BULLETIN OF APPLIED SCIENCES

วารสารผลงานวิชาการ

ปีที่ 8 ฉบับที่ 8 สิงหาคม 2562
Vol. 8 No. 8 August 2019
ISSN 2286-7708

กรมวิทยาศาสตร์บริการ
DEPARTMENT OF SCIENCE SERVICE

http://bas.dss.go.th

วารสารผลงานวิชาการ กรมวิทยาศาสตร์บริการ

Bulletin of Applied Science

ปีที่ 8 ฉบับที่ 8 สิงหาคม 2562

Vol. 8 No. 8 August 2019

วารสารผลงานวิชาการ กรมวิทยาศาสตร์บริการ
Bulletin of Applied Sciences

ISSN 2286-7708

ปีที่ 8 ฉบับที่ 8 สิงหาคม 2562, Vol. 8 No. 8 August 2019

ชื่อวารสาร	วารสารผลงานวิชาการ กรมวิทยาศาสตร์บริการ Bulletin of Applied Sciences
วัตถุประสงค์	1. เพื่อเป็นวารสารเผยแพร่ผลงานวิชาการ ผลงานวิจัย ของนักวิจัย นักวิทยาศาสตร์ให้เป็นที่ประจักษ์แก่ภาครัฐ ภาคเอกชน นักวิชาการ ผู้ประกอบการและประชาชนทั่วไป 2. เพื่อให้สามารถนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์ในทางวิชาการ การอ้างอิง และการประกอบกิจการภาคการผลิตและอุตสาหกรรม
เจ้าของ	กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม
นโยบายการจัดพิมพ์	วารสารผลงานวิชาการ กรมวิทยาศาสตร์บริการ รับบทความวิจัย บทความวิชาการ และบทความปริทัศน์ จากผู้เขียนทั้งภายในและภายนอกหน่วยงาน ในสาขาเคมี ฟิสิกส์ เทคโนโลยีชีวภาพ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร วัสดุศาสตร์ มาตรวิทยา สารสนเทศศาสตร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ วิศวกรรมศาสตร์ หรือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง

ที่ปรึกษา	นางอุมาพร สุขม่วง	อธิบดีกรมวิทยาศาสตร์บริการ
หัวหน้ากองบรรณาธิการ	ดร. ลดา พันธ์สุขุมธนา	ผู้อำนวยการสำนักหอสมุดและศูนย์สารสนเทศวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กรมวิทยาศาสตร์บริการ
กองบรรณาธิการ	รศ. ดร. ฆรณี ตุ้ยเต็มวงศ์	คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
	ผศ. ดร. ชนะ รักษ์ศิริ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
	ดร. ชีวารัตน์ ม่วงพัฒน์	คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
	ศ. ดร. ณัฐธยาน์ พงศ์สถาบดี	คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
	รศ. ดร. ดวงดาว อาจองค์	คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
	นางสาวทิพวรรณ นิ่งน้อย	กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ กระทรวงสาธารณสุข
	นายธนวรรธก์ มีศักดิ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
	ดร. นงนภัส ดวงดี	ศูนย์วิจัยค้นคว้าและพัฒนายา มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
	ผศ. ดร. ปานไพลิน สีหาราช	คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
	นายพายับ นามประเสริฐ	นักวิชาการอิสระ

ผศ. ดร. วิภารัตน์ เชื้อชวด ชัยสิทธิ์	คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
รศ. ดร. วิษณุ เพชรภา	วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
นายวีระ ตุลาสมบัติ	นักวิชาการอิสระ
ผศ. สมพร ชัยอารีย์กิจ	คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
นายสมโภชน์ บุญสนิท	นักวิชาการอิสระ
นายสักขี แสนสุภา	นักวิชาการอิสระ
ผศ. สุชาดา ไชยสวัสดิ์	ศูนย์การจัดการด้านพลังงาน สิ่งแวดล้อม ความปลอดภัย และอาชีวอนามัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ดร. องอาจ ธเนศนิตย์	ศูนย์ความปลอดภัย อาชีวอนามัย และสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รศ. ดร. อมร เพชรสม	คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ฝ่ายประสานงาน	นางสาวอุดมลักษณ์ เวียนงาม นางสาวจอย ผิวสะอาด
ฝ่ายเผยแพร่	นางวลัยพร ร่มรื่น
เว็บไซต์วารสาร	นางสาวพรรษชล รัตนปาณี

การจัดพิมพ์และเผยแพร่	จัดพิมพ์ปีละ 1 ฉบับ กำหนดออกเผยแพร่เดือน สิงหาคม
จำนวนพิมพ์	1,000 เล่ม
สำนักงานวารสาร	สำนักงานเลขานุการกรม ฝ่ายประชาสัมพันธ์ กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม 75/7 ถนนพระรามที่ 6 เขตราชเทวี กรุงเทพฯ 10400 โทรศัพท์ 0 2201 7000 ต่อ 7095, 7097, 7098, 7470 โทรสาร 0 2201 7470 เว็บไซต์ http://bas.dss.go.th

บทความใน “วารสารผลงานวิชาการกรมวิทยาศาสตร์บริการ” ถือเป็นผลงานทางวิชาการ และเป็นความเห็นส่วนตัวของผู้เขียน ไม่ใช่ความเห็นของกรมวิทยาศาสตร์บริการ หรือกองบรรณาธิการ ผู้เขียนต้องรับผิดชอบต่อบทความของตน และบทความที่ตีพิมพ์ในเล่มนี้ไม่เคยพิมพ์ในวารสารใดมาก่อน และจะไม่นำส่งไปเพื่อพิจารณาตีพิมพ์ในวารสารอื่นภายใน 60 วัน

พิมพ์ที่ : บริษัท ภูริพันธ์ การพิมพ์ จำกัด

ISSN (Printed) : 2286-7708

ISSN (Online) : 2697-5262

บทบรรณาธิการ

กรมวิทยาศาสตร์บริการมีวิสัยทัศน์เป็นองค์กรชั้นนำระดับสากลด้านการตรวจสอบและรับรองทางวิทยาศาสตร์ จึงให้ความสำคัญงานโครงสร้างพื้นฐานด้านบริการเทคนิคด้านวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และนวัตกรรมของประเทศ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการผลักดันให้เกิดการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจ เพื่อต่อยอดสู่การใช้เชิงพาณิชย์ ตอบสนองต่อนโยบายรัฐบาลที่ให้ความสำคัญกับการพัฒนาและส่งเสริมการใช้ประโยชน์จากวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี การวิจัยและพัฒนา และนวัตกรรม

Bulletin of Applied Sciences ฉบับนี้ จึงได้รวบรวมผลงานวิชาการที่เกี่ยวกับการพัฒนาบริการเทคนิค ได้แก่ การศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าดัชนีความแข็งเชิงกดของฟองน้ำลาเท็กซ์ การพัฒนาระบบควบคุมการปรับตั้งเครื่องชั่งอัตโนมัติ การวิเคราะห์ความเสียหายในเหล็กเส้นเสริมคอนกรีตที่เสียรูปที่อัตราความเครียดที่แตกต่างโดยใช้กลไกความเสียหายต่อเนื่อง ผลกระทบของไฟฟ้าสถิตที่มีต่อค่าความถูกต้องของการชั่งน้ำหนัก การตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีหาปริมาณปรอทในกรดไฮโดรคลอริก ผลกระทบของอัตราความเครียดต่อการวัดสมบัติทางกลของเหล็กเส้นเสริมคอนกรีต อิทธิพลของการเจือทังสเตนที่มีผลต่อสมบัติเทอร์โมโครมิกของวาเนเดียมไดออกไซด์สังเคราะห์ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล อีกทั้งมีผลงานวิชาการด้านการพัฒนาวัสดุหรือผลิตภัณฑ์ใหม่ ได้แก่ การเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการเห็ดนางรมด้วยวัสดุเหลือทิ้งกากกาแฟ การพัฒนาผลิตภัณฑ์ซุปเห็ดอูดิมานกึ่งสำเร็จรูป การผลิตกระดาษจากเศษผ้าฝ้าย การสังเคราะห์สีผงเซรามิกสีแดงสะท้อนรังสีอินฟราเรดใกล้ และผลงานวิชาการด้านสิ่งแวดล้อม ได้แก่ การสำรวจความคิดเห็นของผู้ทำงานในห้องปฏิบัติการที่เกี่ยวกับสารเคมีเรื่องการจัดการห้องปฏิบัติการสีเขียวในประเทศไทย การสร้างแนวปฏิบัติการจัดการสารเคมีในห้องปฏิบัติการอย่างปลอดภัยสำหรับอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์ในประเทศไทย

กองบรรณาธิการหวังเป็นอย่างยิ่งว่า บทความทุกเรื่องใน Bulletin of Applied Sciences ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อการเรียนรู้ และเพิ่มศักยภาพในการต่อยอดไปสู่การใช้ประโยชน์ต่อไป

ลดา พันธ์สุขุมธนา
หัวหน้ากองบรรณาธิการ

สารบัญ

วารสารผลงานวิชาการ กรมวิทยาศาสตร์บริการ

ปีที่ 8 ฉบับที่ 8 สิงหาคม 2562

1 **การพัฒนาผลิตภัณฑ์ซุปเห็ดอูดิมานกึ่งสำเร็จรูป** 9
จิราภรณ์ บุราคร, ปรานต์ ปิ่นทอง และอภิรัชต์ สมฤทธิ์

2 **การศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าดัชนีความแข็งเชิงกดของฟองน้ำลาเท็กซ์** 17
กาจพันธ์ สกุลแก้ว และประเสริฐ แซ่จู

3 **การผลิตกระดาษจากเศษผ้าฝ้าย** 25
ฐิตารินีย์ สุโรพันธ์

4 **การสังเคราะห์สีผงเซรามิกสีแดงสะท้อนรังสีอินฟราเรดใกล้** 34
พัฒนะ รักความสุข, สิทธิสุนทร สุโพธิณะ, ลดา พันธ์สุขุมธนา และธีรศักดิ์ ตั้งกิตติมศักดิ์

5 **การพัฒนาระบบควบคุมการปรับตั้งเครื่องชั่งอัตโนมัติ** 40
จิตตกานต์ อินเที่ยง, วิชิต ศิริโชติ และสมโภชน์ บุญสนิท

6 **การวิเคราะห์ความเสียหายในเหล็กเส้นเสริมคอนกรีตที่เสียรูปที่อัตราความเครียดที่แตกต่าง โดยใช้กลไกความเสียหายต่อเนื่อง** 48
วีระชัย ลามอ

สารบัญ

วารสารผลงานวิชาการ กรมวิทยาศาสตร์บริการ

ปีที่ 8 ฉบับที่ 8 สิงหาคม 2562

7 **การสำรวจความคิดเห็นของผู้ทำงานในห้องปฏิบัติการที่เกี่ยวกับสารเคมี เรื่องการจัดการห้องปฏิบัติการสีเขียวในประเทศไทย** 55
ปวีณา เครือนิล, อัคริันทร์ ไพบูลย์พานิช, ลัดดาวัลย์ เยียดยัด, ดวงกมล เชาวน์ศรีหมุด และอนันตณัฐ กันต์ธัญญรัตน์

8 **ผลกระทบของไฟฟ้าสถิตที่มีต่อค่าความถูกต้องของชั่งน้ำหนัก** 64
อัจฉราวรรณ วัฒนหัตถกรรม, ศักดิ์สิทธิ์ ดีอ่ำ และบุญธรรม ลิมป์ปิยพันธ์

9 **การตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีหาปริมาณปรอทในกรดไฮโดรคลอริก** 72
จิรสา กรงกรด, อนุชา สินธุสาร, โศรดา ขุนโหร และอภิชญา สุขมาก

10 **การสร้างแนวปฏิบัติการจัดการสารเคมีในห้องปฏิบัติการอย่างปลอดภัย สำหรับอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์ในประเทศไทย** 78
ณัฏฐกานต์ เกตุคุ้ม, ปัทมา นพรัตน์, จันทรัตน์ วรสรรพวิทย์ และสัตติญา ดีดวงพันธ์

11 **ผลกระทบของอัตราความเครียดต่อการวัดสมบัติทางกลของเหล็กเส้นเสริมคอนกรีต** 88
วีระชัย ลามอ

12 **การเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการเห็ดนางรมด้วยวัสดุเหลือทิ้งกากกาแฟ** 96
นงลักษณ์ บรรยงวิมลณัฐ, จิราภรณ์ บุราคร, สุพะไชย์ จินดาวุฒิกุล และอภิรัชต์ สมฤทธิ์

13 **อิทธิพลของสารเจือทังสเตนที่มีผลต่อสมบัติทางโครงสร้างและเทอร์โมโครมิก ของวาเนเดียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล** 106
กรองทิพย์ เติมเกาะ, กิตติยา ปลื้มใจ, วงพงษ์ เจนธนกิจ และกรองกาญจน์ ศิรินุกุลวัฒนา

Contents

Bulletin of Applied Sciences

Vol. 8 No. 8 August 2019

1 **Development of instant mushroom *Oudemansiell canarii* soup product** 9
Jiraporn Burakorn, Pran Pintong and Apirusht Somrith

2 **Study of factors effecting indentation hardness index of natural latex foam** 17
Kartpan Sakulkaew and Prasert Saeju

3 **Production of handicraft paper from cotton rags** 25
Thitarini Suropan

4 **The synthesis of near-infrared reflective red ceramic pigment** 34
Pattana Rakkwamsuk, Sitthisuntorn Supothina, Lada Pansukhumthana and Teerasak Tangkittimasak

5 **Development of automatic calibration system for electronic balances** 40
Jittakant Intiang, Wichit Sirichote and Sompote Boonsanit

6 **Analysis of damage in steel bar for reinforced concrete deformed at varied strain rates by continuum damage mechanism** 48
Werachai Lamo

Contents

Bulletin of Applied Sciences

Vol. 8 No. 8 August 2019

7 Opinion survey on green laboratory management in Thailand among chemical laboratory workers 55
Paweena Kreunin, Akarin Paibulpanich, Laddawan Yeadyad, Duangkamol Chaosrimud and Anantanat Kantanyarat

8 Effect of Electrostatic on Weighing Accuracy 64
Acharawan Wattanahuttakum, Saksit Deeum and Boontham Limpiyapun

9 Method validation for determination of mercury in hydrochloric acid 72
Jirasa Krongkrod, Anucha Sinthusarn, Sorada Khunhon and Aphiya Sukmak

10 Developing guidelines for informing safe laboratory management practices for the chemical industry in Thailand 78
Natthakarn Ketkoom, Pattama Nopparat, Chantarat Vorasapavit and Sattiya Deedoungpan

11 The effect of strain rate on the determination of mechanical properties of steel bar for reinforced concrete 88
Werachai Lamo

12 Increasing nutrition of oyster mushrooms using waste coffee grounds 96
Nonglug Bunyovimonnat, Jiraporn Burakron, Supachai Jindavutikul and Apirusht Somrith

13 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

การพัฒนาผลิตภัณฑ์ซุปเห็ดอูดิมานกึ่งสำเร็จรูป

Development of instant mushroom *Oudemansiell canarii* soup product

1

จิราภรณ์ บุราคร[1*] , ปรานต์ ปิ่นทอง[1], อภิรัชต์ สมฤทธิ์[2]
Jiraporn Burakorn[1*] , Pran Pintong[1] , Apirusht Somrith[2]

บทคัดย่อ

เห็ดอูดิมาน (*Oudemansiella canarii*) เป็นสายพันธุ์ของเห็ดที่พบในป่าจังหวัดตาก ประเทศไทย โดยกรมวิชาการเกษตรได้ศึกษาวิธีการนำมาเพาะเลี้ยงเส้นใยเห็ดและดอกเห็ดจนประสบผลสำเร็จ และพบว่าเห็ดอูดิมานมีคุณค่าทางโภชนาการสูง ได้แก่ โปรตีน เกลือแร่ต่าง ๆ ฟอสฟอรัส แคลเซียม ธาตุเหล็กและไฟเบอร์ แต่มีปริมาณไขมันต่ำมาก งานวิจัยนี้มีเป้าหมายที่จะพัฒนาผลิตภัณฑ์จากเห็ดอูดิมาน เพื่อเป็นแหล่งอาหารทางเลือกใหม่แก่ผู้บริโภค รวมทั้งเพิ่มมูลค่าของเห็ด โดยการพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ซุปเห็ดกึ่งสำเร็จรูปที่มีแคลอรี่ต่ำ โปรตีนและไฟเบอร์สูง และศึกษากระบวนการผลิต 3 วิธี ดังนี้ 1. อบแห้งสูตรซุปเห็ดโดยใช้ลมร้อน (Hot air) 2. อบแห้งส่วนผสมของซุปเห็ดโดยใช้ลมร้อน (hot air) แล้วจึงนำมาผสมเป็นสูตรซุปเห็ด 3. อบแห้งสูตรซุปเห็ดโดยการทำแห้งแบบพ่นฝอย (Spray dry) จากผลการทดลองพบว่าวิธีที่ 2 เหมาะสมที่สุดในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ซุปเห็ดอูดิมานซึ่งพิจารณาจากผลการทดสอบด้านประสาทสัมผัสและคุณลักษณะทางกายภาพที่ดีที่สุด ศึกษาอายุการเก็บรักษาและการบรรจุซุปเห็ดอูดิมานในถุงอะลูมิเนียมฟอยล์และกระป๋อง พบว่าเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องได้เป็นเวลา 180 วัน โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและประสาทสัมผัส รวมถึงวิเคราะห์จุลินทรีย์ผ่านมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก. 462-2548 ซุปกึ่งสำเร็จรูป) นำซุปเห็ดอูดิมานบรรจุถุงอะลูมิเนียมฟอยล์ไปทดสอบคุณค่าทางโภชนาการ และพัฒนารสชาติต่าง ๆ ได้แก่ รสธรรมดา รสต้มยำกุ้ง รสแกงเขียวหวาน ประเมินทางประสาทสัมผัสผลิตภัณฑ์ซุปเห็ดกึ่งสำเร็จรูปทั้ง 3 สูตร เปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ซุปเห็ดกึ่งสำเร็จรูปทางการค้า พบว่า ผลิตภัณฑ์ซุปเห็ดอูดิมานกึ่งสำเร็จรูปรสธรรมดาและผลิตภัณฑ์ซุปเห็ดกึ่งสำเร็จรูปทางการค้า ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ p=0.05

คำสำคัญ : เห็ดอูดิมาน ซุป

Abstract

Oudemansiella canarii (O. cannarii) is mushroom species found in the forest in Tak Province in Thailand. The Department of Agriculture has achieved the cultivation of mycelium and fruit body of the mushroom and also found that *O. canarii* provides high nutritive values such as protein, minerals, phosphorus, calcium, iron and high fiber but low fat. The aim of this research was the product development from *O. canarii* as a new alternative food for consumers and value adding of the mushroom by developing the instant products of mushroom soup with low calories and high protein and fiber. Three processing methods were studied as follows: 1) drying the mushroom soup by hot air, 2) drying the ingredients of mushroom soup by hot air and then formulate mushroom soup and 3) drying the mushroom soup by spray dry. As the results, the method 2), with highest scores from both sensory and physical tests, was considered the most suitable process to produce mushroom soup. The mushroom soup was produced and packed in aluminum foil pouches and in lacquer-coated aluminum cans and evaluated for shelf-life. The results showed that both the mushroom soup in aluminum foil pouches and cans could be kept at room temperature for 180 days without significant physical and sensory change. The microbial quality was acceptable according to TISI 3413 standard (Instant soups). The original flavor instant mushroom soup product was developed further to Tomyumkung flavor and Kaengkaewwan flavor and then sensory evaluation was conducted and compared with a commercial instant mushroom soup. The preference and acceptance tests showed no statistically significant difference between the instant mushroom soup with original flavor and commercial instant mushroom soup product at p=0.05.

Keywords : *Oudemansiella canarii,* Soup

[1] กรมวิทยาศาสตร์บริการ กองผลิตภัณฑ์อาหารและวัสดุสัมผัสอาหาร
[2] กรมวิชาการเกษตร สำนักวิจัยพัฒนาการอารักขาพืช
*Corresponding author e-mail address: juntarama@yahoo.com

1. บทนำ (Introduction)

กรมวิชาการเกษตรเป็นหนึ่งในหน่วยงานที่ทำการสำรวจและเก็บรักษาสายพันธุ์ของเห็ดที่พบในป่าและแหล่งธรรมชาติต่าง ๆ ของประเทศไทยจำนวนมาก มีการศึกษาวิธีการนำมาเพาะเลี้ยงในห้องปฏิบัติการและเรือนทดลองเพื่อเป็นต้นแบบให้เกษตรกรสามารถนำไปเพาะปลูก ส่งเสริมอาชีพการเพาะเห็ดสร้างรายได้ให้แก่เกษตรกร สายพันธุ์เห็ดอูดิมาน (*Oudemansiella canarii*) เป็นสายพันธุ์หนึ่งที่กรมวิชาการเกษตรค้นพบจากจังหวัดนราธิวาสและตาก และได้ทำการศึกษาวิธีการเพาะเลี้ยงเส้นใยเห็ดและดอกเห็ดจนประสบผลสำเร็จ [1-2] ในต่างประเทศมีรายงานการวิจัยคุณประโยชน์ของเห็ดอูดิมานอย่างมากมายในด้านคุณค่าทางยาและคุณค่าทางการเกษตร โดยพบว่าเห็ดมีปริมาณสารอาหารสูง นอกจากนี้ สารสกัดจากเห็ดมีฤทธิ์ในการยับยั้งเซลล์มะเร็งและเนื้องอก [3] มีฤทธิ์ยับยั้งเชื้อราก่อโรคผิวหนัง เช่น *Candida albicans,C. glabrata, C. krusei* และ *C.tropicalis* เป็นต้น ส่วนฤทธิ์การยับยั้งจุลินทรีย์ก่อโรคพืช เช่น *Cladosprium sphaeropermum* สารสำคัญที่พบในเห็ดคือ สาร oudermansins และ strobilurins [4-5] และมีการผลิตสาร exopolysassacharide ได้สูง ซึ่งมีฤทธิ์ทางชีวภาพและเภสัชวิทยาในการกระตุ้นภูมิคุ้มกันและต้านมะเร็ง [6-9] ซึ่งสายพันธุ์เห็ดอูดิมานมีศักยภาพสูงในการนำไปใช้ประโยชน์ทั้งทางด้านอาหาร การแพทย์และการเกษตร

งานวิจัยนี้เป็นการต่อยอดผลงานวิจัยของกรมวิชาการเกษตรที่สามารถเพาะเห็ดอูดิมานได้แล้วและมีแนวทางจะส่งเสริมให้เกษตรกรปลูกในเชิงพาณิชย์ จากรายงานการวิจัยของกรมวิชาการเกษตรโดย อัจฉราและคณะ, 2555 [2] พบว่าคุณค่าทางโภชนาการเห็ดอูดิมานสายพันธุ์จากจังหวัดตาก มีปริมาณโปรตีนสูง เกลือแร่ต่าง ๆ ฟอสฟอรัส แคลเซียม ธาตุเหล็ก ปริมาณสูง ในขณะที่ปริมาณไขมันต่ำมาก รวมถึงมีไฟเบอร์สูง งานวิจัยนี้จึงมีเป้าหมายในการพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารแคลอรี่ต่ำ โปรตีนสูง จากเห็ดอูดิมานเป็นผลิตภัณฑ์ซุปเห็ดกึ่งสำเร็จรูป จะเป็นแนวทางการเพิ่มมูลค่าให้กับเห็ดอูดิมาน สามารถนำไปใช้ประโยชน์หลากหลายช่องทาง จึงจะได้สานต่อโครงการวิจัยของกรมวิชาการเกษตรเพื่อให้งานวิจัยครบวงจรสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้จริง

2. วิธีการวิจัย (Experimental methods)

2.1 เครื่องมือ วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี

2.1.1 เห็ดในสกุล *Oudermansiella canarii* สายพันธุ์จังหวัดตาก ที่เก็บอยู่ในหน่วยเก็บรักษา เชื้อพันธุ์เห็ด จากกรมวิชาการเกษตร

2.1.2 ส่วนผสมในการปรุง ได้แก่ หอมหัวใหญ่ มันฝรั่ง เนย นมสด ผงปรุงรส กระเทียม พริกไทย เกลือป่น ครีม น้ำซุป

2.1.3 ซุปเห็ด ตรา Campbell’s

2.1.4 Aluminum foil

2.1.5 ตู้อบลมร้อน

2.1.6 เครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย (Spray dry)

2.1.7 หม้อต้ม

2.1.8 เครื่องบดปั่น

2.1.9 เครื่องชั่งไฟฟ้า 4 ตำแหน่ง และ 2 ตำแหน่ง

2.1.10 กระป๋อง

2.1.11 เครื่องปิดฝากระป๋อง

2.1.12 หม้อนึ่งความดัน

2.1.13 เครื่องวัดสุญญากาศในกระป๋อง (Can vacuum meter)

2.2 กระบวนการผลิตซุปเห็ด

สูตรซุปเห็ดเบื้องต้นโดยมีส่วนประกอบ เห็ดอูดิมาน หอมหัวใหญ่ มันฝรั่ง กระเทียม เนย พริกไทย เกลือป่น ครีม และน้ำซุป โดยนำเห็ดสดล้างทำความสะอาด หั่นเป็นชิ้น มันฝรั่งปอกเปลือกล้างแล้วหั่นเป็นชิ้น ๆ ต้มให้สุก หอมหัวใหญ่และกระเทียมหั่นละเอียด จากนั้นนำหอมหัวใหญ่ กระเทียม ไปผัดกับเนย จนหอมหัวใหญ่เริ่มสุกให้ใส่เห็ดลง นำส่วนประกอบที่ผัดสุกแล้วไปปั่นกับมันฝรั่งให้ละเอียด นำมาเคี่ยวต่อโดยเติมครีมลงไป คนให้เข้ากัน เติมน้ำซุปที่เตรียมไว้ ปรุงรสชาติเคี่ยวไฟอ่อน ๆ จะได้ซุปเห็ด

2.3 การศึกษาสูตรซุปเห็ดสด

พัฒนาสูตรซุปเห็ดที่มีส่วนผสมดังข้อ 2.2 โดยศึกษาอัตราส่วนประกอบ 6 สูตร วางแผนการทดลองแบบ Randomized Complete Block Design (RCBD) จากนั้นทดสอบทางประสาทสัมผัสโดยการทดสอบแบบ Ranking preference test เพื่อเปรียบเทียบลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตขึ้น 4 ด้าน ได้แก่ กลิ่นรสเห็ด ความข้น ความเค็ม และความชอบโดยรวม โดยผู้ทดสอบชิม 8 คน ที่ผ่านการคัดเลือกและฝึกฝน ในการวิเคราะห์ผลของการจัดลำดับความชอบจะถูกนำมาเปลี่ยนเป็นคะแนนใช้ตารางของ Fisher and Yates (1942)[10] และหาความแตกต่างโดยใช้วิธีการของ Tukey’s test [11] คัดเลือกสูตรซุปเห็ดสดที่ได้รับการจัดอันดับสูงสุดนำไปทดลองผลิตเป็นซุปเห็ดกึ่งสำเร็จรูป

2.4 ศึกษากระบวนการผลิตซุปเห็ดกึ่งสำเร็จรูปโดยใช้การทำแห้ง

ทดลองผลิตซุปเห็ดกึ่งสำเร็จรูป โดยเป็นซุปเห็ดสูตรที่ผ่านการคัดเลือกตาม ข้อ 2.3 นำมาผ่านกระบวนการทำให้แห้ง 3 วิธี ดังนี้

2.4.1 ซุปเห็ดอบแห้งโดยใช้ลมร้อน (Hot air)

ตัวอย่าง 100 กรัม นำไปอบที่อุณหภูมิและเวลาที่แตกต่างกันดังนี้ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมง 70 องศาเซลเซียส 6 ชั่วโมงและอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส 5 ชั่วโมง โดยแต่ละตัวอย่างทำ 3 ซ้ำ โดยใช้ตู้อบลมร้อน

2.4.2 อบแห้งโดยใช้ลมร้อน (Hot air) โดยการแยกส่วนประกอบ แล้วนำมาผสมกันเป็นสูตรซุปเห็ดนำส่วนประกอบของซุปเห็ด เช่น เห็ดอูดิมานสด มันฝรั่ง หอมหัวใหญ่ กระเทียมสด

เป็นต้น ต้มให้สุก แล้วนำไปอบแห้งในตู้อบลมร้อน อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากนั้นบด ปั่นให้เป็นผงละเอียด แล้วนำส่วนประกอบทุกอย่างมาชั่งน้ำหนัก ผสมรวมกัน จะได้สูตรซุปเห็ดกึ่งสำเร็จรูป และมีการเพิ่มแป้งสาลีเพื่อเพิ่มเนื้อสัมผัสที่มีความข้น

2.4.3 ทำแห้งแบบพ่นฝอยซุปเห็ด (Spray dry)

ตัวอย่าง 2,000 กรัม นำไปปั่นให้ละเอียดเป็นเนื้อเดียวกัน เติมน้ำลงไป 1,000 กรัม คนให้เข้ากัน นำไปทำแห้งแบบพ่นฝอย โดยมีสภาวะการทำงานของเครื่อง อุณหภูมิลมเข้า 190-200 องศาเซลเซียส อุณหภูมิลมออก 90-100 องศาเซลเซียส

2.4.4 ตัวอย่างซุปเห็ดแห้งในข้อ 2.4.1-2.4.3 มาทำให้คืนรูป โดยตัวอย่างสูตรซุปเห็ดแห้งปริมาณ 25 กรัม เติมน้ำร้อน 200 มิลลิลิตร คนให้เข้ากัน แล้วนำไปวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ ทดสอบความชื้น และทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัสโดยผู้ทดสอบชิมที่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 10 คน โดยวิธี Scoring test

2.5 พัฒนาผลิตภัณฑ์ซุปเห็ดบรรจุกระป๋อง

นำซุปเห็ดสูตรที่ดีที่สุดรสธรรมดาจากข้อ 2.4.4 ใส่ลงในกระป๋องอะลูมิเนียม นำไปนึ่งไล่อากาศให้อุณหภูมิใจกลางอาหารอยู่ที่ 80-85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที ปิดผนึกฝากระป๋อง แล้วนำไปฆ่าเชื้อที่ 115 องศาเซลเซียส ความดัน 10 ปอนด์ 30 นาที ทำให้กระป๋องเย็นลง นำไปทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัส ความหนืด และค่า pH

2.6 พัฒนาผลิตภัณฑ์ซุปเห็ดบรรจุถุงอะลูมิเนียมฟอยล์

นำซุปเห็ดสูตรที่ดีที่สุดรสธรรมดาจากข้อ 2.4.4 25 กรัม เติมน้ำร้อน 200 กรัม คนให้เป็นเนื้อเดียวกัน บรรจุในถุงอะลูมิเนียมฟอยล์ แล้วปิดผนึก

2.7 ศึกษากระบวนการบรรจุและยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ซุปเห็ดกึ่งสำเร็จรูปที่ทำแห้งแบบลมร้อน

ผลิตภัณฑ์ซุปเห็ดกึ่งสำเร็จรูป โดยซุปเห็ดบรรจุกระป๋องข้อ 2.5 และซุปเห็ดบรรจุถุงอะลูมิเนียมฟอยล์ข้อ 2.6 นำมาเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิห้อง 27$\pm$2 องศาเซลเซียส ทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัสผลิตภัณฑ์ซุปเห็ดในช่วงระยะเวลา 15 30 45 60 75 90 105 120 135 150 165 และ 180 วัน โดย ผู้ทดสอบชิมที่ผ่านการฝึกฝน 8 คนในด้านการเปลี่ยนแปลงสี กลิ่นแปลกปลอม ความข้น รสชาติแปลกปลอม ความชอบโดยรวม การยอมรับโดยรวม แล้วคำนวณผลการทดสอบทางสถิติโดยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance; ANOVA)

2.8 การวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการ

วิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการผลิตภัณฑ์ซุปเห็ดกึ่งสำเร็จรูปโดยวิธี AOAC (2016) [12] โดยการหาโปรตีน ไขมันทั้งหมด ไขมันอิ่มตัว คาร์โบไฮเดรตทั้งหมด โคเลสเตอรอล ใยอาหาร น้ำตาลทั้งหมด แคลเซียม พลังงานทั้งหมด พลังงานจากไขมัน เหล็ก วิตามินเอ วิตามินบี 1 วิตามินบี 2 และโซเดียม

2.9 การวิเคราะห์จุลินทรีย์

วิเคราะห์หาจุลินทรีย์ในตัวอย่าง ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 รายการวิเคราะห์หาจุลินทรีย์และวิธีวิเคราะห์

รายการ	วิธี
Aerobic Plate count	FDA BAM, 2001 (Chapter 3) [13]
Clostridium perfringens	FDA BAM, 2001 (Chapter 6) [14]
Escherichia coli	ISO7251: 2005 (E) [15]
Salmonella spp.	ISO 6579: 2002 [16]
Staphylococcus aureus	AOAC (2012) 2003.07 [17]
Yeast and mold	AOAC (2012) 997.02 [18]

2.10 การศึกษาความชอบและการยอมรับของผู้บริโภค

นำซุปเห็ดรสธรรมดามาปรับปรุงสูตรรสต้มยำ รสแกงเขียวหวาน บรรจุในถุงอะลูมิเนียมฟอยล์ มาทดสอบความชอบและการยอมรับทางประสาทสัมผัสกับผู้บริโภคด้วยการให้คะแนนความชอบตามวิธี 9-point hedonic scale กับผู้บริโภคทั่วไปจำนวน 95 คน ณ กรมวิทยาศาสตร์บริการ กรุงเทพมหานคร โดยการทดสอบทางประสาทสัมผัสวางแผนการทดลองแบบ Randomized Complete Block Design (RCBD) ทำการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance : ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's new multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

3. ผลและวิจารณ์ (Results and discussion)

3.1 ผลการศึกษาสูตรซุปเห็ดสด

จากการพัฒนาสูตรซุปเห็ดสด 6 สูตร แล้วนำไปทดสอบทางประสาทสัมผัสโดยการจัดลำดับความชอบ พบว่า ซุปเห็ดสูตรที่ 6 ได้ค่าเฉลี่ยการจัดลำดับความชอบสูงสุดในทุกด้าน ได้แก่ กลิ่นรส ความข้น ความเค็ม และความชอบโดยรวม โดยมีส่วนประกอบ เห็ดอูดิมาน 150 กรัม หอมหัวใหญ่ 100 กรัม มันฝรั่ง 150 กรัม กระเทียม 30 กรัม เนย 30 กรัม พริกไทย 4 กรัม เกลือป่น 4 กรัม ครีม 4 กรัม และน้ำซุป 732 กรัม จากการทดสอบ โดย Tukey's test [11] ตารางที่ 2 พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p <0.05$)

ตารางที่ 2 ค่าเฉลี่ยคะแนนการจัดลำดับความชอบซุปเห็ด

สูตร	ค่าเฉลี่ยคะแนนการจัดลำดับความชอบ				ลำดับความชอบที่
	กลิ่นรส	ความข้น	ความเค็ม	ความชอบโดยรวม	
1	-0.05[b]	-0.12[b]	-0.07[a]	0.07[a]	4
2	-0.59[b]	-0.68[b]	-0.73[b]	-0.82[b]	6
3	-0.19[b]	-0.12[b]	-0.14[b]	-0.14[b]	5
4	-0.02[b]	0.05[a]	0.00[a]	0.12[a]	3
5	0.16[a]	0.28[a]	0.28[a]	0.23[a]	2
6	0.69[a]	0.59[a]	0.73[a]	0.54[a]	1

หมายเหตุ ตัวเลขที่มีอักษรกำกับต่างกันจากแถวตั้งเดียวกัน แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

3.2 ผลการศึกษากระบวนการผลิตซุปเห็ดกึ่งสำเร็จรูปโดยใช้การทำแห้ง

จากผลการทดสอบทางกายภาพและความชื้นของซุปเห็ดอูดิมานที่ผ่านกระบวนการทำแห้ง 3 แบบ พบว่ากระบวนการอบลมร้อนแบบแยกส่วนประกอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ดีที่สุด (ตาราง 3) สอดคล้องกับผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสที่ได้คะแนนเฉลี่ยสูงที่สุดในทุกรายการทดสอบ (ตาราง 4)

3.3 ผลการพัฒนาผลิตภัณฑ์ซุปเห็ดบรรจุกระป๋องและอะลูมิเนียมฟอยล์

จากการนำซุปเห็ดรสธรรมดาบรรจุกระป๋องและอะลูมิเนียมฟอยล์มาทดสอบทางประสาทสัมผัส พบว่า ซุปเห็ดบรรจุอะลูมิเนียมฟอยล์มีค่าความหนืด ความชอบโดยรวม รสชาติโดยรวม และกลิ่นรสสูงกว่าซุปเห็ดบรรจุกระป๋องอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางที่ 3 ลักษณะทางกายภาพและความชื้นซุปเห็ดอูดิมานแห้งแล้วนำมาคืนรูป

วิธีการทำแห้ง	อุณหภูมิ (^{o}C)	เวลา	ลักษณะทางกายภาพ	ความชื้น
อบลมร้อน	50	24 ชั่วโมง	สีเหลืองอมน้ำตาลเล็กน้อย ชื้น มีเชื้อรา	ND
	70	6 ชั่วโมง	สีเหลืองอมน้ำตาล ซุปคืนรูปไม่ดี ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน	8.5
	80	5 ชั่วโมง	สีเหลืองเข้มอมน้ำตาล ซุปคืนรูปไม่ดี ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน รสชาติจืดไม่มีรสชาติของซุปเท่าที่ควร	8.7
อบลมร้อนแบบแยกส่วนประกอบ	70	6 ชั่วโมง	สีเหลืองอ่อน ซุปคืนรูปได้ดี เนื้อสัมผัสละเอียด เป็นเนื้อเดียวกัน รสชาติกลมกล่อมดี	9.0
แบบพ่นฝอย	200	15 นาที	สีเหลืองอ่อน ซุปคืนรูปได้แต่เหลวมาก รสชาติจืด ไม่มีรสชาติของซุปเท่าที่ควร	8.9

ตารางที่ 4 คะแนนความชอบเฉลี่ยจากการทดสอบทางประสาทสัมผัสผลิตภัณฑ์ซุปเห็ดที่ผ่านกรรมวิธีต่าง ๆ

วิธีการทำแห้ง	คะแนนความชอบเฉลี่ย $\pm$ เบี่ยงเบนมาตรฐาน					
	ลักษณะปรากฏ	สี	กลิ่นรส	ความข้น	รสชาติโดยรวม	ความชอบโดยรวม
อบลมร้อน 70°C 6 ชม.	4.6[b]±0.8	4.8[b]±0.9	4.7[b]±0.9	4.2[c]±0.4	4.6[b]±1.0	4.3[b]±0.7
อบลมร้อน 70°C 5 ชม.	4.4[b]±0.8	4.4[b]±0.8	4.4[b]±0.8	4.3[c]±0.7	4.7[b]±0.8	4.3[b]±0.7
อบลมร้อนแบบแยกส่วนประกอบ	6.2[a]±0.5	6.3[a]±0.5	6.0[a]±0.8	6.1[a]±0.6	6.0[a]±0.9	6.1[a]±0.6
แบบพ่นฝอย	5.9[a]±0.7	6.2[a]±0.4	4.8[b]±0.9	5.1[b]±0.9	5.4[ab]±0.8	5.4[b]±0.8

หมายเหตุ ตัวเลขที่มีอักษรกำกับต่างกันจากแถวตั้งเดียวกัน แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

ตารางที่ 5 คะแนนความชอบเฉลี่ย ค่าความหนืดและ ค่า pH ของซุปเห็ดรสธรรมดาบรรจุกระป๋องและอะลูมิเนียมฟอยล์

ตัวอย่างซุปเห็ด	คะแนนความชอบเฉลี่ย $\pm$ เบี่ยงเบนมาตรฐาน						ค่าความหนืด (cp)	ค่า pH^{ns}
	ลักษณะปรากฏ ^{ns}	สี ^{ns}	กลิ่นรส	ความข้น ^{ns}	รสชาติโดยรวม	ความชอบโดยรวม		
กระป๋อง	5.2±0.9	6.2±0.4	5.3^{b}±0.9	5.0±0.9	5.4^{b}±0.8	5.6^{b}±0.8	10,570^{b}	5.71
อะลูมิเนียมฟอยล์	5.4±0.8	5.9±0.9	6.0^{a}±0.8	5.2±0.8	6.0^{a}±0.8	6.1^{a}±0.8	13,020^{a}	5.68

หมายเหตุ ตัวเลขที่มีอักษรกำกับต่างกันจากแถวตั้งเดียวกัน แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

ns หมายถึง ตัวเลขที่อยู่ในแถวตั้งเดียวกัน ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\geq0.05$)

3.4 ผลการศึกษากระบวนการบรรจุและยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ซุปเห็ดกึ่งสำเร็จรูปที่ทำแห้งแบบลมร้อน

เมื่อนำซุปเห็ดบรรจุถุงอะลูมิเนียมฟอยล์มาเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิห้อง 27$\pm$2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 180 วัน และทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัส พบว่าการเปลี่ยนแปลงสี กลิ่นแปลกปลอม ความข้น รสชาติแปลกปลอม ความชอบโดยรวม การยอมรับโดยรวม และค่า pH มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ผู้ทดสอบชิมยังยอมรับผลิตภัณฑ์ ส่วนค่าความหนืดไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (ตารางที่ 6) ส่วนซุปเห็ดบรรจุกระป๋อง พบว่าทุกรายการทดสอบมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ผู้ทดสอบชิมยังคงยอมรับผลิตภัณฑ์เช่นกัน (ตารางที่ 7) อย่างไรก็ตาม ผู้บริโภคต้องการความสะดวกในการบริโภคซุปเห็ดบรรจุถุงอะลูมิเนียมฟอยล์มากกว่าบรรจุกระป๋อง เนื่องจากน้ำหนักเบา สะดวกในการซื้อและขนส่ง จึงคัดเลือกซุปเห็ดบรรจุถุงอะลูมิเนียมฟอยล์ไปทำการทดลองต่อไป

ตารางที่ 6 ผลการทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัส ค่าความหนืด และค่า pH ผลิตภัณฑ์ซุปเห็ดบรรจุถุงอะลูมิเนียมฟอยล์

เวลา (วัน)	การเปลี่ยนแปลงสี	กลิ่นแปลกปลอม	ความข้น	รสชาติแปลกปลอม	ความชอบโดยรวม	การยอมรับโดยรวม	ค่าความหนืด ^{ns} (cp)	ค่า pH
0	0.98±0.01^{a}	0.99±0.01^{a}	0.98±0.01^{a}	0.99±0.01^{a}	0.98±0.01^{a}	0.99±0.01^{a}	5,825	6.02^{bc}
15	0.97±0.01^{b}	0.98±0.02^{abc}	0.98±0.01^{a}	0.98±0.01^{ab}	0.97±0.01^{ab}	0.97±0.01^{ab}	5,887	6.01^{bc}
30	0.96±0.01^{b}	0.98±0.01^{ab}	0.97±0.01^{ab}	0.97±0.02^{b}	0.96±0.01^{bc}	0.97±0.01^{ab}	5,880	6.05^{b}
45	0.94±0.02^{c}	0.97±0.02^{bc}	0.96±0.01^{abc}	0.97±0.01^{bc}	0.96±0.01^{bc}	0.95±0.03^{bc}	5,959	6.05^{b}
60	0.91±0.02^{d}	0.97±0.01^{bc}	0.95±0.02^{bc}	0.96±0.01^{cd}	0.95±0.01^{c}	0.94±0.04^{bcd}	5,960	6.20^{a}
75	0.90±0.01^{e}	0.96±0.02^{cd}	0.94±0.02^{c}	0.96±0.01^{cd}	0.94±0.01^{d}	0.94±0.02^{cd}	5,910	5.89^{cd}
90	0.88±0.01^{f}	0.94±0.02^{de}	0.92±0.03^{d}	0.95±0.01^{ef}	0.92±0.01^{d}	0.92±0.05^{cde}	5,880	6.05^{b}
105	0.86±0.01^{g}	0.94±0.01^{de}	0.90±0.04^{d}	0.95±0.01^{de}	0.90±0.02^{e}	0.92±0.01^{def}	5,965	5.79^{d}
120	0.84±0.01^{h}	0.94±0.01^{ef}	0.88±0.01^{e}	0.94±0.01^{fg}	0.89±0.01^{e}	0.90±0.04^{ef}	5,936	6.05^{b}
135	0.83±0.01^{h}	0.93±0.02^{fg}	0.87±0.01^{e}	0.94±0.01^{fg}	0.87±0.02^{f}	0.90±0.01^{f}	5,940	6.0^{bc}
150	0.81±0.02^{i}	0.92±0.03^{fg}	0.84±0.03^{f}	0.93±0.01^{gh}	0.85±0.02^{g}	0.89±0.01^{fg}	5,910	6.03^{bc}
165	0.80±0.01^{i}	0.90±0.01^{g}	0.82±0.01^{g}	0.92±0.01^{hi}	0.85±0.02^{g}	0.87±0.01^{gh}	5,878	5.98^{bc}
180	0.80±0.03^{i}	0.88±0.02^{h}	0.81±0.01^{g}	0.91±0.02^{i}	0.84±0.02^{g}	0.86±0.03^{h}	5,950	6.02^{bc}

หมายเหตุ

- ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ปรากฏในแถวตั้งเดียวกันนั้น ถ้าเป็นอักษรที่แตกต่างกันแสดงว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ $P<0.05$
- ค่าเฉลี่ยจากการทดสอบ 2 ครั้ง แต่ละครั้งใช้ผู้ทดสอบชิม 8 ท่าน
- ค่า 1.00 เป็นค่าเท่ากับ Ideal product

ตารางที่ 7 ผลการทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัสผลิตภัณฑ์ซุปเห็ดบรรจุกระป๋อง

เวลา (วัน)	การเปลี่ยนแปลงสี	กลิ่นแปลกปลอม	ความข้น	รสชาติแปลกปลอม	ความชอบโดยรวม	การยอมรับโดยรวม	ค่าความหนืด ^{ns} (cp)	ค่า pH
0	0.98 ± 0.01^{a}	0.99 ± 0.01^{a}	0.98 ± 0.01^{a}	0.99 ± 0.01^{a}	0.98 ± 0.01^{a}	0.99 ± 0.01^{a}	$10,876^{ab}$	5.68^{abc}
15	0.98 ± 0.01^{a}	0.98 ± 0.02^{abc}	0.98 ± 0.01^{ab}	0.98 ± 0.01^{abc}	0.98 ± 0.01^{ab}	0.97 ± 0.01^{ab}	$10,792^{b}$	5.85^{a}
30	0.97 ± 0.02^{ab}	0.98 ± 0.01^{ab}	0.97 ± 0.01^{ab}	0.98 ± 0.02^{ab}	0.97 ± 0.01^{ab}	0.96 ± 0.01^{ab}	$10,597^{c}$	5.69^{abc}
45	0.96 ± 0.03^{ab}	0.98 ± 0.02^{abc}	0.96 ± 0.01^{abc}	0.97 ± 0.01^{abcd}	0.97 ± 0.01^{ab}	0.96 ± 0.01^{ab}	$10,564^{c}$	5.73^{abc}
60	0.95 ± 0.04^{bc}	0.97 ± 0.01^{abc}	0.96 ± 0.03^{abc}	0.96 ± 0.02^{bcde}	0.96 ± 0.02^{ab}	0.96 ± 0.02^{ab}	$10,297^{d}$	5.79^{abc}
75	0.95 ± 0.05^{bc}	0.96 ± 0.02^{abcd}	0.96 ± 0.03^{abc}	0.96 ± 0.01^{cdef}	0.95 ± 0.02^{abc}	0.95 ± 0.02^{bc}	$10,591^{c}$	5.82^{ab}
90	0.93 ± 0.01^{cd}	0.95 ± 0.03^{bcd}	0.95 ± 0.05^{abc}	0.95 ± 0.01^{efg}	0.95 ± 0.04^{abc}	0.95 ± 0.02^{bcd}	$10,990^{a}$	5.70^{abc}
105	0.92 ± 0.04^{de}	0.95 ± 0.02^{cd}	0.95 ± 0.05^{abc}	0.95 ± 0.01^{defg}	0.94 ± 0.05^{bc}	0.93 ± 0.03^{de}	$10,975^{a}$	5.61^{c}
120	0.89 ± 0.02^{ef}	0.94 ± 0.01^{de}	0.95 ± 0.06^{bc}	0.94 ± 0.01^{fgh}	0.92 ± 0.05^{cd}	0.93 ± 0.03^{cde}	$10,932^{ab}$	5.73^{abc}
135	0.87 ± 0.03^{fg}	0.94 ± 0.03^{de}	0.93 ± 0.02^{cd}	0.94 ± 0.01^{gh}	0.90 ± 0.04^{de}	0.92 ± 0.01^{ef}	$10,947^{a}$	5.69^{abc}
150	0.87 ± 0.04^{fg}	0.93 ± 0.04^{de}	0.92 ± 0.02^{cde}	0.94 ± 0.03^{fgh}	0.89 ± 0.06^{de}	0.90 ± 0.04^{ef}	$10,054^{e}$	5.68^{bc}
165	0.86 ± 0.03^{g}	0.93 ± 0.05^{e}	0.90 ± 0.04^{de}	0.93 ± 0.03^{h}	0.89 ± 0.05^{de}	0.90 ± 0.06^{f}	$10,076^{e}$	5.71^{abc}
180	0.85 ± 0.04^{g}	0.91 ± 0.04^{e}	0.90 ± 0.03^{e}	0.93 ± 0.03^{h}	0.88 ± 0.02^{e}	0.89 ± 0.01^{f}	$10,012^{e}$	5.70^{abc}

หมายเหตุ
- ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ปรากฏในแถวตั้งเดียวกันนั้น ถ้าเป็นอักษรที่แตกต่างกันแสดงว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ $P<0.05$
- ค่าเฉลี่ยจากการทดสอบ 2 ครั้ง แต่ละครั้งใช้ผู้ทดสอบชิม 8 ท่าน
- ค่า 1.00 เป็นค่าเท่ากับ Ideal product

ตารางที่ 8 ผลการวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการผลิตภัณฑ์ซุปเห็ดกึ่งสำเร็จรูปบรรจุในถุงอะลูมิเนียมฟอยล์

รายการที่ทดสอบ	ปริมาณที่พบ (ต่อ 100 กรัม)
1. พลังงานทั้งหมด (Total Calories) : กิโลแคลอรี	29.67
2. พลังงานจากไขมัน : กิโลแคลอรี	8.19
3. คาร์โบไฮเดรตทั้งหมด : กรัม	4.12
4. โปรตีน / Protein (Total Nitrogen) : กรัม	1.25
5. ไขมันทั้งหมด (Total Fat) : กรัม	0.91
6. ไขมันอิ่มตัว (Saturated Fat) : กรัม	0.66
7. โคเลสเตอรอล (Cholesteral) : มิลลิกรัม	0.00
8. ใยอาหาร (Dietary Fiber) : กรัม	2.63
9. น้ำตาลทั้งหมด (Total Sugar) 3 ตัว : กรัม	1.04
10. Vitamin A : ไมโครกรัม	0.00
11. Vitamin B1 : มิลลิกรัม	0.01
12. Vitamin B2 : มิลลิกรัม	0.01
13. โซเดียม (Na) : มิลลิกรัม	4.99
14. แคลเซียม (Ca) : มิลลิกรัม	3.86
15. เหล็ก (Fe) : มิลลิกรัม	0.98

3.5 ผลการวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการ

คุณค่าทางโภชนาการผลิตภัณฑ์ซุปเห็ดกึ่งสำเร็จรูปบรรจุในถุงอะลูมิเนียมฟอยล์ ให้พลังงานทั้งหมด 29.67 กิโลแคลอรี ต่อ 100 กรัม มีคาร์โบไฮเดรต โปรตีน และสารอาหารอื่น ๆ ดังตารางที่ 8

3.6 ผลการวิเคราะห์จุลินทรีย์

เมื่อวิเคราะห์จุลินทรีย์ซุปเห็ดบรรจุในถุงอะลูมิเนียมฟอยล์ที่เก็บรักษาที่อุณภูมิห้อง 3 เดือนและ 6 เดือน ปริมาณจุลินทรีย์อยู่ในเกณฑ์กำหนดตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก. 462-2548 ซุปกึ่งสำเร็จรูป)

3.7 ผลการศึกษาความชอบและการยอมรับของผู้บริโภค

ศึกษาความชอบและการยอมรับทางประสาทสัมผัสผลิตภัณฑ์ซุปเห็ดกึ่งสำเร็จรูปรสชาติต่าง ๆ ผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 10 พบว่า รสธรรมดาได้คะแนนความชอบโดยรวม รสชาติ ความข้น กลิ่นรส ไม่ต่างกับทางการค้าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางที่ 9 ผลการทดสอบปริมาณจุลินทรีย์ผลิตภัณฑ์ซุปเห็ดบรรจุในถุงอะลูมิเนียมฟอยล์หลังจากทำการผลิต 3 เดือน และ 6 เดือน

รายการที่ทดสอบ	ปริมาณที่พบ (3 เดือน)	ปริมาณที่พบ (6 เดือน)
1. จำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด (Aerobic Plate count)	62,000 CFU/g	70,000 CFU/g
2. รา	น้อยกว่า 10 CFU/g	น้อยกว่า 10 CFU/g
3. *Clostridium perfringens*	ไม่พบ ใน 0.1 g	ไม่พบ ใน 0.1 g
4. *Escherichia coli*	น้อยกว่า 3 MPN/g	น้อยกว่า 3 MPN/g
5. *Staphylococcus aureus*	ไม่พบ ใน 0.1 g	ไม่พบ ใน 0.1 g
6. *Salmonella spp.*	ไม่พบ ใน 25 g	ไม่พบ ใน 25 g

ตารางที่ 10 คะแนนความชอบและการยอมรับทางประสาทสัมผัสผลิตภัณฑ์ซุปเห็ดกึ่งสำเร็จรูป

ผลิตภัณฑ์ซุปเห็ดกึ่งสำเร็จรูป	คะแนนความชอบเฉลี่ย ± เบี่ยงเบนมาตรฐาน						การยอมรับ (ร้อยละ)
	ลักษณะปรากฏ	สี	กลิ่นรส	ความข้น	รสชาติโดยรวม	ความชอบโดยรวม	
รสธรรมดา	$5.51^{b}\pm0.78$	$5.49^{b}\pm0.94$	$5.33^{b}\pm1.17$	$5.14^{bc}\pm1.24$	$5.37^{b}\pm1.09$	$5.34^{b}\pm1.16$	56.84^{b}
รสต้มยำ	$4.78^{a}\pm1.01$	$4.84^{a}\pm1.05$	$4.38^{a}\pm1.25$	$4.42^{a}\pm1.18$	$4.17^{a}\pm1.18$	$4.15^{a}\pm1.16$	36.84^{a}
รสแกงเขียวหวาน	$4.77^{a}\pm1.1$	$4.84^{a}\pm1.12$	$4.42^{a}\pm1.21$	$4.78^{ab}\pm1.30$	$4.28^{a}\pm1.26$	$4.28^{a}\pm1.15$	37.89^{a}
ทางการค้า	$5.89^{c}\pm0.88$	$6.14^{c}\pm0.95$	$5.46^{b}\pm1.09$	$5.44^{c}\pm1.14$	$5.56^{b}\pm1.05$	$5.48^{b}\pm1.04$	65.26^{b}

หมายเหตุ ตัวเลขที่มีอักษรกำกับต่างกันจากแถวตั้งเดียวกัน แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

4. สรุป (Conclusion)

การศึกษานี้ได้สูตรต้นแบบซุปเห็ดสดที่ให้พลังงาน โปรตีน และไขมันต่ำ โดยมีส่วนประกอบเป็น เห็ดอูดิมาน 150 กรัม หอมหัวใหญ่ 100 กรัม มันฝรั่ง 150 กรัม กระเทียม 30 กรัม เนย 30 กรัม พริกไทย 4 กรัม เกลือป่น 4 กรัม ครีม 4 กรัม และน้ำซุป 732 กรัม และกระบวนการที่เหมาะสมในการผลิตคือการอบลมร้อนแบบแยกส่วนประกอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง การบรรจุในกระป๋องและซองอะลูมิเนียมฟอยล์สามารถเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 180 วัน แต่ซุปเห็ดที่บรรจุในอะลูมิเนียมฟอยล์มีค่าความหนืด ความชอบโดยรวม รสชาติโดยรวม และกลิ่นรส สูงกว่าซุปเห็ดบรรจุกระป๋องอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และไม่แตกต่างจากซุปเห็ดทางการค้า สามารถนำผลงานวิจัยไปถ่ายทอดให้ผู้ประกอบการธุรกิจอาหารนำไปพัฒนาผลิตภัณฑ์จำหน่ายต่อไปได้

5. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณกรมวิทยาศาสตร์บริการที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัยและกรมวิชาการเกษตรที่สนับสนุนสถานที่และอุปกรณ์ในการทำวิจัย

6.เอกสารอ้างอิง (References)

[1] อัจฉรา พยัพพานนท์. *เห็ดสกุล Oudemansiella จะเป็นเห็ดพาณิชย์ ใน : เห็ดไทย 2545.* กรุงเทพฯ : สมาคมนักวิจัยและเพาะเห็ดแห่งประเทศไทย, 2545.

[2] อัจฉรา พยัพพานนท์ พจนา ตระกูลสุขรัตน์ และอุทัยวรรณ แสงวณิช. *การรวบรวบและคัดเลือกสายพันธุ์เห็ด Oudemansiella spp. จากแหล่งต่าง ๆ เพื่อเป็นพันธุ์ทางการค้า ใน : เห็ดไทย 2555.* กรุงเทพฯ : สมาคมนักวิจัยและเพาะเห็ดแห่งประเทศไทย, 2555. หน้า 5-13.

[3] ROSA, LUIZ H., BETANIA B. COTA, KATIA M.G. MACHADO, CARLOS A. ROSA and CARLOS L. ZANI. Antifungal and other biological activities from *Oudemansiella canarii (Basidiomycota). World Journal of Microbiology and Biotechnology.* 2005, **21**(6-7), 983-987.

[4] ANKE, T., H.T. HECHT, G. SCHRAMM and W. STREGLICH. Antibiotics from basidiomycetes. IX. Oudemansin an antifungal antibiotic from *Oudemansiella mucia* (Schrader ex Fr.) Hoehnel (Agaricales). *Journal of Antibiotics.* 1979, **32**(11), 1112-1117.

[5] ANKE, T. The antifungal strobilurins and their possible ecological role. *Canadian Journal of Botany.*1995, **73**, (Suppl. 1), 940-945.

[6] MAZIERO, ROSANA., VALERIA CAVAZZONI and VERA LUCIA RAMOS, BONONI. Screening of basidiomyces for the production of exopolysaccharide and biomass in submerged culture. *Revista de Microbiologia.* 1999, **30**(1), 77-84.

[7] XIANG ZOU. Optimization of nutritional factors for exopolysaccharide production by submerged cultivation of the medicinal mushroom *Oudemansiella radicata. World Journal of Microbiology and Biotechnology*. 2005, **21**(6-7), 1267-1271.

[8] MICROBIAL CHEMISTRY RESERCH FOUNDATION. Hypotensive agent oudenone, its salts and process for production and preparation thereof. HAMAO, U., T. OSAMN and T. TAKENCHI. *United States patent US 3, 835,170A*. 1974-09-10.

[9] TSANTRIZOS, Y.S. and F, ZHOU. Biosynthesis of the hypotensive metabolite oudenone by Oudemansiella radicata. *J. Org. Chem.* 1995, **60**(21), 6922-6930.

[10] FISHER, R.A. and F. YATES. *Statistical Tables.* Edinburgh and London, England : Oliver and Boyd, 1942.

[11] ไพโรจน์ วิริยจารี. *การประเมินทางประสาทสัมผัส (Sensory Evaluation).* เชียงใหม่ : คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2545.

[12] ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS. *Official methods of analysis of AOAC international*. 20th ed. Rockville, Maryland : AOAC International. 2016.

[13] US.FOOD AND DRUG ADMINISTRATION (FDA). *Bacteriological Analytical Manual (BAM) ; (Chapter 3).* USA : Food and drug administration and applied nutrition center for food safety. 2001.

[14] US.FOOD AND DRUG ADMINISTRATION (FDA). *Bacteriological Analytical Manual (BAM) ; (Chapter 6).* USA : Food and drug administration and applied nutrition center for food safety. 2001.

[15] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 7251: 2005 (E). Microbiology of food and animal feeding stuffs -- Horizontal method for the detection and enumeration of presumptive Escherichia coli -- Most probable number technique. 2005.*

[16] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 6579: 2002. Microbiology of food and animal feeding stuffs -- Horizontal method for the detection of Salmonella spp. 2002.*

[17] ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS. *Official methods of analysis of AOAC International ; 2012.2003.07.* 19th ed. Gaithersburg, Md. : AOAC International. 2012.

[18] ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS. *Official methods of analysis of AOAC International ; 2012.997.02.* 19th ed. Gaithersburg, Md. : AOAC International. 2012.

การศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าดัชนีความแข็งเชิงกด ของฟองน้ำลาเท็กซ์

Study of factors effecting indentation hardness index of natural latex foam

2

กาจพันธ์ สกุลแก้ว[1*], ประเสริฐ แซ่จู[1]
Kartpan Sakulkaew[1*], Prasert Saeju[1]

บทคัดย่อ

ฟองน้ำลาเท็กซ์ทำมาจากน้ำยางธรรมชาติมีลักษณะเป็นรูพรุน ระบายอากาศและรองรับน้ำหนักกดได้ดีจึงนิยมใช้ทำเป็นผลิตภัณฑ์หมอนและที่นอน ค่าดัชนีความแข็งเชิงกดเป็นสมบัติที่สำคัญอันหนึ่งซึ่งสะท้อนถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ฟองน้ำลาเท็กซ์ได้เป็นอย่างดี งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อค่าดัชนีความแข็งเชิงกดของฟองน้ำลาเท็กซ์ตามวิธีการทดสอบในมาตรฐาน มอก. 2747-2559 และ ISO 2439-2008 (Method A) เช่น ความหนาแน่น ความหนาของชิ้นทดสอบ ตำแหน่งที่ตัดตัวอย่างเพื่อนำมาเตรียมเป็นชิ้นทดสอบ ซึ่งผลจากการศึกษาพบว่า ปัจจัยต่าง ๆ เหล่านี้มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อผลการวัดดัชนีความแข็งเชิงกดของฟองน้ำลาเท็กซ์

Abstract

Latex foam made from natural rubber latex has porous texture, good ventilation, and excellent load carrying capacity; therefore, it is widely used to make products such as pillows and mattresses. Indentation hardness index is one of the major properties that reflect the quality of latex foam products. This research aims to investigate the factors, affecting the indentation hardness index determined in accordance with TIS 2747-2559, and ISO 2439-2008, for example, density, thickness, location where the test pieces were obtained. This study has shown that these factors play a significant role in determining the indentation hardness index of the latex foam.

คำสำคัญ : ฟองน้ำลาเท็กซ์ ดัชนีความแข็งเชิงกด ความหนาแน่น
Keywords : Latex foam, Indentation hardness index, Density

[1] กรมวิทยาศาสตร์บริการ กองวัสดุวิศวกรรม
*Corresponding author e-mail address: kartpan@dss.go.th

1. บทนำ (Introduction)

ความแข็ง (hardness) หรือดัชนีความแข็งเชิงกด (indentation hardness index) เป็นสมบัติพื้นฐานที่สำคัญของฟองน้ำลาเท็กซ์ ซึ่งส่งผลต่อความสามารถในการรองรับน้ำหนักกด และความยากง่ายในการทำให้ฟองน้ำลาเท็กซ์นั้นเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเมื่อได้รับแรงหรือน้ำหนักกด ค่าดัชนีความแข็งเชิงกดนิยมใช้ในการกำหนดชั้นคุณภาพของฟองน้ำลาเท็กซ์สำหรับทำผลิตภัณฑ์ประเภทต่าง ๆ เช่น ฟองน้ำลาเท็กซ์สำหรับทำที่นอน มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของประเทศมาเลเซีย [1] กำหนดความอ่อนแข็งด้วยค่าดัชนีความแข็งเชิงกด ดังนี้ ฟองน้ำลาเท็กซ์ประเภทนิ่มที่ดัชนีความแข็งเชิงกดมีค่าน้อยกว่า 100 นิวตัน ฟองน้ำลาเท็กซ์ประเภทแข็งปานกลาง ที่ดัชนีความแข็งเชิงกดมีค่าตั้งแต่ 100 นิวตัน ถึง 170 นิวตัน และฟองน้ำลาเท็กซ์ประเภทแข็ง ที่ดัชนีความแข็งเชิงกดมีค่ามากกว่า 170 นิวตัน สำหรับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของไทย มาตรฐานเลขที่ มอก. 2747-2559 กำหนดประเภทความแข็งของฟองน้ำลาเท็กซ์สำหรับทำที่นอนโดยใช้ค่าดัชนีความแข็งเชิงกดร่วมกับค่าความหนาแน่น ดังนี้ ฟองน้ำลาเท็กซ์ประเภทนิ่ม ที่ดัชนีความแข็งเชิงกดมีค่าน้อยกว่า 100 นิวตัน และมีความหนาแน่น อยู่ระหว่าง 61 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ถึง 70 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรฟองน้ำลาเท็กซ์ประเภทแข็งปานกลาง ที่ดัชนีความแข็งเชิงกดมีค่าตั้งแต่ 100 นิวตัน ถึง 170 นิวตัน และมีความหนาแน่น อยู่ระหว่าง 71 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ถึง 80 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ฟองน้ำลาเท็กซ์ประเภทแข็ง ที่ดัชนีความแข็งเชิงกดมีค่ามากกว่า 170 นิวตัน และมีความหนาแน่น อยู่ระหว่าง 81 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ถึง 90 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร นอกจากนั้นค่าดัชนีความแข็งเชิงกดสามารถนำไปใช้ในการกำหนดคุณภาพของผลิตภัณฑ์ฟองน้ำสำหรับใช้ทำที่นอนผู้ป่วยได้อีกด้วย [2] โดยรายงานค่าความแข็งในรูปของ SAG-index หรือ support factor ซึ่งมีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักกดที่ทำให้ชิ้นทดสอบยุบตัวลงไปร้อยละ 65 ของความหนาเริ่มต้นต่อน้ำหนักกดที่ทำให้ชิ้นทดสอบยุบตัวลงไปร้อยละ 25 ของความหนาเริ่มต้น ค่า SAG-index มีค่าแปรผกผันตรงกับระดับของการยุบและห่อตัวของฟองน้ำไปตามโครงสร้างร่างกายของผู้นอน ซึ่งส่งผลต่อสุขภาพของข้อต่อและโครงสร้างกระดูกรวมไปถึงประสิทธิภาพของการนอน (รูปที่ 1) ซึ่งผลการทดสอบดังกล่าวสามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบสมบัติของวัสดุ รวมทั้งโครงสร้างของที่นอนให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมได้

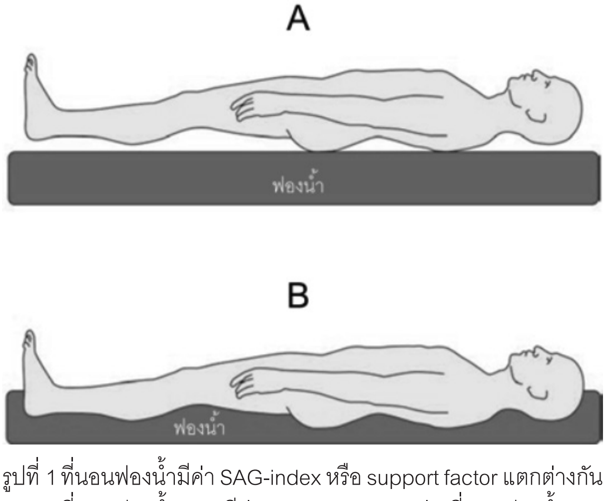
วิธีมาตรฐานสำหรับวัดความแข็งของฟองน้ำลาเท็กซ์ มีอยู่หลายวิธี เช่น ASTM D 1055 กำหนดให้ใช้แผ่นกดรูปวงกลมแบนกดลงไปบนชิ้นงานด้วยอัตราเร็วในการกดที่กำหนด เพื่อให้ชิ้นทดสอบยุบตัวร้อยละ 25 จากความหนาเริ่มต้น ค่าแรงอ่านที่อ่านได้ หน่วยนิวตันคือ ค่าดัชนีความแข็งของชิ้นทดสอบ (รูปที่ 2) สำหรับ ISO 2439 [3] กำหนดวิธีวัดความแข็งของฟองน้ำลาเท็กซ์ไว้ทั้งหมด 5 วิธี โดยแต่ละวิธีให้ข้อมูลที่ได้จากผลการวัดแตกต่างกัน เช่นวิธี A ผลที่ได้จากการวัดด้วยวิธี A เรียกว่า ดัชนีความแข็งเชิงกด ซึ่งได้จากวัดค่าแรงกด ณ วินาทีที่ 30 ภายหลังจากกดให้ชิ้นทดสอบยุบตัวและคงไว้ที่ร้อยละ 40 ของความหนาเริ่มต้น (รูปที่ 3) วิธีดังกล่าวนี้เป็นวิธีที่นิยมใช้ทั่วไปในการวัดความแข็งของฟองน้ำลาเท็กซ์

วิธี B ผลที่ได้จากการวัดด้วยวิธี B เรียกว่า Indentation hardness characteristics ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและระยะยุบตัวของฟองน้ำลาเท็กซ์ที่ ร้อยละ 25 ร้อยละ 40 และร้อยละ 65 ของความหนาเริ่มต้น

วิธี C ผลที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธี C เรียกว่า Indentation hardness check ขั้นตอนการวัดเหมือนกับวิธี A แต่การอ่านค่าแรงกดจะอ่านค่าทันทีที่ชิ้นทดสอบยุบตัวร้อยละ 40 ของความหนาเริ่มต้น วิธีดังกล่าวนี้เหมาะสำหรับการทดสอบเพื่อควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ฟองน้ำเพื่อให้เป็นไปตามเกณฑ์กำหนดของผลิตภัณฑ์ และสามารถใช้เป็นข้อมูลในการตรวจสอบกระบวนการทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับการผลิตในกรณีที่ชิ้นทดสอบไม่ผ่านเกณฑ์กำหนดของผลิตภัณฑ์

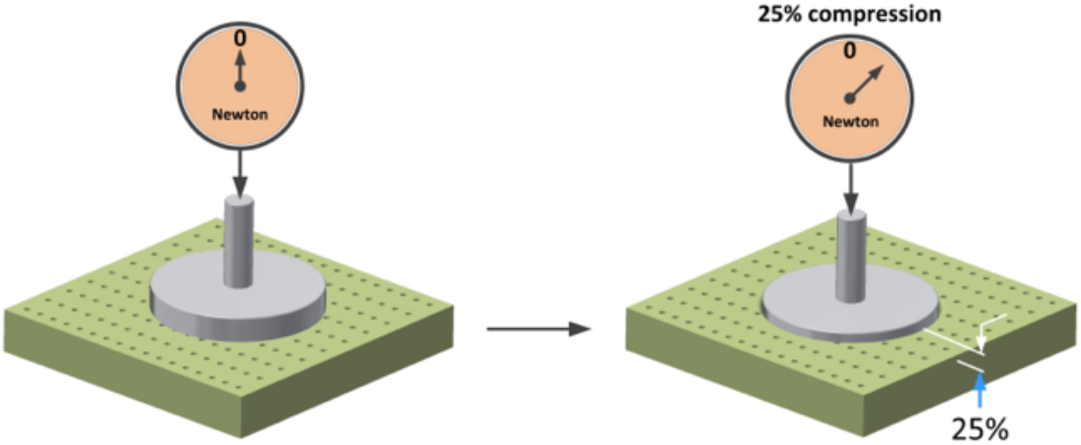
วิธี D ผลที่ได้จากการวัดด้วยวิธี D เรียกว่า Low Indentation hardness index โดยวัดค่าแรงกด ณ วินาทีที่ 20 ภายหลังจากกดให้ชิ้นทดสอบสอบยุบตัวและค้างไว้ที่ร้อยละ 25 ของความหนาเริ่มต้น วิธีดังกล่าวนี้เหมาะสำหรับใช้ในการตัดสินคุณภาพของผลิตภัณฑ์เป็นไปตามเกณฑ์กำหนดหรือไม่

วิธี E ผลที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธี E ได้แก่ สัมประสิทธิ์การยุบตัว (Compressive deflection coefficient) และ อัตราการสูญเสียความยืดหยุ่น (Hysteresis loss rate) สามารถนำผลที่ได้มาใช้เป็นข้อมูล ในการพัฒนาปรับปรุงให้วัสดุฟองน้ำนั้นให้มีค่าดัชนีความแข็งเชิงกดเหมาะสมกับการใช้งานตามที่ต้องการได้ อย่างไรก็ตามค่าดัชนีความแข็งเชิงกดที่วัดได้ไม่เพียงแต่ขึ้นอยู่กับขนาด

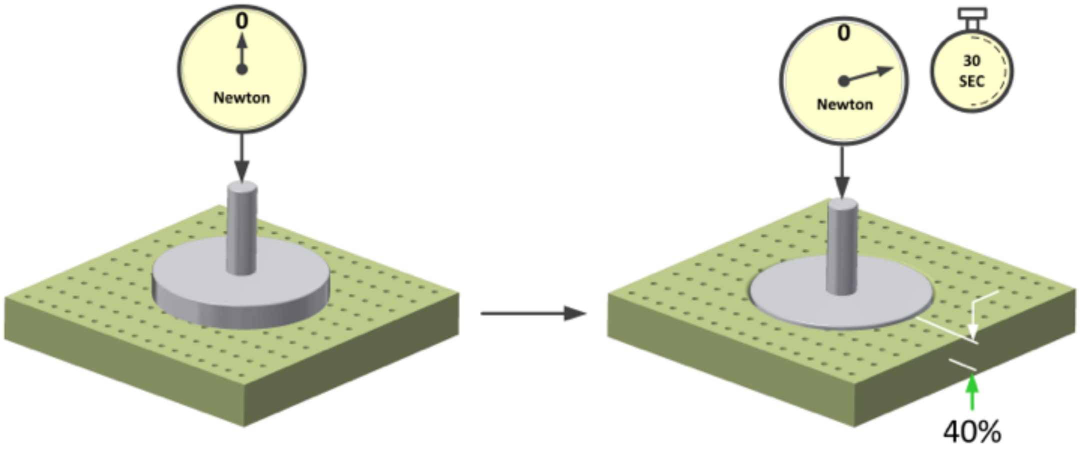


รูปที่ 1 ที่นอนฟองน้ำมีค่า SAG-index หรือ support factor แตกต่างกัน ที่นอนฟองน้ำ (A) มีค่า SAG-index สูงกว่า ที่นอนฟองน้ำ (B) ซึ่งหุ้มห่อตัวของผู้นอนได้มากกว่าที่นอนฟองน้ำ (A) [2]

ของชิ้นตามที่วิธีทดสอบมาตรฐานระบุไว้เท่านั้น ค่าดัชนีความแข็งเชิงกดได้ยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นๆ อีกด้วย ซึ่งในการศึกษา ทดลองครั้งนี้ ได้ศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ ความหนาแน่น ความหนา และตำแหน่งการเรียงตัวของแกน (Core) ที่อยู่ภายในวัสดุฟองน้ำ ที่มีผลต่อค่าดัชนีความแข็งเชิงกด เพื่อนำมาใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบผลิตภัณฑ์ให้มีสมบัติตามที่ต้องการ อีกทั้งนำไปใช้เป็นข้อมูลในการจัดทำมาตรฐานการทดสอบผลิตภัณฑ์ฟองน้ำให้มีความเหมาะสมและสามารถนำไปใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 2 ดัชนีความแข็งเชิงกดวัดโดยกดให้ชิ้นทดสอบฟองน้ำยุบตัวร้อยละ 25 ของความหนาเริ่มต้น แล้วอ่านค่าแรงกด หน่วยนิวตัน (ASTM D 1055)



รูปที่ 3 ดัชนีความแข็งเชิงกดวัดโดยกดให้ชิ้นทดสอบฟองน้ำยุบตัวร้อยละ 40 ของความหนาเริ่มต้น เป็นเวลา 30 วินาที แล้วอ่านค่าแรงกด หน่วย นิวตัน ณ วินาทีที่ 30 (ISO 2439)

2. วิธีการวิจัย (Experimental methods)

2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

2.1.1 เครื่องเตรียมชิ้นทดสอบฟองน้ำลาเท็กซ์ ประกอบด้วยใบมีดตั้งอยู่ในแนวตั้งฉากกับที่วางตัวอย่าง (รูปที่ 4) ใบมีดของเครื่องเตรียมชิ้นทดสอบขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ กำลังของแรงขับของมอเตอร์เท่ากับ 2 แรงม้า

2.1.2 เครื่อง Universal testing machine ของ Zwick model Z010 S/N 149616/2001 ใช้ในการวัดแรงกดของชิ้นทดสอบที่ระยะยุบตัวต่างๆ

2.1.3 แผ่นกดชิ้นทดสอบ ทำด้วยสแตนเลส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 200 มิลลิเมตร และมีความหนา 10 มิลลิเมตร

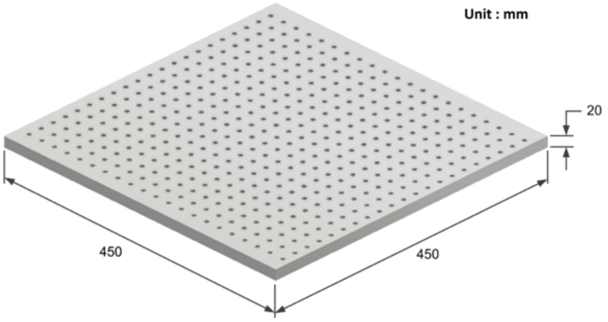
2.1.4 แผ่นรองชิ้นทดสอบ มีรูพรุนขนาด 6 มิลลิเมตร ระยะห่างระหว่างจุดกึ่งกลางของรูเจาะ (Pitch) 20 มิลลิเมตร (รูปที่ 5)

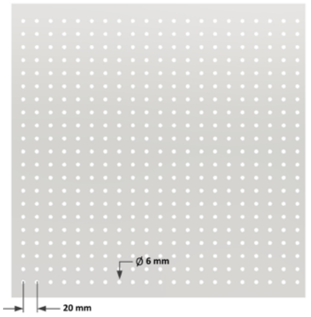
2.1.5 เครื่อง Profile projector ของ Mitutoyo รุ่น PJ-3000 ใช้ในการวัดความกว้างและความยาวของชิ้นทดสอบความหนาแน่น

2.1.6 Horizontal linear gauge ของ Mitutoyo ติดตั้งรวมอยู่กับ AFG digital force gauge ของ Mecmesin เพื่อใช้ควบคุมแรงกดให้อยู่ในช่วง 90 พาสคัล–110 พาสคัล ตามข้อกำหนดใน มอก. 2747-2559 อุปกรณ์นี้ใช้ในการวัดความหนาของชิ้นทดสอบความหนาแน่น

2.1.7 เครื่องชั่งอ่านค่าละเอียด 0.1 มิลลิกรัม ของ Satorious S/N 25705930 สำหรับชั่งน้ำหนักของชิ้นทดสอบความหนาแน่น

รูปที่ 4 เครื่องเตรียมชิ้นทดสอบฟองน้ำลาเท็กซ์



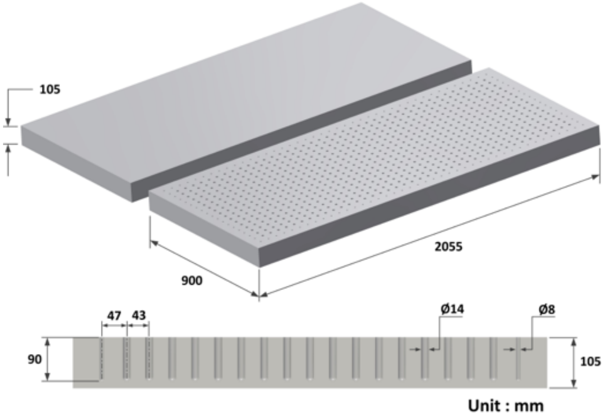


รูปที่ 5 แผ่นรองชิ้นทดสอบมีรูพรุนเพื่อทำหน้าที่ระบายอากาศที่อยู่ภายในของชิ้นทดสอบฟองน้ำลาเท็กซ์

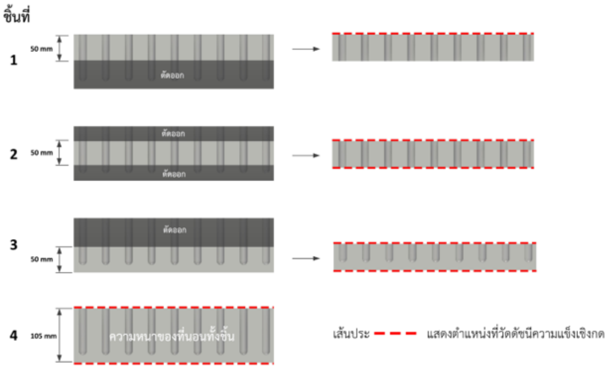
2.2 การเตรียมชิ้นทดสอบ

2.2.1 ชิ้นทดสอบดัชนีความแข็งเชิงกด

นำฟองน้ำลาเท็กซ์ มาวางบนแท่นวางตัวอย่างของเครื่องเตรียมตัวอย่าง ปรับเลื่อนแผ่นประคองตัวอย่างให้แนบสัมผัสกับชิ้นตัวอย่างด้วยแรงที่เหมาะสม ไม่ออกแรงบีบตัวอย่างให้เสียรูป ปรับเลื่อนแท่นวางตัวอย่างเพื่อป้อนตัวอย่างด้วยอัตราเร็วคงที่เข้าหาใบมีด เพื่อตัดเป็นชิ้นทดสอบให้มีขนาด ความกว้าง 380 มิลลิเมตร ความยาว 380 มิลลิเมตร และความหนา 50 มิลลิเมตร สำหรับชิ้นทดสอบที่ใช้ในการศึกษาผลของตำแหน่งของการวัดที่มีต่อค่าดัชนีความแข็งเชิงกดของฟองน้ำลาเท็กซ์ ใช้ชิ้นทดสอบที่เตรียมจากที่นอนฟองน้ำลาเท็กซ์ (รูปที่ 6) ในการเตรียมชิ้นทดสอบได้ตัดชิ้นทดสอบที่ตำแหน่งต่าง ๆ (รูปที่ 7) แล้วนำชิ้นทดสอบที่เตรียมได้มาหาค่าดัชนีความแข็งเชิงกด ในกรณีที่ใช้ชิ้นทดสอบเดียวกันในการวัดค่าดัชนีความแข็งเชิงกด ในการวัดค่าแต่ละครั้งจะให้ชิ้นทดสอบพักคืนตัวเป็นเวลา 48 ชั่วโมง แล้วจึงนำมาทดสอบ



รูปที่ 6 ขนาดตัวอย่างที่นอนฟองน้ำที่นำมาใช้เตรียมชิ้นทดสอบเพื่อศึกษาของค่าดัชนีความแข็งเชิงกดของชิ้นทดสอบที่เตรียมจากตำแหน่งต่าง ๆ



รูปที่ 7 แสดงภาพตัดขวางและตำแหน่งที่ตัดตัวอย่างเพื่อเตรียมเป็นชิ้นทดสอบ (เส้น --- คือ ด้านที่วัดค่าดัชนีความแข็งเชิงกด)

2.2.2 ชิ้นทดสอบความหนาแน่น

นำฟองน้ำลาเท็กซ์ (ประเภทนิ่ม แข็งปานกลาง และแข็ง) มาวางบนแท่นวางตัวอย่างของเครื่องเตรียมตัวอย่าง ปรับเลื่อนแผ่นประคองตัวอย่างให้แนบสัมผัสกับชิ้นตัวอย่างด้วยแรงที่เหมาะสม ไม่ออกแรงบีบตัวอย่างให้เสียรูป ปรับเลื่อนแท่นวางตัวอย่างเพื่อป้อนตัวอย่างด้วยอัตราเร็วคงที่เข้าหาใบมีด ตัดฟองน้ำลาเท็กซ์เป็นชิ้นทดสอบที่มีลักษณะตันเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ความกว้างด้านละ 50±1 มม. และความหนา 40±1 มม. เตรียมชิ้นทดสอบความหนาแน่นจำนวน 5 ชิ้น ของความแข็งแต่ละประเภท

2.3 วัดดัชนีความแข็งเชิงกด

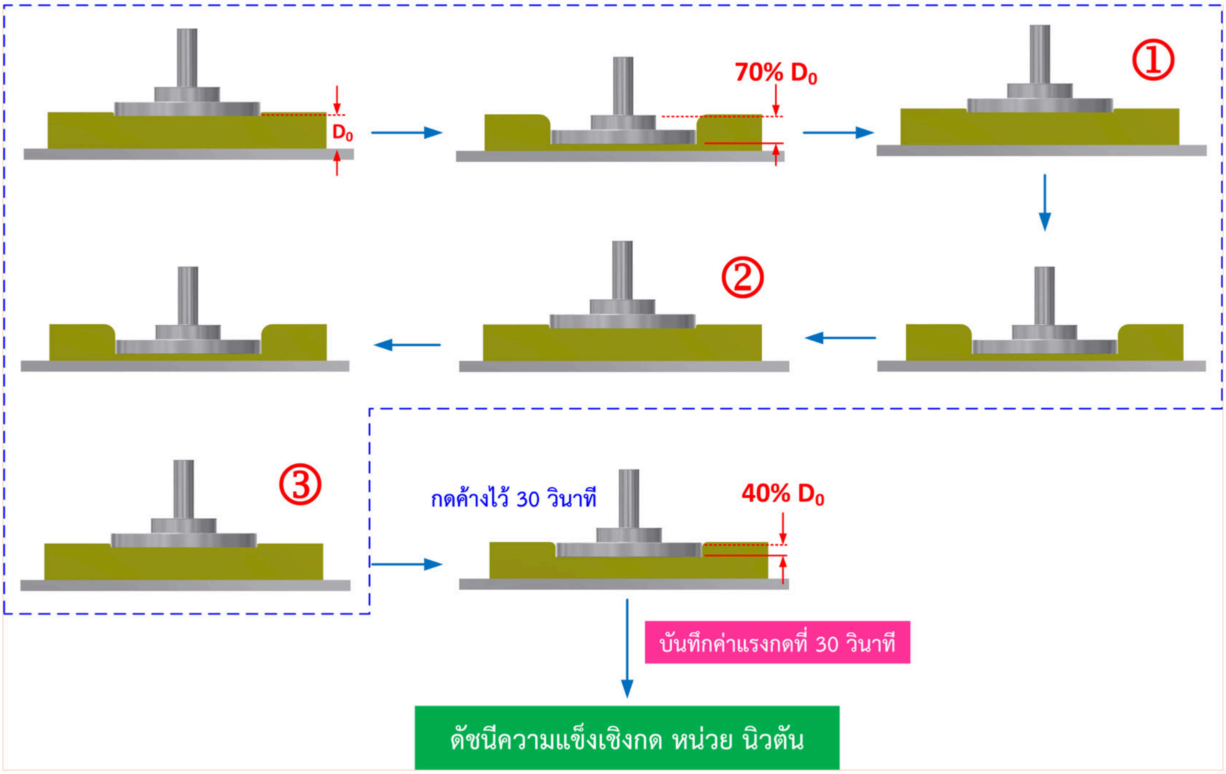
ในการศึกษาทดลองครั้งนี้ใช้วิธีวัดค่าดัชนีความแข็งเชิงกดตามมาตรฐาน มอก. 2747 - 2559 [4] ซึ่งอ้างถึงวิธีการทดสอบดัชนีความแข็งเชิงกดตามมาตรฐาน ISO 2439 ดังนี้

2.3.1 ยึดแผ่นกดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 200 มิลลิเมตรกับ Load cell ขนาด 10 kN ของเครื่อง Universal testing machine

2.3.2 วางชิ้นทดสอบบนแผ่นรองชิ้นทดสอบ (รูปที่ 5)

2.3.3 กดชิ้นทดสอบด้วยแรงกด 5 นิวตัน ด้วยอัตราเร็ว 100 มิลลิเมตรต่อนาที ที่จุดนี้เครื่องทดสอบจะบันทึกความหนาเริ่มต้นของชิ้นทดสอบ และปรับค่าแรงกดให้มีค่าเป็นศูนย์

2.3.4 กดชิ้นทดสอบด้วยแผ่นกดให้ชิ้นทดสอบยุบตัวลงไปร้อยละ 70 จากความหนาเริ่มต้น ด้วยอัตราเร็ว 100 มิลลิเมตรต่อนาที แล้วให้แผ่นกดเคลื่อนที่กลับมาที่ตำแหน่งเริ่มต้น ทำซ้ำกันเช่นนี้จนกระทั่งครบ 3 รอบ กดให้ชิ้นทดสอบยุบตัวอีกครั้งหนึ่ง ที่ระยะยุบตัวร้อยละ 40 จากความหนาเริ่มต้น แล้วกดค้างไว้ที่จุดนี้เป็นเวลา 30 วินาที อ่านค่าแรงกดที่จุดนี้ที่วินาทีที่ 30 ค่าที่อ่านได้คือ ค่าดัชนีความแข็งเชิงกดของชิ้นทดสอบ มีหน่วยเป็นนิวตัน แผนภาพสรุปการวัดดัชนีความแข็งเชิงกดของฟองน้ำลาเท็กซ์ ตามวิธีของ ISO 2439 (รูปที่ 8)



รูปที่ 8 การวัดดัชนีความแข็งเชิงกดของฟองน้ำลาเท็กซ์ ตามมาตรฐาน ISO 2439 ค่าดัชนีความแข็งเชิงกดวัดโดยกดให้ชิ้นทดสอบ ยุบ-คลายตัวที่ระยะยุบตัวร้อยละ 70 จำนวน 3 รอบ ในรอบที่ 4 กดให้ชิ้นทดสอบยุบตัวร้อยละ 40 แล้วคงไว้ที่ตำแหน่งนี้เป็นเวลา 30 วินาที ค่าแรงกด (หน่วยนิวตัน) ที่อ่านได้ที่วินาทีที่ 30 คือ ค่าดัชนีความแข็งเชิงกด (D0 คือ ความหนาเริ่มต้นของชิ้นทดสอบที่กดด้วยแรง 5 นิวตัน และใช้เป็นความหนาอ้างอิงในการคำนวณระยะยุบที่ระยะต่าง ๆ ของชิ้นทดสอบ)

2.4 **วัดความหนาแน่น**

2.4.1 ชั่งน้ำหนักของชิ้นทดสอบด้วยเครื่องชั่งละเอียด 0.1 มิลลิกรัม

2.4.2 วัดมิติของชิ้นทดสอบด้วยเครื่องมือในข้อ 2.1.5 และ 2.1.6 คำนวณหาความหนาแน่นจากสูตร

$$\rho = \frac{m}{v} \times 10^6$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่น หน่วยกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

m คือ น้ำหนัก หน่วยกรัม

v คือ ปริมาตร หน่วยลูกบาศก์มิลลิเมตร

2.5 **วัดแรงกดที่ระยะยุบตัวต่าง ๆ**

2.5.1 ยึดแผ่นกดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 200 มิลลิเมตร กับ load cell ขนาด 10 kN ของเครื่อง universal testing machine

2.5.2 วางชิ้นทดสอบบนแท่นวางแผ่นรองชิ้นทดสอบ

หมายเหตุ เลือกใช้ชิ้นทดสอบที่มีความหนาแน่น 3 ระดับ เพื่อใช้ในการศึกษาเปรียบเทียบความสามารถในการรับแรงกด (ไม่ได้คำนึงถึงประเภทของฟองน้ำตาม มอก. 2747-2559) ดังนี้ 63.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร 73.5 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และ 90.5 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

2.5.3 กดชิ้นทดสอบด้วยแรงกด 5 นิวตัน ด้วยอัตราเร็ว 100 มิลลิเมตรต่อนาที ที่จุดนี้เครื่องทดสอบจะบันทึกความหนาเริ่มต้นของชิ้นทดสอบ และปรับค่าแรงกดให้มีค่าเป็นศูนย์

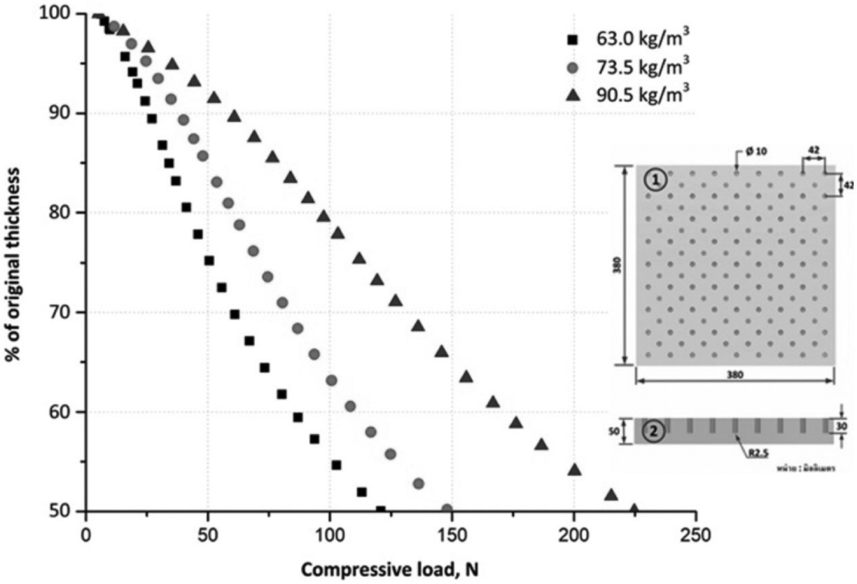
2.5.4 กดชิ้นทดสอบด้วยแผ่นกดให้ชิ้นทดสอบยุบตัวลงไปด้วยอัตราเร็ว 100 มิลลิเมตรต่อนาที อ่านค่าแรงกดที่ระยะยุบตัวต่างๆ จนกระทั่งชิ้นทดสอบยุบตัวลงไปร้อยละ 50

3. ผลและวิจารณ์ (Results and discussion)

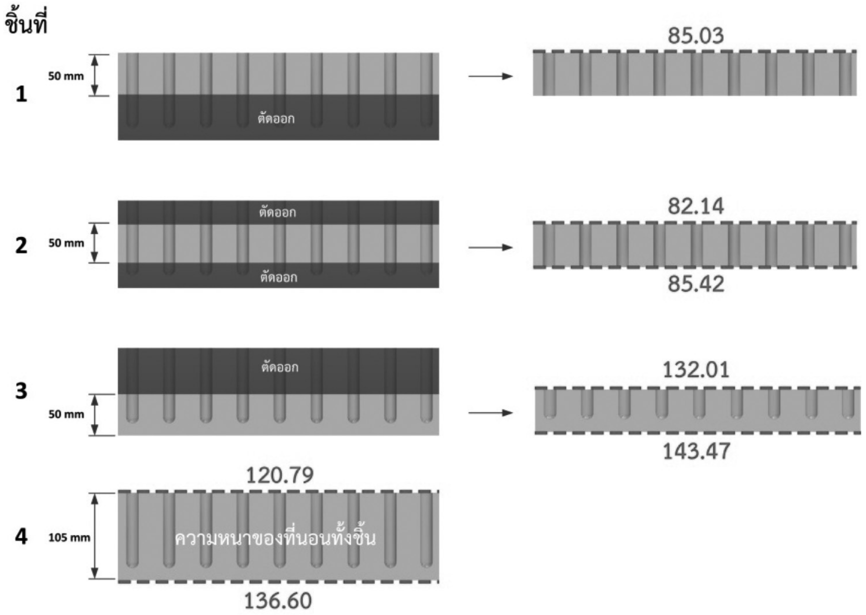
ความสัมพันธ์ระหว่างระดับของการยุบตัวของฟองน้ำลาเท็กซ์ (ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าดัชนีความแข็งเชิงกด)กับความหนาแน่น (63.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร 73.5 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และ 90.5 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) แสดงดังในรูปที่ 9 จากผลการทดลองพบว่าความสามารถในการรองรับน้ำหนักของฟองน้ำลาเท็กซ์มีค่าเพิ่มมากขึ้นตามความหนาแน่นเพิ่มขึ้น โดยฟองน้ำลาเท็กซ์ที่มีค่าความหนาแน่นมากที่สุด (90.5 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) สามารถรองรับน้ำหนักกดได้มากที่สุด จากกราฟรูปที่ 9 ที่ระยะยุบตัวร้อยละ 50 พบว่า ฟองน้ำลาเท็กซ์ที่มีความหนาแน่น 90.5 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร สามารถรองรับน้ำหนักได้ถึง 225 นิวตัน ในขณะที่ฟองน้ำลาเท็กซ์ ที่มีความหนาแน่น 63.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรรองรับน้ำหนักได้เพียง 125 นิวตัน เท่านั้น ซึ่งมีค่าลดลงประมาณสองเท่าของฟองน้ำลาเท็กซ์ที่มีความหนาแน่นสูงสุด ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามวลของเนื้อยางฟองน้ำลาเท็กซ์ที่เพิ่มขึ้นต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร (ความหนาแน่นเพิ่มขึ้น) ส่งผลทำให้ฟองน้ำมีความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ดีขึ้น และมีช่วงของการรองรับแรงกดที่กว้างมากขึ้นอีกด้วย รูปที่ 10 แสดงผลการวัดค่าดัชนีความแข็งเชิงกดที่ระดับชั้นต่าง ๆ ของฟองน้ำลาเท็กซ์ จากการผลทดลองจะเห็นได้ว่าถ้าตัดชิ้นทดสอบตรงตำแหน่งประมาณกึ่งกลางของตัวอย่าง(ชิ้นที่ 2) ค่าดัชนีความแข็งเชิงกดที่วัดอยู่ที่ค่าประมาณ 84 นิวตัน ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าดัชนีความแข็งเชิงกดของตัวอย่างชิ้นที่ 1 เมื่อเปรียบโครงสร้างของชิ้นทดสอบทั้งสองชิ้น (ชิ้นที่ 1 และชิ้นที่ 2) พบว่ามีโครงสร้างเหมือนกัน นั่นคือมีแกน แทงทะลุผ่านผิวหน้าทั้งสองด้าน ในขณะที่ตัวอย่างชิ้นที่ 3 ซึ่งมีแกนแทงทะลุผ่านเพียงด้านเดียว ค่าดัชนีความแข็งเชิงกดของด้านที่ไม่มีแกนแทงทะลุผ่านมีค่าดัชนีความแข็งเชิงกดสูงกว่าค่าดัชนีความแข็งเชิงกดที่วัดจากด้านที่มีแกนแทงทะลุผ่านซึ่งวัดจากชิ้นทดสอบชิ้นเดียวกัน

เมื่อเปรียบค่าดัชนีความแข็งเชิงกดที่วัดจากชิ้นทดสอบขนาดมาตรฐานมีความหนา 50 มิลลิเมตร (ชิ้นที่ 1 ชิ้นที่ 2 และชิ้นที่ 3) กับค่าดัชนีความแข็งเชิงกดที่วัดได้จากชิ้นผลิตภัณฑ์โดยตรง พบว่ามีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ นั่นคือ ชิ้นทดสอบที่มีแกนแทงทะลุผ่านผิวหน้าทั้งสองด้าน (ชิ้นที่ 1 และชิ้นที่ 2) มีค่าดัชนีความแข็งเชิงกดต่ำกว่าค่าดัชนีความแข็งเชิงกดที่วัดจากชิ้นผลิตภัณฑ์ซึ่งมีแกนไม่แทงทะลุผ่านไปยังผิวหน้าอีกด้านหนึ่ง (ชิ้นที่ 4) นอกจากนั้นยังพบอีกว่าค่าดัชนีความแข็งเชิงกดที่ผิวหน้าในแต่ละด้านของชิ้นทดสอบซึ่งมีแกนไม่แทงทะลุผ่านไปยังผิวหน้าอีกด้านหนึ่งของชิ้นทดสอบ (ชิ้นที่ 3) มีค่าดัชนีความแข็งเชิงกดสูงกว่าค่าดัชนีความแข็งเชิงกดที่วัดจากชิ้นผลิตภัณฑ์ (ชิ้นที่ 4) ทั้งๆ ที่ชิ้นทดสอบที่ 3 และชิ้นทดสอบที่ 4 มีโครงสร้างภายในเหมือนกันมีความแตกต่างกันเพียงเฉพาะความหนาและความยาวของแกนภายในเท่านั้น นอกจากนั้นยังพบอีกว่าแม้ว่าใช้ชิ้นทดสอบขนาดความหนามาตรฐาน ตำแหน่งที่เลือกตัดชิ้นทดสอบก็มีผลต่อค่าดัชนีความแข็งเชิงกดเช่นเดียวกัน รูปที่ 11 (A) แสดง Hysteresis loop ของฟองน้ำลาเท็กซ์ที่มีความหนาแน่นเท่ากัน (75.3 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) แต่มีขนาดความหนา และรูปแบบการจัดเรียงตัวของแกนกลางแตกต่างกัน จะเห็นได้ว่าระดับของการสูญเสียพลังงาน (พื้นที่ใน loop) โดยประมาณมีค่าใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบพื้นที่ใต้ loop ของกราฟทั้งสองพบว่าฟองน้ำลาเท็กซ์ขนาดความหนา 150 มิลลิเมตร ซึ่งมีแกนไม่ทะลุผ่านชิ้นทดสอบ มีพื้นใต้ loop มากกว่า เมื่อพิจารณาค่า Resilience (ค่าที่บอกให้ทราบถึงความสามารถในการคืนตัวของวัสดุ หาได้จากอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ใต้ loop ต่อพื้นที่ใน loop) พบว่าฟองน้ำลาเท็กซ์ขนาดความหนา 150 มิลลิเมตร มีค่า Resilience สูงกว่า ดังนั้น ชิ้นทดสอบดังกล่าวนี้มีความสามารถในการคืนตัวสูงกว่า รูปที่ 11 (B) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและระยะยุบตัว

จนกระทั่งถึงร้อยละ 40 พบว่าชิ้นทดสอบขนาดความหนา 150 มิลลิเมตร ซึ่งมีแกนไม่แทงทะลุผ่านชิ้นทดสอบ มีความสามารถในการต้านการเปลี่ยนรูปร่างและมีค่าดัชนีความแข็งเชิงกดมากกว่าชิ้นทดสอบขนาดความหนา 50 มิลลิเมตร ซึ่งผลจากการศึกษาทดลอง เหล่านี้สามารถนำใช้เป็นข้อมูลในการพิจารณาออกแบบผลิตภัณฑ์ให้มีความเหมาะสมกับการใช้งาน นอกจากนั้น ยังได้ข้อมูลสนับสนุนที่สำคัญซึ่งชี้ให้เห็นว่า การนำผลที่ได้จากการทดสอบวิธีมาตรฐานไปเปรียบเทียบกับผลที่เกิดขึ้นกับการใช้งานจริงในภาคปฏิบัติ จะต้องทำด้วยความระมัดระวังและรอบคอบ ในกรณีของฟองน้ำลาเท็กซ์ บางครั้งค่าดัชนีความแข็งเชิงกดที่วัดได้จากชิ้นทดสอบขนาดมาตรฐานไม่ได้เป็นค่าดัชนีความแข็งเชิงกดซึ่งเป็นตัวแทนที่แท้จริงของชิ้นผลิตภัณฑ์ที่ผู้บริโภคนำไปใช้งานจริง



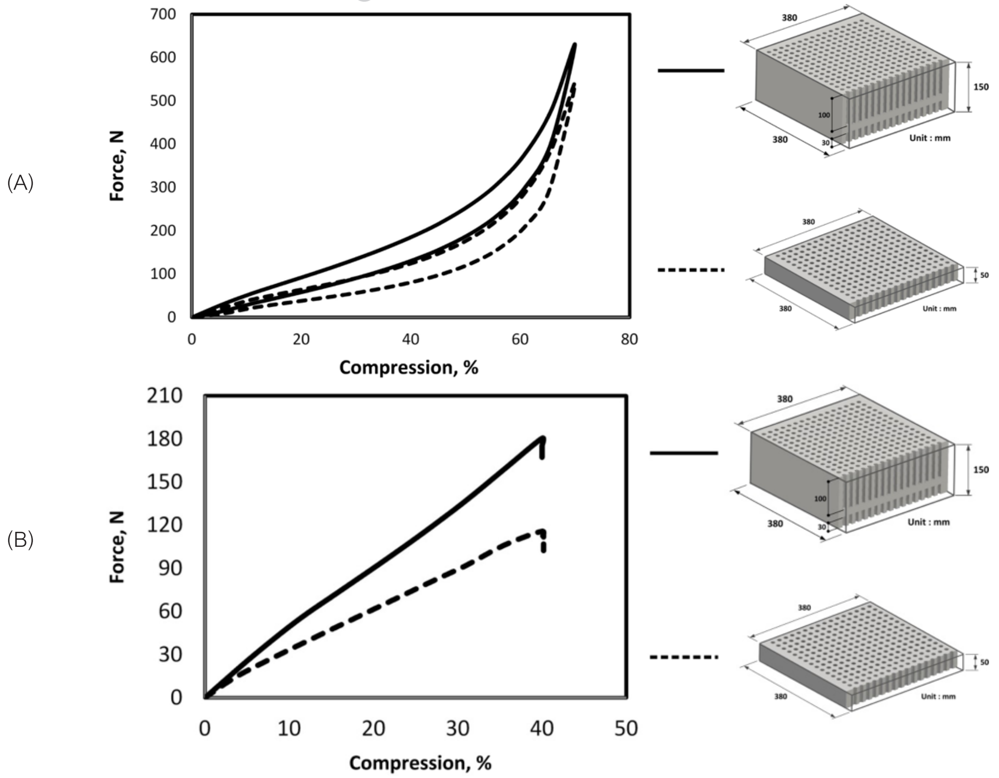
รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดที่ทำให้ชิ้นทดสอบที่มีค่าความหนาแน่นต่าง ๆ (รูปทางด้านขวามือ) เปลี่ยนแปลงรูปร่าง (ยุบตัว) ที่ระยะยุบตัวต่าง ๆ



หมายเหตุ 1. เส้นประ ---- แสดงตำแหน่งที่วัดดัชนีความแข็งเชิงกด

2. ตัวเลขที่แสดงอยู่ด้านบนและด้านล่างของเส้นประคือค่าดัชนีความแข็งเชิงกดที่อ่านได้ตำแหน่งนั้น หน่วยนิวตัน

รูปที่ 10 ผลการวัดดัชนีความแข็งเชิงกดที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของชิ้นทดสอบ ในรูปแสดงภาพตัดขวางเพื่อแสดงให้เห็นถึงแกน ที่อยู่ด้านในของฟองน้ำลาเท็กซ์ ชิ้นทดสอบมีขนาด : 380 มม. × 380 มม. (เส้น ---- คือ ด้านที่ใช้วัดค่าดัชนีความแข็งเชิงกด)



รูปที่ 11 (A) Hysteresis loop ของรอบที่ 3 ในขั้นตอนการวัดค่าดัชนีความแข็งเชิงกด (B) การลดลงของแรงกดภายหลังจากคงระยะยุบตัวไว้ที่ร้อยละ 40 ของฟองน้ำลาเท็กซ์ (ความหนาแน่น 75.3 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) ซึ่งมีความหนา และรูปแบบของแกนภายในแตกต่างกัน

4. สรุป (Conclusions)

ผลจากการศึกษาทดลองสามารถสรุปได้ ดังนี้

4.1 ความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของฟองน้ำลาเท็กซ์ (ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าดัชนีความแข็งเชิงกด) มีค่าเปลี่ยนแปลงตามค่าความหนาแน่นของฟองน้ำลาเท็กซ์ (น้ำหนักต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร) ที่เพิ่มขึ้น

4.2 ค่าดัชนีความแข็งเชิงกดของฟองน้ำลาเท็กซ์ขึ้นอยู่กับความหนาของชิ้นทดสอบและตำแหน่งของแกนที่อยู่ภายในชิ้นทดสอบ

4.3 ค่าดัชนีความแข็งเชิงกดที่วัดได้จากชิ้นทดสอบขนาดมาตรฐานไม่ได้เป็นค่าดัชนีความแข็งเชิงกดที่แท้จริงของชิ้นผลิตภัณฑ์ที่ผู้บริโภคนำไปใช้งานจริง ดังนั้นในการแปลผลการทดสอบจากชิ้นทดสอบขนาดมาตรฐานจึงควรตระหนักถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับชิ้นทดสอบด้วย เช่น ตำแหน่งที่ตัดชิ้นทดสอบมีแกนแทงทะลุผ่านทั้งสองด้านหรือไม่ หรือมีแกนแทงทะลุผ่านเพียงด้านเดียว ความหนาของชิ้นทดสอบ เป็นต้น

5. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่กลุ่มงานยางและผลิตภัณฑ์ยางที่ช่วยเตรียมตัวอย่างชิ้นทดสอบฟองน้ำลาเท็กซ์ที่ใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง (References)

[1] MALAYSIAN STANDARD. *MS 679:2011. Latex foam rubber mattresses for domestic and general use – Specification* (Second revision). 2011.

[2] SOPPI, E., J. LEHTIÖ and H. SAARINEN. An overview of polyurethane foams in higher specification foam mattresses. *Ostomy Wound Manage. 2015*, **61**(2), 38-46.

[3] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 2439:2008. Flexible cellular polymeric materials-Determination of harness (indentation technique)*. 2008.

[4] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. *มอก. 2747-2559. ฟองน้ำลาเท็กซ์สำหรับทำที่นอน*. 2559.

การผลิตกระดาษจากเศษผ้าฝ้าย
Production of handicraft paper from cotton rags

3

ฐิตารินีย์ สุโรพันธ์[1*]
Thitarini Suropan[1*]

Abstract

The main objective of this research project was to develop processes of making handicraft paper from cotton rags as alternative raw materials instead of mulberry; as the cost of mulberry increases steady and it has to be imported from neighboring countries, whereas cotton rags are abundant in Thailand because of ever-growing fashion industries. Replacing mulberry with cotton as raw material could help reducing cost of handicraft paper production and creating new pattern on handicraft paper to further use in producing other handcraft products. It was found from this study that the optimum condition of stock preparation in order to produce handicraft paper from cotton rags was using Valley Beater with 6 kilogram of weight plate for 20 minute. It was discovered that cotton fiber had good distribution without adding dispersing agents with freeness of 252 ml. At this condition, stock could be formed into plain paper sheet with ease and suitable to be used in producing pattern paper sheet with water pressure technique. The properties of laboratory paper sample were as follows Apparent density 5.90 g/cm^3, Tensile index 0.027 Nm/g, Tear index 8.74 mNm^2/g and Burst index 1.60 kPam^2/g. These properties indicated that pulp and handicraft paper made from cotton rags had good physical properties as the Entrepreneurs are satisfied and the paper can improve their properties according to the standards of the Industrial Standards Institute. Cotton rags could be used as alternative raw materials in handicraft paper making industry.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับความเป็นไปได้ในการใช้เศษผ้าฝ้ายเป็นวัตถุดิบทดแทนปอสาในการนำมาผลิตกระดาษหัตถกรรม เนื่องจากปอสามีราคาสูงขึ้นและต้องนำเข้าจากต่างประเทศ และอุตสาหกรรมเสื้อผ้าของประเทศไทยมีเศษผ้าเหลือจากการผลิตเป็นจำนวนมาก เพื่อการลดต้นทุนการผลิต รวมทั้งพัฒนาคุณสมบัติและลวดลายของผลิตภัณฑ์ สำหรับใช้ในงานศิลปะและผลิตของใช้ จากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมน้ำเยื่อและการนำไปขึ้นแผ่นด้วยเครื่องขึ้นแผ่นอัตโนมัติ คือ สภาวะการบดเศษผ้าฝ้ายโดยใช้เวลา 20 นาที แบบใส่ตุ้มน้ำหนักถ่วง 6 กิโลกรัม ด้วยเครื่องบดเยื่อ แบบ Valley Beater ที่สภาพการระบายน้ำของเยื่อ (Freeness) คือ 252 ml เยื่อจากเศษผ้าฝ้ายมีการกระจายตัวของเส้นใยได้ดีขณะขึ้นแผ่น โดยไม่ต้องเติมสารช่วยกระจายเส้นใย กระดาษที่ผลิตในห้องปฏิบัติการมีสมบัติกระดาษ ดังนี้ ความหนาแน่นปรากฏ (Apparent density) 5.90 g/cm^3 ดัชนีความต้านแรงดึง (Tensile index) 0.027 Nm/g ดัชนีความต้านแรงฉีกขาด (Tear index) 8.74 mNm^2/g และดัชนีความต้านแรงดันทะลุ (Burst index) 1.60 kPam^2/g ในสภาวะการเตรียมน้ำเยื่อนี้สามารถนำไปขึ้นแผ่นแบบหัตถกรรมและสร้างลวดลายด้วยเทคนิคการสร้างลวดลายด้วยแรงดันน้ำ ผลการวิจัยพบว่าเยื่อและกระดาษจากเศษผ้าฝ้ายที่ผลิตได้มีคุณภาพดีเป็นไปตามที่ผู้ประกอบการต้องการ และสามารถปรับปรุงคุณภาพให้เป็นตามมาตรฐานชุมชนได้ ดังนั้นเศษผ้าฝ้ายจึงสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบทางเลือกในอุตสาหกรรมการผลิตกระดาษหัตถกรรมได้

คำสำคัญ : การผลิตกระดาษ เศษผ้าฝ้าย กระดาษหัตถกรรม ลวดลาย
Keywords : Papermaking, Cotton rags, Handicraft paper, Pattern

[1] กรมวิทยาศาสตร์บริการ กองวัสดุวิศวกรรม
*Corresponding author e-mail address: thitarinee@dss.go.th

1. บทนำ (Introduction)

การขาดแคลนวัตถุดิบและการขยับขึ้นของต้นทุนเป็นปัญหาของการผลิตกระดาษสาที่ผู้ประกอบการประสบมามากกว่า 10 ปี การแก้ไขปัญหาระยะต้นจากการขาดแคลนวัตถุดิบปอสาด้วยการสั่งซื้อจากจังหวัดใกล้เคียงได้แก่ ลำปาง และน่าน ปัจจุบันต้องสั่งซื้อจากประเทศเพื่อนบ้าน คือ ลาว เมียนมา และเขมร จากราคากิโลกรัมละ 20-30 บาท เพิ่มเป็นกิโลกรัมละ 45 บาท ประมาณ 68,000 ตันต่อปี เนื่องด้วยต้นทุนการผลิตกระดาษสาขยับตัวขึ้นและราคาสินค้าจึงต้องปรับตัวตามนั้น ส่งผลให้เกิดการชะลอการสั่งซื้อจากลูกค้า และประกอบกับคู่แข่งทางตลาดโดยเฉพาะประเทศจีนที่สามารถผลิตได้ในต้นทุนที่ต่ำกว่า[1-2]จากการลงพื้นที่ ณ หมู่บ้านต้นเปา ของกลุ่มวัสดุธรรมชาติและเส้นใย กองวัสดุวิศวกรรม พบว่า ผู้ประกอบการผลิตกระดาษสาในชุมชนมีความสนใจใช้ผ้าและเศษผ้ามาเป็นส่วนผสมในการผลิตกระดาษสาเพื่อลดต้นทุน รวมทั้งมีความสนใจที่จะผลิตกระดาษจากผ้าและเศษผ้า เนื่องจากเป็นวัสดุเหลือทิ้ง ใช้สารเคมีจำนวนน้อยเพื่อคงคุณลักษณะและเอกลักษณ์ของผ้าชนิดนั้น ๆ จึงมีต้นทุนต่ำ และเป็นการเพิ่มความหลากหลายของผลิตภัณฑ์ตามความต้องการของฐานลูกค้าที่มีอยู่เดิม และขยายฐานลูกค้าทั้งในและต่างประเทศ แต่ยังขาดองค์ความรู้ในการใช้ผ้าและเศษผ้าเป็นวัตถุดิบในการผลิตกระดาษ เพื่อตอบโจทย์ผู้ประกอบการงานวิจัยนี้จึงใช้เศษผ้าฝ้ายเป็นวัสดุนำร่องในการนำเศษผ้าที่เหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ มาเป็นเยื่อทางเลือกในการผลิตกระดาษหัตถกรรม และเป็นส่วนผสมในการผลิตกระดาษสา เนื่องจากผ้าฝ้ายใส่สบายไม่ร้อนเป็นที่นิยมอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมสิ่งทอ จึงมีปริมาณเศษเหลือทิ้งจากการตัดเย็บจำนวนมาก นอกจากนี้เส้นใยฝ้ายเป็นเส้นใยธรรมชาติที่มีปริมาณเซลลูโลสสูงใกล้เคียงกับเนื้อไม้มีความแข็งแรง เหมาะสำหรับนำมาผลิตกระดาษ

ผ้าและเศษผ้าชนิดต่าง ๆ ถูกใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตกระดาษในเชิงหัตถกรรมมาช้านานหลายร้อยปี เพราะเป็นวัตถุดิบที่หาได้ง่าย ส่วนใหญ่จะผลิตเป็นจำนวนน้อยเพื่อใช้เป็นกระดาษสำหรับเขียนในครัวเรือน แต่น้อยคนที่จะรู้ว่าผ้าและเศษผ้าได้ถูกใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตกระดาษเชิงอุตสาหกรรมด้วยเช่นกัน ยกตัวอย่าง กรณีของ Cottonwood paper mill หรือ Granite paper mill ในรัฐยูท่าห์ (Utah) สหรัฐอเมริกา ซึ่งถูกสร้างขึ้นในปี ค.ศ. 1883 ได้ขอเศษผ้าจากประชาชนเพื่อใช้ผลิตเป็นกระดาษ โดยสามารถผลิตกระดาษได้ปริมาณถึงห้าตันต่อวัน เพื่อใช้ผลิตหนังสือพิมพ์ Deseret News เป็นระยะเวลากว่า 20 ปี จนกระทั่งมีระบบรางรถไฟและได้เปลี่ยนไปใช้ไม้เป็นวัตถุดิบการผลิตเยื่อและกระดาษแทน หรือ ในประเทศทางตะวันออกกลาง การทำกระดาษจะทำจากเศษผ้าเก่าเป็นวัตถุดิบเสียส่วนใหญ่เนื่องจากขาดแคลนเยื่อไม้ ประกอบกับเครื่องมือที่ใช้ทำกระดาษไม่ค่อยดีนักกระดาษที่ได้จึงถูกปรับปรุงโดยนำไปเคลือบด้วยแป้ง ทำให้กระดาษของชาวอาหรับมีสีขาวและเหมาะกับการใช้ขีดเขียนได้ดีขึ้น กระดาษของชาวอาหรับจะถูกนำไปจำหน่ายในยุโรปซึ่งมีความต้องการเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ ประเทศอินเดียซึ่งมีอุตสาหกรรมสิ่งทอเป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมหลัก ก็มีการผลิตกระดาษจากผ้ามาช้านาน แต่กรรมวิธีการผลิตกระดาษจากผ้ามักถูกเก็บเป็นความลับไม่เป็นที่เปิดเผย [3]

อุตสาหกรรมสิ่งทอและเครื่องนุ่งห่มเป็นอุตสาหกรรมเส้นใยซึ่งแบ่งตามลักษณะการผลิตจะแบ่งออกได้ 2 ประเภท คือ อุตสาหกรรมเส้นใยสังเคราะห์ และอุตสาหกรรมเส้นใยธรรมชาติประกอบไปด้วยเส้นใยฝ้าย ไหม ขนสัตว์ และพืชเส้นใยอื่น ๆ [4] อุตสาหกรรมสิ่งทอและเครื่องนุ่งห่มเป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่สร้างรายได้ให้กับประเทศไทยอย่างต่อเนื่อง ปัจจุบันมีจำนวนโรงงานสิ่งทอและเครื่องนุ่งห่มทั้งสิ้น 4,840 โรงงาน [5] ถึงแม้ว่าจะไม่มีข้อมูลจำนวนเศษด้ายและเศษผ้าที่เหลือทิ้งจากการผลิตเป็นตัวเลขที่แน่นอน แต่จากการสอบถามโรงงานผลิตเครื่องนุ่งห่มต่าง ๆ ในประเทศไทยจำนวนหนึ่งทางโทรศัพท์และอีเมลพบว่า มีเศษผ้าเหลือจากการผลิตส่วนหนึ่งถูกขายเพื่อผลิตเป็นพรมหรือนำไปใช้เป็นไส้ในของตุ๊กตาหรือเครื่องใช้ต่าง ๆ ซึ่งไม่สามารถเพิ่มมูลค่าได้มากนัก และยังคงมีเศษผ้าเหลือทิ้งอีกเป็นจำนวนมาก ถือเป็นการสูญเสียทรัพยากรโดยเปล่าประโยชน์ เพิ่มปริมาณขยะในประเทศและทำลายสิ่งแวดล้อมทางอ้อม และเศษผ้าเหลือทิ้งจากเส้นใยธรรมชาติเหล่านี้สามารถนำมาเป็นวัตถุดิบ หรือเส้นใยทดแทนการผลิตกระดาษจากเส้นใยเนื้อไม้ได้

เส้นใยจากปอสาได้จากเปลือกที่อยู่ชั้นในสุดติดกับเนื้อไม้ มีสีขาวหรือสีขาวอมเหลือง เส้นใยยาว ทำให้เยื่อมีความแข็งแรง สีขาวนวลตามธรรมชาติแม้จะยังไม่ผ่านการฟอก นอกจากนี้กระดาษสาที่ได้ยังมีน้ำหนักเบา นุ่ม เหมาะแก่การนำไปใช้ในงานหัตถกรรมและศิลปกรรมต่าง ๆ [1]

เส้นใยจากฝ้ายมีความยาวเฉลี่ย 0.3-0.5 เซนติเมตร สีของใยฝ้ายมีตั้งแต่สีขาวไปจนถึงเหลือง เทา ใยฝ้ายมีส่วนประกอบเป็นเซลลูโลสร้อยละ 87–90 เส้นใยฝ้ายเมื่อผ่านการชุบด่าง เส้นใยจะพองกลม ดังนั้นเส้นใยจากเศษฝ้ายจึงเหมาะแก่การนำไปใช้ในเป็นวัตถุดิบในการผลิตกระดาษในเชิงหัตถกรรม [6]

กระบวนการผลิตกระดาษ (Papermaking process)

กระดาษ คือ วัสดุที่เป็นแผ่นใช้สำหรับในการเขียน การบรรจุภัณฑ์และเพื่อจุดประสงค์พิเศษอื่น ๆ กระดาษประกอบไปด้วยเครือข่ายของเส้นใยซึ่งกระจายตัวในน้ำ (โดยทั่วไปได้มาจากไม้หรือเส้นใยจากพืชอื่น ๆ) และเกิดการฟอร์มตัวของเส้นใยบนตะแกรง โดยเส้นใยยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจน กระดาษอาจมีสารเติมแต่ง (Additives) และฟิลเลอร์ (Filler) เพิ่มเติมด้วย

1. การเตรียมน้ำเยื่อ (Stock preparation)

ขั้นตอนนี้ถือว่าเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดของกระบวนการผลิต

กระดาษ ที่หน่วยนี้จะมีการปรับปรุงคุณสมบัติของกระดาษให้เหมาะสมกับการใช้งาน โดยขั้นการเตรียมน้ำเยื่อประกอบด้วยการกระจายเยื่อ การปรับความเข้มข้น การตีเยื่อ (Beating/Refining) การผสมน้ำเยื่อกับสารเคมี การกำจัดสิ่งปลอมปน (Contamination) และการกำจัดอากาศ ซึ่งขั้นตอนเหล่านี้สามารถปรับเปลี่ยนลำดับขั้นตอนได้

2. การทำแผ่นกระดาษ (Sheet forming)

2.1 การทำแผ่นกระดาษในห้องปฏิบัติการด้วยเครื่องขึ้นแผ่นกระดาษ

การผลิตกระดาษเริ่มจากน้ำเยื่อจากส่วนของการเตรียมน้ำเยื่อ เทน้ำเยื่อลงบนกระบอกที่มีตะแกรงอยู่ด้านล่าง โดยน้ำเยื่อจะถูกแยกน้ำออก(Dewatering) และเยื่อจะฟอร์มตัวเป็นแผ่นด้วยกระบวนการกรอง (Sheet forming by filtration process) ได้แผ่นเปียกของกระดาษ ซึ่งมีน้ำอยู่ประมาณร้อยละ 80 จากนั้นนำกระดาษซับน้ำมาวางก่อนกดทับด้วยลูกเหล็กแล้วดึงกระดาษออกจากตะแกรงกระดาษ เมื่อออกจากส่วนนี้จะมีน้ำเหลืออยู่ร้อยละ 55-60 จากนั้นแผ่นกระดาษจะเข้าสู่ส่วนทำแห้ง (Drying section) ด้วยการผึ่งกระดาษ

2.2 การทำแผ่นกระดาษด้วยวิธีหัตถกรรม

การผลิตกระดาษด้วยด้วยวิธีหัตถกรรมทำได้โดยนำเยื่อที่เตรียมไว้เทใส่ตะแกรงขนาด 55 x 79 เซนติเมตร ในอ่างหรือภาชนะที่เหมาะสมที่มีน้ำระดับพอเหมาะแล้วใช้มือคนเยื่อในอ่างให้ทั่วตะแกรง เพื่อให้เส้นใยกระจายออกจากกันสม่ำเสมอ ยกตะแกรงขึ้นจากอ่างและนำไปตากแดด

3. สมบัติของกระดาษและการทดสอบ

การทดสอบคุณภาพกระดาษเป็นสิ่งจำเป็นในการควบคุมคุณภาพกระดาษทั้งในโรงงานผู้ผลิตและผู้แปรรูปกระดาษเป็นผลิตภัณฑ์ โดยมีมาตรฐานในการทดสอบ ดังนี้

• ISO (International Standard Organization)

• TAPPI (Technical Association of the Pulp and Paper Industry)

• SCAN (Scandinavian Pulp, Paper and Board Testing Committee)

• ASTM (America Society for Testing and Materials)

• มอก. (มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม)

สมบัติกระดาษเป็นสิ่งที่บ่งชี้ถึงคุณภาพของกระดาษและยังสามารถใช้ในการแบ่งประเภทกระดาษตามลักษณะการใช้งานอีกด้วย สมบัติที่สำคัญของกระดาษ ได้แก่ สมบัติทางโครงสร้าง สมบัติเชิงกล สมบัติเชิงแสงและสมบัติอื่น ๆ ของกระดาษ เช่น สมบัติทางเคมี สมบัติการดูดซึมน้ำมัน และผลกระทบจากสภาพแวดล้อมที่มีต่อกระดาษ

3.1 สมบัติทางโครงสร้างของกระดาษ (Structural properties) บ่งบอกถึงลักษณะโดยรวมของแผ่นกระดาษ ได้แก่

• น้ำหนักมาตรฐาน (Basis weight) คือ น้ำหนักของกระดาษต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ที่เก็บไว้ในสภาวะอุณหภูมิและความชื้นที่ได้ควบคุมตามมาตรฐานกำหนด หน่วยที่นิยมใช้เป็นกรัมต่อตารางเมตร

• ความหนา (Thickness) คือ ระยะห่างที่ตั้งฉากระหว่างผิวด้านบนและผิวด้านล่างของกระดาษภายใต้สภาวะทดสอบที่กำหนด หน่วยที่ใช้วัดเป็นไมโครเมตร แต่ส่วนใหญ่วัดเป็นมิลลิเมตร

• ความพรุน (Porosity) คือ ช่องว่างภายในของเนื้อกระดาษที่อากาศสามารถไหลผ่านได้ หน่วยที่ใช้วัดเป็นวินาที หรือมิลลิลิตรต่อนาที

• ความเรียบ (Smoothness) ขึ้นจะอยู่กับผิวของกระดาษความสม่ำเสมอของเนื้อกระดาษ หน่วยที่ใช้วัดเป็นวินาที

• ทิศทางของเส้นใยและความแตกต่างของผิวกระดาษสองด้าน (Two sidedness) บอกถึงความแตกต่างของเนื้อกระดาษความแตกต่างของกระดาษในแนวทั้งสองและความแตกต่างของกระดาษระหว่างด้านทั้งสอง

3.2 สมบัติเชิงกล (Mechanical properties) หมายถึงสมบัติที่เกี่ยวข้องกับความแข็งแรงของกระดาษ สมบัติเชิงกลที่นิยมใช้กันมาก ได้แก่

• ความต้านแรงดึง (Tensile strength) คือ ความสามารถในการรับแรงดึงสูงสุดที่กระดาษทนได้ก่อนจะขาดออกจากกันมีหน่วยเป็นแรงต่อความกว้างของชิ้นทดสอบ เช่น กิโลนิวตันต่อเมตร หรือปอนด์ต่อนิ้ว

• ความต้านแรงดันทะลุ (Burst strength) คือ ความสามารถของกระดาษที่ทนแรงดันได้สูงสุดเมื่อได้รับแรงกระทำในทิศทางตั้งฉากต่อผิวหน้ากระดาษ มีหน่วยเป็น กิโลพาสคาล (kPa) หรือกรัมต่อตารางเซนติเมตร หรือ ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

• ความต้านแรงฉีกขาด (Tear strength) คือ ความสามารถของกระดาษที่ต้านแรงซึ่งทำให้ชิ้นทดสอบหนึ่งชิ้นขาดออกจากรอยฉีกนำเดิม หน่วยที่วัดได้เป็น มิลลินิวตันต่อกรัม

• ความทนต่อการหักพับ (Folding endurance) คือ จำนวนที่กระดาษถูกพับไปมาจนกระทั่งชิ้นทดสอบขาดออกจากกันภายใต้แรงที่กำหนด หน่วยที่ใช้เป็น จำนวนครั้ง หรือ log10

• ความแกร่งหรือความทรงรูป (Stiffness) คือ ความสามารถของกระดาษที่ต้านทานแรงที่มากระทำให้กระดาษโค้งงอด้วยน้ำหนักกระดาษจากภายนอก หน่วยที่ใช้เป็น นิวตันเมตร หรือ นิวตัน

3.3 สมบัติเชิงแสง (Optical properties) เมื่อแสงตกกระทบกระดาษสิ่งที่เกิดขึ้นคือ การสะท้อน การกระเจิง การดูดกลืนซึ่งปรากฏการณ์ต่าง ๆ เหล่านี้ของแสงที่มีต่อวัตถุและการตอบสนองส่งผลต่อสมบัติเชิงแสงของกระดาษ เช่น

• ความมันวาว (Gloss) หมายถึง ลักษณะของผิวกระดาษที่สะท้อนแสง ณ มุมที่กำหนด โดยมุมสะท้อนเท่ากับมุมตกกระทบสำหรับกระดาษนิยมใช้เชิงมุม 75 องศากับเส้นปกติ

• ความขาวสว่างของกระดาษ (Brightness) สำหรับในอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ หมายถึง ค่าสะท้อนแสงสีน้ำเงินที่ช่วงคลื่น 457 นาโนเมตรเท่านั้น

• ความทึบแสง (Opacity) สามารถวัดโดยเปรียบเทียบค่าการสะท้อนแสงสีเขียวที่ช่วงคลื่น 557 นาโนเมตร ระหว่างกระดาษหนึ่งแผ่นที่รองหลังด้วยพื้นสีดำสนิทกับกระดาษที่วางซ้อนกันหนาจนแสงไม่ทะลุผ่าน

นอกจากนี้สมบัติเชิงแสงของกระดาษ ยังรวมถึง ความขาว (Whiteness) และสี (Color) ด้วย [7-10]

การใช้ผ้าและเศษผ้าเป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตกระดาษในภาวะขาดแคลนวัตถุดิบคือปอสา โดยความต้องการหาวัตถุดิบอื่นมาผสมเพื่อลดต้นทุนการผลิตกระดาษหัตถกรรมในระดับ OTOP และปัญหาเศษผ้าเหลือทิ้งจากสิ่งทอและเครื่องนุ่งห่มนั้น ผู้ประกอบการยังขาดองค์ความรู้ในด้านนี้อยู่มาก กลุ่มวัสดุธรรมชาติและเส้นใย กองวัสดุวิศวกรรม จึงได้ดำเนินการทำวิจัยนี้เพื่อพัฒนาสภาวะในการเตรียมน้ำเยื่อในการผลิตกระดาษจากเศษผ้า และการผลิตกระดาษหัตถกรรมจากเศษผ้า ในการตอบโจทย์ของผู้ประกอบการ และช่วยการพัฒนาอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ รวมถึงการผลิตผลิตภัณฑ์ใหม่และสร้างรายได้ให้กับชุมชนและประเทศชาติ

2. วิธีการวิจัย (Experimental methods)

2.1 วัตถุดิบและอุปกรณ์ที่ใช้

• เศษผ้าฝ้ายเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ

• เครื่องบดเยื่อ แบบ Valley beater

• เครื่องกระจายเยื่อ (Disintegrator)

• เครื่องขึ้นแผ่นกระดาษแบบอัตโนมัติ รุ่น TMI Space Saver model 300-0

• เครื่องทดสอบการอุ้มน้ำของเยื่อ (Freeness tester)

• เครื่องชั่ง (Analytical balance)

• เครื่องอัดแผ่นทดสอบมาตรฐาน

• อุปกรณ์ตัดชิ้นทดสอบกระดาษ

• เครื่องทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษ (Tensile tester)

• เครื่องทดสอบความหนาของกระดาษ (Thickness tester)

• เครื่องทดสอบความต้านแรงฉีกขาด (Tear tester)

• เครื่องทดสอบความต้านแรงดันทะลุ Type C (Burst tester)

• ตะแกรงขึ้นแผ่นแบบหัตถกรรม ขนาดมาตรฐาน

• กระบอกตวง (Cylinder) ขนาด 1,000 มิลลิลิตร

• บีกเกอร์ (Beaker) ขนาด 2,000 1,000 และ 500 มิลลิลิตร

• ถังน้ำขนาด 20 ลิตร และ 10 ลิตร

• เครื่องกวนสารละลายแบบใบพัด

2.2 วิธีการวิจัย

2.2.1 รวบรวมเศษผ้าฝ้ายจากอุตสาหกรรมผ้าต่าง ๆ ในประเทศ

2.2.2 การเตรียมน้ำเยื่อและหาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมน้ำเยื่อ โดยมีขั้นตอนดังนี้

เตรียมน้ำเยื่อสำหรับผลิตกระดาษจากเศษผ้าฝ้ายในระดับห้องปฏิบัติการ โดยนำเศษผ้ามาตัดเป็นชิ้นขนาด 5 x 5 เซนติเมตร จากนั้น

• นำเศษผ้าฝ้ายไปหาความชื้นด้วยวิธีการอบ

• ชั่งเศษผ้าฝ้ายที่เตรียมไว้ 150 กรัมแห้ง

• นำไปบดด้วยเครื่องบดเยื่อ แบบ Valley beater ในน้ำ 23 ลิตร โดยทดลองใช้สภาวะในการบดเยื่อ 3 สภาวะ คือ 1) บดเยื่อโดยใช้เวลา 45 นาที โดยไม่ใส่ตุ้มน้ำหนัก 2) บดเยื่อโดยใช้เวลา 10 นาที และใส่ตุ้มน้ำหนักถ่วง 6 กิโลกรัม และ 3) บดเยื่อโดยใช้เวลา 20 นาที และใส่ตุ้มน้ำหนักถ่วง 6 กิโลกรัม

• ทำความสะอาดน้ำเยื่อจากเศษผ้าฝ้ายโดยใช้ Mesh screen ขนาด 200 mesh เพื่อคัดแยกสิ่งปลอมปนต่าง ๆ อีกรอบ

• ตีกระจายเยื่อเศษผ้าฝ้ายที่เวลา 15,000 รอบ ทำให้เส้นใยมีความเหมาะสมและกระจายตัวได้ดีขึ้นก่อนนำไปขึ้นแผ่น

• ได้น้ำเยื่อสำหรับเตรียมนำไปขึ้นแผ่น

รูปที่ 1 แสดงการบดเยื่อผ้าฝ้ายด้วยเครื่องบดเยื่อแบบ Valley beater

2.2.3 การขึ้นแผ่นกระดาษแบบอัตโนมัติในห้องปฏิบัติการมีขั้นตอนดังนี้

ทดลองผลิตกระดาษจากน้ำเยื่อที่ได้เตรียมไว้ข้างต้น ข้อ 2.2.2 โดยการปรับความเข้มข้นของน้ำเยื่อให้เหมาะสม ก่อนนำมาขึ้นแผ่นด้วยเครื่องขึ้นแผ่นอัตโนมัติ และให้กระดาษที่เตรียมมีขนาดน้ำหนักมาตรฐาน 100 กรัมต่อตารางเมตร

• ตักน้ำเยื่อที่เตรียมไว้ ใส่ลงเครื่องขึ้นแผ่นแบบอัตโนมัติ

• นำแผ่นเยื่อที่ได้จากการขึ้นแผ่นไปประกบกับแผ่นเหล็กและกระดาษซับ อัดด้วยเครื่องอัดแผ่นมาตรฐาน

- นำไปตากในวงแหวน สำหรับตากตัวอย่างในสภาวะอุณหภูมิห้อง เพื่อไม่ให้กระดาษย่นเมื่อแห้ง

2.2.4 การทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของกระดาษและเยื่อ

นำเยื่อที่ได้จากการผลิตน้ำเยื่อ ข้อ 2.2.2 ไปทดสอบสภาพการระบายน้ำ (Freeness) ตามมาตรฐาน TAPPI T227 และนำกระดาษที่ผลิตได้จากข้อ 2.2.3 ไปปรับสภาพ (Pre-conditioning) 1 วัน ที่สภาวะการทดสอบ : อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 65±2 ก่อนนำไปทดสอบตามวิธีมาตรฐาน ISO (International Standard Organization) ดังนี้

- ความหนาแน่นปรากฏ (Apparent density) ตามมาตรฐาน ISO 534
- ดัชนีความต้านแรงดึง (Tensile index) ตามมาตรฐาน ISO 1924-2
- ดัชนีความต้านแรงฉีกขาด (Tear index) ตามมาตรฐาน ISO 1974
- ดัชนีความต้านแรงดันทะลุ (Burst index) ตามมาตรฐาน ISO 2758

รูปที่ 2 แสดงแผ่นเยื่อจากเศษผ้าฝ้ายขณะขึ้นแผ่นและกระดาษจากเศษผ้าฝ้ายที่ขึ้นด้วยเครื่องขึ้นแผ่นกระดาษอัตโนมัติ

2.2.5 การขึ้นแผ่นกระดาษหัตถกรรมและลวดลายในห้องปฏิบัติการ

ทดลองผลิตกระดาษจากน้ำเยื่อจากเยื่อเศษผ้าฝ้ายล้วนที่ได้เตรียมไว้ข้างต้นด้วยวิธีขึ้นแผ่นแบบหัตถกรรม โดยปรับความเข้มข้นให้เหมาะสม ใช้มือเกลี่ย หรือแตะเยื่อบนตะแกรงให้สม่ำเสมอ ก่อนจะยกตะแกรงขึ้นเพื่อระบายน้ำออก โดยขึ้นแผ่นขนาดน้ำหนักมาตรฐาน 100 กรัมต่อตารางเมตร ตากให้แห้ง

รูปที่ 3 แสดงการขึ้นแผ่นกระดาษจากเศษผ้าฝ้ายแบบหัตถกรรมและตกแต่งลวดลายในห้องปฏิบัติการ

2.2.6 ทดลองทำลวดลายบนกระดาษด้วยแรงดันน้ำและแม่พิมพ์ระดับ OTOP ที่หมู่บ้านต้นเปา อำเภอสันกำแพง จังหวัดเชียงใหม่ จากเยื่อเศษผ้าฝ้าย

- นำเยื่อจากเศษผ้าฝ้ายเตรียมไว้มาเทขึ้นแผ่นบนตะแกรง
- นำแม่พิมพ์พลาสติกมาวางประกบกับตะแกรงที่เติมน้ำเยื่อ กดให้แนบสนิท แล้วพลิกกลับด้าน นำด้านที่เป็นแม่พิมพ์วางลงกับตะแกรงเปล่าอีกแผ่น
- นำตะแกรงที่อยู่ด้านบนแผ่นเยื่อออก แล้วนำผ้าดิบวางแล้วนำตะแกรงเดิมทับไว้
- ฉีดน้ำไปตามตะแกรงให้ทั่ว ใช้แรงดันน้ำให้เยื่อไหลไปตามรูปแม่พิมพ์
- นำถ้วยขนาดเล็กรีดไปตามตะแกรงให้ทั่ว เพื่อรีดน้ำและกดลวดลายให้คมชัดขึ้น
- นำตะแกรงและแม่พิมพ์ออก เหลือไว้แค่ด้านที่เป็นผ้าดิบประกบกับตะแกรงอีกด้านไว้ แล้วนำไปตากไว้ให้แห้ง

รูปที่ 4 แสดงการทำลวดลายบนกระดาษจากเศษผ้าฝ้ายด้วยเทคนิคแรงดันน้ำและแม่พิมพ์

3. ผลและวิจารณ์ (Results and discussion)

3.1 ผลการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมน้ำเยื่อสำหรับผลิตกระดาษจากเศษผ้าฝ้าย (จากวิธีการวิจัยข้อ 2.2.2)

โดยได้ทำการทดลอง 3 สภาวะ ได้แก่ 3.1.1 การทดลองเตรียมน้ำเยื่อ โดยใช้เวลาบด 45 นาที 3.1.2 การทดลองเตรียมน้ำเยื่อ โดยใช้เวลาบด 10 นาที แบบใส่ตุ้มน้ำหนักถ่วง 6 กิโลกรัม และ 3.1.3 การทดลองเตรียมน้ำเยื่อ โดยใช้เวลาบด 20 นาที แบบใส่ตุ้มน้ำหนักถ่วง 6 กิโลกรัม ที่บดด้วยเครื่องบดเยื่อแบบ Valley beater มีผลการทดลอง ดังนี้

3.1.1 การทดลองเตรียมน้ำเยื่อ โดยใช้เวลาบด 45 นาที ด้วยเครื่องบดเยื่อแบบ Valley beater

ทดลองโดยเตรียมน้ำเยื่อและการนำไปขึ้นแผ่น โดยชั่งเศษผ้าฝ้ายที่เตรียมไว้ 150 กรัมแห้ง นำไปบดโดยใช้เวลา 45 นาที แบบไม่ใส่ตุ้มน้ำหนัก ในน้ำ 23 ลิตร

ผลการทดลองพบว่า สภาวะการเตรียมน้ำเยื่อนี้ไม่เหมาะสมต่อการนำน้ำเยื่อไปใช้ขึ้นแผ่นเป็นกระดาษ หากนำไปขึ้นเป็นแผ่นกระดาษจะได้แผ่นกระดาษที่ไม่สม่ำเสมอ มีเศษชิ้นผ้าฝ้ายกระจุกเป็นก้อนและบางส่วนขาดเป็นรู เนื่องจากน้ำเยื่อที่ได้ยังมีเศษผ้าฝ้ายแตกตัวเป็นเส้นใยเพียงบางส่วน โดยรวมแตกตัวเป็นกระจุกเส้นใย มีส่วนที่ยังคงเป็นเศษชิ้นผ้าฝ้ายปะปนอยู่บ้าง

3.1.2 การทดลองเตรียมน้ำเยื่อ โดยใช้เวลาบด 10 นาที แบบใส่ตุ้มน้ำหนักถ่วง 6 กิโลกรัม ด้วยเครื่องบดเยื่อแบบ Valley beater ทดลองการเตรียมน้ำเยื่อและการนำไปขึ้นแผ่น โดยชั่งเศษผ้าฝ้ายที่เตรียมไว้ 150 กรัมแห้ง นำไปบดโดยใช้เวลา 10 นาที แบบใส่ตุ้มน้ำหนักถ่วง 6 กิโลกรัม ในน้ำ 23 ลิตร

ผลการทดลองพบว่า สภาวะการเตรียมน้ำเยื่อนี้ไม่เหมาะสมต่อการนำน้ำเยื่อไปขึ้นแผ่นเป็นกระดาษ หากนำไปขึ้นแผ่น กระดาษจะมีการฟอร์มตัวไม่สม่ำเสมอ ขอบของแผ่นกระดาษจะบางกว่าตรงกลางกระดาษ เนื่องจากเส้นใยที่ยังไม่แตกตัวจากการบดมีการจับตัวกันเป็นกระจุก ส่งผลให้สภาพการระบายน้ำเร็วเกินไป เส้นใยกระจายตัวไม่ค่อยดีในขณะทำการขึ้นแผ่น การบดแบบใส่ตุ้มน้ำหนักถ่วง 6 กิโลกรัม ขณะทำการบดนั้นช่วยลดเวลาให้เส้นใยจากเศษผ้าฝ้ายแตกตัวได้ดีขึ้น

3.1.3 การทดลองเตรียมน้ำเยื่อ โดยใช้เวลาบด 20 นาที แบบใส่ตุ้มน้ำหนักถ่วง 6 กิโลกรัม ด้วยเครื่องบดเยื่อแบบ Valley beater การทดลองการเตรียมน้ำเยื่อ โดยชั่งเศษผ้าฝ้ายที่เตรียมไว้ 150 กรัมแห้ง นำไปบดโดยใช้เวลา 20 นาที แบบใส่ตุ้มน้ำหนักถ่วง 6 กิโลกรัม ในน้ำ 23 ลิตร และนำน้ำเยื่อไปขึ้นแผ่นด้วยเครื่องขึ้นแผ่นอัตโนมัติ

ผลการทดลองพบว่า สภาวะการเตรียมน้ำเยื่อนี้เหมาะแก่การนำไปผลิตกระดาษ เนื่องจากการเพิ่มระยะเวลาในบดเป็น 20 นาที แบบใส่ตุ้มน้ำหนักถ่วง 6 กิโลกรัม ทำให้เส้นใยแตกตัวจากกันได้อย่างอิสระ มีการกระจายตัวได้ดี ให้สภาพการระบายน้ำที่เหมาะสม เมื่อนำไปขึ้นแผ่นกระดาษได้กระดาษที่มีความสม่ำเสมอของเส้นใยทั่วทั้งแผ่น ผิวเรียบ และเมื่อนำไปทดสอบตามมาตรฐานสากล ISO ได้สมบัติของกระดาษ ดังต่อไปนี้ ความหนาแน่นปรากฏ (Apparent density) 5.90 g/cm^3 ดัชนีความต้านแรงดึง (Tensile index) 0.027 Nm/g ดัชนีความต้านแรงฉีกขาด (Tear index) 8.74 mNm^2/g และดัชนีความต้านแรงดันทะลุ (Burst index) 1.60 $kPam^2/g$

การทดลองเตรียมน้ำเยื่อ โดยใช้เวลาบด 20 นาที แบบใส่ตุ้มน้ำหนักถ่วง 6 กิโลกรัม ด้วยเครื่องบดเยื่อแบบ Valley beater โดยนำน้ำเยื่อไปขึ้นแผ่นแบบหัตถกรรมในห้องปฏิบัติการ

ผลการทดลองพบว่า สามารถนำมาขึ้นแผ่นแบบหัตถกรรมได้ เส้นใยกระจายตัวได้ดี เมื่อยกตะแกรงขึ้นสภาพการระบายน้ำดี เมื่อแห้งสามารถแกะลอกออกจากตะแกรงได้ง่าย

เมื่อนำผลการทดสอบสมบัติจากเศษผ้าฝ้ายเปรียบเทียบกับสมบัติกระดาษเศษขี้ฝ้าย เศษผ้ายีนส์ และสา ตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงการเปรียบเทียบสมบัติของกระดาษเศษผ้าฝ้ายจากสภาวะน้ำเยื่อที่เหมาะสม เศษผ้ายีนส์ และกระดาษสา ที่ขึ้นแผ่นด้วยเครื่องขึ้นแผ่นอัตโนมัติ

สมบัติต่าง ๆ ของกระดาษ	เศษผ้าฝ้าย	เศษขี้ฝ้าย	เศษผ้ายีนส์	สา (ไม่ฟอก)
ความหนาแน่นปรากฏ (Apparent density), g/cm^3	5.90	5.34	5.45	3.09
ดัชนีความต้านแรงดึง (Tensile index), Nm/g	0.027	0.019	0.037	47.06
ดัชนีความต้านแรงฉีกขาด (Tear index), mNm^2/g	8.74	19.00	15.00	13.87
ดัชนีความต้านแรงดันทะลุ (Burst index), $kPam^2/g$	1.60	1.05	2.75	5.61
สภาพการระบายน้ำของเยื่อ (Freeness), ml	252	420	241	384

ผลการเปรียบเทียบความหนาแน่นปรากฏพบว่า กระดาษจากวัสดุที่ได้จากอุตสาหกรรมสิ่งทอ คือ กระดาษจากเศษผ้าฝ้าย กระดาษจากขี้ฝ้าย และกระดาษเศษผ้ายีนส์ มีความหนาแน่นปรากฏมากกว่ากระดาษสา เนื่องจากมีขนาดเส้นใยที่มีขนาดสั้นกว่าสามารถเติมเต็มช่องว่างระหว่างเส้นใยกระดาษทำให้กระดาษมีปริมาณเส้นใยที่หนาแน่นกว่า ทำให้มีน้ำหนักต่อความหนาที่มากกว่ากระดาษสา

ผลการเปรียบเทียบสมบัติด้านความแข็งแรงพบว่า กระดาษจากเศษผ้าฝ้าย กระดาษจากขี้ฝ้าย และกระดาษเศษผ้ายีนส์ มีสมบัติด้านความแข็งแรงน้อยกว่ากระดาษสา เนื่องจากเยื่อปอสาเป็นเส้นใยที่ผลิตมาจากเปลือกด้านในของต้นปอสา โดยการทุบและลอกเปลือกออก นำมาต้มด้วยด่าง เยื่อปอสาที่ได้ถือเป็นเยื่อปฐมภูมิ ที่ยังคงความยาวเส้นใยไว้ค่อนข้างสมบรูณ์ เส้นใยยังไม่ถูกทำลายมากจากกระบวนการผลิต สำหรับเยื่อจากเศษผ้านั้นเป็นเส้นใยแบบทุติยภูมิ หรือเรียกได้ว่าเป็นเยื่อที่ถูกเวียนนำมาใช้ (Recycle) เส้นใยจากเศษผ้าฝ้ายผ่านกระบวนการผลิตสิ่งทอ ที่ถูกแรงกลในการทักทอ การอัด และการตัด ผ่านกระบวนการทางเคมีที่ใช้สารเคมีในการต้ม การฟอก และการย้อม รวมถึงผ่านกระบวนการอบ การรีดที่ต้องใช้ความร้อนสูง เมื่อนำเศษผ้าฝ้ายมาผลิตเป็นเยื่อต้องผ่านการบด เพื่อให้เศษผ้าฝ้ายแตกตัวเป็นเส้นใย กระบวนการเหล่านี้มีผลต่อสมบัติของเส้นใยที่ถูกเวียนนำมาใช้ ทำให้เส้นใยถูกทำลาย ขาด มีขนาดเล็กและสั้นลงจากเดิม เส้นใยที่ผ่านความร้อนสูงนั้นทำให้สมบัติในการดูดน้ำกลับและการคืนตัวหรือการพองตัวของเส้นใยในขณะถูกน้ำลดลง สีจากการย้อมที่เคลือบอยู่กับเส้นใยขวางการจับตัวของพันธะไฮโดรเจนระหว่างเส้นใย เป็นสาเหตุที่ทำให้กระดาษที่ทำมาจากเยื่อทุติยภูมิมีสมบัติด้านความแข็งแรงน้อยกว่าเยื่อที่ผลิตมาจากเส้นใยปฐมภูมิ เนื่องด้วยความยาวของเส้นใยและประสิทธิภาพในการจับกันระหว่างเส้นใยขณะเปียกและแห้งมีผลต่อสมบัติด้านความแข็งแรงของกระดาษนั้นเอง

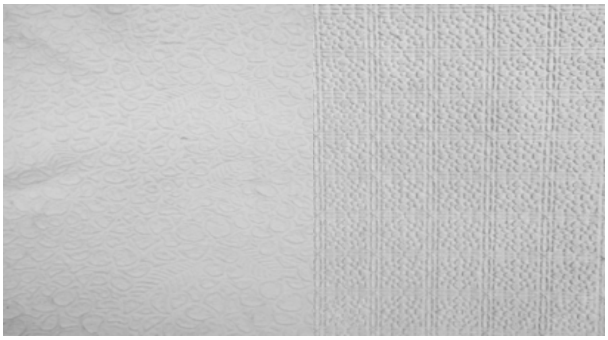
3.1.4 การทดลองผลิตกระดาษจากเศษผ้าฝ้ายและทำลวดลาย ระดับ OTOP ที่หมู่บ้านต้นเปา อำเภอสันกำแพง จังหวัดเชียงใหม่ เมื่อ 17-18 มกราคม 2560 โดยทดลองผลิตกระดาษจากเศษผ้าฝ้าย และตกแต่งลวดลายด้วยเทคนิคแรงดันน้ำ (จากวิธีการวิจัยข้อ 2.2.6)

การทดลองโดยนำเยื่อที่เตรียมจากห้องปฏิบัติการ ในสภาวะใช้เวลาบด 20 นาที แบบใส่ตุ้มน้ำหนักถ่วง 6 กิโลกรัม ด้วยเครื่องบดเยื่อแบบ Valley beater ให้ผู้ประกอบทดลองผลิตกระดาษจากเศษผ้าและทำลวดลาย ระดับ OTOP

ผลการทดลองพบว่า ความพึงพอใจของผู้ประกอบการที่มีต่อเยื่อจากเศษผ้าฝ้าย มีดังนี้

เยื่อจากเศษผ้าฝ้าย ผู้ประกอบการมีความพอใจในเยื่อที่เตรียมไปทดลองผลิตในครั้งนี้ และมีความสนใจที่จะรับเทคโนโลยีนำไปใช้ เนื่องจากเยื่อจากเศษผ้าฝ้าย มีเส้นใยที่สั้น จึงทำให้การขึ้นลวดลายด้วยแรงดันน้ำมีความคมชัด และไม่ขาดเป็นช่องโหว่ขณะโดนแรงดันน้ำเมื่อฉีด เปรียบเทียบกับเยื่อปอสาที่ผู้ประกอบการได้ผลิตอยู่แล้วในการขึ้นลวดลายด้วยแรงดันน้ำนั้นจะมีส่วนที่บางและขาดทะลุเมื่อถูกแรงดันน้ำได้ง่าย ในการฉีดน้ำจึงต้องใช้ความชำนาญต้องระมัดระวังขณะฉีดน้ำเป็นอย่างมาก และลวดลายที่ได้ไม่ค่อยคมชัด นอกจากนี้เยื่อจากเศษผ้าฝ้ายสามารถนำไปผลิตกระดาษหัตถกรรมที่มีสีสันสวยงามจากสีของเศษผ้าฝ้ายโดยไม่ต้องนำไปฟอกและย้อมสี ทำให้ไม่มีต้นทุนสารเคมีและสีย้อมเพิ่ม

เมื่อผู้ประกอบการทดลองนำเยื่อจากเศษผ้าฝ้ายไปตีกระจายรวมกับเยื่อปอสาแล้ว เยื่อจากเศษผ้าฝ้ายสามารถเข้ากันได้ดี ไม่แปลกแยกจากกัน ผู้ประกอบการให้ความเห็นว่าเยื่อจากเศษผ้าฝ้ายมีลักษณะใกล้เคียงกับเยื่อใยสนที่ผู้ประกอบนำเข้ามาใช้ผสมเยื่อปอสาจากต่างประเทศ หากนำเยื่อเศษผ้าฝ้ายมาใช้ทดแทนจะสามารถลดต้นทุนในการผลิตลงไปมาก



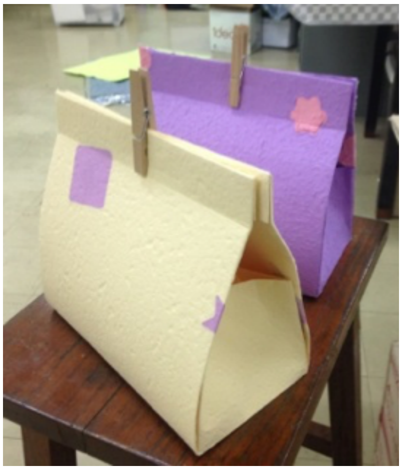
รูปที่ 5 แสดงกระดาษจากเศษผ้าฝ้ายที่ตกแต่งลวดลายด้วยวิธีแรงดันน้ำ

กระดาษหัตถกรรมเป็นอัตลักษณ์ของแต่ละพื้นถิ่น แต่ละพื้นที่มีการนำเยื่อชนิดต่าง ๆ มาผลิตเป็นกระดาษหัตถกรรม โดยใช้วัสดุที่หาได้ง่ายในท้องถิ่น เช่น ปอสา ข้าวโพด ไผ่ ฟางข้าว กระจูด ใบสับปะรด ต้นกก ต้นกล้วย หรือกระดาษรีไซเคิลจากกล่องนม กล่องลังและกระดาษหนังสือพิมพ์ ฯลฯ กระดาษที่ทำมาจากเยื่อแต่ละประเภทนั้นจะมีความสวยงาม ลวดลาย สี ผิวสัมผัส ที่เฉพาะของเยื่อแต่ละชนิด นิยมนำกระดาษหัตถกรรมไปใช้ในงานศิลปะ ผลิตเป็นผลิตภัณฑ์สำหรับเป็นของขวัญของฝาก ใช้ห่อของ และใช้ประดับตกแต่ง เป็นต้น เนื่องจากการผลิตกระดาษหัตถกรรมนั้นต้องอาศัยความชำนาญและเทคนิคของแต่ละบุคคล และแต่ละพื้นที่มีสูตรการผลิตที่สืบทอดกันมาทำให้ได้คุณภาพแตกต่างกันไป เพื่อให้ผลิตภัณฑ์ชุมชนเป็นที่เชื่อถือ มีคุณภาพและมาตรฐานเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค และสร้างความมั่นใจให้กับผู้บริโภคในการเลือกซื้อผลิตภัณฑ์ สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม จึงได้มีข้อกำหนดด้านคุณภาพมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (มผช.) และมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน สำหรับกระดาษหัตถกรรม ได้แก่ มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนกระดาษสา และมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนกระดาษเส้นใยพืช โดยมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนกระดาษสา มีข้อกำหนดคุณลักษณะที่ต้องการ และเกณฑ์ตัดสิน ดังต่อไปนี้

1. ลักษณะทั่วไป ต้องมีลักษณะเป็นแผ่น มีความเหนียวนุ่ม ไม่ขาดง่าย มีความหนาบาง ความหยาบ และความละเอียดสม่ำเสมอ ไม่มีรอยฉีกขาด ไม่มีสิ่งปนเปื้อนหรือตำหนิ และไม่มีราปรากฏให้เห็นอย่างเด่นชัดตลอดชิ้นงาน

2. ลวดลาย (ถ้ามี) ต้องมีความประณีต วัสดุที่นำมาตกแต่งให้เป็นลวดลายต้องเหมาะสม สะอาด ไม่มีสิ่งสกปรกไม่เปรอะเปื้อน

3. สี (ถ้ามี) ต้องสม่ำเสมอ ไม่เลอะเทอะ ไม่ซีดจาง หรือหลุดลอก ยกเว้นการย้อมด้วยเทคนิคใหม่ เกณฑ์การตัดสิน คือ ตัวอย่างกระดาษสาต้องมีคุณลักษณะตามข้อ 1 ข้อ 2 ข้อ 3 จึงถือว่ากระดาษสารุ่นนั้นเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน [11]



รูปที่ 6 แสดงการนำกระดาษจากผ้าฝ้ายมาใช้ประดิษฐ์เป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ

กระดาษหัตถกรรมจากเศษผ้าฝ้ายที่ผลิตได้จากการทดลองขึ้นแผ่นที่หมู่บ้านต้นเปา อำเภอสันกำแพง จังหวัดเชียงใหม่ ได้แผ่นกระดาษที่มีเส้นใยกระจายตัวสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น ไม่ฉีกขาดง่าย ทนต่อการหักพับ สีไม่ซีดจาง ไม่หลุดลอก มีสมบัติด้านความแข็งแรงในระดับที่สามารถนำใช้ในการผลิตหรือประดิษฐ์เป็นผลิตภัณฑ์กระดาษหัตถกรรมจากเศษผ้าฝ้ายได้ หากผู้ประกอบการนำเทคโนโลยีการผลิตกระดาษจากเศษผ้าฝ้ายนี้ไปผลิต พัฒนาปรับปรุงสูตร และควบคุมคุณภาพให้เป็นตามข้อกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน ก็จะสามารถผลิตกระดาษหัตถกรรมจากเศษผ้าฝ้ายให้ได้คุณภาพเทียบเคียงกับกระดาษสาได้

4. สรุป (Conclusions)

การผลิตกระดาษจากเศษผ้าฝ้ายสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมน้ำเยื่อและการนำไปขึ้นแผ่นด้วยเครื่องขึ้นแผ่นอัตโนมัติ คือ สภาวะการบดเศษผ้าฝ้ายใช้เวลา 20 นาที แบบใส่ตุ้มน้ำหนักถ่วง 6 กิโลกรัม ด้วยเครื่องบดเยื่อแบบ Valley beater เยื่อกระดาษจากเศษผ้าฝ้ายมีการกระจายตัวเส้นใยได้ดีขณะขึ้นแผ่น จึงไม่จำเป็นต้องใส่สารช่วยกระจายเส้นใย และสภาวะการเตรียมน้ำเยื่อนี้ยังเหมาะสำหรับการนำไปขึ้นแผ่นด้วยเครื่องขึ้นแบบอัตโนมัติ การขึ้นแผ่นแบบหัตถกรรม และการนำไปตกแต่งลวดลายด้วยเทคนิคแรงดันน้ำ ซึ่งเยื่อและกระดาษที่ผลิตได้มีสมบัติกระดาษและคุณภาพดีตามที่ผู้ประกอบการต้องการ เหมาะสำหรับนำไปใช้ผลิตผลิตภัณฑ์ในงานหัตถกรรมและจำหน่ายต่อ

5. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

ผู้วิจัยขอขอบคุณผู้บังคับบัญชาและเจ้าหน้าที่กลุ่มงานวัสดุธรรมชาติและเส้นใยทุกท่านที่ช่วยสนับสนุนการทำโครงการวิจัยนี้ ขอขอบคุณฟาร์มกระดาษสา อำเภอสันป่าตอง จังหวัดเชียงใหม่ ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ อุปกรณ์ขึ้นแผ่นกระดาษหัตถกรรม และอุปกรณ์สำหรับการตกแต่งลวดลายด้วยแรงดันน้ำ

6. เอกสารอ้างอิง (References)

[1] บุญวงศ์ ไทยอุตส่าห์. *ปอสา : วัตถุดิบหลักของอุตสาหกรรมกระดาษ* [ออนไลน์]. 2545. [อ้างถึงวันที่ 23 พฤษภาคม 2562]. เข้าถึงจาก: http://posaa.kapi.ku.ac.th/Document/PDF/ISBN1521/1521_03.pdf

[2] *ข้อมูลเศรษฐกิจพื้นฐาน* [ออนไลน์]. [อ้างถึงวันที่ 17 พฤษภาคม 2561]. เข้าถึงจาก: http://cm.nesdb.go.th/cluster_ baseinfo.asp?ClusterID=C0066

[3] *Old clothes turned into paper* [ออนไลน์]. 2558. [อ้างถึงวันที่ 26 พฤษภาคม 2558]. เข้าถึงได้จาก: http://www.deseretnews.com/article/590039536/Old-clothes-turned-into-paper.html?pg=all

[4] สำนักส่งเสริมวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม. *แผนปฏิบัติการส่งเสริมวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อมรายสาขาอุตสาหกรรมสิ่งทอและเครื่องนุ่งห่ม* [ออนไลน์]. [อ้างถึงวันที่ 14 พฤศจิกายน 2561]. เข้าถึงจาก: http://www.oic.go.th/FILE WE /CABINFOCENTER2/DRAWER039/GENERAL/DATA0000/0000002

[5] สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม. *สรุปภาวะเศรษฐกิจอุตสาหกรรมไตรมาสที่ 1 ปี 2558 (มกราคม - มีนาคม 2558) (อุตสาหกรรมสิ่งทอและเครื่องนุ่งห่ม)* [ออนไลน์]. 2558. [อ้างถึงวันที่ 26 พฤษภาคม 2558]. เข้าถึงจาก: http://www.ryt9.com/s/oie/2168495

[6] ดรรชนี พัทธวรากร. *เทคโนโลยีสิ่งทอ*. (เอกสารการสอน) [ออนไลน์]. 2559. [อ้างถึงวันที่ 23 พฤษภาคม 2562]. เข้าถึงจาก: http://www.inc.science.cmu.ac.th/thai/upload/article/file/12-11-05-37a74.pdf

[7] GULLICHSEN, J. and H. PAULAPURO. *Papermaking Science and Technology : Chemical Pulping*. USA : Tappi Press, 2000.

[8] สมพร ชัยอารีย์กิจ. *การผลิตกระดาษและสมบัติของกระดาษ*. (เอกสารประกอบการเรียน). กรุงเทพฯ : ภาควิชาเทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2554.

[9] รุ่งอรุณ วัฒนวงศ์. *ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับกระดาษ*. (เอกสารเผยแพร่). กรุงเทพฯ : กรมวิทยาศาสตร์บริการ, 2539.

[10] ประภาภรณ์ เครือจิ๋ว. *ปัญหาหนักอกผู้ผลิตกระดาษสา เสียงสะท้อน SME : วัตถุดิบขาด-ต้นทุนขยับ ปัญหาหนักอกผู้ผลิตกระดาษสา* [ออนไลน์]. 2556. [อ้างถึงวันที่ 30 พฤษภาคม 2558]. เข้าถึงจาก: http://www.komchadluek.net/detail/20130606/160246/ปัญหาหนักอกของผู้ผลิตกระดาษสา.html

[11] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. *มผช. 41/2546. มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนกระดาษสา*. 3. 2546.

การสังเคราะห์สีผงเซรามิกสีแดงสะท้อนรังสีอินฟราเรดใกล้

The synthesis of near-infrared reflective red ceramic pigment

4

พัฒนะ รักความสุข[1*] สิทธิสุนทร สุโพธิณะ[2] ลดา พันธ์สุขุมธนา[3] ธีรศักดิ์ ตั้งกิตติมศักดิ์[1]
Pattana Rakkwamsuk[1*], Sitthisuntorn Supothina[2], Lada Pansukhumthana[3], Teerasak Tangkittimasak[1]

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลการสังเคราะห์สีผงเซรามิกสีแดงด้วยปฏิกิริยาของเซรามิกจากความร้อน (Solid state reaction) จากเซอร์คอน (Zircon) ที่เจือด้วยเหล็กออกไซด์ (Iron(III)oxide) อลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminium oxide) และ ซิลิกอนไดออกไซด์ (Silicon dioxide) เพื่อเกิดเป็นผงสีสารประกอบอนินทรีย์เชิงซ้อน (Complex Inorganic Compound Pigment, CICP) ที่ให้สีแดงปะการัง และมีความสามารถในการสะท้อนรังสีอาทิตย์ช่วงอินฟราเรดใกล้ (near infrared) ผงสีที่สังเคราะห์ได้สามารถใช้ประกอบเป็นผลิตภัณฑ์สีทาอาคารเพื่อสะท้อนรังสีอาทิตย์ และลดปริมาณความร้อนที่สะสมบนแผ่นหลังคา ส่งผลต่อการประหยัดพลังงานของระบบปรับอากาศ และช่วยเพิ่มสภาพสบายเชิงอุณหภาพ (Thermal comfort) ภายในอาคาร

การสังเคราะห์ผงสีทำโดยการบดผสม $ZrSiO_4$ Fe2O_3 Al_2O_3 และ SiO_2 ที่สัดส่วนต่าง ๆ เพื่อเกิดปฏิกิริยาเป็นสารประกอบอนินทรีย์ โดยใช้สัดส่วน $ZrSiO_4$:Fe_2O_3:Al_2O_3:SiO_2 ที่ 45:25:(30-x):x โดย x มีค่าระหว่าง 0 – 30 wt% แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 1,100 1,200 และ 1,300 องศาเซลเซียส แล้วนำมาล้าง อบ และบดจนได้เป็นผงสีเซรามิกสีแดง สีของผงสี ซึ่งคำนวณจากระบบ CIE L* a* b* ไม่เปลี่ยนแปลงมากนักเมื่ออุณหภูมิเผาเปลี่ยนแปลง สีแดงปะการังจะมีความสว่างมากขึ้นเมื่อปริมาณ SiO_2 เพิ่มขึ้น เมื่อทำการวิเคราะห์ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ พบว่าผงสีเซรามิกสีแดงที่มีสัดส่วน $ZrSiO_4$:Fe_2O_3:Al_2O_3:SiO_2 ที่ 45:25:20:10 ที่เผาอุณหภูมิ 1,100°C จะได้ผงสีแดงที่มีค่าการสะท้อนรังสีอินฟราเรดใกล้สูงสุด เท่ากับ 65.9%

Abstract

This paper presents the research and development of red ceramic pigment synthesized by solid-state reaction of zircon doped with iron oxide, aluminium oxide and silicon dioxide that formed complex inorganic compound pigment. The pigment offered shades of coral red and high reflectivity in the near-infrared (NIR) region. The pigment can be used as a vehicle for a high solar reflective coating that reduces heat absorbed by building structures, promotes energy conservation in an air-conditioning system, and enhance human thermal comfort in the building.

The synthesis was performed by ball-milling raw materials composed of $ZrSiO_4$ Fe_2O_3 Al_2O_3 and SiO_2. The compound of $ZrSiO_4$ Fe_2O_3 Al_2O_3 and SiO_2 at the ratio of 45:25:(30-x):x, where x varied between 0 and 30 wt%, was calcined at 1,100, 1,200 and 1,300°C. The calcined compound was then washed, oven-dried and ground, that yielded powdered pigment with the shade of brown. The color of pigments, measured and computed in compliance with CIE L* a* b*, did not alter as the calcining temperature changed but had a brighter shade of coral red as the quantity of SiO_2 increased. It was found that the pigment synthesized from $ZrSiO_4$:Fe_2O_3:Al_2O_3:SiO_2 at 45:25:20:10 and calcined at 1,100°C offered the highest NIR reflectance at 65.9 %

คำสำคัญ : ผงสีสีแดง ผงสีสะท้อนรังสีอาทิตย์ ผงสีสะท้อนรังสีอินฟราเรดใกล้ สารประกอบอนินทรีย์เชิงซ้อน

Keywords : Coral red pigment, Solar reflective pigment, Near-infrared reflective pigment, Complex Inorganic Compound Pigment

[1] มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ
[2] ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ
[3] กรมวิทยาศาสตร์บริการ
* Corresponding author e-mail address: pattana.rak@kmutt.ac.th

1. บทนำ (Introduction)

ในภูมิประเทศที่มีความเข้มรังสีอาทิตย์สูง เช่นประเทศที่อยู่ใกล้เส้นศูนย์สูตร อาคารและที่พักอาศัยต่าง ๆ จะสิ้นเปลืองพลังงานไปกับการปรับอากาศซึ่งอาจมีสัดส่วนสูงถึงร้อยละ 50-60 ของพลังงานที่ใช้ทั้งหมดในอาคาร [1] แนวทางการลดการใช้พลังงานอาจทำได้หลายวิธี แต่การใช้วัสดุเปลือกอาคารที่มีความสามารถในการสะท้อนรังสีอาทิตย์ ได้รับการพิสูจน์ว่าเป็นวิธีที่มีประสิทธิผลสูง เพราะลดการสะสมความร้อนภายในโครงสร้างอาคาร ส่งผลโดยตรงต่อการลดการใช้พลังงานกับการปรับอากาศ [2-4] เป็นประโยชน์โดยตรงต่อการอนุรักษ์พลังงาน และลดปัญหาการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เป็นสาเหตุสำคัญของปัญหาภูมิอากาศของโลกเปลี่ยนแปลง

จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า เปลือกอาคารที่เคลือบด้วยสีที่มีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ (Solar reflectance) ได้ถึง 94% สามารถลดการใช้พลังงานลงได้ไม่น้อยกว่า 20% [5] สีดังกล่าวส่วนใหญ่เป็นสีในกลุ่มโทนสีอ่อน ซึ่งอาจจะไม่ตอบสนองความพึงพอใจของเจ้าของอาคาร อย่างไรก็ตาม การใช้สีโทนเข้มทั่วไปจะมีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์น้อยกว่าหรือมีการดูดกลืนรังสีอาทิตย์ในปริมาณมากกว่า [6] ดังนั้นโจทย์สำคัญของสีสะท้อนรังสีอาทิตย์จึงได้แก่ การที่สียังคงให้สีสันในโทนสีต่าง ๆ ได้ แต่ยังคงมีความสามารถในการสะท้อนรังสีอาทิตย์ในย่านรังสีอินฟราเรดใกล้ (Near infrared) ได้ดี

บทความนี้นำเสนอผลงานวิจัยและพัฒนาผงสีสีแดงที่สามารถสะท้อนรังสีอาทิตย์ช่วงอินฟราเรดใกล้ (NIR) ได้ดี การคิดค้นผลิตผงสีเซรามิกสีแดงจากออกไซด์ต่าง ๆ โดยใช้สูตรสารประกอบต่าง ๆ [7-13] อาทิเช่น $Ce_{25}Pr_{0.2}Mo_xO_y$, Sm_2Ce_2-xMo_xO_7, Y_2Ce_2-xTb_xO_7 เป็นต้น ผงสีเซรามิกสีแดงแต่ละชนิด ที่ผลิตได้ก็มีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่แตกต่างกันออกไปขึ้นกับปริมาณสัดส่วนและอุณหภูมิในการเผา

สำหรับงานวิจัยนี้จะเป็นการสังเคราะห์สีผงเซรามิกสีแดงด้วยปฏิกิริยาของเซรามิกจากความร้อน (Solid state reaction) โดยใช้สารประกอบ เซอร์คอน เหล็กออกไซด์ และ อลูมิเนียมออกไซด์เป็นสารตั้งต้นและลดปริมาณ อลูมิเนียมออกไซด์แทนที่ด้วย ซิลิกอนไดออกไซด์ เพื่อเกิดเป็นสารประกอบอนินทรีย์เชิงซ้อน (Complex Inorganic Compound Pigment, CICP) ที่ให้สีแดงและมีความสามารถในการสะท้อนรังสีอาทิตย์ช่วงอินฟราเรดใกล้

2. วิธีการวิจัย (Experimental methods)

2.1 ขั้นตอนการเตรียมผงสีสีแดง

การสังเคราะห์ผงสีสีแดงในงานวิจัยนี้ ทำโดยการบดผสม Zircon (100%, Mine Chem) iron(III)oxide (99%, Fluka) และ Alumina oxide (99.5%, Sigma-Aldrich) เพื่อเป็นวัตถุดิบฐาน (Based raw material) และมีการลดปริมาณ Alumina oxide ด้วยการแทนที่ด้วย Silicon dioxide (98%, Fluka) ในปริมาณต่าง ๆ ตามแผนการเตรียมตัวอย่างแสดงดังตารางที่ 1 แล้วจึงนำสารประกอบแต่ละสูตรผสมทำการเผาที่อุณหภูมิ 1,100 1,200 และ 1,300 องศาเซลเซียส ด้วยเตาเผา (Modu Temp รุ่น SC96BV-N) เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ใช้อัตราเพิ่มอุณหภูมิเตาเผาที่ 5°C/นาที จากนั้นนำไปบดละเอียด ด้วยเครื่อง Planetary Ball Mill (Retsch รุ่น PM200) ด้วยความเร็ว 300 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำผงสีไปล้างด้วยน้ำ และอบแห้งด้วยอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งเมื่อเสร็จสิ้นกระบวน จะได้ตัวอย่าง 21 ตัวอย่าง แบ่งเป็น กลุ่มที่ 1 ตัวอย่าง S1-S7 เผาที่ 1,100°C กลุ่มที่ 2 ตัวอย่าง S8-S14 เผาที่ 1,200°C และกลุ่มที่ 3 ตัวอย่าง S15-S21 เผาที่ 1,300°C ซึ่งจะถูกนำไปวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ ต่อไป

ตารางที่ 1 ชื่อตัวอย่างที่อัตราส่วนส่วนผสม และอุณหภูมิเผาต่าง ๆ

อัตราส่วน (%)				อุณหภูมิเผา (°C)		
				1,100	1,200	1,300
$ZrSiO_4$	Fe_2O_3	Al_2O_3	SiO_2	ชื่อตัวอย่าง		
45	25	30	0	S1	S8	S15
45	25	25	5	S2	S9	S16
45	25	20	10	S3	S10	S17
45	25	15	15	S4	S11	S18
45	25	10	20	S5	S12	S19
45	25	5	25	S6	S13	S20
45	25	0	30	S7	S14	S21

2.2 การวัดและคำนวณค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของผงสีสีแดงและค่าพิกัดสี

การวิเคราะห์การสะท้อนรังสีอาทิตย์ของผงสีที่สังเคราะห์ได้ทำด้วยการวัดค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ ด้วยเครื่อง UV–VIS–NIR spectrophotometer (Shimadzu, 3,100) และนำค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่ความยาวคลื่น 780 ถึง 2,500 นาโนเมตร มาคำนวณค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ช่วงอินฟราเรดใกล้ ตามมาตรฐาน ASTM E903 และทำการวิเคราะห์ค่าพิกัดสี ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์สีที่อ้างอิงระบบพิกัด CIE L* a* b*

2.3 การศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึก

วิเคราะห์โครงสร้างผลึกทำด้วยเครื่อง X-ray diffractometer (XRD) ด้วยรังสี Cu Kα, 40 kV, 20 mA ในช่วงมุม 2θ ระหว่าง 10–80 องศา จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ชนิดโครงสร้างผลึกโดยเปรียบเทียบสัญญาณ (Peak matching) มุมที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างมาตรฐานในฐานข้อมูล

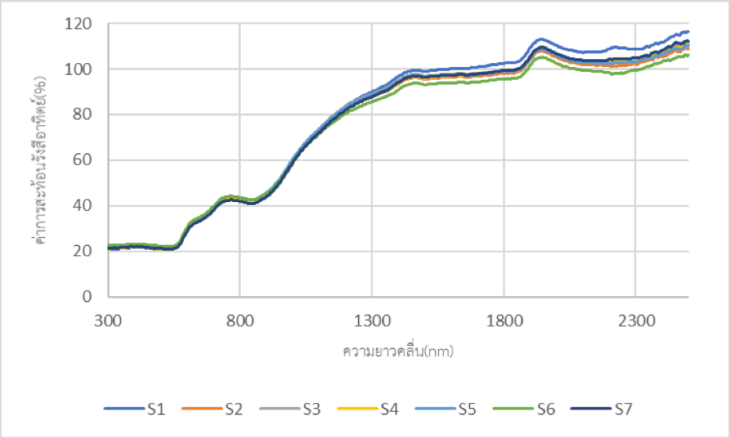
2.4 การศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคและองค์ประกอบของธาตุ

วิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคและองค์ประกอบของธาตุที่เกิดขึ้น ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ที่มีโหมด Energy Dispersive Spectrometer (EDS)

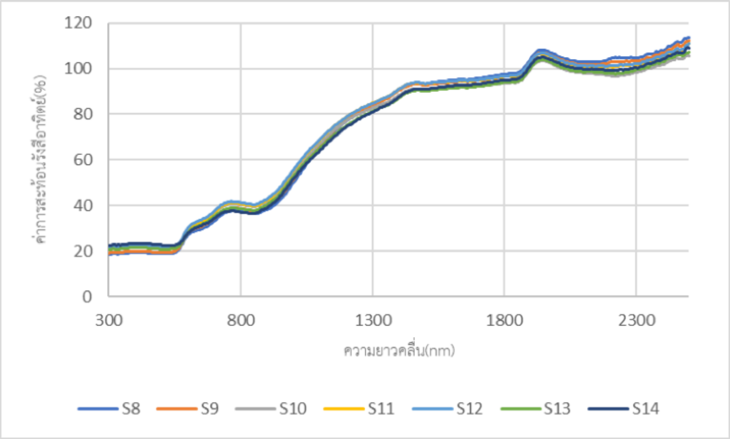
3. ผลและวิจารณ์ (Results and discussion)

3.1 ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของผงสีสีแดงและค่าพิกัดสี

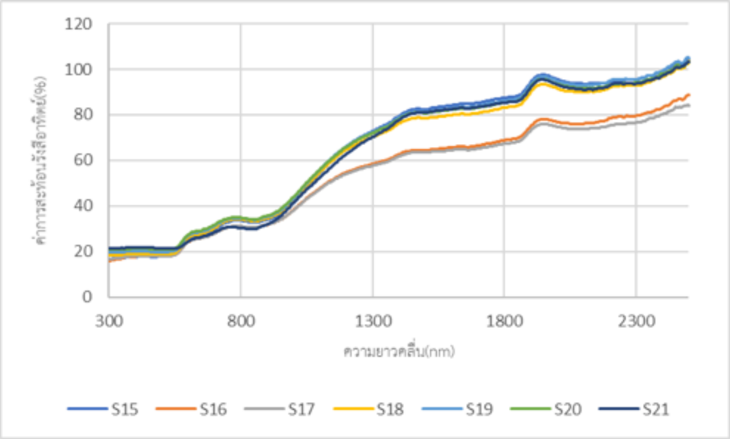
ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ในช่วงความยาวคลื่น 300 ถึง 2,500 นาโนเมตรของตัวอย่างผงสีสีแดง S1 – S21 ที่วัดได้จากเครื่อง Spectrophotometer แสดงในรูปที่ 1-3 และเมื่อนำมาคำนวณค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ช่วงอินฟราเรดใกล้ ตามมาตรฐาน ASTM E903 และค่าวิเคราะห์สี ตามหลัก CIE L* a* b* จะได้ผลดังแสดงในตารางที่ 2 และรูปที่ 4



รูปที่ 1 การสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่ความยาวคลื่น 300 ถึง 2,500 นาโนเมตรของตัวอย่าง S1 – S7 (อุณหภูมิเผา 1,100°C)



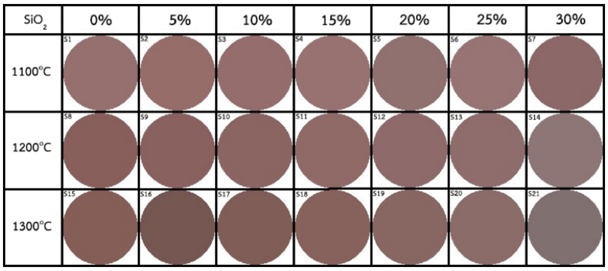
รูปที่ 2 การสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่ความยาวคลื่น 300 ถึง 2,500 นาโนเมตร ของตัวอย่าง S8 - S14 (อุณหภูมิเผา 1,200°C)



รูปที่ 3 การสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่ความยาวคลื่น 300 ถึง 2,500 นาโนเมตร ของตัวอย่าง S15 – S21 (อุณหภูมิเผา 1,300°C)

ตารางที่ 2 ค่าพิกัดสีที่คำนวณได้ตามระบบ CIE L* a* b* และ ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ในช่วงอินฟราเรดใกล้ (RNIR) ของผงสีสีแดงที่สังเคราะห์ได้

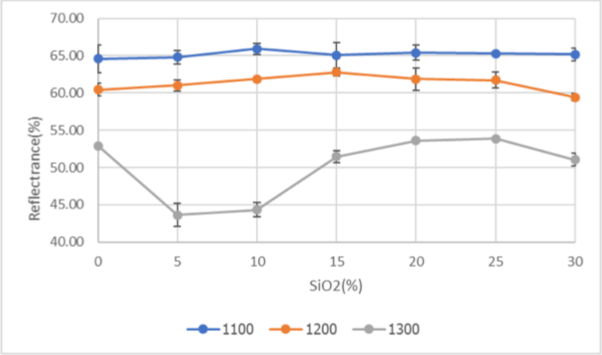
อัตราส่วน (%)				1,100°C				1,200°C				1,300°C			
$ZrSiO_4$	Fe_2O_3	Al_2O_3	SiO_2	L*	a*	b*	R_{NIR} (%)	L*	a*	b*	R_{NIR} (%)	L*	a*	b*	R_{NIR} (%)
45	25	30	0	51.10	15.04	6.84	64.6	45.25	16.24	8.62	60.5	44.33	14.49	9.91	52.9
45	25	25	5	50.13	16.31	7.83	64.8	45.35	15.77	7.85	61.0	40.73	12.72	7.84	43.6
45	25	20	10	50.15	15.16	6.15	65.9	47.00	15.34	7.41	61.9	42.69	13.56	8.40	44.3
45	25	15	15	51.90	15.04	6.22	65.1	48.36	15.00	6.73	62.8	45.25	14.01	8.35	51.5
45	25	10	20	50.88	13.98	5.46	65.4	50.77	13.45	5.53	61.9	46.81	13.06	7.21	53.6
45	25	5	25	53.38	13.60	5.19	65.3	50.53	12.49	5.39	61.7	48.96	11.84	6.22	53.9
45	25	0	30	49.13	14.09	4.94	65.2	52.15	9.44	2.53	59.4	49.18	6.66	1.64	51.0



รูปที่ 4 ลักษณะสีของตัวอย่าง S1 - S21

จากรูปที่ 4 ที่อุณหภูมิเผา 1,100°C ตัวอย่างที่ S1 ที่อัตราส่วน Zr:Fe:Al ที่ 45:25:30 ผงสีมีสีแดงปะการัง และเมื่อลดปริมาณ Aluminium oxide ลง ด้วยการแทนที่ด้วย Silicon dioxide จะเห็นได้ว่าสีของผงสีเริ่มเปลี่ยนมีความสว่างเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของ Silicon dioxide โดยสามารถเปรียบเทียบได้จากค่า L* สำหรับตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้ที่อุณหภูมิเผา 1,200°C และ 1,300°C ก็ให้ผลการวิเคราะห์เป็นไปในแนวทางเดียวกัน

สำหรับค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ในช่วงอินฟราเรดใกล้ ที่แสดงในตารางที่ 2 เมื่อนำผลมาแสดงเป็นกราฟ จะได้ผลดังแสดงได้ในรูปที่ 5 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ช่วงอินฟราเรดใกล้ของผงสีที่สังเคราะห์ได้มีค่าไม่แตกต่างกันมากที่อุณหภูมิเผา 1,100°C และ 1,200°C แต่ที่อุณหภูมิเผา 1,300°C มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 5 ค่าการสะท้อนรังสีอินฟราเรดใกล้ที่มีสัดส่วนของ SiO_2 ระหว่าง 0% ถึง 30% ที่อุณหภูมิเผา 1,100 1,200 และ 1,300°C

3.2 ลักษณะโครงสร้างผลึก

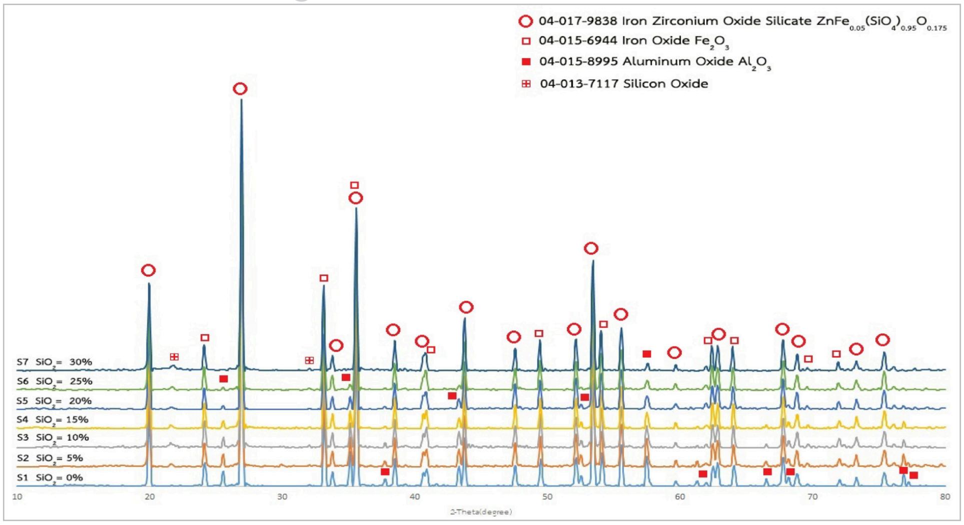
กราฟเปรียบเทียบผล XRD ของผงสีสีแดงปะการังที่สังเคราะห์ได้ที่อุณหภูมิเผา 1,100 1,200 และ 1,300°C แสดงดังรูปที่ 6-8 ตามลำดับ ซึ่งจะพบโครงสร้างของ Iron Zirconium Oxide Silicate (04-017-9838) เป็นโครงสร้างหลัก และมี Iron Oxide (04-015-6944) เป็นส่วนประกอบที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาส่วน Aluminum Oxide(04-015-8995) ที่เติมเข้าไป ไม่ทำปฏิกิริยาเกิดเป็นโครงสร้างใหม่ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเผา ทำให้ Silicon Oxide (04-013-7117) ไม่สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยาได้ จึงอาจส่งผลให้ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ช่วงอินฟราเรดใกล้ มีค่าลดต่ำลง

3.3 การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคและองค์ประกอบของธาตุ

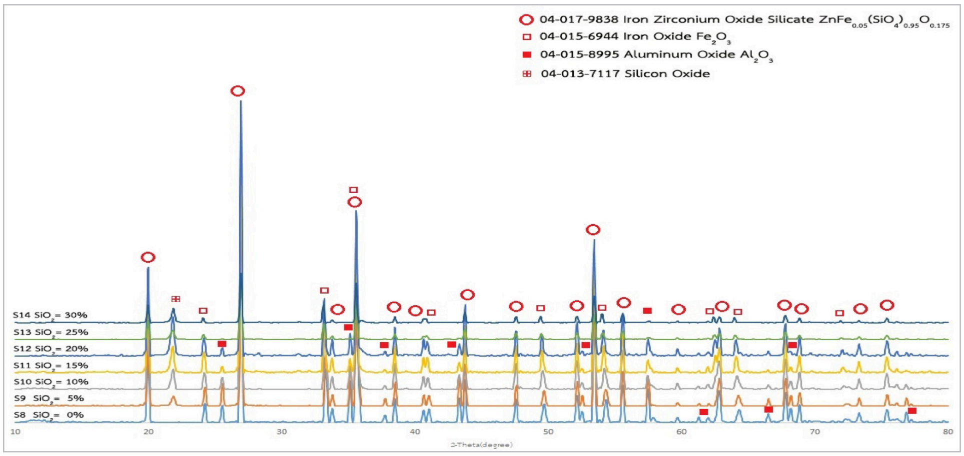
เมื่อนำตัวอย่าง S3 ที่เผาที่อุณหภูมิ 1,100°C ทำการวิเคราะห์ภาพสัณฐานของผงสีที่ผ่านการบดมีลักษณะดังรูปที่ 8 และเมื่อทำการวิเคราะห์ด้วย EDS โดยกำหนดให้ทำการวิเคราะห์ 3 ตำแหน่ง (กรอบสีเหลืองในรูปที่ 8) แล้วหาค่าเฉลี่ย จะได้ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุแบบเฉลี่ยแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ ของตัวอย่าง S3 ที่เผาที่อุณหภูมิ 1,100°C

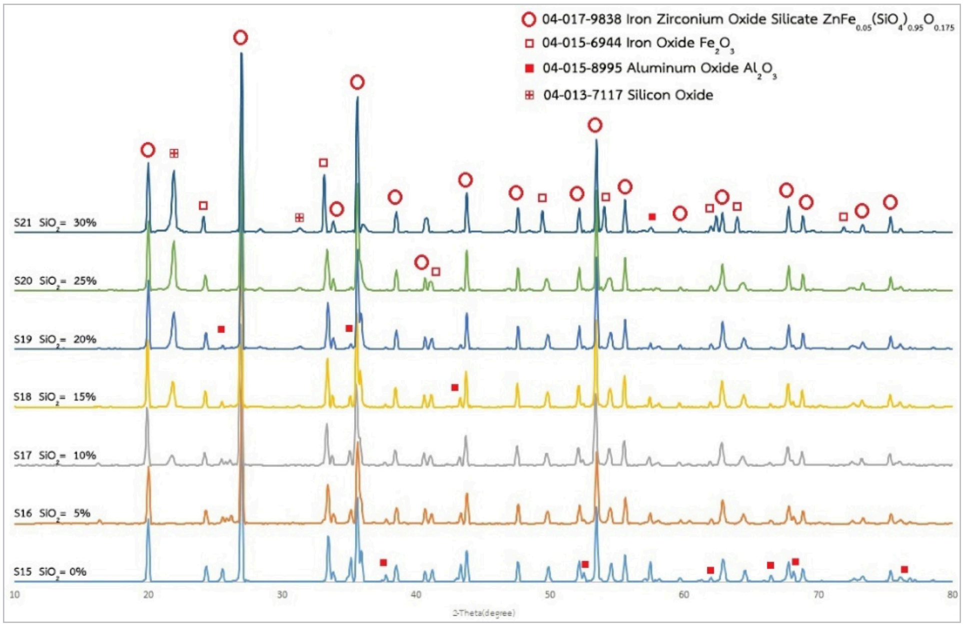
ตัวอย่าง	อุณหภูมิเผา (°C)	องค์ประกอบของธาตุ (%)				
		Fe	Zr	Al	Si	O
S3	1,100	49.83	16.32	1.01	5.39	27.47



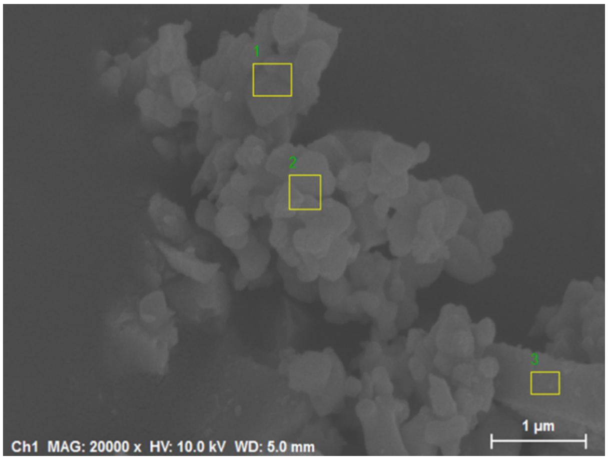
รูปที่ 6 เปรียบเทียบผล XRD ของตัวอย่าง S1 – S7



รูปที่ 7 เปรียบเทียบผล XRD ของตัวอย่าง S8 – S14



รูปที่ 8 เปรียบเทียบผล XRD ของตัวอย่าง S15 – S21



รูปที่ 9 โครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่าง S3 เผาที่ 1,100°C ที่ผ่านการบดละเอียด

4. สรุป (Conclusions)

ผงสีเซรามิกของสารประกอบอนินทรีย์ สามารถสังเคราะห์ได้ด้วยปฏิกิริยาของเซรามิกจากความร้อน (Solid state reaction) ของเซอร์คอน (zircon) ที่เจือด้วยไอรอนออกไซด์ (Iron(III)oxide) อลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminium oxide) และซิลิกอนไดออกไซด์ (Silicon dioxide โดยใช้สัดส่วน $ZrSiO_4$:Fe_2O_3:Al_2O_3 ที่ 45:25:30 เป็นพื้นฐาน แทนที่ Al_2O_3 ด้วย SiO_2 เกิดปฏิกิริยาเป็นผงสีเซรามิกสีแดงปะการังที่สามารถสะท้อนรังสีอินฟราเรดใกล้ สีของผงสีซึ่งคำนวณจากระบบ CIE L* a* b* ไม่เปลี่ยนแปลงมากนักเมื่ออุณหภูมิเผาเปลี่ยนแปลง แต่สีแดงปะการังจะมีความสว่างมากขึ้นเมื่อปริมาณ SiO_2 เพิ่มขึ้น

เมื่อทำการวิเคราะห์ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ พบว่าผงสีเซรามิกสีแดงที่มีสัดส่วน $ZrSiO_4$:Fe_2O_3:Al_2O_3:SiO_2 ที่ 45:25:20:10 ที่เผาอุณหภูมิ 1,100°C จะได้ผงสีแดงที่มีค่าการสะท้อนรังสีอินฟราเรดใกล้สูงสุด เท่ากับ 65.9% ผล XRD พบโครงสร้างของ Iron zirconium oxide silicate เป็นโครงสร้างหลัก และมี Iron oxide เป็นส่วนประกอบที่เหลือจากการทำปฏิกิริยา ส่วน Aluminum oxide ที่เติมเข้าไป ไม่ทำปฏิกิริยาเกิดเป็นโครงสร้างใหม่ และที่อุณหภูมิเผา 1,300°C พบ Silicon oxide ไม่สามารถทำปฏิกิริยาได้

5. เอกสารอ้างอิง (References)

[1] PEREZ-LOMBARD, LUIS, JOSE ORTIZ and ISMAEL R. MAESTRE. The map of energy flow in HVAC system. *Applied Energy*. 2011, **88**(12), 5020 – 5031.

[2] SYNNEFA, A., M. SANTAMOURIS and K. APOSTOLAKIS. On the development, optical properties and thermal performance of cool colored coatings for the urban environment. *Solar Energy*. 2007, **81**(4), 488-497.

[3] TAKEBAYASHI, H. and M. MORIYAMA. Surface heat budget on green roof and high reflection roof for mitigation of urban heat island. *Building and Environment*. 2007, **42**(8), 2971-2979.

[4] LEVINSON, R. H. .A. KBARI and J. C. REILLY. Cooler tile-roofed buildings with near-infrared-reflective non-white coatings. *Building and Environment*. 2007. **42**(7), 2591-2605.

[5] GANGUL, ARNA, DEBASHISH CHOWDHURY and SUBHASIS NEOGI. Performance of building roofs on energy efficiency-a review. *Energy Procedia*. 2016, **90**, 200–208.

[6] LEVINSON, RONNEN, PAUL BERDAHL and HASHEM AKBARI. Solar spectral optical properties of pigments-Part II : survey of common colorants. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2005, **89**(4), 351–389.

[7] HAJJAJI, W. Cr-droped peroskite and rutile pigments derived from industrial by-products. *The Chemical Engineering Journal*. 2011, **171**(3), 1178–1184.

[8] KUMARI, L.S. Synthesis and optical properties of Ce0. 95Pr0.05-xMxO2(M=Mn,Si) as potential ecological red pigments for coloration of plastics. *Ceramics international*. 2012, **38**(5), 4009-4016.

[9] SREERAM, K. J., C. P. Aby, B. U. Nair, T. Ramasami. Colored cool colorants based on rare earth metal ions. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2008, **92**(11), 1462-1467.

[10] VISHNU, V. S., G. George and M. L. P. Reddy. Effect of molybdenum and praseodymium dopants on the optical properties of $Sm_2Ce_2O_7$: Tuning of band gaps to realize various color hues. *Dyes and Pigments*. 2010, **85** (3), 117-123.

[11] RAO, P.P. and M. L. P. Reddy. Synthesis and characterisation of $(BiRE)_2O_3$(RE: Y, Ce) pigments. *Dyes and Pigments*. 2004, **63**(2), 169-174.

[12] RAJ, A. K. V, P.PRABHAKARRAO, S.SAMEERA and S.Divya. Pigments based on terbium-doped yttrium cerate with high NIR reflectance for cool roof and surface coating applications. *Dyes and Pigments*. 2015, **122**, 116-125.

[13] JOVANÍ, M., A. Sanz, H. Beltrán-Mir and E. Cordoncillo. New red-shade environmental-friendly multifunctional pigment based on Tb and Fe doped $Y_2Zr_2O_7$ for ceramic applications and cool roof coatings. *Dyes and Pigments*. 2016. **133**, 33-40.

การพัฒนาระบบควบคุมการปรับตั้งเครื่องชั่งอัตโนมัติ
Development of automatic calibration system for electronic balances

5

จิตตกานต์ อินเที่ยง[1*], วิชิต ศิริโชติ[2**], สมโภชน์ บุญสนิท[1**]
Jittakant Intiang[1*], Wichit Sirichote[2**], Sompote Boonsanit[1**]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะทำการปรับปรุงพัฒนาเครื่องชั่งน้ำหนักอิเล็กทรอนิกส์ที่มีระบบปรับตั้งภายใน (Internal calibration) แบบที่ผู้ใช้งานต้องทำการกระตุ้นระบบ (Manual) ให้กลายเป็นเครื่องชั่งน้ำหนักอิเล็กทรอนิกส์ที่มีการกระตุ้นระบบปรับตั้งภายในโดยอัตโนมัติ ในงานวิจัยนี้จะทำการสร้างระบบตรวจวัด (Sensor) สำหรับวัดค่าอุณหภูมิ ความชื้น ความดันบรรยากาศ และเวลา และระบบควบคุมการทำงาน (Microcontroller) มาประกอบกัน และเขียนโปรแกรมควบคุมการสื่อสารระหว่างระบบควบคุมการทำงานกับเครื่องชั่งน้ำหนักอิเล็กทรอนิกส์ด้วยภาษาซีผ่านการเชื่อมต่อแบบ RS232 เพื่อใช้กระตุ้นการทำงานระบบปรับตั้งภายในของเครื่องชั่งน้ำหนักอิเล็กทรอนิกส์ ในงานวิจัยนี้สามารถกำหนดเงื่อนไขการปรับตั้งได้ 2 รูปแบบ คือ เมื่ออุณหภูมิหรือเวลาเปลี่ยนแปลง ระบบควบคุมการทำงานจะส่งคำสั่งกระตุ้นระบบปรับตั้งภายในไปยังเครื่องชั่งน้ำหนักอิเล็กทรอนิกส์ผ่านช่องเชื่อมต่อแบบ RS232 ของเครื่องชั่งน้ำหนักอิเล็กทรอนิกส์ จากผลการทดลองเบื้องต้นพบว่าเครื่องชั่งน้ำหนักอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในงานวิจัยมีการตอบสนองต่อคำสั่งที่ป้อนเข้าไปทำการกระตุ้นระบบปรับตั้งภายในเมื่ออุณหภูมิหรือเวลาเปลี่ยนแปลงไปตามที่กำหนดไว้

Abstract

This research is aimed to develop the automatic internal calibration system of the electronic balance with inherent internal calibration function. The sensor system (temperature, humidity, atmospheric pressure, time ect.) and the microcontroller system will be assembled together. The communication between this assembled system and the electronic balance will be programmed with C language program via RS232 interface port for activating the internal calibration system of the electronic balance. In this research, the internal calibration system will be activated when each of these two conditions is changed from the setting value: the environmental temperature or the time. The microcontroller system will send the command to activate the internal calibration system of the electronic balance via RS232 port. The preliminary experiment shows that the electronic balance used in this research responses to the command by activating the internal calibration system when the parameters changed according to the setting conditions.

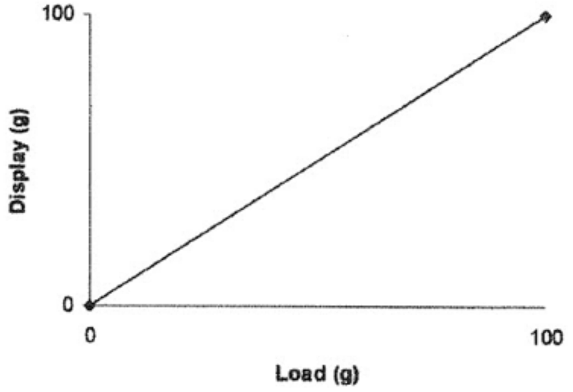
คำสำคัญ : ระบบปรับตั้งภายใน อัตโนมัติ เครื่องชั่งน้ำหนักอิเล็กทรอนิกส์
Keywords : Internal calibration, Automatic, Electronic balance

[1] กรมวิทยาศาสตร์บริการ กองความสามารถห้องปฏิบัติการและรับรองผลิตภัณฑ์
[2] สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
* E-mail address: jittakant@dss.go.th
** Corresponding author e-mail address: wichit.sirichote@gmail.com, snboonsanit@yahoo.com

1. บทนำ (Introduction)

เครื่องชั่งน้ำหนักเป็นเครื่องมือวัดที่สำคัญและใช้งานกันอย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรมหลายด้าน โดยเฉพาะในทางการแพทย์ อาหาร และปิโตรเคมี ซึ่งมีความต้องการค่าน้ำหนักที่มีความถูกต้องแม่นยำอย่างสูงเนื่องจากส่งผลกระทบต่อคุณภาพชีวิต และความปลอดภัยของประชาชน เครื่องชั่งน้ำหนักที่นิยมใช้กันเป็นเครื่องชั่งน้ำหนักแบบอิเล็กทรอนิกส์เพราะใช้งานได้สะดวก รวดเร็ว และดูแลรักษาง่าย นอกจากนี้ยังมีค่าความละเอียดในการอ่านค่าน้ำหนักได้สูง แต่ความถูกต้องแม่นยำของค่าที่อ่านได้จากเครื่องชั่งแบบอิเล็กทรอนิกส์ขึ้นอยู่กับสภาวะแวดล้อมที่เครื่องชั่งติดตั้งอยู่และขณะใช้งานเครื่องชั่ง เช่น ค่าอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์และความดันบรรยากาศของสภาวะแวดล้อมขณะทำการชั่งน้ำหนัก เป็นต้น ดังนั้นผู้ผลิตเครื่องชั่งจึงได้มีการพัฒนาระบบที่ทำหน้าที่ปรับค่าความถูกต้องของเครื่องชั่งให้เหมาะสมสอดคล้องตามสภาวะแวดล้อมที่เครื่องชั่งใช้งานอยู่ ส่งผลให้ค่าน้ำหนักที่ได้จากการชั่งมีค่าถูกต้องแม่นยำอยู่ตลอดเวลา ระบบที่ทำหน้าที่นี้ถูกเรียกว่า ระบบปรับตั้งเครื่องชั่ง

การปรับตั้งเครื่องชั่ง หมายถึง การปรับให้เครื่องชั่งอ่านค่าน้ำหนักได้ถูกต้องหรือใกล้เคียงค่าน้ำหนักจริงของวัตถุที่นำมาชั่งมากที่สุด โดยให้เครื่องชั่งรับรู้ค่าน้ำหนักที่ถูกต้องและบันทึกลงในหน่วยความจำ ณ ตำแหน่งที่น้ำหนักที่ชั่งมีค่าเป็นศูนย์ ตำแหน่งที่มีค่าน้ำหนักที่ระบุอื่นใดอีกตำแหน่งหนึ่ง ลักษณะกราฟที่เกิดขึ้นจากการปรับตั้งแสดงได้ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ลักษณะรูปกราฟที่เกิดขึ้นจากการปรับตั้ง [1]

เครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ควรได้รับการปรับตั้งในกรณีต่อไปนี้ เช่น เมื่อทำการติดตั้งเครื่องชั่งเป็นครั้งแรก มีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งที่วางเครื่องชั่ง มีการปรับระดับเครื่องชั่งใหม่ หรือสภาวะแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความดันบรรยากาศมีการเปลี่ยนแปลงไปจากภาวะที่ทำการปรับตั้งในตอนแรก

ในการปรับตั้งเครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์นั้นปัจจุบันพบว่าวิธีทั่วไปที่นิยมใช้ในการปรับตั้งเครื่องชั่งมีด้วยกัน 2 วิธี คือการปรับตั้งภายใน และการปรับตั้งภายนอก

1) การปรับตั้งภายใน (Internal calibration) เป็นการปรับตั้งโดยใช้ตุ้มน้ำหนักมาตรฐานที่อยู่ภายในเครื่องชั่งหรือที่เรียกว่า built-in calibration weight

2) การปรับตั้งภายนอก (External calibration) เป็นการปรับตั้งโดยใช้ตุ้มน้ำหนักมาตรฐานจากภายนอกมาทำการวางบนเครื่องชั่งเพื่อให้เครื่องชั่งจำค่าน้ำหนักแล้วทำการปรับตั้ง ตามปกติจะมีค่าใกล้เคียงกับค่า Capacity ของเครื่องชั่ง

สำหรับการปรับตั้งแบบภายในนั้นผู้ผลิตจะทำการติดตั้งตุ้มน้ำหนักปรับตั้งไว้ภายในเครื่อง ซึ่งตุ้มน้ำหนักเหล่านี้จะถูกกระตุ้นให้ทำงานสำหรับปรับตั้งเครื่องชั่งได้ 2 รูปแบบ ได้แก่ แบบ manual ซึ่งผู้ใช้งานเครื่องชั่งเลือกคำสั่งปรับตั้งเครื่องชั่งเอง และแบบอัตโนมัติที่เริ่มทำงานเมื่ออุณหภูมิมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามที่ผู้ผลิตกำหนด เช่น เปลี่ยนแปลงไป 1 ^{o}C หรือครบกำหนดระยะเวลาตามที่ผู้ผลิตกำหนด [2] ซึ่งเป็นฟังก์ชันการทำงานที่มีเฉพาะเครื่องชั่งรุ่นที่มีการปรับตั้งภายในเท่านั้น

ในส่วนของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (Temperature fluctuations) นั้นส่งผลต่อการชั่งน้ำหนักเนื่องจากวัสดุที่ใช้ประกอบเครื่องชั่งมีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเมื่ออุณหภูมิมีค่าเปลี่ยนแปลงไป ยกตัวอย่างเช่น โลหะเกิดการขยายตัวเมื่อถูกทำให้ร้อน ความแรงของก้อนแม่เหล็กถาวรใน Electrodynamic converter ได้รับผลกระทบจากอุณหภูมิโดยที่สนามแม่เหล็กมีค่าอ่อนลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งทำให้การชดเชยค่าน้ำหนักนั้นมีความต้องการกระแสเพิ่มมากขึ้นที่อุณหภูมิแวดล้อมสูงขึ้นเมื่อเทียบกับค่าน้ำหนักเดียวกันที่อุณหภูมิมาตรฐาน ส่งผลให้ค่าที่แสดงมีค่ามากกว่าความเป็นจริง

ดังนั้น จึงได้มีการสร้างเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิไว้ใน Weighing cell เพื่อทำการวัดค่าอุณหภูมิของระบบแม่เหล็กถาวร ผลการวัดที่ได้จะไปชดเชยค่าเบี่ยงเบนที่เกิดจากอุณหภูมิ ผลการชดเชยถูกคำนวณด้วยระบบไมโครโปรเซสเซอร์จากค่าอุณหภูมิที่วัดได้และเพิ่มเข้าไปกับค่าน้ำหนักที่วัดได้ก่อนแสดงผลบนหน้าจอ เนื่องจากเครื่องชั่งแต่ละเครื่องมีการตอบสนองต่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนไปไม่เหมือนกัน เครื่องชั่งแต่ละตัวก็จะถูกทำการชดเชยระหว่างการผลิตเมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงไปสำหรับแต่ละเครื่อง จากข้อมูลผลการชั่งน้ำหนักในขั้นตอนนี้สามารถทำการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์สำหรับการแก้ค่าได้ ค่านี้ถูกเก็บไว้ในหน่วยความจำเพื่อให้ระบบไมโครโปรเซสเซอร์สามารถนำมาใช้ในการคำนวณเพื่อชดเชยค่าที่ได้จากการชั่ง ณ อุณหภูมิต่าง ๆ ค่าผิดพลาดจากการชั่งเนื่องจากอุณหภูมิมีชื่อเรียกว่า Temperature coefficient of the sensitivity (TC) ซึ่งกำหนดให้เป็นการเปลี่ยนแปลงค่า Sensitivity ต่อผลต่างของอุณหภูมิ ยกตัวอย่าง เครื่องชั่งที่มีค่า TC สูงสุด 0.0001%/^{o}C หมายความว่า ค่า Sensitivity ของเครื่องชั่งมีค่าเปลี่ยนไปแค่ 1 ในล้าน เมื่ออุณหภูมิมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลง 1 ^{o}C ตัวอย่างในกรณีที่ไม่มีการปรับตั้งแบบอัตโนมัติ เครื่องชั่งถูกปรับตั้งในตอนเช้า

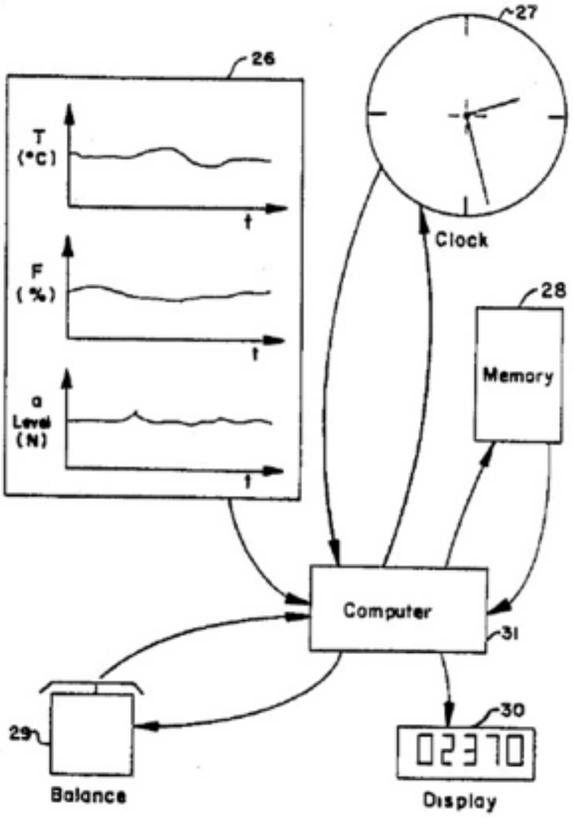
ในตอนบ่ายมีการชั่งวัตถุ m=100 g แต่ระหว่างนั้นอุณหภูมิภายในห้องปฏิบัติการมีค่าเพิ่มขึ้น $\Delta T=5^{\circ}C$ ค่าเบี่ยงเบนมากสุดของผลการชั่งเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิพิจารณาได้ดังนี้

$$\Delta R = (TC \cdot \Delta T)m = (0.0001\%/℃ \cdot 5℃)100g$$
$$= 0.0005\% \cdot 100\ g = 0.5\ mg$$

แต่ถ้าเครื่องชั่งมีระบบปรับตั้งแบบอัตโนมัติ แม้เครื่องชั่งนี้จะถูกติดตั้งภายใน Production room ที่อุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงไปมากกว่า $20^{\circ}C$ ค่าเบี่ยงเบนของค่า Sensitivity ก็ยังคงมีค่าน้อยกว่า 0.00015% เครื่องชั่งที่ไม่มีการปรับตั้งแบบอัตโนมัติและถึงจะมีค่า Temperature coefficient เพียงแค่ $0.0001\%/^{\circ}C$ ก็ยังคงมีค่าเบี่ยงเบนได้ถึง 0.002% ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นถึง 10 เท่า [3]

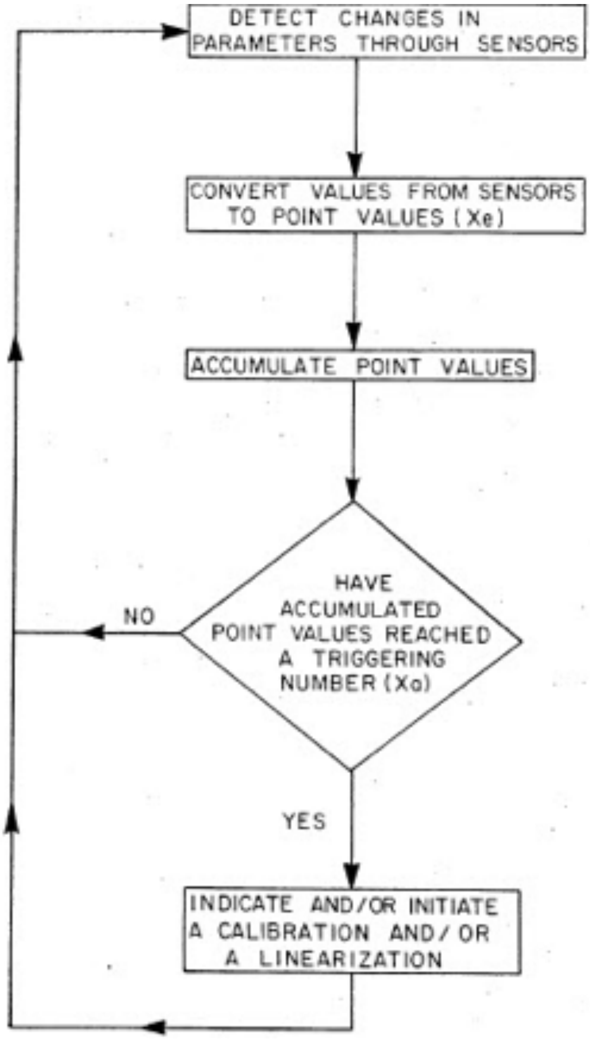
นอกจากสาเหตุเนื่องจากอุณหภูมิแล้วการย้ายเครื่องชั่งจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งก็ส่งผลต่อความถูกต้องน่าเชื่อถือของค่าน้ำหนักเช่นกัน เนื่องจากเครื่องชั่งน้ำหนักไม่ได้วัดค่ามวลของวัตถุแต่จริง ๆ แล้ววัดค่าแรงที่กระทำต่อวัตถุที่นำมาชั่ง แรงกระทำนี้ขึ้นอยู่กับอัตราเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก ณ ตำแหน่งที่ทำการชั่ง ซึ่งอัตราเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกนี้ (โดยประมาณ $9.8\ m/s^2$) ไม่ได้มีค่าคงที่เท่ากันทั่วโลก แต่ขึ้นอยู่กับตำแหน่งโดยเฉพาะตำแหน่งละติจูดและความสูงเหนือระดับน้ำทะเล ยกตัวอย่างเช่น เมื่อเครื่องชั่งน้ำหนักถูกเคลื่อนย้ายไปยังตำแหน่งที่สูงกว่าเดิม 1 ชั้น จะมีระยะห่างจากตำแหน่งศูนย์กลางของโลกออกไปอีก 3 เมตร ซึ่งมีค่าเท่ากับ ½ ในล้านของระยะทางเดิม ค่าอัตราเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงจะมีค่าลดลงไป 1 ในล้านของค่าเดิมเมื่อเปรียบเทียบกับระดับชั้นที่ต่ำกว่า เนื่องจากแรงโน้มถ่วงมีค่าลดลงเป็นอัตราส่วนของระยะทางยกกำลังสอง ถ้าชั่งวัตถุ 200 g ค่าน้ำหนักจะลดลงไป 1 ในล้าน ซึ่งเท่ากับ 0.2 mg ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงควรมีแนวทางแก้ไขผลกระทบอันนี้ การแก้ไขก่อนทำการขนส่งเครื่องชั่งน้ำหนักนั้นเป็นไปไม่ได้เนื่องจากยังไม่ทราบค่าอัตราเร่งโน้มถ่วงที่แท้จริงของตำแหน่งที่จะติดตั้งเครื่องชั่ง แต่ถึงแม้จะทราบค่าแล้วเครื่องชั่งน้ำหนักก็อาจถูกนำไปใช้สำหรับการชั่ง ณ ตำแหน่งเฉพาะซึ่งแม้จะเป็นภายในตึกเดียวกันก็ตามแต่คนละชั้น ซึ่งผลกระทบนี้สามารถรับรู้ได้สำหรับเครื่องชั่งน้ำหนักแบบวิเคราะห์ (Analytical balance) ในการแก้ไขสถานการณ์ที่กล่าวมา เครื่องชั่งน้ำหนักถูกติดตั้งอุปกรณ์สำหรับปรับตั้งไว้ซึ่งทำให้สามารถแก้ไขค่า Sensitivity (slope) ของ Characteristic curve ของเครื่องชั่งน้ำหนักที่มีความต้องการผลการชั่งถูกต้อง ณ ตำแหน่งที่ทำการชั่งน้ำหนักนั้น เมื่อทำการกระตุ้นคำสั่งปรับตั้งของเครื่องชั่ง เครื่องชั่งจะทำการชั่งตุ้มน้ำหนักอ้างอิงภายในข้างใต้จานชั่งน้ำหนักด้วยการทำงานของมอเตอร์ ผลจากการทำการปรับตั้งการชั่งน้ำหนักซึ่งเปลี่ยนไปตามสถานที่ ระบบไมโครโปรเซสเซอร์จะทำการคำนวณค่าแฟกเตอร์ (Calibration factor) และเก็บบันทึกค่านี้ไว้จนกระทั่งมีการปรับตั้งใหม่ เมื่อมีค่าแฟกเตอร์นี้แล้วทำให้สามารถตั้งค่า Sensitivity ของเครื่องชั่งได้อย่างถูกต้อง ผลการชั่งน้ำหนักภายหลังการปรับตั้งจะมีความสัมพันธ์กับค่า Slope ที่ถูกต้องของ Characteristic curve ดังนั้นวิธีแก้ไขทำได้โดยสอบเทียบเครื่องชั่งทุกครั้งที่มีการย้ายตำแหน่ง และใช้เครื่องชั่งที่มีระบบปรับตั้งเครื่องชั่งแบบอัตโนมัติ [4]

สำหรับระบบปรับตั้งเครื่องชั่งแบบอัตโนมัตินี้ได้มีการพัฒนาขึ้นมาแล้วแต่เป็นแบบที่ติดตั้งมาภายในโครงสร้างเครื่องชั่ง [5] โดยระบบปรับตั้งนี้จะทำการเปรียบเทียบผลต่างของค่าสภาวะแวดล้อมที่วัดได้กับผลการวัดที่ผ่านมาก่อนหน้านั้นกับขอบเขตที่กำหนดไว้ ถ้าเกินขอบเขตที่กำหนดไว้ระบบปรับตั้งจะถูกกระตุ้นให้ทำงาน โดยตัวแปรที่ตรวจสอบได้แก่ค่าอุณหภูมิ ความชื้น และเวลา ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 Block diagram ของระบบปรับตั้งอัตโนมัติแบบ Embodiment [5]

นอกจากนี้ยังมีการคิดค้นวิธีการสำหรับพิจารณาความจำเป็นในการปรับตั้งเครื่องชั่งโดยทำการแปลงค่าที่วัดได้จากตัวตรวจวัด (sensors) ให้เป็นค่าดิจิตอล และเก็บรวบรวมค่าเหล่านี้ไว้เพื่อนำไปเทียบกับค่าอ้างอิงที่กำหนดไว้ในส่วนกระตุ้นคำสั่งการทำงานฟังก์ชันปรับตั้งเครื่องชั่ง ถ้าค่าที่เก็บรวบรวมไว้เกินค่าอ้างอิงระบบจะไปกระตุ้นการทำงานของฟังก์ชันดังกล่าว [6] ดังแสดงในรูปที่ 3



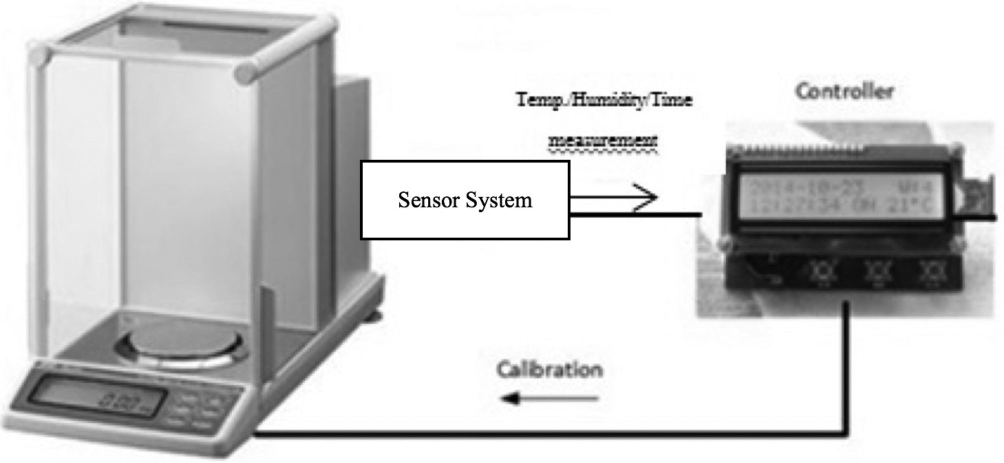
รูปที่ 3 แผนผังของคำสั่งควบคุมการทำงานของระบบปรับตั้งอัตโนมัติแบบ Embodiment [6]

สำหรับระบบที่ผู้ใช้งานต้องทำการกระตุ้นระบบ (Manual) ผู้ใช้งานเครื่องชั่งจะต้องมีการเก็บรวบรวมข้อมูลสภาวะแวดล้อมอย่างเพียงพอและมีความรู้ความเข้าใจในการประเมินผลกระทบที่เกิดขึ้นจากสภาวะแวดล้อมว่าส่งผลต่อค่าความถูกต้องของเครื่องชั่งเป็นเท่าใด เพื่อนำไปใช้ประกอบในการตัดสินใจว่าควรทำการปรับตั้งเครื่องชั่งเมื่อใด ซึ่งในทางปฏิบัติผู้ใช้งานเครื่องชั่งส่วนใหญ่ขาดความรู้ความเข้าใจทางเทคนิคในการประเมินผลกระทบ และไม่มีการเก็บรวบรวมข้อมูลสภาวะแวดล้อมไว้ หรือถ้ามีก็ต้องใช้เวลาในการเก็บรวบรวมข้อมูล ส่งผลให้เกิดความล่าช้าและไม่สะดวกต่อการปฏิบัติงาน ดังนั้นผู้ใช้งานบางรายจึงตัดสินใจทำการปรับตั้งเครื่องชั่งก่อนการใช้งานทุกครั้งเพื่อป้องกันผลกระทบที่จะเกิดขึ้น ซึ่งบางครั้งอาจไม่มีความจำเป็นต้องทำการปรับตั้งเครื่องชั่งก็ได้ การปรับตั้งเครื่องชั่งบ่อยเกินความจำเป็นนี้ส่งผลให้เครื่องชั่งมีการทำงานเพิ่มขึ้น กลไกปรับตั้งภายในเกิดการสึกหรอง่ายขึ้น ส่งผลให้อายุการใช้งานของเครื่องชั่งลดลง นอกจากนี้ผู้ใช้งานเครื่องชั่งบางรายเกิดความเข้าใจคลาดเคลื่อนว่าทำการปรับตั้งเพียงครั้งเดียวก็สามารถใช้งานได้ตลอดทั้งวัน ทำให้ผู้ใช้งานไม่ได้ทำการปรับตั้งเครื่องชั่งในเวลาที่เหมาะสมส่งผลให้ค่าที่ได้จากการชั่งน้ำหนักมีค่าผิดพลาดโดยที่ผู้ใช้งานไม่ทราบ ดังนั้นผู้ผลิตเครื่องชั่งจึงได้ทำการพัฒนาระบบปรับตั้งแบบอัตโนมัติขึ้นมาเพื่อลดปัญหาความยุ่งยากที่เกิดขึ้นต่อผู้ใช้งาน โดยที่ผู้ใช้งานเครื่องชั่งไม่ต้องกังวลกับการเปลี่ยนแปลงไปของสภาวะแวดล้อมเนื่องจากเครื่องชั่งสามารถทำการประเมินผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของสภาวะแวดล้อมและทำการปรับตั้งเองโดยอัตโนมัติ ทำให้สามารถลดความกังวลของผู้ใช้งาน เพิ่มความสะดวกในการใช้งาน และยืดอายุการใช้งานเครื่องชั่งจากการปรับตั้งเครื่องชั่งบ่อยเกินความจำเป็น แต่เครื่องชั่งที่มีระบบปรับตั้งแบบอัตโนมัตินี้มีราคาสูงขึ้นทำให้ผู้ใช้งานมีต้นทุนสูงขึ้นจากการซื้อเครื่องชั่งดังกล่าว

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะทำการปรับปรุงพัฒนาเครื่องชั่งน้ำหนักอิเล็กทรอนิกส์ที่มีระบบปรับตั้งภายใน (Internal calibration) แบบที่ผู้ใช้งานต้องทำการกระตุ้นระบบ (Manual) ให้กลายเป็นเครื่องชั่งน้ำหนักอิเล็กทรอนิกส์ที่มีการกระตุ้นระบบปรับตั้งภายในโดยอัตโนมัติ เพื่อทดแทนการซื้อเครื่องชั่งแบบอัตโนมัติใหม่ที่มีราคาสูงกว่า ทำให้ประเทศไทยสามารถประหยัดเงินตราต่างประเทศในการที่จะต้องซื้อเครื่องชั่งแบบอัตโนมัติ ปัจจุบันภาคอุตสาหกรรมและห้องปฏิบัติการส่วนใหญ่มีการใช้เครื่องชั่งแบบที่ผู้ใช้งานต้องทำการกระตุ้นระบบ (Manual) อยู่แล้ว ดังนั้นสามารถนำระบบจากงานวิจัยนี้ไปใช้ร่วมด้วย เพื่อทดแทนการซื้อเครื่องชั่งแบบอัตโนมัติใหม่ที่มีราคาสูงกว่าในการทำให้ผลการชั่งน้ำหนักมีความถูกต้องแม่นยำ เกิดความน่าเชื่อถือมากขึ้นต่อผลิตภัณฑ์ หรือผลการวิเคราะห์ทดสอบที่ได้ ซึ่งสอดคล้องกับยุทธศาสตร์การมาตรฐานแห่งชาติ ด้านมาตรวิทยา ในการที่ไปเพิ่มขีดความสามารถในการวัดให้เกิดการยอมรับในระดับสากลและสนับสนุนกิจกรรมด้านการมาตรฐานของประเทศ นอกจากนี้ยังส่งผลกระทบในเชิงเศรษฐกิจ เช่น สินค้าหรือผลิตภัณฑ์ของผู้ประกอบการไทยได้รับการยอมรับจากต่างประเทศเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากคุณภาพเป็นไปตามที่กำหนดจากผลการวัดที่ถูกต้อง ทำให้สามารถส่งออกสินค้านำรายได้เข้าประเทศ สำหรับผลกระทบทางสังคมส่งผลให้คุณภาพชีวิตของคนในสังคมดีขึ้น โดยเฉพาะผลการชั่งน้ำหนักในอุตสาหกรรมอาหารและยา ทำให้เกิดความปลอดภัยต่อผู้บริโภค

2. วิธีการวิจัย (Experimental methods)

แนวทางในการสร้างระบบปรับตั้งแบบอัตโนมัตินี้ประกอบไปด้วยระบบตรวจสอบภาวะ (Sensor system) ต่างๆ เช่น อุณหภูมิ/ความชื้น/เวลา และระบบควบคุมคำสั่งการทำงานของเครื่องชั่ง (Controller) ทั้งนี้ผู้ใช้สามารถกำหนดขอบเขตเงื่อนไขของภาวะต่าง ๆ ได้ตามความเหมาะสมและตามความแปรปรวนที่เป็นจริง



รูปที่ 4 การทำงานของระบบปรับตั้งเครื่องชั่งแบบอัตโนมัติ

ของสภาวะแวดล้อมในการทำงาน เช่น อุณหภูมิมีค่าเปลี่ยนแปลงไม่เกิน ±2°C ความชื้นมีค่าเปลี่ยนแปลงไม่เกิน ±10%RH ระยะเวลาเปลี่ยนแปลงไปทุกๆ 2 ชั่วโมง เป็นต้น รูปที่ 4 แสดงการทำงานของระบบปรับตั้งเครื่องชั่งแบบอัตโนมัติที่พัฒนาขึ้นมา โดยตัว Sensor system จะทำการตรวจวัดค่าอุณหภูมิ ความชื้น และระยะเวลาว่าเกินขอบเขตเงื่อนไขที่กำหนดไว้หรือไม่ ถ้าค่าที่วัดได้เกินขอบเขตที่กำหนดไว้ ตัว Controller จะทำการส่งสัญญาณไปที่ตัวเครื่องชั่งผ่านช่องเชื่อมต่อสัญญาณเพื่อทำการกระตุ้นฟังก์ชันการปรับตั้งภายในที่มีอยู่ของเครื่องชั่ง

ขั้นตอนการดำเนินงาน ประกอบด้วย

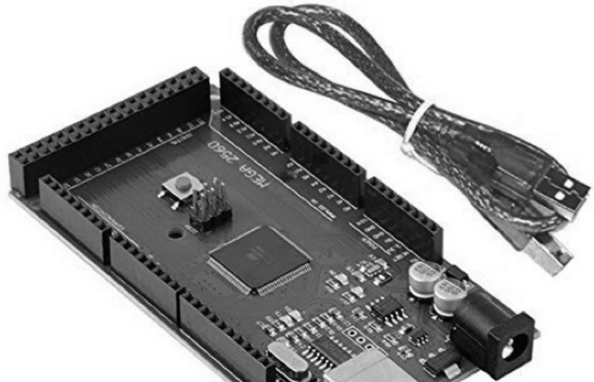
1. สร้างระบบตรวจวัด (Sensor) สำหรับวัดค่าสภาวะแวดล้อม (อุณหภูมิ ความชื้น ความดันบรรยากาศ) และตัววัดเวลา โดยให้สามารถแสดงค่าวัน วันที่ และเวลาที่ทำการวัดได้ ดังแสดงในรูปที่ 5

รูปที่ 5 ระบบตรวจวัด (Sensor) สำหรับวัดค่าสภาวะแวดล้อมที่มีการเพิ่มเติมการแสดงค่าวัน วันที่ และเวลา

ระบบตรวจวัด (Sensor) ดังกล่าวมีคุณลักษณะดังนี้

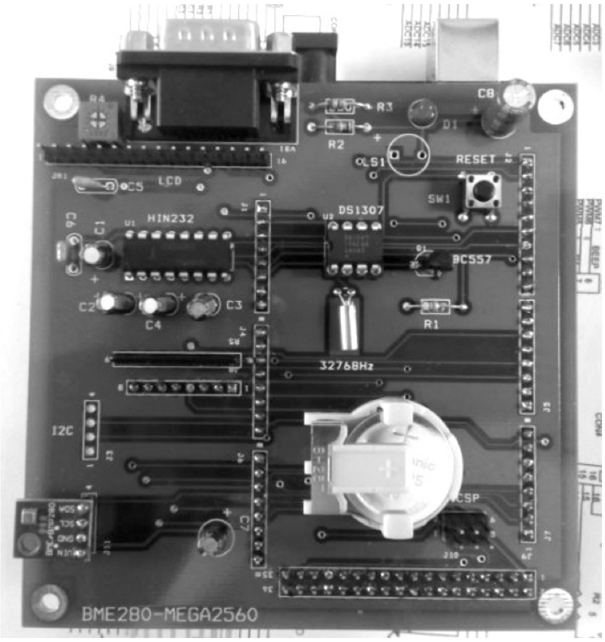
- วัดค่าอุณหภูมิได้ในช่วงตั้งแต่ -40°C ถึง 85°C ความละเอียด 0.1°C
- วัดค่าความชื้นได้ในช่วงตั้งแต่ 0 %RH ถึง 100 %RH ความละเอียด 0.1 %RH
- วัดค่าความดันบรรยากาศได้ในช่วงตั้งแต่ 300 hPa ถึง 1,100 hPa ความละเอียด 0.1 hPa
- วัดเวลาในหน่วยวินาที แบบ real-time ความละเอียด 1 s
- มีช่อง RS232 สำหรับถ่ายโอนข้อมูล
- มีจอ LCD แสดงค่าอุณหภูมิ ความชื้น ความดันบรรยากาศ และเวลา
- มีแป้นพิมพ์สำหรับตั้งค่าการทำงาน

2. สร้างระบบควบคุมการทำงาน (Microcontroller) เพื่อใช้ควบคุมการทำงานของฟังก์ชันการปรับตั้งเครื่องชั่งน้ำหนัก และฟังก์ชันอื่น ๆ ที่ต้องการ ดังแสดงในรูปที่ 6



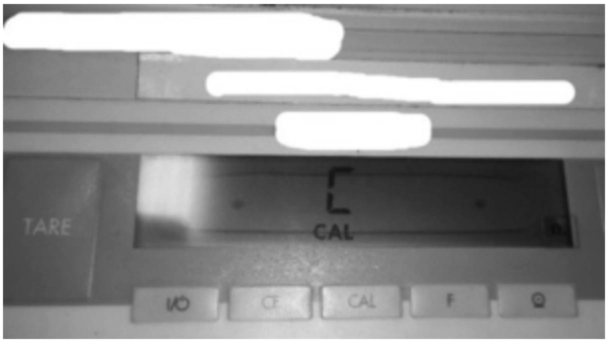
รูปที่ 6 ระบบควบคุมการทำงาน (Microcontroller)

3. ประกอบระบบตรวจวัด (Sensor) กับระบบควบคุมการทำงาน (Microcontroller) เข้าด้วยกันโดยทำการเชื่อมต่อผ่าน I2C port J3, SDA pin และ SCL pin ดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 ชุดประกอบระหว่างระบบตรวจวัดกับระบบควบคุมการทำงาน

4. ออกแบบโปรแกรมควบคุมการทำงานการเชื่อมต่อระหว่างระบบควบคุมการทำงานกับเครื่องชั่งน้ำหนักอิเล็กทรอนิกส์ด้วยภาษาซี โดยทำการตั้งค่าต่อไปนี้ Port เชื่อมต่อ, Baud rate, Data, Parity, Stop bit เป็นต้น เพื่อใช้สื่อสารกับเครื่องชั่งน้ำหนักอิเล็กทรอนิกส์ โดยวิธีการตั้งค่าต่างๆ ปฏิบัติตามคู่มือผู้ผลิตเครื่องชั่งน้ำหนักอิเล็กทรอนิกส์ โดยในเบื้องต้นจะทำการเขียนโปรแกรมลงในเครื่องคอมพิวเตอร์ PC และทำการทดสอบโปรแกรมที่ออกแบบขึ้นมา โดยทำการเชื่อมต่อเครื่องชั่งน้ำหนักอิเล็กทรอนิกส์เข้ากับเครื่องคอมพิวเตอร์ผ่าน RS232 cable ดังแสดงในรูปที่ 8 โดยในการเชื่อมต่อสื่อสารนี้จะใช้โปรแกรม PC terminal emulator Tera Term v4.92 โดยทำการตั้งค่าในการเชื่อมต่อสื่อสารตามคู่มือผู้ผลิต



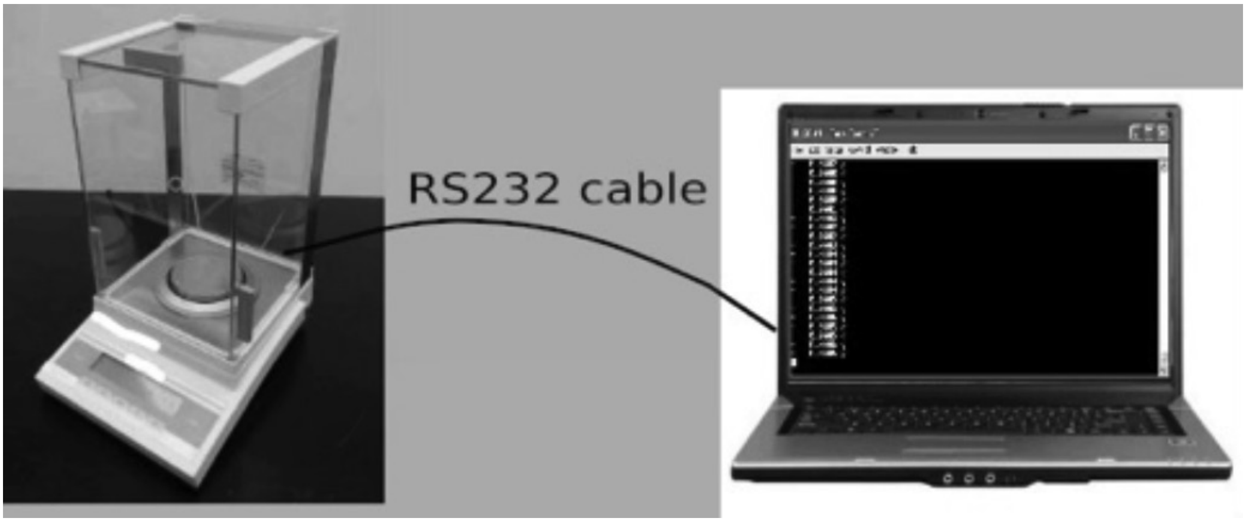
รูปที่ 9 ผลการเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์เพื่อกระตุ้นระบบปรับตั้งภายในของเครื่องชั่ง

5. ตรวจสอบคำสั่งกระตุ้นระบบปรับตั้งภายในของเครื่องชั่งที่เขียนโปรแกรมขึ้นมา จากผลการทดลองพบว่าเครื่องชั่งมีการตอบสนองต่อคำสั่งที่ป้อนเข้าไปโดยทำการกระตุ้นระบบปรับตั้งภายในของเครื่องชั่ง ดังแสดงในรูปที่ 9

6. ทำการอัดโปรแกรมที่ออกแบบลงในหน่วยประมวลผลของระบบควบคุมการทำงานเพื่อให้สามารถเชื่อมต่อและกระตุ้นระบบปรับตั้งภายในของเครื่องชั่งได้โดยตรงโดยไม่ผ่านคอมพิวเตอร์

7. สอบเทียบเครื่องชั่งในกรณีที่เครื่องชั่งได้รับการปรับตั้งแบบที่ผู้ใช้งานต้องทำการกระตุ้นระบบ (Manual) และแบบอัตโนมัติ

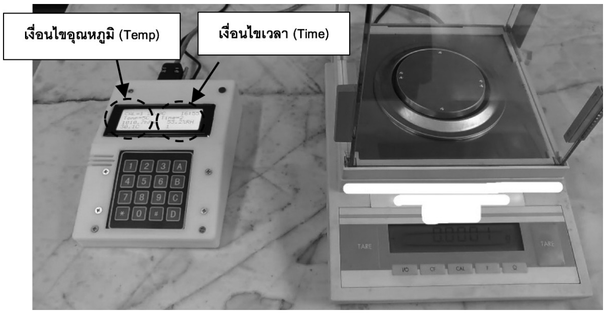
8. เปรียบเทียบผลการสอบเทียบเครื่องชั่งระหว่างการปรับตั้งแบบที่ผู้ใช้งานต้องทำการกระตุ้นระบบ (Manual) และแบบอัตโนมัติ



รูปที่ 8 การเชื่อมต่อระหว่างเครื่องชั่งน้ำหนักกับคอมพิวเตอร์ผ่าน RS232 cable

3. ผลและวิจารณ์ (Results and discussion)

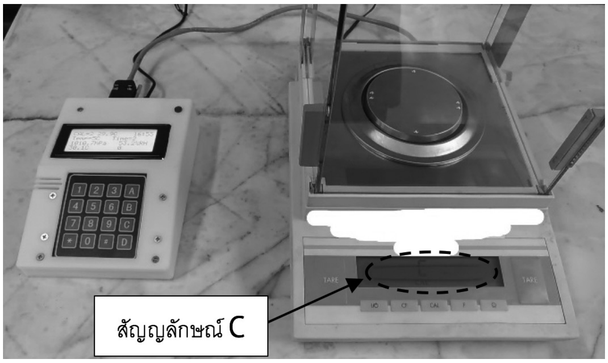
จากการเชื่อมต่อระบบควบคุมการทำงานเข้ากับเครื่องชั่งน้ำหนักอิเล็กทรอนิกส์ดังแสดงในรูปที่ 10 โดยทำการตั้งค่าการเชื่อมต่อที่เครื่องชั่งน้ำหนักอิเล็กทรอนิกส์เพื่อสื่อสารกับระบบควบคุมการทำงาน โดยตั้งค่า Baud rate, Parity และ Stop bit ให้สอดคล้องกับค่าที่โปรแกรมไว้ในระบบควบคุมการทำงาน และทดลองตั้งค่าเงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ เช่น Temp = $5^{o}C$ หรือค่าเวลา เช่น Time = 2 (หน่วยเป็นนาที) ที่แป้นสำหรับตั้งค่า เพื่อไปกระตุ้นคำสั่งระบบปรับตั้งภายใน (รูปที่ 10)



รูปที่ 10 การเชื่อมต่อระบบควบคุมการทำงานเข้ากับเครื่องชั่งและการตั้งค่าเงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและเวลา

จากผลการทดลองเบื้องต้น พบว่าเมื่ออุณหภูมิหรือเวลามีการเปลี่ยนแปลง ระบบปรับตั้งภายในของเครื่องชั่งถูกกระตุ้นให้ทำงานได้เองโดยอัตโนมัติ โดยปรากฏสัญลักษณ์ C บนหน้าจอแสดงผล ซึ่งเป็นการแสดงการทำงานของระบบปรับตั้งเครื่องชั่งดังแสดงในรูปที่ 11

จากนั้นได้ทดลองเชื่อมต่อระบบควบคุมการทำงานที่ได้สร้างขึ้นมานี้กับเครื่องชั่งรุ่นเดียวกันแต่คนละเครื่อง (หมายเลขเครื่อง



รูปที่ 11 การแสดงการทำงานของระบบปรับตั้งภายในของเครื่องชั่ง

แตกต่างกัน) พบว่าระบบควบคุมการทำงานนี้สามารถสื่อสารและกระตุ้นคำสั่งระบบปรับตั้งภายในของเครื่องชั่งน้ำหนักอิเล็กทรอนิกส์ได้เช่นกัน เนื่องจากว่ามีการตั้งค่าที่เกี่ยวกับฟังก์ชันระบบปรับตั้งเครื่องชั่ง และค่าที่เกี่ยวข้องกับการเชื่อมต่อสื่อสารเหมือนกัน

ต่อมาดำเนินการสอบเทียบเครื่องชั่งในกรณีที่เครื่องชั่งได้รับการปรับตั้งแบบที่ผู้ใช้งานต้องทำการกระตุ้นระบบ (Manual) และแบบอัตโนมัติ โดยมีผลการสอบเทียบดังแสดงในตารางที่ 1

หลังจากนั้นดำเนินการเปรียบเทียบผลการสอบเทียบเครื่องชั่งระหว่างการปรับตั้งแบบที่ผู้ใช้งานต้องทำการกระตุ้นระบบ (Manual) และแบบอัตโนมัติ โดยพิจารณาจากค่า E_n numbers ซึ่งมีหลักเกณฑ์ดังนี้ ถ้าค่า $E_n \leq 1.0$ ผลผ่าน แสดงว่าผลการสอบเทียบของทั้งสองแบบไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่ถ้าค่า $E_n > 1.0$ ผลไม่ผ่าน แสดงว่าผลการสอบเทียบของทั้งสองแบบมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งผลการเปรียบเทียบโดยใช้ค่า E_n numbers ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 2

ตารางที่ 1 ผลการสอบเทียบเครื่องชั่งในกรณีที่เครื่องชั่งได้รับการปรับตั้งแบบที่ผู้ใช้งานต้องทำการกระตุ้นระบบ (Manual) และแบบอัตโนมัติ (Auto)

ค่าที่ระบุ (g)	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
การปรับตั้ง	ค่าแก้ (±ค่าความไม่แน่นอน) : หน่วย g									
Manual	-0.0001 (0.000087)	-0.0001 (0.00011)	-0.0002 (0.00014)	0.0000 (0.00015)	0.0000 (0.00016)	-0.0001 (0.00022)	-0.0001 (0.00022)	0.0000 (0.00026)	+0.0001 (0.00026)	+0.0003 (0.00027)
Auto	-0.0001 (0.00015)	0.0000 (0.00011)	-0.0001 (0.00014)	-0.0001 (0.00015)	0.0000 (0.00015)	-0.0002 (0.00022)	-0.0003 (0.00022)	0.0000 (0.00026)	+0.0001 (0.00026)	+0.0003 (0.00027)

ตารางที่ 2 ค่า E_n numbers ของผลการสอบเทียบระหว่างการปรับตั้งแบบที่ผู้ใช้งานต้องทำการกระตุ้นระบบ (Manual) และแบบอัตโนมัติ (Auto)

ค่าที่ระบุ (g)	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
E_n numbers	0.0	0.6	0.5	0.5	0.0	0.3	0.6	0.0	0.0	0.0
สรุปผล	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน

4. สรุป (Conclusion)

จากผลการทดลองนี้พบว่าระบบควบคุมการปรับตั้งเครื่องชั่งอัตโนมัติที่พัฒนาขึ้นมานี้ ประกอบด้วยระบบตรวจวัดที่สามารถวัดค่าอุณหภูมิ ความชื้น ความดันบรรยากาศและเวลา และระบบควบคุมการทำงานที่มีการเขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานการเชื่อมต่อสื่อสารกับเครื่องชั่ง เพื่อใช้ในการกระตุ้นระบบปรับตั้งภายในของเครื่องชั่งได้โดยอัตโนมัติ โดยที่ผลการสอบเทียบเครื่องชั่งระหว่างการปรับตั้งแบบที่ผู้ใช้งานต้องทำการกระตุ้นระบบ (Manual) และแบบอัตโนมัติไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งผู้ใช้งานเครื่องชั่งสามารถนำระบบที่พัฒนาขึ้นมานี้ไปเชื่อมต่อกับเครื่องชั่งที่มีระบบปรับตั้งภายในแบบ Manual เพื่อเปลี่ยนให้เครื่องชั่งสามารถทำการปรับตั้งเครื่องชั่งได้เองแบบอัตโนมัติ โดยสามารถกำหนดค่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและเวลาที่ต้องการจะใช้เป็นเงื่อนไขในการกระตุ้นระบบปรับตั้งภายในของเครื่องชั่งได้ผ่านแป้นพิมพ์ ทำให้ผู้ใช้งานเครื่องชั่งไม่ต้องซื้อเครื่องชั่งที่มีระบบปรับตั้งแบบอัตโนมัติซึ่งมีราคาสูงกว่าเป็นการประหยัดงบประมาณ และยังเพิ่มความถูกต้องแม่นยำให้กับผลการชั่งน้ำหนักอีกด้วย

5. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ คุณสมโภชน์ บุญสนิท กรมวิทยาศาสตร์บริการ ที่ให้คำปรึกษา และขอขอบคุณ สำนักพัฒนาศักยภาพนักวิทยาศาสตร์ห้องปฏิบัติการ (พศ.) ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องชั่งสำหรับใช้ในงานวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง (References)

[1] จิตตกานต์ อินเที่ยง. การปรับตั้งเครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ (ตอนที่ 1). *UPDATE สมท. สาร.* 2549, **11**(1) มกราคม - มีนาคม, 13.

[2] SCORER, T., M. PERKIN and M. BUCKLEY. *Measurement good practice guide No.70 : weighing in the pharmaceutical industry*. Middlesex : NPL, 2004, pp.15-16.

[3] HEINZ, R. and R. ARTHUR. *The New analytical balance AT from METTLER*. Switzerland : Mettler, 1988.

[4] KOCHSIEK, M. Fundamentals of Mass Determination. Greifensee : Mettler-Toledo, 1991, pp. 84, 88.

[5] METTLER INSTRUMENT AG. Method for the automatic calibration of a high-resolution electronic balance. ARTHUR, B. *United States Patent US 4,858,161A*. 1989-08-15.

[6] METTLER INSTRUMENT AG. Method for determining the necessity of adjusting a high-resolution electronic balance. FRITZ F., M. LINUS and R. ARTHUR. *United States Patent US 5,056,050A*. 1991-10-08.

การวิเคราะห์ความเสียหายในเหล็กเส้นเสริมคอนกรีตที่เสียรูปที่อัตราความเครียดที่แตกต่างโดยใช้กลไกความเสียหายต่อเนื่อง

Analysis of damage in steel bar for reinforced concrete deformed at varied strain rates by continuum damage mechanism

6

วีระชัย ลามอ [1*]
Werachai Lamo [1*]

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้ต้องการตรวจสอบการพัฒนาความเสียหายของเหล็กเส้นเสริมคอนกรีตโดยกลไกความเสียหายต่อเนื่องจากตัวแปรความเสียหาย $D_s = 1 - \tilde{E}/E$ และ $D_e = 1 - \sqrt{\tilde{E}/E}$ ตลอดกระบวนการเสียรูปภายใต้อัตราความเครียดที่แตกต่าง 0.001 s^{-1}, 0.005 s^{-1}, 0.01 s^{-1}, 0.02 s^{-1} จากการศึกษาการเพิ่มขึ้นของอัตราความเครียดในช่วงแรก 0.001 s^{-1} ถึง 0.01 s^{-1} มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของความเสียหายอย่างมีนัยสำคัญ ประมาณ 0.33 และ 0.18 กล่าวอีกนัยหนึ่ง ในช่วงแรก อัตราความเสียหายมีการเพิ่มที่สูง เมื่ออัตราความเครียดเพิ่มมากขึ้น และต่อมาการเพิ่มขึ้นของอัตราความเครียดในช่วงหลัง 0.01 s^{-1} ถึง 0.02 s^{-1} มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของความเสียหายที่น้อยกว่า ประมาณ 0.17 และ 0.11 กล่าวอีกนัยหนึ่ง ในช่วงหลังอัตราความเสียหายมีการเพิ่มที่ต่ำกว่า เมื่ออัตราความเครียดเพิ่มมากขึ้น

Abstract

This research study aimed to examine damage evolution in steel bar for reinforced concrete by continuum damage mechanism from $D_s = 1 - \tilde{E}/E$ and $D_e = 1 - \sqrt{\tilde{E}/E}$ throughout deforming process at varied strain rates from 0.001 s^{-1}, 0.005 s^{-1}, 0.01 s^{-1} to 0.02 s^{-1}. From the research study, the increase of the strain rates in the beginning (0.001 s^{-1} to 0.01 s^{-1}) had a significant effect on the development of the damage, approximately 0.33 and 0.18. In other words, the damage rate greatly increased in the initial stage when the stain rate increased. In the later stage, the rising of the strain rates from 0.01 s^{-1} to 0.02 s^{-1} had a slighter effect on the development of the damage, approximately 0.17 and 0.11. In other words, the damage rate increased lower when the strain rate rose additionally.

คำสำคัญ : การเปลี่ยนแปลงความเสียหาย มอดุลัสยืดหยุ่น อัตราความเครียด
Keywords : Damage evolution, Elastic modulus, Strain rate

[1] กรมวิทยาศาสตร์บริการ กองวัสดุวิศวกรรม
*Corresponding author e-mail address: werachai@dss.go.th

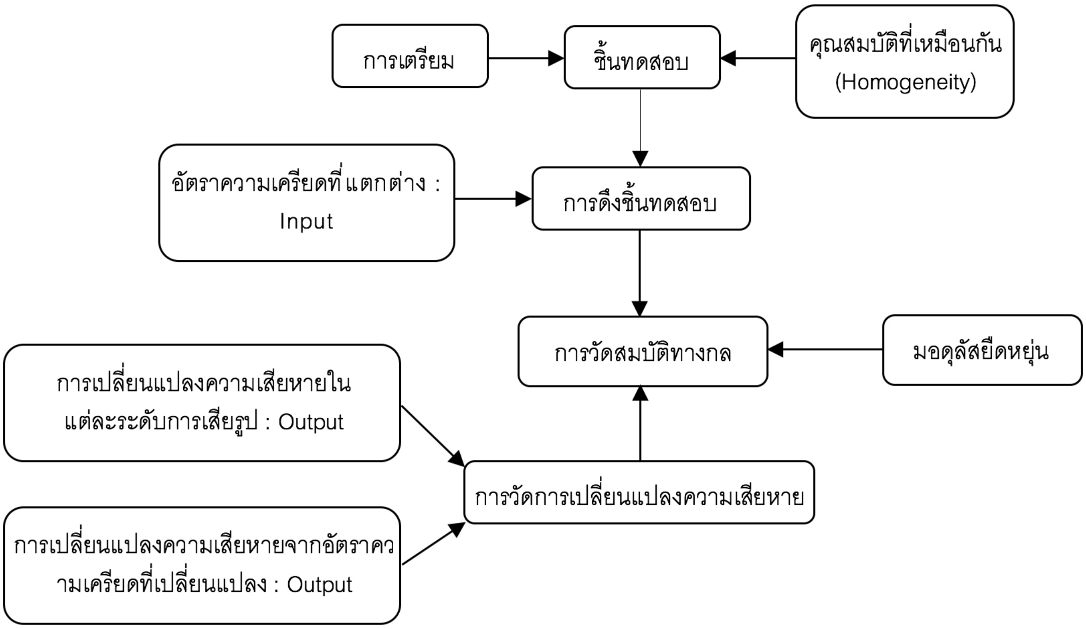
1. บทนำ (Introduction)

ในอุตสาหกรรมอะลูมิเนียม วัสดุอะลูมิเนียมถูกใช้งานภายใต้แรงกระทำรูปแบบต่าง ๆ ที่ซึ่งนำสู่การเสื่อมสภาพ และการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและสมบัติทางกล กล่าวอีกนัยหนึ่งคือเกิดความเสียหาย จากการศึกษาวิจัยพบว่าในการเปลี่ยนแปลงความเสียหายของโลหะผสมอะลูมิเนียม 5083 ที่เสียรูปจากการทดสอบแรงดึงที่อัตราความเครียด 0.001 s^{-1} 0.01 s^{-1}, และ 0.1 s^{-1} โดยใช้กลไกความเสียหายต่อเนื่อง (Continuum damage mechanism) เห็นได้ว่ากลไกความเสียหายต่อเนื่องสามารถแสดงให้เห็นการลดลงของความสามารถในการรับแรงและการเกิดขึ้นของจุดบกพร่องซึ่งเกี่ยวข้องกับอัตราความเครียด [1] ความเค้นก่อให้เกิดจุดบกพร่องที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่า และทำให้จุดบกพร่องที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่าที่มีอยู่ขยายใหญ่ ปริมาณความเค้นที่แตกต่างมีผลกระทบต่อคุณลักษณะโลหะในรูปของการเกิดขึ้น การขยายใหญ่และการรวมตัวของจุดบกพร่อง ในระดับที่แตกต่าง ความเข้าใจการพัฒนาความเสียหายจากอิทธิผลของอัตราความเครียดเป็นสิ่งที่น่าสนใจ เพื่อที่สามารถใช้งานวัสดุได้อย่างเหมาะสมและดีขึ้น [2]

นอกจากนั้น จากการศึกษาวิจัยการเปลี่ยนแปลงความเสียหายของเหล็กที่มีรูพรุนโดยใช้รูปแบบความเสียหายที่อยู่บนตัวแปร *D* ที่คำนวณจากมอดุลัสยืดหยุ่นและความหนาแน่น พบว่าการพัฒนาความเสียหายเกิดขึ้นสองระดับระหว่างกระบวนการเสียรูป เนื่องจากอิทธิพลของรูพรุนที่มีต่อพฤติกรรมการเกิดความเสียหาย [3] มีการใช้รูปแบบความเสียหาย GTN และรูปแบบความเสียหายต่อเนื่องอธิบายพฤติกรรมความเสียหายของแท่งเหล็กจากการทดสอบแรงดึง ผลการศึกษาวิจัยแสดงให้เห็นว่ารูปแบบความเสียหายทั้งสองสามารถแสดงให้เห็นการพัฒนาความเสียหาย อย่างไรก็ตามรูปแบบความเสียหายทั้งสองมีความไวในการแสดงให้เห็นการเพิ่มขึ้นของความเสียหายที่แตกต่าง ๆ กัน ดังนั้น การเลือกใช้รูปแบบความเสียหายที่เหมาะสมจะสามารถให้ข้อมูลการพัฒนาความเสียหายที่แม่นยำได้ [4]

จากหลักการกลไกความเสียหายต่อเนื่อง (Continuum damage mechanism) ที่สมมุติการเปลี่ยนแปลงความเสียหายบนการขยายใหญ่ของจุดบกพร่องที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่า ซึ่งขึ้นอยู่กับผลการเสื่อมสภาพของโครงสร้างอะตอมที่เกิดจากกระบวนการเสียรูปที่ไม่สามารถย้อนกลับได้ และผลลัพธ์ดังกล่าวส่งผลต่อการตอบสนองของโลหะ [5] รูปแบบกลไกความเสียหายต่อเนื่อง (Damage Variable *(D)*) มีความสามารถในการวัดการเปลี่ยนแปลงความเสียหาย [6] การใช้รูปแบบกลไกความเสียหายต่อเนื่องร่วมกับการวัดความเสียหาย สามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงความเสียหายและการเสื่อมสภาพได้อย่างต่อเนื่อง กล่าวได้ว่าแนวคิดกลไกความเสียหายควบคู่กับรูปแบบกลไกความเสียหายต่อเนื่องจะสามารถทำให้บรรลุผลความต้องการของการควบคุมการแตกหักและความเสียหายที่คาดไม่ถึงได้

เหล็กเส้นเสริมคอนกรีตเป็นวัสดุสำคัญที่ใช้ในงานก่อสร้าง ถูกออกแบบการทำงานภายใต้ความเค้นต่าง ๆ ที่ซึ่งนำไปสู่การเสื่อมสภาพและการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างหรือคุณสมบัติอื่น ๆ การเสื่อมสภาพของสมบัติทางกลจากการสูญเสียความสามารถในการรับแรงเกี่ยวข้องกับความเสียหาย เชื่อมโยงกับกระบวนการกำเนิด การขยายใหญ่ และการรวมตัวของจุดบกพร่อง และความเสียหายอื่น ๆ เหล็กเส้นเสริมคอนกรีตอาจเกิดความเสียหายขึ้นภายในเมื่อถูกให้ภาระ เริ่มต้นในระดับจุลภาค ก่อนพัฒนาเป็นสาเหตุความเสียหายในระดับมหภาค เป็นที่น่าสนใจเมื่อเหล็กเส้นเสริมคอนกรีตอยู่



รูปที่ 1 กระบวนการทดลองสำหรับการวัดผลกระทบของอัตราความเครียดต่อการเปลี่ยนแปลงความเสียหาย

ภายใต้การให้ภาระอัตราที่แตกต่าง อาจประสบการเปลี่ยนแปลงความเสียหายที่แตกต่าง ดังนั้น การทราบการเปลี่ยนแปลงความเสียหายโดยกลไกความเสียหายต่อเนื่องตลอดกระบวนการเสียรูปภายใต้อัตราความเครียดที่แตกต่างเป็นสิ่งสำคัญ เพื่อการออกแบบการทำงานที่เหมาะสม ทำให้ใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนั้น สามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงความเสียหาย และสามารถควบคุมการแตกหักและความเสียหายที่คาดไม่ถึงได้

2. วิธีการวิจัย (Experimental methods)

การวัดทางการทดลองต่อไปนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบความเสียหายของเหล็กเส้นเสริมคอนกรีตโดยกลไกความเสียหายต่อเนื่อง (Continuum damage mechanism) ตลอดกระบวนการเสียรูปภายใต้อัตราความเครียดที่แตกต่าง

2.1 ชิ้นทดสอบ เตรียมชิ้นทดสอบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.8 มม. ความยาวพิกัด 70 มม. และความยาว 150 มม. มีส่วนประกอบทางเคมีตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ คาร์บอน (C) สูงสุด 0.28% กำมะถัน (S) สูงสุด 0.060% และฟอสฟอรัส (P) สูงสุด 0.060% นอกจากนั้น ชิ้นทดสอบทั้งหมดถูกเตรียมเหมือน ๆ กัน จากเหล็กเส้นเสริมคอนกรีต

2.2 การวัดสมบัติทางกล (มอดุลัสยืดหยุ่น) ดำเนินการทดสอบโดยใช้เครื่องทดสอบ Universal testing machine : SHIMADZU รุ่น UH-F500kNI ที่อุณหภูมิห้อง โดยอ้างอิงมาตรฐานการทดสอบแรงดึงที่ได้รับการยอมรับ ISO 6892-1 : 2009 ทำการทดสอบจำนวน 5 ชิ้น ในแต่ละเงื่อนไขการทดสอบ เพื่อความมั่นใจในการทำซ้ำ

2.3 ในการทดสอบแรงดึง ทำการควบคุมอัตราความเครียดที่แตกต่าง 0.001 s^{-1}, 0.005 s^{-1}, 0.01 s^{-1}, และ 0.02 s^{-1} โดยแต่ละอัตราความเครียดทำการทดสอบที่ระดับการเสียรูปต่าง ๆ ได้แก่ 5, 15, 25 และ 35 มิลลิเมตร เพื่อให้ได้เส้นแนวโน้มที่เหมาะสมของการลดลงของมอดุลัสยืดหยุ่นเนื่องจากความเสียหายที่เกิดขึ้น

2.4 การตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงความเสียหายภายใต้การเสียรูปจากการทดสอบแรงดึงที่อัตราความเครียดที่แตกต่างที่แต่ละระดับการเสียรูป ทำโดยการสังเกตการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope) มีกระบวนการดำเนินงาน ดังนี้ เตรียมชิ้นทดสอบโดยตัดชิ้นทดสอบบริเวณตรงกลางของชิ้นทดสอบที่ถูกดึงในทิศทางตั้งฉากกับแนวแรงภายในบริเวณที่ความเสียหายเกิดขึ้นหรือคาดว่าจะเกิด นำชิ้นทดสอบขัดหยาบด้วยกระดาษทรายเบอร์ P120, P240, P600 และ P1200 และทำผิวให้เรียบด้วยการขัดละเอียดด้วยผ้าขัดขนาด 3 μm และ 1 μm ทำการกัดด้วยสารละลายเอทานอล-กรดไนตริก 2% ประมาณ 2-30 วินาที และล้างน้ำและแอลกอฮอล์ทันที ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดถ่ายภาพความเสียหายของโครงสร้างของชิ้นทดสอบ

3. ผลและวิจารณ์ (Results and discussion)

ในการทดสอบแรงดึง มาตรฐานทดสอบส่วนมากระบุอัตราความเครียดทดสอบที่ควรปฏิบัติ เมื่อทดสอบที่อัตราความเครียดที่แตกต่าง (ช้าหรือเร็ว) คุณสมบัติความแข็งแรงที่วัสดุแสดงอาจขึ้นอยู่กับอัตราความเครียด กล่าวอีกอย่างหนึ่ง อัตราความเครียดอาจมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเสียหาย ความเสียหายอธิบายได้จากผลลัพธ์ของโครงสร้างอะตอมที่เสื่อมสภาพบนการลดลงของพื้นที่หน้าตัดประสิทธิผลของชิ้นส่วนที่เสียหาย บนแนวคิดนี้ ตัวแปรความเสียหายเพื่อทำนายการเปลี่ยนแปลงความเสียหายแสดงได้ดังนี้ $D_s = 1 - \tilde{E}/E$ [7-8] นอกจากนั้น บนแนวคิดความเท่ากันของพลังงานยืดหยุ่น (Elastic energy equivalence) [9] ที่สมมุติว่าพลังงานยืดหยุ่นวัสดุที่เสียหายเท่ากันในรูปของพลังงานยืดหยุ่นวัสดุที่ไม่เสียหาย สามารถแสดงสมการตัวแปรความเสียหายได้ดังนี้ $D_e = 1 - \sqrt{\tilde{E}/E}$ โดยที่ E คือ มอดุลัสยืดหยุ่นของโลหะที่ไม่เสียหาย และ $\tilde{E}$ คือ มอดุลัสยืดหยุ่นของโลหะที่เสียหาย

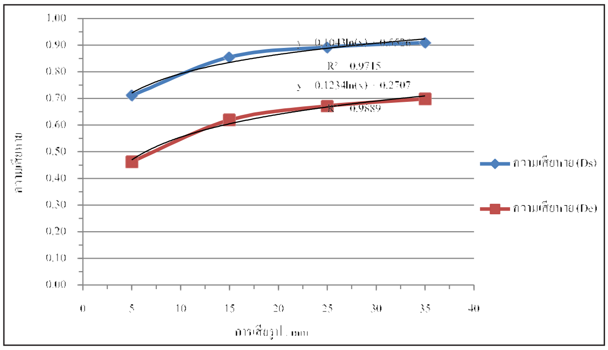
3.1 การเปลี่ยนแปลงความเสียหายในแต่ละระดับการเสียรูปที่อัตราความเครียดที่แตกต่าง

จากผลการทดลอง (ตารางที่ 1 และรูปที่ 2, 3, 4 และ 5) มอดุลัสยืดหยุ่นมีการเปลี่ยนแปลงลดลง ซึ่งเกิดจากกระบวนการเสียหายที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องภายใต้การเสียรูปที่เพิ่มขึ้น นอกจากนั้น มอดุลัสยืดหยุ่นมีอัตราการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างระหว่างการเพิ่ม

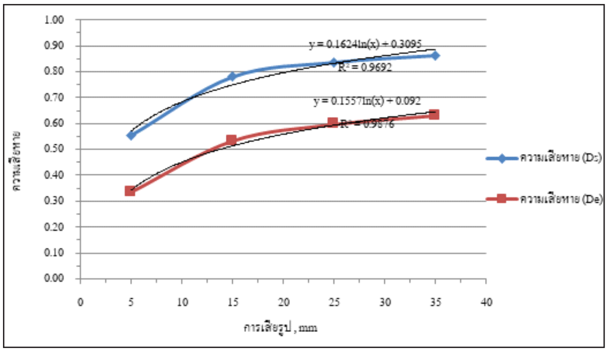
ตารางที่ 1 การเปลี่ยนแปลงความเสียหายในแต่ละระดับการเสียรูปที่อัตราความเครียดต่าง ๆ

การเสียรูป, mm	มอดุลัสยืดหยุ่น, MPa				ความเสียหาย ($D_s = 1 - \tilde{E}/E$)				ความเสียหาย ($D_e = 1 - \sqrt{\tilde{E}/E}$)			
	0.001 s^{-1}	0.005 s^{-1}	0.01 s^{-1}	0.02 s^{-1}	0.001 s^{-1}	0.005 s^{-1}	0.01 s^{-1}	0.02 s^{-1}	0.001 s^{-1}	0.005 s^{-1}	0.01 s^{-1}	0.02 s^{-1}
0	19,872	17,488	13,397	9,934	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	5,739	5,938	5,950	6,176	0.71	0.66	0.56	0.38	0.46	0.42	0.33	0.21
15	2,886	2,908	2,925	2,955	0.85	0.83	0.78	0.70	0.62	0.59	0.53	0.45
25	2,145	2,162	2,175	2,193	0.89	0.88	0.84	0.78	0.67	0.65	0.60	0.53
35	1,805	1,801	1,819	1,803	0.91	0.90	0.86	0.82	0.70	0.68	0.63	0.57

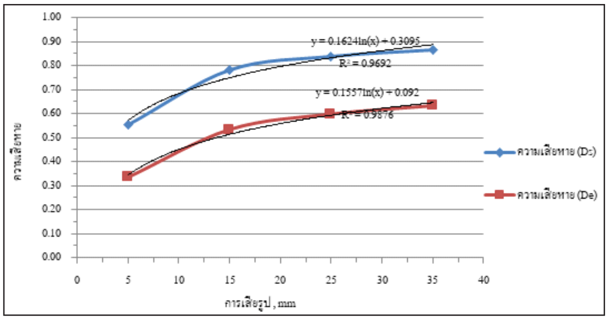
ขึ้นของการเสียรูป กล่าวอีกนัยหนึ่ง ความเสียหายมีการเปลี่ยนแปลงในอัตราที่แตกต่างระหว่างการเสียรูป อัตราความเสียหายเกิดขึ้นอย่างมากในตอนแรกและลดน้อยลงเมื่อการเสียรูปแบบถาวรเพิ่มสูงขึ้นใกล้จุดแตกหัก ผลจากการทดลองดังกล่าวอธิบายได้จากกระบวนการเสียหายของโครงสร้างจุลภาคที่แตกต่าง



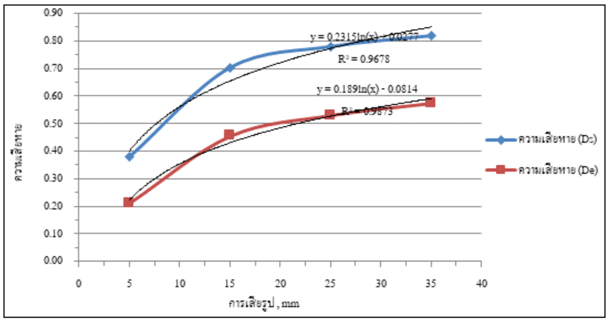
รูปที่ 2 การเปลี่ยนแปลงความเสียหายในแต่ละระดับการเสียรูปที่อัตราความเครียด 0.001 s^{-1}



รูปที่ 3 การเปลี่ยนแปลงความเสียหายในแต่ละระดับการเสียรูปที่อัตราความเครียด 0.005 s^{-1}



รูปที่ 4 การเปลี่ยนแปลงความเสียหายในแต่ละระดับการเสียรูปที่อัตราความเครียด 0.01 s^{-1}



รูปที่ 5 การเปลี่ยนแปลงความเสียหายในแต่ละระดับการเสียรูปที่อัตราความเครียด 0.02 s^{-1}

การเสียหายของโครงสร้างจุลภาค เนื่องจากการกำเนิด การขยายใหญ่ และการรวมตัว ที่พัฒนาอย่างต่อเนื่องภายใต้การเสียรูปแบบถาวร การเสียหายของโครงสร้างจุลภาคกระทบต่อการลดลงของมอดุลัสยืดหยุ่น โลหะที่ซึ่งโครงสร้างจุลภาคได้รับความเสียหาย มีค่ามอดุลัสยืดหยุ่นน้อยกว่าโลหะที่ซึ่งโครงสร้างจุลภาคไม่ได้รับความเสียหาย การเพิ่มขึ้นของการเสียหายนำไปสู่การลดลงในมอดุลัสยืดหยุ่น ยิ่งกว่านั้น การเปลี่ยนแปลงมอดุลัสยืดหยุ่นมีความสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดกับความไม่สมบูรณ์ของโครงสร้างจุลภาค ระหว่างการเสียรูปที่เพิ่มขึ้นความไม่สมบูรณ์ของโครงสร้างจุลภาคพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากมอดุลัสยืดหยุ่นลดลงเป็นสัดส่วนกับการพัฒนาความไม่สมบูรณ์ของโครงสร้างจุลภาค มอดุลัสยืดหยุ่นแสดงการลดลงในปริมาณสูงในตอนแรกของการเสียรูปที่ปริมาณเล็กน้อย และมอดุลัสยืดหยุ่นแสดงการลดลงในปริมาณต่ำในตอนหลังของการเสียรูปที่ปริมาณสูง

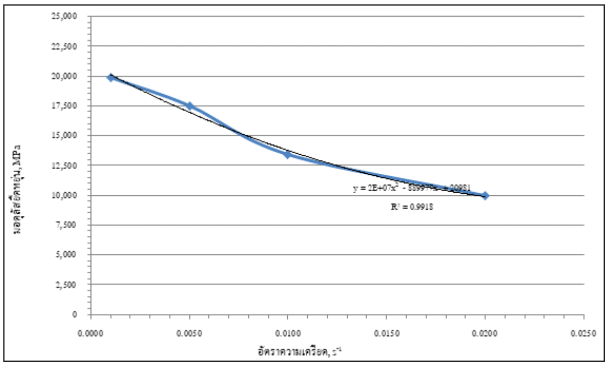
นอกจากนั้น พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงความเสียหายในลักษณะของจุดบกพร่องที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่า และการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาค พัฒนาอย่างชัดเจนและแตกต่างระหว่างการเสียรูปแบบถาวร พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงความเสียหายมีผลอย่างมากต่อการตอบสนองของโลหะ [10] ในการเสียรูปแบบถาวรเริ่มต้น พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงความเสียหายพัฒนาอย่างชัดเจนในการเกิดขึ้นและการขยายใหญ่ของรอยแตกและช่องว่าง ร่วมกับการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยของโครงสร้างจุลภาค สามารถเชื่อมโยงได้กับการเสื่อมสภาพของสมบัติทางกลในตอนแรกของการเสียรูป การเสื่อมสภาพของสมบัติทางกลเป็นกระบวนการต่อเนื่องที่สัมพันธ์กับการพัฒนาความเสียหายในการเสียรูปแบบถาวรที่ปริมาณสูง พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงความเสียหายพัฒนาอย่างชัดเจนในการขยายใหญ่และการรวมตัวและการเปลี่ยนแปลงอย่างสูงในโครงสร้างจุลภาค [11] การเปลี่ยนแปลงอย่างมากของจุดบกพร่องร่วมกับปฏิสัมพันธ์ซึ่งกันและกันของจุดบกพร่อง และการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคจากความเป็นเนื้อเดียวกันและคุณสมบัติทางกายภาพตามแกนที่เหมือนกันในตอนแรกสู่ความไม่เป็นเนื้อเดียวกันและคุณสมบัติทางกายภาพตามแกนที่ต่างกัน [12] สามารถเชื่อมโยงได้กับการเสื่อมสภาพของสมบัติทางกลในตอนหลังของการเสียรูปจนถึงจุดแตกหัก

3.2 การเปลี่ยนแปลงความเสียหายจากอัตราความเครียดที่เปลี่ยนแปลง

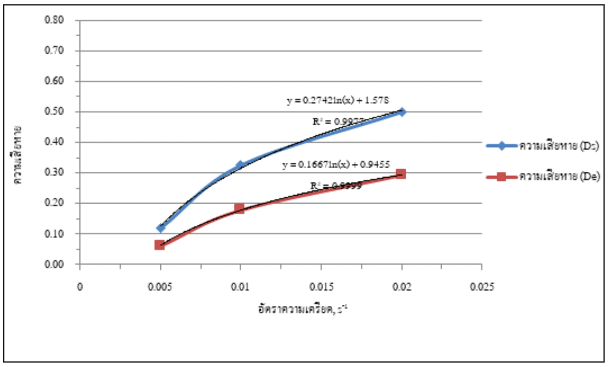
มอดุลัสยืดหยุ่นมีการเปลี่ยนแปลงลดลงเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอัตราความเครียดที่เพิ่มขึ้นจาก 0.001 s^{-1}, 0.005 s^{-1}, 0.01 s^{-1} ถึง 0.02 s^{-1} ดังแสดงในรูปที่ 6 มอดุลัสยืดหยุ่นที่มีค่าสูงกว่าแสดงถึงความแข็งแรงที่สูงกว่าของโลหะ การพัฒนาความเสียหายสามารถเฝ้าดูได้จากการเปลี่ยนแปลงมอดุลัสยืดหยุ่น การลดลงของมอดุลัสยืดหยุ่นที่สังเกตได้ที่อัตราความเครียดที่แตกต่าง แสดงให้เห็นถึงการพัฒนาความเสียหายที่เพิ่มขึ้น จากตารางที่ 2 และรูปที่ 7 แสดงให้เห็นถึงความเสียหายที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากอัตราความเครียดที่เพิ่มขึ้น หากพิจารณาในรายละเอียด การเพิ่มขึ้นของอัตราความเครียดในช่วงแรก 0.001 s^{-1} ถึง 0.01 s^{-1} มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของความเสียหายอย่างมีนัยสำคัญ ประมาณ 0.33 และ 0.18 กล่าวอีกนัยหนึ่ง ในช่วงแรก อัตราความเสียหายมีการเพิ่มที่สูง เมื่ออัตราความเครียดเพิ่มมากขึ้น และการเพิ่มขึ้นของอัตราความเครียดในช่วงหลัง 0.01 s^{-1} ถึง 0.02 s^{-1} มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของความเสียหายที่น้อยกว่า ประมาณ 0.17 และ 0.11 กล่าวอีกนัยหนึ่ง ในช่วงหลัง อัตราความเสียหายมีการเพิ่มที่ต่ำ เมื่ออัตราความเครียดเพิ่มมากขึ้น

ตารางที่ 2 การเปลี่ยนแปลงความเสียหายเนื่องจากการเพิ่มอัตราความเครียด

อัตราความเครียด, s^{-1}	มอดุลัสยืดหยุ่น, MPa	ความเสียหาย $\left(D_s = 1 - \tilde{E}/E\right)$	ความเสียหาย $\left(D_e = 1 - \sqrt{\tilde{E}/E}\right)$
0.001	19,872	0.00	0.00
0.005	17,488	0.12	0.06
0.01	13,397	0.33	0.18
0.02	9,934	0.50	0.29



รูปที่ 6 การเปลี่ยนแปลงมอดุลัสยืดหยุ่นเนื่องจากการเพิ่มอัตราความเครียด



รูปที่ 7 การเปลี่ยนแปลงความเสียหายเนื่องจากการเพิ่มอัตราความเครียด

กลไกความเสียหายของโลหะสามารถเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอัตราความเครียด ความเสียหายที่เพิ่มขึ้นจากอัตราความเครียดที่เพิ่มสูงสามารถเชื่อมโยงได้กับกลไกความเสียหายที่เปลี่ยนแปลงอย่างแตกต่าง ในตอนแรก ความเสียหายของโลหะค่อย ๆ เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มมากขึ้นของจุดบกพร่อง ต่อมาการเสียรูปเข้าสู่ขอบเขตถาวรทำให้การเรียงตัวของโครงสร้างเปลี่ยนแปลงอย่างถาวร โลหะจะค่อย ๆ ไหลผ่านโครงข่ายผลึกโดยการเคลื่อนตัวของอะตอม การรวมตัวของจุดบกพร่องเล็ก ๆ เช่น รอยแตกเล็ก ๆ การเคลื่อนตัวของอะตอม รู และแยกตัวของพันธะ ระหว่างการเสียรูปแบบถาวร ความแข็งแรงของโลหะจะค่อย ๆ ลดลง [5] นอกจากนั้น การแตกร้าวยังขึ้นอยู่กับความแข็งแรง การยึดเกาะของโมเลกุล และแรงยึดตัวของรอยแตกของโลหะ การแตกร้าวจะเกิดขึ้นเมื่อความเค้นสูงสุดเพิ่มสูงขึ้นถึงค่าวิกฤติ [13-14]

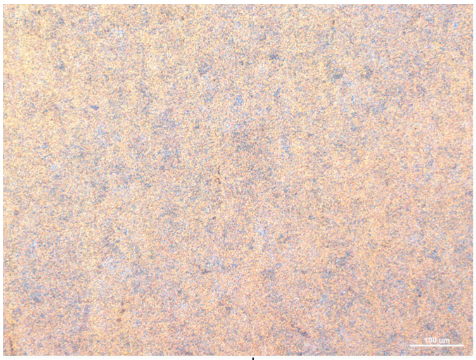
ดังนั้น สามารถสันนิษฐานการเพิ่มขึ้นของความเสียหายเมื่ออัตราความเครียดเพิ่มขึ้นได้ว่า ที่อัตราความเครียดสูง การแตกร้าวและการแยกตัวระหว่างผิวหน้าของอะตอมหรืออนุภาค และการแตกของอนุภาค ทำให้เกิดช่องว่างและ รอยแตก ความไม่ต่อเนื่องในรูปของช่องว่างและรอยแตกที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่าเกิดขึ้นสูง สอดคล้องการลดลงของ มอดุลัสยืดหยุ่นที่ลดลงมากขึ้น เมื่ออัตราความเครียดเพิ่มขึ้น กล่าวอีกนัยหนึ่ง ที่อัตราความเครียดสูง เกรนจะถูกทำลายมากขึ้น ทำให้การเคลื่อนตัวของขอบเกรนผ่านอุปสรรคที่น้อยลง สอดคล้องกับการลดลงของมอดุลัสยืดหยุ่น เมื่ออัตราความเครียดเพิ่มขึ้น ยิ่งกว่านั้น การกำเนิดจุดบกพร่องถูกเร่งให้เกิดระหว่างการเสียรูปโดยการปรากฏขึ้นของโครงสร้างย่อยการเคลื่อนที่ (Dislocation) และการเติบโตของอนุภาคมีขยายใหญ่เร็วขึ้นกว่าในสภาพอยู่นิ่ง เนื่องจาก

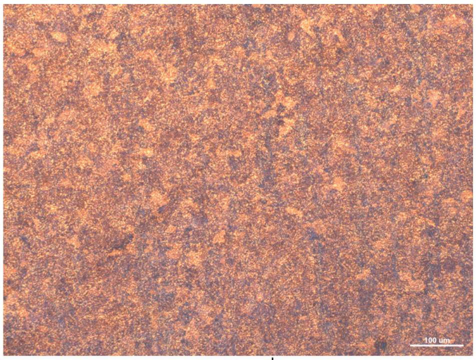
สัมประสิทธิ์การกระจายที่เพิ่มโดยกลไกการกระจายของแกนกลางในการปรากฏขึ้นของความพัวพันการเคลื่อนที่ (Dislocation) อย่างไรก็ตาม การเสียรูปที่เกิดอาจลดจำนวนนิวเคลียสและอนุภาคยึดเกาะ เนื่องจากการตัดผ่านจากการเคลื่อนที่มีจำนวนมากและการละลายของนิวเคลียสขนาดวิกฤตย่อยอนุภาคใหญ่ที่กำเนิดในชิ้นทดสอบอาจขยายใหญ่เร็วขึ้น เนื่องจากผลของการอิ่มตัวที่มากเกินของเมทริกซ์ (Metrix) กลไกดังกล่าวข้างต้นของการขยายใหญ่ของอนุภาคที่ถูกชักนำจากความเครียดอาจทำงานเป็นพิเศษระหว่างการเสียรูปแบบไม่สม่ำเสมอ ระหว่างปริมาณวัสดุที่ถูกแบ่งเป็นพื้นที่ที่ทำงานและพื้นที่ที่ไม่ทำงาน สลับสับเปลี่ยนกันระหว่างการเสียรูป [15] การเพิ่มขึ้นของความเสียหายที่อัตราความเครียดสูงยังอาจได้รับอิทธิผลจากกระบวนการดังกล่าวข้างต้นที่เกิดมากขึ้น

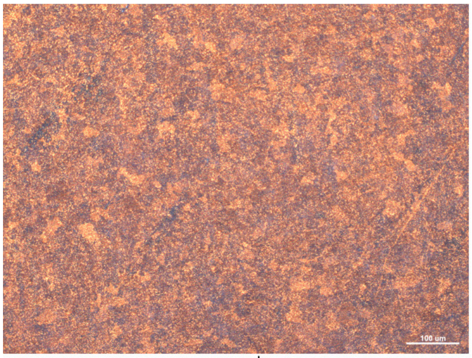
ยิ่งกว่านั้น คำอธิบายการลดลงของมอดุลัสยืดหยุ่นเมื่ออัตราความเครียดเพิ่มสูงขึ้นอาจอ้างอิงแนวคิดกลไกลความเสียหายที่เกิดขึ้นได้ที่อัตราความเครียดต่ำอะตอมที่ละลายจะมีปฏิสัมพันธ์กับอุปสรรคที่ขวาง ยับยั้งการเคลื่อนที่ของโครงสร้างย่อย (Dislocation) ส่งผลให้ความเค้นไหลสูงขึ้น แต่ที่อัตราความเครียดสูงขึ้น ผลการบรรเทาของตัวละลายต่อการเคลื่อนที่ของโครงสร้างย่อยจะลดลง ส่งผลให้ความเค้นไหลลดลง เมื่ออัตราความเครียดสูงมากพอปฏิสัมพันธ์กันและกันของอะตอมที่ละลายกระจายอย่างรวดเร็วเนื่องด้วยการเคลื่อนที่ของโครงสร้างย่อยไม่ปรากฏ เนื่องจากเวลาของเสียรูปที่น้อยมากสำหรับการกระจายที่เกิดขึ้น นอกจากนั้นที่อัตราความเครียดต่ำ การรวมตัวของความเค้นเฉพาะที่ถูกยับยั้งโดยการเคลื่อนที่ของโครงสร้างย่อย แต่เมื่ออัตราความเครียดเพิ่มสูงขึ้น การเคลื่อนที่ของโครงสร้างย่อยที่มากขึ้นถูกจำกัดการเคลื่อนที่และความเค้นเฉพาะที่อาจเกิดขึ้นก่อนการกำเนิดจุดบกพร่อง ดังนั้นความเสียหายถูกทำให้เกิดขึ้นจากจุดที่อ่อนแอ เช่น ขอบเกรนและ/หรือ อนุภาคสองเฟส การเติบโตและการรวมตัวของช่องว่างที่เกิดนำไปสู่ความเสียหายในที่สุด [16] กล่าวอีกนัยหนึ่ง เมื่ออัตราความเครียดสูงขึ้น ความเสียหายจะถูกเร่งให้ปรากฏเร็วขึ้นและในปริมาณที่มากขึ้น จากที่กล่าวข้างต้น เป็นอีกเหตุผลหนึ่งที่สนับสนุนความเสียหายเพิ่มมากขึ้น เมื่อเพิ่มอัตราความเครียดสูงขึ้น

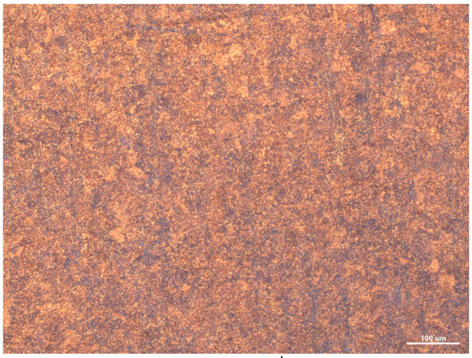
4. สรุป (Conclusion)

4.1 การเปลี่ยนแปลงความเสียหายในแต่ละระดับการเสียรูปสามารถติดตามได้จากรูปแบบกลไกความเสียหายต่อเนื่องที่ซึ่งเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงมอดุลัสยืดหยุ่น ภายใต้การเสียรูปที่เพิ่มขึ้น มอดุลัสยืดหยุ่นมีการเปลี่ยนแปลงลดลง ซึ่งเกิดจากกระบวนการเสียหายที่เพิ่มขึ้น นอกจากนั้น มอดุลัสยืดหยุ่นมีอัตราการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างระหว่างการเพิ่มขึ้นของการเสียรูปซึ่งเกิดจากกระบวนการเสียหายที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและมีอัตรา


(ก) อัตราความเครียดที่ 0.001 s^{-1}


(ข) อัตราความเครียดที่ 0.005 s^{-1}


(ค) อัตราความเครียดที่ 0.01 s^{-1}


(ง) อัตราความเครียดที่ 0.02 s^{-1}

รูปที่ 8 โครงสร้างของโลหะที่เสื่อมสภาพภายใต้อัตราความเครียดที่เปลี่ยนแปลง

การเปลี่ยนแปลงที่แตกต่าง อัตราความเสียหายเกิดขึ้นอย่างมากในตอนแรก และอัตราความเสียหายเกิดขึ้นน้อยลง เมื่อการเสียรูปแบบถาวรเพิ่มสูงขึ้นใกล้จุดแตกหัก ซึ่งสามารถอธิบายได้จากการเพิ่มขึ้นของความเสียหายและความแตกต่างของความเสียหายที่เกิดขึ้นเนื่องจากกระบวนการเสียหายของโครงสร้างจุลภาคที่แตกต่าง

4.2 การเปลี่ยนแปลงความเสียหายจากอัตราความเครียดที่เปลี่ยนแปลงสามารถเฝ้าดูได้จากรูปแบบกลไกความเสียหายต่อเนื่องที่ซึ่งเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงมอดุลัสยืดหยุ่น การลดลงของมอดุลัสยืดหยุ่นที่สังเกตได้ที่อัตราความเครียดที่แตกต่าง แสดงให้เห็นถึงการพัฒนาความเสียหายที่เพิ่มขึ้น เห็นได้ว่ามอดุลัสยืดหยุ่นมีการเปลี่ยนแปลงลดลงเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอัตราความเครียดที่เพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของอัตราความเครียดในช่วงแรก 0.001 s^{-1} ถึง 0.01 s^{-1} มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของความเสียหายอย่างมีนัยสำคัญ ประมาณ 0.33 และ 0.18 กล่าวอีกนัยหนึ่ง ในช่วงแรกอัตราความเสียหายมีการเพิ่มที่สูง เมื่ออัตราความเครียดเพิ่มมากขึ้น และการเพิ่มขึ้นของอัตราความเครียดในช่วงหลัง 0.01 s^{-1} ถึง 0.02 s^{-1} มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของความเสียหายที่น้อยกว่า ประมาณ 0.17 และ 0.11 กล่าวอีกนัยหนึ่ง ในช่วงหลังอัตราความเสียหายมีการเพิ่มที่ต่ำ เมื่ออัตราความเครียดเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสามารถอธิบายได้จากการเพิ่มขึ้นของความเสียหายและความแตกต่างของความเสียหายที่เกิดขึ้นเนื่องจากกระบวนการเสียหายของโครงสร้างจุลภาคที่แตกต่างเนื่องจากการกำเนิด การขยายใหญ่ และการรวมตัว ที่พัฒนาอย่างต่อเนื่องภายใต้การเสียรูปแบบถาวร การเสียหายของโครงสร้างจุลภาคนี้มีผลต่อการลดลงของมอดุลัสยืดหยุ่น นอกจากนั้น การเปลี่ยนแปลงมอดุลัสยืดหยุ่นมีความสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดกับความไม่สมบูรณ์ของโครงสร้างจุลภาค

5. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

ขอขอบคุณกลุ่มวัสดุก่อสร้าง กองวัสดุวิศวกรรม กรมวิทยาศาสตร์บริการ ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการศึกษาวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง (References)

[1] DARRAS, B. M., F. ABED, S. PERVAIZ and A. ABDUL-LATIF. Analysis of damage in 5083 aluminum alloy deformed at different strain rates. *Materials Science and Engineering: A*. 2013, **568**(7),143-149.

[2] KRAJCINOVIC, D. and S. MASTILOVIC. Some fundamental issues of damage mechanics. *Mechanics of Materials*. 1995, **21**(3), 217-230.

[3] STRAFFELINI, G. and A. MOLINARI. Evolution of tensile damage in porous iron. *Materials Science and Engineering: A*. 2002, **334**(1–2), 96-103.

[4] LIAO, I., Y. SUN, J. LIU and W. ZHANG. Applicability of damage models for failure analysis of threaded bolts. *Engineering Fracture Mechanics*. 2011, **8**(3), 514-524.

[5] BONORA, N., D. GENTILE, A. PIRONDI and G. NEWAZ. Ductile damage evolution under triaxial state of stress: theory and experiments. *International Journal of Plasticity*. 2005, **21**(5), 981-1007.

[6] DIAO, X. A statistical equation of damage evolution. *Engineering Fracture Mechanic*. 1995, **52**(1), 33-42.

[7] ALVES, M., J. YU and N. JONES. On the elastic modulus degradation in continuum damage mechanics. *Computers & Structures*. 2000, **76**(6), 703-712.

[8] BONORA, N. and G. M. NEWAZ. Low cycle fatigue life estimation for ductile metals using a nonlinear continuum damage mechanics model. *International Journal of Solids and Structures*. 1998, **35**(6), 1881-1894.

[9] VOYIADJIS, G. Z. and P. I. KATTAN. How a singularity forms in continuum damage mechanics. *Mechanics Research Communications*. January, 2014, **55**, 86-88.

[10] ZHOU, F., J. N. WANG and J. S. LIAN. An investigation of the plastic failure of spheroidized steels. *Materials Science and Engineering: A*. 2002, **332**(1-2), 117-122.

[11] LIU, J.H., X.Y. HAO, G. L. LI and G.S. LIU. Microvoid evaluation of ferrite ductile iron under strain. *Materials Letters*. 2002, **56**(5), 748-755.

[12] ORSINI, V.C. and M.A. ZIKRY. Void growth and interaction in crystalline materials. *International Journal of Plasticity*. 2001, **17**(10), 1393-1417.

[13] THOMSON, R. D. and J. W. HANCOCK. Ductile failure by void nucleation, growth and coalescence. *International Journal of Fracture*. 1984, **26**(2), 99-112.

[14] IBIJOLA, E. A. On some fundamental concepts of continuum damage mechanics. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2002, **191**(13-14), 1505-1520.

[15] BLAZ, L. and E. EVANGELISTA. Strain rate sensitivity of hot deformed Al and AlMgSi alloy. *Materials Science and Engineering: A*. 1996, **207**(2), 195-201.

[16] HADIANFARD, M. J., R. SMERD, S. WINKLER and M. WORSWICK. Effects of strain rate on mechanical properties and failure mechanism of structural Al-Mg alloys. *Materials Science and Engineering: A*. 2008, **492**(1-2), 283-292.

การสำรวจความคิดเห็นของผู้ทำงานในห้องปฏิบัติการที่เกี่ยวกับสารเคมีเรื่องการจัดการห้องปฏิบัติการสีเขียวในประเทศไทย

Opinion survey on green laboratory management in Thailand among chemical laboratory workers

7

ปวีณา เครือนิล[1*], อัครินทร์ ไพบูลย์พานิช[2], ลัดดาวัลย์ เยียดยัด[1]
ดวงกมล เชาวน์ศรีหมุด[1], อนันตณัฐ กันต์ธัญญรัตน์[2]
Paweena Kreunin[1*], Akarin Paibulpanich[2], Laddawan Yeadyad[1],
Duangkamol Chaosrimud[1], Anantanat Kantanyarat[2]

บทคัดย่อ

การศึกษานี้เป็นการสำรวจความคิดเห็นของผู้ทำงานในห้องปฏิบัติการที่เกี่ยวกับสารเคมีเรื่องการจัดการห้องปฏิบัติการสีเขียวในประเทศไทย มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความรู้ความเข้าใจเบื้องต้นเกี่ยวกับห้องปฏิบัติการสีเขียว และข้อเสนอแนะในการพัฒนาการจัดการห้องปฏิบัติการสีเขียว โดยใช้แบบสอบถามในการสำรวจความคิดเห็นของกลุ่มผู้เข้ารับการฝึกอบรมของกรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม โดยแจกแบบสอบถามรวมทั้งสิ้น 4,800 ฉบับ ทั้งทางไปรษณีย์ และ ณ จุดบริการฝึกอบรมของกรมวิทยาศาสตร์บริการ ระหว่างเดือนพฤษภาคม 2558 ถึง เดือนมิถุนายน 2559 ซึ่งมีตัวอย่างจำนวน 2,112 คน ที่ตอบกลับและระบุว่าเป็นผู้ทำงานในห้องปฏิบัติการที่มีการใช้สารเคมี

จากการสำรวจพบว่า บุคลากรห้องปฏิบัติการส่วนใหญ่มีความรู้ความเข้าใจเบื้องต้น ในหลักการของห้องปฏิบัติการสีเขียว ที่มีความปลอดภัยและยั่งยืน เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และมีการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ รวมทั้งเห็นความสำคัญและต้องการพัฒนาการจัดการห้องปฏิบัติการสีเขียว และมีข้อเสนอแนะแนวทางการพัฒนาห้องปฏิบัติการของประเทศให้เป็นสีเขียวว่า ต้องการการสนับสนุนเสริมจากภาครัฐและหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง โดยเน้นเรื่องนโยบายและแนวทางการดำเนินงานที่ชัดเจน ตลอดจนการให้ความรู้และการรณรงค์เพื่อสร้างความตระหนักและความรู้ความเข้าใจให้กับผู้ทำงานในห้องปฏิบัติการ การศึกษาเพื่อติดตามผลการดำเนินการตามข้อเสนอแนะดังกล่าว จะเป็นการช่วยยกระดับคุณภาพของห้องปฏิบัติการ เพื่อสนับสนุนภาคการผลิตและบริการของประเทศที่ยั่งยืน

Abstract

This survey research, using questionnaire, investigates the opinion of personnel working in the chemical-based laboratories regarding green laboratory management in Thailand. The main objectives are to study their basic knowledge and understanding of green laboratory concepts, and their suggestions on the development of green laboratory management. 4,800 questionnaires were distributed to the training participants of the Department of Science Service, Ministry of Higher Education, Science, Research and Innovation, both by mails and at the training service sites. 2,112 questionnaires were returned and indicated as laboratory workers who used chemicals, which, in turn, constitutes our sample.

We found that most of the respondents had a basic knowledge and understanding of the safety and sustainability principles of the green laboratories, by means of efficient use of resources and being environmentally friendly. They understood the importance of green laboratory management, and expressed the need of its development in Thailand. Moreover, the majority of respondents suggested that the development entails the administrative sections from both government and organizations to provide clear policy, and guidelines, as well as knowledge, and actively campaign to raise awareness, knowledge and understanding of those involved. The future study is the impact of such operation implemented. The information acquired will be an integral part that enhances laboratory qualities to drive the manufacturing and service sectors of Thailand substantially.

คำสำคัญ : ห้องปฏิบัติการ ห้องปฏิบัติการสีเขียว การบริหารจัดการห้องปฏิบัติการ ความปลอดภัย ความยั่งยืน
Keywords : Laboratory, Green Laboratory, Laboratory Management, Safety, Sustainability

[1] กรมวิทยาศาสตร์บริการ สำนักพัฒนาศักยภาพนักวิทยาศาสตร์ห้องปฏิบัติการ
[2] จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ภาควิชาสถิติ คณะพาณิชยศาสตร์และการบัญชี
* Corresponding author e-mail address: paweena@dss.go.th

1. บทนำ (Introduction)

ห้องปฏิบัติการที่เกี่ยวกับสารเคมี หรือ Chemical laboratories ตามนิยามของมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เลขที่ มอก. 2677 เรื่อง ระบบการจัดการด้านความปลอดภัยของห้องปฏิบัติการที่เกี่ยวกับสารเคมี หมายถึง สถานที่ที่มีการใช้สารเคมีในกระบวนการ เช่น การวิจัย การเรียนการสอน การทดสอบ สอบเทียบ [1] ห้องปฏิบัติการทั่วไปมีการใช้ทรัพยากรพลังงานต่อตารางฟุตมากกว่าห้องทำงานประเภทอื่น จากกิจกรรมในห้องปฏิบัติการ เช่น การใช้เครื่องมืออุปกรณ์วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่มีความซับซ้อนและใช้พลังงานสูง การดำเนินการกิจกรรมที่ต้องทำในปฏิบัติการตลอดวัน (Around-the-clock operations) หรือการดึงอากาศ 100% จากบรรยากาศภายนอก เพื่อใช้ในระบบปรับอากาศและระบายอากาศของห้องปฏิบัติการ รวมถึงปัจจัยอื่นที่ใช้ในกระบวนการที่ต้องพัฒนาปรับปรุงให้ทันสมัยอย่างต่อเนื่อง ทำให้ความสัมพันธ์ของกิจกรรมที่ปฏิบัติในห้องปฏิบัติการมีความซับซ้อนยิ่งขึ้น และใช้ทรัพยากรมากขึ้น อีกประการหนึ่งห้องปฏิบัติการมักเกี่ยวข้องกับสารเคมีอันตราย ซึ่งนอกจากจะมีผลต่อสุขภาพของผู้ที่เกี่ยวข้องแล้ว ยังมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงมีการริเริ่มโครงการด้านการจัดการห้องปฏิบัติการแนวใหม่ที่มุ่งเน้นการปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงาน (Energy efficiency) และผลการปฏิบัติงานด้านสิ่งแวดล้อม (Environmental performance) ของห้องปฏิบัติการเพื่อความยั่งยืน โดยสำนักงานปกป้องสิ่งแวดล้อม (Environmental Protection Agency) ร่วมกับกระทรวงพลังงาน (Department of Energy) ของประเทศสหรัฐอเมริกาภายใต้โครงการ Labs21 : Labs for the 21st Century Program [2] ทำให้เกิดการดำเนินการพัฒนาห้องปฏิบัติการของประเทศสหรัฐอเมริกาอย่างต่อเนื่อง เช่นโครงการ Green Laboratory Certification ของ University of Wisconsin [3] โครงการ Green Labs Program ของ Harvard University [4] และโครงการ Green Lab Program ของ University of Washington [5] นอกจากสถาบันการศึกษาแล้วยังมีการดำเนินการในหน่วยงานของทุกภาคส่วนที่มีห้องปฏิบัติการหรืออาคารปฏิบัติการที่ใช้เทคโนโลยีขั้นสูง ซึ่งมีการใช้คำว่า Green laboratories หรือห้องปฏิบัติการสีเขียวเป็นเป้าหมายการพัฒนาตามแนวคิดนี้ ต่อมามีการขยายผลของโครงการ Labs21 ในระดับสากล ด้วยการจัดตั้งองค์การไม่แสวงหาผลกำไร International Institute for Sustainable Laboratories (I2SL) ที่สนับสนุนแนวคิดนี้ [6] และริเริ่มการใช้คำว่า Sustainable laboratories หรือห้องปฏิบัติการที่ยั่งยืน

สำหรับการจัดการห้องปฏิบัติการสีเขียวที่ปลอดภัยและยั่งยืนนั้น จำเป็นต้องลดการใช้พลังงาน น้ำ รวมทั้งใช้ทรัพยากรได้อย่างคุ้มค่าและมีประสิทธิภาพ ในที่นี้ขอยกตัวอย่างการใช้พลังงานและน้ำของห้องปฏิบัติการ เช่น การใช้ตู้แช่แข็งอุณหภูมิต่ำ (Ultra-low temperature freezers) เพื่อรักษาสภาพของตัวอย่างที่ต้องการศึกษา สามารถใช้พลังงานเท่ากับพลังงานที่ใช้ในบ้านทั้งวัน เครื่องมือที่ใช้สำหรับนึ่งฆ่าเชื้อโดยใช้ไอน้ำร้อนและแรงดันสูง (Autoclaves) สามารถใช้ปริมาณน้ำเท่ากับหรือมากกว่า 60 แกลลอนต่อรอบ หรือการใช้เครื่องผลิตน้ำปราศจากไอออน (Deionized water) สามารถใช้ปริมาณน้ำมากถึง 3 แกลลอน ในการทำน้ำปราศจากไอออนปริมาณเพียง 1 แกลลอน [7] นอกจากนี้ ห้องปฏิบัติการที่มีการใช้สารเคมีนั้นทำให้เกิดขยะและของเสียอันตราย ซึ่งหากมีการบริหารจัดการที่ไม่เหมาะสม หรือการกระทำโดยรู้เท่าไม่ถึงการณ์ อาจทำให้มีการปล่อยสารพิษสู่แหล่งน้ำ บรรยากาศ ที่จะตกค้างและหรือทำลายสิ่งแวดล้อมได้ ห้องปฏิบัติการจึงนับว่าเป็นแหล่งกำเนิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม และจำเป็นจะต้องมีระบบการจัดการสารเคมีที่เป็นสีเขียว เช่น การแทนที่ด้วยสารที่มีความเป็นอันตรายน้อยกว่า การใช้ 5R ในการจัดการขยะหรือของเสียอันตราย หรือการใช้เทคโนโลยีสะอาด

แต่ถึงอย่างไร การจัดการห้องปฏิบัติการให้เป็นสีเขียวมีค่าใช้จ่ายที่สูง เช่น การออกแบบหรือปรับปรุงโครงสร้างห้องปฏิบัติการ เครื่องมือ วัสดุ อุปกรณ์ นวัตกรรม หรือเทคโนโลยีใหม่ที่ช่วยประหยัดพลังงาน ซึ่งเป็นการลงทุนที่มากกว่าการจัดการห้องปฏิบัติการทั่วไป ถึงอย่างไรก็ตาม การลงทุนกับการจัดการห้องปฏิบัติการสีเขียวจะเกิดความคุ้มค่าในระยะยาว [2,6] เช่น การติดตั้งระบบประหยัดพลังงานในตู้ดูดไอระเหยสารเคมีซึ่งมีค่าใช้จ่ายสูง สามารถประหยัดค่าไฟฟ้าต่อปี ได้มากกว่าการติดตั้งตู้ดูดไอระเหยสารเคมีที่มีค่าใช้จ่ายน้อยกว่า ที่ไม่มีระบบนี้ ค่าไฟฟ้าต่อปีที่ลดลงจะทำให้สามารถคืนทุนค่าใช้จ่ายในการติดตั้งได้ภายในระยะเวลาหนึ่งปี รวมทั้งประหยัดค่าไฟฟ้าต่อปีได้ในระยะยาว การลงทุนเพื่อวัตถุประสงค์ของห้องปฏิบัติการสีเขียวจึงเป็นการลงทุนที่คุ้มค่า และเป็นการอนุรักษ์พลังงานที่เป็นทรัพยากรธรรมชาติ ที่มีคุณค่าได้อย่างยั่งยืน [8]

การนำหลักการของห้องปฏิบัติการสีเขียวมาใช้กับห้องปฏิบัติการในประเทศไทย เป็นการดำเนินการที่สำคัญในการขับเคลื่อนยุทธศาสตร์การพัฒนาประเทศตามแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ฉบับที่ 12 พ.ศ. 2560–2564 ยุทธศาสตร์ที่ 4 การเติบโตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเพื่อการพัฒนาอย่างยั่งยืน ที่ต้องการการพัฒนาที่มุ่งสู่การเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจและสังคมอย่างยั่งยืนที่มีการจัดการด้านสิ่งแวดล้อมอย่างเหมาะสม เพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมให้น้อยที่สุด ไม่ทำให้ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมเสื่อมโทรมและสูญเสียความสมดุล ซึ่งนับว่าเป็นการแก้ปัญหาและจุดอ่อนของการรักษาฐานการผลิตและให้บริการของประเทศ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสำรวจความคิดเห็นของผู้ทำงานในห้องปฏิบัติการที่มีการใช้สารเคมี เรื่องการจัดการห้องปฏิบัติการสีเขียวในประเทศไทย เกี่ยวกับความรู้ความเข้าใจเบื้องต้นเกี่ยวกับห้องปฏิบัติการสีเขียว และข้อเสนอแนะในการพัฒนาการจัดการ

ห้องปฏิบัติการสีเขียว ข้อมูลนี้สามารถนำไปใช้ประกอบการเตรียมความพร้อมสู่การพัฒนาห้องปฏิบัติการสีเขียวที่ยั่งยืนตามกระแสโลก รวมทั้งยกระดับคุณภาพห้องปฏิบัติการเพื่อการขับเคลื่อนอุตสาหกรรมในภาคการผลิตและการบริการของประเทศให้แข่งขันได้ ที่สอดคล้องกับยุทธศาสตร์การพัฒนาประเทศ

2. วิธีการวิจัย (Experimental methods)

การวิจัยเชิงสำรวจ (survey research) มีขั้นตอนการดำเนินการดังนี้

2.1 การออกแบบแบบสอบถาม

แบบสอบถามมีทั้งคำถามปลายเปิดและคำถามปลายปิด เพื่อเก็บข้อมูลตามวัตถุประสงค์ และมีการตรวจสอบความถูกต้อง (validity) โดยทดลองใช้แบบสอบถามกับกลุ่มบุคคลที่ทำงานในห้องปฏิบัติการ หรือทำงานเกี่ยวข้องกับห้องปฏิบัติการ จำนวน 64 คน เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาพัฒนาปรับปรุงแบบสอบถาม จนได้แบบสอบถามที่มีคุณภาพ และยังมีการตรวจสอบความเที่ยง (reliability) ด้วยวิธีของครอนบาค (Cronbach) โดยกำหนดเกณฑ์การพิจารณาค่าความเที่ยงต้องมีค่าตั้งแต่ 0.7 ขึ้นไป

2.2 การกำหนดขนาดของกลุ่มตัวอย่าง

จากการสืบค้นข้อมูลจากองค์กรของรัฐที่เกี่ยวข้องกับห้องปฏิบัติการ ไม่พบฐานข้อมูลที่ระบุจำนวนทั้งหมดของบุคลากรที่ปฏิบัติงานในห้องปฏิบัติการที่มีการใช้สารเคมี และไม่พบจำนวนทั้งหมดของหน่วยงานที่มีห้องปฏิบัติการในประเทศ ดังนั้นการกำหนดขนาดของกลุ่มตัวอย่างในกรณีนี้ จึงใช้สูตรคำนวณของคอแครน (W.G. Cochran) ไม่ทราบขนาดของประชากรที่แน่นอน แต่ทราบว่ามีจำนวนมาก และไม่ทราบค่าสัดส่วนของประชากร สูตรคำนวณของคอแครน (W.G. Cochran)

$$n = Z^2 / 4e^2$$

n = ขนาดของกลุ่มตัวอย่างที่ต้องการ

e = ระดับความคลาดเคลื่อนของการสุ่มตัวอย่างที่ยอมให้เกิดขึ้นได้

Z = ค่า Z ที่ระดับความเชื่อมั่น

โดยกำหนดระดับความเชื่อมั่น 95% ซึ่งมีค่า Z = 1.96 ระดับความคลาดเคลื่อนของการสุ่มตัวอย่างที่ยอมให้เกิดขึ้นได้ในการศึกษาวิจัยนี้ คือ 3% หรือ e = 0.03 ขนาดของกลุ่มตัวอย่างที่ต้องการโดยใช้สูตรนี้เท่ากับ

$$n = Z^2 / 4e^2$$

$$n = (1.96)^2 / 4(0.03)^2$$

$$n = 1067.11 \approx 1{,}068 \text{ หน่วย}$$

ขนาดของกลุ่มตัวอย่างที่ต้องการ คือ 1,068 หน่วย

2.3 การเลือกตัวอย่าง

ตัวอย่างเป็นกลุ่มผู้เข้ารับการฝึกอบรมจากฐานข้อมูลของสำนักพัฒนาศักยภาพนักวิทยาศาสตร์ห้องปฏิบัติการ กรมวิทยาศาสตร์บริการ จำนวนทั้งหมด 3,600 หน่วยตัวอย่าง

2.4 การเก็บข้อมูล

การสำรวจตัวอย่างใช้การส่งแบบสอบถามทางไปรษณีย์ จำนวน 3,600 ฉบับ และทำการสำรวจตัวอย่างจากกลุ่มผู้เข้ารับการฝึกอบรมโดยใช้วิธีการแจกแบบสอบถาม ณ จุดบริการฝึกอบรมของกรมวิทยาศาสตร์บริการ เพื่อให้ผู้เข้ารับการฝึกอบรมกรอกข้อมูลเอง (Self-enumeration) จำนวน 1,200 ฉบับ รวมทั้งสิ้น 4,800 ฉบับ ระหว่างเดือนพฤษภาคม 2558 ถึงเดือนมิถุนายน 2559 แบบสอบถามในการศึกษาวิจัยนี้ประกอบด้วย

1) สถานภาพของผู้ตอบแบบสอบถาม

2) ความรู้ความเข้าใจเบื้องต้นเกี่ยวกับห้องปฏิบัติการสีเขียว

3) ข้อเสนอแนะในการพัฒนาการจัดการห้องปฏิบัติการสีเขียวในประเทศไทย

2.5 การวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลทั้งหมดนำมาวิเคราะห์ด้วยสถิติเชิงพรรณนา (Descriptive statistics) ได้แก่ การแจกแจงความถี่ สัดส่วนและร้อยละ ค่าเฉลี่ย การกระจาย (ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน) และการจัดอันดับด้วยค่าถ่วงน้ำหนัก เพื่อหาข้อสรุปของประเด็นที่ต้องการศึกษาตามวัตถุประสงค์ของการศึกษาวิจัย

3. ผลและวิจารณ์ (Results and discussion)

จากแบบสอบถามจำนวนทั้งหมด 4,800 ฉบับ ได้แบบสอบถามตอบกลับคืน จำนวน 2,266 ฉบับ (ร้อยละ 47.2) เพื่อให้กลุ่มตัวอย่างสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการวิจัย ผู้วิจัยได้คัดเฉพาะแบบสอบถามที่ผู้ตอบแบบสอบถาม ระบุว่า ทำงานในห้องปฏิบัติการเท่านั้น ซึ่งได้แบบสอบถามสำหรับการวิเคราะห์และประมวลผล จำนวน 2,112 ฉบับ

3.1 สถานภาพของผู้ตอบแบบสอบถาม

ผลการวิเคราะห์สถานภาพของกลุ่มเป้าหมายเพื่อเป็นข้อมูลด้านลักษณะประชากรที่เกี่ยวข้องกับผู้ตอบแบบสอบถาม (n = 2,112) พบว่า ผู้ตอบแบบสอบถามส่วนใหญ่เป็นเพศหญิง (ร้อยละ 69.0) มีอายุระหว่าง 26 - 40 ปี (ร้อยละ 66.0) มีการศึกษาสูงสุดที่ระดับปริญญาตรี (ร้อยละ 68.3) มีประสบการณ์การทำงานในห้องปฏิบัติการ ระหว่าง 1–5 ปี (ร้อยละ 40.3) และทำงานอยู่ในห้องปฏิบัติการทดสอบ (ร้อยละ 68.3)

นอกจากนี้ มีข้อคำถามในแบบสอบถามถึงสารเคมีที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ พบว่า ผู้ตอบแบบสอบถามทั้งหมดระบุสารใดสารหนึ่งในข้อคำถามนี้ (ตารางที่ 1) ข้อคำถามนี้เป็นการยืนยันว่ากลุ่มผู้ตอบแบบสอบถามตรงกับเป้าหมายที่ตั้งไว้ ได้แก่ ผู้ที่ทำงานในห้องปฏิบัติการที่เกี่ยวกับสารเคมี

ตารางที่ 1 สถานภาพทั่วไปของผู้ตอบแบบสอบถาม (n = 2,112)

		จำนวน	ร้อยละ
เพศ	ชาย	498	23.6
	หญิง	1,457	69.0
	ไม่ระบุ	157	7.4
อายุ	18 - 25	297	14.1
	26 – 40	1,395	66.0
	41 – 50	309	14.6
	มากกว่า 50	52	2.5
	ไม่ระบุ	59	2.8
ระดับการศึกษาสูงสุด	มัธยมศึกษา อาชีวศึกษา หรือเทียบเท่า	66	3.1
	อนุปริญญา	107	5.1
	ปริญญาตรี	1,442	68.3
	ปริญญาโท	435	20.6
	ปริญญาเอก	51	2.4
	ไม่ระบุ	11	0.5
ประสบการณ์การทำงานในห้องปฏิบัติการ	น้อยกว่า 1 ปี	116	5.5
	1 - 5 ปี	851	40.3
	6 - 10 ปี	523	24.8
	11 - 15 ปี	291	13.8
	16 - 20 ปี	174	8.2
	มากกว่า 20 ปี	149	7.0
	ไม่ระบุ	8	0.4
ภารกิจของห้องปฏิบัติการที่ทำงาน*	ทดสอบ	1,812	68.3
	วิจัย	385	14.5
	สอบเทียบ	226	8.5
	การเรียนการสอน	157	5.9
	อื่น ๆ (ไม่ระบุ)	73	2.8
สารเคมีที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ*	สารกัดกร่อน	1,534	23.4
	ของเหลวไวไฟ	1,261	19.2
	แก๊ส	1,115	17.0
	สารออกซิไดซ์และเปอร์ออกไซด์	1,022	15.6
	สารพิษและสารติดเชื้อ	600	9.2
	ของแข็งไวไฟ	471	7.2
	วัตถุระเบิด	288	4.4
	สารกัมมันตรังสี	142	2.2
	สารอื่น ๆ (ไม่ระบุ)	115	1.8

หมายเหตุ *คำถามนี้ให้ผู้กรอกแบบสอบถามเลือกคำตอบได้มากกว่า 1 คำตอบ ซึ่งการคำนวณร้อยละ โดยการนำความถี่ของการเลือกคำตอบนั้น ๆ หารด้วยจำนวนรวมของคำตอบทั้งหมดแล้วคูณด้วย 100

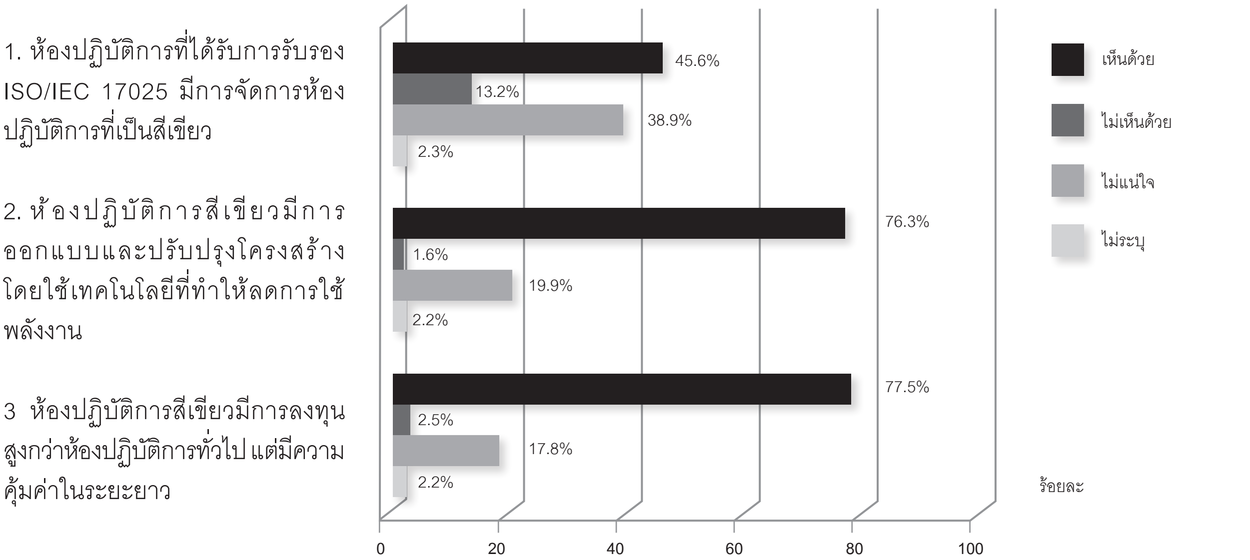
3.2 ความรู้ความเข้าใจเบื้องต้นเกี่ยวกับห้องปฏิบัติการสีเขียว

การศึกษานี้มีสมมุติฐานว่ากลุ่มผู้ตอบแบบสอบถามจะต้องเป็นผู้มีความรู้ความเข้าใจ และหรือมีประสบการณ์โดยตรงหรือทางอ้อมเกี่ยวกับห้องปฏิบัติสีเขียว ซึ่งเป็นองค์ประกอบหนึ่งในการสะท้อนความคิดเห็นที่มีต่อการจัดการห้องปฏิบัติการสีเขียว การเก็บข้อมูลใช้ชุดคำถาม จำนวน 2 ชุด ผลการวิเคราะห์ชุดคำถามที่ 1 ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ความคิดเห็น (ร้อยละ) ของผู้ตอบแบบสอบถามที่แสดงความคิดเห็นต่อชุดคำถามที่ 1

ประเด็นคำถาม	ความคิดเห็น (ร้อยละ)			ไม่ระบุ
	ใช่	ไม่ใช่	ไม่แน่ใจ	
1. ท่านเคยได้ยินคำว่า ห้องปฏิบัติการสีเขียว (Green Laboratory) หรือ ห้องปฏิบัติการปลอดภัยที่ยั่งยืน (Sustainable Laboratory)	1,185 (56.1)	367 (17.4)	509 (24.1)	509 (2.4)
2. ห้องปฏิบัติการที่มีการใช้สารเคมี เป็นแหล่งกำเนิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม	1,679 (79.5)	212 (10.0)	171 (8.1)	50 (2.4)
3. ห้องปฏิบัติการทั่วไปมีการใช้พลังงานน้ำและไฟฟ้าต่อตารางเมตร มากกว่าห้องทำงานประเภทอื่น ๆ	1,379 (65.3)	236 (11.2)	441 (20.9)	56 (2.6)
4. ห้องปฏิบัติการสีเขียว หมายถึง ห้องปฏิบัติการที่มีการบริหารจัดการ เพื่อความปลอดภัยต่อผู้ทำงาน อาคารสถานที่และผู้ที่เกี่ยวข้อง	1,837 (87.0)	42 (2.0)	181 (8.6)	52 (2.4)
5. ห้องปฏิบัติการสีเขียว หมายถึง ห้องปฏิบัติการที่มีการบริหารจัดการเพื่อ ประหยัดพลังงาน	1,562 (74.0)	155 (7.3)	341 (16.1)	54 (2.6)
6. ห้องปฏิบัติการสีเขียว หมายถึง ห้องปฏิบัติการที่มีการบริหารจัดการที่เป็น มิตรต่อสิ่งแวดล้อม	1,945 (92.1)	6 (0.3)	113 (5.3)	48 (2.3)
7. ท่านมีความรู้ความเข้าใจในการบริหารจัดการห้องปฏิบัติการสีเขียว	394 (18.7)	649 (30.7)	1,020 (48.3)	49 (2.3)

จากผลการศึกษาของชุดคำถามที่ 1 (ตารางที่ 2) แม้ว่าผู้ตอบแบบสอบถาม ร้อยละ 56.1 จะเคยได้ยินคำที่เกี่ยวข้องกับห้องปฏิบัติการสีเขียว และร้อยละ 18.7 คิดว่าตนเองมีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับการจัดการห้องปฏิบัติการสีเขียว แต่ผู้ตอบแบบสอบถามส่วนใหญ่ (คิดเป็นร้อยละ 65.3 - 92.1) มีความเข้าใจว่าห้องปฏิบัติการสีเขียวเป็นห้องปฏิบัติการที่มีการบริหารจัดการเพื่อความปลอดภัย ประหยัดพลังงาน เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และมีการใช้ทรัพยากรมากกว่าห้องทำงานทั่วไป รวมทั้งมีการใช้สารเคมีที่สามารถก่อให้เกิดปัญหาทางสิ่งแวดล้อม



รูปที่ 1 ร้อยละของผู้ตอบแบบสอบถาม ที่แสดงความคิดเห็นต่อชุดคำถามที่ 2

ชุดคำถามที่ 2 มีประเด็นคำถาม 3 ข้อ โดยผลการวิเคราะห์สัดส่วนความคิดเห็น (ร้อยละ) ของกลุ่มผู้ตอบแบบสอบถาม (รูปที่ 1) พบว่า ผู้ตอบแบบสอบถาม ร้อยละ 45.6 เข้าใจความสัมพันธ์ของการรับรองห้องปฏิบัติการตามมาตรฐาน ISO/IEC 17025 และการจัดการห้องปฏิบัติการสีเขียว ซึ่งมาตรฐานดังกล่าวไม่ครอบคลุมกฎหมายและข้อกำหนดด้านความปลอดภัย หรือมีข้อกำหนดที่เกี่ยวกับสถานที่และภาวะแวดล้อมที่เป็นการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมของห้องปฏิบัติการ [9] รวมถึงผู้ตอบแบบสอบถามส่วนใหญ่ (คิดเป็นร้อยละ 77.5–76.3) มีความเข้าใจเป็นไปในทิศทางเดียวกันว่า ห้องปฏิบัติการสีเขียวมีการใช้เทคโนโลยีประหยัดพลังงาน และเป็นห้องปฏิบัติการที่ให้ความคุ้มค่าในระยะยาว ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ผู้ตอบแบบสอบถามมีความรู้ความเข้าใจเบื้องต้นในหลักการที่สำคัญของห้องปฏิบัติการสีเขียว

3.2 ข้อเสนอแนะในการพัฒนาการจัดการห้องปฏิบัติการสีเขียวในประเทศ

การสำรวจนี้ใช้คำถามปลายปิดและคำถามปลายเปิดในการศึกษาความคิดเห็นของผู้ตอบแบบสอบถามเรื่องการพัฒนาการจัดการห้องปฏิบัติการทั้งในระดับองค์กรและประเทศ

3.2.1 มุมมองเกี่ยวกับห้องปฏิบัติการสีเขียว

จากผลการศึกษาความรู้ความเข้าใจเบื้องต้น (หัวข้อที่ 2) พบว่า ผู้ตอบแบบสอบถามสามารถสื่อหรือแปลความหมายของห้องปฏิบัติการสีเขียวเบื้องต้นได้ การให้ข้อเสนอแนะในเรื่องที่ทราบหลักการสำคัญจะเป็นการสื่อสารมุมมองของผู้ตอบแบบสอบถาม ที่สามารถนำมาวิเคราะห์และประมวลผลได้อย่างสมเหตุสมผล การศึกษาทรรศนะของผู้ตอบแบบสอบถามเริ่มต้นด้วย 2 ประเด็นคำถาม ได้แก่

ข้อที่ 1. ท่านเห็นความสำคัญและต้องการให้ห้องปฏิบัติการของท่านมีการจัดการห้องปฏิบัติการสีเขียว

ข้อที่ 2. การพัฒนาห้องปฏิบัติการของประเทศไปสู่การจัดการห้องปฏิบัติการสีเขียว มีความสำคัญและเป็นประโยชน์

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลในข้อที่ 1 ผู้ตอบแบบสอบถาม ร้อยละ 86.6 เห็นด้วย ร้อยละ 8.9 ไม่แน่ใจ ร้อยละ 2.5 ไม่เห็นด้วย และร้อยละ 2.0 ไม่ระบุ ส่วนข้อที่ 2 พบว่า ร้อยละ 94.2 เห็นด้วย ร้อยละ 3.4 ไม่แน่ใจ ร้อยละ 0.1 ไม่เห็นด้วย และร้อยละ 2.3 ไม่ระบุ แสดงให้เห็นว่า ผู้ตอบแบบสอบถามส่วนใหญ่ (คิดเป็นร้อยละ 86.6–94.2) มีมุมมองหรือทัศนคติเชิงบวก เกี่ยวกับห้องปฏิบัติการสีเขียว

3.2.2 บทบาทของภาครัฐและภาคประชาชน

การศึกษาบทบาทของภาครัฐและภาคประชาชนเบื้องต้นจะเป็นข้อมูลสำคัญ ที่จะทราบแนวคิดของผู้ตอบแบบสอบถามด้านการบูรณาการในการพัฒนาการจัดการห้องปฏิบัติการสีเขียวในประเทศไทย หรือการใช้พลังประชารัฐในการดำเนินการ การสำรวจใช้คำถามปลายปิดให้ผู้ตอบแบบสอบถามเลือกประเด็นที่เห็นด้วยและไม่เห็นด้วย และให้เรียงลำดับประเด็นที่คิดว่ามีความสำคัญจากมาก (อันดับที่ 1) ไปน้อย (อันดับที่ 3) การประมวลผลใช้การนับความถี่ของการให้อันดับความสำคัญของแต่ละประเด็น และนำมาคำนวณค่าถ่วงน้ำหนัก (ตารางที่ 3) จากการศึกษานี้ทำให้ทราบว่า ผู้ตอบแบบสอบถามให้ความสำคัญกับบทบาทของภาครัฐเป็นอันดับแรก ถัดมาจึงเป็นภาคประชาชน

ตารางที่ 3 ความถี่ (ค่าถ่วงน้ำหนัก) ของความคิดเห็นเกี่ยวกับบทบาทของภาครัฐและภาคประชาชนเบื้องต้น

บทบาทของภาครัฐและภาคประชาชน	เห็นด้วย (ร้อยละ)	ลำดับความสำคัญความถี่ (ค่าถ่วงน้ำหนัก)			
		อันดับที่ 1	อันดับที่ 2	อันดับที่ 3	รวม
1. รัฐบาลควรมีนโยบายเพื่อให้ผู้ทำงานตระหนักถึงการจัดการห้องปฏิบัติการสีเขียว	1,914 (90.6)	1,109 **(3,327)**	638 (1,276)	210 (210)	1,957 (4,813)
2. รัฐบาลควรกำหนดแนวทางที่เป็นมาตรฐานในการจัดการห้องปฏิบัติการสีเขียวของประเทศไทย	1,905 (90.2)	433 (1,299)	1,101 **(2,202)**	423 (423)	1,957 (3,924)
3. ประชาชนควรได้รับความรู้เกี่ยวกับการจัดการห้องปฏิบัติการสีเขียวเพิ่มมากขึ้น	1,901 (90.0)	415 (1,245)	218 (436)	1,324 **(1,324)**	1,957 (3,005)

3.2.3 ข้อมูลเบื้องต้นในการพัฒนาการจัดการห้องปฏิบัติการภายในองค์กร

การเก็บข้อมูลเบื้องต้นในการพัฒนาการจัดการห้องปฏิบัติการภายในองค์กรจากทุกภาคส่วน ได้จากผู้ตอบแบบสอบถามที่ทำงานในหน่วยงานประเภทต่าง ๆ โดยร้อยละ 57.3 ทำงานอยู่ในองค์กร บรรษัท บริษัท หรือนิติบุคคล ร้อยละ 32.8 ทำงานอยู่ในหน่วยงานในกำกับของรัฐที่ไม่ใช่สถานการศึกษา (ส่วนราชการ รัฐวิสาหกิจ องค์กรมหาชน หน่วยงานของรัฐรูปแบบใหม่ หรือหน่วยงานที่ใช้อำนาจรัฐหรือกลไกของรัฐ) ร้อยละ 8.8 ทำงานอยู่ในสถาบันการศึกษา และมีเพียงส่วนน้อย ร้อยละ 1.1 ไม่ระบุหน่วยงาน การสำรวจและการวิเคราะห์ประมวลผลใช้วิธีการเช่นเดียวกันกับข้อ 3.2.1 ผลการศึกษา ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ความถี่ (ค่าถ่วงน้ำหนัก) ประเด็นเบื้องต้นที่จำเป็นและสำคัญต่อการจัดการห้องปฏิบัติการสีเขียวภายในองค์กรของผู้ตอบแบบสอบถาม

ประเด็นที่จำเป็นต่อการจัดการห้องปฏิบัติการสีเขียวภายในองค์กรของท่าน	เห็นด้วย (ร้อยละ)	ลำดับความสำคัญ ความถี่ (ค่าถ่วงน้ำหนัก)					รวม ความถี่ (ค่าถ่วงน้ำหนัก)
		อันดับที่ 1	อันดับที่ 2	อันดับที่ 3	อันดับที่ 4	อันดับที่ 5	
1. การตระหนักรู้ของคนในองค์กรและผู้ทำงานเกี่ยวกับความสำคัญและประโยชน์ของการจัดการห้องปฏิบัติการสีเขียว	2056 (97.3)	1,086 **(5,430)**	293 (1,172)	261 (783)	161 (322)	270 (270)	2,071 (7,977)
2. บุคลากรที่มีความรู้เกี่ยวกับการจัดการห้องปฏิบัติการสีเขียว	2,052 (97.2)	257 (1,285)	738 **(2,952)**	560 (1,680)	359 (718)	151 (151)	2,065 (6,786)
3. สถานที่ เครื่องมือ และอุปกรณ์ เพื่อจัดทำห้องปฏิบัติการสีเขียว	2,043 (96.7)	55 (275)	250 (1,000)	466 **(1,398)**	593 (1,186)	700 (700)	2,064 (4,559)
4. งบประมาณในการปรับปรุงห้องปฏิบัติการให้เป็นห้องปฏิบัติการสีเขียว	2,027 (96.0)	421 **(2,105)**	427 (1,708)	300 (900)	562 (1,124)	358 (358)	2,068 (6,195)
5. การฝึกอบรมด้านการจัดการห้องปฏิบัติการสีเขียวให้กับบุคลากรในองค์กร	2,052 (97.2)	253 (1,265)	360 (1,440)	482 **(1,446)**	391 (782)	583 (583)	2,069 (5,516)

จากตารางที่ 4 ผู้ตอบแบบสอบถามมีความเห็นว่าบุคลากรเป็นปัจจัยสำคัญต่อการจัดการห้องปฏิบัติการสีเขียวภายในองค์กร โดยเน้นเรื่องความตระหนักรู้ (อันดับที่ 1) และความรู้ของบุคลากรในองค์กร (อันดับที่ 2) ถัดมาจึงเป็นเรื่องการสนับสนุนด้านทรัพยากรของห้องปฏิบัติการ

3.2.4 ข้อเสนอแนะแนวทางการพัฒนาการจัดการห้องปฏิบัติการสีเขียวในประเทศ

การใช้คำถามปลายเปิดในการศึกษาบริบทการพัฒนาการจัดการห้องปฏิบัติการสีเขียวในประเทศ เป็นวิธีการที่ผู้ตอบแบบสอบถามสามารถเขียนข้อเสนอแนะได้อย่างอิสระด้วยคำพูดของตนเอง โดยให้เขียนข้อเสนอแนะในประเด็นที่เกี่ยวกับความต้องการ ความพร้อม หรืออุปสรรคในการพัฒนาการจัดการห้องปฏิบัติการสีเขียวในประเทศและองค์กร ซึ่งรวบรวมได้ 229 ความคิดเห็น การจัดกลุ่มความคิดเห็นที่เหมือนกันบริบทการดำเนินการในประเทศและในองค์กร สรุปได้ดังนี้

3.2.4.1 บริบทการดำเนินการในประเทศ

ผู้ตอบแบบสอบถามส่วนใหญ่แสดงความคิดเห็นว่าบริบทการพัฒนาจัดการห้องปฏิบัติการสีเขียวในประเทศนั้น บทบาทจากภาครัฐมีความสำคัญมากที่สุด โดยต้องการสนับสนุนส่งเสริมที่เป็นรูปธรรมและมีความต่อเนื่อง ตลอดจนเสนอแนวทางการสนับสนุนส่งเสริมในหลายด้าน การประมวลผลใช้การสรุปใจความสำคัญของแต่ละความคิดเห็น นับความถี่ของความคิดเห็นในประเด็นหลัก เพื่อนำมาเรียงลำดับที่สำคัญจากมากไปน้อย และยกตัวอย่างความคิดเห็นที่สนับสนุนประเด็นหลัก สรุปข้อมูลได้ดังนี้

ลำดับที่ 1 : การสนับสนุนส่งเสริมด้านการให้ความรู้และการรณรงค์ ข้อเสนอแนะนี้เกิดจากการที่ผู้ตอบแบบสอบถามส่วนใหญ่ให้ความคิดเห็นถึงคำว่า “ห้องปฏิบัติการสีเขียว” ยังไม่แพร่หลาย หรือต้องการทราบเกี่ยวกับห้องปฏิบัติการสีเขียว และ ข้อดี – ข้อเสีย ในการดำเนินการ โดยเสนอแนะแนวทางการให้ความรู้เพื่อเสริมสร้างความรู้ความเข้าใจให้กับประชาชน เช่น

- การจัดทำแผนการฝึกอบรม การจัดอบรม การจัดสัมมนา การประชุม การถ่ายทอดความรู้จากผู้เชี่ยวชาญ
- การพัฒนาหลักสูตรด้านการจัดการห้องปฏิบัติการสีเขียว
- การจัดทำห้องปฏิบัติการสีเขียวต้นแบบของหน่วยงานภาครัฐ เพื่อให้หน่วยงานอื่นศึกษาดูงานหรือเยี่ยมชม
- การให้ความรู้กับเยาวชนเพื่อปลูกฝังการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมและการมีส่วนร่วม ที่เริ่มต้นตั้งแต่ที่บ้าน ในสถาบันการศึกษา สังคม จนถึงระดับประเทศ เพื่อที่จะเป็นอนาคตต่อไป
- การจัดทำหลักสูตรสำหรับนักเรียน นักศึกษา และหรือบรรจุลงในแผนการศึกษาในสาขาวิชาที่เกี่ยวข้อง

นอกจากนี้ ผู้ตอบแบบสอบถามให้ข้อมูลแนวทางการรณรงค์ เพื่อกระตุ้นประชาชนให้มีความตระหนัก เห็นถึงความสำคัญและประโยชน์ของแนวคิดนี้ เช่น

• การส่งหนังสือเชิญชวนให้หน่วยงานปฏิบัติตามแนวทางสีเขียว

• การชี้แจงให้ผู้บริหารมีความเข้าใจและตระหนักถึงความสำคัญและประโยชน์ที่จะได้รับ

• การส่งเสริมให้มีการเลือกใช้เครื่องมือ/อุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการ ที่ติดฉลากสิ่งแวดล้อม เช่น ฉลากเขียว ฉลากประหยัดไฟเบอร์ 5 หรือฉลากสิ่งแวดล้อมของต่างประเทศ

• การสื่อสารหรือการประชาสัมพันธ์ข้อมูลต่าง ๆ ควรคำนึงถึงประโยชน์ที่หน่วยงานต่าง ๆ จะได้รับในระยะยาว หรือการให้ข้อมูลการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์ ผลกำไร - ขาดทุน และความคุ้มค่า ซึ่งอาจสะท้อนแนวคิดของผลตอบแทน ที่ประเมินค่าเป็นเงินไม่ได้ เพื่อจะทำให้ผู้บริหารองค์กรและผู้ทำงานที่เกี่ยวข้องกับห้องปฏิบัติการ มีความสนใจและใส่ใจในการจัดการสีเขียว

ลำดับที่ 2 : การกำหนดนโยบาย วัตถุประสงค์ แผนการส่งเสริมด้านการพัฒนาการจัดการห้องปฏิบัติการสีเขียวที่ชัดเจน รวมทั้งมีการติดตามผลการดำเนินการ โดยต้องการให้ภาครัฐเป็นต้นแบบและเป็นผู้นำในขับเคลื่อนการพัฒนา เพื่อให้เกิดผลลัพธ์ในการยกระดับมาตรฐานห้องปฏิบัติการที่ยั่งยืนได้อย่างแท้จริง แนวทางการดำเนินการที่เสนอแนะ เช่น

• การจัดให้มีหน่วยงานที่รับผิดชอบที่ชัดเจนในการสนับสนุนการดำเนินการให้กับหน่วยงานต่าง ๆ

• การสนับสนุนการดำเนินการอื่น เช่น การให้ข้อมูลเทคโนโลยีหรืองานวิจัยใหม่ ๆ ที่จะเป็นวิธีการในการพัฒนาการจัดการห้องปฏิบัติการสีเขียว

ลำดับที่ 3 : การออกกฎหมายเพื่อเป็นการควบคุมให้ทุกองค์กรได้ปฏิบัติในทิศทางเดียวกัน หรือการกำหนดแนวทาง มาตรการ หรือมาตรฐาน โดยมีข้อเสนอแนะเกี่ยวกับเรื่องนี้ เช่น

• ภาครัฐควรจัดการอบรม/สัมมนา/ประชุมเกี่ยวกับห้องปฏิบัติการสีเขียวให้กับบุคลากรจากหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง ก่อนการกำหนดแนวทาง มาตรการ หรือมาตรฐานในการจัดการห้องปฏิบัติการสีเขียว เพื่อให้หน่วยงานที่เกี่ยวข้องรับทราบข้อมูลโดยทั่วกัน และเกิดความเข้าใจที่ตรงกัน

• การกำหนดแนวทาง หรือการปรับปรุงกฎระเบียบ/ข้อบังคับควรพิจารณาถึงความเป็นไปได้และความเหมาะสมต่อสถานการณ์ปัจจุบัน สำหรับหน่วยงานที่เกี่ยวข้องในทุกภาคส่วน เช่น การพิจารณาถึงการจัดการหรือระบบของห้องปฏิบัติการ ที่ไม่ใช่ห้องปฏิบัติการที่สร้างใหม่ ให้สามารถปฏิบัติได้ และหรือสามารถได้รับการรับรองตามมาตรฐาน

• การกำกับดูแลและตรวจสอบห้องปฏิบัติการอย่างจริงจังให้เป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด

• กฎหมายควรมีบทลงโทษต่อหน่วยงานที่ไม่ปฏิบัติตามกฎหมาย

ลำดับที่ 4 : การจัดหาที่ปรึกษา หรือการเป็นที่ปรึกษา เพื่อให้คำแนะนำ ข้อมูล และช่วยแก้ไขปัญหาให้กับหน่วยงานต่าง ๆ เพื่อเอื้อให้เกิดการนำแนวคิดไปประยุกต์ใช้กับห้องปฏิบัติการนั้นๆ ได้อย่างเหมาะสม ตัวอย่างปัญหาที่ต้องการคำปรึกษา เช่น ห้องปฏิบัติการที่เปิดมานานแล้ว ควรมีการปรับปรุงสิ่งใดก่อนภายใต้งบประมาณที่จำกัด

ลำดับที่ 5 : การสร้างแรงจูงใจ เพื่อทำให้องค์กรและผู้ปฏิบัติการเกิดความมุ่งมั่นในการดำเนินการ หรือเป็นกำลังใจให้ห้องปฏิบัติการที่ดำเนินการ เช่น

• การให้รางวัล การลดภาษีให้กับหน่วยงานที่เข้าร่วมการดำเนินการ การให้ตราสัญลักษณ์ หรือการสนับสนุนงบประมาณ

• การให้แนวทางหรือกระบวนการปฏิบัติโดยให้เกิดค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด มุ่งเน้นการประหยัดเพื่อลดการสิ้นเปลืองต่อองค์กร หรือแนวทางในปรับปรุงห้องปฏิบัติการที่ใช้เงินลงทุนน้อยแล้วสามารถคืนทุนให้องค์กร ที่มีประสิทธิผลในการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม เช่น การลดปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2)

• การให้ข้อมูลวิธีการในการปรับปรุงห้องปฏิบัติการก่อนการใช้งบประมาณ โดยใช้ทรัพยากรที่มีอยู่ให้เกิดประโยชน์สูงสุด

ลำดับที่ 6 : การสร้างการบูรณาการและการมีส่วนร่วมของหน่วยงานในทุกภาคส่วน ทั้งนี้ เพื่อให้เกิดการแลกเปลี่ยนความคิดเห็นพร้อมทั้งปัญหาและแนวทางแก้ไขของแต่ละองค์กร เช่น

• การจัดประชุมหารือด้านนโยบาย การวางแผน แนวทางกฎหมายหรือข้อกำหนดที่เกี่ยวข้อง ร่วมกันระหว่างหน่วยงานภาครัฐ เอกชน และสถาบันการศึกษา

• การส่งเสริมให้เกิดเครือข่ายห้องปฏิบัติการเพื่อการแบ่งปันสารเคมีระหว่างหน่วยงาน

3.2.4.2 บริบทการดำเนินการในองค์กร

การประมวลผลความคิดเห็นเกี่ยวกับบริบทการดำเนินการในองค์กรใช้วิธีการเช่นเดียวกันกับข้อ 3.4.1 ซึ่งพบว่าผู้ตอบแบบสอบถามเห็นว่าการจัดสรรงบประมาณในองค์กรเป็นอุปสรรคมากที่สุด ถัดมาจึงเป็นความพร้อมของห้องปฏิบัติการ รวมทั้งเห็นว่าองค์ประกอบหลักของความสำเร็จในการพัฒนาการจัดการห้องปฏิบัติการสีเขียวภายในองค์กร ได้แก่ บทบาทของผู้บริหารองค์กรมีความสำคัญเป็นอันดับที่ 1 ต่อมาจึงเป็นประเด็นที่ต้องการการสนับสนุนในเรื่องต่าง ๆ สรุปข้อเสนอแนะได้ดังนี้

ลำดับที่ 1 : ผู้บริหารทุกระดับขององค์กรควรเห็นความสำคัญประโยชน์ และมีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับการจัดการห้องปฏิบัติการสีเขียว กำหนดนโยบายและแผน แนวทางการดำเนินการที่ชัดเจนเป็นรูปธรรม รวมทั้งแสดงความเป็นผู้นำและแบบอย่างที่ดี และที่สำคัญคือ ตัวอย่างข้อแนะนำแนวทางการพัฒนาที่เกี่ยวข้อง เช่น

• การกำหนดแนวปฏิบัติของห้องปฏิบัติการ กฎระเบียบ หรือข้อบังคับในการปฏิบัติงานในห้องปฏิบัติการ รวมทั้งพัฒนาการจัดการให้มีการปรับปรุงการดำเนินการในห้องปฏิบัติการอย่างเป็นระบบ

• การกำหนดมาตรฐานที่ใช้ในหน่วยงานให้สอดคล้องกับมาตรฐานอื่น ๆ เช่น International Organization for Standardization (ISO) เพื่อให้ได้การรับรองในระดับนานาชาติ

• การกำหนดมาตรฐานที่จะใช้ก่อนการก่อสร้างห้องปฏิบัติการที่จะเป็นห้องปฏิบัติการสีเขียวในอนาคต จะเป็นการช่วยลดงบประมาณในการลงทุนก่อสร้าง

ลำดับที่ 2 : การให้ความรู้กับบุคลากรทุกระดับในองค์กร รวมทั้งการรณรงค์ และการสื่อสารภายในองค์กร เพื่อสร้างความตระหนักและสร้างความรู้ความเข้าให้กับบุคลากร

ลำดับที่ 3 : การสร้างให้เกิดความร่วมมือของบุคลากรในทุกระดับ และสร้างการมีส่วนร่วมในการพัฒนาการจัดการห้องปฏิบัติการสีเขียวภายในองค์กร เช่น

• การจัดสัมมนาแลกเปลี่ยนความคิดเห็นกันระหว่างห้องปฏิบัติการ

• การให้ห้องปฏิบัติการภายในองค์กรร่วมกันในการดำเนินการกำจัดของเสีย

• การช่วยกันสืบค้นข้อมูลเกี่ยวกับห้องปฏิบัติการสีเขียว และแบ่งปันข้อมูลระหว่างห้องปฏิบัติการ

• การจัดกิจกรรมกระตุ้นการจัดการห้องปฏิบัติการสีเขียว

• การจัดให้มีห้องปฏิบัติการต้นแบบภายในหน่วยงานที่ประสบความสำเร็จ

ลำดับที่ 4 : การสร้างแรงจูงใจ เช่น การขึ้นเงินเดือน การให้รางวัล การจัดการสวัสดิการด้านสุขภาพ การประกันความเสี่ยง หรือประกันชีวิตให้ผู้ทำงานในห้องปฏิบัติการ

จากการประมวลผล 3.1 มุมมองเกี่ยวกับห้องปฏิบัติการสีเขียว 3.2 บทบาทของภาครัฐและภาคประชาชน 3.3 ข้อมูลเบื้องต้นในการพัฒนาการจัดการห้องปฏิบัติการภายในองค์กร และ 3.4 ข้อเสนอแนะแนวทางการพัฒนาการจัดการห้องปฏิบัติการสีเขียวในประเทศทั้งในบริบทการดำเนินการในประเทศและองค์กร พบว่า ผู้ตอบแบบสอบถามเห็นว่าการพัฒนาการจัดการห้องปฏิบัติการสีเขียวมีความสำคัญ (ประมาณร้อยละ 86.6–94.2) และต้องการการสนับสนุนในการดำเนินการ โดยมีข้อเสนอแนะในการพัฒนาดังกล่าวในระดับองค์กรและระดับประเทศที่เหมือนกัน ที่จัดว่ามีความสำคัญมากที่สุด ได้แก่ การกำหนดนโยบายและทิศทางการดำเนินงานที่ชัดเจน รองลงมา คือ การให้ความรู้และการรณรงค์

4. **สรุป** (Conclusion)

จากข้อมูลโครงการจะเห็นได้ว่า กลุ่มผู้ตอบแบบสอบถามในห้องปฏิบัติการที่มีการใช้สารเคมีส่วนใหญ่มีความตระหนัก และความรู้ความเข้าใจเบื้องต้นในหลักการของห้องปฏิบัติการสีเขียว รวมทั้งต้องการพัฒนาการจัดการห้องปฏิบัติการสีเขียว นับว่าเป็นการสะท้อนทัศนคติเชิงบวกต่อการจัดการห้องปฏิบัติการสีเขียว และต้องการการสนับสนุนส่งเสริมจากภาครัฐและหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง โดยเฉพาะด้านนโยบายและแนวทางการดำเนินการที่ชัดเจน รวมทั้งการให้ความรู้เพื่อเพิ่มความรู้ความเข้าใจ และการรณรงค์เพื่อเสริมสร้างความตระหนัก ประกอบกับการสร้างแรงจูงใจเพื่อสร้างการให้ความร่วมมือ และการสร้างการบูรณาการ ซึ่งความช่วยเหลือจะเป็นประโยชน์ต่อการเพิ่มศักยภาพบุคลากรห้องปฏิบัติการในประเทศไทย ให้นำแนวทางการจัดการห้องปฏิบัติการสีเขียวไปประยุกต์ใช้ และเกิดการพัฒนาระบบการจัดการด้านความเป็นสีเขียวของห้องปฏิบัติการที่มีการใช้สารเคมีในองค์กรต่าง ๆ อันจะเป็นกลไกสำคัญในการขับเคลื่อนการจัดการห้องปฏิบัติการสีเขียวในทุกภาคส่วนของประเทศอย่างยั่งยืนต่อไป

5. **กิตติกรรมประกาศ** (Acknowledgement)

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณกรมวิทยาศาสตร์บริการที่ได้สนับสนุนทุนวิจัยตลอดโครงการนี้ และขอขอบคุณผู้บริหารสำนักพัฒนาศักยภาพนักวิทยาศาสตร์ ที่มีส่วนร่วมและผลักดันให้งานวิจัยนี้สำเร็จได้ด้วยดี

6. **เอกสารอ้างอิง** (References)

[1] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 4699 (พ.ศ. 2558) เรื่อง กำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ระบบการจัดการด้านความปลอดภัยของห้องปฏิบัติการที่เกี่ยวข้องกับสารเคมี เล่ม 1 : ข้อกำหนด. *ราชกิจจานุเบกษา 23 กันยายน 2558. เล่มที่ 132 ตอนพิเศษ 229 ง.*

[2] *Labs21* [online]. 2011. [viewed 23 Jan 2011]. Available from: www.labs21century.gov/index.htm

[3] *GREEN LABS* [online]. 2015. [view 29 July 2015]. Available from: https://sustainability.wisc.edu/certifications/green-labs/

[4] *Green Labs* [online]. 2015. [view 29 July 2015]. Available from: https://green.harvard.edu/programs/green-labs

[5] *Green Laboratory Program* [online]. 2018. [viewed 11 June 2019]. Available from: https://green.uw.edu/green-laboratory

[6] *International Institute for Sustainable Laboratories* [online]. 2017. [viewed 9 February 2017]. Available from: http://www.i2sl.org/

[7] *My green lab* [online]. 2017. [viewed 8 February 2017]. Available from: http://www.mygreenlab.org/

[8] ประไพพิศ แจ่มสุกใส เทอรีโน. *เอกสารประกอบการฝึกอบรมหลักสูตร การออกแบบห้องปฏิบัติการเคมีเพื่อความปลอดภัย วันที่ 29–30 เมษายน 2557 ณ สำนักพัฒนาศักยภาพนักวิทยาศาสตร์ห้องปฏิบัติการ กรมวิทยาศาสตร์บริการ*. กรุงเทพฯ : กรม, 2557.

[9] จันทร์เพ็ญ ใจธีรภาพกุล และวรรณภา ต้นยืนยงค์. *เอกสารประกอบการฝึกอบรมหลักสูตร ข้อกำหนด ISO/IEC 17025 วันที่ 24 – 25 มกราคม 2560 ณ สำนักพัฒนาศักยภาพนักวิทยาศาสตร์ห้องปฏิบัติการ กรมวิทยาศาสตร์บริการ*. กรุงเทพฯ : กรม, 2560.

ผลกระทบของไฟฟ้าสถิตที่มีต่อค่าความถูกต้องของการชั่งน้ำหนัก

Effect of electrostatic on weighing accuracy

8

อัจฉราวรรณ วัฒนหัตถกรรม[1*], ศักดิ์สิทธิ์ ดีอ่ำ[1], บุญธรรม ลิมป์ปิยพันธ์[1]
Acharawan Wattanahuttakum[1*], Saksit Deeum[1], Boontham Limpiyapun[1]

บทคัดย่อ

ไฟฟ้าสถิตเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อค่าความถูกต้องของการชั่งน้ำหนัก เพียงแค่จับถูสัมผัสก็ก่อให้เกิดการแลกเปลี่ยนหรือถ่ายเทประจุไฟฟ้าขึ้น มักเกิดกับวัตถุที่เป็นฉนวนไฟฟ้าประเภท ยาง แก้ว พลาสติก และสารชนิดผง ตัวอย่างที่นำมาทดสอบนี้มีหลายประเภทด้วยกัน ได้แก่ แก้ว พลาสติก อลูมิเนียม ถุงมือยางธรรมชาติ และกระดาษ แต่พลาสติกและแก้วเป็นวัสดุที่มักเกิดไฟฟ้าสถิตได้ง่ายซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎี Triboelectric series เมื่อเรานำตัวอย่างทั้งพลาสติกและแก้วที่มีไฟฟ้าสถิตและที่ได้รับการสลายไฟฟ้าสถิตมาทดสอบโดยการชั่งน้ำหนักบนเครื่องชั่งประเภท Analytical balance และ Micro balance และนำผลการชั่งมาเปรียบเทียบกัน พบว่าตัวอย่างที่มีศักย์ไฟฟ้าแสดงค่าน้ำหนักเปลี่ยนแปลงตลอด เครื่องชั่งขาดความเสถียรทำให้ไม่สามารถอ่านค่าได้ ค่าการวัดผิดพลาดไม่ถูกต้องเนื่องจากค่าน้ำหนักที่ได้มีค่ามากกว่าน้ำหนักจริงของตัวอย่างนั้นอันเป็นผลมาจากแรงกระทำระหว่างวัตถุและเครื่องชั่ง และค่าความทวนซ้ำได้ของผลการวัดไม่ดีดังเห็นได้จากผลการวัดที่กระจายตัวมากกว่าการชั่งตัวอย่างที่ไม่มีไฟฟ้าสถิต

ดังนั้นการกำจัดไฟฟ้าสถิตหรือการทำให้ตัวอย่างที่นำมาทดสอบนั้นมีสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้าจึงเป็นสิ่งที่ผู้ใช้งานควรตระหนักและให้ความสำคัญอย่างยิ่ง เพื่อให้เกิดความเสถียรขณะชั่ง ความแม่นและความเที่ยงของการวัดมีมากขึ้น ทำให้ได้ค่าผลการวัดที่ถูกต้อง น่าเชื่อถือและเป็นที่ยอมรับ

Abstract

One of several parameters causing inaccuracy in precision weighing is a static electricity. The charging occurs through rubbing during the handling of objects or containers. It mostly affects insulator materials such as rubber, plastic, glass and powder. Various types of materials such as glass, plastic, aluminium, rubber, and paper are tested in this research but plastic and glass samples are easily to get charged in conformity with the triboelectric series. The charged and neutralized objects are weighed with analytical and micro balances. The charged samples have the problems with the measurement drift and the balance stability. The electrostatic charge affects the measurement accuracy as the weight value of the charged object appears heavier. This measurement error is caused by the electrostatic forces acting between the object and the balance. The charged object also gives the poorer measurement repeatability than the discharged object, as confirmed by the high standard deviation.

Therefore, the removal of the electrostatic charge or the neutralization on charged samples is essential for weighing process. This is to improve the balance stability, measurement accuracy and measurement precision. The reliable measurement results will be finally obtained.

คำสำคัญ : ไฟฟ้าสถิต การชั่งน้ำหนัก ความแม่นการวัด ความเที่ยงการวัด
Keywords : Static electricity, Weighing, Measurement accuracy, Measurement precision

[1] กรมวิทยาศาสตร์บริการ กองความสามารถห้องปฏิบัติการและรับรองผลิตภัณฑ์
*Corresponding author e-mail address: acharawan@dss.go.th

1. บทนำ (Introduction)

เครื่องชั่งถือเป็นเครื่องมือพื้นฐานที่ใช้ในห้องปฏิบัติการทางวิทยาศาสตร์เพื่อใช้ชั่งสารหรือวัตถุตัวอย่างที่ต้องการตรวจวิเคราะห์ ผู้ใช้งานต้องมีความรู้ความเข้าใจในเรื่องการใช้และดูแลรักษาเครื่องชั่ง จึงควรหลีกเลี่ยงปัจจัยต่าง ๆ ที่จะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องชั่ง เพื่อให้ได้ผลการวัดวิเคราะห์ทดสอบที่ถูกต้อง น่าเชื่อถือ

ปัจจัยที่สำคัญอย่างหนึ่งที่ผู้ใช้งานมักมองข้ามหรือละเลยที่ทำให้การชั่งน้ำหนักผิดพลาดคลาดเคลื่อนไป นั่นก็คือ ไฟฟ้าสถิต (Static electricity) [1] โดยทั่วไปนั้นไฟฟ้าสถิตเกิดขึ้นจาก 3 สาเหตุหลักด้วยกัน [2] คือ การเหนี่ยวนำ (Charging by induction) ซึ่งการถ่ายเทประจุจะเกิดขึ้นเมื่อเรานำวัตถุที่มีประจุไฟฟ้าเข้าไปใกล้ ๆ วัตถุที่เป็นกลางแต่ไม่แตะสัมผัส (No direct contact) จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำให้ประจุไฟฟ้าที่อยู่ในวัตถุที่เป็นกลางเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ ประจุไฟฟ้าต่างขั้วกันจะแยกตัวอยู่ในทิศทางตรงกันข้าม หากเราต่อกราวด์ลงดิน (Grounding) ทางด้านฝั่งตรงข้ามกับด้านวัตถุที่นำมาเหนี่ยวนำ ก็จะเกิดการถ่ายเทประจุไฟฟ้าที่อยู่ทางด้านที่ต่อลงดิน ประจุด้านนี้ก็จะหายไป เมื่อเรานำสายดินออก ก็จะคงเหลือแต่ประจุที่ถูกวัตถุที่นำมาเหนี่ยวนำดูดไว้ เป็นผลทำให้วัตถุที่เป็นกลางเดิมมีประจุไฟฟ้าเกิดขึ้น การแตะสัมผัส (Charging by conduction) ประจุไฟฟ้าเกิดขึ้นโดยการนำวัตถุที่มีอำนาจทางไฟฟ้าไปแตะหรือสัมผัสกับวัตถุที่เป็นกลางทางไฟฟ้า หรือแบบที่เรียกว่า Direct contact ทำให้อิเล็กตรอนมีการถ่ายเท จนกระทั่งวัตถุทั้งสองมีศักย์ไฟฟ้าเท่ากันจึงหยุดการถ่ายเท ทำให้วัตถุเดิมที่เป็นกลางกลายเป็นวัตถุที่มีประจุไฟฟ้าชนิดเดียวกับประจุไฟฟ้าของวัตถุที่นำมาแตะ ซึ่งขนาดของประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนวัตถุเดิมที่เป็นกลางทางไฟฟ้านั้นจะมีเท่ากับขนาดประจุไฟฟ้าที่ลดลงของวัตถุที่นำมาแตะ และอีกหนึ่งสาเหตุคือการเสียดสีถูกัน (Charging by friction) เป็นการนำวัตถุ 2 ชนิดมาถูกัน (Rubbing) ทำให้มีการถ่ายเทของประจุไฟฟ้า (อิเล็กตรอน) ระหว่างวัตถุทั้งสอง หากวัตถุใดสูญเสียอิเล็กตรอนไปวัตถุนั้นจะมีประจุไฟฟ้าเป็นบวก ส่วนวัตถุที่ได้รับอิเล็กตรอนก็จะมีประจุไฟฟ้าเป็นลบ ซึ่งวัตถุใดจะมีประจุชนิดใดมากกว่ากันภายหลังจากการเสียดสีกันนั้นก็ขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุทั้งสองตามลำดับของ Triboelectric series [3]

โดยส่วนใหญ่การปฏิบัติงานในขั้นตอนการชั่งตัวอย่างนั้น เราอาจหลีกเลี่ยงไม่ได้ที่จะจับหรือสัมผัสตัวอย่างหรือภาชนะขณะนำไปชั่ง จึงทำให้มีการถ่ายเทประจุไฟฟ้า ส่งผลให้ประจุไฟฟ้าไม่สมดุล ซึ่งมักเกิดขึ้นได้เสมอเมื่อสภาวะอากาศในห้องปฏิบัติการแห้ง หรือห้องปฏิบัติการมีความชื้นสัมพัทธ์ในขณะชั่งอยู่ต่ำกว่าร้อยละ 45 ซึ่งโดยปกติแล้วควรใช้งานในช่วงความชื้นสัมพัทธ์อยู่ระหว่างร้อยละ 45 ถึง 60 ซึ่งปัญหานี้อาจแก้ได้โดยการควบคุมสภาวะแวดล้อมของห้องปฏิบัติการวิเคราะห์ทดสอบให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม อย่างไรก็ตาม แม้เราจะทำการป้องกันมิให้เกิดไฟฟ้าสถิตด้วยการควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ให้อยู่ในเกณฑ์กำหนด แต่ไฟฟ้าสถิตก็ยังสามารถเกิดขึ้นได้แม้ในขณะเช็ดทำความสะอาดเครื่องแก้ว การนำภาชนะชั่งสารออกจากถุงพลาสติก หรือแม้แต่การใช้ช้อนตวงสารเป็นพลาสติก ก็ยังคงมีแนวโน้มที่จะเกิดประจุไฟฟ้าที่ผิวช้อนได้ และเมื่อเรานำช้อนตวงที่มีไฟฟ้าสถิตนั้นมาตักสารตัวอย่างที่เป็นผง ปัญหาใหญ่ที่อาจจะพบคือ เราไม่สามารถตวงสารลงสู่ภาชนะได้ เนื่องจากผงสารถูกดูดปลิวกระจายไปเกาะทั่วตามขอบภาชนะ ซึ่งแรงดึงดูดนี้เกิดแรงประจุไฟฟ้าสถิตนั่นเอง ปริมาณสารที่ชั่งก็จะได้น้อยกว่าที่เราต้องการ และถ้าผงสารที่จะใช้ในการวิเคราะห์มีปริมาณจำกัดและราคาแพงก็ย่อมก่อให้เกิดความเสียหาย เสียเวลา และเสียงบประมาณมากขึ้น

วัสดุต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นกลุ่มตัวนำไฟฟ้าหรือฉนวนไฟฟ้าก็สามารถเกิดไฟฟ้าสถิตได้เช่นเดียวกัน ความแตกต่างอยู่ที่วัสดุที่เป็นตัวนำไฟฟ้าสามารถสลายประจุได้ด้วยตัวมันเอง ส่วนถ้าเป็นฉนวนหรือวัสดุที่ไม่นำไฟฟ้าประเภทยาง พลาสติก แก้ว สารชนิดผง เป็นต้น ประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนั้นไม่สามารถสลายได้ด้วยตัวมันเอง ต้องอาศัยกระบวนการในการกำจัดประจุให้หมดไป หากนำตัวอย่างที่มีไฟฟ้าสถิตมาชั่งจะส่งผลต่อการวัด เช่น ค่าการวัดเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ค่าความทวนซ้ำได้ของผลการวัดไม่ดี และค่าการวัดผิดพลาดไม่ถูกต้อง [4] ซึ่งผู้ปฏิบัติงานอาจสังเกตเห็นได้ในขณะที่เรานำวัตถุที่มีประจุไฟฟ้าเข้าใกล้จานเครื่องชั่ง ค่าตัวตัวเลขที่หน้าจอแสดงผลจากเดิมที่เป็นค่าศูนย์ก็จะมีการเปลี่ยนแปลง (Drifting) และเมื่อเราวางวัตถุที่มีไฟฟ้าสถิตนั้นบนเครื่องชั่ง ก็จะเกิดแรงดูดหรือแรงผลักขึ้นระหว่างวัตถุที่ชั่งกับจานเครื่องชั่ง ทำให้ค่าน้ำหนักของวัตถุนั้นไม่ถูกต้องอาจมากหรือน้อยกว่าค่าที่แท้จริง โดยน้ำหนักจะผิดพลาดเพียงแค่ไม่กี่มิลลิกรัมจนไปถึง 100 มิลลิกรัมก็เป็นได้ [5] หากคิดเป็นร้อยละก็อาจทำให้เกิดความผิดพลาดของการวัดสูงมากถึง 3 % [6] ห้องปฏิบัติการหลายหน่วยงานที่มีการใช้เครื่องชั่งจึงต้องตระหนักและคำนึงถึงผลกระทบและความเสียหายที่จะเกิดขึ้นไม่ว่าจะมากหรือน้อยหากเกิดการรายงานค่าผลการวัดที่ผิดพลาดไป ห้องปฏิบัติการอาจแก้ปัญหาดังกล่าวโดยใช้อุปกรณ์ในการทำลายล้างไฟฟ้าสถิตบนตัววัตถุก่อนนำไปชั่งเพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบที่เกิดขึ้น หรือแม้แต่ในปัจจุบันบริษัทผู้ผลิตเครื่องชั่งชั้นนำของโลกก็เห็นถึงความสำคัญของปัญหานี้ จึงได้ผลิตเครื่องชั่งรุ่นใหม่ที่มีเทคโนโลยีระบบแจ้งเตือนว่าวัตถุที่อยู่บนจานชั่งนั้นมีไฟฟ้าสถิตหรือไม่ และบางรุ่นก็มีโปรแกรมกำจัดไฟฟ้าสถิตในตัวเอง

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของไฟฟ้าสถิตที่มีต่อการชั่งน้ำหนัก โดยเปรียบเทียบผลการวัดระหว่างการชั่งวัตถุที่ไม่มีไฟฟ้าสถิตและที่มีไฟฟ้าสถิต โดยหาค่าความคลาดเคลื่อน (Measurement error) และค่าความทวนซ้ำได้ (Measurement repeatability) ที่แสดงได้จากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation)

2. วิธีการวิจัย (Experimental methods)

2.1 ตัวอย่างทดสอบ

2.1.1 ชิ้นงานทดสอบจำนวน 5 ตัวอย่าง ขนาดประมาณ 2.5 cm x 8 cm (กว้าง x ยาว) คือ แผ่นแก้ว แผ่นพลาสติกชนิด polypropylene แผ่นอลูมิเนียม ถุงมือยางธรรมชาติ และกระดาษกรอง ที่จัดเป็นกลุ่มวัสดุประเภทแก้ว พลาสติก โลหะ ยาง และกระดาษตามลำดับ ซึ่งทั้ง 5 ตัวอย่างนี้จะนำมาใช้ตรวจสอบไฟฟ้าสถิตที่เกิดขึ้นบนผิววัตถุสำหรับการทดสอบในหัวข้อ 2.3.1

2.1.2 ชิ้นงานทดสอบจำนวน 2 ตัวอย่าง คือ ขวดแก้วสำหรับชั่งสาร และขวดพลาสติกชนิด Polypropylene เพื่อใช้ศึกษาผลกระทบของไฟฟ้าสถิตในหัวข้อ 2.3.2

2.2 เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้

2.2.1 เครื่องชั่งไฟฟ้า (Electronic balance) จำนวน 3 เครื่อง โดยมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

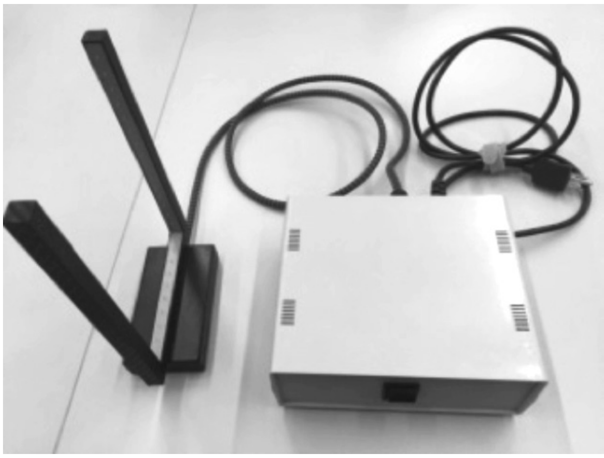
เครื่องที่	รุ่น	ผู้ผลิต	Readability	Capacity
1	MC21S	Sartorius	0.001 mg	21 g
2	ME414S	Sartorius	0.1 mg	410 g
3	LP6200S	Sartorius	10 mg	6,200 g

2.2.2 เครื่องวัดไฟฟ้าสถิตยี่ห้อ SIMCO รุ่น FMX-004 สำหรับวัด Static voltage ที่สามารถวัดค่าได้ทั้งประจุไฟฟ้าบวกและประจุไฟฟ้าลบ ตั้งแต่ค่า -30kV ถึง +30kV ที่ระยะทดสอบ 1 นิ้ว หรือประมาณ 2.5 cm โดยแสดงผลเป็นตัวเลขและมีแถบแสดงผลการวัดที่เป็นประจุบวกหรือลบ และมี Accuracy ±10%

ช่วงการวัดไฟฟ้าสถิต

- Auto Mode 0 kV ถึง ± 1.49 kV (Low range), ± 1.0kV ถึง ± 30.0 kV (High range)
- Low Mode 0 kV ถึง ± 3.00 kV
- Hi Mode 0 kV ถึง ± 30.0 kV
  ช่วงการวัด Ion Balance 0 ถึง ± 300V

2.2.3 อุปกรณ์กำจัดไฟฟ้าสถิตที่สร้างและพัฒนาโดยนักวิจัยของกรมวิทยาศาสตร์บริการ มีตัวสลายประจุไฟฟ้าสถิตหรือ Ionizer ที่จะปล่อยประจุไอออนบวกและลบออกมาเพื่อทำให้วัตถุที่นำมาชั่งมีสภาวะเป็นกลางทางไฟฟ้าก่อนนำไปชั่ง



2.2.4 คีมหรืออุปกรณ์สำหรับจับ

2.2.5 แอลกอฮอล์สำหรับทำความสะอาดชิ้นงานตัวอย่าง

2.3 วิธีการทดสอบ

2.3.1 การตรวจสอบไฟฟ้าสถิตที่เกิดขึ้นบนวัตถุ

งานวิจัยนี้ได้นำวัสดุที่มักใช้บ่อยในห้องปฏิบัติการทางวิทยาศาสตร์มาทดสอบ เพื่อให้ทราบถึงแนวโน้มว่าวัสดุใดจะมีประจุบวกหรือลบมากกว่า โดยตัวอย่างที่นำมาทดสอบนั้นทำจากวัสดุต่างกัน จำนวน 5 ตัวอย่าง คือ แก้ว พลาสติก อลูมิเนียม ถุงมือยางธรรมชาติ และกระดาษ ตัวอย่างทั้งหมดจะถูกนำมาถูกันเป็นคู่ๆ ดังนี้1) แก้วและพลาสติก2) แก้วและถุงมือยางธรรมชาติ3) อลูมิเนียมและพลาสติก 4) อลูมิเนียมและถุงมือยางธรรมชาติ 5) พลาสติกและถุงมือยางธรรมชาติ 6) พลาสติกและกระดาษกรอง 7) ถุงมือยางธรรมชาติและกระดาษกรอง 8) แก้วและกระดาษกรอง และ 9) อลูมิเนียมและกระดาษกรอง จากนั้นวัดค่าศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนผิวชิ้นงานตัวอย่างแต่ละคู่

2.3.2 การทดสอบผลกระทบของไฟฟ้าสถิตที่มีต่อการชั่งน้ำหนัก

การศึกษาผลกระทบของไฟฟ้าสถิตทีมีต่อค่าความถูกต้องของการชั่งน้ำหนัก (Measurement error) ทำโดยการชั่งน้ำหนักชิ้นงานทดสอบซ้ำ 10 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ยของน้ำหนักตัวอย่าง และหาค่าการทวนซ้ำได้ของการวัด (Measurement repeatability) ซึ่งค่าการทวนซ้ำทำได้โดยการคำนวณหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการวัดซ้ำ (Standard deviation, SD)

ตัวอย่างที่นำมาทดสอบคือ ขวดพลาสติกและขวดแก้วที่ไม่มีศักย์ไฟฟ้านั่นคือศักย์ไฟฟ้าเป็น 0 kV และมีค่าศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนวัตถุนั้นอยู่ 2 ช่วงคือ ช่วงศักย์ไฟฟ้าไม่เกิน ± 5kV ($V < \pm 5kV$) และช่วงศักย์ไฟฟ้า ± 5kV ถึง ± 10kV ($\pm 5kV < V \leq \pm 10 kV$) นำมาชั่งบนเครื่องชั่งจำนวน 3 เครื่อง ที่อ่านค่าความละเอียด (Readability) ต่างกันคือ 10 mg 0.1 mg และ 0.001 mg จากนั้นนำเอาตัวอย่างที่มีประจุไฟฟ้ามาผ่านการล้างด้วยอุปกรณ์กำจัดไฟฟ้าสถิต แล้วทำการวัดอีกครั้งเพื่อเปรียบเทียบกับผลการชั่ง

ตัวอย่างที่มีศักย์ไฟฟ้าเป็น 0 kV ที่ทดสอบในครั้งแรก อุปกรณ์กำจัดไฟฟ้าสถิตนี้สร้างและพัฒนาโดยนักวิจัยของกรมวิทยาศาสตร์บริการ ซึ่งคุณสมบัติการทำลายล้างประจุไฟฟ้าของเครื่องนี้สามารถเทียบเท่ากับเครื่องกำจัดไฟฟ้าสถิตที่มีจำหน่ายอยู่ในท้องตลาด [7] อุปกรณ์นี้จะทำให้วัตถุที่เสียสภาวะสมดุลทางประจุกลายเป็นวัตถุที่มีสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้า (Neutralization)

3. **ผลและวิจารณ์** (Results and discussion)

3.1 **ผลการทดสอบ**

3.1.1 การตรวจสอบไฟฟ้าสถิตที่เกิดขึ้นบนวัตถุ

ผลการทดสอบจากการถูชิ้นงานตัวอย่างที่เป็นวัสดุต่างกัน จำนวน 5 ตัวอย่าง คือ แก้ว พลาสติก อลูมิเนียม ถุงมือยางธรรมชาติ และกระดาษ เป็นดังตารางที่ 1 ซึ่งพบว่าวัตถุหนึ่งจะมีศักย์ไฟฟ้าเป็นบวก ในขณะที่อีกวัตถุหนึ่งจะเป็นลบหรือไม่มีศักย์ไฟฟ้าเกิดขึ้น นอกจากนี้ วัสดุประเภทแก้วและพลาสติก เกิดศักย์ไฟฟ้าได้ง่ายเมื่อเทียบกับวัสดุประเภทโลหะและยาง ดังนั้น ทางผู้วิจัยจึงได้เลือกวัสดุประเภทพลาสติกและแก้วมาทดสอบในหัวข้อผลกระทบของไฟฟ้าสถิตที่มีต่อการชั่งน้ำหนัก

ตารางที่ 1 ค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จากการนำวัสดุต่างชนิดกันมาถูกัน

ตัวอย่าง	ศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้		ศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้	
แก้ว : พลาสติก	แก้ว	+ 9.9 kV	พลาสติก	- 15.7 kV
แก้ว : ถุงมือยางธรรมชาติ	แก้ว	+ 9.5 kV	ถุงมือยางธรรมชาติ	- 2.7 kV
แก้ว : อลูมิเนียม	แก้ว	+ 0.5 kV	อลูมิเนียม	0 kV
อลูมิเนียม : พลาสติก	อลูมิเนียม	+ 0.4 kV	พลาสติก	- 7.2 kV
อลูมิเนียม : ถุงมือยางธรรมชาติ	อลูมิเนียม	0 kV	ถุงมือยางธรรมชาติ	- 2.4 kV
พลาสติก : ถุงมือยางธรรมชาติ	พลาสติก	- 10.8 kV	ถุงมือยางธรรมชาติ	+ 2.3 kV
พลาสติก : กระดาษกรอง	พลาสติก	- 11.2 kV	กระดาษ	0 kV
ถุงมือยางธรรมชาติ : กระดาษกรอง	ถุงมือยางธรรมชาติ	- 5.8 kV	กระดาษ	0 kV
แก้ว : กระดาษกรอง	แก้ว	+ 10.2 kV	กระดาษ	0 kV
อลูมิเนียม : กระดาษกรอง	อลูมิเนียม	0 kV	กระดาษ	0 kV

3.1.2 การทดสอบผลกระทบของไฟฟ้าสถิตที่มีต่อการชั่งน้ำหนัก

ผลการชั่งตัวอย่างประเภทพลาสติกและแก้วที่มีและไม่มีศักย์ไฟฟ้า เป็นดังตารางที่ 2 ถึง 4 ดังนี้

ตารางที่ 2 ค่าน้ำหนักของตัวอย่างพลาสติกและแก้วที่อ่านได้จากเครื่องชั่งที่อ่านได้ละเอียด 10 mg

ชั่งครั้งที่	ค่าที่อ่านได้ (g)							
	พลาสติก (0 kV)	พลาสติก (-4.3 kV)	พลาสติก (-9.5 kV)	พลาสติก (ล้างไฟฟ้าสถิต)	แก้ว (0 kV)	แก้ว (+ 4.7 kV)	แก้ว (+9.8 kV)	แก้ว (ล้างไฟฟ้าสถิต)
1	31.56	31.56	31.57	31.57	126.61	126.62	126.62	126.61
2	31.56	31.57	31.57	31.56	126.62	126.61	126.62	126.61
3	31.56	31.57	31.57	31.56	126.61	126.61	126.62	126.61
4	31.56	31.56	31.57	31.56	126.61	126.61	126.62	126.62
5	31.57	31.57	31.56	31.56	126.61	126.61	126.62	126.61
6	31.56	31.56	31.57	31.56	126.61	126.62	126.61	126.61
7	31.56	31.56	31.57	31.56	126.61	126.62	126.62	126.61
8	31.56	31.57	31.57	31.56	126.61	126.62	126.62	126.61
9	31.56	31.57	31.56	31.56	126.61	126.61	126.61	126.61
10	31.56	31.56	31.56	31.56	126.61	126.62	126.61	126.61
Mean	31.56	31.57	31.57	31.56	126.61	126.62	126.62	126.61
Error	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00
SD	0.003	0.005	0.005	0.003	0.003	0.005	0.005	0.003

ตารางที่ 3 ค่าน้ำหนักของตัวอย่างพลาสติกและแก้วที่อ่านได้จากเครื่องชั่งที่อ่านได้ละเอียด 0.1 mg

ชั่งครั้งที่	ค่าที่อ่านได้ (g)							
	พลาสติก (0 kV)	พลาสติก (-4.9 kV)	พลาสติก (-9.7 kV)	พลาสติก (ล้างไฟฟ้าสถิต)	แก้ว (0 kV)	แก้ว (+3.3 kV)	แก้ว (+7.6 kV)	แก้ว (ล้างไฟฟ้าสถิต)
1	31.5657	31.5665	31.6396	31.5656	61.1503	61.1549	61.1607	61.1502
2	31.5657	31.5664	31.6402	31.5656	61.1503	61.1548	61.1598	61.1503
3	31.5657	31.5663	31.6404	31.5657	61.1503	61.1547	61.1595	61.1503
4	31.5657	31.5662	31.6392	31.5657	61.1503	61.1543	61.1589	61.1502
5	31.5657	31.5684	31.6401	31.5657	61.1502	61.1545	61.1587	61.1502
6	31.5656	31.5678	31.6366	31.5656	61.1502	61.1542	61.1582	61.1502
7	31.5658	31.5671	31.6400	31.5658	61.1502	61.1543	61.1584	61.1502
8	31.5658	31.5668	31.6353	31.5658	61.1502	61.1542	61.1579	61.1502
9	31.5657	31.5661	31.6357	31.5657	61.1502	61.1543	61.1577	61.1502
10	31.5658	31.5653	31.6370	31.5658	61.1502	61.1541	61.1579	61.1501
Mean	31.5657	31.5667	31.6384	31.5657	61.1502	61.1544	61.1588	61.1502
Error	0.0000	0.0010	0.0727	0.0000	0.0000	0.0042	0.0086	0.0000
SD	0.00006	0.00089	0.00202	0.00008	0.00005	0.00028	0.00097	0.00006

ตารางที่ 4 ค่าน้ำหนักของตัวอย่างพลาสติกและแก้วที่อ่านได้จากเครื่องชั่งที่อ่านได้ละเอียด 0.001 mg

ชั่งครั้งที่	ค่าที่อ่านได้ (g)				ค่าที่อ่านได้ (g)			
	พลาสติก (0 kV)	พลาสติก (-0.8 kV)	พลาสติก (-2.2 kV)	พลาสติก (ล้างไฟฟ้าสถิต)	แก้ว (0 kV)	แก้ว (+0.6 kV)	แก้ว (+2.5 kV)	แก้ว (ล้างไฟฟ้าสถิต)
1	2.328289	2.331887	N/A	2.328295	12.235941	12.236241	N/A	12.235946
2	2.328290	2.331615		2.328294	12.235942	12.236018		12.235948
3	2.328290	2.331503		2.328294	12.235942	12.235972		12.235949
4	2.328288	2.331363		2.328292	12.235940	12.236188		12.235948
5	2.328288	2.331332		2.328293	12.235943	12.236175		12.235949
6	2.328287	2.330937		2.328292	12.235943	12.236163		12.235950
7	2.328288	2.331027		2.328294	12.235943	12.236151		12.235950
8	2.328288	2.330806		2.328294	12.235943	12.236138		12.235951
9	2.328287	2.330664		2.328292	12.235942	12.236112		12.235950
10	2.328287	2.330486		2.328293	12.235942	12.236075		12.235948
Mean	2.328288	2.331162		2.328293	12.235942	12.236123		12.235949
Error	0.000000	0.002874		0.000005	0.000000	0.000181		0.000007
SD	0.0000011	0.0004493		0.0000011	0.0000010	0.0000815		0.0000014

หมายเหตุ - N/A หมายถึง ค่าที่ปรากฏบนจอเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาอันเนื่องมาจากเครื่องชั่งไม่เข้าสู่สภาวะเสถียรทำให้ผู้ปฏิบัติงานไม่สามารถอ่านค่าการวัดได้

3.2 วิจารณ์ผลการทดสอบ

3.2.1 ผลการตรวจสอบไฟฟ้าสถิตที่เกิดขึ้นบนวัตถุ

ตัวอย่างที่ทำจากวัสดุต่างชนิดกัน เมื่อมีการเสียดสีหรือถูกัน สิ่งที่เกิดขึ้นคือตัวอย่างหนึ่งจะมีค่าศักย์ไฟฟ้าเป็นบวก ในขณะที่อีกตัวอย่างหนึ่งจะมีค่าศักย์ไฟฟ้าเป็นลบ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการเสียดสีกันนั้นจะทำให้เกิดการถ่ายเทประจุไฟฟ้าอย่างรวดเร็วระหว่างผิวสัมผัสของวัตถุทั้งสองชนิด อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จากวัสดุหนึ่งไปยังอีกวัสดุหนึ่ง ทำให้วัตถุนั้นเสียสภาพความเป็นกลางทางไฟฟ้าหรือเกิดความไม่สมดุลกันระหว่างอิเล็กตรอนและนิวตรอนนั่นเอง นั่นคือจำนวนประจุไฟฟ้าบวกและประจุไฟฟ้าลบไม่เท่ากัน ซึ่งสามารถวัดค่าศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้ได้โดยใช้เครื่องวัดไฟฟ้าสถิต จากการทดสอบในหัวข้อ 3.1.1 ตารางที่ 1 แสดงให้เห็นว่าเมื่อนำแก้วมาถูกับถุงมือยาง

ธรรมชาติและเมื่อนำพลาสติกมาถูกับถุงมือยางธรรมชาตินั้น ศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนผิววัสดุยางธรรมชาตินั้นจะเกิดในลักษณะตรงกันข้าม คือถุงมือยางธรรมชาติมีประจุไฟฟ้าเป็นลบเมื่อนำมาถูกับแก้ว แต่จะเป็นบวกเมื่อนำมาถูกับพลาสติก บ่งชี้ว่ายางธรรมชาตินั้นสามารถรับหรือให้อิเล็กตรอนก็ได้ ซึ่งแตกต่างจากกระดาษที่ไม่ให้หรือรับอิเล็กตรอนเลย อลูมิเนียมจัดอยู่ในประเภทโลหะ สูญเสียอิเล็กตรอนทำให้เกิดประจุไฟฟ้าบวก แต่ค่าศักย์ไฟฟ้าไม่สูงมากนัก หากเราพิจารณาจากค่าศักย์ไฟฟ้าแล้วมาเรียงลำดับว่าวัสดุใดมีแนวโน้มที่จะมีบวกและวัสดุจะมีประจุไฟฟ้าลบ จะเรียงตามลำดับได้ ดังนี้

แนวโน้มการเกิดประจุไฟฟ้าบวกและลบ

< -------------- ประจุบวก ประจุลบ------------>

แก้ว	อลูมิเนียม	กระดาษ	ถุงมือยาง	พลาสติก

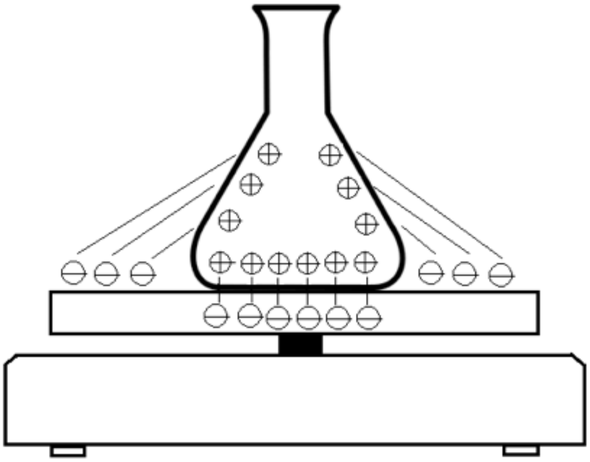
จะเห็นได้ว่าวัสดุประเภทแก้วและพลาสติกมีแนวโน้มที่จะเกิดศักย์ไฟฟ้าได้ง่ายเมื่อเทียบกับวัสดุประเภทอื่น ซึ่งผลการทดสอบนั้นได้สอดคล้องกับทฤษฎี Triboelectric series [2,3,8]

3.2.2 ผลกระทบต่อความผิดพลาดของการวัด (Measurement error) และค่าการทวนซ้ำได้ของการวัด (Measurement repeatability)

ตารางที่ 2 ถึง 4 แสดงผลการชั่งน้ำหนักตัวอย่างที่อยู่ในสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้ากับน้ำหนักของตัวอย่างที่มีประจุไฟฟ้าสถิตที่มีค่าไฟฟ้าสถิตตั้งแต่ 0 kV ถึง ± 10 kV ใน จากเครื่องชั่ง 3 เครื่อง พบว่าขวดพลาสติกและขวดแก้วที่มีประจุไฟฟ้าไม่ว่าจะเป็นบวกหรือลบนั้น จะมีน้ำหนักมากกว่าน้ำหนักของวัตถุที่ไม่มีประจุไฟฟ้าหรือมีค่า 0 kV ไฟฟ้าสถิตอาจไม่มีผลกระทบมากนักเมื่อชั่งด้วยเครื่องชั่งประเภท Precision balance (Readability $\geq$ 1 mg) ซึ่งค่าน้ำหนักเปลี่ยนแปลงน้อยมากแม้ว่าไฟฟ้าสถิตจะประมาณ ± 10 kV แต่จะส่งผลต่อการชั่งเป็นอย่างมากเมื่อเราชั่งด้วยเครื่องชั่งประเภท Analytical balance จนถึงระดับ Micro-balance (Readability ตั้งแต่ 0.1 mg จนถึง 0.001 mg) ซึ่งเป็นเครื่องชั่งที่มีค่าความละเอียดสูงและนิยมใช้ในห้องปฏิบัติการวิเคราะห์ทดสอบ หากชั่งด้วยเครื่องชั่งที่ละเอียดมาก ๆ แม้วัตถุนั้นจะมีประจุไฟฟ้าเกินมาเพียง 2 ถึง 3 kV ก็ทำให้ผู้ปฏิบัติงานไม่สามารถอ่านค่าการวัดได้ เนื่องจากค่าที่ปรากฏบนจอเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาอันเนื่องมาจากเครื่องชั่งไม่ข้าสู่สภาวะเสถียร ดังเช่นเดียวกับที่เกิดขึ้นกับผลการวัดในตารางที่ 4

สาเหตุที่ทำให้น้ำหนักของตัวอย่างที่มีไฟฟ้าสถิตหนักกว่าตัวอย่างที่ไม่มีไฟฟ้าสถิต ก็เนื่องจากแรงดึงดูดระหว่างตัวอย่างและจานชั่ง ทำให้เกิดแรงกดบนเครื่องชั่ง [9-11] ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 1

ด้วยเหตุนี้ หากเราชั่งวัตถุใดก็ตามที่มีไฟฟ้าสถิตที่เกิดขึ้นบนตัววัตถุนั้นแล้ว ค่าน้ำหนักที่ได้จะมากกว่าค่าน้ำหนักจริงของวัตถุนั้น



รูปที่ 1 แรงดึงดูดที่เกิดขึ้นระหว่างวัตถุกับเครื่องชั่ง

ผลการวัดที่ได้ก็จะผิดพลาดคลาดเคลื่อนไป และเมื่อนำข้อมูลจากตารางที่ 2 ถึง 4 มาแสดงผลในรูปกราฟดังรูปที่ 2 ถึง 4 จะเห็นได้ชัดว่าถ้าชั่งวัตถุที่มีประจุไฟฟ้าสูง ๆ ค่าความผิดพลาดของการวัดก็จะยิ่งมากขึ้น และผิดได้มากถึง 72.7 mg (จากกราฟรูปที่ 2 ตัวอย่างพลาสติกที่มีค่าไฟฟ้าสถิต -9.7 kV ชั่งบนเครื่องชั่งที่อ่านได้ละเอียด 0.1 mg)

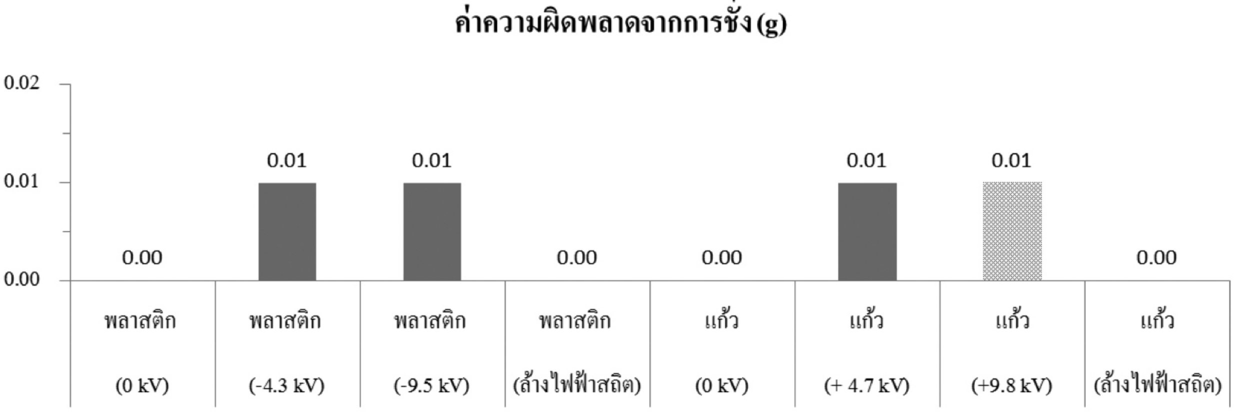
และเมื่อเรานำตัวอย่างพลาสติกและแก้วที่มีค่าศักย์ไฟฟ้านั้นไปผ่านเข้าอุปกรณ์กำจัดไฟฟ้าสถิตต้นแบบจนศักย์ไฟฟ้าเหลือเป็น 0 kV แล้วชั่งน้ำหนักตัวอย่างพลาสติกและแก้ว พบว่าค่าน้ำหนักกลับเข้าใกล้สู่ค่าเดิมก่อนที่วัตถุจะถูกนำไปถูให้เกิดไฟฟ้าสถิตหรือมีความแตกต่างกันน้อยมาก

นอกจากนี้ การวัดค่าความทวนซ้ำได้ของการวัด (Measurement repeatability) ก็เป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึง ค่าความทวนซ้ำได้ของการวัดที่แสดงผลด้วยค่า SD ในตารางที่ 2 ถึง 4 ที่บ่งชัดว่าการชั่งวัตถุที่มีค่าไฟฟ้าสถิตสูง ๆ นั้น ผลการวัดจะเปลี่ยนแปลงไปทุกครั้งที่ชั่ง ทำให้ค่าความทวนซ้ำได้ของผลการวัดหรือความเที่ยงของการวัดไม่ดี

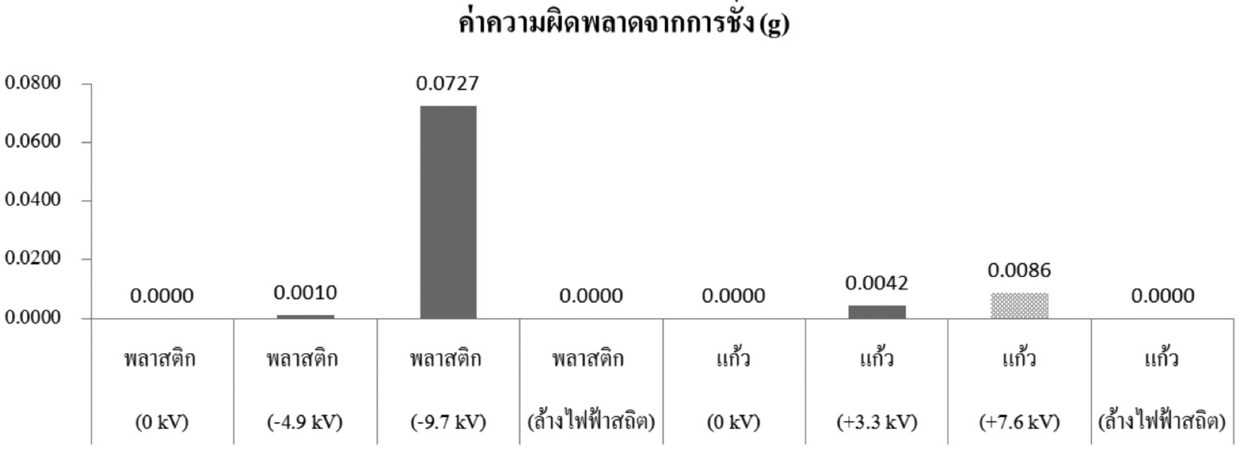
ดังนั้นไฟฟ้าสถิตเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญที่จะส่งผลกระทบต่อค่าความถูกต้องของการชั่งน้ำหนักอย่างมาก โดยเฉพาะวัตถุชิ้นงานที่เป็นประเภทพลาสติก หากหลีกเลี่ยงไม่ได้ ก็จำเป็นต้องกำจัดไฟฟ้าสถิตก่อนที่จะนำไปชั่งหรือทำให้ตัวอย่างมีสภาพสมดุลทางประจุไฟฟ้า (Neutralization) เพื่อให้ได้ค่าผลการวัดที่ถูกต้องน่าเชื่อถือ

4. สรุป (Conclusions)

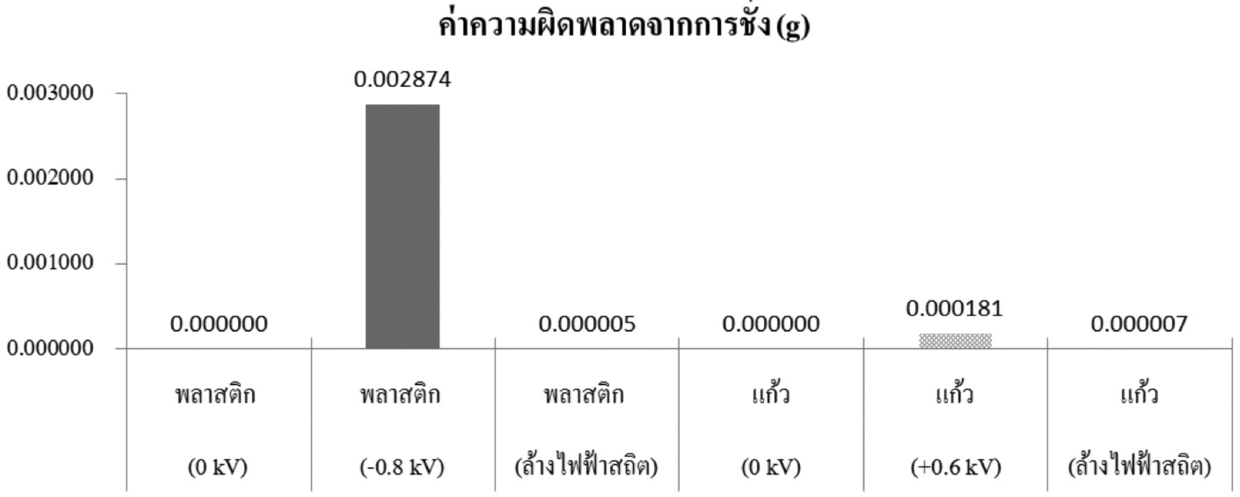
ปัจจัยที่ส่งผลให้การชั่งน้ำหนักผิดพลาดมีอยู่หลายปัจจัยด้วยกัน แต่หนึ่งในหลายปัจจัยนั้นก็คือไฟฟ้าสถิต วัสดุประเภทพลาสติกและแก้วจัดอยู่ในกลุ่มฉนวนไฟฟ้าที่ใช้กันมากในห้องปฏิบัติการ แต่ก็เป็นวัสดุที่เกิดไฟฟ้าสถิตได้ง่ายและมีแนวโน้มการเกิดประจุไฟฟ้าตามทฤษฎี Triboelectric series และหากนำวัตถุที่มีไฟฟ้าสถิตมา



รูปที่ 2 ค่าความผิดพลาดของการวัดจากการชั่งวัตถุที่มีประจุไฟฟ้าเครื่องชั่งที่อ่านได้ละเอียด 10 mg



รูปที่ 3 ค่าความผิดพลาดของการวัดจากการชั่งวัตถุที่มีประจุไฟฟ้าเครื่องชั่งที่อ่านได้ละเอียด 0.1 mg



รูปที่ 4 ค่าความผิดพลาดของการวัดจากการชั่งวัตถุที่มีประจุไฟฟ้าเครื่องชั่งที่อ่านได้ละเอียด 0.001 mg

ชั่งบนเครื่องชั่งประเภท Analytical balance และ Micro balance ก็จะส่งผลต่อการวัด ดังนี้

1. เครื่องชั่งอาจไม่สามารถแสดงค่าการชั่งได้เนื่องจากเครื่องชั่งไม่เสถียร ค่าการวัดเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา

2. ค่าการวัดผิดพลาดไม่ถูกต้อง

3. ค่าความทวนซ้ำได้ของผลการวัดไม่ดี

ดังนั้นการกำจัดไฟฟ้าสถิตหรือการทำให้ตัวอย่างที่นำมาทดสอบนั้นมีสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้าก่อนจะนำไปชั่ง จะช่วยลดความผิดพลาดจากการชั่งน้ำหนัก ทำให้ได้ค่าผลการวัดที่ถูกต้องน่าเชื่อถือและเป็นที่ยอมรับ

5. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณคณะผู้บริหารของกรมวิทยาศาสตร์บริการทุกท่านเป็นอย่างสูง ที่ได้ให้การสนับสนุนการดำเนินงานวิจัยนี้ และช่วยผลักดันให้โครงการสำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ นอกจากนี้ ยังให้คำปรึกษา คำแนะนำ รวมถึงข้อคิดเห็นอันเป็นประโยชน์ต่อการวิจัยและพัฒนางานด้านการวัดและการสอบเทียบให้มีประสิทธิภาพสูงยิ่งขึ้น

6. เอกสารอ้างอิง (References)

[1] *Weighing the right way, proper weighing with laboratory*. Greifensee, Switzerland : Mettler-Toledo AG Laboratory & Weighing Technologies, 2008. 36 p.

[2] CROSS, J. A. *Electrostatics : principles, problems and applications*. Bristol, UK : IOP Publishing, 1987. 500 p.

[3] TEXTILE CENTRE OF EXCELLENCE. *Antistatic* [online]. 2017. [viewed 26 April 2019]. Available from: http://www.tikp.co.uk/knowledge/material-functionality/antistatic/.

[4] SHIMADZU EXCELLENCE IN SCIENCE. *Static electricity remover for electronic balances* [online]. 2013. [viewed 26 April 2019]. Available from: https://www.teopal.fi/wp-content/uploads/2015/10/Stablo-Ex_ionisaattori_Shimadzu.pdf.

[5] METTLER-TOLEDO. *Electrostatic charges and their effects on weighing* [online]. [viewed 26 April 2019]. Available from: https://www.mt.com/nz/en/home/library/collections/laboratory-weighing/electrostatic-and-weighing.html?smartRedirectEvent=true.

[6] GUMKOWSKI, G. and A. STEINMAN. NRD – Advanced Static Control, *Mitigating electrostatic effects on measurement accuracy* [online]. July 2014. [viewed 26 April 2019]. Available from: https://us.vwr.com/assetsvc/asset/en_US/id/22560272/contents.

[7] อัจฉราวรรณ วัฒนหัตถกรรม และว่าที่ ร.ต. ศักดิ์สิทธิ์ ดีอ่ำ. *การพัฒนาอุปกรณ์กำจัดไฟฟ้าสถิตเพื่อลดความผิดพลาดเครื่องชั่ง*. เอกสารผลงานที่เสนอขอประเมินเพื่อแต่งตั้งให้ดำรงตำแหน่งนักวิทยาศาสตร์ระดับชำนาญการพิเศษ, กรุงเทพฯ : กรมวิทยาศาสตร์บริการ. 2560.

[8] พูลพงษ์ บุญพราหมณ์. *ไฟฟ้าสถิตในงานอุตสาหกรรม*. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น). 2530. 168 หน้า.

[9] SARTORIUS. *Sartorius Micro : Analytical, Semi-micro- and Microbalances Installation and Operating Instruction*s. Goettingen, Germany : Sartorius.

[10] NATER, R., et al. *Dictionary of weighing terms : a guide to the terminology of weighing*. Dordrecht, Switzerland : Springer, 2009. 269 p.

[11] METTLER-TOLEDO. *Electrostatic charges in weighing, innovative detection solution* [online]. [viewed 28 August 2019]. Available from: https://www.mt.com/dam/P5/labtec/02_Analytical_Balances/10_Excellence_Line/WP_Antistatic_EN.pdf

การตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีหาปริมาณปรอท ในกรดไฮโดรคลอริก

Method validation for determination of mercury in hydrochloric acid

9

จิรสา กรงกรด[1*] อนุชา สินธุสาร[1] โศรดา ขุนโหร[1] อภิช์ญา สุขมาก[1]
Jirasa Krongkrod[1*], Anucha Sinthusarn[1], Sorada Khunhon[1], Aphiya Sukmak[1]

บทคัดย่อ

การตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีทดสอบปริมาณปรอทในกรดไฮโดรคลอริกตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ อุตสาหกรรม มอก. 217-2556 นั้นเป็นวิธีทดสอบกรดไฮโดรคลอริกสำหรับอุตสาหกรรมโดยเทคนิค Flow Injection Mercury Systems (FIMS) พบว่าช่วงความเป็นเส้นตรงเท่ากับ 0.5-10 ไมโครกรัมต่อลิตร ขีดจำกัดการตรวจหาเท่ากับ 0.2 ไมโครกรัมต่อลิตร และขีดจำกัดการวัดปริมาณเท่ากับ 0.5 ไมโครกรัมต่อลิตร ค่าความโอนเอียงและความเที่ยงระหว่างกลางมีร้อยละการคืนกลับและร้อยละของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์อยู่ในช่วง 85-110 และ 1.0-3.0 ตามลำดับ โดยมีค่าความไม่แน่นอนที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ไม่เกินร้อยละ 20

Abstract

Method validation for determination of mercury in hydrochloric acid in the present work is based on Thai Industrial Standard, TISI 217-2556, which is the test for Hydrochloric acid for industrial used, by Flow Injection Mercury Systems (FIMS). Results showed that the linear range was 0.5-10 µg/L. The limit of detection was 0.2 µg/L, and the limit of quantitation was 0.5 µg/L. Bias and intermediate precision showed that the percent recovery and relative standard deviation were 85-110 % and 1.0-3.0 %, respectively. Measurement uncertainty at 95% confidence limit was less than 20%.

คำสำคัญ : กรดไฮโดรคลอริก ปรอท
Keywords : Hydrochloric acid, Mercury

[1] กรมวิทยาศาสตร์บริการ กองเคมีภัณฑ์และผลิตภัณฑ์อุปโภค
*Corresponding author e-mail address: jirasa@dss.go.th

1. บทนำ (Introduction)

zกรดไฮโดรคลอริกหรือกรดเกลือ เป็นสารประเภทกรดที่ได้จากการละลายของแก๊สไฮโดรเจนคลอไรด์ในน้ำ ถูกค้นพบโดยนักเล่นแร่แปลธาตุคือ จารเบียร์ เฮย์ยัน กรดไฮโดรคลอริกเป็นของเหลวใสไม่มีสีหรือมีสีเหลือง อ่อน มีความเข้มข้นร้อยละ 32 โดยประมาณ มีกลิ่นฉุน สูตรโมเลกุล คือ HCl น้ำหนักโมเลกุล 36.46 ความถ่วงจำเพาะ 1.16 กรดไฮโดรคลอริกที่มีความเข้มข้นมากกว่าร้อยละ 37 จะเรียกว่า fuming hydrochloric acid ซึ่งมีความถ่วงจำเพาะ 1.18 จุดเดือดที่อุณหภูมิ 108.58 °ซ และจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิ -35 °ซ การผลิตกรดไฮโดรคลอริกเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างไฮโดรเจนกับคลอรีนดังสมการ

$$Cl_2 + H_2 \longrightarrow 2HCl$$

กรดไฮโดรคลอริกถูกใช้อย่างกว้างขวางในการผลิตสารประกอบอินทรีย์ เช่น ไวนิลคลอไรด์ สำหรับผลิต พลาสติกพีวีซี และ MDI/TDI (Methylene diphenyl diisocyanate/ toluene diisocyanate) สำหรับผลิตพอลิยูรีเทน (Polyurethane) ใช้ถลุงแร่เพื่อผลิตดีบุก และแทนทาลัม ใช้ในการปรับความเป็นกรด-ด่าง โดย เฉพาะสารที่เป็นด่างให้มีความเป็นกรด ใช้ไฮโดรไลซ์แป้ง และโปรตีน เพื่อผลิตอาหารรูปแบบต่าง ๆ ใช้กัดผิวและทำความสะอาดผิวโลหะ ใช้ในอุตสาหกรรมการ ชุบเคลือบโลหะ ใช้ในกระบวนการกำจัดของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม ใช้ในอุตสาหกรรมการฟอกหนัง [5]

สำหรับ มอก. 217-2556 : กรดไฮโดรคลอริกสำหรับอุตสาหกรรม กำหนดให้มีปริมาณปรอทในกรดไฮโดรคลอริกได้ไม่เกิน 0.05 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และทดสอบโดยใช้เครื่องผลิตไอระเหยระบบหมุนเวียนแบบปิด ใช้ประกอบกับอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโทรมิเตอร์[1] ซึ่งมีความยุ่งยากซับซ้อน มีขั้นตอนในการเตรียมเครื่องมือที่ใช้เวลานาน การทดสอบปริมาณปรอทในกรดไฮโดรคลอริกโดยเทคนิค Flow Injection Mercury Systems (FIMS) [4] จะช่วยลดความยุ่งยากดังกล่าว รวมถึงสามารถทดสอบได้รวดเร็วและมีความถูกต้องสูง ตอบสนองต่อความต้องการผลทดสอบที่รวดเร็วของภาคอุตสาหกรรม สำหรับการทดสอบปริมาณปรอทโดยเทคนิค Flow Injection Mercury Systems (FIMS) มีการศึกษาในเรื่องการประเมินความเสี่ยงโลหะหนักในปลาและกุ้งจากทะเลสาบสงขลาต่อคนไทย [6] แต่ไม่ยังไม่พบในตัวอย่างกรดไฮโดรคลอริก สำหรับตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีทดสอบปริมาณปรอทในกรดไฮโดรคลอริกตามเอกสารนี้มีค่าความไม่แน่นอนของการวัดไม่เกินร้อยละ $\pm$20 ร้อยละ ค่าการกลับคืนอยู่ในช่วง 70-130 และขอบข่ายของการรับรอง 0.01–0.1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

2. วิธีการวิจัย (Experimental methods)

2.1 ตัวอย่างกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 35-37% ที่ผ่านการทดสอบแล้วว่าไม่พบปริมาณปรอท โดยเก็บในขวดแก้วที่มีฝาปิดสนิท

2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

2.2.1 เครื่อง Flow Injection Mercury Systems (FIMS) 400, PerkinElmer, USA

2.2.2 เครื่องชั่งความละเอียดอ่านได้เท่ากับ 0.0001 กรัม, METTLER TOLEDO รุ่น XS205DR, Switzerland

2.2.3 เครื่องทำน้ำปราศจากไอออน MILIPORE, รุ่น Mili-Q Reference A+ System, FRANCE

2.2.4 ขวดปริมาตร (Volumetric flask) ขนาด 100 มิลลิลิตร ชั้นคุณภาพ A

2.2.5 ปิเปตวัดปริมาตร (Volumetric pipette) ชั้นคุณภาพ A ขนาด 1, 2, 5 และ 10 มิลลิลิตร

2.3 สารเคมี

2.3.1 สารละลายมาตรฐานปรอทอ้างอิง (Hg, Reference material (RM)), Perkin Elmer, ความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.3.2 สารละลายมาตรฐานปรอท (Hg, Working standard), AccuStandard, ความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.3.3 กรดไนทริกเข้มข้น (HNO_3) ชั้นคุณภาพวิเคราะห์, Merck

2.3.4 กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น (HCl) ชั้นคุณภาพวิเคราะห์, Merck

2.3.5 ทิน (II) คลอไรด์ ($SnCl_2.2H_2O$) ชั้นคุณภาพวิเคราะห์ ชนิด low mercury, Merck

2.3.6 น้ำปราศจากไอออน (Deionized water)

2.3.7 แก๊สอาร์กอน ความบริสุทธิ์ ร้อยละ ไม่น้อยกว่า 99.99

2.4 วิธีดำเนินงาน

2.4.1 ช่วงความเป็นเส้นตรง สร้างกราฟมาตรฐาน (Calibration curve) ของปรอทที่ระดับความเข้มข้น 0–20 ไมโครกรัมต่อลิตร โดยเตรียมจากสารละลายมาตรฐานความเข้มข้น 1,000 มิลิกรัมต่อลิตร ในกรดไนตริกความเข้มข้นร้อยละ 1 วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 253.7 นาโนเมตร นำข้อมูลของกราฟมาตรฐานที่ได้มาพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (Coefficient of determination, R^2) โดยเกณฑ์การยอมรับต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 0.990

2.4.2 การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบตัวอย่าง

2.4.2.1 ชั่งตัวอย่างกรดไฮโดรคลอริกประมาณ 5 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ที่มีน้ำปราศจากไอออน ประมาณ 50 มิลลิลิตร เติมกรดไนทริก 1: 1 จำนวน 2 มิลลิลิตร

2.4.2.2 ถ่ายสารละลายใส่ขวดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน นำไปวัดค่าการดูด

กลืนแสง ด้วยเครื่อง Flow Injection Mercury Systems

2.4.2.3 ปรับตั้งสภาวะของเครื่อง Flow Injection Mercury Systems

Integration Time (s)	20
Data Processing	Peak Height, Smoothing: 0.5 sec or 19 point
Wavelength (nm)	253.7
Carrier Solution	3% (v/v) HCl
Reducing Agent	1.1 % $SnCl_2$ in 3% (v/v) HCl
Sample loop	500 µL
The flow of carry gas	70-100 mL/min
Pump1 speed	100U/min, 10 sec
Pump2 speed	120U/min, 10 sec

2.4.3 ขีดจำกัดการตรวจหา (LOD) และการหาค่าขีดจำกัดการวัดปริมาณ (LOQ)

นำตัวอย่างจากข้อ 2.1 มาเตรียมตามข้อ 2.4.2 จำนวน 10 ขวด นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสง เทียบกับสารละลายมาตรฐานด้วยเครื่อง Flow Injection Mercury Systems บันทึกค่าความเข้มข้นที่อ่านได้แต่ละขวด หาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S0) คำนวณค่า LOD (3S'0) และ LOQ (10S'0) [2]

2.4.4 ค่าความโอนเอียง (Bias)

นำตัวอย่างจากข้อ 2.1 มาเตรียมตามข้อ 2.4.2.1 เติมสารละลายมาตรฐานปรอทให้มีความเข้มข้น 3 ระดับ (0.5, 5.0 และ 10.0 ไมโครกรัมต่อลิตร ตามลำดับ) ความเข้มข้นละ 10 ขวด ถ่ายสารละลายใส่ขวดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงเทียบกับสารละลายมาตรฐานด้วยเครื่อง Flow Injection Mercury Systems โดยแต่ละความเข้มข้นต้องวัดภายในช่วงเวลาเดียวกัน คำนวณค่าร้อยละการคืนกลับของแต่ละความเข้มข้น โดยเทียบกับสารละลายมาตรฐานปรอทที่เติมลงไป

2.4.5 การหาค่าความเที่ยงระหว่างกลาง (Intermediate precision)

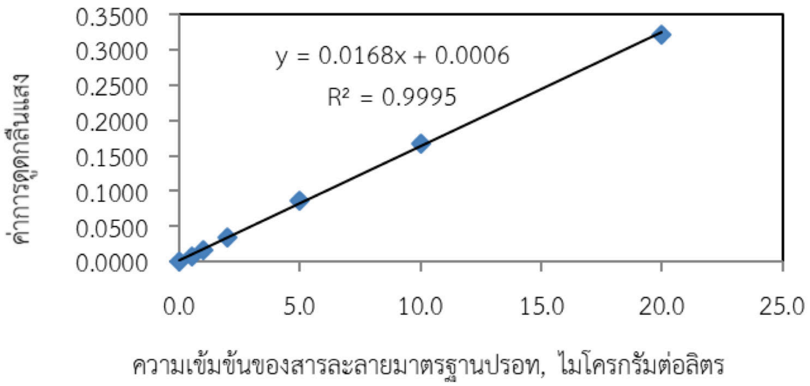
นำตัวอย่างจากข้อ 2.1 มาเตรียมตามข้อ 2.4.2.1 เติมสารละลายมาตรฐานปรอทให้มีความเข้มข้น 3 ระดับ (0.5, 5.0 และ 10.0 ไมโครกรัมต่อลิตร ตามลำดับ) ความเข้มข้นละ 1 ขวด ถ่ายสารละลายใส่ขวดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเทียบกับสารละลายมาตรฐานด้วยเครื่อง Flow Injection Mercury Systems ทำซ้ำตามข้อ 2.4.5 ทั้งหมด 10 วัน นำค่าความเข้มข้นที่ได้ทั้ง 10 วัน มาหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (Relative standard deviation, RSD) เพื่อดูว่าวิธีทดสอบทั้งกระบวนการ จำนวน 10 วัน มีความคงที่หรือไม่ โดยดูจากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์เกินค่ามาตรฐานหรือไม่

3. ผลและวิจารณ์ (Result and discussion)

3.1 ช่วงความเป็นเส้นตรงของกราฟมาตรฐานการสอบเทียบ ความชัน และค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (R2) ของปรอท

ตารางที่ 1 ช่วงความเป็นเส้นตรงของกราฟมาตรฐานการสอบเทียบของปรอท

สารละลายมาตรฐาน (ไมโครกรัมต่อลิตร)	0.0	0.5	1.0	2.0	5.0	10.0	20.0
ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 253.7 นาโนเมตร	0.0000	0.0081	0.0167	0.0330	0.0817	0.1613	0.3219



รูปที่ 1 กราฟมาตรฐานการสอบเทียบ ความชัน และค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (R^2) ของสารละลายมาตรฐานปรอท

ช่วงความเป็นเส้นตรงของปรอท อยู่ที่ 0.5 - 20.0 ไมโครกรัมต่อลิตร ค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ, R^2 เท่ากับ 0.9995 ค่าความชันเท่ากับ 0.0168

3.2 ขีดจำกัดการตรวจหา (LOD) และขีดจำกัดการวัดปริมาณ (LOQ)

ตารางที่ 2 ค่า LOD และ LOQ ในการวิเคราะห์ปริมาณปรอท

ค่าความเข้มข้นปรอทเฉลี่ยของตัวอย่าง 10 ขวด	0.0919 ไมโครกรัมต่อลิตร
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation, S_0)	0.0386 ไมโครกรัมต่อลิตร
S'_0	0.0446 ไมโครกรัมต่อลิตร
LOD = 3 (S'_0)	0.1338 ไมโครกรัมต่อลิตร
LOQ = 10 (S'_0)	0.4458 ไมโครกรัมต่อลิตร

เมื่อ

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

n = จำนวนซ้ำของตัวอย่างที่ห้องปฏิบัติการใช้สำหรับออกรายงาน สำหรับการทดสอบนี้ กำหนดให้เท่ากับ 3

nb = จำนวนซ้ำของแบลงค์ที่ห้องปฏิบัติการใช้ในการทดสอบ สำหรับการทดสอบนี้ กำหนดให้เท่ากับ 1

สรุปขีดจำกัดการตรวจหา (LOD) และขีดจำกัดการวัดปริมาณ (LOQ) ของปรอทคือ

LOD = 0.134 ไมโครกรัมต่อลิตร

LOQ = 0.446 ไมโครกรัมต่อลิตร

3.3 ค่าความโอนเอียง (Bias)

นำผลการทดสอบของสารละลายตัวอย่างจากข้อ 2.4.4 มาคำนวณค่าร้อยละการคืนกลับ (percentage recovery) เพื่อประมาณค่าความโอนเอียงแสดงดังตารางที่ 3

$$\text{ร้อยละการคืนกลับ} = \frac{\text{ความเข้มข้นที่อ่านได้}\ x100}{\text{ความเข้มข้นที่เติม}}$$

ตารางที่ 3 ร้อยละการคืนกลับของปรอทที่ความเข้มข้น 3 ระดับ

	ตัวอย่าง + สารละลายมาตรฐานปรอท 0.5 ไมโครกรัมต่อลิตร	ตัวอย่าง + สารละลายมาตรฐานปรอท 5.0 ไมโครกรัมต่อลิตร	ตัวอย่าง + สารละลายมาตรฐานปรอท 10.0 ไมโครกรัมต่อลิตร
ค่าร้อยละการคืนกลับ	95.8	90.9	95.4
เกณฑ์กำหนด	ร้อยละ 70-130		

3.4 ค่าความเที่ยงระหว่างกลาง (Intermediate precision)

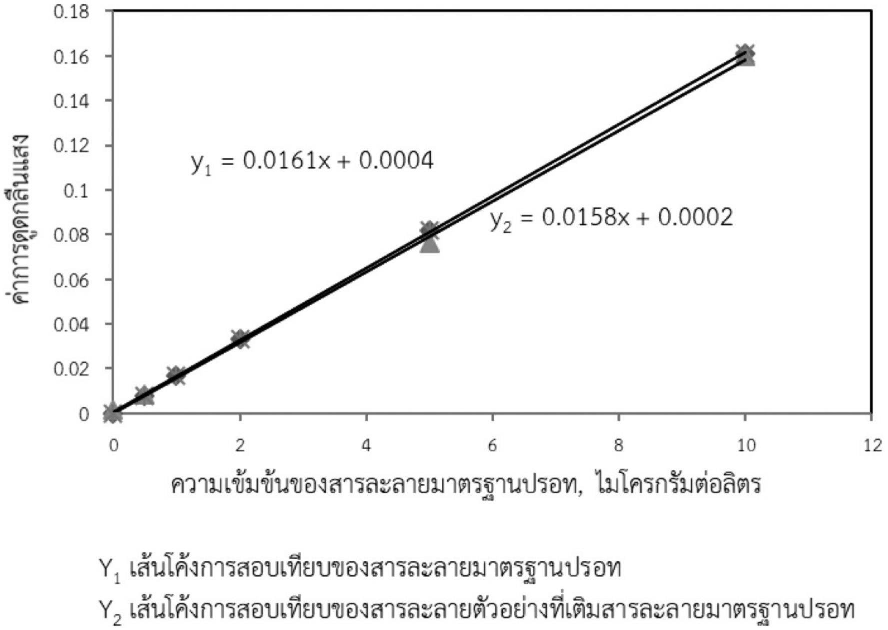
ตารางที่ 4 สรุปค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (Relative standard deviation, RSD) ของปรอท (คำนวณจากผลการทดสอบ 10 ซ้ำ)

	ตัวอย่าง + สารละลายมาตรฐานปรอท 0.5 ไมโครกรัมต่อลิตร	ตัวอย่าง + สารละลายมาตรฐานปรอท 5.0 ไมโครกรัมต่อลิตร	ตัวอย่าง + สารละลายมาตรฐานปรอท 10.0 ไมโครกรัมต่อลิตร
% RSD	7.93	6.08	2.89
เกณฑ์กำหนด	ร้อยละ ± 10		

3.5 ผลกระทบจากเนื้อสาร (Matrix effect)

เปรียบเทียบความชันของกราฟมาตรฐานการสอบเทียบของสารละลายมาตรฐานปรอทกับความชันของของกราฟมาตรฐานการสอบเทียบของสารละลายตัวอย่างที่เติมสารละลายมาตรฐานปรอท

ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน (ไมโครกรัมต่อลิตร)	0.0	0.5	1.0	2.0	5.0	10.0
ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานปรอท	0.0000	0.0081	0.0167	0.0330	0.0817	0.1613
ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายตัวอย่างกรดไฮโดรคลอริกที่เติมสารละลายมาตรฐานปรอท	0.0015	0.0083	-	-	0.0762	0.1597



รูปที่ 2 เปรียบเทียบความชันของกราฟมาตรฐานการสอบเทียบของสารละลายมาตรฐานปรอทกับความชันของสารละลายตัวอย่างที่เติมสารละลายมาตรฐานปรอท

คำนวณร้อยละความแตกต่างของความชันตามสมการ

$$\text{ร้อยละความแตกต่าง} = \left(\frac{\text{ความชันของกราฟมาตรฐาน} - \text{ความชันของ } spiked\ sample}{\text{ความชันของกราฟมาตรฐาน}}\right) \times 100$$

$$= \frac{(0.0161 - 0.0158)}{0.0161} \times 100$$

$$= 1.86$$

สรุปผลการเปรียบเทียบความแตกต่างของความชันต่างกันไม่เกินร้อยละ 10 แสดงว่าวิธีทดสอบนี้ไม่มีผลกระทบจากเนื้อสาร

3.6 การประมาณค่าความไม่แน่นอน (Estimate uncertainty)

การศึกษานี้ใช้วิธีประมาณค่าความไม่แน่นอนของการวัดโดยใช้ Method validation approach ตามเอกสาร VAM Project 3.2.1 Development and Harmonisation of Measurement Uncertainty Principles, Part (d) : Protocol for uncertainty evaluation from validation โดย Barwick และ Ellison [3] ใช้ค่าความไม่แน่นอนจากการทดสอบความโอนเอียง u (R) และค่าความไม่แน่นอนจากการทดสอบความเที่ยง u (P) เพื่อประเมินค่าความไม่แน่นอนของการวัดดังนี้

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

ค่าความไม่แน่นอนขยาย

$$U = k \times u_c$$

ตารางที่ 5 สรุปค่าความไม่แน่นอนที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

รายการ		ปรอท
แหล่งของค่าความไม่แน่นอน	ความโอนเอียง $u(R)$	0.056
	ความเที่ยง $u(P)$	0.079
ความเข้มข้น (มก./กก.) (C)		0.005
ความไม่แน่นอนรวม u_c		0.00048
ความไม่แน่นอนขยายที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (k = 2)		0.00096
ความไม่แน่นอนขยายคิดเป็นร้อยละ		19.2

4. **สรุป** (Conclusion)

การตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีทดสอบปริมาณปรอทในกรดไฮโดรคลอริกโดยเทคนิค Flow Injection Mercury Systems (FIMS) โดยตรวจสอบคุณลักษณะเฉพาะที่แสดงสมบัติของวิธีทดสอบ ได้แก่ ช่วงความเป็นเส้นตรง ขีดจำกัดการตรวจหา ขีดจำกัดการวัดปริมาณ ค่าความโอนเอียง ค่าความเที่ยงระหว่างกลาง ผลกระทบจากเนื้อสาร พบว่าเป็นไปตามเกณฑ์กำหนด โดยมีค่าความไม่แน่นอนที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ไม่เกินร้อยละ 20 ห้องปฏิบัติการสามารถนำวิธีทดสอบดังกล่าวมาใช้ทดสอบปริมาณปรอทในกรดไฮโดรคลอริกได้

5. **เอกสารอ้างอิง** (References)

[1] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. *มอก. 217-2556. กรดไฮโดรคลอริกสำหรับอุตสาหกรรม*. กรุงเทพฯ : สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2557.

[2] EURACHEM. *Eurachem Guide: The Fitness for Purpose of Analytical Method* [online]. 2 nd ed., 2014. [viewed 17 February 2019]. Available from: www.eurachem.org

[3] BARWICK, V. J. and S. L. R., ELLISON. *VAM Project 3.2.1: Development and Harmonization of Measurement Uncertainty Principles, LGC/VAM/1998/088 January 2000* [online]. [viewed 1 March 2001]. Available from: http://blpd.dss.go.th/training/dwdocuments/enews/VAM_uncertainty-0452.pdf.

[4] THE PERKIN ELMER. *Flow Injection Mercury, Setting Up and Performing Analyses* [online]. 2003. [viewed 11 March 2018]. Available from: http://www.cromatec.ro/pdf/12-BRO_FIMS.pdf

[5] จิรสา กรงกรด และโศรดา ขุนโหร. *กรดไฮโดรคลอริก*. สาระน่ารู้กรมวิทยาศาสตร์บริการ [ออนไลน์]. กรกฎาคม 2549. [อ้างถึงวันที่ 8 กรกฎาคม 2562]. เข้าถึงจาก: http://www.dss.go.th/images/st-article/cp_8_2549_hydrochloric.pdf

[6] สุดชฎา ศรประสิทธิ์, กิ่งแก้ว กาญจนรัตน์ และอรัญญา อัศวอารีย์. *การประเมินความเสี่ยงโลหะหนักในปลาและกุ้งจากทะเลสาบสงขลาต่อคนไทย. วารสารกรมวิทยาศาสตร์การแพทย์*. **59**(2) เมษายน - มิถุนายน 2560, หน้า 115-127.

การสร้างแนวปฏิบัติการจัดการสารเคมีในห้องปฏิบัติการอย่างปลอดภัย สำหรับอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์ในประเทศไทย

Developing guidelines for informing safe laboratory management practices for the chemical industry in Thailand

10

ณัฏฐกานต์ เกตุคุ้ม[1*], ปัทมา นพรัตน์[1], จันทรัตน์ วรสรรพวิทย์[2], สัตติญา ดีดวงพันธ์[1]

Natthakarn Ketkoom[1*], Pattama Nopparat[1], Chantarat Vorasapavit[2], Sattiya Deedoungpan[1]

บทคัดย่อ

อันตรายจากสารเคมี รวมทั้งผลกระทบของสารเคมียังคงเป็นประเด็นปัญหาและส่งผลกระทบต่อสังคมและสิ่งแวดล้อมในปัจจุบัน ประกอบไปด้วยการเจริญเติบโตของภาคอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับผลิตภัณฑ์เคมี มีอัตราที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง กิจกรรมอันเกิดจากอุตสาหกรรมในกลุ่มผลิตภัณฑ์เคมี จึงมีความเป็นไปได้อย่างสูงในการใช้สารเคมีอันตรายเป็นจำนวนมาก และมีแนวโน้มอัตราเสี่ยงการเกิดอันตรายจากการใช้สารเคมีอันตรายในกลุ่มนี้ สูงขึ้นอย่างเป็นเท่าตัว รวมทั้งปัญหาจากการจัดการสารเคมีที่ไม่ถูกต้องและเหมาะสมเพียงพอ ยังส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเพิ่มมากขึ้นอีกด้วย โครงการวิจัยเรื่อง การสร้างแนวปฏิบัติในการจัดการสารเคมีอย่างปลอดภัยสำหรับอุตสาหกรรมเคมี มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนารูปแบบกลไกการจัดการสารเคมี และป้องกันอันตรายจากสารเคมีในกลุ่มอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์เคมี และสถานประกอบการเคมีภัณฑ์ในประเทศไทย โดยใช้รูปแบบการวิจัยแบบเชิงสำรวจ และการใช้เครื่องมือการพัฒนาบุคลากรด้านการจัดการสารเคมี โดยการให้การฝึกอบรมที่ครอบคลุมกระบวนการจัดการสารเคมีในห้องปฏิบัติการที่เกี่ยวข้องกับสารเคมีและจัดทำแนวปฏิบัติที่ดีสำหรับการจัดการสารเคมีในห้องปฏิบัติการอย่างปลอดภัยสำหรับหน่วยงานเฉพาะของกลุ่มอุตสาหกรรมเคมี ผลของโครงการวิจัย พบว่า ปัจจัยหลักที่มีผลต่อการสร้างแนวปฏิบัติในการจัดการสารเคมีอย่างปลอดภัยสำหรับห้องปฏิบัติการของอุตสาหกรรมเคมี ประกอบไปด้วย 3 ปัจจัยหลัก คือ 1. ระบบบริหารจัดการความปลอดภัยในองค์กร 2. มาตรการความปลอดภัยด้านสารเคมี 3. การบริหารจัดการความปลอดภัยในห้องปฏิบัติการ สำหรับข้อมูลเชิงลึกของผลการวิจัยยังพบว่า การบริหารจัดการด้านสารเคมี และความปลอดภัยในห้องปฏิบัติการ ขึ้นอยู่กับนโยบายและวิสัยทัศน์ของผู้บริหาร ซึ่งแนวโน้มของการบริหารจัดการด้านความปลอดภัยของห้องปฏิบัติการเคมีในโรงงานอุตสาหกรรมเคมี จะเป็นไปในทางที่ดีขึ้นได้ ถ้าผู้บริหารในองค์กรให้การสนับสนุนในเรื่องเหล่านี้เป็นสำคัญ

Abstract

The impact of chemicals, chemical substances and hazardous substances, is still a problem and affects the current society. It consists of the growth of industries related to chemical products. Additionally, the rate has continued to rise. Chemical Industrial activities are highly possible to use a large number of hazardous chemicals. Also, there are likely to be risks from the use of hazardous chemicals. In additional, the chemical management is not correct and appropriate enough resulted to its effects the environment. The purpose of this research is to study the current chemical management and develop guidelines for Informing the chemicals management and safety in the chemical industry. The survey method was used with a designed questionnaire and the personnel development tool in chemical management was also employed. By providing training courses that cover chemical process management in chemistry laboratory. Results found that 3 main factors affecting the informing of safe chemical management practices for the chemical industry are consisting of 1. safety management system in the organization. 2. chemical safety measures. 3. safety management in the laboratory. For in-depth interview results found that chemical management and safety in the laboratory depend on the policy and vision of the management by executives in the organization support these matters.

คำสำคัญ : สารเคมี การจัดการสารเคมี ความปลอดภัย ห้องปฏิบัติการ อุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์

Keywords : Chemical, Chemical management, Safety, Laboratory, Chemical industry

[1] กรมวิทยาศาสตร์บริการ สำนักพัฒนาศักยภาพนักวิทยาศาสตร์ห้องปฏิบัติการ

[2] กรมวิทยาศาสตร์บริการ สำนักบริหารและรับรองห้องปฏิบัติการ

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

1. บทนำ (Introduction)

ปัจจุบันเรื่องเกี่ยวกับสารเคมีและอันตรายของสารเคมี รวมทั้งผลกระทบของสารเคมีเป็นประเด็นในการอภิปรายในเชิงวิชาการอย่างกว้างขวาง และสังคมเริ่มมีความตระหนักและเห็นพ้องต้องกันว่าปัญหาเหล่านี้เป็นปัญหาที่ต้องได้รับการแก้ไข ประกอบไปด้วยการเจริญเติบโตของภาคอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับผลิตภัณฑ์เคมี มีอัตราที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง จากข้อมูลการค้าระหว่างประเทศของไทยมีการเติบโตที่ต่อเนื่องจนถึงปัจจุบันอัตราการเติบโตของการส่งออกเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ15 ต่อปีโดยส่งออกมากที่สุด คือ บรรจุภัณฑ์พลาสติก และมีอัตราการเติบโตของการนำเข้าเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ10 ต่อปี [1] โดยนำเข้าผลิตภัณฑ์พลาสติกอื่นๆ เป็นส่วนมาก แสดงให้เห็นว่าแนวโน้มอุตสาหกรรมพลาสติกในอนาคตของไทยยังมีโอกาสเจริญเติบโตได้ดีจากการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกเพื่อส่งออกและเพื่อใช้ภายในประเทศทดแทนการนำเข้า [1] จะเห็นได้ว่า กิจกรรมอันเกิดจากอุตสาหกรรมในกลุ่มผลิตภัณฑ์เคมี มีความเป็นไปได้อย่างสูงในการใช้สารเคมีอันตรายเป็นจำนวนมาก และมีแนวโน้มอัตราเสี่ยงการเกิดอันตรายจากการใช้สารเคมีอันตรายในกลุ่มนี้ สูงขึ้นอย่างเป็นเท่าตัว รวมทั้งปัญหาจากการจัดการสารเคมีที่ไม่ถูกต้องและเหมาะสมเพียงพอ ยังส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเพิ่มมากขึ้นอีกด้วย [2]

ปัญหาด้านการบริหารจัดการ การใช้สารเคมีและผลกระทบที่เกี่ยวข้องกับสิ่งแวดล้อมรวมถึงการยอมรับของประชาชน อันเนื่องมาจากมลพิษจากอุตสาหกรรมในกลุ่มผลิตภัณฑ์เคมีเพิ่มขึ้นอย่างมากในปัจจุบัน โดยเฉพาะในเขตนิคมอุตสาหกรรมภาคตะวันออก ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและคุณภาพชีวิตของชุมชนในพื้นที่ เช่น ปัญหากลิ่นรบกวนจากโรงงานอุตสาหกรรมเคมี หรือโรงกลั่นน้ำมัน ปัญหาด้านการขาดแคลนน้ำใช้ อันเนื่องมาจากการใช้น้ำร่วมกันระหว่างชุมชนและภาคอุตสาหกรรม รวมทั้งการแย่งชิงทรัพยากรหรือสาธารณูปโภค ผลกระทบที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องส่งผลต่อความเชื่อมั่นของประชาชนในพื้นที่บริเวณโดยรอบนิคมอุตสาหกรรม ทำให้ประชาชนออกมาเรียกร้องให้มีการแก้ไขปัญหาในพื้นที่อย่างจริงจัง ขณะที่ผลิตภัณฑ์เคมีได้เข้ามามีส่วนอย่างมากในอุตสาหกรรมหลายอย่าง อาทิ อาหาร เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมยานยนต์ เส้นใยสังเคราะห์ ยางสังเคราะห์ วัตถุสี ตัวทำละลาย สารซักฟอกและเคลือบผิว เป็นต้น

นอกเหนือจากความบกพร่องของการบริหารจัดการสารเคมีซึ่งก่อให้เกิดปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมแล้ว การเกิดอุบัติภัยอันเนื่องมาจากการใช้สารเคมีในกลุ่มโรงงานอุตสาหกรรมยังมีให้เห็นอย่างต่อเนื่อง จากการรวบรวมข้อมูลสถิติอุบัติภัย ของสำนักเทคโนโลยีความปลอดภัย กรมโรงงานอุตสาหกรรมและสำนักการจัดการกากของเสียและสารอันตราย กรมควบคุมมลพิษ [21] ทำให้ทราบว่า การเกิดอุบัติภัยจากสารเคมี ตั้งแต่ปี 2549 ถึง เดือน มิ.ย. 2555 เฉลี่ยประมาณ 100 ครั้งต่อปี เฉลี่ย 3 ครั้งในแต่ละเดือนโดยมีประเด็นสำคัญ คือ

- การใช้สารเคมีประเภทต่างๆ พบว่า เป็นสาเหตุของการเกิดอุบัติภัยเป็นอันดับแรก ในขณะที่กลุ่มสารเคมีประเภทกากของเสีย ก๊าซไวไฟ/น้ำมัน และแอมโมเนีย/ด่างเข้มข้น/ไนโตรเจน เป็นประเภทของสารเคมีที่ก่อให้เกิดอุบัติภัยเป็นอันดับรองลงมา
- การเกิดอุบัติภัยสารเคมี จำแนกประเภทกิจกรรมได้ 6 ประเภท ได้แก่ การผลิต การขนส่ง การเก็บ การใช้ การกำจัดกากของเสีย กิจกรรมในห้องปฏิบัติการ
- มูลเหตุหลักของการเกิดอุบัติภัยด้านสารเคมี 3 ประการ คือ ความผิดพลาดจากคน อุปกรณ์บกพร่อง/ชำรุด และลักลอบผลิต/ทิ้งสารเคมี [3]

แนวโน้มของการเกิดอุบัติภัยด้านสารเคมี [4] ตั้งแต่ปี 2544-2554 พบว่า สถิติอุบัติภัยด้านสารเคมีมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นทุกปี โดยมีอัตราสูงถึงร้อยละ 31

สำนักพัฒนาศักยภาพนักวิทยาศาสตร์ห้องปฏิบัติการ กรมวิทยาศาสตร์บริการ ประมวลข้อมูลกลุ่มเป้าหมายพบว่า กลุ่มผู้เข้ารับการฝึกอบรมกับสำนักฯ ในปีงบประมาณ พ.ศ. 2557 ที่มาจากภาคอุตสาหกรรม ทั้งสิ้น 2,066 คน โดยเป็นผู้ที่มาจากกลุ่มอุตสาหกรรมด้านเคมีภัณฑ์ ทั้งสิ้น 149 คน อาทิ งานให้บริการและจัดจำหน่ายผลิตภัณฑ์ทำความสะอาด ผลิตภัณฑ์ฆ่าเชื้อ ผลิตภัณฑ์ด้านสุขอนามัย กิจการยาปราบศัตรูพืช อุตสาหกรรมผลิตสี ตัวทำละลาย บริษัทผลิตสารตั้งต้นในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น การเกษตรและอาหารสัตว์ แก้วและเซรามิค เครื่องสำอาง เครื่องหนัง ชุบโลหะ บำบัดน้ำเสีย ปิโตรเคมีและพลาสติก ยา ยางต่าง ๆ เยื่อและกระดาษ สี สีย้อมผ้าและสิ่งทอ เหล็กและโลหะ อาหาร เครื่องดื่ม และอุตสาหกรรมเคมีทั่วไป เป็นต้น ซึ่งเป็นจำนวนกลุ่มตัวอย่างที่ค่อนข้างสูง และครอบคลุมกับตัวแทนของบุคลากรที่ทำงานเกี่ยวข้องกับสารเคมีในภาคอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์ในประเทศไทย ซึ่งเป็นกลุ่มเป้าหมายที่สามารถศึกษาสถานภาพปัจจุบันของการจัดการสารเคมีอันตรายของกลุ่มอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์เคมีในประเทศไทยเชิงลึกได้ และสามารถนำข้อมูลที่ได้มาประเมิน บ่งชี้อันตราย รวมถึงหาปัจจัยเสี่ยงของความเป็นอันตรายที่เกิดจากการใช้และจัดการสารเคมีอันตรายในภาคอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์เคมีจากสถานประกอบการเคมีภัณฑ์ เพื่อนำมาพัฒนาและออกแบบการสร้างแนวปฏิบัติการจัดการสารเคมี และป้องกันอันตรายจากสารเคมีในภาคอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์เคมี ที่สามารถนำไปสู่ต้นแบบของการจัดการสารเคมีในภาคอุตสาหกรรมอื่น ๆ เพื่อการใช้สารเคมีอย่างปลอดภัยและยั่งยืน

2. วิธีการวิจัย (Experimental methods)

2.1 การออกแบบการวิจัย (Research design)

การวิจัยครั้งนี้ใช้เครื่องมือ (Tool) คือ แบบสอบถามและแบบสัมภาษณ์ผู้จัดการ และ/หรือ ผู้บริหารห้องปฏิบัติการเคมีในภาค

อุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์ รายละเอียดดังภาคผนวกที่ 1 โดยการวิจัยครั้งนี้ จะมีแผนการดำเนินการ ดังนี้

1. การเก็บข้อมูลเชิงปริมาณ จากแบบสอบถาม โดยผู้ตอบเป็นหัวหน้าห้องปฏิบัติการ และ/หรือ ผู้ปฏิบัติงานในห้องปฏิบัติการเคมี และ/หรือ ผู้ที่เกี่ยวข้องในการปฏิบัติงานด้านสารเคมีของภาคอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์

2. การเก็บข้อมูลเชิงคุณภาพ จากแบบสัมภาษณ์โดยผู้ตอบเป็นผู้จัดการ และ/หรือ ผู้บริหาร ห้องปฏิบัติการเคมีในภาคอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์ เพื่อให้ได้ข้อมูลเชิงลึก และมีความละเอียดมากขึ้น

กำหนดขนาดตัวอย่างโดยพิจารณาจากคุ้มรวม (Coverage) และขนาดประชากร (Population) สำหรับกำหนดขนาดตัวอย่างโดยพิจารณาจากคุ้มรวม (Coverage) และขนาดประชากร (Population) ของโครงการวิจัย คือ ประชากร และการกำหนดขนาดของตัวอย่าง

การกำหนดขนาดของตัวอย่าง

ในการสำรวจครั้งนี้ คณะผู้วิจัยได้กำหนดขนาดตัวอย่าง ‘การกำหนดขนาดกลุ่มจำนวนประชากร (Sample size determination) ขึ้นเพื่อกำหนดส่วนย่อของประชากรให้เหมาะสมกับการทำงานวิจัย และการใช้ทรัพยากรทางธุรกิจอย่างเหมาะสม เช่น ต้นทุน เวลา แรงงาน ฯลฯ โดยในการวิจัยครั้งนี้ ได้นำทฤษฎีของ ทาโร ยามาเน (Taro Tayamane) ในปี 1970 นักเศรษฐศาสตร์และสถิติชาวญี่ปุ่น ที่ได้คิดค้นทฤษฎีการคำนวณ หรือสูตรคำนวณ สำหรับการกำหนดขนาดกลุ่มจำนวนประชากรตัวอย่างขึ้น ซึ่งทฤษฎีคำนวณของ ทาโร ยามาเน จะเหมาะสมสำหรับ การวิจัยที่สนใจประชากรจำนวนมากและทราบจำนวนประชากรทั้งหมดที่ต้องการศึกษา โดยมีสมการดังนี้

สูตรที่ใช้ในการคำนวณหาตัวอย่าง โดย ทาโร ยามาเน (Taro Tayamane)

$$n = \frac{N}{1 + Ne^2}$$

เมื่อ n คือ ขนาดกลุ่มตัวอย่าง

N คือ ขนาดของประชากรทั้งหมด

e คือ ค่าความคลาดเคลื่อนของตัวอย่างที่ยอมรับได้ (ร้อยละ)

การวิจัยในครั้งนี้คณะผู้วิจัย ได้ใช้ระดับความเชื่อมั่น 95% สัดส่วนความคลาดเคลื่อน 0.05

2.2 กลุ่มตัวอย่าง (Sample size)

การคัดเลือกกลุ่มตัวอย่างเพื่อตอบแบบสอบถามที่จัดทำขึ้นเป็นกลุ่มตัวอย่างที่มีความเฉพาะเจาะจง โดยผู้ตอบคำถาม ควรมีอำนาจหน้าที่ในการบริหารจัดการ และควบคุมการจัดการสารเคมีในภาคอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์ และควรมีความรู้และประสบการณ์ทำงานที่เกี่ยวข้องกับห้องปฏิบัติการโดยตรง ดังนั้น กลุ่มตัวอย่างตอบแบบสอบถามเป็นหัวหน้าห้องปฏิบัติการ และ/หรือ ผู้ปฏิบัติงานในห้องปฏิบัติการเคมี และ/หรือ ผู้ที่เกี่ยวข้องในการปฏิบัติงานด้านสารเคมีของภาคอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์ส่วนกลุ่มตัวอย่างตอบแบบสัมภาษณ์เชิงลึก เป็นผู้จัดการ และ/หรือ ผู้บริหาร ห้องปฏิบัติการเคมีในภาคอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์

2.3 ระเบียบวิธีการวิจัย (Research methodology)

กรอบแนวคิด ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและนำมาใช้สนับสนุนการวิจัย (Theory) ตามกรอบแนวคิดและนิยามปฏิบัติการอย่างได้มาตรฐาน โดยการออกแบบสำรวจซึ่งผ่านการทดสอบความเที่ยงตรง เพื่อที่ผู้อ่านแบบสอบถามมีความเข้าใจถูกต้อง หลังจากนั้นจึงทำการศึกษาและรวบรวม แนวทางการจัดการสารเคมีในภาคอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์ของประเทศไทย โดยภาพรวมในปัจจุบัน โดยรูปแบบการสำรวจ ประกอบไปด้วย

1. การใช้แบบสอบถาม เพื่อต้องการทราบความคิดเห็นซึ่งสามารถกระทำได้ในลักษณะกำหนดคำตอบให้เลือกหรือตอบคำถามอิสระ คำถามดังกล่าวจะประเมินศักยภาพการจัดการสารเคมีในด้านต่าง ๆ ได้

2. การสัมภาษณ์ เป็นการวัดศักยภาพการจัดการสารเคมีของภาคอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์ สถานะปัจจุบันในทางตรง ซึ่งต้องอาศัยเทคนิคและวิธีการที่ดีจึงจะได้ข้อมูลที่เป็นจริง และเชิงลึก

3. กลุ่มอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์เคมี สถานประกอบการเคมีภัณฑ์ ในพื้นที่นิคมอุตสาหกรรมของประเทศไทย ขอบเขตพื้นที่การวิจัย ได้แก่ กรุงเทพฯ สมุทรสาคร สมุทรปราการ พระนครศรีอยุธยา ฉะเชิงเทรา ชลบุรี ปราจีนบุรี ระยอง ปทุมธานี และนนทบุรี

2.4 การเก็บรวบรวมข้อมูล (Data collection)

การวิจัยครั้งนี้ได้ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลมาจาก 2 แหล่งข้อมูลด้วยกัน คือ

2.4.1 ข้อมูลปฐมภูมิ (Primary data) ซึ่งเป็นข้อมูลที่ผู้วิจัยเป็นผู้ทำการเก็บข้อมูลด้วยตนเอง ซึ่งวิธีการเก็บรวบรวมข้อมูลได้มาจากวิธีการทั้งจากแบบสอบถามและการสัมภาษณ์เชิงลึก ข้อมูลปฐมภูมิเป็นข้อมูลที่มีรายละเอียดตรงตามที่ผู้วิจัยต้องการ ในการวิจัยครั้งนี้ ได้ข้อมูลปฐมภูมิ มาจาก

1. การเก็บรวบรวมข้อมูลโดยแบบสอบถามจากพื้นที่ภาคอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์จำนวน 10 จังหวัด ในพื้นที่ขอบเขตงานวิจัย โดยวิธีการสุ่มตัวอย่างแบบเจาะจง (Purposive sampling) แบบสอบถามที่ส่งทางไปรษณีย์ จดหมายอิเล็กทรอนิคส์

2. การจัดการประชุม/สัมมนาเชิงปฏิบัติการ จำนวน 2 ครั้ง เก็บข้อมูลจากแบบสอบถาม และนำผลวิเคราะห์ ปัญหา ข้อเสนอแนะต่างๆ ของห้องปฏิบัติการที่เข้าร่วมโครงการ

3. การเก็บรวบรวมข้อมูลโดยใช้วิธีการสัมภาษณ์เชิงลึก (In-depth interview) ที่มีแบบสำรวจและกำหนดโครงสร้างคำถาม โดยนำไปใช้กับบุคลากรระดับผู้จัดการ และ/หรือ ผู้บริหารห้องปฏิบัติการเคมีในภาคอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์ โดยกลุ่มตัวอย่าง

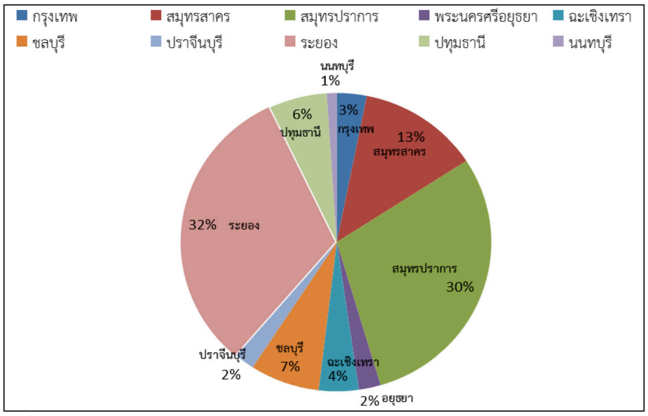
จะต้องเป็นผู้มีความรู้และประสบการณ์ทำงานที่เกี่ยวข้องกับห้องปฏิบัติการโดยตรง

2.4.2 ข้อมูลทุติยภูมิ (Secondary data) เป็นข้อมูลที่ผู้วิจัยไม่ได้เก็บรวบรวมเอง แต่ได้มาซึ่งข้อมูลจาก หน่วยงานอื่น ๆ ทำการเก็บรวบรวมไว้แล้ว ในที่นี้ ได้ข้อมูลจากกรมโรงงานอุตสาหกรรม การศึกษาข้อมูลจากเอกสาร วารสาร บทความ และผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง รวมทั้งเอกสารจากหน่วยงานราชการและเอกชนต่าง ๆ การนำเอาข้อมูลเหล่านี้มาใช้เป็นการประหยัดเวลาและค่าใช้จ่าย แต่ข้อมูลอาจจะยังไม่ตรงกับความต้องการของผู้วิจัย หรือมีรายละเอียดไม่เพียงพอที่จะนำไปวิเคราะห์ต่อได้

3. ผลและวิจารณ์ (Results and discussion)

3.1 การวิเคราะห์ผลข้อมูลปฐมภูมิ (Primary data)

3.1.1 การเก็บรวบรวมข้อมูลโดยใช้แบบสอบถาม (Questionnaire) ในภาคอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์ในพื้นที่ขอบเขตงานวิจัย จำนวน 10 จังหวัด ได้แก่ กรุงเทพฯ สมุทรสาคร สมุทรปราการ พระนครศรีอยุธยา ฉะเชิงเทรา ชลบุรี ปราจีนบุรี ระยอง ปทุมธานี และนนทบุรี โดยวิธีการสุ่มตัวอย่างแบบเจาะจง (Purposive sampling) แบบสอบถามที่ส่งไปทางไปรษณีย์ และทางจดหมายอิเล็กทรอนิคส์ ทั้งสิ้น 513 ฉบับ (N = 513) โดยมีสัดส่วนร้อยละของพื้นที่ของการส่งแบบสอบถาม พื้นที่ส่วนใหญ่ที่ส่งแบบสอบถามมากที่สุด คือ พื้นที่ในจังหวัดระยอง และจังหวัดสมุทรปราการ โดยมีร้อยละ 32 และร้อยละ 30 ของจำนวนแบบสอบถามทั้งหมดที่ส่งออกตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แสดงสัดส่วนร้อยละของพื้นที่ในการส่งแบบสอบถามทางไปรษณีย์ และทางจดหมายอิเล็กทรอนิคส์ ทั้งสิ้น 513 ฉบับ (N = 513)

ผลที่ได้จากการส่งแบบสอบถามทางไปรษณีย์และทางจดหมายอิเล็กทรอนิคส์ จำนวนทั้งสิ้น 513 ฉบับ ผู้วิจัยได้รับแบบสอบถามที่ตอบกลับ จำนวน 172 ฉบับ โดยเป็นแบบสอบถามที่ตอบกลับจากทางไปรษณีย์ จำนวน 156 ฉบับ และแบบสอบถามที่ตอบกลับจากทางจดหมายอิเล็กทรอนิคส์ จำนวน 16 ฉบับ ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 33.5 ของจำนวนแบบสอบถามทั้งหมดที่ส่งออก โดยมีข้อมูลของลักษณะสถานภาพของผู้ตอบแบบสอบ พบว่า กลุ่มบุคคลที่ตอบแบบสอบถามสูงสุด ร้อยละ 36.6เป็นผู้ที่มีอายุระหว่าง 30-39 ปี และโดยส่วนใหญ่เป็นผู้ที่มีการศึกษาระดับปริญญาตรี ถึงร้อยละ 65 แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงสถานภาพของผู้ตอบแบบสอบถามทางไปรษณีย์และทางจดหมายอิเล็กทรอนิคส์ จำนวนทั้งสิ้น 172 ฉบับ (n = 172)

ส่วนที่ 1 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับหน่วยงานและผู้ให้ข้อมูล		
อายุ	จำนวนแบบสอบถามที่ได้รับ	ร้อยละ
20-29 ปี	29	16.9
30-39 ปี	62	36.6
40-49 ปี	58	33.7
มากกว่า 50 ปีขึ้นไป	23	12.8
ระดับการศึกษา	จำนวนแบบสอบถามที่ได้รับ	ร้อยละ
ปวช./ปวส./อนุปริญญา	6	3.5
ปริญญาตรี	112	65.0
ปริญญาโท	51	29.7
สูงกว่าปริญญาโท	1	0.6
อื่นๆ (โปรดระบุ)	2	1.2

การวิเคราะห์แบบสอบถาม ด้านสถานภาพการจัดการสารเคมีในภาพรวมของโรงงานที่มีขนาดกลางและขนาดใหญ่ ซึ่งประเมินจากจำนวนผู้ปฏิบัติงาน และขนาดของพื้นที่โรงงาน ซึ่งระบุโดยกรมโรงงานอุตสาหกรรมที่ว่า "สถานประกอบการอุตสาหกรรมขนาดเล็กและขนาดกลาง (SMEs) คือ สถานประกอบการที่มีมูลค่าของสินทรัพย์ถาวรไม่เกิน 200 ล้านบาท และมีจำนวนลูกจ้างไม่เกิน 200 คน" และ "สถานประกอบการขนาดใหญ่ (Large) คือ สถานประกอบการที่มีมูลค่าของสินทรัพย์ถาวรมากกว่า 200 ล้านบาท หรือมีจำนวนการจ้างแรงงานมากกว่า 200 คน"

ผลการวิเคราะห์จากแบบสอบถาม พบว่า ผู้ตอบแบบสอบถามสำหรับโรงงานที่มีขนาดกลางและขนาดใหญ่ มีระบบการจัดการที่มีมาตรฐานสากล ผู้ปฏิบัติงานส่วนมากได้รับความรู้ และการฝึกอบรมในเรื่องที่เกี่ยวข้องกับห้องปฏิบัติการ และสารเคมีพอสมควร อย่างไรก็ตาม สำหรับกลุ่มโรงงานอุตสาหกรรมขนาดรองลงมา พบว่า ระบบการจัดการสารเคมี และการได้รับความรู้ และการฝึกอบรม ยังไม่เพียงพอ และยังมีความต้องการที่จะได้รับการฝึกอบรมเฉพาะด้านค่อนข้างมาก ในขณะที่ สถานภาพการจัดการสารเคมีในภาพรวมของโรงงานที่มีขนาดใหญ่ (ประเมินจากจำนวนผู้ปฏิบัติงานและขนาดของพื้นที่โรงงาน) มีระบบการจัดการที่มีมาตรฐานสากลรองรับ ผู้ปฏิบัติงานส่วนมาก ได้รับความรู้ การฝึกอบรมในเรื่องที่เกี่ยวข้องกับห้องปฏิบัติการ และสารเคมีพอสมควร อย่างไรก็ตาม สำหรับกลุ่มโรงงานอุตสาหกรรมขนาดรองลงมา พบว่า ระบบการจัดการสารเคมี การได้รับความรู้ และการฝึกอบรม ยังไม่เพียงพอ และยังมีความต้องการที่จะได้รับการฝึกอบรมเฉพาะด้าน ค่อนข้างสูง

3.1.2 จัดการประชุมสัมมนาเชิงปฏิบัติการ เพื่อเก็บข้อมูลแบบสอบถามเพิ่มเติม

สืบเนื่องจากการได้รับผลตอบกลับ ของแบบสอบถามที่ส่งทางไปรษณีย์ และทางจดหมายอิเล็กทรอนิกส์ ค่อนข้างน้อยกว่าที่คาดหวังไว้ซึ่งได้รับตอบกลับ เพียงแค่ร้อยละ 33.5 ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงได้จัดกิจกรรมการสัมมนาเชิงปฏิบัติการ ในปีงบประมาณ พ.ศ. 2560 จำนวนทั้งสิ้น 2 ครั้ง คือ ในวันที่ 7 สิงหาคม และ วันที่ 20 กันยายน 2560 เพื่อได้มาซึ่งข้อมูล การสำรวจสถานภาพและความต้องการในการจัดการสารเคมีอย่างปลอดภัยสำหรับอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์ ผลที่ได้ คือ ได้รวบรวมการตอบแบบสอบถามจากการจัดสัมมนาทั้ง 2 ครั้ง จำนวนทั้งสิ้น 294 ฉบับ โดยได้จากการจัดสัมมนาในวันที่ 7 สิงหาคม และ วันที่ 20 กันยายน 2560 จำนวน 161 และ 133 ฉบับ ตามลำดับ

จากการสำรวจความต้องการได้รับการพัฒนาบุคลากรในหน่วยงานด้านการจัดการสารเคมีอย่างปลอดภัยสำหรับอุตสาหกรรมเคมี พบว่า หน่วยงาน แสดงเจตนารมณ์ในความต้องการพัฒนาด้านบุคลากรในหน่วยงานในด้านการจัดการสารเคมีและหน่วยงานได้แสดงความคิดเห็นในหัวข้อความต้องการพัฒนาบุคลากร ในด้านต่าง ๆ โดยมีจำนวนความถี่ของผู้แสดงความคิดเห็นตามตัวเลขในวงเล็บ ดังนี้

• การให้ความรู้ ความเข้าใจในการทำงานกับสารเคมีในห้องปฏิบัติการ (11)

• การออกแบบห้องปฏิบัติการเพื่อความปลอดภัยและขอความคิดเห็นในการปรับปรุงห้องปฏิบัติการที่มีอยู่เดิมเพื่อเพิ่มความปลอดภัยในการปฏิบัติงาน (8)

• การปลูกจิตสำนึกเรื่องความปลอดภัย การเข้าใจถึงความปลอดภัยในห้องปฏิบัติการและตระหนักถึงความปลอดภัยมาเป็นอันดับแรกก่อนการปฏิบัติงาน (6)

• การจำแนกประเภทสารเคมีให้ถูกต้อง และการแยกประเภทสารเคมีที่เข้ากันได้หรือไม่ เพื่อการลดความเสี่ยงในห้องปฏิบัติการ (4)

• แนวทางการปฏิบัติงานและการควบคุมจัดการสารเคมีอย่างปลอดภัย (3)

• การให้ความรู้พร้อมทั้งแนะนำการจัดทำการประเมินความเสี่ยงของสารเคมี (2)

• ให้ข้อมูลแนวโน้มของระเบียบหรือมาตรฐานการจัดการสารเคมีในห้องปฏิบัติการ (2)

• เสนอให้มีโครงการการตรวจติดตาม (audit) ห้องปฏิบัติการเพื่อแนะนำห้องปฏิบัติในการจัดการสารเคมีอย่างปลอดภัย (1)

รูปที่ 2 แสดงกิจกรรมการจัดสัมมนาเชิงปฏิบัติการ เรื่อง การจัดการสารเคมีอย่างปลอดภัยสำหรับอุตสาหกรรมเคมี ในวันที่ 7 สิงหาคม 2560

3.1.3 การเก็บรวบรวมข้อมูลโดยใช้วิธีการสัมภาษณ์เชิงลึก (In-depth Interview) ที่มีแบบสำรวจและกำหนดโครงสร้างคำถาม โดยนำไปใช้กับบุคลากรระดับผู้จัดการ และ/หรือ ผู้บริหารห้องปฏิบัติการเคมีในภาคอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์ จำนวน 6 หน่วยงาน โดยกลุ่มตัวอย่างจะต้องเป็นผู้มีความรู้และประสบการณ์ทำงานที่เกี่ยวข้องกับห้องปฏิบัติการโดยตรง

การเก็บรวบรวมข้อมูลเชิงคุณภาพและการวิเคราะห์ผลใช้ระยะเวลาทั้งสิ้น 6 เดือน ดำเนินการตั้งแต่ เดือนมกราคม – มิถุนายน 2560 โดยวิธีการสัมภาษณ์เชิงลึก ในเขตจังหวัดสมุทรปราการ และจังหวัดสมุทรสาคร จำนวนทั้งสิ้น 6 โรงงาน ดังต่อไปนี้ 1.) บริษัท คอนทิเนนทอล ปิโตรเคมีคอล (ประเทศไทย) จำกัด 2.) บริษัท โจตันไทย จำกัด 3.) บริษัท โปรดักส์ ดีเวลลอปเม้นท์ เมนูเฟคเจอริ่ง จำกัด 4.) บริษัท สยามเอเชีย เคมิคอล อินดัสตรี้ จำกัด 5.) บริษัท วีระสุวรรณ จำกัด และ 6.) บริษัทอาร์ซีไอ แล็บสแกน จำกัด

โดยแบบสอบถามเชิงลึก มีข้อคำถามเป็น 3 ประเด็นหลัก คือ

1) ข้อมูลเชิงลึก เกี่ยวกับการจัดการสารเคมีในห้องปฏิบัติการ

2) ข้อมูลเชิงลึก เกี่ยวกับห้องปฏิบัติการที่เกี่ยวข้องกับสารเคมี

3) ความต้องการให้กรมวิทยาศาสตร์บริการ พัฒนาด้านบุคลากร สำหรับการจัดการสารเคมีในหน่วยงาน

ผลที่ได้จากการเก็บข้อมูลโดยใช้วิธีการสัมภาษณ์เชิงลึก (In-depth Interview) พบว่า สถานภาพการจัดการสารเคมีอย่างปลอดภัยสำหรับห้องปฏิบัติการของอุตสาหกรรมเคมี การบริหารจัดการด้านสารเคมี และความปลอดภัยในห้องปฏิบัติการ มักจะขึ้นอยู่กับนโยบายและวิสัยทัศน์ของผู้บริหาร ให้ความสำคัญกับเรื่องนี้มากน้อยเพียงใด ซึ่งแนวโน้มของการบริหารจัดการ จะเป็นไปในทางที่ดีขึ้นได้ ถ้ามีผู้บริหารให้การสนับสนุนในเรื่องนี้เป็นสำคัญ

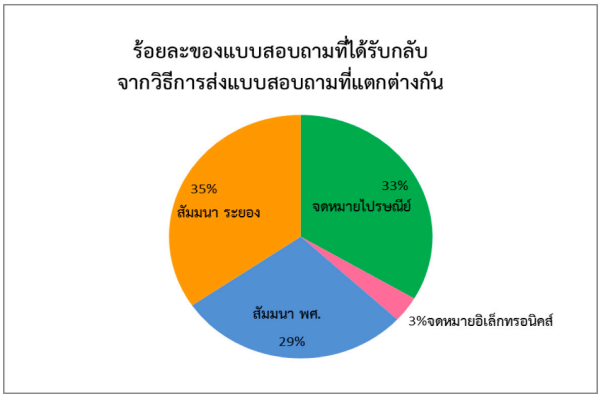
การวิเคราะห์ผลข้อมูลปฐมภูมิ (Primary data) ทั้งหมดที่รวบรวมได้ สรุปผลที่ได้จากวิธีการเก็บรวบรวมข้อมูลด้วยวิธีปฐมภูมิ (Primary data) แบบสอบถามที่ได้รับกลับ จากแหล่งต่าง ๆ รวมทั้งสิ้น 466 ฉบับ จากแบบสอบถามที่ได้ส่งออกไปทั้งสิ้น 755 ฉบับ (N = 755) ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 61.7 ของจำนวนแบบสอบถามทั้งหมดที่ส่งออก โดยมีรายละเอียดแสดงในตารางที่ 2

ทั้งนี้ จะเห็นได้ว่า เมื่อผู้วิจัยได้ปรับเปลี่ยนวิธีการเก็บรวบรวมข้อมูลปฐมภูมิ โดยการจัดกิจกรรมการจัดสัมมนาเชิงปฏิบัติการ โดยการรวบรวมผู้ที่เกี่ยวข้อง หรือ ผู้สนใจ เข้าร่วมกิจกรรม ทำให้การได้รับผลตอบกลับของแบบสอบถามมากขึ้น มากกว่าร้อยละ 50 ของแบบสอบถามทั้งหมดที่ส่งออก และการจัดกิจกรรมสัมมนาเชิงปฏิบัติการ ยังทำให้ได้รับผลตอบกลับสูงสุด ถึงร้อยละ 35 จากแบบสอบถามที่ได้รับกลับทั้งหมด อีกด้วย แสดงดังรูปที่ 4

รูปที่ 3 แสดงกิจกรรมการรวบรวมข้อมูลโดยใช้วิธีการสัมภาษณ์เชิงลึก (In-depth interview)

ตารางที่ 2 แสดงจำนวนแบบสอบถามที่ได้รับกลับ จากวิธีการส่งแบบสอบถามที่แตกต่างกัน (n=466)

แบบสอบถามที่ได้รับ	จำนวน (ฉบับ)	ร้อยละของแบบสอบถามที่ตอบกลับ
จดหมายไปรษณีย์	156	33.5
จดหมายอิเล็กทรอนิกส์	16	3.4
สัมมนา ระยอง ในวันที่ 7 สิงหาคม 2560	161	34.6
สัมมนา พศ. ในวันที่ 20 กันยายน 2560	133	28.5
รวมทั้งสิ้น	466	100



รูปที่ 4 แสดงสัดส่วนร้อยละของวิธีการส่งแบบสอบถามที่แตกต่างกันแสดงเป็นร้อยละของแบบสอบถามที่ตอบกลับ จำนวนทั้งสิ้น 466 ฉบับ (n = 466)

เมื่อวิเคราะห์ผลจากแบบสอบถามในเรื่อง สถานภาพการจัดการสารเคมีในห้องปฏิบัติการ และความต้องการการได้รับการพัฒนาบุคลากรในห้องปฏิบัติการเคมี ของภาคอุตสาหกรรมเคมี ผลของข้อมูลที่ได้จากแบบสอบถามที่ได้รับกลับ ทั้งสิ้น 466 ฉบับ พบว่า ร้อยละ 88.4 ของกลุ่มอุตสาหกรรมเคมีที่ตอบแบบสอบถามมีห้องปฏิบัติการเคมีในหน่วยงานตนเอง และมีระบบการบริหารจัดการสารเคมีของห้องปฏิบัติการสำหรับภาคอุตสาหกรรมเคมีโดยส่วนใหญ่ จะเป็นระบบการจัดการโดยใช้ระบบสากล โดยมีร้อยละ 79 ของแบบสอบถามที่ได้รับกลับทั้งหมด มีการใช้เอกสารข้อมูลความปลอดภัยของสารเคมี (Safety data sheet, SDS) นอกจากนั้น หน่วยงานอุตสาหกรรมเคมีที่ตอบแบบสอบถามยังมีแนวปฏิบัติในการทำงานของห้องปฏิบัติการตนเองในการใช้ตู้ดูดควันที่ได้มาตรฐาน การแยกตามสถานะของสารเคมี แยกตามคุณสมบัติอันตรายของสารเคมี และจำแนกของเสียอันตรายโดยพบว่า มีร้อยละ 62.7, 61.4, 59.9 และ 54.5 ตามลำดับ

สำหรับประเด็นด้านการพัฒนาบุคลากร หน่วยงานในกลุ่มอุตสาหกรรมเคมีโดยส่วนใหญ่ต้องการพัฒนาบุคลากรในด้านต่างๆ ค่อนข้างใกล้เคียงกัน โดยร้อยละ 60–70 ของแบบสอบถามที่ได้รับกลับทั้งหมด มีความต้องการพัฒนาบุคลากรในเรื่อง การควบคุมและจัดการสารเคมีอันตราย แนวปฏิบัติที่ดีสำหรับการปฏิบัติงานในห้องปฏิบัติการ การกำจัดของเสียอันตราย การใช้อุปกรณ์ป้องกันส่วนบุคคล และการประเมินความเสี่ยงสารเคมี

การดำเนินงานของโครงการ ในปีที่ 2 ปีงบประมาณ พ.ศ. 2561 (ตุลาคม 2560 - กันยายน 2561) ผู้วิจัยได้นำผลที่ได้จากแบบสอบถามของปีแรก มาดำเนินกิจกรรมเพื่อสร้างแนวปฏิบัติการจัดการสารเคมีในห้องปฏิบัติการ กับกลุ่มอุตสาหกรรมเคมีที่เข้าร่วมโครงการทั้งสิ้น 19 ราย โดยมีจำนวนผู้เข้ารับการฝึกอบรม ทั้งสิ้น 99 คน

โดยมีกิจกรรม ดังนี้

1) กิจกรรมการเสริมสร้างบุคลากรทางด้านการจัดการสารเคมีอย่างปลอดภัยสำหรับอุตสาหกรรมเคมี

การใช้เครื่องมือ การพัฒนาบุคลากรด้านการจัดการสารเคมีโดยการให้การฝึกอบรมที่ครอบคลุมกระบวนการจัดการสารเคมีในห้องปฏิบัติการที่เกี่ยวข้องกับสารเคมี โดยการออกแบบหลักสูตรฝึกอบรมที่เชื่อมโยงกันอย่างเป็นระบบของการจัดการสารเคมีอันตรายอย่างปลอดภัยและยั่งยืน และดำเนินการพัฒนาหลักสูตรฝึกอบรมโดยทำการรวบรวมผลและประเมินผลจากการสำรวจความต้องการในด้านการพัฒนาบุคลากรของกลุ่มโรงงานอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์และจัดทำโครงสร้างหลักสูตรฝึกอบรม โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างแนวปฏิบัติในการจัดการสารเคมีอย่างปลอดภัยสำหรับอุตสาหกรรมเคมี รวมทั้งเสริมสร้างความรู้ ความเข้าใจเกี่ยวกับการจัดการสารเคมีอย่างปลอดภัยสำหรับอุตสาหกรรมเคมี

ประกอบไปด้วยหลักสูตรฝึกอบรมที่ครอบคลุม กระบวนการจัดการสารเคมีอย่างปลอดภัยสำหรับห้องปฏิบัติการ รวมทั้งสิ้น 4 หลักสูตร คือ

a. หลักสูตร ความปลอดภัยของห้องปฏิบัติการที่เกี่ยวข้องกับสารเคมี (15-16 มี.ค. 61)

b. หลักสูตร การกำจัดของเสียอันตรายในห้องปฏิบัติการ (29-30 มี.ค. 61)

c. หลักสูตร การออกแบบห้องปฏิบัติการเคมีเพื่อความปลอดภัย (24-25 เม.ย. 61)

d. หลักสูตร การตอบโต้สถานการณ์ฉุกเฉินจากการทำงานในห้องปฏิบัติการเคมี (8 พ.ค. 61)

รูปที่ 5 แสดงกิจกรรมการจัดการฝึกอบรม ด้านการสร้างแนวปฏิบัติในการจัดการสารเคมีอย่างปลอดภัยสำหรับอุตสาหกรรมเคมี

ผลของการดำเนินการจัดการฝึกอบรมให้กับกลุ่มอุตสาหกรรมเคมีที่เข้าร่วมโครงการฯ สำหรับ 4 หลักสูตร มีผู้เข้ารับการฝึกอบรมจากกลุ่มอุตสาหกรรมเคมีที่เข้าร่วมโครงการ ทั้งสิ้น 19 ราย มีจำนวนผู้เข้ารับการฝึกอบรม ทั้งสิ้น 99 คน ผลที่ได้รับ มีระดับความพึงพอใจในการเข้ารับฝึกอบรม ด้านการนำไปใช้ประโยชน์อยู่ในระดับมากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 97.9 มีระดับความพึงพอใจด้านการจัดการฝึกอบรม ในระดับมากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 100.0 และมีผู้ผ่านการฝึกอบรมได้รับประกาศนียบัตรตามเกณฑ์ประเมินหลักสูตร จำนวนทั้งสิ้น 99 ราย คิดเป็นร้อยละ 100.0

2) กิจกรรมการประเมินผลและติดตามผลการดำเนินงานของกลุ่มอุตสาหกรรมเคมีที่เข้าร่วมกิจกรรมโครงการวิจัย

โดยการให้กลุ่มอุตสาหกรรมเคมี จัดทำคู่มือ แนวทางการจัดการสารเคมีอย่างปลอดภัยสำหรับหน่วยงานตนเอง เพื่อตกผลึกองค์ความรู้ที่ได้รับ และสามารถนำไปปฏิบัติได้จริง โดยทางคณะผู้วิจัยได้กำหนดขอบข่ายถึงแนวทางการปฏิบัติการจัดการสารเคมีที่สำคัญ ประกอบไปด้วย 3 ประเด็น คือ

• ระบบบริหารจัดการความปลอดภัยในองค์กร โดยมุ่งเน้นในเรื่องของการวางวัตถุประสงค์ นโยบาย และโครงสร้างด้านการจัดการด้านความปลอดภัย

• มาตรการความปลอดภัยด้านสารเคมี โดยมุ่งเน้นในเรื่องของ การจัดการสารเคมี การจัดการของเสีย และการป้องกันและแก้ไขภัยอันตรายจากสารเคมี

• การบริหารจัดการความปลอดภัยในห้องปฏิบัติการ โดยมุ่งเน้นในเรื่องของการประเมินความเสี่ยง และการจัดการด้านกายภาพของห้องปฏิบัติการ

ซึ่งคณะผู้วิจัยและผู้เชี่ยวชาญได้เข้าไปให้คำแนะนำด้านการจัดการสารเคมี ณ สถานที่ของหน่วยงานโดยกิจกรรมนี้ได้ดำเนินการในวันที่ 3 กรกฎาคม 2561 และวันที่ 9-10 สิงหาคม 2561 ประกอบไปด้วย 4 หน่วยงาน คือ 1) บริษัท เอเชีย แปซิฟิค ปิโตรเคมิคอล จำกัด 2) บริษัท โปรดักส์ ดีเวลลอปเม้นท์ เมนูแฟคเจอร์ริ่ง จำกัด 3) บริษัท เอสแอนด์แอล สเปเชียลตี้ โพลิเมอร์ จำกัด และ 4) บริษัท ไออาร์พีซี จำกัด (มหาชน)

3) ผลที่ได้จากการรวบรวมคู่มือการจัดทำแนวปฏิบัติฯ และการเข้าเยี่ยมชมและให้คำปรึกษาด้านการจัดการสารเคมีของหน่วยงานที่เข้าร่วมโครงการ พบว่า ห้องปฏิบัติการโดยทั่วไปมีความพร้อมในด้านทรัพยากรต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัยของห้องปฏิบัติการ เช่น เครื่องมือ อุปกรณ์ที่จำเป็น รวมทั้ง สถานที่ สิ่งอำนวยความสะดวก ตลอดจนไฟฟ้า แสงสว่าง ที่มีความเอื้ออำนวยต่อการปฏิบัติงานได้ดี โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การที่ผู้บริหารองค์กรให้ความสำคัญในเรื่องความปลอดภัยของบุคลากรในหน่วยงานตนเอง ซึ่งพิจารณาได้จากการจัดสรรงบประมาณเพื่อส่งเสริมด้านความปลอดภัยของหน่วยงาน

อย่างไรก็ตาม ผลจากการวิจัย การสร้างแนวปฏิบัติการจัดการสารเคมีอย่างปลอดภัยในห้องปฏิบัติการของกลุ่มอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์ในประเทศไทย นี้ยังพบประเด็นความเสี่ยง และจุดอ่อนใน 2 เรื่องที่เด่นชัด คือ

1. ความเสี่ยง : บุคลากรที่ทำงานในห้องปฏิบัติการยังคงบกพร่องในเรื่องความเป็นอันตรายของสารเคมี ทั้งในเชิงทฤษฎีและปฏิบัติ เนื่องมาจากการทำงานโดยใช้ “ความเคยชิน” และยังไม่เกิดเหตุการณ์ที่ร้ายแรงขึ้นกับตนเองและหน่วยงาน รวมทั้งยังขาดความรู้ของการใช้อุปกรณ์ป้องกันส่วนบุคคลที่เหมาะสม และถูกต้อง

2. จุดอ่อน : การจัดการทางกายภาพในห้องปฏิบัติการ อาทิ ด้านไฟฟ้า ยังมีการจัดการที่ยังไม่เหมาะสมต่อการสร้างความปลอดภัยในห้องปฏิบัติการ และระบบระบายอากาศในห้องปฏิบัติการ ยังมีไม่เพียงพอทำให้ภายในห้องปฏิบัติการ มีกลิ่นค่อนข้างสูงมาก

ทั้งนี้ สิ่งที่สำนักพัฒนาศักยภาพนักวิทยาศาสตร์ห้องปฏิบัติการ สามารถดำเนินการได้ในเบื้องต้น เพื่อแก้ไขจุดอ่อนในเรื่องของบุคลากรที่ยังขาดความรู้ความเข้าใจ ด้านความปลอดภัยสารเคมีในห้องปฏิบัติการ คือ การดำเนินการต่อเนื่องในเรื่องของการพัฒนาหลักสูตรฝึกอบรมที่เกี่ยวข้อง และสอดคล้องกับความต้องการของกลุ่มเป้าหมาย เพื่อเพิ่มศักยภาพบุคลากรด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีของประเทศซึ่งเป็นภารกิจหลักของสำนักฯ

รูปที่ 6 แสดงกิจกรรมการประเมินผลและติดตามผลการดำเนินงานของกลุ่มอุตสาหกรรมเคมีที่เข้าร่วมกิจกรรมโครงการวิจัย

4) กิจกรรมการถ่ายทอดแนวปฏิบัติการจัดการสารเคมีในห้องปฏิบัติการอย่างปลอดภัยสำหรับอุตสาหกรรมเคมี

เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ในการเสริมสร้างความรู้ ความเข้าใจถึงการจัดการสารเคมีในห้องปฏิบัติการ อย่างถูกต้อง และสามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับห้องปฏิบัติการในภาคอุตสาหกรรมเคมีของประเทศได้ ผู้ดำเนินโครงการจึงได้จัดกิจกรรมการสัมมนาเรื่อง "การจัดการสารเคมีในห้องปฏิบัติการอย่างปลอดภัยสำหรับอุตสาหกรรมเคมี" ในวันที่ 20 สิงหาคม 2561 เพื่อถ่ายทอด ความรู้ ความเข้าใจในระบบการจัดการสารเคมีอย่างปลอดภัยสำหรับอุตสาหกรรมเคมี และแลกเปลี่ยนความคิดเห็น ประสบการณ์ในระบบการจัดการสารเคมีสำหรับอุตสาหกรรมเคมีของกลุ่มผู้เข้าร่วมกิจกรรมตลอดโครงการ โดยมีผู้สนใจเข้าร่วมการสัมมนาทั้งจากภาครัฐ และภาคเอกชน จำนวนทั้งสิ้น 120 คน โดยมีผลประเมินความพึงพอใจในภาพรวม ดังนี้คือ มีระดับความพึงพอใจในด้านเนื้อหาวิชาการ และ การบรรยายสรุปผลโครงการวิจัยฯ อยู่ในระดับดีมาก ทั้งนี้ หน่วยงานที่เข้าร่วมการสัมมนายังได้แสดงข้อคิดเห็นเพิ่มเติม โดยมีจำนวนความถี่ของผู้แสดงความคิดเห็นตามตัวเลขในวงเล็บ ดังนี้

- ได้รับความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับความปลอดภัยในห้องปฏิบัติการ และนำไปปฏิบัติใช้งานได้จริง (3)
- ได้รับความรู้เกี่ยวกับการจัดการสารเคมีในห้องปฏิบัติการ การป้องกัน การเลือกใช้อุปกรณ์อย่างปลอดภัย (2)
- ได้รับแนวความคิดเพื่อนำไปปรับปรุงและจัดทำเพิ่มเติมในเรื่องความปลอดภัยในห้องปฏิบัติการ (2)
- ได้รับเทคนิคต่างๆ ในการปรับปรุงห้องปฏิบัติการให้เหมาะสม ปลอดภัยต่อผู้ใช้งาน (1)
- ได้รับแนวทางที่จะนำไปปฏิบัติในการจัดการสารเคมีในห้องปฏิบัติการอย่างปลอดภัย มีความตระหนักด้านความปลอดภัยมากขึ้น และประยุกต์ใช้ในห้องปฏิบัติการได้ (1)

4. สรุป (Conclusion)

สารเคมีและอันตรายของสารเคมี รวมทั้งผลกระทบของสารเคมียังคงเป็นประเด็นปัญหาและส่งผลกระทบต่อสังคมปัจจุบัน ประกอบไปด้วยการเจริญเติบโตของภาคอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับผลิตภัณฑ์เคมี มีอัตราที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง กิจกรรมอันเกิดจากอุตสาหกรรมในกลุ่มผลิตภัณฑ์เคมี จึงมีความเป็นไปได้อย่างสูงในการใช้สารเคมีอันตรายเป็นจำนวนมาก และมีแนวโน้มอัตราเสี่ยงการเกิดอันตรายจากการใช้สารเคมีอันตรายในกลุ่มนี้สูงขึ้นอย่างเป็นเท่าตัว รวมทั้ง ปัญหาจากการจัดการสารเคมีที่ไม่ถูกต้องและเหมาะสมเพียงพอ ยังส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเพิ่มมากขึ้นอีกด้วย

จากการศึกษาวิจัยโครงการการสร้างแนวปฏิบัติจัดการสารเคมีอย่างปลอดภัยสำหรับห้องปฏิบัติการของกลุ่มโรงงานอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์ในประเทศไทย ได้ข้อสรุป ดังนี้

1) สถานภาพการจัดการสารเคมีในห้องปฏิบัติการเคมีของภาคอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์ในประเทศไทย ณ ปัจจุบัน ผลที่ได้คือ สถานภาพการจัดการสารเคมีในห้องปฏิบัติการเคมีของภาคอุตสาหกรรมเคมี มีแนวปฏิบัติในการทำงานของห้องปฏิบัติการตนเอง เช่น การแยกตามสถานะของสารเคมี แยกตามคุณสมบัติอันตรายของสารเคมี และมีการใช้อุปกรณ์ด้านความปลอดภัยพื้นฐานในห้องปฏิบัติการ โดยมีการใช้ตู้ดูดควันที่ได้มาตรฐาน แต่อย่างไรก็ตาม บุคลากรยังขาดความรู้ และศักยภาพที่เหมาะสมในการทำงานอย่างปลอดภัยในห้องปฏิบัติการ ตัวอย่างเช่น ยังพบว่า ผู้ปฏิบัติงานที่เกี่ยวข้องกับสารเคมีไม่ใช้อุปกรณ์ป้องกันส่วนบุคคลที่เหมาะสมทุกครั้งของการปฏิบัติงาน อาจเนื่องมาจากบุคลากรยังขาดความตระหนัก และความรู้เกี่ยวกับอันตรายอันอาจเกิดจากการใช้สารเคมีที่เพียงพอ

2) สามารถออกแบบหลักสูตรฝึกอบรมที่เชื่อมโยงกันอย่างเป็นระบบของการจัดการสารเคมีอันตรายอย่างปลอดภัยและยั่งยืน

รูปที่ 7 แสดงกิจกรรมการถ่ายทอดแนวปฏิบัติการจัดการสารเคมีในห้องปฏิบัติการอย่างปลอดภัยสำหรับอุตสาหกรรมเคมี ในวันที่ 20 สิงหาคม 2561

ซึ่งประกอบไปด้วยเนื้อหาตั้งแต่เริ่มต้น การนำเข้าสารเคมี วัตถุดิบ (Raw materials) กระบวนการ (Process) กระบวนการผลิต (Production) การใช้ (Use) และการจัดการของเสีย (Disposal) และนำไปพัฒนาแนวทางการจัดการสารเคมี และป้องกันอันตรายจากสารเคมีในห้องปฏิบัติการของกลุ่มอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์เคมีและสถานประกอบการเคมีภัณฑ์ในประเทศไทย โดยใช้รูปแบบการวิจัยแบบเชิงสำรวจ และการใช้เครื่องมือการพัฒนาบุคลากรด้านการจัดการสารเคมี โดยการให้การฝึกอบรมที่ครอบคลุมกระบวนการจัดการสารเคมีในห้องปฏิบัติการที่เกี่ยวข้องกับสารเคมี

3) ได้แนวปฏิบัติที่ดีสำหรับการจัดการสารเคมีในห้องปฏิบัติการอย่างปลอดภัยสำหรับหน่วยงานเฉพาะของกลุ่มอุตสาหกรรมเคมี โดยรูปแบบการจัดการสารเคมี และป้องกันอันตรายจากสารเคมีในห้องปฏิบัติการของภาคอุตสาหกรรมเคมี พบว่าต้องประกอบไปด้วย 3 ปัจจัยหลัก คือ

1. ระบบบริหารจัดการความปลอดภัยในองค์กร
2. มาตรการความปลอดภัยด้านสารเคมี
3. การบริหารจัดการความปลอดภัยในห้องปฏิบัติการ

สำหรับข้อมูลเชิงลึกของผลการวิจัย พบว่า การบริหารจัดการด้านสารเคมี และความปลอดภัยในห้องปฏิบัติการ ขึ้นอยู่กับนโยบายและวิสัยทัศน์ของผู้บริหาร ซึ่งแนวโน้มของการบริหารจัดการด้านความปลอดภัยของห้องปฏิบัติการเคมีในโรงงานอุตสาหกรรมเคมี จะเป็นไปในทางที่ดีขึ้น ถ้าผู้บริหารในองค์กรให้การสนับสนุนในเรื่องเหล่านี้เป็นสำคัญ

5. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

คณะวิจัยขอขอบพระคุณท่านอธิบดีกรมวิทยาศาสตร์บริการ นางอุมาพร สุขม่วง ที่เล็งเห็นความสำคัญของการจัดการสารเคมีสำหรับภาคอุตสาหกรรมของประเทศ และสนับสนุนการดำเนินโครงการวิจัยจนแล้วเสร็จด้วยดี และขอขอบพระคุ ดร.จันทร์เพ็ญ เมฆาอภิรักษ์ รองอธิบดี รักษาการผู้อำนวยการสำนักพัฒนาศักยภาพนักวิทยาศาสตร์ห้องปฏิบัติการ ที่ช่วยให้ข้อเสนอแนะและความคิดเห็นในการดำเนินงานของโครงการ และดูแลการดำเนินงานต่างๆ ของงานวิจัยนี้เป็นอย่างดีเสมอมา

6. เอกสารอ้างอิง (References)

[1] สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. *เอกสารเผยแพร่อุตสาหกรรมน่ารู้ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับอุตสาหกรรมปิโตรเคมี และอุตสาหกรรมพลาสติก*. กรุงเทพฯ : วงศ์สว่างพับลิชชิ่ง แอนด์พริ้นติ้ง, 2557.

[2] สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. *เอกสารเผยแพร่อุตสาหกรรมน่ารู้ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์*. กรุงเทพฯ : วงศ์สว่างพับลิชชิ่ง แอนด์พริ้นติ้ง, 2557.

[3] ศุภวรรณ ตันตยานนท์. *เคมีกับความปลอดภัย ตอนที่ 1 อุบัติเหตุและการป้องกันอันตรายในห้องปฏิบัติการ : แนวปฏิบัติทั่วไป* [ออนไลน์]. [อ้างถึงวันที่ 30 มีนาคม 2562] เข้าถึงจาก : http://www.chemsafety.research.chula.ac.th/html/content.html.

[4] หน่วยข้อสนเทศวัตถุอันตรายและความปลอดภัย ศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. *สถิติอุบัติภัยสารเคมี (ม.ค.49 – มิ.ย.55) และบทวิเคราะห์* [ออนไลน์]. กันยายน 2555. [อ้างถึงวันที่ 6 มกราคม 2560]. เข้าถึงจาก: http://www.chemtrack.org/doc/f646.pdf

ผลกระทบของอัตราความเครียดต่อการวัดสมบัติทางกลของเหล็กเส้นเสริมคอนกรีต

The effect of strain rate on the determination of mechanical properties of steel bar for reinforced concrete

11

วีระชัย ลามอ[1*]
Werachai Lamo[1*]

บทคัดย่อ

ในการทดสอบแรงดึง มาตรฐานการทดสอบส่วนมากระบุอัตราความเครียดที่ควรปฏิบัติ เนื่องจากวัสดุจะเกิดการครากที่ระดับความแข็งแรงที่แตกต่างและมีความไวค่อนข้างต่ำต่ออัตราความเครียดสำหรับความต้านแรงดึง วัสดุที่ทดสอบตรงตามมาตรฐานการทดสอบควรให้ค่าความแข็งแรงที่เท่ากันโดยไม่คำนึงว่าห้องปฏิบัติการทดสอบใดทำการทดสอบ ความแข็งแรงของวัสดุที่แสดงอาจขึ้นอยู่อัตราความเครียดที่ใช้ จึงมีคำถามเกี่ยวข้องกับผลของอัตราความเครียดว่าความแตกต่างของอัตราความเครียดมีอิทธิพลต่อสมบัติทางกลของวัสดุที่ทำการทดสอบหรือไม่

ตามมาตรฐานการทดสอบเหล็กเส้นเสริมคอนกรีต ค่าสมบัติทางกลต่ำสุดที่แน่นอน เช่น ความเค้นคราก ความต้านแรงดึง ความยืด การลดทอนพื้นที่ และมอดุลัสยืดหยุ่น เป็นที่ต้องการทราบ ดังนั้น ห้องปฏิบัติทดสอบต้องดำเนินการเพื่อให้ได้มาข้อมูลสมบัติทางกลที่น่าเชื่อ ความน่าเชื่อสูงสุดของข้อมูลสมบัติทางกล นำสู่ความถูกต้องแม่นยำในการใช้งาน ทำให้สามารถหลีกเลี่ยงความเสียหายที่รุนแรง การทำให้เกิดการเสียชีวิต หรือค่าใช้จ่ายที่สูงในการซ่อมบำรุง

การวิจัยนี้ต้องการศึกษาผลกระทบของอัตราความเครียดที่แตกต่าง (0.000185 s^{-1}, 0.000555 s^{-1}, 0.001296 s^{-1}, 0.002222 s^{-1}, 0.011111 s^{-1}, และ 0.02963 s^{-1}) ต่อค่าสมบัติทางกล (ความเค้นคราก ความต้านแรงดึง ความยืด และการลดทอนพื้นที่) โดยพิจารณาจากความไวต่ออัตราความเครียด ($m = \Delta x/\Delta\varepsilon$) ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าอัตราความเครียดที่แตกต่างมีผลกระทบต่อค่าสมบัติทางกล ความต้านแรงดึงมีแนวโน้มลดลง (ประมาณ 13 MPa) และความเค้นครากมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น (ประมาณ 19 MPa) เมื่ออัตราความเครียดเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับความไวต่ออัตราความเครียดสำหรับความต้านแรงดึง m=-0.0024 และความไวต่ออัตราความเครียดสำหรับความเค้นคราก m=0.0045 การเพิ่มขึ้นของอัตราความเครียดมีผลต่อความเค้นครากมากกว่าความต้านแรงดึง นอกจากนั้น ความเค้นคราก (ประมาณ ±30 MPa และ ±47 MPa ตามลำดับ) และความต้านแรงดึง (ประมาณ ±60 MPa และ ±82 MPa ตามลำดับ) มีค่าความไม่แน่นอนสูงกว่าที่อัตราความเครียดต่ำสุดและอัตราความเครียดสูงสุด นอกจากนั้น ความยืดมีแนวโน้มลดลง (ประมาณ 3%) และการลดทอนพื้นที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย (ประมาณ 1%) เมื่ออัตราความเครียดเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับความไวต่ออัตราความเครียดสำหรับความยืด m=-0.0341 และความไวต่ออัตราความเครียดสำหรับการลดทอนพื้นที่ m=0.0032 เมื่ออัตราความเครียดเพิ่มสูงขึ้น ความยืดลดลงอย่างมากแตกต่างกับการลดทอนพื้นที่ที่เพิ่มขึ้นในปริมาณน้อยมากหรือแทบไม่เปลี่ยนแปลง นอกจากนั้น ความยืด (ประมาณ ±0.2%) และการลดทอนพื้นที่ (ประมาณ ±0.3%) มีค่าความไม่แน่นอนเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อย เมื่ออัตราความเครียดเพิ่มสูงขึ้น

Abstract

In tensile test, most of testing standards specify applicable strain rates because of that the materials will yield at different strength levels and are slightly sensitive to the strain rates for the tensile strength. The materials tested in according to the testing standards should present equivalent strength values without considering which test laboratory performs the tensile test. The presented material strength may depend upon the used strain rates. Therefore, the question comes up whether or not different strain rates have an effect on the mechanical properties of the tested materials.

คำสำคัญ : อัตราความเครียด ความไวต่ออัตราความเครียด สมบัติทางกล
Keywords : Strain rate, Strain rate sensitivity, Mechanical property

[1] กรมวิทยาศาสตร์บริการ กองวัสดุวิศวกรรม
*Corresponding author e-mail address: werachai@dss.go.th

Referring to the testing standard of steel bar for reinforced concrete, it is required to know definite minimum values of the mechanical properties of steel bar for reinforced concrete, such as yield strength, tensile strength, elongation, reduction of area, and elastic modulus. Therefore, testing laboratories have to test for gaining reliable mechanical property information, which will lead to the exact utilization. This can avoid severe damage, loss of life, and high expense in maintenance.

This research study aimed to study the effect of different strain rates (0.000185 s^{-1}, 0.000555 s^{-1}, 0.001296 s^{-1}, 0.002222 s^{-1}, 0.011111 s^{-1}, and 0.02963 s^{-1}) on the mechanical property values (such as yield strength, tensile strength, elongation, and reduction of area) of steel bar for reinforced concrete by considering the strain rate sensitivity ($\boldsymbol{m} = \Delta x/\Delta \varepsilon$). The experimental results showed that different strain rates had an impact on the mechanical property values. When the strain rate was increased, the tensile strength tended to decrease (around 13 MPa) and the yield strength tended to increase (around 19 MPa), according to the strain rate sensitivity for the tensile strength m=-0.0024 and the strain rate sensitivity for the yield strength m=0.0045, respectively. The increasing of the strain rate had more effect on the yield strength than the tensile strength. In addition, the uncertainties of the yield strength (about ±30 MPa และ ±47 MPa, respectively) and tensile strength (about ±60 MPa และ ±82 MPa, respectively) were higher at the minimum strain rate and the maximum strain rate. Moreover, when the strain rate was increased, the elongation tended to decrease (approximately 3%) and the reduction of area tended to slightly increase (approximately 1%), according to the strain rate sensitivity for the elongation m=-0.0341 and the strain rate sensitivity for the reduction of area m=-0.0032, respectively. When the strain rate was increased, the elongation significantly decreased. In contrast, the reduction of area slightly increased or barely changed. In addition, the uncertainties of the elongation (approximately ±0.2%) and reduction of area (approximately ±0.3%) were risen very slightly, when the strain rate was increased.

1. บทนำ (Introduction)

ความแข็งแรงของวัสดุโลหะภายใต้แรงกระทำเป็นลักษณะสำคัญที่ต้องทราบ ในอุตสาหกรรมรถยนต์ โลหะความแข็งแรงสูงถูกใช้อย่างกว้างขวางเพื่อลดน้ำหนักรถยนต์และเพิ่มความปลอดภัยแก่ผู้โดยสาร จากการวิจัยพบว่า การเสียรูปของโลหะความแข็งสูงได้รับผลกระทบจากอัตราความเครียดระหว่าง 0.001 s^{-1} ถึง 100 s^{-1} และเมื่อการเสียรูปถูกเร่งเร็วขึ้น อัตราความเครียดมีบทบาทสำคัญเพิ่มมากขึ้น [1] นอกจากนั้น อัตราความเครียดระหว่าง 0.0005 s^{-1} ถึง 0.1 s^{-1} มีอิทธิพลต่อสมบัติแรงดึงของสเตนเลส ความเค้นครากเพิ่มเมื่ออัตราความเครียดสูงขึ้น แต่ทว่าความต้านแรงดึงและความยืดค่อย ๆ ลดลงและเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในลำดับต่อมา [2] จากที่ได้กล่าว อัตราความเครียดมีผลกระทบต่อสมบัติทางกลที่ได้ การศึกษาพฤติกรรมและความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดภายใต้อัตราความเครียดที่แตกต่างจึงมีความน่าสนใจอย่างยิ่ง

มีการศึกษาจำนวนมากในพฤติกรรมความเค้น-ความเครียดของแผ่นเหล็ก DP780 ที่อัตราความเครียดต่าง ๆ จากการการทดสอบแรงดึง พบว่าความยืดของแผ่นเหล็กความหนา 1.0 mm ลดลงที่อัตราความเครียดระหว่าง 0.001 s^{-1} ถึง 0.01 s^{-1} และต่อมาเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราความเครียดเพิ่มขึ้นถึง 100 s-1 ความต้านแรงดึงเพิ่มเล็กน้อยที่อัตราความเครียดระหว่าง 0.001 s^{-1} ถึง 0.1 s^{-1} และต่อมาเพิ่มสูงเมื่ออัตราความเครียดเพิ่มขึ้นถึง 100 s-1 นอกจากนั้น ความเครียดเสียหายแท้จริงของแผ่นเหล็กความหนา 1.4 mm ลดลงที่อัตราความเครียดถึง 1 s^{-1} ต่อมาเพิ่มขึ้นที่อัตราความเครียดถึง 10 s^{-1} และลดลงอีกครั้งที่อัตราความเครียดถึง 200 s-1 ความต้านแรงดึงเพิ่มขึ้นที่อัตราความเครียดระหว่าง 0.1 s^{-1} ถึง 100 s^{-1} ยิ่งกว่านั้น ความเครียดเสียหายและความต้านแรงดึงของแผ่นความหนา 1.56 mm ลดลงที่อัตราความเครียดระหว่าง 0.001 s^{-1} ถึง 0.1 s^{-1} และต่อมาเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราความเครียดเพิ่มสูงถึง 1,500 s^{-1} ความเข้าใจในบทบาทของอัตราความเครียดต่อพฤติกรรมความเค้น-ความเครียด อาจเป็นตัวช่วยสำคัญในการทำนายประสิทธิภาพของแผ่นเหล็กในการใช้งาน [3]

ความไวต่ออัตราความเครียด ($\boldsymbol{m} = \Delta x/\Delta \varepsilon$) เป็นพารามิเตอร์หนึ่งที่สำคัญ สามารถใช้อธิบายการวัดความเค้นไหลของกระบวนการเสียรูป ความไวต่ออัตราความเครียดขึ้นอยู่กับอัตราความเครียด [4] การปฏิบัติการทดสอบแรงดึงที่อัตราความเครียดกึ่งคงที่ (น้อยว่า 0.01 s^{-1}) และพลวัต (600, 1, 100 และ 1,500 s^{-1}) แสดงให้เห็นความไวต่ออัตราความเครียดเป็นลบที่อัตราความเครียดกึ่งคงที่ และความไวต่ออัตราความเครียดเป็นบวกเล็กน้อยที่อัตราความเครียดพลวัต เนื่องจากกลไกความเสียหายที่แตกต่างเกิดขึ้น ดังนั้น ข้อมูลของความไวต่ออัตราความเครียดที่แตกต่างอาจให้ข้อมูลที่สำคัญในการอธิบายกลไกการเสียรูป [5]

เหล็กเสริมคอนกรีตเป็นวัสดุโลหะหนึ่งที่สำคัญที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในงานก่อสร้าง ซึ่งถูกใช้ในการรับแรงดึงเป็นหลัก ตามมาตรฐานในปัจจุบันที่เกี่ยวข้อง ค่าสมบัติทางกลต่ำสุดที่แน่นอน เช่น ความเค้นคราก ความต้านแรงดึง ความยืด และมอดุลัสยืดหยุ่นเป็นที่ต้องการทราบ การผันแปรของสมบัติทางกลต่าง ๆ เนื่องจาก

อัตราความเครียด เป็นสิ่งที่ห้องปฏิบัติการต่าง ๆ ควรให้ความสำคัญอย่างยิ่ง เพื่อการให้ได้มาของข้อมูลสมบัติทางกลที่น่าเชื่อถือ ความน่าเชื่อได้สูงสุดของข้อมูลสมบัติทางกลที่ได้นำไปสู่ความถูกต้องแม่นยำในการใช้งาน กล่าวอีกอย่างหนึ่ง ข้อมูลสมบัติทางกลที่น่าเชื่อถือ ทำให้สามารถหลีกเลี่ยงความเสียหายที่รุนแรง การทำให้เกิดการเสียชีวิต และค่าใช้จ่ายที่สูงในการซ่อมบำรุงได้

2. วิธีการวิจัย (Experimental methods)

การวัดทางการทดลองต่อไปนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อพิสูจน์ผลกระทบของการให้แรงกระทำต่อชิ้นทดสอบโดยการควบคุมอัตราความเครียดที่แตกต่าง ต่อค่าของสมบัติทางกลของเหล็กเส้นเสริมคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบแรงดึง

2.1 ชิ้นทดสอบ เตรียมอย่างแม่นยำตามมาตรฐานISO6892-1: 2009 ให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.9 มม. ความยาวพิกัด 45 มม. และความยาว 150 มม. นอกจากนั้น ชิ้นทดสอบทั้งหมดถูกเตรียมเหมือน ๆ กันจากเหล็กเส้นเสริมคอนกรีต

2.2 การทดสอบแรงดึง ดำเนินการทดสอบสอบแรงดึงโดยใช้เครื่องทดสอบ Universal testing machine : SHIMADZU รุ่นUH-F500kNI ที่อุณหภูมิห้อง โดยอ้างอิงมาตรฐานการทดสอบแรงดึงที่ได้รับการยอมรับ ISO 6892-1 : 2009 เพื่อลดความผันแปรของข้อมูลที่จะได้ ในแต่ละเงื่อนไขการทดสอบ ทำการทดสอบจำนวน 3 ชิ้น

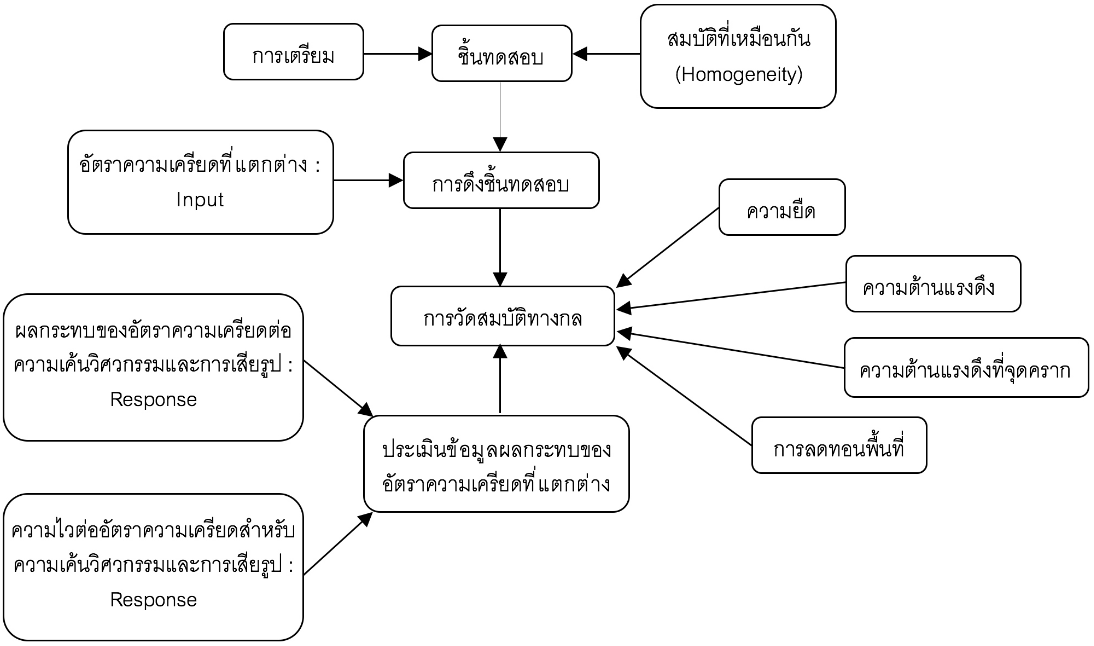
2.3 ในการทดสอบแรงดึง ทำการควบคุมอัตราความเครียดที่แตกต่าง 0.000185 s^{-1}, 0.000555 s^{-1}, 0.001296 s^{-1}, 0.002222 $^{-1}$, 0.011111 s^{-1}, และ 0.02963 s^{-1} โดยกำหนดความเร็วของเครื่องทดสอบให้เท่ากับอัตราความเครียดด้วยการใช้อัตราการแยกห่างจากกันของหัวจับ $v_C = L_C \dot{e}_{L_C}$ เมื่อ $\dot{e}_{L_C}$ คือ อัตราความเครียดโดยประมาณของความยาวส่วนขนาน และ L_C คือ ความยาวส่วนขนาน

3. ผลและวิจารณ์ (Results and discussion)

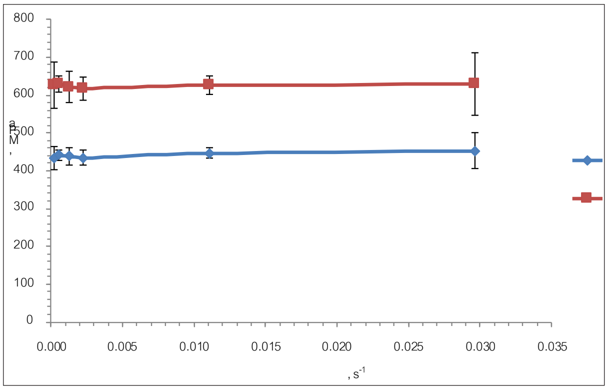
อัตราความเครียดเป็นปัจจัยที่สำคัญที่ต้องพิจารณาเมื่อทำการทดสอบสมบัติทางกลของเหล็กเส้นเสริมคอนกรีตจากการทดสอบแรงดึง อัตราความเครียดที่ระดับต่าง ๆ มีผลต่อพฤติกรรมของความเค้น-ความเครียด และการเปลี่ยนแปลงของสมบัติทางกล

3.1 ความแข็งแรงสำหรับเหล็กเส้นเสริมคอนกรีต

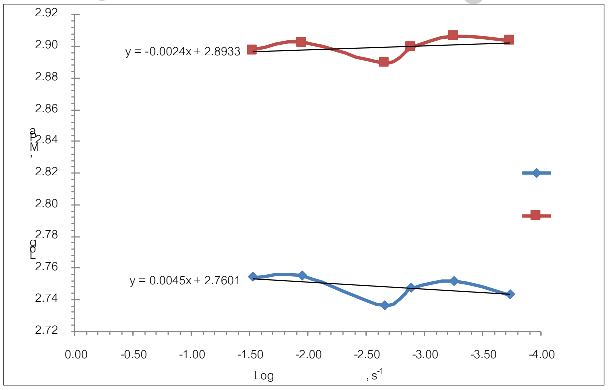
ความต้านแรงดึงและความเค้นครากมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการเพิ่มอัตราความเครียด (รูปที่ 2) ความต้านแรงดึง (จากประมาณ 629 MPa ถึง 616 MPa) มีแนวโน้มลดลง และความเค้นคราก (จากประมาณ 433 MPa ถึง 452 MPa) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราความเครียดเพิ่มขึ้นจาก 0.000185 s^{-1} ถึง 0.02963 s^{-1} พบว่าการเพิ่มอัตราความเครียดมีผลต่อการเพิ่มของความเค้นคราก ประมาณ 19 MPa มากกว่าการลดของความต้านแรงดึง ประมาณ 13 MPa สอดคล้องกับความไวต่ออัตราความเครียดสำหรับความเค้นคราก m=0.0045 และความไวต่ออัตราความเครียดสำหรับความต้านแรงดึง m=-0.0024 (รูปที่ 3) นอกจากนั้น พบว่าเมื่ออัตราความเครียดเพิ่มขึ้นไม่มากในช่วงต่ำ 0.000185 s^{-1} ถึง 0.00222 s^{-1} ความเค้นครากเพิ่มขึ้นไม่มากเช่นเดียวกัน จากประมาณ 433 MPa ถึง 441 MPa แต่ทว่า ต่อมาเมื่ออัตราความเครียดเพิ่มสูงขึ้นมากในช่วงสูง 0.00222 s^{-1} ถึง 0.02963 s^{-1} ความเค้นครากเพิ่มขึ้นมากเช่นเดียวกัน จากประมาณ



รูปที่ 1 กระบวนการทดลองสำหรับการวัดผลกระทบของอัตราความเครียดต่อค่าสมบัติทางกล



รูปที่ 2 ผลกระทบของอัตราความเครียดต่อความเค้นวิศวกรรม

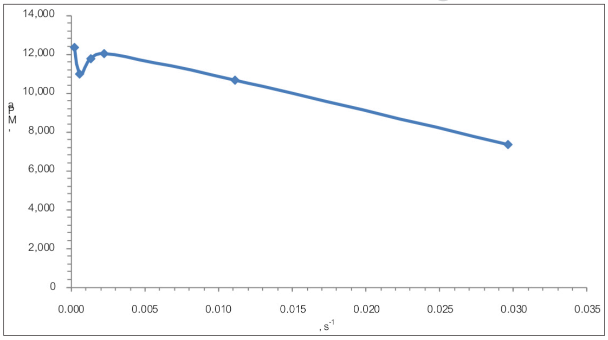


รูปที่ 3 การเปลี่ยนแปลงของ Log ความเค้นแท้จริงเนื่องจากการเพิ่ม Log อัตราความเครียด

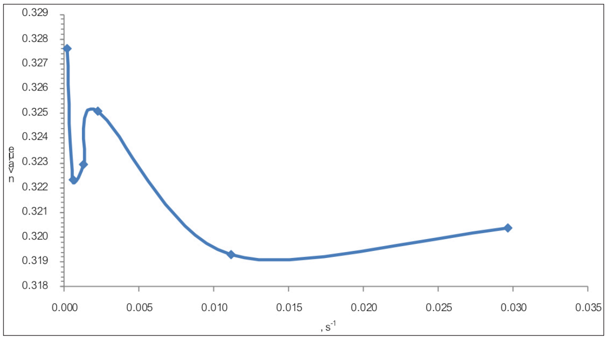
441 MPa ถึง 453 MPa ในความแตกต่าง ความต้านแรงดึงมีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่ออัตราความเครียดเพิ่มขึ้นจากช่วงต่ำสู่ช่วงสูง ยิ่งกว่านั้น เมื่อพิจารณาความไม่แน่นอน พบว่าที่อัตราความเครียดต่ำสุด 0.000185 s^{-1} และอัตราความเครียดสูงสุด 0.02963 s^{-1} ความไม่แน่นอนของความเค้นครากเกิดขึ้นสูง (ประมาณ ±30 MPa และ ±47 MPa ตามลำดับ) และความไม่แน่นอนของความต้านแรงดึงเกิดขึ้นสูง (ประมาณ ±60 MPa และ ±82 MPa ตามลำดับ)

จุดครากกำหนดเป็นจุดที่ปริมาณการเสียรูปแบบถาวรเกิดขึ้น จุดครากมีความสำคัญอย่างมากสำหรับการกำหนดความแข็งแรงของโลหะ เนื่องจากจุดครากแสดงขีดจำกัดบนสู่การเสียรูปแบบถาวร หรือคือความเครียดสูงสุดที่โลหะสามารถรับได้โดยปราศจากการเสียรูปแบบถาวร ความแข็งแรงของโลหะค่อย ๆ ลดลงในตอนแรก เนื่องจากการเพิ่มมากขึ้นของจุดบกพร่อง ต่อมาเมื่อการเสียรูปเข้าสู่ขอบเขตถาวร การเสียรูปแบบถาวรทำให้การเรียงตัวของโครงสร้างเปลี่ยนแปลงอย่างถาวร โลหะจะค่อย ๆ ไหลผ่านโครงข่ายผลึกโดยการเคลื่อนตัวของอะตอม การรวมตัวของจุดบกพร่องเล็ก ๆ เช่น รอยแตกเล็ก ๆ การเคลื่อนตัวของอะตอม รู และแยกตัวของพันธะ ระหว่างการเสียรูปแบบถาวรจะค่อย ๆ ลดความแข็งแรงของโลหะ ดังนั้น การเพิ่มขึ้นของความเค้นครากเมื่ออัตราความเครียดเพิ่มขึ้น สามารถสันนิษฐานได้ว่า ที่อัตราความเครียดต่ำโครงสร้างไหลผ่านโครงข่ายผลึกโดยการเคลื่อนตัวของอะตอม มีเวลามากพอสำหรับโครงข่ายผลึกจะสามารถเรียงตัวอย่างกันได้อย่างสม่ำเสมอ ในความแตกต่างที่อัตราความเครียดสูง โครงสร้างไหลผ่านโครงข่ายผลึกโดยการเคลื่อนตัวของอะตอมในความเร็วที่สูงขึ้น ทำให้เกิดการเรียงตัวของโครงข่ายผลึกที่ไม่สม่ำเสมอ การเคลื่อนตัวของอะตอมเกิดการซ้อนตัวที่สูงขึ้นบริเวณขอบเกรน ทำให้เกิดการต้านทานของเกรนที่สูงขึ้นหรือมีอุปสรรคมากขึ้น เป็นสาเหตุให้ต้องใช้แรงที่มากขึ้นในการทำให้อะตอมเคลื่อนที่ผ่านอุปสรรค หรือต้องใช้แรงที่มากขึ้น สอดคล้องกับความเค้นครากที่สูงขึ้นเมื่ออัตราความเครียดเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับ [2] การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลจากอัตราความเครียดอธิบายได้จากประเด็นการเคลื่อนตัวของอนุภาค เป็นที่รู้กันดีว่าโลหะมีความสามารถการแข็งแรงที่สูงเนื่องจากความหนาแน่นการเคลื่อนตัวของอนุภาค การเลื่อนของการเคลื่อนตัวควบคุมการเพิ่มขึ้นของความเค้นไหลระหว่างการเสียรูปจากการดึงเริ่มต้น เพื่อที่จะรักษาอัตราความเครียดที่ให้ที่สูงขึ้น ความเร็วการเคลื่อนตัวของอนุภาคเฉลี่ยจึงต้องการความเค้นไหลที่เพิ่มขึ้นในเวลาเดียวกัน ดังนั้น ความเค้นครากจึงเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เมื่ออัตราความเครียดเพิ่มสูงขึ้น

นอกจากนั้น เมื่อเลยจุดครากหรือการเสียรูปเข้าสู่ขอบเขตถาวรมากขึ้น การเสียรูปแบบถาวรทำให้การเรียงตัวของโครงสร้างเปลี่ยนแปลงอย่างถาวร โลหะจะค่อย ๆ ไหลผ่านโครงข่ายผลึกโดยการเคลื่อนตัวของอะตอม การรวมตัวของจุดบกพร่องเล็ก ๆ เช่น รอยแตกเล็ก ๆ การเคลื่อนตัวของอะตอม รู และแยกตัวของพันธะ ระหว่างการเสียรูปแบบถาวรจะค่อย ๆ ลดความแข็งแรงของโลหะ โลหะจะสูญเสียความสามารถต้านทานต่อความเค้นที่กระทำ นอกจากนั้น การแตกร้าวยังขึ้นอยู่กับความแข็งแรงการยึดเกาะของโมเลกุล และแรงยึดตัวของรอยแตกของโลหะ การแตกร้าวจะเกิดขึ้นเมื่อความเค้นสูงสุดเพิ่มสูงขึ้นถึงค่าวิกฤติ ดังนั้น การลดลงของความต้านแรงดึงเมื่ออัตราความเครียดเพิ่มขึ้น สามารถสันนิษฐานได้ว่า ที่อัตราความเครียดสูง การแตกร้าวและการแยกตัวของระหว่างผิวหน้าของอะตอมหรืออนุภาค และการแตกของอนุภาค ทำให้เกิดช่องว่างและรอยแตก ความไม่ต่อเนื่องในรูปของช่องว่างและรอยแตกที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่า เกิดขึ้นสูง สอดคล้องการลดลงของมอดุลัสยืดหยุ่นที่ลดลงมากขึ้นเมื่ออัตราความเครียดเพิ่มขึ้น เห็นได้จากรูปที่ 4 นอกจากนั้น การเสียรูปแบบถาวรเพิ่มสูงขึ้น การเคลื่อนของขอบเกรนจะผ่านอุปสรรคที่สูงขึ้นจากการซ้อนตัวของอะตอม รู้จักกันในชื่อความเครียดแข็งตัว (Strain hardening, η) ค่า η ควบคุมปริมาณความเครียดถาวรแบบสม่ำเสมอซึ่งวัสดุประสบก่อนการอ่อนตัวลงแบบเฉพาะที่ (Strain Localization) การเกิดคอคอด และการแตกหัก [6] ดัชนีความเครียดแข็งตัวที่สูงกว่าแสดงว่ามีความเครียดแข็งตัวที่มากกว่า ดัชนีความเครียดแข็งตัวเกี่ยวข้องกับการรวมตัวในวัสดุที่แข็งตัวแบบเส้นตรง ผลกระทบ



รูปที่ 4 การเปลี่ยนแปลงของมอดุลัสยืดหยุ่นเนื่องจากการเพิ่มอัตราความเครียด



รูปที่ 5 การเปลี่ยนแปลงของ n value เนื่องจากการการเพิ่มอัตราความเครียด

ของความเครียดแข็งตัวต่อการรวมตัวเกี่ยวข้องกับความแตกต่างของความแข็งระหว่างบริเวณที่เสียรูปซึ่งกำลังแข็งขึ้นจากการเสียรูปแบบถาวร และบริเวณที่ไม่เสียรูปซึ่งกำลังจำกัดวงการเสียรูปแบบถาวร เห็นได้จากรูปที่ 5 มีค่าลดลงที่อัตราความเครียดสูง หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง ที่อัตราความเครียดสูง เกรนจะถูกทำลายมากขึ้น ทำให้การเคลื่อนตัวของขอบเกรนผ่านอุปสรรคที่น้อยลง เหตุผลดังกล่าวสอดคล้องกับการลดลงของความต้านแรงดึงเมื่ออัตราความเครียดเพิ่มขึ้น

ยิ่งกว่านั้น การกำเนิดของจุดบกพร่องถูกเร่งให้เกิดระหว่างการเสียรูปโดยการปรากฏขึ้นของโครงสร้างย่อยการเคลื่อนที่ (Dislocation) และการเติบโตของอนุภาคมีการขยายใหญ่เร็วขึ้นกว่าในสภาพอยู่นิ่ง เนื่องจากสัมประสิทธิ์การกระจายที่เพิ่มโดยกลไกการกระจายของแกนกลางในการปรากฏขึ้นของความพัวพันการเคลื่อนที่ อย่างไรก็ตาม การเสียรูปที่เกิดอาจลดจำนวนนิวเคลียสและอนุภาคยึดเกาะ เนื่องจากการตัดผ่านจากการเคลื่อนที่มีจำนวนมากและการละลายของนิวเคลียสขนาดวิกฤตย่อย อนุภาคที่ใหญ่ที่กำเนิดในชิ้นทดสอบอาจขยายใหญ่เร็วขึ้น เนื่องจากผลของการอิ่มตัวที่มากเกินของเมทริกซ์ กลไกดังกล่าวข้างต้นของการขยายใหญ่ของอนุภาคที่ถูกชักนำจากความเครียดอาจทำงานเป็นพิเศษระหว่างการเสียรูปแบบไม่สม่ำเสมอ ระหว่างปริมาณวัสดุที่ถูกแบ่งเป็นพื้นที่ที่ทำงานและพื้นที่ที่ไม่ทำงาน สลับสับเปลี่ยนกันระหว่างการเสียรูป [4] ดังนั้น สันนิษฐานได้ว่า การลดลงของความต้านแรงดึงที่อัตราความเครียดสูงได้รับอิทธิพลจากกระบวนการดังกล่าวที่เกิดมากขึ้นเมื่อวัสดุถูกให้ความเครียด โดยทั่วไป พลังงานกลที่นำสู่ชิ้นทดสอบโดยการเสียรูปแบบถาวรเกือบ 90% ถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน ส่วนที่เหลือของพลังงานกลถูกเก็บในรูปของพลังงานยืดหยุ่นของการเคลื่อนที่ [2] นอกจากอุณหภูมิเพิ่มขึ้นยังได้รับผลจากความร้อนที่เปลี่ยนรูปและการกระจายความร้อนโดยการนำความร้อน ในกรณีที่อัตราความเครียดต่ำ เวลาของการนำความร้อนยาวนานและการกระจายความร้อนเข้าใกล้การกำเนิดความร้อนโดยไม่มีความร้อนถ่ายเทเข้า-ออกจากระบบ และไม่มีการเปลี่ยนรูปมาร์เทนไซต์ ดังนั้น การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในชิ้นทดสอบไม่สูงขึ้นมาก ในทางตรงกันข้าม การกำเนิดความร้อนสูงขึ้นมากกว่าการกระจายความร้อนที่อัตราความเครียดสูง ส่งผลให้อุณหภูมิชิ้นทดสอบเพิ่มสูงขึ้นสูงชัดเจน ด้วยอุณหภูมิที่สูงขึ้น ขนาดของเกรนจะหยาบขึ้นจากกลไก Hall-Petch และขนาดของเกรนจะใหญ่ขึ้น ด้วยเกรนที่เปลี่ยนแปลงดังกล่าวมีอิทธิพลต่อการลดลงของความเค้น นอกจากนั้น พบว่าความหนาแน่นของแถบเลื่อนตัวจุดตัดของแถบเพิ่ม และมาร์เทนไซต์สูงขึ้น เมื่ออัตราความเครียดเพิ่มขึ้น [7] จากเหตุผลที่กล่าวมาสนับสนุนพฤติกรรมการลดลงของความต้านแรงดึงเมื่ออัตราความเครียดเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนั้น คำอธิบายการลดลงความต้านแรงดึงเมื่ออัตราความเครียดเพิ่มสูงขึ้นอาจอ้างอิงแนวคิดกลไกความเสียหาย ปรากฏการณ์ของความไวต่ออัตราความเครียดสามารถอธิบายโดยการรวมทฤษฎี Griffith และแนวคิดการขยายใหญ่ของรอยแตกวิกฤตย่อยตามทฤษฎี Griffith ความเสียหายในวัสดุเปราะเกิดขึ้นเมื่อตำหนิมีขนาดเกินขนาดวิกฤตความเค้นที่ให้ ถ้าให้ภาระที่อัตราความเครียดต่ำ ขนาดตำหนิวิกฤตย่อยมีเวลาขยายใหญ่ ดังนั้น ความเสียหายเกิดขึ้นที่ค่าภาระต่ำ อย่างไรก็ตาม ถ้าให้ภาระที่อัตราความเครียดสูง มีเวลาเล็กน้อยหรือไม่มีเวลามากพอสำหรับการขยายใหญ่ของตำหนิวิกฤตย่อย วัสดุสามารถไปถึงภาระที่สูงกว่าก่อนความเสียหายเกิดขึ้น

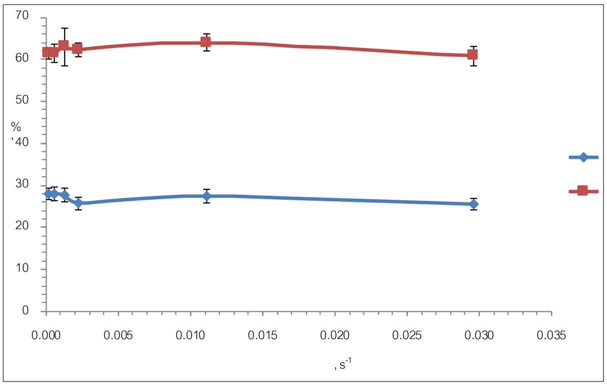
3.2 การเสียรูปสำหรับเหล็กเส้นเสริมคอนกรีต

ความยืดและการลดทอนพื้นที่มีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการเพิ่มอัตราความเครียด (รูปที่ 6) ความยืด (จากประมาณ 28% ถึง 25%) มีแนวโน้มลดลง และการลดทอนพื้นที่ (จากประมาณ 61% ถึง 62%) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราความเครียดเพิ่มขึ้นจาก 0.000185 s^{-1} ถึง 0.02963 s^{-1} พบว่า การเพิ่มอัตราความเครียดมีผลต่อการลดลงของความยืดประมาณ 3 % และเพิ่มขึ้นของการลดทอนพื้นที่ประมาณ 1% สอดคล้องกับความไวต่ออัตราความเครียดสำหรับความยืด m=-0.0341 และความไวต่ออัตราความเครียดสำหรับการลดทอนพื้นที่ m=0.0032 (รูปที่ 7) นอกจากนั้น พบว่าเมื่ออัตราความเครียดเพิ่มขึ้นไม่มากในช่วงต่ำ 0.000185 s^{-1} ถึง 0.00222 s^{-1} ความยืดลดลงไม่มาก จากประมาณ 28% ถึง 27% แต่ทว่าต่อมาเมื่ออัตราความเครียดเพิ่มสูงขึ้นมากในช่วงสูง 0.00222 s^{-1}

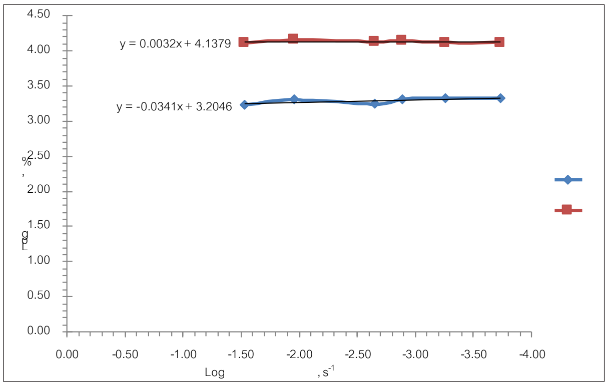
ถึง 0.02963 s^{-1} ความยืดลดลงมากขึ้น จากประมาณ 27% ถึง 25% สอดคล้องกับ [5] ความไวต่ออัตราความเครียดที่เป็นลบส่งให้เกิดสภาพที่เหมาะสมสำหรับการอ่อนตัวลงแบบเฉพาะที่ลดปริมาณความเครียดที่ต้องการสำหรับการขยายใหญ่ของช่องว่าง การลดลงของความยืดจากอัตราความเครียดที่เพิ่มขึ้นอาจเป็นไปได้เพราะความเครียดที่ต่ำกว่าเป็นที่ต้องการสำหรับการขยายใหญ่ภายในบริเวณแถบเฉือน ในส่วนของการลดทอนพื้นที่ เมื่ออัตราความเครียดเพิ่มขึ้นในช่วงต่ำและช่วงสูง การลดทอนพื้นที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในปริมาณน้อยมาก ๆ หรือแทบไม่เปลี่ยนแปลง ยิ่งกว่านั้น เมื่อพิจารณาความไม่แน่นอน พบว่าที่อัตราความเครียดเพิ่มสูงขึ้น ความไม่แน่นอนของความยืดและการลดทอนพื้นที่เพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อย (ประมาณ ±0.2% และ ±0.3% ตามลำดับ)

โดยทั่วไป ความเหนียวมีความเกี่ยวข้องกับการเกิดขึ้น การขยายใหญ่ และการรวมตัวของช่องว่าง และการแตกหักของวัสดุ [8] เมื่อวัสดุถูกกระทำให้เสียรูปอย่างต่อเนื่อง การหลุดออกจากกันและการแตกหักของโครงสร้างจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ส่งผลต่อการเกิดขึ้นของการขยายใหญ่ของช่องว่าง ดังนั้น การเพิ่มขึ้นของความเครียดส่งผลต่อการเพิ่มปริมาณช่องว่าง ปริมาณช่องว่างที่เพิ่มขึ้นระหว่างการเสียรูปอย่างต่อเนื่องมีผลต่อการลดลงของความเหนียว นอกจากนั้น ความเหนียวมีความเกี่ยวข้องกับปัจจัยต่าง ๆ ทั้งภายนอก เช่น โพรงและการรวมของอนุภาคประกอบ และภายใน เช่น การขาดแคลนของการแข็งตัว และความไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ที่กล่าวมาเป็นปัจจัยที่ทำให้ความเหนียวของวัสดุลดลง ดังนั้น ความเหนียวมีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง [9] นอกจากนั้น ระหว่างการเสียรูปจากแรงดึง ขนาดรอยบุ๋มบนผิวหน้าที่แตกหักเปลี่ยนแปลงอย่างมากขึ้นอยู่กับอัตราความเครียด [2] ที่อัตราความเครียดที่สูงขึ้น ความหนาแน่นของรอยบุ๋มจะต่ำลง ในขณะที่ขนาดของรอยบุ๋มใหญ่ขึ้น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอัตราความเครียด โครงข่ายของรอยบุ๋มขนาดเล็กถูกแทนที่โดยรอยบุ๋มขนาดใหญ่ ทำให้ความหนาแน่นของรอยบุ๋มขนาดเล็กลดลง สอดคล้องกับการลดลงของความยืด ดังนั้น การลดลงของความยืดเมื่ออัตราความเครียดเพิ่มขึ้นสามารถสันนิษฐานได้ทำนองเดียวกันกับการลดลงของความต้านแรงดึงเมื่ออัตราความเครียดเพิ่มขึ้นที่อัตราความเครียดสูง การแตกร้าวและการแยกตัวของระหว่างผิวหน้าของอะตอมหรืออนุภาคและการแตกของอนุภาค ทำให้เกิดช่องว่างและรอยแตก ความไม่ต่อเนื่องในรูปของช่องว่าง และรอยแตกที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่าจะเกิดขึ้นสูงกว่า นอกจากนั้น สามารถอธิบายเพิ่มเติมได้จากที่อัตราความเครียดสูง ขนาดของช่องว่างที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่าต่าง ๆ เชื่อมต่อกันเป็นช่องว่างที่มีขนาดใหญ่ขึ้น กล่าวอีกนัยหนึ่ง ช่องว่างที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่าต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นกระจัดกระจายทั่วบริเวณผิวหน้าและมีจำนวนมากในตอนแรกมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากช่องว่างดังกล่าวรวมตัวกันเป็นโครงข่าย ก่อตัวเป็นช่องว่างที่มองเห็นด้วยตาเปล่า เป็นสาเหตุเหตุทำให้ความยืดลดลงเมื่ออัตราความเครียดเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับ [10] รายงานว่าความเหนียวมีค่าต่ำเมื่อจุดบกพร่องมีขนาดใหญ่

นอกจากนั้น ดัชนีความเครียดแข็งตัว η เกี่ยวข้องกับการรวมตัวในวัสดุที่แข็งตัวแบบเส้นตรง ผลกระทบของความเครียดแข็งตัวต่อการรวมตัวเกี่ยวข้องกับความแตกต่างของความแข็งระหว่างบริเวณที่เสียรูปซึ่งกำลังแข็งขึ้นจากการเสียรูปแบบถาวร และบริเวณที่ไม่เสียรูปซึ่งกำลังจำกัดวงการเสียรูปแบบถาวร กล่าวอีกนัยหนึ่ง กลไกการอ่อนตัวลงซึ่งเป็นปรากฏการณ์แบบเฉพาะที่ (Strain localization) ขึ้นอยู่กับดัชนีความเครียดแข็ง η อย่างมาก ค่าที่น้อยของดัชนีความเครียดแข็งชี้ให้เห็นกลไกการอ่อนตัวลงซึ่งเป็นปรากฏการณ์แบบเฉพาะที่ที่สูง [11] และเกี่ยวข้องกับความเหนียวที่สูงของวัสดุ จะเห็นได้จากผลการทดลอง (รูปที่ 5) ดัชนีความเครียดแข็ง η ลดลงที่อัตราความเครียดสูง แสดงให้เห็นว่าที่อัตราความเครียดสูง เกิดกลไกการอ่อนตัวลงซึ่งเป็นปรากฏการณ์แบบเฉพาะที่ที่สูงกว่า ซึ่งสอดคล้องกับความยืดที่ลดลงเมื่ออัตราความเครียดเพิ่มขึ้น เมื่อวัสดุถูกให้ความเครียด โดยทั่วไปพลังงานกลที่นำสู่ชิ้นทดสอบโดยการเสียรูปแบบถาวรเกือบ 90% ถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน ส่วนที่เหลือของพลังงานกลถูกเก็บในรูปของพลังงานยืดหยุ่นของ dislocation นอกจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ยังได้รับผลจาก



รูปที่ 6 ผลกระทบของอัตราความเครียดต่อการเสียรูป



รูปที่ 7 การเปลี่ยนแปลงของ Log การเสียรูปเนื่องจากการเพิ่ม Log อัตราความเครียด

ความร้อนจากการเปลี่ยนรูปและการกระจายความร้อนโดยการนำความร้อน ในกรณีที่อัตราความเครียดต่ำ เวลาของการนำความร้อนยาวนานและการกระจายความร้อนเข้าใกล้การกำเนิดความร้อนโดยไม่มีความร้อนถ่ายเทเข้า-ออกจากระบบและไม่มีการเปลี่ยนรูปมาร์เทนไซต์ ดังนั้น การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในชิ้นทดสอบไม่สูงขึ้นมาก [2] ในทางตรงกันข้าม การกำเนิดความร้อนสูงขึ้นมากกว่าการกระจายความร้อนที่อัตราความเครียดสูง ส่งผลให้อุณหภูมิของชิ้นทดสอบแรงดึงเพิ่มขึ้นสูงอย่างชัดเจน ด้วยอุณหภูมิที่สูงขึ้นนี้ ขนาดของเกรนเปลี่ยนแปลงหยาบขึ้นจากกลไกแบบ Hall-Petch และขนาดของเกรนใหญ่ขึ้น เกรนที่เปลี่ยนแปลงดังกล่าวมีอิทธิพลต่อการลดลงของความเค้นและความเหนียว [12] และ [5] นอกจากนั้น มีการรายงานว่าโครงสร้างที่หยาบจะเสียหายอย่างไม่เป็นเนื้อเดียวกันหรือไม่สม่ำเสมอ และทำให้เกิดปรากฏการณ์แบบเฉพาะที่ของการไหล (Flow localization) ในแถบการเลื่อนที่แคบซึ่งจำกัดความเหนียว [13] จากเหตุผลที่กล่าวมาสนับสนุนพฤติกรรมการลดลงของความยืด เมื่ออัตราความเครียดเพิ่มสูงขึ้น

4. สรุป (Conclusion)

4.1 ความต้านแรงดึงและความเค้นครากของเหล็กเส้นเสริมคอนกรีตมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการเพิ่มอัตราความเครียด ความต้านแรงดึงมีแนวโน้มลดลง (ความไวต่ออัตราความเครียด m=-0.0024) และความเค้นครากมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น (ความไวต่ออัตราความเครียด m=0.0045) เมื่ออัตราความเครียดเพิ่มขึ้นและการเพิ่มอัตราความเครียดมีผลต่อความเค้นคราก (ประมาณ 19 MPa) มากกว่าความต้านแรงดึง (ประมาณ 13 MPa) ความเค้นครากเพิ่มขึ้นมากเมื่อมีการเพิ่มอัตราความเครียดสู่ช่วงสูง ในความแตกต่าง ความต้านแรงดึงมีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่ออัตราความเครียดเพิ่มขึ้นจากอัตราความเครียดต่ำสู่อัตราความเครียดสูง นอกจากนั้น ความเค้นคราก (ประมาณ ±30 MPa และ ±47 MPa ตามลำดับ) และความต้านแรงดึง (ประมาณ ±60 MPa และ ±82 MPa ตามลำดับ) มีค่าความไม่แน่นอนสูงกว่าที่อัตราความเครียดต่ำสุด 0.000185 s^{-1} และอัตราความเครียดสูงสุด 0.02963 s^{-1}

4.2 ความยืดและการลดทอนพื้นที่มีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากอัตราความเครียดที่แตกต่าง ความยืดมีแนวโน้มลดลงประมาณ 3% (ความไวต่ออัตราความเครียด m= -0.0341) และการลดทอนพื้นที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นประมาณ 1% (ความไวต่ออัตราความเครียด m=0.0032) เมื่ออัตราความเครียดเพิ่มขึ้น ความยืดลดลงไม่มากในช่วงอัตราความเครียดต่ำ แต่ความยืดลดลงมากขึ้นเมื่ออัตราความเครียดเพิ่มสูงขึ้น ในส่วนของการลดทอนพื้นที่ การลดทอนพื้นที่เพิ่มขึ้นในปริมาณน้อยมากหรือแถบไม่เปลี่ยนแปลงเมื่ออัตราความเครียดเพิ่มขึ้นจากช่วงต่ำสู่ช่วงสูง นอกจากนั้น ความยืด (ประมาณ ±0.2%) และการลดทอนพื้นที่ (ประมาณ ±0.3%) มีค่าความไม่แน่นอนเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อย เมื่ออัตราความเครียดเพิ่มสูงขึ้น

5. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

ขอขอบคุณกลุ่มวัสดุก่อสร้าง กองวัสดุวิศวกรรม กรมวิทยาศาสตร์บริการ ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการศึกษาวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

[1] HUH, J., H. HUH and C. S. LEE. Effect of strain rate on plastic anisotropy of advanced high strength steel sheets. *International Journal of Plasticity*. May, 2013, **44**, 23-46.

[2] LI, X., J. CHEN, L. YE, W. DING and P. SONG, Influence of strain rate on tensile characteristics of SUS304 metastable austenitic stainless steel. *ACTA Metallurgica Sinica*. 2013, **26**(6), 657-662.

[3] ANDERSON, D., S. WINKLER, A. BARDELCIK and M. J. WORSWICK. Influence of triaxiality and strain rate on the failure behaviour of a dual-phase DP780 steel. *Materials & Design*. August, 2014, **60**, 198-207.

[4] BLAZ, L. and E. EVANGELISTA. Strain rate sensitivity of hot deformed Al and AlMgSi alloy. *Materials Science and Engineering: A*. 1996, **207**(2), 95-201.

[5] HADIANFARD, M. J., R. SMERD, S. WINKLER and M.WORSWICK. Effects of strain rate on mechanical properties and failure mechanism. *Materials Science and Engineering: A*. 2008, **492**(1-2), 283-292.

[6] LUO, J., M. Li, W. Yu and H. Li. The variation of strain rate sensitivity exponent and strain hardening exponent in isothermal compression of Ti-6Al-4V alloy. *Materials & Design*. 2010, **31**(2), 741-748.

[7] LICHTENFELD, J. A., M. C. MATAYA and C. J. VAN TYNE. Effect of strain rate on stress-strin behavior of alloy 309 and 304L austenitic stainless stainless steel. *Metallurgical and Materials Transactions: A*. 2006, **37**(1), 147-161.

[8] ZHOU, F., J. N. WANG and J. S. LIAN. An investigation of the plastic failure of spheroidized steels. *Materials Science and Engineering: A*. 2002, **332**(1-2), 117-122.

[9] FAN, G. J., L. F. FU, H. CHOO, P. K. LIAW and N. D. BROWNING. Uniaxial tensile plastic deformation and grain growth of bulk nanocrystalline alloys. *Acta Materialia*. 2006, **54**(18), 4781-4792.

[10] NILSSON, K. F and V. VOKAL. Analysis of ductile cast iron tensile tests to relate ductility variation to casting defects and material microstructure, *Materials Science and Engineering: A*. 2009, **502**(1-2), 54-63.

[11] BACHA, A., D. DANIEL and H. KLOCKER. On the determination of true stress triaxiality in sheet metal. *Journal of Materials Processing Technology*. 2007, **184**(1-3), 272-287.

[12] PUTATUNDA, S. K. Fracture toughness of a high carbon and high silicon steel. *Materials Science and Engineering: A*. 2001, **297**(1–2), 31-43.

[13] ELWAZRI, A. M., P. WANJARA and S. YUE. The effect of microstructural characteristics of pearlite on the mechanical properties of hypereutectoid steel. *Materials Science and Engineering: A*. 2005, **404**(1–2), 91-98.

การเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการเห็ดนางรมด้วยวัสดุเหลือทิ้งกากกาแฟ

Increasing nutrition of oyster mushrooms using waste coffee grounds

12

นงลักษณ์ บรรยงวิมลณัฐ[1], จิราภรณ์ บุราคร[1*], สุพะไชย์ จินดาวุฒิกุล[1], อภิรัชต์ สมฤทธิ์[2]
Nonglug Bunyovimonnat[1], Jiraporn Burakron [1*], Supachai Jindavutikul[1], Apirusht Somrith[2]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการเพิ่มค่าโภชนาการเห็ดนางรมด้วยวัสดุเหลือทิ้งกากกาแฟ เนื่องจากกากกาแฟประกอบด้วยธาตุไนโตรเจนปริมาณสูงเป็นส่วนประกอบสำคัญ มีธาตุโพแทสเซียม ธาตุฟอสฟอรัสและสารอย่างอื่นอีกเล็กน้อยที่ช่วยเพิ่มพัฒนาการของเห็ด โดยใช้เป็นวัสดุเพาะปลูกเห็ดนางรมภูฏานซึ่งเป็นเห็ดชนิดสีเทาที่กรมวิชาการเกษตรเป็นผู้ผลิตเชื้อ ทดลองเพาะปลูกเห็ดนางรมภูฏานด้วยวัสดุปลูกจากกากกาแฟผสมขี้เลื่อยไม้ยางพารา อัตราส่วนร้อยละ 50:50, 25:75 และ 0:100 พบว่าวัสดุปลูกอัตราส่วน 50:50 ให้ค่าทางโภชนาการด้านโปรตีนสูงกว่าวัสดุเพาะปลูกขี้เลื่อยไม้ยางพารา 100% มากกว่า 2 เท่า และการใช้วัสดุเพาะปลูกเห็ดจากกากเมล็ดกาแฟบดผสมขี้เลื่อยไม้ยางพารา อัตราส่วนร้อยละ 25:75 ให้ค่าทางโภชนาการด้านค่าแคลอรีต่ำกว่าวัสดุเพาะปลูกขี้เลื่อยไม้ยางพารา 100% เท่ากับร้อยละ 51 นอกจากนี้การเพาะเห็ดนางรมภูฏานจากกากกาแฟผสมขี้เลื่อยไม้ยางพาราอัตราส่วนร้อยละ 50:50 ได้ผลผลิตดอกเห็ดที่มีปริมาณมากกว่าวัสดุเพาะปลูกขี้เลื่อยไม้ยางพารา 100% ถึงร้อยละ 19-110 จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่ากากกาแฟเหมาะสมเป็นวัสดุเพาะปลูกเห็ดนางรมภูฏานทดแทนวัสดุเพาะปลูกขี้เลื่อยไม้ยางพารา เนื่องจากผลิตเห็ดที่มีคุณค่าทางโภชนาการเพิ่มขึ้น และวัสดุเพาะปลูกเห็ดชนิดใหม่ยังเป็นการเพิ่มมูลค่ากากกาแฟที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งและลดปัญหาการกำจัดขยะกากกาแฟอีกนับหลายพันตันต่อปี

Abstract

This research is aimed to improve the nutritional oyster mushrooms with waste coffee grounds. The coffee grounds contain high nitrogen, a key component of the plant growth, phosphorus, potassium and other substances that enhance the development of mushrooms. The coffee grounds were used to be substrate of a gray oyster mushroom which produced by the Department of Agriculture. Mushroom cultivated materials were combined waste coffee grounds with sawdust as the ratio of 50:50, 25:75 and 0:100 (control). The results showed that the mushroom grown on the material ratio of 50: 50 gave two-folds higher protein content as compare to that of 100% sawdust. Furthermore, the mushrooms grown on material with the ratio of 25:75 gave 51% lower calories than that of sawdust. In addition, oyster mushroom yields were higher than those of sawdust alone, up to 19-110 %. Thus, it is indicated that the waste coffee ground is suitable material for growing a gray oyster mushroom and can be replaced the sawdust because of producing higher nutritive value oyster mushroom, novel substrate of mushroom and high value added of waste coffee ground materials including reduce a problem of refuse many thousands tons of coffee ground waste.

คำสำคัญ : เห็ดนางรม วัสดุเหลือทิ้งกากกาแฟ ขี้เลื่อย
Keywords : Oyster mushrooms, Waste coffee grounds, Sawdust

[1] กรมวิทยาศาสตร์บริการ สำนักเทคโนโลยีชุมชน
[2] กรมวิชาการเกษตร สำนักวิจัยพัฒนาการอารักขาพืช
*Corresponding author e-mail address: juntarama@yahoo.com

1. บทนำ (Introduction)

ปัจจุบันการรักษาสุขภาพด้วยอาหารมีอัตราก้าวกระโดดอย่างชัดเจน และส่วนใหญ่มีพฤติกรรมการบริโภคแบบใส่ใจสุขภาพ (Health conscious) ทำให้เห็ดเป็นอาหารสุขภาพที่ได้รับความนิยมอย่างสูงเพราะสามารถแทนโปรตีนเนื้อสัตว์ได้ดี ดังนั้นการเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการเห็ดนางรมด้วยวัสดุเหลือทิ้งกากกาแฟจึงเป็นแนวทางให้ได้อาหารสุขภาพที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง พร้อมทั้งกำจัดขยะกากกาแฟช่วยลดโลกร้อนและใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือทิ้งอย่างคุ้มค่า แม้กากกาแฟจะมีวิธีใช้และกำจัดอย่างมากมายแต่ปริมาณกากกาแฟก็เพิ่มขึ้นทุกปีอย่างเห็นได้ชัด

เห็ดนางรม (Oyster mushroom) เป็นเห็ดที่นิยมบริโภคกันอย่างแพร่หลายมี 2 ชนิด คือ ชนิดสีขาว และชนิดสีเทา สวยงาม และสะอาด โดยเฉพาะเห็ดนางรมภฏฐานเป็นชนิดสีเทาเกษตรกรนิยมเพาะปลูกเพื่อการบริโภค มีคุณค่าทางโภชนาการสูง เช่น โปรตีน คาร์โบไฮเดรต วิตามิน และเกลือแร่อีกหลายชนิด รวมทั้งมีสรรพคุณทางยา คือ กรดโฟลิก มีคุณสมบัติช่วยป้องกันโรคโลหิตจาง โรคความดันโลหิตสูง อีกทั้งเห็ดนางรมยังเหมาะสำหรับผู้ที่เป็นโรคเบาหวาน และผู้ที่ต้องการลดน้ำหนัก เนื่องจากมีปริมาณไขมันน้อยและแคลเซียมต่ำ [1] ในการเพาะเห็ดนางรมเกษตรกรส่วนใหญ่จะใช้ขี้เลื่อยไม้ยางพาราเป็นวัสดุสำหรับเพาะเห็ดนางรม ซึ่งส่วนมากจะหาซื้อได้ในเขตพื้นที่ภาคใต้ของประเทศไทย จากสภาพเศรษฐกิจและราคาของน้ำมันในปัจจุบัน เกษตรกรต้องเสียค่าใช้จ่ายในการขนส่งสูง ทำให้ราคาขี้เลื่อยไม้ยางพารามีราคาแพงขึ้นมากส่งผลให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้นตามไปด้วย ดังนั้น ถ้าต้องการลดต้นทุนการผลิตจึงจำเป็นต้องหาวัสดุอื่น ๆ ที่สามารถนำมาใช้เพาะเห็ดทดแทนขี้เลื่อยไม้ยางพารา นอกจากนี้ ยังพบว่าปัญหาการเพาะเห็ดนางรมในถุงพลาสติกแบบถุงก้อน ขี้เลื่อยไม้ยางพาราจะมีการแพร่กระจายของเส้นใยเห็ดเป็นไปได้ช้าและไม่เต็มถุงก้อนเชื้อ จึงทำให้การออกดอกของเห็ดนางรมต้องใช้เวลานาน เพราะขี้เลื่อยไม้ยางพาราประกอบด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งเห็ดนางรมต้องใช้เวลาในการย่อยสลายสารประกอบเหล่านี้ให้เป็นน้ำตาลโมเลกุลเล็ก ๆ เช่น กลูโคส ฟรุกโตส เพื่อใช้ในการเจริญเติบโตของเส้นใยและการเจริญเป็นดอกเห็ดต่อไป

กาแฟเป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจ โดยเฉพาะเกษตรกรในจังหวัดชุมพร ระนอง สุราษฎร์ธานี กระบี่ และเชียงราย ซึ่งเป็นจังหวัดที่มีการเพาะปลูกกาแฟเป็นจำนวนมาก มีพื้นที่ปลูกกาแฟที่ให้ผลผลิตได้แล้วจำนวน 388,662 ไร่ ผลผลิต 50,442 ตัน ส่วนใหญ่เป็นกาแฟพันธุ์โรบัสต้าร้อยละ 95 [2] อุตสาหกรรมกาแฟของประเทศไทยเป็นอุตสาหกรรมแปรสภาพขั้นต้นที่นำเอากาแฟสดมาแปรสภาพให้อยู่ในสภาพที่เหมาะสมและสะดวกในการนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตผลิตภัณฑ์กาแฟ [3] และโรงงานผลิตกาแฟมีความต้องการใช้เมล็ดกาแฟปริมาณสูงและมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเรื่อย ๆ การผลิตกาแฟมีปริมาณเพิ่มขึ้นทุกปีทั้งในตลาดโลกและในประเทศไทย เนื่องจากการใช้เมล็ดกาแฟในการผลิตกาแฟชนิดต่าง ๆ นั้น จะมีกากกาแฟเหลือปริมาณร้อยละ 40-60 ดังนั้น กากกาแฟก็ย่อมมีปริมาณมากและเพิ่มขึ้นทุกปีสอดคล้องกับปริมาณการผลิตกาแฟ ทำให้ต้องมีระบบกำจัดกากกาแฟที่ถือเป็นของเสียที่มีความต้องการเพิ่มขึ้นทุกปีของการใช้เมล็ดกาแฟของโรงงาน จากข้อมูลส่วนวิชาการและการกำกับข้อมูลกากอุตสาหกรรม สำนักบริหารจัดการกากอุตสาหกรรม กรมโรงงานอุตสาหกรรม สรุปปริมาณกากกาแฟจากอุตสาหกรรมแปรสภาพกาแฟ ซึ่งกากกาแฟเป็นสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่อนุญาตให้ออกนอกบริเวณโรงงาน (รหัสของเสีย 02 07 04) และเป็นวัสดุที่ไม่เหมาะสมสำหรับการบริโภคหรือแปรสภาพต่อไป ซึ่งพบว่ากากกาแฟมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้น แต่ละปีมีการกำจัดกากกาแฟ เช่น การนำไปใช้ประโยชน์โดยกลับมาใช้ใหม่ การทำเป็นเชื้อเพลิงผสม การหมักเป็นปุ๋ยและการทำอาหารสัตว์ เป็นต้น และการกำจัดแบบไร้ประโยชน์ ได้แก่ การฝังกลบ การเผาทำลายทิ้ง ฯลฯ จากปัญหากากกาแฟมีปริมาณมากและมีแนวโน้มสูงขึ้น โดยไม่มีการนำไปใช้ประโยชน์ให้คุ้มค่าและยังต้องเสียค่าใช้จ่ายในการกำจัด แต่กากกาแฟมีสารสำคัญที่มีประโยชน์ ได้แก่ ค่า Organic material 70% และ Total nitrogen 1.96 ซึ่งไนโตรเจนเป็นส่วนประกอบสำคัญของพืชจะต้องใช้ในการเจริญเติบโต นอกจากนี้ยังมีโพแทสเซียม ฟอสฟอรัส และสารอย่างอื่นอีกเล็กน้อยที่ช่วยเพิ่มพัฒนาการของพืช ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวความคิดในการนำกากกาแฟมาเพิ่มมูลค่าโดยนำมาใช้เป็นส่วนประกอบในวัสดุเพาะเห็ด ซึ่งปัจจุบันการเพาะเห็ดในประเทศไทยได้มีการพัฒนามาอย่างรวดเร็ว โดยรัฐบาลพยายามส่งเสริมให้เกษตรกรทำการเพาะเห็ดเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากใช้พื้นที่ในการเพาะไม่มากแต่ให้ผลผลิตสูงและตลาดกำลังให้ความนิยมบริโภคเห็ดเพื่อสุขภาพมากขึ้น ทำให้เกษตรขยายการเพาะเห็ดอย่างแพร่หลาย ครอบคลุมพื้นที่ทั่วประเทศไทย จึงเป็นสาเหตุให้วัสดุปลูกและวัตถุดิบต่าง ๆ ที่นำมาทำการเพาะเห็ดมีราคาแพงขึ้น ซึ่งทำให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้น

กลุ่มวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยี สำนักเทคโนโลยีชุมชน มีการดำเนินงานวิจัยด้านวัสดุศาสตร์ได้บูรณาการงานวิจัยกับกรมวิชาการเกษตรซึ่งมีความเชี่ยวชาญด้านการเพาะปลูกเห็ด โดยจะพัฒนาวัสดุเพาะปลูกเห็ดจากกากกาแฟ ทำให้การเพาะเห็ดนางรมสามารถผลิตดอกเห็ดได้เร็ว และปริมาณมากกว่าวัสดุปลูกทั่วไปที่ใช้ คือ ขี้เลื่อยจากไม้ยางพารา ซึ่งนอกจากจะได้วัสดุเพาะปลูกเห็ดซึ่งเป็นทางเลือกใหม่สำหรับเกษตรกรแล้ว ยังเป็นการเพิ่มมูลค่ากากกาแฟที่เป็นวัสดุเหลือทิ้ง และลดปัญหาการกำจัดขยะกากกาแฟอีกนับหลายพันตันต่อปี

2. วิธีการวิจัย (Experimental methods)

2.1 วัตถุดิบที่ใช้

2.1.1 เชื้อเห็ดนางรมภฏฐาน (Mushroom spawn) หมายถึงเชื้อเห็ดที่เจริญเป็นเส้นใยบนวัสดุที่ใช้เลี้ยงเชื้อเห็ด เช่น เมล็ดธัญพืช

เพื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยเห็ด

2.1.2 กากกาแฟ เป็นกาแฟพันธุ์โรบัสต้าผสมอราบิก้า

2.1.2.1 เปลือกกาแฟที่ได้จากการผลิตเมล็ดกาแฟจากโรงสีกาแฟจังหวัดชุมพร

2.1.2.2 เมล็ดกากกาแฟบดที่ได้จากการชงกาแฟจากร้านกาแฟสดทั่วไปในกรุงเทพมหานคร

2.1.3 ขี้เลื่อยไม้ยางพารา

2.1.4 รำละเอียด

2.1.5 ปูนขาว

2.1.6 ดีเกลือ

2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

2.2.1 โรงเรือนเพาะเห็ด มีระบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นด้วยสปริงเกอร์ให้น้ำอัตโนมัติ ในเวลา 6.00 น. 12.00 น. และ 18.00 น. พ่นครั้งละ15 นาที หัวพ่นน้ำเป็นหมอกฝอยเพื่อรักษาความชื้นในเวลากลางวันที่มีอุณหภูมิสูง ทำให้ความชื้น 80-85 % ส่วนเวลากลางคืน อุณหภูมิไม่สูง โรงเรือนก็สามารถเก็บความชื้นและความเย็นได้

2.2.2 ตะกร้า

2.2.3 ตะแกรง

2.2.4 ถุงพลาสติกทนร้อนขนาด 6 ¾ x 12 ½ หรือ 8 x 12 นิ้ว

2.2.5 คอขวดพลาสติกเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 ½ นิ้ว

2.2.6 สำลี

2.2.7 ยางรัด

2.3 การดำเนินการศึกษาวิจัย

2.3.1 ขั้นตอนการทดลองเบื้องต้น

การทดลองเพาะเห็ดนางรมภูฏานเป็นเห็ดชนิดสีเทาที่กรมวิชาการเกษตรเป็นผู้ผลิตเชื้อ โดยใช้วัสดุเพาะเห็ดคือกากกาแฟและขี้เลื่อยไม้ยางพารา ในอัตราส่วนต่าง ๆ ดังนี้

2.3.1.1 สูตร Control ทดลอง 1 สูตร คือ ขี้เลื่อยยางพารา 100% กับอาหารเสริม

2.3.1.2 กากเปลือกกาแฟ : ขี้เลื่อย ทดลอง 3 สูตร คือ 75% 50% 25% กับอาหารเสริม

2.3.1.3 กากเมล็ดกาแฟบด : ขี้เลื่อย ทดลอง 3 สูตร คือ 75% 50% 25% กับอาหารเสริม

ตารางที่ 1 อาหารเสริม สูตรของกรมวิชาการเกษตร สำหรับก้อนเห็ดปริมาณ 50 ก้อน/สูตร

อาหารเสริม สูตรของกรมวิชาการเกษตร	จำนวน
รำละเอียด	1.25 กิโลกรัม
น้ำตาล	1.25 กิโลกรัม
ปูนขาว	0.25 กิโลกรัม
ดีเกลือ	150 กรัม

2.3.2 การเตรียมกากกาแฟเป็นวัสดุเพาะเห็ดนางรม

เตรียมกากกาแฟ โดยนำกากกาแฟตากแดด (Sun drying) บนแผ่นพลาสติกหรือถาด และพลิกกลับด้านเป็นระยะ ๆ เพื่อป้องกันการหมัก ตากแห้งจนกว่ากากกาแฟเหลือความชื้นไม่เกินร้อยละ 10-12 เพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพ

2.3.3 การผลิตก้อนเพาะเห็ดนางรม ตามอัตราส่วนต่าง ๆ

2.3.3.1 นำส่วนผสมต่าง ๆ มาคลุกเคล้าให้เข้ากัน

2.3.3.2 เติมน้ำลงไปผสม ควรผสมให้ความชื้นกระจายให้ทั่วสม่ำเสมอ ทดสอบให้ได้ความชื้นประมาณ 65 - 75 % โดยใช้มือกำส่วนผสมขึ้นมาแล้วบีบดู ถ้ามีน้ำซึมออกมาแสดงว่าชื้นเกินไปให้เติมขี้เลื่อยเพิ่ม หากไม่มีน้ำซึมออกมาให้แบมือออกส่วนผสมจะจับกันเป็นก้อนและแตกออก 2-3 ส่วนแสดงว่าใช้ได้

2.3.3.3 บรรจุใส่ถุงพลาสติกทนร้อนที่ใช้สำหรับเพาะเห็ด ถุงละ 500 กรัม อัดให้แน่นพอประมาณใส่คอขวดพลาสติกหุ้มด้วยสำลีและกระดาษ

รูปที่ 1 กากเปลือกกาแฟตากแห้ง (ซ้าย) และกากเมล็ดกาแฟบดตากแห้ง (ขวา)

2.3.3.4 นำไปนึ่งด้วยหม้อนึ่งลูกทุ่งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 - 4 ชั่วโมง

2.3.3.5 หลังจากนึ่งทิ้งไว้ให้เย็นแล้วใส่เชื้อลงไป นำก้อนเชื้อไปบ่มในที่มืด และอุณหภูมิสูงประมาณ 28 - 35 องศาเซลเซียส เพื่อเร่งการเจริญเติบโตของเส้นใยเห็ด จะเจริญเต็มถุงประมาณ 3 - 4 สัปดาห์

2.3.3.6 เมื่อเส้นใยเดินเต็มถุงแล้วให้พักก้อนเชื้อระยะหนึ่ง เพื่อให้เส้นใยสะสมอาหารและพร้อมจะเจริญเป็นดอกเห็ดแล้วนำไปเปิดดอกในโรงเรือนต่อไป

2.3.4 การทดสอบปริมาณไนโตรเจน ฟอสเฟตและโพแทสเซียม

การทดสอบปริมาณไนโตรเจน ฟอสเฟส และโพแทสเซียม ใช้วิธีทดสอบอ้างอิงตาม AOAC (2012) 993.13, 958.01 [4] และ Official Method of Analysis Fertilizers JAPAN (1987) [5] ตามลำดับ

2.3.5 การทดสอบอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน

การทดสอบอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน ใช้วิธีทดสอบอ้างอิงตาม Manual on Organic Fertilizer Analysis, APSRDO, DOA:4/2551 [6] และ AOAC (2012) 993.13 [4]

2.3.6 การทดสอบโภชนาการของเห็ดนางรม

วิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการของเห็ดนางรม โดยวิธี AOAC (2012) 920.153, 981.10, 996.06, 985.29, 942.23, 984.27, 999.10 [7], โดยการหา โปรตีน ไขมันทั้งหมด เถ้า ใยอาหาร น้ำตาลทั้งหมด แคลเซียม พลังงานทั้งหมด เหล็ก วิตามินเอ วิตามินบี 1 วิตามินบี 2 และโซเดียม

3. ผลและวิจารณ์ (Results and discussions)

3.1 ธาตุอาหารที่จำเป็นในการเติบโตของเห็ด

การทดสอบปริมาณไนโตรเจน ฟอสเฟตและโพแทสเซียมของกากกาแฟแสดงให้เห็นว่ากากเปลือกกาแฟมีค่าไนโตรเจนอยู่ร้อยละ 1.26 ไม่พบฟอสเฟส และมีค่าโพแทสเซียม ร้อยละ 2.48 และกากเมล็ดกาแฟบดมีค่าไนโตรเจน ร้อยละ 2.4 ฟอสเฟสร้อยละ <0.5 และโพแทสเซียม ร้อยละ 0.62 ซึ่งค่าไนโตรเจนที่มีค่าสูงกว่าร้อยละ 1 มีผลให้เกิดการย่อยสลายได้เร็วทำให้เห็ดสามารถนำสารอาหารไปใช้ได้ง่าย ดังแสดงในตารางที่ 2

3.2 ผลการศึกษาการหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของการใช้วัสดุปลูกเพาะเห็ด

ค่าสัดส่วนของคาร์บอนกับไนโตรเจน (C/N ratio) สามารถบอกคุณภาพของวัสดุอินทรีย์ที่นำมาใช้ทำก้อนเพาะเห็ดซึ่งเป็นปัจจัยควบคุมความเป็นประโยชน์ของไนโตรเจน ควรมีค่า C/N ratio ไม่สูงมาก เพื่อให้เกิดการย่อยสลายวัสดุอินทรีย์ที่เป็นส่วนผสมได้ง่าย เช่น สูตร Control (ขี้เลื่อยไม้ยางพารา 100%) มีค่า C/N เท่ากับ 125.5:1 เกิดการย่อยสลายได้ยากกว่าสูตรอื่น ๆ ที่มีค่า C/N ratio ต่ำกว่า ดังนั้น การย่อยสลายของก้อนเพาะเห็ดเพื่อให้เห็ดสามารถดูดซึมไปใช้ได้ง่ายเรียงลำดับจากการย่อยสลายยากไปง่าย ดังนี้ สูตร Control (ขี้เลื่อยไม้ยางพารา 100%), กากเปลือกกาแฟ 25% ผสมขี้เลื่อย 75%, กากเมล็ดกาแฟบด 25% ผสมขี้เลื่อย 75%, กากเปลือกกาแฟ 50% ผสมขี้เลื่อย 50%, กากเปลือกกาแฟ 100%, กากเมล็ดกาแฟบด 50% ผสมขี้เลื่อย 50% และสูตรกากเมล็ดกาแฟบด 100% ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบปริมาณไนโตรเจน ฟอสเฟส และโพแทสเซียมของกากกาแฟ

ลำดับ	รายละเอียด	ผลการทดสอบ		
		ไนโตรเจน	ฟอสเฟส	โพแทสเซียม
1.	กากเปลือกกาแฟจังหวัดชุมพร	1.26%	Not Detected	2.48%
2.	กากเมล็ดกาแฟบดจากร้านค้าทั่วไป	2.4%	<0.5%	0.62%

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน

รายการ	Control (ขี้เลื่อยไม้ยางพารา 100%)	กากเปลือกกาแฟ 100%	กากเปลือกกาแฟ 50% ผสมขี้เลื่อย 50%	กากเปลือกกาแฟ 25% ผสมขี้เลื่อย 75%	กากเมล็ดกาแฟบด 100%	กากเมล็ดกาแฟบด 50% ผสมขี้เลื่อย 50%	กากเมล็ดกาแฟบด 50% ผสมขี้เลื่อย 75%
C/N	125.5 : 1	40.5 : 1	45.2 : 1	59 : 1	20 : 1	31.5 : 1	47.8 : 1
Moisture (After)	29.0%	118%	24.0%	18.1%	18.2%	25.6%	14.9%
Moisture (Before)	66.2%	33.1%	55.2%	60.0%	65.5%	62.6%	64.9%
Total Nitrogen (Total N)	<0.5%	0.8%	0.6%	<0.5%	1.0%	0.8%	<0.5%
Total Organic Carbon (TOC)	25.1%	32.4%	27.1%	23.6%	20.0%	25.2%	19.1%

การเจริญของเส้นใยเห็ดนางรมแต่ละสูตร พบว่า สูตร Control (ขี้เลื่อยไม้ยางพารา 100%) มีการเจริญของเส้นใยได้ดีหนาแน่นทั่วทั้งก้อน ส่วนสูตรกากเปลือกกาแฟ 100% มีการเจริญของเส้นใยได้ช้าไม่หนาแน่นประมาณครึ่งก้อน สูตรกากเปลือกกาแฟ 50% ผสมขี้เลื่อย 50% มีการเจริญของเส้นใยได้เร็วหนาแน่นเกือบเต็มก้อน และสูตรกากเปลือกกาแฟ 25% ผสมขี้เลื่อย 75% มีการเจริญของเส้นใยได้เร็วหนาแน่นเกือบเต็มก้อน และสูตรกากเมล็ดกาแฟบด 100% มีการเจริญของเส้นใยได้ไม่หนาแน่นเกือบเต็มก้อน สูตรกากเมล็ดกาแฟบด 50% ผสมขี้เลื่อย 50% มีการเจริญของเส้นใยเจริญได้หนาแน่นเกือบเต็มก้อน และสูตรกากเมล็ดกาแฟบด 25% ผสมขี้เลื่อย 75% มีการเจริญของเส้นใยเจริญได้หนาแน่นเกือบเต็มก้อน ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 การเจริญของเส้นใยเห็ดนางรม

รายการ	รูปภาพ	การเจริญของเส้นใย	ความหนาแน่นของเส้นใย
ก. สูตร Control (ขี้เลื่อยไม้ยางพารา 100%)		++++++++	++++++++
ข. สูตรอัตราส่วนกากเปลือกกาแฟผสมขี้เลื่อยสูตรต่าง ๆ กัน			
กากเปลือกกาแฟ 100%		+	+
กากเปลือกกาแฟ 50% ผสมขี้เลื่อย 50 %		+++++	+++
กากเปลือกกาแฟ 25% ผสมขี้เลื่อย 75%		+++++++	++++++
ค. สูตรอัตราส่วนกากเมล็ดกาแฟบดผสมขี้เลื่อยสูตรต่าง ๆ			
กากเมล็ดกาแฟบด 100%		+++	+++
กากเมล็ดกาแฟบด 50% ผสมขี้เลื่อย 50%		+++++	++++
กากเมล็ดกาแฟบด 25% ผสมขี้เลื่อย 75%		++++++	+++++++

ผลการเจริญเติบโตของดอกเห็ดนางรมแต่ละสูตร พบว่าสูตร Control (ขี้เลื่อยไม้ยางพารา 100%) มีการเจริญเติบโตของดอกเห็ดเจริญเติบโตปกติ สูตรกากเปลือกกาแฟ 100% มีการเจริญเติบโตของดอกเห็ดเจริญเติบโตได้ช้า ดอกเห็ดมีสีเทา ก้านและดอกมีขนาดเล็ก สูตรกากเปลือกกาแฟ 50% ผสมขี้เลื่อย 50% มีการเจริญเติบโตของดอกเห็ดเจริญเติบโตดี ดอกเห็ดมีสีเทา ก้านและดอกใหญ่มาก สูตรกากเปลือกกาแฟ 25% ผสมขี้เลื่อย 75% มีการเจริญเติบโตของดอกเห็ดเจริญเติบโตดี ดอกเห็ดมีสีเทา ก้านและดอกใหญ่มาก สูตรกากเมล็ดกาแฟบด 100% มีการเจริญเติบโตของดอกเห็ดเจริญเติบโตช้า ก้านและดอกมีขนาดเล็ก สูตรกากเมล็ดกาแฟบด 50% ผสมขี้เลื่อย 50% มีการเจริญเติบโตของดอกเห็ดเจริญเติบโตดี ก้านและดอกมีขนาดเล็ก สูตรกากเมล็ดกาแฟบด 25% ผสมขี้เลื่อย 75% มีการเจริญเติบโตของดอกเห็ดเจริญเติบโตดี ดอกเห็ดมีสีเทา ก้านและดอกใหญ่มาก ดังแสดงในรูปที่ 2, 3 และ 4

รูปที่ 2 การเจริญเติบโตของดอกเห็ด สูตร Control

ก ข ค

รูปที่ 3 การเจริญเติบโตของดอกเห็ดสูตรอัตราส่วนกากเปลือกกาแฟผสมขี้เลื่อยสูตรต่าง ๆ กัน คือ กาก เปลือกกาแฟ 100% (ก) กากเปลือกกาแฟ 50% ผสมขี้เลื่อย 50% (ข) และกากเปลือกกาแฟ 25% ผสมขี้เลื่อย 75% (ค)

ก ข ค

รูปที่ 4 การเจริญเติบโตของดอกเห็ด สูตรกากเมล็ดกาแฟบดผสมขี้เลื่อยสูตรต่าง ๆ กัน คือ กากเมล็ดกาแฟบด 100% (ก) กากเมล็ดกาแฟบด 50% ผสมขี้เลื่อย 50% (ข) และกากเมล็ดกาแฟบด 25% ผสมขี้เลื่อย 75% (ค)

สำหรับค่าโภชนาการของเห็ดนางรมของอัตราส่วนต่าง ๆ ทดสอบ 3 ซ้ำ ดังแสดงในตารางที่ 5 ดังนี้

สูตรกากเปลือกกาแฟ 50% ผสมขี้เลื่อย 50% (3.07g/100g) มีโปรตีนปริมาณสูงกว่าสูตร Control (1.43g/100g) มากกว่า 2 เท่า และค่าแคลอรี่ของสูตรกากเปลือกกาแฟ 50% ผสมขี้เลื่อย 50% (30.26 Kcal) ต่ำกว่าสูตร Control (ขี้เลื่อยไม้ยางพารา 100%) (41.32 Kcal) ลดลง 11.06 Kcal)

สูตรกากเปลือกกาแฟ 25% ผสมขี้เลื่อย 75% มีปริมาณโปรตีน (2.86g/100g) สูงกว่าสูตร Control (ขี้เลื่อยไม้ยางพารา 100%) (1.43g/100g) เป็น 2 เท่า และมีค่าแคลอรี่ (29.83 Kcal) ต่ำกว่าสูตร Control (ขี้เลื่อยไม้ยางพารา 100%) (41.32 Kcal) ลดลง 11.49 Kcal

สูตรกากเมล็ดกาแฟบด 50% ผสมขี้เลื่อย 50% มีปริมาณโปรตีน (3.14g/100g) สูงกว่าสูตร Control (ขี้เลื่อยไม้ยางพารา 100%) (1.43g/100g) มากกว่า 2 เท่า และค่าแคลอรี่ (41.96 Kcal) ใกล้กับสูตร Control (ขี้เลื่อยไม้ยางพารา 100%) (41.32 Kcal)

ส่วนสูตรกากเมล็ดกาแฟบด 25% ผสมขี้เลื่อย 75% มีปริมาณโปรตีน (1.78/100g) สูงกว่าสูตร Control (ขี้เลื่อยไม้ยางพารา 100%) (1.43g/100g) เพิ่มขึ้นร้อยละ 0.35 และมีค่าแคลอรี่ (20.22 Kcal) ต่ำกว่าสูตร Control (ขี้เลื่อยไม้ยางพารา 100%) (41.32 Kcal) ลดลง 21.11 Kcal

ดังนั้น เห็ดนางรมที่เกิดจากการใช้กากกาแฟมาทดแทนขี้เลื่อยไม้ยางพาราในการเพาะปลูกจะให้โปรตีนสูง และมีค่าแคลอรี่ต่ำกว่าเห็ดนางรมที่ใช้ขี้เลื่อยไม้ยางพาราเพียงอย่างเดียว

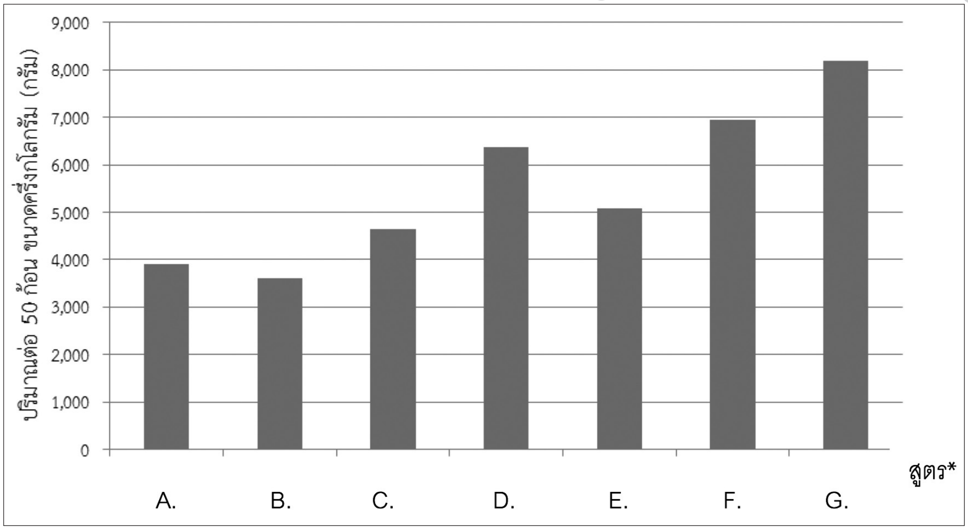
ตารางที่ 5 ค่าเฉลี่ยผลการทดสอบค่าโภชนาการของเห็ดนางรมของการทดลองอัตราส่วนต่าง ๆ

รายการทดสอบ	ค่าเฉลี่ยผลการทดสอบ±SD				
	Control (ขี้เลื่อยไม้ยางพารา 100%)	กากเปลือกกาแฟ 50% ผสมขี้เลื่อย 50%	กากเปลือกกาแฟ 25% ผสมขี้เลื่อย 75%	กากเมล็ดกาแฟบด 50% ผสมขี้เลื่อย 50%	กากเมล็ดกาแฟบด 25% ผสมขี้เลื่อย 75%
Ash* (g/100g)	0.50±0.02	0.76±0.02	0.77±0.09	0.76±0.13	0.59±0.01
Calories (Kcal/100g)	41.32±0.01	30.26±0.12	29.83±0.12	41.96±0.08	20.22±0.13
Protein (%Nx6.25)* (g/100g)	1.43±0.13	3.07±0.01	2.86±0.02	3.14±0.01	1.78±0.02
Saturated fat (g/100g)	0.08±0.01	0.03±0.09	0.02±0.09	0.14±0.02	0.02±0.07
Sugar (g/100g)	1.05±0.14	Not Detected	Not Detected	2.29±0.07	1.61±0.02
Dietary Fiber (g/100g)	4.57±0.09	2.53±0.02	1.81±0.07	4.03±0.01	1.44±0.09
Vitamin A	Not Detected	Not Detected	Not Detected	Not Detected	Not Detected
Vitamin B1 (mg/100g)	<0.030±0.02	<0.030±0.13	<0.030±0.08	<0.030±0.08	<0.030±0.10
Vitamin B2 (mg/100g)	0.085±0.13	0.176±0.07	0.167±0.14	0.204±0.02	0.082±0.02
Calcium(Ca)* (mg/100g)	6.66±0.17	6.05±0.05	12.41±0.19	5.04±0.06	3.94±0.08
Iron (Fe)* (mg/100g)	0.52±0.08	0.89±0.10	1.02±0.02	0.85±0.02	0.72±0.05
Sodium (Na)* (mg/100g)	4.33±0.04	3.68±0.02	5.07±0.09	3.98±0.11	3.02±0.01

การคำนวณค่าเฉลี่ยผลผลิตเห็ดนางรมจำนวน 3 ซ้ำ โดยเห็ดนางรมต่อก้อนของสูตร Control (ขี้เลื่อยไม้ยางพารา 100% ปริมาณ 3,900 กรัม) ได้ผลผลิตสูงกว่าสูตรเปลือกกากกาแฟ 100% (ปริมาณ 3,611 กรัม) คิดเป็น 7.41 % ส่วนสูตรกากเปลือกกาแฟ 50% ผสมขี้เลื่อย 50%(ปริมาณ 4,647 กรัม) และกากเปลือกกาแฟ 25% ผสมขี้เลื่อย 75% (ปริมาณ 6,364 กรัม) มีปริมาณผลผลิตมากกว่าสูตร Control และสูตรกากเมล็ดกาแฟบด 100% (ปริมาณ 5,080 กรัม) สูตรกากเมล็ดกาแฟบด 50% ผสมขี้เลื่อย 50% (ปริมาณ 6,950 กรัม) และกากเมล็ดกาแฟบด 25% ผสมขี้เลื่อย 75% (ปริมาณ 8,181 กรัม) มีปริมาณผลผลิตมากกว่ากับสูตร Control ทั้งหมด ดังแสดงในตารางที่ 6 และรูปที่ 5

ตารางที่ 6 ค่าเฉลี่ยผลผลิตของเห็ดนางรม

สูตร	ค่าเฉลี่ยผลผลิต ± SD (กรัม)	คิดเป็น %	หมายเหตุ
Control	3,900±0.27	100	-
กากเปลือกกาแฟ 100%	3,611±0.51	92.59	น้อยกว่า control 7.41%
กากเปลือกกาแฟ 50% ผสมขี้เลื่อย 50 %	4,647±0.43	119.15	มากกว่า control 19.15%
กากเปลือกกาแฟ 25% ผสมขี้เลื่อย 75%	6,364±0.21	163.18	มากกว่า control 63.18%
กากเมล็ดกาแฟบด 100%	5,080±0.35	130.26	มากกว่า control 30.26%
กากเมล็ดกาแฟบด 50% ผสมขี้เลื่อย 50%	6,950±0.62	178.20	มากกว่า control 78.02%
กากเมล็ดกาแฟบด 25% ผสมขี้เลื่อย 75%	8,181±0.37	209.77	มากกว่า control 109.77%



หมายเหตุ *
A. Control (ขี้เลื่อยไม้ยางพารา 100%)
B. กากเปลือกกาแฟ 100%
C. กากเปลือกกาแฟ 50% ผสมขี้เลื่อยฯ 50%
D. กากเปลือกกาแฟ 25% ผสมขี้เลื่อยฯ 75%
E. กากเมล็ดกาแฟบด 100%
F. กากเมล็ดกาแฟบด 50% ผสมขี้เลื่อยฯ 50%
G. กากเมล็ดกาแฟบด 25% ผสมขี้เลื่อยฯ 75%

รูปที่ 5 แผนภูมิแสดงปริมาณผลผลิตของเห็ดนางรมของสูตรต่าง ๆ

งานวิจัยการใช้กากกาแฟเป็นวัสดุทดแทนขี้เลื่อยยางพารา สามารถช่วยเกษตรกรลดต้นทุนในการซื้อขี้เลื่อยยางพารา ปกติราคาขี้เลื่อยต่อก้อนเพาะเห็ดน้ำหนัก 1 กิโลกรัม ราคา 3 บาท ในท้องตลาดขายก้อนเพาะเห็ดสูตร Control (ขี้เลื่อยไม้ยางพารา 100%) หนัก 1 กิโลกรัม ราคา 8 บาท ดังนั้น การผลิตก้อนเพาะเห็ดที่ผสมกากกาแฟ 50 ก้อนต่อสูตร ทำให้ลดต้นทุนดังปรากฏในตารางที่ 7 อีกทั้งยังเป็นการกำจัดกากกาแฟได้อย่างคุ้มค่าและมีประโยชน์สูงสุด ดังแสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 เปรียบเทียบต้นทุนการผลิตก้อนเพาะเห็ด

สูตร	วัสดุปลูกราคาต่อก้อน ขนาด 1 กิโลกรัม(บาท)	ลดต้นทุน ต่อก้อน (บาท)	ผลิตก้อนเพาะเห็ด 50 ก้อน ลดต้นทุน (บาท)	ลดต้นทุน 50 ก้อน คิดเป็นร้อยละ
Control (ขี้เลื่อยไม้ยางพารา 100%)	8.00	-	-	-
กากเปลือกกาแฟ 100%	5.00	3.00	150.00	37.50
กากเปลือกกาแฟ 50% ผสมขี้เลื่อย 50%	6.50	1.50	75.00	17.75
กากเปลือกกาแฟ 25% ผสมขี้เลื่อย 75%	7.25	0.75	37.50	9.38
กากเมล็ดกาแฟบด 100%	5.00	3.00	150.00	37.50
กากเมล็ดกาแฟบด 50% ผสมขี้เลื่อย 50%	6.50	1.50	75.00	17.75
กากเมล็ดกาแฟบด 25% ผสมขี้เลื่อย 75%	7.25	0.75	37.50	9.38

4. สรุป (Conclusion)

เนื่องจากกากเปลือกกาแฟมีค่าไนโตรเจน 1.26 % และกากเมล็ดกาแฟบดมีค่าไนโตรเจน 2.4% รวมถึงค่าสัดส่วนของคาร์บอนกับไนโตรเจน (C/N ratio) สามารถบอกคุณภาพของวัสดุอินทรีย์ที่นำมาใช้ทำก้อนเพาะเห็ด อันเป็นปัจจัยควบคุมการย่อยสลายทำให้ใช้ประโยชน์ไนโตรเจนได้ พบว่าสูตร control จะย่อยสลายได้ยากกว่าสูตรที่ใช้กากเปลือกกาแฟหรือกากเมล็ดกาแฟบดมากกว่า 3 เท่าตัว ส่วนการเจริญของเส้นใยเห็ด พบว่าผลการที่ใช้ขี้เลื่อยยางพารา 100% (สูตร control) พบการเจริญของเส้นใยและการเดินของเส้นใยทั่วทั้งก้อนได้ดี น่าจะมาจากการถ่ายเทออกซิเจนของก้อนวัสดุที่ทำจากขี้เลื่อยยางพาราดีกว่าวัสดุที่ทำจากกากกาแฟ ลักษณะทางกายภาพของขี้เลื่อยค่อนข้างกระด้างแข็งทำให้ก้อนวัสดุเพาะเห็ดมีลักษณะโปร่งไม่อัดแน่นมีอากาศหรือออกซิเจนถ่ายเทได้ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกากกาแฟซึ่งออกซิเจนเป็นปัจจัยที่ส่งเสริมการเจริญของเส้นใยเห็ด ดังนั้นการที่มีค่าไนโตรเจนสูงพอดีช่วยการเจริญเติบโตของเห็ดด้านปริมาณและคุณภาพได้ดี ดังนี้

ด้านปริมาณจากปริมาณผลผลิตสูตรกากเมล็ดกาแฟบดให้ผลผลิตเห็ดนางรมได้มากกว่าสูตรกากเปลือกกาแฟ และสูตรกากเปลือกกาแฟให้ผลผลิตเห็ดนางรมได้มากกว่าสูตร control ยกเว้นสูตรกากเปลือกกาแฟ 100 % ที่มีผลผลิตต่ำกว่า 7.41 %

ด้านคุณภาพจากค่าโภชนาการทุกสูตรที่ได้ผลผลิต ปริมาณโปรตีนของสูตรกากเปลือกกาแฟ หรือกากเมล็ดกาแฟบด มีค่าโปรตีนมากกว่า 2 เท่า ยกเว้นสูตรกาแฟเมล็ดบด 25% ผสมขี้เลื่อย 75% ที่มีค่าโปรตีนมากกว่า 1.25 เท่า ส่วนค่าแคลอรีทุกสูตรจะต่ำกว่าสูตร control ยกเว้นสูตรกากเมล็ดกาแฟบด 50% ผสมขี้เลื่อย 50% ที่มีค่าสูงกว่าเล็กน้อยประมาณ 1.5% และปริมาณแคลอรี่ของสูตรกากเปลือกกาแฟ 50% ผสมขี้เลื่อย 50% และสูตรกากเปลือกกาแฟ 25% ผสมขี้เลื่อย 75% มีค่าแคลอรีต่ำกว่าสูตร control เกือบ 30 % โดยเฉพาะสูตรกากเมล็ดกาแฟบด 25% ผสมขี้เลื่อย 75% ค่าแคลอรีต่ำกว่าสูตร control เท่ากับ 51 %

ดังนั้นกรณีที่ต้องการเห็ดนางรมที่มีค่าโภชนาการของโปรตีนสูง สูตรที่เหมาะสมคือสูตรกากเปลือกกาแฟ 50% ผสมขี้เลื่อย 50% และกากเมล็ดกาแฟบด 50% ผสมขี้เลื่อย 50% ส่วนสูตรที่ต้องการเห็ดนางรมที่มีค่าโภชนาการของแคลอรีต่ำ สูตรที่เหมาะสมคือสูตรกากเมล็ดกาแฟบด 25% ผสมขี้เลื่อย 75% จะดีที่สุด

สูตรที่ใช้ขี้เลื่อยไม้ยางพารา 100% (control) เป็นสูตรที่นิยมเป็นวัสดุเพาะปลูกเห็ดนางรมในท้องตลาดทั่วไป ดังนั้น เมื่อใช้กากกาแฟที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งเป็นวัสดุเพาะปลูกเห็ดนางรมปรากฏว่าสามารถเพิ่มปริมาณผลผลิตมากขึ้นและคุณภาพของคุณค่าทางโภชนาการสูงขึ้นมากกว่าสูตร control ที่ใช้ในท้องตลาดได้อย่างชัดเจน ซึ่งเป็นไปตามสมมุติฐานของนักวิทยาศาสตร์ที่ว่ากากกาแฟที่มีปริมาณไนโตรเจนสูงจะสามารถเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการของเห็ดนางรมเพิ่มขึ้นเหมาะแก่การผลิตเป็นอาหารสุขภาพที่มีโปรตีนสูงและแคลอรีต่ำได้อย่างเหมาะสม

5. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

การเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการเห็ดนางรมด้วยวัสดุเหลือทิ้งกากกาแฟสามารถดำเนินการได้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความกรุณาและได้ความช่วยเหลือจากคุณอภิรัชต์ สมฤทธิ์ และเจ้าหน้าที่จากกรมวิชาการเกษตร สำนักวิจัยพัฒนาการอารักขาพืช เขตบางเขน กรุงเทพมหานคร ที่ให้ความร่วมมือ ร่วมแรง และร่วมใจในงานวิจัยการเพาะปลูกเห็ดนางรมเป็นอย่างดี ตั้งแต่การผสมกากกาแฟกับขี้เลื่อยในอัตราส่วนต่าง ๆ เพื่อทำเป็นก้อนเชื้อจนได้ผลผลิตที่ดีจึงขอขอบพระคุณอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ สำนักเทคโนโลยีชุมชนทุกท่านที่ให้ความสะดวกกับการทำงาน และลูกจ้างเหมาของโครงการฯ ทุกท่านที่ให้ความร่วมมืออย่างดีในการทำงาน

หวังว่าโครงการนี้จะเป็นประโยชน์ในการเพิ่มมูลค่ากากกาแฟซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้ง ลดปัญหาการกำจัดกากกาแฟ และสามารถช่วยลดภาวะโลกร้อน ลดมลพิษในสิ่งแวดล้อมได้อย่างคุ้มค่าดีที่สุด

6. เอกสารอ้างอิง (References)

[1] ณัฐพงษ์ สิงห์ภูงา และรัตนะ ยศเมธากุล. *การเพิ่มผลผลิตของเห็ดนางรมที่เพาะเลี้ยงจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรด้วยจุลินทรีย์ที่มีประสิทธิภาพ (EM)*. นครสวรรค์ : คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์, 2553.

[2] สำนักส่งเสริมและจัดการสินค้าเกษตร กรมส่งเสริมการเกษตร. *ยุทธศาสตร์กาแฟ ปี 2552-2556* [ออนไลน์]. [อ้างถึง วันที่ 29 มีนาคม 2555]. เข้าถึงจาก: http://www.agriman.doae.go.th/home/agri1/agri1.3/ strategics_2554/05_coffee.pdf.

[3] สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์กรมหาชน). *อุตสาหกรรมการแปรภาพกาแฟ* [ออนไลน์]. [อ้างถึงวันที่ 22 เมษายน 2555]. เข้าถึงจาก: http://www.arda.or.th/kasetinfo/south/coffee/used/index.php.

[4] ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS. *Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemists*. AOAC. 993.13, 958.01. Arlington, Virginia : Association of Official Analytical Chemists International, 2012.

[5] SUISANSHO, NORIN, NOGYO KANKYO and GIJUTSU KENKYUJO. *Official methods of analysis of fertilizers*. Tsukuba-shi, Ibaraki-ken, Japan : National Institute of Agro-Environmental Sciences, Ministry of Agriculture, Forestry, and Fisheries, Official Method of Analysis Fertilizers JAPAN, 1987.

[6] HORWITZ, W. and GEORGE W. LATIMER. *Manual on Organic Fertilizer Analysis*, APSRDO, DOA:4/2551, 2551.
[7] ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS. *Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemists*. AOAC. 920.153, 981.10, 996.06, 985.29, 942.23, 984.27, 999.10. Arlington, Virginia : Association of Official Analytical Chemists International, 2012.

13

อิทธิพลของสารเจือทังสเตนที่มีผลต่อสมบัติทางโครงสร้างและเทอร์โมโครมิกของวาเนเดียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล

Effect of tungsten dopant on structural and thermochromic properties of vanadium dioxide synthesized by hydrothermal method

กรองทิพย์ เติมเกาะ[1*], กิตติยา ปลื้มใจ, วงพงษ์ เจนธนกิจ[1], กรองกาญจน์ ศิรินุกุลวัฒนา[1]

Krongtip Termkoa[1*], Kittiya PlemJai, Woraphong janetanakit[1], Krongkran Sirinukunwattana[1]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของการเจือโดยโมลทังสเตน (W) ที่มีผลต่อสมบัติทางความร้อนและรูปร่างโครงสร้างของวาเนเดียมไดออกไซด์ (VO_2) โดยใช้สารตั้งต้นวาเนเดียมเพนทอกไซด์ (V_2O_5) และกรดออกซาลิก ($H_2C_2O_4$) เป็นตัวรีดิวซ์ด้วยอัตราส่วนโมเลกุล 1:3 เตรียมจากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลที่อุณหภูมิ 26^{O}C และเจือทังสเตนปริมาณที่แตกต่างกันเพื่อลดอุณหภูมิทรานซิชันหลังจากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิสูง สาร VO_2 และสารที่เจือทังสเตนที่สังเคราะห์ได้ถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Differential Scanning Calorimetry (DSC), X-ray diffraction (XRD), และ Scanning Electron Microscope (SEM) ผลจากเทคนิค DSC แสดงให้เห็นว่าการเจือทังสเตนสามารถลดค่าอุณหภูมิทรานซิชันขึ้นอยู่กับปริมาณทังสเตนที่เจือลงไป โดยค่าอุณหภูมิทรานซิชันลดลงไปถึง 35^{O}C เมื่อเจือทังสเตนร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

Abstract

The research is to investigate effect of tungsten (W) dopant on thermal and structural properties of synthesized vanadium dioxide (VO_2). VO_2 was synthesized using vanadium pentoxide (V_2O_5) as a precursor and oxalic acid ($H_2C_2O_4$) as a reducing agent with 1:3 molar ratios by hydrothermal method at 260^{O}C. W with different weight ratios were added to the initial solution to reduce the phase transition temperature and a subsequent thermal annealing. The as-prepared VO_2 and W-doped VO_2 powder were characterized using differential scanning calorimetry (DSC), X-ray diffraction (XRD), and scanning electron microscope (SEM). DSC results showed that W doping can decrease phase transition temperature depending on concentration of W. The phase transition temperature was decreased to 35^{O}C when VO_2 was doped with the 5 wt. % W.

คำสำคัญ : กระจกอัจฉริยะเทอร์โมโครมิก วาเนเดียมไดออกไซด์ อุณหภูมิทรานซิชัน

Keywords : Thermochromic smart glass, Vanadium dioxide, Transition temperature

[1] กรมวิทยาศาสตร์บริการ กองวัสดุวิศวกรรม

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

1. บทนำ (Introduction)

ภาวะโลกร้อน (Global warming) หรือการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศ (Climate change) คือ การที่อุณหภูมิเฉลี่ยของโลกเพิ่มสูงขึ้นเนื่องมาจากภาวะเรือนกระจก (Greenhouse effect) ซึ่งเกิดจากกิจกรรมชีวิตประจำวันของมนุษย์ เช่น การใช้ไฟฟ้า เครื่องปรับอากาศ การขนส่ง และขบวนผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม กิจกรรมเหล่านี้ได้เพิ่มปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซกลุ่มไนตรัสออกไซด์ และคลอโรฟลูโรคาร์บอน (CFC) [1] ทำให้ก๊าซเรือนกระจกเหล่านี้ลอยขึ้นไปรวมตัวกันอยู่บนชั้นบรรยากาศของโลก ส่งผลให้รังสีจากดวงอาทิตย์ที่ควรจะสะท้อนกลับออกไปในปริมาณที่เหมาะสม กลับถูกก๊าซเรือนกระจกเหล่านี้กักเก็บไว้ ส่งผลให้อุณหภูมิของโลกค่อย ๆ สูงขึ้นจากเดิม ผลกระทบของภาวะโลกร้อนนี้ก็มีให้เราเห็นกันอยู่บ่อย ๆ เช่น สภาพลมฟ้าอากาศที่ผิดแปลกไปจากเดิม ภัยธรรมชาติที่รุนแรงมากขึ้น น้ำท่วม แผ่นดินไหว พายุที่รุนแรง อากาศที่ร้อนผิดปกติ ซึ่งในอนาคตคาดว่าผลกระทบของภาวะโลกร้อนจะรุนแรงมากขึ้นเรื่อย ๆ

กระจกเป็นวัสดุชนิดหนึ่งที่ได้รับความนิยมนำมาใช้ในงานก่อสร้างอาคาร ทั้งที่ใช้เป็นผนังภายนอกของอาคาร หน้าต่าง ประตู ทั้งนี้รวมถึงอุตสาหกรรมรถยนต์ เนื่องจากกระจกมีความโปร่งใส ช่วยเพิ่มแสงสว่างภายในอาคาร นอกจากนี้ ยังช่วยในการมองเห็นทัศนียภาพภายนอกได้ด้วย แต่ข้อเสียของกระจกก็คือนอกจากแสงผ่านเข้ามาได้แล้วนั้นยังนำความร้อนเข้ามาในตัวอาคารด้วย ส่งผลทำให้มีการใช้เครื่องปรับอากาศมากขึ้น สิ้นเปลืองพลังงาน เพิ่มการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกสู่บรรยากาศ ที่เป็นสาเหตุทำให้เกิดภาวะโลกร้อน

กระจกอัจฉริยะ (Smart glass) เป็นกระจกที่ช่วยในการประหยัดพลังงานเหมือนกระจกฉนวนทั่วไป แต่มีความพิเศษกว่าที่สามารถเปลี่ยนความใสของกระจกเป็นทึบแสงหรือเปลี่ยนสีตามสารเจือที่เติมลงไปอย่างอัตโนมัติเมื่อมีปัจจัยภายนอกมากระตุ้น แบ่งได้เป็น 2 ประเภท [2] คือ

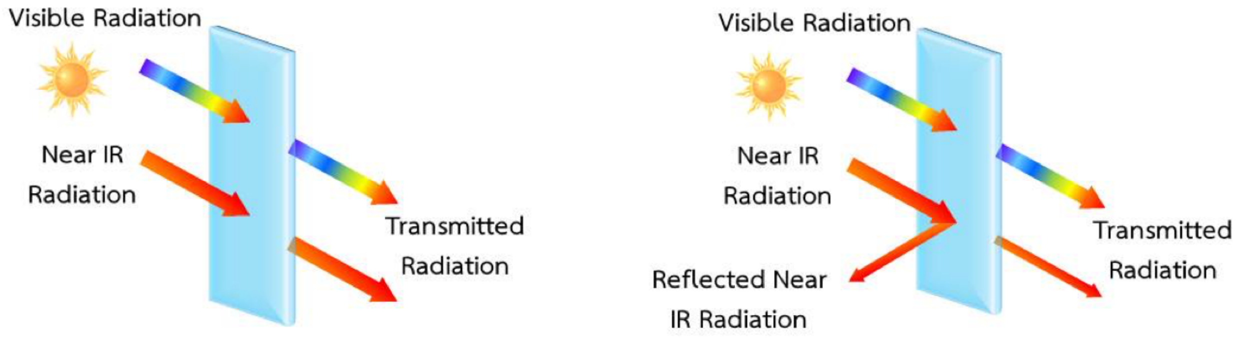
1. กระจกอัจฉริยะแบบ Active จะตอบสนองต่อแรงดันไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้าที่จ่ายเข้าไปแล้วสามารถเปลี่ยนกระจกใสให้ทึบแสงตามที่ต้องการ อาทิ เช่น กระจกอัจฉริยะอิเล็กโตรโครมิก (Electrochromic smart glass) และกระจกอัจฉริยะผลึกของเหลว (Liquid crystals smart glass) ซึ่งกระบวนการการผลิตกระจกประเภทนี้ค่อนข้างซับซ้อน และการติดตั้งเพื่อนำไปใช้งานตามอาคารบ้านเรือนค่อนข้างยากเนื่องจากมีระบบไฟฟ้ามาเกี่ยวข้อง

2. กระจกอัจฉริยะแบบ Passive จะตอบสนองต่อสภาพแวดล้อมภายนอก เช่น ความร้อนและแสง เช่น กระจกอัจฉริยะเทอร์โมโครมิก (Thermochromic smart glass) และกระจกอัจฉริยะโฟโตโมโครมิก (Photochromic smart glass) ซึ่งมีกระบวนการผลิตไม่ซับซ้อน และการติดตั้งง่ายกว่าแบบ Active โดยกระจกอัจฉริยะโฟโตโมโครมิกจะเปลี่ยนสมบัติทางแสงก็ต่อเมื่อมีปริมาณของแสงเหนือม่วง (Ultraviolet light) ผ่านเข้ามา ซึ่งเหมาะกับการทำเลนส์กระจกแว่นตาเปลี่ยนสีได้ ส่วนกระจกอัจฉริยะเทอร์โมโครมิกจะเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางแสงอัตโนมัติเมื่อมีความร้อนเป็นตัวกระตุ้น

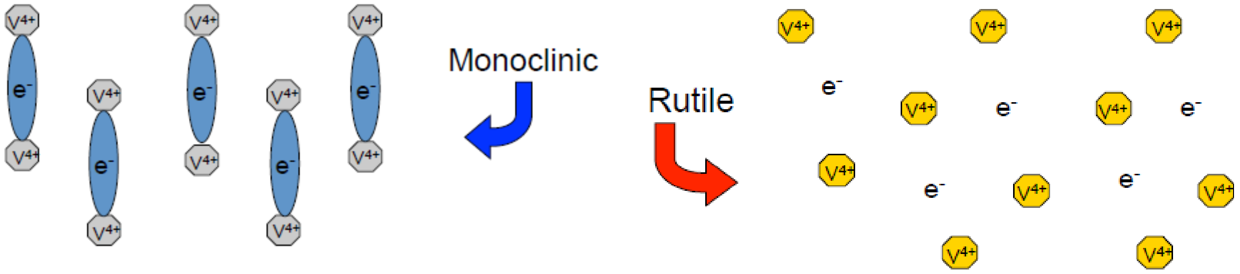
จากเหตุผลที่กล่าวมาเบื้องต้นว่าประเทศไทยเป็นประเทศเมืองร้อนและมีแนวโน้มร้อนเพิ่มขึ้นทุก ๆ ปี กระจกอัจฉริยะประเภทเทอร์โมโครมิกจึงมีความเหมาะสมกับประเทศไทย เพราะสามารถเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิที่สูง ทำให้ความร้อนจากแสงอาทิตย์หรือแสงในช่วงอินฟราเรดใกล้ (Near infrared; NIR) ที่ส่องผ่านเข้ามาภายในอาคารหรือที่อยู่อาศัยถูกลดทอนลงหรือกั้นไม่ให้เข้ามาได้ ผลดีที่ได้ตามมาก็คือ ไม่ต้องติดมู่ลี่หรือผ้าม่านและประหยัดพลังงานไฟฟ้าและลดการใช้เครื่องปรับอากาศ

กระจกอัจฉริยะเทอร์โมโครมิกเป็นกระจกที่สามารถเปลี่ยนสีจากกระจกใสเปลี่ยนให้เป็นทึบแสงกลับไปกลับมาได้โดยมีความร้อนเป็นตัวกระตุ้น รูปที่ 1 แสดงกลไกการทำงานของกระจกเมื่อด้านหนึ่งของกระจกถูกเคลือบด้วยวัสดุเทอร์โมโครมิก รูปทางด้านซ้ายมือแสดงเมื่ออุณหภูมิ (T) ต่ำกว่าอุณหภูมิทรานซิชัน (Transition temperature, T_c) ทั้งแสงที่มองเห็นได้ (Visible) ที่มีความยาวคลื่น 380-780 nm และแสงช่วง NIR ที่มีความยาวคลื่นมากกว่า 780 nm สามารถผ่านกระจกไปอีกด้านหนึ่งได้ แต่ในทางกลับกันเมื่ออุณหภูมิของกระจกมีค่ามากกว่าอุณหภูมิทรานซิชันรังสี NIR บางส่วนจะสะท้อนกลับ

โดยทั่วไปแล้ววัสดุที่มีสมบัติเปลี่ยนสีตามอุณหภูมิและให้ผลด้านการสะท้อนคลื่นความร้อนได้แก่กลุ่มออกไซด์ของโลหะทรานซิชัน



รูปที่ 1 แสดงการทำงานของกระจก (ซ้าย) $T > T_c$ และ (ขวา) $T < T_c$



รูปที่ 2 โครงสร้าง VO_2 (ซ้าย) T > T_c เฟส Monoclinic และเมื่อได้รับความร้อน (ขวา) T < T_c เฟสเปลี่ยนเป็น Rutile [3]

เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) และวาเนเดียมไดออกไซด์ (VO_2) ซึ่งโลหะออกไซด์ดังกล่าวจะมีสมบัติเป็นวัสดุกึ่งตัวนำ (Semiconductor) ที่อุณหภูมิห้อง และเปลี่ยนเป็นสถานะโลหะ (Metallic) ที่อุณหภูมิทรานซิชัน สาร VO_2 จัดได้ว่ามีความน่าสนใจสูง นักวิจัยนิยมศึกษาสารนี้กันมากเพราะอุณหภูมิทรานซิชันมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิห้องมากที่สุด VO_2 ที่อุณหภูมิห้องจะมีโครงสร้างเฟสโมโนคลินิก (Monoclinic) และจะเปลี่ยนเฟสหรืออุณหภูมิ ทรานซิชัน (T_c) อุณหภูมิที่ 68°C [3-4] โดยมีการเปลี่ยนไปเป็นเฟสรูไทล์ (Rutile) ดังแสดงในรูปที่ 2 ส่งผลให้สีและสมบัติทางไฟฟ้า สมบัติทางแสงเปลี่ยนไป สามารถสะท้อน NIR ได้ เพราะการเปลี่ยนเฟสเป็นเฟสรูไทล์ทำให้โครงสร้างของวาเนเดียมไดออกไซด์มีสมบัติเป็นโลหะ เมื่อคลื่นความร้อนในช่วง NIR กระทบบนกระจกจะเกิดการสะท้อนกลับออกไปได้มากขึ้น [3]

ถึงแม้ว่า VO_2 จะมีอุณหภูมิทรานซิชันใกล้เคียงกับอุณหภูมิห้องมากที่สุดแต่ยังมีค่าที่สูงอยู่ จึงมีความพยายามลดอุณหภูมิทรานซิชันลง ซึ่งอุณหภูมิทรานซิชันสามารถลดลงได้ด้วยการเจือสาร (Doping) โดยไอออนที่มีค่าวาเลนซ์ (Valence) สูงกว่าจะทำให้ T_c ลดลง เช่น ทังสเตน (W) ซึ่งอุณหภูมิเปลี่ยนเฟสจะมีแนวโน้มลดลงตามสัดส่วนของสารเจือที่เติมลงไป [4] จากเหตุผลที่กล่าวมาเบื้องต้นนี้ งานวิจัยนี้ต้องการพัฒนากระบวนการผลิตกระจกอัจฉริยะแบบเทอร์โมโครมิกที่สามารถลดอุณหภูมิทรานซิชันลงเพื่อให้ตอบสนองกับอุณหภูมิแท้จริงในประเทศไทย ทำให้กระจกสามารถช่วยในการประหยัดพลังงาน ลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกสู่บรรยากาศ แก้ปัญหาภาวะโลกร้อนอย่างยั่งยืน

2. วิธีการวิจัย (Experimental methods)

2.1 วิธีการสังเคราะห์วาเนเดียมไดออกไซด์ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal method)

วิธีไฮโดรเทอร์มอลเป็นกระบวนการสังเคราะห์สารโดยใช้ความร้อนและความดันทำให้สารละลายทำปฏิกิริยาได้อนุภาคที่มีขนาดเล็ก มีความบริสุทธิ์สูงโดยจะได้สารละลายหรือสารแขวนลอย ซึ่งมีตัวแปรในการเกิดปฏิกิริยาที่สำคัญหลายตัว เช่นความเข้มข้นของสารละลาย อุณหภูมิที่ทำปฏิกิริยา ระยะเวลาให้ความร้อน pH ของสารละลาย เป็นต้น [5-6] งานวิจัยนี้สังเคราะห์วาเนเดียมไดออกไซด์ได้จากการวาเนเดียมเพนทอกไซด์ (V_2O_5) ในที่นี้เป็นสารตั้งต้นและรีดิวซ์ด้วยกรดออกซาลิก ($H_2C_2O_4$) ด้วยอัตราส่วนโดยโมล (1:3) V_2O_5: $H_2C_2O_4$ ละลายในน้ำกลั่น สามารถเขียนสมการการเกิดปฏิกิริยาได้ดังนี้

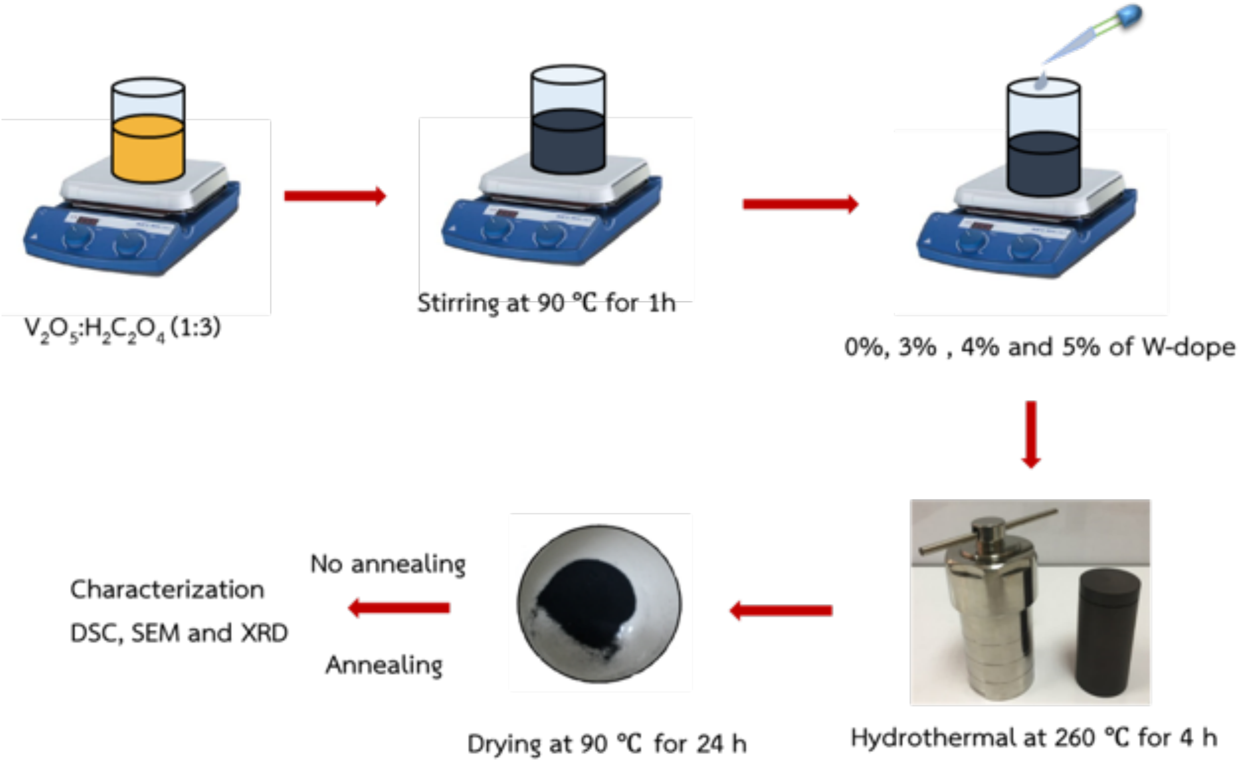
$$V_2O_5 + H_2C_2O_4 + 3H_2O \longrightarrow 2VO_2 + 2H_2O + 2CO_2$$

ในขั้นตอนนี้กรดออกซาลิกจะสลายตัวทางความร้อนให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และเปลี่ยนเลขออกซิเดชันของวาเนเดียมจาก V^{5+} เป็น V^{4+} [7] สารละลาย (1:3) V_2O_5:$H_2C_2O_4$ ถูกกวนอย่างต่อเนื่องด้วยเครื่องกวนแท่งแม่เหล็กที่อุณหภูมิ 90°C ความเร็วรอบ 1,000 rpm เป็นเวลา 1 ชั่วโมง สารละลายจะเปลี่ยนจากสีส้มเป็นสีน้ำเงินเข้ม จากนั้นเจือสารทังสเตนในสารละลายเพื่อลดอุณหภูมิทรานซิชันโดยใช้กรดทังสติก (Tungstic Acid ; H_2WO_4) ด้วยอัตราส่วน (0, 3, 4 และ 5 wt. % W) โดยทำการละลาย H_2WO_4 ในสารละลายแอมโมเนีย (NH_4OH) ที่อุณหภูมิ 90°C จนได้สารละลายใสไม่มีสี นำสารละลายใสที่ได้เติมไปในสารละลาย V_2O_5:$H_2C_2O_4$ ที่เตรียมได้ จากนั้นนำสารละลายสีน้ำเงินเข้มที่ได้บรรจุในภาชนะเทฟลอนออโตเคลปขนาดปริมาตร 250 ml แล้วนำเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 260°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นล้างตะกอนด้วยน้ำกลั่นหลาย ๆ ครั้ง ทิ้งให้สารละลายตกตะกอน แล้วนำไปอบไล่ให้แห้งที่ 90°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำผงที่ได้ส่วนหนึ่งไปวิเคราะห์คุณลักษณะด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM) Differential Scanning Calorimeter (DSC) และ X-ray diffraction (XRD) และตัวอย่างอีกส่วนหนึ่งไปเผาที่อุณหภูมิสูงที่ 450°C ภายใต้สภาวะบรรยากาศ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อให้สาร VO_2 เปลี่ยนเฟสที่มีความเสถียรมากขึ้น แล้ววิเคราะห์คุณลักษณะด้วยเทคนิค SEM DSC และ XRD ดังแสดงในรูปที่ 3

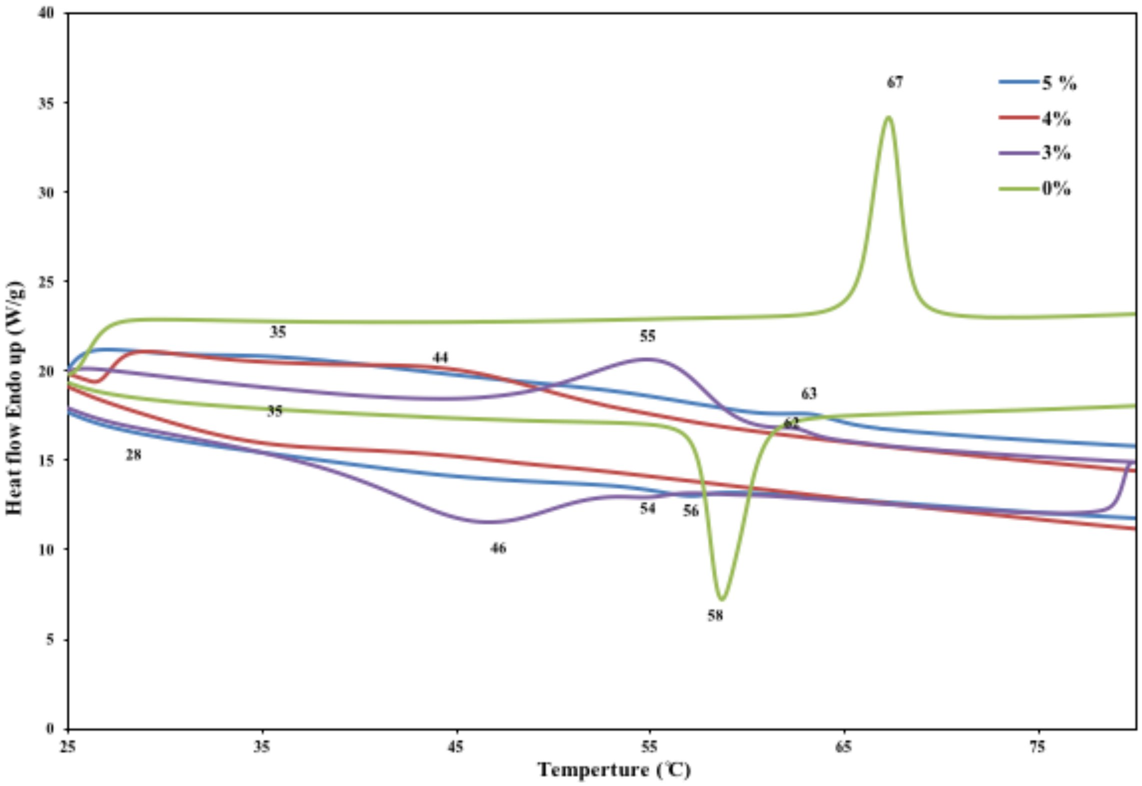
3. ผลและวิจารณ์ (Results and discussion)

3.1 สมบัติความเป็นเทอร์โมโครมิก

จากการทดลองสังเคราะห์วาเนเดียมไดออกไซด์ โดยศึกษาตัวแปรปริมาณการเจือสารทังสเตนเพื่อปรับปรุงสมบัติเทอร์โมโครมิกให้มีค่าอุณหภูมิทรานซิชันลดลงแล้ว ได้นำผงที่สังเคราะห์ได้ก่อนและหลังเผาที่อุณหภูมิ 450°C มาวิเคราะห์คุณลักษณะด้วยเทคนิค



รูปที่ 3 แสดงขั้นตอนการสังเคราะห์ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล



รูปที่ 4 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DSC ของสารที่เจือด้วย H_2WO_3 ด้วยอัตราส่วนที่แตกต่างกัน และเผาที่ 450°C

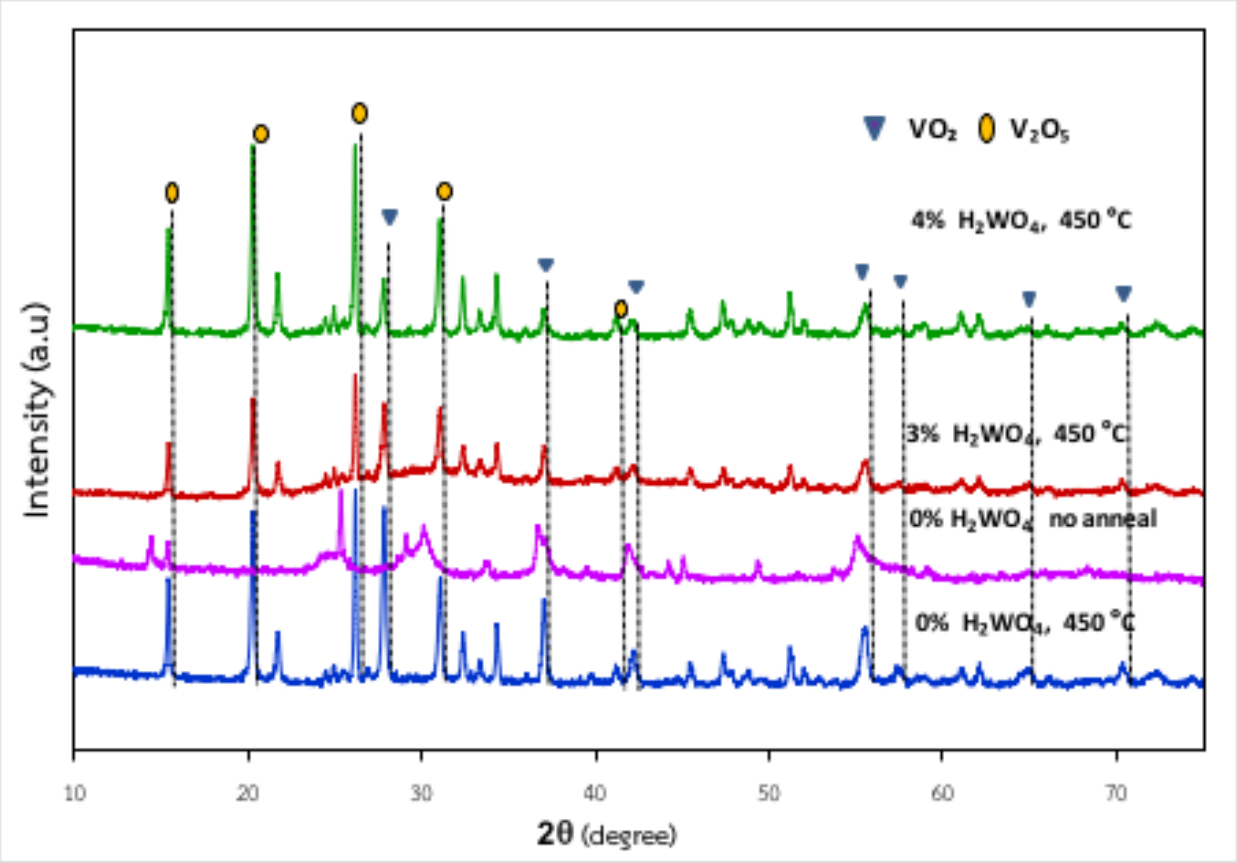
Scanning Electron Microscope (SEM) Differential Scanning Calorimeter (DSC) และ X-ray diffraction (XRD) ได้ผลการวิเคราะห์ผลดังนี้

3.1.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DSC

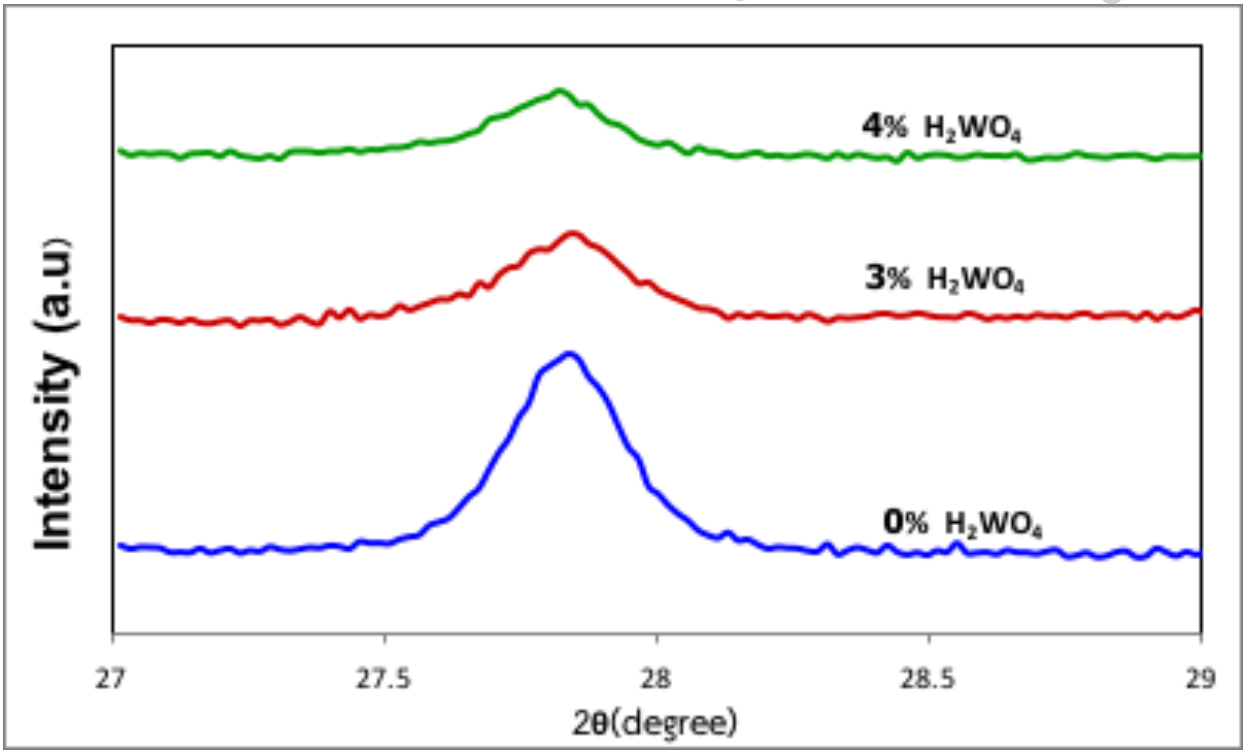
ผงที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอลก่อนและหลังเผาที่ 450°C ที่มีการเจือสารทังสเตนในสารละลาย 1:3 V_2O_5: $H_2C_2O_4$ (ด้วยอัตราส่วน 0, 3, 4 และ 5 wt. % W) ถูกวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DSC โดยให้อุณหภูมิจาก 25°C ถึง 80°C หลังจากนั้นลดอุณหภูมิลงมาที่ 25°C จากผลการวิเคราะห์พบว่าผงก่อนเผาทั้งผงที่เจือและไม่เจือสารทังสเตนไม่มีสมบัติทางเทอร์โมโครมิก คือไม่พบพีคระหว่างอุณหภูมิ 25-80°C ส่วนผลการวิเคราะห์ของผงหลังเผาที่เจือสารทังสเตน ด้วยอัตราส่วนที่แตกต่างกันแสดงดังในรูปที่ 4 จากกราฟผงที่ไม่เจือสารทังสเตนพบพีคหรือค่าอุณหภูมิทรานซิชันที่ 68°C ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎี [3-4] ส่วนผงที่เจือด้วยทังสเตนพบว่าสารทังสเตนสามารถลดค่าอุณหภูมิทรานซิชัน โดยการเจือที่อัตรา 5 wt.% W อุณหภูมิทรานซิชันลดลงมาอยู่ที่ประมาณ 35°C และที่ 5 wt.% W ยังพบพีคที่ 63°C อีก 1 พีค เช่นเดียวกันกับผลการวิเคราะห์การเจือสารทังสเตนที่ 3 wt.% W พบพีคที่ 55°C และ 62°C การเกิดพีคสองจุดนี้เกิดจากผงที่สังเคราะห์ได้มีขนาดอนุภาคหรือลักษณะที่แตกต่างกัน ซึ่งสอดคล้องกับวิจัยของ Lei Dai และคณะ [8] ส่วนการเจือที่ 4 wt. % W พบพีคที่ 44°C และเมื่อลดอุณหภูมิลงมาจะพบพีคที่ ประมาณ 35°C อุณหภูมิทรานซิชันของ VO_2 ที่เจือด้วยทังสเตนลดลงเนื่องจากไอออน W^{6+} มีประจุบวกสูง แพร่เข้าไปแทนที่ไอออน V^{4+} ในโครงสร้างผลึกของ VO_2 ทำให้เกิดอิเล็กตรอน 2 ตัวจากชั้น d ของไอออน W เคลื่อนไปแทนที่ไอออน V ใกล้เคียง หรือกล่าวได้ว่า W เข้าไปสลายพันธะ V^{4+}- V^{4} และเกิดพันธะคู่ใหม่ คือ V^{3+}- W^{6+} และ V^{3+}-V^{4+} การสูญเสียขั้วเหมือน (Homo-polar) ของพันธะ V^{4+}- V^{4} นี้ทำให้ชั้นพลังงาน (Band gap) ของ VO_2 ลดลง และเฟสสารกึ่งตัวนำไม่เสถียรส่งผลให้อุณหภูมิทรานซิชันลดลง [9-11]

3.1.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD

เมื่อนำผงที่สังเคราะห์ได้วิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 5 หลังการเผาที่ 450°C ผลการวิเคราะห์พบว่าผงที่เจือทังสเตนด้วยอัตราส่วน 0, 3, และ 4 wt. % W จะพบพีค diffraction angle, 2θ ประมาณที่ 27.8° 36.9° 42.1° 55.5° 57.4° และ 57.4° แสดงให้เห็นว่าผงที่สังเคราะห์ได้เป็นสาร VO_2(M) (JCPDS 43-1051) ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Xiudi Xiao และคณะ [11] นอกจากนี้ผล XRD ยังพบเฟสของ V_2O_5 ที่พีคประมาณ 15.3° 20.1° 21.8° 26.2° 31.1° 32.5° 34.0° และ 41.6° [12-14]



รูปที่ 5 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ของผงก่อนเผาที่ไม่ได้เจือทังสเตนและหลังเผาที่เจือทังสเตนด้วยอัตราส่วนที่แตกต่างกัน



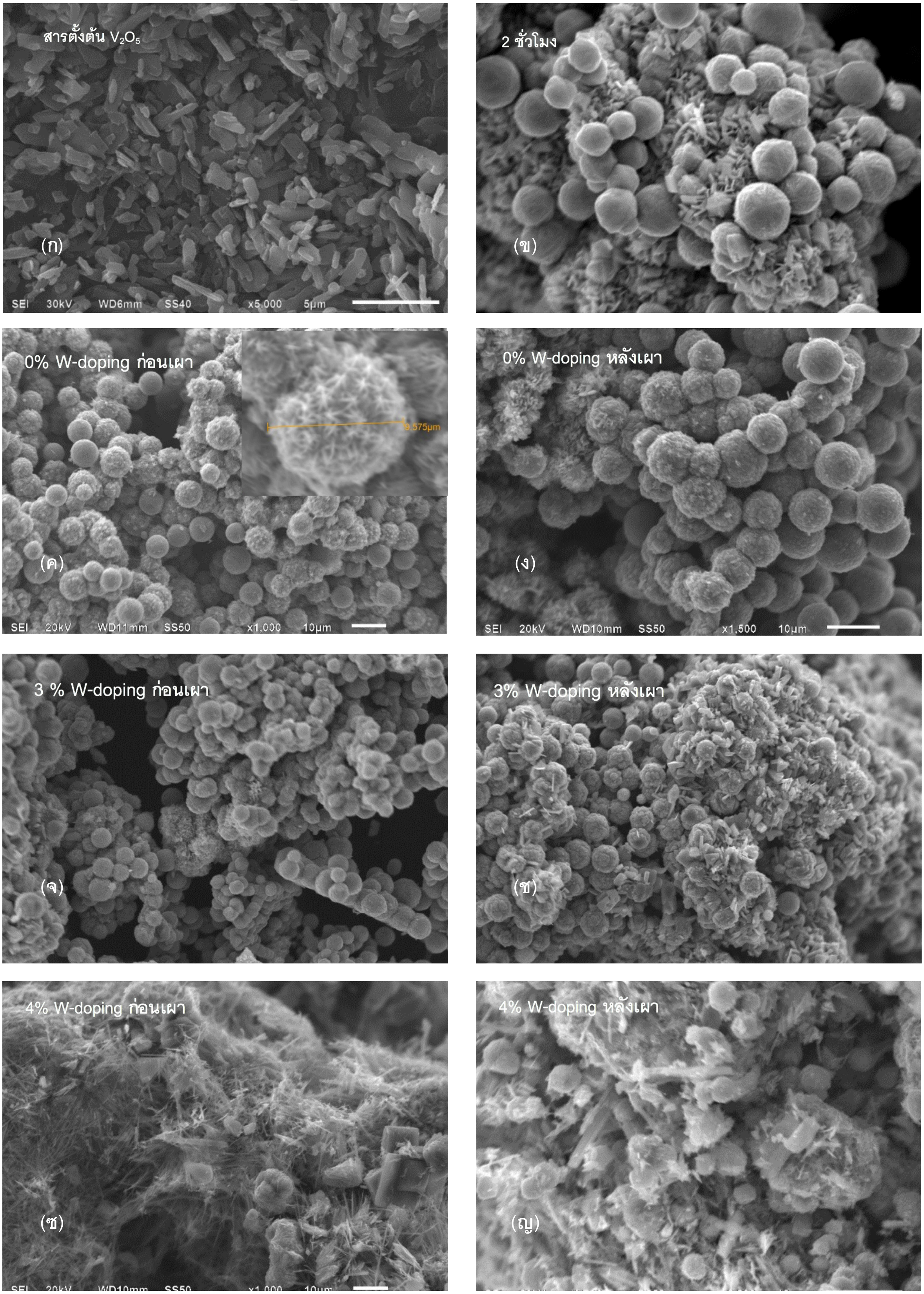
รูปที่ 6 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ของผงเจือสารทังสเตน

นอกจากนี้จะพบว่าหลังการเผาผงสีดำเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลเหลือง เนื่องจากการเผาที่อุณหภูมิ 450°C ภายใต้สภาวะบรรยากาศ VO_2 ไม่เสถียรจากการเกิดออกซิเดชัน (Oxidation) คือสารทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ ทำให้ผงบางส่วนได้เปลี่ยนกลับมาเป็น V_2O_5 อีกครั้ง และเมื่อเปรียบเทียบกับผงที่ไม่ได้เจือสารทังสเตนก่อนและหลังเผาพบพีคทั้ง VO_2 และ V_2O_5 แต่ผงก่อนเผาไม่พบพีคที่ 20.1° และ 27.8° ของ VO_2 V_2O_5 ตามลำดับ ทั้งนี้ยังพบว่าสารเจือทังสเตนมีผลต่อการเปลี่ยนตำแหน่งพีค 2θ ของ 27.8° ตามรูปที่ 6 แสดงให้เห็นว่าการเจือสารทังสเตนที่ 3 wt. % ตำแหน่งพีค 2θ เลื่อนขึ้นทางด้านขวาเล็กน้อยแต่ผงของเจือสาร 4 wt. % ตำแหน่ง 2θ จะเยื้องมาทางซ้าย สอดคล้องกับสมการ Bragg คือ $2d\sin\theta = \lambda$, โดยที่ λ คือความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ที่ตกกระทบอะตอมทำมุม θ และ d เป็นระยะห่างระหว่างอะตอม เมื่อมุมตกกระทบสูงขึ้น d จะน้อยในขณะที่มุมตกกระทบน้อย d จะสูงขึ้น ผลของ d ที่แตกต่างกันนี้มีผลจาก W^{6+} มีรัศมีใหญ่กว่า V^{4+} เมื่อ W^{6+} แพร่ไปที่โครงสร้างผลึก VO_2 แทนที่ V^{4+} ทำให้ระยะ d เพิ่มขึ้น [11-12,15]

3.2 สมบัติทางโครงสร้าง

3.1.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM

รูปที่ 7 (ก) แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของสารตั้งต้น V_2O_5 จะเห็นได้ว่า V_2O_5 มีลักษณะเป็นแท่ง มีขนาดความยาวประมาณ 0.5 - 5 μm เมื่อทำศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาการทำไฮโดรเทอร์มอล โดยเวลาไฮโดรเทอร์มอล 2 ชั่วโมงจาก 4 ชั่วโมงมาเป็น แสดงดังรูป 7 (ข) จากภาพถ่าย SEM จะเห็นว่าอนุภาคบางส่วนรูปร่างทรงกลมผิวไม่เรียบและมีลายที่ผิงทรงกลม นอกจากนั้นยังพบอนุภาคที่เป็นแท่งเกาะกันเป็นก้อนโดยมีการรวมกันของเส้นม้วนกันจนเป็นทรงกลม และบางส่วนเป็นแท่งที่ไม่จับตัวเป็นก้อน จากผลการศึกษานี้จะเห็นว่าระยะเวลาการทำไฮโดรเทอร์มอลมีผลลักษณะโครงสร้างของอนุภาค รูปที่ 7 (ค) - (ง) แสดงการเปรียบเทียบผลวิเคราะห์ด้วย SEM ของผงที่เจือสารทังสเตน 0 wt.% 3 wt.% และ 4 wt. % ก่อนและหลังที่อุณหภูมิที่ 450°C ผลการวิเคราะห์ของผงที่เจือสารทังสเตน 0 wt.% และ 3 wt.% พบว่าอนุภาคส่วนใหญ่มีรูปร่างเป็นทรงกลมผิวไม่เรียบขนาดประมาณ 2-10 μm โดยบางส่วนจะมีความขรุขระที่ผิวมีลักษณะคล้ายดอกไม้ ในรูปที่ 7 (ค) มุมขวาบนแสดงภาพขยายของอนุภาคที่เป็นทรงกลมที่มีการรวมตัวกันอนุภาคเป็นแท่งและแผ่นที่ผิวทำให้มีลักษณะคล้ายดอกไม้ แสดงให้เห็นว่าระหว่างขั้นตอนไฮโดรเทอร์มอลสารละลายได้ทำปฏิกิริยากันเกิดการรวมตัวของอนุภาคจับเป็นก้อน (Agglomeration) และเมื่อเปรียบเทียบกับผงหลังเผาที่อุณหภูมิที่ 450°C พบอนุภาคทรงกลมจับกันเป็นก้อนใหญ่ดังรูปที่ 7 (ง) สำหรับผงที่เจือสารทังสเตนที่ 3% บางส่วนมีรูปร่างทรงกลมที่ผิวมีอนุภาคเป็นแท่งและแผ่นเกาะรวมตัวคล้ายดอกไม้ จะพบมากในมุมซ้ายบนของภาพซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Jinxing Wang และคณะ แต่เมื่อพิจารณารูปที่ 7 (จ-ซ) ก่อนและหลังเผาพบว่ามีอนุภาคลักษณะเป็นแท่งที่ผิวอนุภาคทรงกลมมากขึ้นและอนุภาค



รูปที่ 7 ภาพถ่าย SEM (ก) สารสารตั้งต้น V_2O_5 (ข) ไฮโดรเทอร์มอล ที่ 260°C ระยะเวลา 2 ชั่วโมง (ค)-(ญ) ผงที่เจือสารทังสเตน 0% 3% 4% ไฮโดรเทอร์มอล ที่ 260°C ระยะเวลา 4 ชั่วโมง ก่อนและหลังเผา

ทรงกลมเกาะกันเป็นก้อนใหญ่ แต่เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ของผงเจือสารที่ 4% ดังแสดงในรูปที่ 7 (ซ) จะพบอนุภาคเป็นเส้นใยและมีรูปทรงกลม และลักษณะเป็นแผ่นเล็กน้อย โดยจะพบอนุภาคทรงกลมมากขึ้นหลังเผาตามในรูปที่ 7 (ญ) จากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM นี้แสดงให้เห็นการเผาจะทำให้อนุภาคจับกันเป็นก้อนมากขึ้นและการเจือสารทังสเตนทำให้เกิดการจับตัวเป็นก้อนรูปร่างทรงกลมน้อยลงและเป็นเส้นและแผ่น เนื่องจากรัศมีของไอออน W^{6+} มีขนาดใหญ่กว่ารัศมีของไอออน V^{4+} และเมื่อ W แทนที่ใน VO_2 ซึ่งสอดคล้องกับในการวิเคราะห์ผลด้วย XRD และงานวิจัยของ David Aillie และคณะ [7]

4. สรุป (Conclusion)

งานวิจัยนี้ได้ทำการสังเคราะห์สารเทอร์โมโครมิก VO_2 ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอลซึ่งจะได้สารเป็นผงสีดำ จากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DSC ผงที่ได้หลังการเผาที่อุณหภูมิ 450°C โดยไม่มีการเจือสารทังสเตนอุณหภูมิทรานซิชันอยู่ที่ประมาณ 68°C และเมื่อเจือสารทังสเตน 5 wt. % สามารถลดอุณหภูมิทรานซิชันลงมาได้ถึง 35°C เนื่องจากชั้นพลังงาน (band gap) ลดลงจากการที่ไอออน W เข้าไปแทนที่ V ใน VO_2 และเฟสสารกึ่งตัวนำไม่เสถียรส่งผลให้อุณหภูมิทรานซิชันลดลง ส่วนการวิเคราะห์ผลด้วยเทคนิค XRD จะพบว่าผงก่อนและหลังเผาที่อุณหภูมิที่ 450°C ภายใต้สภาวะบรรยากาศ สาร VO_2 บางส่วนเปลี่ยนเฟสกลับเป็น V_2O_5 เนื่องจากเกิดการ oxidation การการเจือสารทังสเตนทำให้ตำแหน่งพีค 2θ เลื่อนขึ้นทางด้านซ้ายเล็กน้อย นอกจากนี้ภาพถ่าย SEM แสดงให้เห็นว่าสารที่สังเคราะห์ได้ที่ไม่มีการเติมทังสเตนรูปร่างเป็นทรงกลมขนาดประมาณ 2-10 μm เป็นอนุภาคแท่งและแผ่นมาเกาะรวมตัวกันเป็นก้อนที่ผิวคล้ายดอกไม้ แต่เมื่อเจือทังสเตนด้วยอัตรา 4 wt.% ผงที่สังเคราะห์มีลักษณะเป็นเส้นยาวที่มีขนาดความยาวที่แตกต่างกันประมาณ 1-5 μm และมีบางที่เป็นทรงกลม

5. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

ขอขอบคุณกรมวิทยาศาสตร์บริการที่ให้ทุนสนับสนุนโครงการวิจัยนี้ และขอขอบคุณ รศ.ดร.วิษณุ เพชรภา วิทยาลัยนาโนพระจอมเกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำหรับคำปรึกษาและช่วยอนุเคราะห์ให้ใช้ชุดไฮโดรเทอร์มอล

6. เอกสารอ้างอิง (References)

[1] *การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย* [ออนไลน์]. [อ้างถึงวันที่ 15 มกราคม 2562]. เข้าถึงจาก: https://www.tmd.go.th/info/info.php?FileID=20

[2] *Type of Smart Glass* [online]. 2013. [viewed 15 January 2019]. Available from: https://www.slideshare.net/glassapps/electrochromic-glass

[3] SAELI, M., C. PICCIRILLO, M.E.A. WARWICK and R. BINIONS. Thermochromic thin films: synthesis, properties and energy consumption modelling. *Material and process for energy*. 2013, pp. 736-746.

[4] JI, SHIDONG, FENG ZHANG and PING JIN. Preparation of high performance pure single phase VO_2 nanopowder by hydrothermally reducing the V_2O_5 gel. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2011, **95**(12), 3520-3526.

[5] LIVAGE, JACQUES. Hydrothermal synthesis of nanostructured vanadium oxides. *Material*. 2010, **3**(8), 4175-4195

[6] OSMOLOVSKAYA, O.M., I.V. MURIN, V.M. SMIRNOV and M.G. OSMOLOVSKY. Synthesis of vanadium dioxide thin films and nanopowders : a brief review. *Rev. Adv. Mater. Sci.* 2014, **36**(1), 70-74.

[7] ALIE, DAVID, LYNN GEDVILAS, ZHIWEI WANG, ROBERT TENENT, CHAIWAT ENGTRAKUL, YANFA YAN, SEAN E. SHAHEEN, ANNE C. DILLON and CHUNMEI BAN. Direct synthesis of thermochromic VO2 through hydrothermal reaction. *Journal of Solid State Chemistry*. 2014, **212**, 237–241.

[8] DAI, LEI, CHUANXIANG CAO, YANFENG GAO and HONGJIE LUO. Synthesis and phase transition behavior of undoped VO_2 with a strong nano-size effect. *Solar Energy Materials & Solar Cells*. 2011, **95**(2), 712–715.

[9] ZHAO, LILI, LEI MIAO, SAKAE TANEMURA, JIANHUA ZHOU, LIHUA CHEN, XIUDI XIAO and GANG XU. A low cost preparation of VO2 thin films with improved thermochromic properties from a solution-based process. *Thin Solid Films*. 2013, **543**, 157–161.

[10] ROMANYUK, ANDRIY, ROLAND STEINER, LAURENT MAROT and PETER OELHAFEN. Temperature-induced metal–semiconductor transition in W-doped VO2 films studied by photoelectron spectroscopy. *Solar Energy Materials & Solar Cells.* 2007, **19**(23), 1831–1835.

[11] XIAO, XIUDI., HUA ZHANG, GUANQI CHAI, YAOMING SUN, TAO YANG, HAOLIANG CHENG, LIHUA CHEN, LEI MIAO and GANG XU. A cost-effective process to prepare VO2 (M) powder and films with superior thermochromic properties. *Materials Research Bulletin*. 2014, **51**, 6–12.

[12] LI, WENJING., SHIDONG JI, YAMEI LI, AIBIN HUANG, HONGJIE LUO and PING JIN. Synthesis of VO_2

nanoparticles by a hydrothermal assisted homogeneous precipitation approach for thermochromic applications. *Royal Society of Chemistry Advances*, 2014, (25), 13026.

[13] WANG, JINXING. WEIJIE YU, SHUN XU, SONGYAN DAI, JIADONG WANG, CHENXI WANG, WEN ZENG and PEISHAN CAO. A study on the precursor of vanadium pentoxide by the hydrothermal method. *Ceramics International*. 2014, **40**(1) Pt. A, 317–321.

[14] AKL, A. ALAA. Thermal annealing effect on the crystallization and optical dispersion of sprayed V_2O_5 thin films. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 2010, **7**(3), 223–229.

[15] ZOU, JIAN, XUANYAN CHEN and LEI XIAO. Phase transition performance recovery of W-doped VO_2 by annealing treatment. *Mater. Res. Express*. 2018, **5**(6), 065055.

คำแนะนำในการส่งต้นฉบับ
วารสารผลงานวิชาการ กรมวิทยาศาสตร์บริการ
Bulletin of Applied Sciences

บทความที่ส่งตีพิมพ์จะต้องไม่เคยตีพิมพ์หรืออยู่ในระหว่างการรอพิจารณาเพื่อตีพิมพ์ในวารสารอื่น บทความที่เสนอมาเพื่อตีพิมพ์อาจเขียนเป็นภาษาไทยหรือภาษาอังกฤษก็ได้ แต่บทคัดย่อต้องมีทั้งสองภาษา ทั้งนี้บทความทุกเรื่องจะได้รับการพิจารณาตรวจแก้จากผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาที่เกี่ยวข้อง และกองบรรณาธิการขอสงวนสิทธิ์ในการตรวจแก้ไขต้นฉบับและพิจารณาตีพิมพ์ตามลำดับก่อนหลัง

ความรับผิดชอบ

บทความที่ตีพิมพ์ในวารสารผลงานวิชาการกรมวิทยาศาสตร์บริการ ถือเป็นผลงานทางวิชาการ และเป็นความเห็นส่วนตัวของผู้เขียน ไม่ใช่ความเห็นของกรมวิทยาศาสตร์บริการ หรือกองบรรณาธิการ ผู้เขียนต้องรับผิดชอบต่อบทความของตน และบทความที่ตีพิมพ์ในเล่มนี้ไม่เคยพิมพ์ในวารสารใดมาก่อน และจะไม่นำส่งไปเพื่อพิจารณาตีพิมพ์ในวารสารอื่นภายใน 60 วัน

การเตรียมต้นฉบับและการส่งต้นฉบับ

ชื่อเรื่อง : ชื่อเรื่องต้องมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ตัวอักษร Cordia New ขนาด18 ตัวหนา จัดวางข้อความชื่อเรื่องตรงกึ่งกลางหน้ากระดาษ โดยชื่อเรื่องภาษาอังกฤษเฉพาะคำขึ้นต้น ให้พิมพ์ตัวใหญ่

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

ตัวอย่าง

อรวรรณ ปิ่นประยูร[1*], กรรณิการ์ บุตรเอก[2**]

Orawan Pinprayoon[1*], Kannika Butraek[2**]

[1]กรมวิทยาศาสตร์บริการ

[2]ศูนย์ประสานงานกระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม ประจำภูมิภาค ภาคใต้

* E-mail address: porawan@dss.go.th

** Corresponding author. e-mail address: kannika.b@most.go.th

บทคัดย่อ (Abstract) : บทคัดย่อต้องมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ตัวอักษร Cordia New ขนาด14 ตัวปกติ เนื้อหาในคัดย่อควรระบุวัตถุประสงค์ ผลการวิจัย และบทสรุปโดยย่อ

คำสำคัญ (Keywords) : คำสำคัญต้องมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ระบุคำสำคัญหรือวลีสั้นๆ 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 ขนาด16 ตัวหนา จัดชิดขอบด้านซ้าย หัวข้อย่อย ตัวอักษร Cordia New ขนาด14 ตัวหนา เนื้อหา ตัวอักษร Cordia New ขนาด 14 ตัวปกติ

2. วิธีการวิจัย (Experimental methods) : หัวข้อวิธีการวิจัย ตัวอักษร Cordia New ขนาด16 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 ขนาด16 ตัวหนา จัดชิดขอบด้านซ้าย หัวข้อย่อย ตัวอักษร Cordia New ขนาด 14 ตัวหนา เนื้อหา ตัวอักษร Cordia New ขนาด 14 ตัวปกติ

4. สรุป (Conclusion) : หัวข้อสรุป ตัวอักษร Cordia New ขนาด16 ตัวหนา จัดชิดขอบด้านซ้าย เนื้อหา ตัวอักษร Cordia New ขนาด 14 ตัวปกติ

5. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement) : หัวข้อกิตติกรรมประกาศ ตัวอักษร Cordia New ขนาด16 ตัวหนา จัดชิดขอบด้านซ้าย เนื้อหา ตัวอักษร Cordia New ขนาด 14 ตัวปกติ

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

ตัวอย่าง

[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.

[5] TECHNICAL DIVISION ON REFERENCE MATERIALS OF AOAC INTERNATIONAL. *Standard format and guidance for AOAC standard method performance requirement documents* [online]. 2011. [viewed 26 January 201]. 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

การส่งต้นฉบับ

1. ส่งต้นฉบับทางไปรษณีย์ ส่งต้นฉบับจำนวน 1 ชุด และสำเนาจำนวน 2 ชุด พร้อมไฟล์ข้อมูลมาที่
   กองบรรณาธิการวารสารวิชาการ กรมวิทยาศาสตร์บริการ (Bulletin of Applied Science)
   สำนักงานวารสาร สำนักงานเลขานุการกรม
   ฝ่ายประชาสัมพันธ์ กรมวิทยาศาสตร์บริการ
   เลขที่ 75/7 ถนนพระรามที่ 6 เขตราชเทวี กรุงเทพฯ 10400
2. ส่งต้นฉบับทางไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (e-mail)
   e-mail : bulletin@dss.go.th, udomlak@dss.go.th
3. ส่งต้นฉบับทางเว็บไซต์ได้ที่ URL : http://bas.dss.go.th

ดัชนีคำสำคัญ
วารสารผลงานวิชาการ กรมวิทยาศาสตร์บริการ
ปีที่ 8 ฉบับที่ 8 สิงหาคม 2562

ก

กรดไฮโดรคลอริก 72

กระจกอัจฉริยะเทอร์โมโครมิก 106

กระดาษหัตถกรรม 25

การจัดการสารเคมี 78

การชั่งน้ำหนัก 64

การบริหารจัดการห้องปฏิบัติการ 55

การเปลี่ยนแปลงความเสียหาย 48

การผลิตกระดาษ 25

ข

ขี้เลื่อย 96

ค

ความเที่ยงการวัด 64

ความปลอดภัย 55, 78

ความแม่นการวัด 64

ความยั่งยืน 55

ความไวต่ออัตราความเครียด 88

ความหนาแน่น 17

เครื่องชั่งน้ำหนักอิเล็กทรอนิกส์ 40

ซ

ซุป 9

ด

ดัชนีความแข็งเชิงกด 17

ป

ปรอท 72

ผ

ผงสีสะท้อนรังสีอาทิตย์ 34

ผงสีสะท้อนรังสีอินฟราเรดใกล้ 34

ผงสีสีแดง 34

ฟ

ฟองน้ำลาเท็กซ์ 17

ไฟฟ้าสถิต 64

ม

มอดุลัสยืดหยุ่น 48

ระบบปรับตั้งภายใน 40

ล

ลวดลาย 25

ว

วัสดุเหลือทิ้งกากกาแฟ 96

วาเนเดียมไดออกไซด์ 106

ศ

เศษผ้าฝ้าย 25

ส

สมบัติทางกล 88

สารเคมี 78

สารประกอบอนินทรีย์เชิงซ้อน 34

ห

ห้องปฏิบัติการ 55, 78

ห้องปฏิบัติการสีเขียว 55

เห็ดนางรม 96

เห็ดอูดิมาน 9

อ

อัตโนมัติ 40

อัตราความเครียด 48, 88

อุณหภูมิทรานซิชัน 106

อุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์ 78

Keyword Index

Bulletin of Applied Sciences

Vol. 8 No. 8 August 2019

A

Automatic 40

C

Chemical 78

Chemical industry 78

Chemical management 78

Complex inorganic compound pigment 34

Coral red pigment 34

Cotton rags 25

D

Damage evolution 48

Density 17

E

Elastic modulus 48

Electronic balance 40

G

Green Laboratory 55

H

Handicraft paper 25

Hydrochloric acid 72

I

Indentation hardness index 17

Internal calibration 40

L

Laboratory 55, 78

Laboratory Management 55

Latex foam 17

M

Measurement accuracy 64

Measurement precision 64

Mechanical property 88

Mercury 72

N

Near-infrared reflective pigment 34

O

Oudemansiella canarii 9

Oyster mushrooms 96

P

Papermaking 25

Pattern 25

S

Safety 55, 78

Sawdust 96

Solar reflective pigment 34

Soup 9

Static electricity 64

Strain rate 48, 88

Strain rate sensitivity 88

Sustainability 55

T

Thermochromic smart glass 106

Transition temperature 106

V

Vanadium dioxide 106

W

Waste coffee grounds 96

Weighing 64

ดัชนีผู้แต่ง
วารสารผลงานวิชาการ กรมวิทยาศาสตร์บริการ
ปีที่ 8 ฉบับที่ 8 สิงหาคม 2562

ก

กรองกาญจน์ ศิรินุกุลวัฒนา 106

กรองทิพย์ เติมเกาะ 106

กาจพันธ์ สกุลแก้ว 17

กิตติยา ปลื้มใจ 106

จ

จันทรัตน์ วรสรรพวิทย์ 78

จิตตกานต์ อินเที่ยง 40

จิรสา กรงกรด 72

จิราภรณ์ บุราคร 9, 96

ฐ

ฐิตารินีย์ สุโรพันธ์ 25

ณ

ณัฏฐกานต์ เกตุคุ้ม 78

ด

ดวงกมล เชาวน์ศรีหมุด 55

ธ

ธีรศักดิ์ ตั้งกิตติมศักดิ์ 34

น

นงลักษณ์ บรรยงวิมลณัฐ 96

บ

บุญธรรม ลิมป์ปิยพันธ์ 64

ป

ประเสริฐ แซ่จู 17

ปรานต์ ปิ่นทอง 9

ปวีณา เครือนิล 55

ปัทมา นพรัตน์ 78

พ

พัฒนะ รักความสุข 34

ล

ลดา พันธ์สุขุมธนา 34

ลัดดาวัลย์ เยียดยัด 55

ว

วรพงษ์ เจนธนกิจ 106

วิชิต ศิริโชติ 40

วีระชัย ลามอ 48, 88

ศ

ศักดิ์สิทธิ์ ดีอ่ำ 64

โศรดา ขุนโหร 72

ส

สมโภชน์ บุญสนิท 40

สัตติญา ดีดวงพันธ์ 78

สิทธิสุนทร สุโพธิณะ 34

สุพะไชย์ จินดาวุฒิกุล 96

อ

อนันตณัฐ กันต์ธัญญรัตน์ 55

อนุชา สินธุสาร 72

อภิช์ญา สุขมาก 72

อภิรัชต์ สมฤทธิ์ 9, 96

อัครินทร์ ไพบูลย์พานิช 55

อัจฉราวรรณ วัฒนหัตถกรรม 64

Author Index

Bulletin of Applied Sciences

Vol. 8 No. 8 August 2019

A

Acharawan Wattanahuttakum 64

Akarin Paibulpanich 55

Anantanat Kantanyarat 55

Anucha Sinthusarn 72

Aphiya Sukmak 72

Apirusht Somrith 9, 96

B

Boontham Limpiyapun 64

C

Chantarat Vorasapavit 78

D

Duangkamol Chaosrimud 55

J

Jiraporn Burakorn 9, 96

Jirasa Krongkrod 72

Jittakant Intiang 40

K

Kartpan Sakulkaew 17

Kittiya Plermjai 106

Krongkran Sirinukunwattana 106

Krongtip Termkoa 106

L

Lada Pansukhumthana 34

Laddawan Yeadyad 55

N

Natthakarn Ketkoom 78

Nonglug Bunyovimonnat 96

P

Pattama Nopparat 78

Pattana Rakkwamsuk 34

Paweena Kreunin 55

Pran Pintong 9

Prasert Saeju 17

S

Saksit Deeum 64

Sattiya Deedoungpan 78

Sitthisuntorn Supothina 34

Sompote Boonsanit 40

Sorada Khunhon 72

Supachai Jindavutikul 96

T

TeerasakTangkittimasak 34

Thitarini Suropan 25

W

Werachai Lamo 48, 88

Wichit Sirichote 40

Woraphong Janetanakit 106

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