนย์สารสนเทศวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
	รศ. ดร. ครรชิต จุดประแสงค์	สถาบันโภชนาการ มหาวิทยาลัยมหิดล
	รศ. ดร. ชรินทร์ ดุ้ยเต็มวงศ์	ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
	รศ. ดร. ประเวทย์ ดุ้ยเต็มวงศ์	ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
	ดร. งามอาจ ธนศนิตย์	ศูนย์ความปลอดภัย อาชีวอนามัยและสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
	ดร. ประไพพิศ แจ่มสุกใส เทอร์โน	บริษัท อินโนเวเลบ ดีไซน์ จำกัด
	ผศ. ดร. พุทธิรักษา วรานุศฤกษ์กุล	ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
	รศ. ดร. วิภากรนต์ เชื้อขวด ชัยสิทธิ์	ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
	รศ. ดร. อติยา ศิริบุญยานนท์	ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล
	รศ. ดร. ปานไพลิน สีหาราช	ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
	ผศ. ดร. ณัฐวุฒิ เชิงชั้น	ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
	รศ. ดร. จักรพงษ์ แก้วขาว	ศูนย์วิจัยแห่งความเป็นเลิศทางเทคโนโลยีแก้วและวัสดุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม
	รศ. ดร. วันทนีย์ พุกกะคุปต์	ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
	รศ. ดร. อรทัย จงประทีป	ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
	ศ. ดร. ดวงดาว อาจองค์	ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
	รศ. ดร. วิษณุ เพชรภา	วิทยาลัยนานาชาติพระจอมเกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผศ. ดร. เทอดเกียรติ ลิ้มปิที่ปรางกร	ศูนย์นวัตกรรมระบบราง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี ราชมงคลธัญบุรี	
ผศ. ดร. รัฐภูมิ ปรัชชาติปรีชา	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	
รศ. ดร. วิทยา ทิพย์สุวรรณพร	ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	

	นายเจษฎา วงศาโรจน์ นายกิตติพงษ์ ชะเอมเทศ	สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ (ห้องปฏิบัติการความยาว) กลุ่มงานกลศาสตร์ของแข็งและการทดสอบ ฝ่ายมาตรวิทยาเชิงกล สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ
ฝ่ายประสานงาน	นางเพ็ญพิชชา เข้มเงิน นางสาวพนารัตน์ มอญใต้ นางสาวจอย ผิวสะอาด	
ฝ่ายเผยแพร่	ฝ่ายประชาสัมพันธ์	
เว็บไซต์วารสาร	นางสาวพรชชล รัตนปานิ	
การจัดพิมพ์และเผยแพร่	จัดพิมพ์ปีละ 1 ฉบับ กำหนดออกเผยแพร่เดือน สิงหาคม	
จำนวนพิมพ์	300 เล่ม	
สำนักงานวารสาร	สำนักงานเลขาธิการกรม ฝ่ายประชาสัมพันธ์ กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม 75/7 ถนน พระรามที่ 6 แขวงทุ่งพญาไท เขตราชเทวี กรุงเทพมหานคร 10400 โทรศัพท์: 02 201 7000 ต่อ 7095, 7097, 7098, 7470 โทรสาร 0 2201 7470 เว็บไซต์ http://bas.dss.go.th	

ISSN (Printed) : 2286-7708

ISSN (Online) : 2697-5262

บทความใน “วารสารผลงานวิชาการ กรมวิทยาศาสตร์บริการ” ถือเป็นผลงานทางวิชาการ และเป็นความเห็นส่วนตัวของผู้เขียน ไม่ใช่ความเห็นของกรมวิทยาศาสตร์บริการ หรือกองบรรณาธิการ ผู้เขียนต้องรับผิดชอบบทความของตน และบทความที่ดีพิมพ์ในเล่มนี้ไม่เคยพิมพ์ในวารสารใดมาก่อน และจะไม่นำส่งไปเพื่อพิจารณาตีพิมพ์ในวารสารอื่นภายใน 60 วัน

พิมพ์ที่ ร้าน พีเอ็น ก๊อปปี้เซ็นเตอร์
45/123 พรธิสาร 3 ม.1 ต.คลองหก อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12120 โทรศัพท์ 09 3519 9795

บทบรรณาธิการ

วารสารผลงานวิชาการ กรมวิทยาศาสตร์บริการ Bulletin of Applied Sciences ฉบับนี้เป็นฉบับประจำปี ที่ 10 ฉบับที่ 10 พ.ศ. 2564 นับเป็นระยะเวลา 10 ปี ที่ได้มีการตีพิมพ์อย่างต่อเนื่อง โดยมีจุดมุ่งหวังที่จะนำเสนอผลงานวิจัยและเผยแพร่ผลงานวิชาการของนักวิทยาศาสตร์ นักวิจัย ของกรมวิทยาศาสตร์บริการและหน่วยงานต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง ในฉบับประกอบด้วยบทความวิจัยและบทความวิชาการหลากหลายด้าน จำนวน 12 เรื่อง อาทิ ด้านการพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารและเครื่องดื่ม ได้แก่ “การพัฒนาเครื่องดื่มที่มีสารต้านอนุมูลอิสระจากข้าวสีเข้มผสมน้ำผลไม้” “การทวนสอบวิธีและการศึกษาปริมาณการปนเปื้อนสารอะฟลาทอกซินเอ็ม₁ ในนมและผลิตภัณฑ์นม” ด้านความปลอดภัย ได้แก่ “แนวทางการจัดการด้านความปลอดภัยของห้องปฏิบัติการและสารเคมี” ด้านการวิเคราะห์ทดสอบ ได้แก่ “การตรวจวัดบิสฟีนอลเอไดโกลซิไดลอีเธอร์ บิสฟีนอลเอไดโกลซิไดลอีเธอร์ โนโวลแลกไดโกลซิไดลอีเธอร์และอนุพันธ์ในปลากระป๋องโดยเทคนิคแมทริกซ์โซลิดิฟิเคชันและอัลตราไฮเพอร์ฟอว์แมนซ์ลิกวิด โครมาโทกราฟี-แทนเดมแมสสเปกโตรเมตรี” “การตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีทดสอบปริมาณแคดเมียม และตะกั่วที่ละลายจากกระดาสัมผัสอาหาร” “การเปรียบเทียบการหาค่าความร้อนแบบกรอสในตัวอย่างชีวมวลระหว่างวิธีมาตรฐาน ISO 18125 และ ASTM D5865” ด้านวัสดุศาสตร์ ได้แก่ “การเตรียมเคลือบที่มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ สำหรับเนื้อดินภาชนะเซรามิกหุ้มฉนวนประเภทสัมผัสเปลวไฟโดยตรง” ด้านการพัฒนาเทคโนโลยี ได้แก่ “การพัฒนาเส้นพิมพ์ชีวภาพจากเส้นใยกล้วยสำหรับเครื่องพิมพ์สามมิติ” “การพัฒนาผ้าสนามแผ่ด้วยอนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟกลาส” “การพัฒนาและทดสอบระบบตรวจสอบทางรถไฟสำหรับงานซ่อมบำรุงทาง” และด้านการสอบเทียบ ได้แก่ “เทคนิคขั้นสูงของการสอบเทียบเครื่องวัดระยะชนิดเลเซอร์” “การพัฒนาอุปกรณ์ควบคุมแรงสำหรับสอบเทียบเครื่องทดสอบแรงกดกระดาส”

กองบรรณาธิการ ขอขอบพระคุณผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่านที่กรุณาประเมินคุณภาพบทความและให้ข้อคิดเห็นในการปรับปรุงแก้ไข ทำให้บทความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ขอขอบพระคุณผู้สนับสนุน รวมถึงผู้เกี่ยวข้องทุกท่านที่ทำให้การจัดทำวารสารสำเร็จลุล่วงด้วยดี และหวังเป็นอย่างยิ่งว่า เนื้อหาจากวารสารฉบับนี้ จะเป็นประโยชน์ต่อผู้สนใจ ในการนำความรู้ไปต่อยอดและนำไปใช้ประโยชน์ในด้านอื่น ๆ ต่อไป

นිරณารถ แจ้งทอง
หัวหน้ากองบรรณาธิการ

สารบัญ

การพัฒนาเครื่องดื่มที่มีสารต้านอนุมูลอิสระจากข้าวสีเข้มผสมน้ำผลไม้ หน้า 1-8

วรรณดี มหรรณพกุล, จันทร์ฉาย ยศศักดิ์ศรี, เจนจิรา อยู่พะเนียด, ศิริวรรณ จำแนกสาร, การ์ตูน เพ็ญพรหม

Development of the antioxidant beverage from colored rice and juice

Wannadee Mahannopkul, Janchay Yossaksri, Janejira Yupanead, Siriwan Jumnaksan, Kartoon Pengprom

การทวนสอบวิธีและการศึกษาปริมาณการปนเปื้อนสารอะฟลาทอกซินเอ็ม₁ ในนมและผลิตภัณฑ์นม หน้า 9-15

อภิษฐา ช่างสุพรรณ

Validation and the study of aflatoxin M₁ contamination in milk and milk products

Apisthaa Changsuphan

แนวทางการจัดการด้านความปลอดภัยของห้องปฏิบัติการและสารเคมี หน้า 16-29

ปวีณา เครือนิล, ปัทมา นพรัตน์

Guideline for laboratory and chemical safety management

Paweena Kreunin, Pattama Nopparat

การตรวจวัดบิสฟีนอลเอไดโกลไซด์อีเธอร์ บิสฟีนอลเอฟไดโกลไซด์อีเธอร์ โนวแลกไดโกลไซด์อีเธอร์ และอนุพันธ์ในปลากระป๋องโดยเทคนิคแมทริกซ์โซลิดดิสเพอร์ชันและอัลตราไฮเพอร์ฟอร์แมนซ์ลิกวิดโครมาโทกราฟี-แทนเดมแมสสเปกโตรเมตรี หน้า 30-45

จุฑาทิพย์ ลาภวิบูลย์สุข, สมภพ ลาภวิบูลย์สุข

Simultaneous determination of bisphenol A diglycidyl ether, bisphenol F diglycidyl ether, novolac glycidyl ether and their derivatives in canned fishes by matrix solid dispersion with ultra high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry

Jutathip Lapviboonsuk, Sompop Lapviboonsuk

การตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีทดสอบปริมาณแคดเมียม และตะกั่วที่ละลายจากกระดาษสัมผัสอาหาร หน้า 46-51

จิตวิไล เวฬุวนารักษ์, นุจจินทร์ พลหงษ์, วรณรัตน์ บุรณะกุล, วันดี ลือสายวงศ์

Method validation for determination of released cadmium and lead from paper for food contact materials

Jitwilai Waluvanarak, Nootjarin Phonhong, Warunrat Buranakul, Wandee Luesaiwong

การเปรียบเทียบการหาค่าความร้อนแบบกรอสในตัวอย่างชีวมวลระหว่างวิธีทดสอบมาตรฐาน ISO 18125 และ ASTM D5865 หน้า 52-61

วชิรพันธุ์ พันธุ์กระวี

Comparison of gross calorific value in biomass between standard test method ISO 18125 and ASTM D5865

Wachirapun Punkrawee

สารบัญ (ต่อ)

- การเตรียมเคลือบที่มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ สำหรับเนื้อดินภาชนะเซรามิก หน้า 62-70
หุงต้มประเภทสัมผัสเปลวไฟโดยตรง

ปราณี จันทรลา , กรองกาญจน์ ศิริกุลวัฒนา, ธนากร วาสนาเพียรพงศ์

Preparation of low thermal expansion glaze for ceramic cookware body of direct flame type

Pranee Junlar, Krongkarn Sirinukunwattana, Thanakorn Wasanapiarnpong

- การพัฒนาเส้นพิมพ์ชีวภาพจากเส้นใยกัญชงสำหรับเครื่องพิมพ์สามมิติ หน้า 71-79

ธนัชฐา ภูลวรรณ

Development of bio-filament using hemp fiber for 3D-printer

Tanittha Pullawan

- การพัฒนาผ้าสมานแผลด้วยอนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟกลาส หน้า 80-89

ชีวิภัทร ปาโมกษ์, เอกธวัช มีชูวาศ, กนิษฐ์ ตะปะสา

Development of wound healing cloth containing bioactive glass nanoparticles

Cheevapat Pamok, Ekarat Meechoowas, Kanit Tapasa

- การพัฒนาและทดสอบระบบตรวจสอบทางรถไฟสำหรับงานซ่อมบำรุงทาง หน้า 90-103

กรธรรม สติรกุล

The development and testing of a railway track inspection system for track maintenance

Korntham Sathirakul

- เทคนิคขั้นสูงของการสอบเทียบเครื่องวัดระยะชนิดเลเซอร์ หน้า 104-112

วันชัย ชินชูศักดิ์, ชนินธ์ พิมพ์ศรี, พิสิฐ หอมเชย, สริญญา นนทศิริ

An advanced technique of laser distance meter calibration

Wanchai Chinchusak, Chanin Phimsri, Pisit Homchoey, Sarinya Nonthasiri

- การพัฒนาอุปกรณ์ควบคุมแรงสำหรับสอบเทียบเครื่องทดสอบแรงกดกระดาษ หน้า 113-125

สุรวุฒิ พวงมาลี

Development of force control equipment for paper crush testers calibration

Surawut Puangmalee

การพัฒนาเครื่องดื่มที่มีสารต้านอนุมูลอิสระจากข้าวสีเข้มผสมน้ำผลไม้ Development of the antioxidant beverage from colored rice and juice

วรรณดี มหรรณพกุล¹, จันทรฉาย ยศศักดิ์ศรี^{1*}, เจนจิรา อยู่พะเนียด^{1**}, ศิริวรรณ จำแนกสาร^{1**}, การ์ตูน เพ็ญพรหม^{1*}

Wannadee Mahannopkul¹, Janchay Yossakdi^{1**}, Janejira Yupanead^{1**}, Siriwan Jumnaksan^{1**}, Kartoon Pengprom^{1*}

บทคัดย่อ

การพัฒนาเครื่องดื่มที่มีสารต้านอนุมูลอิสระจากข้าวสีเข้มผสมน้ำผลไม้ ได้เลือกใช้ข้าวไรซ์เบอร์รี่ ข้าวสังข์หยด บีทรูท และ พักข้าว เป็นวัตถุดิบ โดยงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปริมาณน้ำที่เหมาะสมในการสกัดข้าว อัตราส่วนของน้ำข้าวและน้ำผลไม้ ปริมาณสารให้ความคงตัวที่เหมาะสม และกระบวนการในการฆ่าเชื้อ พบว่า ปริมาณน้ำที่เหมาะสมในการสกัดข้าว โดยใช้ น้ำ 20 เท่าของน้ำหนักข้าว จะได้น้ำข้าวที่มีลักษณะเหมาะสม คือ ไม่ข้นหรือหนืดเกินไป อัตราส่วนของน้ำข้าว:น้ำผลไม้ เท่ากับ 75:25 สำหรับน้ำข้าวไรซ์เบอร์รี่ อัตราส่วนของน้ำข้าวไรซ์เบอร์รี่:น้ำบีทรูท เท่ากับ 75:25 และน้ำข้าวสังข์หยด อัตราส่วนของน้ำข้าวสังข์หยด:น้ำบีทรูท เท่ากับ 80:20 ให้ค่าโอแรค (ORAC) สูงสุด คือ 176 และ 143 $\mu\text{mol TE}/100\text{ g}$ ตามลำดับ ปริมาณสารให้ความคงตัวที่เหมาะสมกับเครื่องดื่มข้าวผสมน้ำผลไม้ คือ เพคติน (Pectin) ร้อยละ 0.1 ร่วมกับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Carboxymethyl cellulose, CMC) ร้อยละ 0.2 ทำให้เครื่องดื่มเป็นเนื้อเดียวกัน การแยกชั้นลดลง กระบวนการฆ่าเชื้อด้วยหม้อนึ่งความดัน ที่ 5 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (110 องศาเซลเซียส, °C) นาน 25 นาที และเครื่องฆ่าเชื้อชนิดฉีดพ่นไอน้ำร้อน ที่อุณหภูมิ 110°C นาน 25 นาที ทำให้เครื่องดื่มมีอายุการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องได้ไม่น้อยกว่า 6 เดือน สำหรับคุณค่าทางโภชนาการต่อหนึ่งหน่วยบริโภค (180 มิลลิลิตร) พบว่า เครื่องดื่มข้าวไรซ์เบอร์รี่ สูตร R2 ซึ่งประกอบด้วย น้ำข้าว:น้ำบีทรูท ในอัตราส่วน 75:25 ให้พลังงานน้อยกว่าเครื่องดื่มข้าวสังข์หยด สูตร S2 ซึ่งประกอบด้วย น้ำข้าว:น้ำบีทรูท ในอัตราส่วน 75:25

ABSTRACT

This research developed of the antioxidant beverage from colored rice and juice resources, including Riceberry rice, Sangyod rice, beetroot, and gac. The research aimed to optimize water content for rice extraction, examine the appropriate ratio of rice extract and fruit juice, determine a suitable amount of stabilizer, and optimize the sterilization process. The result demonstrated that the optimum water content for extracting rice was using water 20 times the rice weight, which obtained rice extract with suitable viscosity. The appropriate ratio of rice extract:juice is 75:25 for Riceberry rice extract:beetroot juice and 80:20 for Sangyod rice extract:beetroot juice, based on the presented highest Oxygen Radical Absorbance Capacity (ORAC) value, 176 and 143 $\mu\text{mol TE}/100\text{ g}$, respectively. The stabilizer suitable for healthy drink was 0.1% pectin with 0.2% carboxymethyl cellulose (CMC), obtaining a homogeneous drink and decreased phase separation. The sterilization process with an autoclave at 5 psi (110 °C) for 25 minutes and spraying hot steam at 110 °C for 25 minutes ensured a shelf life of at least 6 months at room temperature. The nutritional value per serving (180 ml) was that the Riceberry rice drink R2 formula, which contains rice water:beetroot juice at a ratio of 75:25 provides less energy than Sangyod rice drink formula S2, which contains rice water:beetroot juice in a ratio of 75:25.

คำสำคัญ: เครื่องดื่มข้าว เครื่องดื่มต้านอนุมูลอิสระ เครื่องดื่มเพื่อสุขภาพ

Keywords: Rice drink, Antioxidant drink, Healthy drink

¹ กรมวิทยาศาสตร์บริการ

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

** Corresponding author. e-mail address: janchay@dss.go.th, yjanejira@dss.go.th, jsiriwan@dss.go.th

1. บทนำ (Introduction)

ปัจจุบันผู้บริโภคมีความใส่ใจและดูแลในเรื่องสุขภาพกันมากขึ้น ทั้งนี้ผลจากการสำรวจของ Euromonitor ปี 2017 พบว่า มูลค่าตลาดอาหารเพื่อสุขภาพทั่วโลกมีแนวโน้มเติบโตอย่างต่อเนื่อง โดยในปี 2560 มีมูลค่าตลาดสูงถึง 1 ล้านล้านดอลลาร์สหรัฐ หรือประมาณ ร้อยละ 15 ของมูลค่าอาหารและเครื่องดื่มทั้งหมด โดยประเทศที่บริโภคอาหารเพื่อสุขภาพเป็นอันดับต้น ๆ ของโลก ได้แก่ สหรัฐอเมริกา เยอรมนี ฝรั่งเศส และจีน ในปี 2558 มูลค่าตลาดอาหารเสริมเพื่อสุขภาพในประเทศไทยมีมูลค่ากว่า 1.7 แสนล้านบาท [1] ในทางวิชาการและวงการแพทย์ได้นำสารต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant) มาใช้เป็นส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์เพื่อสุขภาพ โดยสารนี้ทำหน้าที่ต้านหรือยับยั้งปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) ในร่างกาย ยับยั้งการเกิดเซลล์มะเร็ง ช่วยป้องกันโรคหัวใจ และโรคอัมพาต [2,3] ทำให้ผู้บริโภคหันมาให้ความสำคัญกับสารต้านอนุมูลอิสระที่สามารถลดความเสี่ยงต่อโรคต่าง ๆ เหล่านี้มากขึ้น สารต้านอนุมูลอิสระจะช่วยปกป้องเซลล์ที่ถูกทำลายหรือได้รับความเสียหายจากโมเลกุลอิสระ โดยผลิตภัณฑ์ธรรมชาติส่วนใหญ่จะประกอบด้วย สารต้านอนุมูลอิสระที่อยู่ในรูปแบบสารประกอบฟีนอลิก เช่น ฟลาโวนอยด์ กรดฟีนอลิก แทนนิน แคโรทีนอยด์ เทอร์ปีนอยด์ และวิตามิน เป็นต้น [4] สารต้านอนุมูลอิสระในอาหารวัดได้จาก การวัดความสามารถตัวต้านออกซิเดชันทั้งหมด (Oxygen radical absorbance capacity, ORAC) เป็นการทดสอบทางห้องปฏิบัติการที่พยายามตรวจวัดเชิงปริมาณความสามารถตัวต้านออกซิเดชันทั้งหมดของอาหาร โดยการวางตัวอย่างของอาหารในหลอดทดลองพร้อมกับโมเลกุลบางอย่าง (Certain molecule) อันก่อให้เกิดการออกฤทธิ์อนุมูลอิสระและโมเลกุลอื่น ที่ง่ายต่อปฏิกิริยาออกซิเดชัน [5] และมีวิธีการประเมินความสามารถตัวต้านออกซิเดชันได้หลายวิธี แต่ที่นิยมคือ วิธี 2,2'-azino-bis-3-ethylbenzthiazoline-6-sulphonic acid (ABTS) และ 1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl (DPPH) [6] จากข้อมูลงานวิจัยของ Sompong และคณะ ปี 2011 [7] และงานวิจัยของ Pedro และคณะ ปี 2016 [8] พบว่า ข้าวสีเข้มนั้นมีคุณสมบัติในการต้านอนุมูลอิสระที่มีประสิทธิภาพที่ดีกว่าวิตามินซี และวิตามินอี และงานวิจัยของ สุรพงษ์ และรัชณี ปี 2018 [9] ได้วิจัยสารสกัดข้าวสีเข้มนั้น พบว่า มีความสามารถการต้านอนุมูลอิสระ (%Inhibition ABTS) ใกล้เคียงกับวิตามินซี โดยมีการยับยั้งอนุมูลอิสระสูงถึงร้อยละ

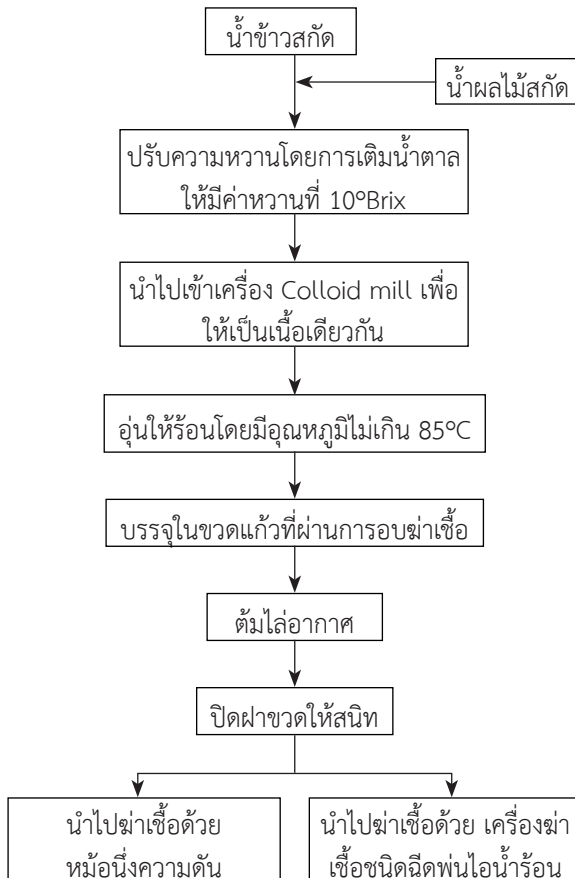
90 และเมื่อวิเคราะห์ปริมาณ แอนโทไซยานิน พบว่า มีเท่ากับ 2.09 ± 0.01 มิลลิกรัม/กรัม นอกจากนี้ยังพบข้อมูลข้าวสีเข้มนั้นพันธุ์อื่น ๆ เช่น ข้าวไรซ์เบอร์รี่ ข้าวสังข์หยด ที่มีธาตุเหล็ก และมีสารต้านอนุมูลอิสระสูง [10,11]

การวิจัยพัฒนาเครื่องดื่มข้าวมีผู้ศึกษาไว้ดังนี้ การวิจัยพัฒนาเครื่องดื่มสกัดจากปลายข้าว สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) ปี 2558 [12] ผลิตภัณฑ์ข้าวโดยใช้ปลายข้าวกล้องหอมมะลิผ่านกระบวนการโม่เปียกและทำให้แห้งด้วยเครื่องอบลมร้อนและใช้เอนไซม์อะไมเลส (Termamyl SE) ย่อยแป้งข้าวได้เป็นน้ำตาลมอลโตส ที่สามารถดูดซึมได้ง่าย ได้วิตามินซีจากน้ำผลไม้ซึ่งเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ และพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มข้าวสูตรไบเบิ้ล และสูตรผลไม้รวม และในส่วนการวิจัยพัฒนาเครื่องดื่มเพื่อสุขภาพ งานวิจัยของ จุฑามาศ และเฉลิมพล ปี 2015 [13] ศึกษาอัตราส่วนระหว่างแป้งข้าวต่อน้ำที่เหมาะสม ที่ 1:20 1:30 และ 1:40 สก๊ตน้ำแป้งที่ 50°C พบว่า อัตราส่วนที่เหมาะสมของแป้งข้าวต่อน้ำคือ 1:30 มีปริมาณ แอนโทไซยานิน เท่ากับ 0.37 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร และการฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 90°C นาน 25 นาที มีอายุการเก็บรักษาเครื่องดื่มได้ 15 วัน ที่อุณหภูมิ $4-6^{\circ}\text{C}$ และงานวิจัยของ สุรพงษ์และรัชณี ปี 2018 [9] ได้วิจัยสารสกัดจากข้าวสีเข้มนั้นเพื่อใช้ผลิตเครื่องดื่มซูเปอร์เบอร์รี่จากข้าวสีเข้มนั้น พบว่า การสกัดที่ดีที่สุดคือ ใช้อัตราส่วนข้าวหอมนิลต่อน้ำ เท่ากับ 1:2 (w/v) มีปริมาณแอนโทไซยานิน เท่ากับ 2.09 ± 0.01 มิลลิกรัม/กรัม และมีร้อยละการต้านอนุมูลอิสระด้วย 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) และ 2,2-azobis (3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) (ABTS) เท่ากับ 72.34 ± 8.17 และ 90.72 ± 0.86 ตามลำดับ เมื่อนำสารสกัดมาผสมในผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มผลไม้รวมที่มีผงเบอร์รี่รวม (Super berries) ปริมาณ 0.1 กรัม ซึ่งจะมีค่าโอแรคสูงถึง 6,000 หน่วย

กรมวิทยาศาสตร์บริการ เล็งเห็นถึงความต้องการเครื่องดื่มเพื่อสุขภาพ จึงได้จัดทำโครงการวิจัย การศึกษาพัฒนาเครื่องดื่มสุขภาพที่ผลิตจากข้าวสีเข้มนั้น (ข้าวไรซ์เบอร์รี่ และข้าวสังข์หยด) ผสมน้ำผลไม้ (น้ำปืทุท และน้ำฟักข้าว) โดยมีเป้าหมายคือ เพื่อให้ได้กระบวนการผลิตเครื่องดื่มข้าวที่มีสารต้านอนุมูลอิสระ บรรจุในภาชนะปิดสนิท ที่ผ่านการฆ่าเชื้อแบบสเตอริไลส์ เพื่อให้สามารถนำองค์ความรู้ไปใช้ทดลองผลิตในระดับอุตสาหกรรม

2. วิธีการวิจัย (Experimental)

ขั้นตอนการผลิตเครื่องดื่มที่มีสารต้านอนุมูลอิสระ
จากข้าวสีเข้มผสมน้ำผลไม้



2.1 ศึกษาการเตรียมวัตถุดิบขั้นต้น เพื่อใช้ในการผลิตเครื่องดื่มข้าว

- การเตรียมน้ำข้าวโดยใช้วิธีสกัดด้วยน้ำ ข้าวที่ใช้เป็นข้าวสีเข้ม ได้แก่ ข้าวไรซ์เบอร์รี่ และข้าวสังข์หยด โดยเปรียบเทียบปริมาณน้ำ 15 และ 20 เท่าของน้ำหนักข้าว ต้มให้เดือดนาน 30 นาที ปั่นให้ละเอียดและกรองผ่านตะแกรงขนาด 100 เมช (Mesh) และวัดปริมาณของแข็งที่ละลายได้ในน้ำข้าวสีกัดเริ่มต้น ($^{\circ}$ Brix)

- การเตรียมน้ำผลไม้ที่มีสารต้านอนุมูลอิสระ ได้แก่ น้ำปืทุ และน้ำฟักข้าว โดยใช้ปริมาณน้ำ 3 เท่าของน้ำหนักผลไม้ ต้มให้เดือดนาน 15 นาที ปั่นให้ละเอียดและกรองผ่านผ้าขาวบาง และวัดปริมาณของแข็งที่ละลายได้ในน้ำผลไม้สีกัดเริ่มต้น ($^{\circ}$ Brix)

2.2 ศึกษาพัฒนาสูตรเครื่องดื่มข้าว และลักษณะทางกายภาพ ในเครื่องดื่มข้าว

- ศึกษาพัฒนาสูตรเครื่องดื่มข้าวไรซ์เบอร์รี่ และเครื่องดื่มข้าวสังข์หยด โดยการนำน้ำข้าวที่สกัดด้วยปริมาณน้ำ 15 และ 20 เท่าของน้ำหนักข้าว ผสมน้ำปืทุ ในอัตราส่วน 80:20 และ 75:25 และผสมน้ำปืทุร่วมกับน้ำฟักข้าว ในอัตราส่วน 50:25:25

- ศึกษาลักษณะทางกายภาพ ในเครื่องดื่มข้าวไรซ์เบอร์รี่ และเครื่องดื่มข้าวสังข์หยด สูตรต่าง ๆ โดยการเปรียบเทียบปริมาณสารให้ความคงตัวที่เหมาะสม ได้แก่ การเติม Pectin ร้อยละ 0.1 ร่วมกับ CMC ร้อยละ 0.2 เปรียบเทียบกับการเติม Pectin ร้อยละ 0.2 ร่วมกับ CMC ร้อยละ 0.2

2.3 ศึกษาปริมาณจุลินทรีย์ ในเครื่องดื่มข้าว

ศึกษาปริมาณจุลินทรีย์ ในเครื่องดื่มข้าวไรซ์เบอร์รี่ และเครื่องดื่มข้าวสังข์หยด ด้วยการส่งตัวอย่างไปวิเคราะห์เชื้อจุลินทรีย์ตามเกณฑ์ข้อกำหนดตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข (ฉบับที่ 356) พ.ศ. 2556 เรื่องเครื่องดื่มในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิท ที่ห้องปฏิบัติการตรวจวิเคราะห์ปริมาณจุลินทรีย์ โดยสุ่มตัวอย่างเครื่องดื่มข้าวทั้ง 2 ชนิด ที่ผ่านการฆ่าเชื้อด้วยหม้อนึ่งความดัน ที่ 5 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (110°C) นาน 25 นาที และการฆ่าเชื้อด้วยเครื่องฆ่าเชื้อชนิดฉีดพ่นไอน้ำร้อน ที่อุณหภูมิ 110°C นาน 25 นาที

2.4 ศึกษาปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระ และคุณค่าทางโภชนาการ ในเครื่องดื่มข้าว

ศึกษาปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระ และคุณค่าทางโภชนาการ ในเครื่องดื่มข้าวไรซ์เบอร์รี่ และเครื่องดื่มข้าวสังข์หยด ด้วยการส่งตัวอย่างไปวิเคราะห์ ที่ห้องปฏิบัติการตรวจวิเคราะห์ปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระ และคุณค่าทางโภชนาการ

2.5 ศึกษาการยอมรับผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มข้าว

การประเมินทางประสาทสัมผัสด้าน สี ลักษณะปรากฏ กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และการยอมรับโดยรวม โดยใช้ผู้ทดสอบชิม จำนวน 25 คน โดยให้คะแนนความชอบแบบ 9-point Hedonic Scale และวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติ โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS เปรียบเทียบความแตกต่างทางสถิติด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

2.6 ศึกษาอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์เครื่องต้มข้าว

ศึกษาอายุการเก็บของผลิตภัณฑ์เครื่องต้มข้าวไรซ์เบอร์รี่ และเครื่องต้มข้าวสังข์หยด โดยเก็บผลิตภัณฑ์เครื่องต้มข้าวทั้ง 2 ชนิดไว้ ที่อุณหภูมิห้อง นาน 6 เดือน

3. ผลและวิจารณ์ (Results and discussion)

3.1 ผลการศึกษาการเตรียมวัตถุดิบขั้นต้น เพื่อใช้ในการผลิตเครื่องต้มข้าว

- การสกัดน้ำข้าวไรซ์เบอร์รี่ และน้ำข้าวสังข์หยด โดยใช้ปริมาณน้ำ 15 และ 20 เท่าของน้ำหนักข้าว พบว่า การสกัดน้ำข้าวทั้ง 2 ชนิด ที่ใช้ปริมาณน้ำ 15 เท่าของน้ำหนักข้าว มีลักษณะเนื้อข้นหนืดมาก และที่ใช้ปริมาณน้ำ 20 เท่าของน้ำหนักข้าว มีลักษณะเนื้อข้นหนืดน้อยกว่า จึงเหมาะสมที่จะนำไปผลิตเป็นเครื่องต้มข้าวต่อไป และเมื่อนำไปวัดปริมาณของแข็งที่ละลายได้ในน้ำข้าวสกัดเริ่มต้น ได้ค่าเท่ากับ 1.8 และ 2 °Brix ตามลำดับ

- การสกัดน้ำผลไม้ที่มีสารต้านอนุมูลอิสระ ได้แก่ น้ำบีทรูท และน้ำฟักข้าว พบว่า การสกัดน้ำผลไม้ทั้ง 2 ชนิด เมื่อนำไปวัดปริมาณของแข็งที่ละลายได้ในน้ำผลไม้สกัดเริ่มต้น ได้ค่าเท่ากับ 3 และ 3 °Brix ตามลำดับ

3.2 ผลศึกษาพัฒนาสูตรเครื่องต้มข้าว และลักษณะทางกายภาพ ในเครื่องต้มข้าว

- การพัฒนาสูตรเครื่องต้มข้าวไรซ์เบอร์รี่ และเครื่องต้มข้าวสังข์หยด โดยเครื่องต้มข้าวทั้ง 2 ชนิด สกัดน้ำข้าวโดยใช้ปริมาณน้ำ 20 เท่าของน้ำหนักข้าว ผสมน้ำบีทรูท ในอัตราส่วน 80:20 และ 75:25 และผสมน้ำฟักข้าวร่วมกับน้ำฟักข้าว ในอัตราส่วน 50:25:25 (ตารางที่ 1)

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมในเครื่องต้มข้าวไรซ์เบอร์รี่ และเครื่องต้มข้าวสังข์หยด

สูตร	เครื่องต้มข้าวไรซ์เบอร์รี่			สูตร	เครื่องต้มข้าวสังข์หยด		
	น้ำข้าว (ร้อยละ)	น้ำบีทรูท (ร้อยละ)	น้ำฟักข้าว (ร้อยละ)		น้ำข้าว (ร้อยละ)	น้ำบีทรูท (ร้อยละ)	น้ำฟักข้าว (ร้อยละ)
R1	80	20	-	S1	80	20	-
R2	75	25	-	S2	75	25	-
R3	50	25	25	S3	50	25	25
R4	75	25	-	S4	75	25	-

หมายเหตุ : ตัวอย่าง R1-R3 และ S1-S3 ฆ่าเชื้อโดยใช้ หม้อนึ่งความดัน ที่ 5 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (110°C) นาน 25 นาที

ตัวอย่าง R4, S4 ฆ่าเชื้อโดยใช้ เครื่องฆ่าเชื้อชนิดฉีดยาน้ำร้อน ที่อุณหภูมิ 110°C นาน 25 นาที

- การศึกษาลักษณะทางกายภาพของเครื่องต้มข้าว โดยการเติมสารให้ความคงตัว ได้แก่ Pectin ร่วมกับ CMC ในเครื่องต้มข้าวไรซ์เบอร์รี่ผสมบีทรูท (75:25) และเครื่องต้มข้าวสังข์หยดผสมบีทรูท (75:25) พบว่า การเติมสารให้ความคงตัวในเครื่องต้มข้าวทั้ง 2 ชนิด เมื่อเติม Pectin ร้อยละ 0.1 ร่วมกับ CMC ร้อยละ 0.2 เครื่องต้มข้าวมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน และเกิดการแยกชั้นน้อยมาก และเมื่อเติม Pectin ร้อยละ 0.2 ร่วมกับ CMC ร้อยละ 0.2 เครื่องต้มข้าวมีลักษณะเนื้อข้นหนืดเล็กน้อย ดังนั้นการเติมสารให้ความคงตัวในเครื่องต้มข้าวทั้ง 2 ชนิด ให้ผลเหมือนกัน จึงเลือกการเติม Pectin ร้อยละ 0.1 ร่วมกับ CMC ร้อยละ 0.2 เป็นปริมาณสารให้ความคงตัวที่เหมาะสม ทำให้ได้เครื่องต้มที่มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน และเกิดการแยกชั้นน้อย

3.3 การศึกษาปริมาณจุลินทรีย์ ในเครื่องต้มข้าว

จากการสุ่มตัวอย่าง เครื่องต้มข้าวไรซ์เบอร์รี่ผสมบีทรูท สูตร R2 และ R4 และเครื่องต้มข้าวสังข์หยดผสมบีทรูท สูตร S2 และ S4 ที่ผ่านการฆ่าเชื้อด้วยหม้อนึ่งความดัน ที่ 5 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (110°C) นาน 25 นาที และการฆ่าเชื้อด้วยเครื่องฆ่าเชื้อชนิดฉีดยาน้ำร้อน ที่อุณหภูมิ 110°C นาน 25 นาที ส่งตรวจวิเคราะห์จุลินทรีย์ตามเกณฑ์ข้อกำหนดตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข (ฉบับที่ 356) พ.ศ. 2556 เรื่องเครื่องต้มในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิท พบว่าเครื่องต้มข้าวทั้ง 2 ชนิด มีปริมาณ <http://bas.dss.go.th>

จุลินทรีย์ผ่านตามเกณฑ์ข้อกำหนดดังกล่าว และผลิตภัณฑ์เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องได้ โดยไม่เสื่อมเสียจากจุลินทรีย์ (ตารางที่ 2)

ตารางที่ 2 ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ในเครื่องดื่มข้าวไรซ์เบอร์รี่ และเครื่องดื่มข้าวสังข์หยด

รายการวิเคราะห์	มาตรฐานเครื่องดื่มใน ภาชนะบรรจุที่ปิดสนิท	สูตรเครื่องดื่มข้าวไรซ์เบอร์รี่		สูตรเครื่องดื่มข้าวสังข์หยด	
		R2	R4	S2	S4
<i>Bacillus cereus</i> (cfu/ml)	≤ 100	< 1	< 1	< 1	< 1
<i>Clostridium perfringens</i> (cfu/ml)	≤ 100	< 1	< 1	< 1	< 1
Coliforms (MPN/100 ml)	< 2.2	< 1.1	< 1.1	< 1.1	< 1.1
<i>Escherichia coli</i> (in 100 ml)	Not Detected	Not Detected	Not Detected	Not Detected	Not Detected
<i>Salmonella</i> spp. (in 25 ml)	Not Detected	Not Detected	Not Detected	Not Detected	Not Detected
<i>Staphylococcus aureus</i> (in 0.1 ml)	Not Detected	Not Detected	Not Detected	Not Detected	Not Detected
Yeast and Mold (cfu/ml)	< 100	< 1	< 1	< 1	< 1

หมายเหตุ : การส่งตัวอย่างวิเคราะห์ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ที่ บริษัท ห้องปฏิบัติการกลาง (ประเทศไทย) จำกัด

3.4 การศึกษาปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระ และคุณค่าทางโภชนาการ ในเครื่องดื่มข้าว

จากการศึกษาเครื่องดื่มข้าวไรซ์เบอร์รี่ 4 สูตร พบว่า เครื่องดื่มข้าวไรซ์เบอร์รี่ สูตร R2 ซึ่งประกอบด้วย น้ำข้าว: น้ำปีทูทู ในอัตราส่วน 75:25 มีค่า ORAC สูงสุด คือ 176 $\mu\text{mol TE}/100\text{ g}$ รองลงมาคือ สูตร R3, R1 และ R4 ตามลำดับ ส่วนเครื่องดื่มข้าวสังข์หยด 4 สูตร พบว่า เครื่องดื่มข้าวสังข์หยด สูตร S1 ซึ่งประกอบด้วย น้ำข้าว:น้ำปีทูทู ในอัตราส่วน 80:20 มีค่า ORAC สูงสุดคือ 143 $\mu\text{mol TE}/100$ รองลงมาคือ สูตร S2, S3 และ S4 ตามลำดับ (ตารางที่ 3) ซึ่งค่า ORAC เป็นหน่วยวัดริเริ่มโดยสถาบันผู้สูงอายุแห่งชาติ และสถาบันสุขภาพแห่งชาติของประเทศสหรัฐอเมริกา แสดงถึงอาหารและเครื่องดื่มที่มีค่า ORAC สูงกว่าน่าจะมีประสิทธิภาพในการทำให้อนุมูลอิสระเป็นกลาง (Neutralizing) ได้มากกว่า [5] ดังนั้นควรเลือกเครื่องดื่มข้าวไรซ์เบอร์รี่ สูตร R2 ซึ่งมีปริมาณ ORAC สูงสุด เมื่อเทียบกับสูตรอื่น ๆ

ตารางที่ 3 ค่าการต้านอนุมูลอิสระรวม สารโพลีฟีนอล และธาตุเหล็ก ในเครื่องดื่มข้าวไรซ์เบอร์รี่ และเครื่องดื่มข้าวสังข์หยด

รายการวิเคราะห์	สูตรเครื่องดื่มข้าวไรซ์เบอร์รี่				สูตรเครื่องดื่มข้าวสังข์หยด			
	R1	R2	R3	R4	S1	S2	S3	S4
Total Antioxidant (ORAC) $\mu\text{mol TE}/100\text{ g}$ (DPPH-method)	160	176	167	103	143	105	91	53
Total polyphenol (as gallic acid) mg/mL	0.16	0.21	0.30	0.34	0.15	0.24	0.27	0.24
Iron (Fe) mg/kg	0.620	0.650	0.910	0.075	0.810	0.124	0.074	0.086

หมายเหตุ : การส่งตัวอย่างวิเคราะห์ปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระที่ บริษัท ห้องปฏิบัติการกลาง (ประเทศไทย) จำกัด

สำหรับผลการวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการ ในเครื่องดื่มข้าวไรซ์เบอร์รี่ สูตร R2 ซึ่งประกอบด้วย น้ำข้าว:น้ำปีทูทู ในอัตราส่วน 75:25 และเครื่องดื่มข้าวสังข์หยด สูตร S2 ซึ่งประกอบด้วย น้ำข้าว:น้ำปีทูทู ในอัตราส่วน 75:25 พบว่า เครื่องดื่มข้าวทั้ง 2 ชนิด มีคุณค่าทางโภชนาการต่อหนึ่งหน่วยบริโภค (180 มิลลิลิตร) ตามตารางที่ 4 แต่ถ้าพิจารณาปริมาณพลังงาน ในแต่ละครั้งที่จะได้รับต่อการบริโภคเครื่องดื่มข้าวทั้ง 2 ชนิด ควรเลือกบริโภคเครื่องดื่มข้าวไรซ์เบอร์รี่ สูตร R2 ที่ให้พลังงาน 70 กิโลแคลอรี ซึ่งน้อยกว่าเครื่องดื่มข้าวสังข์หยดสูตร S2 ที่ให้พลังงาน 100 กิโลแคลอรี

ตารางที่ 4 ค่าการวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการ ในเครื่องต้มข้าวไรซ์เบอร์รี่ และเครื่องต้มข้าวสังข์หยด ต่อหนึ่งหน่วยบริโภค (180 มิลลิกรัม)

รายการวิเคราะห์	สูตรเครื่องต้มข้าวไรซ์เบอร์รี่	สูตรเครื่องต้มข้าวสังข์หยด
	R2	S2
พลังงาน (กิโลแคลอรี)	70	100
ไขมัน (กรัม)	0.09	0.35
โปรตีน (กรัม)	2	5
คาร์โบไฮเดรต (กรัม)	16	20
โซเดียม (มิลลิกรัม)	40	45
แคลเซียม (มิลลิกรัม)	6.05	7.15
เหล็ก (มิลลิกรัม)	0.13	0.22
ใยอาหาร (กรัม)	น้อยกว่า 0.18	น้อยกว่า 0.18

หมายเหตุ : การส่งตัวอย่างวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการที่ บริษัท ห้องปฏิบัติการกลาง (ประเทศไทย) จำกัด

3.5 ผลการศึกษาการยอมรับผลิตภัณฑ์เครื่องต้มข้าว

การประเมินทางประสาทสัมผัสการยอมรับด้าน สี ลักษณะปรากฏ กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และการยอมรับโดยรวม ของเครื่องต้มข้าวไรซ์เบอร์รี่ และเครื่องต้มข้าวสังข์หยด ทุกสูตร โดยใช้ผู้ทดสอบชิม จำนวน 25 คน พบว่า เครื่องต้มข้าวทั้ง 2 ชนิด ผู้ทดสอบชิมให้การยอมรับด้าน กลิ่น และเนื้อสัมผัส ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) แต่พบว่า ผู้ทดสอบชิมให้การยอมรับด้าน สี ลักษณะปรากฏ รสชาติ และการยอมรับโดยรวม ในระดับที่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) โดยเฉพาะเครื่องต้มข้าวไรซ์เบอร์รี่ สูตร R2 ผู้ทดสอบชิมให้การยอมรับด้าน สี ลักษณะปรากฏ รสชาติ และการยอมรับโดยรวม สูงที่สุด (ตารางที่ 5)

ตารางที่ 5 ค่าคะแนนความชอบด้านคุณลักษณะต่าง ๆ ในเครื่องต้มข้าวไรซ์เบอร์รี่ และเครื่องต้มข้าวสังข์หยด

คุณลักษณะ	สูตรเครื่องต้มข้าวไรซ์เบอร์รี่				สูตรเครื่องต้มข้าวสังข์หยด			
	R1	R2	R3	R4	S1	S2	S3	S4
สี	6.68±1.07 ^a	7.16±1.11 ^a	4.72±2.03 ^b	4.04±1.97 ^b	4.64±0.76 ^b	4.68±1.03 ^b	4.60±1.04 ^b	4.64±0.76 ^b
ลักษณะปรากฏ	6.12±1.30 ^a	6.68±1.31 ^a	4.60±1.98 ^b	4.00±1.63 ^b	4.68±0.95 ^b	4.68±0.69 ^b	4.48±1.00 ^b	4.68±0.95 ^b
กลิ่น ^{ns}	4.72±1.67	5.20±1.98	4.64±2.58	4.52±1.94	4.64±0.91	4.96±0.89	4.76±1.16	4.64±0.91
รสชาติ	4.80±1.87 ^{ab}	5.48±2.04 ^a	5.12±2.54 ^{ab}	4.12±1.86 ^{ab}	4.80±0.87 ^{ab}	4.84±1.03 ^{ab}	4.96±1.17 ^{ab}	4.80±0.87 ^{ab}
เนื้อสัมผัส ^{ns}	5.12±1.79	5.56±2.18	4.56±2.12	4.68±2.04	4.84±0.75	5.16±0.62	4.76±1.05	4.84±0.75
การยอมรับโดยรวม	5.44±1.58 ^{ab}	6.16±1.68 ^a	4.68±2.12 ^b	4.56±1.76 ^b	4.92±0.91 ^b	5.20±0.50 ^b	4.84±0.94 ^b	4.92±0.91 ^b

หมายเหตุ : ns หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลในแนวนอน ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$)

a,b หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลในแนวนอน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

3.6 ผลการศึกษาอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์เครื่องต้มข้าว

การศึกษาอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์เครื่องต้มข้าว โดยดูลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ พบว่า อายุการเก็บรักษา ผลิตภัณฑ์ เครื่องต้มข้าวไรซ์เบอร์รี่ และเครื่องต้มข้าวสังข์หยด ทุกสูตร ที่ผ่านการฆ่าเชื้อด้วยหม้อนึ่งความดัน ที่ 5 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (110°C) นาน 25 นาที และเครื่องฆ่าเชื้อชนิดฉีดพ่นไอน้ำร้อน ที่อุณหภูมิ 110°C นาน 25 นาที สามารถเก็บรักษา <http://bas.dss.go.th>

ที่อุณหภูมิห้องได้มีอายุการเก็บได้ไม่น้อยกว่า 6 เดือน โดยมีลักษณะทางกายภาพคงเดิม

4. สรุปผลการศึกษาวิจัย (Conclusion)

จากการศึกษาวิจัยนี้ พบว่า การพัฒนาผลิตภัณฑ์เครื่องต้มข้าวไรซ์เบอร์รี่ และเครื่องต้มข้าวสังข์หยด ในการสกัดน้ำข้าวโดยใช้ปริมาณน้ำ 20 เท่าของน้ำหนักข้าว น้ำข้าวที่ได้มีลักษณะเนื้อข้นหนืดน้อย จึงเหมาะสมที่จะนำไปผลิตเป็นเครื่องต้มข้าวต่อไป โดยนำไปผสมกับน้ำผลไม้ที่มีสารต้านอนุมูลอิสระสูง ได้แก่ บัทรูป และพริกขี้หนู และการเติมสารให้ความคงตัว ได้แก่ Pectin ร้อยละ 0.1 ร่วมกับ CMC ร้อยละ 0.2 ซึ่งเป็นปริมาณสารให้ความคงตัวที่เหมาะสม เครื่องต้มที่ได้มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน และเกิดการแยกชั้นน้อย เมื่อนำเครื่องต้มข้าวทั้ง 2 ชนิด ที่ผ่านการฆ่าเชื้อด้วยหม้อนึ่งความดัน ที่ 5 ปอนด์ ต่อตารางนิ้ว (110°C) นาน 25 นาที และเครื่องฆ่าเชื้อชนิดฉีดพ่นไอน้ำร้อน ที่อุณหภูมิ 110°C นาน 25 นาที จากการส่งตรวจวิเคราะห์ปริมาณจุลินทรีย์ พบว่า ปริมาณจุลินทรีย์ผ่านเกณฑ์ข้อกำหนดตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข (ฉบับที่ 356) พ.ศ. 2556 เรื่องเครื่องต้มในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิท และจากการส่งตรวจวิเคราะห์ปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระ และคุณค่าทางโภชนาการ พบว่า เครื่องต้มข้าวไรซ์เบอร์รี่ สูตร R2 ซึ่งประกอบด้วย น้ำข้าว:น้ำบัทรูป ในอัตราส่วน 75:25 มีค่า ORAC สูงสุด คือ 176 $\mu\text{mol TE}/100\text{ g}$ เมื่อเปรียบเทียบกับสูตรอื่นทั้งหมด และคุณค่าทางโภชนาการต่อหนึ่งหน่วยบริโภค (180 มิลลิลิตร) ของเครื่องต้มข้าวทั้ง 2 ชนิด เมื่อพิจารณาปริมาณพลังงานในแต่ละครั้งที่จะได้รับต่อการบริโภค เครื่องต้มข้าวไรซ์เบอร์รี่ สูตร R2 ให้พลังงานน้อยกว่าเครื่องต้มข้าวสังข์หยด สูตร S2 ในขณะเดียวกันผู้ทดสอบชิมให้การยอมรับเครื่องต้มข้าวไรซ์เบอร์รี่ สูตร R2 สูงสุด ($p \leq 0.05$) เครื่องต้มข้าวทั้ง 2 ชนิด ทุกสูตร สามารถเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องได้มีอายุการเก็บได้ไม่น้อยกว่า 6 เดือน โดยมีลักษณะทางกายภาพคงเดิม

ดังนั้นการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ จึงเลือกผลิตภัณฑ์เครื่องต้มข้าวไรซ์เบอร์รี่ สูตร R2 ซึ่งประกอบด้วย น้ำข้าว:น้ำบัทรูป ในอัตราส่วน 75:25 ที่ให้ค่า ORAC สูงสุด คือ 176 $\mu\text{mol TE}/100\text{ g}$ เมื่อเปรียบเทียบกับสูตรอื่นทั้งหมด และให้พลังงานน้อยกว่าสูตรอื่น

5. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่กองหอสมุดและศูนย์สารสนเทศวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และเจ้าหน้าที่กองเทคโนโลยีชุมชน ที่อนุเคราะห์ช่วยทดสอบการยอมรับของผลิตภัณฑ์เครื่องต้มข้าวสูตรต่าง ๆ ทำให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ของโครงการ

6. เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] สถาบันอาหาร กระทรวงอุตสาหกรรม. *เทรนด์สุขภาพ ยังมาแรงในปี 62 กลุ่มอาหารเพื่อสุขภาพ เป็นสินค้าขายดี* [ออนไลน์]. 2561. [อ้างถึงวันที่ 25 ตุลาคม 2563]. เข้าถึงจาก: <https://cheechongruay.smartsme.co.th/content/23337>
- [2] ANDREW WEIL, M.D. *ORAC: Scoring Antioxidants?* [online]. 2010. [viewed 28 December 2019]. Available from: <https://www.drweil.com/vitamins-supplements-herbs/vitamins/orac-scoring-antioxidants>
- [3] JORGUSTIN, K. *ORAC Value | Top 100 High Antioxidant Foods – Berries – Spices – Herbs*. [online]. 2017. [viewed 18 July 2020]. Available from: <https://modernsurvivalblog.com/health/high-orac-value-antioxidant-foods-top-100/>
- [4] สุชาติ มาณอก และปวีณา ลิ้มเจริญ. การวิเคราะห์ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระโดยวิธี DPPH, ABTS และ FRAP และปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของสารสกัดสมุนไพรในตำรับยาหอมเทพจิตร. *Advanced Science*. 2015, 15(1), 106-117.
- [5] บทบรรณาธิการ. วิธีการกำหนดหาการออกฤทธิ์ของตัวต้านออกซิเดชันทั้งหมด. *Naresuan Phayao Journal*. 2016, 9(3), 25-30.
- [6] FLOEGEL, A., et al. Comparison of ABTS/DPPH assays to measure antioxidant capacity in popular antioxidant-rich US foods. *Journal of Food Composition and Analysis*. 2011, 24(7), 1043-1048.
- [7] R, SOMPONG, et al. Physicochemical and antioxidative properties of red and black rice varieties from Thailand, China and Sri Lanka. <http://bas.dss.go.th>

- Food Chemistry*. 2011, **124**(1), 132-140.
- [8] PEDRO, A.C., D. GRANATO and N.D. ROSSO. Extraction of anthocyanins and polyphenols from black rice (*Oryza sativa* L.) by modeling and assessing their reversibility and stability. *Food Chemistry*, 2016, **191**, 12-20.
- [9] สุรพงษ์ พินิจกลาง และรัชนิ ไสยประจง. การผลิตเครื่อง ต้มชุปเปอร์เบอร์รี่ที่มีสารสกัดแอนโธไซยานินจากข้าวหอม นิล. *Agricultural Science Journal*. 2018, **49**(2) (Suppl.), 25-28.
- [10] ศูนย์ข้อมูลข้าวตลาดเฉพาะ กรมการข้าว. ข้าวไรซ์เบอร์รี่ [ออนไลน์]. [อ้างถึงวันที่ 21 กันยายน 2563]. เข้าถึงจาก: <https://www.thairicedb.com/rice-detail.php?id=15>.
- [11] ศูนย์ข้อมูลข้าวตลาดเฉพาะ กรมการข้าว. ข้าวสังข์หยด เมืองพัทลุง [ออนไลน์]. [อ้างถึงวันที่ 30 พฤศจิกายน 2563] . เข้าถึงจาก: <https://www.thairicedb.com/rice-detail.php?id=1>
- [12] สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.). เครื่องดื่มสกัดจากปลายข้าว [ออนไลน์]. 2558. [อ้างถึงวันที่ 26 มกราคม 2564] . เข้าถึงจาก: <https://waa.inter.nstda.or.th/stks/pub/2015/20150911-Technology-show%202-2558-Food-Beverage-15.pdf>
- [13] จุฑามาศ ถิระสาโรช และเฉลิมพล ถนอมวงศ์. การผลิต เครื่องดื่มเพื่อสุขภาพจากข้าวหอมนิล. *KKU Science Journal*, 2015, **43**(3), 395-402.

การทวนสอบวิธีและการศึกษาปริมาณการปนเปื้อนสารอะฟลาทอกซินเอ็ม₁ ในนมและผลิตภัณฑ์นม Validation and the study of aflatoxin M₁ contamination in milk and milk products

อภิษฐา ช่างสุพรรณ^{1*}

Apisthaa Changsuphan^{1*}

บทคัดย่อ

อะฟลาทอกซินเอ็ม₁ (AFM₁) เป็นสารพิษที่เกิดจากเมตาบอลิซึมของสารพิษอะฟลาทอกซินบี₁ (AFB₁) เกิดขึ้นภายในร่างกายสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมที่บริโภคอาหารสัตว์ที่มีการปนเปื้อน AFB₁ เข้าไปจะถูกเมตาบอลิซึมโดยเอนไซม์ในเซลล์ตับเปลี่ยนเป็น AFM₁ และถูกขับออกมาทางน้ำนม ปัญหาการปนเปื้อนสารพิษอะฟลาทอกซินในอาหารสัตว์ และน้ำนมนั้นมีผลกระทบกับความปลอดภัยของผู้บริโภคทั้งในทางตรงและทางอ้อม หากได้รับอย่างต่อเนื่องอาจเพิ่มความเสี่ยงในการเกิดโรคมะเร็งในตับ คณะกรรมาธิการอาหารระหว่างประเทศ (Codex Alimentarius Commission) ที่กำหนดให้มีการปนเปื้อนของอะฟลาทอกซินเอ็ม₁ ในน้ำนม น้อยกว่า 0.5 ไมโครกรัม/กิโลกรัม ดังนั้นงานวิจัยนี้ศึกษาวิธีทดสอบสารพิษอะฟลาทอกซินเอ็ม₁ (AFM₁) โดยตรวจวัดด้วยเครื่อง HPLC เมื่อได้สภาวะที่เหมาะสมในการทดสอบ และจากการทวนสอบความใช้ได้ของวิธี พบว่า มีความสัมพันธ์เชิงเส้นในระดับความเข้มข้น 0.1 ถึง 50 ไมโครกรัม/ลิตร ขีดจำกัดการตรวจพบ (limit of detection, LOD) เท่ากับ 0.001 ไมโครกรัม/ลิตร ขีดจำกัดการวัดปริมาณ (limit of quantitation, LOQ) เท่ากับ 0.004 ไมโครกรัม/ลิตร โดยค่าความแม่นยำ (accuracy) แสดงด้วยร้อยละการคืนกลับและความเที่ยง (precision) แสดงด้วยร้อยละของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (relative standard deviation %RSD) รวมทั้งค่าความไม่แน่นอน เป็นไปตามเกณฑ์การยอมรับของวิธีทดสอบ นอกจากนี้ได้สุ่มตัวอย่างนมสดจากฟาร์มโคนม ในพื้นที่จังหวัดนครราชสีมา และสระบุรี นมและผลิตภัณฑ์นมตามท้องตลาดในเขตพื้นที่กรุงเทพมหานคร จังหวัดนครราชสีมา และสระบุรี นำมาทำการทดสอบพบว่า สารพิษอะฟลาทอกซินเอ็ม₁ มีค่าอยู่ระหว่าง ไม่พบ ถึง 0.0552 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม

ABSTRACT

Aflatoxin M₁ (AFM₁) has been identified as toxic substance, which produced from the metabolism of Aflatoxin B₁ (AFB₁) in mammals that consumed contaminant feed. AFB₁ is metabolized by enzyme in liver cells and transformed to AFM₁ then excrete through mammal milk. There are both indirect and direct adverse effected to the consumer who consumed meat and milk contaminated with Aflatoxin. Continuously consumption can be resulted in accumulation in body hence contribute to liver cancer. The Codex Alimentarius Commission has established standard of AFM₁ in milk product to less than 0.5 microgram/Kilogram.

The aim of this study was to investigate the optimum condition and verification for AFM₁ testing method which using HPLC. The study showed the linear correlation between the concentrations from 0.1 to 50 microgram/Liter, limit of detection (LOD) of 0.001 microgram/Liter and limit of quantitation (LOQ) of 0.004 microgram/Liter. The study also demonstrated acceptable percent recovery, precision by relative standard deviation (%RSD). The uncertainty of testing also included in this study. Animal feed samples were taken farms dairy farm in Nakorn-Rachasima and Saraburi provinces. While milk and milk products were sampled from markets in Bangkok, Nakorn-Rachasima and Saraburi provinces Results illustrated the AFM₁ concentrations range from not detected to 0.0552 microgram/Kilogram.

คำสำคัญ: อะฟลาทอกซินเอ็ม₁ ไฮเพอร์ฟอร์แมนส์ลิกวิดโครมาโทกราฟี นมและผลิตภัณฑ์นม

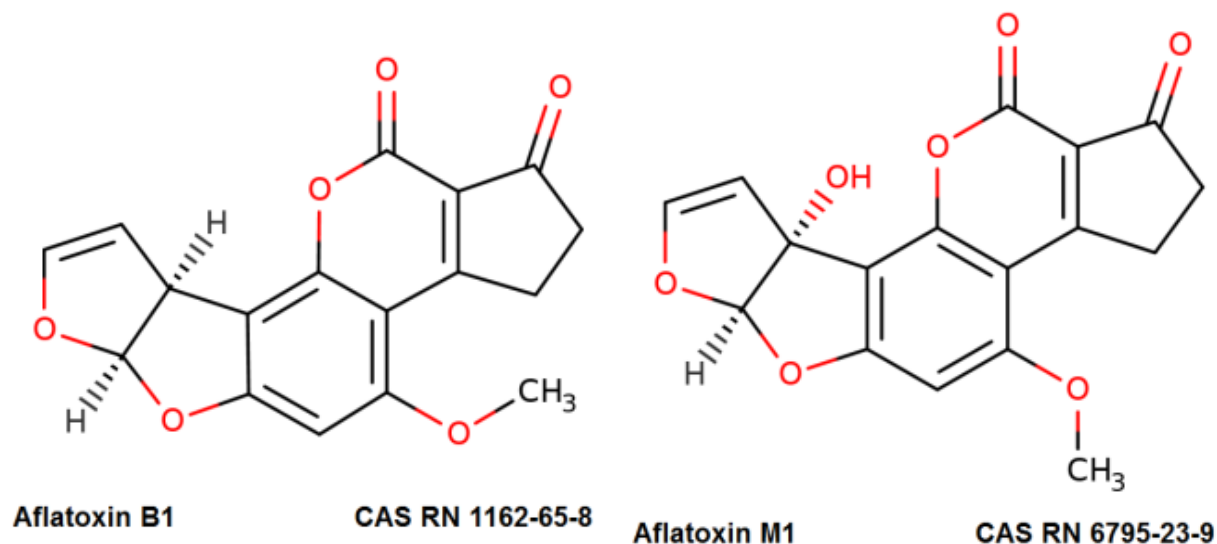
Keywords: Aflatoxin M₁, High-performance liquid chromatography, Milk and milk product

¹ กรมวิทยาศาสตร์บริการ

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

1. บทนำ (Introduction)

สารพิษจากเชื้อรา อะฟลาทอกซิน บี₁ บี₂ จี₁ และจี₂ ส่วนมากจะพบในผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร ส่วนสารพิษอะฟลาทอกซินเอ็ม₁ จะพบในน้ำมันของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม เมื่อสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมได้รับสารพิษอะฟลาทอกซิน บี₁ เข้าสู่ร่างกายจะถูกดูดซึมไว้ประมาณร้อยละ 10-20 ที่เหลือถูกขับออกจากร่างกาย ในส่วนที่ร่างกายดูดซึมไว้จะถูกสะสมไว้มากที่สุดในตับ และสารพิษอะฟลาทอกซินบี₁ จะถูกเมตาบอไลซ์เปลี่ยนเป็นสารพิษอะฟลาทอกซินเอ็ม₁ ซึ่งจะถูกขับออกมาทางน้ำนม จึงทำให้น้ำมันของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมเกิดปนเปื้อนสารพิษอะฟลาทอกซินเอ็ม₁ ในสารพิษอะฟลาทอกซินเอ็ม₁ คือ อนุพันธ์ของสารพิษอะฟลาทอกซิน บี₁ ปนเปื้อนอยู่ในน้ำมัน



รูปที่ 1: โครงสร้าง สารพิษอะฟลาทอกซินบี₁ (Aflatoxin B₁ : AFB₁) และสารพิษอะฟลาทอกซินเอ็ม₁ (Aflatoxin M₁ : AFM₁)

International Agency for Research on Cancer (IARC) เป็นหน่วยงานของ World Health Organization (WHO) ที่ทำหน้าที่ประเมินและจัดกลุ่มสารก่อมะเร็งได้จัดให้สารพิษอะฟลาทอกซินมีความสำคัญเกี่ยวข้องกับสุขภาพของมนุษย์โดยตรง โดยเฉพาะมีผลกับเซลล์ตับ เพราะเป็นสารก่อมะเร็ง (Carcinogen) เมื่อปี 2012 IARC รายงานว่า อะฟลาทอกซินเป็นสารก่อมะเร็งในมนุษย์ กลุ่มที่ 1 (Carcinogenic to humans) ซึ่งการกำหนดระดับ AFB₁ ในอาหาร และ AFM₁ ในน้ำมัน มีระดับที่ยอมรับได้ต่อวัน (Acceptable Daily Intake : ADI) คำนวณได้จากปริมาณสารพิษต่อน้ำหนักตัวของผู้บริโภค ค่า ADI นี้จะนำไปใช้เป็นเกณฑ์ในการพิจารณาค่าปริมาณสูงสุดที่ได้รับ (Maximum level: ML) เพื่อเป็นการคุ้มครองผู้บริโภคของแต่ละประเทศ โดยคณะกรรมการอาหารและยาของสหภาพยุโรป (European Commission: EC) ได้กำหนดให้มีปริมาณการปนเปื้อนสูงสุดของ AFM₁ ในน้ำมันได้ไม่เกิน 0.05 µg/kg (Commission Regulation (EC) No. 1881, 2006) แต่ในขณะที่คณะกรรมการอาหารและยาของสหรัฐอเมริกา (U.S. Food and Drug Administration: FDA) กำหนดให้มีปริมาณการปนเปื้อนสูงสุดของ AFM₁ ในน้ำมันได้ไม่เกิน 0.5 µg/kg (CPG Sec.527.400, 2005) และคณะกรรมการอาหารและยาของสหรัฐอเมริกา (U.S. Food and Drug Administration: FDA) กำหนดให้มีปริมาณการปนเปื้อนสูงสุดของ AFM₁ ในน้ำมันได้ไม่เกิน 0.5 µg/kg (Codex Stan 193, 2015)

การตรวจหาปริมาณ AFM₁ มีหลายเทคนิค เช่น เทคนิค Enzyme-linked immunosorbent assay (ELISA) | เทคนิคลิควิดโครมาโทกราฟี (High Performance Liquid Chromatography; HPLC) เทคนิคทินเลเยอร์โครมาโทกราฟี (Thin Layer Chromatography; TLC) |

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

กราฟฟี (Thin Layer Chromatography; TLC) และเทคนิค ลิควิดโครมาโทกราฟีควบคู่ไปกับแมสสเปกโตรเมทรี (Liquid Chromatography coupled with mass spectrometry; LC-MS/MS) เทคนิค HPLC เป็นวิธีที่นิยมใช้กันโดยทั่วไป มาตรฐานการทดสอบปริมาณสารพิษอะฟลาทอกซินเอ็ม₁ คือ AOAC Official Method 2000.8 Aflatoxin M₁ in Liquid Milk ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเน้นการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมเพื่อ ใช้สำหรับการทดสอบหาปริมาณสารพิษอะฟลาทอกซินในนม และผลิตภัณฑ์นมในท้องตลาดสำหรับห้องปฏิบัติการ เพื่อใช้ในการศึกษาปริมาณการปนเปื้อน AFM₁ ในน้ำนมดิบที่ฟาร์มโคนม และผลิตภัณฑ์นมในพื้นที่จังหวัดนครราชสีมา และสระบุรี

เพื่อใช้เป็นข้อมูลที่ช่วยลดการปนเปื้อนของ สารอะฟลาทอกซินเอ็ม₁ ช่วยแก้ปัญหาการเกิดการปนเปื้อน สารพิษอะฟลาทอกซินเอ็ม₁ ในน้ำนมโค ดูแลคุ้มครองความปลอดภัยของผู้บริโภค และเพื่อเป็นการเพิ่มศักยภาพของ กรมวิทยาศาสตร์บริการในการให้บริการ กองผลิตภัณฑ์ อาหารและวัสดุสัมผัสอาหาร กรมวิทยาศาสตร์บริการ จึงศึกษาการศึกษาปริมาณการปนเปื้อนสารอะฟลาทอกซิน เอ็ม₁ ในนมและผลิตภัณฑ์นม โดยเทคนิค HPLC

2. วิธีการวิจัย (Experimental)

2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

- 2.1.1 เครื่องชั่งไฟฟ้า (electronic analytical balance) ชั่งได้ละเอียด 0.0001 กรัม ยี่ห้อ Mettler รุ่น XP 204
- 2.1.2 เครื่อง HPLC ยี่ห้อ Waters รุ่น Alliance e2695 และคอลัมน์ HPLC ชนิดเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 4.6 x 250 มิลลิเมตร บรรจุด้วย C18 ขนาดอนุภาค 5 ไมโครเมตร
- 2.1.3 เครื่องระเหย (evaporator) ยี่ห้อ BINDER รุ่น FED115
- 2.1.4 เครื่องอ่างไอน้ำ (water-bath)
- 2.1.5 เครื่องทำน้ำบริสุทธิ์ (deionizer)
- 2.1.6 Solid Phase Extraction; SPE cleanup ProElut AFT1500 mg/12 mL (Cat.#65904)
- 2.1.7 ชุดอุปกรณ์การกรองพร้อมแผ่นเมมเบรน (membrane filter) ชนิดไนลอน ขนาด 47 มิลลิเมตร 0.20 ไมโครเมตร
- 2.1.8 ตัวกรอง (syringe filter) ชนิด MCM หรือ

cellulose acetate ขนาด 13 มิลลิเมตร 0.20 ไมโครเมตร หรือตัวกรองชนิดอื่นๆ ที่มีคุณสมบัติเหมือนกัน

- 2.1.9 หลอดฉีดยา (syringe) ขนาด 10 มิลลิลิตร
- 2.1.10 ขวดแก้วขนาดเล็ก (vial) ขนาด 2 มิลลิลิตร
- 2.1.11 เครื่องแก้วต่างๆ เช่น ปิเปตต์ ขวดแก้วปริมาตร ขวดแก้วปริมาตรทรงกรวย หลอดแก้วมีจุกปิด (headspace tube) บีกเกอร์ และกระบอกตวง ขนาดต่างๆ

2.2 สารเคมี

- 2.2.1 สารมาตรฐานอะฟลาทอกซิน เอ็ม₁ ความบริสุทธิ์อย่างน้อยร้อยละ 99.0
- 2.2.2 อะซิโตนไตรลล์ ชั้นคุณภาพวิเคราะห์ HPLC
- 2.2.3 น้ำที่มีความบริสุทธิ์สูง มีค่าความต้านทานไฟฟ้า ไม่น้อยกว่า 18.2 MΩ•cm
- 2.2.4 สารละลายผสมอะซิโตนไตรลล์ : น้ำ 40:60

2.3 วัสดุตัวอย่าง

ตัวอย่างที่นำมาใช้ในการตรวจสอบความใช้ได้ของวิธี เป็นน้ำนมดิบจากฟาร์มโคนม นมพลาสเจอร์ไรด์ นมยูเอชที นมเปรี้ยว โยเกิร์ต กาแฟยูเอชที

2.4 การเตรียมตัวอย่าง

สุ่มปิเปตตัวอย่างน้ำนมที่นำมาทดสอบ 50 มิลลิลิตร ผ่านไส้ SPE ด้วยความเร็ว 1 มิลลิลิตรต่อนาที สารพิษอะฟลาทอกซินจะถูกจับไว้ ล้างคอลัมน์ SPE ด้วย น้ำปราศจากไอออน 15 มิลลิลิตร แล้ว elute สารพิษอะฟลาทอกซินจาก SPE ด้วยอะซิโตนไตรลล์ 10 มิลลิลิตร ระเหยสารละลายตัวอย่างด้วยเครื่องระเหยแห้งละลายด้วย สารละลาย Mobile phase (อะซิโตนไตรลล์ : น้ำ 40:60) จำนวน 1 มิลลิลิตร กรองผ่านตัวกรอง ขนาด 0.2 ไมโครเมตร (ข้อ 2.1.6) ลงในขวดแก้วขนาดเล็กสำหรับฉีดเข้า เครื่อง HPLC

2.5 การเตรียมตัวอย่างที่เติมสารละลายมาตรฐาน (spiked sample)

ตัวอย่างน้ำนม เติมสารละลายมาตรฐาน อะฟลาทอกซิน เอ็ม₁ ที่ความเข้มข้น 0.10 มิลลิกรัมต่อ มิลลิลิตร ลงในตัวอย่าง โดยคำนวณความเข้มข้นตาม ปริมาตรของสารละลายตัวแทนอาหารที่เติม แล้วนำมา ทดสอบตามข้อ 2.4

2.6 การตรวจวัดปริมาณโดยเทคนิคไฮเพอร์ฟอร์แมนส์ลิควิดโครมาโทกราฟี

สร้างกราฟมาตรฐานจากสารละลายมาตรฐานอะฟลาทอกซินเอ็ม₁ ที่ความเข้มข้นระหว่าง 0 ถึง 50 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ที่กรองผ่านตัวกรองขนาด 0.2 ไมโครเมตร ลงในขวดแก้วขนาดเล็ก ฉีดเข้าเครื่อง HPLC ตามสภาวะเครื่อง HPLC ที่เหมาะสมในการทดสอบ ดังนี้

คอลัมน์: ชนิดเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 250 x 4.6 มิลลิเมตรและการดอกลัมน์ บรรจุด้วย C18 ขนาดอนุภาค 5 ไมโครเมตร ยี่ห้อ Luna

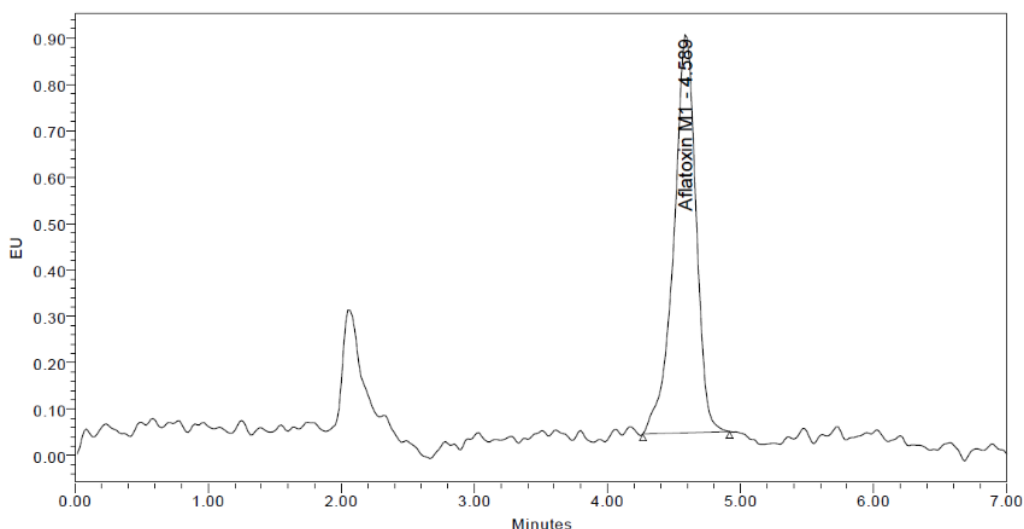
วัฏภาคเคลื่อนที่: อะซิโตน:ไตรล : น้ำ (40:60)

อัตราการไหล: 1.0 มิลลิลิตรต่อนาที

ปริมาตรที่ฉีด: 20 ไมโครลิตร

เครื่องตรวจวัด: เครื่องตรวจวัดชนิดฟลูออเรสเซนต์ (Fluorescent detector); ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร excitation และ 435 นาโนเมตร emission

เมื่อทำการฉีดทดสอบสารมาตรฐานอะฟลาทอกซินเอ็ม₁ พบว่า ปรากฏพีคของสารพิษอะฟลาทอกซินเอ็ม₁ ที่เวลา 4.5 (RT=4.5) ตามรูปที่ 2



	Peak Name	RT	Area	% Area	Height	Amount	Units
1	Aflatoxin M1	4.589	99956	100.00	8603	0.500	ppb

รูปที่ 2 : แสดงพีคของสารละลายมาตรฐานอะฟลาทอกซินเอ็ม₁

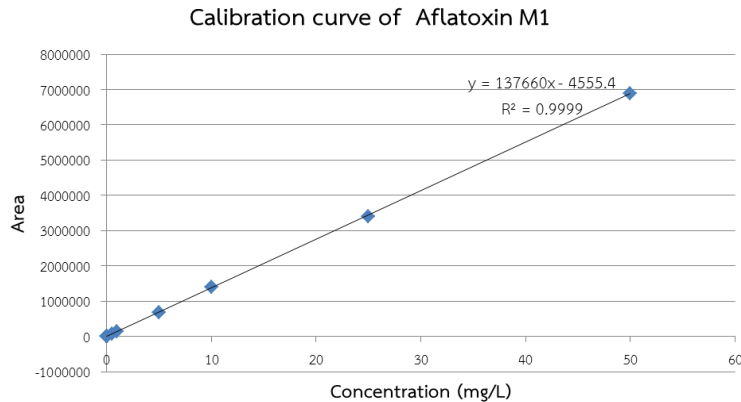
2.7 การทดสอบความใช้ได้ของวิธี

วิธีที่ศึกษาดำเนินการทดสอบความใช้ได้ของวิธีตามแนวทาง EUR 24105 EN: 2009 โดยศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ดังนี้ ความเป็นเส้นตรง ชีตจำกัดการตรวจพบและขีดจำกัดการวัดปริมาณ ความแม่นยำและความเที่ยง และประเมินความไม่แน่นอนของการวัด โดยมีรายละเอียดตามที่ระบุในข้อ 3.1

3. ผลและวิจารณ์ (Results and Discussion)

3.1. การทดสอบความใช้ได้ของวิธี

3.1.1 ความเป็นเส้นตรง (Linearity) ของกราฟมาตรฐาน โดยทำการศึกษาในช่วง 0 ถึง 50 ไมโครกรัมต่อมิลลิกรัม ได้ค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด (coefficient of determination, R^2 เท่ากับ 0.9999

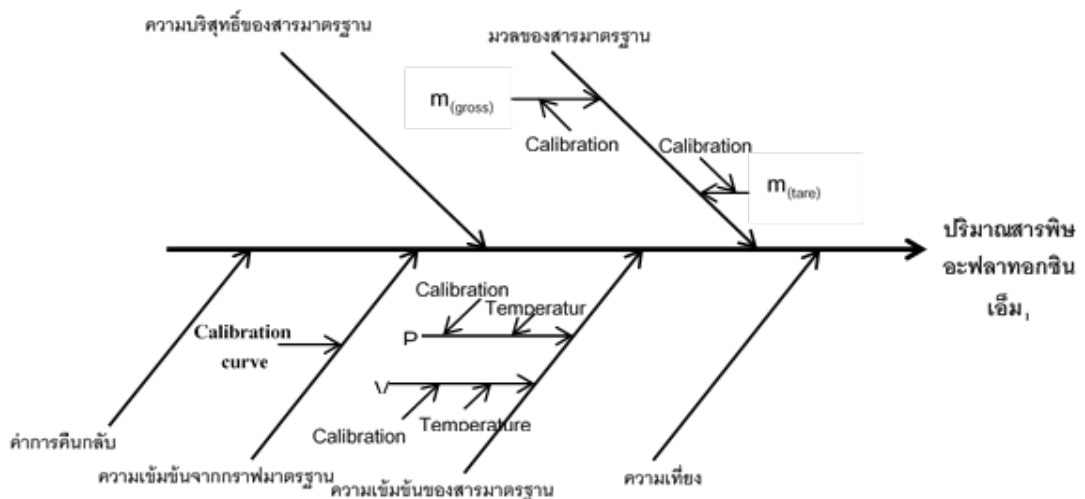


รูปที่ 3 : ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นและพื้นที่ใต้กราฟของสารละลายมาตรฐาน AFM₁ ในช่วงความเข้มข้น 0–50 ไมโครกรัม/ลิตร

3.1.2 ขีดจำกัดการตรวจพบและขีดจำกัดการวัดปริมาณของวิธีทดสอบ โดยทำการวัดตัวอย่าง แบบลงค์จำนวน 10 ซ้ำ จากการทดลองพบว่า ขีดจำกัดการตรวจพบ (Limit of Detection; LOD) เท่ากับ 0.001 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม และขีดจำกัดการวัดปริมาณ (Limit of Quantification; LOQ) เท่ากับ 0.004 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม

3.1.3 ความแม่นยำและความเที่ยงของวิธีทดสอบ ได้จากการศึกษาตัวอย่างที่เติมสารละลายมาตรฐานที่ 3 ระดับความเข้มข้น ดังนี้ 0.05 25 และ 50 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม จำนวนความเข้มข้นละ 10 ซ้ำ ซึ่งความแม่นยำแสดงด้วยค่าร้อยละการคืนกลับและความเที่ยงแสดงด้วยค่าส่วนเบี่ยงเบนสัมพัทธ์ จากการทดลองพบว่า มีค่าร้อยละการคืนกลับที่ระดับความเข้มข้น 0.05 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม เท่ากับ 80.3-92.2 และมีค่าส่วนเบี่ยงเบนสัมพัทธ์ เท่ากับ 9.21 ค่าร้อยละการคืนกลับที่ระดับความเข้มข้น 25 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม เท่ากับ 83.7-100.9 และมีค่าส่วนเบี่ยงเบนสัมพัทธ์ เท่ากับ 4.85 ค่าร้อยละการคืนกลับที่ระดับความเข้มข้น 50 ไมโครกรัม/กิโลกรัม เท่ากับ 72.9-101.6 และมีค่าส่วนเบี่ยงเบนสัมพัทธ์เท่ากับ 9.20

3.1.4 การประเมินค่าความไม่แน่นอนของการวัดตาม EURACHEM/CITAC Guide: 2012 พบว่า ที่ระดับความเข้มข้น 0.004 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม มีค่าความไม่แน่นอนขยายเท่ากับ 0.0029 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม ดังนั้นวิธีนี้เป็นไปตามเกณฑ์การยอมรับของวิธีตาม EUR 24105 EN: 2009 คือ LOQ + ULOQ เท่ากับ 0.0069 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งมีค่าน้อยกว่าเกณฑ์กฎหมายกำหนด 0.5 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม จากรูปที่ 4 แสดงให้เห็นสิ่งที่มีผลกับค่าความไม่แน่นอนของการวัดหาปริมาณสารพิษอะฟลาทอกซินเอ็ม₁ ในห้องปฏิบัติการด้วยเทคนิค HPLC



รูปที่ 4 : แหล่งที่มาของค่าความไม่แน่นอน

เมื่อทำการทวนสอบวิธีทดสอบหาอะฟลาทอกซินเอ็ม₁ ตามวิธีดัดแปลงมาจาก AOAC Official Method 2000.08 Aflatoxin M₁ in Liquid Milk ที่ได้ตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีมาแล้ว นำวิธีทดสอบไปใช้กับตัวอย่างนมโรงเรียน 5 ตัวอย่าง นมและผลิตภัณฑ์นมที่จำหน่ายในท้องตลาด 61 ตัวอย่าง ที่ทำการสุ่มมาจากท้องตลาดในเขตพื้นที่กรุงเทพมหานคร พบปริมาณสารพิษอะฟลาทอกซินเอ็ม₁ ในตัวอย่าง 3 ตัวอย่างจาก 66 ตัวอย่าง ในปริมาณ 0.035 ถึง 0.055 ไมโครกรัม/กิโลกรัม และน้ำมันดิบจากฟาร์มโคนม 25 ตัวอย่างในพื้นที่ อำเภอบางปะกง จังหวัดนครราชสีมาและอำเภอมวกเหล็ก จังหวัดสระบุรี พบสารพิษอะฟลาทอกซิน เอ็ม₁ 2 ใน 25 ตัวอย่าง มีค่าอยู่ระหว่าง 0.04-0.05 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมและตัวอย่างน้ำมันดิบจากฟาร์ม สำหรับพบปริมาณอะฟลาทอกซินเอ็ม₁ ใน 3 ตัวอย่างจาก 5 ตัวอย่าง ในปริมาณ 0.0366, 0.0552 และ 0.0351 ไมโครกรัม/กิโลกรัม ตามลำดับ

4. สรุป (Conclusions)

การทวนสอบความใช้ได้ของวิธีการทดสอบหาปริมาณสารพิษอะฟลาทอกซินเอ็ม₁ ในนมและผลิตภัณฑ์นม ด้วยเทคนิคไฮเพอร์ฟอร์แมนสลิควิดโครมาโทกราฟี พบว่าสารพิษอะฟลาทอกซินเอ็ม₁ มีช่วงความเป็นเส้นตรงในช่วงความเข้มข้น 0-50 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม มีค่าสัมประสิทธิ์การกำหนดเท่ากับ 0.9999 ซีดจำกัดการตรวจพบเท่ากับ 0.001 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม ซีดจำกัดการวัดปริมาณเท่ากับ 0.004 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม ความแม่นยำแสดงด้วยค่าร้อยละการคืนกลับ ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 72.9-101.6 และความเที่ยงแสดงด้วยค่าส่วนเบี่ยงเบนสัมพัทธ์อยู่ในช่วง 4.85-9.21 ค่าความไม่แน่นอนขยายเท่ากับ 0.0029 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม ที่ระดับความเข้มข้น 0.004 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม ดังนั้นวิธีทดสอบนี้มีความเหมาะสม และสามารถนำไปทดสอบตัวอย่างนมและผลิตภัณฑ์นม โดยมีการสุ่มตัวอย่างในเขตพื้นที่กรุงเทพมหานคร ซึ่งตรวจพบว่า สารพิษอะฟลาทอกซินเอ็ม₁ พบมีค่าอยู่ 3 ตัวอย่าง อยู่ระหว่าง 0.035-0.055 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม และน้ำมันดิบจากฟาร์มโคนม 25 ตัวอย่างในพื้นที่ อำเภอบางปะกง จังหวัดนครราชสีมา และอำเภอมวกเหล็ก จังหวัดสระบุรี จาก 25 ตัวอย่าง พบมีการปนเปื้อนสารพิษอะฟลาทอกซินเอ็ม₁ อยู่ 2 ตัวอย่าง มีค่าอยู่ระหว่าง 0.04-0.05 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งต่ำกว่าเกณฑ์กำหนดของคณะกรรมการอาหารระหว่างประเทศ (Codex

Alimentarius Commission) และประกาศกระทรวงสาธารณสุขฉบับที่ 414 (พ.ศ.2563) เรื่องมาตรฐานอาหารที่มีสารปนเปื้อน ที่กำหนดให้มีการปนเปื้อนของอะฟลาทอกซินเอ็ม₁ ในน้ำมัน น้อยกว่า 0.5 ไมโครกรัม/กิโลกรัม

5. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

ขอขอบคุณกรมวิทยาศาสตร์บริการที่ได้สนับสนุนงบประมาณในการวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] *Agents classified by the IARC monographs, Volume 1-125* [online]. [viewed 2 March 2021]. Available From: <https://dtsc.ca.gov/wp-content/uploads/sites/31/2019/05/1-J-IARC-carcin.pdf>
- [2] YITBAREK, M.B. and B. Tamir. Mycotoxins and/or Aflatoxins in milk and milk products: Review. *American Scientific Research Journal for Engineering, Technology and Sciences*. 2013, 7(1), 1-32.
- [3] BADEA, M., L. MICHELI, M.C. MESSIA, T. CANDIGLIOTA, E. MARCONI, T. MOTTRAM, M. VELASCO-GARCIA, D. MOSCONE and G. PALLESCI. Aflatoxin M₁ determination in raw milk using a flow-injection immunoassay system. *Analytica Chimica Acta*. 2004, 520(1-2), 141-148.
- [4] *Commission Regulation (EC) No 1881/2006 of 19 December 2006 setting maximum levels for certain contaminants in foodstuffs (Text with EEA relevance)* [online]. [viewed 2 March 2021]. Available from: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=J:L:2006:364:0005:0024:EN:PDF>
- [5] DRAGACCI, S. and J. M. FREMY. Application of immunoaffinity column cleanup to aflatoxin M₁ determination and survey in cheese. *Journal of Food Protection*. 1996, 59(9), 1011-1013.
- [6] DRAGACCI, S., F. GROSSO and J. GILBERT. Immunoaffinity column cleanup with liquid chromatography for determination of

- aflatoxinM1 in liquid milk: Collaborative study. *Journal of AOAC International*. 2001, **84**(2), 437- 443.
- [7] FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION AND WORLD HEALTH ORGANIZATION. Codex Alimentarius Commission. *Agenda Item 5, CX/CF 10/4/5: FAO/WHO*, March 2010, p.1-25.
- [8] CODEX ALIMENTARIUS INTERNATIONAL FOOD STANDARDS. *General standard for contaminants and toxins in food and feed*. CXS 193-1995. Amended in 2019, p.32
- [9] MOHAMMADI, H. A review of aflatoxin M1, milk, and milk products. *Aflatoxins-Biochemistry and Molecular Biology*, Chapter 19, 2011. p. 397-414.
- [10] IHA, M.H., C.B. BARBOSA, R.M.D. FAVARO and M.W. TRUCKSESS. Chromatographic method for the determination of aflatoxin M₁ in cheese, yogurt, and dairy beverages. *Journal of AOAC International*. 2011, **94**(5), 1513-1518.
- [11] LQBAL, S.Z. and M.R. ASI. Assessment of aflatoxin M1 in milk and milk products from Punjab, Pakistan. *Food Control*. 2013, **30**(1), 235-239.
- [12] MUSCARELLA, M., S.L. MAGROA, C. PALERMO and D. CENTONZE. Validation according to European Commission Decision 2002/657/EC of a confirmatory method for aflatoxin M1 in milk based on immunoaffinity columns and high-performance liquid chromatography with fluorescence detection. *Analytica Chimica Acta*. 2007, **594**(2), 257–264
- [13] NEMATI, M., M.A. MEHRAN, P.K. HAMED and A. MASOUD. A survey on the occurrence of aflatoxin M1 in milk samples in Ardabil, Iran. *Food control*. 2010, **21**(7), 1022-1024.

แนวทางการจัดการด้านความปลอดภัยของห้องปฏิบัติการและสารเคมี Guideline for laboratory and chemical safety management

ปวีณา เครือนิล^{1*} และ ปัทมา นพรัตน์¹

Paweena Kreunin^{1*} Pattama Nopparat¹

บทคัดย่อ

การจัดการด้านความปลอดภัยของห้องปฏิบัติการและสารเคมีอย่างมีประสิทธิภาพ จะช่วยลดความเสี่ยงและป้องกันเหตุการณ์ที่อาจเกิดขึ้นในห้องปฏิบัติการ บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเสริมสร้างความรู้ ความเข้าใจเบื้องต้นเกี่ยวกับการจัดการด้านความปลอดภัยของห้องปฏิบัติการและสารเคมี ตลอดจนเป็นการรณรงค์เพื่อสร้างความตระหนักให้กับผู้ที่เกี่ยวข้องกับห้องปฏิบัติการที่ใช้สารเคมี รายละเอียดเนื้อหาแบ่งออกเป็น 8 หัวข้อ ได้แก่ 1) ความสำคัญของการจัดทำระบบการจัดการด้านความปลอดภัยของห้องปฏิบัติการที่เกี่ยวข้องกับสารเคมี ข้อกำหนด กฎหมายที่เกี่ยวข้อง 2) การออกแบบระบบการจัดการด้านความปลอดภัยในห้องปฏิบัติการ 3) การควบคุมสารเคมีอันตราย 4) การแยกประเภทสารเคมีอันตราย 5) การประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพจากสารเคมี 6) การจัดการสารเคมีอันตราย 7) การออกแบบห้องปฏิบัติการเพื่อความปลอดภัย และ 8) การจัดการห้องปฏิบัติการสีเขียว โดยรายละเอียดเนื้อหาสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางการจัดทำระบบการจัดการด้านความปลอดภัยของห้องปฏิบัติการสีเขียวภายในหน่วยงานภาครัฐ รัฐวิสาหกิจ เอกชน และสถาบันการศึกษา อย่างไรก็ตาม องค์กรควรจัดให้มีการอบรมที่เกี่ยวข้องและเป็นปัจจุบัน การอบรมทบทวนให้ความรู้ และการเสริมสร้างความรู้ ความเข้าใจเชิงลึกด้านความปลอดภัยของห้องปฏิบัติการและสารเคมี พร้อมทั้งส่งเสริมสร้างวัฒนธรรมความปลอดภัยในองค์กรอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้เกิดความปลอดภัยในการทำงานภายในองค์กรอย่างแท้จริง การขับเคลื่อนขององค์กรจะเป็นส่วนหนึ่งในการยกระดับคุณภาพห้องปฏิบัติการ รวมทั้งคุณภาพชีวิตและสิ่งแวดล้อมของประเทศอย่างยั่งยืน

Abstract

The effective management of chemical-based laboratories can help to reduce risks and prevent incidents that have the potential to occur in laboratories. This article's objective is to enhance basic knowledge and understanding of laboratory and chemical safety management, as well as to raise awareness of workers who are involved in laboratory work. The content is divided into eight topics. i.e. 1) the importance of the development of safety management systems in chemical laboratories – related requirements and regulations, 2) the design of safety management systems in laboratories, 3) the control of hazardous chemicals, 4) the classification of hazardous chemicals, 5) chemical health risk assessment, 6) the management of hazardous chemicals, 7) the design and remodeling of laboratories for safety, and 8) the green laboratory management. The content is a guideline for the management system of green laboratories within the public and private sectors and educational institutions. However, organizations should have relevant and up-to-date training, knowledge-refresher trainings, and promote in-depth understandings on laboratory and chemical safety. In addition, organizations should continuously promote cultural awareness of safety within laboratories to achieve true safety. The organization's drive will be an integral part that enhances the quality of laboratories, life, and environment in Thailand sustainably.

¹ กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม

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

คำสำคัญ : ห้องปฏิบัติการ สารเคมี ระบบการจัดการ ความปลอดภัย สีเขียว ยั่งยืน

Keywords : Laboratory, Chemical, Management System, Safety, Green, Sustainability

1. บทนำ

ในปัจจุบันวงการวิทยาศาสตร์ โรงงานอุตสาหกรรม โรงพยาบาล หน่วยงานวิจัยและพัฒนา ไม่ว่าจะเป็นหน่วยงานภาครัฐ รัฐวิสาหกิจ เอกชน และสถาบันการศึกษา ล้วนมีห้องปฏิบัติการที่มีการใช้สารเคมีอันตรายอยู่เป็นจำนวนมาก ผู้ที่ทำงานกับสารเคมีในห้องปฏิบัติการจึงจะต้องมีความรู้ ความเข้าใจเกี่ยวกับการจัดการด้านความปลอดภัยของห้องปฏิบัติการและสารเคมี สามารถเลือกใช้แนวปฏิบัติที่ปลอดภัย และดำเนินการควบคุมและจัดการสารเคมีได้อย่างถูกต้องเหมาะสม เพื่อไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อตนเอง ผู้ที่เกี่ยวข้อง องค์กร หรือกลุ่มพลเมือง สิ่งแวดล้อม ความเข้าใจถึงความสำคัญในเรื่องความปลอดภัยของห้องปฏิบัติการและสารเคมี จะทำให้ตระหนักถึงความจำเป็นในการจัดทำระบบการจัดการด้านความปลอดภัย ที่จะช่วยลดความเสี่ยงและป้องกันอันตรายที่อาจเกิดได้จากห้องปฏิบัติการ ซึ่งรวมถึงพื้นที่และ/หรือสภาพแวดล้อมอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง โดยผู้ปฏิบัติจะต้องทราบข้อกำหนด กฎหมายที่เกี่ยวข้อง เพื่อนำไปใช้เป็นข้อมูลประกอบการพัฒนา การออกแบบ หรือการจัดทำระบบการจัดการด้านความปลอดภัยของห้องปฏิบัติการและสารเคมี

การดำเนินการด้านความปลอดภัยของห้องปฏิบัติการที่ใช้สารเคมี เป็นความรับผิดชอบของบุคลากรทุกคนทุกระดับในองค์กร ตั้งแต่ผู้บริหารระดับสูงขององค์กร ฝ่ายบริหารจัดการด้านความปลอดภัย เจ้าหน้าที่ความปลอดภัยประจำห้องปฏิบัติการ พนักงานของห้องปฏิบัติการ รวมทั้งพนักงานขนส่ง พนักงานทำความสะอาด และผู้เกี่ยวข้องทุกคน [1] ซึ่งทุกคนนั้นจะต้องมีความรู้ ความเข้าใจเกี่ยวกับการจัดการด้านความปลอดภัยตามหน้าที่ความรับผิดชอบของตนเอง และมีส่วนร่วมในการพัฒนาระบบการจัดการด้านความปลอดภัยอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้ การออกแบบระบบการจัดการด้านความปลอดภัยของห้องปฏิบัติการที่ใช้สารเคมีมีมาตรฐาน เช่น OSHA Laboratory Standard (29 CFR 1910.1450) ซึ่งเป็นมาตรฐานความปลอดภัยห้องปฏิบัติการของประเทศสหรัฐอเมริกา สำหรับประเทศไทยมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับ

ความปลอดภัยของห้องปฏิบัติการและสารเคมีโดยตรง ตัวอย่างเช่น มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมห้องปฏิบัติการทางการแพทย์ – ข้อกำหนดด้านความปลอดภัย มาตรฐานเลขที่ มอก. 2276 และมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ระบบการจัดการด้านความปลอดภัยของห้องปฏิบัติการที่เกี่ยวข้องกับสารเคมี มาตรฐานเลขที่ มอก. 2677 ซึ่งโดยทั่วไปมาตรฐาน มอก. จะไม่ใช่มาตรฐานบังคับใช้ มาตรฐานที่บังคับใช้ตามกฎหมาย จะเป็นมาตรฐานที่ออกโดยกระทรวงต่าง ๆ ซึ่งจะมีการกล่าวถึงในบทความนี้ต่อไป

สิ่งที่สำคัญและจำเป็นอย่างมากในการจัดการด้านความปลอดภัย คือ ผู้ที่เกี่ยวข้องกับการทำงานในห้องปฏิบัติการโดยเฉพาะผู้ใช้สารเคมีเองต้องมีความรู้เกี่ยวกับสารเคมี ทราบความเป็นอันตรายของสารเคมี รวมทั้งสามารถสื่อสารความเป็นอันตราย และประเมินความเสี่ยงจากสารเคมีหากบุคลากรได้รับการสัมผัสผ่านช่องทางต่าง ๆ เช่น การหายใจ การดูดซึมผ่านผิวหนัง ที่อาจก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพทั้งแบบเฉียบพลันและแบบเรื้อรังได้ ทั้งนี้ เพื่อให้สามารถควบคุมและจัดการสารเคมีได้อย่างครบวงจร (Chemical life cycle) ยิ่งไปกว่านั้นต้องมีความรู้ความเข้าใจในหลักการการออกแบบและ/หรือการปรับปรุงห้องปฏิบัติการ เพื่อให้สามารถจัดการสภาพห้องปฏิบัติการเป็นไปตามมาตรฐาน คือ มีความเสี่ยงน้อยที่สุด มีความเหมาะสมต่อการใช้ห้องปฏิบัติการในการทำงานกับสารเคมีอย่างปลอดภัย และสามารถแก้ไขผลกระทบต่าง ๆ ที่อาจก่อให้เกิดความเสียหายภายในองค์กร อาทิเช่น การติดตั้งเครื่องมีอุปกรณ์ ตู้ดูดไอระเหยสารเคมี ปล่องระบายอากาศ ระบบระบายอากาศที่เหมาะสม ทำให้ไม่เกิดการไหลเวียนของสารเคมีปนเปื้อนภายในอาคาร

ดังนั้น องค์กรจึงต้องคำนึงถึงการจัดการด้านความปลอดภัยของห้องปฏิบัติการและสารเคมี รวมไปถึงการจัดการเพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและการอนุรักษ์พลังงานของห้องปฏิบัติการ ตามแนวคิดของห้องปฏิบัติการสีเขียว ซึ่งต้องอาศัยการดำเนินงานผ่านแนวปฏิบัติที่เกี่ยวข้องในประเด็นดังกล่าว หรือที่เรียกว่า “แนวปฏิบัติที่เป็นสีเขียว” ตัวอย่างเช่น การลดการเกิดขยะและของเสียอันตราย การลดการใช้พลังงานไฟฟ้า/น้ำ ซึ่งจะช่วยให้ห้องปฏิบัติการมีการดำเนินงานที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเพิ่มมากขึ้น และมีการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่าและมีประสิทธิภาพสูงสุด ดังนั้น จึงเป็น

สิ่งสำคัญที่ต้องส่งเสริมให้บุคลากรใช้แนวปฏิบัติที่เป็นสีเขียว และให้มีการดำเนินการจัดการด้านสิ่งแวดล้อมของห้องปฏิบัติการ เพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมไปพร้อมกันกับการมีห้องปฏิบัติการที่ปลอดภัย บทความนี้จัดทำขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้บุคลากรในองค์กรที่มีห้องปฏิบัติการมีความรู้ ความเข้าใจและตระหนักในการจัดการด้านความปลอดภัยของห้องปฏิบัติการและสารเคมี สามารถนำข้อมูลไปใช้ประกอบการจัดการด้านความปลอดภัยของห้องปฏิบัติการและสารเคมี เตรียมความพร้อมสู่การพัฒนาห้องปฏิบัติการสีเขียวตามกระแสโลก รวมทั้งยกระดับคุณภาพห้องปฏิบัติการเพื่อการขับเคลื่อนอุตสาหกรรมในภาคการผลิตและการบริการของประเทศให้แข่งขันได้อย่างยั่งยืน

2. วิธีดำเนินการ

ผู้เขียนได้รวบรวมข้อมูลการพัฒนาหลักสูตรด้านความปลอดภัยของห้องปฏิบัติการและสารเคมีของกรมวิทยาศาสตร์บริการ ที่ผู้เขียนเป็นผู้ร่วมพัฒนาหลักสูตรและจัดทำข้อมูลการเรียนการสอน โดยนำข้อมูลมาเรียบเรียงและจัดทำเนื้อหาเป็น 8 หัวข้อ ได้แก่ 1) ความสำคัญของการจัดทำระบบการจัดการด้านความปลอดภัยของห้องปฏิบัติการที่เกี่ยวกับสารเคมี ข้อกำหนด กฎหมายที่เกี่ยวข้อง 2) การออกแบบระบบการจัดการด้านความปลอดภัยในห้องปฏิบัติการ 3) การควบคุมสารเคมีอันตราย 4) การแยกประเภทสารเคมีอันตราย 5) การประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพจากสารเคมี 6) การจัดการสารเคมีอันตราย 7) การออกแบบห้องปฏิบัติการเพื่อความปลอดภัย และ 8) การจัดการห้องปฏิบัติการสีเขียว โดยนำสาระสำคัญในแต่ละหัวข้อมาสรุปและจัดทำเป็นบทความเรื่องแนวทางการจัดการด้านความปลอดภัยของห้องปฏิบัติการและสารเคมี

แนวทางการจัดการด้านความปลอดภัยของห้องปฏิบัติการและสารเคมี

แนวทางการจัดการด้านความปลอดภัยห้องปฏิบัติการและสารเคมีในบทความนี้ มุ่งเน้นเฉพาะห้องปฏิบัติการที่มีการใช้สารเคมีในกระบวนการ แบ่งเป็น 8 หัวข้อ ดังนี้

1) ความสำคัญของการจัดทำระบบการจัดการด้านความปลอดภัยของห้องปฏิบัติการที่เกี่ยวกับสารเคมี ข้อกำหนดกฎหมายที่เกี่ยวข้อง

ปัจจุบันมีการใช้เทคโนโลยีใหม่ ๆ และสารเคมีที่เป็นอันตรายเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะการใช้สารเคมีอันตราย <http://bas.dss.go.th>

ในห้องปฏิบัติการวิจัย ทดสอบ สอบเทียบ และการเรียนการสอน องค์กรที่มีห้องปฏิบัติการจึงควรจัดทำระบบการจัดการด้านความปลอดภัยของห้องปฏิบัติการที่เกี่ยวกับสารเคมี ซึ่งมีองค์ประกอบหลากหลาย เช่น หน้าที่ความรับผิดชอบของบุคลากรในองค์กร มาตรการควบคุมสารเคมีอันตราย การเก็บ/ใช้/เคลื่อนย้ายสารเคมี การเก็บ/บำบัด/กำจัดของเสียอันตรายจากห้องปฏิบัติการ เป็นต้น ทั้งนี้ระบบที่จัดทำขึ้นต้องคำนึงถึงความเหมาะสมกับบริบทขององค์กร เช่น กฎหมายและข้อกำหนดต่าง ๆ วัฒนธรรมองค์กร ขีดความสามารถด้านทรัพยากรบุคคล ดังนั้น ผู้ทำงานในห้องปฏิบัติการหรือผู้ที่เกี่ยวข้องจึงต้องทราบข้อมูลและตระหนักถึงอันตรายจากสารเคมี ตลอดจนเห็นความสำคัญของการจัดทำระบบการจัดการด้านความปลอดภัยของห้องปฏิบัติการที่เกี่ยวกับสารเคมี และให้ความร่วมมือในการจัดทำและพัฒนาระบบเพื่อความปลอดภัยทั้งต่อตนเองและผู้อื่น รวมถึงสิ่งแวดล้อม

สารเคมีอันตรายไม่ว่าจะเป็น ธาตุ สารประกอบ หรือสารผสม ตามกฎกระทรวงกำหนดมาตรฐานในการบริหารจัดการ และดำเนินการด้านความปลอดภัย อาชีวอนามัย และสภาพแวดล้อมในการทำงานเกี่ยวกับสารเคมีอันตราย พ.ศ. 2556 ระบุว่าสารเคมีอาจทำให้เกิดอันตรายทางกายภาพ เช่น การระเบิดหรือไฟไหม้ หรืออันตรายต่อสุขภาพ เช่น อาการแพ้ การก่อมะเร็ง การเปลี่ยนแปลงทางพันธุกรรม เป็นอันตรายต่อทารกในครรภ์หรือสุขภาพอนามัย หรือทำให้เกิดแก่ความตาย [2] ตัวอย่างสารอันตราย เช่น ตัวทำละลายประเภท Chlorinated solvent ที่มักใช้ในห้องปฏิบัติการ มีฤทธิ์สามารถทำลายตับและไต ออกฤทธิ์ต่อระบบประสาทส่วนกลาง และส่วนมากจะเป็นสารก่อมะเร็ง หรือสารที่เป็นที่สงสัยว่าจะเป็นสารก่อมะเร็งในมนุษย์ ตัวอย่างอันตรายที่เกิดในห้องปฏิบัติการมีอยู่ให้เห็นเนือง ๆ เช่น ขาวไฟไหม้ห้องแล็บ ศุภวัฏพทุมธานีในปี พ.ศ. 2554 [3] ขาวแก๊สระเบิดของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีในปี พ.ศ. 2557 [4] หรือการเสียชีวิตจากการสัมผัสสารโพแทสเซียมไฮไดรด์ในห้องปฏิบัติการ Frontage Laboratories ในปี พ.ศ. 2561 และการระเบิดที่เกิดจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับไฮโดรเจน ซึ่งทำให้มีผู้เสียชีวิตในปี พ.ศ. 2563 [5]

แนวทางป้องกันเหตุการณ์ที่ไม่พึงประสงค์ในห้องปฏิบัติการ นอกจากผู้ทำงานในห้องปฏิบัติการและผู้ที่เกี่ยวข้องจะต้องระมัดระวังเป็นพิเศษ และตระหนักถึง

ความเสี่ยงและอันตรายแล้ว องค์กรต้องมีการจัดหาระบบการจัดการด้านความปลอดภัยของห้องปฏิบัติการที่ใช้สารเคมี และต้องมีการติดตามข้อกำหนด กฎหมายที่เกี่ยวข้องที่มีผลบังคับใช้ในขณะนั้น และนำข้อกำหนด กฎหมายมาบรรจุในขั้นตอนการดำเนินงานที่เกี่ยวข้อง สำหรับกฎหมายหลักที่เกี่ยวกับความปลอดภัยของแรงงาน ได้แก่ พระราชบัญญัติความปลอดภัย อาชีวอนามัย และสภาพแวดล้อมในการทำงาน พ.ศ. 2554 ซึ่งเป็นกฎหมายเพื่อประโยชน์ในการวางมาตรการควบคุม กำกับ ดูแล และบริหารจัดการด้านความปลอดภัย อาชีวอนามัย และสภาพแวดล้อมในการทำงาน รวมถึงระเบียบ ข้อบังคับอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น ข้อบังคับสภาวิชาชีพวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ในส่วนของผู้รับผิดชอบการปฏิบัติงานในห้องปฏิบัติการ ที่เกี่ยวข้องกับวัตถุอันตราย ชนิดที่ 2 ชนิดที่ 3 หรือชนิดที่ 4 (ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง บัญชีรายชื่อวัตถุอันตราย ออกตามความในมาตรา 18 วรรคสอง แห่งพระราชบัญญัติวัตถุอันตราย พ.ศ. 2535) ผู้รับผิดชอบการปฏิบัติงานในห้องปฏิบัติการที่มีการครอบครองวัตถุอันตรายชนิดดังกล่าว ต้องมีใบอนุญาตประกอบวิชาชีพวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ควบคุม สาขาการผลิต การควบคุม และการจัดการสารเคมีอันตราย เพื่อให้เกิดความปลอดภัยในการทำงาน แต่ถึงอย่างไร แม้ว่าจะองค์กรจะมีระบบการจัดการด้านความปลอดภัยที่ดี มีประสิทธิภาพและประสิทธิผลแล้ว ก็อาจจะมีล้มเหลวได้ หากบุคลากรไม่มีความตระหนักและขาดความใส่ใจในการปฏิบัติงานตามระบบที่จัดทำขึ้น ดังนั้น องค์กรจะต้องพัฒนาบุคลากรและระบบไปพร้อม ๆ กัน ตลอดจนสนับสนุนการสร้างวัฒนธรรมความปลอดภัยที่ยั่งยืน

2) การออกแบบระบบการจัดการด้านความปลอดภัยในห้องปฏิบัติการ

การออกแบบระบบการจัดการด้านความปลอดภัยในห้องปฏิบัติการที่ใช้สารเคมีนั้น ผู้ดำเนินการจะต้องมีความรู้ทางวิทยาศาสตร์โดยเฉพาะที่เกี่ยวกับสารเคมีและเข้าใจบริบทต่าง ๆ ของห้องปฏิบัติการ ตลอดจนทราบกระบวนการ แนวปฏิบัติ และระเบียบปฏิบัติด้านความปลอดภัยเป็นอย่างดี การพัฒนาระบบการจัดการด้านความปลอดภัยในห้องปฏิบัติการนั้น องค์กรจะต้องกำหนดนโยบาย เป้าหมาย และระดับความสำเร็จในการพัฒนาระบบการจัดการ เช่น ระดับพื้นฐาน ระดับต้นแบบ ระดับมาตรฐาน หรือระดับ

World Class ซึ่งเป็นที่ยอมรับในระดับนานาชาติ เช่น การเป็นห้องปฏิบัติการที่ปลอดภัยและยั่งยืน (sustainable laboratory) หรือห้องปฏิบัติการสีเขียว (green laboratory) ทั้งนี้ เพื่อให้องค์กรสามารถวางแผนและดำเนินการให้ไปถึงเป้าหมายที่ชัดเจน เป็นรูปธรรม โดยแนวทางเบื้องต้นในการออกแบบระบบการจัดการด้านความปลอดภัยในห้องปฏิบัติการประกอบด้วย 1) การสำรวจ บ่งชี้ รวบรวม และประเมินผลปัจจัยเสี่ยงต่าง ๆ ในห้องปฏิบัติการ 2) การกำหนดแนวทางป้องกันและลดความเสี่ยง หรือการจัดการความเสี่ยง 3) การติดตามและประเมินผล เพื่อป้องกันและลดความเสี่ยง 4) การวางแผนพัฒนาและปรับปรุง 5) การดำเนินการเพื่อความปลอดภัยอย่างเป็นกระบวนการและต่อเนื่อง 6) การสร้างการมีส่วนร่วมในกระบวนการพัฒนาให้กับบุคลากรในองค์กร และ 7) การสร้างความตระหนัก การณรงค์เพื่อสร้างและปลูกฝังวัฒนธรรมความปลอดภัย (Safety Culture) เกี่ยวกับห้องปฏิบัติการ

นอกจากนี้ องค์กรอาจนำมาตราฐาน มอก. เลขที่ 2677 มาใช้เป็นแนวทางการออกแบบระบบ ข้อกำหนดระบบการจัดการด้านความปลอดภัยของห้องปฏิบัติการตามมาตรฐานนี้ประกอบด้วย 1) นโยบายความปลอดภัยของห้องปฏิบัติการ 2) การวางแผน 3) การนำไปใช้และการปฏิบัติ 4) การติดตามตรวจสอบและการประเมินผลการปฏิบัติ 5) การทบทวนการจัดการ ซึ่งระบุข้อปฏิบัติในขั้นตอนการดำเนินงาน 7 ข้อ ได้แก่ 1) โครงสร้าง หน้าที่ ความรับผิดชอบ 2) การจัดการสารเคมี 3) การจัดการของเสีย 4) ลักษณะทางกายภาพของห้องปฏิบัติการ 5) การเตรียมความพร้อม และตอบโต้ภาวะฉุกเฉิน 6) การให้ความรู้ และการสร้างจิตสำนึก 7) การจัดการเอกสาร ตัวอย่างแนวทางเบื้องต้นในการออกแบบระบบการจัดการด้านความปลอดภัยในห้องปฏิบัติการที่เกี่ยวข้องกับการจัดการเอกสาร เช่น ห้องปฏิบัติการต้องมีคู่มือความปลอดภัยที่มีเนื้อหาเหมาะสมกับห้องปฏิบัติการนั้น ๆ ตัวอย่างคู่มือปฏิบัติด้านความปลอดภัยห้องปฏิบัติการ กรมวิทยาศาสตร์บริการจัดทำขึ้นเพื่อใช้เป็นแนวปฏิบัติที่ร่วมกันสำหรับผู้ทำงานในห้องปฏิบัติการทดสอบ สอบเทียบ วิจัยและพัฒนา รวมถึงห้องปฏิบัติการสำหรับการจัดฝึกอบรม ทั้งนี้ ด้วยบริบทขององค์กรมีบริการทางห้องปฏิบัติการที่หลากหลาย นอกจากคู่มือจะประกอบด้วยการจัดการด้านความปลอดภัยสำหรับห้องปฏิบัติการที่ใช้สารเคมีแล้ว ยังกล่าวถึงบริบทความปลอดภัยในห้องปฏิบัติการที่ใช้รังสี และความปลอดภัย

ห้องปฏิบัติการทางจุลชีววิทยาด้วย เป็นต้น [6]

ความสำเร็จในการออกแบบระบบการจัดการด้านความปลอดภัยในห้องปฏิบัติการขึ้นอยู่กับปัจจัย 2 ประการ ได้แก่ การสนับสนุนของผู้บริหารตั้งแต่ระดับบนจนถึงผู้ปฏิบัติการระดับล่าง (Top-down management support) และความเป็นเจ้าของด้านความปลอดภัยในทุกกระดับ (Safety ownership at all levels) ทั้งนี้ จะต้องทำความเข้าใจด้วยว่า ระบบการจัดการด้านความปลอดภัยนั้น ไม่สามารถจะมีความสมบูรณ์แบบและป้องกันอันตรายได้ 100% เพราะอุบัติเหตุหรือสิ่งที่ไม่พึงประสงค์นั้นสามารถเกิดขึ้นได้ตลอดเวลา ทำให้ต้องมีการพิจารณา และปรับปรุงตลอดเวลาอย่างต่อเนื่อง

3) การควบคุมสารเคมีอันตราย

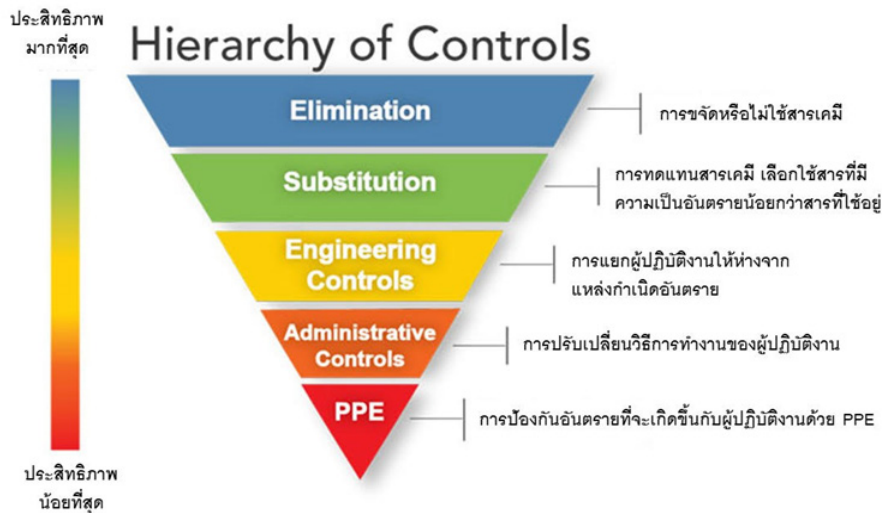
การควบคุมสารเคมีอันตรายหรือการควบคุมปริมาณการสัมผัสสารเคมีอันตราย จะต้องควบคุมตั้งแต่แหล่งกำเนิด เส้นทางผ่านของสารเคมี และตัวของผู้ปฏิบัติงานหรือผู้ที่เกี่ยวข้อง สิ่งที่ใช้สารเคมีอันตรายสามารถดำเนินการได้เลย คือ การทำงานตามระเบียบปฏิบัติงานที่องค์กรกำหนด และการใช้อุปกรณ์คุ้มครองความปลอดภัยส่วนบุคคล (Personal Protective Equipment, PPE) โดยใส่ PPE ที่ได้มาตรฐาน และมีความเหมาะสมกับลักษณะอันตรายของกิจกรรมที่ทำตลอดเวลาในการทำงาน และใส่ PPE พื้นฐานตลอดเวลาที่อยู่ในห้องปฏิบัติการ รวมถึงการใส่ PPE ในการดำเนินการต่อภาวะฉุกเฉิน ดังนั้น ผู้ทำงานจึงควรศึกษาและเข้าร่วมอบรมวิธีการใช้งาน การดูแลบำรุงรักษา และวิธีการตรวจสอบสภาพ PPE ตลอดการใช้งาน

ผู้ทำงานควรศึกษาวิธีการปฏิบัติงานเพื่อความปลอดภัยอยู่ตลอดเวลา เพื่อให้เกิดความรู้ความเข้าใจ เพื่อให้สามารถนำไปปฏิบัติได้อย่างถูกต้อง จนเป็นนิสัย พร้อมทั้งเข้าร่วมการฝึกอบรมหรือการอบรมทบทวนให้ความรู้ และปฏิบัติตามป้ายสัญลักษณ์ต่าง ๆ เช่น ป้ายห้ามป้ายให้ปฏิบัติ ป้ายเตือน หรือป้ายแจ้งข้อความในบริเวณสถานที่ทำงานเกี่ยวกับสารเคมีอันตราย สถานที่เก็บรักษาสารเคมีอันตราย หรือยานพาหนะขนส่งสารเคมีอันตราย อย่างไรก็ตาม ผู้ปฏิบัติงานกับสารเคมีควรศึกษาเอกสารข้อมูลความปลอดภัย (Safety Data Sheet, SDS) อย่างถี่ถ้วน ให้ความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับสารเคมีที่ใช้อย่างถ่องแท้

และตระหนักถึงความสำคัญในการทำงานตามระเบียบปฏิบัติและ/หรือแนวปฏิบัติที่ปลอดภัย นอกจากนี้แล้วผู้ปฏิบัติงานควรศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับสารเคมีจากแหล่งข้อมูลอื่นที่เชื่อถือได้ เช่น ฐานข้อมูลสารเคมี PubChem ของ National Institutes of Health เป็นต้น

การศึกษา SDS โดยเฉพาะข้อที่ 8 การควบคุมการสัมผัสและการป้องกันส่วนบุคคล (Exposure controls/personal protection) เป็นข้อมูลสำคัญสำหรับผู้ปฏิบัติงานในการป้องกันตนเองจากการสัมผัสสารเคมี หัวข้อที่ 8 ประกอบด้วย 1) ค่าต่าง ๆ ที่ใช้ควบคุมการสัมผัส เช่น ค่า Occupational Exposure Limits (OELs) หรือค่าขีดจำกัดสารเคมีที่สัมผัสได้ในสถานที่ทำงาน 2) การควบคุมทางวิศวกรรมที่เหมาะสม และ 3) มาตรการป้องกันส่วนบุคคล ทั้งนี้ หลักการทั่วไปในการควบคุมและป้องกันอันตรายจากการทำงานประกอบด้วยการควบคุมอันตรายที่แหล่งกำเนิดอันตราย (Source control) ทางผ่านระหว่างแหล่งกำเนิดกับตัวบุคคล (Pathway control) และการควบคุมอันตรายที่ตัวบุคคล (Worker control) ซึ่งส่วนใหญ่แล้ว Source control และ Pathway control จะเป็นการดำเนินการตามมาตรการที่องค์กรกำหนดขึ้น สำหรับ Worker control นั้นเน้นที่ตัวผู้ปฏิบัติงานเองในการใช้ PPE ที่เหมาะสมกับการปฏิบัติงาน ซึ่งสามารถหาข้อมูลเกี่ยวกับ PPE ได้ในหัวข้อที่ 8 ส่วนที่ 3 มาตรการป้องกันส่วนบุคคล ตัวอย่างข้อมูล PPE ใน SDS เช่น การเลือกใช้ถุงมือในการทำงานกับอะซิโตนไตรล์ ให้เลือกถุงมือที่ทำจาก Butyl-rubber ความหนาอย่างน้อย 0.3 มิลลิเมตร [7]

มาตรการควบคุมอันตรายที่ยอมรับและใช้อย่างแพร่หลายในองค์กรต่าง ๆ ในระดับสากล ได้แก่ Hierarchy of Controls หรือลำดับขั้นของการควบคุมอันตรายเพื่อลดหรือกำจัดการสัมผัสอันตราย ที่จัดทำโดย The National Institute for Occupational Safety and Health [9] มาตรการควบคุมที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดคือ การกำจัดหรือไม่ใช้สารเคมี (Elimination) ส่วนมาตรการที่มีประสิทธิภาพน้อยที่สุดแต่ต้องใช้อยู่ตลอดเวลา คือ การใช้ PPE เพราะอันตรายต่าง ๆ นั้น ได้มาประชิดตัวแล้ว ทำให้ PPE กลายเป็นสิ่งที่สำคัญและจำเป็นที่สุด แม้จะมีประสิทธิภาพน้อยที่สุดก็ตาม ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 : Hierarchy of Controls [9]

4) การแยกประเภทสารเคมีอันตราย

ปัจจุบันการแยกประเภทสารเคมีอันตรายในประเทศไทยอ้างอิงระบบสากล Globally Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals (GHS) หรือระบบการจำแนกและการสื่อสารความเป็นอันตรายของสารเคมี [8] โดยจำแนกตามความเป็นอันตรายทางกายภาพ 16 ประเภท ความเป็นอันตรายต่อสุขภาพ 10 ประเภท ความเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม 2 ประเภท การติดฉลากและ SDS สื่อสารความเป็นอันตรายของสารเคมี

ตารางที่ 1 ข้อมูลประเภทความเป็นอันตราย และรูปสัญลักษณ์ความเป็นอันตราย (Hazard pictogram)
ตามระบบ GHS เป็นข้อมูลเบื้องต้นให้เกิดความเข้าใจเกี่ยวกับการจำแนกและการสื่อสารความเป็นอันตรายของสารเคมี

ความเป็นอันตรายตามระบบ GHS	ประเภทความเป็นอันตราย	ตัวอย่างรูปสัญลักษณ์ (Hazard Pictogram)
ความเป็นอันตรายทางกายภาพ 16 ประเภท	1. วัตถุระเบิด (Explosives)	
	2. แก๊สไวไฟ (Flammable gases) 3. ละอองลอยไวไฟ (Flammable aerosols) 4. ของเหลวไวไฟ (Flammable liquids) 5. ของแข็งไวไฟ (Flammable solids) 6. ของเหลวที่ลุกติดไฟได้เองในอากาศ (Pyrophoric liquids) 7. ของแข็งที่ลุกติดไฟได้เองในอากาศ (Pyrophoric solids) 8. สารเดี่ยวและสารผสมที่เกิดความร้อนได้เอง (Self-heating substances and mixtures) 9. สารเดี่ยวและสารผสมที่สัมผัสกับน้ำแล้วให้แก๊สไวไฟ (Substances and mixtures, which in contact with water, emit flammable gases)	

ความเป็นอันตราย ตามระบบ GHS	ประเภทความเป็นอันตราย	ตัวอย่างรูปสัญลักษณ์ (Hazard Pictogram)
ความเป็นอันตราย ทางกายภาพ 16 ประเภท	10. สารเดี่ยวและสารผสมที่ทำปฏิกิริยาได้เอง (Self-reactive substances and mixtures)	 หรือ 
	11. แก๊สออกซิไดซ์ (Oxidizing gases) 12. ของเหลวออกซิไดซ์ (Oxidizing liquids) 13. ของแข็งออกซิไดซ์ (Oxidizing solids) 14. สารเปอร์ออกไซด์อินทรีย์ (Organic peroxides)	
	15. แก๊สภายใต้ความดัน (Gases under pressure)	
	16. สารกัดกร่อนโลหะ (Corrosive to metals)	
ความเป็นอันตราย ต่อสุขภาพ 10 ประเภท	1. ความเป็นพิษเฉียบพลัน (Acute toxicity)	
	2. การกัดกร่อนและการระคายเคืองต่อผิวหนัง (Skin corrosion/irritation) 3. การทำลายดวงตาอย่างรุนแรงและการระคายเคืองต่อดวงตา (Serious eye damage/eye irritation)	 หรือ 

ความเป็นอันตราย ตามระบบ GHS	ประเภทความเป็นอันตราย	ตัวอย่างรูปสัญลักษณ์ (Hazard Pictogram)
ความเป็นอันตราย ต่อสุขภาพ 10 ประเภท	4. การทำให้ไวต่อการกระตุ้นอาการแพ้ต่อระบบทางเดินหายใจหรือผิวหนัง (Respiratory or skin sensitization)	 หรือ 
	5. การก่อให้เกิดการกลายพันธุ์ของเซลล์สืบพันธุ์ (Germ cell mutagenicity) 6. การก่อมะเร็ง (Carcinogenicity) 7. ความเป็นพิษต่อระบบสืบพันธุ์ (Reproductive toxicity) 8. ความเป็นพิษต่ออวัยวะเป้าหมายอย่างเฉพาะเจาะจงจากการสัมผัสครั้งเดียว (Specific target organ toxicity – Single exposure) 9. ความเป็นพิษต่ออวัยวะเป้าหมายอย่างเฉพาะเจาะจงจากการสัมผัสซ้ำ (Specific target organ toxicity – Repeated exposure) 10. ความเป็นอันตรายจากการสำลัก (Aspiration hazard)	
ความเป็นอันตราย ต่อสิ่งแวดล้อม 2 ประเภท	1. ความเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมในน้ำ (Hazardous to the aquatic environment) 2. ความเป็นอันตรายต่อโอโซนในชั้นบรรยากาศ (Hazardous to the ozone layer)	 หรือ 

ทั้งนี้ รูปสัญลักษณ์ที่ใช้ขึ้นอยู่กับความรุนแรงของประเภทความเป็นอันตรายของสารเคมีนั้น ๆ ดังนั้น ผู้ปฏิบัติงานที่เกี่ยวข้องกับสารเคมี ต้องเข้าใจข้อมูลต่าง ๆ ที่ปรากฏอยู่ในฉลากสารเคมีและ SDS ซึ่งรวมถึงรูปสัญลักษณ์ในการขนส่งสารเคมี หรือวัตถุอันตรายที่จำแนกประเภทตาม United Nation Recommendations on the Transport of Dangerous Goods (UNRTDG) และรูปสัญลักษณ์และข้อมูลอื่นที่ใช้สื่อสารเกี่ยวกับสารเคมีในห้องปฏิบัติการและสถานประกอบการ ความรู้ความเข้าใจข้อมูลการสื่อสารความเป็นอันตรายในรูปแบบต่าง ๆ จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ปฏิบัติงานในการประเมินความเสี่ยงเบื้องต้น เพื่อป้องกันอันตรายที่อาจเกิดขึ้นกับตนเองได้

5) การประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพจากสารเคมี

อันตรายของสารเคมีที่มีผลต่อสุขภาพขึ้นอยู่กับความเสี่ยงและโอกาสที่ผู้ปฏิบัติงานจะได้รับการสัมผัสสารเคมีไม่ว่าจะเป็นการสัมผัสทางการกลืนกิน ทางผิวหนัง หรือทางการหายใจ ตามกฎกระทรวงกำหนดมาตรฐานในการบริหาร จัดการ และดำเนินการด้านความปลอดภัย อาชีวอนามัย และสภาพแวดล้อมในการทำงานเกี่ยวกับสารเคมีอันตราย พ.ศ. 2556 มาตรา 32

ระบุให้นายจ้างต้องกำหนดให้มีการประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพของลูกจ้าง ระบบการป้องกันและควบคุมปริมาณสารเคมีอันตราย รวมทั้งการตรวจวัดหรือวิเคราะห์ระดับความเข้มข้นของสารเคมีอันตรายในบรรยากาศของสถานที่ทำงานและสถานที่เก็บรักษาสารเคมีอันตราย ซึ่งหากระดับความเข้มข้นของสารเคมีอันตรายในบรรยากาศมีระดับเกินขีดจำกัดความเข้มข้นของสารเคมีอันตรายตามที่กำหนดไว้ จะต้องใช้มาตรการควบคุมสารเคมีอันตรายด้วยวิธีการที่เหมาะสม เพื่อลดระดับความเข้มข้นของสารเคมีอันตราย ดังนั้น นายจ้างจะต้องมีเครื่องมือสำหรับการประเมินความเสี่ยงของสารเคมีที่ใช้ในสถานประกอบการ ซึ่งต้องพิจารณาให้ครอบคลุมทุกองค์ประกอบ และเก็บข้อมูลที่เกี่ยวข้องให้ครบถ้วนไปใช้ประกอบในกระบวนการประเมิน

ผู้ปฏิบัติงานนำมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมการประเมินความเสี่ยงด้านสารเคมีต่อสุขภาพผู้ปฏิบัติงานในโรงงานอุตสาหกรรม มาตรฐานเลขที่ มอก. 2535 มาประยุกต์ใช้เป็นแนวทางในการประเมินความเสี่ยงจากสารเคมีที่มีผลกระทบต่อสุขภาพผู้ปฏิบัติงานในห้องปฏิบัติการ มาตรฐานนี้ครอบคลุมเฉพาะการประเมินความเสี่ยงเชิงคุณภาพ ซึ่งแบ่งเป็น 5 ระดับ ได้แก่ ระดับยอมรับได้ ระดับต่ำ ระดับปานกลาง ระดับสูง และระดับสูงมาก โดยผู้ประเมินความเสี่ยงต้องเก็บข้อมูลในสถานประกอบการเพื่อนำมาระบุลักษณะเฉพาะความเสี่ยง เช่น ระดับความรุนแรงของสารเคมีอันตรายที่มีผลกระทบต่อสุขภาพ ระดับความเข้มข้นสารเคมีอันตรายเฉลี่ยตลอดเวลาทำงาน ระดับความถี่การสัมผัส ระดับการสัมผัส ระดับความเสี่ยง และมาตรการควบคุมความเสี่ยง เป็นต้น ทั้งนี้ การทราบระดับความเสี่ยงจะทำให้ดำเนินการตามมาตรการควบคุมความเสี่ยงได้อย่างทันทั่วทั้งที่

บทความนี้นำเสนอกรณีศึกษาแนวทางการประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพจากสารเคมีที่มีความเป็นพิษเฉียบพลัน 4 ชนิด ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ ในกรณีที่ได้รับการสัมผัสทางการหายใจ โดยกำหนดระดับและค่าต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องในการประเมินความเสี่ยง ได้แก่ ระดับความเป็นอันตรายและคะแนน (A) ระดับการสัมผัสและคะแนน (B) คะแนนความเสี่ยงการสัมผัสได้จากคะแนน (A) x (B) ซึ่งระดับความเสี่ยงการสัมผัสประกอบการกำหนดช่วงคะแนนความเสี่ยงการสัมผัส เกณฑ์ความเสี่ยงการสัมผัส และการกำหนดมาตรการควบคุมความเสี่ยง ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การกำหนดระดับความเสี่ยงการสัมผัสสำหรับกรณีศึกษาแนวทางการประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพจากสารเคมีที่มีความเป็นพิษเฉียบพลัน

ระดับความเป็นอันตรายและคะแนน(A)	ระดับการสัมผัสและคะแนน (B)				ระดับความเสี่ยงการสัมผัส		
	น้อย (1)	ปานกลาง (2)	มาก (3)	มากที่สุด (4)	ช่วงคะแนนความเสี่ยงการสัมผัส	เกณฑ์ความเสี่ยงการสัมผัส	มาตรการควบคุมความเสี่ยง
	คะแนนความเสี่ยงการสัมผัส (A)x(B)						
มากที่สุด (4)	4	8	12	16	10 ถึง 16	สูง	ให้หยุดดำเนินการและดำเนินการควบคุมทันที เช่น การกำจัดแหล่งกำเนิดอันตราย การทดแทนหรือทางเลือกอื่น ที่ไม่ก่อให้เกิดอันตรายหรืออันตรายน้อยกว่า
มาก (3)	3	6	9	12	7 ถึง 9	ปานกลาง	ต้องมีมาตรการควบคุมเร็วที่สุดเท่าที่จะทำได้ และจัดให้มีแผนการควบคุมที่ถาวร เช่น การควบคุมทางวิศวกรรม
ปานกลาง (2)	2	4	6	8	3 ถึง 6	ต่ำ	จัดให้มีมาตรการควบคุมความเสี่ยงเพิ่มเติม และให้ดำเนินการประเมินความเสี่ยงซ้ำ
น้อย (1)	1	2	3	4	1 ถึง 2	ยอมรับได้	เฝ้าระวังและตรวจสอบสภาพแวดล้อมอย่างสม่ำเสมอ

สำหรับสารที่มีความเป็นพิษเฉียบพลัน 4 ชนิด มีความเป็นอันตรายหากได้รับการสัมผัสทางการหายใจ ระดับความเป็นอันตรายและคะแนนความเป็นอันตราย ดังนี้ สารที่ 1 มีความเป็นพิษรุนแรงมาก ทำให้เสียชีวิต หรือพิการ หรือป่วยโดยช่วยเหลือตนเองไม่ได้ มีความเป็นอันตรายในระดับมากที่สุด คะแนนเท่ากับ 4 สารที่ 2 มีความเป็นพิษรุนแรง มีผลกระทบต่อสุขภาพอย่างถาวร ไม่สามารถรักษาให้หายได้ โดยไม่มีอันตรายถึงชีวิต แต่ต้องได้รับการรักษาทางการแพทย์อย่างต่อเนื่อง มีความเป็นอันตรายในระดับมาก คะแนนเท่ากับ 3 สารที่ 3 มีความเป็นพิษปานกลาง มีผลกระทบต่อสุขภาพรุนแรงที่หายได้ ต้องได้รับการรักษาจากแพทย์ มีความเป็นอันตรายในระดับปานกลาง คะแนนเท่ากับ 2 สารที่ 4 มีความเป็นพิษน้อย มีผลกระทบต่อสุขภาพเล็กน้อย เช่น วิงเวียนศีรษะ ไม่จำเป็นต้องรักษา หรือหายได้โดยไม่ต้องรักษาทางการแพทย์ มีความเป็นอันตรายในระดับน้อย คะแนนเท่ากับ 1 ดังแสดงในตารางที่ 3

กรณีศึกษากำหนดให้สารทั้ง 4 ชนิด มีระดับการสัมผัสมากที่สุดและคะแนนเท่ากับ 4 ซึ่งโดยทั่วไปการกำหนดระดับการสัมผัสได้มาจากการตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นของสารเคมีที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ และนำมาเปรียบเทียบกับค่าขีดจำกัดสารเคมีที่สัมผัสได้ในสถานที่ทำงานหรือค่า OEL ของสารนั้น และคิดเป็นร้อยละของ OEL ตามสมการด้านล่างนี้

$$\% \text{ OEL} = \frac{\text{ปริมาณความเข้มข้นของสารที่วัดได้}}{\text{ค่า OEL ของสารนั้น}} \times 100\%$$

หากค่า % OEL สูง แสดงว่าผู้ปฏิบัติงานมีโอกาสสูง ในการได้รับสารเคมีเข้าสู่ระดับที่จะเป็นอันตราย หรือมีระดับการสัมผัสสูง กรณีศึกษานี้กำหนดให้สารทั้ง 4 ชนิดเมื่อวัดหา % OEL แล้วมีค่ามากกว่า 50% OEL แต่ไม่เกิน 75% OEL และกำหนดระดับการสัมผัสมากที่สุดและคะแนนเท่ากับ 4 ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 กรณีศึกษาของระดับความเสี่ยงการสัมผัสสารที่มีความเป็นพิษเฉียบพลัน 4 ชนิด

สาร	ความเป็นอันตรายของสารที่มีความเป็นพิษเฉียบพลัน กรณีได้รับทางการหายใจ	ระดับความเป็นอันตรายและคะแนน (A)	% OEL	ระดับการสัมผัสและคะแนน (B)	คะแนนความเสี่ยงการสัมผัส (A) x (B)	ระดับความเสี่ยงการสัมผัส
สารที่ 1	เป็นพิษรุนแรงมาก ทำให้เสียชีวิต หรือพิการ หรือป่วยโดยช่วยเหลือตนเองไม่ได้	มากที่สุด (4)	> 50 - 75% OEL	มากที่สุด (4)	16	สูง
สารที่ 2	เป็นพิษรุนแรง มีผลกระทบต่อสุขภาพอย่างถาวร ไม่สามารถรักษาให้หายได้ โดยไม่มีอันตรายถึงชีวิต แต่ต้องได้รับการรักษาทางการแพทย์อย่างต่อเนื่อง	มาก (3)	> 50 - 75% OEL	มากที่สุด (4)	12	
สารที่ 3	เป็นพิษปานกลาง มีผลกระทบต่อสุขภาพรุนแรงที่หายได้ ต้องได้รับการรักษาจากแพทย์	ปานกลาง (2)	> 50 - 75% OEL	มากที่สุด (4)	8	ปานกลาง
สารที่ 4	เป็นพิษน้อย มีผลกระทบต่อสุขภาพเล็กน้อย เช่น วิงเวียนศีรษะ ไม่จำเป็นต้องรักษา หรือหายได้โดยไม่ต้องรักษาทางการแพทย์	น้อย (1)	> 50 - 75% OEL	มากที่สุด (4)	4	ต่ำ

กรณีนี้สารที่ 1 และสารที่ 2 มีระดับความเสี่ยง “สูง” องค์กรต้องให้หยุดดำเนินการและดำเนินการควบคุมทันที ในขณะที่ สารที่ 3 มีระดับความเสี่ยง “ปานกลาง” องค์กรต้องมีมาตรการควบคุมเร็วที่สุดเท่าที่จะทำได้ และจัดให้มีแผนการควบคุมที่ถาวร สำหรับสารที่ 4 มีระดับความเสี่ยง “ต่ำ” องค์กรต้องจัดให้มีมาตรการควบคุมความเสี่ยงเพิ่มเติม และให้ดำเนินการประเมินความเสี่ยงซ้ำ เพื่อไม่ให้มีระดับความเสี่ยงจากการได้รับการสัมผัสสูงขึ้นได้ ดังนั้น เพื่อป้องกันอันตรายและลดความเสี่ยงจากการสัมผัสสารเคมีในห้องปฏิบัติการ ผู้ปฏิบัติงานจะต้องมีความรู้ ความเข้าใจเกี่ยวกับความเสี่ยงจากสารเคมี รวมทั้งสามารถดำเนินการประเมินความเสี่ยงของสารเคมีที่ใช้ได้อย่างถูกต้องเหมาะสม เพื่อให้ทราบระดับความเสี่ยงที่อาจมีผลต่อ

สุขภาพของตนเอง เลือกใช้มาตรการควบคุมความเสี่ยงที่เหมาะสมเพื่อลดปริมาณการตกค้างของสารเคมี ตลอดจนเกิดความตระหนักและเอาใจใส่ในการนำแนวปฏิบัติ วิธีการหรือมาตรการควบคุมสารเคมี และการจัดการสารเคมีไปปฏิบัติจริง

6) การจัดการสารเคมีอันตราย

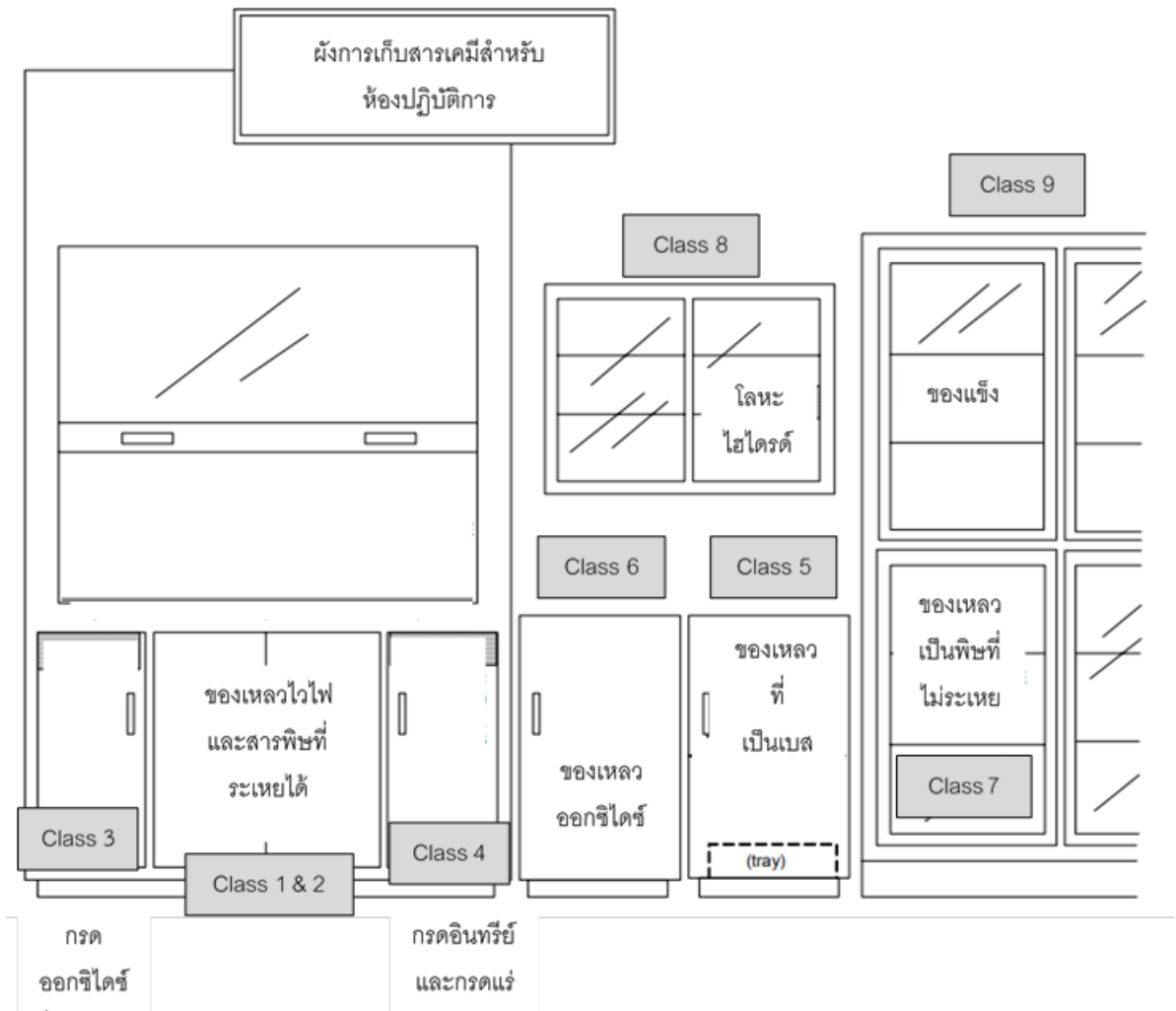
ระบบการจัดการสารเคมีที่มีประสิทธิภาพ จะต้องมีการควบคุมดูแลให้มีกระบวนการจัดการสารเคมีอย่างครบวงจร ตั้งแต่การวางแผนก่อนการจัดซื้อ การจัดซื้อ การตรวจรับ การจัดเก็บ การกำหนดระบบจัดเก็บ-เบิกจ่าย การเคลื่อนย้ายและการใช้สารเคมี รวมไปถึงการจัดการผลผลิตที่เกิดจากการปฏิบัติงานและผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเสียอันตราย โดยองค์กรต้องมีการกำหนดแนวปฏิบัติที่ชัดเจนในการจัดการสารเคมีและของเสียอันตราย เช่น การจำแนกประเภทและการจัดการข้อมูลของสารเคมี/ของเสียอันตราย การลดการเกิดของเสีย การเก็บและการเคลื่อนย้ายของเสีย เป็นต้น ซึ่งข้อมูลจากการบริหารจัดการสารเคมีสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายด้าน เช่น การวางแผนด้านความปลอดภัยและงบประมาณที่เกี่ยวข้องกับสารเคมี อาทิ การซื้อสารเคมีและอุปกรณ์ด้านความปลอดภัย การกำจัดสารเคมี เป็นต้น

สำหรับแนวทางทั่วไปในการจัดซื้อสารเคมีนั้นผู้ใช้สารต้องวินิจฉัยความเสี่ยงจากสารอันตรายนั้น ๆ ให้ครอบคลุมและตรวจสอบให้มั่นใจถึงปริมาณสารที่ต้องการสั่งซื้อ อย่าให้มีปริมาณมากเกินไปจนความจำเป็น และห้องปฏิบัติการต้องมีมาตรการควบคุมที่เหมาะสมและเพียงพอ หรือดำเนินการเพิ่มมาตรการควบคุมจากข้อมูลการประเมินความเสี่ยงจากสารเคมี พร้อมทั้งต้องเผยแพร่ข้อมูลความเสี่ยงและมาตรการควบคุมสารเคมีนั้นให้กับผู้ที่เกี่ยวข้อง โดยเฉพาะในกรณีที่เป็นการนำสารอันตรายใหม่เข้ามาใช้ในห้องปฏิบัติการ

เมื่อมีสารเคมีเข้ามาในระบบควรตรวจสอบฉลากสารเคมีบนภาชนะบรรจุ เช่น การตรวจสอบชื่อสารเคมีให้ตรงกับชื่อสารเคมีในเอกสารข้อมูลความปลอดภัยที่จัดส่งมาพร้อมกัน ข้อมูลความเป็นอันตราย ข้อควรระวัง เป็นต้น นอกจากนี้ต้องบันทึกข้อมูลสารเคมีในสารบบสารเคมี เช่น ชื่อเคมี CAS No. ปริมาณของสารเคมี สถานที่เก็บสารเคมี วันที่รับเข้ามาในห้องปฏิบัติการ ทั้งนี้ การเพิ่มข้อมูลบนฉลากสารเคมี เช่น วันที่เปิดใช้ครั้งแรก วันหมดอายุ หรือ

วันที่กำหนดเพื่อส่งกำจัด จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ใช้สารเคมีในการวางแผนการจัดซื้อ และการส่งกำจัดสารเคมีต่อไป ข้อเสนอแนะทั่วไปสำหรับการจัดเก็บสารเคมีนั้นอันดับแรกคือการแยกเก็บตามสถานะของสาร โดยแยกบริเวณเก็บสารที่เป็นของแข็ง ของเหลว และแก๊สภายใต้ความดัน แล้วจึงแยกเก็บตามประเภทหรือตามความเป็นอันตรายของสาร โดยแยกเก็บตามระเบียบการจัดเก็บพิเศษ ได้แก่ วัตถุระเบิด สารติดเชื้อ วัตถุไวไฟ วัตถุอันตรายตามด้วยสารที่เป็นอันตรายทางกายภาพ ต่อมาจึงเป็นสารที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ ทั้งนี้ ต้องศึกษาการแยกเก็บตามสมบัติการเข้ากันไม่ได้ของสารเคมี (Chemical incompatibility) ด้วยเสมอ เพื่อให้ทราบว่าสารชนิดใดที่ไม่สามารถวางไว้ใกล้กัน แม้ว่าจะจัดให้อยู่ในสารอันตรายประเภทเดียวกัน ตัวอย่างการจัดเก็บสารเคมีในคู่มือสุขศาสตร์สารเคมีในห้องปฏิบัติการของ Fred Hutchinson Cancer Research Center [10] ซึ่งแบ่งการเก็บสารเป็น 9 Class ได้แก่ ของเหลวไวไฟ สารพิษที่ระเหยได้ กรดออกซิไดซ์ กรดอินทรีย์และกรดแร่ ของเหลวที่เป็นเบส ของเหลวออกซิไดซ์ ของเหลวเป็นพิษที่ไม่ระเหย โลหะไฮไดรด์ และของแข็ง ดังแสดงในรูปที่ 2

ตัวอย่างการจัดเก็บสารเคมีจะแยกเก็บสารที่เป็นของแข็งออกจากของเหลว และมีตู้เก็บสารที่เป็นอันตรายทางกายภาพ เช่น ตู้เก็บโลหะไฮไดรด์ ตู้เก็บกรดออกซิไดซ์ ซึ่งเป็นสารว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา รวมถึงตู้เก็บสารที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ เช่น ของเหลวที่เป็นสารพิษ และยังมีการแยกเก็บสารที่เข้ากันไม่ได้ เช่น การแยกเก็บกรดออกซิไดซ์ออกจากกรดอินทรีย์และกรดแร่ สำหรับการเก็บสาร Class 4 กรดอินทรีย์และกรดแร่ไวในตู้เดียวกันนั้นจะต้องระมัดระวังเป็นพิเศษเนื่องจากกรดอินทรีย์จำนวนมากที่เข้ากันไม่ได้กับกรดแร่ เช่น กรดอะซิติกเข้ากันไม่ได้กับกรดไนตริก กรณีในพื้นที่ที่จำกัดควรจัดวางขวดกรดอะซิติกไว้ในภาชนะบรรจุหนึ่ง และจัดเก็บขวดกรดไนตริกแยกใส่ไว้ในอีกภาชนะบรรจุหนึ่ง เป็นต้น ทั้งนี้ ผู้ปฏิบัติต้องสำรวจการจัดเก็บสารเคมีในสถานที่เก็บรักษาสารเคมีอย่างสม่ำเสมอ หรือตามระยะเวลาที่กำหนด โดยสำรวจสารเคมีที่หมดอายุ/เสื่อมสภาพที่อาจทำให้สารเกิดการเปลี่ยนแปลงและก่อให้เกิดอันตราย รวมถึงสำรวจสารเคมีที่ไม่ต้องการใช้ เพื่อดำเนินการกำจัดสารเคมีและของเสียอันตรายต่อไป



รูปที่ 2 : ตัวอย่างการจัดเก็บสารเคมีในตู้มือสุศาสตร์สารเคมีในห้องปฏิบัติการของ Fred Hutchinson Cancer Research Center [10]

7) การออกแบบหรือการปรับปรุงห้องปฏิบัติการเพื่อความปลอดภัย

ในการออกแบบห้องปฏิบัติการใหม่หรือการปรับปรุงห้องปฏิบัติการเพื่อความปลอดภัย จะต้องเข้าใจถึงความเสี่ยงและอันตรายที่อาจเกิดขึ้นได้จากกิจกรรมในห้องปฏิบัติการ รวมถึงต้องพิจารณาองค์ประกอบของห้องปฏิบัติการให้ครอบคลุมไม่ว่าจะเป็นสถานที่ตั้ง โครงสร้าง ขนาดพื้นที่ วัสดุพื้นผิวของห้องปฏิบัติการ การจัดวางครุภัณฑ์/เฟอร์นิเจอร์/เครื่องมือและอุปกรณ์ วงจรไฟฟ้าช่วยชีวิต ระบบสัญญาณ มาตรฐานเส้นทางหนีไฟ ป้ายบอกทางหนีไฟ ป้ายสัญลักษณ์ และข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับห้องปฏิบัติการนั้น ๆ และต้องดำเนินการตามข้อกำหนดกฎหมายที่เป็นปัจจุบัน ข้อเสนอแนะปฏิบัติทั่วไปในการจัดการลักษณะทางกายภาพของ

ห้องปฏิบัติการตามมาตรฐานเลขที่ มอก. 2677 ซึ่งแบ่งงานระบบของห้องปฏิบัติการออกเป็น 7 งาน ได้แก่ งานสถาปัตยกรรม งานสถาปัตยกรรมภายใน งานระบบโครงสร้าง งานระบบไฟฟ้ากำลังและไฟฟ้าแสงสว่าง งานสุขาภิบาลและสิ่งแวดล้อม งานระบบระบายอากาศและระบบปรับอากาศ และงานระบบฉุกเฉินและระบบติดต่อสื่อสาร [1] โดยมาตรฐานนี้เน้นให้มีการจัดการงานระบบของห้องปฏิบัติการโดยคำนึงถึงความปลอดภัยเป็นหลักทั้งในกรณีการปฏิบัติงานปกติและกรณีที่เกิดกรณีฉุกเฉิน ทั้งนี้ เมื่อห้องปฏิบัติการที่มีการออกแบบและการติดตั้งเครื่องมือที่ดีแล้ว ผู้ใช้ห้องปฏิบัติการและผู้ที่เกี่ยวข้อง จะต้องมีความรู้ ความเข้าใจในการใช้ห้องปฏิบัติการตามที่ออกแบบไว้ได้อย่างถูกต้องเหมาะสม พร้อมทั้งต้องมีการบำรุงรักษาห้องปฏิบัติการอย่างสม่ำเสมอ

หรือตามระยะที่กำหนด เพื่อคงสภาพไว้ซึ่งห้องปฏิบัติการปลอดภัย [11]

โดยทั่วไปห้องปฏิบัติการอาจไม่มีงบประมาณหรือแผนในการสร้างห้องปฏิบัติการใหม่ เนื่องจากต้องใช้เงินลงทุนมูลค่าเป็นหลักสิบถึงร้อยล้านขึ้นอยู่กับขนาด ประเภทและวัตถุประสงค์การใช้งานของห้องปฏิบัติการ ดังนั้น การปรับปรุงห้องปฏิบัติการเพื่อความปลอดภัยจึงเป็นทางเลือกให้กับห้องปฏิบัติการที่ใช้งานกันอยู่ในปัจจุบัน แนวทางหลักในการปรับปรุงความปลอดภัยของห้องปฏิบัติการคือ การจัดระเบียบภายในอาคาร การจัดวางเครื่องมือ/วัสดุอุปกรณ์ภายในห้องปฏิบัติการให้เกิดความปลอดภัย การแบ่งโซนพื้นที่ใช้งานที่เหมาะสม และการบริหารจัดการห้องปฏิบัติการ ในบางกรณีที่มีการปรับเปลี่ยนโครงสร้างที่มีอยู่เดิมหรือการจัดวางเครื่องมือใหม่ไม่สามารถทำได้ หรือห้องปฏิบัติการมีข้อจำกัดที่ทำให้ยังไม่สามารถดำเนินการปรับปรุงห้องปฏิบัติการ วิธีการแก้ไขปัญหามุ่งเน้นคือ การกำหนดแนวปฏิบัติที่ชัดเจนในการทำงานในบริเวณหรือพื้นที่นั้น ๆ และสื่อสารแนวปฏิบัติให้ผู้ปฏิบัติงานในห้องปฏิบัติการและผู้ที่เกี่ยวข้องทุกคนรับทราบทั่วกัน พร้อมกันนั้นต้องมีการสื่อสารข้อมูลความเสี่ยง อันตราย อุบัติการณ์ที่อาจเกิดขึ้นได้หากไม่ปฏิบัติตามแนวปฏิบัติที่กำหนดขึ้น เพื่อให้ผู้ปฏิบัติได้รับทราบข้อมูลที่เพียงพอ เข้าใจ เหตุผลในการจัดทำแนวปฏิบัติ ซึ่งจะช่วยให้ผู้ปฏิบัติเกิดความตระหนัก ปรับเปลี่ยนพฤติกรรมการทำงาน และนำแนวปฏิบัติไปใช้ได้นบนพื้นฐานของข้อมูลที่ถูกต้องและเป็นจริง

8) การจัดการห้องปฏิบัติการสีเขียว

ห้องปฏิบัติการโดยทั่วไปมีการใช้ทรัพยากรและพลังงานมากกว่าห้องทำงานประเภทอื่น ๆ เช่น การใช้ตู้แช่แข็งอุณหภูมิต่ำ (ultra-low temperature freezers) จะใช้พลังงานเท่ากับพลังงานที่ใช้ในบ้านทั้งวัน หรือเครื่องมือที่ใช้สำหรับนั่งแช่เชื้อโดยใช้ไอน้ำร้อนและแรงดันสูง จะใช้ปริมาณน้ำเท่ากับหรือมากกว่า 60 แกลลอนต่อรอบ [12] การจัดการห้องปฏิบัติการสีเขียวที่มีความปลอดภัยและยั่งยืนจึงเป็นเรื่องสำคัญในการที่จะลดการใช้พลังงาน รวมทั้งการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่าและมีประสิทธิภาพ และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม แนวทางการลดการใช้พลังงานของห้องปฏิบัติการ เช่น การติดตั้งระบบประหยัดพลังงานในตู้ดูดไอระเหยสารเคมี จะสามารถประหยัดค่าไฟฟ้าต่อปีได้ในระยะยาว ซึ่งค่าไฟฟ้าต่อปีที่ลดลงจะทำให้สามารถคืนทุนค่าใช้จ่ายในการติดตั้งได้ภายในระยะเวลาหนึ่งปี [11] การใช้เทคโนโลยีประหยัดเป็นการลงทุน

ที่คุ้มค่าและอนุรักษ์พลังงานที่เป็นทรัพยากรธรรมชาติได้อย่างยั่งยืน ตัวอย่างเช่น การจัดทำแนวปฏิบัติห้องปฏิบัติการสีเขียวของ University of Pennsylvania โดยมีการอนุรักษ์พลังงาน การอนุรักษ์น้ำ การลดปริมาณของเสีย ซึ่งแนวปฏิบัตินี้เป็นส่วนหนึ่งที่จะช่วยให้มหาวิทยาลัยบรรลุเป้าหมายในการลดการปลดปล่อยคาร์บอนให้ได้ 100% ภายในปี 2042 [13] แนวปฏิบัติทั่วไปของห้องปฏิบัติการสีเขียวนอกเหนือไปจากการเลือกซื้อวัสดุอุปกรณ์ประหยัดพลังงานแล้ว การละลายน้ำแข็งในตู้เย็นสม่ำเสมอ การปฏิบัติตามป้ายลดการใช้พลังงาน การแบ่งปันเครื่องมือภายในหน่วยงาน การแบ่งปันสารเคมีที่เลิกใช้หรือไม่ใช้แล้วให้กับหน่วยงานภายนอก การปิดตู้ดูดไอระเหยสารเคมีเมื่อไม่ใช้งาน หรือการปิดเครื่องใช้ไฟฟ้าหลังใช้งานเสร็จแล้ว การปฏิบัติเหล่านี้นำไปสู่การเป็นห้องปฏิบัติการสีเขียว

ทั้งนี้ องค์กรสามารถใช้เกณฑ์สากล Labs21 Environmental Performance Criteria 3.0 ในการประเมินห้องปฏิบัติการสีเขียว การให้คะแนนตามเกณฑ์การประเมินผลการปฏิบัติงานด้านสิ่งแวดล้อม เช่น การจัดการความปลอดภัยและความเสี่ยงในการปล่อยทิ้งอากาศเสียออกสู่บรรยากาศ (Safety and risk management for air effluents) ประสิทธิภาพในการใช้น้ำในกระบวนการ (Process water efficiency) การเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้เครื่องมือ (Improve laboratory equipment efficiency) โหลดของเครื่องมือที่มีขนาดที่เหมาะสม (Right-size laboratory equipment load) การวิเคราะห์ทิศทางทางไหลของอากาศในห้องปฏิบัติการ (Laboratory air flow analysis) [14] การสำรวจและ/หรือการตรวจประเมินห้องปฏิบัติการ โดยให้ทุกคนมีส่วนร่วมจะช่วยให้เห็นภาพรวมในการดำเนินการ ปัจจัยที่อาจมองข้ามไป ซึ่งจะช่วยให้เกิดความตระหนักมากขึ้น และนำไปสู่การพัฒนาปรับปรุงเป็นห้องปฏิบัติการสีเขียวที่ปลอดภัยยั่งยืน

3. บทสรุป

การจัดการด้านความปลอดภัยของห้องปฏิบัติการและสารเคมี ผู้ที่เกี่ยวข้องต้องทราบอันตรายต่าง ๆ ที่อาจเกิดขึ้นได้ในห้องปฏิบัติการที่ใช้สารเคมี มีความตระหนักด้านความปลอดภัย มีความรู้ความเข้าใจระบบการจัดการด้านความปลอดภัยของห้องปฏิบัติการ ข้อกำหนด กฎหมายต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง นอกจากนี้ ความปลอดภัยในองค์กรเป็นหน้าที่ของ

ทุกคนทุกระดับที่ต้องรับผิดชอบร่วมกัน และต้องร่วมกันสร้างความตระหนักด้านความปลอดภัยให้เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องจนเป็นวัฒนธรรมขององค์กร การออกแบบระบบการจัดการสารเคมีอันตราย จะต้องคำนึงถึงความปลอดภัยของบุคลากรและสิ่งแวดล้อม และครอบคลุมทุกองค์ประกอบของความปลอดภัยห้องปฏิบัติการ ไม่ว่าจะเป็นมาตรฐานของประเทศ มาตรฐานสากล หรือห้องปฏิบัติการสีเขียว เพื่อความปลอดภัยต่อผู้เกี่ยวข้องทั้งหมด และเพื่อประโยชน์ในการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ และรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมของประเทศได้อย่างยั่งยืน

4. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณคณะอาจารย์ที่ประสิทธิประสาทให้ความรู้ สอนและผลักดันให้ศิษย์มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับความปลอดภัยของห้องปฏิบัติการและสารเคมี และจัดทำบทความทางวิชาการนี้สำเร็จได้ด้วยดี

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม. ฉบับที่ 4699 (พ.ศ. 2558) เรื่อง กำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ระบบการจัดการด้านความปลอดภัยของห้องปฏิบัติการที่เกี่ยวข้องกับสารเคมี เล่ม 1 : ข้อกำหนด. ราชกิจจานุเบกษา 23 กันยายน 2558. เล่มที่ 132 ตอนพิเศษ 229 ง.
- [2] กระทรวงแรงงาน. กฎกระทรวงกำหนดมาตรฐานในการบริหาร จัดการ และดำเนินการด้านความปลอดภัย อาชีวอนามัย และสภาพแวดล้อมในการทำงานเกี่ยวกับสารเคมีอันตราย. ราชกิจจานุเบกษา 29 พฤศจิกายน 2556. เล่มที่ 130 ตอนที่ 113 ก.
- [3] ห้องแลปคู่สัตว์ปทุมธานีวัด เสียวหาย 20 ล้านบาท [ออนไลน์]. [อ้างถึงวันที่ 8 มีนาคม 2564]. เข้าถึงจาก : <http://www.thairath.co.th/content/187789>
- [4] มจร. แก๊สระเบิด แค่หลอดทดลองแตกจากแรงดัน ชั่ว นศ.ประมาท ยันเข้มงวดเซฟตี้ [ออนไลน์]. [อ้างถึงวันที่ 8 มีนาคม 2564]. เข้าถึงจาก : <https://mgronline.com/qol/detail/9570000130444>
- [5] Memorial wall-Killed in lab accidents. Laboratory Safety Institute. [online]. [viewed 8 March 2021]. Available from : <https://www.labsafety.org/memorial%20wall>
- [6] คู่มือปฏิบัติงานด้านความปลอดภัยห้องปฏิบัติการกรมวิทยาศาสตร์บริการ [ออนไลน์]. [อ้างถึงวันที่ 8 มีนาคม 2564]. เข้าถึงจาก : <https://www.dss.go.th/images/ohm/lab-safety.pdf>
- [7] MERCK. [online]. [viewed 9 March 2021]. Available from : <https://www.sigmaaldrich.com/singapore.html>
- [8] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง ระบบการจำแนกและการสื่อสารความเป็นอันตรายของวัตถุอันตราย พ.ศ. 2555. ราชกิจจานุเบกษา 12 มีนาคม 2555. เล่มที่ 129 ตอนพิเศษ 48 ง.
- [9] Hierarchy of controls [online]. [viewed 9 March 2021]. Available from : <https://www.cdc.gov/niosh/topics/hierarchy/>
- [10] Chapter III. Laboratory Chemical Hygiene [online]. [viewed 6 April 2021] Available from: <https://extranet.fredhutch.org/en/u/ehs/hamm/chap3.html>
- [11] ประไพพิศ แจ่มสุกใส เทอร์โน. เอกสารประกอบการฝึกอบรมหลักสูตร การออกแบบห้องปฏิบัติการเคมีเพื่อความปลอดภัย วันที่ 29 – 30 เมษายน 2557 ณ สำนักพัฒนาศักยภาพนักวิทยาศาสตร์ห้องปฏิบัติการ กรมวิทยาศาสตร์บริการ. กรุงเทพฯ : กรม, 2557.
- [12] My green lab [online]. [viewed 20 March 2020]. Available from: <http://www.mygreenlab.org/>
- [13] Penn Sustainability [online]. [viewed 5 April 2021] Available from: <https://www.sustainability.upenn.edu/>
- [14] Labs21 Environmental Performance Criteria 3.0 [online]. [viewed 5 April 2021]. Available from: https://www.i2sl.org/documents/toolkit/epc_3-0_508.pdf

การตรวจวัดบิสฟีนอลเอไดโกลซิดิลอีเธอร์ บิสฟีนอลเอฟไดโกลซิดิลอีเธอร์ โนโวลแลคไดโกลซิดิลอีเธอร์และอนุพันธ์ในปลากระป๋องโดยเทคนิคแมทริกซ์โซลิดดิสเพอร์ชันและอัลตราไฮเพอร์ฟอร์แมนซ์ลิกวิด โครมาโทกราฟี-แทนเดมแมสสเปกโตรเมตรี

Simultaneous determination of bisphenol A diglycidyl ether, bisphenol F diglycidyl ether, novolac glycidyl ether and their derivatives in canned fishes by matrix solid dispersion with ultra high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry

จุฑาทิพย์ ลาภวิบูลย์สุข^{1**}, สมภพ ลาภวิบูลย์สุข^{1*}

Jutathip Lapviboonsuk^{1**}, Sompop Lapviboonsuk^{1*}

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาการตรวจวัดปริมาณสารมอนอเมอร์ทั้งหมด 13 ชนิด ได้แก่ บิสฟีนอลเอไดโกลซิดิลอีเธอร์ (BADGE) บิสฟีนอลเอฟไดโกลซิดิลอีเธอร์ (BFDGE) โนโวลแลคไดโกลซิดิลอีเธอร์ (NOGE 3-6 ring) และอนุพันธ์ (BADGE·H₂O, BADGE·2H₂O, BADGE·HCl, BADGE·2HCl, BADGE·H₂O·HCl, BFDGE·2H₂O and BFDGE·2HCl) ในอาหารกระป๋อง โดยใช้เทคนิคลิกวิด โครมาโทกราฟี-แทนเดมแมสสเปกโตรเมตรี (LC-MS/MS) และแมทริกซ์โซลิดดิสเพอร์ชันที่รู้จักในชื่อว่า QuEChERS ทั้งนี้ได้ศึกษาและตรวจสอบความใช้ได้เพื่อให้ได้วิธีที่มีความน่าเชื่อถือสำหรับตรวจวัดปริมาณ โดยการตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีดำเนินการตาม Eurachem Guide: 2014 โดยเติมสารละลายมาตรฐานที่ความเข้มข้น 5 ระดับ (0.025, 0.50, 1.00, 9.00 และ 18.0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ค่าร้อยละกลับคืนมีค่าอยู่ในช่วง 60.8 ถึง 114.2% ที่ 0.025 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม, 81.2 ถึง 109.3% ที่ 0.50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม, 80.1 ถึง 109.2% ที่ 1.00 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม, 83.7 ถึง 110.0% ที่ 9.00 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และ 84.6 ถึง 109.1% ที่ 18.0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมและได้ค่าการทำซ้ำที่ดี (ร้อยละส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานประมาณ 1.13 ถึง 19.5) โดยมีค่าขีดจำกัดของการตรวจพบเท่ากับ 0.010 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมสำหรับมอนอเมอร์แต่ละชนิด และขีดจำกัดของการหาปริมาณมีค่าเท่ากันสำหรับทุกชนิด เท่ากับ 0.025 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม กราฟมาตรฐานมีความเป็นเส้นตรงสูงถึง 1000 ไมโครกรัมต่อลิตรด้วยค่าสัมประสิทธิ์การกำหนดที่ดี (r^2) อยู่ในช่วงระหว่าง 0.9983 ถึง 0.9999

Abstract

A method was successfully developed for the simultaneous determination of thirteen monomers, *i.e.* bisphenol A diglycidyl ether (BADGE), bisphenol F diglycidyl ether (BFDGE), novolac glycidyl ether (NOGE 3-6 ring) and their derivatives (BADGE·H₂O, BADGE·2H₂O, BADGE·HCl, BADGE·2HCl, BADGE·H₂O·HCl, BFDGE·2H₂O and BFDGE·2HCl) in canned foods. Liquid chromatography with tandem mass spectrometry (LC-MS/MS) and matrix solid dispersion method known as QuEChERS were investigated and validated to obtain a reliable method for the application of concentration measurement. The method validation was performed according to Eurachem Guide: 2014 using fortified samples at five different concentration levels (0.025, 0.50, 1.00, 9.00 and 18.0 mg kg⁻¹). The extraction recoveries ranged from 60.8 to 114.2% at 0.025 mg kg⁻¹, 81.2 to 109.3% at 0.50 mg kg⁻¹, 80.1 to 109.2% at 1.00 mg kg⁻¹, 83.7 to 110.0% at 9.00 mg kg⁻¹ and 84.6 to 109.1% at 18.0 mg kg⁻¹ with good repeatability (%RSD $\approx$ 1.13-19.5). The limits of detection were 0.010 mg kg⁻¹ for all monomers, while the limits of quantitation were the same at 0.025 mg kg⁻¹ for all analytes. The calibration curves were provided linear up to 1000 μ g L⁻¹ with the excellent coefficient of determination (r^2) in the range 0.9983-0.9999.

¹ Department of Science Service

* e-mail address: lsompop@gmail.com

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

คำสำคัญ : บิสฟีนอลเอไดโกลซิดิลอีเธอร์ บิสฟีนอลเอฟไดโกลซิดิลอีเธอร์ โนโวลแลกไดโกลซิดิลอีเธอร์ อัลตราไฮเพอร์ฟอร์แมนซ์ลิกวิด โครมาโทกราฟี-แพนเดมแมสสเปกโตรเมตรี เมทริกซ์โซลิดดิสเพอร์ชัน อาหารกระป๋อง

Keywords : Bisphenol A diglycidyl ether, Bisphenol F diglycidyl ether, Novolac glycidyl ether, Ultra-high-performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry, Matrix solid dispersion, Canned fish, QuEChERS

1. Introduction

Food safety is increasingly concerned about public human health that affects food production worldwide [1, 2]. Food contaminants occur from raw materials and packaging involving in every step of production. Food contact materials (FCMs) are widely used for food manufacturing and a potential source of toxic substances migrating into foods. Therefore FCMs, *i.e.* metal cans have been controlled to prevent and avoid risks to health problems. Even though interior can coatings will deter interaction between food components and metals, they may release chemical substances, *e.g.* bisphenol A diglycidyl ether (BADGE), bisphenol F diglycidyl ether (BFDGE) and novolac glycidyl ether (NOGE) into foodstuffs when the coating would not be produced in good quality. It must not be only a poor quality coating, but also the characteristics of the foodstuff (pH, acid, base) can cause the monomers to migrate out of the coating. Moreover, during storage these monomers can migrate and react with food contents, *i.e.* water and hydrochloric acid to form hydrolyzed and chlorinated products such as $\text{BADGE} \cdot \text{H}_2\text{O}$, $\text{BADGE} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{BADGE} \cdot \text{HCl}$, $\text{BADGE} \cdot 2\text{HCl}$, $\text{BADGE} \cdot \text{H}_2\text{O} \cdot \text{HCl}$, $\text{BFDGE} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ and $\text{BFDGE} \cdot 2\text{HCl}$ [3]. These low molecular weight compounds ($< 1\,000$ Da) are absorbed in the gastrointestinal tract and suspected to harm to human health. Although recent available data of BADGE and hydrolyzed products are compiled with a lack of carcinogenicity and genotoxicity, the data of chlorinated products are not available on

genotoxicity. However, BADGE and derivatives have been recently revealed the cytotoxicity in human placental cells and show an effect on placental lipids and CYP19 activity. Since the researchers have found that the accumulation in blood [4] and food sensitization in young children [5], BADGEs and bisphenol analogs would be a raised concern for human exposure. Therefore, the EU Commission restricts the use of these compounds. According to EC No. 1895/2005 [6], the sum of BADGE and hydrolyzed products shall not exceed 9 mg kg^{-1} food or food simulants. The sum of chlorinated products shall not exceed 1 mg kg^{-1} food or food simulants. NOGE and BFDGE shall not allow use in food contact materials. For law enforcement, the analytical method which plays an important role consist of sample preparation and measurement steps. The reliable techniques are required to fulfill this need [7].

The food simulants have been applied for the safety assessments of these compounds contaminated in foods; therefore, early research focused on the extraction of BADGE and its derivatives into the water, ethanol, acetic acid, and oil as migration testing [8-10]. The determination of these compounds in real foods will be a better representative of risk assessments to human health; although it requires multiple steps and complicated analytical methods as revealed in many previous publications of researches [3, 11-17]. The HPLC-FLD provided a very low detection limit at $0.01\text{-}4.20\text{ ng g}^{-1}$ owing to good sensitivity with a fluorescent detector, but it still limited only BADGE, BFDGE and their derivatives [18, 19]. However, NOGE also involved in the safety issue of can coating. In another research, ultrasound-assisted solvent extraction of porous membrane-packed sample and LC-MS/MS was published and obtained good recoveries and low

LOQ of 0.8-1.5 ng g⁻¹ in canned vegetables [20]. Although several researches showed very low detectable LOD and LOQ, these techniques such as membrane required longer time for equilibrium that would be a critical point of sample preparation and lead to an error [20]. The matrix-matched calibration was applied that would cause more complicate and re-create several calibrations to match with different kinds of matrix [21]. Nowadays, the standard methods of these compounds are published in 2 methods as following BS EN 15136: 2006 for BADGE, BFDGE and their derivatives and BS EN 15137: 2006 for NOGE and its derivatives. These standard methods provide accurate results, but they have the deficit of using simple HPLC techniques and run times of 85 min per injection. Liquid chromatography coupled with tandem mass spectrometry (LC-MS/MS) has been applied to gain the advantages of shorter run time and simultaneous method for all analytes. The sample preparation step is also important for measurement. The matrix solid dispersion or QuEChERS (Quick, Easy, Cheap, Effective, Rugged and Safe) method has become popular and is widely applied as a sample preparation technique for pesticide determination in fruits and vegetables [22]. This technique was investigated and revealed to seek out the sample preparation method which obtains less labor, time and solvent consumption for LC-MS/MS technique [23].

This study aimed to investigate and validate fast sample preparation and simultaneous method for determination of BADGE, BFDGE, NOGE and their derivatives, as well as the benefit of confidential technique with good accuracy and precision. Moreover, the developed method would be proved and met the requirement of ISO/IEC 17025: 2017.

2. Experimental methods

2.1 Materials and reagents

Magnesium sulfate anhydrous (MgSO₄), sodium phosphate monobasic (NaH₂PO₄•H₂O or NaPhosphate), sodium acetate anhydrous (CH₃COONa or NaOAc), tri-sodium citrate dihydrate (C₆H₅Na₃O₇•2H₂O or NaCitrate), ammonium acetate (CH₃COONH₄ or NH₄OAc), di-ammonium hydrogen citrate (C₆H₈O₇•2NH₃ or NH₄Citrate), and sodium chloride (NaCl), analytical grade, were purchased from Merck (Darmstadt, Germany) as well as formic acid for the pH adjustment of buffer solution as mobile phase (MP). Ammonium formate was supplied by Sigma-Aldrich (Buchs, Switzerland) for MP preparation. Methanol and acetonitrile, gradient grade for liquid chromatography, was also supplied by Merck. HPLC water was obtained from a Milli-Q water system (Millipore, Billerica, MA, USA) at 18.2 MΩ•cm. Octadecylsilane (C18) was purchased from Waters (Milford, MA, USA), as well as a 0.2 μm polytetrafluoroethylene (PTFE) syringe filter.

Nitrogen (purity ~ 95.0-99.5%) was supplied by Agilent nitrogen generator (USA) for an electrospray ionization source (ESI). Ultra-high-purity nitrogen (N₂) was purchased from Lab Solution and Engineering Co., Ltd. (Nonthaburi, Thailand) for a collision-induced gas (CID gas).

2.2 Standards

Bisphenol A diglycidyl ether (BADGE, CAS No. 1675-54-3, ≥95%), bisphenol A (2,3-dihydroxypropyl) glycidyl ether (BADGE-H₂O, CAS No. 76002-91-0, ≥95%), bisphenol A bis(2,3-dihydroxypropyl) ether (BADGE•2H₂O, CAS No. 5581-32-8, ≥97%), bisphenol A (3-chloro-2-hydroxypropyl) glycidyl ether (BADGE-HCl, CAS No. 13836-48-1, ≥90%), bisphenol A bis(3-chloro-2-hydroxypropyl) ether

(BADGE·2HCl, CAS No. 4809-35-2, $\geq 97\%$), bisphenol A (3-chloro-2-hydroxypropyl) (2,3-dihydroxypropyl) ether (BADGE·H₂O·HCl, CAS No. 227947-06-0, $\geq 95\%$), bisphenol F diglycidyl ether (BFDGE, CAS No. 2095-03-6), bisphenol F bis(2,3-dihydroxypropyl) ether (BFDGE·2H₂O, CAS No. 72406-26-9, $\geq 95\%$), bisphenol F bis(3-chloro-2-hydroxypropyl) ether (BFDGE·2HCl, Product No. 15139, $\geq 90\%$), novolac glycidyl ether (3-Ring NOGE mixtures of isomers, CAS No. 158163-01-0, $\geq 90\%$), (4-Ring NOGE mixtures of isomers, chain-like or branched, Product No. 04976, $\geq 90\%$), (5-Ring NOGE mixtures of isomers, chain-like or branched, Product No. 12109, $\geq 90\%$) and (6-Ring NOGE mixtures of isomers, chain-like or branched, Product No. 30977, $\geq 80\%$) were purchased from Sigma-Aldrich (Buchs, Switzerland).

2.3 Instrumentation and LC-MS/MS conditions

The LC-MS/MS system consisted of an Agilent Technologies 1290 Infinity LC separation module and an Agilent Technologies 6460 Triple Quad LC/MS System. The column was a Zorbax Eclipse Plus-C18 (2.1 × 50 mm; 1.8 μm) with a Zorbax Eclipse Plus-C18 (2.1 × 12.5 mm; 1.8 μm) as a guard-column (Agilent Technologies) operated at 40 °C. The injection volume was 3 μL . Elution conditions were developed to successfully determine all analytes in simultaneous method [23]. Methanol and 25 mM of ammonium formate at pH 3 were applied as mobile phase with gradient elution at a flow rate of 0.4 mL min⁻¹. The gradient condition was shown in below:

Table 1. LC gradient condition

Time (min)	25 mM Ammonium formate (pH 3) (%)	Methanol (%)
0	55	45
1	50	50
3	30	70
9	10	90
9.5	0	100
10	55	45
12	55	45

The LC system was coupled with a triple quadrupole MS system equipped with an electrospray ionization source (ESI) in positive mode. Nitrogen was used as a sheath and collision gas. The ESI conditions were set as follows: gas temperature at 320 °C, gas flow at 8 L min⁻¹, nebulizer at 45 psi, sheath gas heater at 350 °C, sheath gas flow at 11 L min⁻¹ and capillary at 4000 V. The scan segments for each compound and ammonium adducts [M+NH₄]⁺ used as precursor ions are shown in Table 2.

Table 2. Optimized conditions of mass spectrometry for determination of BADGE, BFDGE, NOGE and derivatives.

Compound Name	Precursor Ion	Product Ion 1	Product Ion 2	Dwell	Fragment (V)	Collision Energy (V)	Cell Accelerator (V)
BADGE	358.2	191.1	135.1	30	100	9	4
BADGE•2HCl	430.2	227.0	135.0	30	100	6	4
BADGE•H ₂ O•HCl	412.3	227.0	135.0	30	100	9	4
BADGE•HCl	394.2	227.0	135.0	30	100	6	4
BADGE•2H ₂ O	394.2	209.2	135.1	30	108	12	4
BADGE•H ₂ O	376.2	209.2	135.1	30	108	8	4
BFDGE	330.2	163.2	133.0	30	100	8	4
BFDGE•2HCl	403.3	386.3	198.8	30	100	4	4
BFDGE•2H ₂ O	366.4	349.2	181.1	30	80	4	4
NOGE 3 ring	492.2	325.3	145.0	30	110	8	4
NOGE 4 ring	654.3	163.2	106.9	30	140	23	4
NOGE 5 ring	816.3	325.0	162.8	30	160	25	4
NOGE 6 ring	978.0	162.9	107.0	30	216	36	4

2.4 Samples

Tuna samples were fully uncanned, pre-cooked and selected to minimize the contamination of BADGE, BFDGE, NOGE and their derivatives from the coating of metal can. The tuna was homogenized and mixed with some ingredients, *i.e.* water, salt and oil to obtain the tuna in oil matrix. The ratio of added ingredients was the same as sold in local markets in Thailand. The tuna samples were prepared by adding pre-cooked tuna (75%), deionized water (9.78%), salt (0.5%) and sunflower oil (14.7%). For the study of extraction conditions, the tuna samples were fortified at 0.50 mg kg⁻¹ and analyzed in triplicate. For method validation, the tuna samples were fortified at five levels (0.025, 0.50, 1.00, 9.00 and 18.0 mg kg⁻¹) in ten replicates per each concentration level including blank sample with no additional standard.

2.5 Sample preparation as matrix solid dispersion or QuEChERS method

The sample extraction was performed following the modified QuEChERS method [23]. The homogenized tuna samples in matrices were prepared by using a DIAX 900 (Heidolph, Schwabach, Germany). A sub-sample of 10 ± 0.01 g was weighed into a 50 mL centrifuge tube and added 10 mL of acetonitrile to extract for 1 min. The sample was added with 1 ± 0.05 g of NaCl and 4 ± 0.20 g of MgSO_4 and then vigorously shaken for 1 min. The mixture was centrifuged using a Biofuge Stratos (Heraeus Instruments, Newtown, CT, USA) for 5 min at 3000 rpm. Two mL of acetonitrile solution was transferred and shaken with the mixture of 50 mg C18 and 300 mg MgSO_4 for 30 sec. To separate the sorbents, the mixture was centrifuged again for 5 min at 3000 rpm. The extracted solution was filtered before injection to LC-MS/MS system.

2.6 Correction factors of matrix effect

Since mass spectrometry have been faced the problem of matrix interferences, matrix effect was investigated through the standard addition method [24-26]. Analytes were spiked in the sample with none-interested compound before extraction, therefore matrix effects contributed to mass response. This experiment is applied to compensate any signal and interference error during the measurement step due to the lack of isotope-labeled internal standard. The correction factor (MEF) was calculated from the ratio of standard | concentration in the matrix sample and pure standard. The equation is as following:

$$\text{MEF} = \frac{C_M}{C_P} \quad (1)$$

where C_M and C_P are the concentrations of standards in matrix samples and pure standards, respectively.

2.7 Calibration curves

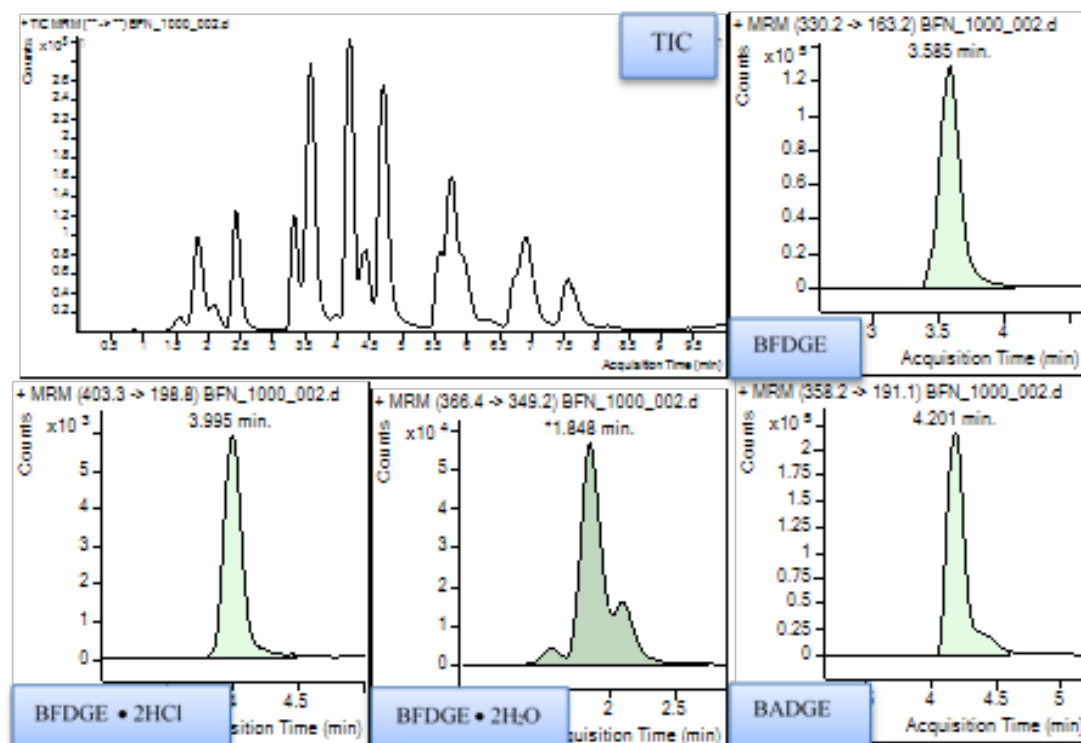
The 500 mg L^{-1} of standard solutions for BADGE, BFDGE and their derivatives were individually prepared in acetonitrile and stored at -20°C as well as the 1000 mg L^{-1} for NOGE and its derivatives. At this storage temperature provided high stability according to the study of Szczepańska et al [27]. The stock solutions were diluted by acetonitrile to obtain six concentration levels of 10, 25, 50, 100, 500 and 1000 $\mu\text{g L}^{-1}$. All calibration solutions were daily prepared and linearity was investigated in triplicate analysis.

3. Results and discussion

3.1 Optimization of LC-MS/MS conditions

The LC-MS/MS was evaluated to obtain a fast and simultaneous method for determination of BADGE, BFDGE, NOGE and their derivatives. The scan segments and source parameters were optimized to gain best sensitivity for measurement. In previous study, several kinds, compositions and flow rates of mobile phase were investigated; for example, acetic acid-sodium acetate at pH 3, formic acid-water at pH 3, formic acid-ammonium formate at pH 3, methanol and acetonitrile as well as injection volume [23]. As a result the use of methanol and ammonium formate provided the best signal. Additionally the concentrations (10, 25, 40 and 55 mM) and pH (3.00, 3.50, 3.75 and 4.00) of ammonium formate were also studied and the best condition was 25 mM and pH 3 [23]. In varied pH, the peak area provided two time higher at pH 3.00 but the lower signal obtained at the highest pH 4.00. In acid

condition, these compounds could form hydronium, sodium and ammonium adducts, but these required the sufficiency of sodium and ammonium ions from the buffer solutions. The different concentrations of ammonium formate were also investigated and found that only peak areas were slightly changed with variation of 10 to 55 mM and peak shapes were similar for all conditions. The ammonium adducts of these compounds provided the best signal; therefore, in this study, the 25 mM ammonium formate at pH 3: methanol was selected because of the highest responses in electrospray. This mobile phase condition was applied in this study; moreover, these results had the same trends with previous publication [17]. The extracted-ion chromatogram of 1000 $\mu\text{g L}^{-1}$ mix-standard solution was developed by using optimized condition as illustrated in Figure 1. In the chromatogram, some peaks of analytes were not fully separated due to varied isomers of each compound [28, 29]. The injection volume has related to ratio of water and organic solvent for the dilution of extracted sample. When higher volume of water was applied, the larger injection volume could be used. However, in this study, the sensitivities of all analytes were satisfied with a 3 μL injection volume and acetonitrile used. This condition provided the benefits of less analysis time from the additional step of sample preparation, solvent consumption and no need of additional instrument for evaporation to reconstitute into other solvents, e.g. methanol:water (1:1) or acetonitrile: water (1:1) etc.



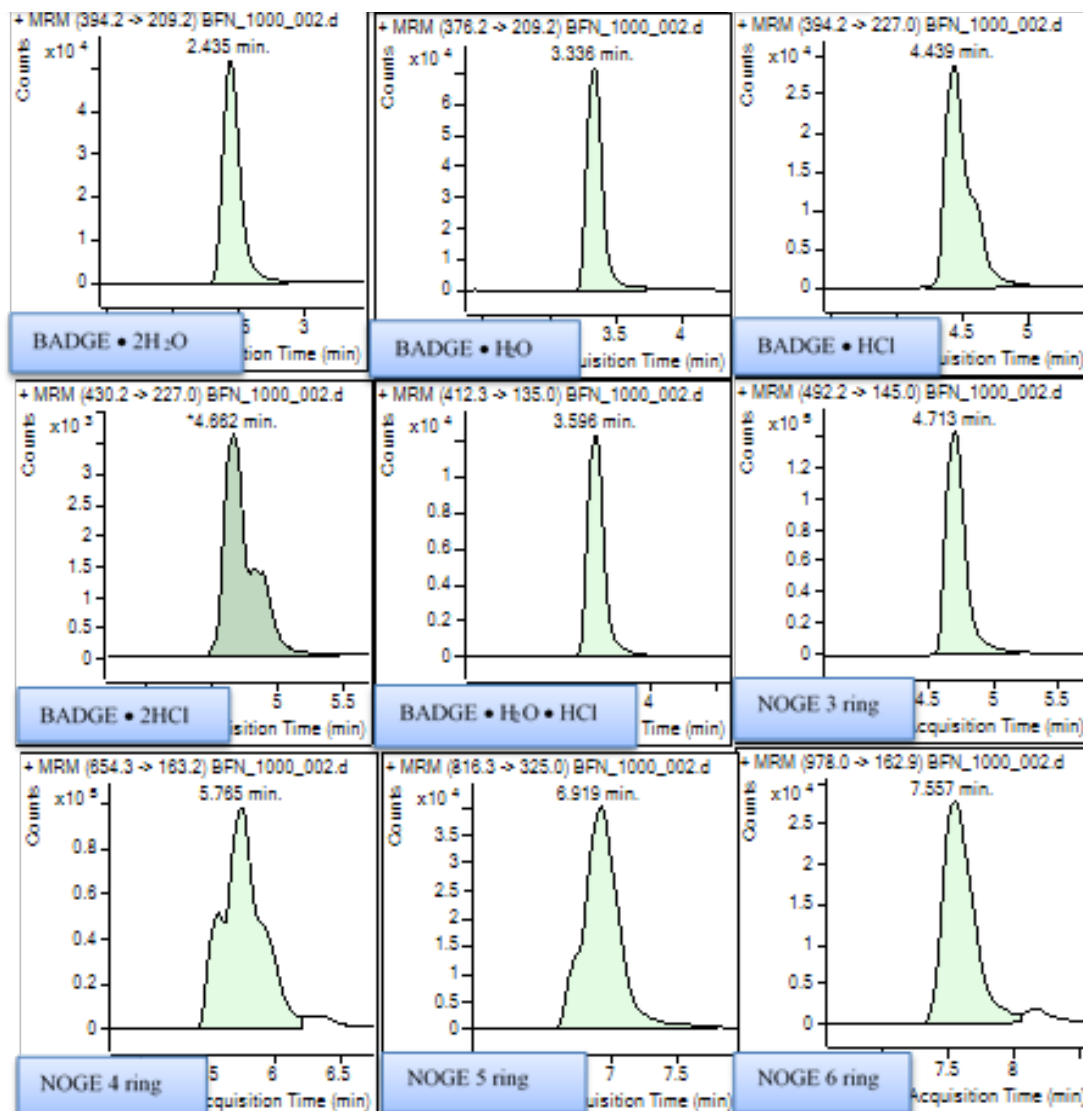


Figure 1 : The total ion chromatogram (TIC) and extracted-ion chromatogram of 1000 $\mu\text{g L}^{-1}$ mixed standard solution (BADGE, BFDGE, NOGE and their derivatives): BADGE, BFDGE, NOGE, BADGE•H₂O, BADGE•2H₂O, BADGE•HCl, BADGE•2HCl, BADGE•H₂O•HCl, BFDGE•2H₂O, BFDGE•2HCl, NOGE 3 ring, NOGE 4 ring, NOGE 5 ring, NOGE 6 ring.

3.2 Optimization of extraction conditions

The previous study was investigated QuEChERS method by varying inducers and sorbents in order to obtain successful phase separations, minimized interferences and also provide good accuracy and precision [23]. Each inducer, i.e. NaPhosphate, NaOAc, NaCitrate, NH_4OAc and NH_4 Citrate, was added to replace NaCl after extraction with acetonitrile; due to different pH and water absorption, the triplicated average of recoveries were also different for each inducer. The use of NaCl, NaOAc, NH_4OAc and NH_4 Citrate gave the percentages of recoveries in the acceptable range (81.1 to 112.2%) for all analytes, while NaCitrate and NaPhosphate provided relatively low recoveries for NOGE 6 ring (65.3% for NaCitrate and 59.4% for NaPhosphate). Therefore, NaCl was selected because of low cost and safety. Each sorbent, i.e. PSA, C18, combination of PSA and C18, was studied because their properties could absorb fat and oil for C18 and amino acid for PSA; therefore, they were applied during the cleanup step to reduce co-extraction [30, 31]. However, the use of C18 and the combination of PSA and C18 showed non-significant difference using two-tailed t-test at a 95% confidence level; hence, only C18 was used as sorbent for method validation.

3.3 Matrix effect

Matrix effect was investigated through the standard addition method. Analytes were spiked in the sample before extraction, hence both recovery and matrix effects contributed to mass response. The tuna samples were selected to be the representative of canned fishes, since there is large consumption in Thailand. The responses were compared between pure standard calibrations and matrix-matched calibrations, using a two-tailed t-test <http://bas.dss.go.th>

at a 95% confidence level. These results indicated significant differences ($P < 0.05$) for all compounds; therefore, the correction of matrix effect was required to compensate for the difference of detector responses between pure standards and matrix samples from food components, e.g. protein, fat and water content etc. The ratio of matrix effect (MEF) was applied to compensate any errors during measurement steps such as ionization efficiency in the liquid phase and gas phase. The higher inferences would affect to the formation of evaporation in gas phase and reduce ionization efficiency; hence, it provided low response in detector and also cause the false negative of ion suppression. Since the previous study was required to use the standard addition technique for calculating the amount of analytes, MEF ratio with the pure standard calibration was employed to solve this problem and also gain accurate, precise, while less work with the correction factor and with that a great optimization of the sample throughput.

3.4 Method validation

The performances of this developed method were revealed in relation to linearity, accuracy, precision, instrument detection limit (IDL), limit of detection (LOD) and limit of quantification (LOQ). The sample blanks were analyzed in ten replicates to investigate contaminants from itself and determine the LOD and LOQ. The linear regression of six calibration levels were studied using relationships between analytes' concentrations and peak areas, as shown in Table 3. The coefficients of determination (r^2) were better than 0.9983 for all compounds; hence, good linearities were obtained from 25 to 1 000 $\mu\text{g L}^{-1}$. Accuracy and precision were performed at five concentration levels (0.025, 0.50, 1.00, 9.00 and 18.0 mg kg^{-1} , as considering at a regulation

limit and two times) and ten replicates per level. Accuracy was expressed as recoveries and ranged from 60.8 to 114.2% at 0.025 mg kg⁻¹, 81.2 to 109.3% at 0.50 mg kg⁻¹, 80.1 to 109.2% at 1.00 mg kg⁻¹, 83.7 to 110.0% at 9.00 mg kg⁻¹ and 84.6 to 109.1% at 18.0 mg kg⁻¹ for all monomers. The details were shown in Table 4. Precision was expressed as relative standard deviation (RSD), and ranged from 5.07 to 23.1% at 0.025 mg kg⁻¹, 4.07 to 9.74% at 0.50 mg kg⁻¹, 1.62 to 8.57% at 1.00 mg kg⁻¹, 4.59 to 10.7% at 9.00 mg kg⁻¹ and 3.69 to 9.36% at 18.0 mg kg⁻¹ for all analytes. All recoveries and RSDs were in the acceptable ranges. The LOD and LOQ were calculated from three and ten times of the standard deviation of results at 0.025 mg kg⁻¹ (near zero concentration as mentioned in Eurachem Guide) [32]. The IDL was investigated by using pure standards that were injected into LC-MS/MS and obtained low detection limit at part-per-billion (ppb) level. All performance details were shown in Table 3 and 4.

Table 3. Analytical method performance for thirteen monomers, i.e. BADGE, BFDGE, NOGE and their derivatives.

Analyte	Coefficient of determination (r^2)	Instrument Detection Limit (IDL) ($\mu\text{g L}^{-1}$)	Limit of Detection (LOD) (mg kg ⁻¹)	Limit of Quantitation (LOQ) (mg kg ⁻¹)
BADGE	1.0000	0.5	0.010	0.025
BADGE•H ₂ O	0.9998	1.0	0.010	0.025
BADGE•2H ₂ O	0.9993	5.0	0.010	0.025
BADGE•HCl	0.9991	0.5	0.010	0.025
BADGE•2HCl	0.9993	1.0	0.010	0.025
BADGE•H ₂ O•HCl	0.9998	0.5	0.010	0.025
BFDGE	0.9998	1.0	0.010	0.025
BFDGE•2H ₂ O	0.9992	10.0	0.010	0.025
BFDGE•2HCl	0.9983	1.0	0.010	0.025
NOGE•3ring	0.9999	0.5	0.010	0.025
NOGE•4ring	0.9997	0.5	0.010	0.025
NOGE•5ring	0.9985	2.5	0.010	0.025
NOGE•6ring	0.9984	2.5	0.010	0.025

Table 4. Extraction recoveries at five level concentrations (0.025, 0.50, 1.00, 9.00 and 18.0 mg kg⁻¹) for thirteen monomers, i.e. BADGE, BFDGE, NOGE and their derivatives.

Analyte	Recovery, % (average $\pm$ SD)				
	0.025 mg kg ⁻¹	0.50 mg kg ⁻¹	1.00 mg kg ⁻¹	9.00 mg kg ⁻¹	18.0 mg kg ⁻¹
BADGE	87.32 $\pm$ 9.44	100.14 $\pm$ 4.06	102.50 $\pm$ 1.98	102.86 $\pm$ 5.86	100.46 $\pm$ 3.11
BADGE•H ₂ O	82.90 $\pm$ 4.86	95.37 $\pm$ 5.08	103.23 $\pm$ 2.68	101.96 $\pm$ 6.02	98.92 $\pm$ 1.06
BADGE•2H ₂ O	80.18 $\pm$ 18.60	97.02 $\pm$ 3.94	103.63 $\pm$ 3.40	98.88 $\pm$ 5.77	96.22 $\pm$ 3.50
BADGE•HCl	82.00 $\pm$ 13.08	99.48 $\pm$ 5.89	100.99 $\pm$ 1.76	100.07 $\pm$ 7.79	102.81 $\pm$ 3.19
BADGE•2HCl	93.06 $\pm$ 12.25	97.52 $\pm$ 7.65	103.02 $\pm$ 3.02	100.15 $\pm$ 9.10	101.21 $\pm$ 9.32
BADGE•H ₂ O•HCl	78.11 $\pm$ 6.23	97.05 $\pm$ 4.98	98.83 $\pm$ 4.80	97.82 $\pm$ 5.91	97.2 $\pm$ 5.28
BFDGE	92.93 $\pm$ 4.65	99.21 $\pm$ 3.51	104.80 $\pm$ 1.68	102.96 $\pm$ 5.59	103.48 $\pm$ 6.10
BFDGE•2H ₂ O	74.29 $\pm$ 11.89	97.19 $\pm$ 6.71	100.94 $\pm$ 4.70	97.45 $\pm$ 6.00	97.72 $\pm$ 3.65
BFDGE•2HCl	85.84 $\pm$ 14.96	95.03 $\pm$ 8.79	100.04 $\pm$ 3.91	94.19 $\pm$ 8.72	93.06 $\pm$ 6.69
NOGE•3ring	87.17 $\pm$ 7.92	100.46 $\pm$ 5.34	100.66 $\pm$ 8.64	104.11 $\pm$ 5.23	102.93 $\pm$ 4.72
NOGE•4ring	81.97 $\pm$ 8.44	92.63 $\pm$ 9.01	98.38 $\pm$ 5.94	101.30 $\pm$ 5.62	101.15 $\pm$ 4.43
NOGE•5ring	78.33 $\pm$ 7.20	91.68 $\pm$ 8.01	98.16 $\pm$ 5.61	100.85 $\pm$ 5.70	100.34 $\pm$ 1.96
NOGE•6ring	84.87 $\pm$ 13.07	95.72 $\pm$ 7.05	95.75 $\pm$ 6.28	102.79 $\pm$ 5.48	103.05 $\pm$ 6.64

Robustness was also investigated following EUR 24105 EN (Table 5) [33]. These results showed non-significant differences using a two-tailed t-test at a 95% confidence level. Thus, the developed method was suitable to determine thirteen compounds of BADGE, BFDGE, NOGE and their derivatives.

Table 5. Experiment sets of robustness by varying seven parameters, i.e. NaCl, $MgSO_4$, ACN, weight, C18, PSA and $MgSO_4$ for cleanup step.

Parameters		Experimental sets							
Developed method (+)	Varied condition (-)	1	2	3	4	5	6	7	8
A) NaCl 1 g	a) NaCl 3 g	+	+	+	+	-	-	-	-
B) $MgSO_4$ 4 g	b) $MgSO_4$ 6 g	+	+	-	-	+	+	-	-
C) ACN 10 mL	c) ACN 15 mL	+	-	+	-	+	-	+	-
D) weight 10 g	d) weight 5 g	+	+	-	-	-	-	+	+
E) C18 25 mg mL ⁻¹	e) C18 50 mg mL ⁻¹	+	-	+	-	-	+	-	+
F) PSA 0 mg mL ⁻¹	f) PSA 25 mg mL ⁻¹	+	-	-	+	+	-	-	+
G) $MgSO_4$ 150 mg mL ⁻¹	g) $MgSO_4$ 300 mg mL ⁻¹	+	-	-	+	-	+	+	-

3.5 Sample analysis

The developed method was applied to the canned foods purchased from local markets in Thailand. The several food matrices were performed, for example, tuna in oil, tuna in brine, tuna in mineral water, mackerel in tomato sauce, sardine in tomato sauce and tuna in mayonnaise etc. The concentrations were found as shown in Table 6 and revealed the suitability of this developed method in the analysts of canned food and complying to regulatory limit [6]. The quality control was also performed by using triplicate, recovery and precision that fell in acceptable range. In comparison with other methods [20], the LOD and LOQ of this study were a little higher than the performance in vegetable products due to fat and oil in fish canned food. However, there were various ranges of LOD and LOQ either fish and vegetable canned food [3, 13-17, 19, 23], Sun et al. gave the similar limit of this research [15]. The BADGE was found in below detectable concentration, which may cause from its transformation in food matrix during long period of storage.

Table 6. Average concentrations (mg kg⁻¹) of BADGE, BFDGE, NOGE and their derivatives in canned foods.

Sample No.	Average concentrations (mg kg ⁻¹)												
	BADGE	BADGE-H ₂ O	BADGE-2H ₂ O	BADGE-HCl	BADGE-2HCl	BADGE-H ₂ O-HCl	BFDGE	BFDGE-2H ₂ O	BFDGE-2HCl	NOGE 3 ring	NOGE 4 ring	NOGE 5 ring	NOGE 6 ring
1	n.d.	n.d.	0.86	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
2	n.d.	n.d.	0.32	n.d.	0.03	0.03	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
3	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
4	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
5	n.d.	n.d.	0.72	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
6	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
7	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
8	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
9	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.63	0.05	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
10	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.07	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
11	n.d.	n.d.	0.20	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
12	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.03	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
13	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.

n.d.: not detected. The sample details were 1) Mackerel in tomato sauce: brand A, 2) Sardines in tomato sauce, 3) Sandwich tuna in brine, 4) Salmon spread, 5) Sardines in tomato sauce, 6) Mackerel in tomato sauce: brand C, 7) Tuna green curry, 8) Tuna nam prik pad, 9) Tuna in soybean oil (Tuna sandwich), 10) Tuna in spring water (Tuna sandwich), 11) Mackerel in tomato sauce: brand D, 12) Tuna in brine tuna steak and 13) Tuna in mayonnaise.

4. Conclusion

The reliable method was investigated to simultaneously determine BADGE, BFDGE, NOGE and their derivatives in canned fish. The matrix solid dispersion or QuEChERS method and LC-MS/MS was successfully applied with high efficiency which was validated and obtained good accuracy and precision with the pure standard calibration. The MEF was also applied and gained more accurate and compensate any error during measurement step. This method also provided the benefits of low LOD and LOQ in 0.010 mg kg⁻¹ and 0.025 mg kg⁻¹, confirmation using specific ratio of precursors and product ions, less time, labor and expense, as well as complying with Commission Regulation (EC) No. 1895/2005.

5. Acknowledgement

This research was funded by Department of Science Service, Ministry of Higher Education, Science, Research and Innovation, Thailand.

6. References

- [1] VALERA-TARIFA, N.M., R. SANTIAGO-VALVERDE, E. HERNANDEZ-TORRES, J.L. MARTINEZ-VIDAL and A. GARRIDO-FRENICH. Development and full validation of a multiresidue method for the analysis of a wide range of pesticides in processed fruit by UHPLC-MS/MS. *Food Chemistry*. 2020, **315**, 126304.
- [2] FRITSCH, J. Recent developments and digital perspectives in food safety and authenticity. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2018, **66**(29), 7562-7567.
- [3] PETERSEN, H., A. SCHAEFER, C.A. BUCKOW, T.J. SIMAT and H. STEINHART. Determination of bisphenol A diglycidyl ether (BADGE) and its derivatives in food: identification and quantification by internal standard. *European Food Research and Technology*. 2003, **216**(4), 355-364.
- [4] Wang L, J. Xue and K. Kannan. Widespread occurrence and accumulation of bisphenol A diglycidyl ether (BADGE), bisphenol F diglycidyl ether (BFDGE) and their derivatives in human blood and adipose fat. *Environmental Science & Technology*. 2015, **49**(5), 3150-3157.
- [5] TSUJI, M., C. KORIYAMA, Y. ISHIHARA, C.F.A. VOGEL and T. KAWAMOTO. Association between bisphenol A diglycidyl ether-specific IgG in serum and food sensitization in young children. *European Journal of Medical Research*. 2018, **23**(1), 61.
- [6] Commission Regulation (EC) No 1895/2005 of 18 November 2005 on the restriction of use of certain epoxy derivatives in materials and articles intended to come into contact with food, (2005).
- [7] ROMERO-GONZALEZ, R. Food safety: how analytical chemists ensure it. *Analytical Methods*. 2015, **7**(17), 7193-7201.
- [8] MUNGUIA-LOPEZ, E.M. and H. SOTO-VALDEZ. Effect of heat processing and storage time on migration of bisphenol A (BPA) and bisphenol A diglycidyl Ether (BADGE) to aqueous food simulant from Mexican can coatings. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2001, **49**(8), 3666-3671.
- [9] POUSTKOVA, I., J. DOBIAS, I. STEINER, J. POUSTKA and M. VOLDRICH. Stability of bisphenol A diglycidyl ether and bisphenol F diglycidyl ether in water-based food simulants. *European Food Research & Technology*. 2004, **219**(5), 534-539.
- [10] UEMATSU, Y., HIRATA, K., SUZUKI, K., IIDA, K. and SAITO, K. Chlorohydrins of bisphenol A diglycidyl ether (BADGE) and of bisphenol F diglycidyl ether (BFDGE) in canned foods and ready-to-drink coffees from the Japanese market. *Food Additives and Contaminants*. 2001, **18**(2), 177-185.
- [11] SUMMERFIELD, W., A. GOODSON and I. COOPER. Survey of bisphenol A diglycidyl ether (BADGE) in canned foods. *Food Additives and Contaminants*. 1998, **15**(7), 818-830.
- [12] BILES, J.E., K.D. WHITE, T.P. MANEAL and T.H. BEGLEY. Determination of the diglycidyl ether of bisphenol A and its derivatives in canned foods. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 1999, **47**(5), 1965-1969.
- [13] ZHANG, H., M. XUE, Y. LU, Z. DAI and H. WANG. Microwave-assisted extraction for the simultaneous determination of novolac glycidyl ethers, bisphenol A diglycidyl ether, and its derivatives in canned food using HPLC with fluorescence detection. *Journal of Separation Science*. 2010, **33**(2), 235-243.
- [14] CASAJUANA, N. and S. LACORTE. New methodology for the determination of phthalate esters, bisphenol A, bisphenol A diglycidyl ether, and nonylphenol in commercial whole milk samples. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2004, **52**(12), 3702-3707.

- [15] SUN, C., L.P. LEONG, P.J. B ARLOW, S.H. CHAN and B.C. BLOODWORTH. Single laboratory validation of a method for the determination of bisphenol A, bisphenol A diglycidyl ether and its derivatives in canned foods by reversed-phase liquid chromatography. *Journal of Chromatography A*. 2006, **1129**(1), 145-148.
- [16] YONEKUBO, J., K. HAYAKAWA and K. SAJIKI. Concentrations of bisphenol A, bisphenol A diglycidyl ether, and their derivatives in canned foods in Japanese markets. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2008, **56**(6), 2041-2047.
- [17] GALLART-AYALA, H., E. MOYANA and M.T. GALLERAN. Fast liquid chromatography-tandem mass spectrometry for the analysis of bisphenol A-diglycidyl ether, bisphenol F-diglycidyl ether and their derivatives in canned food and beverages. *Journal of Chromatography A*. 2011, **1218**(12), 1603-1610.
- [18] GUO, M., M. HE, J. ZHONG, Q. HE, B.B. ISMAIL, G. CHEN and D. LIU. High-performance liquid chromatography (HPLC)-fluorescence method for determination of bisphenol A diglycidyl ether (BADGE) and its derivatives in canned foods. *Science of The Total Environment*. 2020, **710**, 134975.
- [19] LEEPIPATPIBOON, N., O. SAE-KHOW, S. JAYANTA. Simultaneous determination of bisphenol-A-diglycidyl ether, bisphenol-F-diglycidyl ether, and their derivatives in oil-in-water and aqueous-based canned foods by high-performance liquid chromatography with fluorescence detection. *Journal of Chromatography A*. 2005, **1073**(1), 331-339.
- [20] SZCZEPANSKA, N., P. KUBICA, J. PLOTKA-WASYLKA, B. KUDLAK and J. NAMIESNIK. Ultrasound assisted solvent extraction of porous membrane-packed samples followed by liquid chromatography-tandem mass spectrometry for determination of BADGE, BFDGE and their derivatives in packed vegetables. *Science of The Total Environment*. 2020, **708**, 135178.
- [21] ZOU, Y., S. LIN, S. CHEN and H. ZHANG. Determination of bisphenol A diglycidyl ether, novolac glycidyl ether and their derivatives migrated from can coatings into foodstuff by UPLC-MS/MS. *European Food Research & Technology*. 2012, **235**(2), 231-244.
- [22] ANASTASSIADES, M., S.J. LEHOTAY, D. STAJNBAHER and F.J. SCHENCK. Fast and easy multiresidue method employing acetonitrile extraction/partitioning and "dispersive solid-phase extraction" for the determination of pesticide residues in produce. *Journal of AOAC International*. 2003, **86**(2), 412-431.
- [23] LAPVIBOONSUK, J. *Method development for determination of momomers mrgated from food contact materials in canned foods*. Bangkok: Chulalongkorn University. 2014.
- [24] MATUSZEWSKI, B.K., M.L. CONSTANZER and C.M. CHAVEZ-ENG. Matrix effect in quantitative LC/MS/MS analyses of biological fluids: A method for determination of finasteride in human plasma at picogram per milliliter concentrations. *Analytical Chemistry*. 1998, **70**(5), 882-889.
- [25] ZHOU, W., S. YANG and P.G. WANG. Matrix effects and application of matrix effect factor. *Bioanalysis*. 2017, **9**(23), 1839-1844.
- [26] MATUSZEWSKI, B.K., M.L. CONSTANZER and C.M. CHAVEZ-ENG. Strategies for the assessment of matrix effect in quantitative bioanalytical methods based on HPLC-MS/MS. *Analytical Chemistry*. 2003, **75**(13), 3019-3030.
- [27] SZCZEPANSKA, N., P. KUBICA, B. KUDLAK, J. NAMIESNIK and A. WASIK. Stabilities of bisphenol A diglycidyl ether, bisphenol F diglycidyl ether,

- and their derivatives under controlled conditions analyzed using liquid chromatography coupled with tandem mass spectrometry. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*. 2019, **411**(24), 6387-6398.
- [28] PAN, CHUN-XIU, XU, XIU-ZHU, HE, HONG-MEI, CAI, XIAO-JUN, ZHANG, XUE-JUN. Separation and identification of cis and trans isomers of 2-butene-1,4-diol and lafutidine by HPLC and LC-MS. *Journal of Zhejiang University Science B*. 2005, **6**(1), 74-78.
- [29] SANTOS, N.A.dos, L.V. TOSE, S.R.C. da SILVA, M. MURGU, R.M. KUSTER, R.S. ORTIZ et al. Analysis of isomeric cannabinoid standards and cannabis products by UPLC-ESI-TWIM-MS: A comparison with GC-MS and GC × GC-QMS. *Journal of the Brazilian Chemical Society*. 2019, **30**(1), 60-70.
- [30] GUO, Y., H. HU, T. LI, L. XUE, X. ZHANG, Z. ZHONG, Y. ZHANG and Y. JIN. Primary secondary amine as a sorbent material in dispersive solid-phase extraction clean-up for the determination of indicator polychlorinated biphenyls in environmental water samples by gas chromatography with electron capture detection. *Journal of Separation Science*. 2017, **40**(16), 3279-3288.
- [31] BS EN 15136:2006. *Materials and articles in contact with foodstuffs. Certain epoxy derivatives subject to limitation. Determination of BADGE, BFDGE and their hydroxy and chlorinated derivatives in food simulants*. 2006, p. 34.
- [32] MAGNUSSON, B. and U. ORNEMARK. *Eurachem Guide: The fitness for purpose of analytical methods - A laboratory guide to method validation and related topics*, 2nd edition, 2014.
- [33] BRATINOVA, S., B. RAFFAEL and C. SIMONEAU. *Guidelines for performance criteria and validation procedures of analytical methods used in controls of food contact materials*. EUR 24105 EN. Luxembourg (Luxembourg): Publications Office of the European Union. 2009.

การตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีทดสอบปริมาณแคดเมียม และตะกั่ว ที่ละลายจากกระดาษสัมผัสอาหาร Method validation for determination of released cadmium and lead from paper for food contact materials

จิตวิไล เวฬุวนารักษ์¹ นุจรินทร์ พลหงษ์¹ วรณรัตน์ บุรณะกุล¹ วันดี ลือสายวงศ์¹

Jitwilai Waluvanarak¹, Nootjarin Phonhong¹, Warunrat Buranakul¹, Wandee Luesaiwong¹

บทคัดย่อ

การตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีทดสอบปริมาณแคดเมียม และตะกั่วที่ละลายจากกระดาษสัมผัสอาหาร ด้วยเทคนิค Inductively coupled plasma optical emission spectrometry ตามวิธีทดสอบมาตรฐาน EN 12498:2005 Paper and board-Paper and board intended to come into contact with foodstuffs-Determination of cadmium and lead in an aqueous extract พบว่า ช่วงใช้งานของเครื่องมือสำหรับการทดสอบแคดเมียม และตะกั่ว เท่ากับ 5-50 และ 50-500 ไมโครกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ค่าขีดจำกัดการตรวจหาของแคดเมียม และตะกั่ว เท่ากับ 0.5 และ 5.0 ไมโครกรัมต่อลิตร ค่าขีดจำกัดในการวัดเชิงปริมาณของแคดเมียม และตะกั่ว เท่ากับ 5.0 และ 50 ไมโครกรัมต่อลิตร และการศึกษาค่าความเอนเอียงและความเที่ยง มีช่วงร้อยละการคืนกลับ และร้อยละของค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ของทั้งสองธาตุอยู่ในช่วง 85.3-94.4 และอยู่ในช่วง 0.63-2.92 ตามลำดับ ค่าความไม่แน่นอนของแต่ละธาตุมีค่าไม่เกินร้อยละ 15 ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

Abstract

The method for determination of released cadmium and lead from paper for food contact by inductively coupled plasma optical emission spectrometry was validated according to EN 12498:2005 Paper and board-Paper and board intended to come into contact with foodstuffs-Determination of cadmium and lead in an aqueous extract. Results showed that instrument working range of cadmium and lead were 5-50 and 50-500 µg/L respectively. The limit of detection of cadmium and lead were 0.5 and 5.0 µg/L and the limit of quantitation of both elements were 5 and 50 µg/L. The bias and precision studies showed that percentage recovery and relative pooled standard deviation of both elements were 85.3-94.4 and 0.63-2.92 respectively. While measurement uncertainty was less than 15 % at 95 % confident limit of all elements

คำสำคัญ : กระดาษสัมผัสอาหาร แคดเมียม ตะกั่ว

Keywords : Paper for food contact, Cadmium, Lead

1. บทนำ (Introduction)

อุตสาหกรรมกระดาษในประเทศไทย โดยส่วนใหญ่เป็นการผลิตบรรจุภัณฑ์ที่ไม่ได้สัมผัสกับอาหารโดยตรง แต่เป็นไปเพื่อการบรรจุสิ่งของและการขนส่ง เช่น ถุงกระดาษ ลังกระดาษ กล่องกระดาษลูกฟูก หรือกล่องกระดาษแข็ง ด้วยคุณสมบัติของกระดาษที่มีน้ำหนักเบา สามารถตัด ดัด พับงอ หรือออกแบบให้เหมาะสมกับสินค้าที่บรรจุ และมีรูปร่างได้หลากหลาย สะดวกต่อการพิมพ์ลวดลาย ราคาถูก อีกทั้งแนวโน้มความสนใจและความต้องการสินค้าของผู้บริโภคที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เมื่อเทียบกับบรรจุภัณฑ์ที่ทำจากวัสดุชนิดอื่นๆ บรรจุภัณฑ์กระดาษจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ผู้ผลิตอาหารหันมาให้ความสนใจมากขึ้น บรรจุภัณฑ์กระดาษหรือกระดาษสัมผัสอาหาร ในที่นี้ หมายถึง กระดาษ กระดาษแข็ง และภาชนะกระดาษ ที่นำมาใช้

¹ กรมวิทยาศาสตร์บริการ

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

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

ห่อหุ้ม บรรจุ หรือรองรับอาหารในรูปของ จาน ชาม ถาด ถ้วย กล่อง ถัง ที่ทำจากกระดาษหรือกระดาษแข็ง รวมถึงภาชนะ ทำจากเยื่อกระดาษที่ขึ้นรูปเป็นภาชนะแล้วนำไปทำให้แห้ง และจะมีความแตกต่างกับบรรจุภัณฑ์โดยทั่วไป เนื่องจากต้องมีคุณสมบัติในการเก็บรักษาคุณภาพและยืดอายุอาหารที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ด้วยปัจจัยแวดล้อมต่าง ๆ หรือคุณลักษณะทางฟิสิกส์ เคมี หรือจุลชีววิทยาเฉพาะของอาหารนั้น ขณะเดียวกันกระดาษสัมผัสอาหารต้องไม่มีการเคลื่อนย้ายสารเคมีไปสู่อาหารในปริมาณที่ส่งผลต่อความปลอดภัยต่อการบริโภค กระดาษสัมผัสอาหารจึงต้องมีการทดสอบสมบัติต่าง ๆ เพื่อความปลอดภัยของผู้บริโภค เช่น ต้องสะอาด และไม่มีข้อบกพร่องที่ส่งผลต่อการใช้งานและการปนเปื้อนต่อผลิตภัณฑ์อาหารที่บรรจุ โดยการผลิตกระดาษต้องมีความสะอาด มีการปนเปื้อนจากสารเคมีที่อยู่ในระดับที่ปลอดภัยตามที่กำหนดตามมาตรฐานต่าง ๆ

สหภาพยุโรปได้มีระเบียบที่ว่าด้วยเรื่องวัสดุสัมผัสอาหาร Regulation (EC) No 1935/2004 (Materials and articles intended to come into contact with food) ในระเบียบดังกล่าวได้แยกประเภทของวัสดุที่อาจสัมผัสอาหารได้ไว้ 17 ประเภท ซึ่งกระดาษและกระดาษแข็ง (Paper and Board) จัดเป็นหนึ่งใน 17 ประเภทนั้น โดยทางสหภาพยุโรปได้ตีพิมพ์เอกสารเรื่อง Guideline for the Compliance of Paper & Board Materials and Articles for Food Contact ในข้อแนะนำฉบับนี้ได้มีการระบุถึงสารปนเปื้อนทั้งที่เป็นสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่ต้องควบคุมปริมาณที่ควบคุม และวิธีที่ใช้ในทดสอบ [1] เช่นเดียวกับประเทศไทยที่ได้กำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระดาษสัมผัสอาหารขึ้น [2]

การประเมินคุณภาพผลิตภัณฑ์กระดาษสำหรับสัมผัสอาหาร โดยตรวจสอบคุณลักษณะความปลอดภัยเฉพาะปริมาณโลหะหนักที่ละลายออกจากภาชนะกระดาษโดยวิธีทดสอบตามมาตรฐาน EN 12498 ห้องปฏิบัติการจะต้องตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีทดสอบก่อนนำไปใช้งาน การพัฒนาวิธีทดสอบครั้งนี้ได้ตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีทดสอบปริมาณแคดเมียม และตะกั่ว ที่ละลายจากกระดาษสำหรับสัมผัสอาหาร โดยได้มีการกำหนดค่าความไม่แน่นอนเป้าหมายของผลการทดสอบไม่เกิน ร้อยละ 20 และศึกษาคุณลักษณะเฉพาะของวิธี ได้แก่ ช่วงการใช้งานของเครื่องมือ (Instrument working range) ขีดจำกัดการตรวจหา (LOD) ขีดจำกัดการวัดปริมาณ (LOQ) ความเอนเอียง (Bias) ผลกระทบจาก

เมทริกซ์ (Matrix effect) ความเที่ยงระหว่างกลาง (Intermediate precision) อ้างอิงแนวทางตามเอกสาร The Fitness for Purpose of Analytical Methods. A Laboratory Guide to Method Validation and Related Topics. [3] และการประมาณค่าความไม่แน่นอนของการวัด ตามเอกสาร VAM Project 3.2.1 Development and Harmonisation of Measurement Uncertainty Principles. Part (d): Protocol for uncertainty evaluation from validation data. [4]

2. วิธีการวิจัย (Experimental methods)

2.1 ตัวอย่าง

กระดาษสัมผัสอาหารที่ทำจากเยื่อธรรมชาติ โดยมีหมายเลขการผลิตเดียวกัน

2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

2.2.1 เครื่องอินดักทีฟพีรี คัพเพิล พลาสมา ออฟติกคอล อิมิสชัน สเปกโตรมิเตอร์ (ICP-OES) ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น Optima 5300 DV

สภาวะเครื่อง Flow gas: Plasma 15 L/min, Auxiliary 0.2 L/min, Nebulizer 0.80 L/min, Power 1300 watts, Plasma view: Axial, Sample flow rate 1.5 mL/min

2.2.2 เครื่องเขย่าควบคุมอุณหภูมิ (Shaker bath)

2.3 สารเคมี

2.3.1 สารละลายมาตรฐานยี่ห้อ High Pure (ผลิตจากประเทศอเมริกา) สำหรับสร้างเส้นโค้งการสอบเทียบ

2.3.1.1 สารละลายมาตรฐานแคดเมียม ความเข้มข้น 1000 ± 3 มก./ลิตร

2.3.1.2 สารละลายมาตรฐานตะกั่ว ความเข้มข้น 1000 ± 3 มก./ลิตร

2.3.2 สารละลายมาตรฐานยี่ห้อ Perkin Elmer (ผลิตจากประเทศอเมริกา) สำหรับการหาค่าขีดจำกัดการวัดปริมาณ การหาค่าความเอนเอียงและการหาความเที่ยง

2.3.2.1 สารละลายมาตรฐานแคดเมียม ความเข้มข้น 1000 ± 5 มก./ลิตร

2.3.2.2 สารละลายมาตรฐานตะกั่ว ความเข้มข้น 1000 ± 5 มก./ลิตร

2.3.3 สารละลายกรดไนตริกเข้มข้น 65% ยี่ห้อ Merck (ผลิตจากประเทศเยอรมัน)

2.4 วิธีการดำเนินงาน

2.4.1 ช่วงการใช้งานของเครื่องมือ (Instrument working range)

สร้างเส้นโค้งการสอบเทียบ (calibration curve) ระหว่างค่าความเข้มข้นและความเข้มข้นของสารละลายตามตารางที่ 1 แล้วนำค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination, R^2) มาหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient, r)

ตารางที่ 1 ค่าความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานผสม

ขวดที่	ความเข้มข้น (มก./ลิตร)	
	แคดเมียม	ตะกั่ว
สารละลายแบลงค์ (สารละลายกรดไนตริก (1%V/ V))	-	-
สารละลายมาตรฐานขวดที่ 1	5	50
สารละลายมาตรฐานขวดที่ 2	7	70
สารละลายมาตรฐานขวดที่ 3	15	150
สารละลายมาตรฐานขวดที่ 4	25	250
สารละลายมาตรฐานขวดที่ 5	50	500

2.4.2 การเตรียมและการทดสอบตัวอย่าง

ชั่งตัวอย่างกระดาษ 10 ± 0.0050 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมน้ำปราศจากไอออนที่ต้มไล่คาร์บอนไดออกไซด์ จำนวน 200 mL นำตัวอย่างที่ได้ไปสกัดที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นกรองสารละลาย แล้วล้างตัวอย่างด้วยน้ำร้อน 80 °C ใส่ลงในขวดปรับปริมาตร ขนาด 250 mL ทั้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง เติมกรดไนตริกให้มีความเข้มข้น 1% v/v จากนั้นปรับปริมาตร และนำไปวัดด้วยเครื่อง ICP-OES

2.4.3 การขีดจำกัดการตรวจหา (LOD) และขีดจำกัดการวัดปริมาณ (LOQ)

เตรียมและทดสอบตัวอย่างตามข้อ 2.4.2 โดยใช้ตัวอย่างกระดาษ จำนวน 10 ขั้ว

2.4.4 การยืนยันขีดจำกัดการวัดปริมาณ (LOQ)

เตรียมและทดสอบตัวอย่างตามข้อ 2.4.2 โดยใช้ตัวอย่างกระดาษ จำนวน 10 ขั้ว เติมสารละลายมาตรฐานผสมของแคดเมียม และตะกั่วที่มีความเข้มข้น 5 และ 50 ไมโครกรัม/ลิตร

2.4.5 การหาค่าความเอนเอียง (Bias)

เตรียมและทดสอบตัวอย่างตามข้อ 2.4.2 เติมสารละลายมาตรฐานผสมของแคดเมียม และตะกั่ว ที่ 3 ระดับความเข้มข้น (ต่ำ กลาง สูง) ตามตารางที่ 2 โดยใช้ตัวอย่างกระดาษจำนวน 10 ขั้ว ต่อหนึ่งสารละลายมาตรฐานผสม

ตารางที่ 2 ค่าความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานผสมที่ 3 ระดับความเข้มข้น

สารละลาย	ความเข้มข้น (ไมโครกรัม/ลิตร)	
	แคดเมียม	ตะกั่ว
สารละลายกรดไนตริก (1%V/ V)	-	-
สารละลายมาตรฐานผสมที่ความเข้มข้นระดับต่ำ	5	50
สารละลายมาตรฐานผสมที่ความเข้มข้นระดับกลาง	25	250
สารละลายมาตรฐานผสมที่ความเข้มข้นระดับสูง	50	500

2.4.6 การศึกษาผลกระทบจากเมทริกซ์ (Matrix effect)

เตรียมและทดสอบตัวอย่างตามข้อ 2.4.2 เติมสารละลายมาตรฐานผสมของแคดเมียม และตะกั่ว ที่ 3 ระดับความเข้มข้น (ต่ำ กลาง สูง) ตามตารางที่ 2 คำนวณค่าเฉลี่ยความเข้มข้น และสร้างกราฟระหว่างค่าเฉลี่ยความเข้มข้นกับความเข้มข้น [5]

2.4.7 การหาค่าความเที่ยงระหว่างกลาง (Intermediate precision)

เตรียมและทดสอบตัวอย่างตามข้อ 2.4.2 เติมสารละลายมาตรฐานผสมของแคดเมียม และตะกั่ว ที่ 3 ระดับความเข้มข้น (ต่ำ กลาง สูง) ตามตารางที่ 2 โดยแต่ละวันเตรียมสารละลายใช้ตัวอย่างจำนวน 4 ขั้ว และทำการทดสอบแบ่งเป็น 3 วัน

3. ผลและวิจารณ์ (Results and Discussion)

3.1 ช่วงการใช้งานของเครื่องมือ

ความชันและค่า R^2 ของแคดเมียม และตะกั่ว แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ช่วงความเป็นเส้นตรง ความชัน และ R^2

ของแคดเมียม และตะกั่ว

ธาตุ	ช่วงความเป็นเส้นตรง (มก./ลิตร)	ความชัน	R^2	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r)
แคดเมียม	5-50	53.6	0.9999	0.9999
ตะกั่ว	50-500	9.20	0.9999	0.9999

3.2 ขีดจำกัดการตรวจหา (LOD) และ ขีดจำกัดการวัดปริมาณ (LOQ)

นำผลการทดสอบมาคำนวณ LOD ตามสมการที่ 1 โดยค่า LOD ของแคดเมียม และตะกั่ว มีค่าเท่ากับ 0.5 และ 5.0 ไมโครกรัม/ลิตร ตามลำดับ และคำนวณค่า LOQ จากสมการที่ 2 ซึ่งค่า LOQ ของแคดเมียม และตะกั่ว มีค่าเท่ากับ 1.0 และ 15 ไมโครกรัม/ลิตร ตามลำดับ

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

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

$$S'_0 = S_0 \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{1}{n_b}}$$

S_0 = SD คำนวณจากผลการทดสอบค่า LOD จำนวน 10 ซ้ำ
 n = จำนวนซ้ำของตัวอย่างที่ห้องปฏิบัติการใช้สำหรับออกรายงาน สำหรับการทดสอบนี้กำหนดให้ เท่ากับ 2
 n_b = จำนวนซ้ำของแบล็ค ที่ห้องปฏิบัติการใช้ในการทดสอบ สำหรับการทดสอบนี้กำหนดให้เท่ากับ 1

3.3 การยืนยันขีดจำกัดการวัดปริมาณ (LOQ)

ที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม และตะกั่ว เท่ากับ 5.0 และ 50 ไมโครกรัม/ลิตร ตามลำดับ เมื่อนำผลการทดสอบของค่าทั้ง 2 ธาตุมาคำนวณค่าร้อยละการคืนกลับ (% recovery) และร้อยละค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (% RSD) แล้วเปรียบเทียบกับเกณฑ์กำหนดแสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ค่าร้อยละการคืนกลับ (% recovery) และร้อยละค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD) ของแคดเมียม และตะกั่ว ที่ความเข้มข้น 5.0 และ 50.0 ไมโครกรัม/ลิตร (คำนวณจากผลการทดสอบ 10 ซ้ำ)

ธาตุ	ความเข้มข้นเฉลี่ย (มก./ลิตร)	ความเข้มข้นเฉลี่ย (มก./กก.)	ร้อยละการคืนกลับ(% recovery)	ร้อยละส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD)
แคดเมียม	4.7	0.1177	94.1	1.0
ตะกั่ว	42.7	1.0666	85.3	2.1
เกณฑ์กำหนด			80-110	≤10

สรุปค่า LOQ ของแคดเมียม และตะกั่วของการทดสอบนี้เท่ากับ 5.0 และ 50 ไมโครกรัม/ลิตร ตามลำดับ เนื่องจากมีค่าความไวเชิง ค่าความเที่ยง และความไม่แน่นอนอยู่ในเกณฑ์กำหนด

3.4 ค่าความเอนเอียง (bias)

นำผลการทดสอบของสารละลายตัวอย่างจากข้อ 2.4.5 ความเข้มข้น 10 ซ้ำ จากการตรวจสอบ outlier ของการศึกษาความเอนเอียงโดยใช้ Grubb's test พบว่าแต่ละความเข้มข้นมีข้อมูลที่เป็น outlier ไม่เกินร้อยละ 20 ของข้อมูลทั้งหมด ซึ่งสูตรคำนวณ outlier โดย Grubb's test คือ

$$G_{cal} = \frac{\text{ข้อมูลที่สงสัย} - \text{ค่าเฉลี่ย}}{\text{ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน}}$$

ถ้า $G_{cal} < G_{crit}$ แสดงว่า ข้อมูลนั้นไม่เป็น outlier (โดยที่ $G_{crit} = 2.290$ สำหรับจำนวนซ้ำเท่ากับ 10) จากนั้นคำนวณค่าร้อยละการคืนกลับ (% recovery) เพื่อประมาณค่าความเอนเอียง โดยค่าร้อยละการคืนกลับ (% recovery) ของแคดเมียม และตะกั่ว แสดงดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ค่าร้อยละการคืนกลับ (% recovery) ของแคดเมียม และตะกั่ว ของการศึกษาความเอนเอียง

ธาตุ	จำนวนที่วัด	ความเข้มข้นของสารที่เติมในตัวอย่าง (มก./กก.)	ความเข้มข้นที่วิเคราะห์ได้ (มก./กก.)	ร้อยละการคืนกลับ
แคดเมียม	9*	0.125	0.1177	94.1
	10	0.625	0.5813	93.0
	10	1.25	1.1774	94.8
ตะกั่ว	10	1.25	1.0666	85.3
	10	6.25	5.8079	92.9
	10	12.5	11.7981	94.4

หมายเหตุ : * คือ มีชุดข้อมูลที่เป็น outlier โดยค่าร้อยละการคืนกลับ (% recovery) ของแคดเมียม และตะกั่วอยู่ในเกณฑ์กำหนด

3.5 ผลกระทบจากเมทริกซ์ (Matrix effect)

เปรียบเทียบความชัน ของเส้นโค้งการสอบเทียบกับความชันของกราฟที่พลอตระหว่างค่าความเข้มข้นกับค่าความเข้มข้นของสารละลายตามตารางที่ 2 โดยความชันของทั้งสองกราฟต้องมีความแตกต่างไม่เกิน 10% คำนวณตามสมการที่ 3

$$\% \text{ ความแตกต่าง} = \frac{[\text{ความเข้มข้นกราฟมาตรฐาน-ความเข้มข้นกราฟ spiked sample}]}{\text{ความเข้มข้นกราฟมาตรฐาน}} \times 100 (3)$$

ตารางที่ 6 ค่าความแตกต่างความเข้มข้นของกราฟมาตรฐานและกราฟ spiked sample ของแคดเมียม และตะกั่ว

ธาตุ	ความเข้มข้นของกราฟมาตรฐาน	กราฟ spiked sample	% ความแตกต่าง	เกณฑ์กำหนด
แคดเมียม	53.1	56.5	6.40	≤ 10 %
ตะกั่ว	9.14	9.10	0.44	

3.6 ค่าความเที่ยงระหว่างกลาง (Intermediate precision)

นำผลการทดสอบของสารละลายตัวอย่างจากข้อ 2.4.5 ความเข้มข้นละ 12 ข้ำ จำนวนค่าร้อยละการคืนกลับ, ค่าร้อยละของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD) แล้วนำข้อมูลที่ได้จากการศึกษาความเที่ยงมาทดสอบ outlier โดยการใช้ Grubb's test เกณฑ์การยอมรับส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ไม่เกินร้อยละ 10

$$\%RSD = \frac{SD}{\bar{X}} \times 100 (4)$$

ตารางที่ 7 สรุปค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์จากการตรวจสอบความเที่ยงตลอดช่วงการทำงานของแคดเมียมและ ตะกั่ว (คำนวณจากผลการทดสอบ 12 ข้ำ)

ธาตุ	จำนวนที่วัด	ความเข้มข้นของสารที่เติมในตัวอย่าง (มก./กก.)	%RSD
แคดเมียม	12	0.125	2.96
	12	0.625	0.55
	12	1.25	1.03
ตะกั่ว	12	1.25	2.80
	12	6.25	2.17
	12	12.5	1.90

หมายเหตุ : ไม่มีชุดข้อมูลที่เป็น outlier โดยค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD) ของแคดเมียม และตะกั่วอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด

3.7 การประมาณค่าความไม่แน่นอน

การศึกษานี้ใช้วิธีการประมาณค่าความไม่แน่นอนของการวัดโดยใช้ method validation approach ตามเอกสารอ้างอิง [4] โดยแหล่งของค่าความไม่แน่นอนมาจากการทดสอบความเอนเอียง $u(R)$ และการทดสอบความเที่ยง $u(P)$ และประมาณค่าความไม่แน่นอนของการวัดได้ดังนี้

$$u_c = C \sqrt{u(R)^2 + u(P)^2} (5)$$

เมื่อ C คือ ความเข้มข้นของสารละลาย

u_c คือ ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานรวม

และ ค่าความไม่แน่นอนขยาย U เท่ากับ

$$U = k \times u_c (6)$$

เมื่อ K คือ ค่า coverage factor มีค่าเท่ากับ 2 ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางที่ 8 สรุปแหล่งความไม่แน่นอนของการวัดและปริมาณที่คำนวณได้

แหล่งของค่าความไม่แน่นอน		แคดเมียม	ตะกั่ว
ความเอนเอียง	$u(\bar{R}_m)$	0.0041	0.0050
	t-test	มีนัยสำคัญ	มีนัยสำคัญ
	$u(\bar{R}_m)''$	0.0352	0.0357
	$u(\bar{R}_s)$	0.0066	0.0486
	$u(R)$	0.0358	0.0603
ความเที่ยง	$u(P)/P$	0.0296	0.0280
ความไม่แน่นอนรวม, u_c ug/L		1.1615	16.6263
ความไม่แน่นอนขยาย (U) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (k = 2)		2.3231 ug/L (0.0581 mg/kg)	33.2526 ug/L (0.8313 mg/kg)
ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)		0.625	6.25
ความไม่แน่นอนขยายคิดเป็นร้อยละ		9.3	13.3

4. สรุป (Conclusion)

การตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีทดสอบปริมาณแคดเมียม และตะกั่วที่ละลายจากกระดาษสัมผัสอาหาร ด้วยเทคนิค inductively coupled plasma optical emission spectrometry ตามวิธีทดสอบมาตรฐาน EN 12498:2005 Paper and board-Paper and board intended to come into contact with foodstuffs-Determination of cadmium and lead in an aqueous extract โดยตรวจสอบคุณลักษณะเฉพาะที่แสดงสมบัติของวิธีทดสอบ ได้แก่ ช่วงความเป็นเส้นตรง การหาค่าขีดจำกัดการตรวจหา การหาค่าขีดจำกัดการวัดปริมาณ การหาค่าความไวเชิงลบ ผลกระทบจากเนื้อสาร การหาความเที่ยง พบว่า เป็นไปตามเกณฑ์กำหนดและมีค่าความไม่แน่นอนของผลการทดสอบที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ของทั้ง 2 ธาตุไม่เกินร้อยละ 15 ห้องปฏิบัติการสามารถนำวิธีทดสอบดังกล่าวมาใช้ทดสอบหาปริมาณแคดเมียม และตะกั่วที่ละลายจากกระดาษสัมผัสอาหารได้

5. เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] *Industry guideline for the compliance of paper & board materials and articles for food contact.* Issue 1, [online]. 2010. [viewed 12 January 2021]. Available from: https://www.contactalimentaire.fr/sites/default/files/media/file/field_media_file/paper_board_industry_guideline-final_2010.pdf
- [2] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. มอก. 2948-2562. *กระดาษสัมผัสอาหาร.* 2562.
- [3] EURACHEM. *The fitness for purpose of analytical methods. A laboratory guide to method validation and related topics*, Second edition. 2014.
- [4] BARWICK, V.J. and S.L.R. ELLISON. *VAM Project 3.2.1 Development and harmonisation of measurement uncertainty principles. Part (d): Protocol for uncertainty evaluation from validation data.* [online]. 2000.
- [5] NATA. *Technical Note 17 Guidelines for the validation and verification of quantitative and qualitative test methods*, October 2013.

การเปรียบเทียบการหาค่าความร้อนแบบกรอสในตัวอย่างชีวมวลระหว่างวิธีทดสอบมาตรฐาน ISO 18125 และ ASTM D5865

Comparison of gross calorific value in biomass between standard test method ISO 18125 and ASTM D5865

วชิรพันธุ์ พันธ์กระวี^{1*}

Wachirapun Punkrawee^{1*}

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เปรียบเทียบค่าความร้อนแบบกรอสที่ทดสอบด้วยวิธีทดสอบมาตรฐาน ISO 18125 และ ASTM D5865 ของชีวมวล 5 ชนิด ได้แก่ ชานอ้อย (A) ใบอ้อย (B) ไม้ยางพารา (C) แกลบ (D) และกะลามะพร้าว (E) ผลการศึกษาได้ค่าความร้อนแบบกรอสเรียงตามลำดับดังนี้ ไม้ยางพารา > ชานอ้อย > ใบอ้อย > แกลบ > กะลามะพร้าว ร้อยละของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ของทั้ง 2 วิธี มีค่าใกล้เคียงกัน (ASTM ค่าอยู่ระหว่าง 0.07 - 0.21% และ ISO อยู่ระหว่าง 0.08-0.18%) เมื่อเปรียบเทียบค่าความร้อนจากการทดสอบทั้งสองวิธีด้วยวิธีทางสถิติ t-test พบว่า ค่า $t_{cal} < t_{critical}$ แสดงว่า วิธีทดสอบมาตรฐานทั้งสองให้ผลการทดสอบค่าความร้อนแบบกรอสในตัวอย่างชีวมวลที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ดังนั้น วิธีทดสอบมาตรฐาน ASTM D5865 สามารถนำมาปรับใช้ในการทดสอบค่าความร้อนแบบกรอสในตัวอย่างชีวมวลได้

Abstract

In this study, comparison of gross calorific value between ISO 18125 and ASTM D5865 in five types of biomass, including bagasse (A), sugarcane leaf (B), rubber wood (C), rice husk (D) and coconut shell (E), will be conducted. The results of gross calorific value are as follows: rubber wood > bagasse > sugarcane leaf > rice husk > coconut shell. The interval values of percentage relative standard deviation (%RSD) obtained from both methods are similar which are 0.07 - 0.21% and 0.08 - 0.18% for the ASTM D5865 and ISO 18125 method, respectively. For student's t-test, it was found that $t_{cal} < t_{critical}$. Therefore, there is no significant difference between calorific value of biomass sample from both methods at 95% confidence level. Hence, ASTM D5865 method can be applicable to determining gross calorific value in biomass samples.

คำสำคัญ : ค่าความร้อนแบบกรอส ชีวมวล

Keywords : Gross calorific value, Biomass, ISO 18125, ASTM D5865

1. บทนำ (Introduction)

ปัจจุบันประชากรโลกเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วทำให้ความต้องการด้านพลังงานเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง พลังงานส่วนใหญ่มาจากฟอสซิล (fossil) เช่น น้ำมัน และแก๊สธรรมชาติซึ่งมีปริมาณจำกัด ดังนั้น การใช้พลังงานทางเลือกอื่น ๆ เช่น พลังงานลม พลังงานจากความร้อนใต้พิภพ และพลังงานจากเชื้อเพลิงชีวภาพจึงเป็นการแก้ปัญหาด้านการขาดแคลนพลังงานในอนาคต ประเทศไทยตั้งอยู่ในเขตร้อนชื้นจึงมีความหลากหลายทางชีวภาพสูงโดยเฉพาะมีพืชพันธุ์หลายชนิด ด้วยเหตุนี้พลังงานจาก

¹ กรมวิทยาศาสตร์บริการ

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

เชื้อเพลิงชีวภาพโดยเฉพาะชีวมวลจึงเป็นตัวเลือกที่เหมาะสมทั้งนี้ควรเลือกวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมาใช้ เช่น ชานอ้อย แกลบ กะลามะพร้าว เพื่อป้องกันผลกระทบจากการขาดแคลนอาหาร

คุณลักษณะของเชื้อเพลิงชีวมวลต้องใช้วิธีการทดสอบที่เป็นมาตรฐานระดับสากลเพื่อให้ผลการทดสอบมีความน่าเชื่อถือและเป็นที่ยอมรับ โดยเฉพาะการส่งสินค้าออกไปขายยังต่างประเทศที่มีการกำหนดเกณฑ์หรือคุณลักษณะต่าง ๆ เช่น ค่าความร้อนแบบกรอส (gross calorific value) ปริมาณโลหะหนัก ความหนาแน่น แต่วิธีทดสอบมาตรฐานนั้นมีการใช้กันหลากหลายขึ้นกับผู้ใช้งานต้องการอ้างอิงมาตรฐานใด เช่น ประเทศสหรัฐอเมริกาจะอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM (ASTM International) สหภาพยุโรปมักจะอ้างอิงตามมาตรฐานของ DIN (Deutsches Institut für Normung / German Institute for Standardization), ISO (International Organization for Standardization) หรือ ENs (European Standard) ขณะที่เอเชียอ้างอิงตามมาตรฐาน JIS (Japanese Industrial Standards) ดังนั้น การให้บริการวิเคราะห์ ทดสอบของห้องปฏิบัติการควรทำได้ตามมาตรฐานที่หลากหลาย เพื่อตอบสนองต่อความต้องการของผู้ใช้บริการ

คุณลักษณะที่สำคัญสำหรับชีวมวลคือ ค่าความร้อน (calorific value) ซึ่งเป็นพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้ต่อหน่วยน้ำหนัก นิยมรายงานในหน่วยจูลต่อกรัม (J/g) แคลอรีต่อกรัม (cal/g) หรือบีทียูต่อปอนด์ (BTU/lb) ค่าความร้อนแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ ค่าความร้อนแบบกรอส (gross calorific value หรือ high heating value) และค่าความร้อนแบบเนต (net calorific value หรือ low heating value) โดยทั่วไปถ้ากล่าวถึงค่าความร้อนมักหมายถึง ค่าความร้อนแบบกรอส ซึ่งสามารถทดสอบด้วยเครื่อง bomb calorimeter องค์ประกอบหลักของชีวมวล ได้แก่ คาร์บอน (C) ออกซิเจน (O) และไฮโดรเจน (H) เมื่อชีวมวลถูกเผาไหม้ภายใต้บรรยากาศของออกซิเจนจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และน้ำ (H_2O) ดังสมการที่ 1



นอกจากคาร์บอน ออกซิเจนและไฮโดรเจนซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักแล้ว ชีวมวลยังมีธาตุไนโตรเจน (N) และกำมะถัน (S) เป็นส่วนประกอบซึ่งจะถูกออกซิไดซ์ (oxidized) ขณะเผาไหม้กลายเป็นกรดไนตริก (HNO_3) และกรดกำมะถัน (H_2SO_4) ที่คายความร้อนให้แก่ระบบโดยจะเรียกรวมว่า acid formation นอกจากนี้ ค่าความร้อนที่เกิดขึ้นอาจมาจากด้าย (cotton fuse) ที่ใช้ในการทดสอบด้วย ดังนั้น เพื่อให้การรายงานค่าความร้อนมีความถูกต้องจึงต้องหักค่าแก๊สของค่าความร้อนต่าง ๆ ชำงต้นที่เกิดจากปฏิกิริยาภายใน combustion bomb ก่อนรายงานผลการทดสอบ

วิธีทดสอบมาตรฐานสำหรับการหาค่าความร้อนแบบกรอสมีหลายวิธี เช่น ISO 18125 [1], ISO 1928 [2], ASTM D5865 [3], ASTM E711 [4], AS 1038.5 [5], DIN 51900-2 [6] ปัจจุบันสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมได้กำหนดมาตรฐาน มอก. 2772-2560 [7] : เชื้อเพลิงชีวมวลแข็งอัดเม็ด เพื่อควบคุมคุณภาพเชื้อเพลิงชีวมวลแข็งที่ได้จากการนำเศษไม้ที่เหลือจากอุตสาหกรรมหรือวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมาอัดเม็ด มอก. ดังกล่าวอ้างอิงการทดสอบคุณลักษณะของค่าความร้อนโดยวิธีทดสอบมาตรฐาน ASTM E711 (Standard test method for gross calorific value of refuse-derived fuel by the bomb calorimeter) ซึ่งเป็นวิธีทดสอบค่าความร้อนแบบกรอสในตัวอย่างเชื้อเพลิงขยะ (Refuse Derived Fuel: RDF) แต่ทว่าวิธีนี้ถูกยกเลิกตั้งแต่เดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2554 ในขณะที่วิธีทดสอบมาตรฐาน ASTM D5865 และ ISO 18125 ปัจจุบันยังคงมีการใช้งานอยู่ ดังนั้น การศึกษานี้จะเปรียบเทียบการหาค่าความร้อนแบบกรอสโดยใช้วิธีทดสอบมาตรฐาน ISO 18125 และ ASTM D5865 เนื่องจากวิธีมาตรฐานทั้งสองมีหลักการทดสอบค่าความร้อนที่คล้ายกันโดยใช้วิธีคำนวณค่าความร้อนแบบกรอสดังสมการที่ 2 และมีค่า repeatability (ค่าการทวนซ้ำ) และ reproducibility (ค่าการทำซ้ำ) ของวิธีทดสอบตามตารางที่ 1

$$Q_v(\text{gross}) = \frac{[(tE_e) - e1 - e2 - e3 - e4]}{m} \quad (2)$$

เมื่อ $Q_v(\text{gross})$ = ค่าความร้อนแบบกรอส (J/g), E_{e} = heat capacity ของ calorimeter (J/°C), t = อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นหลังการทดสอบ (°C), e_1 = acid correction (J), e_2 = ค่าความร้อนจากการเผาไหม้จาก cotton fuse (J), e_3 = sulfur correction (J), e_4 = combustion aid correction (J), m = น้ำหนักตัวอย่าง (g)

ตารางที่ 1 Repeatability (r) และ Reproducibility (R) ของวิธี ISO 18125 และ ASTM D5865

วิธีมาตรฐาน	Repeatability (J/g)	Reproducibility (J/g)
ISO 18125	140	400
ASTM D5865	149	256

วิธีทดสอบมาตรฐาน ISO 18125 เป็นวิธีที่ใช้ทดสอบค่าความร้อนในตัวอย่างเชื้อเพลิงชีวภาพ (biofuel) ส่วนวิธีทดสอบมาตรฐาน ASTM D5865 เป็นวิธีทดสอบค่าความร้อนของตัวอย่างถ่านหิน (coal) และถ่านโค้ก (coke) โดยทั่วไปถ่านหินและชีวมวลมีองค์ประกอบที่คล้ายกัน ได้แก่ คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และกำมะถัน แต่ถ่านหินมีปริมาณกำมะถันและไนโตรเจนที่สูงกว่าชีวมวล วิธีทดสอบมาตรฐานทั้งสองจึงมีความแตกต่างกันในการคำนวณค่า e_1 (acid correction) และ sulfur correction (e_3) โดยวิธี ISO 18125 ใช้การไทเทรตน้ำที่ล้าง combustion bomb หลังการทดสอบด้วยสารละลาย 0.05 M Ba(OH)₂ และสารละลาย 0.1 M HCl เพื่อคำนวณค่า $e_1(e_{1\text{iso}})$ และ $e_3(e_{3\text{iso}})$ ดังสมการที่ 3 และ 4 ส่วนวิธี ASTM D5865 จะไทเทรตด้วยสารละลาย 0.07 M Na₂CO₃ เพื่อนำมาคำนวณค่า $e_1(e_{1\text{ASTM}})$ และหาปริมาณกำมะถันโดยเติม BaCl₂ ให้ตกตะกอนในรูป BaSO₄ เพื่อคำนวณค่า $e_3(e_{3\text{ASTM}})$ ดังสมการที่ 5 และ 6

$$e_{1\text{iso}} = 6.0 \times (20 - V_1) \quad (3)$$

$$e_{3\text{iso}} = 15.1 \times (V_1 + v_2 - 20) \quad (4)$$

$$e_{1\text{ASTM}} = 4.2 \times V_3 \quad (5)$$

$$e_{3\text{ASTM}} = 55.5 \times S \times m \quad (6)$$

$$e_{1\text{iso benzoic}} = 6.0 \times v_4 \quad (7)$$

เมื่อ V_1 = ปริมาตร 0.05 M Ba(OH)₂ ที่ใช้ในการไทเทรต (ml), V_2 = ปริมาตร 0.1 M HCl ที่ใช้ในการไทเทรต (ml), V_3 = ปริมาตร 0.07 M Na₂CO₃ ที่ใช้ในการไทเทรต (ml), S = ร้อยละของกำมะถันในตัวอย่าง (%), m = น้ำหนักตัวอย่าง (g), V_4 = ปริมาตร 0.1 M NaOH ที่ใช้ในการไทเทรต (ml)

ปัจจุบันมีการใช้วิธีทดสอบมาตรฐานเพื่อหาค่าความร้อนแบบกรอสในงานวิจัย เช่น ใช้วิธีทดสอบมาตรฐาน ASTM D5865 ในชีวมวลอัดแท่งที่ผสมระหว่างขี้ข้าวโพดและเปลือกจากลำต้นปาล์ม [8] และชีวมวลจากฟางข้าวโพด [9] และวิธีทดสอบมาตรฐาน ISO 18125 ในชีวมวลจากขี้เหล็ก พังแหร ปอสา สะแกนา [10] และชีวมวลจากอัลมอนต์ [11] ดังนั้น การหาค่าความร้อนแบบกรอสในชีวมวลสามารถใช้วิธีทดสอบมาตรฐานได้ทั้งสองวิธี

กรณีที่ทดสอบค่าความร้อนแบบกรอสในตัวอย่างที่ไม่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบ เช่น benzoic acid (C₇H₆O₂) ซึ่งเป็นสารมาตรฐานที่ใช้ในการทวนสอบค่าความร้อนนั้นจะไม่เกิดการดักกำมะถันขึ้น จึงไม่ต้องคำนวณค่า e_3 และค่า e_1 ตามวิธี ISO 18125 ($e_{1\text{iso benzoic}}$) จะใช้สารละลาย 0.1 M NaOH ในการไทเทรตแทนสารละลาย 0.1 M HCl ค่าแก้แสดงดังสมการที่ 7 ส่วนวิธี ASTM D5865 ไม่มีการแยกในกรณีของ benzoic acid จึงคำนวณค่า $e_1(e_{1\text{ASTM}})$ ตามสมการที่ 5

เนื่องจากสารละลาย Ba(OH)₂ ที่ใช้หาค่าแก้ตามวิธีทดสอบมาตรฐาน ISO 18125 สามารถตกตะกอนเป็น BaCO₃ เมื่อสัมผัสกับอากาศทำให้ความเข้มข้นของ Ba(OH)₂ ไม่เสถียรและมีค่าลดลงเมื่อใช้เป็นเวลานานทำให้การหาค่าแก้ (e_1 , e_3) มีโอกาสคลาดเคลื่อนได้ แต่วิธีทดสอบมาตรฐาน ASTM D5865 ใช้สารละลาย BaCl₂ ซึ่งมีความเสถียรที่สูงกว่าสารละลาย Ba(OH)₂ ดังนั้นงานวิจัยนี้จะศึกษาความแตกต่างของค่าความร้อนแบบกรอสตามวิธีทดสอบมาตรฐาน ISO 18125 และ ASTM D5865 เพื่อพิสูจน์ว่า วิธี ASTM D5865 สามารถใช้ทดสอบค่าความร้อนแบบกรอสในตัวอย่างชีวมวลได้ และเป็นข้อมูลในการเลือกใช้วิธีมาตรฐานที่เหมาะสมในการหาค่าความร้อนของตัวอย่างชีวมวลต่อไป

2. วิธีการวิจัย (Experimental methods)

2.1. อุปกรณ์และสารเคมี

2.1.1 Bomb calorimeter ยี่ห้อ LECO รุ่น AC-600

2.1.2 สารละลาย 0.05 M Ba(OH)₂, 0.1 M HCl และ 0.1 M NaOH ใช้ในการคำนวณค่าแก้ตามวิธี ISO 18125 ตามสมการที่ 3, 4 และ 7 ตามลำดับ สารละลาย 0.07 M Na₂CO₃ และ 0.05 M BaCl₂ ใช้ในการหาค่าแก้ตาม ASTM D5865 ตามสมการที่ 5 และ 6 ตามลำดับ

2.1.3 สารมาตรฐาน benzoic acid (LECO 502-892) ค่าความร้อนแบบกรอส 26448 ± 34.75 J/g ใช้ในการทวนสอบ bomb calorimeter ในข้อ 2.3.1 ถ่านหินมาตรฐาน (LECO: part No. 501-001) ใช้ทดสอบตามข้อ 2.3.2

2.1.4 ชีวมวล 5 ชนิด ได้แก่

1. ชานอ้อย (A) 2. ใบอ้อย (B) 3. ไม้ยางพารา (C) 4. แกลบ (D) และ 5. กะลามะพร้าว (E)

2.2 การทดสอบทางสถิติ

2.2.1 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่าความร้อนแบบกรอสของสารมาตรฐาน Benzoic acid จากการทดลองกับค่าที่ระบุตามใบรับรองโดยใช้ t-test แบบ t-test for bias ตามสมการที่ 8

$$t - \text{test} = \frac{(X - X_{\text{CRM}})}{\frac{SD}{\sqrt{n}}} \quad (8)$$

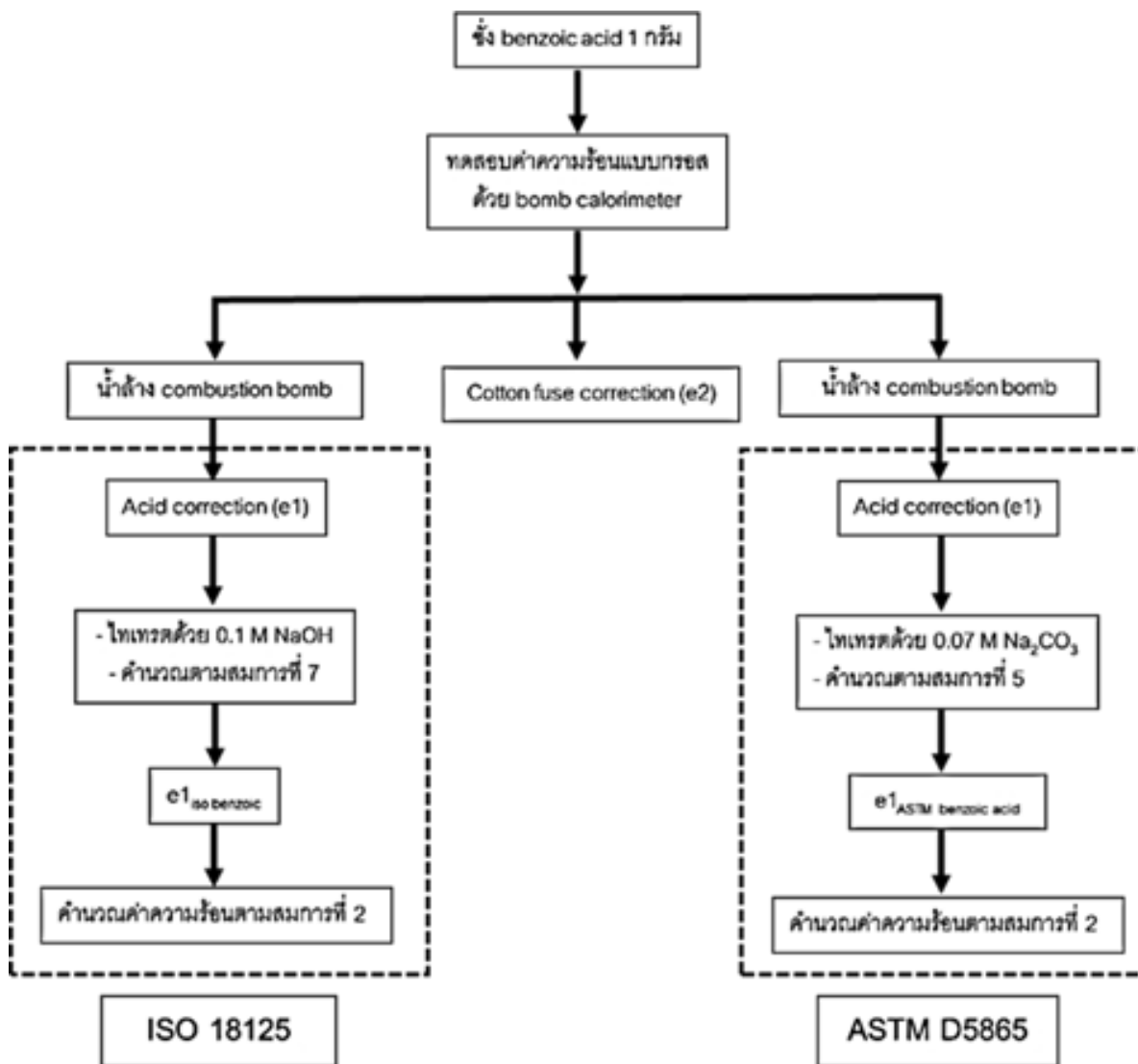
เมื่อ X และ SD = ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลการทดสอบ, X_{CRM} = ค่าความร้อนของสารมาตรฐาน, n = จำนวนการทดสอบ

2.2.2 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่าความร้อนแบบกรอสที่ทดสอบตามวิธีมาตรฐาน ISO 18125 และ ASTM D5865 เพื่อให้มั่นใจว่าข้อมูลที่นำมาเปรียบเทียบมีค่าความเที่ยง (precision) ที่ไม่แตกต่างกัน ผู้วิจัยจะใช้สถิติ F-test ในการทดสอบความแปรปรวน (variance, σ^2) ของข้อมูลทั้งสองชุดที่มีความแปรปรวนไม่แตกต่างกัน ($\sigma_1^2 = \sigma_2^2$) จากนั้นเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยใช้วิธีทางสถิติ student t-test แบบ Pooled variance

2.3 วิธีการทดสอบ

2.3.1 ทวนสอบเครื่อง bomb calorimeter โดยทดสอบค่าความร้อนแบบกรอสของสารมาตรฐาน benzoic acid ตามวิธี ISO 18125 และ ASTM D5865

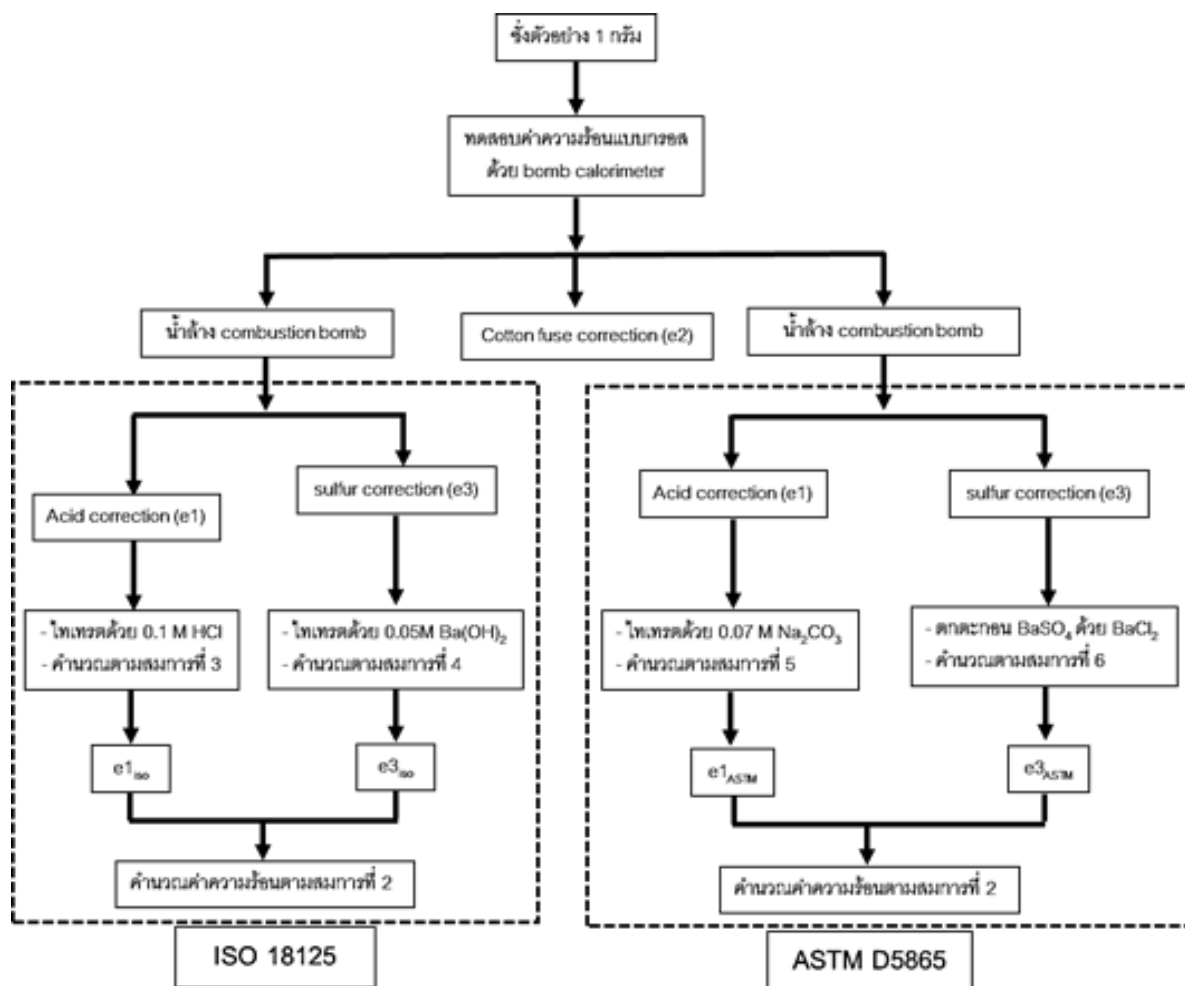
การทดลองนี้เพื่อทดสอบว่า เครื่องมือที่ใช้สามารถใช้ทดสอบได้กับวิธีมาตรฐานทั้งสองและให้ผลการทดสอบที่เป็นไปตามเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนด ขั้นตอนการทดสอบแสดงในผังไหลตามรูปที่ 1 โดยทดสอบค่าความร้อนของสารมาตรฐาน benzoic acid วิธีละ 10 ซ้ำ นำค่าความร้อนที่ได้มาทดสอบ outlier ด้วยวิธี Grubb's test จากนั้นทดสอบความเอนเอียง (bias) โดยเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่าความร้อนที่ได้จากการทดสอบกับค่าความร้อนตามใบรับรองโดยใช้วิธีทางสถิติในข้อ 2.2.1



รูปที่ 1 : ผังไหล (flow chart) ของวิธีการทดสอบค่าความร้อนแบบกรอสของ Benzoic acid

2.3.2 เปรียบเทียบค่าความร้อนแบบกรอสของสารมาตรฐานถ่านหินที่ทดสอบด้วยวิธีทดสอบมาตรฐาน ISO 18125 และ ASTM D5865

ชีวมวลและถ่านหินมีองค์ประกอบคล้ายกันแต่ชีวมวล มีความเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneity) น้อยกว่า ผู้วิจัยจึงเลือกใช้สารมาตรฐานถ่านหินเป็นตัวแทนของตัวอย่างที่มีองค์ประกอบใกล้เคียงกับชีวมวลในการเปรียบเทียบค่าความร้อนแบบกรอสที่ทดสอบโดยวิธีทดสอบมาตรฐาน ISO 18125 และ ASTM D5865 โดยศึกษาความแตกต่างของค่าความร้อนแบบกรอสหลังหักค่าแก้ e1 และ e3 ทั้ง 2 วิธี ๆ ละ 10 ชั่วโมงโดยใช้ตัวอย่างประมาณ 1 กรัม วิธีการทดสอบแสดงในผังไหลตามรูปที่ 2 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยใช้วิธีทางสถิติตามข้อ 2.2.2 และทดสอบความเที่ยง โดยเปรียบเทียบส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานกับค่า repeatability ของวิธีตามตารางที่ 1



รูปที่ 2 : ฟังไหล (flow chart) ของวิธีการทดสอบค่าความร้อนแบบกรอสของตัวอย่างชีวมวล

2.3.3 เปรียบเทียบค่าความร้อนแบบกรอสที่ทดสอบด้วยวิธีทดสอบมาตรฐาน ISO 18125 และ ASTM D5865 ในตัวอย่างชีวมวลจำนวน 5 ชนิด

งานวิจัยนี้คัดเลือกตัวอย่างที่เป็นตัวแทนชีวมวลในประเทศไทยจำนวน 5 ชนิดตามข้อ 2.1.4 โดยนำชีวมวลมาผึ่งแห้งบดและอัดให้เป็นเม็ดขนาดประมาณ 1 กรัม ทดสอบค่าความร้อนแบบกรอสของตัวอย่างทั้งหมดด้วยวิธี ISO 18125 และ ASTM D5865 โดยทดสอบชนิดละ 3 ซ้ำ วิธีการทดสอบแสดงในผังไหลตามรูปที่ 1 เปรียบเทียบค่าความร้อนของทั้งสองวิธีด้วยวิธีทางสถิติตามข้อ 2.2.2 จากนั้นเลือกตัวอย่างชีวมวลที่มีความแตกต่างของค่าความแปรปรวนของข้อมูลมากที่สุดมาทดสอบค่าความร้อนแบบกรอสตามวิธีทดสอบมาตรฐาน ISO 18125 และทดสอบซ้ำตามวิธีทดสอบมาตรฐาน ASTM D5865 โดยเปรียบเทียบค่าความร้อนแบบกรอสด้วยวิธีทางสถิติตามข้อ 2.2.2

3. ผลและวิจารณ์ (Results and discussion)

3.1 การทวนสอบเครื่อง bomb calorimeter โดยทดสอบค่าความร้อนแบบกรอสของสารมาตรฐาน benzoic acid ตามวิธีมาตรฐาน ISO 18125 และ ASTM D5865

ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 2 ค่าเฉลี่ยของ benzoic acid ที่ทดสอบตามวิธี ASTM D5865 ได้ 26,445 J/g มีค่าใกล้เคียงกับวิธี ISO 18125 ที่ได้ 26,445 J/g ผลการทดสอบทั้งหมดมีค่าอยู่ในช่วงอ้างอิงของ benzoic acid คือ 26,413.3 – 26,482.7 J/g แสดงว่า ผลการทดสอบเป็นไปตามเกณฑ์ เมื่อทดสอบ Bias ตามสมการในข้อที่ 8 พบว่า ค่า $t_{cal} < t_{critical}$ ($t_{critical} = 2.26$) แสดงว่า ค่าความร้อนที่ทดสอบได้จากสองวิธีไม่แตกต่างจากค่าความร้อนของ benzoic acid ตามใบรับรองอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% จากนั้นเปรียบเทียบค่าความร้อนของทั้งสองวิธีโดยทดสอบความแปรปรวนของทั้งสองชุดโดยใช้การทดสอบทางสถิติ F-test พบว่า $F_{cal}(1.12) < F_{critical}(3.18)$ แสดงว่า ข้อมูลทั้งสองชุดมีความแปรปรวนไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% จึงเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยใช้วิธีการทางสถิติ t-test แบบ pooled variance พบว่า $t_{cal}(0.08) < t_{critical}(2.10)$ แสดงว่า ค่าความร้อนของวิธีทดสอบมาตรฐานทั้งสองไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้น bomb calorimeter ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีประสิทธิภาพในการหาค่าความร้อนแบบกรอสตามวิธีทดสอบมาตรฐาน ASTM D5865 และ ISO 18125

ตารางที่ 2 แสดงค่าความร้อนแบบกรอสของสารมาตรฐาน Benzoic acid ที่ทดสอบด้วยวิธี ISO 18125 และ ASTM D5865

No.	Gross calorific value (J/g)	
	ISO 18125	ASTM D5865
1	26452	26449
2	26436	26434
3	26440	26445
4	26449	26441
5	26442	26455
6	26444	26438
7	26451	26443
8	26450	26448

ตารางที่ 2 (ต่อ)

No.	Gross calorific value (J/g)	
	ISO 18125	ASTM D5865
9	26448	26450
10	26438	26445
Mean	26445	26445
SD	6	6

3.2 เปรียบเทียบค่าความร้อนแบบกรอสตามวิธีทดสอบมาตรฐาน ISO 18125 และ ASTM D5865 ของสารมาตรฐานถ่านหิน

จากตารางที่ 3 ค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบสารมาตรฐานถ่านหิน ค่าความร้อนแบบกรอสของ 2 วิธีมีค่าใกล้เคียงกัน (วิธี ASTM ได้ 20,996 J/g และวิธี ISO ได้ 21,009 J/g) ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของทั้งสองวิธีมีค่าต่ำกว่า repeatability (r) ของทั้งสองวิธี แสดงว่า ผลการทดสอบทั้งสองวิธีอยู่ในเกณฑ์การยอมรับตามวิธีมาตรฐาน เมื่อทดสอบความแปรปรวนของทั้งสองชุดโดยใช้การทดสอบทางสถิติ F-test พบว่า $F_{cal}(0.44) < F_{critical}(3.18)$ แสดงว่า ข้อมูลทั้งสองชุดมีความแปรปรวนไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% จึงเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยใช้วิธีการทางสถิติ t-test แบบ pooled variance พบว่า $t_{cal}(1.05) < t_{critical}(2.10)$ แสดงว่า ค่าความร้อนของวิธีทดสอบมาตรฐานทั้งสองไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นการทดสอบค่าความร้อนแบบกรอสในสารมาตรฐานถ่านหินตามวิธีทดสอบมาตรฐาน ASTM D5865 และ ISO 18125 ให้ผลการทดสอบที่ไม่แตกต่างกัน

ตารางที่ 3 แสดงค่าความร้อนแบบกรอสของถ่านหินมาตรฐานที่ทดสอบด้วยวิธี ISO 18125 และ ASTM D5865

No.	Gross calorific value (J/g)	
	ISO 18125	ASTM D5865
1	21037	20989
2	21029	20989
3	21048	20973
4	20981	20971

ตารางที่ 3 (ต่อ)

No.	Gross calorific value (J/g)	
	ISO 18125	ASTM D5865
5	20973	20970
6	20956	21009
7	21041	21026
8	20986	21029
9	21034	21008
10	21009	20998
Mean	21009	20996
SD	33	22
%RSD	0.157	0.146

3.3 เปรียบเทียบค่าความร้อนแบบกรอสในตัวอย่างชีวมวลด้วยวิธีทดสอบมาตรฐาน ISO 18125 และ ASTM D5865

จากตารางที่ 4 ค่าเฉลี่ยของค่าความร้อนแบบกรอสเมื่อทดสอบตามวิธี ASTM D5865 และ ISO 18125 เรียงจากมากไปน้อยได้ดังนี้ ไม้ยางพารา > ชานอ้อย > ใบอ้อย > แกลบ > กะลามะพร้าว แสดงว่า ไม้ยางพาราให้ค่าความร้อนสูงสุด และกะลามะพร้าวให้ค่าความร้อนต่ำสุด ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลการทดสอบทุกตัวอย่างน้อยกว่า repeatability ของวิธีทดสอบมาตรฐานทั้ง ASTM และ ISO แสดงว่า ผลการทดสอบอยู่ในช่วงเกณฑ์การยอมรับตามวิธีมาตรฐาน ตารางที่ 5 แสดงค่า F-test และ t-test ของค่าความร้อนแบบกรอสจากตารางที่ 4 เมื่อทดสอบความแปรปรวนของข้อมูลทั้งสองชุดโดยใช้การทดสอบทางสถิติ F-test แต่ละตัวอย่างพบว่า ชีวมวลทั้ง 5 ชนิดมีค่า $F_{cal} < F_{critical}$ แสดงว่า ข้อมูลทั้งสองชุดไม่มีความแตกต่างของความแปรปรวนอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% จึงใช้การทดสอบ t-test แบบ pooled variance พบว่า $t_{cal} < t_{critical}$ แสดงว่า ค่าความร้อนของตัวอย่างชีวมวลทั้ง 5 ชนิดที่ทดสอบด้วยวิธีทดสอบมาตรฐานทั้งสองวิธีไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบค่าความร้อนแบบกรอสที่ทดสอบด้วยวิธีมาตรฐาน ISO 18125 และ ASTM D5865 ของชีวมวล 5 ชนิดได้แก่ ชานอ้อย (A) ใบอ้อย (B) ไม้ยางพารา (C) แกลบ (D) และกะลามะพร้าว (E)

Sample	Gross calorific value (J/g), dry basis											
	ISO 18125						ASTM D5865					
	1	2	3	Mean	SD	%RSD	1	2	3	Mean	SD	%RSD
A	17470	17428	17444	17447	21	0.121	17473	17488	17445	17469	22	0.126
B	16796	16779	16738	16771	30	0.176	16776	16733	16799	16769	34	0.200
C	17722	17742	17785	17750	32	0.181	17707	17731	17713	17717	12	0.070
D	14659	14669	14647	14658	11	0.075	14683	14688	14671	14681	9	0.060
E	14610	14604	14593	14602	9	0.059	14600	14658	14642	14633	30	0.205

ตารางที่ 5 ค่าทางสถิติ F-test และ t-test ของค่าความร้อนแบบ

กรอสจากตารางที่ 4

sample	F-test	t-test
A	1.07	1.22
B	1.28	0.07
C	0.15	1.64
D	0.63	2.75
E	12.14	1.73

หมายเหตุ : $F_{critical} (2,2,0.05) = 19.00$ และ $t_{critical} (4,0.025) = 2.78$

จากตารางที่ 4 ตัวอย่างกะลามะพร้าวมีความแตกต่างของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์สูงสุดในกลุ่มตัวอย่างชีวมวล (%RSD_{ASTM} = 0.205%, %RSD_{ISO} = 0.059%) ผู้วิจัยจึงเลือกตัวอย่างนี้เป็นตัวแทนชีวมวลในการทดสอบค่าความร้อนแบบกรอสตามวิธี ISO 18125 กับค่าความร้อนแบบกรอสตามวิธี ASTM D5865 จากนั้นเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบทั้งสองวิธีด้วยสถิติ t-test ถ้าค่า t-test ผ่าน แสดงว่า ค่าเฉลี่ยของทั้งสองวิธีไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้น การทดสอบค่าความร้อนแบบกรอสของตัวอย่างชีวมวลอีก 4 ชนิดโดยวิธี ISO 18125 และ ASTM D5865 ควรมีค่าเฉลี่ยที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเช่นกัน

ตารางที่ 6 เปรียบเทียบค่าความร้อนแบบกรอสของกะลามะพร้าว (E) โดยวิธีมาตรฐาน ISO 18125 กับ ASTM D5865

No.	Gross calorific value (J/g)	
	ISO 18125	ASTM D5865
1	14613	14608
2	14628	14623
3	14626	14616
4	14616	14614
5	14615	14628
6	14623	14626
7	14622	14615
8	14612	14634
9	14620	14614

ตารางที่ 6 (ต่อ)

No.	Gross calorific value (J/g)	
	ISO 18125	ASTM D5865
10	14618	14626
mean	14619	14621
SD	5	8
%RSD	0.037	0.055

จากตารางที่ 6 ค่าเฉลี่ยของค่าความร้อนแบบกรอสของทั้ง 2 วิธีมีค่าใกล้เคียงกัน โดยวิธี ISO ได้ค่าความร้อน 14,619 J/g วิธี ASTM ได้ค่าความร้อน 14,621 J/g และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ของค่าความร้อนแบบกรอสของวิธี ASTM มีค่า 0.054% ซึ่งมีค่ามากกว่าที่ทดสอบตามวิธี ISO 18125 ที่ได้ 0.037% เมื่อทดสอบค่าความแปรปรวนด้วย F-test พบว่า $F_{cal} (2.17) < F_{critical} (3.18)$ แสดงว่า ข้อมูลทั้งสองชุดมีความแปรปรวนไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% จึงใช้วิธีทดสอบ t-test แบบ pooled variance พบว่า $t_{cal} (0.40) < t_{critical} (2.10)$ แสดงว่า ค่าความร้อนของวิธีทดสอบมาตรฐาน ISO 18125 และ ASTM D5865 ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

4. สรุป (Conclusion)

การทดสอบค่าความร้อนแบบกรอสตามวิธี ISO 18125 และ ASTM D5865 ของสารมาตรฐานถ่านหินและตัวอย่างชีวมวล เช่น กะลามะพร้าวซึ่งเป็นตัวแทนของชีวมวลที่มีการกระจายของข้อมูลมากที่สุด พบว่า ค่าความร้อนที่ทดสอบได้ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% วิธีทดสอบมาตรฐาน ASTM D5865 จึงอาจเป็นทางเลือกสำหรับการหาค่าความร้อนแบบกรอส เนื่องจากในการทดสอบค่าแก๊สจะใช้สารละลาย $BaCl_2$ ซึ่งมีความเสถียรที่สูงกว่าสารละลาย $Ba(OH)_2$ ในการทดสอบ อีกทั้งยังสามารถใช้เป็นข้อมูลในการเลือกใช้วิธีมาตรฐานที่เหมาะสมในการหาค่าความร้อนของตัวอย่างชีวมวลต่อไปในอนาคต อย่างไรก็ตาม อาจต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมในตัวอย่างชีวมวลที่หลากหลาย เพื่อยืนยันว่าวิธีทดสอบมาตรฐาน ASTM D5865 สามารถเป็นวิธีทดสอบทางเลือกได้

5. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

งานวิจัยนี้สำเร็จได้ด้วยการสนับสนุนด้านเครื่องมือวิเคราะห์ สารเคมีและตัวอย่างชีวมวลจากกลุ่มเชื้อเพลิงและผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม กองเคมีภัณฑ์และผลิตภัณฑ์อุปโภค กรมวิทยาศาสตร์บริการ และได้รับการสนับสนุนงบวิจัยจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ

6. เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 18125:2017. Solid biofuels – Determination of calorific value.* 2017.
- [2] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 1928:2020. Coal and coke – Determination of gross calorific value.* 2020.
- [3] ASTM INTERNATIONAL. *ASTM D5865-19. Standard test method for gross calorific value of coal and coke.* 2019.
- [4] ASTM INTERNATIONAL. *ASTM E711-87 (1996). Standard test method for gross calorific value of refuse-derived fuel by the bomb calorimeter.* 1996.
- [5] STANDARDS AUSTRALIA. *AS 1038.5-1998. Coal and coke - Analysis and testing gross calorific value.* 1998.
- [6] GERMAN INSTITUTE FOR STANDARDIZATION. *DIN 51900-2:2003-05. Determining the gross calorific value of solid and liquid fuels using the isoperibol or static jacket calorimeter and calculation of net calorific value.* 2003-05.
- [7] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. *มอก. 2772-2560. เชื้อเพลิงชีวมวลแข็งอัดเม็ด.* 2560.
- [8] KPALO, S.Y., M.F. ZAINUDDIN, L.A. MANAF and A.M. ROSLAN. Production and characterization of hybrid briquettes from corncobs and oil palm trunk bark under a low pressure densification technique. *Sustainability.* 2020, **12**, 2468.
- [9] JOSE, G., G. IVAN, A. MARIA and B. JAVIER. Simulation of adiabatic gasification of corn straw using air-steam blends as an oxidizing agent. *Global Journal of Engineering Sciences.* 2019, **1**(3).
- [10] BADAN, P., T. THEPCHATRI, E. TANAVAT, M. HARUTHAITHANASAN and K. HARUTHAITHANASAN. Fuel properties of some native tree species for biomass energy in Thailand. *Thai Journal of Agricultural Science.* 2020, **53**(1), 53-57.
- [11] MONDRAGON-VALERO, A., B. VELAZQUEZ-MARTI, D. M. SALAZAR and I. LOPEZ-CORTES. Influence of fertilization and rootstocks in the biomass energy characterization of *Prunus dulcis* (Miller). *Energies.* 2018, **11**(5), 1189.

การเตรียมเคลือบที่มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ สำหรับเนื้อดินภาชนะเซรามิกหุงต้มประเภทสัมผัสเปลวไฟโดยตรง

Preparation of low thermal expansion glaze for ceramic cookware body of direct flame type

ปราณี จันทรลา^{1**}, กรองกาญจน์ ศิริบุญวัฒนา¹, ธนากร วาสนาเพียรพงศ์²

Pranee Junlar^{1**}, Krongkarn Sirinukunwattana¹, Thanakorn Wasanapiarnpong²

บทคัดย่อ

ภาชนะเซรามิกหุงต้มประเภทสัมผัสเปลวไฟโดยตรง มีสมบัติค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ มีความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเฉียบพลันได้ดี มีค่าการดูดซึมน้ำต่ำ และมีค่าความแข็งแรงสูงสามารถนำมาใช้เป็นภาชนะสำหรับปรุงอาหารบนเตาแก๊สโดยไม่เกิดแตกร้าว ดังนั้นเคลือบสำหรับภาชนะเซรามิกหุงต้มประเภทนี้จะต้องมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำกว่าหรือเท่ากับเนื้อดิน และต้องมีความเข้ากันได้ระหว่างวัสดุเนื้อพื้นและผิวเคลือบ ในงานวิจัยนี้ทดลองเตรียมสูตรเคลือบสำหรับเนื้อดินภาชนะเซรามิกหุงต้มคอมโพสิตคอร์เดียไรต์/สปอดูเมน ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ 2.83×10^{-6} ต่อองศาเซลเซียส โดยคำนวณสูตรจากระบบ $\text{Li}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ และแปรค่าอัตราส่วนจำนวนโมลของอะลูมินา ตั้งแต่ 0.483-0.653 และแปรค่าอัตราส่วนจำนวนโมลของซิลิกา ตั้งแต่ 4.308-4.508 โดยเตรียมจากวัตถุดิบตั้งต้นจาก แร่เพทาไลต์ แคลเซียมซิลิเกต ทัลค์ อะลูมินา ซิลิกา และเซอร์โคเนียมซิลิเกต บดผสมแบบเปียกด้วยหม้อบด เคลือบชั้นทดสอบ เเผาที่อุณหภูมิ 1275 องศาเซลเซียส ยืนไฟ 1 ชั่วโมง จากนั้นนำมาวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนด้วยเครื่อง XRD หาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนด้วยเครื่องไดลาโตมิเตอร์ ทดสอบความทนทานต่อการร้าวตัวของเคลือบตามมาตรฐาน ASTM C424-80 ด้วยเครื่องมือหนึ่งอัดแรงดันที่ความดัน 250 psi การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคและธาตุองค์ประกอบเชิงปริมาณทำโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนและเทคนิคเอนเนอร์จิสเปกโทรสโกปีเอกซเรย์ตามลำดับ ผลการทดลองพบเฟสหลัก 2 เฟส คือ เพทาไลต์และเซอร์คอน ที่มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ ผิวเคลือบมีความเรียบเนียนและปราศจากการร้าวตัวของผิวเคลือบ

Abstract

Ceramic flameware bodies have a low thermal expansion coefficient, excellent thermal shock resistance, low water absorption and high strength. It can be used for direct flame cooking on stove-top without cracking. Therefore, a glaze for ceramic cookware body requires thermal expansion coefficient value lower than or similar to that of the body to get compatibility between matrix and coating. This study focused on the glaze of cordierite/spodumene composite for ceramic cookware body which has low thermal expansion coefficient of $2.83 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. The glazes in a $\text{Li}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ system were calculated by varying the mole ratio of Al_2O_3 between at 0.483-0.653 and SiO_2 between of 4.308-4.508. The starting material including petalite, calcium carbonate, talc, alumina, silica and zirconium silicate were mixed via wet ball milling. The samples were coated onto the composite body and fired at 1275 °C with 1 h soaking time. Phase content was analyzed by XRD. Thermal expansion coefficient was tested by dilatometer. The crazing resistance was tested using an autoclave at 250 psi followed ASTM C424-80. The microstructure quantitative analysis and elemental archived by SEM&EDX technique, respectively. The results showed

¹ กรมวิทยาศาสตร์บริการ

² ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

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

petalite and zircon as two main phases, providing thermal expansion coefficient with smooth and crack-free surfaces.

คำสำคัญ : ภาชนะเซรามิกหุงต้ม เคลือบการขยายตัวทางความร้อนต่ำ เคลือบเซรามิก เนื้อดินเซรามิก

Keywords : Ceramic cookware, Low thermal expansion glaze, Ceramic glaze, Ceramic body

1. บทนำ (Introduction)

ภาชนะเซรามิกหุงต้มประเภทสัมผัสสเปาไฟโดยตรงสามารถนำมาใช้ปรุงอาหารบนเตาแก๊สได้โดยตรง สามารถใช้งานได้อย่างทนทานและใช้ซ้ำได้โดยไม่เกิดการแตกร้าว และยังใช้งานได้บนเตาอบ เตาไฟฟ้าและเตาไมโครเวฟได้ เนื้อดินที่จะนำมาใช้ผลิตเป็นภาชนะเซรามิกประเภทนี้จะต้องมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำประมาณ 0.9×10^{-6} ต่อองศาเซลเซียส มีการดูดซึมน้ำต่ำ มีค่าความแข็งแรงสูง และมีความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเฉียบพลันได้ดี ปัจจุบันภาชนะเซรามิกประเภทสัมผัสสเปาไฟโดยตรงสามารถผลิตได้จากเนื้อดินคอร์เดียไรต์ เนื้อดินสปอดูมิน เนื้อดินเพทาไลต์ หรือเนื้อดินเซรามิกคอมโพสิท เช่น เนื้อดินอะลูมิเนียม/ไททานีต เนื้อดินสปอดูมิน/มุลไลต์ เนื้อดินคอร์เดียไรต์/สปอดูมิน เนื้อดินคอร์เดียไรต์/สปอดูมิน/มุลไลต์ เป็นต้น ดังนั้นในการเคลือบผิวเนื้อดินประเภทนี้เคลือบจะต้องมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำกว่าหรือเท่ากับเนื้อดิน มีความเข้ากันได้ดี สามารถยึดเกาะกันได้ดีกับวัสดุเนื้อพื้น ไม่เกิดการแตกร้าวที่ผิวหลังเผา ในระหว่างใช้งานหรือหลังใช้งานซ้ำหลายครั้งบนเตาแก๊ส เตาอบ เตาไฟฟ้า และเตาไมโครเวฟ [1-6]

จากการศึกษาวิจัยและบทความทางวิชาการพบว่าวัสดุเคลือบที่มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ สามารถเตรียมได้จากสปอดูมินร้อยละ 30-41 โดยน้ำหนัก แร่ฟันม้าร้อยละ 10-14 โดยน้ำหนัก โดโลไมต์ร้อยละ 6-8 โดยน้ำหนัก ทัลค์ร้อยละ 4-5 โดยน้ำหนัก ดินเหนียวร้อยละ 6-14 โดยน้ำหนัก อะลูมินาร้อยละ 2-3 โดยน้ำหนัก ควอตซ์ร้อยละ 20-42 โดยน้ำหนัก เเผาที่อุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส [3] หรือสามารถเตรียมได้จากส่วนผสมของทัลค์ร้อยละ 14 โดยน้ำหนัก แคลเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก สปอดูมินร้อยละ 47 โดยน้ำหนัก ดินขาวร้อยละ

5 โดยน้ำหนัก และซิลิการ้อยละ 30 โดยน้ำหนัก เเผาที่อุณหภูมิ 1260-1285 องศาเซลเซียส [7-8] หรือเตรียมได้จากแร่เพทาไลต์ร้อยละ 76 โดยน้ำหนัก ทัลค์ร้อยละ 14 โดยน้ำหนัก แคลเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 3.5 โดยน้ำหนัก และดินขาวร้อยละ 6.5 โดยน้ำหนัก เเผาที่อุณหภูมิ 1280 ถึง 1325 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นเคลือบในระบบ $\text{Li}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ [9]

เมื่อศึกษางานวิจัยเพิ่มเติมพบว่า เพทาไลต์ (petalite) เป็นสารประกอบลิเทียมอะลูมิเนียมซิลิเกต มีสูตรทางเคมี $\text{Li}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 8\text{SiO}_2$ มีจุดหลอมเหลวประมาณ 1350 องศาเซลเซียส เป็นแร่ธรรมชาติที่พบมากในแอฟริกาใต้ จีน และออสเตรเลีย เป็นต้น มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำประมาณ 0.9×10^{-6} ต่อองศาเซลเซียส นิยมนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมเซรามิกและแก้วโดยผสมลงในเนื้อดินและเคลือบเซรามิก เพื่อลดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของเนื้อดิน เป็นฟลักซ์ที่ดีเมื่อใส่ลงไปในเคลือบทำให้เกิดสีสนที่สวยงาม โดยการใช้งานไม่ต้องนำมาเผาแคลไซน์ มีความเสถียรทางโครงสร้างที่อุณหภูมิสูง [10] จึงเป็นแร่ที่น่าสนใจนำมาเป็นวัตถุดิบหลักในการทำสูตรเคลือบที่มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงศึกษาการเตรียมเคลือบที่มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำจากแร่เพทาไลต์ ทัลค์ แคลเซียมคาร์บอเนต อะลูมินา ดินขาว และควอตซ์ ทำการแปรค่าอัตราส่วนโดยโมลของอะลูมินาต่อซิลิกา เเผาเคลือบที่อุณหภูมิ 1275 องศาเซลเซียส เพื่อใช้เคลือบภาชนะเซรามิกหุงต้มประเภทสัมผัสสเปาไฟโดยตรง

2. วิธีการวิจัย (Experimental methods)

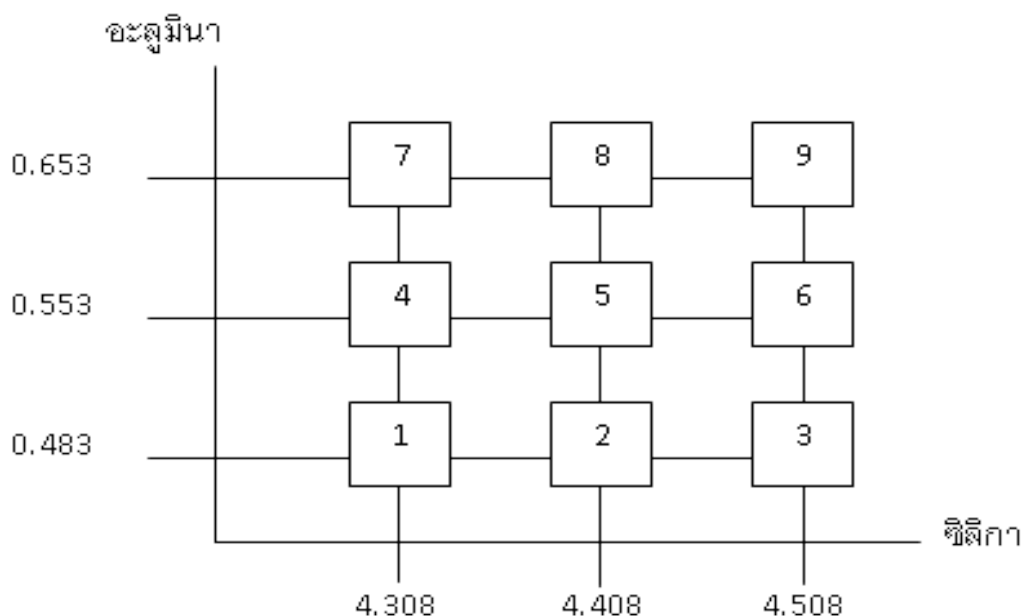
จากการศึกษาวิจัยและบทความทางวิชาการพบว่าเคลือบที่มีการค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ จะมีระบบ $\text{Li}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ [7-9] ดังนั้นจึงนำมาใช้ในการคำนวณเป็นสูตรเคลือบพื้นฐาน และแปรค่าอะลูมินา/ซิลิกา โดยโมลของอะลูมินามีค่าอยู่ระหว่าง 0.483- 0.653 และโมลของซิลิกามีค่าอยู่ระหว่าง 4.308- 4.508 ทดลองเตรียมสูตรเคลือบและนำมาเคลือบบนเนื้อดินเซรามิกคอมโพสิทชนิดสปอดูมิน/คอร์เดียไรต์ เเผาที่อุณหภูมิ 1275 องศาเซลเซียส ยืนไฟที่อุณหภูมิสูงสุด 1 ชั่วโมง

2.1 การคำนวณสูตรเคมี

การทดลองนี้เลือกใช้เคลือบระบบ $\text{Li}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ โดยมีสูตรเคมีพื้นฐานดังนี้ คือ

0.459 Li_2O		
0.350 CaO	0.483-0.653 Al_2O_3	4.308-4.508 SiO_2
0.191 MgO		

ทำการแปรเปลี่ยนจำนวนโมลของอะลูมินามีค่าอยู่ระหว่าง 0.483-0.653 และโมลของซิลิกามีค่าอยู่ระหว่าง 4.308-4.508 ดังแสดงในรูปที่ 1 และตารางที่ 1 โดยทุกสูตรเคมีเติมเซอร์คอนร้อยละ 10 เนื่องจากเซอร์คอนเป็นสารคงตัวในเคลือบ ช่วยให้เคลือบเกิดความทนทานต่อสารเคมี เพิ่มความแข็งแรงผิวเคลือบ และความทึบแสงโดยเกิดผลึกขนาดเล็ก



รูปที่ 1 : การแปรค่าจำนวนโมลอะลูมินาและซิลิกา

ตารางที่ 1 จำนวนโมลของอะลูมินาและซิลิกาที่ใช้ในการทดลอง

จุดที่	โมลของอะลูมินา	โมลของซิลิกา
Pe.1	0.483	4.308
Pe.2	0.483	4.408
Pe.3	0.483	4.508
Pe.4	0.553	4.308
Pe.5	0.553	4.408
Pe.6	0.553	4.508
Pe.7	0.653	4.308
Pe.8	0.653	4.408
Pe.9	0.653	4.508

2.2 วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง

- แร่เพทาไลต์ ($\text{Li}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 8\text{SiO}_2$) ของบริษัท เซรามิก อาร์ อัส อินเตอร์ เนชั่นแนล เทคดิงจำกัด นำเข้าจากประเทศออสเตรเลีย
- อะลูมินา A31 (Al_2O_3 , 99.6 %), ของบริษัท กลาสรุม จำกัด นำเข้าจากประเทศญี่ปุ่น
- ทัลค์ ($2\text{MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$) ของบริษัท เซอร์นิค อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด นำเข้าจากประเทศจีน
- ดินขาว (Cerafast) ของบริษัท อินดัสเตรียส มินเนอรัล ดีวิลอปเม้นท์ จำกัด จากประเทศไทย
- ควอตซ์ (Cerasil), ของบริษัท อินดัสเตรียส มินเนอรัล ดีวิลอปเม้นท์ จำกัด จากประเทศไทย
- แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ของบริษัท เซอร์นิค อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด จากประเทศไทย
- เซอร์โคเนียมซิลิเกต (ZrSiO_4) ของบริษัท เซอร์นิค อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด จากประเทศสเปน

2.3 การคำนวณส่วนผสม

จากค่าสูตรพื้นฐานที่กำหนดในข้อ 2.1 โดยส่วนผสมเคลือบที่ใช้ทดลอง แสดงดังตารางที่ 2 ซึ่งทุกสูตรเติมเซอร์คอนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 2 จำนวนโมลของอะลูมินาและซิลิกาและส่วนผสมเคลือบที่ใช้ในการทดลอง

สูตร			ส่วนผสมของเคลือบต่อ 100 กรัม					
จุด	เพทาไลต์ (กรัม) อะลูมินา	ทัลค์ (กรัม) ซิลิกา	แคลเซียม คาร์บอเนต (กรัม)	อะลูมินา (กรัม)	ดินขาว (กรัม)	ควอตซ์ (กรัม)	ดินขาว (กรัม)	ควอตซ์ (กรัม)
1	0.483	4.308	79.3	14.6	3.7	-	1.7	0.7
2	0.483	4.408	78.0	14.4	3.6	-	1.7	2.3
3	0.483	4.508	76.7	14.1	3.5	-	1.7	3.9
4	0.553	4.308	77.7	14.3	3.6	1.8	2.2	0.4
5	0.553	4.408	76.0	14.0	3.5	-	6.5	-
6	0.553	4.508	74.7	13.8	3.5	-	6.4	1.6
7	0.653	4.308	75.5	13.9	3.5	4.1	3.0	-
8	0.653	4.408	73.9	13.6	3.4	2.7	6.3	-
9	0.653	4.508	72.8	13.4	3.4	2.7	6.2	1.6

2.4 การเตรียมเคลือบและขั้นตอนทดสอบเคลือบ

บดส่วนผสมตามสูตรในหม้อบดให้ละเอียดผ่านตะแกรง 100 เมช ชุบเคลือบบนชิ้นทดสอบ ที่ผ่านการเผาที่ 800 องศาเซลเซียส นำไปเผาที่อุณหภูมิ 1275 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง ยืนไฟที่อุณหภูมิสูงสุด 1 ชั่วโมง

2.5 การทดสอบสมบัติของเคลือบ

2.5.1 นำชิ้นทดสอบที่เคลือบแล้วเผาที่อุณหภูมิ 1275 องศาเซลเซียส ตรวจสอบพินิจดูลักษณะทั่วไปด้วยตา และดูการร้าวด้วยสารละลายเมทิลีนบลู

2.5.2 ทดสอบความทนต่อการร้าวเครื่องด้วยหม้อนึ่งอัดแรงดัน (autoclave) ที่ความดัน 250 psi โดยใช้วิธีทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C424-80

2.5.3 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟส โดยใช้เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8-Advance มี Cu เป็นตัวกำเนิดรังสี และ Ni เป็น filter ตั้งค่า 2θ ตั้งแต่ 5 ถึง 80 องศา ใช้ตัวอย่างที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1275 องศาเซลเซียส

2.5.4 หาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนที่อุณหภูมิ 25-1000 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 3 องศาเซลเซียสต่อวินาที ด้วยเครื่องไดลาโตมิเตอร์ (Netzsch รุ่น DIL402PC)

2.5.5 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วย Scanning electron microscope (SEM) และ วิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDX)

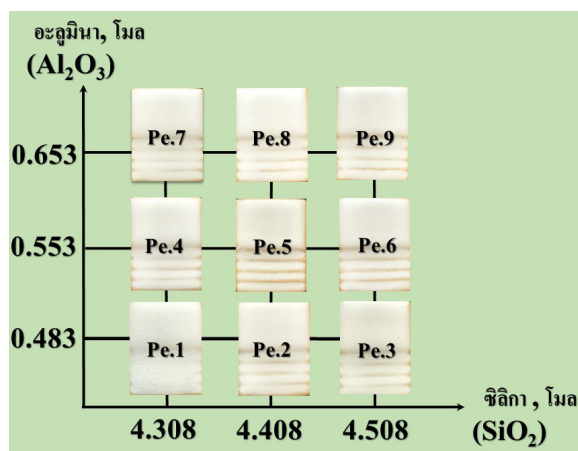
3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล (Results and Discussion)

3.1 ผลการทดลองเคลือบ

ผลการตรวจพินิจลักษณะทั่วไปของเคลือบบนเนื้อดินเซรามิกคอมโพสิตหลังเผาที่อุณหภูมิ 1275 องศาเซลเซียส พบว่าทุกสูตรมีลักษณะสีขาวทึบ ผิวมัน กึ่งด้าน ไม่ร้าว และเมื่อนำไปทดสอบความทนทานต่อการร้าวในหม้อนึ่งอัดแรงดันที่ความดัน 250 psi โดยใช้วิธีทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C424-80 พบการแตกร้าวในสูตร Pe.1-7 และ Pe.9 ยกเว้นสูตร Pe.8 ไม่พบการแตกร้าวของทั้งเนื้อดินและเคลือบ ดังแสดงในรูปที่ 2 และตารางที่ 3

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

โดยการร้าวตัวของสูตร Pe.1-7 และ Pe.9 สาเหตุอาจเกิดจากการที่เนื้อดินและชั้นผิวเคลือบไม่เข้ากันหรือไม่เป็นเนื้อเดียวกัน เนื่องจากเนื้อดินและเคลือบมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนแตกต่างกัน โดยเคลือบสูตร Pe.1 และ Pe.3 มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนเท่ากับ 0.65×10^{-6} และ Pe.3 มีค่าเท่ากับ 1.13×10^{-6} ต่อองศาเซลเซียส ตามลำดับ ส่วนเนื้อดินมีค่าเท่ากับ 2.83×10^{-6} ต่อองศาเซลเซียส จึงเป็นสาเหตุทำให้เกิดความเค้นตกค้าง (residual stresses) หลังเผาขึ้นทดสอบ ระหว่างเนื้อดินและผิวชั้นเคลือบภายใต้ความเค้นแรงดึงและแรงอัด เกิดการขยายตัวและหดตัวไม่สัมพันธ์กัน ดังนั้นเมื่อทำการทดสอบการทนทานต่อการร้าวในตัวในสภาวะภายใต้ความดันที่ 250 psi เนื้อดินและเคลือบเกิดการขยายตัวที่ไม่ใกล้เคียงกันจึงเกิดการร้าวตัวของเคลือบ [11-13]



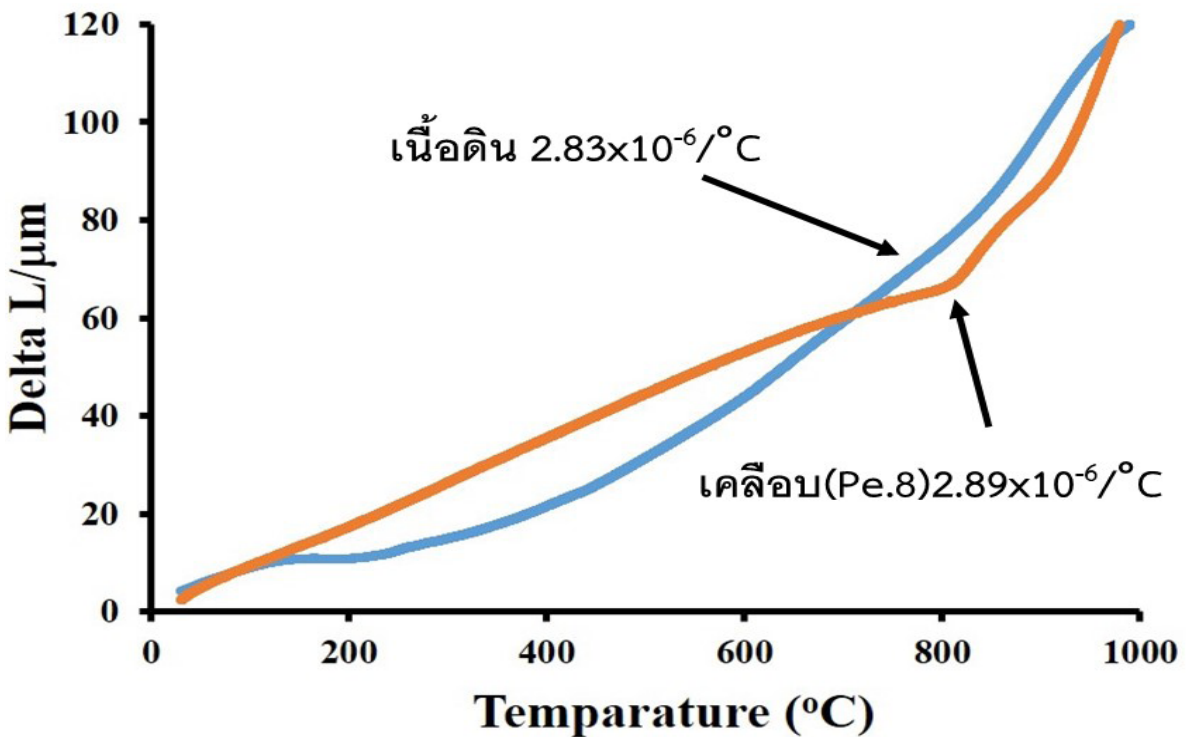
รูปที่ 2 : ลักษณะทั่วไปของเคลือบหลังเผา 1275 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 3 ผลการทดลองเคลือบหลังเผาที่อุณหภูมิ 1275 องศาเซลเซียส

สูตรที่	ลักษณะของผิวเคลือบหลังเผาและทดสอบ		
	ใส-ทึบ Transparent-Opaque	เนื้อแก้ว-ด้าน Glass-Matte	การทนทานต่อการ ร้าว(crazing Resistance)
Pe.1	สีขาวทึบ	กึ่งมัน-กึ่งด้าน	ร้าว
Pe.2	สีขาวทึบ	กึ่งมัน-กึ่งด้าน	ร้าว
Pe.3	สีขาวทึบ	กึ่งมัน-กึ่งด้าน	ร้าว

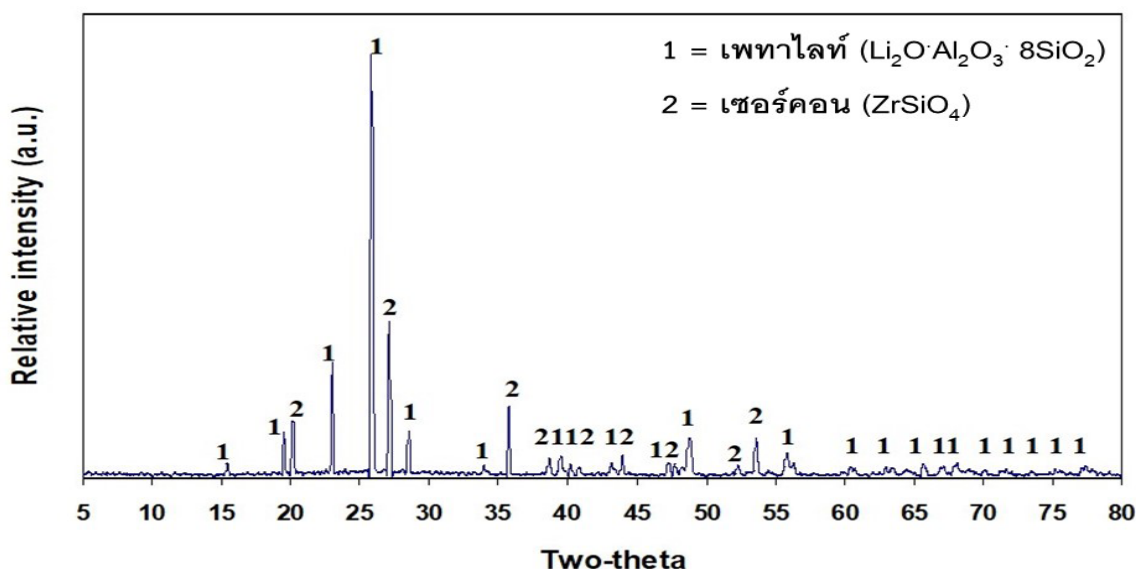
สูตรที่	ลักษณะของผิวเคลือบหลังเผาและทดสอบ		
	ใส-ทึบ Transparent-Opaque	เนื้อแก้ว-ด้าน Glass-Matte	การทนทานต่อการ ร้าว(Crazing Resistance)
Pe.4	สีขาวทึบ	กึ่งมัน-กึ่งด้าน	ร้าว
Pe.5	สีขาวทึบ	กึ่งมัน-กึ่งด้าน	ร้าว
Pe.6	สีขาวทึบ	กึ่งมัน-กึ่งด้าน	ร้าว
Pe.7	สีขาวทึบ	กึ่งมัน-กึ่งด้าน	ร้าว
Pe.8	สีขาวทึบ	กึ่งมัน-กึ่งด้าน	ไม่ร้าว
Pe.9	สีขาวทึบ	กึ่งมัน-กึ่งด้าน	ร้าว

เมื่อนำสูตรเคลือบ Pe.8 ทำการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนพบว่า เคลือบมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนเท่ากับหรือใกล้เคียงกับเนื้อดิน คือ เนื้อดินมีค่าเท่ากับ 2.83×10^{-6} ต่อองศาเซลเซียส และเคลือบมีค่าเท่ากับ 2.89×10^{-6} ต่อองศาเซลเซียส ซึ่งจะช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้แก่ชิ้นทดสอบเนื่องจากชิ้นงานอยู่ภายใต้แรงอัด และไม่ทำให้เคลือบเกิดการร้าว [14-15] ดังแสดงในรูปที่ 3

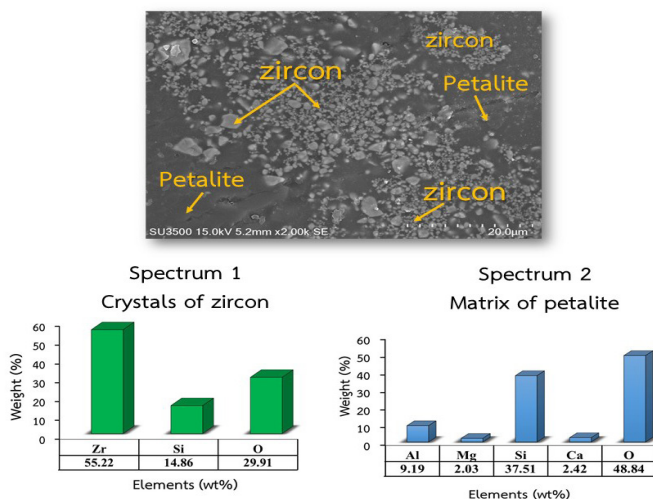


รูปที่ 3 : ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของเนื้อดินและเคลือบหลังเผาที่อุณหภูมิ 1275 องศาเซลเซียส

จากผลการทดลองเตรียมเคลือบ พบว่าสูตร Pe.8 ไม่เกิดการร้าวหลังทดสอบความทนทานต่อการร้าว โดยใช้วิธีทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C424-80 หลังเผาที่อุณหภูมิ 1275 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงนำชิ้นทดสอบมาวิเคราะห์เฟสโดย XRD พบ 2 เฟสหลัก คือ เพทาไลต์และเซอร์คอน ดังแสดงในรูปที่ 4 เนื่องจากในสูตรส่วนผสมของเคลือบมีองค์ประกอบหลักเป็นแร่เพทาไลต์มากกว่าร้อยละ 70 จึงทำให้พบเป็นเฟสหลัก ส่วนวัตถุดิบอื่นๆ คือ ดินขาว แคลเซียมคาร์บอเนต ควอตซ์ อะลูมินาและทัลค์ เติมนิเวศในส่วนเพียงเล็กน้อยหรือบางวัตถุดิบเป็นวัสดุที่สามารถหลอมได้ที่อุณหภูมิ 1275 องศาเซลเซียส จึงทำให้ไม่ปรากฏเฟส แต่ในส่วนเซอร์คอนนั้นถึงแม้ใส่เพียงร้อยละ 10 แต่เนื่องจากมีจุดหลอมเหลวสูงประมาณ 1500 องศาเซลเซียส เป็นวัตถุดิบที่มีความเสถียรที่อุณหภูมิสูง นิยมนำมาใส่เคลือบเพื่อให้เกิดความแข็งแรง ทนต่อการขีดข่วน ช่วยให้มีความขาวทึบ [16] จึงไม่เกิดหลอมละลายผสมกับเพทาไลต์ แต่เกิดเป็นผลึกขนาดเล็กกระจายตัวรอบๆ เนื้อพื้นที่เป็นเพทาไลต์ ดังแสดงในรูปที่ 5 โดยวัสดุที่เป็นส่วนเนื้อพื้นต่อเนื่องถึงกัน คือ เพทาไลต์ และเกิดผลึกเซอร์คอนที่มีรูปร่างไม่แน่นอนกระจายตัวทั่วทั้งชิ้นทดสอบ หลังเผาที่อุณหภูมิ 1275 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4 : องค์ประกอบทางเฟสของเคลือบหลังเผา ที่อุณหภูมิ 1275 องศาเซลเซียส



รูปที่ 5 : ผลตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วย SEM และวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณด้วย EDX หลังเผาที่อุณหภูมิ 1275 องศาเซลเซียส

จากนั้นนำสูตรเคลือบ Pe.8 เคลือบลงบนผลิตภัณฑ์ตัวอย่างภาชนะเซรามิกหุงต้มรูปทรงหม้อที่มีความเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 เซนติเมตร มีความจุ 1 ลิตร ขึ้นรูปด้วยวิธีหล่อแบบ เผาที่อุณหภูมิ 1275 องศาเซลเซียส พบว่าผลิตภัณฑ์ตัวอย่างหลังเผามีผิวเคลือบที่เรียบเนียน ผิวแข็งมันเงา ทดสอบการใช้งานโดยตั้งบนเตาแก๊สไม่พบการแตกร้าวก่อนและหลังการใช้งาน แสดงดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 : ผลิตภัณฑ์ตัวอย่างหลังเคลือบสูตรเคลือบ Pe.8 หลังเผาที่ อุณหภูมิ 1275 องศาเซลเซียส

4. สรุป (Conclusion)

จากผลการทดลองสูตรเคลือบที่มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำสำหรับเนื้อดินภาชนะเซรามิกหุงต้มประเภทสัมผัสเปลวไฟโดยตรง หลังเผาที่อุณหภูมิ 1275 องศาเซลเซียส ยืนไฟที่อุณหภูมิสูงสุด 1 ชั่วโมง พบสูตรเคลือบที่ดีที่สุดคือ Pe.8 มีลักษณะผิวเคลือบสีขาวทึบ ผิวเคลือบแข็งมันเงา ไม่เกิดร้าวแตกหลังทดสอบความทนทานต่อการรานตามมาตรฐาน ASTM C424-80 โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ 2.89×10^{-6} ต่อองศาเซลเซียส เข้ากันได้กับเนื้อดินเซรามิกคอมโพสิทคอร์เดียไรต์/สปอดูมิน ที่มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความต่ำ 2.83×10^{-6} ต่อองศาเซลเซียส เมื่อทดลองเคลือบผลิตภัณฑ์ตัวอย่างและทดสอบการใช้งานจริงบนเตาแก๊สไม่พบการเกิดการรานตัวของเคลือบ ดังนั้นสูตรเคลือบดังกล่าวสามารถนำมาเตรียมเคลือบเนื้อดินภาชนะเซรามิกหุงต้มประเภทสัมผัสเปลวไฟโดยตรงได้

5. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

ขอขอบคุณผู้บังคับบัญชาและเจ้าหน้าที่ กองวัสดุและวิศวกรรมทุกท่านช่วยสนับสนุนการทำงานวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] ปราณี จันทร์ลา. ความต้านทานการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเฉียบพลันและสมบัติหลังเผาของวัสดุเชิงประกอบสปอคูมิน/คอร์เดียไรต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2554.
- [2] วรณา ต.แสงจันทร์, ลดา พันธุ์สุนธนา และปราณี จันทร์ลา. การพัฒนาภาชนะเซรามิกหุงต้มเนื้อคอร์เดียไรต์. *วารสารผลงานวิชาการ กรมวิทยาศาสตร์บริการ*. 2555, 1(1), มกราคม – มิถุนายน, 59-71.
- [3] SAENGCHANTARA, WANNA T., LADA PUNSUKUMTANA and PRANEE JUNLAR. Development of low thermal expansion glaze cordierite body. *Suranaree Journal of Science and Technology*. 2013, 21(1), 21-25.
- [4] ปราณี จันทร์ลา. การเตรียมและลักษณะสมบัติของวัสดุเชิงประกอบคอร์เดียไรต์/สปอคูมิน/มุลไลต์สำหรับภาชนะเซรามิก ประเภทสัมผัสเปลวไฟโดยตรง. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรดุษฎีบัณฑิต, ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2562.
- [5] OLIVEIRA, F.A. COSTA, J.A. FRANCO, J. CRUZ FERNANDES and D. DIAS. Newly developed Cordierite-Zircon composites. *British Ceramic Transactions*. 2020, 101(1), 14-21.
- [6] PARMALEE, C.W. *Ceramic Glazes*. 3rd edition, Boston : Cahnerns Books, 1973, pp. 250-251.
- [7] TECHNO FILE. *Flameware* [online]. 2011. [viewed 3 June 2020] Available from: <https://ceramicarts-network.org/wp-content/uploads/2011/12/flamewaremay2011cmtechnofile.pdf>.
- [8] CHECHOPOULOS, G. J. A discussion of flameware. *Ceramics Technical*. 2011, 32, 12–18.
- [9] คชินท์ สายอินทวงศ์. สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน คุณสมบัติที่สำคัญที่หลายคนมองข้าม. 2554. [ออนไลน์]. [อ้างถึงวันที่ 14 มิถุนายน 2564]. เข้าถึงจาก: http://www.thaiceramicsociety.com/ch_heat.php.
- [10] FISHWICK, J.H. *Applications of lithium in ceramics*. Boston : Cahnerns Books, 1974, 156 p.
- [11] KAVANOVA, M., A. KLOUŽKOVÁ and J. KLOUŽEK. Characterization of the interaction between glazes and ceramic bodies. *Ceramics – Silikáty*. 2017, 61(3), 267-275.
- [12] KINGERY, W.D., H.K. BOWEN and D.R. UHLMANN. *Introduction to Ceramic*. 2nd edition. New York : John Wiley & Sons, 1976, pp. 603-611.
- [13] NORTON, F.H. *Fine ceramic: Technology and appications*. New York : McGrew-Hill, 1974, pp. 287-289.
- [14] EPPLER, RICHARD A. and DOUGLAS R. EPPLER. *Glazes and Glass Coatings*. Ohio : The American Ceramic Society, 2000, pp. 25-29.
- [15] RHODES, DANIEL. *Clay and glazes for the potter*, 3rd edition. Revised and expanded by Robin Hopper. Wisconsin : Krause publications, 2000, pp. 111-113.
- [16] EPPLER, RICHARD ANDREW and O'CONOR, EUGENE F. Composition and process for glazing ceramic ware. United states patent application 3871890. 1975-03-18.

การพัฒนาเส้นพิมพ์ชีวภาพจากเส้นใยกัญชงสำหรับเครื่องพิมพ์สามมิติ

Development of bio-filament using hemp fiber for 3D-printer

ธนัชฐา ภูลาวรรณ^{1*}Tanittha Pullawan^{1*}

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเบื้องต้นในการนำเส้นใยกัญชงมาใช้เป็นสารเสริมแรงในพอลิเมอร์ชีวภาพ คือ พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid, PLA) และนำคอมโพสิตที่ได้มาใช้ในการพิมพ์สามมิติด้วยเทคนิค FDM ทั้งนี้ เส้นใยกัญชง (ความยาวเฉลี่ย 150 ไมครอน) ได้ถูกนำมามาบดใน PLA 2003D ด้วยเทคนิคการหลอมผสมที่อัตราส่วนต่างกัน (1, 2.5, 5 และ 10%wt) โดยพบว่า ค่าความทนแรงดึงเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้น แต่ก็มีค่าความเปราะเพิ่มขึ้นด้วย อัตราส่วน PLA/1%wt เส้นใยกัญชง ถูกเลือกใช้ในการศึกษาปริมาณพลาสติกไซเซอร์ที่เหมาะสม เพื่อแก้ปัญหาค่าความเปราะได้มีการปรับสมบัติความยืดหยุ่นของวัสดุโดยการเติมพลาสติกไซเซอร์ พอลิเอทิลีน ไกลคอล (Polyethylene glycol, PEG) ในอัตราส่วน 2.5 และ 5%wt ตามลำดับ ซึ่งพบว่า วัสดุมีค่าความยืดตัวที่จุดขาดเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นคุณสมบัติที่จำเป็นในการนำมาขึ้นรูปเป็นเส้นพิมพ์สำหรับงานพิมพ์สามมิติ

Abstract

This work is a preliminary study about the use of hemp fiber as filler in a biopolymer, i.e. polylactic acid (PLA), and the following use of such composites in the 3D printing via FDM technique. In particular, hemp fiber (average length 150 micron) was added via melt-compounding into PLA 2003D at different weight percentages (1, 2.5, 5 and 10%wt). We observed that not only tensile strength increased with the increased of hemp fiber content, but also increase in brittleness. Moreover, PLA/1%wt hemp fiber was chosen to study the optimal amount of plasticizer. To solve the brittleness problem, we adjust the flexibility of the material by adding the plasticizer Polyethylene glycol (PEG) ratio 2.5 and 5%wt, respectively. The results showed a remarkable increase in the elongation at break of material, which is a necessary feature to form a 3D printed filament for 3D printing.

คำสำคัญ : ไบโอบีโอมโพสิท กัญชง เครื่องพิมพ์สามมิติ

Keywords : Biocomposite, Hemp, 3D-printer

1. บทนำ (Introduction)

ในปัจจุบันแนวโน้มการผลิตวัสดุจากธรรมชาติมีความต้องการเพิ่มสูงขึ้นและเป็นที่นิยม โดยสินค้าที่มาจากธรรมชาติ นอกจากจะให้ความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมแล้ว ทางการตลาดยังเป็นการเพิ่มแรงจูงใจในการซื้อให้แก่ผู้บริโภคและสามารถเพิ่มมูลค่าสินค้าได้มากกว่าวัสดุโดยทั่วไป เนื่องจากวัสดุธรรมชาติประเภทเส้นใยก็เป็นสิ่งที่นิยมใช้กันเพราะมีอยู่มากในธรรมชาติ และสามารถดัดแปลงใช้ในกระบวนการผลิตได้หลากหลาย

¹ กรมวิทยาศาสตร์บริการ

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

เส้นใยธรรมชาติที่นิยมใช้กันทั่วโลก ได้แก่ กัญชง หรือ เฮมพ์ (Hemp) ซึ่งถือเป็นพืชเศรษฐกิจในหลายประเทศ เนื่องจากเส้นใยมีความแข็งแรง ความเหนียว และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมทำให้เกิดการแปรรูปเฮมพ์ในรูปแบบต่าง ๆ ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันก็มีการพัฒนามาอย่างต่อเนื่อง โดย Calin C.E., Director of Capital Markets, New Frontier Data [1] ได้กล่าวถึงบทบาทของกัญชงในด้านการใช้งานเป็นชิ้นส่วนภายในของรถยนต์ทั้งในอดีตจนถึงปัจจุบัน โดยในประเทศไทยนั้นรัฐบาลไทยได้เล็งเห็นถึงโอกาสในการสร้างมูลค่าทางเศรษฐกิจจากพืชชนิดนี้ จึงมีการปลดปล่อยกฎหมายการปลูกและการใช้งานกัญชง ตามประกาศกระทรวงสาธารณสุขที่ประกาศในราชกิจจานุเบกษา มีผลบังคับใช้วันที่ 29 มกราคม 2564 [2] กฎกระทรวงฉบับนี้เปิดกว้างให้ทุกภาคส่วนทั้งเกษตรกร ภาครัฐและเอกชน ประชาชนทั่วไปสามารถขออนุญาต และนำกัญชงไปใช้ในวัตถุประสงค์ ตั้งแต่การแพทย์ การศึกษา วิจัย การใช้ตามวิถีชีวิต ใช้เป็นเมล็ดพันธุ์ และการค้าเพื่อนำส่วนต่าง ๆ ของกัญชงไปแปรรูปและสร้างมูลค่าเพิ่มเป็นผลิตภัณฑ์สุขภาพต่าง ๆ ทั้งยา อาหาร เครื่องสำอาง และผลิตภัณฑ์สมุนไพร เป็นต้น ทั้งนี้ การผลิตผลิตภัณฑ์สุขภาพเพื่อจำหน่าย จะต้องขออนุญาตตามกฎหมายของผลิตภัณฑ์นั้น ๆ ด้วย

ข้อมูลชี้แจงที่สำคัญในบทสรุปผู้บริหารจากการประชุมระดมความคิดเห็นแนวทางการใช้ประโยชน์จากกัญชง ปี 2562 โดยสถาบันพัฒนาวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม [3] บ่งชี้ว่า กัญชงหรือเฮมพ์เป็นพืชที่สามารถปลูกได้ง่ายในประเทศไทยตอนบน เนื่องจากสภาพภูมิอากาศมีความเอื้ออำนวยต่อการเจริญเติบโตของพืช แต่ขาดวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีในการพัฒนาต่อยอดเพื่อถ่ายทอดแก่ผู้ประกอบการในการผลิตสินค้าส่งออก และจากการสำรวจข้อมูลภายในโครงการของสำนักงานสภาพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ พบว่าความต้องการเส้นใยกัญชงหรือเฮมพ์ทดแทนใยแก้วในประเทศไทยมีปริมาณกว่า 1000 ตัน ต่อปี เพื่อใช้ในการผลิตสินค้าจากวัสดุธรรมชาติส่งออกไปยังกลุ่มลูกค้าต่างประเทศทางผู้ประกอบการจึงมีความต้องการด้านเทคโนโลยีการผลิตเส้นใยเฮมพ์เพื่อสร้างนวัตกรรม และช่วยลดต้นทุนการนำเข้าวัตถุดิบและสินค้าจากต่างประเทศ

อย่างไรก็ตาม มีการศึกษาวิจัยจำนวนมากทั้งในประเทศและต่างประเทศ ที่นำกัญชงมาพัฒนาเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยการศึกษาหา

วัสดุที่เหมาะสมในการนำมาคอมปาวด์ร่วมกับเส้นใยธรรมชาติ เช่น กัญชง เพื่อให้ได้วัสดุที่มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมอย่างสมบูรณ์ ซึ่งพอลิเมอร์ที่ได้รับความสนใจก็คือ พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid, PLA) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเพราะผลิตจากวัสดุธรรมชาติ PLA นิยมนำไปใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับการคอมปาวด์ร่วมกับวัสดุอื่นในปัจจุบันแต่ก็มีข้อด้อย คือ ความเปราะ นักวิจัยจึงพยายามปรับปรุงสมบัติของ PLA ให้เหมาะสมกับวัตถุประสงค์ของการใช้งานผลิตภัณฑ์นั้น ๆ โดยการผสมกับวัสดุหรือสารเติมแต่งอื่น เพื่อปรับปรุงสมบัติของ PLA ให้เป็นไปตามต้องการ เช่น งานวิจัยของ Sawpan และคณะ ในปี 2007 [4] ได้ทำการเสริมแรง PLA ด้วยใยกัญชงสั้น พบว่า เส้นใยกัญชงและ PLA สามารถเข้ากันได้ดีและภายหลังจากใส่ใยกัญชงที่อัตราส่วน 30% สามารถเพิ่มค่า Young's Modulus ได้ถึง 100% ในขณะที่ค่าความต้านแรงดึงเพิ่มขึ้น 30% ตลอดจนการศึกษาเทคนิคการเติมพลาสติกไซเซอร์ประเภทน้ำมันเพื่อช่วยปรับปรุง PLA ให้มีความยืดหยุ่นที่ดีขึ้น ดังเช่นในงานวิจัยของ Al-Mulla และคณะในปี 2010 [5] ซึ่งทำการเติมพลาสติกไซเซอร์ คือ น้ำมันปาล์มอีพ็อกซิโดซ์ ลงใน PLA ทำให้มีความเหนียวเพิ่มขึ้นและมีค่าความยืดหยุ่นที่สูงขึ้น นอกจากนี้ในปี 2009 Martino และคณะ [6] ได้ทำการศึกษาการเติม พลาสติกไซเซอร์ซึ่งเป็นสารในกลุ่มอะดิเพต (Adipates) ที่อัตราส่วน 20% ลงไปใน PLA พบว่า ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการเพิ่มสมบัติด้านเสถียรภาพทางความร้อน แต่มีผลต่อสมบัติทางกล คือ ทำให้มีความเหนียวเพิ่มขึ้น จะเห็นได้ว่า การปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์เมทริกซ์สามารถทำได้โดยการเลือกเติมสารเสริมแรงและพลาสติกไซเซอร์ที่มีคุณสมบัติที่ต้องการลงไปเพื่อให้เข้าไปปรับปรุงสมบัติด้อยของเมทริกซ์นั้น

ในปัจจุบันเทคโนโลยีเครื่องพิมพ์สามมิติ เป็นเทคโนโลยีที่มีการใช้งานวัสดุ PLA สูงมาก เนื่องจากวัตถุประสงค์ของเครื่องพิมพ์สามมิติคือการผลิตชิ้นส่วนต้นแบบผลิตภัณฑ์ซึ่งต้องการความรวดเร็วในการผลิตและควรใช้วัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมที่ไม่มีปัญหาเรื่องการย่อยสลายเป็นเวลานาน อีกทั้งยังสามารถทำได้ในงบจำกัด เนื่องจากไม่ต้องลงทุนการผลิตที่สูงเหมือนการขึ้นรูปปกติที่ต้องผลิตแม่พิมพ์ราคาสูง (Wimmer และคณะ, 2015 และ Ou-Yang และคณะ, 2018) [7,8] จากการศึกษาของ Chiulan และคณะ ในปี 2017 [9] พบว่า การใช้ PLA ในงานด้านวัสดุวิศวกรรมหรือการแพทย์นั้น จำเป็นต้องมีการใช้

สารเสริมแรงเพื่อให้สมบัติเหมาะสมกับการใช้งานมากที่สุด ทั้งนี้ ได้มีการศึกษาการใช้ผงไม้เป็นสารเสริมแรงใน PLA โดยคณะของ Kariz (2018) [10] พบว่า การเติมผงไม้เป็นสารเสริมแรงที่ปริมาณ 10% สามารถเพิ่มความทนแรงดึงให้แก้วสุดได้แต่เมื่อเพิ่มปริมาณผงไม้มากเกินไปกลับทำให้ความทนแรงดึงลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Guo และคณะในปี 2018 [11] ที่พบว่า สมบัติทางกลของวัสดุลดลงเมื่อทำการเพิ่มปริมาณผงไม้ลงใน PLA นอกจากนี้ ในปี 2019 Rasselet และคณะ [12] ได้ทำการปรับปรุงสมบัติความทนแรงดึงของวัสดุ PLA ผสมกับ พอลิเอไมด์ 11 (Polyamind11, PA11) โดยการเติมสารช่วยยึดสารโพลีเมอร์ (Joncryl) ปริมาณ 3%wt ซึ่งพบว่า Joncryl สามารถทำให้ PLA และ PA11 เข้ากันได้ดีขึ้นและยังเพิ่มสมบัติความทนแรงดึงอีกด้วย จะเห็นได้ว่า การพัฒนาสมบัติของ PLA นอกจากจะสามารถทำได้โดยการผสมวัสดุหรือสารเคมีที่มีคุณสมบัติที่ต้องการลงไปแล้ว ยังต้องเลือกเติมวัสดุหรือสารเคมีนั้นในอัตราส่วนที่เหมาะสมอีกด้วย

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยใยกล้วยซึ่งถือเป็นวัสดุชีวภาพ เพื่อใช้งานเป็นวัสดุที่มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และสร้างต้นแบบโดยออกแบบสูตรอัตราส่วนของสารเสริมแรงและพลาสติกไซเซอรให้มีความเหมาะสมกับสมบัติของต้นแบบที่ต้องการ โดยใช้การขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติซึ่งเป็นเทคโนโลยีการขึ้นรูปต้นแบบหรือชิ้นงานที่สะดวกและต้นทุนไม่สูง

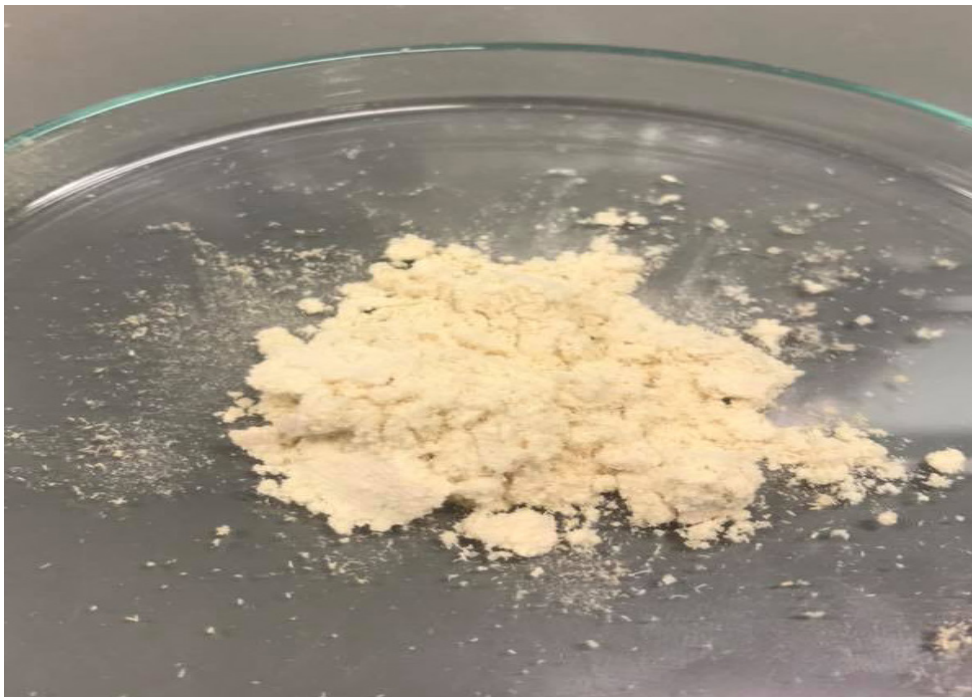
2. วิธีการวิจัย (Experimental methods)

2.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

2.1.1 เม็ดพลาสติกชีวภาพ พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid, PLA) จากบริษัท Natureworks (ประเทศสหรัฐอเมริกา) เกรด 2003D มีดัชนีการไหล (กรัม/10นาที่) เท่ากับ 6 ตาม ASTM D1238

2.1.2 สารเติมแต่ง PEG Food grade

2.1.3 เส้นใยกล้วยที่ใช้ในงานวิจัยได้รับการอนุเคราะห์จากสถาบันพัฒนาวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม (ISMED) มีลักษณะเป็นเส้นใยสั้นได้มาจากการบดแกนกล้วย ดังรูปที่ 1 โดยระบุขนาดเฉลี่ยอยู่ที่ 150 micron เพื่อให้เหมาะสมต่อกระบวนการ Extrusion และการขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติต่อไป



รูปที่ 1 : เส้นใยสั้นกล้วยขนาดความยาว 150 micron

2.2 เครื่องมือที่ใช้ดำเนินการวิจัย

2.2.1 เครื่องผสมเม็ดพลาสติก ยี่ห้อ BOSCO, 5 Kg, Thailand

2.2.2 เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (Twin-screw extruder) ยี่ห้อ GS-Mach รุ่น Gs-35, Nanjing, China

2.2.3 เครื่องทดสอบทางกล Zwick Universal testing machine Capacity 100 kN, Germany

2.2.4 เครื่องอัดเม็ดพลาสติกพร้อมแม่พิมพ์ (Compression molding) (เครื่องประกอบเอง)

2.2.5 เครื่องพิมพ์สามมิติระบบฉีดเส้นวัสดุ ยี่ห้อ Raise 3D Pro 2, Shanghai, China

2.3 วิธีการวิจัย

2.3.1 การเตรียมวัตถุดิบเส้นใยกันบูชและ PLA

ในขั้นตอนการเตรียมเส้นใยกันบูชและ PLA มีการใช้กระบวนการตามวิธีของงานวิจัยที่ได้ศึกษามาแล้ว (Sawpan และคณะ, 2009) [13] โดยล้างเส้นใยกันบูชด้วยน้ำร้อน เพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อน จากนั้นนำเม็ด PLA และ เส้นใยกันบูช มาอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 คืน

การคอมปาวด์เส้นใยกันบูชลงในเมทริกซ์ของ PLA

ทำการผสมเส้นใยกันบูชและพลาสติกไซเซอร์ (PEG) ซึ่งมีสมบัติเชิงวัสดุที่ยืดหยุ่นและช่วยลดข้อด้อยด้านความเปราะของ PLA โดยทำการผสมลงในเมทริกซ์ PLA ด้วยเครื่องผสมเม็ดพลาสติก (ยี่ห้อ BOSCO, 5 Kg, Thailand) เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นทำการคอมปาวด์ด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (Twin-screw extruder, ยี่ห้อ GS-Mach Gs-35, Nanjing, China) มีช่วงอุณหภูมิ คือ 30-155-160-165-165 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยในการคอมปาวด์มีการใช้สูตรผสมที่อัตราส่วนของเส้นใยกันบูชต่าง ๆ กัน คือ 1%, 2.5%, 5% และ 10%wt ตามลำดับ เมื่อผ่านกระบวนการอัดรีดแล้วคอมปาวด์ กันบูช/PLA จะอยู่ในรูปแบบเม็ด พร้อมจะนำไปขึ้นรูปเป็นเส้นพิมพ์สามมิติต่อไป

การขึ้นรูปเส้นพิมพ์สามมิติ (3D filament)

นำเม็ดคอมปาวด์ที่ได้จากการอัดรีดส่วนผสมทั้งหมดไปขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่อีกครั้งโดยทำการดึงเส้นผ่านหัวฉีดให้เส้นพิมพ์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.75 มิลลิเมตร

การขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ

นำมวลเส้นพิมพ์สามมิติกันบูช 1%wt+PEG มาขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติระบบฉีดเส้นพลาสติก (Raise 3D pro 2) โดยพิมพ์ให้เป็นชิ้นงานในรูปแบบ “Dog-bone” เพื่อทดสอบหาสมบัติความทนแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D638-14 type I ขนาด 165x19x13 mm โดยปรับอุณหภูมิหัวฉีดและถาดรองชิ้นงานเป็น 180 และ 60 องศาเซลเซียส และการทดสอบหาสมบัติความทนแรงดัดงอ ตามมาตรฐาน ASTM D790-17 ขนาดชิ้นงาน 125x12.7x3.2 mm ตามลำดับ

ด้วยเครื่องอัดเม็ดพลาสติกพร้อมแม่พิมพ์ Compression molding

นำเม็ดคอมปาวด์ที่อัตราส่วน เส้นใยกันบูช 1, 2.5, 5 และ 10%wt มาขึ้นรูปโดยการอัดด้วยแม่พิมพ์อัดเม็ดพลาสติก เป็นชิ้นงานสำหรับทดสอบความทนแรงดึงและความทนแรงดัดงอ ตามมาตรฐาน ASTM D638-14 type I ขนาด 16 x19x13 mm และ ตามมาตรฐาน ASTM D790-17 ขนาดชิ้นงาน 125x12.7x3.2 mm ตามลำดับ

การทดสอบสมบัติความทนแรงดึงและความทนแรงดัดงอ

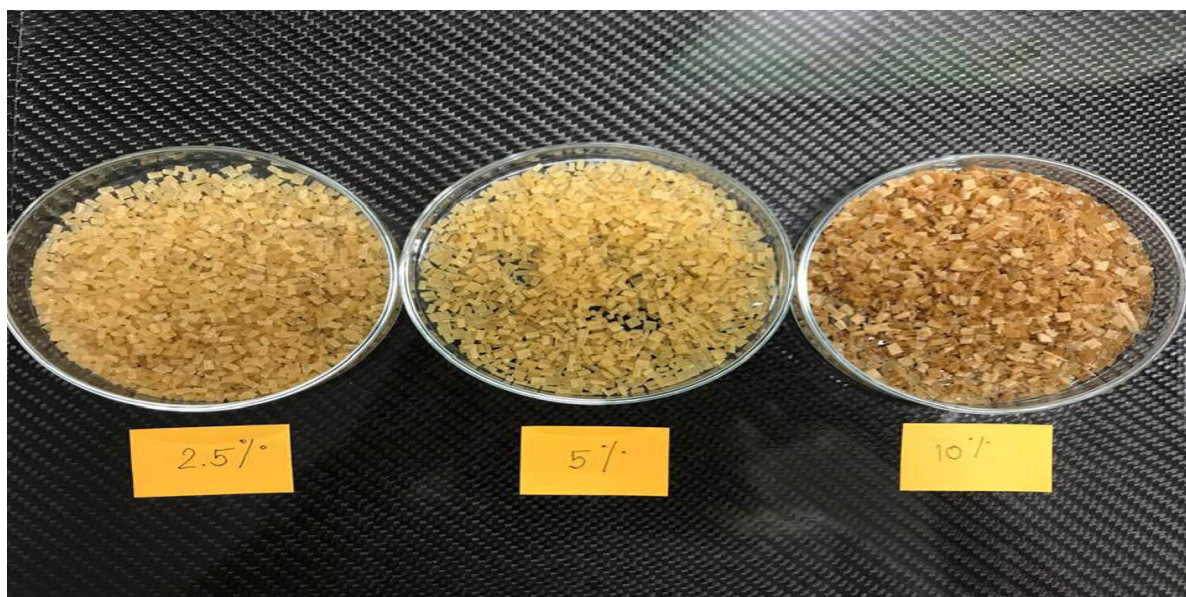
การทดสอบหาสมบัติความทนแรงดึง (Tensile testing) และ ความทนแรงดัดงอ (Flexural testing) ด้วยเครื่อง Zwick Universal testing machine Capacity 100kN, Germany ใช้ load cell 5 kN และมีความเร็วในการดึง (crosshead speed) เท่ากับ 5 mm/min สำหรับการทดสอบความทนแรงดึง และ ใช้สัดส่วน Span-to-depth เท่ากับ 16:1 และ มีความเร็วในการกด (crosshead speed) เท่ากับ 1.5 mm/min สำหรับการทดสอบความทนแรงดัดงอแบบ 3-point bending ตามลำดับ

3. ผลและวิจารณ์ (Results and Discussion)

การศึกษาปริมาณเส้นใยกันบูชที่มีผลต่อสมบัติทางกล

เพื่อศึกษาหาปริมาณที่เหมาะสมของเส้นใยกันบูชในการคอมปาวด์ร่วมกับเม็ดพลาสติกชีวภาพ PLA มีการทดลองปรับสูตรของเส้นใยกันบูชที่อัตราส่วนต่าง ๆ กัน อัตราส่วนของเส้นใยกันบูชต่อเม็ดพลาสติก PLA ที่ใช้ในงานวิจัยมีดังนี้ 1, 2.5, 5 และ 10%wt จะสังเกตได้ว่า เม็ดคอมปาวด์มีสีที่เข้มขึ้นที่อัตราส่วนเส้นใยกันบูชที่มากขึ้น และสังเกตเห็นการไหม้ชัดเจนในสูตรที่มีเส้นใยกันบูช 10%wt เนื่องจากสัดส่วนของกันบูชที่มากเกินไปทำให้การไหลช้าลง

จากการจับตัวเป็นก้อนของเส้นใยกล้วยง ทำให้เกิดการไหม้ของเส้นใยเกิดขึ้นดังจะสังเกตเห็นได้จากรูปที่ 2 ซึ่งมีสีน้ำตาลเข้มจากการไหม้ปรากฏเด่นชัด



รูปที่ 2 : เม็ด PLA ผสมใยเส้นกล้วยง ด้วยอัตราส่วน 1%, 2.5%, 5% และ 10%

อย่างไรก็ตาม เมื่อทำการขึ้นรูปเส้นใยสามมิติจากสูตรผสมทั้งหมด พบว่า เส้นใยกล้วย/PLA ที่สูตร 2.5, 5 และ 10%wt ทำการขึ้นรูปได้ยาก เนื่องจากขึ้นงานมีความเปราะมากจึงทำให้ไม่สามารถขึ้นเส้นใยสามมิติได้ต่อเนื่อง จะเกิดการหักเมื่อมีการรอฟึงเล็กน้อย เมื่อไม่สามารถขึ้นเส้นใยต่อเนื่องได้จึงทำให้ไม่สามารถใช้งานเป็นเส้นพิมพ์สำหรับเครื่องพิมพ์สามมิติได้ เนื่องจากการพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติต้องการเส้นพิมพ์ที่ยาวและมีความต่อเนื่อง ดังนั้นในการศึกษาเปรียบเทียบสมบัติทางกลของสูตรผสมเส้นใยกล้วยที่ 1, 2.5, 5 และ 10%wt จึงทำโดยการอัดเม็ดพลาสติกในแม่พิมพ์และตัดให้มีรูปร่างตามมาตรฐานการทดสอบที่ต้องการ ซึ่งได้ค่าการทดสอบสมบัติเชิงกลเป็นดังตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่า เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยกล้วยทำให้ค่าความทนแรงดึง และมอดูลัสแรงดัดงอเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความยืดตัวที่จุดขาดลดลง และค่าความทนการดัดงอไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งก็คือขึ้นงานที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยกล้วยมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นในขณะที่ความยืดหยุ่นลดลง ความเปราะเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sawpan และคณะ (2009) [13] ที่ทำการเสริมแรง เส้นใยกล้วยใน PLA และพบว่า ค่าความทนแรงดึงเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้น แต่ความยืดหยุ่นลดลง ในส่วนของสมบัติความทนแรงดัดงอพบว่า สอดคล้องกับงานวิจัยของ Shibata และคณะ (2003) [14] ซึ่งรายงานสมบัติความทนแรงดัดงอของวัสดุเส้นใยธรรมชาติเสริมแรง PLA ไว้ว่า ค่าความทนแรงดัดงอที่ไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อทำการเพิ่มปริมาณเส้นใยธรรมชาติ ในขณะที่มอดูลัสแรงดัดงอเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นไปในทางเดียวกันกับ Shin และ Masatoshi (2006) [15] และ Huda และคณะ (2005a) [16] ที่พบว่า ค่าเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยธรรมชาติ ใน PLA ทำให้ความทนแรงดัดงอของคอมโพสิตลดลง ในขณะที่มอดูลัสแรงดัดงอเพิ่มขึ้น เช่นกัน

สาเหตุที่เป็นเช่นนี้ เนื่องจากเส้นใยกล้วยที่ใช้เป็นสารเสริมแรงมีสถานะเป็นของแข็งมีค่า Young's modulus ที่สูงกว่าพลาสติก (Mwaikambo, 2006) [17] เมื่อผสมลงในพลาสติก PLA จะได้ของผสมที่มีความแข็งแรงมากขึ้น เปลี่ยนรูปร่างได้ยาก เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยกล้วยจึงทำให้วัสดุคอมโพสิตมีความแข็งแรงมากขึ้น มีการโก่งตัวได้น้อยลง หรือไม่สามารถที่จะเกิดการเปลี่ยนรูปร่างเพื่อลดความเค้นที่ได้รับ ความแข็งที่เพิ่มขึ้นสังเกตได้จาก Flexural modulus ที่สูงขึ้นนั่นเอง

ตารางที่ 1 สมบัติความทนแรงดึงและความทนแรงดัดงอของเม็ด PLA ผสมใยกล้วยที่อัตราส่วน 1%, 2.5%, 5% และ 10%wt

สูตร	ความทนแรงดึง		ความทนการดัดงอ	
	ความทนแรงดึง, MPa	ความยืดตัวที่จุดขาด, %	ความทนการดัดงอ, MPa	มอดูลัสแรงดัดงอ, GPa
Pure PLA	53±3.10	2.50±0.18	65±4.55	3.45±0.295
PLA + 1%wt Hemp	95±2.80	2.15±0.14	79±3.65	3.65±0.180
PLA + 2.5%wt Hemp	115±3.55	1.50±0.18	75±4.20	3.88±0.240
PLA + 5%wt Hemp	135±2.50	1.35±0.15	71±2.85	4.04±0.225
PLA + 10%wt Hemp	130±2.22	0.90±0.13	74±2.56	4.25±0.255

การปรับเพิ่มความยืดหยุ่นให้แก่คอมโพสิตด้วยพลาสติกไซเซอร์

เพื่อปรับปรุงสมบัติด้านความเปราะของคอมโพสิตซึ่งมีการทดลองเติมพลาสติกไซเซอร์ คือ พอลิเอทิลีน ไกลคอล (PEG) ลงไปที่ปริมาณ 2.5 และ 5%wt จากการศึกษาผลที่ได้จากการเติมพลาสติกไซเซอร์ PEG ลงไปเพื่อปรับเพิ่มความยืดหยุ่นให้แก่วัสดุตามตารางที่ 2 แสดงให้เห็นว่า ค่าความทนแรงดึงไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ แต่ความยืดตัวที่จุดขาดของวัสดุเพิ่มขึ้น ในขณะที่การศึกษาสมบัติความทนแรงดึงของวัสดุพบว่า ความทนแรงดึงและมอดูลัสแรงดึงของวัสดุคงที่และมีแนวโน้มลดลง

ผลที่ได้จากการวิจัยนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Li และคณะในปี 2018 [18] ที่ทำการศึกษาผลของการเติม PEG ลงในเมทริกซ์ของ PLA พบว่า ค่าความทนแรงดึงไม่เปลี่ยนแปลงในขณะที่ความยืดที่จุดขาดเพิ่มขึ้น อธิบายได้ว่า PEG ที่เติมลงไปทำให้วัสดุมีสภาพของพลาสติกเพิ่มขึ้นมีสภาพผลึกที่ลดลง ซึ่งทำให้ความแข็งแรงของวัสดุลดลง นอกจากนี้ ก็ยังส่งผลให้สมบัติความทนแรงดึงด้อยลงเล็กน้อยด้วย ซึ่งการด้อยลงของสมบัติความทนแรงดึงอาจเกิดได้หลายปัจจัย เช่น วัสดุเข้ากันได้ไม่ดี เนื่องจากไม่มีการปรับสภาพของพอลิเมอร์ก่อนทำการผสม หรือ ชนิดของ PEG ที่ใช้ อาจมีน้ำหนักโมเลกุลที่ไม่เหมาะสม เป็นต้น ซึ่งปัจจัยต่าง ๆ เหล่านี้จะได้มีการศึกษาในลำดับต่อไป

ตารางที่ 2 สมบัติความทนแรงดึงและความทนแรงดึงของสูตร 1%wt Hemp/PLA ผสมพลาสติกไซเซอร์ PEG

สูตร	ความทนแรงดึง		ความทนการดัดงอ	
	ความทนแรงดึง, MPa	ความยืดตัวที่จุดขาด, %	ความทนการดัดงอ, MPa	มอดูลัสแรงดึง, GPa
Pure PLA	53±3.10	2.50±0.18	65±4.55	3.45±0.295
1%wt Hemp/PLA without additive	95±2.80	2.15±0.14	79±3.65	3.65±0.180
1%wt Hemp/PLA with 2.5%wt PEG	108±2.55	4.58±2.60	71±2.84	3.54±0.210
1%wt Hemp/PLA with 5.0%wt PEG	105±2.75	6.48±2.45	68±2.59	2.95±0.305

ในการทดลองขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ พบว่า เครื่องพิมพ์สามารถพิมพ์ได้ต่อเนื่องจนจบเมื่อใช้เส้นใยสูตร 1%wt Hemp/PLA/5.0%wt PEG เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีความยืดตัวที่จุดขาดสูงที่สุดในการวิจัยนี้ เนื่องจากการวิจัยนี้เป็นการศึกษาเบื้องต้นในการศึกษาความเป็นไปได้ในการขึ้นรูปเส้นใยสามมิติจากเส้นใยกล้วยไทยและพอลิเมอร์ชีวภาพ จึงจะมีการศึกษาปัจจัยอื่นที่มีผลในการขึ้นรูปในโอกาสต่อไป

4. สรุป (Conclusion)

อัตราส่วนของกล้วยที่เหมาะสมกับกระบวนการคอมปาวด์ไบโอพลาสติกร่วมกับ PLA ในงานวิจัยนี้ คือ 1%wt เนื่องจากสามารถขึ้นรูปเป็นเส้นพิมพ์สามมิติได้ นอกจากนี้สารเสริมแรงเส้นใยกล้วยที่เติมลงไปสามารถเพิ่มความแข็งแรงให้แก่วัสดุได้ แต่ก็ทำให้เกิดข้อด้อยในเรื่องความเปราะ ซึ่งสามารถปรับเพิ่มความยืดหยุ่นให้กับวัสดุโดยการเติมพลาสติกไซเซอร์ในอัตราส่วน 2.5 และ 5% ซึ่งพบว่า ทำให้ค่าความยืดตัวที่จุดขาดของวัสดุเพิ่มขึ้นแต่ทำให้สมบัติความทนแรงดึงด้อยลงและเมื่อขึ้นรูปเป็นเส้นใยสามมิติแล้วตัวเส้นใยมีความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นและสามารถพิมพ์ได้ต่อเนื่อง

5. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

1. สถาบันพัฒนาวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม (ISMED) สนับสนุนเส้นใยกัญชงบด
2. กลุ่มวัสดุขั้นสูงและเซรามิกสมัยใหม่ กองวัสดุวิศวกรรม กรมวิทยาศาสตร์บริการ

6. เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] Calin C.E. (2020). *Where hemp meets the road : Automotive bioplastics*. [online]. [viewed 19 January 2021]. Available from: <https://newfrontierdata.com/cannabis-insights/where-hemp-meets-the-road-automotive-bioplastics/>
- [2] กฎกระทรวง การขออนุญาตและการอนุญาตผลิต นำเข้า ส่งออก จำหน่าย หรือมีไว้ในครอบครองซึ่งยาเสพติดให้โทษในประเภท 5 เฉพาะกัญชง (Hemp) พ.ศ. 2563. *ราชกิจจานุเบกษา* 30 ธันวาคม 2563. *ราชกิจจานุเบกษา*. เล่ม 137 ตอนที่ 107 ก.
- [3] มูลนิธิสถาบันพัฒนาวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม. *บทสรุปผู้บริหารโครงการส่งเสริมและพัฒนาอุตสาหกรรมเฮมพ์อย่างสร้างสรรค์แบบครบวงจร. การประชุมระดมความคิดเห็นแนวทางการใช้ประโยชน์จากกัญชง*. 2562.
- [4] SAWPAN, M.A., K.L. PICKERING and ALAN FERNY-HOUGH. Hemp fibre reinforced poly (lactic acid) composites. *Advanced Materials Research*. 2007, **29-30**, 337-340.
- [5] AL-MULLA, E.A.J., W.Md.Z.W. YUNUS, N.A.B. IBRAHIM and M.Z.Ab. RAHMAN. Properties of epoxidized palm oil plasticized poly(lactic acid). *Journal of Materials Science*. 2010, **45**, 1942–1946
- [6] MARTINO, V.P., A. JIMENEZ and R.A. RUSECKAITE. Processing and characterization of poly (lactic acid) films plasticized with commercial adipates. *Journal of Applied Polymer Science*. 2009, **112**(4), 2010–2018.
- [7] WIMMER, R., B. STEYRER, J. WOESS, T. KODDENBERG and N. MUNDIGLER. 3D printing and wood. *International Conference Wood Science and Engineering in the Third Millenium*. Brasov, Rumania. 10th edition, 2015, pp. 145–150.
- [8] OU-YANG, Q., B. GUO and J. XU. Preparation and characterization of poly (butylene succinate)/ polylactide blends for fused deposition modeling 3D printing. *ACS Omega*. 2018, **3**(10), 14309–14317.
- [9] CHIULAN, I., A. FRONE, C. BRADABUR and D.M. PANAITESCU. Recent advances in 3D printing of aliphatic polyesters. *Bioengineering (Basel)*. 2017, **5**(1), 2.
- [10] KARIZ, M., M. SERNEK, M. OBUCINA and M.K. KUZMAN. Effect of wood content in FDM filament on properties of 3D printed parts. *Materials Today Communications*. 2018, **14**, 135–140.
- [11] GUO, R., Z. REN, H. BI, Y. SONG and M. XU. Effect of toughening agents on the properties of poplar wood flour/poly (lactic acid) composites fabricated with fused deposition modeling. *European Polymer Journal*. 2018, **107**, 34–45.
- [12] RASSELET, D., A.S. CARO-BRETELLE, A. TAGUET and JOSE-MARIE LOPEZ-CUESTA. Reactive compatibilization of PLA/PA11 blends and their application in additive manufacturing. *Materials*. 2019, **12**(3), 485.
- [13] SAWPAN, M.A., K.L. PICKERING and ALAN FERNY-HOUGH. Characterisation of hemp fibre reinforced Poly(Lactic Acid). *International Journal of Materials and Product Technology*. 2009, **36**(1-4).
- [14] SHIBATA, M., K. OZAWA, N. TERAMOTO, R. YOSOMIYA and H. TAKEISHI. Biocomposites made from short abaca fiber and biodegradable polyesters. *Macromolecular Materials and Engineering*. 2003, **288**(1), 35-43.
- [15] SERIZAWA, SHIN., KAZUHIKO INOUE and MASATOSHI IJI. Kenaf-fiber-reinforced poly (lactic acid) used for electronic products.

Journal of Applied Polymer Science. 2006, **100**(1), 618–624.

- [16] HUDA, M.S., A.K. MOHANTY, L.T. DRZAL, M. MISRA, K. WILLIAMS and D.F. MIELEWSKI. *Mechanical and thermo-mechanical studies of poly (lactic acid) PLA/talc/recycled newspaper fiber hybrid composites*. Atlanta, GA, United States, 2005, pp. 469.
- [17] MWAIKAMBO, L.Y. and M.P. ANSELL. Mechanical properties of alkali treated plant fibres and their potential as reinforcement materials. I. Hemp fibres. *Journal of Materials Science*. 2008, **41**, 2483-2496.
- [18] LI, D., Y. JIANG, S. LV, X. LIU, J. GU, Q. CHEN and Y. ZHANG. Preparation of plasticized poly (lactic acid) and its influence on the properties of composite materials. *PLOS ONE*. 2018, **13**(3), e0193520.

การพัฒนาผ้าสมานแผลด้วยอนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัส

Development of wound healing cloth containing bioactive glass nanoparticles

ชีวกัทร ปาโมกข์^{1*}, เอกธวัช มีชูวาศ¹, กนิษฐ์ ตะปะสา¹

Cheevapat Pamok^{1*}, Ekarat Meechoowas¹, Kanit Tapasa¹

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการสังเคราะห์ไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัสให้ได้อนุภาคนาโนและไม่มีความเป็นพิษซึ่งเหมาะสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ทางการแพทย์ เช่น พัฒนาเป็นผ้าสมานแผล การสังเคราะห์อนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัส ถูกเตรียมโดยการผสม $\text{SiO}_2:\text{CaO}:\text{P}_2\text{O}_5$ ที่มีอัตราส่วนแตกต่างกัน ด้วยวิธีโซลเจลโดยกระบวนการของ Stöber ซึ่งใช้แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา วิเคราะห์ด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD) Scanning electron microscope (SEM) และ Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) เพื่อวิเคราะห์ความเป็นผลึกและสัณฐานของไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัสที่สังเคราะห์ได้พบว่า จากผล XRD เมื่อผสม CaO ที่อัตราส่วน 10 เปอร์เซ็นต์โดยโมล ไม่มีความเป็นผลึก ภาพ SEM สามารถยืนยันได้ว่าอนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัสที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะเป็นทรงกลม ขนาดเฉลี่ยที่ 200-300 นาโนเมตร และ FTIR พบพันธะที่สอดคล้องกับโครงสร้างโมเลกุลของไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัส จากนั้นนำไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัสที่สังเคราะห์ได้มาผสมกับเซลลูโลสที่อัตราส่วนต่าง ๆ พบว่า อัตราส่วนระหว่างนาโนไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัสกับเซลลูโลส อัตราส่วนที่เหมาะสมคือ 1:6 เพราะที่อัตราส่วนนี้อนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัสมีการกระจายตัวที่ดีในแผ่นเซลลูโลส

Abstract

This research aims to synthesize bioactive glass nanoparticles in non-crystalline structure which can be used in medical application for example wound healing cloth. This synthesis was composed of $\text{SiO}_2:\text{CaO}:\text{P}_2\text{O}_5$ at the different ratio using Sol-gel method and Stöber's process that ammonium hydroxide was utilized as a catalyst. The synthesized bioactive glasses and cellulose adding bioactive glasses were characterized using X-ray diffraction (XRD), Scanning electron microscope (SEM) and Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR). The XRD results of the 10% mol CaO show a non-crystalline structure and the SEM images of the morphology reveal nanospherical shape in size range of 200-300 nm. FTIR results identify chemical bonds corresponding to bioactive glass structure and then obtained nanoparticles were composited with cellulose. The results show that the composition of bioactive glasses and cellulose at a ratio of 1:6 is homogeneously dispersed in cellulose matrix.

คำสำคัญ : ไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัส อนุภาคนาโน ผ้าสมานแผล

Keywords : Bioactive glasses, Nanoparticles, Wound healing cloth

1. บทนำ

ปัจจุบันทั่วโลกมีโครงสร้างของประชากรที่เปลี่ยนแปลงไป โดยมีสัดส่วนของผู้สูงอายุเพิ่มสูงขึ้นและหลายประเทศกำลังเข้าสู่สังคมผู้สูงอายุ (aging society) รวมทั้งประเทศไทย โดยคาดว่าภายในปี 2030 สัดส่วนของประชากรช่วงอายุ 65 ปีขึ้นไปทั่วโลกจะเพิ่มขึ้นมาอยู่ที่ 12% จาก 8% ในปัจจุบัน สำหรับประเทศไทยจะมีสัดส่วนผู้สูงอายุเพิ่มขึ้นเป็น 18% จาก 10% ในปี 2562 [1] จากปัจจัยนี้เองมีส่วนทำให้เกิดอัตราการทางการแพทย์และอุปกรณ์การแพทย์เติบโตสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งเห็นได้จากแนวโน้มการขยายตัวของจำนวนผู้ป่วยและธุรกิจอุปกรณ์การแพทย์ของประเทศไทย ซึ่งประเทศไทย

¹ กรมวิทยาศาสตร์บริการ

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

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

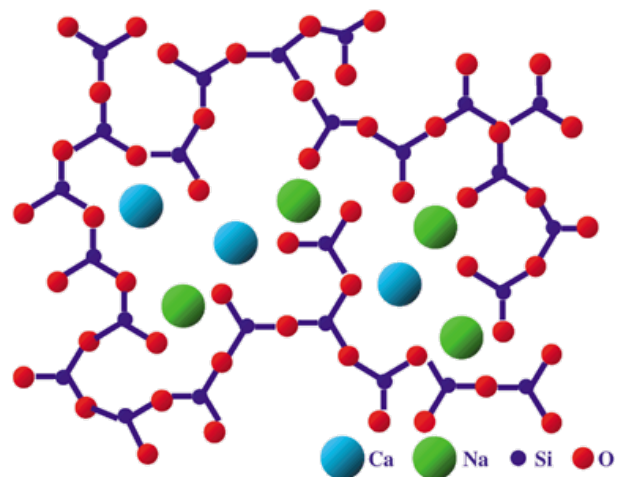
ถือได้ว่าเป็นศูนย์กลางของธุรกิจบริการเพื่อสุขภาพในอาเซียน โดยมีความได้เปรียบทั้งในแง่คุณภาพและมาตรฐานการรักษา ซึ่งได้รับความเชื่อมั่นจากผู้ให้บริการทั้งภายในและต่างประเทศ ปัจจุบันรัฐบาลได้ส่งเสริมให้อุตสาหกรรมการแพทย์เป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมเป้าหมายที่จะเป็นตัวขับเคลื่อนประเทศไทยให้หลุดพ้นจากกับดักรายได้ปานกลาง ด้วยเศรษฐกิจเชิงสร้างสรรค์และการสร้างนวัตกรรมตามนโยบายไทยแลนด์ 4.0 โดยมีเป้าหมายให้ประเทศไทยเป็นศูนย์กลางการแพทย์แบบครบวงจร (Medical hub) ทั้งด้านการให้บริการและการวิจัยพัฒนา

อย่างไรก็ตามความท้าทายสำคัญของการยกระดับธุรกิจอุปกรณ์การแพทย์ในไทยคือการวิจัยและพัฒนาด้านเทคโนโลยี และการได้รับการรับรองด้านมาตรฐานความปลอดภัยระดับสูง การผลิตวัสดุและอุปกรณ์การแพทย์ของไทยยังเป็นการผลิตโดยใช้เทคโนโลยีที่ไม่ซับซ้อน เช่น ถูมือแพทย์ เข็มฉีดยา และสายน้ำเกลือ เป็นต้น ขณะที่อุปกรณ์การแพทย์ระดับสูง เช่น อวัยวะเทียม เครื่องเอ็กซเรย์ และเครื่องสแกน ที่ต้องใช้เทคโนโลยีการผลิตและมาตรฐานความปลอดภัยระดับสูง ยังคงต้องพึ่งพาการนำเข้าจากผู้ผลิตชั้นนำจากต่างประเทศ โดยในปี 2015 มูลค่าการนำเข้าเครื่องมือและอุปกรณ์การแพทย์ของไทยสูงถึง 150,000 ล้านบาท ขณะที่มูลค่าการส่งออกอยู่ราว 22,000 ล้านบาทเท่านั้น [1] ดังนั้นประเทศไทยต้องเร่งพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตเครื่องมือและอุปกรณ์การแพทย์ที่มีมูลค่าระดับสูงเพื่อเพิ่มมูลค่าการส่งออกให้สูงขึ้น

วัสดุชีวภาพ (Biomaterials) เป็นหนึ่งในผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์ที่มีมูลค่าสูง ซึ่งนำมาใช้ทดแทนส่วนหนึ่งส่วนใดในร่างกายมนุษย์ที่เสื่อมสภาพ ไม่ว่าจะเป็นการเปลี่ยนถ่ายอวัยวะ การสร้างอวัยวะเทียม การปลูกถ่ายเนื้อเยื่อ รวมไปถึงอุปกรณ์และวัสดุต่าง ๆ ที่ใช้กับร่างกาย เช่น เข็มฉีดยา วัสดุอุดฟัน และท่อขยายหลอดเลือด เป็นต้น วัสดุชีวภาพสามารถผลิตได้จากวัสดุทั่วไปไม่ว่าจะเป็น โลหะ เซรามิก พอลิเมอร์ วัสดุผสม หรือสารกึ่งตัวนำ เป็นต้น แก้วเป็นวัสดุหนึ่งที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้เป็นวัสดุชีวภาพ ซึ่งเรียกว่า ไบโอบีโกลาส (Bioglass) เนื่องจากมีสมบัติเด่นกว่าวัสดุชีวภาพชนิดอื่น ๆ คือสามารถละลายและกระตุ้นให้เกิดการซ่อมแซมกระดูกหรือเนื้อเยื่อ (bioactive) ที่ดีกว่าวัสดุชีวภาพอื่น ๆ โดยเฉพาะไบโอแอคทีฟกลาสที่มีอนุภาคระดับนาโน (bioactive glass nanoparticles) จุดมุ่งหมายของ

การพัฒนาวัสดุนี้นี้ขึ้นมาก็คือ ต้องการให้วัสดุมีคุณสมบัติอยู่ระหว่างวัสดุที่ค่อนข้างเฉื่อย และวัสดุที่สามารถละลายได้ วัสดุนี้นี้จึงมีปฏิกิริยาทางเคมีกับร่างกาย แต่เกิดเฉพาะที่ผิวของวัสดุเท่านั้น [2] ซึ่งมีงานวิจัยจำนวนมากได้พัฒนาอนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟกลาสสำหรับใช้ในวัสดุอุปกรณ์ทางการแพทย์ เช่น การนำไปเคลือบผิววัสดุชีวภาพอื่น ๆ เพื่อเพิ่มสมบัติความเข้ากันได้ทางชีวภาพ (biocompatibility) การนำไปผสมกับวัสดุชีวภาพพอลิเมอร์เพื่อให้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น การนำไปใช้ในเทคโนโลยีการนำส่งยาเข้าสู่ร่างกาย (drug delivery) การนำไปใช้สมานแผล (wound healing) เนื่องจากอนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟกลาสมีสมบัติในการห้ามเลือดโดยสามารถลดเวลาการปิดแผลและเร่งเวลาให้เลือดแข็งตัวได้เร็ว นอกจากนี้ยังสามารถลดอาการอักเสบของแผลก่อนทำการเย็บปิดได้อีกด้วย

สมบัติในการสมานแผลของไบโอแอคทีฟกลาสเกิดจากการเกิดไฮดรอกซีอะพาไทต์ (Hydroxyapatite) ซึ่งเป็นแร่แคลเซียมฟอสเฟต สูตรทางเคมีคือ $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ โดยสารไฮดรอกซีอะพาไทต์นั้นเป็นสารอนินทรีย์ที่เป็นองค์ประกอบของกระดูกและมีสัดส่วนประมาณ 69% ของน้ำหนักกระดูก ซึ่งเทคโนโลยีในปัจจุบันนั้นสามารถเตรียมขึ้นได้จากแหล่งต่าง ๆ ในธรรมชาติ ดังนั้น สารชนิดนี้จึงเป็นที่นิยมในการนำมาใช้เป็นสารทดแทนกระดูกและใช้ในระบบนำส่งยา [3] โดยไบโอแอคทีฟกลาสจะเกิดเป็นไฮดรอกซีอะพาไทต์ได้ก็ต่อเมื่อสัมผัสกับเลือดของผู้ป่วย



รูปที่ 1 : โครงสร้างโมเลกุลของไบโอแอคทีฟกลาส [4]

การพัฒนาเป็นผ้าสमानแผล วัสดุที่เลือกใช้ในการทำเป็นแผ่นปิดแผลคือ เซลลูโลส เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม สามารถนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาสกัดเซลลูโลสออกมาใช้งานได้ มีงานวิจัยหลายงานที่นำวัสดุธรรมชาติในประเทศไทย เช่น ใบสับปะรด ชานอ้อย มันสำปะหลัง [5-7] มาสกัดเป็นเซลลูโลส นอกจากนี้เซลลูโลสยังมีสมบัติคือ ไม่ละลายน้ำ ย่อยสลายยากและดูดซับน้ำได้ จึงเหมาะกับการนำมาทำเป็นวัสดุผ้าสमानแผล

ในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการพัฒนาแผ่นวัสดุปิดแผลที่ใช้อนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสเฟตเป็นส่วนผสม ซึ่งอนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสเฟตถูกสังเคราะห์ด้วยวิธีโซลเจล โดยกระบวนการของ Stöber ศึกษาอัตราส่วนระหว่าง $\text{SiO}_2:\text{CaO}:\text{P}_2\text{O}_5$ ที่อัตราส่วน 70:25:5, 80:15:5 และ 85:10:5 เปรียบเทียบโดยไมล วิเคราะห์ความเป็นผลึกและสัณฐานของอนุภาคไบโอแอคทีฟฟอสเฟตที่สังเคราะห์ได้ เนื่องจากการเกิดผลึกของไบโอแอคทีฟฟอสเฟตทำให้ความเป็นไบโอแอคทีฟและการเกิดไฮดรอกซีอะพาไทต์ลดลง จึงนำเซลลูโลสทางการค้าที่ผลิตในประเทศผสมกับอนุภาคไบโอแอคทีฟฟอสเฟตสูตรที่ไม่มีความเป็นผลึก ที่อัตราส่วน 0.06:0.06, 0.06:0.03, 0.06:0.01 และ 0.06:0.005 กรัม ศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างเซลลูโลสกับอนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสเฟต

2. วิธีการวิจัย (Experimental methods)

2.1 วัสดุและอุปกรณ์

ในการทดลองนี้ใช้สารละลายเตตระเอทิลออร์โทซิลิเกต (Tetraethyl orthosilicate, TEOS) สูตรทางเคมีคือ $\text{SiO}(\text{C}_2\text{H}_5)_4$ ความบริสุทธิ์ร้อยละ 98 ยี่ห้อ Acros Organics แคลเซียมไนเตรทเตตระไฮเดรต (Calcium nitrate tetrahydrate) สูตรทางเคมีคือ $(\text{CaNO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ยี่ห้อ Carlo Erba Reagents สารละลายไตรเอทิลฟอสเฟต (Triethyl phosphate, TEP) สูตรทางเคมีคือ $(\text{C}_2\text{H}_5)_3\text{PO}_4$ ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99 ยี่ห้อ Acros Organics สารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ สูตรทางเคมีคือ NH_4OH ความบริสุทธิ์ร้อยละ 30 ยี่ห้อ Carlo Erba Reagents สารละลายเอทานอล สูตรทางเคมีคือ $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 ยี่ห้อ Carlo Erba Reagents และสารละลายเซลลูโลสทางการค้าที่ผลิตในประเทศ

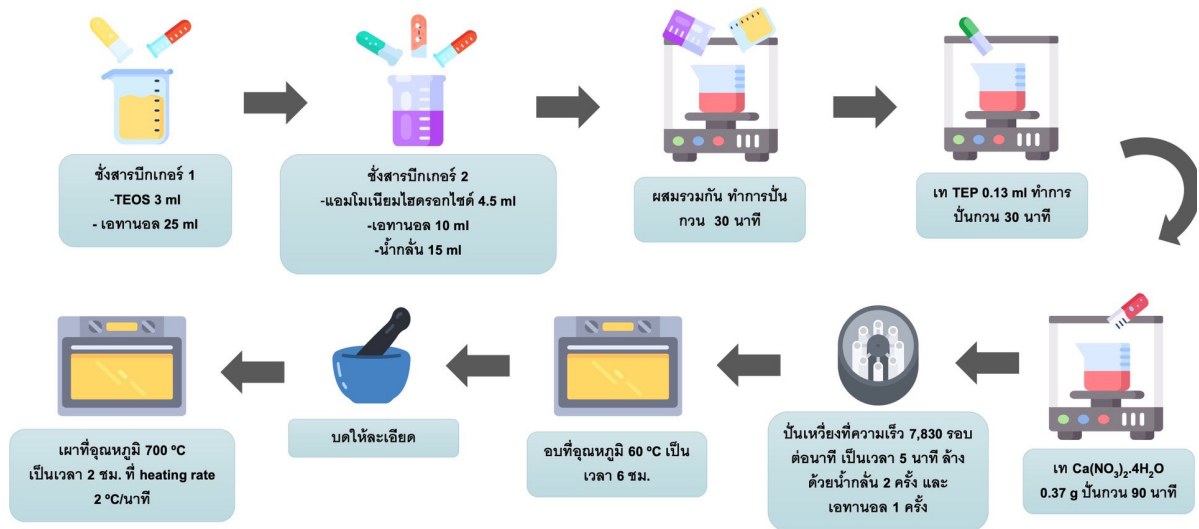
<http://bas.dss.go.th>

2.2 วิธีการสังเคราะห์นาโนไบโอแอคทีฟฟอสเฟต

งานวิจัยนี้เลือกศึกษาอัตราส่วนระหว่างเตตระเอทิลออร์โทซิลิเกต แคลเซียมไนเตรทเตตระไฮเดรต และไตรเอทิลฟอสเฟต ในอัตราส่วน ดังตารางที่ 1 ใช้น้ำกลั่นเป็นตัวทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ใช้สารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและสารละลายเอทานอลเป็นตัวทำละลาย [8-9] โดยมีขั้นตอนแสดงดังรูปที่ 2 นำสารเตตระเอทิลออร์โทซิลิเกต ผสมกับเอทานอล แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ และน้ำกลั่น ปั่นกวนสารละลายให้เข้ากัน จากนั้นนำไปผสมกับไตรเอทิลฟอสเฟตและแคลเซียมไนเตรทเตตระไฮเดรต ตามลำดับ ปั่นกวนสารละลายทั้งหมดให้เข้ากัน สารละลายที่ได้จะมีสีขาวขุ่น นำสารที่สังเคราะห์ได้มาปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 7,830 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที ล้างอนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสเฟต ด้วยน้ำกลั่น 2 ครั้งและเอทานอล 1 ครั้ง หลังจากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมงเพื่อให้แห้ง นำสารที่อบแห้งแล้วมาบดให้ละเอียดก่อนนำไปเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง อัตราการเพิ่มอุณหภูมิการเผา 2 องศาเซลเซียสต่อนาที เพื่อไล่หมู่ O-H บนผิวของอนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสเฟตออกไป

ตารางที่ 1 อัตราส่วนของสารประกอบที่ใช้ในการสังเคราะห์

สารตั้งต้นที่ต้องการ	สารเคมีที่ใช้	สูตร $70\text{SiO}_2 - 25\text{CaO} - 5\text{P}_2\text{O}_5$ (mol%)	สูตร $80\text{SiO}_2 - 15\text{CaO} - 5\text{P}_2\text{O}_5$ (mol%)	สูตร $85\text{SiO}_2 - 10\text{CaO} - 5\text{P}_2\text{O}_5$ (mol%)
SiO_2	Tetraethyl orthosilicate, TEOS ($\text{SiO}(\text{C}_2\text{H}_5)_4$)	70	80	85
CaO	Calcium nitrate tetrahydrate ($(\text{CaNO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$)	25	15	10
P_2O_5	Triethyl phosphate, TEP ($(\text{C}_2\text{H}_5)_3\text{PO}_4$)	5	5	5



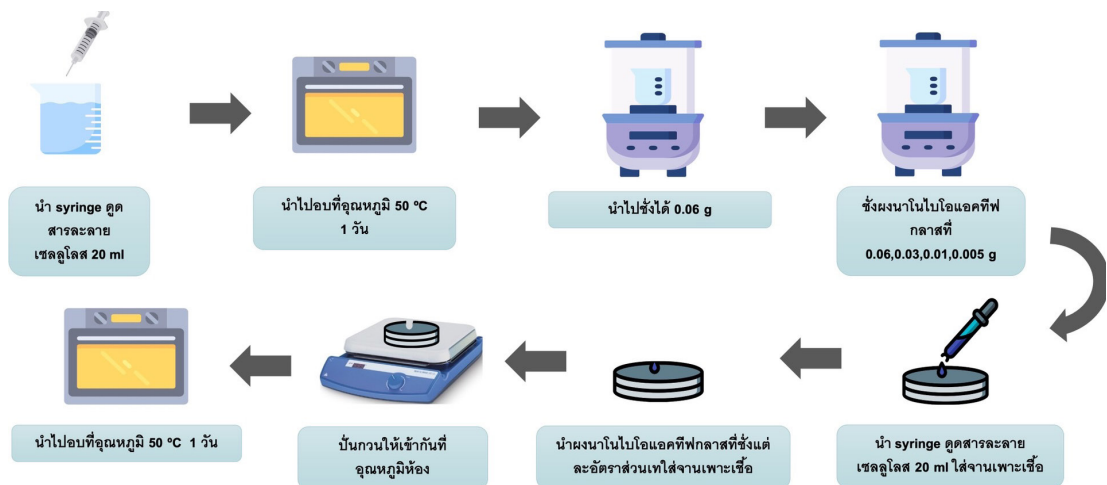
รูปที่ 2 : ขั้นตอนการสังเคราะห์นาโนไบโอแอคทีฟกลาส

2.3 การเตรียมแผ่นฟิล์มเซลล์โอสผสมอนาเคนาโนไบโอแอคทีฟกลาส

หาปริมาณเนื้อสารของเซลลูโลสก่อนนำไปผสมกับอนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟกลาส โดยมีขั้นตอนดังรูปที่ 3 จุด
สารละลายเซลลูโลสมา 20 มิลลิลิตร อบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน จนสารละลายแห้งกลายเป็นแผ่น นำไป
ชั่งน้ำหนักได้ 0.06 กรัม ผสมนาโนไบโอแอคทีฟกลาสกับสารละลายเซลลูโลสที่อัตราส่วนดังตารางที่ 2 เพื่อศึกษาหาอัตราส่วน
ที่เหมาะสมในการทำเป็นแผ่นปิดแผล ปั่นกวนให้เข้ากันที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส
เป็นเวลา 1 วัน

ตารางที่ 2 อัตราส่วนระหว่างเซลล์โลสกับอนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟกลาส

	อัตราส่วน (กรัม)			
เซลลูโลส	0.06	0.06	0.06	0.06
อนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟกลาส	0.06	0.03	0.01	0.005



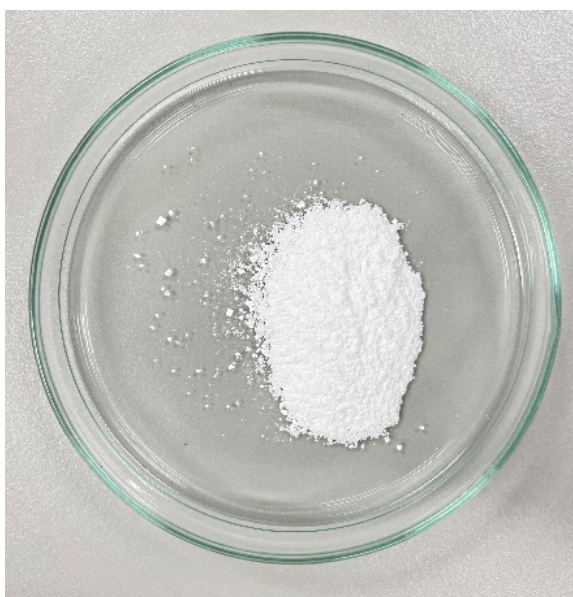
รูปที่ 3 : ขั้นตอนการเตรียมเซลล์โอสผสมกับนาโนไบโอแอคทีฟพลาสทีกที่อัตราส่วนต่าง ๆ

2.4 การทดสอบตัวอย่าง

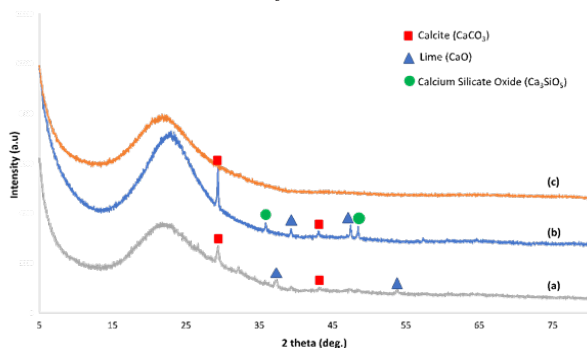
นำสารที่สังเคราะห์ได้มาวิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer (XRD) ยี่ห้อ AXS BRUKER รุ่น D8 ADVANCE วิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscopy (SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-6610LV และวิเคราะห์รูปแบบการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดด้วยเครื่อง Fourier-transform infrared spectrophotometry ยี่ห้อ BRUKER รุ่น VERTEX 70

3. ผลและวิจารณ์ (Results and discussion)

3.1 ผลการวิเคราะห์อนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสเฟต

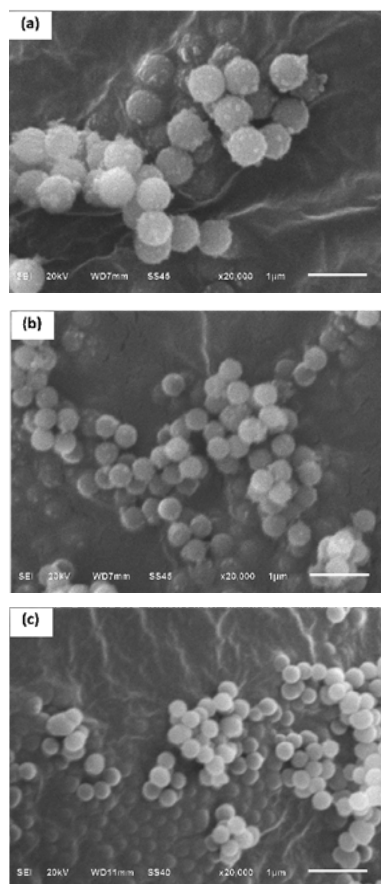


รูปที่ 4 : ผงของนาโนไบโอแอคทีฟฟอสเฟตที่สังเคราะห์ได้จะมีลักษณะเป็นผงสีขาวเหมือนกันทั้ง 3 สูตร



รูปที่ 5 : รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (a) สูตร $70\text{SiO}_2\text{-}25\text{CaO-}5\text{P}_2\text{O}_5$ (b) สูตร $80\text{SiO}_2\text{-}15\text{CaO-}5\text{P}_2\text{O}_5$ (c) สูตร $85\text{SiO}_2\text{-}10\text{CaO-}5\text{P}_2\text{O}_5$
<http://bas.dss.go.th>

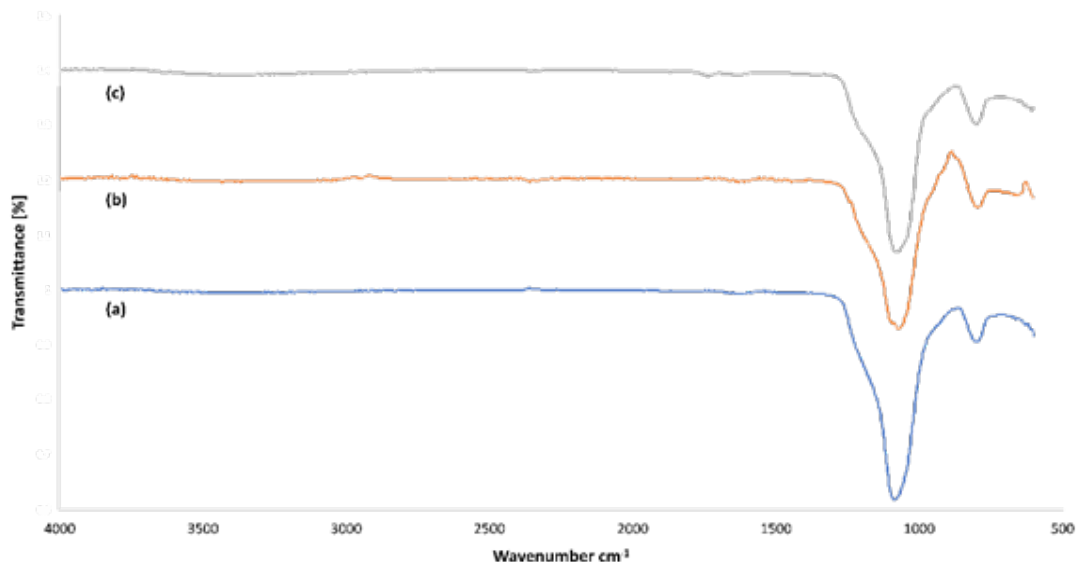
รูปที่ 5 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของอนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสเฟต พบว่า ทุกตัวอย่างมีพีคกว้างที่ 2-theta ที่ประมาณ 24 องศาเซลเซียส ซึ่งแสดงถึง SiO_2 ออสตรอนที่เป็นวัฏภาคหลัก [10] และพบพีคของวัฏภาคอื่นคือที่สูตร $70\text{SiO}_2\text{-}25\text{CaO-}5\text{P}_2\text{O}_5$ และ สูตร $80\text{SiO}_2\text{-}15\text{CaO-}5\text{P}_2\text{O}_5$ พบผลึกของ Calcite (CaCO_3) JCPDS number 85-1108, Lime (CaO) JCPDS number 43-1001 และ Calcium Silicate Oxide (Ca_3SiO_5) JCPDS number 13-0209 โดยเมื่ออัตราส่วนของ SiO_2 เพิ่มขึ้นจะพบเฉพาะพีคของ SiO_2 ออสตรอนเพียงอย่างเดียว จะสังเกตเห็นได้ว่า ผลึกที่พบประกอบด้วยแคลเซียมทั้งหมด สูตร $85\text{SiO}_2\text{-}10\text{CaO-}5\text{P}_2\text{O}_5$ ที่มีแคลเซียมน้อยที่สุด จึงไม่พบผลึก เนื่องจากการเกิดผลึกทำให้ความเป็นไบโอแอคทีฟของสารที่สังเคราะห์ได้ลดลง ดังนั้นจึงใช้สูตร $85\text{SiO}_2\text{-}10\text{CaO-}5\text{P}_2\text{O}_5$ ผสมกับเซลลูโลสทางการค้า เพื่อพัฒนาเป็นผ้าสมานแผล



รูปที่ 6 : สัณฐานวิทยาของอนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสเฟต (a) สูตร $70\text{SiO}_2\text{-}25\text{CaO-}5\text{P}_2\text{O}_5$ (b) สูตร $80\text{SiO}_2\text{-}15\text{CaO-}5\text{P}_2\text{O}_5$ และ (c) สูตร $85\text{SiO}_2\text{-}10\text{CaO-}5\text{P}_2\text{O}_5$

การศึกษาสัณฐานวิทยาของอนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสเฟตด้วยเทคนิค SEM แสดงในรูปที่ 6 พบว่า รูปร่างของอนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสเฟตเป็นทรงกลม อยู่รวมกันเป็นกลุ่ม มีขนาดเฉลี่ยที่ 200-300 นาโนเมตร โดยขนาดของอนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสเฟตจะมีขนาดเล็กลง เมื่ออัตราส่วนของ SiO_2 เพิ่มขึ้นและ CaO ลดลง

วิเคราะห์สมบัติทางเคมีของสารตัวอย่างในช่วงเลขคลื่น $4000\text{--}400\text{ cm}^{-1}$ ของอนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสเฟตเพื่อดูการเกิดพันธะหลังจากเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสในขั้นตอนการสังเคราะห์อนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสเฟต แสดงดังรูปที่ 7



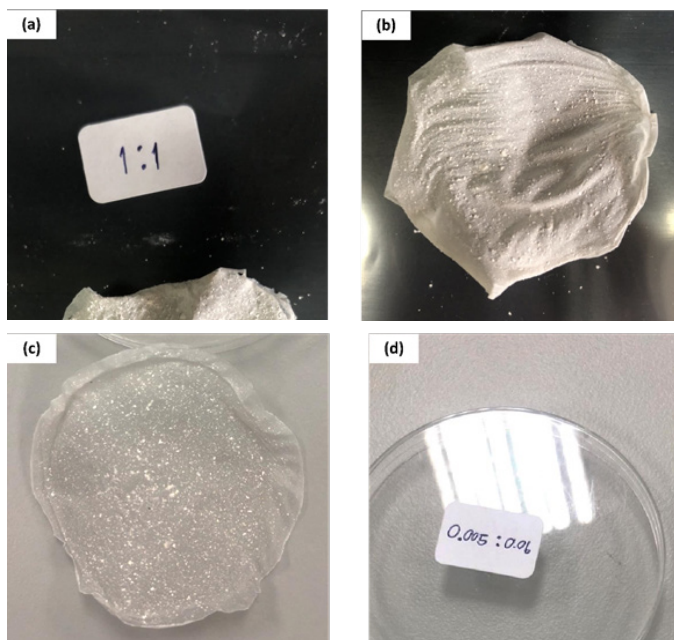
รูปที่ 7 : รูปแบบการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด FTIR ของอนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสเฟต (a) สูตร $70\text{SiO}_2\text{--}25\text{CaO--}5\text{P}_2\text{O}_5$ (b) สูตร $80\text{SiO}_2\text{--}15\text{CaO--}5\text{P}_2\text{O}_5$ (c) สูตร $85\text{SiO}_2\text{--}10\text{CaO--}5\text{P}_2\text{O}_5$

ตัวอย่างทั้ง 3 สูตรพบสัญญาณที่เลขคลื่นประมาณ $1,400\text{ cm}^{-1}$ สอดคล้องกับการสั่นของพันธะ $1100\text{--}1040\text{ cm}^{-1}$ สอดคล้องกับการสั่นของพันธะ Si-O-Si แบบไม่สมมาตรในโหมด stretching และพบสัญญาณที่เลขคลื่นประมาณ $814\text{--}793\text{ cm}^{-1}$ สอดคล้องกับพันธะ Si-O-Si แบบสมมาตรในโหมด stretching [11]

3.2 ผลการวิเคราะห์อนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสเฟตผสมกับเซลลูโลสที่อัตราส่วนต่างๆ

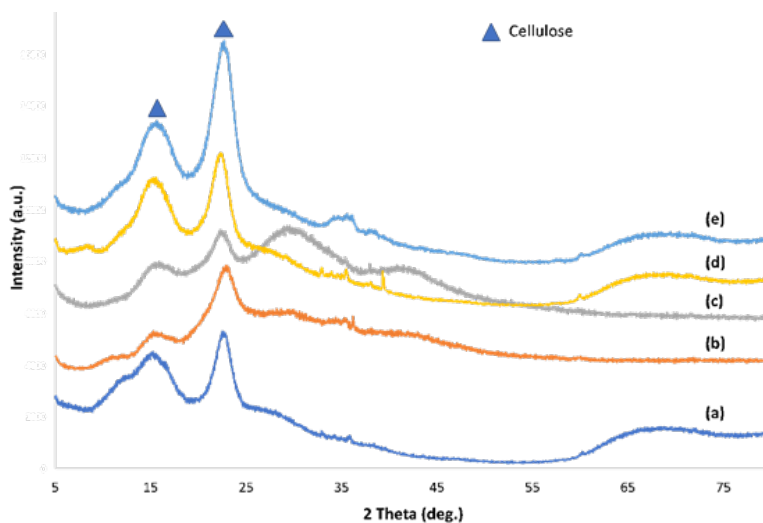


รูปที่ 8: แผ่นเซลลูโลสที่อบแห้งแล้ว



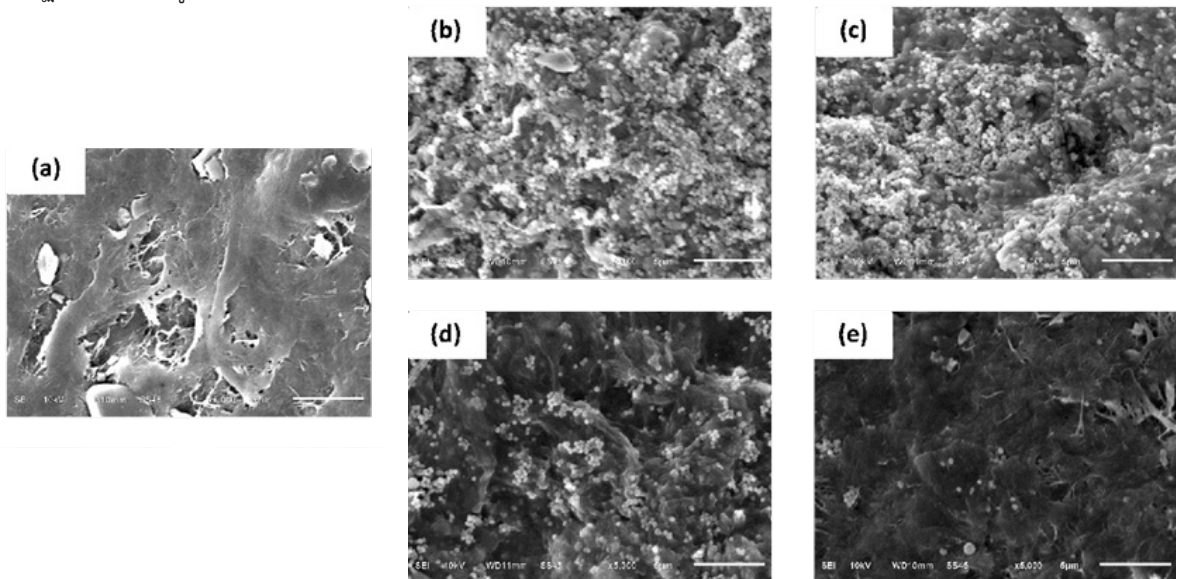
รูปที่ 9 : เซลลูโลสที่ผสมกับอนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัสสูตร $85\text{SiO}_2-10\text{CaO}-5\text{P}_2\text{O}_5$ ที่อัตราส่วน (a) เซลลูโลส 0.06 กรัมต่ออนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัส 0.06 กรัม (b) เซลลูโลส 0.06 กรัมต่ออนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัส 0.03 กรัม (c) เซลลูโลส 0.06 กรัมต่ออนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัส 0.01 กรัม (d) เซลลูโลส 0.06 กรัมต่ออนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัส 0.005 กรัม

แผ่นเซลลูโลสที่เตรียมได้มีความเป็นเนื้อเดียวกัน ฉีกขาดยาก ไม่ยืดหยุ่น น้ำหนักประมาณ 0.06 กรัม เมื่อผสมเซลลูโลสกับอนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัส ดังรูปที่ 9 พบว่า ที่อัตราส่วนเซลลูโลส 0.06 กรัมต่ออนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัส 0.06 กรัม และเซลลูโลส 0.06 กรัมต่ออนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัส 0.03 กรัม แผ่นเซลลูโลสมีลักษณะหึ่งงอ ไม่เป็นแผ่นทรงกลม สีขาวขุ่น มีเศษผงของอนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัสหลุดออกมา แต่ที่อัตราส่วนเซลลูโลส 0.06 กรัมต่ออนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัส 0.01 กรัม และเซลลูโลส 0.06 กรัมต่ออนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัส 0.005 กรัม แผ่นเซลลูโลสมีลักษณะเป็นแผ่นทรงกลม มีจุดสีขาวของอนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัสกระจายอยู่ทั่วแผ่นเซลลูโลส



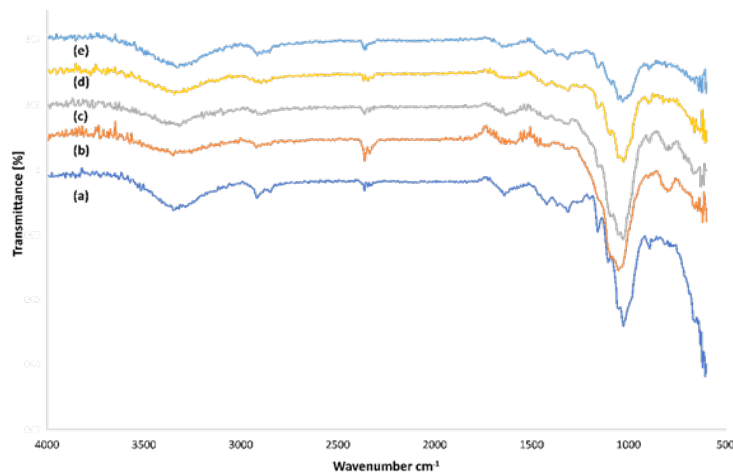
รูปที่ 10 : รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ เมื่อผสมเซลลูโลสกับอนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัสสูตร $85\text{SiO}_2-10\text{CaO}-5\text{P}_2\text{O}_5$ (a) เซลลูโลส (b) เซลลูโลส 0.06 กรัมต่ออนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัส 0.06 กรัม (c) เซลลูโลส 0.06 กรัมต่ออนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัส 0.03 กรัม (d) เซลลูโลส 0.06 กรัมต่ออนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัส 0.01 กรัม (e) เซลลูโลส 0.06 กรัมต่ออนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัส 0.005 กรัม

รูปที่ 10 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของเซลลูโลสและเซลลูโลสที่ผสมกับอนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัสสูตร $85\text{SiO}_2-10\text{CaO}-5\text{P}_2\text{O}_5$ ที่อัตราส่วนต่าง ๆ พบว่า ทุกตัวอย่างมีพีคหลักที่ 2-Theta ที่ประมาณ 15 และ 23 องศาเซลเซียสซึ่งเป็นวิญญากาศของเซลลูโลส



รูปที่ 11 : สัณฐานวิทยาของอนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัสเมื่อผสมกับเซลลูโลส โดยที่ (a) เซลลูโลส (b) เซลลูโลส 0.06 กรัมต่ออนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัส 0.06 กรัม (c) เซลลูโลส 0.06 กรัมต่ออนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัส 0.03 กรัม (d) เซลลูโลส 0.06 กรัมต่ออนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัส 0.01 กรัม (e) เซลลูโลส 0.06 กรัมต่ออนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัส 0.005 กรัม

จะเห็นได้ว่า ที่อัตราส่วนเซลลูโลส 0.06 กรัมต่ออนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัส 0.06 กรัม และเซลลูโลส 0.06 กรัมต่ออนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัส 0.03 กรัม อนุภาคจะมีการกระจายตัวในเซลลูโลสอย่างหนาแน่นมากทำให้แผ่นเซลลูโลสมีพื้นผิวไม่เรียบ และเป็นสีขาวขุ่น ส่วนที่อัตราส่วนเซลลูโลส 0.06 กรัมต่ออนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัส 0.01 กรัม พบว่าอนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัสกระจายตัวในเซลลูโลสได้เป็นอย่างดี ไม่หนาแน่นจนเกินไป และที่อัตราส่วน เซลลูโลส 0.06 กรัมต่ออนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัส 0.005 กรัม พบว่า อนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัสมีจำนวนน้อย ทำให้อนุภาคกระจายตัวไม่ทั่วแผ่นเซลลูโลส



รูปที่ 12 : รูปแบบการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด FTIR (a) เซลลูโลส (b) เซลลูโลส 0.06 กรัมต่ออนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัส 0.06 กรัม (c) เซลลูโลส 0.06 กรัมต่ออนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัส 0.03 กรัม (d) เซลลูโลส 0.06 กรัมต่ออนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัส 0.01 กรัม (e) เซลลูโลส 0.06 กรัมต่ออนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัส 0.005 กรัม

รูปที่ 12 สารตัวอย่าง (a) ที่เป็นเซลลูโลส พบสัญญาณที่เลขคลื่นประมาณ $3,600-3,300\text{ cm}^{-1}$ สอดคล้องกับการสั่นของพันธะ O-H ในโหมด stretching ซึ่งเป็นพันธะเคมีของเซลลูโลสหรือน้ำ ช่วงสัญญาณที่เลขคลื่นประมาณ $2,900-2,800\text{ cm}^{-1}$ สอดคล้องกับการสั่นของพันธะ C-H ของเซลลูโลสในโหมด stretching สัญญาณที่เลขคลื่นประมาณ $1,643\text{ cm}^{-1}$ สอดคล้องกับการสั่นของพันธะ O-H ในโหมด stretching ซึ่งสอดคล้องกับการดูดกลืนพลังงานของพันธะของน้ำในเซลลูโลส สัญญาณที่เลขคลื่นประมาณ $1,027\text{ cm}^{-1}$ สอดคล้องกับการสั่นโหมด stretching ของพันธะ C-O สัญญาณที่เลขคลื่นประมาณ 891 cm^{-1} สอดคล้องกับการสั่นโหมด deformation ของพันธะ glycosidic ที่ตำแหน่ง β -1,4 ซึ่งเป็นลักษณะของเซลลูโลส [12-14] โดยเมื่อผสมอนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัสกับเซลลูโลสแล้ว พบว่า สารตัวอย่าง (b) และ (c) ที่มีอนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัสปริมาณมาก พบช่วงการดูดกลืนแสงของ Si-O-Si symmetric stretching mode ที่ประมาณ 800 cm^{-1} แสดงให้เห็นว่า มีอนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัสอยู่ในแผ่นฟิล์มเซลลูโลส

4. สรุป (Conclusion)

งานวิจัยนี้สามารถสังเคราะห์ไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัสได้ด้วยวิธีโซลเจลโดยกระบวนการของ Stöber ใช้การเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและมีเอมโมเนียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำการศึกษ้อัตราส่วนระหว่าง $\text{SiO}_2:\text{CaO}:\text{P}_2\text{O}_5$ พบว่า ที่อัตราส่วน 85:10:5 ไม่มีความเป็นผลึก สารที่สังเคราะห์ได้เป็นอนุภาคระดับนาโน มีขนาดเฉลี่ยที่ 200-300 นาโนเมตร โดยจะมีขนาดเล็กลง เมื่ออัตราส่วนของ SiO_2 เพิ่มขึ้นและ CaO ลดลง นอกจากนี้เมื่อผสมอนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัสกับเซลลูโลส พบว่า ที่อัตราส่วนระหว่างเซลลูโลส 0.06 กรัมต่ออนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัส 0.01 กรัม อนุภาคนาโนไบโอแอคทีฟฟอสฟอรัสมีการกระจายตัวที่ดีในเซลลูโลสเมื่อเทียบกับอัตราส่วนอื่น ๆ ที่ทำการศึกษา

5. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

ขอขอบคุณกรมวิทยาศาสตร์บริการที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยนี้

6. เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] เลิศพงศ์ ลากชีวะสิทธิ์. อุปกรณ์การแพทย์ ดาวรุ่งดวงใหม่ยกระดับอุตสาหกรรมพลาสติกไทยก้าวทันโลก [ออนไลน์]. 2559. [อ้างถึงวันที่ 25 กุมภาพันธ์ 2564]. เข้าถึงจาก: <https://www.scbeic.com/th/detail/product/2729>
- [2] นิศา จันทรพวง. พฤติกรรมในหลอดแก้วของกลาสเซรามิก ที่มีไบตาแคลเซียมฟอสเฟต. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 2550, 100 หน้า.
- [3] ไฮดรอกซีแอปาทิต (Hydroxyapatite) [ออนไลน์]. [อ้างถึงวันที่ 25 มิถุนายน 2564]. เข้าถึงจาก: <http://wongkarnpat.com/viewya.php?id=1030>
- [4] Bioglass 45S5 [ออนไลน์]. [อ้างถึงวันที่ 23 กุมภาพันธ์ 2564]. เข้าถึงจาก: https://en.wikipedia.org/wiki/Bioglass_45S5
- [5] แสงสุรีย์ โรจน์สกุลวงศ์. การผลิตจากเส้นใยไบโอสปีรต. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. 2540, 91 หน้า.
- [6] รัตนา อางสมรรถ และ อิทธิพล แจ่มชัด. การสกัดเซลลูโลสจากชานอ้อย. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์บัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2532, 58 หน้า.
- [7] สวรรยา ปัญญานันท์, เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ และ กล้าณรงค์ ศรีรอด. การเตรียมและการศึกษาสมบัติของเซลลูโลสจากกากมันสำปะหลังเพื่อประยุกต์ใช้ในอาหาร. วารสารเกษตรพระจอมเกล้า. 2561, 36(2), 106-116.
- [8] IBRAHIM, ISMAIL A.M., A.A.F. ZIKRY and MOHAMED A. SHARAF. Preparation of spherical silica nanoparticles: Stober silica. *Journal of American Science*. 2010, 6(11). 985-989.
- [9] ZHENG, KAI., XINYI DAI, MIAO LU, NORBERT HÜSER, NICOLA TACCARDI and ALDO. R. BOCCACCINI. Synthesis of copper-containing bioactive glass nanoparticles using a modified Stöber method for biomedical applications. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*. 2017, 150, 159-167.
- [10] GUO, QIAN, GUOQIANG YANG, DANCHUN HUANG, WENBIN CAO, LIN GE and LU LI. Synthesis and

- characterization of spherical silica nanoparticles by modified Stöber process assisted by slow-hydrolysis catalyst. *Colloid and Polymer Science*. 2018, **296**, 379-384.
- [11] PAPPAS, G.S., P. LIATSI, I.A. KARTSONAKIS, I. DANILIDIS and G. KORDAS. Synthesis and characterization of new SiO₂-CaO hollow nanospheres by sol-gel method: Bioactivity of the new system. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2008, **354**(2-9), 755-760.
- [12] ALEMDAR, AYSE and MOHINI SAIN. Isolation and characterization of nanofibers from agricultural residues-Wheat straw and soy hulls. *Bioresource Technology*. 2008, **99**(6), 1664-1671.
- [13] WADA, M., JUNJI SUGIYAMA and TAKESHI OKANO. Native celluloses on the basis of two crystalline phase (I α /I β) system. *Journal of Applied Polymer Science*. 1993, **49**(8), 1491-1496.
- [14] กิตติยา ปลื้มใจ, กรองทิพย์ เต็มเกาะ, เอกรัฐ มีชูวาศ และ วิษณุ เพชรภา. การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนและหมู่ฟังก์ชันของเซลลูโลสจากชานอ้อย. *วารสารผลงานวิชาการ กรมวิทยาศาสตร์บริการ*. 2563, **9**(9), 31-37.

การพัฒนาและทดสอบระบบตรวจสอบทางรถไฟสำหรับงานซ่อมบำรุงทาง

The development and testing of a railway track inspection system for track maintenance

กรรธรรม สติรกุล^{1*}

Korntham Sathirakul^{1*}

บทคัดย่อ

ระบบตรวจสอบสภาพทางรถไฟสำหรับงานซ่อมบำรุงทางที่กรมวิทยาศาสตร์บริการได้วิจัยพัฒนาขึ้นประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ 1) ส่วนการขับเคลื่อนไปตามทางรถไฟ ซึ่งใช้พลังงานไฟฟ้าซึ่งในการขับเคลื่อนตัวรถ มีสมรรถนะที่เหมาะสมกับการใช้งานจริง น้ำหนักเบา และสามารถใช้งานด้วยคนคนเดียวได้ และ 2) ส่วนการตรวจและบันทึกสภาพทาง ที่มีความเร็ว และความคมชัดของการบันทึกภาพสภาพทางได้อย่างเหมาะสม ตรงตามความต้องการของผู้ปฏิบัติงานตรวจสอบทาง ทั้ง 2 ส่วนนี้ได้รับการออกแบบพัฒนาให้มีโครงสร้างและระบบการทำงานง่าย ไม่ซับซ้อน ใช้วัสดุอุปกรณ์ที่สามารถจัดหาได้ภายในประเทศ เพื่อให้สามารถผลิตขึ้นใช้งานได้ต้นทุนที่ต่ำ

ต้นแบบระบบตรวจสอบสภาพทางรถไฟสำหรับงานซ่อมบำรุงทางที่สร้างขึ้น ได้นำไปทดสอบในทางรถไฟจำลองขึ้นที่มีลักษณะใกล้เคียงกับสภาพการทำงานจริง เพื่อทำการเก็บข้อมูลการทำงานของระบบ เพื่อการปรับปรุงแก้ไขให้ระบบสามารถทำงานได้อย่างสมบูรณ์เหมาะสมกับการใช้งานจริง และจะได้นำไปใช้งานในการตรวจสอบสภาพทางรถไฟจริงเพื่อให้ทางรถไฟได้รับการตรวจสอบบำรุงรักษาให้มีสภาพที่ปลอดภัยในการให้บริการเดินรถแก่ประชาชนอย่างปลอดภัยและสะดวกสบายต่อไป

Abstract

The railway-track inspection system for track maintenance being developed in this research project consists of 2 sub-systems, namely 1) railway-track locomotion sub-system, consuming electric energy to propel itself along the track for the inspection operation, with light gross weight, operated by one person, and 2) railway-track inspection and data recording sub-system with high-speed and high-resolution image capturing capability in order to suit the requirements of railway-track inspectors' operations. These 2 parts were researched, designed and developed such that the railway-track inspection system had simple construction and operation, and could be built with locally available supplied parts and equipments, leading to low manufacturing costs.

A prototype of the system was built and tested on a mock-up test track simulating a real operation. The test results were used for later improvements of the system to yield an appropriate performance for real railway-track inspection operation. The prototype had been planned to be tested on a real track in a real field operation in a near future. This developed system had been expected to put into real inspection and maintenance service of the railway operators to help ensuring safe tracks for railway passengers safety and comfort.

คำสำคัญ: ทางรถไฟ, การตรวจสอบสภาพทางรถไฟ, รถขับเคลื่อนด้วยล้ออย่างใช้พลังงานไฟฟ้า

Keywords: Railway-track inspection, Track maintenance, Railway-track vehicle

¹ กรมวิทยาศาสตร์บริการ

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

1. ปัญหาและที่มาของการวิจัย

ในปัจจุบันระบบคมนาคมขนส่งทางรางของไทยมีการเร่งพัฒนาปรับปรุงการบริการอย่างมาก เพื่อให้สะดวก รวดเร็ว และปลอดภัยในการเดินทาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการปรับปรุงสภาพทางใหม่ และการขยายทางรถไฟให้เป็นทางคู่ อย่างไรก็ตามการตรวจสอบสภาพทางเพื่อหาจุดบกพร่องของทางที่อาจก่อให้เกิดอุบัติเหตุต่อขบวนรถไฟ และทำการซ่อมบำรุงโดยทันการณ์ ก็เป็นสิ่งจำเป็นในงานซ่อมบำรุงทางที่ต้องทำอย่างต่อเนื่องอยู่เป็นประจำ ซึ่งการตรวจสอบสภาพทางโดยนายตรวจทางของการรถไฟแห่งประเทศไทยนั้น ปฏิบัติโดยใช้นายตรวจทางจำนวนมากรับผิดชอบในการตรวจสอบสภาพทางด้วยตา โดยการเดินเท้าเป็นประจำ หรืออาจใช้รถตรวจสอบสภาพทางที่มีเครื่องมือตรวจวัดที่มีความซับซ้อนราคาแพง แต่การตรวจสอบสภาพทางเช่นนี้ไม่สามารถกระทำตลอดทั้งเส้นทางที่มีกว่า 4,000 กิโลเมตร อย่างเป็นประจำทุกวันได้ เพราะรถตรวจสอบสภาพทางมีอยู่จำนวนจำกัด ไม่เพียงพอใช้งาน อีกทั้งมีราคาแพงมาก รถตรวจสอบสภาพทางต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ใช้งบประมาณหลายล้านบาทต่อคัน และจำเป็นต้องจัดเป็นการเดินรถขบวนพิเศษ แทรกเข้าไว้ในประกาศการเดินรถ การตรวจทางที่เป็นอยู่ในปัจจุบันอาศัยนายตรวจทางจำนวนมาก รับผิดชอบตรวจสอบสภาพทางด้วยการเดินเท้าคนละกว่าสิบกิโลเมตร และเมื่อมีการปรับปรุงทางโดยขยายเป็นทางคู่ในอนาคตอันใกล้ ซึ่งจะเป็นระยะทางรวมทั้งสิ้นกว่า 7,000 กิโลเมตร การตรวจสอบสภาพทางจึงกลายเป็นภาระที่เพิ่มขึ้นอย่างมาก การมีเครื่องมือในการช่วยให้นายตรวจทางสามารถทำงานได้สะดวก รวดเร็ว และมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้นจึงเป็นเรื่องจำเป็น จึงได้มีแนวคิดในการพัฒนาต้นแบบระบบการตรวจสอบสภาพทางรถไฟขึ้น โดยทั้งนี้ระบบนี้ต้องสามารถช่วยการทำงานของนายตรวจทางได้จริง ใช้งานง่าย และมีต้นทุนที่ไม่สูงนัก

1.1 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษา ออกแบบ สร้างระบบตรวจสอบสภาพทางรถไฟต้นแบบ ให้สามารถอำนวยความสะดวกในการปฏิบัติงานของนายตรวจทางรถไฟ และสามารถปฏิบัติงานได้รวดเร็ว และมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น เพื่อให้การเดินทางรถไฟเป็นไปได้อย่างปลอดภัย โดยใช้ต้นทุนที่เหมาะสม

1.2 ขอบเขตของการศึกษาวิจัย

การวิจัยพัฒนานี้เป็นการพัฒนาต้นแบบระบบตรวจสอบสภาพทางรถไฟที่จะใช้เครื่องมือในการช่วยให้การปฏิบัติงานของนายตรวจทางรถไฟให้เป็นไปได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น โดยทั้งนี้ผู้วิจัยไม่ได้ตั้งวัตถุประสงค์ในการพัฒนาระบบตรวจสอบสภาพทางรถไฟนี้เพื่อให้เทียบเท่าหรือทดแทนรถตรวจสอบสภาพทาง (Track inspection car) ที่มีเครื่องมือตรวจวัดที่ซับซ้อนที่การรถไฟแห่งประเทศไทยมีใช้งานอยู่ในปัจจุบัน แต่เป็นการเติมเต็มช่องว่างระหว่างการทำงานตรวจสอบสภาพทางของนายตรวจทางด้วยการเดินเท้า กับการตรวจสอบสภาพทางโดยใช้รถตรวจสอบสภาพทาง โดยใช้การขับเคลื่อนไปตามทางรถไฟด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าพลังงานจากแบตเตอรี่ การใช้กล้องดิจิทัลความเร็วสูงบันทึกภาพสภาพทางรถไฟ และการระบุและบันทึกตำแหน่งขณะปฏิบัติงานด้วยระบบ Global Positioning System หรือ GPS และวิธีการต่าง ๆ

2. ทฤษฎีและวารสารปริทรรศน์

2.1 การบำรุงรักษาและตรวจสอบสภาพทางรถไฟ

ในขณะที่ขบวนรถไฟวิ่งผ่านทาง รางจะถูกแรงกระแทกจากล้อรถไฟทำให้สภาพทางชำรุดไป ในกรณีของทางรถไฟที่ใช้หินโรยทางนั้น หินโรยทางจะมีการแตกตัว เกิดการหลวมตัว หมอนรองรางจะขยับเคลื่อนตัวได้ ซึ่งจะมีผลทำให้รางรถไฟทั้งสองข้างเลื่อนตัวห่างออกจากกัน และอาจเกิดการโก่งตัวในแนวดิ่ง การเปลี่ยนแปลงผิดรูปไปจากทางสภาพปกตินี้เรียกว่า ความคลาดเคลื่อนของทาง หรือ Track Irregularities ความคลาดเคลื่อนนี้หากมีค่าเกินกว่าพิกัดที่กำหนด ทางรถไฟช่วงนั้นจะต้องได้รับการซ่อมแซมแก้ไข

การสัมผัสเสียดสีกันระหว่างล้อเหล็กกับรางเหล็กนั้นก่อให้เกิดการสึกหรอของรางในลักษณะต่าง ๆ กัน เช่น รางในทางโค้งจะถูกล้อดันให้เกิดความคลาดเคลื่อนในแนวขวาง รางสึกทางด้านข้างของราง หัวต่อรางและรอยเชื่อมของรางอาจถูกล้อกระแทกเสียหาย โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ส่วนประกอบของประแจที่จะสึกหรอ หัวรางบีแบง รางหัก หรือรางเป็นคลื่น เป็นต้น ความคลาดเคลื่อนของทางรถไฟ และการชำรุดสึกหรอของราง และส่วนประกอบต่าง ๆ ของทาง เหล่านี้เป็นภาระในการบำรุงรักษาทางให้ได้มาตรฐาน เพื่อความปลอดภัยต่อขบวนรถ ความนุ่มนวลในการโดยสาร ลดการกระแทกอย่างรุนแรง ลดเสียงดัง และลดการสั่นสะเทือนที่อาจทำให้

ผู้โดยสารเกิดความรู้สึกไม่สบายในการโดยสารบนขบวนรถ ข้อมูลลักษณะต่าง ๆ ของความคลาดเคลื่อนของทาง และการเกิดตำหนิสีหรือของรางเหล็ก เพื่อใช้ในการตรวจสอบสภาพและการบันทึกสภาพทางมีอธิบายอย่างละเอียดชัดเจนในเอกสารอ้างอิง [1-4]

ส่วนการตรวจสอบสภาพทางนั้นมีเทคนิคในการปฏิบัติอยู่หลายวิธี การตรวจสอบสภาพทางด้วยการสังเกตด้วยสายตา หรือ Visual Inspection จะใช้ในการตรวจสอบสภาพของทางโดยทั่วไป เช่น การแตกหักของราง การชำรุดสึกหรอบนผิวภายนอกของราง การชำรุดผุพังของหมอนรองราง เครื่องยึดเหนี่ยวรางที่ชำรุดหลุดหาย ความคลาดเคลื่อนต่าง ๆ ที่สามารถสังเกตได้ด้วยตาเปล่า ความผิดปกติของทางเช่นนี้ตรวจสอบโดยนายตรวจทาง รวมถึงการใช้กล้องบันทึกภาพตลอดระยะทาง แล้วมาย้อนดูในภายหลัง หรืออาจใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการวิเคราะห์ภาพเพื่อระบุจุดบกพร่องโดยอัตโนมัติ [3] [4]

การตรวจสอบสภาพทางเพื่อหาความผิดปกติที่ไม่สามารถสังเกตได้ด้วยตาเปล่า เช่น รอยร้าวในเนื้อรางเหล็กซึ่งอาจเกิดการขยายตัว (Crack Growth) และทำให้รางแตกหักอันเป็นเหตุให้เกิดอันตรายกับขบวนรถได้ เช่นนี้จะใช้เทคโนโลยีเครื่องมือวัดที่ซับซ้อนขึ้น การใช้เทคนิคการทดสอบโดยไม่ทำลาย หรือ Non-Destructive Testing (NDT) เช่น การใช้หลักการสะท้อนของคลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonic) และการใช้หลักการของแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic) หรือวิธีเอ็ดดี้เคอร์เรนท์ (Eddy Current Method) เหล่านี้มีบทบาทมากในการตรวจสอบสภาพรางที่ชำรุดจากข้างในเนื้อวัสดุที่ไม่สามารถมองเห็นได้ [5] [6]

นอกจากนี้ความคลาดเคลื่อนอื่น ๆ ที่แม้จะไม่ได้เกิดขึ้นภายในเนื้อวัสดุ แต่เป็นความคลาดเคลื่อนของมิติและรูปทรงของทางและราง หรือ Track Geometry ที่ไม่อาจจะระบุได้ด้วยตาเปล่าก็จำเป็นต้องใช้เครื่องมือวัด เช่น การวัดโปรไฟล์ของรางโดยใช้แสงเลเซอร์เพื่อตรวจสอบความสึกหรอของราง หรือการใช้แสงเลเซอร์เพื่อวัดความคลาดเคลื่อนของการบิดหรือโก่งตัวของแนวทาง การตรวจสอบทางดังเช่นที่กล่าวมานี้มักใช้รถตรวจสอบสภาพทางที่ติดตั้งเครื่องมือวัดและเซ็นเซอร์ต่าง ๆ ไว้วิ่งไปตามทาง แล้ววัดและบันทึกค่าของสภาพทางไว้ พร้อมกับบันทึกตำแหน่งของทางด้วยระบบ Global Positioning System หรือ GPS เพื่อใช้

สามารถระบุตำแหน่งของความผิดปกติของทางแล้วทำการแก้ไขซ่อมบำรุงทางได้ถูกต้อง รถตรวจสอบสภาพทางเช่นนี้ทำให้การปฏิบัติงานซ่อมบำรุงทางได้รวดเร็วมีประสิทธิภาพสูง แต่เป็นการลงทุนที่สูงมากเช่นกัน

2.2 ข้อกำหนดคุณลักษณะของระบบตรวจสอบสภาพทางรถไฟ

ข้อกำหนดในการตรวจสอบสภาพทางรถไฟ รวมถึงกฎระเบียบที่เกี่ยวข้องของบริษัทผู้ให้บริการเดินรถ เช่น การรถไฟแห่งประเทศไทย [3] โดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนของการซ่อมบำรุงทางขนาดเบาได้รับการศึกษา ซึ่งสามารถสรุปเป็นข้อกำหนดคุณลักษณะของระบบตรวจสอบสภาพทางรถไฟที่ทำการพัฒนาได้ดังนี้

2.2.1 ระบบตรวจสอบสภาพทางรถไฟต้องมีน้ำหนักเบาที่สามารถยกออกจากทางได้ด้วยแรงคน 2 คน และการทำงานของระบบต้องสามารถควบคุมได้ด้วยเพียงคนเดียว

2.2.2 การทำงานของระบบจะต้องไม่ไปรบกวนระบบอาณัติสัญญาณและการบริการเดินรถที่เป็นอยู่

2.2.3 รัศมีการทำงานต้องไม่น้อยกว่า 25 ถึง 30 กิโลเมตรบนทาง และความเร็วในการเคลื่อนที่ต้องไม่เกิน 50 กิโลเมตรต่อชั่วโมง [3]

2.2.4 ระบบต้องมีระบบกล้องบันทึกภาพที่มีความเร็วสูงเพียงพอที่จะสามารถเก็บบันทึกภาพสภาพทางที่มีความละเอียดสูงด้วยความคมชัดของภาพในขณะที่ระบบวิ่งไปบนทางรถไฟด้วยความเร็วในขณะดำเนินการตรวจสอบสภาพทาง ระบบต้องมีจอแสดงผลภาพเพื่อให้นายตรวจทางได้สังเกตเห็นสภาพทางในขณะปฏิบัติการตรวจสอบสภาพทาง

2.2.5 ระบบควรมีระบบในการเก็บบันทึกข้อมูลตำแหน่งปัจจุบันของระบบขณะบันทึกภาพสภาพทางในแต่ละภาพอย่างแม่นยำเพื่อให้สามารถกลับมาซ่อมบำรุงทางในตำแหน่งที่จำเป็นได้อย่างถูกต้องในภายหลัง

2.2.6 ระบบนี้เนื่องจากต้องวิ่งไปบนทางรถไฟ เพื่อความปลอดภัยจึงจำเป็นต้องมีสัญลักษณ์ เช่น ธงแดง และโคมไฟสีแดงในเวลากลางคืน เพื่อให้สามารถมองเห็นตำแหน่งที่อยู่ได้อย่างชัดเจน เพื่อหลีกเลี่ยงอุบัติเหตุที่อาจเกิดขึ้นได้ ทั้งในเวลากลางวันและกลางคืน รวมถึงควรสามารถส่งสัญญาณเสียงเตือน เช่น เสียงแตร เมื่อจำเป็น

2.2.7 ระบบนี้ต้องมีต้นทุนที่เหมาะสม ไม่แพงจนเกินไป

ข้อกำหนดคุณลักษณะตามข้างต้นนี้ต้องใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการพิจารณาออกแบบระบบตรวจสอบสภาพทางรถไฟต้นแบบที่ได้พัฒนาขึ้น การออกแบบและพัฒนาระบบต้นแบบนี้ได้กล่าวถึงในข้อ 3.

2.3 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีในการตรวจสอบสภาพทางรถไฟนั้นมีอยู่หลายวิธี ที่มีความก้าวหน้าและพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ในเชิงพาณิชย์แล้วก็มีอยู่มาก ดังที่ได้กล่าวในข้อ 2.1 สำหรับการวิจัยพัฒนาในปัจจุบัน มีดังเช่น การพัฒนาระบบตรวจสอบรางแบบอัตโนมัติโดยใช้หลักการของการวิเคราะห์ภาพด้วยวิธีทางดิจิทัล (Digital Image Processing) หรือ Machine-vision Technique [7-9] โดยจะมีรถที่ขับเคลื่อนไปตามรางขนาดเล็กที่วิ่งไปบนรางรถไฟโดยอัตโนมัติ ไร้คนควบคุม บนตัวรถจะมีการติดตั้งกล้องจำนวนหนึ่งเพื่อบันทึกภาพทางในมุมต่าง ๆ ของทางและราง ภาพที่บันทึกจะส่งไปที่คอมพิวเตอร์บนตัวรถเพื่อประมวลผลภาพดิจิทัลเพื่อหาความผิดปกติของสภาพทางพร้อมบันทึกผลข้อมูลเพื่อใช้ในการวางแผนการซ่อมบำรุงทางต่อไป [10]

ทางรถไฟต้องได้รับการตรวจสอบและบำรุงรักษาอยู่เป็นประจำเพื่อให้มั่นใจในความปลอดภัยและความสบายในการโดยสารรถไฟ ซึ่งผู้ให้บริการเดินรถไฟมีกฎระเบียบต่าง ๆ ในการตรวจสอบทางที่ต้องดำเนินการให้สอดคล้องเหมาะสม [3] Innotrack [5] ได้ศึกษาและสรุปภาพรวมของความก้าวหน้าของเทคโนโลยีตรวจสอบสภาพทางรถไฟ Sawadisavi และคณะ [7] ได้ริเริ่มเทคนิคการใช้คอมพิวเตอร์ประมวลผลภาพสำหรับการตรวจสอบสภาพทางรถไฟ Berry และคณะ [8] กับ Hsieh และคณะ [9] ใช้กล้องวิดีโอความเร็วสูงและเทคนิคการประมวลผลภาพขั้นก้าวหน้าในการตรวจสอบจุดเชื่อมต่อหัวราง รวมถึงคลิปสปริงยึดราง ซึ่งต้องใช้เทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์เข้ามาช่วยในการจดจำลักษณะดีและเสียของสภาพทาง Resendiz และคณะ [10] ได้พัฒนาระบบต้นแบบในระดับห้องปฏิบัติการในการตรวจสอบสภาพทางรถไฟอย่างอัตโนมัติ ความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีนวัตกรรมตรวจสอบสภาพและบำรุงรักษาทางรถไฟมีอยู่อย่างต่อเนื่อง และเทคโนโลยีเหล่านี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับสภาพแวดล้อมและสภาพของทางรถไฟไทยได้

โครงการวิจัยพัฒนาที่กรมวิทยาศาสตร์บริการได้

ริเริ่มนี้ [11] ถึงแม้ว่าในปัจจุบันยังไม่ได้มีวัตถุประสงค์ที่จะพัฒนาระบบให้สามารถตรวจสอบสภาพทางรถไฟแบบอัตโนมัติ แต่ข้อมูลที่ได้จากการดำเนินงานโครงการนี้สามารถนำมาใช้ในการพัฒนาต่อระบบตรวจสอบสภาพทางรถไฟแบบอัตโนมัติโดยสมบูรณ์ได้ในอนาคตต่อไป

3. การออกแบบและพัฒนาระบบต้นแบบ

3.1 การออกแบบระบบต้นแบบ

นักวิจัยได้สำรวจความต้องการของผู้ใช้งาน รวมถึงข้อกำหนดคุณลักษณะของงานตรวจสอบสภาพทางรถไฟ และของรถซ่อมบำรุงทางขนาดเบาตามที่กำหนดไว้ใน กฎระเบียบ ข้อบังคับของการรถไฟแห่งประเทศไทย ระบบต้นแบบจะประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ ส่วนการขับเคลื่อนไปตามทางรถไฟ และส่วนการตรวจและบันทึกสภาพทาง ซึ่งต้องทำงานสัมพันธ์กันอย่างดี และสามารถทำงานตอบโต้ภัยการปฏิบัติงานตรวจสอบสภาพทางรถไฟได้ โจทย์ปัญหาทางเทคนิคที่สำคัญในงานวิจัยพัฒนานี้คือ

1) การขับเคลื่อนส่วนการขับเคลื่อนไปตามทางรถไฟจะต้องออกแบบให้มีหลักการทำงานและควรมีข้อกำหนดคุณลักษณะเฉพาะอย่างไรจึงจะเหมาะสมกับการตรวจสอบสภาพทางรถไฟ

1.1) ระบบต้นแบบต้องสามารถทำงานได้ในรัศมีการทำงานภารกิจตรวจสอบสภาพทางทั้งขาไปและขากลับ

1.2) ต้องมีน้ำหนักโดยรวมเบาพอที่จะให้คนไม่เกิน 2 คนสามารถยกระบบทั้งหมดออกจากทางได้ แต่ในขณะเดียวกันต้องมีความสามารถในการเกาะติดทาง (traction) ให้สามารถขับเคลื่อนไปบนทางได้โดยไม่มีการไถล หรือลื่นหลุด ทำให้วิ่งไปตามทางได้ด้วยความเร็วตามที่กำหนด

1.3) ในการขับเคลื่อนระบบไปตามทางรถไฟจะต้องไม่ไปรบกวนอาณัติสัญญาณการเดินขบวนรถต่าง ๆ บนทาง

2) การตรวจสอบสภาพทางและการบันทึกสภาพสภาพทางรถไฟจะต้องออกแบบให้มีหลักการทำงานและควรมีข้อกำหนดคุณลักษณะเฉพาะอย่างไร

2.1) ต้องตรวจสอบสภาพทางรถไฟในตัวแปรใดบ้าง ซึ่งตามที่ได้รับข้อมูลความต้องการใช้นั้น ปัญหาที่สำคัญเป็นอันดับต้นคือ สภาพและความครบถ้วนของอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวรางกับหมอนรองรางรถไฟ เพราะที่ผ่านมามีขบวนรถตกรางและประสบอุบัติเหตุจากการที่อุปกรณ์ยึดเหนี่ยวรางไม่สมบูรณ์ ซึ่งอาจจะเกิดจากการลอบลักขโมยถอดอุปกรณ์

ดังกล่าวไป ดังนั้นเราจะบันทึกภาพได้อย่างไรให้ได้คุณภาพของภาพที่ดี และครบถ้วน เป็นประโยชน์ในการนำไปวิเคราะห์สภาพทางได้

2.2) การระบุตำแหน่งของภาพสภาพทางแต่ละภาพบนเส้นทางรถไฟ อย่างแม่นยำ เพื่อประโยชน์ในการระบุตำแหน่งที่ต้องกลับมาซ่อมบำรุงได้อย่างถูกต้องแม่นยำอย่างเหมาะสม โดยทั้งนี้ด้วยวิธีการและเครื่องมือที่มีต้นทุนต่ำ

2.3) ด้วยความเร็วของส่วนขับเคลื่อนที่นำพาส่วนตรวจและบันทึกสภาพทางรถไฟ กล้องที่ใช้ในการจับบันทึกภาพต้องมีข้อกำหนดคุณลักษณะอย่างไร และจะมีกลไกในการทำงานสัมพันธ์กับการเคลื่อนไปตามทางอย่างไร เพื่อให้ได้ภาพที่บันทึกมีความชัดพอที่จะสามารถนำมาพิจารณาสภาพทางได้

3) ลักษณะและการทำงานของระบบต้องเป็นไปตามกฎและข้อบังคับของผู้ให้บริการเดินรถ เช่น เป็นไปตามข้อบังคับและระเบียบการเดินรถ ของการรถไฟแห่งประเทศไทย เป็นต้น

4) ระบบควรใช้งบประมาณลงทุนที่เหมาะสม ไม่สูงจนเกินไป

จากโจทย์ทางเทคนิคข้างต้น นักวิจัยได้ออกแบบหลักการและข้อกำหนดคุณลักษณะของเครื่องต้นแบบดังต่อไปนี้

1) ระบบขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าพลังงานจากแบตเตอรี่ มีลักษณะเป็นล้อกำลังในการขับเคลื่อนเพื่อให้มี traction ในขณะที่ระบบมีน้ำหนักที่เบาว่า ทั้งนี้เนื่องจากสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างล้อกับรางเหล็กมีค่ามากกว่าระหว่างล้อเหล็กกับรางเหล็ก ระบบมีล้ออีก 4 ล้อที่เป็นวัสดุโพลีเมอร์ที่แข็งแรงเพื่อรับภาระและประคองให้ระบบเคลื่อนที่ไปได้ตามทางรถไฟ รัศมีทำการระยะไม่น้อยกว่า 20 กิโลเมตร ทั้งไปและกลับ

2) ระบบรับภาระน้ำหนักผู้โดยสาร 2 คน หรือน้ำหนักรวมราว 150 กิโลกรัม และน้ำหนักตัวรถต้องไม่เกิน 60 กิโลกรัม สามารถยกออกจากทางได้ด้วยคนไม่เกิน 2 คน

3) ความเร็วในการขับเคลื่อนในขณะปฏิบัติงานตรวจสภาพทางไม่ต่ำกว่า 10 กิโลเมตรต่อชั่วโมง (ออกแบบไว้ที่ 15 กิโลเมตรต่อชั่วโมง) และความเร็วสูงสุดไม่เกิน 50 กิโลเมตรต่อชั่วโมง (ตามข้อบังคับและระเบียบการเดินรถของการรถไฟแห่งประเทศไทย)

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

4) ในส่วนของการจับและบันทึกภาพใช้กล้องบันทึกภาพดิจิทัลความละเอียดสูงความเร็วสูง 2 ตัว โดยมีชุดไฟส่องสว่างอย่างเพียงพอ การทำงานของกล้องจะควบคุมโดยใช้คอมพิวเตอร์ระดับใช้งานหนักภาคสนามได้ และมีเซ็นเซอร์แสงเลเซอร์ในการตรวจจับหมอนรองรางเพื่อเป็นสัญญาณแจ้งหะในการบันทึกภาพ

5) มีจอภาพแสดงภาพสภาพทางรถไฟ และมีที่นั่งให้นายตรวจทางได้โดยสารและปฏิบัติงานได้ 2 ที่

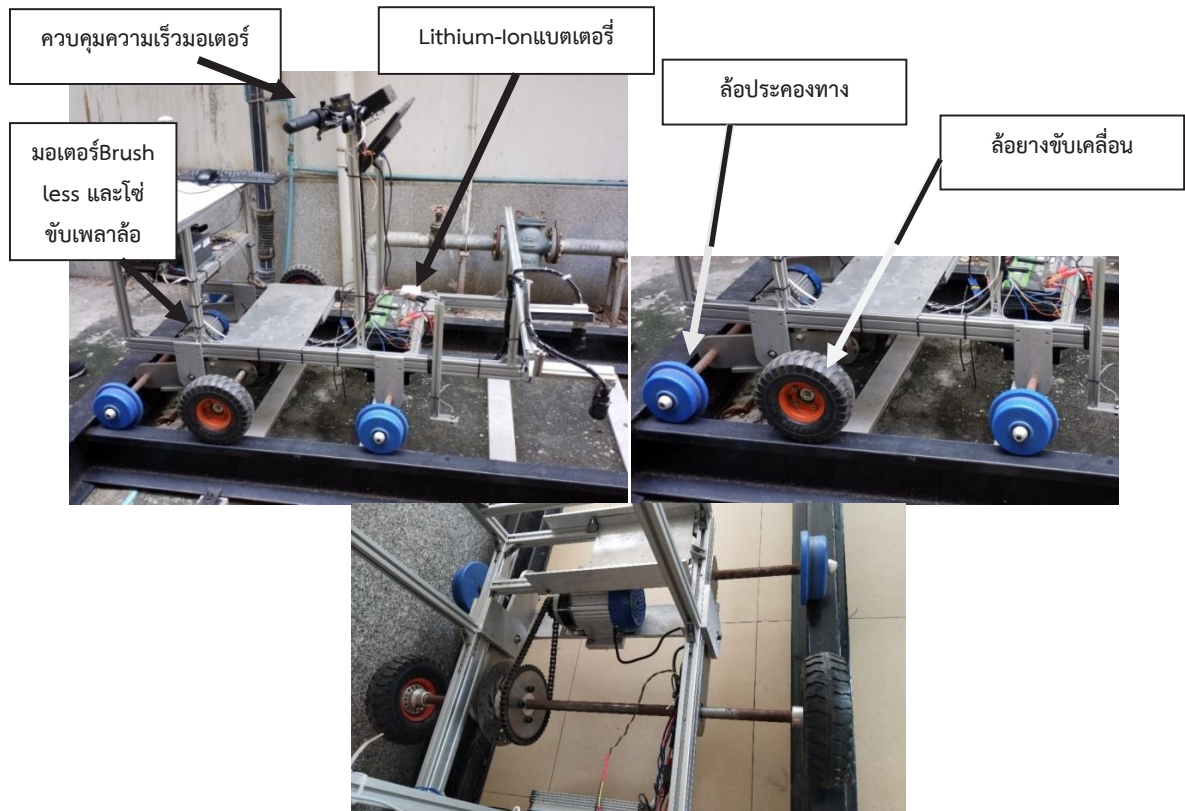
6) สามารถควบคุมรถให้เดินหน้า และถอยหลังได้ และมีเบรกในการหยุดและจอดอย่างครบถ้วน

7) ส่วนประกอบทั้งหมดนี้ยึดอยู่บนโครงสร้างอะลูมิเนียมที่แข็งแรงแต่น้ำหนักเบา

8) มีอุปกรณ์ประกอบอื่น ๆ เพื่อความปลอดภัยตามที่กำหนดไว้ในข้อบังคับและระเบียบการเดินรถฯ

3.2 การพัฒนาส่วนการขับเคลื่อนไปตามทางรถไฟ

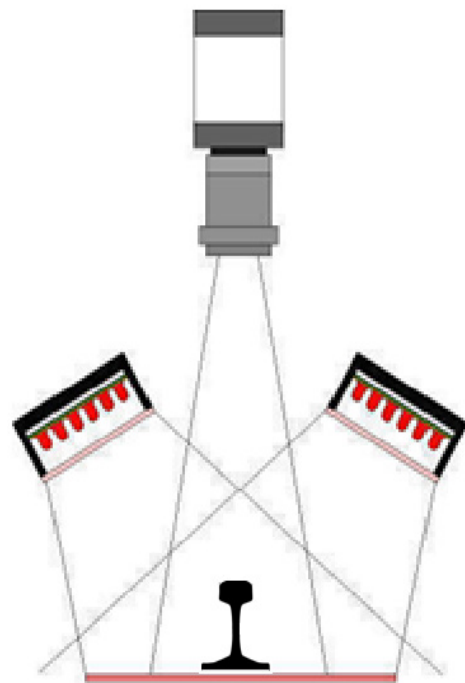
ในส่วนของการขับเคลื่อนไปตามทางรถไฟนี้ โครงสร้างทำด้วยอะลูมิเนียม (aluminum profile) มีล้อขับเคลื่อน 2 ล้อ ชนิดล้อยางเพื่อให้มีการยึดเกาะกับรางเพื่อเกิดแรงจุด และมีล้อประคองทาง 2 คู่ หน้าและหลัง ทำจากวัสดุที่ไม่เป็นสื่อนำไฟฟ้า ทั้งนี้เพื่อไม่ให้เกิดการรบกวนระบบอาณัติสัญญาณการเดินขบวนรถบนทางหลัก ล้อขับเคลื่อนใช้พลังงานจากมอเตอร์ไฟฟ้าไร้แปรงถ่านขนาด 750 วัตต์ 72 โวลต์ ส่งผ่านแรงบิดด้วยระบบชุดโซ่และเฟือง และมีวงจรขับเคลื่อนและควบคุมการทำงานของมอเตอร์ที่มีจำหน่ายในท้องตลาดทั่วไป โดยจะรับคำสั่งความเร็วและทิศทางการทำงานของมอเตอร์จากผู้ควบคุมการทำงาน แห่เก็บและจ่ายพลังงานไฟฟ้ามาจากแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน 12 โวลต์ 35 แอมแปร์-ชั่วโมง 6 ลูกต่ออนุกรมกันให้ได้ศักย์ไฟฟ้ารวม 72 โวลต์ ระบบเบรกใช้ระบบเบรกงานแบบที่ใช้กับรถจักรยานยนต์ รูปที่ 1 แสดงส่วนการขับเคลื่อนไปตามทางรถไฟดังกล่าวนี้



รูปที่ 1 : แสดงส่วนการขับเคลื่อนไปตามทางรถไฟ

3.3 ส่วนการตรวจและบันทึกสภาพทางรถไฟ

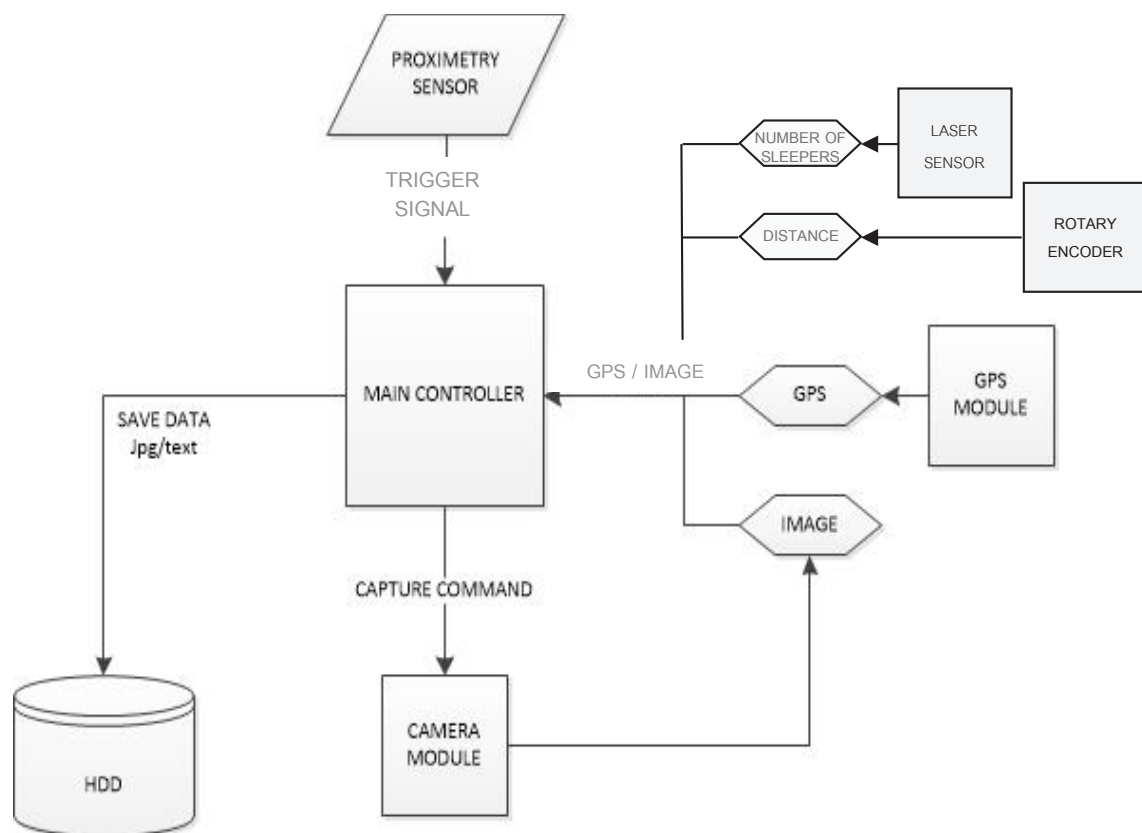
ในส่วนนี้สามารถจับและบันทึกภาพดิจิทัลความละเอียดสูงของสภาพทางได้ ระบบมีกล้องดิจิทัลความเร็วสูงความละเอียดสูงจำนวน 2 ตัว สำหรับใช้กับรางทั้ง 2 ด้าน ข่าย-ขวาพร้อมไฟส่องสว่าง จับและบันทึกภาพอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวรางได้อย่างละเอียดชัดเจน โดยการทำงานของกล้องจะรับสัญญาณจากเซ็นเซอร์ตรวจจับระยะวัตถุด้วยแสงเลเซอร์ (Laser proximity sensor) ที่ตรวจจับหอนร่องรางรถไฟโดยเมื่อเซ็นเซอร์ตรวจจับว่าพบหอนร่องรางแล้วให้กล้องจับภาพของอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวรางทั้ง 2 ด้านพร้อมกัน และข้อมูลจะจัดเก็บพร้อมกับข้อมูลของตำแหน่งพิกัด GPS ระยะจากโรตารีเอ็นโคเดอร์ และจำนวนนับของหอน ไว้ในหน่วยจัดเก็บข้อมูลฮาร์ดดิส เพื่อให้สามารถระบุตำแหน่งบนทางรถไฟได้อย่างแม่นยำ หากต้องกลับมาทำการซ่อมบำรุงทางในตำแหน่งที่สภาพทางมีความผิดปกติเสียหายได้ในภายหลัง รูปที่ 2 แสดงการติดตั้งกล้องบันทึกภาพความเร็วสูงและระบบไฟส่องสว่าง และรูปที่ 3 แสดงแผนผังการทำงานของระบบในส่วนนี้



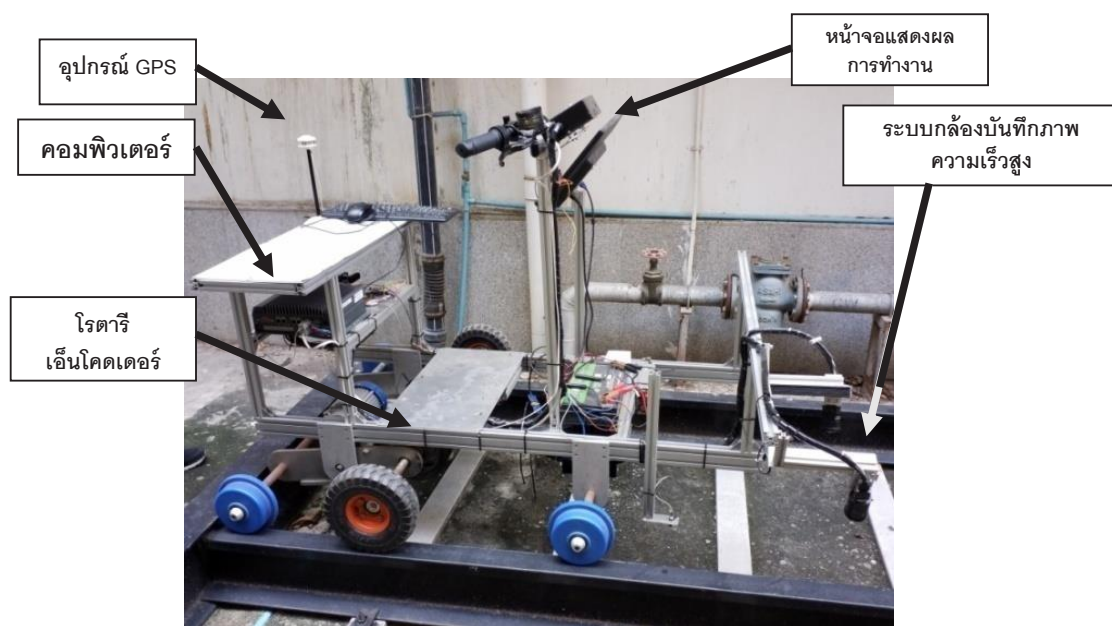
รูปที่ 2 : แสดงการติดตั้งกล้องบันทึกภาพความเร็วสูงและระบบไฟ

ส่องสว่าง

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



รูปที่ 3 : แสดงแผนผังการทำงานของระบบในส่วนการตรวจและบันทึกสภาพทางรถไฟ



รูปที่ 4 : แสดงส่วนการตรวจและบันทึกสภาพทางรถไฟของระบบต้นแบบ

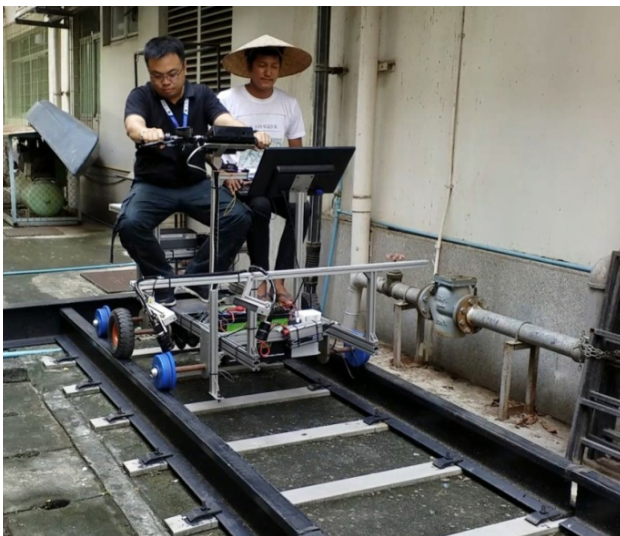
สำหรับการพัฒนาระบบของส่วนนี้เริ่มต้นจากการจับภาพและเก็บบันทึกข้อมูลของพิกัดตำแหน่งของภาพสภาพทางตามเส้นทางรถไฟที่กำลังตรวจสอบสภาพทาง ซึ่งนายตรวจทางสามารถนำข้อมูลไปประมวลและพิจารณาประเมินสภาพทางได้ด้วยสายตา หรืออาจใช้โปรแกรมวิเคราะห์ภาพดิจิทัลทำการประเมินสภาพทางให้ในลักษณะ Post-processing นอกจากนี้ นายตรวจทางผู้ควบคุมระบบจะมีจอคอมพิวเตอร์ดูภาพจากกล้องทั้ง 2 คูสภาพทางด้วยสายตาในขณะที่โดยสารเคลื่อนไปกับระบบต้นแบบได้ และการควบคุมการทำงานทั้งหมดของระบบนี้ใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ระดับอุตสาหกรรมที่มีความทนทานแข็งแรงประมวลผลและควบคุม รูปที่ 4 แสดงส่วนการตรวจและบันทึกสภาพทางรถไฟของระบบต้นแบบดังกล่าว

3.4 การทดสอบระบบต้นแบบ

สำหรับการทดสอบระบบต้นแบบ นักวิจัยได้ทดสอบบนทางรถไฟเสมือนจริงที่สร้างขึ้น เป็นทางมีเมตรเกจความยาว 18 เมตร โดยได้ทดสอบดังต่อไปนี้

- 1) ทดสอบการทำงานของระบบกล้องจับและบันทึกภาพสภาพทางรถไฟ โดยเน้นไปที่ภาพของอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวราง ในขณะที่ระบบเคลื่อนที่ไปตามทางรถไฟ
- 2) ทดสอบการระบุตำแหน่งบนทางรถไฟ โดยใช้ GPS, rotary encoder และการนับหมอน
- 3) ทดสอบระยะรัศมีทำการของระบบต้นแบบ

ต้นแบบระบบตรวจสอบสภาพทางรถไฟสำหรับงานซ่อมบำรุงทางที่ วิทยาลัยการศึกษาศาสตร์บริการได้สร้างขึ้น ได้รับการทดสอบในทางรถไฟในสภาพการทำงานจริงบนทางรถไฟจำลองระยะทาง 18 เมตรในลักษณะวิ่งไปและกลับอย่างต่อเนื่องโดยมีผู้ดำเนินการทดสอบโดยสารไปกับระบบต้นแบบด้วย 2 คน เพื่อทำการเก็บข้อมูลการทำงานของระบบ และนำข้อมูลที่ได้นำมาวิเคราะห์ข้อต่อที่ต้องทำการแก้ไขปรับปรุงเพื่อให้ระบบสามารถทำงานได้อย่างสมบูรณ์เหมาะสมกับการใช้งานจริง รูปที่ 5 แสดงการทดสอบการทำงานจริงของระบบตรวจและบันทึกสภาพทางรถไฟสำหรับงานซ่อมบำรุงทางบนทางจำลอง ผลการทดสอบระบบต้นแบบเป็นดังต่อไปนี้



รูปที่ 5 : แสดงการทดสอบการทำงานจริงของระบบตรวจและบันทึกสภาพทางรถไฟสำหรับงานซ่อมบำรุงทางบนทางจำลองระยะทาง 18 เมตร

3.4.1 ผลการทดสอบการทำงานของระบบกล้องจับและบันทึกภาพสภาพทางรถไฟ

สำหรับการทดสอบการทำงานของระบบกล้องจับและบันทึกภาพสภาพทางรถไฟในขณะที่ระบบขับเคลื่อนด้วยความเร็ว 15 กิโลเมตรต่อชั่วโมงบนทางจำลองเสมือนจริงได้ผลว่า ระบบเก็บข้อมูลสภาพทาง สามารถจับและบันทึกภาพดิจิทัลของอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวราง และเก็บบันทึกข้อมูลตำแหน่งที่สัมพันธ์กับภาพที่ถ่าย ซึ่งเป็นข้อมูลตำแหน่ง/ระยะทางจาก GPS ข้อมูลจาก rotary encoder และข้อมูลจากการนับจำนวนหมอนรองรางจาก laser sensor บันทึกไว้ในฮาร์ดดิสก์ของเครื่องคอมพิวเตอร์ควบคุมระบบฯ ได้เป็นอย่างดี ข้อมูลความครบถ้วนในทุกตำแหน่งของหมอนรองราง และคุณภาพของภาพดิจิทัล

ของสภาพทางที่เก็บและบันทึกได้มีคุณภาพชัดเจนสามารถนำไปวิเคราะห์ความสมบูรณ์ของอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวรางโดยคน หรือ โดยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพได้ในภายหลัง ภาพตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 6



(รางทางซ้าย)

(รางทางขวา)

รูปที่ 6 : แสดงตัวอย่างภาพสภาพทางรถไฟที่ระบบสามารถบันทึกได้ในขณะทดสอบจะสามารถเห็นราง และอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวราง ซ้ายและขวา

3.4.2 ผลการทดสอบการระบุตำแหน่งบนทางรถไฟ โดยใช้ GPS, rotary encoder และการนับหมอนด้วย laser sensor

สำหรับการทดสอบนี้ได้ผลดังแสดงในกราฟที่ 1 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความแม่นยำในการระบุตำแหน่งของตัวรถ ขณะเคลื่อนที่ไปและกลับบนทางรถไฟจำลองระยะ 0 ถึง 18 เมตรที่ให้ผลความแม่นยำที่แตกต่างกัน โดยเมื่อพิจารณาข้อมูล แล้วจะเห็นว่าการระบุตำแหน่งบนทางรถไฟโดยวิธีทั้ง 3 นั้นให้ลักษณะเด่นและลักษณะด้อยที่ต่างกัน ดังนี้

1) การใช้ GPS จะให้ค่าความคลาดเคลื่อนที่กว้างกว่าวิธีอื่น เนื่องจากว่าความแม่นยำของ GPS อยู่ในรัศมีราว 3 เมตร ซึ่งความแม่นยำจะขึ้นอยู่กับว่าในขณะนั้น GPS จะสามารถรับสัญญาณจากดาวเทียมได้กี่ดวง ทั้งนี้ GPS ที่ใช้เป็น GPS ที่มีใช้กันโดยทั่วไป ไม่ใช่รุ่นที่มีความแม่นยำสูง จุดเด่นของ GPS คือ ใช้งานง่าย ค่าความคลาดเคลื่อนไม่สะสม (accumulative) ใช้ในพื้นที่เปิดกว้างได้ดี แต่หากอยู่ในที่อับสัญญาณดาวเทียมจะไม่สามารถทำงานได้

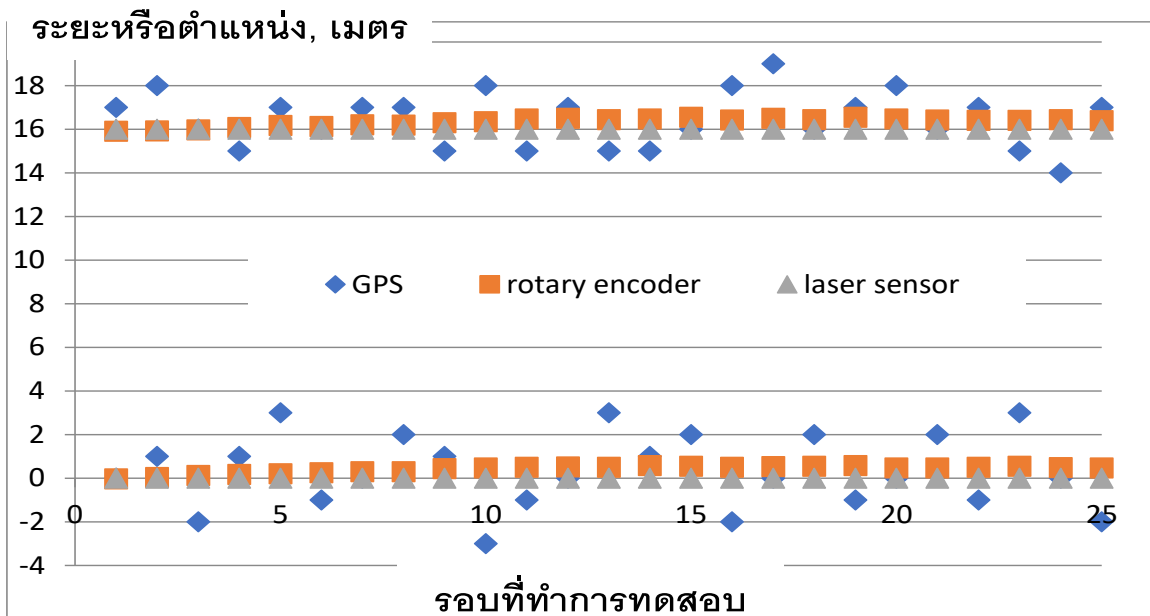
2) การใช้ rotary encoder ที่เพลาล้อ ในการทดสอบนี้ได้ผลความคลาดเคลื่อนที่น้อยกว่า GPS แต่แนวโน้มของความคลาดเคลื่อนจะเป็นลักษณะสะสม (accumulative) ซึ่งหากระยะทางที่วิ่งไปไกลขึ้นการระบุตำแหน่งก็จะมีผลคลาดเคลื่อนมากขึ้น ความคลาดเคลื่อนนี้เกิดจากการลื่นไถลของล้อในขณะวิ่ง หรือในขณะชะลอความเร็ว หรือเบรก และอาจเกิดจากการที่ล้อหมุนฟรีในขณะที่เราเร่งความเร็วขึ้น (ลื้อด้น) หากสภาพยางล้อไม่สมบูรณ์ เมื่อพิจารณาข้อมูลจากการทดสอบ จะเห็นว่า ความคลาดเคลื่อนของการระบุตำแหน่งด้วย rotary encoder ที่เพลาล้อนนี้มีลักษณะเคลื่อนไปทางบวก (ในทิศทางที่ยาวออกไป) ด้วยระยะราว 0.5 เมตร (หนึ่งช่วงหมอน) ต่อระยะทางวิ่งทดสอบรวมยาว 800 เมตร (25 รอบ) ทั้งนี้ อาจอธิบายได้ว่า ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นเกิดจากการที่ล้อลื่นไถล (slip) ซึ่งน่าจะเป็นช่วงการชะลอความเร็วและเบรก ในช่วงที่ต้องวิ่งกลับทิศทางวิ่งไปและวิ่งกลับหลายรอบ ในการปฏิบัติงานจริงนั้นระบบต้นแบบจะทำงานในลักษณะที่วิ่งไป

ตามทางในระยะที่ไกลกว่านี้มาก ไม่ต้องการชะลอและเบรกบ่อยเช่นนี้ ดังนั้นความคลาดเคลื่อนจากการสั่นไถ่อาจจะมีอัตราส่วนระยะทางที่คลาดเคลื่อนต่อระยะทางที่วิ่งไป โดยรวมน้อยกว่าที่ทำการทดสอบได้ ในทางปฏิบัติอาจจะแก้ไขความคลาดเคลื่อนสะสมนี้ด้วยการเริ่มนับระยะทางใหม่เมื่อถึงจุดอ้างอิงที่ทราบตำแหน่งแน่นอน ซึ่งจุดอ้างอิงที่ว่านี้อาจมีจัดไว้ตลอดเส้นทางรถไฟที่ทำการตรวจสอบระยะห่างเท่า ๆ กันเช่น ทุก ๆ ระยะ 1 กิโลเมตร เป็นต้น (หรือเลือกระยะที่เหมาะสมที่ความคลาดเคลื่อนสะสมไม่เกิน 1 ช่วงหมอนรองราง)

3) การใช้ laser sensor นับจำนวนหมอนรองรางในการทดสอบการระบุตำแหน่งด้วยวิธีการนับจำนวนหมอนรองรางนี้ให้ผลความแม่นยำที่ดีที่สุด ตามปกติแล้วระยะห่างระหว่างหมอนจะมีช่วงความยาวที่เท่า ๆ กันคือ 60-70 เซนติเมตร และจะอยู่ในตำแหน่งที่ค่อนข้างคงที่ถาวร ยิ่งหากเป็นในระบบรถไฟฟ้ามหานครที่มีหมอนรองรางฝังอยู่ในคอนกรีตของโครงสร้างทางด้วยแล้ว (slab track) การยึดเอาตำแหน่งของหมอนเป็นตัวระบุตำแหน่งบนทางเป็นสิ่งที่ได้เปรียบ แต่ทั้งนี้การนับหมอนในขณะที่ระบบต้นแบบวิ่งไปตามทางควรต้องไม่พลาดเลย ซึ่งการใช้ laser sensor ซึ่งมีความไวทำให้สามารถตรวจจับหมอนได้อย่าง

ถูกต้องแม่นยำในขณะที่วิ่งด้วยความเร็ว แต่ทั้งนี้หากสภาพของทางไม่อยู่ในสภาพที่เป็นระเบียบ โดยเฉพาะหากหมอนไม่อยู่ในตำแหน่งที่มั่นคง หรือมีสิ่งกีดขวางรบกวนการตรวจจับของ laser sensor ก็จะทำให้ผลที่คลาดเคลื่อนอย่างมากได้เช่นกัน ตัวอย่างเช่น การใช้วิธีนี้กับทางแบบที่ใช้หินโรยทาง (ballast track) หากหินโรยทางถมทับเหนือหมอนรองรางแล้ว การระบุตำแหน่งด้วยวิธีนี้ก็จะไม่สามารถทำได้

เห็นได้ว่า วิธีการระบุตำแหน่งแต่ละวิธีมีความแตกต่างกัน หากเลือกใช้วิธีที่เหมาะสมกับสภาพหรือสถานการณ์งานจริง อย่างผสมผสานวิธีการกัน เราสามารถจะสร้างระบบระบุตำแหน่งตามทางรถไฟที่มีความแม่นยำที่เหมาะสมกับงานในต้นทุนที่ต่ำได้ เช่น การใช้ GPS ในการระบุตำแหน่งอย่างคร่าว แล้วใช้การนับหมอนเป็นตัวกำหนด/ระบุตำแหน่งในระยะที่ละเอียด แต่หากมีสภาพทางที่สามารถนับหมอนด้วย laser sensor ได้ ก็สามารถใช้อุปกรณ์จาก rotary encoder ระบุตำแหน่งได้ โดยทั้งนี้ตลอดเส้นทางที่ปฏิบัติการตรวจสอบทางนี้ มีจุดพิกัดอ้างอิงอยู่เป็นระยะ ๆ ที่เหมาะสมเพื่อการอัปเดตตำแหน่งที่ถูกต้องอย่างเป็นระยะ ๆ ได้ ซึ่งแนวคิดวิธีการข้างต้นเป็นวิธีการที่ไม่ซับซ้อน อีกทั้งยังใช้ต้นทุนที่ต่ำอีกด้วย



กราฟที่ 1 : แสดงการเปรียบเทียบการระบุตำแหน่งบนทางรถไฟด้วยข้อมูลจาก GPS, rotary encoder และการนับหมอนด้วย laser sensor

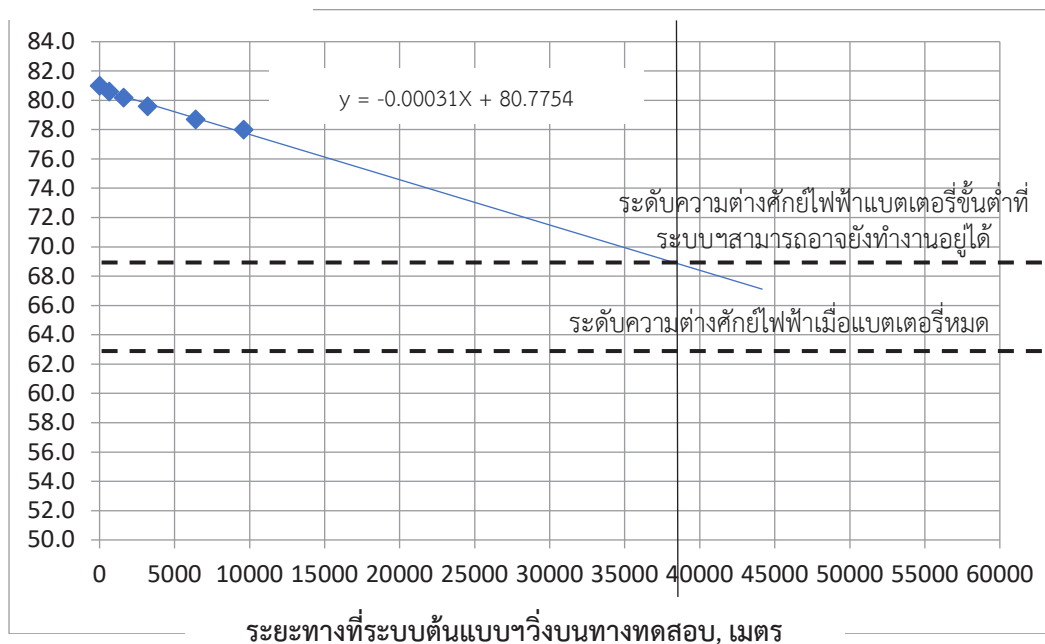
3.4.3 ผลการทดสอบระยะรัศมีทำการของระบบต้นแบบ

สำหรับการทดสอบหาระยะรัศมีทำการของระบบต้นแบบได้ผลเป็นดังข้อมูลในตารางที่ 1 และในกราฟที่ 2 เพื่อเป็นการวิเคราะห์ว่า ระบบต้นแบบที่นักวิจัยได้พัฒนาขึ้นจะสามารถนำไปใช้ปฏิบัติงานจริงได้อย่างเหมาะสมมากน้อยเพียงใด แต่ทั้งนี้การทดสอบไม่ได้กระทำในลักษณะที่ใช้งานจนถึงจุดสิ้นสุดคือจนแบตเตอรี่ไม่สามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้ระบบต้นแบบวิ่งต่อไปได้ ซึ่งถ้าทำเช่นนั้นบนทางจำลองเสมือนจริง 18 เมตร จะต้องใช้เวลานานมากและยุ่งยาก นักวิจัยจึงใช้วิธีการทดสอบโดยให้ระบบต้นแบบวิ่งไปกลับหลายรอบในระยะทางที่สามารถจัดการได้ แล้วใช้วิธีการพยากรณ์เพื่อประมาณระยะรัศมีที่ระบบต้นแบบสามารถวิ่งได้

ตารางที่ 1 แสดงข้อมูลผลการทดสอบเพื่อหาระยะรัศมีทำการของระบบต้นแบบ

จำนวนรอบ	ระยะทาง [m]	ค่าความต่างศักย์ของแบตเตอรี่ [volts]
0	0	81.0
20	640	80.6
50	1600	80.2
100	3200	79.6
200	6400	78.7
300	9600	78.0

ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า
ของแบตเตอรี่, โวลต์



กราฟที่ 2 : แสดงผลการทดสอบและการพยากรณ์ระยะรัศมีการทำงานของระบบต้นแบบ

จากข้อมูลข้างต้นหาวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงเส้นด้วยวิธี linear regression เพื่อประมาณการหรือพยากรณ์ค่าระยะทางที่ระบบต้นแบบวิ่งไปได้จนระดับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของแบตเตอรี่ลดลงเหลือ 1 ใน 3 ของระดับความต่างศักย์ไฟฟ้าเมื่อแบตเตอรี่มีประจุไฟฟ้าอยู่เต็ม กล่าวคือที่ 69 โวลต์ จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการ

“เมื่อ y คือ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของแบตเตอรี่มีหน่วยเป็น โวลต์ และ X คือ ระยะทางที่ระบบต้นแบบวิ่งไปได้มีหน่วยเป็น เมตร”

ดังนั้นสามารถใช้สมการข้างต้นนี้ในการพยากรณ์ระยะรัศมีการทำงานของระบบต้นแบบได้เป็น 37,811.42 เมตร หรือ ราว 38,000 เมตร หรือ 38 กิโลเมตร

หมายเหตุ: ระยะรัศมีการทำงานนี้เป็นการประมาณการอย่างคร่าวและเป็นค่าขั้นต่ำ อันที่จริงแล้วความสัมพันธ์จะเป็นในลักษณะ exponential มากกว่า ซึ่งจุดตัดที่ค่าความต่างศักย์ 69 โวลต์ควรจะมากกว่าที่ 38,000 เมตร แต่การประมาณการที่ต่ำกว่าก็ถือได้ว่าเป็นมาตรการความปลอดภัยอย่างหนึ่ง กล่าวคือเพื่อเป็นการเตือนผู้ใช้งานว่าระบบจะสามารถใช้งานได้ถึงระยะทางดังกล่าวล่วงหน้าก่อนที่แบตเตอรี่จะมีระดับลดลงจนระบบไม่สามารถใช้งานได้ต่อไป

จากผลการทดสอบระบบต้นแบบข้างต้นจะเห็นได้ว่า ในส่วนของระบบขับเคลื่อนไปตามทางนั้นสามารถทำงานได้เป็นอย่างดี ความเร็วในการเคลื่อนที่ขณะทำการทดสอบอยู่ที่ราว 15 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และสามารถทำความเร็วสูงสุดได้ราว 25 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ที่ทางในแนวราบ และในขณะบรรทุกผู้โดยสาร 2 คน โดยที่น้ำหนักของระบบต้นแบบรวมซึ่งได้ราว 50 กิโลกรัม ซึ่งสามารถยกขึ้นและลงทางรถไฟได้ด้วยคน 2 คน ในขณะที่เคลื่อนที่รถไฟใช้กระแสไฟฟ้าไม่เกิน 10 แอมป์ (ประมาณ 4-7 แอมป์) สำหรับแบตเตอรี่ 35 แอมแปร์-ชั่วโมง จะได้ระยะทำการราว 20 กิโลเมตร ไป-กลับ

สำหรับในส่วนการตรวจและบันทึกสภาพทางนั้น กล้องบันทึกภาพความไวสูงความละเอียดสูงสามารถบันทึกภาพของรางและอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวรางได้ค่อนข้างชัดเจนและครบถ้วน รวมถึงการบันทึกพิกัด GPS และข้อมูลตำแหน่งอื่นๆ ที่สัมพันธ์กันได้อย่างครบถ้วนสมบูรณ์ รูปที่ 6 แสดงตัวอย่างของภาพสภาพทางที่บันทึกได้ในขณะทำการทดสอบระบบ

ผลการทดสอบในงานวิจัยนี้ใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบต้นแบบได้ แต่เพื่อการปรับปรุงระบบให้ทำงานได้เหมาะสมกับผู้ใช้งานยิ่งขึ้นจำเป็นต้อง

ต้องทดสอบการใช้งานบนทางรถไฟจริงเพื่อให้สามารถนำผลงานวิจัยนี้ไปใช้ในการตรวจสอบสภาพทางรถไฟจริงอย่างกว้างขวาง เพื่อให้ทางรถไฟได้รับการตรวจสอบบำรุงรักษาให้มีสภาพที่ปลอดภัยในการให้บริการเดินรถแก่ประชาชนอย่างปลอดภัยและสะดวกสบายต่อไป

4. สรุปผลการศึกษาวิจัย

การวิจัยพัฒนานี้เป็นการพัฒนาต้นแบบระบบตรวจสอบสภาพทางรถไฟที่จะใช้เป็นเครื่องมือในการช่วยให้การปฏิบัติงานของนายตรวจทางรถไฟให้เป็นไปได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น โดยระบบนี้ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ 1) ส่วนการขับเคลื่อนไปตามทางรถไฟ เป็นลักษณะคล้ายกับรถบำรุงทางขนาดเบา แต่จะขับเคลื่อนด้วยพลังงานไฟฟ้าโดยมีมอเตอร์ไฟฟ้าและแบตเตอรี่ และ 2) ส่วนการตรวจและบันทึกสภาพทางซึ่งทำการตรวจวัดและบันทึกสภาพทางรถไฟ โดยทั้งนี้นายตรวจทางเป็นผู้ควบคุมการทำงานของระบบเพื่อปฏิบัติงานตรวจสอบสภาพทางให้ลุล่วง ระบบตรวจสอบสภาพทางรถไฟนี้ออกแบบโดยยึดถือเอาความต้องการของผู้ใช้งาน ข้อจำกัดต่าง ๆ ในสภาพการใช้งานจริง และข้อบังคับต่าง ๆ ของทางรถไฟแห่งประเทศไทยว่าด้วยการบำรุงรักษาทางและการเดินรถเป็นหลัก โดยทั้งนี้ในอนาคตอันใกล้จะพัฒนาต่อยอดระบบให้สามารถทำงานได้อย่างอัตโนมัติโดยไม่ต้องมีผู้ควบคุมการทำงาน งานวิจัยพัฒนานี้สามารถตอบโจทย์ความต้องการในการดำเนินการของการรถไฟได้อย่างเหมาะสม

ผลผลิตที่ได้จากงานวิจัยนี้เป็นต้นแบบระบบตรวจสอบสภาพทางรถไฟสำหรับงานซ่อมบำรุงทางที่สามารถทำงานได้ตามที่ได้กำหนดออกแบบไว้ โดยระบบได้รับการทดสอบบนทางรถไฟในสภาพการทำงานจริงบนทางรถไฟจำลองที่มีระยะทางวิ่ง 18 เมตร ทดสอบการวิ่ง และการบันทึกสภาพทาง เพื่อเก็บข้อมูลการทำงานของระบบ และยืนยันความสามารถของระบบโดยรวมว่าทำงานได้อย่างสมบูรณ์เหมาะสมกับการใช้งานจริง แต่ทั้งนี้ระบบต้นแบบที่ได้พัฒนาขึ้นนี้ยังไม่ได้นำไปทดสอบบนทางรถไฟจริง

ในส่วนของระบบขับเคลื่อนไปตามทางนั้นสามารถทำงานได้เป็นอย่างดี ความเร็วในการเคลื่อนที่ขณะทำการทดสอบอยู่ที่ราว 15 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และสามารถทำความเร็วสูงสุดได้ราว 25 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ที่ทางในแนวราบ และในขณะบรรทุกผู้โดยสาร 2 คน โดยที่น้ำหนักตัวรวมนั้นได้ราว 50 กิโลกรัม ซึ่งสามารถยกขึ้นและลงทางรถไฟได้ด้วยคน 2 คน

ในขณะที่เคลื่อนที่รถไฟใช้กระแสไฟฟ้าราว 10 แอมป์ สำหรับแบตเตอรี่ 35 แอมป์-ชั่วโมง จะได้ระยะทำการราว 20 กิโลเมตร ไป-กลับ ซึ่งครอบคลุมระยะทางการทำงานของนายตรวจทางในแต่ละตอนทางรถไฟ

สำหรับในส่วนการตรวจและบันทึกสภาพทางนั้น กล้องบันทึกภาพความไวสูงความละเอียดสูงสามารถบันทึกภาพของรางและอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวรางได้ชัดเจนดีและครบถ้วน รวมถึงการบันทึกพิกัด GPS และข้อมูลตำแหน่งอื่น ๆ ที่สัมพันธ์กันได้อย่างครบถ้วนสมบูรณ์

จะเห็นว่า ด้วยการใช้งานระบบฯ ที่ได้พัฒนาขึ้นนี้ นายตรวจทางสามารถเก็บข้อมูลตำแหน่งพร้อมบันทึกภาพสภาพทางรถไฟในพื้นที่จัดเก็บข้อมูลบนเครื่องคอมพิวเตอร์ ซึ่งนายตรวจทางสามารถนำข้อมูลกลับมาวิเคราะห์ได้ในภายหลัง ซึ่งสามารถต่อยอดโดยพัฒนาโปรแกรมวิเคราะห์ภาพดิจิทัลเพื่อให้หาจุดบกพร่องของสภาพทางได้อย่างอัตโนมัติซึ่งจะทำให้การทำงานของนายตรวจทางเป็นไปได้อย่างมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น ต้นทุนของระบบต้นแบบนี้ราว 300,000 บาทต่อเครื่อง

5. ข้อเสนอแนะ

ผลงานวิจัยนี้ควรจะได้รับ การทดสอบการทำงานกับทางรถไฟจริงของ รฟท. และ รฟม. ต่อไป และจักได้ปรับปรุงระบบให้ทำงานได้เหมาะสมกับผู้ใช้งานยิ่งขึ้น เพื่อให้สามารถนำผลงานวิจัยนี้ไปใช้งานในการตรวจสอบสภาพทางรถไฟจริงอย่างกว้างขวาง เพื่อให้ทางรถไฟได้รับการตรวจสอบบำรุงรักษาให้มีสภาพที่ปลอดภัยในการให้บริการเดินรถแก่ประชาชนอย่างปลอดภัยและสะดวกสบายต่อไป

นอกจากนี้ ผู้วิจัยจักได้ต่อยอดระบบต้นแบบโดยพัฒนาโปรแกรมสำหรับประเมินผลภาพสภาพทางโดยใช้เทคโนโลยี Image Processing และ Artificial Intelligence (AI) ในการวิเคราะห์สภาพรางและอุปกรณ์ยึดเหนี่ยวรางว่ามีสภาพที่ต้องทำการซ่อมบำรุงหรือไม่ ซึ่งโปรแกรมที่จะพัฒนาขึ้นนี้อาจเป็นโปรแกรมที่ให้ทำงานในภายหลังจากที่ได้เก็บบันทึกภาพสภาพทางแล้วในลักษณะ Post Processing หรือหากใช้บน Hardware ที่มีสมรรถนะเพียงพออาจให้โปรแกรมประเมินผลภาพสภาพทางไปพร้อม ๆ กับการเก็บบันทึกภาพที่หน้างานจริงเลย ทั้งนี้ การเพิ่มฟังก์ชันประเมินผลสภาพทางรถไฟนี้จะทำให้ระบบที่พัฒนาขึ้นมีศักยภาพในการทำงานและพัฒนาสู่เชิงพาณิชย์ได้เป็นอย่างดี และหากได้ติดตั้งอุปกรณ์

ตรวจวัดพารามิเตอร์อื่น ๆ ของสภาพทางรถไฟเพิ่มเข้าไปอีกก็จะทำให้ระบบตรวจสอบสภาพทางรถไฟสามารถทำงานได้ครบถ้วนสมบูรณ์ในการปฏิบัติงานตรวจสอบสภาพทางรถไฟยิ่งขึ้น แต่ทั้งนี้จะทำให้ต้นทุนของระบบโดยรวมเพิ่มมากยิ่งขึ้นด้วย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] นคร จันทศร. *ช่วงรถไฟ: ความรู้ทั่วไปด้านวิศวกรรมรถไฟ โครงการพัฒนาระบบขนส่งทางรางและอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องของประเทศไทย*. พิมพ์ครั้งที่ 2. สำนักงานวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. พฤษภาคม 2555. 338 หน้า.
- [2] เจน บุญเชื้อ. *ความรู้เบื้องต้นวิศวกรรมรถไฟ*. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : ห้างหุ้นส่วนจำกัด แสงไทย. 2554. 122 หน้า.
- [3] การรถไฟแห่งประเทศไทย. *ข้อบังคับและระเบียบการเดินรถ พ.ศ.2549*. ขตร. 2549. 338 หน้า.
- [4] DEPARTMENT OF DEFENSE, UNITED STATES OF AMERICA. UFC 4-860-03. *Railroad Track Maintenance & Safety Standards* [online]. 2008. [viewed 19 September 2020]. Available from: https://www.wbdg.org/FFC/DOD/UFC/ufc_4_860_03_2008.pdf
- [5] INNTRACK. *D4.4.1- Rail Inspection Technologies TIP5-CT-2006-031415* [online]. 2008. [viewed 19 September 2020]. Available from: http://www.charmec.chalmers.se/inntrack/deliverables/sp4/d441-f3p-rail_inspection_technologies.pdf
- [6] BARRAGAN, A., P. CEMBRERO, N. CACERES and F. SCHUBERT. *D2.1 Report on railway inspection and monitoring techniques- Analysis of different approaches* [online]. 2011. [viewed 19 September 2020]. Available from: <https://sil0.tips/download/seventh-framework-programme-theme-sst-automated-and-cost-effective-railway-infra>
- [7] SAWADISAVI, S. V., et al. *Machine-Vision Inspection of Railroad Track* [online]. November 2008. [viewed 19 September 2020]. Available from : https://railtec.illinois.edu/wp/wp-content/uploads/pdf-archive/Sawadisavi-et-al-2009_1.pdf

- [8] BERRY, A., et al. *High Speed Video Inspection of Joint Bars Using Advanced Image Collection and Processing Techniques*. Proceedings of the 2008 World Congress on Railway Research, Seoul, Korea. [online]. 2008. [viewed 19 September 2020]. Available from: <http://www.railway-research.org/IMG/pdf/i.3.1.3.2.pdf>
- [9] HSIEH, H. Y., N. CHEN and C. L. LIAO. *Visual Recognition System of Elastic Rail Clips for Mass Rapid Transit Systems*. JRC/ICE 2007-40080. Proceedings of the ASME/IEEE Joint Rail Conference and Internal Combustion Engine Spring Technical Conference. Pueblo, Colorado, USA. 2007. pp. 319-325.
- [10] RESENDIZ, E., J. M. HART A and N. AHUJA. Automated Visual Inspection of Railroad Tracks. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2013, **14**(2), 751-760.
- [11] SATHIRAKUL, K., S. SURATISAK, J. BORSUB and S. PRAEKNOKEAW. *The Development of Railway Track Inspection System for Track Maintenance*. the 6th Thailand Rail Academic Symposium 2019 (TRAS 2019). November 21-22, 2019. Mahidol University, Bangkok, Thailand.

เทคนิคขั้นสูงของการสอบเทียบเครื่องวัดระยะชนิดเลเซอร์

An advanced technique of laser distance meter calibration

วันชัย ชินชูศักดิ์^{1*}, ชนินท์ พิมพ์ศรี¹, พิสิฐ หอมเชย¹, ศรีญญา นนทศิริ¹

Wanchai Chinchusak^{1*}, Chanin Phimsri¹, Pisit Homchoey¹, Sarinya Nonthasiri¹

บทคัดย่อ

ปัจจุบันเครื่องวัดระยะชนิดเลเซอร์ส่วนมากนิยมใช้วัดระยะในงานก่อสร้าง และงานที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้การวัดทั่วไป ในขณะที่ห้องปฏิบัติการสอบเทียบความยาวต้องการหาวิธีการสอบเทียบและการสอบกลับได้ของเครื่องมือวัดนี้ งานวิจัยนี้นำเสนอเทคนิคขั้นสูงด้วยหัววัดแบบอัจฉริยะ ในการตรวจสอบความถูกต้องเครื่องวัดระยะด้วยเลเซอร์ โดยอ้างอิงบนพื้นฐานหลักการของมาตรฐาน ISO 16331-1 (2012) ที่ระยะอ้างอิงสูงสุด 20 m ด้วยค่าความสามารถการวัดลดลงที่ค่า 0.64 mm, 0.73 mm, และ 0.80 mm ของ 3 ตัวอย่าง ที่ระดับความเชื่อมั่นโดยประมาณ ร้อยละ 95

Abstract

Recently, the laser distance meter mostly employed in construction area, and other related to measurement applications. Whereas, the length calibration laboratory certainly needs to find out both technical calibration and their traceability. This research presents the advanced technique of smart measuring probe for performance test method of laser distance meter, based on ISO 16331-1 (2012). The minimized measurement uncertainties are 0.64 mm, 0.73 mm, and 0.80 mm of 3 samples, at maximum range of reference distance 20 m, the confident level at approximately 95%.

คำสำคัญ : เครื่องวัดระยะชนิดเลเซอร์ หัววัดอัจฉริยะ สอบเทียบ ค่าความไม่แน่นอนการวัด

Keywords : Laser distance meter, Smart measuring probe, Calibration, Measurement uncertainty

1. Introduction

The laser distance meter (LDM) also known as an electronic distance meter (EDM), or rangefinder, or laser telemeter is employs time of flight principle [1], which a laser (solid states) beam to determine the distance to an object, it was developed by Leica, in 1993. There are many of measuring applications, such as building, interior decoration, room dimensions, conveyor belt lengths, bridge construction highway survey, and so on. Although, in the present the LDM is more comfortable, and precise than the long range measuring instruments, it needs to calibrate and metrological traceability as well.

Generally, the LDM is simply used the manual calibration by comparison method with interferometry, high precision EDM, and standard tape which is set up on. These activity would be usually provided by the national metrology institute (NMI), at the range up to below 50 m, as EURAMET Supplementary Comparison (L-S20) [2].

Hence, the standard tape calibration bench 50 m in the length and dimensions calibration laboratory, Department of Science Service (DSS) is developed in 2009 [3]. In order to provide the traceability of long range electronic distance device, in Thailand. LDM calibration by using interferometry technique of

¹ กรมวิทยาศาสตร์บริการ

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

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

DSS have been developing since 2017, which is typically based on ISO 16331-1/2012 (part 1) Performance of handheld laser distance meters [4]. But the measurement uncertainty of LDM calibration is practically up to 1.0 mm or more larger, that caused by some technical problems of human error. The repeatability and measurement uncertainty (MU) are manually also very large from manual effect of setting up.

This research presents an advanced design of automatic smart probing technique using the interferometry system, in order to minimize repeatability and measurement uncertainty. The comparison results of LDM calibration is satisfy |between the manual method and new automated technique method. The measurement uncertainty and repeatability decrease significantly.

The next research would challenges to investigate how to reduce the residual errors with completely the measurement uncertainty evaluation technique of LDM calibration at the confident level 95%. To evaluate the sources of uncertainty and contributes uncertainty budgets.

2. Principles

2.1 Time of flight (TOF)

The LDM principle is based on the time of flight (TOF). In Fig.1, shown the diagram of LDM principle, the distance (D) is the light path propagates from light source to target or object and return back to receiver with light velocity (c) and time (t) divides by 2, as equation (1).

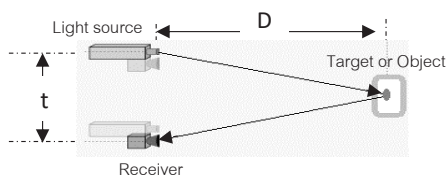


Figure 1 : The time of flight principle of LDM

$$D = \frac{ct}{2} \quad (1)$$

When, D: Distance, c: Light velocity, t:
Time to travel a distance through a medium

2.2 Interferometry method

The interferometry method is the absolute method as shown in Fig.2 the light source is a He-Ne laser with wavelength 633 nm, power output less than 1 mw based on light interference principle refer to Michelson's interferometer principle. To develop heterodyne interferometer two frequencies f_1 and f_2 , as equation (2) [5].

$$\Delta f = \frac{\Delta \phi}{2\pi} \lambda_a \quad (2)$$

The principle of linear interferometry as shown in Fig.2 has directly view linear interferometer, and movable retroreflector. The result of interference is 2 images f_2 (f reference) and Δf of the interference fringe which interference pattern is observed by photodetector, and interpreted fringe to distance with frequency counter, and heterodyne.

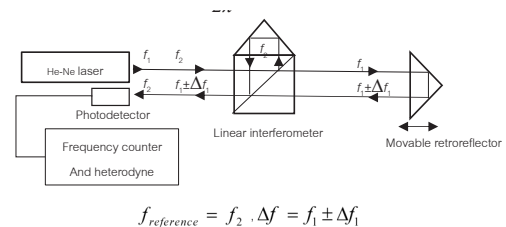


Figure 2 : Principle of interferometry method

2.3 Design of smart measuring probe

A smart measuring probe (SMP) carriage is only special designed for LDM calibration system. The carriage chassis made of a high quality material (Aluminium No.7075). The measurement positioning is controlled by the high precision motorized DC driving wireless control of each measuring points with repeatability approximately ± 0.002 mm. The

SMP automatically moves along the straightness of guideway, both pitch and yaw less than ± 300 arcsec., for all reference distance 20 m. The LDM and laser interferometer beams are accurately provided parallelism movement both the LDM target and linear retroreflector, as show in Fig.3.

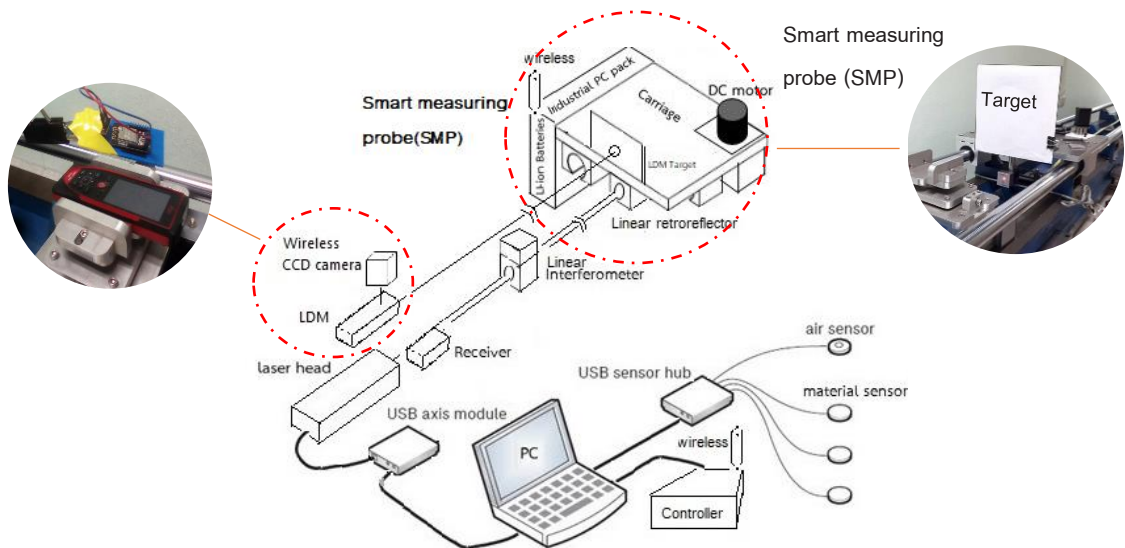


Figure 3 : The design of smart measuring probe (SMP)

The algorithm of SMP, the measurement positioning of smart probe is defined by the operator setting on the PC and computerized software XAMPP control panel Version 3.2.2 [6]. Whatever, the measuring probe approaches to any measuring points, the smart probe would decelerate slowly stop the carriage when comes over each measuring point, and then move to next measuring point. Each of measuring points automatically is observed and collected the data from laser interferometer by CCD camera via the software, until the program runs completely all measuring points, as Fig. 4 the flow chart of the running program.

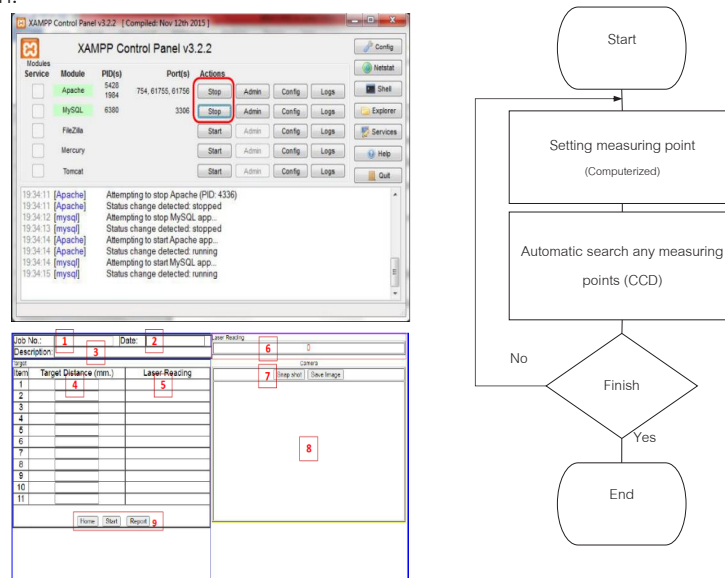


Figure 4 : The program XAMPP and flow chart of the measuring program

3. Experiments

The measuring tape calibration bench 50 m applied for the LDM calibration system consists of the long bench of standard tape calibration system 20 m, laser interferometer (He-Ne, wavelength 633 nm) and optical devices (linear interferometer and retroreflector), 6 material and 6 air temperature sensors, all devices set up on measuring bench together with optical devices, such as linear interferometer, retroreflector and mounted CCD camera over LDM, as following Fig.5.

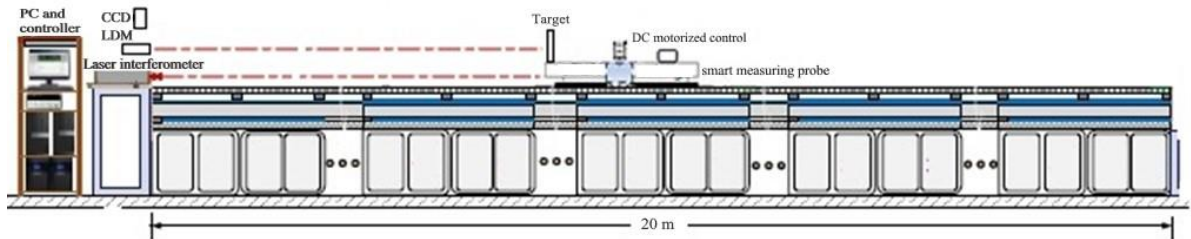


Figure 5 : Laser distance meter measuring bench 20 m

The calibration points (CP) up to 10CP would be defined either to the longest specified distance of the device under test or to the maximum range of the reference distance measurement system. In this case, laboratory set up only the maximum range of the reference distance at 20 m, as show in Fig.6. At each calibration point would take 3 measuring runs, until complete 10 calibration points (each point 10 repeats) with the reference distance measurement system, with the unit under calibration, in order to make sure that the configuration alignment of LDM to target is correct.

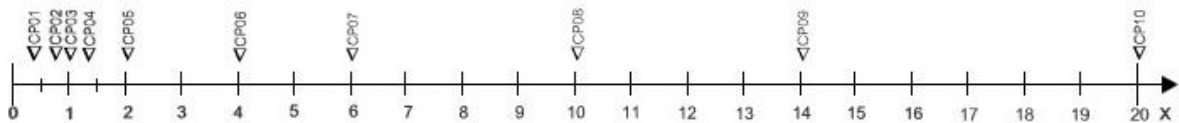


Figure 6 : The calibration points or check points

The 10 calibration points set as following ISO 16331-1/2012 (part 1)

1. $D(CP01) = 0.02 \cdot D(CP10) = 0.4 \text{ m (400 mm)}$
2. $D(CP02) = 0.03 \cdot D(CP10) = 0.6 \text{ m (600 mm)}$
3. $D(CP03) = 0.05 \cdot D(CP10) = 1.0 \text{ m (1000 mm)}$
4. $D(CP04) = 0.07 \cdot D(CP10) = 1.4 \text{ m (1400 mm)}$
5. $D(CP05) = 0.10 \cdot D(CP10) = 2.0 \text{ m (2000 mm)}$
6. $D(CP06) = 0.20 \cdot D(CP10) = 4.0 \text{ m (4000 mm)}$
7. $D(CP07) = 0.30 \cdot D(CP10) = 6.0 \text{ m (6000 mm)}$
8. $D(CP08) = 0.50 \cdot D(CP10) = 10.0 \text{ m (10000 mm)}$
9. $D(CP09) = 0.70 \cdot D(CP10) = 14.0 \text{ m (14000 mm)}$
10. $D(CP10) = \text{max. distance} = 20 \text{ m (20000 mm)}$

Where X : Distance (m), maximum range of the reference distance : 20 m

Note : The calibration or check point of classical method is 0, 500, 1000, 2000, 3000, 4000, 5000, 10000, 15000, 20000 mm.

The measurement conditions set up under laboratory conditions with temperature $25^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ or , relative humidity $50\% \pm 10\%$ target reflectivity $95\% \pm 5\%$ and background illumination $< 3000\text{ lx}$ (indoor conditions).

Reference standards:

1. Measuring bench 0-20 m with smart measuring probe
2. Laser measurement system 5529A (optional for long range application up to 80 m)

Unit under calibrations:

1. UUC-1: Fluke 411D, Range 0-30 m, (DSS's artifact)
2. UUC-2: Leica DISTO D8, Range 0-250 m (customer), and
3. UUC-3 Leica DISTO A5, Range 0-20 m (customer)

4. Results and Discussion

4.1 The corrections and repeatability

As mentioned above, the calibration points based on ISO 16331-1(2012) 10CP (Fig.6) have been starting since 2017. The correction comparison of UUC-1 (Y2017 & Y2019), UUC-2 (Y2016 & Y2019), and UUC-3 (Y2016 & Y2018) as Figure 7, Figure 8, and Figure 9 respectively, are compared between the manual and SMP method. Therefore the UUC-2 and UUC-3 would be compared correspondently only the nominal value of 0, 2000, 4000, 10000, 20000 mm.

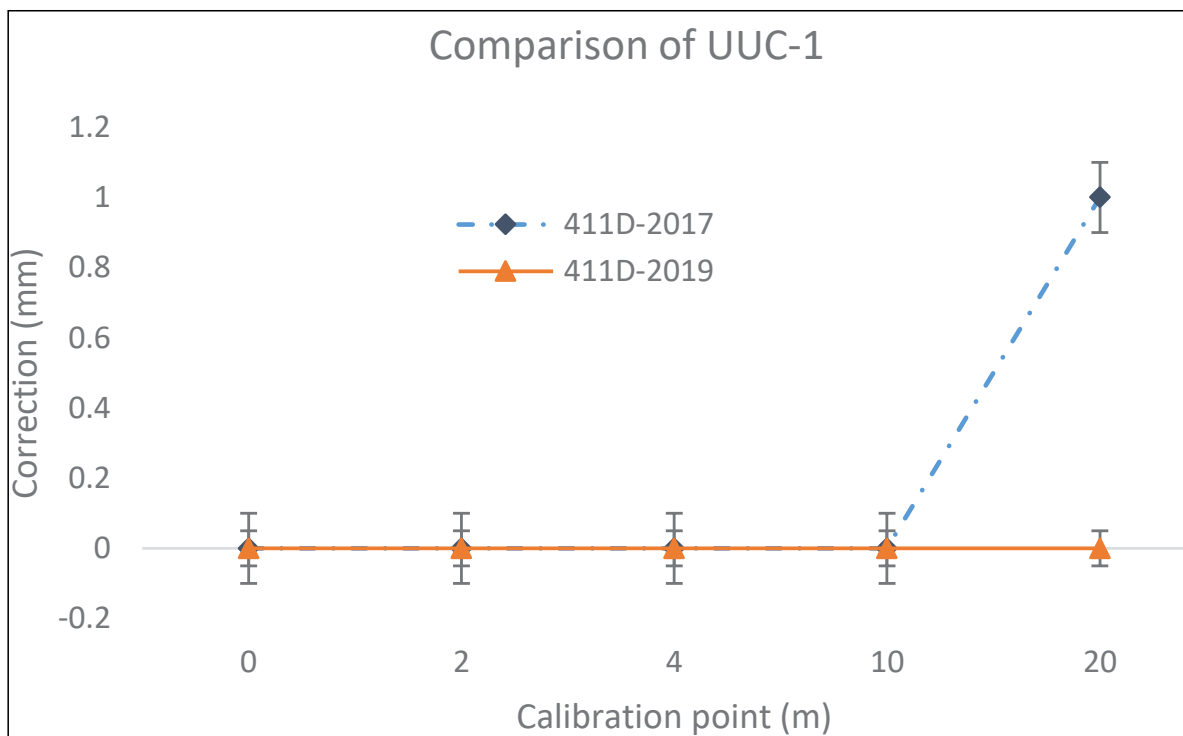


Figure 7 : The comparison of UUC-1(Y2017-Y2019)

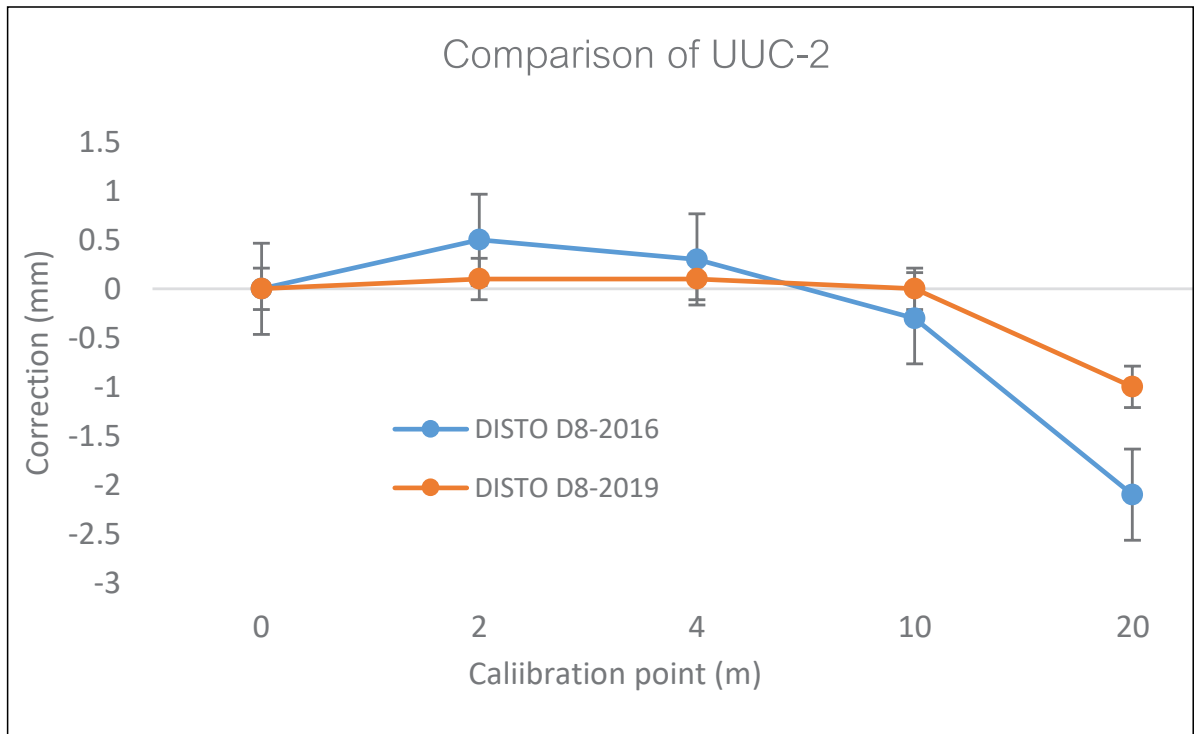


Figure 8 : The comparison of UUC-2 (Y2016-Y2019)

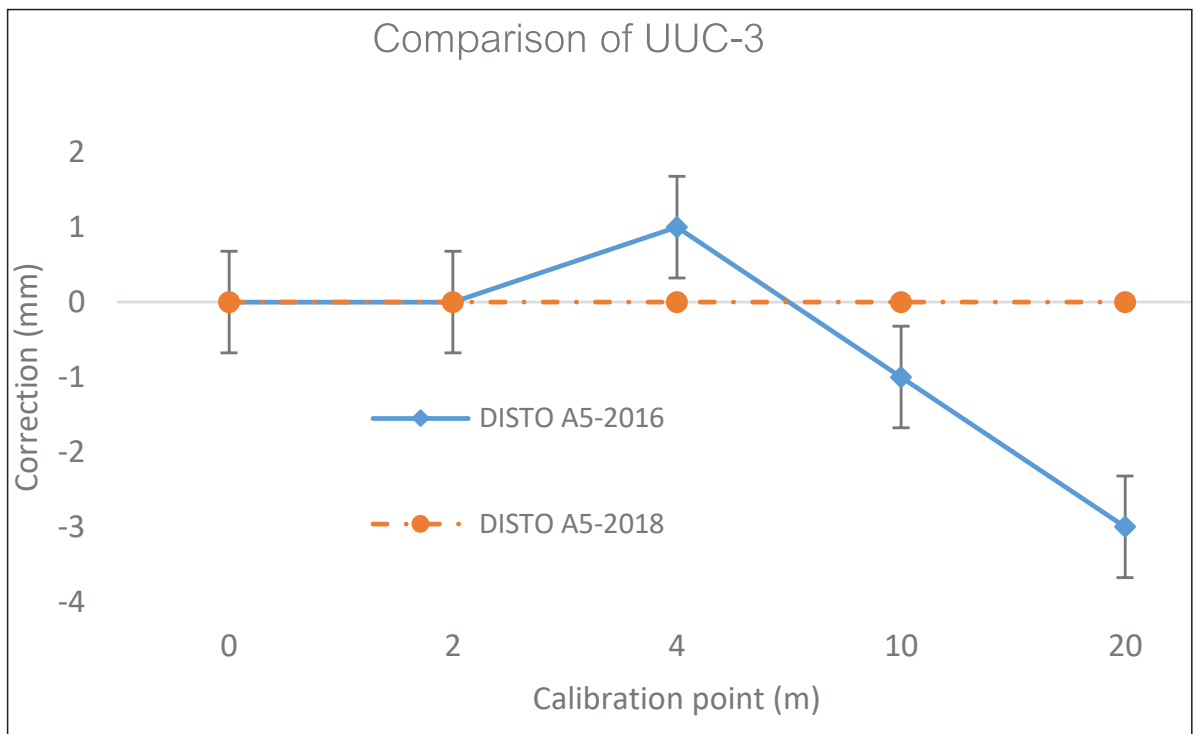


Figure 9 : The comparison of UUC-3 (Y2016-Y2018)

The repeatability of UUC is compared with each other, at the same calibration point and difference methods between manual and automatic system of SMP, as showed in Table1.

Table 1. Repeatability Comparison of UUC1, UUC2, and UUC3 between Manual and SMP

Nominal value (mm)	UUC1		UUC2		UUC3	
	Manual (2017)	SMP (2019)	Manual (2016)	SMP (2019)	Manual (2016)	SMP (2018)
0	0.33	0	0.05	0.14	0	0
2000	0.33	0	0.05	0.14	0	0
4000	0.33	0	0.05	0.14	0	0
10000	0	0	0.04	0.09	0.2	0
20000	0.33	0	0.03	0.12	0	0

However, the repeatability of SMP method is obviously more stable than the manual method. The authors expect that their long-term stability of SMP is certainly better than classical method as well.

4.2 Measurement uncertainties

This measurement uncertainty evaluation based on M3003 (2012), the guideline to the expression of uncertainty in measurement [7]. Hence, the 12 source of uncertainty budgets and flow chat of measurement uncertainty budgets, as following, Figure 10 below.

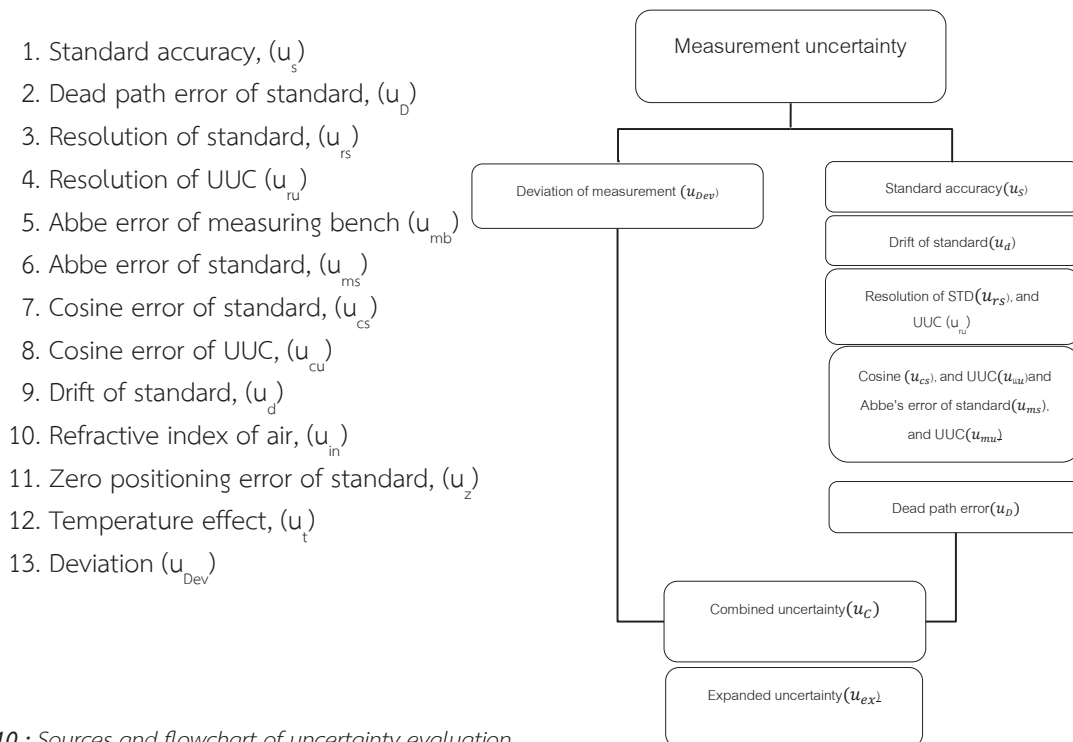


Figure 10 : Sources and flowchart of uncertainty evaluation

$$U_y^2 = u_D^2 + u_s^2 + u_d^2 + u_{(rs,ru)}^2 + u_{(ms,mu)}^2 + u_{(cs,cu)}^2 + u_t^2 + u_{zs,zu}^2 + u_{in}^2 \quad (3)$$

Each source of measurement uncertainty budgets were declared and combined of root sum square, as equation (3). u_D^2 , u_s^2 , u_d^2 , $u_{rs,ru}^2$, $u_{ms,mu}^2$, $u_{cs,cu}^2$, u_t^2 , $u_{zs,zu}^2$, and u_{in}^2 . In case of air index effect, which is not change from the previous value, caused by limitation of setup equipment. The comparison results of measurement uncertainty, as shown in Table 2.

Table 2. Comparison of measurement uncertainty of UUC1, UUC2, and UUC3

Nominal value (mm)	UUC1 (mm)		UUC2 (mm)		UUC3 (mm)	
	2017	2019	2016	2019	2016	2018
0	1.1	0.17	0.68	0.33	2.0	0.60
2000	1.1	0.17	0.68	0.33	2.0	0.60
4000	1.1	0.17	0.68	0.33	2.0	0.60
10000	0.9	0.33	0.71	0.39	2.0	0.64
20000	1.3	0.64	0.84	0.73	2.0	0.80

5. Conclusions

The comparison results of measurement uncertainty for UUC1 (411D), UUC2 (DISTO D8), and UUC3 (DISTO A5) at the distance 20000 mm, reducing measurement uncertainty as 0.66 mm, 0.11 mm, and 1.2 mm, or up to 50.7%, 10.7%, and 60% respectively at the confidence level 95%, which is decreasing significantly within maximum permissible error ± 1.0 mm, due to reducing of repeatability. Recently, length calibration laboratory of DSS accredited ISO 17025 (2017), scopes of LDM measuring range with calibration and measurement capability (CMC), issued update on 2020, as Table 3.

Table 3. The calibration and measurement capability of LDM

ช่วงการวัด	ขีดความสามารถการสอบเทียบและการวัด (CMC)
0 up to 6 m	± 0.26 mm
> 6 up to 10 m	± 0.38 mm
> 10 up to 16m	± 0.54 mm
> 15 up to 20 m	± 0.65 mm

The next research would present how to investigate the main factor of error, and to evaluate or discuss more details the sources of uncertainty and contributes uncertainty budgets technique of LDM calibration at the confident level 95%.

6. Acknowledgement

The authors would like to thank staffs of length calibration laboratory, Department of Science Service (DSS) Bangkok, Thailand, for their helpful and supports on equipment in the laboratory, and technical knowledge discussion.

7. References

- [1] *Time of flight* [online]. [viewed 17 February 2021]. Available from: https://en.wikipedia.org/wiki/Time_of_flight
- [2] WISNIEWSKI, M. and Z. RAMOTOWSKI. EURAMET Supplementary Comparison, EURAMET.L-S20 (#1169). *Comparison of laser distance measuring Instruments*. Final Report. [online]. [viewed 20 February 2021]. Available from: https://www.bipm.org/utils/common/pdf/final_reports/L/S20/EURAMET.L-S20.pdf
- [3] CHINCHUSAK, W. and V. TIPSUWANPORN. Investigation of yaw errors in measuring tape calibration system. *Measurement*. 2018, **125**, 142-150.
- [4] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 16331-1:2012. Optics and optical instruments — Laboratory procedures for testing surveying and construction instruments — Part 1: Performance of handheld laser distance meters*. 2012.
- [5] AGILENT TECHNOLOGIES, INC. 2010, Laser Measurement System 5529A - User's Guide. Hewlett-Packard Company, 5301 Stevens Creek Boulevard, Santa Clara, California 95052-8059. May 10, 2010.
- [6] Program XAMPP version 3.2.2, work instruction for Laser Meter Certification Project – LMCP, First Edition, 2020-10-13.
- [7] UNITED KINGDOM ACCREDITATION SERVICE. M3003. *The expression of uncertainty and confidence in measurement*. EDITION 3, NOVEMBER 2012.

การพัฒนาอุปกรณ์ควบคุมแรงสำหรับสอบเทียบเครื่องทดสอบแรงกดกระดาษ Development of force control equipment for paper crush testers calibration

สุรวุฒิ พวงมาลี^{1*}

Surawut Puangmalee^{1*}

บทคัดย่อ

คุณสมบัติเชิงกลของบรรจุภัณฑ์กระดาษเป็นหนึ่งในคุณสมบัติที่บ่งชี้ศักยภาพในการใช้งาน ซึ่งในการทดสอบที่แม่นยำและเชื่อถือได้ เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบจำเป็นต้องมีการสอบเทียบเครื่องมือวัดเพื่อให้แน่ใจว่าเครื่องมือวัดสามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และการสอบเทียบหลาย ๆ ครั้งยังแสดงให้เห็นคุณลักษณะทางด้านความเสถียรของเครื่องมือวัดอีกด้วย ความต้านทานแรงกดวงแหวน เป็นความสามารถต้านทานแรงกดของกระดาษเหนียวและกระดาษทำลอนตามมาตรฐาน TAPPI 818 [1] ISO 12192 [2] และ มอก.321 [3] โดยอุปกรณ์สอบเทียบหลักประกอบด้วย โหลดเซลล์ และจอแสดงผลแบบดิจิทัล ในการสอบเทียบเครื่องทดสอบความต้านทานแรงกดวงแหวน ผู้ทดสอบต้องปรับควบคุมแรงที่กดด้วยตนเอง แรงดังกล่าวจำเป็นต้องปรับแรงให้ได้เท่ากับค่าที่มาตรฐานระบุไว้ ซึ่งใช้แรงและเวลาในการปรับควบคุมมากทำให้มีความคลาดเคลื่อนสูง ความเที่ยงตรงในการปรับควบคุมแรงต่ำ ทั้งหมดนี้ทำให้ผลการสอบเทียบคลาดเคลื่อน

งานวิจัยชิ้นนี้ เป็นการพัฒนาอุปกรณ์ควบคุมแรงที่คิดในงานสอบเทียบเครื่องทดสอบแรงกดวงแหวน โดยประยุกต์หลักการทดแรงของเฟือง ผลการวิจัยพบว่า เมื่อใช้อุปกรณ์ต้นแบบนี้ช่วยในการสอบเทียบทำให้สามารถควบคุมแรงกดได้เสถียรมากกว่า ใช้เวลาในการปรับควบคุมแรงลดลงมา 20-25% จากเดิม ค่าเฉลี่ยจากการสอบเทียบภายหลังใช้อุปกรณ์ต้นแบบเข้าใกล้ค่าแรงระบุมากขึ้น 2-8 นิวตัน และความไม่แน่นอนของการวัดมีค่าน้อยลงในช่วง 10.4-37.5% เมื่อเปรียบเทียบ repeatability และ reproducibility ดีขึ้น 19% และ 48% ตามลำดับ นอกจากนี้อุปกรณ์ดังกล่าวสามารถควบคุมแรงด้วยอัตราการหมุนและมีการเคลื่อนที่ด้วย Guide way linear ทำให้ได้ค่าแรงที่มีความเที่ยงตรงมากขึ้น

Abstract

Mechanical properties of paper packaging are one of the indicators for the capabilities of the final products. According to the consistency, accuracy, and effectiveness of the testing equipment, it needs to be calibrated with the standard calibration equipment to ensure that the testing equipment could be worked properly and efficiency. In addition, the repetitiveness of the calibration also indicates the stability of the testing equipment. The ring crush tester is used to determine the ring crush resistance of a paper strip formed into a ring with a standardized length and width. This test is performed corresponding to TAPPI 818, ISO 12192 and TISI 321 standard. The main calibration equipment are load cell and monitor, which the calibrated person needs to adjust the force of the load cell himself which the value of the adjusted force needs to be exactly equal to the given standard. As a consequence of this adjustment, too much time of adjustment is taken, and the force of the load cell is not accurate, imprecise and various, leading to the inaccurate calibration.

In this work, the add-on equipment for controlling the force adjustment of the load cell is developed using the gearing ratio and the motor. The results show the increase of stability of the force adjustment, in other words, the adjusted force is 2-8 newtons closer to the given standard, 20-25% of lower adjusted

¹ กรมวิทยาศาสตร์บริการ

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

time taken, and 10.4-37.5% lower of uncertainty. The repeatability and reproducibility also 19% and 48% improved, respectively. Furthermore, this add-on equipment is controlled by rotational rate and the linear guide way, which leads to the higher precision and accuracy.

คำสำคัญ : เครื่องวัดแรงกดวงแหวน สอบเทียบแรงกด โหลดเซลล์

Keywords : Ring crush tester machine,

Compression calibration, Load cell

1. บทนำ (Introduction)

การผลิตกระดาษและบรรจุภัณฑ์กระดาษ จำเป็นต้องควบคุมสินค้าหรือผลิตภัณฑ์ให้มีคุณสมบัติต่าง ๆ ตามมาตรฐาน โดยคุณสมบัติที่สำคัญ ประกอบด้วย

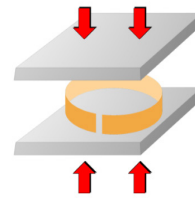
1. คุณสมบัติทางโครงสร้าง (Structural Properties) เป็นตัวบ่งชี้ถึงการจัดเรียงตัวขององค์ประกอบต่าง ๆ ภายในเนื้อกระดาษ โดยเฉพาะเส้นใย ซึ่งได้แก่ การกระจายตัวของเส้นใย ทิศทางการเรียงตัวของเส้นใย

2. คุณสมบัติด้านทัศนศาสตร์ (Optical properties) หมายถึง สมบัติทางแสงของกระดาษที่ปรากฏแก่สายตาโดยเกิดจากสัมพัทธ์กิริยาระหว่างแสงกับกระดาษ

3. คุณสมบัติทางเชิงกล (Mechanical Properties) เป็นตัวบ่งชี้ถึงศักยภาพในการใช้งานของกระดาษซึ่งหมายถึง การที่กระดาษมีความทนทานต่อการใช้งาน (durability) และความสามารถในการต้านทานแรงที่มากระทำในลักษณะต่าง ๆ เช่น แรงดึง แรงเฉือน แรงบิดและแรงที่ทำให้กระดาษโค้งงอ ซึ่งแรงเหล่านี้เกิดขึ้นในขั้นตอนต่าง ๆ ตั้งแต่การผลิต การแปรรูป จนถึงการใช้งานกระดาษจะตอบสนองแรงที่มากระทำเหล่านี้ได้มากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของกระดาษ โดยสามารถวัดออกมาได้ในรูปของสมบัติเชิงกลได้ ดังนั้นในการเลือกกระดาษเพื่อนำไปใช้งานจะต้องคำนึงถึงสมบัติทางเชิงกลของกระดาษด้วย ซึ่งกระดาษสำหรับนำไปผลิตบรรจุภัณฑ์หรือกล่องกระดาษ มีค่าแรงกดที่ควรนำมาพิจารณา ดังต่อไปนี้ [4]

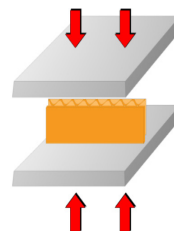
1) ความต้านทานแรงกดวงแหวน (Ring crush resistance) เป็นความสามารถของกระดาษความยาวคงที่นำมาโค้งงอเป็นวงแหวน เพื่อที่จะต้านแรงกด มีหน่วยเป็น กิโลนิวตันต่อเมตร (kN/m) ค่าความต้านแรงกดวงแหวนของกระดาษในแนวขวางเครื่องจะมีความสัมพันธ์กับความต้านแรง

กด หรือความแข็งแรงในการเรียงซ้อนของกล่องกระดาษ โดยลักษณะการทดสอบและทิศทางแรงที่กระทำต่อตัวอย่างทดสอบแสดงได้ในรูปที่ 1



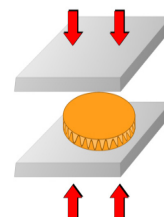
รูปที่ 1 : การทดสอบความต้านทานแรงกดวงแหวน

2) ความต้านทานแรงกดลอนในแนวตั้ง (Edge crush resistance) เป็นความสามารถของแผ่นกระดาษลูกฟูก รูปสี่เหลี่ยมมุมฉากที่จะต้านแรงกดเมื่อกระทำในทิศทางเดียว กับแนวตั้งของลอนลูกฟูกจนกระทั่งแผ่นลูกฟูกหักหรือยุบตัวลง มีหน่วยเป็น กิโลนิวตันต่อเมตร (kN/m) การทดสอบนี้บอกถึงความแข็งแรงของแผ่นกระดาษลูกฟูก ซึ่งสัมพันธ์โดยตรงกับความแข็งแรงในการเรียงซ้อนของกล่องกระดาษลูกฟูกหรือค่าการรับแรงกดกล่อง โดยลักษณะการทดสอบและทิศทางแรงที่กระทำต่อตัวอย่างทดสอบแสดงได้ในรูปที่ 2



รูปที่ 2 : การทดสอบความต้านทานแรงกดลอนในแนวตั้ง

3) ความต้านทานแรงกดลอนในแนวนอน (Flat crush resistance) เป็นความสามารถของลอนในแผ่นกระดาษที่ต้านทานแรงกดลงบนลอน ในแนวราบจนลอนเสียรูป มีหน่วยเป็น กิโลกรัมแรงต่อตารางเซนติเมตร (kgf/cm²) ความสัมพันธ์กับความสามารถในการรับน้ำหนักกดทับและการป้องกันการกระแทกโดยใช้เครื่องมือ โดยลักษณะของการทดสอบและทิศทางแรงที่กระทำต่อตัวอย่างทดสอบแสดงได้ในรูปที่ 3



รูปที่ 3 : ความต้านทานแรงกดลอนในแนวนอน (Flat Crush)

เนื่องจากเครื่องมือทดสอบจะส่งผลกระทบต่อความแม่นยำและเชื่อถือได้ของข้อมูลค่าผลทดสอบ จึงจำเป็นต้องดำเนินการให้แน่ใจว่าเครื่องมือทดสอบสามารถให้ผลการวัดที่แม่นยำตามความต้องการ การสอบเทียบเครื่องมือวัด (Calibration) [4] เป็นกิจกรรมที่จำเป็นสำหรับการทำให้แน่ใจว่าเครื่องมือวัดที่ใช้งานยังสามารถทำงานได้อย่างแม่นยำตามที่ต้องการ ซึ่งผลจากการสอบเทียบเมื่อนำมาวิเคราะห์ จะทำให้สามารถกำหนดได้ว่าเครื่องมือวัดควรจะใช้ต่อไปหรือจำเป็นต้องปรับแต่งผลจากการสอบเทียบ ทำให้มั่นใจได้ว่าเครื่องมือทดสอบยังคงทำงานได้อย่างแม่นยำและเชื่อถือได้ และผลการสอบเทียบหลาย ๆ ครั้งยังแสดงให้เห็นคุณลักษณะทางด้านความเสถียร (Stability) ของเครื่องมือวัดได้อีกด้วย

ซึ่งสำหรับเครื่องทดสอบแรงกดในกระดาศ ตามมาตรฐาน ISO 12192 ข้อที่ 4.3 เครื่องทดสอบแรงกดแบบใช้แผ่นเพลทผ่านมอเตอร์ขับเคลื่อน การสอบเทียบให้เป็นไปตามมาตรฐาน ISO 13820 [5] โดยส่วนที่สำคัญ คือ การวัดค่าความต้านแรงกดหรือค่าแรงกด เพื่อตรวจสอบว่าโหลดเซลล์ (Load Cell) ของเครื่องทดสอบมีความถูกต้องสามารถใช้งานได้ปกติ โดยเทียบกับค่าโหลดเซลล์มาตรฐานที่กำหนดว่า ค่าที่อ่านจากเครื่องทดสอบกับค่าที่อ่านค่าการสอบเทียบตรงกันหรือไม่ โดยอุปกรณ์สอบเทียบหลัก ประกอบด้วย

1) ตัวรับค่าแรงหรือโหลดเซลล์ (Load Cell) [6] เป็นอุปกรณ์ที่ใช้เปลี่ยนจากแรงที่กระทำต่อโหลดเซลล์เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า แสดงค่าที่จอแสดงผล (Display) โดยแสดงค่าเป็นแรง (N) มีหลากหลายรูปแบบขึ้นกับแรงที่ใช้ทดสอบและขนาดของเครื่องมือที่สอบเทียบ

2) จอแสดงผลแบบดิจิทัล (มาตรวัดแรงกด) รับค่าแรงแปลงสัญญาณ แสดงผลค่าตัวเลขการสอบเทียบด้วยมาตรวัดแรงกดและโหลดเซลล์ ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 : การสอบเทียบเครื่องวัดแรงกดวงแหวน

ข้อสังเกตที่เป็นประเด็นสำคัญ ในการสอบเทียบแรงกดในเครื่องทดสอบกระดาศ ดังต่อไปนี้

1. เครื่องทดสอบที่ทำการการสอบเทียบมีความเปลี่ยนแปลงรุ่นใหม่ ๆ เสมอ ทำให้เกิดความหลากหลายของเครื่องทดสอบ เช่น ขนาด มิติ ทิศทางการทดสอบ อัตราเร็วการทดสอบ
2. ช่วงค่าแรงที่เป็นมาตรฐานจากมาตรวัดแรงกดและโหลดเซลล์ที่มีค่าคงที่เฉพาะ ทำให้การสอบเทียบกับเครื่องทดสอบต้องออกแรงให้ได้เท่ากับค่าที่ระบุไว้ ทำให้เกิดการออกแรงกลับไปกลับมาเพื่อให้ถึงค่ารวมทั้งใช้เวลาในการปรับมากเกินไป
3. ความขนานและความเรียบระหว่างเครื่องทดสอบกับโหลดเซลล์เครื่องสอบเทียบ ในบางตำแหน่งจะสัมผัสก่อนแทนที่เป็นทั้งระนาบสัมผัสกันทำให้ค่าคลาดเคลื่อน

4. ความนิ่ง ความละเอียดของค่าที่สอบเทียบมีความอ่อนไหว (Sensibility) มากเกินไป เบื้องต้นมีการพยายามเก็บเป็นไฟล์ภาพหรือวิดีโอเพื่อจับภาพเปรียบเทียบ แต่พบว่ายังแก้ไขได้ไม่ดีเท่าที่ควรซึ่งทำให้การบันทึกค่าขึ้นอยู่กับการตัดสินใจของผู้สอบเทียบ

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะพัฒนาเทคโนโลยีนวัตกรรมเพื่อใช้สำหรับปรับควบคุมแรงที่กดในงานสอบเทียบเครื่องทดสอบแรงกดของกระดาศ เพื่อให้การสอบเทียบสามารถอ่านและวัดค่าแรงกดได้ถูกต้องแม่นยำยิ่งขึ้น โดยประยุกต์ใช้เทคโนโลยีด้านตัวควบคุมแรง การทดแรงของเฟือง ระบบเชื่อมต่อ ระบบควบคุมความเรียบขนาน เป็นประโยชน์สำหรับการนำไปใช้เพื่อควบคุมคุณภาพการสอบเทียบเครื่องทดสอบด้านแรงกดต่อสินค้าและผลิตภัณฑ์ในภาคอุตสาหกรรมกระดาศ ที่ต้องการผลการวัดที่มีความถูกต้องและแม่นยำสูง เพื่อการพัฒนาและปรับปรุงกระบวนการผลิตสินค้าให้เป็นไปตามมาตรฐานมากยิ่งขึ้น

2. วิธีการวิจัย (Experimental methods)

2.1 ประชากรและกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัย ผู้วิจัยได้กำหนดกลุ่มตัวอย่างในการวิจัย ดังนี้

2.1.1 เครื่องทดสอบความต้านแรงกดวงแหวน จำนวน 5 เครื่อง จากกลุ่มภาคอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์กล่องกระดาศ ลูกฟูก 3 ห้องปฏิบัติการ

2.1.2 ผู้เชี่ยวชาญที่จะประเมินคุณภาพของเครื่องมือที่ออกแบบ โดยผู้วิจัยเลือกผู้เชี่ยวชาญจากผู้ปฏิบัติการสอบเทียบด้านเครื่องทดสอบกระดาศแบบเจาะจง จำนวน 4 คน

2.2 เครื่องที่ใช้ในการวิจัย หรือเครื่องมือที่ใช้ในการสอบเทียบ

2.2.1 เครื่องทดสอบความต้านแรงกดวงแหวน/ลอนลูกฟูก (Crush tester machine) แบบโหลดเซลล์กดจากด้านบนลงล่าง ดังแสดงในรูปที่ 5 จากข้อมูลเครื่องมือมีความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ $\pm 1\%$ ความจำแนกชัด 1 นิวตัน ช่วงการใช้งาน 0 - 2,000 นิวตัน



รูปที่ 5 : ตัวอย่างเครื่องทดสอบความต้านแรงกดวงแหวน/ลอนลูกฟูกของกระดาศ

2.2.2 มาตราวัดแรงกดพร้อมโหลดเซลล์ โดยมีรายงานการสอบเทียบหมายเลขปฏิบัติการ L62/08089.1 จากกองความสามารถห้องปฏิบัติการและรับรองผลิตภัณฑ์ (สผ.) เบื้องต้น ช่วงการวัด 0-2,000 นิวตัน ดังนี้

ค่าแรงระบุ 489.15 นิวตัน	ค่าความผิดพลาด 1.45 นิวตัน	ค่าความไม่แน่นอน 0.73 นิวตัน
ค่าแรงระบุ 978.30 นิวตัน	ค่าความผิดพลาด 3.62 นิวตัน	ค่าความไม่แน่นอน 1.37 นิวตัน
ค่าแรงระบุ 1,467.45 นิวตัน	ค่าความผิดพลาด 5.72 นิวตัน	ค่าความไม่แน่นอน 1.90 นิวตัน
ค่าแรงระบุ 1,956.60 นิวตัน	ค่าความผิดพลาด 7.63 นิวตัน	ค่าความไม่แน่นอน 2.74 นิวตัน

2.2.3 ชุดอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ร่วมในการสอบเทียบ เช่น ประแจไขหกเหลี่ยม อุปกรณ์ควบคุมแรง เป็นต้น เนื่องจากมีขนาดเครื่องมือที่เหมาะสม สามารถบังคับแรงควบคุมการกดโดยผู้ใช้งานได้โดยสิ่งที่ต้องคำนึงสำหรับการสอบเทียบเครื่องทดสอบมีดังต่อไปนี้

- การปรับควบคุมแรงกดในงานสอบเทียบเครื่องทดสอบให้ช้าลงเพื่อความแม่นยำมากขึ้น แนวทางแก้ปัญหา คือ อุปกรณ์ช่วยควบคุมแรง
- ความเสถียรและความละเอียดของค่าจากเครื่องมือทดสอบกับเครื่องมือสอบเทียบมีความอ่อนไหว แนวทางแก้ปัญหา คือ อุปกรณ์ช่วยควบคุมแรง

มีข้อมูลเครื่องทดสอบความต้านแรงกดวงแหวน/ลอนลูกฟูก ดังต่อไปนี้

ลักษณะแรงที่กระทำ	กดจากบนลงล่าง
ช่วงการวัด (Measurement range)	(50-5,000) นิวตัน
ระยะกดหรือช่วงชัก (Stroke length)	76 มิลลิเมตร
ความเร็วการเปลี่ยนรูป (Deformation speed)	(1-50) มิลลิเมตร/นาที
ความเร็วเคลื่อนที่กลับ (Return speed)	60 มิลลิเมตร/นาที
ขนาดแผ่นเพลท	125 × 125 มิลลิเมตร

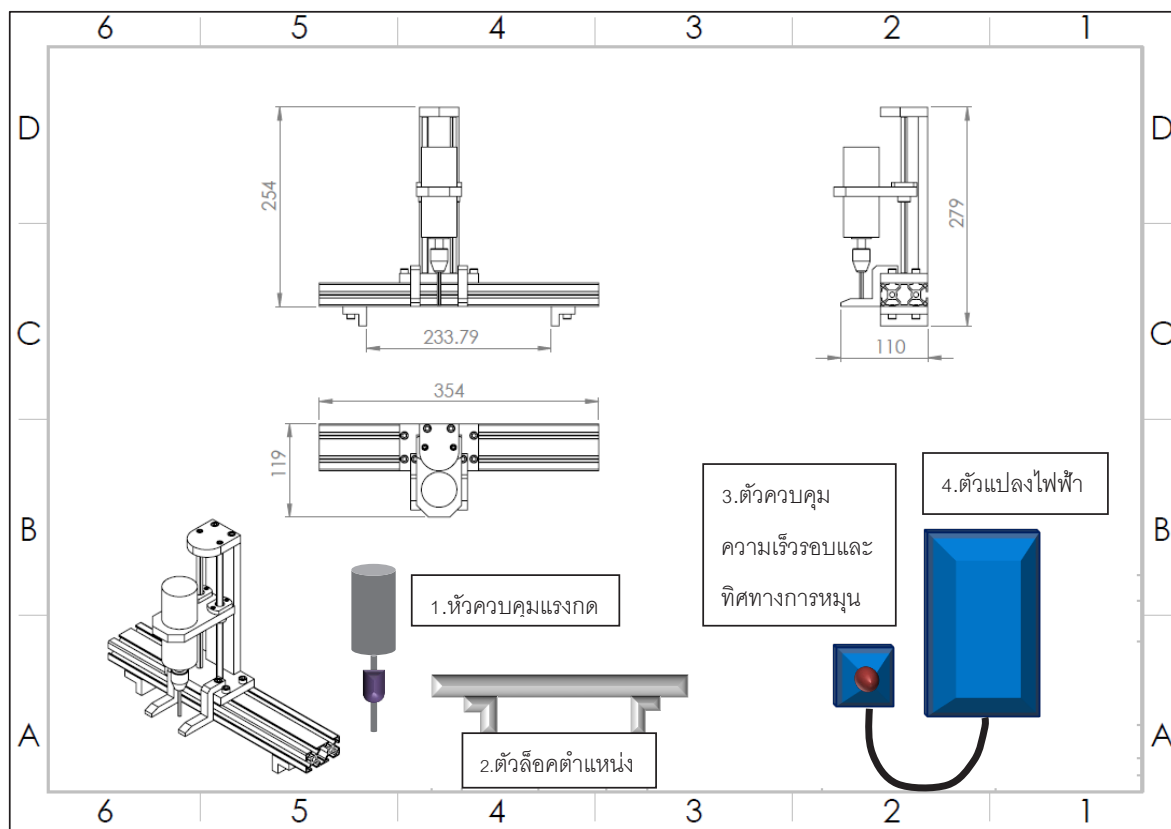
2.3 การออกแบบและสร้างอุปกรณ์ต้นแบบที่ช่วยควบคุมแรงที่กดต่อเครื่องทดสอบแรงกดของกระดาศ

2.3.1 การออกแบบอุปกรณ์ต้นแบบที่ช่วยควบคุมแรงที่กดต่อเครื่องทดสอบแรงกดของกระดาศ แนวทางในการสร้างอุปกรณ์ต้นแบบที่ช่วยควบคุมแรงที่กดต่อเครื่องทดสอบแรงกดของกระดาศ ประกอบด้วย ตัวควบคุมแรง ความเร็วรอบในการหมุน ทิศทางการหมุน แกนรางเลื่อนและระบบล้อคตำแหน่ง โดยทำงานร่วมกับบุคลากรจากกลุ่มนวัตกรรมหุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติ (นอ.) ทั้งนี้สามารถกำหนดขอบเขตเงื่อนไข คือ ไม่ใช้แรงคนในการควบคุมและสามารถปรับแรงได้ ช่วยลดแรงและเวลาในการทำงาน โดยมีตัวแปรสำคัญดังต่อไปนี้

- ค่าแรงสูงสุดที่ต้องปรับได้ (F_{max}) 5,000 นิวตัน (509.8 กิโลกรัมแรง)
- ต้องการความเร็วรอบที่หมุนน้อยเพื่อควบคุมค่าที่กำหนดได้และสามารถอ่านค่าแม่นยำขึ้น (RPM_{min} 1 รอบต่อนาที)
- ระยะหมุนที่ต้องการจากเดิมความยาวประแจเบอร์ 5 ที่ใช้ คือ 0.08 เมตร เป็นขนาดหัวประแจเบอร์ 5 คือ 0.003 เมตร

จากสูตร	Power (W)	= Torque (N.m) × Speed (RPM) / 9.55 [7]
จากการทำงานจริงได้	Power (W)	= 5000*0.08 × 1 /9.55 = 41.9 W
งานที่ต้องการ	41.9 W	= 5000*0.003 × RPM/9.55
	Speed	= 41.9*9.55/(5000*0.003) = 26.4 RPM

ดังนั้น อัตราทดรอบที่ควรได้น้อยคือ 26.4 : 1 แต่เพื่อความปลอดภัยของผู้ใช้และความเหมาะสมของเครื่องมือ จึงเห็นควรใช้อัตราทดรอบที่สูง คือ 500 : 1 (3000 RPM : 5 RPM) และได้แบบจัดทำอุปกรณ์และข้อมูลดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 : แบบและข้อมูลอุปกรณ์ที่ช่วยควบคุมแรงที่กดต่อเครื่องทดสอบกระดาศ

2.3.2 จัดหาและสร้างอุปกรณ์ช่วยควบคุมแรงที่กดต่อเครื่องทดสอบกระดาศ ภายหลังได้แบบจัดทำอุปกรณ์แล้ว ทำการคัดเลือกวัสดุส่วนประกอบต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1) หัวควบคุมแรงกด ส่วนประแจที่ใช้หมุนวัสดุเป็นเหล็กกล้าวานาเดียมโครเมียม (cr-v) เพราะความต้านทานการกัดกร่อนสูง ไม่เป็นสนิม ความต้านทานแรงดึงสูงเป็นพิเศษเมื่อเทียบกับโลหะอื่น ๆ

2) แกนรางเลื่อนและตัวลีดตำแหน่งใช้วัสดุเป็นอะลูมิเนียมเพราะมีความแข็งแรง สามารถใช้งานทดแทนเหล็กได้เป็นอย่างดี ไม่เป็นสนิม ทนความชื้นได้ มีน้ำหนักเบา ทนความร้อนได้ดี คงรูปไม่เกิดการบิดงอ

3) ตัวควบคุมแรง ความเร็วรอบในการหมุนและทิศทางการหมุน รวมทั้งกล่องแปลงไฟจากกระแสไฟฟ้าสลับเป็นกระแสตรง (220 V เป็น 12 V) ใช้วัสดุเป็นกล่องพลาสติก เพราะ น้ำหนักเบาไม่นำความร้อน ไม่นำไฟฟ้า มีความเหนียว

2.3.3 ทดลองใช้งานเบื้องต้น ภายหลังสร้างอุปกรณ์เสร็จสิ้นแล้ว ทดลองใช้งานด้านความเร็วรอบ ทิศทางการหมุน เวลาในการใช้งาน กำลังไฟที่ใช้ได้

2.3.4 ทดลองสอบเทียบเครื่องทดสอบความต้านแรงกดวงแหวน/ลอนลูกฟูก โดยเปรียบเทียบระหว่างการสอบเทียบปกติและการสอบเทียบโดยใช้อุปกรณ์ต้นแบบที่สร้างขึ้น จากค่าแรงที่ระบุเทียบกับค่าที่ได้จากกปฏิบัติให้สอดคล้องกับมาตรฐาน ISO 12192 ที่ระบุว่า ค่าแรงจากเครื่องทดสอบมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 1% โดยใช้ค่าสถิติ ค่าเฉลี่ย ($\bar{X}$) และความไม่แน่นอน และเวลาการสอบเทียบตั้งแต่ค่าแรงระบุแรกจนถึงค่าสุดท้าย

2.4 การประเมินคุณภาพของอุปกรณ์ที่สร้างขึ้น ผู้วิจัยได้กำหนดผู้เชี่ยวชาญจากผู้ปฏิบัติการสอบเทียบด้านเครื่องทดสอบกระดาษ จำนวน 4 คน มีขั้นตอนดังนี้

2.4.1 จัดทำแบบฟอร์มการประเมินคุณภาพของอุปกรณ์ จากการหาค่าดัชนีความสอดคล้องระหว่างข้อคำถามกับจุดประสงค์ (Item-Objective Congruence Index : IOC) [8] แบ่งออกเป็น 2 ด้าน 1) ด้านการออกแบบและสร้างเครื่อง 2) ด้านการใช้งานเครื่อง

2.4.2 สาคิตการทำงานและการสอบเทียบด้วยอุปกรณ์ช่วยควบคุมแรงที่สร้างขึ้น

2.4.3 นำผลที่ได้จากการประเมินคุณภาพเครื่องโดยผู้เชี่ยวชาญ มาหาค่าทางสถิติ ตามสูตรที่ 1 ดังนี้

$$\text{สูตร IOC} = \frac{\Sigma R}{N} \quad (1)$$

เมื่อ IOC คือ ค่าดัชนีสอดคล้องตามสมมติฐานของการวิจัย

ΣR คือ ค่าผลรวมของคะแนนจากผู้เชี่ยวชาญ

N คือ จำนวนผู้เชี่ยวชาญ

กำหนดคะแนนความคิดเห็นมีไว้ ดังนี้

+1 หมายถึง แนใจว่าจุดประเมินวัดได้ตรงตามที่ระบุไว้จริง

0 หมายถึง ไม่แนใจว่าจุดประเมินวัดได้ตรงตามที่ระบุไว้จริง

-1 หมายถึง แนใจว่าจุดประเมินไม่ได้วัด

ได้ตรงตามที่ระบุไว้จริง

เกณฑ์การแปลความหมาย ค่าดัชนีความสอดคล้องที่ยอมรับได้ต้องมีค่าตั้งแต่ 0.50 ขึ้นไป

2.5 วิธีสอบเทียบ (In-House Method based on ISO 13820: 2014 ฝ่ายสอบเทียบ กลุ่มเส้นใยธรรมชาติจัดทำขึ้น)

ในการสอบเทียบเครื่องทดสอบความต้านแรงกดวงแหวน ควรตรวจสอบปัจจัยเหล่านี้ก่อนทำการสอบเทียบเครื่องทดสอบ

2.5.1 การเตรียมความพร้อมของสภาพพื้นที่ตั้งของเครื่องทดสอบความต้านแรงกดวงแหวน

2.5.1.1 ตรวจสอบแท่นวางเครื่อง ต้องมั่นคง แข็งแรงผิวเรียบเสมอกัน

2.5.1.2 มีแสงสว่างมากพอในการสอบเทียบ

2.5.2 การเตรียมความพร้อมของเครื่องทดสอบความต้านแรงกดวงแหวน

2.5.2.1 ตรวจสอบสภาพทั่วไป เช่น ตรวจสอบความสะอาดและฝุ่นละออง เป็นต้น

2.5.2.2 ตรวจสอบระบบไฟฟ้า

2.5.2.3 ตรวจสอบสภาพชุดอ่านค่า

2.5.2.4 ตรวจสอบอุปกรณ์ควบคุม

2.5.2.5 ตรวจสอบการทำงานของมอเตอร์/สายพาน

2.5.2.6 ตรวจสอบระบบ safety

2.5.3 การเตรียมความพร้อมของมาตรวัดแรงกดพร้อมโหลดเซลล์และชุดอุปกรณ์ต่าง ๆ วางไว้ในห้องปฏิบัติการ ใกล้กับเครื่องทดสอบความต้านแรงกดวงแหวน เป็นเวลาอย่างน้อย 2 ชั่วโมง ก่อนดำเนินการสอบเทียบ ดูแลรักษาเรื่องความสะอาดและครบสกปรก เพื่อไม่ให้ส่งผลต่อการใช้งาน

2.5.4 สภาพการสอบเทียบอ้างอิงตามมาตรฐาน ISO 187:1990

อุณหภูมิ (27 ± 1) องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ (65 ± 2)

เมื่อพบว่า การดำเนินการมีความพร้อมเป็นไปตามปกติ ผ่านข้อ 2.5.1 - 2.5.4 ให้ดำเนินการสอบเทียบต่อไป แต่ถ้าสภาวะการสอบเทียบไม่เป็นไปตามมาตรฐานกำหนดก็ให้หยุดการสอบเทียบรอจนกว่าห้องทดสอบจะมีสภาวะเป็นไปตามมาตรฐานจึงดำเนินการสอบเทียบ

2.5.5 เปิดเครื่องทดสอบความต้านแรงกดวงแหวนเพื่อทำการอุ่นเครื่อง (warm up) เป็นเวลาอย่างน้อย 30 นาที

2.5.6 ทำ pre load ความต้านแรงกดวงแหวนโดยใช้ตามค่าความสามารถสูงสุดของแรงที่รับได้ (2,000 นิวตัน)

2.5.6.1 ติดตั้งมาตรวัดแรงกดพร้อมโหลดเซลล์เข้ากับเครื่องทดสอบ

2.5.6.2 ปรับการอ่านค่าของเครื่องทดสอบเป็นศูนย์

2.5.6.3 ใช้ประแจหกเหลี่ยมไขหรือใช้อุปกรณ์ควบคุมแรงหมุนช่องปรับแรงบนตัวเครื่องทดสอบจนมาตรวัดแรงกดมีค่า 2,000 นิวตัน ทั้งนี้เป็นเวลาประมาณ 5-10 วินาที

2.5.6.4 คลายการหมุนปรับแรงออกจากเครื่องทดสอบ จนการอ่านค่าของเครื่องเป็นศูนย์

2.5.6.5 ดำเนินการตามข้อ 2.5.6.3 ถึง 2.5.6.4 จนครบ 3 รอบ

2.5.7 สอบเทียบเครื่องทดสอบความต้านแรงกดวงแหวน

2.5.7.1 ปรับการอ่านค่าของเครื่องทดสอบให้เป็นศูนย์

2.5.7.2 ใช้ประแจหกเหลี่ยมไขหรือใช้อุปกรณ์ควบคุมแรงหมุนช่องปรับแรงบนตัวเครื่องทดสอบจนมาตรวัดแรงกดมีค่า 487.7 นิวตัน ตามรูปที่ 7 อ่านค่าและบันทึกค่าเครื่องทดสอบให้ลงในแบบบันทึกข้อมูลการสอบเทียบ

2.5.7.3 คลายการหมุนปรับแรงออกจากเครื่องทดสอบ จนการอ่านค่าของเครื่องเป็นศูนย์

2.5.7.4 ใช้ประแจหกเหลี่ยมไขหรือใช้อุปกรณ์ควบคุมแรงหมุนช่องปรับแรงบนตัวเครื่องทดสอบจนมาตรวัดแรงกดมีค่า 974.7 นิวตัน อ่านค่าและบันทึกค่าเครื่องทดสอบให้ลงในแบบบันทึกข้อมูลการสอบเทียบ

2.5.7.5 คลายการหมุนปรับแรงออกจากเครื่องทดสอบ จนการอ่านค่าของเครื่องเป็นศูนย์

2.5.7.6 ใช้ประแจหกเหลี่ยมไขหรือใช้อุปกรณ์ควบคุมแรงหมุนช่องปรับแรงบนตัวเครื่องทดสอบจนมาตรวัดแรงกดมีค่า 1,461.7 นิวตัน อ่านค่าและบันทึกค่าเครื่องทดสอบให้ลงในแบบบันทึกข้อมูลการสอบเทียบ

2.5.7.7 คลายการหมุนปรับแรงออกจากเครื่องทดสอบ จนการอ่านค่าของเครื่องเป็นศูนย์

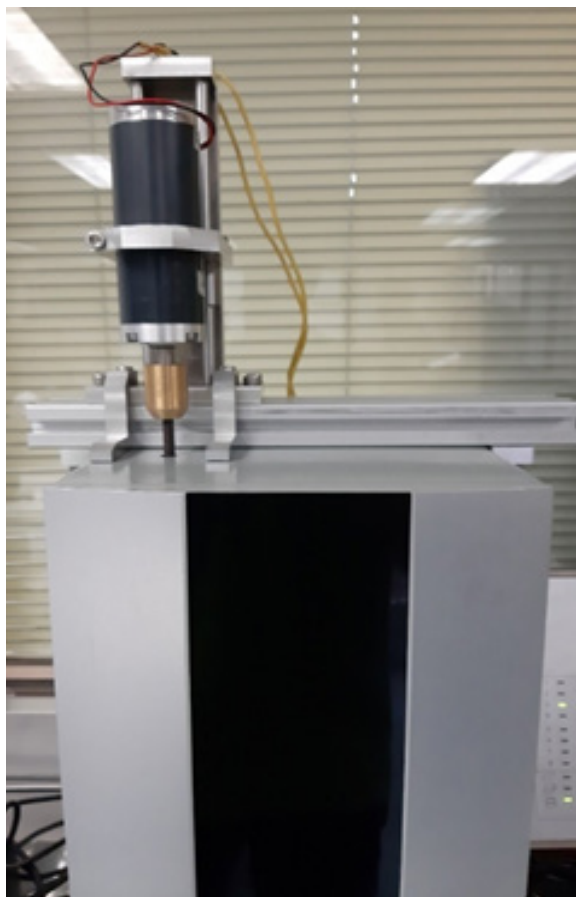
2.5.7.8 ใช้ประแจหกเหลี่ยมไขหรือใช้อุปกรณ์ควบคุมแรงหมุนช่องปรับแรงบนตัวเครื่องทดสอบจนมาตรวัดแรงกดมีค่า 1,949 นิวตัน อ่านค่าและบันทึกค่าเครื่องทดสอบให้ลงในแบบบันทึกข้อมูลการสอบเทียบ

2.5.7.9 คลายการหมุนปรับแรงออกจากเครื่องทดสอบ จนการอ่านค่าของเครื่องเป็นศูนย์

2.5.7.10 ดำเนินการตามข้อ 2.5.7.2 ถึง 2.5.7.9 จนครบ 8 รอบ

2.5.7.11 นำค่าที่บันทึกในแบบบันทึกค่าของแต่ละระดับคำนวณหาค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่าแก้ ค่าความไม่แน่นอนขยายในการวัดตาม M3003 The Expression of Uncertainty and Confidence in Mea-

surement: Edition 4 October 2019 [9] และสามารถในการทำซ้ำได้ (Precision) โดยพิจารณาผ่านความผันแปรภายในกลุ่ม (Repeatability) และ ความผันแปรระหว่างกลุ่ม (Reproducibility) ตาม Range & Average Method [10]



รูปที่ 7 : การใช้อุปกรณ์ควบคุมแรงหมุนช่องปรับแรงบนตัวเครื่องทดสอบ

3. ผลและวิจารณ์ (Results and discussion)

3.1 ผลการสร้างอุปกรณ์ต้นแบบที่ช่วยควบคุมแรงที่กดต่อเครื่องทดสอบแรงกดของกระดาศ แบ่งเป็นส่วนต่าง ๆ 4 ส่วน ดังนี้

- 1) หัวควบคุมแรงกด
- 2) ตัวล็อคตำแหน่ง
- 3) ตัวปรับความเร็วรอบและทิศทาง
- 4) ตัวแปลงไฟ ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 : อุปกรณ์ต้นแบบที่ช่วยควบคุมแรงที่กดต่อเครื่องทดสอบกระดาษ

โดยทั้ง 4 ส่วนทำงานรวมกันทำให้ประสิทธิภาพของอุปกรณ์เป็นดังนี้

- | | | |
|--------------------------|-------------------------------|---------------------------------|
| 1) ใช้งานด้านความเร็วรอบ | 0 - 5 รอบ/นาที | (เป็นไปตามที่ออกแบบไว้) |
| 2) ทิศทางการหมุน | ตามเข็มนาฬิกา , ทวนเข็มนาฬิกา | (เป็นไปตามที่ออกแบบไว้) |
| 3) เวลาในการใช้งาน | มากกว่า 240 นาที | (มากกว่าเวลาที่ใช้สอบเทียบจริง) |
| 4) กำลังไฟที่ใช้ได้ | 220 V แปลงเป็น 12 V | (เป็นไปตามที่ออกแบบไว้) |

ข้อดีของอุปกรณ์ช่วยควบคุมแรงที่กด

1. สามารถควบคุมแรงที่กดด้วยการควบคุมอัตราการหมุนและทิศทางการหมุน (ทวนเข็มและตามเข็มนาฬิกา) ได้
2. เคลื่อนที่ด้วย Guide way linear ทำให้ได้แรงที่ดีที่สุด มีความเที่ยงตรง รวมศูนย์กลางเครื่องมือทดสอบ
3. มีตัวลีดค้ำตำแหน่งอุปกรณ์ช่วยควบคุมแรงที่กดกับเครื่องทดสอบโดยเลื่อนตำแหน่งรองรับขนาดที่แตกต่างกัน

โดยแสดงการติดตั้งเบื้องต้นในการสอบเทียบอุปกรณ์ต้นแบบที่ช่วยควบคุมแรงที่กดเข้ากับเครื่องทดสอบกระดาษ

และมาตรวัดแรงกดพร้อมโหลดเซลล์ ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 : การติดตั้งอุปกรณ์ต้นแบบที่ช่วยควบคุมแรงที่กดเข้ากับเครื่องทดสอบกระดาษ

3.2 ผลการทดลองใช้อุปกรณ์สอบเทียบโดยผู้วิจัยและทดสอบประสิทธิภาพ

3.2.1 ค่าแรงจากการสอบเทียบเครื่องทดสอบความต้านแรงกดวงแหวนแบบกดจากบนลงล่าง ทั้งหมด 5 เครื่องโดยทำการสอบเทียบในช่วงการใช้งาน 0 นิวตัน-2,000 นิวตัน จำนวนค่าแรงระบุ (X_i) 4 จุด ได้แก่ 487.7, 974.7, 1,461.7 และ 1,949.0 นิวตัน เปรียบเทียบระหว่างการสอบเทียบปกติและการสอบเทียบโดยใช้อุปกรณ์ต้นแบบที่สร้างขึ้นแสดงผล การวัดสอบเทียบได้เป็นค่าเฉลี่ยจากการวัด 8 ครั้ง รวมกับค่าความไม่แน่นอนขยายของการวัด (Expanded Uncertainty) ($\bar{X} \pm U$) ให้สอดคล้องกับค่าที่ระบุในมาตรฐาน ISO 13820 Accuracy within $\pm 1\%$ ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการสอบเทียบค่าแรงระหว่างการสอบเทียบปกติกับการสอบเทียบโดยใช้อุปกรณ์ต้นแบบ

ค่าแรงระบุ ($X_i \pm U$) (นิวตัน)	สถานะการทำงาน สอบเทียบ	ค่าแรงเครื่อง A ($\bar{X} \pm U$) (นิวตัน)	ค่าแรงเครื่อง B ($\bar{X} \pm U$) (นิวตัน)	ค่าแรงเครื่อง C ($\bar{X} \pm U$) (นิวตัน)	ค่าแรงเครื่อง D ($\bar{X} \pm U$) (นิวตัน)	ค่าแรงเครื่อง E ($\bar{X} \pm U$) (นิวตัน)
487.7 $\pm$ 0.73	ปกติ(ประจําหมุน)	488 $\pm$ 1.7	490 $\pm$ 2.2	487 $\pm$ 1.5	488 $\pm$ 1.6	488 $\pm$ 1.5
	ใช้อุปกรณ์ต้นแบบ	488 $\pm$ 1.2	488 $\pm$ 1.6	488 $\pm$ 1.1	488 $\pm$ 1.0	488 $\pm$ 1.0
974.7 $\pm$ 1.37	ปกติ(ประจําหมุน)	975 $\pm$ 2.8	981 $\pm$ 3.0	974 $\pm$ 2.1	978 $\pm$ 2.3	978 $\pm$ 2.5
	ใช้อุปกรณ์ต้นแบบ	975 $\pm$ 2.0	978 $\pm$ 2.2	975 $\pm$ 1.5	976 $\pm$ 1.7	976 $\pm$ 2.0
1,461.7 $\pm$ 1.90	ปกติ(ประจําหมุน)	1,465 $\pm$ 3.5	1,471 $\pm$ 3.7	1,461 $\pm$ 3.1	1,468 $\pm$ 3.2	1,467 $\pm$ 3.1
	ใช้อุปกรณ์ต้นแบบ	1,463 $\pm$ 2.9	1,468 $\pm$ 3.1	1,462 $\pm$ 2.6	1,464 $\pm$ 2.6	1,464 $\pm$ 2.6
1,949.0 $\pm$ 2.74	ปกติ(ประจําหมุน)	1,954 $\pm$ 4.7	1,965 $\pm$ 4.8	1,948 $\pm$ 4.4	1,958 $\pm$ 4.4	1,955 $\pm$ 4.4
	ใช้อุปกรณ์ต้นแบบ	1,950 $\pm$ 4.1	1,959 $\pm$ 4.3	1,948 $\pm$ 3.8	1,952 $\pm$ 3.7	1,950 $\pm$ 3.9

จากตารางที่ 1 จะเห็นว่า เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการสอบเทียบปกติและการสอบเทียบโดยใช้อุปกรณ์ต้นแบบที่สร้างขึ้นแล้ว ทุกจุดค่าแรงระบุและทุกเครื่อง ค่าเฉลี่ยจากการสอบเทียบภายหลังใช้อุปกรณ์ต้นแบบเข้าใกล้ค่าแรงระบุมากยิ่งขึ้นแสดงถึงความแม่นยำที่เพิ่มขึ้น ตามข้อมูลดังนี้ ค่าแรงระบุ 487.7 นิวตัน ค่าเฉลี่ยเข้าใกล้ค่าแรงระบุมากถึง 2 นิวตัน คิดเป็น 0.41% ค่าแรงระบุ 974.7 นิวตัน ค่าเฉลี่ยเข้าใกล้ค่าแรงระบุมากถึง 3 นิวตัน คิดเป็น 0.31% ค่าแรงระบุ 1,461.7 นิวตัน ค่าเฉลี่ยเข้าใกล้ค่าแรงระบุมากถึง 4 นิวตัน คิดเป็น 0.27% ค่าแรงระบุ 1,949.0 นิวตัน ค่าเฉลี่ยเข้าใกล้ค่าแรงระบุมากถึง 6 นิวตัน คิดเป็น 0.31% รวมทั้งค่าความไม่แน่นอนของการวัดจากการสอบเทียบภายหลังใช้อุปกรณ์ต้นแบบมีค่าลดลงทุกค่าแรงระบุ และทุกเครื่องทดสอบ ลดลงในช่วง 10.4%-37.5% เนื่องจากอุปกรณ์ต้นแบบที่สร้างขึ้นสามารถควบคุมแรง ความเร็วรอบการหมุนและความเสถียรของการสอบเทียบได้ดีกว่าการทำงานโดยผู้ใช้งานเองได้

3.2.2 ค่าความสามารถในการทำซ้ำได้หรือความเที่ยงตรง (Precision) ดังต่อไปนี้

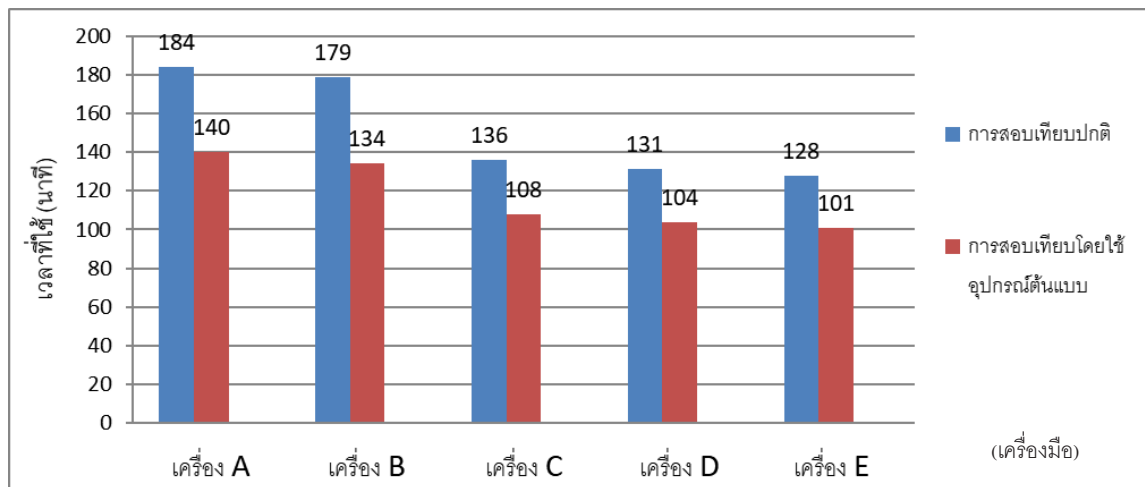
สถานะการทำงานสอบเทียบปกติ(ประจําหมุน) ค่าความผันแปรภายในกลุ่มรวม (Repeatability) 13.68 นิวตัน ความผันแปรระหว่างกลุ่ม (Reproducibility) 9.25 นิวตัน

สถานะการทำงานสอบเทียบใช้อุปกรณ์ต้นแบบ ค่าความผันแปรภายในกลุ่มรวม (Repeatability) 11.06 นิวตัน ความผันแปรระหว่างกลุ่ม (Reproducibility) 4.75 นิวตัน

เมื่อเปรียบเทียบ Repeatability และ Reproducibility ของการวัดจากการสอบเทียบภายหลังใช้อุปกรณ์ต้นแบบดีขึ้น 19% และ 48% ตามลำดับ

3.3 ผลเปรียบเทียบระยะเวลาที่ใช้ในการสอบเทียบเครื่องทดสอบความต้านแรงกดวงแหวน

เมื่อใช้อุปกรณ์ต้นแบบกับการสอบเทียบปกติ ทั้งหมด 5 เครื่อง โดยใช้นาฬิกาจับเวลาโดยรวมในหน่วยนาที จากเริ่มต้นสอบเทียบช่วงค่าระบุแรกจนถึงค่าสุดท้าย ดังรูปที่ 10



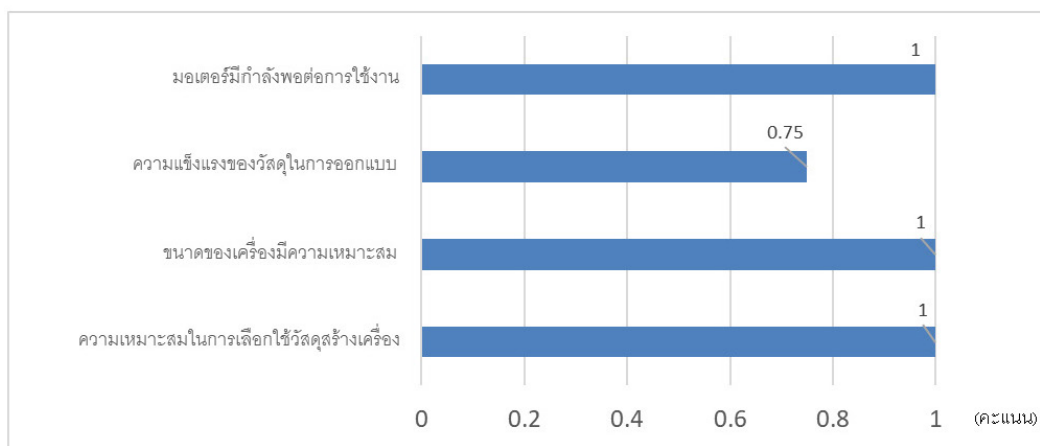
รูปที่ 10 : ผลของเวลาที่ใช้ในการการสอบเทียบระหว่างการสอบเทียบปกติกับการสอบเทียบโดยใช้อุปกรณ์ต้นแบบ

จากรูปที่ 10 พบว่า การสอบเทียบแบบปกติใช้เวลาสอบเทียบอยู่ที่ช่วง 128 นาที -184 นาที และการสอบเทียบโดยใช้อุปกรณ์ต้นแบบใช้เวลาสอบเทียบอยู่ที่ช่วง 101 นาที -140 นาที เวลาลดลงอยู่ในช่วง 27 นาที- 45 นาที คิดเป็นการลดลงจากเดิมโดยเฉลี่ย 20%-25% เนื่องจากการสอบเทียบแบบปกติ ผู้ใช้งานจำเป็นต้องควบคุมความเสถียรค่าแรงระบุ และต้องปรับระดับค่าด้วยตนเองซึ่งใช้เวลานาน ประกอบกับมีความเหนื่อยล้าสะสมจากการปรับหลายระดับซึ่งใช้เวลานานกว่าใช้อุปกรณ์ต้นแบบ

3.4 ผลการประเมินคุณภาพของอุปกรณ์ต้นแบบที่ช่วยควบคุมแรง

การประเมินสมรรถนะของเครื่องตามหัวข้อ 2 ด้าน ได้แก่ ด้านการออกแบบและสร้างเครื่อง และด้านการใช้งาน โดยมีการวิเคราะห์ดังนี้

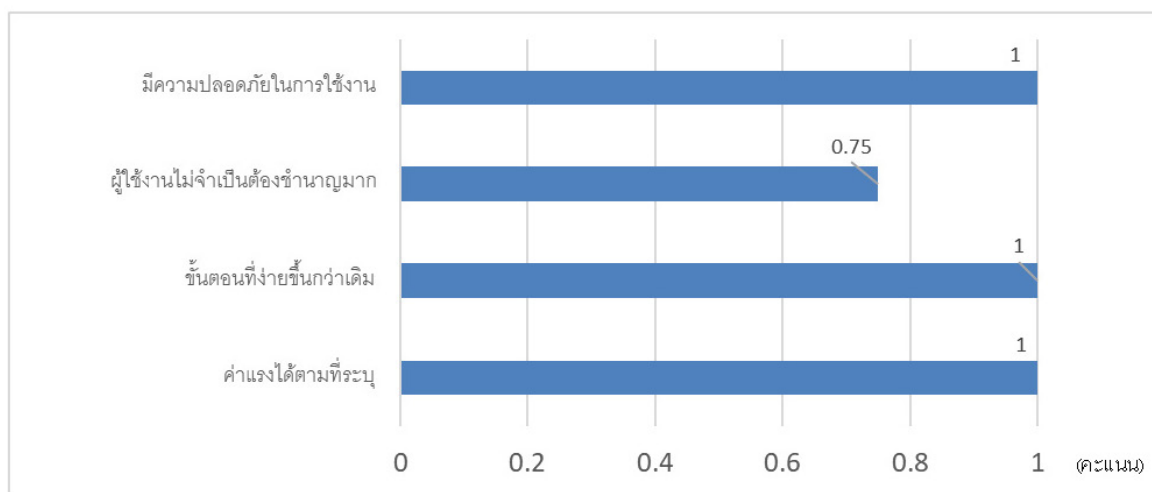
3.4.1 ผลความคิดเห็นผู้เชี่ยวชาญในด้านการออกแบบและสร้างเครื่อง โดยแบ่งประเด็นเป็นข้อ จำนวน 4 ข้อ ดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 : ผลความคิดเห็นผู้เชี่ยวชาญในด้านการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ต้นแบบ

จากรูปที่ 11 แสดงให้เห็นว่า ผู้เชี่ยวชาญมีความคิดเห็นในด้านการออกแบบและการสร้าง ดังนี้ อุปกรณ์ต้นแบบมอเตอร์มีกำลังเพียงพอต่อการใช้งาน ได้ความเร็วรอบตามที่ต้องการได้ ผู้ปฏิบัติงานใช้แรงในการสอบเทียบน้อยลง เพราะไม่จำเป็นต้องควบคุมความเสถียรค่าแรงระบุ และต้องปรับระดับค่าด้วยตนเอง วัสดุที่ใช้ทำมีความแข็งแรงเหมาะสมกับงาน ขนาดเครื่องมือเหมาะสมมีส่วนล็อกและเลื่อนตำแหน่งตามเครื่องมือที่สอบเทียบได้ เพิ่มเดิมการติดตามใช้งานในระยะยาวต่อไป โดยมีค่าดัชนีความคิดเห็นสอดคล้องรวมของด้านนี้ (IOC) จากการคำนวณตามสูตรที่ (1) เท่ากับ 0.94 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

3.4.2 ผลความคิดเห็นผู้เชี่ยวชาญในด้านการใช้เครื่อง โดยแบ่งประเด็นเป็นข้อ จำนวน 4 ข้อ ดังรูปที่ 12



รูปที่ 12 : ผลความคิดเห็นผู้เชี่ยวชาญในด้านการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ต้นแบบ

จากรูปที่ 12 แสดงให้เห็นว่า ผู้เชี่ยวชาญมีความคิดเห็นในด้านการใช้งานเครื่อง ดังนี้ เมื่อสาธิตการทำงานแล้ว อุปกรณ์ต้นแบบ ปรับค่าแรงได้ตามที่ระบุทุกช่วงค่า มีความปลอดภัยในการใช้งาน จากการมีปุ่มปิด และการสลับทิศทาง การหมุน ขั้นตอนใช้งานไม่ซับซ้อน ไม่จำเป็นต้องมีประสบการณ์ใช้งานแต่ควรมีความรู้พื้นฐานด้านเครื่องมือทดสอบของกระดาศเบื้องต้น โดยมีค่าดัชนีความคิดเห็นสอดคล้องรวมของด้านนี้ (IOC) จากการคำนวณตามสูตรที่ (1) เท่ากับ 0.94 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

4. สรุป (Conclusions)

อุปกรณ์ต้นแบบช่วยควบคุมแรงกดที่สร้างขึ้นมีองค์ประกอบ คือ หัวควบคุมแรงกด ตัวปรับความเร็วรอบและทิศทางการหมุน ใช้ในการสอบเทียบเครื่องมือทดสอบความต้านแรงกดของกระดาศ โดยผลการสอบเทียบเครื่องทดสอบพบว่า ค่าเฉลี่ยจากการสอบเทียบภายหลังใช้อุปกรณ์ต้นแบบเข้าใกล้ค่าแรงระบุมากขึ้น 2-8 นิวตัน และความไม่แน่นอน

ของการวัดมีค่าน้อยลงในช่วง 10.4%-37.5% เมื่อเปรียบเทียบ repeatability และ reproducibility ที่ขึ้น 19% และ 48% ตามลำดับ ทำให้ข้อมูลที่ได้มีความถูกต้องแม่นยำยิ่งขึ้น เวลาที่ใช้งานลดลงจากเดิมโดยเฉลี่ย 20-25% ด้วย เพราะอุปกรณ์ต้นแบบที่สร้างขึ้นสามารถควบคุมแรง ความเร็วรอบการหมุน และความเสถียรได้ และผู้ปฏิบัติงานใช้แรงในการสอบเทียบน้อยลง เพราะไม่จำเป็นต้องควบคุมความเสถียรค่าแรงระบุ และต้องปรับระดับค่าด้วยตนเอง

5. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

ผู้วิจัยขอขอบคุณผู้บังคับบัญชาและเจ้าหน้าที่กลุ่มเส้นใยธรรมชาติ (สธ.) ทุกท่านที่ช่วยสนับสนุนการทำโครงการวิจัยนี้ และกลุ่มนวัตกรรมหุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติ (นอ.) ที่ให้คำแนะนำปรึกษา ขอขอบคุณกลุ่มภาคอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์กล่องกระดาศลูกฟูก 5 ห้องปฏิบัติการที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ และเครื่องมือ ดำเนินการทดลองเพื่อหาข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการพัฒนางานวิจัยนี้

6. เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] THE TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. *TAPPI 818 cm-07. Ring crush of paperboard*. 2007.
- [2] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 12192:2011. Paper and board--Determination of compressive strength--Ring crush method*. 2011.
- [3] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. *มอก.321-2560. กระดาษทำลูกฟูก*. 2560.
- [4] จรวย ชงไชย. *การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อความต้านแรงกดของกระดาษทำลูกฟูก*. กรุงเทพฯ: กรมวิทยาศาสตร์บริการ. 2542. 64 หน้า.
- [5] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 13820:2014. Paper, board and corrugated fibreboard —Description and calibration of compression-testing equipment*. 2014.
- [6] โหลดเซลล์ (Load Cell) คืออะไร ราคาเท่าไร [ออนไลน์]. 2562 [อ้างถึงวันที่ 2 พฤษภาคม 2562] เข้าถึงจาก: <http://www.svs-en.com/load-cell/>
- [7] กฤษ เฉยไสย. *พื้นฐานการควบคุมมอเตอร์ (เอกสารการสอน)*. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2547.
- [8] ปราณี หลาเบญยะ. *การหาคุณภาพของเครื่องมือวัดและประเมินผล (เอกสารการสอน)*. คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา, 2559.
- [9] UNITED KINGDOM ACCREDITATION SERVICE. *M3003. The expression of uncertainty and confidence in measurement*. Edition 4. Middlesex: UKAS, October 2019.
- [10] ENGINEERED SOFTWARE, INC. *Repeatability and reproducibility*. [online]. [viewed 12 January 2021]. Available from: http://www.engineered-software.com/papers/msa_rr.pdf

คำแนะนำในการส่งต้นฉบับ วารสารผลงานวิชาการ กรมวิทยาศาสตร์บริการ Bulletin of Applied Sciences

บทความที่ส่งตีพิมพ์จะต้องไม่เคยตีพิมพ์หรืออยู่ในระหว่างการรอพิจารณาเพื่อตีพิมพ์ในวารสารอื่น บทความที่เสนอมาเพื่อตีพิมพ์ อาจเขียนเป็นภาษาไทยหรือภาษาอังกฤษก็ได้ แต่บทความต้องมีทั้งสองภาษา ทั้งนี้บทความทุกเรื่องจะได้รับการพิจารณาตรวจแก้ไขจากผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาที่เกี่ยวข้อง และกองบรรณาธิการขอสงวนสิทธิ์ในการตรวจแก้ไขต้นฉบับและพิจารณาตีพิมพ์ตามลำดับก่อนหลัง

ความรับผิดชอบ

บทความที่ตีพิมพ์ในวารสารผลงานวิชาการ กรมวิทยาศาสตร์บริการ ถือเป็นผลงานทางวิชาการ และเป็นความเห็นส่วนตัวของผู้เขียน ไม่ใช่ความเห็นของกรมวิทยาศาสตร์บริการ หรือกองบรรณาธิการ ผู้เขียนต้องรับผิดชอบต่อบทความของตน และบทความที่ตีพิมพ์ในเล่ม นี้ไม่เคยพิมพ์ในวารสารใดมาก่อน และจะไม่นำส่งไปเพื่อพิจารณาตีพิมพ์ในวารสารอื่นภายใน 60 วัน

ชื่อเรื่อง: ชื่อเรื่องต้องมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ตัวอักษร Cordia New ขนาด 18 ตัวหนา จัดวางข้อความชื่อเรื่องตรงกึ่งกลางหน้ากระดาษ โดยชื่อเรื่องภาษาอังกฤษเฉพาะคำขึ้นต้น ให้พิมพ์ตัวใหญ่

ชื่อผู้วิจัย ผู้วิจัยร่วม: ชื่อผู้วิจัย ผู้วิจัยร่วม ต้องมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ตัวอักษร Cordia New ขนาด 12 ตัวปกติ จัดวาง ข้อความชื่อผู้วิจัย ผู้วิจัยร่วมกึ่งกลางหน้ากระดาษ ใช้เลข 1.2.3 . โดยยกกำลังแสดงตรงชื่อ และเป็นเลขเดียวกันเพื่อแสดงที่อยู่ และ e-mail address

ตัวอย่าง

จิตตกานต์ อินเที่ยง¹, วิจิต ศรีโชติ^{2*}

Jittakant Intiang^{1*}, Wichit Sirichote^{2**}

¹ กรมวิทยาศาสตร์บริการ

² สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

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

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

บทคัดย่อ (Abstract): บทคัดย่อต้องมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ตัวอักษร Cordia New ขนาด 14 ตัวปกติ เนื้อหาในบทคัดย่อ ควรระบุวัตถุประสงค์ ผลการวิจัย และบทสรุปโดยย่อ

คำสำคัญ (Keywords): คำสำคัญต้องมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ระบุคำสำคัญหรือวลีสั้น ๆ จำนวน 3-5 คำ คำที่ 1 , คำที่ 2 , คำที่ 3 ตัวอักษร Cordia New ขนาด 12 ตัวปกติ

เนื้อเรื่อง แบ่งเป็นส่วนต่าง ๆ ดังนี้

1. บทนำ (Introduction): หัวข้อบทนำ ตัวอักษร Cordia New ขนาด 16 ตัวหนา จัดชิดขอบด้านซ้าย หัวข้อย่อย ตัวอักษร Cordia New ขนาด 14 ตัวหนา เนื้อหา ตัวอักษร Cordia New ขนาด 14 ตัวปกติ

2. วิธีการวิจัย (Experimental methods): หัวข้อวิธีการวิจัย ตัวอักษร Cordia New ขนาด 16 ตัวหนา จัดชิดขอบด้านซ้าย หัวข้อย่อย ตัวอักษร Cordia New ขนาด 14 ตัวหนา เนื้อหา ตัวอักษร Cordia New ขนาด 14 ตัวปกติ

3. ผลและวิจารณ์ (Results and Discussion): หัวข้อผลและวิจารณ์ ตัวอักษร Cordia New ขนาด 16 ตัวหนา จัดชิดขอบด้านซ้าย หัวข้อย่อย ตัวอักษร Cordia New ขนาด 14 ตัวหนา เนื้อหา ตัวอักษร Cordia New ขนาด 14 ตัวปกติ

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

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

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

ตัวอย่าง (อ้างอิงตาม ISO 690)

[1] AKGUL, M. and A. TOZLUOGLU. Alkaline-ethanol pulping of cotton stalks. *Scientific Research and Essays*. 2010, 5(10), 1068-1074.

[2] STADELMAN, W. J. and O. J. COTTERILL. *Egg Science and Technology*. 4th ed. New York : Food Produce Press, 1990, 591 p.

[3] TECHNICAL DIVISION ON REFERENCE MATERIALS OF AOAC INTERNATIONAL. *Standard format and guidance for AOAC standard method performance requirement documents* [online]. 2011. [viewed 26 January 2017]. Available from: http://stakeholder.aoac.org/SPIFAN/SMPR_Guidelines_v13.pdf

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

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

ดรรชนีคำสำคัญ
วารสารผลงานวิชาการ กรมวิทยาศาสตร์บริการ
ปีที่ 10 ฉบับที่ 10 สิงหาคม 2564

ก		ไบโอแอคทีฟกลาส	80
กระดาสัมผัสอาหาร	46	ผ	
กัญชง	71	ผ้าสมานแผล	80
การตรวจสภาพทางรถไฟ	90	ภ	
ค		ภาษาเซรามิกหุงต้ม	63
ความปลอดภัย	17	ม	
ค่าความไม่แน่นอนการวัด	104	เมทริกซ์โพลีดีสเพอร์ชัน	31
ค่าความร้อนแบบกรอส	52	ย	
เครื่องต้มข้าว	1	ยั่งยืน	17
เครื่องต้มน้ำอุณหภูมิสูง	1	ร	
เครื่องต้มเพื่อสุขภาพ	1	รถขับเคลื่อนด้วยล้อที่ใช้พลังงานไฟฟ้า	90
เครื่องพิมพ์สามมิติ	71	ระบบการจัดการ	17
เครื่องวัดระยะชนิดเลเซอร์	104	ส	
เครื่องวัดแรงกดวงแหวน	114	สอบเทียบ	104
เคลือบการขยายตัวทางความร้อนต่ำ	63	สอบเทียบแรงกด	114
เคลือบเซรามิก	63	สารเคมี	17
แคดเมียม	46	สีเขียว	17
ข		ท	
ชีวมวล	52	ห้องปฏิบัติการ	17
ด		หัวโพรบอัจฉริยะ	104
ตะกั่ว	46	โพลีเซลล์	104
ท		อ	
ทางรถไฟ	90	อนุภาคนาโน	80
น		อะฟลาทอกซินเอ็ม ₁	9
นมและผลิตภัณฑ์นม	9	อัลตราไฮเพอร์ฟอร์แมนซ์ลิควิด โครมาโทกราฟี- แทนเดมแมสสเปกโตรเมตรี	31
เนื้อดินเซรามิก	63	อาหารกระป๋อง	31
โนโวแลคไกลซิดิลอีเธอร์	31	ฮ	
บ		ไฮเพอร์ฟอร์แมนซ์ลิควิดโครมาโทกราฟี	9
บิสฟีนอลเอไดโกลซิดิลอีเธอร์	31		
บิสฟีนอลเอฟไดโกลซิดิลอีเธอร์	31		
ไบโอคอมโพสิต	71		

Keyword Index

Bulletin of Applied Sciences

Vol. 10 No. 10 August 2021

A			
Aflatoxin M ₁	9	Load cell	114
Antioxidant drink	1	Low thermal expansion glaze	63
ASTM D5865	52	M	
B		Management system	17
Bioactive glasses	80	Matrix solid dispersion	31
Biocomposite	71	Measurement uncertainty	104
Biomass	52	Milk and milk product	9
Bisphenol A diglycidyl ether	31	N	
Bisphenol F diglycidyl ether	31	Nanoparticles	80
C		Novolac glycidyl ether	31
Cadmium	46	P	
Calibration	104	3D-printer	71
Canned fish	31	Paper for food contact	46
Ceramic body	63	Q	
Ceramic cookware	63	QuEChERS	31
Ceramic glaze	63	R	
Chemical	17	Railway-track inspection	90
Compression calibration	114	Railway-track vehicle	90
G		Rice drink	1
Green	17	Ring crush tester machine	114
Gross calorific value	52	S	
H		Safety	17
Healthy drink	1	Smart measuring probe	104
Hemp	71	Sustainability	17
High-performance liquid chromatography	9	T	
I		Track maintenance	90
ISO 18125	52	U	
L		Ultra-high-performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry	31
Laboratory	17	W	
Laser distance meter	104	Wound healing cloth	80
Lead	46		

ดรรชนีผู้แต่ง
วารสารผลงานวิชาการ กรมวิทยาศาสตร์บริการ
ปีที่ 10 ฉบับที่ 10 สิงหาคม 2564

ก		ค	
กนิษฐ์ ตะปะสา	80	ศิริวรรณ จำแนกสาร	1
กรธรรม สติรกุล	90	ส	
กรองกาญจน์ ศิริกุลวัฒนา	62	สมภาพ ลาภวิบูลย์สุข	30
การ์ตูน เพ็ญพรม	1	สรัญญา นนทศิริ	104
จ		สุรจติ พวงมาลี	113
จันทร์ฉาย ยศศักดิ์ศรี	1	อ	
จิตวิไล เวฬุวนารักษ์	46	อภิษฐา ช่างสุพรรณ	9
จุฑาทิพย์ ลาภวิบูลย์สุข	30	เอกรัฐ มีชูวาศ	80
เจนจิรา อยู่พะเนียด	1		
ข			
ชนินธ์ พิมพ์ศรี	104		
ชีวัทร ปาโมกษ์	80		
ธ			
ธนากร วาสนาเพียรพงศ์	62		
ธนิษฐา ภูลวรรณ	71		
น			
นุจรินทร์ พลพงษ์	46		
ป			
ปราณี จันทร์ลา	62		
ปวีณา เครือนิล	16		
ปัทมา นพรัตน์	16		
พ			
พิสิฐ หอมเขย	104		
ว			
วชิรพันธุ์ พันธุ์กระวี	52		
วรรณดี มหรรณพกุล	1		
วรรณรัตน์ บุรณะกุล	46		
วันชัย ชินชูศักดิ์	104		
วันดี ลือสายวงศ์	46		

Author Index

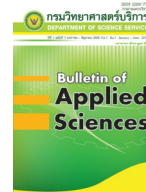
Bulletin of Applied Sciences

Vol. 10 No. 10 August 2021

A		Siriwan Jumnaksan	1
Apisthaa Changsuphan	9	Sompop Lapviboonsuk	30
C		Surawut Puangmalee	113
Chanin Phimsri	104	T	
Cheevapat Pamok	80	Tanittha Pullawan	71
E		Thanakorn Wasanapiarnpong	62
Ekarat Meechoowas	80	W	
J		Wachirapun Punkrawee	52
Janchay Yossaksri	1	Wanchai Chinchusak	104
Janejira Yupanead	1	Wandee Luesaiwong	46
Jitwilai Waluvanarak	46	Wannadee Mahannopkul	1
Jutathip Lapviboonsuk	30	Warunrat Buranakul	46
K			
Kanit Tapasa	80		
Kartoon Pengprom	1		
Korntham Sathirakul	90		
Krongkarn Sirinukunwattana	62		
N			
Nootjarin Phonhong	46		
P			
Pattama Nopparat	16		
Paweena Kreunin	16		
Pisit Homchoey	104		
Pranee Junlar	62		
S			
Sarinya Nonthasiri	104		



Contents
Bulletin of Applied Sciences
Vol.1 No.1 January - July 2012 ISSN 2286-7708



Microstructural Analysis of Poly(ethylene-co-propylene-co-1-butene) terpolymers by Multidimensional NMR Spectroscopy	10
Anuttra Nuamthanom and Phusadee Sandee	
Method for determination of phthalate contents in PVC plastic toys using gas chromatography/mass spectrometry	23
Woraprapa Sriyotai and Doungnapa Suwan	
Method validation for determination of lead and cadmium in natural water using flame atomic absorption spectrometry (FAAS)	30
Angwara Poolkasem and Neeranart Changthong	
A study of the effect of outdoor exposure on the impact strength of plastics	37
Siriwan Mingbunjersuk	
Batch Modification for Glass Melting Energy Reduction	43
Ekarat Meechoovas Kanit Tapasa and Tepiwan Jitwatcharakomol	
Sol gel synthesis of TEOS-SiO₂-PDMS hydrophobic film for ceramic coating	50
Thidarat Predkaew Lada Punsukmtana Sutham Srilomsak and Vararee Bangluang	
Development of Cordierite Ceramic Cookware	59
Wanna T.sængchantara Lada Punsukmtana and Pranee Junlar	
To produce standard fluorescence reference paper for calibration of brightness tester	72
Poovadee Tuchinda	
The Water Quality Survey of Mae Chan Basin at Chiang Rai Province	91
Waraporn Kitchainukul Tepwitoon Thongsri Natawan Thipvisaid Wasan Tirapitayanon	
Kanya Muangkaew Jirachatr Srisane and Veerapat Thonganan	
The effect of solvent on antimicrobial activity of medicinal plant extraction	99
Jaravee Sukprasert and Subongkoch Subtaeng	
A Study on the method comparison of rice sample preparation for inorganic arsenic analysis	110
Savarin Sinaviwat and Noungnuch Mayteeyonpiriya	
Facial scrub cream contained ginger-enzyme	122
Jiraporn Burakhon Subongkoch Subtaeng Jitrakha Thongmanee and Srisomporn Preepram	
The Development of Durian Shell Biochar as a Nutrition Enrichment Medium for Agricultural Purpose : Part 1 Chemical and Physical Characterization	133
Saijit Daosukho Arun Kongkeaw and Urawan Oengeaw	
Banana Cider production	142
Wannadee Mahannopkul Khanittha Inprasit Piti Kalthiyanant and Panyot Mongkolchat	
Robot Boat for Environmental Data Collection	158
Pasan Kulvanit Suradej Surattisak and Pradya Prempraneerach	



Contents

Bulletin of Applied Sciences

Volume 2 No.2 August 2013 ISSN 2286-7708

A physical properties study of porous ceramics for the development of the fragrance ceramic	9
Lada Punsukumtana Inthira Markhapattanasin and Vararee Bangluang	
A synthesis of cordierite from aluminium slag	17
Pranee Junlar Wanna T.saeengechantara and Sansanee Rugthaicharoencheep	
Pretreatment of corn husk and coconut husk using ionic liquid to enhance glucose recovery	26
Watcharee Katinonkul and Jenjira Phuriragpitikhon	
Adsorption of mercury contaminated synthetic water by fly ash from coal fired power plant	35
Waraporn Kitchainukul	
Method validation for determination of chromium, nickel, manganese, molybdenum, silicon carbon, phosphorous and sulfur in stainless steel using spark emission spectrometry	40
Wandee Luesaiwong and Vannapa Tanyuenyoung	
A comparison of the amount of AOX in effluent before entering and after leaving wastewater treatment system in pulp and paper mills in Thailand	48
Poovadee Tuchinda and Korpong Hongsi	
The development of laboratory safety management in metals and trace elements testing laboratory	55
Paweena Kreunin Duangkamol Chaosrimud and Benchaporn Borisuthi	
Gloves for food industry: risk from contamination of heavy metals	62
Orawan Pinprayoon and Kannika Butraek	
Proficiency Testing: Aerobic plate count in starch	69
Raviwan Artsamang Sukanya Pondet and Pochaman Tageen	
The effect of matrices and bacterial type on uncertainty of microbiological testing	77
Kijtisak Yotinn	
Relationship between surface roughness and stability of standard weight	84
Jittakant Intiang	
The development of a low-cost solar tracking system for renewable energy applications	90
Korntham Sathirakul and Apinya Boonprakob	
Screening of microorganisms producing lactic acid using glycerol as a sole carbon source	100
Jiraporn Burakron Nongluk Bunyovimonnat Supachai Jindavutikul Thirada Suktham and Thirada Suktham	
Microbiological quality of fresh-cut fruits from street vendors sold in Bangkok	108
Nopamart Sapoo Jarunee Meksuwan and Supanee Theparoonrat	



Contents

Bulletin of Applied Sciences

Volume 3 No.3 August 2014 ISSN 2286-7708



Synthesis of cordierite from bagasse ash	9
Wanna T.sangchantara, Pranee Junlar, Sansanee Rugthaicharoencheep and Sutthima Sriprasertsuk	
A comparative study of the firing shrinkage properties of the process temperature control rings	15
Lada Punsukmtana, Chantararat Vorasapavit, Siriwan Saephoo and Chatchai Balsri	
The studies of hydrolytic resistance of inner surfaces of glass containers for energy drinks	24
Usuma Naknikham, Sorada Khunhon and Tepiwan Jitwatcharakomol	
Development of test method for determination of lead in lead-free solder using inductively coupled plasma optical emission spectrometry	32
Wandee Luesaiwong and Jitwilai Waluwanaruk	
Comparison of measurement uncertainty between ISO/GUM and method validation approach of mercury measurement in drinking water sample	39
Neeranart Chaengthong	
A preliminary survey: Problems of physical and chemical properties of community consumption water quality	49
Supaporn Kownarumit, Aungsana Chuasuwan, Phitchayapa Ratchathumma, Angwara Poolkasem and Arun Kongkaew	
An assessment of coliform and fecal coliform bacteria levels in surface water resources of Bangkok and vicinity area	59
Tepwitoon Thongsri, Surat Petchkasem and Kanya Muangkaew	
Quantitative analysis of PBBs and PBDEs in plastic parts of electrical and electronics equipment according to RoHS regulation by gas chromatography/mass spectrometry	68
Manop Sittidech , Nathalamon Panyawathanakit	
A preliminary survey: trans fat in fried food, bakery, edible fat and oil products and milk and milk products	80
Kamolgan Jingan, Bangorn Boonshu, Wipawan Srimus	
The study on efficiency of Acorus calamus L. extract against fruit rot fungi isolated from lychee	88
Suwannee Thaenthanee, Jaravee Sukprasert, Saijit Daosukho, Soraya Rodsert	
Innovation of rubber cap for covering concrete block from natural rubber	102
Pantila Poomrabeab, Orasa Onjun	
Troubleshooting of defect formation in injection-moulded thermoplastic tensile specimens by optical microscopy technique	114
Jariyavadee Sirichantra	
Pilot study of laboratory safety status for laboratory workers	120
Paweena Kreunin, Sombat Kongwithtaya, Natthakarn Ketkoom	
Evaluation of measurement uncertainty for volumetric glassware calibration from the variation of surface tension between liquid and glass	130
Pochaman Tagheen	
Sample preparation for laboratory proficiency testing of heavy metals in water	136
Rachada Hemapattawee, Wannee Aupaiboon	



Contents

Bulletin of Applied Sciences

Vol. 4 No. 4 August 2015 ISSN 2286-7708



Improve the Maha Sarakham clay properties by grog addition.	9
Lada Punsukmtana, Sasithorn Pharaboon, Danai Kitchainukul	
Determination of chloride in admixtures and aggregates for concrete by flow injection potentiometry	19
Jaroon Junsomboon and Jaroon Jakmunee	
Glass batch development for pot furnace	29
Ekarat Meechoovas, Kanit Tapasa, Parida Jampeeruang, Tepewan Jitwatcharakomol	
Identification of natural leather and artificial leather products using FT-IR spectroscopy	37
Tanittha Pullawan	
Wastewater characterization from chemical dyeing process of silk: case study household Thai silk production, One Tumbon One Product (OTOP), Surin Province	45
Amornpon Changsuphan, Tepwitoon Thongsri, Surat Petchkaseam, Waraporn Kitchainukul, Chanin Lertkanavanichakul, Natawan Tipviset, Wasan Tirapitayanon, Kanya Muangkaew, Nimit Palee, Jirachatr Srisaen, Veerapat Thonganan and Pornvipa Nartmanee	
Quantitative analysis of melamine in food contact materials by using high-performance liquid chromatography	53
Jutathip Lapviboonsuk, Sompop Lapviboonsuk	
A study of potassium acetate concentration on clay structure	61
S. Rugthaicharoencheep, K. Sirinukunwattana, L. Punsukumtana	
Method validation for determination of phenol in plastic products using high performance liquid chromatography	67
Wongkanok Yoosong	
Algorithm S Setting the target standard deviation for proficiency testing assessment by Algorithm S	73
Wanee Aupaiboon, Rachada Hemapattawee, Pochaman Tagheen	
Purification of crude glycerol by column chromatography	81
Supachai Jindavutikul, Jiraporn Burakhon, and Nonglug Bunyovimonnat	
The method validation of formaldehyde quantitation in textile	89
Nart Promrangsan	
The development of soil quality using biochar amendment from agricultural waste	95
Saijit Daosukho and Soraya Rodprasert	



Contents

Bulletin of Applied Sciences

Vol. 5 No. 5 August 2016 ISSN 2286-7708



The improvement of physical and mechanical properties of cement decorative ornaments by adding wasted paper	9
Korpong Hongsri, Kwanjai Somboon	
A preliminary survey : Quality of plastic melamine kitchenware	19
Thawat Nusonthara, Pawarisa Srisury, Supattra Charoenkasemwit	
Bagasse ash ceramic glaze	31
Sansanee Rugthaicharoencheep, Vararee Bangluang, Emwagee Panthong, Wanna T. Sangchantara	
Development of a reference material for water soluble chlorides (as NaCl) in feeding stuffs	39
Pochaman Tagheen, Sukanya Pondet, Srisuda Romraluk	
Calibration of volumetric pipettes using a prototype of a high accuracy pipette calibration set	47
Acharawan Wattanahuttakum, Weerachai Variyart, Boontham Limpiyapun	
A Development of moisture resistant lightweight material from cullet and fly ash	57
Wanna T.sangchantara, Sutthima Sriprasertsuk, Phatthiya Suwannason, Sansanee Rugthaicharoencheep	
Chemical and physical analysis of sesame oil by nuclear magnetic resonance spectroscopy and accelerated oxidation test	65
Anuttra Nuamthanom, Jenjira Phuriragpitikhon, Titiporn Wattanakul	
Survey of the understanding of chemical laboratory workers in the Department of Science Service toward sustainability	71
Paweena Kreunin, Akarin Paibulpanich, Anantanat Kantanyarat, Laddawan Yeadyad, Duangkamol Chaosrimud, Pitchaya Buthkhunthong, Pattida Nilpatarachat	
Development of coliform test kit for microbiological quality water	79
Theera Panthipamporn	
The survival of agricultural microorganisms in biochar	89
Suwannee Thaenthanee and Saijit Daosukho	
Comparison of solvent and techniques for extraction of benzophenone from paper intended to come into contact with foodstuffs	97
Neungrutai Saesaengseerung	
The comparison of method of mercury determination in solid waste and leachate : A case study of mercury determination in coal fly ash from power plant and sludge from wastewater treatment plant	103
Waraporn Kitchainukul	



Contents

Bulletin of Applied Sciences

Vol. 6 No. 6 August 2017 ISSN 2286-7708

A Development of strong and lightweight banpattan red clay body	9
Lada Punsukumtana, Wanna T.saengchantara, Sansanee Rugthaicharoencheep, Sasithorn Pharaboon	
Case study of safety status of laboratory workers in a chemical industrial plant	17
Paweena Kreunin, Akarin Paibulpanich, Pitchaya Butkhunthong	
Vibration effect on laboratory balance with different readability and loading	24
Jittakant Intiang, Weerachai Variyart, Sompote Boonsanit, Phlapphlueng Nakkead	
The Effect of cobalt oxide (CoO) and praseodymium oxide (Pr₂O₃) on the spectroscopic properties in filter glass	32
Ekarat Meechoowas, Wanida Sangchan, Usuma Nakhikham, Kanit Tapasa	
Comparison of the efficiency of diluents on the enumeration of molds contaminated in spices and spice products	38
Supanee Theparoonrat, Sulawadee Keawchom	
Preliminary study on efficiency of arsenic filter from kaolin for water for consumption	44
Apaporn Sinthusarn, Nongluk Bunyovimonnat, Aungsana Chuasuwan, Mathee Krongpong	
Evaluation of material quality and study of released elements from aluminium electric pan	52
Duangkamol Chaosrimud, Jitwilai Waluvanarak, Jirapan Roma, Nootjarin Phonhong	
Natural rubber-based compound for rubber mold cleaning	58
Kartpan Sakulkaew, Prasert Saeju	
A Development of kiln shelf for firing ceramic from waste	65
Wanna T.saengchantara, Sansanee Rugthaicharoencheep, Jutipa Boonwiset, Sutthima Sriprasertsuk	
Survey of basic understanding of chemical laboratory workers' towards green laboratory management:	
A case study in a government sector	73
Paweena Kreunin, Akarin Paibulpanich, Anantanat Kantanyarat, Laddawan Yeadyad, Duangkamol Chaosrimud	
Neutron and gamma radiation shielding block from natural rubber	80
Orasa Onjun, Nichapa Buasuwan	
Development of thailand reference material for determining trace elements in drinking water	88
Usana Thienmanee, Nattikarn Kaewkhomdee, Sutthinun Taebunpakul, Charun Yafa	
Development of semi-Instant glass batch for increasing glass melting efficiency	97
Kanit Tapasa, Ekarat Meechoowas	
A study conducted proficiency testing of laboratory test for the compression strength of corrugated fiberboard boxes	101
Jierasak Chaisanit, Suradej Phanphang, Kwanjai Somboon, Poovadee Tuchinda	
The production of recycle corrugated paper from used corrugated container	108
Yutthanapong Daengpeng, Suradej Phanphang, Kwanjai Somboon, Poovadee Tuchinda	
Comparison of melamine determination as reference value in food simulant by gravimetric method and high performance liquid chromatography	113
Jutathip Lapviboonsuk, Pochaman Tagheen, Sompop Lapviboonsuk	



Contents

Bulletin of Applied Sciences

Vol. 7 No. 7 August 2018 ISSN 2286-7708



Development of voltammetric method for determination of cadmium and lead released from concrete roofing tiles	9
Jaroon Junsomboon, Jaroon Jakmunee	
Method validation for determination of released cadmium, chromium, lead, molybdenum and nickel from stainless steel cookwares	18
Duangkamol Chaosrimud, Jitwilai Waluvararak, Jirapan Roma, Nootjarin Phonhong	
Properties of pineapple-leaf fibers after chemical treatments	25
Siriwan Leesirisan	
Production of environmental friendly standard rubber sheet for abrasion testing	32
Pantila Bhumirabiab, Orasa Onjun, Prasert Saeju	
Study of effects of SiO ₂ contents on hydrophobicity and optical properties of TEOS-SiO ₂ -OTES film on glass panels	41
Usanee Pantulap, Benjamon Petchareanmongkol, Waraporn Kaewdang, Kanit Tapasa	
Shelf-life extension of Foi Thong by using sweeteners	49
Khanittha Inprasit, Panyot Mongkonchart, Lalita Chookaew, Theerapong Pengkham, Sutachaya Chuenwattana	
The synthesis of near-infrared reflective blue ceramic pigment of Co _{1-x} Mg _x Al ₂ O ₄	60
Pattana Rakkwamsuk, Sitthisunton Supothina, Lada Pansukhumthana, Teerasak Tangkittimasak	
The development of color and pattern on mulberry craft paper for value added	70
Korpong Hongsri, Thitarini Suropan, Surawut Puangmalee	
Development of salt substitute for reduction of sodium in ready to eat mushroom soup and snack foods	78
Wannadee Mahannopkul, Janchay Yossaksri	
Quantitative analysis of nitrite in blood-red bird's nest by high-performance liquid chromatography	89
Manowich Ruengdit, Nipaporn Chanacot, Warinkarn Torateekorntawat	
Developing the quality of palm oil with herbal extracts	95
Patinya Jiyipong, Janchay Yossaksri	
Optimization study of GC-MS and IDMS technique for separation of benzophenone and its derivatives from food packaging paper	104
Neungrutai Saesaengseerung	



Contents

Bulletin of Applied Sciences

Vol. 8 No. 8 August 2019 ISSN 2286-7708



Development of instant mushroom <i>Oudemansiella canarii</i> soup product	9
Jiraporn Burakorn, Pran Pintong and Apirusht Somrith	
Study of factors effecting indentation hardness index of natural latex foam	17
Kartpan Sakulkaew and Prasert Saeju	
Production of handicraft paper from cotton rags	25
Thitarini Suropan	
The synthesis of near-infrared reflective red ceramic pigment	34
Pattana Rakkwamsuk, Sitthisuntorn Supothina, Lada Pansukhumthana and Teerasak Tangkittimasak	
Development of automatic calibration system for electronic balances	40
Jittakant Intiang, Wichit Sirichoteand Sompote Boonsanit	
Analysis of damage in steel bar for reinforced concrete deformed at varied strain rates by continuum damage mechanism	48
Werachai Lamo	
Opinion survey on green laboratory management in Thailand among chemical laboratory workers	55
Paweena Kreunin, Akarin Paibulpanich, Laddawan Yeadyad, Duangkamol Chaosrimud and Anantanat Kantanyarat	
Effect of Electrostatic on Weighing Accuracy	64
Acharawan Wattanahuttakum, Saksit Deeum and Boontham Limpiyapun	
Method validation for determination of mercury in hydrochloric acid	72
Jirasa Krongkrod, Anucha Sinthusarn, Sorada Khunhon and Aphiya Sukmak	
Developing guidelines for informing safe laboratory management practices for the chemical industry in Thailand	78
Natthakarn Ketkoom, Pattama Nopparat, Chantarat Vorasapavit and Sattiya Deedoungpan	
The effect of strain rate on the determination of mechanical properties of steel bar for reinforced concrete	88
Werachai Lamo	
Increasing nutrition of oyster mushrooms using waste coffee grounds	96
Nonglug Bunyovimonnat, Jiraporn Burakorn, Supachai Jindavutikul and Apirusht Somrith	
Effect of tungsten dopant on structural and thermochromic properties of vanadium dioxide synthesized by hydrothermal method	106
Krongtip Termkoa, Kittiya plermjai, Woraphong janetanakit and Krongkran Sirinukunwattana	



Contents
Bulletin of Applied Sciences
Vol. 9 No. 9 August 2020 ISSN 2286-7708



Development of oil sorbent from pineapple leaf fibers using succinic anhydride modification in ionic liquid Watcharee Katinonkul, Orasa Onjun	11
Development of silk sericin extraction process using bromelain and study antioxidant activities of the hydrolysates SuwanneeThaenthanee, PattamapornJitpreeda, Thanawan Rojpitikul, Subongkoch Subtaeng	21
Thermal and functional group characterization of cellulose from sugarcane bagasse Kittiya Plermjai, Krongtip Termkoa, Ekarat Meechawas, Wisanu Pecharapa	31
Study of optimization conditions for inorganic/organic film development coating on aluminum alloy A5083 for improving the corrosion resistance Usuma Naknikham, Itsari Youngthin, KanitTapasa	38
Nitrosamines in rubber gloves used for food contact applications Orawan Pinprayoon, Orasa Onjun, Pantila Bhumirabeab	49
Safety level and risk assessment of melamine migration from food contact materials Jutathip Lapviboonsuk, Sompop Lapviboonsuk	58
Method validation for migration testing of metals from plastic food contact materials to support Thai export Nitchaon Pakawatchai, ChinawatTongchat	71
Development of automatic meniscus adjustment instrument Weerachai Variyart, Acharawan Wattanahuttakum, Saksit Deeum	81
The development of automatic internal adjustment system with memory for electronic balances Jittakant Intiang, Sompote Boonsanit, Wichit Sirichote	95
The synthesis of near-infrared reflectance brown ceramic pigment of $Zn_{1-x}Mg_xFe_2O_4$ Pattana Rakkwamsuk, Sitthisuntorn Supothina, Lada Pansukhumthana, TeerasakTangkittimasak	105



Description slide 2

แนะนำ

สำหรับผู้แต่ง (Author)

คำแนะนำการส่งต้นฉบับ

คำแนะนำการเขียนบทความ

การเขียนเอกสารอ้างอิง

รูปแบบบทความ (Article)

แนะนำวารสาร

วารสารผลงานวิชาการ กรมวิทยาศาสตร์บริการ Bulletin of Applied Sciences เป็นวารสารเผยแพร่ผลงานวิชาการ ผลงานวิจัย ของนักวิจัย นักวิทยาศาสตร์ ให้เป็นที่ประจักษ์แก่ภาครัฐ ภาคเอกชน นักวิชาการ ผู้ประกอบการและประชาชนทั่วไป และสามารถนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์ในทางวิชาการ การอ้างอิง และการประกอบกิจการภาคการผลิตและอุตสาหกรรม

รูปแบบวารสาร

วารสารฉบับล่าสุด



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

กรมวิทยาศาสตร์บริการ

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

