



วารสารวิจัยราชภัฏพระนคร สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

Phranakhon Rajabhat Research Journal (Science and Technology)

ปีที่ 16 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม - ธันวาคม 2564

Vol. 16 No.2 July – December 2021

เจ้าของ

มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร

ISSN : 1905-4963 (Print)

ISSN : 2672-9296 (Online)

วัตถุประสงค์

เพื่อเป็นสื่อกลางในการเผยแพร่ผลงานวิชาการและงานวิจัยด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ได้แก่ สาขาคณิตศาสตร์ สถิติ ฟิสิกส์ เคมี ชีววิทยา ชีวเคมี จุลชีววิทยา เทคโนโลยีชีวภาพ เกษตรศาสตร์ วิทยาศาสตร์การอาหาร คหกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ทางทะเล วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม วิทยาศาสตร์สุขภาพ การพยาบาล การสาธารณสุข คอมพิวเตอร์ วัสดุศาสตร์ วิศวกรรมศาสตร์และอุตสาหกรรม สถาปัตยกรรม หรือวิทยาศาสตร์ประยุกต์

ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์ ดร.เป็รื่อง กิจรัตน์ภร
รองศาสตราจารย์ ดร.จิตราภา กุณทลบุตร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สืบทระกูล สุชาติ
อาจารย์วราวุธ ยอดจันทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนันต์กุล อินทรผดุง

อธิการบดี
รองอธิการบดี
คณบดีคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
คณบดีคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา

บรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประกายดาว ยิ่งสง่า

มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร

กองบรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร.พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์
ศาสตราจารย์ ดร.เรณูมาศ มาอ่อน
ศาสตราจารย์ ดร.สัลยุทธ์ สว่างวรรณ
ศาสตราจารย์ ดร.พวงเพ็ญ ศิริรักษ์
ศาสตราจารย์ ดร.ชิดชนก เหลือสินทรัพย์
ศาสตราจารย์ ดร.พิเชษฐ ลิ้มสุวรรณ
รองศาสตราจารย์ ดร.โองการ วนิชชีวะ
รองศาสตราจารย์ ดร.มนทลี ศาสนันทน์
รองศาสตราจารย์ ดร.ชาลีตา บรมพิชัยชาติกุล
รองศาสตราจารย์ ดร.ผ่องเพ็ญ จิตอารีย์รัตน์
รองศาสตราจารย์ ดร.วสิน เลิศวัฒนารักษ์
รองศาสตราจารย์ ดร.สุพัตรา โพธิ์เอี่ยม
รองศาสตราจารย์ ดร.มนตรี ทองคำ
รองศาสตราจารย์ ดร.อรธผล แก้ววัลย์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ลดา มัทธูรศ

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
มหาวิทยาลัยศิลปากร
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
มหาวิทยาลัยศิลปากร
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อะเคื้อ กุลประสูติติลก	มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมคิด สุทธิธารวัช	มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรสิน สุภวาลย์	มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนภูมิ ศิริงาม	มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิรักษ์ สุทธิธารวัช	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภาวดี ลิ้มสวัสดิ์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมฤดี สักการเวช	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปารเมศ กำแหงฤทธิ์รงค์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาสุระ อังกุลานนท์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
อาจารย์ ดร.กิตติพงษ์ เยาวาจา	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
อาจารย์ ดร.เมธิณี รัตสาร	กรมสอบสวนคดีพิเศษ
อาจารย์ ดร.วรวิดี สุขัยยะ	มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร
อาจารย์ ดร.อริยา รัตนพิทยาภรณ์	มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร
อาจารย์ ดร.ลักขณา ฤกษ์เกษม	มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร
อาจารย์ ดร.อัยยานนท์ จิตรโรจนรักษ์	มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร
อาจารย์ ดร.จุฬาลักษณ์ ชาญกุล	มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร

เลขานุการ

อาจารย์ ดร.รัศมี แสงศิริมงคลยิ่ง	มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร
----------------------------------	-------------------------

ผู้ช่วยเลขานุการ

นางสาวจิราภรณ์ เพื่องฟัง	สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร
--------------------------	---

ผู้ช่วยกองบรรณาธิการ

นางเดือนเพ็ญ สุขทอง	สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร
นางสาวมัทนา เกตุโพธิ์ทอง	สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร
นางสาวศุภราพร เกตุกลม	สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร
นางสาวทัศนีย์ ปันทอง	สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร
นายรัชตะ อนุวัชกุล	สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร
นายจักรพันธ์ ก้อนมณี	สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร
นางสาวฐนวลวรรณ หินกล้า	สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร

ติดต่อกองบรรณาธิการ

สถาบันวิจัยและพัฒนา ชั้น 4 อาคารเบญจมาภรณ์ (อาคาร 13) มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร 9 ถนนแจ้งวัฒนะ แขวงอนุสาวรีย์ เขตบางเขน กรุงเทพมหานคร 10220 โทรศัพท์ / โทรสาร 0-2544-8629 Email: PRRJ_Scitech@pnru.ac.th

กำหนดตีพิมพ์

2 ฉบับ ต่อปี (มกราคม-มิถุนายน และกรกฎาคม-ธันวาคม)

การเผยแพร่

ผู้ที่สนใจสามารถค้นหาที่ http://PRRJ_Scitech@pnru.ac.th/ และ https://www.tci-thaijo.org/index.php/PRRJ_Scitech/user

พิมพ์ที่

พจก. ประยูรสาส์นไทย การพิมพ์ : เลขที่ 44/132 ถ.ก้านน้มน้ำ แขวงบางขุนเทียน เขตจอมทอง กทม. 10150
โทรศัพท์ : 0 - 2802 - 0377, 0 - 2802 - 0379, 08 - 1566 - 2540

บทบรรณาธิการ

วารสารวิจัยราชภัฏพระนคร สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร ปีที่ 16 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม - ธันวาคม 2564 ได้รับรวบรวมบทความ เพื่อเผยแพร่และแลกเปลี่ยนความรู้ทางวิชาการและการวิจัยของคณาจารย์ นักศึกษา และผู้ทรงคุณวุฒิทั้งภายในและภายนอกมหาวิทยาลัย

เนื้อหาสาระในวารสารฉบับนี้มีบทความจำนวน 14 เรื่อง ทุกเรื่องมีความน่าสนใจและเป็นประโยชน์กับผู้อ่านหลากหลายสาขาอย่างมาก นอกจากนี้บทความยังได้ผ่านการกลั่นกรองอย่างเข้มข้นจากผู้ทรงคุณวุฒิทั้งภายในและภายนอกมหาวิทยาลัยที่มีความเชี่ยวชาญในเรื่องนั้น ๆ เป็นที่เรียบร้อยแล้ว สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร หวังเป็นอย่างยิ่งว่าวารสารฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ทางวิชาการสำหรับนักวิชาการ นักวิจัย คณาจารย์ และนักศึกษาต่อไป

การจัดทำวารสารฉบับนี้ สำเร็จได้ด้วยความร่วมมืออย่างดียิ่งจากผู้เขียนบทความ ผู้ทรงคุณวุฒิกองบรรณาธิการ ตลอดจนบุคคลท่านอื่น ๆ จึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประกายดาว ยิ่งสง่า
บรรณาธิการวารสารวิจัยราชภัฏพระนคร
สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิ (Readers)

ประจำวารสารวิจัยราชภัฏพระนคร (สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี)

ศาสตราจารย์ ดร.รังสีนี โสธรวิทย์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.เฉลิมชัย วงษ์อารี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.อนุชา หิรัญวัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร.สุณิพร สุวรรณมณี	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร.วริช ศรีละออง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.อรรถพล แก้ววิสัย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยรัตน์ เตชะวุฒิพร	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาสุระ อังกุลานนท์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.โอปอล์ สุวรรณเมฆ	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กุสุมา ศรียากุล	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิราพัทธ์ สีแจ่ม	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมฤดี สักกาเวช	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษณ์ วันอินทร์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อะเคื้อ กุลประสูติติก	มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ลดา มัทธูรศ	มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วุฒิชัย แพงาม	มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร
ดร.จันทร์เพ็ญ ตั้งจิตเรเจริญกุล	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ดร.จันธิดา กมลสนธิ์ริญ	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ดร.รัชชาวรรณ มงคล	มหาวิทยาลัยศิลปากร
ดร.ชญาณี ทิพย์เสม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ดร.กิตติชัย ไชยสีดา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ดร.เปล่งสุรีย์ เทียนน้อย	มหาวิทยาลัยมหิดล
ดร.ศีลาวุธ ดำรงศิริ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ดร.ศรินทร์ สุวรรณรงค์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ดร.ฉัตรชัย พะวงษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ดร.อดิเทพ ณ พัทลุง	มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร
ดร.ธิดาพงษ์ สุขดี	มหาวิทยาลัยการกีฬาแห่งชาติ
ดร.วรเดช ช้างแก้ว	วิทยาลัยพยาบาลบรมราชชนนี

สารบัญ

หน้า

บทบรรณาธิการ	ก
รายนามผู้ทรงคุณวุฒิ	ข
สารบัญ	ค

บทความวิจัย

● การพัฒนาผลิตภัณฑ์โยเกิร์ตผสมลูกจากเชื่อม ศศิอาภา บุญคง.....	1
● การศึกษาประสิทธิภาพของการใช้พลังบำบัดในอาสาศาสตร์ที่มีระดับความเครียดสูง ศรินรัตน์ โคตะพันธ์.....	12
● NUMERICAL STUDY OF HEAT TRANSFER AND FLUID FLOW IN A CONFINED PLANE TURBULENT JET IMPINGEMENT USING NANOFLUIDS Khomgris Chaiyo	18
● ผลกระทบฝุ่น PM2.5 ต่อสุขภาพของอาคาร กรณีศึกษาหอจดหมายเหตุแห่งชาติ จันทบุรี สุคนธ์ ขาวกริบ สายพิน ไซยนันท์ สิริพันธ์ ไซยนันท์ อินจิรา นิยมธูร และ สรินทร พัฒอำพันธ์.....	34
● การจัดการน้ำทิ้งจากโรงงานน้ำมันปาล์มด้วยไอโซนบำบัดก่อนผลิตก๊าซชีวภาพ สายพิน ไซยนันท์ อินจิรา นิยมธูร วิมลศิริ พรทวีวัฒน์ นุชนภา สุกใส และ สิริพันธ์ ไซยนันท์.....	45
● การปรับตัวของเกษตรกรผู้ปลูกมะยงชิดจังหวัดนครนายกต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ศศิมา พักคง จักรพงษ์ หรั่งเจริญ ยุทธพล สาเอี่ยม และ นราศักดิ์ บุญมี.....	57
● ผงฝุ่นวาวแสงจากแกลบสำหรับเพิ่มความคมชัดของรอยลายนิ้วมือแฝง กิตดา ขานโบ กิตติธัช ธนสิระวงษ์ เขมฤทัย งามะพัฒน์ ศิริประภา รัตตัญญู สุรินทร์ ชมเสาร์หัด พัชรา ลินลอยมา และ พิเชษฐ ลิ้มสุวรรณ.....	67
● ผลการฝึกแบบหนักสลับเบาที่มีต่อความอดทนของระบบหายใจและไหลเวียนโลหิตของนักกีฬาแบดมินตัน โรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัยรามคำแหง (ฝ่ายประถม) สุกฤษฎี ฤทธิธรรม และ สาธิน ประจันบาน.....	81
● SCREENING ACTIVE NATURAL LIGANDS OF TYROSINASE FROM <i>Aglaonema simplex</i> BL. BY HPLC Sutthiduean Chunhakant and Thongchai Khammee	93

- การเปรียบเทียบผลการฝึกแบบควบคุมที่มีต่อสมรรถภาพทางกลไกของนักกีฬาฟุตบอลหญิงระดับมัธยมศึกษา
ณัฐพล วรพักตร์ ลักษมี ฉิมวงษ์ และ อนันต์ มาลารัตน์..... 109
- EFFECT OF LIGHT AND DARK CONDITIONS ON QUALITY CHANGES
 OF MUNG BEAN SPROUT DURING STORAGE
*Sompoch Noichinda, Kitti Bodhipadma, Suriya Rutatip
 and Thayanin Rattanaphisit* 121
- APPLICATION OF SILICON CARBIDE CRUCIBLE FOR GEMSTONE HEAT TREATMENT
 IN MICROWAVE OVEN
Teerat Watcharatpong, Panot Krongsut, and Bhuwadol Wanthanachaisaeng 132
- TOTAL PHENOLIC CONTENT, ANTIOXIDANT, AND ACETYLCHOLINESTERASE
 INHIBITORY ACTIVITIES OF *Vitex trifolia* L. EXTRACTS
Pemika Khamweera and Suekanya Jarupinthusophon..... 148

บทความวิชาการ

- วิธีการง่ายในการหาสมการและประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยว
ชโนภาส ชนลักษณ์ดาว และ รัศมี แสงศิริมงคลยิ่ง 161

ภาคผนวก

รายละเอียดการเตรียมบทความ.....	176
ขั้นตอนการพิจารณาบทความ.....	180
รูปแบบบทความเพื่อส่งตีพิมพ์.....	181
จริยธรรมในการตีพิมพ์.....	186

การพัฒนาผลิตภัณฑ์โยเกิร์ตผสมลูกจากเชื่อม

DEVELOPMENT OF YOGURT WITH *NYPA FRUITCANS* IN SYRUP

ศศิอาภา บุญคง^{1*}

¹สาขาวิชาคหกรรมศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี

Sasiapa Boonkong^{1*}

¹Home Economics Program, Faculty of Science and Technology, Dhonburi Rajabhat University

*E-mail: sasiapa.b@dru.ac.th

Received: 2020-06-22

Revised: 2021-07-30

Accepted: 2021-08-28

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอัตราส่วนระหว่างน้ำกับน้ำตาลทรายในการเชื่อมลูกจาก และ ปริมาณการเติมน้ำตาลจากเชื่อม ร้อยละ 10 15 และ 20 ของน้ำหนัก ต่อคุณภาพโยเกิร์ต ซึ่งการเชื่อมลูกจากควรใช้อัตราส่วนของน้ำกับน้ำตาลทรายเท่ากับ 1 : 1 เมื่อนำโยเกิร์ตที่ได้มาทดสอบการยอมรับทางประสาทสัมผัสแบบ 9-point hedonic scale ในด้านลักษณะปรากฏ เนื้อสัมผัส รสชาติ กลิ่นรส และความชอบโดยรวม โดยใช้ผู้ทดสอบที่ไม่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 100 คน พบว่าผู้บริโภคให้การยอมรับโยเกิร์ตผสมลูกจากเชื่อมสูตรที่ 1 (ปริมาณลูกจากเชื่อมร้อยละ 10) และ สูตรที่ 2 (ปริมาณลูกจากเชื่อมร้อยละ 15) ไม่แตกต่างกัน ($p>0.05$) โดยมีคะแนนความชอบโดยรวมที่ระดับความชอบปานกลาง อย่างไรก็ตามสูตรที่ 2 มีปริมาณเส้นใยหยาบ (0.68 %) และพลังงานทั้งหมด (111.18 Kcal/100g) สูงกว่า นอกจากนี้โยเกิร์ตผสมลูกจากเชื่อมสามารถเก็บรักษาได้นาน 5 สัปดาห์ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

คำสำคัญ: ลูกจาก โยเกิร์ต โยเกิร์ตลูกจากเชื่อม

ABSTRACT

The objective of this research was to determine the ratio between water and granulated sugar on preparing of *Nypa fruiticans* in syrup and the quality of yogurt with different additional content of *Nypa fruiticans* in syrup at 10, 15 and 20 % w/w of yogurt, respectively. The optimum ratio of water and granulated sugar was 1:1. The sensory test of yogurt was conducted with 100 untrained panelists using a 9-point hedonic scale, appearance, texture, taste, flavor and overall liking. The result showed that the overall liking score of yogurt was not significantly different among

formula 1 (10% w/w of *Nypa fruticans* in syrup) and formula 2 (15% w/w of *Nypa fruticans* in syrups) ($p>0.05$), which had a moderate liking. However, the formula 2 had higher fiber content (0.68%) and total energy (111.18 Kcal/100g). Moreover, the development of yogurt containing *Nypa fruticans* in syrup could extend for 5 weeks during storage at 4 °C

Keywords: *Nypa fruticans*, Yogurt, Yogurt with *Nypa fruticans* in syrup

บทนำ

ลูกจาก (*Nypa fruticans* Wurmp. หรือ Nipa Palm) เป็นพืชตระกูลปาล์ม ปลูกมากในแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ในประเทศมาเลเซีย อินโดนีเซีย เวียดนาม ฟิลิปปินส์ (Amroongrugs & Purintavaragul, 2006) สำหรับประเทศไทยมีการเพาะปลูกหนาแน่นบริเวณริมฝั่งคลองของป่าชายเลน แถบชายฝั่งทะเล หรือบริเวณน้ำกร่อย โดยเฉพาะจังหวัดสมุทรปราการ ต้นจากจะออกลูกเมื่ออายุประมาณ 4 – 5 ปี (Katesakul & Thanomchat, 2013; Suthinoon, 2011) โดยแทบทุกส่วนของต้นจากสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความจำเป็นและภูมิปัญญาของคนในพื้นที่ ลูกจากมีความสำคัญต่อการดำรงชีวิตของคนในชุมชน สามารถนำมาประกอบอาหารได้ทั้งอาหารคาวและอาหารหวาน เช่น น้ำหวาน น้ำส้มจาก ผักเคียง หรือไข่แกงเผ็ด ลูกจากเชื่อม ผลิตภัณฑ์เยลลี่คาราจีแนผสมเนือลูกจาก ท็อปปี้ลูกจาก รวมทั้งงานประดิษฐ์ น้ำจุลินทรีย์เพื่อใช้เป็นยาแก้โรคเกา และเป็นเชื้อเพลิงในครัวเรือน (Niranathmatekul, 2010; Janyatham & Sikka, 2012; Kunpakdee et al., 2012; Prasongchan et al., 2013; Supakin, 2019) ซึ่งลูกจากแก่มีปริมาณเส้นใยทั้งหมดมากกว่าลูกจากอ่อน และลูกจากแก่มีปริมาณเส้นใยอาหารทั้งหมดมากกว่าทุเรียน มังคุด มะม่วง มะละกอ สับปะรด และเงาะ รวมทั้งลูกจากแก่มีปริมาณใยอาหารที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำสูงกว่าลูกจากอ่อน โดยลูกจากสดมีปริมาณแร่ธาตุสูง โดยเฉพาะโพแทสเซียม (Sum et al., 2013)

โยเกิร์ตเป็นผลิตภัณฑ์นมชนิดหนึ่ง โดยอาศัยการหมักของเชื้อจุลินทรีย์จำพวกกลุ่มแบคทีเรียแลคติก เช่น เชื้อ *Lactobacillus delbruekii* sub sp. *bulgaricus* และเชื้อ *Streptococcus thermophilus* โยเกิร์ตจัดเป็นอาหารเพื่อสุขภาพชนิดหนึ่งที่สามารถบริโภคกันทุกเพศทุกวัย และมีประโยชน์ต่อผู้บริโภค เป็นแหล่งของคาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน วิตามิน แคลเซียม และฟอสฟอรัส ช่วยในระบบการย่อยอาหาร ระบบขับถ่าย ช่วยปรับสมดุลของลำไส้ (Jariyawanukul, 2009) นอกจากนี้โพรไบโอติกส์ (probiotic) เป็นกลุ่มของจุลินทรีย์มีชีวิต โดยกลุ่มเชื้อแบคทีเรียแลคติก (lactic acid bacteria) เช่น *Lactobacillus acidophilus* และ *Bifidobacterium* spp. มักพบในอาหารหมัก เช่น โยเกิร์ต เนยแข็ง ผักดองบางชนิด และอาหารสุขภาพที่มีเส้นใย เช่น ผักผลไม้สด และเมล็ดธัญพืชที่ไม่ขัดสี ซึ่งถ้ามีจำนวนมากพอจะก่อให้เกิดประโยชน์แก่สุขภาพ มีผลในด้านการทำงานของทางเดินอาหารที่ผิดปกติ เช่น การเกิดโรคอุจจาระร่วงและช่วยให้ระบบภูมิคุ้มกันที่ดี โดยช่วยปรับให้เกิดความสมดุลของเชื้อจุลินทรีย์ภายในลำไส้ ความดันโลหิตสูง สารต้านมะเร็ง รวมทั้งช่วยรักษาอาการของโรคภูมิแพ้ทั้งในเด็ก ผู้ใหญ่รวมทั้งในผู้สูงอายุด้วย อย่างไรก็ตามผลิตภัณฑ์โพรไบโอติกส์ควรมีตามปริมาณของเชื้อโพรไบโอติกอย่างน้อย 107 cfu/ml (Ellis et al., 2006; Ferdousi et al., 2013; Nopchinda, 2014; Pinthong et al., 2019) โดยโยเกิร์ตที่วางขายในท้องตลาดมีกระบวนการผลิตที่ต่างกันตามท้องถิ่น การผลิตโยเกิร์ตสามารถแบ่งตามกระบวนการผลิตเป็น 2 ลักษณะ คือ โยเกิร์ตชนิดคงตัว (set yogurt) และโยเกิร์ตชนิดคน (stirred yogurt) ซึ่งมีกระบวนการปรับคุณภาพ (standardization) การพาสเจอร์ไรส์ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส นาน 10 – 30 นาที โฮโมจิไนส์และทำให้เย็น 45 – 47 องศาเซลเซียส เติมเชื้อจุลินทรีย์และทำให้เย็นอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิ 4 – 7 องศาเซลเซียส และการบรรจุ การหมักให้ปริมาณ acetaldehyde,

diacetyl, กรดแลกติก (lactic acid) และสารประกอบกรดอินทรีย์อื่นซึ่งมีผลต่อกลิ่นรสของโยเกิร์ต (Ramírez-Sucre & Vélez-Ruiz, 2013)

ปัจจุบันโยเกิร์ตเป็นที่นิยมบริโภคอย่างแพร่หลาย ซึ่งโยเกิร์ตรสชาติต่าง ๆ ที่วางขายตามท้องตลาด โดยมีการเสริมผลไม้เชื่อมหรือแต่งกลิ่นรส (Celik et al., 2006; Rojas-Castro et al., 2007; Gad, 2010; Ramírez-Sucre & Vélez-Ruiz, 2013; Srisuvor et al., 2013) นอกจากนี้มีการพัฒนาโยเกิร์ตที่มีปริมาณไขมันต่ำหรือไม่มีไขมัน (Harte et al., 2003; Yaowapaksophon et al., 2016) และเสริมคุณค่าทางโภชนาการ (Daengprok & Warasawas, 2008; Anawachkul & Jiamyangyuenn, 2009; Jariyawara-nukul, 2009; Ranadheera et al., 2012; Chaikham, 2015; Petina, et al., 2015; Unhasirikul, 2018; Wang et al., 2019; Abdel-Hamid et al., 2020) รวมทั้งการพัฒนาผลิตภัณฑ์โยเกิร์ตสำหรับผู้ป่วยโรคเอดส์ ซึ่งพบว่าจุลินทรีย์ที่เป็นโปรไบโอติกกรมทั้งเชื้อ *Lactobacillus rhamnosus* GR-1 มีผลต่อระบบภูมิคุ้มกันของผู้ป่วยโรคเอดส์ได้ (Hemsworth et al., 2011)

ทั้งนี้ยังไม่มีรายงานการใช้ประโยชน์จากลูกจากเชื่อมเป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์โยเกิร์ต ดังนั้น เพื่อเป็นการส่งเสริมการสร้างมูลค่าเพิ่มของลูกจากจากรากฐานทรัพยากรที่มีอยู่ในท้องถิ่น หรือภูมิปัญญาชาวบ้านในชุมชนท้องถิ่นโดยเฉพาะสินค้าเกษตรให้มีการผลิต การแปรรูป และการบรรจุหีบห่อ เป็นสิ่งที่ทำให้เกิดการเกษตรอย่างยั่งยืน จากเหตุผลดังกล่าว ผู้วิจัยจึงสนใจที่จะศึกษาการผลิตลูกจากเชื่อม ซึ่งเป็นภูมิปัญญาท้องถิ่นของชุมชนบ้านขุนสมุทรไทย จังหวัดสมุทรปราการ และปริมาณการเติมลูกจากเชื่อมที่เหมาะสมในผลิตภัณฑ์โยเกิร์ต เพื่อเป็นทางเลือกให้แก่ผู้บริโภค ตลอดจนการพัฒนาส่งเสริมเป็นสินค้าท้องถิ่นประจำชุมชนและสร้างรายได้ให้แก่ชุมชน

วิธีการ

1. การศึกษาการผลิตลูกจากเชื่อม

โดยการสัมภาษณ์ผู้ผลิตเกี่ยวกับการผลิตลูกจากเชื่อม จากชุมชนบ้านขุนสมุทรไทย อำเภอพระสมุทรเจดีย์ จังหวัดสมุทรปราการ ข้อมูลที่ได้จากการสัมภาษณ์ การคัดเลือกวัตถุดิบ ส่วนผสม และกรรมวิธีการผลิต พบว่า สามารถนำข้อมูลไปทำการทดลองตอนที่ได้อีกต่อไป เพื่อทำการพัฒนาสูตรการผลิตและการยอมรับผลิตภัณฑ์โยเกิร์ตผสมลูกจากเชื่อมต่อไป ซึ่งการเชื่อมลูกจากของชุมชนมีการใช้ทั้งน้ำตาลทรายขาวและน้ำตาลทรายแดง และปริมาณน้ำตาลที่แตกต่างกัน ทำให้ลูกจากเชื่อมที่ได้มีลักษณะที่แตกต่างกัน

2. การพัฒนาโยเกิร์ตผสมลูกจากเชื่อม

โดยศึกษาการเติมลูกจากปริมาณที่เหมาะสมของการผลิตโยเกิร์ต ซึ่งการผลิตโยเกิร์ตประกอบด้วย นมสดพาสเจอร์ไรส์ นมผง น้ำตาลทราย และโยเกิร์ตธรรมชาติ ร้อยละ 80.64, 4.84, 3.23 และ 11.29 ของน้ำหนักทั้งหมด ตามลำดับ โดยดัดแปลงตามวิธีของ Boonkong (2011) นำนมสดพาสเจอร์ไรส์ นมผง และน้ำตาลทรายมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที ตั้งทิ้งไว้ให้อุณหภูมิลดลงเหลือ 45 องศาเซลเซียส จากนั้นเติมหัวเชื้อโยเกิร์ตธรรมชาติ และลูกจากปริมาณร้อยละ 10, 15 และ 20 ของน้ำหนักโยเกิร์ต ตามลำดับ ผสมให้เข้ากัน และบรรจุในถ้วยพลาสติก บ่มที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 10 ชั่วโมง หรือจนเกิดเคิร์ด และได้ค่า pH เท่ากับ 4.2 จะได้โยเกิร์ตชนิดคงตัว (set yogurt) วิเคราะห์คุณภาพและอายุการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 5 สัปดาห์

3. การวิเคราะห์คุณภาพผลิตภัณฑ์โยเกิร์ตผสมลูกจากเชื่อม

3.1 คุณภาพทางประสาทสัมผัส โดยใช้การทดสอบทางประสาทสัมผัสแบบ 9-points hedonic scale (1 = ไม่ชอบมากที่สุด, 9 = ชอบมากที่สุด) ด้านลักษณะปรากฏ เนื้อสัมผัส รสชาติ กลิ่นรส และความชอบโดยรวม

โดยใช้ผู้บริโภครวบรวมไปจำนวน 100 คน ที่เคยรับประทานโยเกิร์ต (อายุระหว่าง 15 – 25 ปี) แบ่งเป็นเพศหญิงร้อยละ 80 และเพศชายร้อยละ 20 โดยผู้บริโภครู้จักลูกจากร้อยละ 76 และเคยรับประทานผลิตภัณฑ์จากลูกจากร้อยละ 62

3.2 ทางด้านเคมี ได้แก่ ค่า pH การแยกตัวของน้ำ (% Syneresis) ปริมาณกรดแลคติก ความชื้น เถ้า ปริมาณโปรตีน ไขมัน เส้นใยหยาบ คาร์โบไฮเดรต พลังงานทั้งหมด ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ วิเคราะห์ปริมาณตามวิธีการ (AOAC 2000) ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด ($^{\circ}$ Brix) ของน้ำเชื่อมก่อนและหลังเชื่อมลูกจาก

วัดค่าการแยกตัวของน้ำ

นำโยเกิร์ตที่แช่เย็นทิ้งถ่วงมาชั่งน้ำหนักและเทในกรวยที่ใส่กระดาษกรอง (Whatman No. 1) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร) ตั้งทิ้งเพื่อแยกน้ำเวย์ที่ได้จากเนื้อโยเกิร์ต เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นชั่งน้ำหนัก น้ำเวย์ที่ได้ และคำนวณ %Syneresis

$$\% \text{Syneresis} = \frac{\text{น้ำหนักน้ำที่แยกออกจากเนื้อโยเกิร์ต} \times 100}{\text{น้ำหนักโยเกิร์ตที่ใช้}}$$

3.3 ทางด้านกายภาพ

วัดค่าสี นำโยเกิร์ตวัดค่าสี L^* a^* และ b^* โดยใช้เครื่องวัดสี Lovibond RT100 Reflectance Tintometer ตัวอย่างละ 5 ซ้ำ

วัดค่าความหนืด นำโยเกิร์ตที่แช่เย็น นำมาแยกส่วนของเนื้อลูกจากเชื่อมออกจากโยเกิร์ตผสม ลูกจากเชื่อมปริมาณ 500 มิลลิลิตร ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 600 มิลลิลิตร วัดความหนืดโดยใช้เครื่อง Brookfield Digital Viscometer รุ่น DV – II+ ที่ความเร็วรอบ 6 rpm และเข็มเบอร์ 03

3.4 ทางด้านจุลินทรีย์ ได้แก่ การตรวจนับเชื้อแบคทีเรียแลคติก ด้วยวิธี ISO15215: 1998 และ การตรวจสอบเชื้อ Escherichia Coli

3.5 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ การวิเคราะห์ทางด้านกายภาพ ทางด้านเคมี มีการวางแผนการทดลองแบบสุ่มตลอด (Completely Randomized Design; CRD) และการทดสอบทางประสาทสัมผัสต่อการยอมรับผลิตภัณฑ์โยเกิร์ตสดลูกจากมีการวางแผนการทดลองแบบบล็อกสุ่มสมบูรณ์ (Randomized Complete Block Design; RCBD) แล้ววิเคราะห์ความแปรปรวนและเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของทรีตเมนต์ด้วย Duncan's New Multiple Range Test) ที่ระดับนัยสำคัญ .05 เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติโดยใช้โปรแกรม SPSS, version 17.0 (IBM, USA)

ผลการทดลองและวิจารณ์

1. การศึกษาการผลิตลูกจากเชื่อม

ผลจากการสัมภาษณ์ผู้ผลิตในชุมชนบ้านขุนสมุทรไทย อำเภอพระสมุทรเจดีย์ จังหวัดสมุทรปราการ พบว่า ลูกจากที่มีความเหมาะสมในการเชื่อม คือ ลูกจากที่ไม่อ่อนหรือแก่จนเกินไป เนื่องจากลูกจากที่อ่อนจะทำให้ลูกจากเชื่อมเละ ขณะเดียวกันหากลูกจากแก่จะทำให้ลูกจากแข็ง โดยนำลูกจากมาล้างให้สะอาด จากนั้นนำลูกจากมาเชื่อมด้วยน้ำตาลทรายขาวหรือน้ำตาลทรายแดง แต่จะให้สีของน้ำเชื่อมแตกต่างกัน โดยใช้อัตราส่วนของลูกจากต่อปริมาณน้ำตาล เท่ากับ 2 กิโลกรัม น้ำตาลทราย 1 – 1.5 กิโลกรัม จากนั้นต้มจนเดือด

สำหรับงานวิจัยนี้เลือกใช้น้ำตาลทรายขาว เนื่องจากลักษณะของลูกจากเชื่อมที่ได้จะไม่มีผลต่อสีของผลิตภัณฑ์โยเกิร์ต ซึ่งจากศึกษาอัตราส่วนน้ำกับน้ำตาลทรายในการผลิตลูกจากเชื่อม ในอัตราส่วน 1 : 1, 1 : 2 และ 2 : 1 ตามลำดับ เมื่อน้ำตาลทรายละลายแล้วให้เติมลูกจากที่เตรียมไว้และต้มจนกระทั่งเดือด ประมาณ 15 นาที (ภาพที่ 1) ซึ่งน้ำเชื่อมมีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ เท่ากับ 62.74 และ 36.6 องศาบริกซ์ ($^{\circ}\text{Brix}$) ซึ่งพบว่าอัตราส่วนระหว่างน้ำกับน้ำตาลทรายเท่ากับ 1 : 1 มีความเหมาะสมในการผลิตลูกจากเชื่อมสำหรับการผลิตโยเกิร์ต เนื่องจากลักษณะของลูกจากเชื่อมไม่เละ และมีน้ำเชื่อมมีความหนืดไม่มากเกินไป ซึ่งการเชื่อมลูกจากด้วยอัตราส่วนน้ำต่อน้ำตาลทราย เท่ากับ 1 : 2 พบว่า ปริมาณของแข็งหลังจากเชื่อมมีค่าสูงขึ้น ลูกจากจะมีลักษณะเหี่ยวลง ในขณะที่การเชื่อมลูกจากในอัตราส่วนของน้ำต่อน้ำตาลทรายเท่ากับ 1 : 1 และ 1 : 2 ปริมาณของแข็งที่ละลายได้มีค่าคงที่ การผลิตลูกจากเชื่อม ทำได้โดยนำลูกจากมาล้างทำความสะอาด จากนั้นต้มน้ำกับน้ำตาลทรายในอัตราส่วน 1 : 1 ซึ่งอาจใช้น้ำตาลทรายขาวหรือน้ำตาลแดงก็ได้ แต่จะให้สีของน้ำเชื่อมแตกต่างกัน รวมทั้งการใช้น้ำตาลทรายสีแดงจะให้รสหวานแหลมมากกว่าการใช้น้ำตาลทรายขาว



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 1 ลักษณะของลูกจากเชื่อม (ก) อัตราส่วนของน้ำต่อน้ำตาลทราย = 1:1
(ข) อัตราส่วนของน้ำต่อน้ำตาลทราย = 1:2 (ค) อัตราส่วนของน้ำต่อน้ำตาลทราย = 2:1

2. การทดสอบทางประสาทสัมผัสของผู้บริโภค

นำโยเกิร์ตผสมลูกจากเชื่อมร้อยละ 10 15 และ 20 มาทดสอบทางประสาทสัมผัสด้วย วิธี 9-point hedonic scale ในด้านลักษณะปรากฏ เนื้อสัมผัส รสชาติ กลิ่นรส และความชอบโดยรวม ซึ่งโยเกิร์ตผสมลูกจากเชื่อมมีความแตกต่างกันในด้านลักษณะปรากฏ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม ($p \leq .05$) แต่ไม่มีความแตกต่างกันในด้านรสชาติและกลิ่นรส ($p > .05$) ซึ่งการเติมปริมาณลูกจากเชื่อมเพิ่มขึ้น ทำให้โยเกิร์ตผสมลูกจากเชื่อมมีการเซตตัวและความหนืดของโยเกิร์ตลดลง และผู้บริโภคให้การยอมรับความชอบโดยรวมผลิตภัณฑ์โยเกิร์ตผสมลูกจากเชื่อมมีปริมาณลูกจากร้อยละ 15 ของน้ำหนักรวมทั้งหมด (ตารางที่ 1)

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์โยเกิร์ตสดลูกจาก

คุณลักษณะ	ปริมาณลูกจากเชื่อม (ร้อยละ)		
	10 (สูตร 1)	15 (สูตร 2)	20 (สูตร 3)
ลักษณะปรากฏ	6.96 ^a ± 0.97	6.81 ^a ± 1.43	6.10 ^b ± 1.83
เนื้อสัมผัส	6.45 ^a ± 1.61	6.35 ^a ± 1.79	5.72 ^b ± 2.05
รสชาติ ^{ns}	6.17 ± 1.79	6.50 ± 1.80	6.23 ± 1.92
กลิ่นรส ^{ns}	6.39 ± 1.60	6.64 ± 1.46	6.42 ± 1.67
ความชอบโดยรวม	6.55 ^{ab} ± 1.63	6.66 ^a ± 1.73	6.18 ^b ± 1.76

หมายเหตุ : a-c หมายถึง ค่าเฉลี่ยในแนวนอนที่กำกับด้วยตัวอักษรต่างกัน แสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ns (non – significant) หมายถึง ค่าเฉลี่ยในแนวนอนไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

3. การวิเคราะห์คุณภาพผลิตภัณฑ์โยเกิร์ตผสมลูกจากเชื่อม

การพัฒนาโยเกิร์ตผสมลูกจากเชื่อมที่มีปริมาณลูกจากเชื่อมร้อยละ 10 – 20 พบว่าผลิตภัณฑ์โยเกิร์ตผสมลูกจากเชื่อมทั้งสามสูตรมีปริมาณความชื้น ร้อยละ 74.84 – 76.66 ปริมาณสารประกอบหลัก ได้แก่ เกล็ด โปรตีน ไขมัน เส้นใยหยาบ และคาร์โบไฮเดรต ร้อยละ 0.61 – 0.64, 2.60 – 2.96, 2.61 – 3.00, 0.57 – 0.68, และ 16.74 – 19.34 ตามลำดับ ดังตารางที่ 2 โดยโยเกิร์ตมีค่าสี L^* a^* และ b^* เท่ากับ 41.95 – 55.31, 0.02 – 0.17 และ 1.74 – 2.47 ตามลำดับ มีปริมาณกรดแลกติก ร้อยละ 0.85 – 0.99 (ตารางที่ 3) ซึ่งโยเกิร์ตผสมลูกจากเชื่อมสูตรที่ 1 มีปริมาณ Lactic acid bacteria ปริมาณความชื้น เกล็ด โปรตีน และไขมันสูงที่สุด และสูตรที่ 3 มีปริมาณ Reducing sugar ปริมาณเส้นใยหยาบและคาร์โบไฮเดรตสูงที่สุด ซึ่งโยเกิร์ตที่เติมปริมาณลูกจากเพิ่มขึ้นทำให้มีปริมาณเส้นใยหยาบและคาร์โบไฮเดรตเพิ่มมากขึ้น แต่มีปริมาณความชื้น เกล็ด โปรตีน และไขมันลดลง ดังนั้นจึงควรเติมปริมาณลูกจากเชื่อมร้อยละ 15 ในผลิตภัณฑ์โยเกิร์ตเช่นเดียวกับผลิตภัณฑ์โยเกิร์ตผลไม้จากกล้วย มะละกอ แดงโม และลูกแพร์ แคดดัส รวมทั้ง FAO/WHO แนะนำให้มีการเติมผลไม้ในผลิตภัณฑ์โยเกิร์ตประมาณร้อยละ 5 – 15 (Roy et al., 2015; Matter et al., 2016) ซึ่งโยเกิร์ตผสมลูกจากเชื่อมที่มีปริมาณลูกจากเชื่อมเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าการแยกตัวของน้ำลดลง เช่นเดียวกับโยเกิร์ตผสมผลไม้ (กล้วย มะละกอ และแดงโม) ร้อยละ 15 (Roy et al., 2015) และโยเกิร์ตผสมลูกจากเชื่อมที่มีปริมาณของเชื้อ Lactic acid bacteria สูง ทำให้มีค่าปริมาณกรดแลกติกสูง ซึ่งส่งผลให้โปรตีนเข้าใกล้จุด Isoelectric Point ทำให้การอุ้มน้ำลดลง และค่าการแยกตัวของน้ำเพิ่มขึ้น โดยค่าการแยกตัวของน้ำและปริมาณกรดแลกติกมีแนวโน้มค่อนข้างคงที่ เมื่อมีการเก็บรักษานานขึ้น เนื่องจากแบคทีเรียแลกติกมีเมตาบอลิซึมลดลง (Jariyawaranukul, 2009) สำหรับโยเกิร์ตที่มีค่าการแยกตัวของน้ำสูง จะทำให้คุณภาพของโยเกิร์ตต่ำ แต่ปริมาณของลูกจากเชื่อมที่เพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณ reducing sugar เพิ่มขึ้น ซึ่งปริมาณ reducing sugar สูง มีผลต่อความเสี่ยงในการเกิดโรคอ้วน ทำให้ปริมาณของลูกจากเชื่อมมีผลต่อค่าการแยกตัวของน้ำ ปริมาณ reducing sugar และปริมาณกรดแลกติก เมื่อศึกษาอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์โยเกิร์ตผสมลูกจากเชื่อมปริมาณร้อยละ 10, 15 และ 20 ของน้ำหนัโยเกิร์ต ที่ระยะเวลาการเก็บรักษา 0 3 4 และ 5 สัปดาห์ พบว่า ผลของจำนวนเชื้อ Lactic acid bacteria ที่เหลือรอดมีจำนวนเพิ่มขึ้น

ในช่วงแรกและลดลงเมื่อมีอายุการเก็บรักษานานขึ้น ซึ่งโยเกิร์ตที่เก็บรักษานาน 5 สัปดาห์ มีปริมาณเชื้อ Lactic acid bacteria ระหว่าง $8.15 - 8.60 \log_{10} \text{ cfu/g}$ จึงควรเก็บรักษาผลิตภัณฑ์โยเกิร์ตสดลูกจากนาน 4 สัปดาห์ เพื่อให้ได้รับคุณค่าทางโภชนาการมากที่สุด เนื่องจากปริมาณเชื้อ Lactic acid bacteria สูงสุด ซึ่งการจะให้ได้รับประโยชน์จากการบริโภคโยเกิร์ตอย่างเต็มที่นั้น จำเป็นต้องบริโภคโยเกิร์ตที่มีจุลินทรีย์ที่มีประโยชน์และมีปริมาณจุลินทรีย์ที่มีชีวิตในปริมาณที่สูงกว่า $5.0 - 6.0 \log_{10} \text{ cfu/g}$ (Dave & Shah, 1998) อย่างสม่ำเสมอและต่อเนื่อง เพื่อให้มีปริมาณแบคทีเรียที่มีประโยชน์มากเพียงพอในลำไส้ ซึ่งการรักษาปริมาณแบคทีเรียที่มีประโยชน์ให้มีค่าไม่น้อยกว่า $8 \log_{10} \text{ cfu/g}$ ควบคู่กับความคงตัวของคุณสมบัติทางเคมี กายภาพของโยเกิร์ตในระหว่างการเก็บรักษา เป็นสิ่งที่ผู้ผลิตควรให้ความสำคัญ (Na Nakornpanom, 2011) อย่างไรก็ตามการลดลงของค่า pH ทำให้การรอดชีวิตของเชื้อแบคทีเรียแลคติกลดลงด้วย (Jariyawanukul, 2009) และสามารถเก็บรักษาลักษณะโยเกิร์ตสดลูกจากนาน 5 สัปดาห์ นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์โยเกิร์ตผสมลูกจากเชื่อมมีปริมาณ E. Coli น้อยกว่า 3 MPN/g ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานของประกาศกระทรวงสาธารณสุข (ฉบับที่ 353) พ.ศ. 2556 เรื่อง นมเปรี้ยว

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพ เคมี และจุลินทรีย์ของผลิตภัณฑ์โยเกิร์ตสดลูกจาก

คุณภาพทางกายภาพ เคมี และจุลินทรีย์	ปริมาณลูกจากเชื่อม (ร้อยละ)		
	10 (สูตร 1)	15 (สูตร 2)	20 (สูตร 3)
ค่าสี			
L*	47.77	41.95	55.31
a*	0.17	0.02	0.08
b*	1.74	2.47	2.02
ค่า pH	4.22	4.26	4.29
ค่า syneresis (%)	30.20	26.27	18.98
ปริมาณกรดแลคติก (g/100 g)	0.99	0.88	0.85
ปริมาณ Reducing sugar (g/100 g)	0.18	0.22	0.28
E. coli (MPN/g)	> 3	> 3	> 3
Lactic acid bacteria (cfu/g)	1.9×10^8	1.2×10^8	1.1×10^8

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบหลักของโยเกิร์ตผสมลูกจากเชื่อม

สารประกอบหลัก	ปริมาณลูกจากเชื่อม (ร้อยละ)		
	10 (สูตร 1)	15 (สูตร 2)	20 (สูตร 3)
ความชื้น (%)	76.66	75.11	74.84
เถ้า (%)	0.64	0.62	0.61
โปรตีน (%)	2.96	2.62	2.60
ไขมัน (%)	3.00	2.82	2.61
เส้นใยหยาบ (%)	0.57	0.68	0.69
คาร์โบไฮเดรต (%)	16.74	18.83	19.34
พลังงานทั้งหมด (Kcal/100g)	105.80	111.18	111.25

สรุป

การผลิตลูกจากเชื่อม ทำได้โดยนำลูกจากมาล้างทำความสะอาด จากนั้นต้มน้ำกับน้ำตาลทรายขาว ในอัตราส่วน 1 : 1 เมื่อน้ำตาลทรายละลายแล้วให้เติบลูกจากที่เตรียมไว้และต้มจนกระทั่งเดือด ประมาณ 15 นาที ทำให้มีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ 62 °Brix ผู้บริโภคให้คะแนนความชอบโยเกิร์ต สูตรที่ 1 ปริมาณลูกจากเชื่อม ร้อยละ 10 และสูตรที่ 2 ปริมาณลูกจากเชื่อมร้อยละ 15 ไม่แตกต่างกัน ($p \geq 0.05$) แต่สูตรที่ 2 มีปริมาณเส้นใยหยาบ พลังงานทั้งหมดและพลังงานจากไขมันมากกว่าสูตรที่ 1 เพื่อเพิ่มมูลค่าของลูกจากจึงควรเลือกการผลิตที่มีปริมาณ ลูกจากเชื่อมร้อยละ 15 ซึ่งมีปริมาณสารอาหารหลัก ได้แก่ เถ้า โปรตีน ไขมัน เส้นใยหยาบ และคาร์โบไฮเดรต ร้อยละ 0.62 2.62 2.82 0.68 และ 18.83 ตามลำดับ มีพลังงานทั้งหมดเท่ากับ 111.18 Kcal/100g และมีปริมาณ Lactic acid bacteria เท่ากับ $8.15 \log_{10} \text{ cfu/g}$ ที่อุณหภูมิการเก็บรักษา 4 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 5 สัปดาห์ ซึ่งปริมาณจุลินทรีย์เป็นไปตามมาตรฐาน

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษาที่สนับสนุนทุนในการดำเนินงานวิจัย มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรีและผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่านที่มีส่วนช่วยให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- Abdel-Hamid, M., Romeih, E., Huang, Z., Enomoto, T., Huang, L., & Li, L. (2020). Bioactive properties of probiotic set-yogurt supplemented with *Siraitia grosvenorii* fruit extract. *Food Chemistry*, 103(4), 2956 – 2968.
- Anawachkul, M., & Jiamyangyuenn, S. (2009). Study of GABA content and development of GABA enriched yogurt from germinated red rice (Munpoo rice). Proceedings of 47th Kasetsart

- University Annual Conference: Agro-Industry, pp 1 - 11. March 17 – 20, 2009. Bangkok. Thailand. (in Thai)
- AOAC. (1990). **Official Methods of Analysis**. 14th ed. Vol. 2. Washington, D.C.: Association of official Analytical Chemists.
- AOAC. (2000). **Official Methods of Analysis**. 17^{ed} ed. Vol. 2. Washington, D.C.: Association of official Analytical Chemists.
- Bamroongruga, N., & Purintavaragul, C. (2006). **Nipa palm (*Nypa fruticans* Wurm.) cultivation in salt affected paddy fields**. Prince of Songkla University. Hat Yai Campus, Songkhla. (in Thai)
- Boonkong, S. (2011). **Coursebook of food preservation and food processing about Yogurt**. Dhonburi Rajabhat University. Bangkok. (in Thai)
- Celik, S., Bakirci, I., & Sat, I. G. (2006). Physicochemical and organoleptic properties of yogurt with cornelian cherry paste. **International Journal of Food Properties**, **9**, 401-408.
- Chaikham, P. (2015). Stability of probiotics encapsulated with Thai herbal extracts in fruit juices and yoghurt during refrigerated storage. **Food Bioscience**, **12**(1), 61 – 66.
- Daengprok, W., & Warasawas, P. (2008). Product development of longan-fortified cereal yoghurt. Maejo University. (in Thai)
- Dave, R. I., & Shah, N. P. (1998). Ingredient supplementation effects on viability of probiotic bacteria in yogurt. **Journal of Dairy Science**, **81**, 2804 – 2816.
- Ferdousi, R., Rouhi, M., Mohammadi, R., Mortazavian, A. M., Khosravi-Darani, K., & Rad, A. H. (2013). Evaluation of probiotic survivability in yogurt exposed to cold chain interruption. **Iranian Journal of Pharmaceutical Research**, **12**(Suppl), 139–144.
- Elli, M., Callegari, M. L., Ferrari, S., Bessi, E., Cattivelli, D., Soldi, S., Morelli, L., Feuillerat, N. G., & Antoine, J. (2006). Survival of yogurt bacteria in the human gut. **Applied and Environmental Microbiology**, **72**(7), 5113–5117.
- Gad, A. S., Kholif, A. M., & Sayed, A. F. (2010). Evaluation of the nutritional value of functional yogurt resulting from combination of date palm syrup and skim milk. **American Journal of Food Technology**, **5**(4), 250 – 259.
- Harte, F., Luedecke, L., Swanson, B., & Barbosa-Cánovas, G. V. (2003). Low-fat set yogurt made from milk subjected to combinations of high hydrostatic pressure and thermal processing. **Journal of Dairy Science**, **86**(4), 1074-1082.
- Hemsworth, J., Hekmat, S., & Reid, G. (2011). The development of micronutrient supplemented probiotic yogurt for people living with HIV: Laboratory testing and sensory evaluation. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, **12**, 79–84.

- Janyatham, J., & Sikka, P. (2012). The development of nipa palm fiber for use in product design. **Art and Architecture Journal Naresuan University**, 3(1), 94 – 104. (in Thai)
- Jariyawanukul, U. (2009). Effect of sweetener on quality of yogurt. **University of the Thai Chamber of Commerce Journal**, 29(4), 102 – 111. (in Thai)
- Katesakul, P., & Thanomchat, P. (2013). Direct use value of Nipa Palm in Ban Tha ta-pao. Knowledge management for sustainable management of coastal and mangrove forest resource: Case study of the strengthening coastal network management in community trough learning resources center in six villages, Trad province. 10 – 14. Retrieved March 15, 2019 From <https://www.mangrovesforthefuture.org/assets/Repository/Documents/CbLC-Case-study22FebFinal.pdf> (in Thai)
- Kunpakdee, Y., Kawee, W., Woothigoon, R., Podkumnerd, N., & Sunthornaphirak, N. (2012). Carageenan jelly with Nipa's fruits for communities. **Thaksin University Journal**, 15(3) (Suppl.), 227 – 235. (in Thai)
- Matter, A. A., Eman, Mahmoud, A.M., & Zidan, N. S. (2016). Fruit Flavored Yoghurt: Chemical, Functional and Rheological Properties. **International Journal of Environmental & Agriculture Research**, 2(5), 2454-1850.
- Na Nakornpanom, N. (2011). The physico-chemical properties and survival of lactic acid bacteria of yogurt containing germinated mung bean starch. Faculty of Agricultural Product Innovation and Technology, Srinakharinwirot University. (in Thai)
- Nopchinda, S. (2014). Probiotics for Health Promotion. **Journal of The Royal Thai Army Nurses**, 15(3), 430 – 435. (in Thai)
- Niranathmateekul, J. (Ed). (2010). Nature and Environment “Nypa fruticans” Plants that do not want to leave. **Journal of medesai**, 6(2), 18 – 19. (in Thai)
- Petina, N.P., Grant, D., Hirota, C., Gruz, A. G., Bogdan, C. S. B., & Oloverira, M. N. (2015). Effect of vegetal-oil emulsion and passion fruit peel-power on sensory acceptance of functional yogurt. **Food Research International**, 70, 134 – 141.
- Phetcharat, P., Wannakhate, U., & Sarakul, S. (2010). The Comparison of chemical characteristics between cereal-milk yogurt and cow-milk yogurt. **Agricultural Science Journal**, 41(3/1) (Suppl.), 585-588.
- Pinthong, S., Tiposot, S., Makfuang, S., Poomtien, J., & Poontawee, R. (2019). **Barracuda mango yoghurt supplemented mango encapsulation with probiotic bacteria**. The 7th Academic Science and Technology Conference. Retrieved December 28, 2020 From http://sci2.hcu.ac.th/webqa/WebQA61/documents/23_20.pdf. (in Thai)
- Prasongchan, S., Podkumnerd, N., Pimsen, K., Sunyan, S., Sumphunthamitr, T., & Thanapha, C. (2013). Utilization of nipa palm in the area of Songkhla lake basin Pak-Ro and

- Chalae Sub-districts, Singhanakhon District, Songkhla Province. **Journal of community development and Life Quality**, 1(1), 67 - 76. (in Thai)
- Ramírez-Sucre, M. O., & Vélez-Ruiz, J. F. (2013). Physicochemical, rheological and stability characterization of a caramel flavored yogurt. **LWT - Food Science and Technology**, 51, 233-241.
- Ranadheera, C. S., Evans, C. A., Adams, M. C., & Baines, S. K. (2012). Probiotic viability and physico-chemical and sensory properties of plain and stirred fruit yogurts made from goat's milk. **Food Chemistry**, 135(3), 1411 – 1418.
- Rojas-Castro, W., Chacón-Villalobos, A., & Pineda-Castro, M. L. (2007). Características del yogurt batido de fresa derivadas de diferentes proporciones de leche de vaca y cabra. **Agronomía Mesoamericana**, 18(2), 221-237.
- Roy, D. K. D. Roy, Saha, T. , Akter, M. , Hosain, M., Khatun, H., & Roy, M. C. (2015). Quality evaluation of yogurt supplemented with fruit pulp (banana, papaya, and water melon). **International Journal of Nutrition and Food Sciences**, 4(6), 695-699.
- Singh, G., & Muthukumarappan, K. (2008). Influence of calcium fortification on sensory, Physical and rheological characteristics of fruit yogurt. **LWT - Food Science and Technology**, 41, 1145–1152.
- Srisuvor, N., Chinprahast, N., Prakitchaiwattana, C., & Subhimaros, S. (2013). Effects of inulin and polydextrose on physicochemical and sensory properties of low-fat set yoghurt with probiotic-cultured banana purée. **LWT - Food Science and Technology**, 51(1), 30 - 36.
- Sum, P. C., Khoo, H. E., & Azlan, A. (2013). Comparison of nutrient composition of ripe and unripe fruits of *Nypa fruticans*. **Fruits**, 68(6), 491–498.
- Supaking, J. (2019). Development of nipa palm fruit toffee product. **Journal of Food Technology, Siam University**, 14(1), 48 – 57. (in Thai)
- Suthinoon, K. (2011). Nipa Palm management in Pak Panang Basin. **Journal of Marine and Coastal Resources**, 1(1), 50 – 63. (in Thai)
- Unhasirikul, M., Unhasirikul, K., Thongphueak, D., Bannoen, C., Yingprayun, T., & Chantarangsi, N. (2018). Yoghurt production using local germinated brown rice cultivars from Chanthaburi Province. **Agricultural Science Journal**, 49 : 3 (Suppl.), 118-124.
- Wang, X., Kristo, E., & LaPointe, G. (2019). Adding apple pomace as a functional ingredient in stirred-type yogurt and yogurt drinks. **Food Hydrocolloids**, 91, 83 – 91.
- Yaowapaksophon, J., Thumdee, A., Kongrit, J., & Phaeobang, P. (2016). Calcium fortification of fruit-mix set-type low-fat yogurt. **Journal of Science Ladkrabang**, 25(2), 27 – 40. (in Thai)

การศึกษาประสิทธิผลของการใช้พลังบำบัดในอาสาสมัครที่มีระดับความเครียดสูง
THE STUDY IN EFFECTIVENESS OF ENERGY MEDICINE
IN HIGH STRESS LEVEL VOLUNTEERS.

ศรินรัตน์ โคตะพันธ์*

สาขาวิชาการแพทย์แผนไทยประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร กรุงเทพมหานคร 10220

Sarinrat Khotaphan*

Department of Applied Thai Traditional Medicine, Faculty of Science and Technology,
Phranakhon Rajabhat University, Bangkok, 10220

*E-mail: sarinrat@pnru.ac.th

Received: 2020-11-11

Revised: 2021-11-11

Accepted: 2021-11-12

บทคัดย่อ

ความเครียด เป็นภาวะทางจิตใจที่เกิดขึ้นได้กับทุกเพศทุกวัยจากสาเหตุที่แตกต่างกัน เช่น การทำงาน การเรียน ครอบครัว สังคม เศรษฐกิจ ประเทศชาติ หรือแม้กระทั่งบุคลิกภาพของแต่ละบุคคล บางครั้งเราสามารถบรรเทาความเครียดได้ด้วยตนเอง แต่บางครั้งเมื่อมีปัจจัยกระตุ้นให้เกิดความเครียดซ้ำ ๆ ก็ยากที่จะขจัดความเครียดให้หมดไป จนบางครั้งความเครียดแฝงอยู่ภายใต้จิตสำนึก จนก่อให้เกิดโรคทางกาย เช่น โรคความดันโลหิตสูง การบำบัดความเครียดทำได้หลายวิธี อาทิ รับประทานยาคลายเครียด ทำกิจกรรมบำบัด การแพทย์แผนไทยและการแพทย์ทางเลือกด้านพลังบำบัดเป็นอีกหนึ่งวิธีที่ช่วยบำบัดความเครียดได้ การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิผลของการใช้พลังบำบัด ในอาสาสมัคร จำนวน 21 คน ที่มีระดับความเครียดสูงกว่าระดับปกติ โดยใช้โปรแกรมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอ่อน ๆ จำนวน 3 ครั้ง สัปดาห์ละ 1 ครั้ง ห่างกันครั้งละไม่เกิน 1 สัปดาห์ โดยวัดประเมินความเครียดก่อนและหลังการบำบัด ซึ่งจากผลการวิจัยพบว่าการใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอ่อนๆ หรือคือธาตุลมในทางการแพทย์แผนไทย ไปปรับสมดุลร่างกายให้เข้าสู่ภาวะสมดุล โดยประเมินจากคะแนนแบบประเมินความเครียดของสวนปรุง อัตราการเต้นของหัวใจ อัตราการหายใจ ความดันโลหิตซึ่งจัดเป็นการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาที่ตอบสนองต่อความเครียด ทั้งก่อนและหลังการทดลอง พบว่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < .05$)

คำสำคัญ: ความเครียด การแพทย์แผนไทย การแพทย์ทางเลือก พลังบำบัด

ABSTRACT

Stress is a mental conditional that can happen to everyone from different reasons, such as work, school, family, society, economy, nation, or even individual personality. Sometimes we can relieve stress by ourselves. But sometimes when there is repetitive stress provoke factors, it will be difficult to eliminate stress completely. Sometimes stress is hiding under the conscious mind until it causes physical disease such as Hypertension. Stress therapy can be performed in various ways such as taking anti-stress medicine, Occupational Therapy, Thai Traditional Medicine, and Alternative Medicine in Energy Medicine is one of the ways to treat stress. The purpose of this research is to study the effectiveness of Energy Therapy in 21 volunteers with higher stress level than normal people by using weak electromagnetic wave program 3 times, once a week and not more than a week each time, By assessing the assessment before and after the therapy. Which the result of research showed that using weak electromagnetic wave or wind element in Thai Traditional Medicine to rebalance body into equilibrium state by assessing the Suanprung's stress assessment form, heart rate, breathe rate, blood pressure that is the physiological change in response to stress both before and after experiment it was found that statistically significant decrease. ($p < .05$)

Keywords: Stress, Thai Traditional Medicine, Alternative Medicine, Energy Medicine

บทนำ

สังคมในปัจจุบันมีการแข่งขันค่อนข้างสูง ความเครียดจึงเป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงได้ยาก ตั้งแต่วัยเด็กจนถึงวัยชรา ความเครียดเกิดได้จากหลายสาเหตุ สังคม ครอบครัว การเรียน การทำงาน หรือแม้กระทั่งบุคลิกภาพของแต่ละบุคคล ซึ่งความเครียดอาจเป็นปัจจัยก่อให้เกิดโรคทางกายได้ การบรรเทาความเครียดสามารถทำได้หลายวิธี ทั้งด้านการแพทย์แผนปัจจุบันและการแพทย์ทางเลือก เช่น การทำกิจกรรมบำบัด การรับประทานยา การปรึกษาจิตแพทย์ การทำสปา การนวดผ่อนคลาย การฝังเข็ม หรือการใช้พลังบำบัด เพื่อลดผลข้างเคียงจากการบำบัดด้วยวิธีอื่น

ความเครียด (stress) มีรากศัพท์มาจากภาษาละตินว่า *strictus* หรือ *strict* หมายถึงแรงดันซึ่งส่งผลต่อร่างกายให้มีแนวโน้มที่จะเกิดความผิดปกติขึ้น ซึ่งแต่ละบุคคลจะเกิดปฏิกิริยาตอบสนองต่อความเครียดแตกต่างกัน

ความเครียดแบ่งได้เป็น 4 ลักษณะ (Miller et al., 1993) ได้แก่

1. ความเครียดเฉียบพลัน (Acute stress) เป็นความเครียดที่เกิดขึ้นในเวลาสั้นๆจากการทำงานของระบบประสาทซิมพาเทติก ทำให้มีอาการ ชีพจรเต้นเร็ว ความดันโลหิตสูง หายใจสั้น มือเท้าเย็น ส่วนระบบพาราซิมพาเทติก ทำให้มีอาการ ปวดศีรษะ ปวดกล้ามเนื้อ เป็นต้น

2. ความเครียดเฉียบพลันที่เกิดขึ้นซ้ำ ๆ (Episodic acute stress) เป็นความเครียดเฉียบพลันที่ถูกกระตุ้นซ้ำ ๆ จนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงต่อระบบร่างกายละเอียดใจ อาทิ ความคิด ความจำ อารมณ์ ตลอดจนอวัยวะในร่างกายผิดปกติ

3. ความเครียดเรื้อรัง (Chronic stress) เมื่อร่างกายมีภาวะเครียดเรื้อรัง จะส่งผลกระทบต่อระบบต่าง ๆ ของร่างกาย

ในด้านการรักษาความเครียด (Department of Psychiatry, 2012) ได้กล่าวถึงการรักษาโรคเครียดได้หลายวิธี ได้แก่ การรักษาโดยใช้ยา เป็นวิธีที่ได้ผลดีที่สุด โดยเฉพาะความเครียดแบบเฉียบพลัน แต่ข้อจำกัดคือ ผู้ป่วยต้องได้รับยาต่อเนื่อง จิตบำบัด โดยเน้นจิตวิเคราะห์ พฤติกรรมบำบัด หรือการสนทนากการต่าง ๆ ก็เป็นอีกหนึ่งวิธีที่ช่วยบำบัดความเครียด

เมื่อร่างกายเกิดความเครียดจะเกิดการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยา อาทิ อัตราการเต้นของหัวใจสูงขึ้น อัตราการหายใจขึ้น อุณหภูมิร่างกายสูงขึ้น ความดันโลหิตสูงกว่าปกติ จนทำให้เกิดอาการ นอนไม่หลับ ขาดสมาธิ ความสามารถในการควบคุมอารมณ์ลดลง (Disayawanich & Disayawanich, 2002)

วิธีการ

การประเมินระดับความเครียดสามารถทำได้ด้วยตนเอง ได้แก่ แบบประเมินความเครียด HOS (Karnjanawong & Kompayak, 2002) แบบวัดสุขภาพจิต CMI แบบสอบถาม SCL (Tontisirin et al., 2000) แบบวัดความเครียดด้วยสายตา VAS แบบประเมินความเครียดที่พัฒนาโดยกรมสุขภาพจิตและแบบวัดความเครียดสวนปรุง (Mahatnirankul et al., 1997) ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้แบบประเมินความเครียดของสวนปรุง เนื่องจากสามารถประเมินความเครียดที่แสดงออกได้ถึง 7 กลุ่มอาการและยังบ่งบอกถึงสาเหตุของความเครียด

ในทฤษฎีการแพทย์แผนไทย ร่างกายของมนุษย์ประกอบไปด้วยธาตุทั้ง 4 ได้แก่ ธาตุดิน ธาตุน้ำ ธาตุลม ธาตุไฟ ซึ่งความเครียด คือ ธาตุไฟ ปริทัยหคคิกกำเรบ เป็นไฟที่ทำให้จิตใจระส่ำระสาย เมื่อมีธาตุใดผิดปกติก็จะส่งผลกระทบต่อธาตุอื่น ๆ ตามมา การรักษาต้องปรับที่ลมสมมาวาตะโดยใช้ยารสสุขุมเพื่อปรับธาตุลมและธาตุไฟเข้าสู่ภาวะสมดุล (Foundation of Applied Thai Traditional Medicine, 2007)

การบำบัดความเครียดควรอยู่ภายใต้การกวดดูแลของแพทย์หรือผู้เชี่ยวชาญ เพราะการให้ยา ไม่ว่าจะเป็นยาแผนปัจจุบัน หรือ สมุนไพร ล้วนมีผลข้างเคียงหรือผลกระทบในระยะยาวต่อดับหรือไต การใช้พลังบำบัด จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ไม่ได้ให้คนไข้รับประทาน หรือฉีดสารใดๆใส่ร่างกายผู้ป่วย จึงค่อนข้างปลอดภัยทั้งในระยะสั้นและระยะยาว

นอกจากนี้ยังมีการรักษา บำบัดความเครียด โดยใช้คลื่น แสง สี เสียง ในการบำบัดความเครียด งานวิจัยนี้ผ่านคณะกรรมการจริยธรรมการวิจัย มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง ในการวิจัยนี้เป็นการวิจัยกึ่งทดลอง ในอาสาสมัครที่มีระดับความเครียดสูงกว่าปกติ จำนวน 21 คน โดยใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอ่อนๆ ปรับสมดุลกระตุ้นและฟื้นฟูเซลล์ โดยกระจายพลังงานไปยังส่วนต่าง ๆ โดยขั้นตอนแรกจะใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอ่อนๆเตรียมความพร้อมของร่างกายให้พร้อมตอบสนองต่อการรักษา ต่อมาปล่อยคลื่นเพื่อปรับสมดุลระบบประสาทอัตโนมัติ กระตุ้นระบบต่าง ๆ ในร่างกาย ระบบเผาผลาญ ระบบภูมิคุ้มกัน จัดการทำงานของระบบประสาทส่วนกลาง ทำให้ร่างกายผ่อนคลาย ลดปัญหาอนไม่หลับ ปรับคลื่นสมอง โดยใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอ่อนๆทั้งหมด 3 ครั้ง ใช้แบบประเมินความเครียดของโรงพยาบาลสวนปรุงควบคู่กับการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาได้แก่ อัตราการหายใจ อัตราการเต้นของหัวใจ ความดันโลหิต ทั้งก่อนและหลังการบำบัดตามโปรแกรมทั้ง 3 ครั้ง โดยนำผลการประเมินและการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยา มาเปรียบเทียบกับก่อนและหลังการบำบัดในแต่ละครั้ง ตลอดจนก่อนการบำบัดในครั้งแรก และหลังการบำบัดเมื่อสิ้นสุดโปรแกรมมาวิเคราะห์ผล

ผลการทดลองและวิจารณ์

ผลจากการวิจัยในอาสาสมัครซึ่งมีอายุ 18 ปีขึ้นไป ทำแบบประเมินความเครียดของโรงพยาบาลสวนปรุง ได้คะแนนมากกว่าหรือเท่ากับ 43 คะแนน ซึ่งหมายถึงมีระดับความเครียดสูงกว่าปกติ สามารถเข้ารับโปรแกรมการบำบัดได้ 3 ครั้ง สัปดาห์ละ 1 ครั้ง ใช้เวลาในการบำบัด 60 นาที ไม่ได้อยู่ในระหว่างตั้งครรภ์ ไม่ได้ใส่เครื่องกระตุ้นไฟฟ้าหัวใจชนิดถาวร จำนวน 21 คน พบว่าปัญหาความเครียดหลักมาจากการงาน/การเรียน รองลงมาครอบครัว/คนรอบข้าง เครียดจากปัญหาสุขภาพและการเงินเป็นอันดับสุดท้าย

ตารางที่ 1 ตารางแสดงการเปรียบเทียบก่อน และหลังครบโปรแกรมการบำบัดความเครียดด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

ข้อมูล	ก่อน		หลัง		t	p-value
	Mean	±SD	Mean	±SD		
คะแนนความเครียด (คะแนน)	63.33	12.11	32.43	9.91	9.76	0.000
อัตราการเต้นของหัวใจ (T/min)	77.29	7.50	68.48	8.63	7.01	0.000
อัตราการหายใจ (T/min)	19.14	1.62	16.67	1.59	-3.98*	0.000
ความดันโลหิต Systolic (mm.Hg.)	123.86	12.53	115.43	9.33	4.88	0.000
ความดันโลหิต Diastolic (mm.Hg.)	79.57	9.22	73.81	9.79	3.63	0.002

หมายเหตุ : *ค่า Z จากสถิติ Wilcoxon Matched-Pairs Sing-Rank Test

จากการใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอ่อนๆครั้งแรก ก่อนทำอาสาสมัครมีความเครียดเฉลี่ย 63.33 คะแนนหลังเสร็จโปรแกรมการรักษาครั้งที่ 1 อาสาสมัครมีคะแนนความเครียดเฉลี่ย 40.62 คะแนน (SD = 0.43) ซึ่งลดลงอย่างชัดเจนและเมื่อนำคะแนนความเครียดมาวิเคราะห์ทางสถิติโดยการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยคะแนนความเครียดก่อนและหลังการรักษาครั้งที่ 1 โดยใช้สถิติ Wilcoxon Matched-Pairs Sing-Rank Test พบว่าระดับความเครียดลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < .05$)

การเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยา ได้แก่ อัตราการเต้นของหัวใจก่อนการรักษาเฉลี่ย 77.29 ครั้งต่อนาที หลังเสร็จโปรแกรมการรักษาครั้งที่ 1 อาสาสมัครมีอัตราการเต้นของหัวใจเฉลี่ย 72.10 ครั้งต่อนาที (SD = 0.57) ซึ่งลดลงอย่างชัดเจนและเมื่อนำมาวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้สถิติ Paired t-test พบว่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < .05$) อัตราการหายใจก่อนการรักษาเฉลี่ย 19.14 ครั้งต่อนาที หลังเสร็จโปรแกรมการรักษาครั้งที่ 1 อาสาสมัครมีอัตราการหายใจเฉลี่ย 17.81 ครั้งต่อนาที (SD = 0.54) ซึ่งนำมาวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้สถิติ Paired t-test พบว่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < .05$) ความดันโลหิต Systolic ก่อนการรักษาเฉลี่ย 123.86 มิลลิเมตรปรอท หลังเสร็จโปรแกรมการรักษาครั้งที่ 1 อาสาสมัครมีความดัน Systolic เฉลี่ย 117.95 มิลลิเมตรปรอท (SD = 0.13) ซึ่งนำมาวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้สถิติ Paired t-test พบว่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < .05$) ความดันโลหิต Diastolic ก่อนการรักษาเฉลี่ย 79.57 มิลลิเมตรปรอทหลังเสร็จโปรแกรมการรักษาครั้งที่ 1 อาสาสมัครมีความดันโลหิต Diastolic เฉลี่ย 76.95 มิลลิเมตรปรอท (SD = 0.79) ซึ่งนำมาวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้สถิติ Paired t-test พบว่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < .05$)

ก่อนการรักษาโปรแกรมครั้งที่ 2 อาสาสมัครมีคะแนนความเครียดเฉลี่ย 50.57 คะแนน (SD = 0.52) หลังเสร็จโปรแกรมการรักษาครั้งที่ 2 อาสาสมัครมีคะแนนความเครียดเฉลี่ย 33.62 คะแนน (SD = 1.01) ซึ่งลดลงอย่างชัดเจนและเมื่อนำคะแนนความเครียดมาวิเคราะห์ทางสถิติโดยการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยคะแนนความเครียดก่อนและหลังการรักษาครั้งที่ 2 โดยใช้สถิติ Paired t-test พบว่าระดับความเครียดลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < .05$) การเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยา ได้แก่ อัตราการเต้นของหัวใจก่อนการรักษาเฉลี่ย 73.24 ครั้งต่อนาที (SD = 0.52) หลังเสร็จโปรแกรมการรักษาครั้งที่ 2 อาสาสมัครมีอัตราการเต้นของหัวใจเฉลี่ย 69.52 ครั้งต่อนาที (SD = 0.36) ซึ่งลดลงอย่างชัดเจนและเมื่อนำมาวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้สถิติ Paired t-test พบว่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < .05$) อัตราการหายใจก่อนการรักษาเฉลี่ย 18.38 ครั้งต่อนาที (SD = 1.63) หลังเสร็จโปรแกรมการรักษาครั้งที่ 2 อาสาสมัครมีอัตราการหายใจเฉลี่ย 17.24 ครั้งต่อนาที (SD = 1.34) ซึ่งนำมาวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้สถิติ Wilcoxon Matched-Pairs Sing-Rank test พบว่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < .05$) ความดันโลหิต Systolic ก่อนการรักษาครั้งที่ 2 เฉลี่ย 120.95 มิลลิเมตรปรอท (SD = 1.23) หลังเสร็จโปรแกรมการรักษาครั้งที่ 2 อาสาสมัครมีความดัน Systolic เฉลี่ย 116.38 มิลลิเมตรปรอท (SD = 0.79) ซึ่งนำมาวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้สถิติ Paired t-test พบว่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < .05$) ความดันโลหิต Diastolic ก่อนการรักษาเฉลี่ย 76.29 มิลลิเมตรปรอท (SD = 1.36) หลังเสร็จโปรแกรมการรักษาครั้งที่ 2 อาสาสมัครมีความดันโลหิต Diastolic เฉลี่ย 74.57 มิลลิเมตรปรอท (SD = 0.77) ซึ่งนำมาวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้สถิติ Paired t-test พบว่าไม่แตกต่างระหว่างก่อนการรักษาครั้งที่ 2 และหลังการรักษาครั้งที่ 2

โปรแกรมการรักษาครั้งที่ 3 ก่อนการรักษาครั้งที่ 3 อาสาสมัครมีคะแนนความเครียดเฉลี่ย 46.71 คะแนน (SD = 1.18) หลังเสร็จโปรแกรมการรักษาครั้งที่ 2 อาสาสมัครมีคะแนนความเครียดเฉลี่ย 32.43 คะแนน (SD = 0.91) ซึ่งลดลงอย่างชัดเจนและเมื่อนำคะแนนความเครียดมาวิเคราะห์ทางสถิติโดยการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยคะแนนความเครียดก่อนและหลังการรักษาครั้งที่ 3 โดยใช้สถิติ Paired t-test พบว่าระดับความเครียดลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < .05$)

การเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยา ได้แก่ อัตราการเต้นของหัวใจก่อนการรักษาครั้งที่ 3 เฉลี่ย 73.57 ครั้งต่อนาที (SD = 0.66) หลังเสร็จโปรแกรมการรักษาครั้งที่ 3 อาสาสมัครมีอัตราการเต้นของหัวใจเฉลี่ย 68.48 ครั้งต่อนาที (SD = 1.63) ซึ่งลดลงอย่างชัดเจนและเมื่อนำมาวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้สถิติ Wilcoxon Matched-Pairs Sing-Rank Test พบว่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < .05$) อัตราการหายใจก่อนการรักษาครั้งที่ 3 เฉลี่ย 18.48 ครั้งต่อนาที (SD = 1.78) หลังเสร็จโปรแกรมการรักษาครั้งที่ 3 อาสาสมัครมีอัตราการหายใจเฉลี่ย 16.67 ครั้งต่อนาที (SD = 1.59) ซึ่งนำมาวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้ Wilcoxon Matched-Pairs Sing-Rank Test พบว่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < .05$) ความดันโลหิต Systolic ก่อนการรักษาครั้งที่ 3 เฉลี่ย 120.48 มิลลิเมตรปรอท (SD = 1.86) หลังโปรแกรมการรักษาครั้งที่ 3 อาสาสมัครมีความดัน Systolic เฉลี่ย 115.43 มิลลิเมตรปรอท (SD = 1.33) ซึ่งนำมาวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้สถิติ Paired t-test พบว่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < .05$) ความดันโลหิต Diastolic ก่อนการรักษาครั้งที่ 3 เฉลี่ย 76.48 มิลลิเมตรปรอท (SD = 0.66) หลังเสร็จโปรแกรมการรักษาครั้งที่ 3 อาสาสมัครมีความดันโลหิต Diastolic เฉลี่ย 73.81 มิลลิเมตรปรอท (SD = 8.79) ซึ่งนำมาวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้ Paired t-test พบว่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < .05$)

นอกจากนี้ผู้วิจัยได้ติดตามผลการรักษาหลังจากที่ครบโปรแกรมการรักษาทั้ง 3 ครั้งแล้วห่างจากการรักษาครั้งสุดท้ายเป็นระยะเวลา 1 สัปดาห์โดยติดตามจากคะแนนความเครียดพบว่าเมื่อเสร็จสิ้นโปรแกรมการรักษาไปแล้ว

สรุป

เอกสารอ้างอิง

- Department of Psychiatry. (2012). **Stress: Chulalongkorn University**. Faculty of Medicine, Chulalongkorn University. (in Thai)
- Disayawanich, C. & Disayawanich, P. (2002). Stress & Physiology of Stress. **Journal of the Psychiatric Association of Thailand**, 47(3), 3-24.
- Disayawanich, C. & Disayawanich, P. (2002). **Stress, Anxiety & Health**. Chiang Mai: Sang Silp Printing.
- Foundation of Applied Thai Traditional Medicine. (2007). **The textbook of Thai traditional medicine (Padthayasard Songkroh) volume I 2550BE**. Ayurved School, Center of Applied Thai Traditional Medicine, Faculty of Medicine, Siriraj Hospital, Mahidol University. Bangkok: Supavanich. (in Thai)
- Karnjanawong, S. & Kompayak, J., (2002), **Stress, health & illness: concepts & research studies in Thailand**. Master of Social Science's Thesis, Mahidol University. Nakhon Pathom.
- Krisanaprakornkit, T. (2011). **Stressology in psychiatry**. Khon Kaen: Klunghana Vittaya Press.
- Mahatnirankul, S., Pumpaisalchai, W. & Tapanya, P. (1997). **Suanprung stress Test Creation**. Chiang Mai: Suanprung Hospital.
- Miller, N., Rice-Evans, C., Davies, M., Gopinathan, V. & Milner, A. (1993). **The stress solution: An action plan to manage the stress in your life**. New York.
- Tontisirin, P., Ittarat, P. & Nivasavat, W. (2000). **A study of stress, cause of stress and coping behavior of students nurses in the Faculty of Nursing, Khon Khan University**. Master of Nursing Science's Thesis. Khon Kaen University. Khon Kaen. (in Thai)

NUMERICAL STUDY OF HEAT TRANSFER AND FLUID FLOW IN A CONFINED PLANE TURBULENT JET IMPINGEMENT USING NANOFLUIDS

Khomgris Chaiyo^{1*}

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaengsaen,
Kasetsart University, Kamphaengsaen Campus, Nakhonpathom, 73140

*E-mail: khomgris.c@ku.th

Received: 2021-02-05

Revised: 2021-05-13

Accepted: 2021-06-08

ABSTRACT

This article presents a numerical investigation on heat transfer and fluid flow of a confined plane turbulent nanofluid jet impingement on an isothermal heated surface using a single-phase model. The finite volume method and standard k- ϵ turbulent model were used for the solution of resulting governing equations. Al_2O_3 nanoparticles dispersed in water with volumetric concentration of nanoparticles ranging between 0 and 4% were used as working fluid for simulating the heat transfer and fluid flow of nanofluid jet impingement. At inlet mean velocity profile was non-uniform. The influences of volumetric concentration of nanoparticles, aspect ratio and Reynolds number were examined and discussed in details. The results indicated that the volumetric concentration of nanoparticles, aspect ratio and Reynolds number enhanced heat transfer when considering in terms of the local and average Nusselt number, while the skin friction coefficient profile was slightly increased whereas increasing the volumetric concentration of nanoparticles.

Keywords: impinging jet, heat transfer enhancement, nanofluids

Introduction

Impinging jets provide an effective and flexible way to transfer energy or mass in industrial applications. The directed liquid or gaseous flow released against a surface can efficiently transfer large amounts of thermal energy or mass between the surface and the fluid. Heat transfer applications include cooling of stock material during material forming processes, heat treatment (Ferrari et al., 2003), cooling of electronic components, heating of optical surfaces for defogging, cooling of turbine

components, cooling of critical machinery structures, and many other industrial processes (Zuckerman et al., 2006).

Nanofluids are suspensions of very fine solid particles (nanoparticles) with length scales of 1–100 nm dispersed in base fluids, such as water, engine oil, and ethylene glycol (Choi et al., 1995). Due to the enhancement in thermal conductivity and heat transfer provided by nanofluids compared to classical heat transfer fluids. Nanofluids have become drastically significant for a wide range of engineering applications which require high heat dissipation rates such as heat exchangers (Venkataraj et al., 2018) and cooling of electronic components which suffer from a high heat generation (Selvakumar et al., 2012). Integrating nanofluids with impinging jet is considered a promising technique that can overcome the challenges of heat removal (Abdelrehim et al., 2019).

Several researches have investigated numerically utilizing the single-phase model under a laminar flow regime using water- Al_2O_3 nanofluids. The hydrodynamic and thermal fields of a water- $\gamma\text{Al}_2\text{O}_3$ nanofluid in a radial laminar flow cooling system were presented by Roy et al. (2004). The results indicated that considerable heat transfer enhancement is possible, even achieving a twofold increase in the case of a 10% nanoparticle volume fraction nanofluid. On the other hand, an increase in wall shear stress is also noticed with an increase in particle volume concentration.

A confined impinging slot jets working with pure water or water- Al_2O_3 based nanofluids was numerically presented. The flow is laminar and a constant uniform temperature is applied on the target surface. The single-phase model approach was adopted in order to describe the nanofluid behavior and different particle volume concentrations. The results demonstrated that the stagnation point the local heat transfer coefficient and Nusselt number values result to be the highest and they increase as particle concentrations and Reynolds numbers increase. The required pumping power ratio increases as particle concentration grows and it is at most 3.9 times greater than the values calculated in the case of pure water (Manca et al., 2016).

However, a few researches of turbulent impinging jet cooling using nanofluids have investigated numerically utilizing the single-phase model. A numerical analysis of a confined plane turbulent impinging jet with nanofluids was carried out to evaluate the thermal and fluid-dynamic performances and study the velocity and temperature fields. The base fluid is water and different volume concentrations of Al_2O_3 nanoparticles. The results demonstrated nanofluids produce an increase of fluid bulk temperature increasing concentrations, the highest values of the average Nusselt numbers increase as the nanoparticle concentrations and Reynolds numbers. Moreover, the velocity is set an uniform profile at inlet jet section (Manca et al., 2011).

The flow and heat transfer processes in a circular impinging jet of nanofluids water- Al_2O_3 were described by several different turbulence models and wall functions by Peng et al. (2014). The velocity and temperature fields were predicted by the single-phase model and the two-phase

model. The results indicated that two-phase model with the addition of nanoparticles significantly strengthens the momentum exchange between phases, promotes the uniformity of the temperature field, and, consequently, improves the overall heat transfer capacity, which cannot be predicted by the single-phase model.

Numerical investigations of turbulent flow field and heat transfer performance of water- Al_2O_3 nanofluid jet impingement were reported where jet impinged over a flat circular heated surface from a circular pipe of diameter. A single-phase mixture model and the control-volume approach were used. The uniform inlet velocity was applied at the jet inlet. The results indicated that the heat transfer increases with increasing values of the particle volumetric concentration while the flow field and turbulent kinetic energy distribution remain unchanged with the inclusion of nanoparticles (Allaiddin et al., 2018).

Although a few researches are currently available on the numerical study of turbulent heat transfer and fluid flow of nanofluids impingement jet, there is no comprehensive study on at the inlet mean velocity profile that is non-uniform. The objective of this study is carried out to numerical evaluate the results of heat transfer and fluid flow obtained by the single-phase model in a confined plane turbulent jet impingement using nanofluids to cool the isothermal heated surface. The jet stream at inlet have an almost flat mean velocity profile that is non-uniform and specified according to Tsubokura et al. (2003). Furthermore, the influences of volumetric concentration of nanoparticles, aspect ratio and Reynolds number (Re) are investigated.

Methods

A. Problem description

The flow of the impinging jet is assumed to be steady, two-dimensional, turbulent, and incompressible as shown in Figure 1. The body forces are neglected and the fluid properties are assumed to be temperature independent. Brownian motion and thermophoretic diffusions of the nanoparticles do not have any significant effect on convection heat transfer for the percentage of nanoparticle concentration considered in this study. The length of the isothermal impingement surface to the width of the impinging jet was fixed at $L/B=50$, this isothermal impingement had a constant temperature of 310 K. The aspect ratios (H/B) were ranged from 4 to 8 to study the confining effect, and the flow was considered turbulent with varied from 10000 to 30000. The working fluid is water- Al_2O_3 nanofluids with the volumetric concentration of nanoparticles ϕ ranged from 0 to 4%.

B. Thermophysical properties of nanofluids

The numerical simulations were performed using water- Al_2O_3 nanofluids and the nanoparticle concentrations considered in the present analysis are as 0%, 1%, 2%, and 4%. The thermophysical properties of pure water and alumina are given in Table 1 (Rohsenow et al., 1998).

When the single-phase model was adopted in the present work as nanofluids with small nanoparticle volume fractions can be considered as Newtonian fluids for small temperature jumps (Mookherjee et al., 2020). The density and the specific heat of the nanofluids are evaluated using the formula developed for conventional solid–liquid mixtures as follow:

$$\rho_{nf} = (1 - \phi) \rho_{bf} + \phi \rho_p \quad (1)$$

$$(\rho C)_{nf} = (1 - \phi)(\rho C)_{bf} + \phi(\rho C)_p \quad (2)$$

where ϕ , ρ_{bf} , ρ_p , C_{bf} , and C_p are the volumetric concentration of nanoparticles, density of the base fluid, density of the nanoparticles, specific heat of the base fluid, and the specific heat of the nanoparticles, respectively. The viscosity and thermal conductivity of nanofluids are evaluated to follow Masoumi et al. (2009) & Chon et al. (2005) respectively. The thermophysical properties of the working fluid are summarized in Table 2 (Mookherjee 2020).

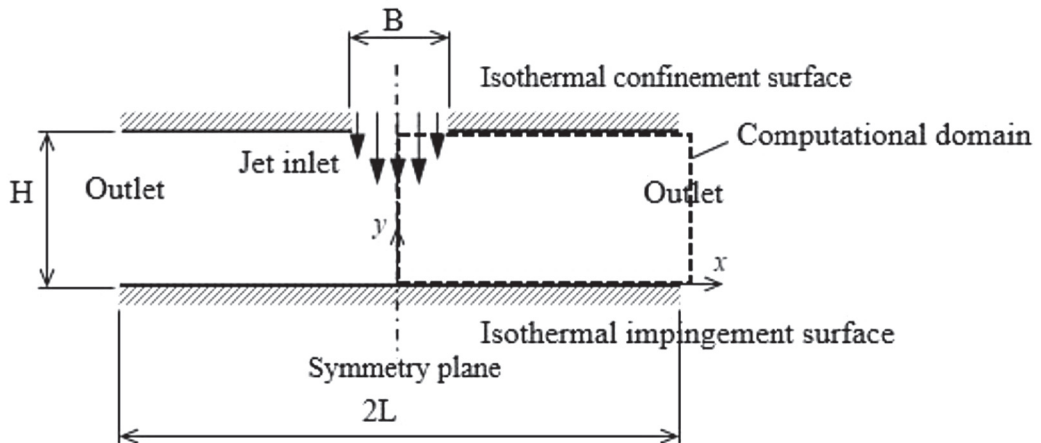


Figure 1 The two-dimensional confined impinging jet

C. Governing equations

The governing equations of the time-averaged formulation include the conservation equations of mass, momentum, and energy. In the present study, flows are assumed to be steady and incompressible, and the eddy viscosity concept is used to model the Reynolds stress (Launder et al., 1974). The continuity, momentum, and energy equations of the time-averaged equations can be written in the two-dimensional Cartesian coordinate system form as follows:

Continuity:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho \bar{u}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho \bar{v}) = 0 \quad (3)$$

x-momentum:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho \bar{u} \bar{u}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho \bar{u} \bar{v}) = -\frac{\partial \bar{p}^*}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right] \quad (4)$$

y-momentum:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho \bar{u} \bar{v}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho \bar{v} \bar{v}) = -\frac{\partial \bar{p}^*}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right] \quad (5)$$

Energy:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho \bar{u} \bar{T}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho \bar{v} \bar{T}) = \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu_e \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu_e \frac{\partial \bar{T}}{\partial y} \right] \quad (6)$$

where $\bar{u}$, $\bar{v}$ are the mean velocities in the streamwise and crosswise directions respectively, $\bar{T}$ is the mean temperature, and ρ is the density. Besides, μ_t is the eddy viscosity (the turbulent viscosity) and the modified pressure, $\bar{p}^*$, is defined as:

$$\bar{p}^* = \bar{p} + \frac{2}{3}k \quad (7)$$

with $\bar{p}$ is the mean pressure, and k is the turbulence kinetic energy. The effective diffusion coefficient (μ_e) is defined as:

$$\mu_e = \left(\frac{\mu}{\text{Pr}} + \frac{\mu_t}{\text{Pr}_t} \right) \quad (8)$$

where Pr is the Prandtl number, and Pr_t is the turbulent Prandtl number, respectively.

E. The standard k- ϵ model

In the case of Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) equation, a standard turbulence model such as the turbulence kinetic energy (k) and its dissipation rate (ϵ) are:

Turbulent kinetic energy:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho \bar{u} k) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho \bar{v} k) = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right] + P_k - \rho \epsilon \quad (9)$$

Turbulent kinetic energy:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho \bar{u}k) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho \bar{v}k) = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right] + P_k - \rho \varepsilon \quad (9)$$

Dissipation rate:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho \bar{u}\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho \bar{v}\varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right] + C_{\varepsilon 1} P_k \frac{\varepsilon}{k} - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (10)$$

The production of the turbulent kinetic energy, P_k , is formulated as:

$$P_k = \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (11)$$

The production of the turbulent kinetic energy, P_k , is formulated as:

$$P_k = \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (11)$$

The turbulent viscosity is defined as:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (12)$$

The model constants are given by

$$C_\mu = 0.09, \quad C_{\varepsilon 1} = 1.44, \quad C_{\varepsilon 2} = 1.92, \quad \sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\varepsilon = 1.3$$

Since the laminar sublayer has effects on the flow near walls, the velocities, turbulent kinetic energy and its dissipation rates in this near wall regions may be evaluated by the wall function approaches (Launder 1974).

Table 1 Thermophysical properties of pure water and Al_2O_3 particles at $T = 293$ K used in the computations

Material	Density ρ (kg/m^3)	Heat capacity c ($\text{J/kg} \cdot \text{K}$)	Viscosity μ ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)	Thermal conductivity λ ($\text{W/m} \cdot \text{K}$)
Al_2O_3	3380	773	-	36
Water	998.2	4182	993×10^{-6}	0.597

Table 2 Thermophysical properties of working fluids

Volume fraction ϕ	Density ρ (kg/m^3)	Heat capacity c ($\text{J/kg} \cdot \text{K}$)	Viscosity μ ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)	Thermal conductivity λ ($\text{W/m} \cdot \text{K}$)
0%	998.2	4182	993×10^{-6}	0.597
1%	1027.018	4053.210	1097.05×10^{-6}	0.617
2%	1055.836	3931.451	1154.756×10^{-6}	0.631
4%	1113.472	3706.841	1375.910×10^{-6}	0.655

D. Numerical solution procedure

The computations have been performed with the in-house developed computational code. The governing equations and the transport equation of above turbulence models were solved using the finite volume method (Patankar, 1980). This scheme solves discretized versions of all equations with non-uniform staggered grids. The principle of mass-flux continuity is improved indirectly via the solution of pressure-correction equations according to SIMPLE algorithm (Patankar 1980). The convergence is judged by monitoring the magnitude of the absolute residual sources of mass, momentum and energy, normalized by the respective inlet fluxes. The solution is taken as having converged when all above residuals fell below 0.0001%.

The geometry of two-dimensional plane impinging jet consists of the jet stream, impinging and confinement wall; therefore as shown in Figure 1, computational boundaries involved are inlet, outlet, axis of symmetry and solid walls (isothermal impingement and confinement surfaces).

First at the inlet, the jet temperature $\bar{T}_j$ is given at 300 K. The jet stream having an almost flat mean velocity profile ($\bar{v}_m$) was specified according to Tsubokura (2003) as:

$$\bar{v}_m = \bar{v}_0 \left[1 - (2x/B)^4 \right] \quad (13)$$

where B is jet width and $\bar{v}_0$ is the mean centerline velocity. The Reynolds number (Re) is calculated as:

$$Re = \frac{\rho \bar{v}_0 B}{\mu} \quad (14)$$

Next, the outlet boundary is placed at $x=50B$ which is sufficiently far away from the main region of interesting. At this boundary streamwise gradients of all variables are set to zero. Then along the axis of symmetry, the normal velocity component and the normal gradients of other variables are set to zero.

Finally, at solid walls including impingement and confinement surface, the standard wall function approach is used to bridge the viscous sublayer at the duct wall which is based on standard $k-\epsilon$ model consideration. Also the walls are considered isothermal, the impingement surface T_w at 310 K and the confinement surface at 300 K, respectively. The Nusselt number (Nu) is defined as:

$$Nu = \frac{-(\partial \bar{T} / \partial y)_w B}{\bar{T}_w - \bar{T}_j} \quad (15)$$

Before proceeding to the discussion of the predicted results, it will be beneficial to focus first on the effect of the grid density on the solution. Figure 2 shows the computational grid at distance $x/B=50$ and $y/B=6$, the grid clustering are applied near the impingement surface and the confinement surface. The grid-independency of the solutions are examined using three different grid sizes consisting of 12464 (82x152), 25944 (92x282) and 30804 (102x302) on the model $H/B=6$ at $Re=20000$ with water as working fluid. The results on the intermediate grid 92x282 can be considered as the grid-independent results because the refinement from the grid 92x282 to the grid 102x302 produces averaged too small Nusselt number difference as shown in Figure 3.

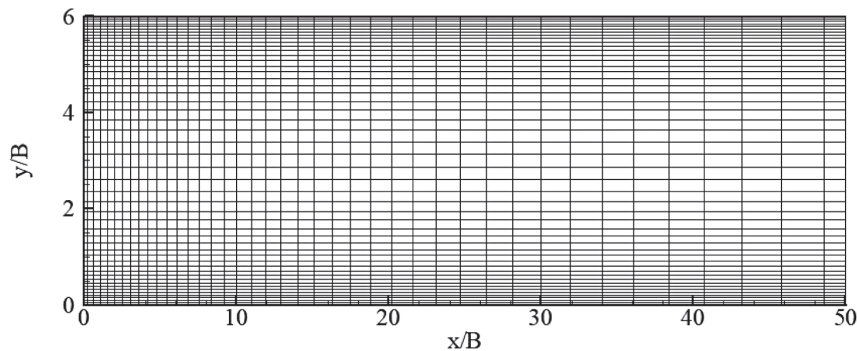


Figure 2 Sample of computational grid

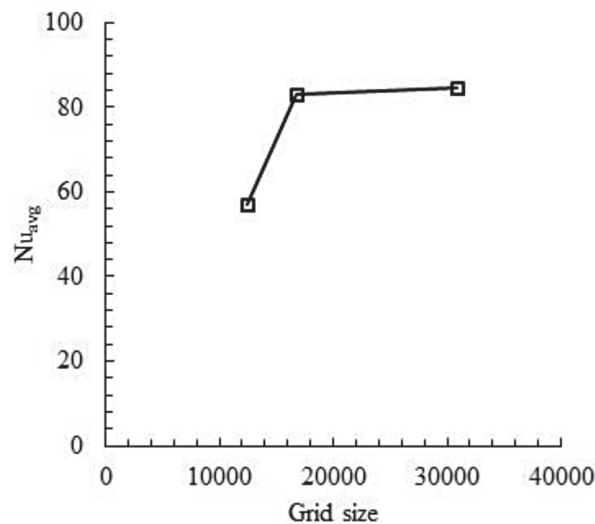


Figure 3 Grid independence analysis in the case of $H/B=6$ and $Re=20000$
using water as working fluid

Results and Discussions

The numerical results of a two-dimensional turbulent confined jet of Al_2O_3 -water-based nanofluids impinging on a stationary isothermal wall are investigated. Including the influence of volumetric concentration of nanoparticles, aspect ratio and Reynolds number are presented.

A. Numerical validation

In order to verify the developed computational code, the simulation results including the Nusselt number and the skin friction coefficient along the impingement plate for $H/B=9.2$ and $Re=20000$ are compared with the experimental data (Ashforth-Frost et al., 1997) and previous numerical data (Kubacki et al., 2010). The present numerical results are in good agreement with the experimental data and also the previous numerical data as shown in Figures 4.

B. Influence of volumetric concentration of nanoparticles

The numerical results of heat transfer and fluid flow are investigated at the different volumetric concentrations of nanoparticles values as $\phi = 0\%$, 1% , 2% , and 4% for $H/B=6$ and $Re=20000$. Figure 5 illustrates streamlines in case of various volumetric concentrations of nanoparticles values for $H/B=6$ and $Re=20000$. The development of a vortex is generated by the impinging jet because of jet entrainment, confining effects, and isothermal confinement surface. It is seen that a vortex is generated below the jet. The main jet stream impinges on the target isothermal heated impingement surface, gets deflected, and then flows downstream in a meandering path in between the recirculation and the impingement surface toward the outlet. Similar streamline trends are observed all volumetric concentration of nanoparticles.

Figure 6 shows temperature distributions in case of various the volumetric concentration of nanoparticles for $H/B=6$ and $Re=20000$. The temperature profiles are increased with respect to the increase of volumetric concentration of nanoparticles because of improving thermal conductivity of nanofluids.

Figure 7(a) shows the Nusselt number (Nu) distribution along the impingement surface for $H/B=6$ and $Re=20000$ at various volumetric concentration of nanoparticles. It is observed that the increased volumetric concentration of nanoparticles, the Nu is increased due to the increase of the thermal conductivity. Furthermore, the averaged Nusselt number (Nu_{avg}) distribution along the impingement surface is 83.06, 83.59, 83.57 and 84.75 for $\phi = 0\%$, 1%, 2% and 4%, respectively. However, the skin friction coefficient along the impinging surface is slightly different due to the small effect of nanoparticle on the velocity field as shown in Figure 7(b). Additionally, it is clear on the averaged skin friction coefficient along the impingement plate is 0.004644, 0.004645, 0.004645 and 0.004645 at different volumetric concentrations $\phi = 0\%$, 1%, 2% and 4%, respectively.

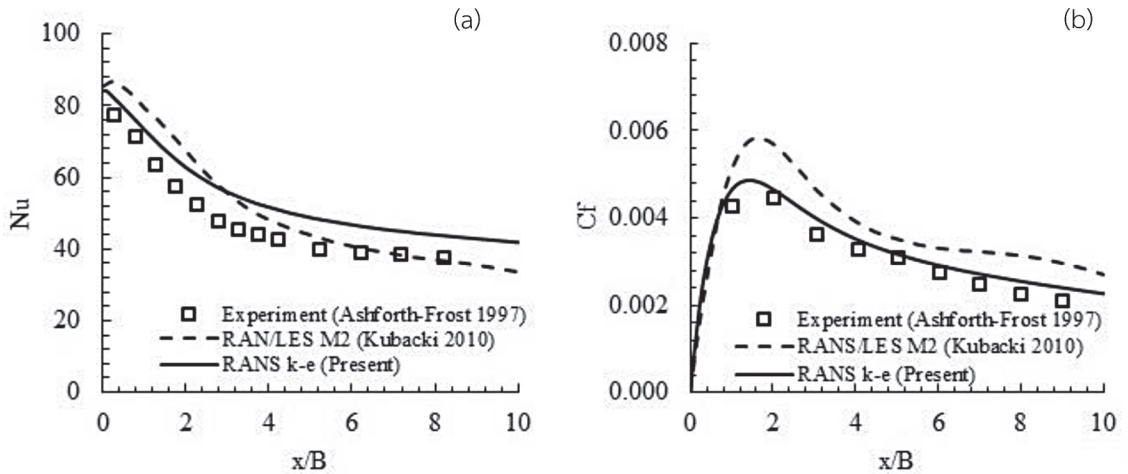


Figure 4 Comparison of present results with previous experimental and numerical data for $H/B=9.2$ and $Re=20000$ (a) The Nusselt number distribution
(b) The skin friction coefficient distribution

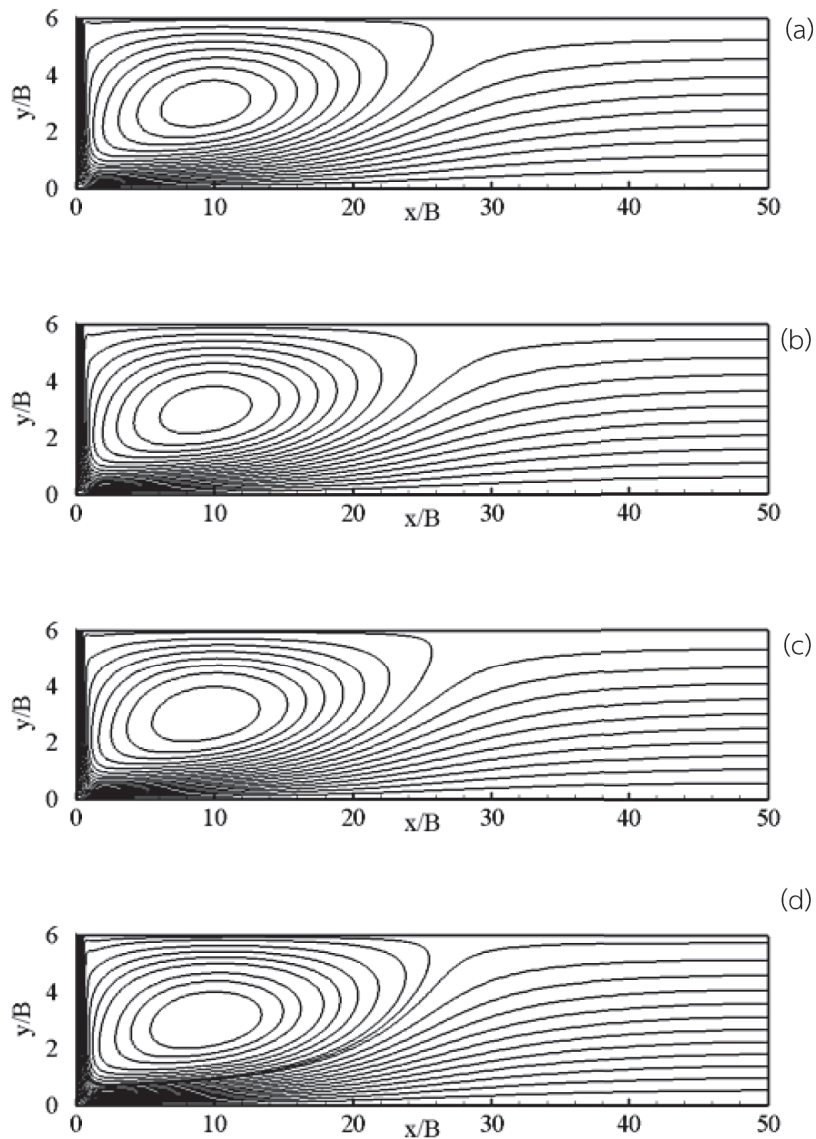


Figure 5 The streamlines at different volumetric concentrations of nanoparticles values for $H/B=6$ and $Re=20000$ (a) $\phi = 0\%$, (b) $\phi = 1\%$, (c) $\phi = 2\%$, (d) $\phi = 4\%$,

C. Influence of aspect ratio

The Nu distribution along the impingement surface for different aspect ratios H/B and volumetric concentration of nanoparticles $\phi=0\%$ and 4% at $Re=20000$ as shown in Figure 8(a). Nu is the maximum value at the stagnation point and then it is exponentially decreased along the surface. This is because the increase of the thickness of thermal boundary layer and the decrease of the local velocity due to velocity boundary layer. Figure 8(b) shows the averaged Nu along the impingement surface at different aspect ratios for the volumetric concentration of nanoparticles

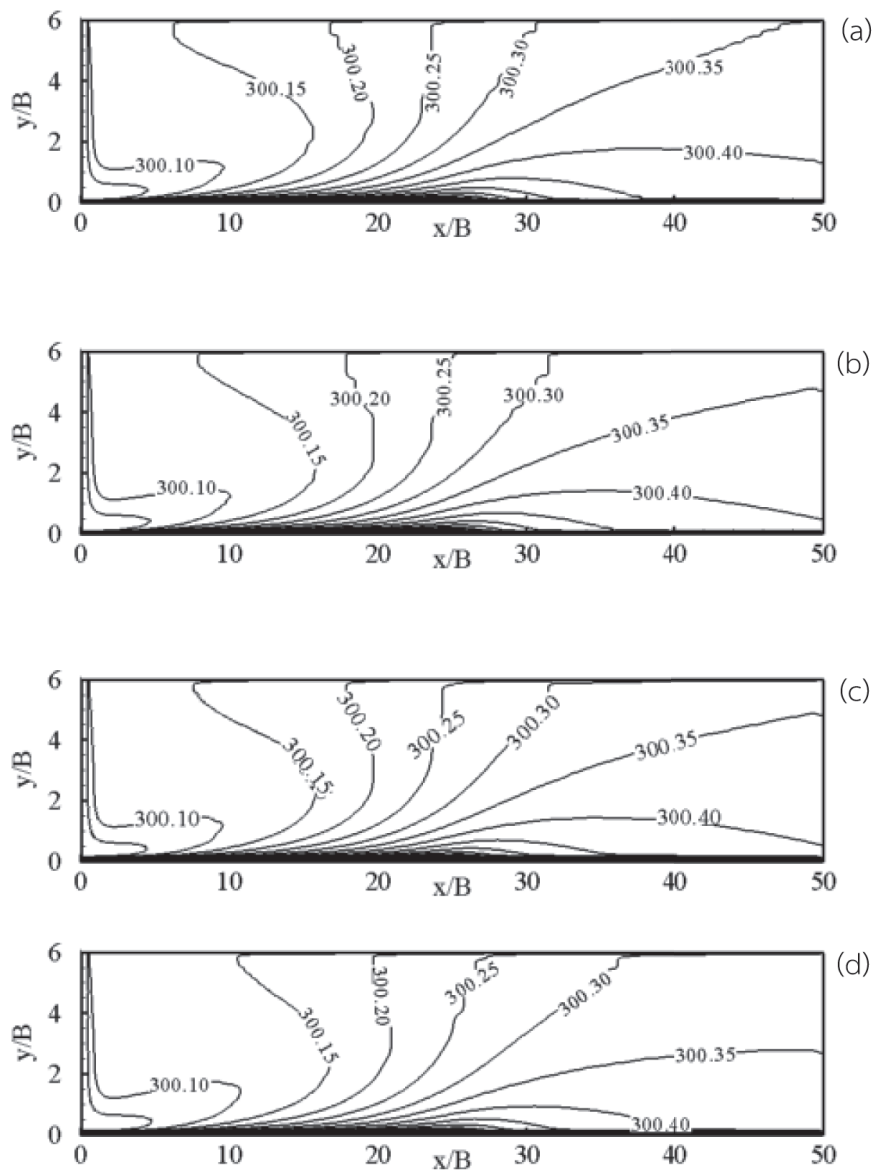


Figure 6 The temperature field at different volumetric concentration of nanoparticles values for $H/B=6$ and $Re=20000$ (a) $\phi=0\%$, (b) $\phi=1\%$, (c) $\phi=2\%$, (d) $\phi=4\%$,

$\phi=0\%$ and 4% at $Re=20000$. The Nu_{avg} is risen by increasing H/B and also the maximum Nu_{avg} is found at largest $H/B=8$

D. Influence of Reynolds number

For different Re and the volumetric concentrations of nanoparticles $\phi=0\%$ and 4% at $H/B=6$ are investigated. The influence of Re on the heat transfer can also be clarified in terms of Nu and Nu_{avg} as shown in Figures 9(a) and 9(b), respectively. Increasing Re leads to increase in the heat transfer due to the increase of the temperature gradient at the isothermal impingement surface

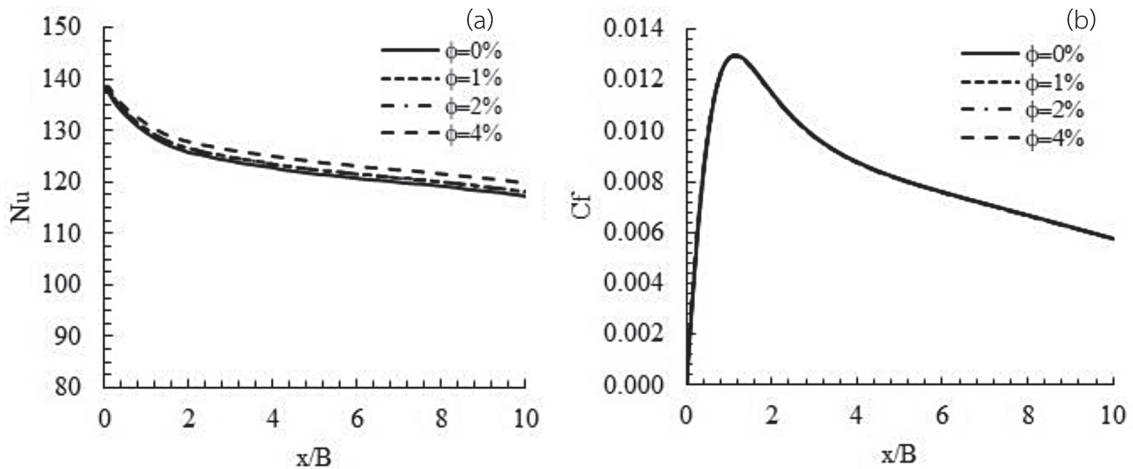


Figure 7 The results at different volumetric concentration of nanoparticles values for $H/B=6$ and $Re=20000$ (a) Nusselt number distribution (b) The skin friction coefficient distribution

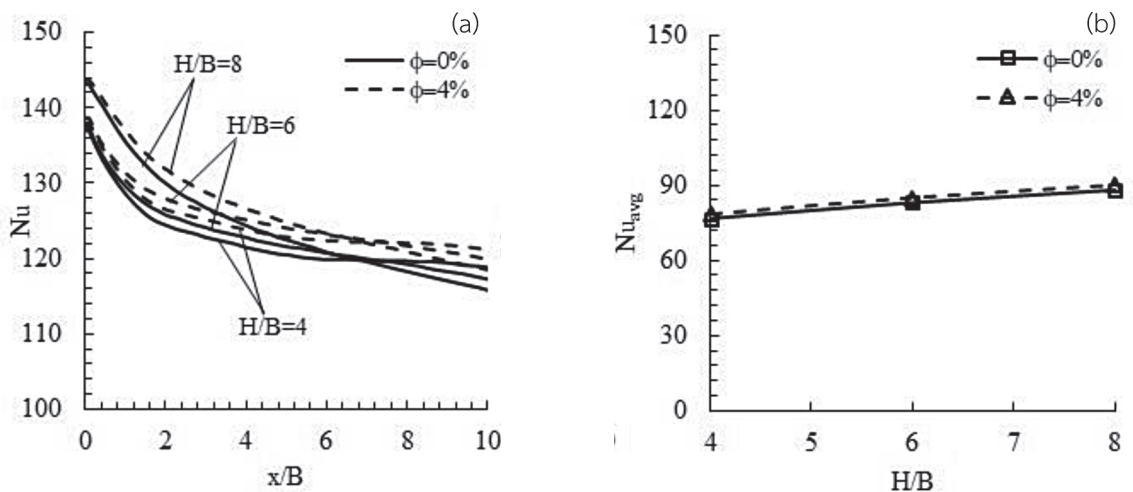


Figure 8 The Nusselt number for various aspect ratios H/B at $Re=20000$ (a) Nu distribution along the impingement surface (b) the averaged Nu profile

Conclusions

The turbulent heat transfer and fluid flow of nanofluids in a confined plane jet impingement were numerically investigated using the single-phase and the standard $k-\epsilon$ model in the simulation of jet impingement flow was evaluated against previous experimental and numerical data that was found to produce good predictions of the local Nusselt number and the skin friction coefficient distribution along the impingement surface. The influences of volumetric concentration of nanoparticles, aspect ratio and Reynolds number are examined in details. Major findings can be summarized as follows:

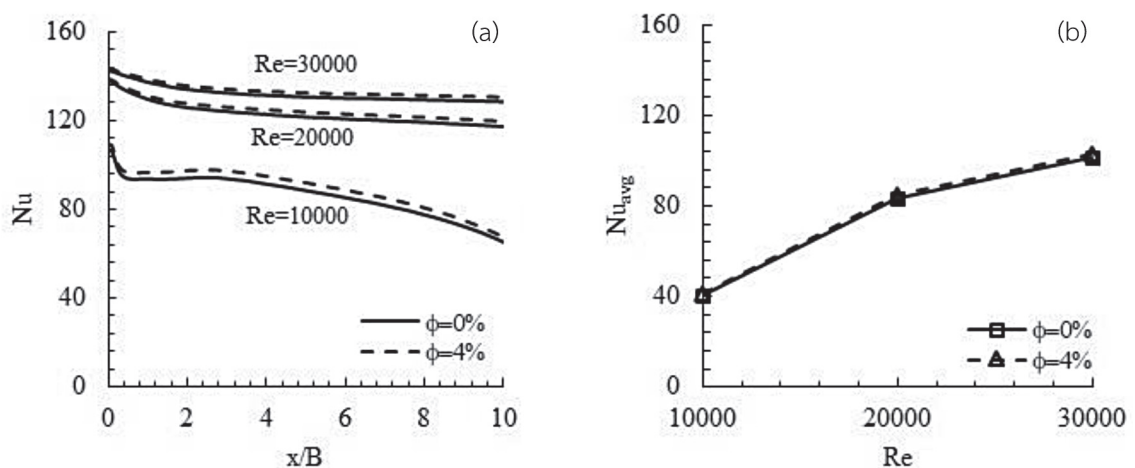


Figure 9 The Nusselt number for various Re numbers at $H/B=6$ (a) Nu distribution along the impingement surface (b) the averaged Nu profile

(1) The volumetric concentration of nanoparticles ranging from 0 to 4% increase the heat transfer in terms of the local and average Nusselt number, while the skin friction coefficient profile is slightly increased whereas increasing the volumetric concentration of nanoparticles.

(2) Aspect ratio ranges from 4 to 8 similar to the flow Reynolds number varied from 10000 to 30000 enhance the heat transfer coefficient of nanofluids

Acknowledgement

The author gratefully acknowledge the Faculty of Engineering at Kamphaengsaen, Kasetsart University, Kamphaengsaen Campus, Nakhonpathom for supporting this research.

References

- Abdelrehim, O., Khater, A., Mohamad, A.A., & Radwan, A. (2019). Two-phase simulation of nanofluid in a confined single impinging jet. **Case Studies in Thermal Engineering**, **14**, 100423.
- Allaiddin, U., Mahrukh, M., Rehman, N.U., Haque, M. E., & Uddin, N. (2018). Numerical investigation of heat transfer by an impinging jet using alumina–water nanofluid. **Numerical Heat Transfer A**, **74**(8), 1486-1502.
- Ashforth-Frost, S., Jambunathan, K., & Whitney, C.F. (1997). Velocity and turbulence characteristics of a semiconfined orthogonally impinging slot jet. **Experimental Thermal and Fluid Science**, **14**, 60–67.
- Choi, S.U.S., & Eastman, J.A. (1995). Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles. **ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition**, **66**, 99–105.
- Chon, C.H., Kihm, K.D., Lee, S.P., & Choi, S.U. (2005). Empirical correlation finding the role of temperature and particle size for nanofluid (Al_2O_3) thermal conductivity enhancement. **Applied Physics Letters**, **87**, 153107-3.
- Ferrari, J., Lior, N., & Slycke, J. (2003). An evaluation of gas quenching of steel rings by multiple-jet impingement. **Journal of Materials Processing Technology**, **136**, 190–201.
- Kubacki, S., & E. Dick, E. (2010). Simulation of plane impinging jets with k- ϵ based hybrid RANS/LES models. **International Journal of Heat and Fluid Flow**, **31**, 862–878.
- Launder, B.E., & Spalding, D.B. (1974). The numerical computation of turbulent flows. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, **3**, 269-289.
- Manca, O., Mesolella, P., Nardini, S., & Ricci, D. (2011). Numerical study of a confined slot impinging jet with nanofluids. **Nanoscale Research Letters**, **6**:188.
- Manca, O., Ricci, D., Nardini, S., & Lorenzo, G.D. (2016). Thermal and fluid dynamic behaviors of confined laminar impinging slot jets with nanofluids. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, **70**, 15–26.
- Masoumi, N., Sohrabi, N., & Behzadmehr, A. (2009). A new model for calculating the effective viscosity of nanofluids. **Journal of Physics D: Applied Physics**, **42**, 0550-501.
- Mookherjee, O., Pramanik, S., & Kar, U.K. (2020). Numerical investigation of a confined laminar jet impingement cooling of heat sources using nanofluids. **ASME Journal of Heat Transfer**, **142**(8), 082301.
- Patankar, S.V. (1980). **Numerical Heat Transfer and Fluid Flow**. New York: Hemisphere Publishing Corporation.
- Peng, W., Jizu, L., Minli, B., Yuyan, W., & Chengzhi, H. (2014). A numerical investigation of impinging jet cooling with nanofluids. **Nanoscale and Microscale Thermophysical Engineering**, **18**, 329–353.

- Rohsenow, W.M., Hartnett, J.P., & Cho, Y.I. (1998). Handbook of Heat Transfer. 3rd Edition. New York: McGraw-Hill.
- Roy, G., Nguyen, C.T., & Lajoie, P.R. (2004). Numerical investigation of laminar flow and heat transfer in a radial flow cooling system with the use of nanofluids. **Superlattices and Microstructures**, **35**, 497–511.
- Selvakumar, P., & Suresh, S. (2012). Convective performance of CuO/water nanofluid in an electronic heat sink. **Experimental Thermal and Fluid Science**, **40**, 57–63.
- Tsubokura, M., Kobayashi, T., Taniguchi, N., & Jones, W.P. (2003) A numerical study on the eddy structures of impinging jets exited at the inlet. **International Journal of Heat and Fluid Flow**, **24**, 500–511.
- Venkitaraj, K.P., Suresh S., Alwin Mathew, T., Bibin B.S., & Abraham, J. (2018). An experimental investigation on heat transfer enhancement in the laminar flow of water/TiO₂ nanofluid through a tube heat exchanger fitted with modified butterfly inserts. **Heat and Mass Transfer**, **54**, 813–829.
- Zuckerman, N., & Lior, N. (2006). Jet impingement heat transfer: physics, correlations, and numerical modeling. **Advances in Heat Transfer**, **39**, 565–631.
-

ผลกระทบฝุ่น PM2.5 ต่อสุขภาพและอาคาร กรณีศึกษาหอจดหมายเหตุแห่งชาติ จันทบุรี

IMPACT OF PM2.5 ON BUILDING HYGIENE, A CASE STUDY OF CHANTHABURI NATIONAL ARCHIVES

สุคนธ์ ขาวกริบ* สายพิน ไชยนันท์ สิริพันธ์ ไชยนันท์ อินจิรา นิยมธูร

และ สรินทร พัฒอำพันธ์

คณะวิทยาศาสตร์สุขภาพ วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม กรุงเทพมหานคร 10600

Sukon Khawgrib*, Saipin Chaiyanan, Sitthipan Chaiyanan, Injira Niyomtoon
and Sarintorn Patampan

Faculty of Health Sciences, Siam Technology College, Bangkok, 10600

*E-mail: sukonk@siamtechno.ac.th

Received: 2021-04-09

Revised: 2021-11-11

Accepted: 2021-11-11

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์หาค่าความเข้มข้นของฝุ่น PM2.5 และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยฝุ่น PM2.5 ภายในอาคารหอจดหมายเหตุแห่งชาติ จันทบุรี ที่เป็นห้องระบบเปิด ระบบปิด และภายนอกอาคาร เป็นการวิจัยเชิงสำรวจแบบภาคตัดขวาง ณ จุดเวลาใดเวลาหนึ่ง เลือกตัวอย่างแบบเจาะจง ได้แก่ กลุ่มห้องภายในอาคารที่เป็นระบบเปิด กลุ่มห้องภายในอาคารที่เป็นระบบปิด กลุ่มพื้นที่ภายนอกอาคารบริเวณทางเข้า กลุ่มละ 3 จุด แต่ละจุดตรวจวัดค่าเฉลี่ยรายชั่วโมง 8 ชั่วโมงต่อเนื่อง รวม 72 ตัวอย่าง ด้วยเครื่อง DUSTTRAK DRX Aerosol Monitor เปรียบเทียบข้อมูลที่ได้อ้างอิงมาตรฐานคุณภาพอากาศภายในอาคารที่เสนอแนะโดยกรมอนามัย สถิติที่ใช้วิเคราะห์ข้อมูล ได้แก่ ค่าเฉลี่ย (Avg.) ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ใช้ F-test ทดสอบการกระจายของข้อมูล ทดสอบความแตกต่างของฝุ่น PM2.5 ด้วยสถิติ Kruskal-Wallis test และ Mann-Whitney U test ผลการวิจัยพบว่าความเข้มข้นของฝุ่น PM2.5 มีค่าอยู่ในช่วง 28 - 82 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และมีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 28.4 - 73.5 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ห้องที่มีค่าสูงเกินเกณฑ์มาตรฐาน ได้แก่ ห้องปฏิบัติงานตรวจสอบและประเมินคุณค่าเอกสาร ห้องปฏิบัติงานตรวจสอบและประเมินคุณค่าเอกสารประเภทฟิล์ม ห้องสำนักงานหอจดหมายเหตุ (ห้องธุรการ) ห้องศูนย์เอกสาร กลุ่มห้องที่เป็นระบบเปิดมีค่าเฉลี่ยฝุ่นสูงกว่ากลุ่มห้องที่เป็นระบบปิด อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < .05$) กลุ่มห้องที่เป็นระบบเปิดมีค่าเฉลี่ยฝุ่นไม่แตกต่างจากกลุ่มพื้นที่ภายนอกอาคาร ($p > .05$) กลุ่มห้องภายในอาคารที่เป็นระบบปิดมีค่าเฉลี่ยฝุ่น PM2.5 ต่ำกว่ากลุ่มพื้นที่ภายนอกอาคารบริเวณทางเข้า อย่างมีนัยสำคัญทาง

สถิติ ($p < .05$) ข้อเสนอแนะการปรับปรุงตามหลักการสุขาภิบาลอาคารหรือที่อยู่อาศัยให้ถูกสุขลักษณะ ด้วยวิธีการ ปิดประตู-หน้าต่าง ช่องว่าง หรือรอยรั่วต่าง ๆ ที่สามารถทำได้ง่าย มีค่าใช้จ่ายน้อย เหมาะกับอาคารบ้านเรือนที่อยู่อาศัยและอาคารสาธารณะเพื่อสุขลักษณะที่ดีปลอดภัยต่อผู้อยู่อาศัย

คำสำคัญ: ฝุ่น PM2.5 สุขลักษณะอาคาร อาคารหอจดหมายเหตุ อาคารอยู่อาศัย อาคารสาธารณะ

ABSTRACT

The purpose of this research was to analyze the concentration and compare the average of PM2.5 in the open system room, closed system room and outside the building at the National Archives building, Chanthaburi. It is a cross-sectional study research and purposive air sampling, including 3 groups, open air room, closed or air-condition room and outside the building at the entrance. Each group was sampling 3 points, each point measured 1 hour average for a total of 8 hours per point for a total of 72 samples, with the DUSTTRAK DRX Aerosol Monitor. The data were compared with the Indoor Air Quality Standards recommended by the Department of Health. The statistics used for data analysis were mean (Avg.), standard deviation (SD), F-test, Kruskal-Wallis test and Mann-Whitney U test. The results showed that the concentration of PM2.5 was in the range of 28 - 82 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ and averaged in the range of 28.4 - 73.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. The room that PM2.5 was higher than the standard are the Document Valuation and Assessment Room, Film Valuation and Assessment Room, Archives Office Room (Administration Room) and Document Center Room. The average of PM2.5 in open air room group was significantly higher than the closed room group ($p < .05$). The average of PM2.5 in open air room group was not significantly different from those outside the building ($p > .05$). The average of PM2.5 in closed room group was significantly lower than the outside the building ($p < .05$). Suggestions for improvement according to the sanitary principles to be hygienic by closing doors, windows, gaps or leaks. It is a simple and low-cost method of improving building hygiene, suitable for residential and public buildings for good hygiene and safety for residents.

Keywords: PM2.5, building hygiene, archived building, residential building, public building

บทนำ

ฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอน (PM2.5) หรือฝุ่นขนาดเล็ก หรือฝุ่น PM2.5 เป็นปัญหามลพิษทางอากาศสำคัญที่คุกคามสุขภาพของประชากรทั่วโลก รวมถึงการดำรงชีวิตประจำวันของคนในปัจจุบันอย่างมาก เช่น การทำงาน การออกกำลังกาย การใช้ชีวิตภายนอกอาคาร และการใช้ชีวิตในอาคารที่อยู่อาศัยโดยเฉพาะอาคารเปิดที่มีการถ่ายเทอากาศจากภายนอกทำให้ได้รับฝุ่นขนาดเล็กเข้าสู่ระบบในอาคาร เมื่อรับสัมผัสฝุ่นขนาดเล็กเข้าสู่ร่างกายผ่านระบบทางเดินหายใจ ขนาดอนุภาคที่เล็กมากสามารถเข้าถึงระบบทางเดินหายใจส่วนการแลกเปลี่ยนออกซิเจน ส่งผลกระทบต่อกระบวนการแลกเปลี่ยนก๊าซของร่างกาย (Gas Exchange Regions) ก่อให้เกิดโรคที่มีสาเหตุสัมพันธ์กับมลพิษทางอากาศ เช่น โรคหัวใจและหลอดเลือดหัวใจ โรคระบบทางเดินหายใจ และโรคมะเร็งปอด ที่เป็นสาเหตุหลัก

ของการเสียชีวิตก่อนวัยอันสมควร ในภูมิภาคเอเชียใต้และเอเชียตะวันออกเป็นที่ตั้งของเมืองใหญ่ที่มีประชากรรวมกันมากกว่า 150 ล้านคน การพัฒนาเมืองในภูมิภาคนี้ก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศในบรรยากาศทั่วไป เป็นสาเหตุให้มีผู้เสียชีวิตก่อนวัยอันควรเนื่องจากมลพิษทางอากาศ (World Health Organization, 2016)

จากข้อมูลสถานการณ์การเฝ้าระวังผลกระทบต่อสุขภาพ จากมลพิษอากาศฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอน ในเขตพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑล ระหว่างวันที่ 1 มกราคม – 20 พฤศจิกายน 2562 พบจำนวนผู้ป่วยที่รายงานเข้าสู่ระบบเฝ้าระวังในเดือนธันวาคมถึงเดือนมกราคม มีแนวโน้มสูงไปในทิศทางเดียวกับสถานการณ์ฝุ่นละอองที่เกินค่ามาตรฐานในช่วงเดือนพฤศจิกายนถึงเดือนกุมภาพันธ์ (Department of Disease Control, 2019) จากฐานข้อมูลเฝ้าระวังโรคที่เกี่ยวข้องกับมลพิษทางอากาศ (HDC) ของกระทรวงสาธารณสุข ได้แก่ กลุ่มโรคทางเดินหายใจ กลุ่มโรคหัวใจหลอดเลือดและสมองอุดตันขาดเลือด กลุ่มโรคตาอักเสบ กลุ่มโรคผิวหนังอักเสบ กลุ่มโรคอื่น ๆ และ long term effect เช่น โรคมะเร็งปอด มีจำนวนผู้ป่วยด้วยโรคที่เกี่ยวข้องกับมลพิษทางอากาศที่รายงานจากทุกเขตสุขภาพทั่วประเทศ ในปี พ.ศ. 2563 รวม 6,883,562 คน และในปี พ.ศ. 2564 ข้อมูล ณ วันที่ 3 เมษายน 2564 มีจำนวนผู้ป่วยแล้ว รวม 1,861,747 คน คิดเป็นร้อยละ 27.05 ของจำนวนผู้ป่วยปี พ.ศ. 2563 ทั้งปี ข้อมูลจำนวนผู้ป่วยด้วยโรคที่เกี่ยวข้องกับมลพิษทางอากาศ ที่มีการรายงานในปี พ.ศ. 2563 ทั้งปี พบว่ากลุ่มโรคที่มีรายงานผู้ป่วยมากที่สุด ได้แก่ กลุ่มโรคทางเดินหายใจ ร้อยละ 39.85 รองลงมาคือ กลุ่มโรคผิวหนังอักเสบ ร้อยละ 26.49 กลุ่มโรคตาอักเสบ ร้อยละ 18.16 กลุ่มโรคหัวใจหลอดเลือดและสมองอุดตันขาดเลือด ร้อยละ 13.72 กลุ่ม long term effect ร้อยละ 1.77 และกลุ่มโรคอื่น ๆ ร้อยละ 0.004 ตามลำดับ (Ministry of Public Health, 2021) การรับสัมผัสฝุ่นเข้าสู่ร่างกายขณะทำกิจกรรมกลางแจ้ง หรือในอาคารเปิดโล่ง ที่ได้รับผลกระทบจากฝุ่น PM2.5 การจัดการสุขลักษณะภายในที่พักอาศัยหรืออาคารสำนักงานและอาคารสาธารณะต่าง ๆ เป็นสิ่งจำเป็น โดย สุขลักษณะ หมายถึง ลักษณะที่ถูกต้องตามหลักปฏิบัติเพื่อความปลอดภัยจากโรคมัยไข้เจ็บ (Office of the Royal Society, 2011)

รายงานสถานการณ์ฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5) ในพื้นที่จังหวัดจันทบุรี จากจุดตรวจวัดค่า PM2.5 ณ สำนักงานทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมจังหวัดจันทบุรี อำเภอเมืองจันทบุรี ระหว่างวันที่ 20 ธันวาคม 2563 ถึงวันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2564 จำนวน 21 ข้อมูล มีค่าเฉลี่ย 24 ชั่วโมง อยู่ในช่วง 14 – 90 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ค่าเฉลี่ยฝุ่น PM2.5 อยู่ในระดับดีถึงดีมาก ร้อยละ 52.38 และอยู่ในระดับปานกลางถึงระดับเริ่มมีผลกระทบต่อสุขภาพ ร้อยละ 47.62 (Provincial Office of Natural Resources and Environment Chanthaburi, 2021) ข้อมูลจำนวนผู้ป่วยด้วยโรคที่เกี่ยวข้องกับมลพิษทางอากาศ ในเขตพื้นที่จังหวัดจันทบุรี ที่มีการรายงานในปี พ.ศ. 2563 ทั้งปี รวม 83,561 คน และในปี พ.ศ. 2564 ข้อมูล ณ วันที่ 24 มิถุนายน 2564 มีจำนวนผู้ป่วยแล้ว รวม 31,450 คน คิดเป็นร้อยละ 37.64 ของจำนวนผู้ป่วยปี พ.ศ. 2563 ทั้งปี (Ministry of Public Health, 2021)

หอจดหมายเหตุแห่งชาติ เป็นแหล่งรวบรวมข้อมูลและให้บริการสารนิเทศประเภทเอกสารจดหมายเหตุ มีที่มาจากหลายแหล่ง จากผลการศึกษาสภาวะแวดล้อมการทำงานที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพของผู้ปฏิบัติงานในสำนักหอจดหมายเหตุแห่งชาติและหอจดหมายเหตุแห่งชาติสาขา-ทัศนคติของนักจดหมายเหตุและนักวิชาการ ผลจากการตอบแบบสอบถามของกลุ่มตัวอย่างระบุว่ามีความกังวลต่อสุขภาพที่มาจากสารเคมีที่ใช้ในการเก็บรักษาเอกสารร้อยละ 26.00 จากเชื้อราในห้องทำงานร้อยละ 44.00 สภาวะแวดล้อมที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพของผู้ปฏิบัติงาน มีสาเหตุมาจาก (1) ระบบเครื่องปรับอากาศที่เป็นระบบปรับอากาศแบบรวม (2) ฝุ่นละออง เชื้อรา ไรฝุ่น และสารเคมีที่อยู่ในเอกสาร (3) อาคารสถานที่ที่มีการปฏิบัติงานและเอกสารอยู่รวมในห้องเดียวกัน ผู้ตอบแบบสอบถามคิดว่าตนเองมีสุขภาพไม่ดีร้อยละ 52.00 และมีโรคประจำตัวร้อยละ 60.00 (Sumontarikan et al., 2018) อาคาร

หอดูดาวแห่งชาติ จันทบุรี เป็นอาคารเก่ามีห้องปรับอากาศเป็นห้องปิด และห้องเปิดรับอากาศจากภายนอก ตัวอาคารตั้งอยู่ในเขตเมือง และใกล้ถนนเส้นทางหลักของเมือง อาจได้รับผลกระทบเพิ่มขึ้นจากปัญหาฝุ่น PM2.5 จากข้อมูลดังกล่าวผู้วิจัยจึงสนใจศึกษาผลกระทบของฝุ่น PM2.5 ต่อสุขภาพของอาคารหอดูดาวแห่งชาติ จันทบุรี

วิธีการ

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อวิเคราะห์หาค่าความเข้มข้นของฝุ่น PM2.5 ภายในอาคารหอดูดาวแห่งชาติ จันทบุรี ที่เป็นห้องระบบเปิด ห้องระบบปิด และค่าความเข้มข้นของฝุ่น PM2.5 ภายนอกอาคาร
2. เพื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยฝุ่น PM2.5 ภายในอาคารหอดูดาวแห่งชาติ จันทบุรี ที่เป็นห้องระบบเปิด ห้องระบบปิด และค่าเฉลี่ยฝุ่น PM2.5 ภายนอกอาคาร

วิธีดำเนินการวิจัย

1. รูปแบบการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยออกแบบการวิจัยเชิงสำรวจแบบภาคตัดขวาง ณ จุดเวลาใดเวลาหนึ่ง (cross-sectional study) โดยทำการสำรวจและเก็บตัวอย่างอากาศเพื่อวิเคราะห์หาค่าความเข้มข้นของฝุ่น PM2.5 ณ อาคารหอดูดาวแห่งชาติ จันทบุรี ในช่วงที่มีกิจกรรมตามปกติ โดยการเลือกตัวอย่างแบบเจาะจง (purposive sampling)

2. กลุ่มตัวอย่าง

การวิจัยครั้งนี้ ทำการเลือกเก็บตัวอย่างอากาศเพื่อวิเคราะห์หาค่าความเข้มข้นของฝุ่น PM2.5 ในอากาศแบบเจาะจง บริเวณอาคารหอดูดาวแห่งชาติ จันทบุรี ออกแบบกลุ่มตัวอย่างเป็น 3 กลุ่ม ตามลักษณะการเปิดรับอากาศจากภายนอกอาคาร ประกอบด้วย

- 1) ห้องภายในอาคารที่เป็นระบบเปิด และมีการทำงาน 3 ห้อง รวม 3 จุด ได้แก่ ห้องปฏิบัติงาน ตรวจสอบและประเมินคุณค่าเอกสาร ห้องปฏิบัติงานตรวจสอบและประเมินคุณค่าเอกสารประเภทฟิล์ม และห้องสำนักงานหอดูดาวแห่งชาติ (ห้องธุรการ)
- 2) ห้องภายในอาคารที่เป็นระบบปิด และมีการทำงาน 3 ห้อง รวม 3 จุด ได้แก่ ห้องศูนย์เอกสาร คลังเอกสาร/เอกสารอ้างอิง และห้องสำนักงานหอดูดาวแห่งชาติ (ห้องผู้บริหาร)
- 3) พื้นที่ภายนอกอาคารบริเวณทางเข้า รวม 3 จุด ได้แก่ ทางเข้าอาคารกลาง ทางเข้าด้านเหนือ และทางเข้าด้านใต้

แต่ละจุดออกแบบการเก็บตัวอย่างโดยตรวจวัดเป็นค่าเฉลี่ยรายชั่วโมง เป็นเวลา 8 ชั่วโมงต่อเนื่อง ต่อจุด รวมจำนวนตัวอย่างทั้งหมด 72 ตัวอย่าง

กำหนดตำแหน่งการเก็บตัวอย่างที่ความสูงจากพื้นระหว่าง 75 - 120 เซนติเมตร ดังภาพที่ 1 ติดตั้งเครื่องมือเก็บตัวอย่างในตำแหน่งที่อยู่บริเวณกึ่งกลางของห้อง หรือส่วนที่มีผู้ใช้อาคารหนาแน่น และอยู่ใกล้ระดับหายใจ (breathing zone) ของผู้ใช้อาคารมากที่สุด ไม่รบกวนการทำงาน กิจกรรม หรือทางเดิน และไม่อยู่ในทิศทางที่มีการระบายอากาศ เข้า - ออก (Bureau of Environmental Health, 2016)

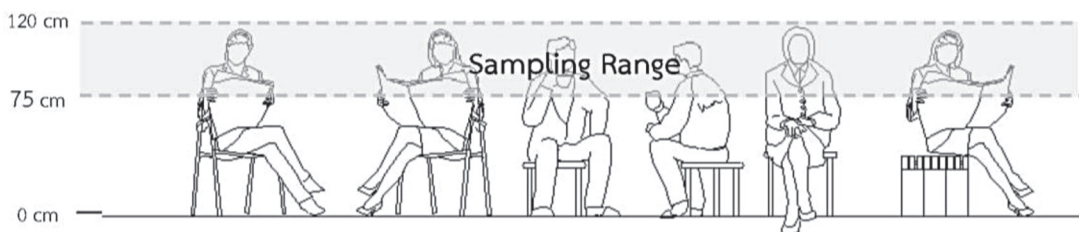
3. เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

ทำการตรวจวัดฝุ่น PM2.5 ตามจุดที่เลือกแบบเจาะจง แต่ละจุดตรวจวัดเป็นค่าเฉลี่ยรายชั่วโมง ด้วยเครื่อง DUSTTRAK DRX Aerosol Monitor ชนิดอ่านค่าโดยตรง (portable direct sampling) แสดงผล

การตรวจวัดพื้นที่ ณ จุดเก็บตัวอย่าง ด้วยหลักการตรวจวัดแบบ laser 90° light scattering (Bureau of Environmental Health, 2016; Royal Thai Government Gazette, 2019)

4. การวิเคราะห์ข้อมูลและสถิติที่ใช้ในการวิจัย

ข้อมูลความเข้มข้นของฝุ่น PM2.5 วิเคราะห์โดยสถิติเชิงพรรณนา (descriptive statistics) ได้แก่ ค่าเฉลี่ย (Avg.) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) จากการทดสอบการกระจายของข้อมูลด้วย F-test พบว่ามีการกระจายข้อมูลแบบไม่ปกติ ผู้วิจัยจึงใช้สถิติ Kruskal-Wallis test และ Mann-Whitney U test เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยฝุ่น PM2.5 จากกลุ่มห้องภายในอาคารที่เป็นระบบเปิด กลุ่มห้องภายในอาคารที่เป็นระบบปิด และกลุ่มพื้นที่ภายนอกอาคารบริเวณทางเข้า



ภาพที่ 1 ระดับความสูงการสุ่มเก็บตัวอย่าง (Bureau of Environmental Health, 2016)

ผลการทดลอง

ผู้วิจัยทำการวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของฝุ่น PM2.5 จากจุดเก็บตัวอย่างภายในอาคารหอจดหมายเหตุแห่งชาติ จันทบุรี มีผลดังนี้

1. ค่าความเข้มข้นของฝุ่น PM2.5 ภายในอาคารหอจดหมายเหตุแห่งชาติ จันทบุรี และค่าความเข้มข้นของฝุ่น PM2.5 ภายนอกอาคาร แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าความเข้มข้นของฝุ่น PM2.5 อาคารหอจดหมายเหตุแห่งชาติ จันทบุรี

กลุ่ม	N	ฝุ่น PM2.5 ค่าเฉลี่ยรายชั่วโมง (หน่วย: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)			
		min	max	Avg.	SD
1. ห้องภายในอาคารที่เป็นระบบเปิด					
1.1 ห้องปฏิบัติงานตรวจสอบและประเมิน คุณค่าเอกสาร	8	59	82	73.5	9.24
1.2 ห้องปฏิบัติงานตรวจสอบและประเมิน คุณค่าเอกสารประเภทฟิล์ม	8	38	59	44.6	7.01
1.3 ห้องสำนักงานหอจดหมายเหตุ (ห้องธุรการ)	8	39	52	44.5	4.17
2. ห้องภายในอาคารที่เป็นระบบปิด					
2.1 ห้องศูนย์เอกสาร	8	36	37	36.5	0.53
2.2 คลังเอกสาร/เอกสารอ้างอิง	8	31	34	32.9	0.99
2.3 ห้องสำนักงานหอจดหมายเหตุ (ห้องผู้บริหาร)	8	28	29	28.4	0.52
3. พื้นที่ภายนอกอาคารบริเวณทางเข้า					
3.1 ทางเข้าอาคารกลาง	8	44	56	49.1	5.00
3.2 ทางเข้าด้านเหนือ	8	44	54	48.6	3.54
3.3 ทางเข้าด้านใต้	8	47	57	50.9	3.98

หมายเหตุ : $\mu\text{g}/\text{m}^3$ หมายถึง ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

จากตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์หาค่าความเข้มข้นของฝุ่น PM2.5 อาคารหอจดหมายเหตุแห่งชาติ จันทบุรี บริเวณห้องภายในอาคารที่เป็นระบบเปิด รวม 3 จุด ห้องภายในอาคารที่เป็นระบบปิด รวม 3 จุด และพื้นที่ภายนอกอาคารบริเวณทางเข้า รวม 3 จุด แต่ละจุดตรวจวัดเป็นค่าเฉลี่ยรายชั่วโมง เป็นเวลา 8 ชั่วโมงต่อเนื่องต่อจุด รวมจำนวน 72 ตัวอย่าง พบว่าความเข้มข้นของฝุ่น PM2.5 มีค่าอยู่ในช่วง 28 - 82 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) และมีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 28.4 - 73.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ รายละเอียดผลการวิเคราะห์หาค่าความเข้มข้นของฝุ่นแบ่งตามกลุ่มพื้นที่ ดังนี้

1.1 กลุ่มห้องภายในอาคารที่เป็นระบบเปิด รวม 3 ห้อง ได้แก่ ห้องปฏิบัติงานตรวจสอบและประเมินคุณค่าเอกสารพบว่าฝุ่น PM2.5 มีค่าอยู่ในช่วง 59 - 82 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 73.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ห้องปฏิบัติงานตรวจสอบและประเมินคุณค่าเอกสารประเภทฟิล์มพบว่าฝุ่น PM2.5 มีค่าอยู่ในช่วง 38 - 59 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 44.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ และห้องสำนักงานหอจดหมายเหตุ (ห้องธุรการ) พบว่าฝุ่น PM2.5 มีค่าอยู่ในช่วง 39 - 52 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 44.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

1.2 กลุ่มห้องภายในอาคารที่เป็นระบบปิด รวม 3 ห้อง ได้แก่ ห้องศูนย์เอกสาร ฝุ่น PM_{2.5} มีค่าอยู่ในช่วง 36 - 37 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 36.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ห้องคลังเอกสาร/เอกสารอ้างอิงพบว่าฝุ่น PM_{2.5} มีค่าอยู่ในช่วง 31 - 34 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 32.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ และห้องสำนักงานหอจดหมายเหตุ (ห้องผู้บริหาร) พบว่าฝุ่น PM_{2.5} มีค่าอยู่ในช่วง 28 - 29 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 28.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

1.3 กลุ่มพื้นที่ภายนอกอาคารบริเวณทางเข้า รวม 3 จุด ได้แก่ ทางเข้าอาคารกลาง ฝุ่น PM_{2.5} มีค่าอยู่ในช่วง 44 - 56 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 49.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ทางเข้าอาคารด้านเหนือ ฝุ่น PM_{2.5} มีค่าอยู่ในช่วง 44 - 54 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 48.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ทางเข้าอาคารด้านใต้ ฝุ่น PM_{2.5} มีค่าอยู่ในช่วง 47 - 57 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 50.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

2. เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยฝุ่น PM_{2.5} ภายในอาคารหอจดหมายเหตุแห่งชาติ จันทบุรี และค่าเฉลี่ยฝุ่น PM_{2.5} ภายนอกอาคาร แสดงดังตารางที่ 2 และตารางที่ 3

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยฝุ่น PM_{2.5} อาคารหอจดหมายเหตุแห่งชาติ จันทบุรี โดยใช้สถิติ Kruskal-Wallis test

กลุ่ม	N	Avg.	SD	Mean rank	df	p-value
1. ห้องภายในอาคารที่เป็นระบบเปิด	24	54.21	15.51	47.98	2	.000
2. ห้องภายในอาคารที่เป็นระบบปิด	24	32.58	3.46	12.50		
3. พื้นที่ภายนอกอาคารบริเวณทางเข้า	24	49.54	4.15	49.02		

จากตารางที่ 2 ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยฝุ่น PM_{2.5} ระหว่างกลุ่มห้องภายในอาคารที่เป็นระบบเปิด กลุ่มห้องภายในอาคารที่เป็นระบบปิด และกลุ่มพื้นที่ภายนอกอาคารบริเวณทางเข้า จากการทดสอบโดย Kruskal-Wallis พบว่า กลุ่มห้องที่แตกต่างกัน มีค่าเฉลี่ยฝุ่น PM_{2.5} แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < .05$)

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยฝุ่น PM_{2.5} อาคารหอจดหมายเหตุแห่งชาติ จันทบุรี โดยใช้สถิติ Mann-Whitney U test

กลุ่ม	N	Avg.	SD	Mean rank	df	p-value
1. ห้องภายในอาคารที่เป็นระบบเปิด	24	54.21	15.51	36.50	-5.949	.000
2. ห้องภายในอาคารที่เป็นระบบปิด	24	32.58	3.46	12.50		
1. ห้องภายในอาคารที่เป็นระบบเปิด	24	54.21	15.51	23.98	-.258	.796
3. พื้นที่ภายนอกอาคารบริเวณทางเข้า	24	49.54	4.15	25.02		
2. ห้องภายในอาคารที่เป็นระบบปิด	24	32.58	3.46	12.50	-5.952	.000
3. พื้นที่ภายนอกอาคารบริเวณทางเข้า	24	49.54	4.15	36.50		

จากตารางที่ 3 เมื่อทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยฝุ่น PM_{2.5} รายคู่ด้วยวิธี Mann-Whitney U พบว่า กลุ่มห้องภายในอาคารที่เป็นระบบเปิด มีค่าเฉลี่ยฝุ่น PM_{2.5} สูงกว่ากลุ่มห้องภายในอาคารที่เป็นระบบปิด อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < .05$) และกลุ่มห้องภายในอาคารที่เป็นระบบปิดมีค่าเฉลี่ยฝุ่น PM_{2.5} ต่ำกว่ากลุ่มพื้นที่ภายนอกอาคารบริเวณทางเข้า อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < .05$) ในขณะที่กลุ่มห้องระบบเปิดและกลุ่มพื้นที่ภายนอกอาคารบริเวณทางเข้ามีค่าเฉลี่ยฝุ่น PM_{2.5} ไม่แตกต่างกัน ($p > .05$)

สรุปและวิจารณ์

ผลการวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของฝุ่น PM_{2.5} ภายในอาคารหอจดหมายเหตุแห่งชาติ จันทบุรี บริเวณห้องภายในอาคารที่เป็นระบบเปิด รวม 3 จุด ห้องภายในอาคารที่เป็นระบบปิด รวม 3 จุด และพื้นที่ภายนอกอาคารบริเวณทางเข้า รวม 3 จุด แต่ละจุดตรวจวัดเป็นค่าเฉลี่ยรายชั่วโมง เป็นเวลา 8 ชั่วโมงต่อเนื่องต่อดูจุด รวมจำนวน 72 ตัวอย่าง พบว่าค่าเฉลี่ยฝุ่น PM_{2.5} จากห้องปฏิบัติงานตรวจสอบและประเมินคุณค่าเอกสาร ห้องปฏิบัติงานตรวจสอบและประเมินคุณค่าเอกสารประเภทฟิล์ม ห้องสำนักงานหอจดหมายเหตุ (ห้องธุรการ) และห้องศูนย์เอกสาร มีค่าเฉลี่ยสูงเกินกว่าเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพอากาศภายในอาคารที่ยอมรับได้ไม่เกิน $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ เมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานที่เสนอแนะโดยกรมอนามัย (Bureau of Environmental Health, 2016) สำหรับห้องคลังเอกสาร/เอกสารอ้างอิง และห้องสำนักงานหอจดหมายเหตุ (ห้องผู้บริหาร) ที่เป็นห้องระบบปิดมีค่าเฉลี่ยของ PM_{2.5} อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่ยอมรับได้ ผลการตรวจวัดพื้นที่ภายนอกอาคารบริเวณทางเข้าด้านทิศใต้พบว่าฝุ่น PM_{2.5} มีค่าเฉลี่ยสูงเกินกว่าเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพอากาศภายในอาคารที่ยอมรับได้ และมีค่าสูงเกินกว่าเกณฑ์มาตรฐานฝุ่นละอองในบรรยากาศโดยทั่วไปที่กำหนดให้ไม่เกิน $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Royal Thai Government Gazette, 2010) ห้องที่พบมีค่าเฉลี่ยฝุ่น PM_{2.5} มากที่สุดคือห้องตรวจสอบและประเมินคุณค่าเอกสาร ลักษณะทางกายภาพของห้องมีการเปิดประตูหน้าต่าง รับอากาศจากภายนอก ประกอบกับหอจดหมายเหตุแห่งชาติ จันทบุรี ตั้งอยู่ใกล้กับถนนที่เป็นเส้นทางหลักของเมืองจันทบุรี มีการจราจรตลอดวัน ส่งผลให้ฝุ่นละอองขนาดเล็กจากภายนอกเข้าสู่อาคารได้เช่นกัน สอดคล้องกับผลการศึกษาค่าความเข้มข้นของอนุภาคและปริมาณจุลินทรีย์ในอากาศภายในอาคารและภายนอกอาคารของอาคารพิพิธภัณฑ์และหอสมุดในประเศกรีก ที่พบว่าในอาคารเปิดที่มีการระบายอากาศแบบธรรมชาติมีอนุภาคที่มาจากฝุ่นละอองในอากาศภายนอกอาคาร และแหล่งกำเนิดของฝุ่นส่วนใหญ่เกิดจากการจราจรและกิจกรรมในชุมชน (Mašková et al., 2015) และสอดคล้องกับผลการศึกษาแหล่งกำเนิดของฝุ่นละออง PM_{2.5} ในบริเวณภาคเหนือของประเทศไทย พบว่าอันดับหนึ่งเกิดจากการเผาในที่โล่ง และรองลงมาเกิดขึ้นจากไอเสียรถโดยเฉพาะดีเซล (Kanidta & Natphasuth, 2020) จากการศึกษาผลกระทบของฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 10 ไมครอน (PM₁₀) จากการคมนาคมบนท้องถนนที่มีต่อสุขภาพของเด็กนักเรียน กรณีศึกษาโรงเรียนพระปฐมวิทยาลัย อำเภอมือง จังหวัดนครปฐม พบว่าในฤดูหนาวเด็กนักเรียนโรงเรียนพระปฐมวิทยาลัยที่ตั้งอยู่ใกล้ถนนสายหลักมีอาการและอาการแสดงของโรคระบบทางเดินหายใจแตกต่างจากเด็กนักเรียนโรงเรียนสระกะเทียมวิทยาคมที่ตั้งอยู่ห่างไกลจากถนนสายหลักอย่างมีนัยสำคัญ ($p < .05$) โรงเรียนในกลุ่มศึกษาที่ตั้งอยู่ใกล้ถนนสายหลัก มีปริมาณ PM₁₀ มากกว่าโรงเรียนในกลุ่มเปรียบเทียบที่ตั้งอยู่ห่างไกลจากถนนสายหลัก ส่งผลต่อปริมาณการรับสัมผัส PM₁₀ ของนักเรียนในกลุ่มศึกษา มากกว่าโรงเรียนในกลุ่มเปรียบเทียบ (Worawut, 2017)

การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของฝุ่น PM2.5 ภายในอาคารหอจดหมายเหตุแห่งชาติ จันทบุรี กับค่าเฉลี่ยของฝุ่น PM2.5 ภายนอกอาคาร พบว่ากลุ่มห้องที่เป็นระบบเปิดมีค่าเฉลี่ยฝุ่น PM2.5 สูงกว่ากลุ่มห้องที่เป็นระบบปิดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 และกลุ่มห้องที่เป็นระบบปิดมีค่าเฉลี่ยฝุ่น PM2.5 ต่ำกว่ากลุ่มพื้นที่ภายนอกอาคารบริเวณทางเข้า อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 ในขณะที่กลุ่มห้องที่เป็นระบบเปิดและกลุ่มพื้นที่ภายนอกอาคารบริเวณทางเข้ามีค่าเฉลี่ยฝุ่น PM2.5 ไม่แตกต่างกัน ห้องที่มีการเปิดประตู-หน้าต่าง เปิดรับอากาศจากภายนอกจึงมีค่าเฉลี่ยของฝุ่นหรือมลพิษต่าง ๆ มากกว่าห้องที่ไม่เปิดประตู-หน้าต่าง สอดคล้องกับผลการศึกษากการสำรวจชนิดและปริมาณเชื้อราที่แขวนลอยในอากาศ อาคารวิจัย คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ผลการศึกษาการเปิดหน้าต่างและประตูมีผลต่อปริมาณเชื้อราแขวนลอยในอากาศ โดยห้องที่มีการเปิดหน้าต่างประตู มีค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของเชื้อรามากกว่าห้องที่ไม่เปิดหน้าต่างประตูอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ .05 (Katika et al., 2016)

ผลจากการศึกษา วิเคราะห์ และเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของฝุ่น PM2.5 ภายในอาคารหอจดหมายเหตุแห่งชาติ จันทบุรี บริเวณห้องภายในอาคารที่เป็นระบบเปิด ห้องภายในอาคารที่เป็นระบบปิด และพื้นที่ภายนอกอาคารบริเวณทางเข้า สรุปได้ว่าฝุ่น PM2.5 ในอากาศภายนอกอาคารมีผลกระทบต่อสุขภาพลักษณะของอาคารในห้องที่เป็นระบบเปิดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ข้อเสนอแนะการวิจัย

1. ข้อเสนอแนะในการนำผลการวิจัยไปใช้

จากผลการวิจัยที่พบว่าฝุ่นละอองขนาดเล็กจากภายนอกอาคารส่งผลต่อปริมาณความเข้มข้นของฝุ่นละอองขนาดเล็กภายในอาคารที่เป็นห้องเปิดรับอากาศจากภายนอก ดังนั้น การปรับปรุงอาคารสำนักงานหรือบ้านเรือนที่อยู่อาศัยที่ต้องใช้ทำกิจกรรมเป็นเวลานานทุกวันให้ถูกสุขลักษณะ ตามหลักการสุขาภิบาลอาคารหรือที่พักอาศัย โดยเสนอแนะให้ลดการปนเปื้อนของฝุ่นจากภายนอกเข้ามาในห้อง ด้วยวิธีการปิดประตู-หน้าต่าง ช่องว่างหรือรอยรั่วต่าง ๆ ของห้อง และเปิดเพื่อทำการระบายอากาศเป็นบางครั้งในช่วงที่ฝุ่นภายนอกมีค่าต่ำ เป็นวิธีการปรับปรุงที่สามารถทำได้ง่ายและมีค่าใช้จ่ายน้อยเหมาะกับอาคารบ้านเรือนที่อยู่อาศัยและอาคารสาธารณะ

2. ข้อเสนอแนะเพื่อการวิจัยครั้งต่อไป

จากผลการวิจัยในครั้งนี้ ผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะที่เป็นแนวทางในการวิจัยในครั้งต่อไป คือควรศึกษาฝุ่น PM2.5 และดัชนีชี้วัดคุณภาพอากาศอื่น ๆ ในอาคารหลากหลายประเภทที่มีการอยู่อาศัยหรืออาคารสาธารณะและอยู่ในพื้นที่เสี่ยงต่อการได้รับผลกระทบด้านคุณภาพอากาศ โดยศึกษาให้ครอบคลุมทุกฤดูกาล รวมถึงศึกษาเกี่ยวกับความรู้ ทัศนคติ ในการจัดการที่พักอาศัยให้ถูกสุขลักษณะ และการป้องกันตนเอง

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยในครั้งนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัย จากกองทุนวิจัย วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม (เลขที่สัญญา วทส. 608/2560) คณะผู้วิจัยขอขอบคุณหอจดหมายเหตุแห่งชาติ จันทบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์และอำนวยความสะดวกในการเข้าเก็บข้อมูล จนทำให้สามารถเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ผลได้เป็นผลงานวิจัยที่สมบูรณ์

เอกสารอ้างอิง

- Bureau of Environmental Health. (2016). **Indoor air quality assessment operation manual for staff**. Nonthaburi: Department of Health, Ministry of Public Health.
- Department of Disease Control. (2019). **Guidelines for surveillance of health impacts from particulate matter up to 2.5 microns (PM2.5)**. Retrieved from https://pher.moph.go.th/wordpress/wp-content/uploads/2019/11/วาระที่-2.2_แนวทางและสถานการณ์การเฝ้าระวังผ-1.pdf [2021, 1 Apr.]
- Kanidta, C., & Natphasuth, P. (2020). Emission source impact and problem solving and management on PM 2.5 in the northern part of Thailand. **Journal of the Association of Researchers**, 25(1), 461-474.
- Katika, S., Kannalinya, B., Sirsawarany, S., & Yuparat, K. (2016). **Exploration of airborne fungi in research building, Faculty of Science Ubon Ratchathani University**. Retrieved from <http://repository.rmutr.ac.th/bitstream/handle/123456789/273/50.Blnno2016-1005-86.pdf?sequence=1&isAllowed=y> [2018, 12 Nov.]
- Mašková, L., Smolík, J., & Vodicka, P. (2015). Characterisation of particulate matter in different types of archives. **Atmospheric Environment**, 107, 217-224.
- Ministry of Public Health. (2021). **Health data center (HDC)**. Retrieved from https://hdcservice.moph.go.th/hdc/reports/report.php?source=pformatted/format1.php&cat_id=9c647c1f31ac73f4396c2cf987e7448a&id=297c1cb035778f7b49357693e6867e6c [2021, 24 Jun.]
- Office of the Royal Society. (2011). **Dictionary of the Royal Institute of Thailand 2011**. Retrieved from <https://dictionary.orst.go.th> [2021, 1 Apr.]
- Provincial Office of Natural Resources and Environment Chanthaburi. (2021). **PM2.5 & hotspot NEWS**. Retrieved from <http://chanthaburi.mnre.go.th/th/news/more/140/page/1> [2021, 24 Jun.]
- Royal Thai Government Gazette. (2010). **National Environment Board Announcement No. 36 (2010) subject: Standards for particulate matter with a size of not more than 2.5 microns in the ambient air**. Retrieved from <http://www.ratchakitcha.soc.go.th/DATA/PDF/2553/E/037/61.PDF> [2021, 1 Apr.]
- Royal Thai Government Gazette. (2019). **Notification of the Pollution Control Department subject: Measuring instruments and methods for measuring the average value of gases or particulates in the ambient air, other systems or other methods approved by the Pollution Control Department**. Retrieved from http://www.ratchakitcha.soc.go.th/DATA/PDF/2562/E/259/T_0037.PDF [2021, 1 Apr.]
- Sumontarikan, M., Onanong, W., Benjamas, T., Chavinthorn, M., Wirakorn, T., Sitthiphan, C., & Sukon, K. (2018). Occupational health hazards in the national archive and its branches –archivists and scientists’ attitude. **Safety and Environment Review E-Journal**, 1(1), 28-33.

-

การจัดการน้ำทิ้งจากโรงงานน้ำมันปาล์มด้วยโอโซนบำบัดก่อนผลิตก๊าซชีวภาพ
EFFLUENT MANAGEMENT OF PALM OIL FACTORY WITH OZONE TREATMENT
BEFORE BIOGAS PRODUCTION

สายพิน ไซยันทน์ อินจิรา นิยมธู* วิมลศิริ พรทวิวัฒน์ นุชนภา สุกใส
และ สิทธิพันธ์ ไซยันทน์
คณะวิทยาศาสตร์สุขภาพ วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม กรุงเทพมหานคร 10600

Saipin Chaiyanan, Injira Niyomtoon*, Wimolsiri Porntaveewat, Noochnapa Sooksai
and Sitthipan Chaiyanan
Faculty of Health Sciences, Siam Technology Collage, Bangkok 10600

*E-mail: injiran@siamtechno.ac.th

Received: 2021-04-20

Revised: 2021-11-12

Accepted: 2021-11-12

บทคัดย่อ

น้ำทิ้งส่วนใหญ่จากโรงงานน้ำมันปาล์มใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพ แต่ปริมาณก๊าซที่ได้รับไม่สูงมากนักเนื่องจากมีกากตะกอนปาล์มในน้ำทิ้งอยู่ปริมาณสูง งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้โอโซนบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานน้ำมันปาล์มก่อนนำไปผลิตก๊าซชีวภาพ น้ำทิ้งที่ใช้ในการศึกษาเป็นน้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มซึ่งมีกากตะกอนปาล์มอยู่ 70-80% โอโซนจากเครื่องผลิตโอโซนที่ 1, 2, 3 และ 4 กรัม/ชั่วโมง ใช้ปรับสภาพกากตะกอนในน้ำทิ้งที่ระยะเวลา 0, 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 นาที พบว่าสภาวะที่เหมาะสม คือ ความเข้มข้นโอโซน 2 กรัม/ชั่วโมง นาน 30 นาทีที่สภาวะนี้สามารถเพิ่มค่า BOD จาก 49.98 ± 0.90 เป็น 69.60 ± 1.02 กรัม/ลิตร และน้ำตาลรีดิวซ์หรือน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว จาก 4.41 ± 0.09 เป็น 5.48 ± 0.03 กรัม/ลิตร ค่า TS ลดลงจาก 74.20 ± 1.96 เป็น 52.05 ± 0.10 และ COD ลดลงจาก 90.40 ± 0.80 เป็น 51.20 ± 0.07 กรัม/ลิตร การผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำทิ้งกากตะกอนที่ผ่านการปรับสภาพด้วยโอโซนให้ปริมาณก๊าซชีวภาพมากกว่าน้ำทิ้งกากตะกอนที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ก๊าซชีวภาพที่ได้จากน้ำทิ้งที่มีการปรับสภาพมีคุณภาพดีกว่าที่ไม่มีการปรับสภาพจากการที่มีก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพสูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

คำสำคัญ: น้ำทิ้งจากโรงงานน้ำมันปาล์ม กากตะกอนน้ำมันปาล์ม โอโซนปรับสภาพ ก๊าซชีวภาพ ก๊าซมีเทน

ABSTRACT

Most of the effluent from palm oil factories is used to produce biogas, but the amount of gas obtained has not been very high, since there is a high content of palm sludge in the wastewater.

At the end of fermentation, the resulting wastewater and sediment may be released into the water sources, causing environmental problems. This research aims to use ozone to treat palm oil wastewater before they are used to produce biogas. Wastewater used in this study was from a Palm oil extraction plant and had 70-80 per cent of decanter sludge. Ozone producing machine generates ozone at 1 g/h, 2 g/h, 3 g/h and 4 g/h was used for pre-treatment the decanter sludge for 0, 10, 20, 30, 40, 50, and 60 minutes. When pre-treatments of the waste with different ozone concentrations and exposure times, it was found that the optimal condition was ozone 2 g/h for 30 min. This could increase BOD from 49.98 ± 0.90 g/L to be 69.60 ± 1.02 g/L and Reducing sugar from 4.41 ± 0.09 g/L to be 5.48 ± 0.03 g/L. The TS was decreased from 74.20 ± 1.96 to 52.05 ± 0.10 and COD from 90.40 ± 0.80 g/L to be 51.20 ± 0.07 g/L. Biogas production from ozone pretreated wastewater gave significantly higher amount of biogas than from untreated wastewater ($p < 0.05$). The biogas from the pretreated waste had better quality than the untreated waste for having significantly more methane ($p < 0.05$).

Keywords: wastewater from palm oil factory, palm oil decanter sludge, ozone pre-treatment, biogas, methane gas

บทนำ

ปาล์มน้ำมันเป็นพืชเศรษฐกิจสำคัญอย่างหนึ่งของประเทศไทย เนื่องจากผลผลิตที่ได้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ทั้งด้านการอุปโภคและบริโภคจึงส่งผลให้การผลิตน้ำมันปาล์มเกิดขึ้นอย่างกว้างขวางทั่วประเทศ น้ำมันปาล์มนอกจากใช้ในการปรุงอาหารแล้ว น้ำมันปาล์มดิบยังมีประโยชน์ด้านพลังงานอีกด้วย คือ ถูกนำมาผลิตเป็นไบโอดีเซลได้ แต่เนื่องจากกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มก่อให้เกิดของเสียจำนวนมาก มีการประมาณการว่า ในการผลิตน้ำมันปาล์มจะเกิดน้ำทิ้งจากกระบวนการผลิต 0.65 ตันต่อปาล์มสดหนึ่งตัน เนื่องจากของเสียดังกล่าวมีความสกปรกสูงและมีกลิ่นเหม็นรบกวนชาวบ้านบริเวณโรงงาน ช่วงฤดูฝนหากฝนตกหนัก น้ำเสียจะเอ่อล้นออกจากบ่อเก็บของโรงงาน ไหลลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติสร้างความเดือดร้อนต่อชาวบ้านเพิ่มขึ้นอีก ดังนั้นแต่ละโรงงานจึงต้องหาวิธีจัดการน้ำเสียที่ไม่ส่งผลกระทบต่อชุมชนและสิ่งแวดล้อม การนำน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มมาผลิตเป็นก๊าซชีวภาพเป็นทางเลือกหนึ่งที่สามารถช่วยแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้เป็นอย่างดี น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มมีปริมาณมากในแต่ละวัน จึงมีความเหมาะสมในการนำมาผลิตพลังงานทดแทนในรูปแบบของก๊าซชีวภาพ โดยก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้จะถูกนำไปใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าไว้ในโรงงานหรือเพื่อขายให้แก่การไฟฟ้าเพื่อเป็นรายได้ให้แก่โรงงานอีกทางหนึ่ง น้ำเสียวันละ 12,000 ลบ.ม. จากการผลิตน้ำมันปาล์มสามารถนำไปผลิตเป็นกระแสไฟฟ้าขนาด 2 MWh ได้ (ERDI-CMU, 2021)

น้ำเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตจะมีลักษณะสีน้ำตาลเข้มมีปริมาณของตะกอนซึ่งเป็นกากตะกอนของปาล์มปนอยู่ปริมาณสูง อาจถึง 70-80% จากการที่ตะกอนปาล์มส่วนใหญ่เป็นกากใยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และ ลิกนิน ซึ่งมีลักษณะเป็นของแข็งที่ย่อยสลายทางชีวภาพได้ยากส่งผลให้ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพค่อนข้างต่ำ แต่ถ้าได้มีการบำบัดเบื้องต้น (pretreatment) ให้กากตะกอนเหล่านี้เปลี่ยนโครงสร้างให้ย่อยสลายได้ง่ายขึ้นเพื่อให้จุลินทรีย์ที่มีบทบาทสำคัญในการผลิตก๊าซชีวภาพสามารถใช้ส่วนที่ย่อยสลายนี้ได้ด้วยจะเป็นการเพิ่มปริมาณก๊าซชีวภาพจากน้ำทิ้งได้

การปรับสภาพกากตะกอนน้ำทิ้งมีด้วยกันหลายวิธี ทั้งชีวภาพ เคมีและกายภาพ โดยงานวิจัยนี้เลือกใช้ก๊าซโอโซนในการปรับสภาพกากตะกอนปาล์ม โดยก๊าซโอโซนจะผลิตอนุมูลออกซิเจนอิสระซึ่งมีประสิทธิภาพเป็นสารออกซิไดซ์ที่รุนแรง(Strong Oxidant) ได้แก่ Hydroxyl radical ($^{\circ}\text{OH}$), HO_3 , HO_4 และ Super oxide (O_2) (Wisessombat, 2014) สามารถเปลี่ยนโครงสร้างของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินที่เป็นสารโมเลกุลใหญ่ มีโครงสร้างที่ซับซ้อนให้เป็นสารโมเลกุลขนาดเล็ก มีโครงสร้างที่ง่ายในการย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ ได้แก่ น้ำตาลกลูโคส ไซโลส เป็นต้น (Gupta et al., 2015) ซึ่งน้ำตาลรีดิวซ์หรือน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวเหล่านี้จะเป็นแหล่งพลังงานให้กับจุลินทรีย์ใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพต่อไป

ดังนั้น งานวิจัยจึงทำการศึกษาภาวะและวิธีการที่เหมาะสมสำหรับการปรับสภาพน้ำเสียกากตะกอนปาล์มด้วยก๊าซโอโซนเพื่อเพิ่มปริมาณของก๊าซชีวภาพที่ได้จากน้ำทิ้งและได้ก๊าซชีวภาพที่คุณภาพดีขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียที่ต้องกำจัดก่อนปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม

วิธีการ

1. วัตถุดิบ

กากตะกอนปาล์มที่ทำการศึกษามาจากน้ำเสียเข้มข้นของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม บริษัท สุขสมบูรณ์ น้ำมันพืช จำกัด ซึ่งมีกากตะกอนปาล์มอยู่ 70-80% มีความเข้มข้นของแข็งทั้งหมด (Total Solid) 74,200 กรัม/ลิตร ก่อนเข้าสู่ระบบถังหมักไร้อากาศเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ ซึ่งเป็นน้ำเสียที่เกิดขึ้นจริงในกระบวนการ เจือจางให้มีความเข้มข้น 10% เพื่อให้เหมาะกับการทดลองแบบ batch experiment และเครื่องวัดก๊าซ OxiTop ® Control OC 110 ที่ใช้ในการทดลองติดตามการหมักก๊าซชีวภาพ

2. รูปแบบการวิจัย

งานศึกษาวิจัยนี้เป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ (laboratory scale) โดยออกแบบการทดลองเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกออกแบบการทดลองเป็น 4x7 factorial complete randomized design ข้างขึ้น เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสม ได้แก่ ความเข้มข้นของโอโซน และระยะเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพน้ำทิ้งกากตะกอนปาล์ม เพื่อนำไปใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพในขั้นตอนผลิตก๊าซชีวภาพต่อไป ประกอบด้วยความเข้มข้นของโอโซน 4 ระดับคือ 1, 2, 3, และ 4 กรัม/ชั่วโมง และช่วงเวลาที่ใช้โอโซนในการปรับสภาพมี 7 ระดับ คือ 0, 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 นาที สำหรับตัวอย่างในแต่ละ treatment ทำการวิเคราะห์ตัวแปรตาม คือ pH, Reducing sugar, Biochemical Oxygen Demand (BOD), Total Solid (TS), Chemical Oxygen Demand (COD) แต่ละ Treatment ทำ 3 ข้างขึ้น โดยวิธีการวิเคราะห์ตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงวิธีวิเคราะห์และเอกสารอ้างอิง

Parameters	Analysis Method	Reference
pH	pH Meter	APHA, AWWA and WEF (2017)
Reducing Sugar	Dinitrosalicylic Colorimetric Method	Miller (1959)
Total Solid (TS)	Dried at 103 - 105 °C	APHA, AWWA and WEF (2017)
Chemical Oxygen Demand (COD)	Closed Reflux, Colorimetric Method	APHA, AWWA and WEF (2017)
Biological Oxygen Demand (BOD)	Azide Modification	APHA, AWWA and WEF (2017)
Total Kjeldahl Nitrogen (TN)	Macro Kjeldahl Method	APHA, AWWA and WEF (1998)

ส่วนที่สองเป็นการออกแบบการทดลองหมักก๊าซชีวภาพ ระหว่างน้ำทิ้งจากตะกอนปาล์มที่ผ่านการปรับสภาพด้วยโอโซนในสภาวะที่คัดเลือก กับชุดควบคุมจากน้ำทิ้งจากตะกอนที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำทิ้งจากตะกอนปาล์ม เป็นการหมักก๊าซชีวภาพแบบไร้อากาศโดยทดสอบใน OxiTop® Control OC 110 Respirometer ขนาดขวดแก้วทดลอง 500 มิลลิลิตร โดยนำน้ำทิ้งจากตะกอนที่ผ่านการปรับสภาพด้วยโอโซน และไม่ผ่านการปรับสภาพปริมาตร 225 มิลลิลิตร ใส่หัวเชื้อในขวดแก้วทดลองชุดละ 25 มิลลิลิตร โดยออกแบบการทดลองเป็นแบบ CRD ทำ 3 ซ้ำ ตัวแปรตามหรือดัชนีคือ ปริมาณก๊าซชีวภาพ และของคูลภาพก๊าซชีวภาพ (สัดส่วนของมีเทนต่อคาร์บอนไดออกไซด์)

3. สถิติที่ใช้ในการวิจัย

สถิติที่ใช้ในการวิจัยคือ descriptive statistics วิเคราะห์ค่า means, standard deviation และ standard error ในการหาความเข้มข้นและช่วงระยะเวลาเหมาะสมในการใช้โอโซนปรับสภาพ วิเคราะห์โดย Analysis of Variance (ANOVA) และการเปรียบเทียบค่า means ใช้วิธี Bonferroni

ในการเปรียบเทียบการหมักก๊าซชีวภาพ วิเคราะห์เปรียบเทียบค่า means ของ 2 treatments (ระหว่างชุดตัวอย่างและชุดควบคุม) โดยใช้ t-test

ผลการทดลองและวิจารณ์

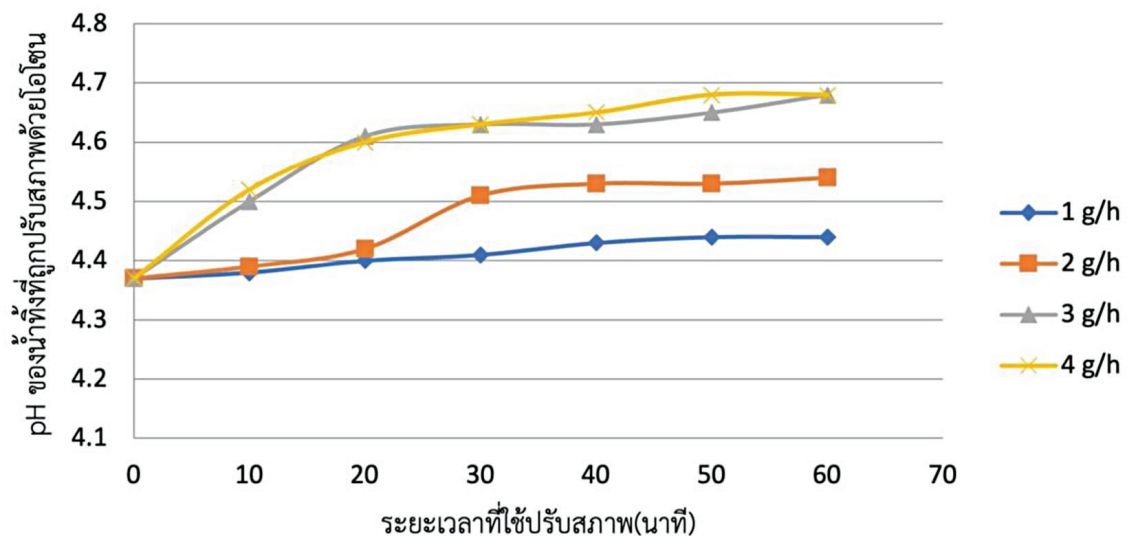
1. ผลการศึกษาการปรับสภาพน้ำทิ้งจากตะกอนด้วยก๊าซโอโซน

1.1 การเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอช (pH) ของน้ำทิ้งจากตะกอน

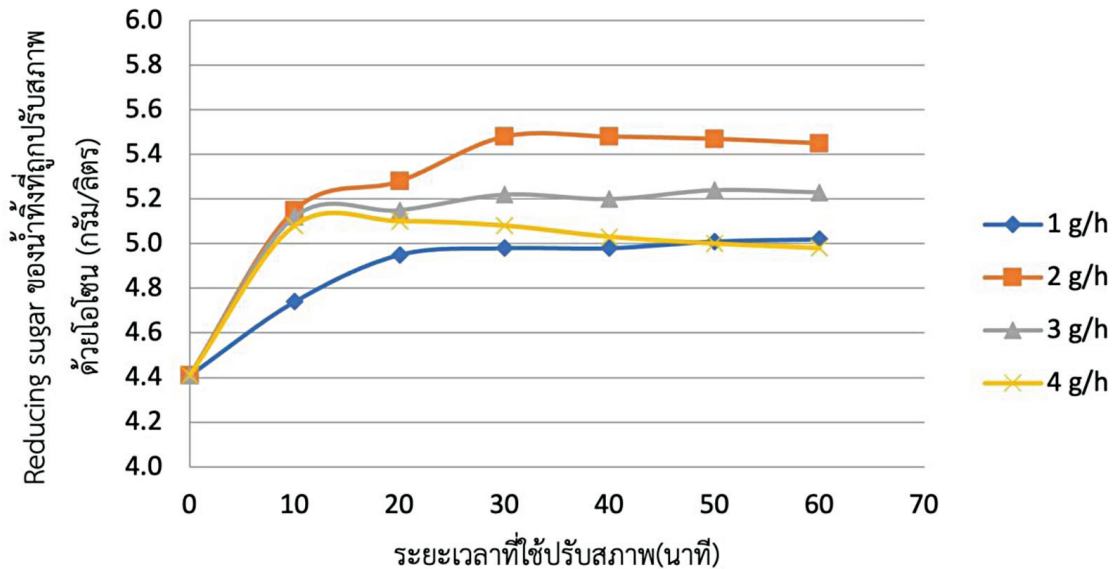
ความเข้มข้นของโอโซนและระยะเวลาที่น้ำทิ้งจากตะกอนสัมผัสโอโซนมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และมีปฏิสัมพันธ์ระหว่างอิทธิพลของทั้ง 2 ปัจจัย ($p < 0.05$) จากภาพที่ 1 ค่าพีเอชของน้ำทิ้งจากตะกอนตั้งต้นเริ่มที่ค่าเฉลี่ย 4.37 ± 0.03 และมีค่าสูงขึ้นเมื่อถูกออกซิไดซ์ด้วยโอโซนที่ความเข้มข้นของโอโซนสูงขึ้นและสัมผัสนานขึ้น แต่การเพิ่มขึ้นของ pH สูงสุดที่ 4.68 เมื่อใช้ความเข้มข้นของโอโซนที่ 4 กรัมต่อชั่วโมงนาน 60 นาที ค่าพีเอชเท่ากับ 4.68 ± 0.02 เพราะโอโซน สามารถแตกตัวให้ออกซิเจนอิสระและไฮดรอกซีแรดิคัล (Hydroxyl radical $^{\cdot}\text{OH}$) เพิ่มความเป็นด่างในน้ำทิ้งจึงทำให้มีค่าพีเอชที่เพิ่มขึ้น

1.2 การเปลี่ยนแปลงของน้ำตาลรีดิวซ์หรือน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว (Reducing sugar) ของน้ำทิ้งจากตะกอน

ความเข้มข้นของโอโซนและระยะเวลาที่น้ำทิ้งกากตะกอนสัมผัสโอโซนมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าน้ำตาลรีดิวซ์หรือน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และมีปฏิสัมพันธ์ระหว่างอิทธิพลของทั้ง 2 ปัจจัย ($p < 0.05$) จากภาพที่ 2 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในน้ำทิ้งกากตะกอนก่อนสัมผัสโอโซนมีค่าเฉลี่ย 4.41 ± 0.09 กรัม/ลิตร และเมื่อน้ำทิ้งกากตะกอนสัมผัสโอโซนทั้ง 4 ความเข้มข้นที่เวลา 0 – 60 นาที พบว่าปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาสัมผัส โดยสูงสุดที่ระยะเวลา 30 นาที ต่อจากนั้นระดับของน้ำตาลรีดิวซ์จะค่อนข้างคงที่ โดยปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในน้ำทิ้งกากตะกอนสูงสุดที่ 5.48 ± 0.03 กรัม/ลิตร จากการใช้อัตราความเข้มข้น 2 กรัม/ชั่วโมง นาน 30 นาที จะเห็นว่าปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์จะค่อนข้างคงที่หรือค่อย ๆ ลดลงเป็นลำดับเมื่อใช้เวลานาน 30 นาที และจากกราฟที่ 2 พบว่าเมื่อใช้ระยะเวลาสัมผัสมากกว่า 30 นาที ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์จะค่อย ๆ ลดลงเมื่อให้โอโซนสัมผัสกากตะกอนนานต่อไป โดยเฉพาะความเข้มข้นของโอโซนที่ 3 และ 4 กรัม/ชั่วโมง จะมีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ลดลงมากกว่าความเข้มข้นของโอโซน 2 กรัม/ชั่วโมง อาจเนื่องมาจากการมีปริมาณความเข้มข้นของโอโซนที่มากเกินไปจนทำให้ออกซิไดซ์น้ำตาลรีดิวซ์หรือน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวลงไปด้วย และเนื่องจากโอโซนเป็นสารที่ไม่เสถียร สามารถแตกตัวได้แรดดิคัลอิสระ (free radical) ซึ่งมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ต่าง ๆ นอกจากนั้นโอโซนสลายตัวกลับเป็นก๊าซออกซิเจนได้ง่าย โอโซนมีครึ่งชีวิต (half-life) 12 ชั่วโมง ในบรรยากาศ และเพียง 20-30 นาที หากละลายอยู่ในน้ำ (Lin & Yeh, 1993)



ภาพที่ 1 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอช (pH) ในน้ำทิ้งกากตะกอนที่ถูกปรับสภาพด้วยโอโซนที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ และระยะเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพ



ภาพที่ 2 แสดงการเปลี่ยนแปลงของน้ำตาลรีดิวซ์ในน้ำทิ้งกากตะกอนที่ถูกปรับสภาพด้วยโอโซนที่ความเข้มข้นต่าง ๆ และระยะเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพ

1.3 การเปลี่ยนแปลงของ Biochemical Oxygen Demand (BOD) ของน้ำทิ้งกากตะกอน

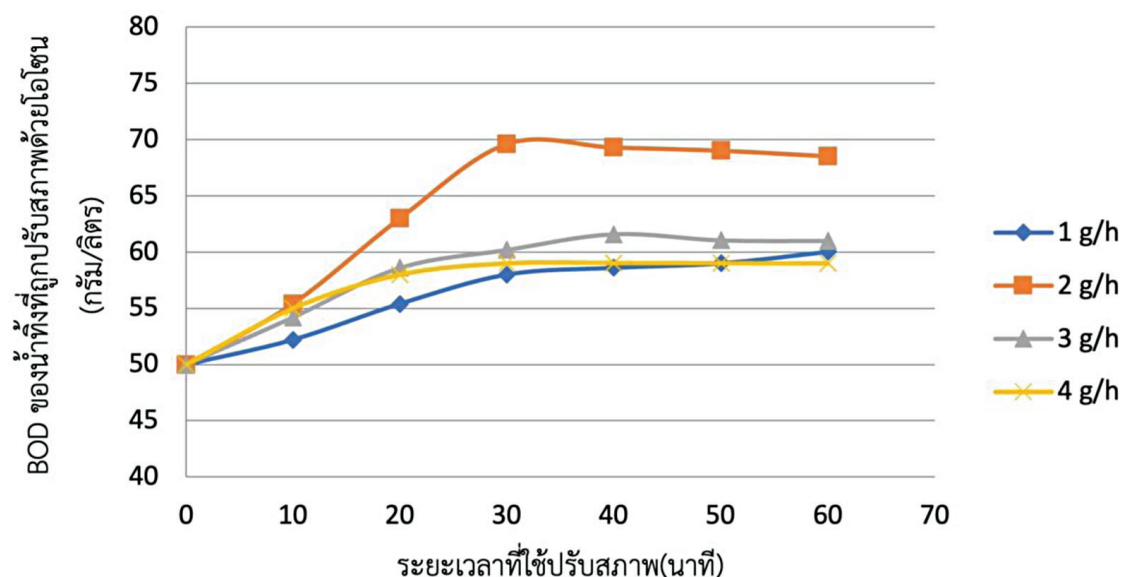
ความเข้มข้น และระยะเวลาที่น้ำทิ้งกากตะกอนสัมผัสโอโซน มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่า BOD ($p < 0.05$) รวมทั้งมีนัยสำคัญของปฏิสัมพันธ์ของทั้ง 2 ปัจจัย จากภาพที่ 3 ค่า BOD ของน้ำทิ้งกากตะกอนก่อนเติมโอโซนมีค่าเฉลี่ยที่ 49.98 ± 1.89 กรัม/ลิตร และเมื่อเติมโอโซนที่ความเข้มข้นต่างกันพบว่า การเติมโอโซนเพิ่มค่า BOD ได้ในอัตราที่สูงใน 30 นาทีแรก โดยเฉพาะที่ความเข้มข้นโอโซน 2 กรัม/ชั่วโมง มีค่า BOD เพิ่มขึ้นสูงสุดที่ 30 นาทีที่ค่าเฉลี่ย 69.60 ± 1.16 กรัม/ลิตร ต่อจากนั้นทุกความเข้มข้นของโอโซนมีค่า BOD ค่อนข้างคงที่

1.4 การเปลี่ยนแปลงของตะกอนของแข็ง (TS) ของน้ำทิ้งกากตะกอน

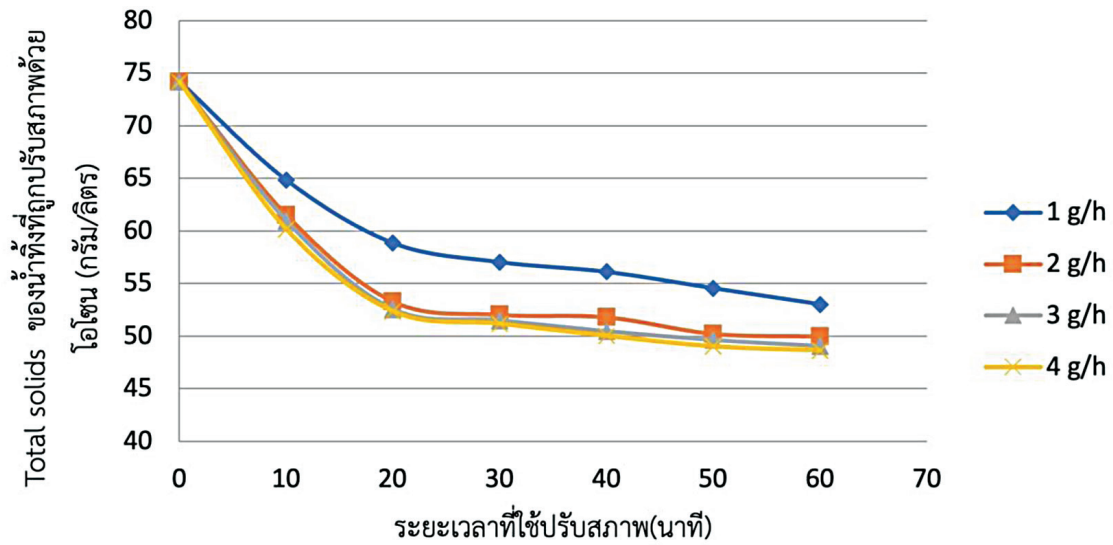
ความเข้มข้นของโอโซนและระยะเวลาที่น้ำทิ้งกากตะกอนสัมผัสโอโซนมีผลต่อการลดลงของค่า TS ($p < 0.05$) โดยไม่มีนัยสำคัญทางสถิติของความสัมพันธ์ทั้งสองปัจจัย ($p > 0.05$) จากภาพที่ 4 ค่า Total Solids ของน้ำทิ้งกากตะกอนตั้งต้นที่ค่าเฉลี่ย 74.20 ± 1.98 กรัม/ลิตร และทุกความเข้มข้นของโอโซน TS ลดลงเมื่อเติมโอโซนนานขึ้น การสัมผัสโอโซนทำให้ TS ลดลงอย่างมากในช่วง 30 นาทีแรก ในทุก ๆ ความเข้มข้นของโอโซน ต่อจากนั้นการลดลงจะน้อยลงจนเกือบไม่เปลี่ยนแปลง ความเข้มข้นของโอโซนที่ 2, 3, 4 กรัม/ชั่วโมง ทำให้ TS เหลือที่ 60 นาทีไม่แตกต่างกันมาก

1.5 การเปลี่ยนแปลงของ Chemical Oxygen Demand (COD) ของน้ำทิ้งกากตะกอน

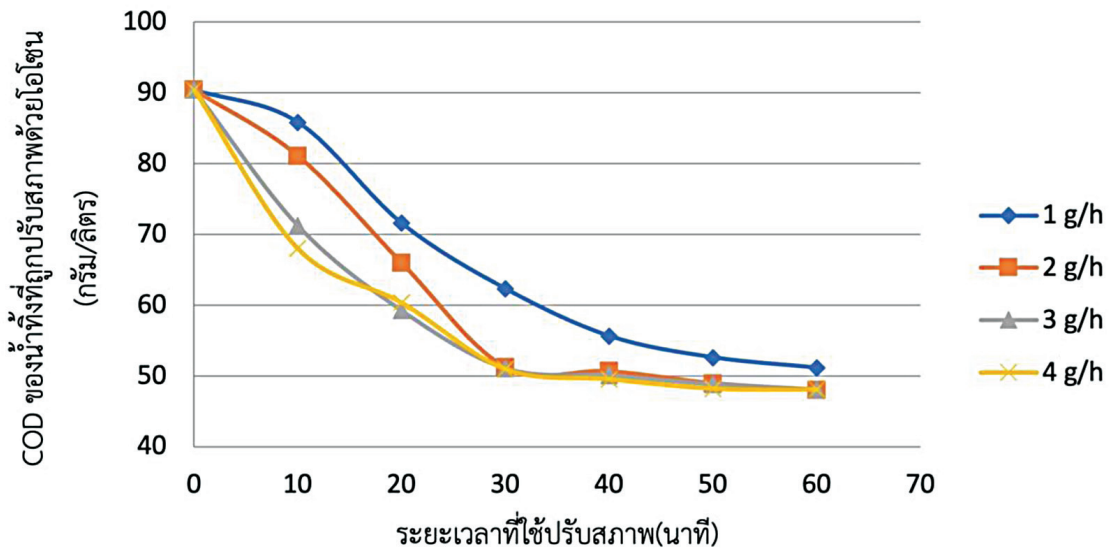
ระยะเวลาที่น้ำทิ้งกากตะกอนสัมผัสโอโซนและความเข้มข้นของโอโซนที่ใช้มีผลต่อการลดลงของค่า COD ($p < 0.05$) รวมทั้งมีปฏิสัมพันธ์ระหว่าง 2 ปัจจัย อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ค่า COD ก่อนเติมโอโซนมีค่าเฉลี่ยที่ 90.40 ± 0.80 กรัม/ลิตร จากภาพที่ 5 จะเห็นว่าที่ความเข้มข้นของโอโซน 2, 3, และ 4 กรัม/ชั่วโมง ค่า COD ลดลงอย่างมากใน 30 นาทีแรก จนเหลือ 50.64 ± 1.21 กรัม/ลิตร โดยต่อจากนั้นไม่แตกต่างกันมาก การเติมโอโซนในน้ำทิ้งกากตะกอนจะทำให้ตะกอนปาล์มส่วนใหญ่เป็นกากใยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ย่อยสลายลงได้ ดังนั้นสภาวะที่ลดค่า COD ที่เหมาะสมคือการใช้โอโซนที่ 2 กรัม/ชั่วโมง นาน 30 นาที



ภาพที่ 3 แสดงการเปลี่ยนแปลงของ BOD ของน้ำทิ้งกากตะกอนที่ถูกปรับสภาพด้วยโอโซนที่ความเข้มข้นต่าง ๆ และระยะเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพ



ภาพที่ 4 แสดงการเปลี่ยนแปลงของ Total Solids ของน้ำทิ้งจากตะกอนที่ถูกปรับสภาพด้วยโอโซนที่ความเข้มข้นต่าง ๆ และระยะเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพ



ภาพที่ 5 แสดงการเปลี่ยนแปลงของ COD ของน้ำทิ้งจากตะกอนที่ถูกปรับสภาพด้วยโอโซนที่ความเข้มข้นต่าง ๆ และระยะเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพ

2. สถานะที่เหมาะสมที่จะปรับสภาพน้ำทิ้งจากตะกอนด้วยโอโซน

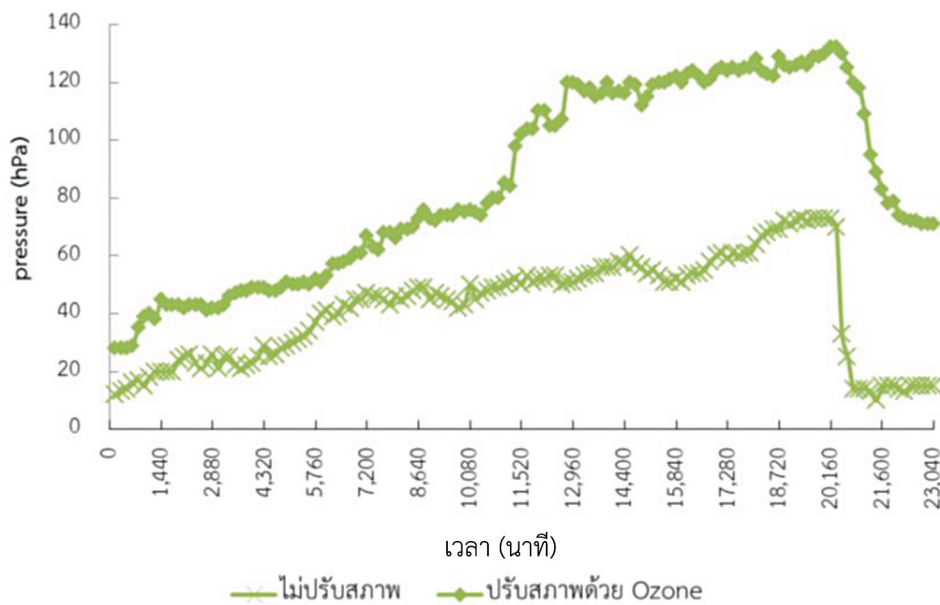
การใช้โอโซนที่อัตราการผลิตที่ 1, 2, 3 และ 4 กรัม/ชั่วโมง ในการปรับสภาพน้ำทิ้งจากตะกอนที่เวลา 0, 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 นาที พบว่าการเพิ่มขึ้นของน้ำตาลรีดิวซ์หรือน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว และ BOD จะเกิดขึ้นได้ดีที่สุดเมื่อใช้โอโซนที่ความเข้มข้น 2 กรัม/ชั่วโมง ในช่วง 30 นาทีแรก ของการให้น้ำทิ้งสัมผัสโอโซน ภาพที่ 2 และ ภาพที่ 3 และเพื่อลดค่าตะกอนในน้ำทิ้ง (TS) และลดค่า COD จะเห็นว่าการลดลงของทั้ง TS และ COD เกิดขึ้นได้ดี ในช่วง 30 นาทีแรกของการออกซิไดซ์น้ำทิ้งด้วยโอโซน และเมื่อใช้เวลามากกว่า 30 นาที ขึ้นไป พบว่าอัตราคงที่ หรือค่อย ๆ ลดลง ดังแสดงในภาพที่ 4 และภาพที่ 5 จึงสรุปได้ว่าการปรับสภาพน้ำทิ้งจากตะกอนด้วยโอโซนก่อนนำน้ำทิ้งจากตะกอนไปใช้ในการหมักภายใต้สภาพไร้อากาศเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ ควรจะใช้ความเข้มข้นของโอโซนที่ 2 กรัม/ชั่วโมง ระยะเวลา 30 นาที สามารถเพิ่มค่าน้ำตาลรีดิวซ์หรือน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวและ BOD ได้ถึง 24.54 และ 39.3% ตามลำดับ และสามารถลดค่า TS และ COD ได้ถึง 29.85 และ 43.36% ตามลำดับ ซึ่งทำให้เหมาะที่จะนำไปหมักก๊าซชีวภาพมากกว่าน้ำทิ้งที่ไม่ได้มีการปรับสภาพ

3. การผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำทิ้งจากตะกอนปาล์มที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยโอโซน

งานวิจัยนี้ได้ใช้น้ำทิ้งเข้มข้นของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่มีความเข้มข้นของแข็งทั้งหมด 74.20 ± 1.98 กรัม/ลิตร ปรับให้มีความเข้มข้นของน้ำทิ้ง 10% แล้วนำมาปรับสภาพด้วยก๊าซโอโซนที่ความเข้มข้น 2 กรัม/ชั่วโมง เป็นระยะเวลานาน 30 นาที แล้วนำมาหมักก๊าซชีวภาพเปรียบเทียบกับน้ำทิ้งที่ไม่ได้ผ่านการเติมโอโซน โดยทำ 3 ซ้ำ ทดลองใน OxiTop® Control OC 110 Respirometer ผลการทดลองพบว่าความดันก๊าซที่เกิดขึ้นตลอดช่วงระยะเวลาการหมักก๊าซชีวภาพมีความดันเพิ่มขึ้นต่อเนื่องจนครบ 14 วัน ของการหมักทั้งสองชุด แต่ชุดที่มีการปรับสภาพด้วยโอโซนมีความดันก๊าซมากกว่าชุดควบคุม และเมื่อทำการกำจัดก๊าซออกจากส่วนของของเหลวของขวดหมักด้วย Hydrochloric Acid และกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในส่วนของช่องว่างอากาศด้วย Potassium Hydroxide พบว่าน้ำทิ้งทั้งสองชุดทดลอง มีความดันก๊าซลดลงและมีค่าคงที่ต่อจากนั้น



ภาพที่ 6 การศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำทิ้งจากตะกอนทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยโอโซนทดลองใน OxiTop® Control OC 110 Respirometer



ภาพที่ 7 ความดันก๊าซที่ได้จากการหมักน้ำทิ้งกากตะกอนปาล์ม

ตารางที่ 2 แสดงปริมาณก๊าซชีวภาพ คาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน ที่เกิดขึ้นการหมักในสภาพไร้อากาศของน้ำทิ้งกากตะกอนที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ และน้ำทิ้งกากตะกอนที่ผ่านการปรับสภาพด้วยโอโซน

ก๊าซ	ชุดทดสอบน้ำทิ้ง		p-value*
	กากตะกอนที่ไม่ปรับสภาพ	กากตะกอนที่ผ่านการปรับสภาพ	
Total carbon ($\text{CH}_4 + \text{CO}_2$: m mol)	2.137±0.10	3.844±0.13	p< 0.05
CO_2 (m mol)	1.717±0.17	1.483±0.045	p< 0.05
CH_4 (m mol)	0.420±0.17	2.361±0.07	p< 0.05
% CO_2 in Biogas	80.35	38.59	-
% CH_4 in Biogas	19.65	61.41	-
CO_2 : CH_4	80 : 20	39 : 61	

*แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติด้วย t-test

การเปลี่ยนแปลงของความดัน (hPa) ในขวดหมักของทั้งสองชุดทดสอบ (ผ่านและไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยโอโซน) แสดงในภาพที่ 7 เห็นได้ว่าความดันของก๊าซที่เกิดขึ้นในระหว่างการหมักน้ำทิ้งกากตะกอนปาล์มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาจนถึงวันที่ 14 ซึ่งเป็นการสิ้นสุดการหมัก ชุดทดสอบที่หมักโดยใช้น้ำทิ้งกากตะกอนที่ผ่านการปรับสภาพด้วยโอโซนมีความดันที่สูงกว่าชุดทดสอบที่ใช้ น้ำทิ้งที่ไม่ผ่านการปรับสภาพอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) วิเคราะห์ผลโดยใช้ t-test แสดงตารางที่ 2 และเมื่อคำนวณปริมาณก๊าซชีวภาพ ก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นเป็นมิลลิโมล (m mol) หรือกรัม/ลิตร เปรียบเทียบระหว่างน้ำทิ้งกากตะกอนที่ผ่านการปรับสภาพด้วยโอโซนกับชุดทดสอบที่ใช้ น้ำทิ้งที่ไม่ผ่านการปรับสภาพพบว่า ปริมาณก๊าซชีวภาพของชุดที่ไม่ผ่านการปรับสภาพที่เกิดขึ้นทั้งหมด 2.137 ± 0.10 กรัม/ลิตร เทียบกับปริมาณก๊าซชีวภาพของชุดผ่านการปรับสภาพด้วยโอโซนที่เกิดขึ้นทั้งหมด 3.844 ± 0.13 กรัม/ลิตร ซึ่งเพิ่มขึ้นถึง 79.9% คงเนื่องจากการปรับสภาพด้วยโอโซนจะทำให้ทำให้โครงสร้างของสารอินทรีย์ประกอบด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินในน้ำทิ้งกากตะกอนที่เป็นสารโมเลกุลใหญ่มีโครงสร้างที่ซับซ้อน เปลี่ยนไปให้เหมาะกับการย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ด้วยกระบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ทำให้ได้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์หรือน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวและค่าบีโอดีในน้ำทิ้งเพิ่มขึ้น ซึ่งน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวที่ได้จะเป็นสารอาหารที่เหมาะสมสำหรับการผลิตก๊าซมีเทนโดยจุลินทรีย์ในขั้นต่อไป ขณะเดียวกันโอโซนจะออกซิไดส์สารอินทรีย์เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินในกากตะกอนน้ำทิ้ง ลดค่าของแข็งในน้ำทิ้ง (TS) และลดค่าความต้องการออกซิเจนเพื่อใช้ในการกำจัดสารเคมีในน้ำทิ้ง (COD) ก๊าซชีวภาพที่ได้จากน้ำทิ้งกากตะกอนที่ผ่านการปรับสภาพเป็นก๊าซชีวภาพที่มีคุณภาพดีกว่า โดยจะเห็นว่าปริมาณก๊าซมีเทนซึ่งเป็นก๊าซสำคัญในการติดไฟในก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) จาก 0.420 ± 0.17 กรัม/ลิตร เป็น 2.361 ± 0.07 กรัม/ลิตร เพิ่มขึ้นถึง 5.6 เท่า และเมื่อเทียบสัดส่วนของมีเทนกับคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซชีวภาพพบว่า ก๊าซชีวภาพที่ได้จากชุดทดสอบที่ผ่านการปรับสภาพด้วยโอโซนมีสัดส่วนของ $\text{CO}_2 : \text{CH}_4$ เท่ากับ 39 : 61 คุณภาพการติดไฟดีกว่าชุดทดสอบที่ไม่ผ่านการปรับสภาพซึ่งมี $\text{CO}_2 : \text{CH}_4$ เท่ากับ 80 : 20 ซึ่งโดยทั่วไปองค์ประกอบหลักของก๊าซชีวภาพจะได้แก่ ก๊าซมีเทน (CH_4) ประมาณ 60-70 % ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ประมาณ 28-38 % และก๊าซอื่น ๆ ประมาณ 2 % เช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ไนโตรเจน (N_2) และไอน้ำ เป็นต้น เนื่องจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นก๊าซที่คงตัวและไม่ติดไฟ ดังนั้น คุณสมบัติของก๊าซชีวภาพที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ จึงขึ้นอยู่กับปริมาณของก๊าซมีเทน (Chulapedia, 2011)

สรุป

ผลการวิจัยการใช้โอโซนในการปรับสภาพน้ำทิ้งกากตะกอนน้ำมันปาล์มเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ เป็นวิธีการที่เหมาะสมและได้ผลดี จากการที่คุณสมบัติของก๊าซโอโซนไม่ก่อให้เกิดปัญหาการตกค้างของสารเคมี และเตรียมได้ง่าย สามารถเตรียมได้จากอากาศ ผลการศึกษาวิจัยสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพกากตะกอนปาล์มโดยใช้ก๊าซโอโซนในครั้งนี้ พบว่าโอโซนที่ความเข้มข้น 2 กรัม/ชั่วโมง ในระยะเวลา 30 นาที เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพน้ำทิ้งกากตะกอนปาล์ม ซึ่งช่วยทำให้กากตะกอนปาล์มที่มีองค์ประกอบของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินที่เป็นสารโมเลกุลใหญ่มีโครงสร้างที่ซับซ้อนอยู่ในสภาวะที่พร้อมต่อการย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ และเมื่อนำน้ำทิ้งที่ผ่านการปรับสภาพไปหมักเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ จะได้ก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้นกว่าการใช้น้ำทิ้งที่ไม่ปรับสภาพถึง 79.9% และผลผลิตก๊าซชีวภาพที่ได้มีคุณภาพดีมีปริมาณก๊าซมีเทนที่สูงขึ้นถึง 5.6 เท่า

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัย จากกองทุนวิจัย วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม เลขที่สัญญา วทส.609/2560

APHA, AWWA., & WEF. (1998). **Standard methods for the examination of water and wastewater.** (20th). Washington: APHA.

APHA, AWWA., & WEF. (2017). **Standard methods for the examination of water and wastewater.** (23rd). Washington: APHA.

Chulapedia. (2011). **Biogas**. Retrieved from <http://www.chulapedia.chula.ac.th/index.php?title=%E0%B8%81%E0%B9%8A%E0%B8%B2%E0%B8%8B%E0%B8%8A%E0%B8%B5%E0%B8%A7%E0%B8%A0%E0%B8%B2%E0%B8%9E> [2011, 27 Mar.]

ERDI-CMU. (2021). **Palm oil waste to generate electricity to reduce global warming**. Retrieved from <https://erdi.cmu.ac.th/?p=1606> [2021, 1 Nov.]

Gupta, S., Sharma, A., Chadra, T.S., Malik, S., Waindeskar, V., & Mudliar, S. (2015). Effect of ozone pretreatment on biodegradability enhancement and biogas generation potential from biomethanated distillery effluent. **Ozone: Science & Engineering: The Journal of the International Ozone Association**, 37(5), 411-419.

Lin, S.H., & Yeh, K.L. (1993). Looking to treat wastewater by ozone. **Chemical Engineering**, 100(5), 112-116.

Miller, G.L. (1959). Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar. Retrieved from <https://doi.org/10.1021/ac60147a030> [2011, 27 Mar.]

Wisessombat, S. (2014). **Ozone**. Retrieved from https://medtech.psu.ac.th/Files_Article/20140721xU9evoENlycr.pdf [2020, 17 Jul.]

[illegible]

การปรับตัวของเกษตรกรผู้ปลูกมะยงชิดจังหวัดนครนายกต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

THE ADAPTATION OF THE YELLOW MARIAN PLUM GROWERS IN NAKHON NAYOK TO CLIMATE CHANGE

ศศิมา ฟักคง^{1*} จักรพงษ์ หรั่งเจริญ¹ ยุทธพล สาเอี่ยม¹ และ นราศักดิ์ บุญมี²

¹สาขาวิชาเทคโนโลยีการเกษตร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย

²สาขาวิชาเกษตรศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย

Sasima Fakhong^{1*}, Chakrapong Rangjaroen¹, Yuthapol Saeiam¹ and Narasak Boonme²

¹Department of Agricultural Technology, Faculty of Science and Technology,

Phranakhon Rajabhat University, Bangkok, Thailand

²Department of Agriculture, Faculty of Science and Technology, Phranakhon Rajabhat University,

Bangkok, Thailand

*E-mail: sasima.f@pnru.ac.th

Received: 2021-04-30

Revised: 2021-07-27

Accepted: 2021-08-03

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการปรับตัวและวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการปรับตัวของเกษตรกรผู้ปลูกมะยงชิดจังหวัดนครนายกต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ โดยใช้แบบสอบถามเป็นเครื่องมือในการเก็บรวบรวมข้อมูล จากเกษตรกรผู้ปลูกมะยงชิด จำนวน 240 ราย วิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้สถิติเชิงพรรณนาและการวิเคราะห์ความถดถอยโลจิสติกแบบทวิ ผลการวิจัย พบว่า เกษตรกรผู้ปลูกมะยงชิดจังหวัดนครนายก มีลักษณะการปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ แบ่งเป็น 3 ด้าน ได้แก่ ด้านเศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อม ปัจจัยที่มีผลต่อการปรับตัวของเกษตรกรผู้ปลูกมะยงชิดจังหวัดนครนายกต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ จากการวิเคราะห์ความถดถอยโลจิสติกแบบทวิ ได้แก่ อายุ ผลผลิตมะยงชิด และการเข้ารับการอบรมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05 จึงได้จัดทำข้อเสนอแนะเพื่อหาแนวทางการปรับตัวและการวางแผนการผลิตให้สอดคล้องกับสภาพภูมิอากาศที่เปลี่ยนแปลงไป

คำสำคัญ: การปรับตัว เกษตรกรผู้ปลูกมะยงชิดจังหวัดนครนายก การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ มะยงชิด

ABSTRACT

The purpose of this research were to study adaptation and analyze factors affecting adaptation of the yellow marian plum growers in Nakhon Nayok to climate change. Questionnaires

were applied with 240 growers. The descriptive statistics and binary logistic regression were used for data analysis. The results found that the adaptation of growers within 3 issues: economic, social and environment. The results of binary logistic regression analysis revealed that age, yield and training level at 0.05 of significance. Based on recommendations were provided for relevant agencies to find adaptation guideline and plan production according to changing climate change.

Keywords: adaptation, yellow marian plum grower, climate change, yellow marian plum

บทนำ

สภาพภูมิอากาศ เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญต่อการทำเกษตรกรรมและมีความสัมพันธ์กับผลผลิตทางการเกษตร โดยประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม ที่มีพื้นที่ทางการเกษตรเป็นส่วนใหญ่ มีจำนวนครัวเรือนเกษตรกรที่ขึ้นทะเบียนเกษตรกรในปี พ.ศ. 2562 ประมาณ 7,554,562 ครัวเรือน (National Statistical Office, 2020) จึงนับได้ว่าเกษตรกรรมเป็นอาชีพหลักของประเทศไทย ในปัจจุบันสภาพภูมิอากาศได้มีการเปลี่ยนแปลงไปจากอดีต และทวีความรุนแรงมากขึ้น ส่งผลกระทบโดยตรงต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์ โดย Kurukulasuriya & Mendelsohn (2003) คาดว่าการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศนั้นจะส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อผลผลิตทางการเกษตรอีกด้วย ซึ่งการที่อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นหรือรูปแบบการกระจายตัวของฝนในช่วงฤดูฝนเปลี่ยนแปลงในอนาคตจะส่งผลกระทบโดยตรงต่อผลผลิตทางการเกษตร ทั้งนี้ Chinverno (2011) รายงานว่า อุณหภูมิของประเทศไทยและประเทศใกล้เคียงมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเฉลี่ยประมาณ 2-3 องศาเซลเซียส และจะมีฝนมากขึ้นร้อยละ 25 โดยในบางพื้นที่มีฝนมากขึ้นถึงร้อยละ 50 โดยลักษณะผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศต่อภาคการเกษตรของประเทศไทยที่สำคัญ คือ ปัญหาปริมาณผลผลิตทางการเกษตรลดลง (Poapongsakorn et al., 2015) การที่ผลผลิตลดลงนั้น ส่งผลทำให้รายได้ของเกษตรกรลดลงด้วยเช่นกัน จากการศึกษาของ Bobojonov & Aw-Hassan (2014) กล่าวว่า รายได้ของเกษตรกรที่ลดลงนั้นอาจจะส่งผลกระทบในระยะยาวได้

จังหวัดนครนายกตั้งอยู่ทางทิศตะวันออกของประเทศไทยมีความหลากหลายของผลผลิตทางการเกษตร ทั้งการทำนา ประมง รวมทั้งสวนผลไม้ โดยมีมะยงชิดเป็นผลไม้ขึ้นชื่อของจังหวัดมีความแตกต่างกับมะยงชิดจังหวัดอื่น มีลักษณะเด่น คือ ผลใหญ่ รูปไข่ มีสีเหลืองเนื้อแน่น กรอบ มีกลิ่นหอม รสชาติหวานอมเปรี้ยว มีค่าความหวาน 18–22 บีคซ์ มีพื้นที่ปลูก 13,842 ไร่ พื้นที่เก็บ 12,357 ไร่ ปริมาณผลผลิต 412 ตัน/ปี โดยปี 2561 มีเกษตรกรผู้ปลูกมะยงชิดในอำเภอเมืองนครนายก จังหวัดนครนายก จำนวน 572 ราย (Office for Agriculture and Cooperatives Nakhon Nayok, 2020) แต่จากการที่สภาพภูมิอากาศแปรปรวน ทำให้เกิดปัญหาในการบังคับให้ออกผลผลิตของมะยงชิดยากขึ้น ช่วงเวลาแทงช่อดอกแล้วฝนตกหนัก ทำให้ดอกร่วง ไม่ติดลูก หรือติดลูกแล้วฝนตกหนัก ลมแรง ทำให้เกิดความเสียหาย ผลผลิตมะยงชิดในจังหวัดนครนายกไม่เพียงพอต่อความต้องการของตลาด (Mueang Nakhon Nayok District Agricultural Extension Office, 2019)

เกษตรกรผู้ปลูกมะยงชิดของจังหวัดนครนายกจึงมีโอกาที่จะได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ทั้งผลกระทบที่เกิดจากภัยธรรมชาติและรายได้ที่ไม่แน่นอนจากการประกอบอาชีพได้ เกษตรกรจึงควรมีความเข้าใจและมีการปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ จากปัญหาที่กล่าวมาข้างต้น จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าสภาพอากาศเกิดการเปลี่ยนแปลงและส่งผลกระทบต่อเกษตรกรผู้ปลูกมะยงชิดจังหวัดนครนายก ดังนั้นการวิจัยนี้

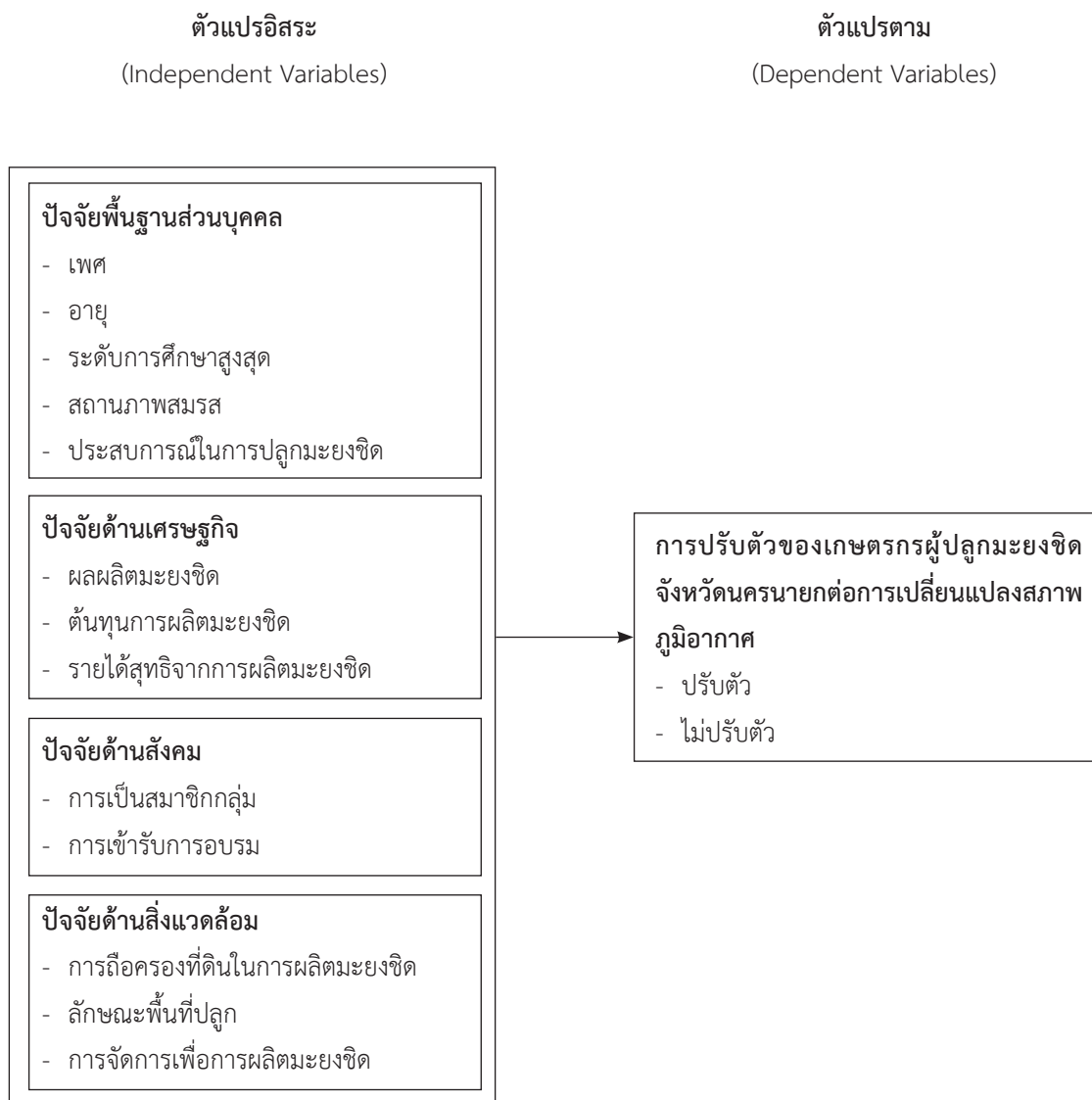
มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการปรับตัวของเกษตรกรและวิเคราะห้ปัจจัยที่มีผลต่อการปรับตัวของเกษตรกรผู้ปลูกมะยงชิด จังหวัดนครนายกต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ซึ่งผู้วิจัยเห็นถึงความสำคัญในการศึกษาลักษณะการปรับตัวของเกษตรกรผู้ปลูกมะยงชิดของนครนายกต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่เหมาะสม เพื่อให้เป็นแนวทางสำหรับหน่วยงานภาครัฐที่เกี่ยวข้องในการส่งเสริมให้เกษตรกรผู้ปลูกมะยงชิดมีการปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศอย่างยั่งยืน

วิธีการ

ประชากรที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ คือ เกษตรกรผู้ปลูกมะยงชิดในอำเภอเมืองนครนายก จังหวัดนครนายก ปี 2561 จำนวน 572 ราย โดยกลุ่มตัวอย่างได้ใช้วิธีการสุ่มตัวอย่างโดยไม่ใช้ความน่าจะเป็นแบบมีจุดมุ่งหมาย (Purposive sampling) เฉพาะครัวเรือนเกษตรกรผู้ปลูกมะยงชิดในอำเภอเมืองนครนายก จังหวัดนครนายก ปี 2561 จำนวน 240 ราย โดยใช้สูตรของ Yamane (1973) จากแบบสอบถามที่มีลักษณะเป็นคำถามปลายเปิดและคำถามปลายปิด ที่มีการทดสอบความเชื่อมั่น (Reliability) ด้วยวิธีสัมประสิทธิ์แอลฟา (Coefficient: α) ของครอนบาค (Cronbach) จากเกษตรกรผู้ปลูกมะยงชิดซึ่งไม่ใช่กลุ่มตัวอย่าง จำนวน 30 ราย ได้ค่าสัมประสิทธิ์ความเชื่อมั่นของแบบสอบถาม เท่ากับ 0.794 และการทดสอบความเที่ยงตรง (Validity) เป็นดัชนีความสอดคล้องระหว่างข้อคำถามและวัตถุประสงค์ (IOC: index of item object congruence) ตามวิธีการของ Rovinelli & Hambleton (1977) เท่ากับ 0.740 ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลในช่วงเดือนพฤษภาคมถึงเดือนมิถุนายน 2563 ทำการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้สถิติเชิงพรรณนา (Descriptive statistics) และการวิเคราะห์ความถดถอยโลจิสติกแบบทวิ (Binary logistic regression model) จากการประยุกต์แนวคิดของ Griffiths et al. (2008) และ Greene (2012) จากสมการ

$$E(Y/X) = \beta_0 + \beta_{1x}$$

โดยที่ Y_i คือ 1 เมื่อเกษตรกรมีการปรับตัว และ 0 เมื่อเกษตรกรไม่มีการปรับตัว โดยการวิเคราะห์การถดถอยแบบโลจิสติกสองทางเลือกจะเป็นการเปรียบเทียบโอกาสของการปรับตัว ($Y_i = 1$) กับโอกาสของการไม่ปรับตัว ($Y_i = 0$) ซึ่งเป็นกลุ่มอ้างอิง โดยที่ตัวแปรอธิบาย (X_1) ประกอบด้วยตัวแปร 3 กลุ่ม ตามแนวคิดของ Demeke et al. (2011) คือ ตัวแปรด้านปัจจัยส่วนบุคคลของเกษตรกร ซึ่งเป็นตัวแปรต้นทุนทางมนุษย์ (human capital) ตัวแปรด้านเศรษฐกิจสังคม ซึ่งเป็นตัวแปรต้นทุนทางสังคม การเงิน และกายภาพ (social/financial/physical capital) และตัวแปรด้านสิ่งแวดล้อม ซึ่งเป็นตัวแปรต้นทุนทางธรรมชาติ (natural capital) β_i คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความชันของสมการ จากการทบทวนแนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ผู้วิจัยได้กำหนดกรอบแนวคิดในการวิจัย ดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 กรอบแนวคิดของการวิจัย

ผลการทดลองและวิจารณ์

1. ข้อมูลด้านเศรษฐกิจ - สังคมของเกษตรกรผู้ปลูกมะยงชิดจังหวัดนครนายก

1.1 ปัจจัยพื้นฐานส่วนบุคคล

เกษตรกรผู้ปลูกมะยงชิดส่วนใหญ่เป็นเพศหญิง (ร้อยละ 55.80) มีอายุเฉลี่ย 58.96 ปี ระดับการศึกษาสูงสุดอยู่ในระดับประถมศึกษามากที่สุด (ร้อยละ 40.00) มีสถานภาพสมรส (ร้อยละ 78.40) และมีประสบการณ์ในการปลูกมะยงชิดเฉลี่ย 15.28 ปี ซึ่งสอดคล้องกับ Nakklay et al. (2019) ที่เกษตรกรผู้ปลูกมะยงชิดในจังหวัดนครนายกเป็นผู้สูงอายุ (Singthong, 2008) ทั้งนี้จบการศึกษาในชั้นประถมศึกษาหรือต่ำกว่า

และมีประสบการณ์ในการปลูกมะยงชิดมากกว่า 10 ปี

1.2 ด้านเศรษฐกิจ - สังคม

เกษตรกรผู้ปลูกมะยงชิดส่วนใหญ่ใช้เงินทุนส่วนตัวในการลงทุน โดยมีต้นทุนรวมในการผลิตต่อไร่ต่อปีเฉลี่ย 11,246.51 บาท มีผลผลิตมะยงชิดเฉลี่ย 39.59 กิโลกรัมต่อต้น หรือ 1,050.76 กิโลกรัมต่อไร่ และมีรายได้สุทธิจากการผลิตมะยงชิดเฉลี่ย 54,811.40 บาท/ไร่ ซึ่งแตกต่างกับ Nakklay et al. (2019) ที่ใช้ต้นทุนในการปลูกมะยงชิดเฉลี่ย 1,508.78 บาทต่อไร่ จำนวนผลผลิตจากการปลูกมะยงชิด 25.27 กิโลกรัมต่อไร่ ส่งผลให้มีรายได้จากการจำหน่ายเฉลี่ยเพียง 4,138.87 บาทต่อไร่ เกษตรกรเป็นสมาชิกกลุ่มเกษตรกรแปลงใหญ่มากที่สุด (ร้อยละ 36.30) เข้ารับการอบรมเกี่ยวกับการผลิตมะยงชิดเฉลี่ย 4.63 ครั้งต่อปี และไม่ได้รับสวัสดิการทางการเกษตรจากหน่วยงานภาครัฐ (ร้อยละ 71.25)

1.3 ด้านสิ่งแวดล้อม

เกษตรกรผู้ปลูกมะยงชิดส่วนใหญ่ลักษณะพื้นที่ปลูกมะยงชิดส่วนใหญ่ปลูกแบบสวนไม่ยกร่อง (พื้นราบหรือที่ดอน) (ร้อยละ 90.00) นิยมปลูกมะยงชิดพันธุ์ทูลเกล้า (ร้อยละ 93.33) ที่เป็นสายพันธุ์ดีที่มีชื่อเสียงและนิยมปลูกกันมากในจังหวัดนครนายก เกษตรกรถือครองที่ดินในการปลูกมะยงชิดเฉลี่ย 6.39 ไร่ และเป็นที่ดินของตนเอง (ร้อยละ 88.75) ใช้แหล่งน้ำจากธรรมชาติ (ร้อยละ 40.40) มีการจัดการดิน ปุ๋ย ธาตุอาหาร และสารเคมี การป้องกันและกำจัดศัตรูพืช และน้ำ เนื่องจากมะยงชิดเป็นผลไม้ขึ้นชื่อของจังหวัด ที่ได้รับการขึ้นทะเบียนเป็นสินค้าสิ่งบ่งชี้ทางภูมิศาสตร์ (GI) จึงต้องมีการดูแลตั้งแต่กระบวนการเตรียมพันธุ์ เพื่อให้ได้ผลผลิตมะยงชิดที่ดีมีคุณภาพ

2. ลักษณะการปรับตัวของเกษตรกรผู้ปลูกมะยงชิดจังหวัดนครนายกต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

ในภาพรวมเกษตรกรผู้ปลูกมะยงชิดมีการปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ โดยมีลักษณะของการปรับตัวของเกษตรกร แบ่งได้เป็น 3 ด้าน ได้แก่ ด้านเศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อม ดังนี้

2.1 ด้านเศรษฐกิจ

เกษตรกรมีการปรับตัวด้านเศรษฐกิจ คือ เน้นคุณภาพของมะยงชิดมากกว่าปริมาณ (ร้อยละ 80.42) การหารายได้เสริมเพิ่มเติม (ร้อยละ 66.67) มีการศึกษาความต้องการของตลาด (ร้อยละ 60.42)

2.2 ด้านสังคม

เกษตรกรมีการปรับตัวด้านสังคม คือ การเข้าร่วมเป็นสมาชิกกลุ่มและสถาบันเกษตรกร (ร้อยละ 91.25) เข้าร่วมอบรมเพื่อเพิ่มพูนความรู้ (ร้อยละ 85.83) ประยุกต์ใช้ภูมิปัญญา (ร้อยละ 74.58) การประชาสัมพันธ์ให้ข้อมูลเกี่ยวกับการเป็นสิ่งบ่งชี้ทางภูมิศาสตร์ (GI) (ร้อยละ 66.25) สนับสนุนจากภาครัฐ (ร้อยละ 58.75) การยอมรับเทคโนโลยีใหม่ของเกษตรกร (ร้อยละ 57.08) และประสานงานข้อมูลเพิ่มเติมจากหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง (ร้อยละ 55.83)

2.3 ด้านสิ่งแวดล้อม

เกษตรกรมีการปรับตัวด้านสิ่งแวดล้อม คือ การตัดแต่งกิ่งให้เหมาะสม (ร้อยละ 87.50) หาข้อมูลการแจ้งเตือนเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (ร้อยละ 81.67) เปลี่ยนรูปแบบการผลิตแบบเดิมเป็นการปฏิบัติทางการเกษตรที่ดี (GAP) (ร้อยละ 78.33) การตรวจวิเคราะห์ดิน/ธาตุอาหาร/ความชื้น (ร้อยละ 64.58) สร้างแหล่งกักเก็บน้ำในพื้นที่ (ร้อยละ 61.67) การทำไร่นาสวนผสม (ร้อยละ 60.00) และการปรับปรุงดิน (ร้อยละ 52.92) ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ลักษณะการปรับตัวของเกษตรกรผู้ปลูกมะยงชิดจังหวัดนครนายกต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

รายการ	ปรับตัว		ไม่ปรับตัว	
	จำนวน	ร้อยละ	จำนวน	ร้อยละ
ด้านเศรษฐกิจ				
หารายได้เสริมเพิ่มเติม	160	66.67	80	33.33
เน้นคุณภาพของมะยงชิดมากกว่า	193	80.42	47	19.58
ศึกษาความต้องการของตลาด	145	60.42	95	39.58
ด้านสังคม				
ยอมรับเทคโนโลยีใหม่	137	57.08	103	42.92
เข้าร่วมอบรมเพื่อเพิ่มความรู้	206	85.83	34	14.17
ประชาสัมพันธ์ให้ข้อมูลเกี่ยวกับการเป็นสิ่งป่งชี้ทางภูมิศาสตร์ (GI)	159	66.25	81	33.75
การประยุกต์ใช้ภูมิปัญญา	179	74.59	61	25.42
เข้าร่วมเป็นสมาชิกกลุ่มและสถาบันเกษตรกร	219	91.25	21	8.75
สนับสนุนจากภาครัฐมากขึ้น	140	58.33	100	41.67
ประสานงานข้อมูลเพิ่มเติมจากหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง	134	55.83	106	44.17
ด้านสิ่งแวดล้อม				
ปรับปรุงดิน	127	52.92	113	47.08
การทำไร่นาสวนผสม	144	60.00	96	40.00
การตัดแต่งกิ่งให้เหมาะสม	208	86.67	32	13.33
การตรวจวิเคราะห์ดิน/ธาตุอาหาร/ความชื้น	154	64.17	86	35.83
เปลี่ยนรูปแบบการผลิตแบบเดิมเป็นการปฏิบัติทางการเกษตรที่ดี (GAP)	187	77.92	53	22.08
สร้างแหล่งกักเก็บน้ำในพื้นที่	148	61.67	92	38.33
หาข้อมูลการแจ้งเตือนเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ	196	81.67	44	13.33

3. ปัจจัยที่มีผลต่อการปรับตัวของเกษตรกรผู้ปลูกมะยงชิดจังหวัดนครนายกต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

ในการวิเคราะห์ความถดถอยโลจิสติก (Logistic regression analysis) แบบทวิ (Binary logistic regression) จากการทดสอบความเหมาะสมของแบบจำลองด้วยค่าสัมประสิทธิ์แห่งการกำหนด (Goodness of fit) (ตารางที่ 2) พบว่า ค่า Cox and Snell R^2 และ Nagelkerke R^2 มีค่าเท่ากับ .591 และ .874 หมายความว่า ตัวแปรปัจจัยมีประสิทธิภาพในการทำนายโอกาสในการปรับตัวของเกษตรกรผู้ปลูกมะยงชิดได้ร้อยละ 59.10 และ 87.40 ตามลำดับ และสมการถดถอยโลจิสติก สามารถทำนายเกษตรกรผู้ปลูกมะยงชิดที่มีการปรับตัวได้ร้อยละ 99.00 และเกษตรกรผู้ปลูกมะยงชิด

ที่ไม่มีการปรับตัว ร้อยละ 86.30 โดยที่สมการถดถอยโลจิสติกสามารถทำนายได้ถูกต้องได้ทั้งหมด ร้อยละ 86.70

ปัจจัยที่มีผลต่อการปรับตัวของเกษตรกรผู้ปลูกมะยงชิดจังหวัดนครนายกต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ .05 ได้แก่ อายุ ผลผลิตมะยงชิด และการเข้ารับการอบรม โดยปัจจัยมีค่าสัมประสิทธิ์เป็นบวก ได้แก่ ผลผลิตมะยงชิด $[(Exp(B) = 2.999)]$ แสดงว่า เกษตรกรที่มีจำนวนผลผลิตมะยงชิดในปริมาณที่น้อยจะมีโอกาสในการปรับตัวมากกว่าเกษตรกรที่มีปริมาณผลผลิตมะยงชิดในปริมาณมากกว่าอยู่ 2.999 เท่า เนื่องจาก ปริมาณของผลผลิตมะยงชิดส่งผลโดยตรงกับรายได้สุทธิของเกษตรกร และจากการที่มีการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ โดยเฉพาะการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำฝนและอุณหภูมิของจังหวัดนครนายกนั้น อาจทำให้ผลผลิตที่ได้มีน้อยลงและคุณภาพต่ำลง อาจทำให้รายได้ของเกษตรกรลดลงในระยะยาว ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Bobojonov & Aw-Hassan (2014) เกษตรกรผู้ปลูกมะยงชิดจึงควรมีการปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่อาจจะส่งผลกระทบต่อรายได้ของเกษตรกรได้ นอกจากนี้เกษตรกรผู้ปลูกมะยงชิดจังหวัดนครนายกที่มีปริมาณผลผลิตในปริมาณน้อยนั้น มาจากการที่เกษตรกรปลูกไว้ในครัวเรือนในจำนวนต้นที่ไม่มาก มีการปลูกผสมผสานกับพืชชนิดอื่น ๆ ด้วย ทำให้ปริมาณของผลผลิตจึงไม่มากเท่าที่ควร และการเข้ารับการอบรม $[(Exp(B) = 3.058)]$ โดยที่เกษตรกรผู้ปลูกมะยงชิดจังหวัดนครนายกที่ได้เข้าอบรมเกี่ยวกับการผลิตมะยงชิดกับหน่วยงานต่าง ๆ ทั้งภาครัฐและเอกชนจะมีโอกาสในการปรับตัวมากกว่าเกษตรกรที่ไม่ได้เข้าอบรมถึง 3.058 เท่า ทั้งนี้ในพื้นที่จังหวัดนครนายก ซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีการปลูกมะยงชิดที่คุณภาพและมีชื่อเสียงมากที่สุด เกษตรกรผู้ปลูกมะยงชิดจึงควรมีการเข้ารับการอบรมอย่างสม่ำเสมอ เพื่อเป็นการสร้างโอกาสในการติดต่อประสานงาน ได้รับการถ่ายทอดความรู้และเทคโนโลยีที่เป็นประโยชน์ สอดคล้องกับการศึกษาของ (Regional Office of Agricultural Economics 8, 2020) ที่ศึกษาการปรับตัวของเกษตรกรผู้ปลูกทุเรียนภาคใต้ตอนบน พบว่า การเข้ารับการอบรมด้านการเกษตรมีผลต่อการปรับตัวของเกษตรกรผู้ปลูกทุเรียนในจังหวัด ชุมพร สุราษฎร์ธานี และนครศรีธรรมราช

ส่วนปัจจัยมีค่าสัมประสิทธิ์เป็นลบ คือ อายุ $[(Exp(B) = .677)]$ แสดงว่า เกษตรกรที่มีอายุน้อยจะมีโอกาสในการปรับตัวมากกว่าเกษตรกรที่มีอายุมาก .677 เท่า จะเห็นได้ว่า ผลการวิเคราะห์สอดคล้องกับการศึกษาของ Lertkunnaluk et al. (2012) ที่อายุของเกษตรกรผู้ปลูกมะม่วงในอำเภอปากช่อง จังหวัดนครราชสีมาที่มีอายุน้อยกว่า จะมีโอกาสในการตัดสินใจเข้าร่วมโครงการผลิตมะม่วงตามแนวทางการเกษตรที่ดีที่เหมาะสม เนื่องจากอายุน้อยมีผลต่อการศึกษาหาความรู้เพิ่มเติมที่สามารถจะเป็นประโยชน์ในการทำการเกษตร เพื่อความอยู่รอดและคงอาชีพนี้ไว้ (Bennett, 1969) และจากผลวิจัยที่พบว่าเกษตรกรผู้ปลูกมะยงชิดในจังหวัดนครนายกมีอายุเฉลี่ย 55.92 ปี ถือได้ว่าเป็นเกษตรกรผู้สูงอายุ ซึ่งมีการรับรู้และประสบการณ์เกี่ยวกับลักษณะภูมิอากาศที่เปลี่ยนแปลงไป ทั้งปริมาณน้ำฝน อุณหภูมิ และอื่น ๆ จะมีความเคยชินกับรูปแบบและวิธีการในรูปแบบเดิม เกษตรกรผู้ปลูกมะยงชิดที่มีอายุน้อยจึงควรเข้าร่วมกลุ่มกับเกษตรกรสูงอายุ เพื่อกระตุ้นให้เห็นถึงความสำคัญและสร้างความรู้ความเข้าใจถึงการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่อาจจะส่งผลกระทบต่อตัวเกษตรกร นอกจากนี้ยังเป็นโอกาสที่ได้รับการถ่ายทอดข้อมูลและองค์ความรู้ภูมิปัญญา ข้อมูลข่าวสาร รายงานสถานการณ์ข้อมูล และประกาศเตือนต่าง ๆ ทางทางเกษตรที่เป็นประโยชน์ต่อตัวเกษตรกร และต่อสมาชิกในกลุ่ม เพื่อเป็นแนวทางในการรับมือกับสถานการณ์ และนำไปสู่การปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศได้

ตารางที่ 2 ปัจจัยที่มีผลต่อการปรับตัวเกษตรกรผู้ปลูกมะยงชิดจังหวัดนครนายกต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

ตัวแปรปัจจัย	B	SEM	Wald	df	Sig.	Exp(B)
ค่าคงที่	-50.956	1819.826	.000	1	.895	.000
อายุ (ปี)	-.390	.308	6.610	1	.024**	.677
ผลผลิตมะยงชิด (กิโลกรัม/ไร่)	.000	.000	1.518	1	.049**	2.999
การเข้ารับการอบรม (ครั้ง/ปี)	.856	.084	3.758	1	.034**	3.058

Overall percentage predictions = 86.70, Adaptation = 99.00, Non adaptation = 86.30, -2 Log-likelihood = 55.462, Cox and Snell R^2 = .591, Nagelkerke R^2 = .874.

**Significant at p = .05

สรุป

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการปรับตัวของเกษตรกรและวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการปรับตัวของเกษตรกรผู้ปลูกมะยงชิดจังหวัดนครนายกต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ผลการวิจัย พบว่า เกษตรกรผู้ปลูกมะยงชิดจังหวัดนครนายกมีลักษณะการปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ แบ่งเป็น 3 ด้าน ได้แก่ 1) ด้านเศรษฐกิจ เกษตรกรมีการปรับตัวโดยเน้นการผลิตมะยงชิดให้มีคุณภาพขึ้น การหารายได้เสริมเพิ่มเติมจากการทำไร่สวนผสม และมีการศึกษาความต้องการของตลาด 2) ด้านสังคม เกษตรกรมีการปรับตัว โดยเป็นสมาชิกกลุ่มและสถาบันเกษตรกร มีการเข้าร่วมอบรมเพื่อเพิ่มพูนความรู้และเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับการผลิตมะยงชิด ประยุกต์ใช้ภูมิปัญญา เพิ่มการประชาสัมพันธ์ให้ข้อมูลเกี่ยวกับการเป็นสิ่งบ่งชี้ทางภูมิศาสตร์ (GI) ของมะยงชิดนครนายก เป็นต้น และ 3) ด้านสิ่งแวดล้อม เกษตรกรมีการปรับตัวในการตัดแต่งกิ่ง ดูแล ระยะที่เหมาะสม ช่วยให้ทรงพุ่มโปร่ง อากาศถ่ายเทได้ดี ทำให้การออกดอกติดผลกระจายได้ทั่วต้นอย่างสม่ำเสมอ และยังป้องกันการสะสมของโรคและแมลงศัตรูพืช สืบค้นหาข้อมูลการแจ้งเตือนเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ปรับเปลี่ยนรูปแบบการผลิตแบบเดิมเป็นการปฏิบัติทางการเกษตรที่ดี (GAP) เพื่อเพิ่มคุณภาพของผลผลิตและเป็นการเพิ่มมูลค่ามะยงชิด เกษตรกรมีการตรวจวิเคราะห์ดิน/ธาตุอาหาร/ความชื้น อย่างสม่ำเสมอ และสร้างแหล่งกักเก็บน้ำในพื้นที่ เพื่อป้องกันภาวะขาดแคลนน้ำในช่วงเดือนเมษายนถึงกันยายน ซึ่งเป็นช่วงการตัดแต่งกิ่งและการแตกใบอ่อนของมะยงชิด

สำหรับผลการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการปรับตัวของเกษตรกรผู้ปลูกมะยงชิดจังหวัดนครนายกต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ พบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อการปรับตัวของเกษตรกรผู้ปลูกมะยงชิดนครนายก ได้แก่ อายุ ผลผลิตมะยงชิด และการเข้ารับการอบรมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ .05 จึงได้จัดทำข้อเสนอแนะเชิงนโยบายให้แก่สำนักงานเกษตรจังหวัดนครนายก สมาคมชาวสวนมะปรางนครนายก และหน่วยงานที่เกี่ยวข้องสนับสนุนในการส่งเสริมการผลิตมะยงชิดนครนายกเพื่อหาแนวทางการปรับตัวและการวางแผนการผลิตให้สอดคล้องกับสภาพภูมิอากาศที่เปลี่ยนแปลงไป พร้อมทั้งสร้างความรู้ ความเข้าใจ และให้บริการข้อมูลเทคโนโลยี ข่าวสาร วิธีการเตรียมการป้องกัน ตลอดจนคำแนะนำต่าง ๆ ได้อย่างเหมาะสม ถูกต้องตามหลักวิชาการ และสอดคล้องกับบริบทพื้นที่

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความอนุเคราะห์ทุนอุดหนุนการวิจัยจากเงินกองทุนวิจัย ประจำปีงบประมาณ 2563 มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร รวมทั้งขอขอบคุณผู้ทรงคุณวุฒิ เจ้าหน้าที่สำนักงานเกษตรจังหวัดนครนายก และผู้ที่เกี่ยวข้อง สมาคมชาวสวนมะปรางนครนายก และเกษตรกรผู้ปลูกมะยงชิดจังหวัดนครนายก ผู้ให้ข้อมูลทุกท่าน ที่ได้ให้ข้อมูล คำแนะนำและชี้แนะงานวิจัยนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- Bennett, W.J. (1969). **The Northern Plainsmen: Adaptive Strategy and Agrarian Life**. Chicago: Aldine, 352.
- Bobojonov, I., & Aw-Hassan, A. (2014). Impacts of climate change on farm income security in Central Asia: An integrated modeling approach. **Agriculture, ecosystems and environment**. **188**, 245-255.
- Chinvanno, S. (2011). **The study of impact of future climate change and variation and adaptation of key economic sectors**. Final report. Southeast Asia START Regional Center. Chulalongkorn University. (in Thai)
- Demeke, A.B., Keil, A., & Zeller, M. (2011). Using panel data to estimate the effect of rainfall shocks on smallholders food security and vulnerability in rural Ethiopia. **Climatic change**. **108**(1), 185-206.
- Greene, W. (2012). **Econometric Analysis**. 7th ed. Pearson Education, New Jersey.
- Griffiths, W. E., Hill, R. C., & Lim, G. C. (2008). **Using EViews: For Principles of Econometrics**. Danvers, MA : John Wiley & Sons
- Kurukulasuriya, P., & Mendelsohn, R. (2003). **Climate change and agriculture: A review of impacts and adaptations**. Environment Department Papers, Climate Change Series. Paper 91. The World Bank, Washington D.C.
- Lertkunnaluk, J., Mankeb, P., & Mekhora, T. (2012) Factors influencing farmer's decision making in good agricultural practice (GAP) of mango production project in Pak Chong district, Nakhon Ratchasima province. **King Mongkut's Agricultural Journal**. **30**(3), 13-21. (in Thai)
- Mueang Nakhon Nayok District Agricultural Extension Office. (2019). **The Economic of Mayongchid Cultivation in Mueang Nakhon Nayok District**. Nakhon Nayok. Mueang Nakhonnayok District Agricultural Extension Office. (in Thai)
- Nakklay, R., Sriboonruang, P., & Tongdeelert, P. (2019). Farmers' opinions toward Mayongchid Nakhon Nayok cultivation in Mueang Nakhon, Nayok district, Nakhon Nayok province. **Agricultural Science Journal**. **50**(3), 228-238. (in Thai)

- National Statistical Office. (2020). **11 Agriculture and Fisheries Branch**. Retrieved from <http://statbbi.nso.go.th/staticreport/page/sector/th/11.aspx> [2020, 30 Dec.]
- Office for Agriculture and Cooperatives Nakhon Nayok. (2020). **Basic information of Nakhon Nayok Province**. Retrieved from <https://www.opsmoac.go.th/nakhonnayok-dwl-files-421291791884>. [2020, 20 Mar.]
- Poapongsakorn, N., Thampanichvong, K., & Anuchitworawong, C. (2015). **Global warming and its impacts on the Thai agricultural sector**. Thailand Development Research Institute. Retrieved from <https://tdri.or.th/2015/02/20150226/>. 2558. [2019, 7 May.]
- Regional Office of Agricultural Economics 8. (2020). The adaptation of durian farmers in the upper southern region in agriculture 4.0. **Agricultural Economics Journal**. 65(762), 5–6. (in Thai)
- Rovinelli, R. J., & Hambleton, R. K. (1977). The use of content specialists in the assessment of criterion-referenced test item validity: 1977. **Journal of Educational Research**, 49-60.
- Singthong, A. (2008). **Maprang Production of Farmers in Nakhon Nayok Province**. MS Thesis, Sukhothai Thammathirat Open University, Nonthaburi. (in Thai)
- Yamane, T. (1973). **Statistics: An introductory analysis**. 3rd edition. New York: Harper and Row.
-

ผงฝุ่นวาวแสงจากเกล็ดสำหรับเพิ่มความคมชัดของรอยลายนิ้วมือแฝง
RICE HUSK-BASED FLUORESCENT POWDERS FOR ENHANCING
THE VISUALIZATION OF LATENT FINGERPRINTS

กิริดา ขานโบ¹ กิตติธัช ธนสิวะวงษ์² เขมฤทัย ถามะพัฒน์^{2*} ศิริประภา รัตตัญญู³ สุรินทร์ ชมเสาร์หัท³
พัชรา สินลอยมา¹ และ พิเชษฐ ลิ้มสุวรรณ²

¹สาขาวิชานิติวิทยาศาสตร์ คณะนิติวิทยาศาสตร์ โรงเรียนนายร้อยตำรวจ สามพราน นครปฐม 73110

²ห้องปฏิบัติการสังเคราะห์และการใช้ประโยชน์จากเคมีสีเขียว ศูนย์วิจัยวิทยาศาสตร์ประยุกต์และวิศวกรรมศาสตร์
เพื่อคำตอบของสังคม ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี บางมด กรุงเทพฯ 10140

³กองพิสูจน์หลักฐานกลาง สำนักงานพิสูจน์หลักฐานตำรวจ สำนักงานตำรวจแห่งชาติ ปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

Kirada Khanbo¹, Kittidhaj Dhanasiwawong², Kheamrutai Thamaphat^{2*}, Siriprapa Rattanyu³,
Surin Chomsaohus³, Patchara Sinloyma¹ and Pichet Limsuwan²

¹Program of Forensic Science, Forensic Science Faculty, Royal Police Cadet, Sam Phran, Nakhon Pathom 73110

²Green Synthesis and Application Laboratory, Applied Science and Engineering
for Social Solution Research Center, Department of Physics, Faculty of Science, King Mongkut's University
of Technology Thonburi, Bangmod, Bangkok 10140

³Central Police Forensic Science Division, Office of Police Forensic Science, Royal Thai Police,
Pathum Wan, Bangkok 10330

*E-mail: kheamrutai.tha@kmutt.ac.th

Received: 2021-05-23

Revised: 2021-05-27

Accepted: 2021-06-10

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการสังเคราะห์ผงฝุ่นวาวแสงด้วยวิธีที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมสำหรับเพิ่มความคมชัดของรอยลายนิ้วมือแฝงบนพื้นผิวของวัตถุพยาน โดยนำเกล็ดซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลิกา (SiNPs) ที่มีความบริสุทธิ์สูงถึง 99.90 % หลังจากนั้นจึงนำสีย้อมเรืองแสงโรดามีน 6 จี มาเคลือบบนพื้นผิวของอนุภาค SiNPs จะได้อนุภาคนาโนซิลิกาวาวแสง (SiNPs-R6G) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 25 ± 1 nm มีลักษณะเป็นผงสีส้ม เมื่อนำ SiNPs-R6G นี้ไปตรวจหารอยลายนิ้วมือแฝงโดยอาศัยวิธีการกดทับซึ่งเป็นวิธีที่ไม่ทำลายลายเส้นแทนการปัดผงฝุ่น พบว่า SiNPs-R6G สามารถเพิ่มความคมชัดของรอยลายนิ้วมือแฝงบนพื้นผิวของวัตถุชนิดต่าง ๆ ทั้งพื้นผิวมีรูพรุน กึ่งรูพรุน และไม่มีรูพรุน ทั้งพื้นผิวเรียบและพื้นผิวขรุขระได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเมื่อถ่ายภาพรอยลายนิ้วมือที่ปรากฏด้วยกล้องถ่ายภาพดิจิทัลผ่านฟิลเตอร์สีส้ม ภายใต้แสงจากเครื่องโพลีไลท์ที่มีความยาวคลื่น 505 nm ภาพที่ได้ปรากฏรายละเอียดของลายเส้นลายนิ้วมือที่มีสีเหลือง (570 nm) ตัดกับพื้นผิว

ของวัตถุได้อย่างคมชัด แสดงให้เห็นว่าผงฝุ่นวาวแสงและวิธีการหารอยลายนิ้วมือแฝงที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ สามารถนำไปใช้ในงานตรวจพิสูจน์หลักฐานทางนิติวิทยาศาสตร์ได้

คำสำคัญ: ผงฝุ่นวาวแสง รอยลายนิ้วมือแฝง แกลบ อนุภาคนาโนซิลิกา โรดามีน 6 จี

ABSTRACT

In this work, the fluorescent powders were synthesized using green method for enhancing the visualization of latent fingerprints (LFPs) on physical evidence surfaces. Rice husks, which are one of the major agricultural wastes, were used to synthesize silica nanoparticles (SiNPs) with high purity up to 99.8%. The prepared SiNPs were subsequently coated with fluorescent dyes called rhodamine 6G to obtain the fluorescent silica nanoparticles (SiNPs-R6G) with an average diameter of 25 ± 1 nm. The synthesized SiNPs-R6G were powders in orange color. They were used for the detection of fresh LFPs with non-dusting technique. The results showed that the SiNPs-R6G could efficiently enhance the visualization of LFPs on porous surfaces, semi-porous surfaces, and non-porous surfaces. The best visual contrast of the yellow fingerprints (570 nm) on both smooth and rough surfaces was imaged using orange filter with digital camera under the beam of Polilight with a wavelength of 505 nm. The resultant findings indicated that the developed fluorescent powders and LFPs detection technique proposed herein can be used for criminal investigation in forensic science.

Keywords: fluorescent powder, latent fingerprints, rice husk, silica nanoparticles, rhodamine 6G

บทนำ

การเก็บรวบรวมพยานหลักฐานในกระบวนการสืบสวนสอบสวนเป็นประเด็นสำคัญที่ส่งผลต่อคุณภาพและความน่าเชื่อถือของผลการตรวจพิสูจน์โดยพยานหลักฐานที่ถูกเก็บรวบรวมมาจากสถานที่เกิดเหตุสามารถบอกได้ว่าการกระทำผิดเกิดขึ้น และการกระทำผิดนั้นเกิดขึ้นด้วยวิธีการใดและประสงค์ต่อสิ่งใด ทำให้สามารถเชื่อมโยงไปยังผู้กระทำความผิดหรือพิสูจน์ความบริสุทธิ์ของผู้ถูกกล่าวหาได้ โดยผู้กระทำผิดมักจะทิ้งร่องรอยหลักฐานไว้ในสถานที่เกิดเหตุเสมอ ดังทฤษฎีที่พัฒนามาจากแนวความคิดของ ดร.เอตมิง โลคาร์ต นักนิติวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศส ที่กล่าวไว้ว่า “ทุกการสัมผัสย่อมมีการทิ้งร่องรอย” (Suteerakune, 2018) ซึ่งมีการพิสูจน์และนำไปใช้ในงานนิติวิทยาศาสตร์อย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะการตรวจหาร่องรอยต่าง ๆ โดยมีหลักการ คือ เมื่อวัตถุ 2 ชิ้น สัมผัสกัน จะเกิดการแลกเปลี่ยนบริเวณพื้นผิวที่สัมผัสกันของวัตถุนั้น การนำมาใช้ที่เห็นเด่นชัดที่สุด คือ การตรวจหารอยลายนิ้วมือ (fingerprints) ของผู้ต้องสงสัย ซึ่งเป็นพยานหลักฐานที่พบได้บ่อยครั้งในสถานที่เกิดเหตุและถือเป็นวัตถุพยานที่สำคัญมาก เนื่องจากรอยลายนิ้วมือของมนุษย์ (ridge pattern) จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบตั้งแต่เกิดจนตาย ซึ่งรูปแบบดังกล่าวจะมีลักษณะพิเศษที่ไม่เหมือนกันแม้กระทั่งฝาแฝดที่เกิดจากไข่ใบเดียวกันซึ่งมีดีเอ็นเอ (DNA) เหมือนกัน ก็ยังมีลายนิ้วมือที่แตกต่างกัน ดังนั้นรอยลายนิ้วมือจึงเป็นพยานหลักฐานสำคัญที่สามารถนำมาตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์บุคคล (uniqueness) เพื่อยืนยันตัวผู้กระทำผิดได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ (Daluz, 2015)

รอยลายนิ้วมือที่พบในสถานที่เกิดเหตุแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ รอยลายนิ้วมือที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า (visible fingerprints) และรอยลายนิ้วมือที่มองไม่เห็นหรือมองเห็นด้วยตาเปล่าไม่ชัดเจน ที่เรียกว่า

รอยลายนิ้วมือแฝง (latent fingerprints หรือ LFPs) โดยรอยลายนิ้วมือส่วนใหญ่ที่พบในที่เกิดเหตุจะเป็นประเภท LFPs ซึ่งเกิดจากคราบเหงื่อและคราบไขมัน (สารคัดหลั่ง) ที่ติดอยู่บนเส้นขนของลายนิ้วมือ เมื่อนิ้วมือไปสัมผัสกับวัตถุ ทำให้เส้นขนที่ประกอบไปด้วยความชื้นและกรดไขมันนี้ถูกกดลงบนพื้นผิวของวัตถุ เกิดการจำลองลายนิ้วมือที่มีลักษณะใสไม่มีสี ทำให้ลายนิ้วมือที่ปรากฏนั้นไม่ชัดเจน ดังนั้นงานทางด้านนิติวิทยาศาสตร์จึงจำเป็นต้องการวิธีทางแสง ฟลิเกส หรือเคมี มาช่วยในการทำให้ LFPs บนพื้นผิวต่าง ๆ ปรากฏชัดเจนขึ้น (Champod et al., 2004; Azman et al., 2019) ซึ่งวิธีการเพิ่มความคมชัดของ LFPs ที่สำนักงานพิสูจน์หลักฐานตำรวจนิยมใช้ในปัจจุบันมีหลายวิธี เช่น การปัดผงฝุ่น (powder-dusting method) การจุ่มในสารละลายนินไฮดริน (ninhydrin dipping) การอบไอระเหยจากกาว (cyanoacrylate fuming) และการรมควีนไอโอดีน (iodine fuming) วิธีการปัดผงฝุ่นเป็นวิธีการที่ได้รับความนิยมนำไปใช้มากที่สุดสถานที่เกิดเหตุ อนุภาคของผงฝุ่นจะไปเกาะติดที่ LFPs บนพื้นผิวของวัตถุพยาน เนื่องจากความชื้นและองค์ประกอบของไขมันที่ตกค้างอยู่ ซึ่งความสามารถในการเกาะติดของอนุภาคขึ้นกับขนาด รูปร่าง และการเกาะกลุ่มกันของอนุภาค ซึ่งอนุภาคที่กลมและมีขนาดเล็กจะเกาะติดได้กว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ และหยาบ ดังนั้นผงฝุ่นโดยทั่วไปจึงมีขนาดของอนุภาคอยู่ในช่วง 1 – 10 μm (Rajan et al., 2018) ซึ่งผงฝุ่นทางการค้า ที่นิยมนำมาใช้ในการหา LFPs คือ ผงฝุ่นดำ (black powder) ที่ประกอบด้วย เหล็กออกไซด์สีดำ (black iron oxide) ยางสน (rosin) เขม่าดำที่เกิดจากการเผาไหม้ของน้ำมัน (lamp black) ฟลูเลอร์เอิร์ท (fuller's earth) และ แมงกานีสไดออกไซด์ (manganese dioxide) ที่ทำหน้าที่เป็นสารให้สีและสารเพิ่มการยึดเกาะ (Lee & Gaensslen, 2012) นอกจากนั้นยังมีผงฝุ่นทางการค้าชนิดอื่น ๆ อีก ซึ่งจำแนกออกเป็นประเภทหลัก ๆ ได้แก่ ผงฝุ่นโลหะ (metal powder) ผงฝุ่นแม่เหล็ก (magnetic powder) ผงฝุ่นสี (colored powder) และผงฝุ่นวาวแสง (fluorescent powder) การเลือกใช้ผงฝุ่นแต่ละประเภทจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ความมีรูพรุน ความเรียบ และสีของพื้นผิว วัตถุพยาน อายุของ LFPs และปริมาณองค์ประกอบของสารคัดหลั่งที่หลงเหลือบนพื้นผิวของวัตถุพยาน (Sears et al., 2012; Dhall et al., 2016)

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา มีนักวิจัยหลายท่านได้อาศัยเทคโนโลยีนาโนเข้ามาช่วยในการสังเคราะห์อนุภาคชนิดต่าง ๆ ได้แก่ 1) อนุภาคนาโนโลหะ เช่น อนุภาคนาโนเงิน และอนุภาคนาโนทอง 2) อนุภาคนาโนโลหะออกไซด์ เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ สังกะสีออกไซด์ เหล็กออกไซด์ ยูโรเพียมออกไซด์ และอนุภาคนาโนซิลิกา และ 3) อนุภาคนาโนเรืองแสง เช่น แคดเมียมซัลไฟด์ควอนตัมดอต แคดเมียมซีลีไนด์ควอนตัมดอต คาร์บอนดอต และอนุภาคนาโนของแร่โลหะหายาก เป็นต้น (Prabakaran & Pillay, 2021) สำหรับนำไปประยุกต์ใช้ในการตรวจหา LFPs ทั้งในรูปของอนุภาคแขวนลอย (wet powder suspension) เพื่อใช้เคลือบแบบโลหะชนิดเดียว (single metal deposition) และแบบโลหะหลายชนิด (multi metal deposition) และรูปของผงฝุ่น (Azman et al., 2019) จากการศึกษาพบว่าอนุภาคนาโนซิลิกา (silica nanoparticles หรือ SiNPs) ถูกใช้อย่างแพร่หลายเพื่อเพิ่มความคมชัดของ LFPs เนื่องจาก SiNPs มีความสามารถในการยึดจับแน่นกับโมเลกุลของน้ำสูง และสามารถจับกับหมู่คาร์บอกซิลของกรดอะมิโน โปรตีน และลิพิด ที่เป็นองค์ประกอบของ LFPs ผ่านพันธะไฮโดรเจนของหมู่ไฮดรอกซิลที่อยู่บนพื้นผิวของ SiNPs ได้ (Garg et al., 2011; Hazarika et al., 2012; Huang et al., 2015; Kim et al., 2016) อย่างไรก็ตามผงฝุ่นทางการค้ารวมถึงผงฝุ่นที่ถูกพัฒนาขึ้นในหลายงานวิจัยยังไม่สามารถนำไปใช้เพื่อเพิ่มความคมชัดของ LFPs บนพื้นผิววัตถุทุกประเภทได้ จะเหมาะสมเพียงแค่พื้นผิวกึ่งรูพรุน (semi-porous surface) และพื้นผิวไม่มีรูพรุน (non-porous surface) เท่านั้น แต่ไม่สามารถนำไปหา LFPs บนพื้นผิวที่มีรูพรุน (porous surface) ได้ หรือหากนำไปใช้ได้ก็ยังไม่มีความคมชัดของลายนิ้วมือทั้ง 3 ประเภท ทั้งพื้นผิวเรียบและพื้นผิวขรุขระ ส่งผลให้เจ้าหน้าที่

ตรวจสอบสถานที่เกิดเหตุต้องพิจารณาลักษณะพื้นผิวของวัตถุพยานก่อนในเบื้องต้น เพื่อเลือกชนิดของผงฝุ่นให้เหมาะสมกับการใช้งาน (Prabakaran & Pillay, 2021; Rajan et al., 2018; Thongthammachad & Witchuwanich, 2019; Azman et al., 2019; Rajan et al., 2019; Jenie et al., 2020)

แกลบ (rice husk หรือ RH) เป็นวัสดุเหลือทิ้งหลักจากกระบวนการสีข้าวและอุตสาหกรรมชีวมวล จากการสำรวจโดยสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ พบว่าในแต่ละปีมีปริมาณแกลบเหลือทิ้งสูงถึง 5 - 6 ล้านตัน/ปี (Boonsrila, 2016) แกลบประกอบด้วยสารอินทรีย์ที่สำคัญ 3 ชนิด คือ เซลลูโลส (30%) เฮมิเซลลูโลส (20%) และลิกนิน (25-30%) และเถ้า (17-23%) โดยในเถ้ามีซิลิกา (SiO_2) เป็นองค์ประกอบอยู่ถึง 90% ที่เหลือจะเป็นสารประกอบอนินทรีย์ของโลหะออกไซด์ต่าง ๆ เช่น โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) และเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) (Pacheco-Torgal et al., 2015) ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะนำแกลบมาใช้ในการสังเคราะห์ SiNPs แทนการใช้สารประกอบทางเคมีเตตระเอทอกซิซิลเลน (tetraethoxysilane หรือ TEOS) หลังจากนั้นจะนำ SiNPs ที่สังเคราะห์ได้มาทำการเจือด้วยโมเลกุลของสีย้อมเรืองแสงอินทรีย์โรดามีน 6 จี (rhodamine 6G หรือ R6G) เพื่อใช้เป็นผงฝุ่นวาวแสง (SiNPs-R6G) สำหรับตรวจหา LFPs บนพื้นผิววัตถุได้ทุกประเภททั้งพื้นผิวที่มีรูพรุน กึ่งรูพรุน และไม่มีรูพรุน ทั้งพื้นผิวเรียบและพื้นผิวขรุขระ ทั้งวัตถุพยานที่มีพื้นผิวสีเข้มและสีอ่อน โดยใช้วิธีการกดทับแทนการปิดผงฝุ่นที่ต้องอาศัยความชำนาญและอาจทำลายเส้นรอยลายนิ้วมือแฝงได้

วิธีการ

1. การสังเคราะห์ SiNPs จากแกลบด้วยวิธีการสกัดและการตกตะกอน

นำแกลบข้าวหอมมะลิพันธุ์ 105 ซึ่งได้รับมาจากกลุ่มวิสาหกิจชุมชน ศูนย์ข้าวชุมชน บ้านอุ่มแสง (กลุ่มเกษตรกรทิพย์) จังหวัดศรีสะเกษ มาล้างทำความสะอาดด้วยน้ำปราศจากไอออน (deionized water หรือ DI) เป็นจำนวน 3 ครั้ง เพื่อชะล้างสิ่งสกปรก เช่น เศษดินและเศษทรายที่ติดมากับแกลบ จากนั้นจึงนำแกลบที่ผ่านการล้างทำความสะอาดแล้วไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง และบดให้มีความละเอียดลง นำผงแกลบไปชะล้างด้วยกรด (acid leaching) HCl ความเข้มข้น 2 M ภายใต้กระบวนการรีฟลักซ์ที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 90 นาที เพื่อกำจัดออกไซด์ของโลหะออก เมื่อครบเวลาที่กำหนดจึงนำผงแกลบมาล้างด้วยน้ำ DI จนกระทั่งเป็นกลาง (pH = 7) แล้วนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

ขั้นตอนต่อไปเป็นการกำจัดสารอินทรีย์ออกโดยใช้ความร้อน ผู้วิจัยจึงนำผงแกลบไปวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงมวลของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน (thermogravimetric analysis หรือ TGA) โดยใช้เครื่อง TGA/DSC 3+ (Mettler Toledo) เพื่อพิจารณาช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการกำจัดสารอินทรีย์ที่อยู่ในแกลบออกไปได้ทั้งหมด พบว่าการสลายตัวทางความร้อนของแกลบจะเริ่มจากการระเหยของน้ำที่อุณหภูมิ 100 °C ตามด้วยการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนิน ที่อุณหภูมิ 180-310 °C 320-410 °C และสูงกว่า 410 °C ตามลำดับ ทั้งนี้มวลของแกลบจะเกิดสลายตัวกว่า 70% ที่อุณหภูมิสูงกว่า 500 °C ดังนั้นผู้วิจัยจึงนำผงแกลบไปเผาภายใต้บรรยากาศออกซิเจนด้วยเตาเผาความร้อนสูง (Humanlab, DMF-12) ที่อุณหภูมิ 650 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง เพื่อกำจัดสารอินทรีย์และให้ได้เถ้าที่มีปริมาณของซิลิกาอสัณฐานมากที่สุด นำเถ้าที่ได้ไปสังเคราะห์ SiO_2 บริสุทธิ์โดยใช้วิธีการสกัดและการตกตะกอน โดยต้มในสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 2.5 M เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ตามด้วยการปรับค่า pH จนมีค่า pH เป็น 2 ด้วยสารละลายกรด H_2SO_4 ความเข้มข้น 2 M หลังจากนั้นจึงปรับค่า pH ให้เป็น 8.5 ด้วยสารละลาย NH_4OH

ความเข้มข้น 2 M เพื่อให้ SiO_2 บริสุทธิ์ที่ถูกสกัดตกตะกอนออกมา จากนั้นนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ภายใต้ความดัน 10 mbar ด้วยเตาอบสูญญากาศ (Binder, VD series) จะได้ SiO_2 บริสุทธิ์ หลังจากนั้นจึงนำ SiO_2 บริสุทธิ์ที่ได้ไปผ่านกระบวนการชะล้างด้วยกรด สกัด และตกตะกอนอีกครั้ง เพื่อเพิ่มความบริสุทธิ์และลดขนาดของซิลิกาให้กลายเป็น SiNPs ที่มีความบริสุทธิ์สูง

2. การเตรียมผงฝุ่นวาวแสง SiNPs-R6G

นำผง SiNPs ที่สังเคราะห์ได้จากขั้นตอนที่ 1 มาผสมกับสารละลาย R6G ในอัตราส่วน 1 : 10 เป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นแยกเอาผงออกจากสารละลาย R6G และล้างพื้นผิวของอนุภาคด้วยน้ำ DI ภายใต้การปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 14,000 รอบ/นาที เป็นเวลา 10 นาที เป็นจำนวน 3 ครั้ง เพื่อกำจัดโมเลกุลของ R6G ที่เคลือบไม่ติดออกจากนั้นนำผงที่ได้ไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ภายใต้ความดัน 10 mbar ด้วยเตาอบสูญญากาศ จะได้เป็นผงฝุ่นวาวแสง SiNPs-R6G สำหรับนำไปใช้ตรวจหา LFPs ในขั้นตอนต่อไป

3. การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางเคมี และสมบัติทางแสง

หลังจากทำการสังเคราะห์ SiNPs และ SiNPs-R6G จะนำไปวิเคราะห์หองค์ทางเคมีที่เป็นธาตุและสารประกอบ รวมถึงความบริสุทธิ์ของ SiO_2 โดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์การเรืองรังสีเอกซ์ (PANalytical, MiniPal4) วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันและโครงสร้างของโมเลกุลโดยใช้เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Shimadzu, IR prestige-21) วิเคราะห์โครงสร้างผลึกโดยใช้เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ (Rigaku, Miniflex) วิเคราะห์ขนาดและรูปร่างของอนุภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (LEO, 1450VP) และวิเคราะห์สมบัติทางแสงโดยใช้เครื่องวัดการเรืองแสง (Jasco, FP-6200)

4. การเตรียมตัวอย่างรอยลายนิ้วมือแฝงบนวัตถุพยาน

ในการจำลอง LFPs บนพื้นผิวของวัตถุต่าง ๆ เริ่มจากเลือกตัวแทนของวัตถุพยานโดยแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ตามลักษณะของพื้นผิว คือ พื้นผิวแบบมีรูพรุน กึ่งรูพรุน และไม่มีรูพรุน ซึ่งตัวอย่างที่ใช้สำหรับพื้นผิวแบบมีรูพรุน ได้แก่ กระดาษถ่ายเอกสารสีขาว (80แกรม) และกระดาษเทอร์มอล (ใบเสร็จจากร้านสะดวกซื้อ) ส่วนพื้นผิวแบบกึ่งรูพรุน ได้แก่ ธนบัตรฉบับละ 20 บาท และพื้นหนัง และพื้นผิวแบบไม่มีรูพรุน ได้แก่ กระดาษสไลด์ แผ่นทองแดง เพรียมูชิยาปม์ ภูเก็ตสแตนเลส อลูมิเนียมฟอยล์ ถุงดำ ถุงสีขาวขุ่น ถุงจากร้านสะดวกซื้อเซเว่น และถุงจากห้างสรรพสินค้า ซึ่งล้วนแต่เป็นสิ่งที่มิใช้อยู่ทั่วไปในชีวิตประจำวันและมักพบเจอในสถานที่เกิดเหตุ โดยวัตถุพยานตัวอย่างจะถูกนำมาตัดให้มีขนาด $3\times 3\text{ cm}^2$ สำหรับตัวอย่างพื้นผิวแบบไม่มีรูพรุนจะถูกล้างทำความสะอาดโดยนำไปแช่ในอะซิโตน เอทานอล ล้างด้วยน้ำ DI และทิ้งไว้ให้แห้ง เพื่อนำไปจำลอง LFPs ต่อไป

ในการจำลอง LFPs นั้น ทำโดยให้อาสาสมัคร 1 คน เป็นผู้ประทับลายนิ้วมือตลอดการทดลองเพื่อให้รูปแบบลายนิ้วมือไม่เปลี่ยนแปลง โดยก่อนประทับลายนิ้วมืออาสาสมัครต้องทำความสะอาดมือด้วยการล้างน้ำสบู่และน้ำสะอาด เช็ดให้แห้ง จากนั้นใช้นิ้วมือป้ายไปตรงบริเวณ T-zone แล้วไปประทับนิ้วมือลงบนพื้นผิวตัวอย่างที่เตรียมไว้ โดยการวางแผ่นตัวอย่างบนฐานรองรับแล้วประทับลายนิ้วมือไปบนตำแหน่งที่กำหนด จากนั้นปล่อยลูกตุ้มลงมากดทับนิ้วมือด้วยแรง 9.8 นิวตัน ไว้ เป็นเวลา 10 วินาที เพื่อควบคุมแรงกดให้เท่ากันทุก ๆ ครั้ง

5. การศึกษาความสามารถของ SiNPs-R6G ในการเพิ่มความคมชัดของรอยลายนิ้วมือแฝงบนพื้นผิวแบบมีรูพรุน กึ่งรูพรุน และไม่มีรูพรุน

สำหรับวิธีทดลองหา LFPs โดยใช้ผงฝุ่นวาวแสง SiNPs-R6G ที่เตรียมขึ้นมานั้น เริ่มจากนำผง SiNPs-R6G ใส่ในภาชนะรองรับ แล้วนำตัวอย่างวัตถุพยานที่ต้องการหา LFPs มาคว่ำลงบนผง SiNPs-R6G จากนั้น

ใช้ลูกตุ้มวางทับตัวอย่างด้านบนด้วยแรงกด 1.96 นิวตัน เป็นเวลา 10 วินาที เพื่อเพิ่มแรงกดทับให้ LFPs กับผงฝุ่นสามารถเกาะติดกันได้มากขึ้น จากนั้นนำตัวอย่างมาเคาะผงส่วนเกินออกจากพื้นผิว แล้วนำมาวางบนแท่นถ่ายภาพทำการกระตุ้นให้เกิดการวาวแสงด้วยแสงสีฟ้าที่มีความยาวคลื่น 505 nm จากเครื่องฉายแสงโพลิไลท์ที่ถูกติดตั้งให้ทำมุม 45 องศา กับตัวอย่าง แล้วเก็บหลักฐานโดยการถ่ายภาพด้วยกล้องดิจิทัล (Nikon, D200) ผ่านฟิลเตอร์สีส้มในโหมดโฟกัสแบบอัตโนมัติ (Autofocus: AF) โดยมีค่าความไวแสง (ISO) เท่ากับ 800 และค่ารูรับแสง (F number) เท่ากับ 3.2

ผลการทดลองและวิจารณ์

ผลการทดลองแบ่งออกเป็น 2 ตอนหลัก ๆ คือ ผลการสังเคราะห์ SiNPs และ SiNPs-R6G และการนำผงฝุ่นวาวแสงที่เตรียมขึ้นไปศึกษาความสามารถในการตรวจหา LFPs โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

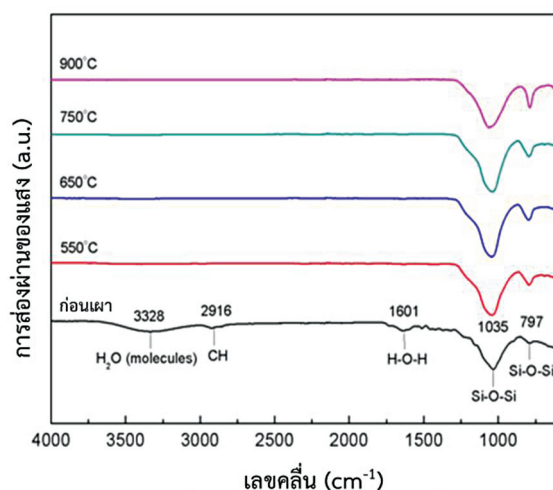
1. ผลการสังเคราะห์ SiNPs และ SiNPs-R6G



ภาพที่ 1 การเปลี่ยนสีของแกลบหลังผ่านกระบวนการชะล้างด้วยกรด เผา สกัด และตกตะกอน

จากการทดลองเมื่อนำแกลบมาผ่านกระบวนการชะล้างด้วยกรด เผา สกัด และตกตะกอน เพื่อสังเคราะห์ SiO_2 จากแกลบ พบว่าสีของแกลบจะเปลี่ยนจากสีน้ำตาลอ่อนเป็นสีขาวซึ่งเป็นสีของ SiO_2 ดังแสดงในภาพที่ 1 ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดยใช้เทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ (X-ray fluorescence spectrometry หรือ XRF) ที่พบว่าแกลบก่อนผ่านกระบวนการชะล้างด้วยกรดประกอบด้วยสารประกอบหลัก คือ SiO_2 96.40% K_2O 1.15% CaO 0.97% และ Fe_2O_3 0.12% แต่ภายหลังผ่านกระบวนการชะล้างด้วยกรดปริมาณ K_2O และ CaO ลดลงจนไม่สามารถตรวจวัดได้ (N/A) และปริมาณ Fe_2O_3 ลดลงเหลือ 0.01% ทั้งนี้เนื่องจากวิธีการชะล้างด้วยกรดซึ่งเป็นวิธีการละลายสารประกอบในสถานะที่สารละลายเป็นกรด สารประกอบจำพวกโลหะออกไซด์จะถูกกำจัดออกไปจากแกลบผ่านการสลายตัวให้อยู่ในรูปของเกลือคลอไรด์ KCl CaCl_2 และ FeCl_3 ที่สามารถละลายในน้ำได้ (Laganá & Parker, 2018)

เมื่อนำเคลือบหลังการชะล้างด้วยกรดไปเผาที่อุณหภูมิสูงกว่า 500 °C (550, 650, 750 และ 900 °C) เป็นเวลา 6 ชั่วโมง พบว่าเกิดการสลายตัวของสารอินทรีย์ซึ่งสามารถยืนยันได้จากผลการวิเคราะห์ฟังก์ชันของโมเลกุลสารอินทรีย์โดยใช้เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier transform infrared หรือ FTIR) ดังแสดงในภาพที่ 2 ที่ไม่พบ 1) องค์ประกอบของน้ำปรากฏอยู่ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 3,328 cm^{-1} 2) สารประกอบไฮโดรคาร์บอน (CH) ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 2,916 cm^{-1} และ 3) H-O-H ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1,601 cm^{-1} ซึ่งสอดคล้องกับเอมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนิน (Vibuljan, 2005) อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยเลือกใช้อุณหภูมิในการเผาเท่ากับ 650 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง เนื่องจากให้ค่าของเคลือบที่มีปริมาณของซิลิกาอสัณฐานมากที่สุด (99.30%) และสีของซีเมนต์หลังการเผามีความขาวมากที่สุดดังแสดงในภาพที่ 3

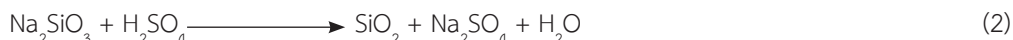


ภาพที่ 2 FTIR สเปกตรัมของเคลือบหลังการชะล้างด้วยกรดแล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

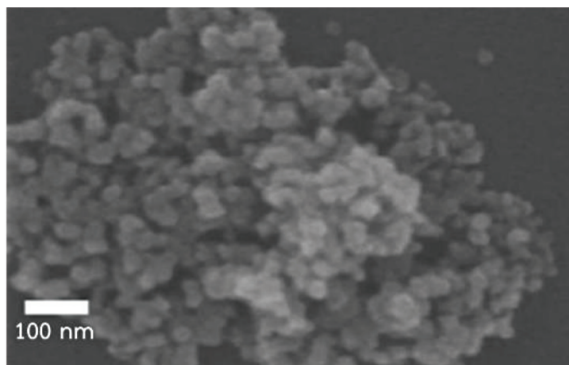


ภาพที่ 3 ซีเมนต์เคลือบหลังการชะล้างด้วยกรดแล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

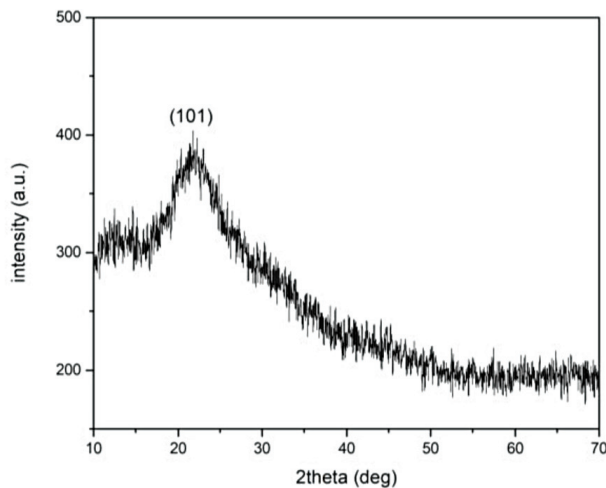
เมื่อนำซีเถ้าหลังผ่านกระบวนการชะล้างด้วยกรดและเผาที่อุณหภูมิ 650 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ไปทำการสกัดและตกตะกอนเพื่อสังเคราะห์เอา SiO_2 ออกมา โดยการต้มในสารละลายที่เป็นด่างเพื่อให้ SiO_2 ที่อยู่ในซีเถ้าของแกลบเกิดการเปลี่ยนแปลงไปเป็นโซเดียมซิลิเกต (sodium silicate หรือ Na_2SiO_3) ซึ่งอยู่ในรูปของเหลวใสไม่มีสี หลังจากนั้นจึงเติมกรดลงไปในสารละลายของ Na_2SiO_3 เพื่อทำให้เกิดการตกตะกอนเป็น SiO_2 และยังเป็นการปรับค่า pH ให้มีค่าเท่ากับ 2 ซึ่งส่งผลให้อนุภาค SiO_2 มีขนาดเล็กลง (Ghorbani et al., 2015) ดังแสดงในสมการที่ (1) -(2)



จากสมการที่ (2) เมื่อกำจัด Na_2SO_4 ออก ผลการทดลองพบว่าจะได้ SiO_2 ที่มีลักษณะเป็นผงสีขาว (ภาพที่ 1) มีความบริสุทธิ์สูงถึง 99.84% และเมื่อนำผง SiO_2 เหล่านี้ไปผ่านกระบวนการชะล้างด้วยกรด สกัด และตกตะกอนอีกครั้ง เพื่อเพิ่มค่าความบริสุทธิ์และลดขนาดของซิลิกาให้กลายเป็น SiNPs ผลการทดลองพบว่าจะได้ SiNPs ที่มีความบริสุทธิ์สูงถึง 99.90% มีลักษณะเป็นทรงกลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคโดยเฉลี่ย 27 ± 1 nm ดังแสดงในภาพที่ 4 จากการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction หรือ XRD) พบรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD pattern) แสดงดังภาพที่ 5 ซึ่งปรากฏพีกค่อนข้างกว้าง ณ ตำแหน่งการเลี้ยวเบน 2θ ประมาณ 21.9° สอดคล้องกับระนาบ (101) ตาม JCPDS หมายเลข 00-011-0695 ซึ่งสามารถยืนยันได้ว่าเป็น SiO_2 ที่มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบอสัณฐาน (Rojas et al., 2019) และมีขนาดอนุภาคในระดับนาโนเมตร



ภาพที่ 4 ภาพถ่าย SiNPs ที่สังเคราะห์ขึ้นจากแกลบ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



ภาพที่ 5 XRD pattern ของ SiNPs ที่สังเคราะห์ขึ้นจากเกล็ด



ภาพที่ 6 ภาพถ่ายผงฝุ่น SiNPs-R6G ที่เตรียมขึ้นจากการทดลอง

เมื่อนำ SiNPs บริสุทธิ์ที่สังเคราะห์ขึ้นนี้ไปทำการเคลือบด้วย R6G จะได้ผงฝุ่น SiNPs-R6G ดังแสดงในภาพที่ 6 ซึ่งเมื่อพิจารณาจากลักษณะทางกายภาพพบว่าเป็นผงฝุ่นละเอียดที่มีสีส้ม เมื่อนำไปตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคฟลูออเรสเซนส์สเปกโตรสโกปี พบว่าผง SiNPs-R6G จะเกิดการวาวแสงสีเหลืองที่มีความยาวคลื่น (emission wavelength) 570 nm เมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงความยาวคลื่น (excitation wavelength) 505 nm ซึ่งเป็นความยาวคลื่นมาตรฐานที่กลุ่มงานตรวจสอบที่เกิดเหตุใช้การวาวแสงของสาร R6G ทั้งนี้การย้อมสี R6G บนพื้นผิวอนุภาคของ SiNPs ไม่ส่งผลให้เกิดการสร้างพันธะหรือโมเลกุลบนพื้นผิวของ SiNPs-R6G และยังคงพบหมู่ฟังก์ชัน ซิลอกเซน (siloxane) Si-O-Si ที่ตำแหน่งเลขคลื่น $1,035\text{ cm}^{-1}$ และ 797 cm^{-1} ที่เกิดจากการสั่นแบบยืดหดแบบไม่สมมาตร (asymmetric stretching vibration) และการสั่นแบบยืดหดแบบสมมาตร (symmetric stretching vibration) ตามลำดับ ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะตัวของ SiO_2 (Nhung et al., 2017)

2. ผลการศึกษาความสามารถของ SiNPs-R6G ในการเพิ่มความคมชัดของ LFPs

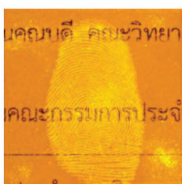
หลังจากสังเคราะห์ผงฝุ่นวาวแสง SiNPs-R6G เสร็จเรียบร้อยแล้วในตอนที่ 1 จึงนำผงฝุ่นที่เตรียมขึ้นไปตรวจหา LFPs บนพื้นผิวของตัวอย่างวัตถุแบบมีรูพรุน กึ่งรูพรุน และไม่มีรูพรุน ทั้งตัวอย่างที่มีพื้นผิวเรียบและพื้นผิว

ขรุขระ มีสีสว่างและมีด จำนวนทั้งสิ้น 13 ชนิด โดยอาศัยวิธีการกดทับด้วยผง SiNPs-R6G แล้วนำไปส่องภายใต้แสงสีฟ้าที่มีความยาวคลื่น 505 nm โดยใช้เครื่องฉายแสงโพลิไลต์ ผลการทดลองพบว่าทุกตัวอย่างจะปรากฏรอยลายนิ้วมือที่สว่างแสงสีเหลืองให้เห็นอย่างเด่นชัด โดย R6G นอกจากจะช่วยเพิ่มความคมชัดระหว่างรูปแบบของรอยลายนิ้วมือและพื้นผิววัตถุพยานเนื่องจากคุณสมบัติการวาวแสงแล้ว ยังเพิ่มคุณสมบัติความชอบน้ำ (hydrophilic) มากขึ้นด้วย เพราะในสาร R6G มีองค์ประกอบเป็นออกซิเจนที่สามารถเข้าไปจับและสร้างพันธะกับหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) ที่มีอยู่มากใน SiNPs ส่งผลให้ SiNPs-R6G แสดงสมบัติน้ำมากขึ้น จึงช่วยในยึดติดกับสารคัดหลั่งบน LFPs ได้ดียิ่งขึ้น ภาพที่ 7 แสดงผลจากการเพิ่มความคมชัดของ LFPs บนตัวอย่างวัตถุพยานชนิดต่าง ๆ โดยใช้ผงฝุ่นวาวแสง SiNPs-R6G ร่วมกับวิธีการกดทับ ที่เก็บหลักฐานโดยการถ่ายภาพด้วยกล้องดิจิทัลผ่านฟิลเตอร์สีส้ม

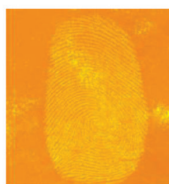
หลังจากที่ได้ทำการตรวจหา LFPs บนตัวอย่างวัตถุพยานทุก ๆ พื้นผิวแล้ว ผู้วิจัยได้นำภาพถ่ายทุกภาพที่ได้จากการทดลองไปให้ พ.ต.อ.หญิง สุรินทร์ ชมเสาร์หัส นักวิทยาศาสตร์ (สบ.4) กลุ่มงานตรวจลายนิ้วมือแฝง กองพิสูจน์หลักฐานกลาง ทำการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์บุคคลโดยอาศัยหลักการการตรวจเปรียบเทียบจุดลักษณะสำคัญพิเศษ (special characteristics) หรือจุดตำหนิ (minutiae) ที่จะต้องมีจุดลักษณะสำคัญพิเศษของลายเส้นตรงกันอย่างน้อย 10 จุด (ศาลไทย) เพื่อลงความเห็นว่าเป็นลายนิ้วมือของบุคคลคนเดียวกัน (Azman et al., 2019) ซึ่งจากการตรวจเปรียบเทียบจุดลักษณะสำคัญพิเศษระหว่างภาพถ่ายลายนิ้วมือที่บันทึกได้จากการตรวจหา LFPs โดยใช้ SiNPs-R6G ร่วมกับวิธีการกดทับที่พัฒนาขึ้น กับภาพพิมพ์ลายนิ้วมือของอาสาสมัคร พบว่าทุกภาพสามารถยืนยันเอกลักษณ์บุคคลได้ (ภาพที่ 8) แสดงให้เห็นว่าผง SiNPs-R6G สามารถเพิ่มความคมชัดให้กับเส้นรอยลายนิ้วมือได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากคุณสมบัติในการวาวแสงนั้นทำให้เส้นลายนิ้วมือที่ปรากฏติดกับพื้นผิวของวัตถุพยานได้อย่างชัดเจนซึ่งเป็นการลดการรบกวนจากพื้นหลัง นอกจากนั้นเพื่อเป็นการยืนยันว่าผง SiNPs-R6G ที่ถูกพัฒนาขึ้นจะสามารถนำไปใช้ในงานพิสูจน์หลักฐานได้จริง ผู้วิจัยจึงได้สอบถามข้อคิดเห็นเพื่อประเมินประสิทธิภาพและความเหมาะสมในการใช้ SiNPs-R6G จาก พ.ต.อ.หญิง สุรินทร์ ชมเสาร์หัส ซึ่งเป็นผู้เชี่ยวชาญที่มีประสบการณ์ในการชี้จุดสำคัญพิเศษมานานกว่า 20 ปี ซึ่งผู้เชี่ยวชาญได้ให้ความเห็นว่าการใช้ SiNPs-R6G ในการเพิ่มความคมชัดของ LFPs นั้นสามารถเพิ่มการมองเห็นของเส้นลายนิ้วมือให้ชัดเจนขึ้นได้แม้มองด้วยตาเปล่า สะดวกต่อการใช้งานเนื่องจากสามารถใช้ได้กับพื้นผิวที่หลากหลาย ทำให้ไม่เสียเวลาในการเปลี่ยนไปใช้ผงฝุ่นชนิดอื่น ๆ



กระดาดถ่ายเอกสารสีขาว



กระดาดถ่ายเอกสารแบบ
มีตัวหนังสือที่พื้นหลัง

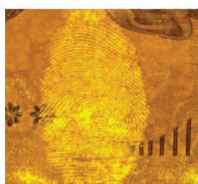


กระดาดเทอร์มอลสีขาว

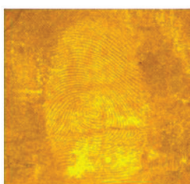


กระดาดเทอร์มอลแบบมี
ตัวหนังสือที่พื้นหลัง

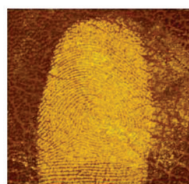
ตัวอย่างวัตถุประเภทที่มีพื้นผิวแบบมีรูพรุน



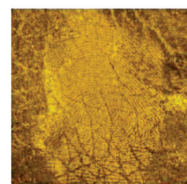
ธนบัตรฉบับละ 20 บาท
(ด้านหน้า)



ธนบัตรฉบับละ 20 บาท
(ด้านหลัง)

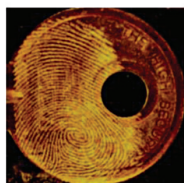


แผ่นหนังสืออ่อน

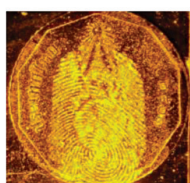


แผ่นหนังสือแข็ง

ตัวอย่างวัตถุประเภทที่มีพื้นผิวแบบกึ่งรูพรุน



กุญแจสแตนเลส



เหรียญกษาปณ์



กระຈกสไลด์



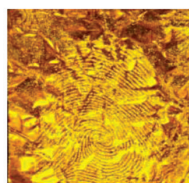
แผ่นทองแดง



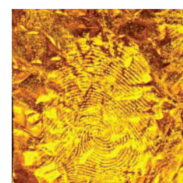
อลูมิเนียมฟอยล์
แบบเรียบด้านเงา



อลูมิเนียมฟอยล์
แบบเรียบด้านไม่เงา



อลูมิเนียมฟอยล์
แบบยับด้านเงา



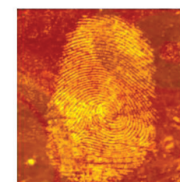
อลูมิเนียมฟอยล์
แบบยับด้านไม่เงา



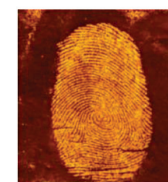
ถุงสีขาวขุ่น



ถุงจากร้านสะดวกซื้อ



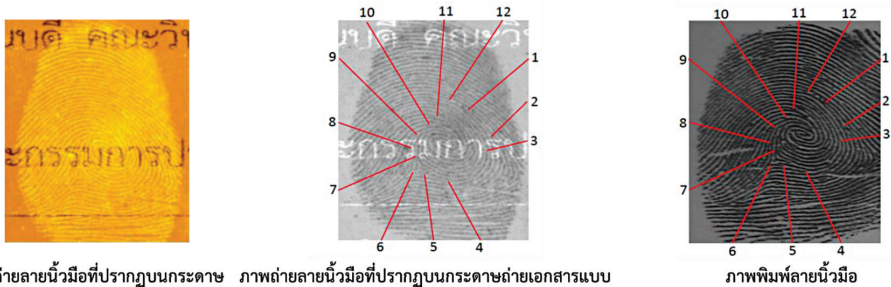
ถุงจากห้างสรรพสินค้า



ถุงดำ

ตัวอย่างวัตถุประเภทที่มีพื้นผิวแบบไม่มีรูพรุน

ภาพที่ 7 ภาพถ่ายลายนิ้วมือที่ปรากฏให้เห็นอย่างเด่นชัดเมื่อใช้ผงฝุ่น SiNPs-R6G ที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้
ร่วมกับวิธีการกดทับแทนการใช้วิธีการปิดผงฝุ่น สำหรับตรวจหา LFPs



ภาพถ่ายลายนิ้วมือที่ปรากฏบนกระดาษ
ถ่ายเอกสารแบบมีตัวหนังสือที่พื้นหลัง
ภายใต้แสงสีฟ้าที่มีความยาวคลื่น 505 nm
จากเครื่องฉายแสงโพลิโธรอน ผ่านฟิลเตอร์สี
ส้ม เมื่อเพิ่มความคมชัดโดยใช้ผงฝุ่น
SiNPs-R6G

ภาพถ่ายลายนิ้วมือที่ปรากฏบนกระดาษถ่ายเอกสารแบบ
มีตัวหนังสือที่พื้นหลัง หลังเปลี่ยนเป็นภาพสีขาว-ดำ
เพื่อให้ง่ายต่อการชี้จุดสำคัญพิเศษ

ภาพพิมพ์ลายนิ้วมือ

ภาพที่ 8 ตัวอย่างการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์บุคคลโดยอาศัยหลักการการตรวจเปรียบเทียบจุดลักษณะสำคัญพิเศษ

สรุป

งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จในการนำแอลบซึ่งเป็นวัสดุจากภาคเกษตรกรรมที่เหลือทิ้งอยู่เป็นจำนวนมากในแต่ละปี มาเพิ่มมูลค่าด้วยการนำไปใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการพัฒนาผงฝุ่นวาวแสงชนิดใหม่โดยใช้วิธีการสกัดและตกตะกอนเพื่อเอา SiO_2 ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักหนึ่งในแอลบมาเพิ่มความบริสุทธิ์และลดขนาดอนุภาคให้อยู่ในระดับนาโนเมตร แล้วจึงเคลือบด้วยสีย้อมเรืองแสงอินทรีย์ R6G เพื่อให้เป็นผงฝุ่นวาวแสงที่มีขนาดอนุภาคประมาณ 27 nm มีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง ซึ่งจะยิ่งช่วยเพิ่มความสามารถในการยึดติดระหว่างอนุภาคของผงฝุ่นกับความชื้นและไขมันที่ตกค้างอยู่บน LFPs ผ่านพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่คาร์บอกซิลของกรดอะมิโน โปรตีน และลิปิด กับหมู่ไฮดรอกซิลที่อยู่บนพื้นผิวของอนุภาคได้ โดยวิธีนำผงฝุ่นวาวแสง SiNPs-R6G ไปประยุกต์ในการตรวจหา LFPs เพื่อเพิ่มความคมชัดนั้น จะใช้วิธีการกดทับระหว่างผงฝุ่นกับพื้นผิวของวัตถุพยานโดยใช้ระยะเวลาเพียงแค่ 10 วินาที ก็สามารถเห็นเส้นลายนิ้วมือปรากฏขึ้นอย่างชัดเจนโดยไม่ต้องใช้วิธีการปิดและการลอกเทปที่ต้องอาศัยความชำนาญเพราะอาจทำลายลายเส้นของ LFPs ได้ อย่างไรก็ตามในกรณีนี้วัตถุพยานไม่ได้มีรูปร่างเป็นแผ่นแบบเรียบ สามารถใช้การปิดแทนการกดทับได้ ซึ่งผลการทดลองจากงานวิจัยแสดงให้เห็นเชิงประจักษ์ว่าผงฝุ่นวาวแสงชนิดใหม่พัฒนาขึ้นนี้มีข้อดีที่เด่นชัดกว่าผงฝุ่นทางการค้าหรือผงฝุ่นที่ถูกพัฒนาขึ้นในงานวิจัยอื่น คือ สามารถตรวจหา LFPs บนพื้นผิวของวัตถุพยานทั้งแบบไม่มีรูพรุน กึ่งรูพรุน และมีรูพรุน ได้ โดยพื้นผิวนั้นอาจเป็นพื้นผิวเรียบหรือพื้นผิวขรุขระ มีสีเข้มหรือสีสว่างก็ได้ ทำให้ง่ายต่อการใช้งานของเจ้าหน้าที่ตรวจสถานที่เกิดเหตุที่ไม่จำเป็นต้องเลือกวิธีการหา LFPs ให้เหมาะสมกับลักษณะของพื้นผิววัตถุพยาน ยิ่งไปกว่านั้นลายนิ้วมือที่ปรากฏขึ้นยังมีความคมชัดติดกับสีของพื้นหลัง สามารถนำไปชี้จุดลักษณะสำคัญพิเศษเพื่อตรวจเปรียบเทียบยืนยันตัวบุคคลได้ง่าย จึงได้รับการยอมรับที่จะนำไปใช้ในทางตรวจพิสูจน์หลักฐานจริง ซึ่งนอกจากจะช่วยให้เจ้าหน้าที่ปฏิบัติงานได้ง่ายขึ้นแล้ว ยังช่วยลดงบประมาณของภาครัฐในการสั่งซื้อสารเคมีหรือผงฝุ่นทางการค้าที่ต้องนำเข้าจากต่างประเทศได้อีกด้วย

นอกจากนี้ผู้วิจัยนำ SiNPs ที่เตรียมขึ้นจากแอลบมาพัฒนาเป็นผงฝุ่นวาวแสงชนิดใหม่แล้ว ผู้วิจัยยังได้นำ SiNPs ไปเคลือบด้วยสีย้อมจากธรรมชาติเพื่อพัฒนาเป็นผงฝุ่นสีต่าง ๆ สำหรับใช้ตรวจหา LFPs บนพื้นผิวของวัตถุพยานทั้งแบบไม่มีรูพรุน กึ่งรูพรุน และมีรูพรุน โดยพื้นผิวนั้นอาจเป็นพื้นผิวเรียบหรือพื้นผิวขรุขระได้อีกด้วย

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานพิสูจน์หลักฐานกลาง สำนักงานตำรวจแห่งชาติ ที่กรุณาให้คำแนะนำ และให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องฉายแสงโพลิไลต์ และขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่กรุณาสับสนุนงบประมาณในการดำเนินงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- Azman, A.R., Mahat, N.A., Wahub, R.A., Ahmad, W.A., Huri, M.A.M., & Hamzah, H.H. (2019). Relevant visualization technologies for latent fingerprints on wet objects and its challenges: a review. **Egyptian Journal of Forensic Sciences**, 9(23), 1-13.
- Boonsrila, M. (2016). **Community-based participatory design and development of environmentally friendly products from rice husk**. (Doctoral dissertation). Ubon Ratchathani University, Ubon Ratchathani.
- Champod, C., Lennard, C., Margot, P., & Stollovic, M. (2004). **Fingerprint and other ridge skin impressions**. (1st ed.). Boca Raton: CRC Press.
- Daluz, H.M. (2015). **Fundamentals of fingerprint analysis**. Boca Raton: CRC Press.
- Dhall, J.K., & Kapoor, A.K. (2016). Development of latent prints exposed to destructive crime scene conditions using wet powder suspensions. **Egyptian Journal of Forensic Sciences**, 6(4), 396-404.
- Garg, R.K., Kumari, H., & Kaur, R. (2011). A new technique for visualization of latent fingerprints on various surfaces using powder from turmeric: a rhizomatous herbaceous Plant (*Curcuma longa*). **Egyptian Journal of Forensic Sciences**, 1(1), 53-57.
- Ghorbani, F., Sanati, A., & Maleki, M. (2015). Production of silica nanoparticles from rice husk as agricultural waste by environmental friendly technique. **Environmental Studies of Persian Gulf**, 2(1), 56-65.
- Hazarika, P., & Russell, D.A. (2012). Advances in fingerprint analysis. **Angewandte Chemie International Edition**, 51(15), 3524-3531.
- Huang, W., Li, X., Wang, H., Xu, X., Liu, H., & Wang, G. (2015). Synthesis of amphiphilic silica nanoparticles for latent fingerprint detection. **Analytical Letters**, 48(9), 1524-1535.
- Jenie, S.N.A., Krismastuti, F.S.H., Ningrum, Y.P., Kristiani, A., Yuniati, M.D., Astuti, W., & Petrus, H.T.B.M. (2020). Geothermal silica-based fluorescent nanoparticles for the visualization of latent fingerprints. **Materials Express**, 10(2), 258-266.
- Kim, Y., Jung, H., Lim, J., Ryu, S., & Lee, J. (2016). Rapid imaging of latent fingerprints using biocompatible fluorescent silica nanoparticles. **Langmuir**, 32(32), 8077-8083.
- Laganá, A., & Parker, G.A. (2018). **Chemical reaction: basic theory and computing**. (1st ed.). Cham: Springer.

- Lee, H.C., & Gaenssien, R.E. (2012). **Lee and Gaenssien's: advances in fingerprint technology**. (3rd ed.). Boca Raton: CRC Press.
- Nhung, D.T.T., Hoa, T., Trinh, N.T.N., Phu, D.V., Tuan, P.D., & Hien, N.O. (2017). Synthesis of silica nanoparticles from rice husk ash. **Science and Technology Development Journal**, 20(K7), 50-54.
- Pacheco-Torgal, F., Lourenço, P.B., Labrincha, J.A., Kumar, S., & Chindapasirt, P. (2015). **Eco-efficient masonry bricks and blocks: design, properties and durability**. Cambridge: Woodhead Publishing.
- Prabakaran, E., & Pillay, K. (2021). Nanomaterials for latent fingerprint detection: a review. **Journal of Materials Research and Technology**, 12(1), 1856-1885.
- Rajan, R., Zakaria, Y., Shamsuddin, S., & Hassan, N.F.N. (2018). Nanocarbon powder for latent fingermark development: a green chemistry approach. **Egyptian Journal of Forensic Sciences**, 8(60), 1-10.
- Rajan, R., Zakaria, Y., Shamsuddin, S., & Hassan, N.F.N. (2019). Fluorescent variant of silica nanoparticle powder synthesised from rice husk for latent fingerprint development. **Egyptian Journal of Forensic Sciences**, 9(50), 1-9.
- Rojas, D.F.H., Gómez, P.P., & Rivera, A.R. (2019). Production and characterization of silica nanoparticles from rice husk. **Advanced Materials Letters**, 10(1), 67-73.
- Sears, V.G., Bleay, S.M., Bander, H.L., & Bowman, V.J. (2012). A methodology for fingermark research. **Science & Justice**, 52(3), 145-160.
- Suteerakune, P. (2018). **The use of forensic investigation (facial recognition) in the field of integrated security**. (Report in National Defence College class). Bangkok: Royal Thai Police.
- Thongthammachad, R., & Wichuwanich, W. (2019). The development of fingerprint powder made from black rice husk for detecting latent fingerprints on different types of surfaces. **Journal of Criminology and Forensic Science**, 5(2), 87-103.
- Vibuljan, S. (2005). **Organic chemistry**. Bangkok: Mahidol University Press.



ผลการฝึกแบบหนักสลับเบาที่มีต่อความอดทนของระบบหายใจและไหลเวียนโลหิต
ของนักกีฬาแบดมินตัน โรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัยรามคำแหง (ฝ่ายประถม)

THE EFFECT OF INTERVAL TRAINING ON CARDIORESPIRATORY ENDURANCE
OF RAMKHAMHAENG UNIVERSITY DEMONSTRATION SCHOOL
(ELEMENTARY LEVEL) BADMINTON ATHLETES

สุกฤษฎี ฤทธิธรรม^{1*} และ สาธิน ประจันบาน²

¹สาขาวิชาสุขศึกษาและพลศึกษา คณะพลศึกษา มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

Sukrit Ritthitham^{1*} and Sathin Prachanban²

¹Health Education & Physical Education, Faculty of Physical Education, Srinakharinwirot University

*E-mail: Sukrit.ritthitham@g.swu.ac.th

Received: 2021-07-06

Revised: 2021-07-14

Accepted: 2021-07-15

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาและเปรียบเทียบผลการฝึกแบบหนักสลับเบาที่มีต่อความอดทนของระบบหายใจและไหลเวียนโลหิตของนักกีฬาแบดมินตัน โรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัยรามคำแหง (ฝ่ายประถม) กลุ่มตัวอย่างเป็นนักกีฬาแบดมินตัน จำนวน 30 คน แบ่งกลุ่มออกเป็น 3 กลุ่ม ๆ ละ 10 คน ดังนี้ กลุ่มการฝึกแบบสลับช่วงสั้น กลุ่มการฝึกแบบสลับช่วงกลาง และกลุ่มการฝึกปกติ เครื่องมือที่ใช้มี 4 ชนิด ได้แก่ 1) โปรแกรมการฝึกหนักสลับเบาแบบสลับช่วงสั้น 2) โปรแกรมการฝึกแบบหนักสลับเบาแบบสลับช่วงกลาง 3) แบบทดสอบความอดทนแบบใช้ออกซิเจน 4) แบบทดสอบความอดทนแบบไม่ใช้ออกซิเจน ผลการวิจัยพบว่า 1) กลุ่มการฝึกแบบสลับช่วงสั้น กลุ่มการฝึกแบบสลับช่วงกลาง และกลุ่มการฝึกปกติ หลังการฝึกดีกว่าก่อนการฝึกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 2) การฝึกหนักสลับเบาแบบสลับช่วงสั้นและการฝึกหนักสลับเบาแบบช่วงกลาง ส่งผลต่อความอดทน แบบไม่ใช้ออกซิเจน ประเมินจากค่าเวลาที่ต่ำที่สุด (RSSA best) และค่าเวลาเฉลี่ย (RSSA mean) ในหลังการฝึกสัปดาห์ที่ 4 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 และ 3) ปฏิสัมพันธ์ระหว่างโปรแกรมการฝึกและระยะเวลาในการฝึกร่วมกัน ส่งผลต่อความอดทน ทั้งแบบใช้ออกซิเจน และแบบไม่ใช้ออกซิเจนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05

คำสำคัญ: การฝึกแบบหนักสลับเบา, ความอดทนของระบบหายใจและไหลเวียนโลหิต, นักกีฬาแบดมินตัน

ABSTRACT

This research were to study and compare the Interval training to the cardiorespiratory endurance and blood circulation of Satit Ramkhamhaeng Demonstration School Elementary Department's Badminton athletes. The sample consists of 30 Badminton athletes. The sample group was divided on 3 sub-groups each consisting of 10 participants: interval training group, Intermediate-interval training, and the control group. The instrument was 4 types: 1. Short-interval training 2. Intermediate-interval training 3. Multistage Fitness Test: Beep Test 4. Repeated-Shuttle Sprint Ability: RSSA. The study revealed that: Firstly, for the Beep Test and RSSA, all 3 sub-groups were better at training than before at significant of .05 level. Secondly, the comparison between different lengths of interval tests showed different effects on cardiorespiratory endurance and blood circulation. Short-interval and Intermediate-interval significantly affects the RSSA endurance measured by RSSA best value and RSSA mean after four weeks of training at .05 level. Thirdly, interaction between training programs and training duration together greatly affects endurance for both Beep test and RSSA between three sample groups at .05 level.

Keywords: Interval training, Cardiorespiratory Endurance, Badminton Athletes

บทนำ

ในระดับการแข่งขันกีฬาแบดมินตันเป็นกีฬาที่ต้องใช้ความสามารถสมรรถภาพทางกายในระดับสูง โดยมีลักษณะการเคลื่อนไหวอย่างรวดเร็วฉับพลันสลับกับความเร็วที่ลดลงตลอดทั้งการแข่งขันและพักระหว่างคะแนนเพียง 7-15 นาทีหรือน้อยกว่านั้น ความอดทนของระบบหายใจและไหลเวียนโลหิตถือได้ว่าเป็นระบบพื้นฐาน ที่สำคัญอย่างยิ่งต่อนักกีฬาแบดมินตัน หากร่างกายของนักกีฬาแบดมินตันมีความอดทนของระบบหายใจ และไหลเวียนโลหิตที่ดี นักกีฬาก็จะมีการฟื้นได้รวดเร็วและเกิดข้อได้เปรียบในการแข่งขัน โดยที่อัตราการเต้น ของหัวใจจะมีอัตราความเร็วลดลง ส่งผลให้นักกีฬาสามารถแสดงทักษะได้อย่างต่อเนื่องเป็นอย่างดี (Phomsoupha & laffaye, 2014)

การฝึกหนักสลับเบาเป็นรูปแบบการฝึกที่ปัจจุบันนิยมนำมาใช้พัฒนาความอดทนของระบบหายใจ และไหลเวียนโลหิตเป็นอย่างมาก เนื่องจากมีงานวิจัยได้ศึกษาจาก (Mehdi et al., 2012) พบว่า การฝึกหนักสลับเบาสามารถพัฒนาค่า $VO_2\text{Max}$ ให้เพิ่มสูงขึ้นได้แต่ใช้ระยะเวลาในการฝึกน้อยกว่าการฝึกแบบต่อเนื่อง (Continuous training) และที่สำคัญยังสามารถพัฒนาเพดานของระบบพลังงานแอโรบิก (Anaerobic threshold) ให้เพิ่มสูงขึ้นได้อีกด้วย ซึ่งสอดคล้องกับ (Kachayut, 2019) ได้ศึกษาเกี่ยวกับวิจัยเรื่อง ผลของการฝึกโปรแกรมแบบสแตทีและการฝึกแบบหนักสลับเบา ที่มีต่อความอดทนระบบไหลเวียนโลหิตของนักกีฬาฟุตซอล โรงเรียนวัดราชบพิธ พบว่า ผลการฝึกโปรแกรมแบบสแตทีและการฝึกโปรแกรมแบบหนักสลับเบา สามารถพัฒนาความอดทนของระบบไหลเวียนโลหิตของนักกีฬาฟุตซอลสามารถพัฒนาความอดทนของระบบไหลเวียนโลหิตได้ดีกว่าโปรแกรมปกติ

โรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัยรามคำแหง (ฝ่ายประถม) ได้เข้าร่วมการแข่งขันกีฬาสาธิตสามัคคีและในทุกปีทางโรงเรียนได้ส่งกีฬาแบดมินตันเข้าร่วมในการแข่งขันและพบปัญหาว่า นักกีฬามีอาการเหนื่อยล้าและฟื้นตัวช้าเนื่องจากกีฬาแบดมินตันเป็นกีฬาที่มีการแข่งขันต่อเนื่องในหนึ่งรายการโดยจะต้องทำการแข่งขันทุกวันจนถึงรอบชิงชนะเลิศ

จากประเด็นดังกล่าวทำให้ผู้วิจัยสนใจรูปแบบการฝึกหนักสลับเบามาใช้ในการฝึกเพราะการฝึกหนักสลับเบา มีรูปแบบการเคลื่อนไหวที่คล้ายกับกีฬาแบดมินตัน ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่สลับกับการหยุด แต่ต้องใช้ระยะเวลา 6-8 สัปดาห์และต้องกระทำอย่างต่อเนื่องเป็นลำดับขั้นตอน (Buthmuang, 2019) ในฐานะที่ผู้วิจัย เป็นผู้ฝึกสอน นักกีฬาจึงสนใจศึกษาถึงผลของโปรแกรมการฝึกหนักสลับเบาที่มีต่อความอดทนของระบบหายใจและไหลเวียนโลหิตของนักกีฬาแบดมินตันโรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัยรามคำแหง (ฝ่ายประถม) เพื่อพัฒนาสมรรถภาพร่างกายของนักกีฬาให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

วิธีการ

กลุ่มตัวอย่าง

กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้เป็นนักเรียนประถมศึกษาชายที่เป็นนักกีฬาแบดมินตันตัวแทนของโรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัยรามคำแหง (ฝ่ายประถม) จำนวน 30 คน แบ่งกลุ่มออกเป็น 3 กลุ่ม ๆ ละ 10 คน ประกอบด้วย 1) กลุ่มการฝึกแบบสลับช่วงสั้น 2) กลุ่มการฝึกแบบสลับช่วงกลาง และ 3) กลุ่มการฝึกปกติ โดยใช้วิธีการจับคู่ (Matching group) โดยเรียงตามลำดับค่า $VO_2\text{Max}$ จากมากไปน้อย

แบบแผนการทดลอง

แบบแผนการทดลองคือ แบบหลายกลุ่มอนุกรมเวลา (Multi-groups Time Series Design) โดยมีระยะเวลาในการทดลอง 8 สัปดาห์ ดำเนินการวัดผลค่าของตัวแปรตามก่อนการทดลอง หลังการทดลองครั้งที่ 1 (4 สัปดาห์) หลังการทดลองครั้งที่ 2 (6 สัปดาห์) และหลังการทดลองครั้งที่ 3 (8 สัปดาห์) ตามลำดับ

การสร้างเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

1. แบบทดลองที่ใช้ในการวิจัย

1.1 เครื่องมือทดลอง คือ โปรแกรมการฝึกความอดทนของระบบหายใจและไหลเวียนโลหิต ซึ่งประกอบด้วยโปรแกรมการฝึกตามปกติ และโปรแกรมการฝึกแบบหนักสลับเบาที่ผู้วิจัยสร้างขึ้น

1.2 การสร้างและการพัฒนาโปรแกรมฝึก คือ การสร้างและการพัฒนาโปรแกรมฝึกนำโปรแกรมการฝึกที่ผู้วิจัยสร้างขึ้น พิจารณาตรวจสอบความตรงเชิงเนื้อหา (Content Validity) โดยผู้เชี่ยวชาญจำนวน 5 ท่าน เพื่อหาค่าความสอดคล้องตามวัตถุประสงค์ (Index of Item objective Congruence: IOC) ซึ่งได้ค่าความตรงเชิงเนื้อหา ดังนี้

1.1.1 โปรแกรมการฝึกแบบหนักสลับเบาแบบสลับช่วงสั้น (Short-Interval Training) ที่ผู้วิจัยสร้างขึ้น มีค่าความเที่ยงตรงเชิงเนื้อหา (IOC = 1)

1.1.2 โปรแกรมการฝึกแบบหนักสลับเบาแบบสลับช่วงกลาง (Intermediate-Interval Training) ที่ผู้วิจัยสร้างขึ้น มีค่าความเที่ยงตรงเชิงเนื้อหา (IOC = 1)

2. เครื่องมือในการวัดผล

2.1 แบบทดสอบความอดทนของระบบหายใจและไหลเวียนโลหิต มี 2 ชุด คือ

2.1.1 แบบทดสอบความอดทนของระบบหายใจและไหลเวียนโลหิตแบบใช้ออกซิเจน (Multistage Fitness Test: Beep Test)

2.1.2 แบบทดสอบความอดทนของระบบหายใจและไหลเวียนโลหิตแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Repeated - Shuttle Sprint Ability: RSSA)

2.2 การสร้างและการพัฒนาแบบทดสอบ คือนำแบบทดสอบทั้ง 2 แบบไปทดสอบซ้ำเพื่อหาความเชื่อมั่นของแบบทดสอบกับประชากรที่ไม่ใช่กลุ่มตัวอย่าง จำนวน 30 คน ด้วยวิธีการทดสอบซ้ำ (Test – retest method) โดยแบ่งช่วงระยะเวลาในการทดสอบ 1 – 2 สัปดาห์แล้วนำคะแนนการทดสอบทั้งสองครั้งมาหาความสัมพันธ์กันค่าที่ได้เรียกค่าสัมประสิทธิ์ของความคงที่ (Coefficient of stability) สูตรที่ใช้คำนวณหาความเชื่อมั่น กรณีนี้คือสูตรการหาสัมประสิทธิ์สหพันธ์อย่างง่าย ของเพียร์สัน (Pearson’s Product Moment Correlation Coefficient) หลังจากการทดสอบได้ค่าความเชื่อมั่น $r = 0.81$

การวิเคราะห์ข้อมูล

1. วิเคราะห์ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ความอดทนทั้งแบบใช้ออกซิเจน ประเมินจากค่า $VO_2\text{Max}$ และแบบไม่ใช้ออกซิเจน ประเมินจากค่าเวลาที่ดียที่สุด (RSSA best) ค่าเวลาเฉลี่ย (RSSA mean) และค่าดัชนีความเหนื่อยล้า (Fatigue Index)
2. วิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวชนิดวัดซ้ำ (One-way ANOVA with repeated measures) เพื่อทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย $VO_2\text{Max}$ ค่าเวลาที่ดียที่สุด (RSSA best) ค่าเวลาเฉลี่ย (RSSA mean) และค่าดัชนีความเหนื่อยล้า (Fatigue Index) ก่อนและหลังการทดลองครั้งที่ 1, 2, 3 ตามลำดับ ในแต่ละกลุ่มทดลอง กรณีที่พบมีความแตกต่างทำการทดสอบรายคู่ด้วยสถิติ Least Significant Different (LSD)
3. วิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางชนิดวัดซ้ำ (Two-way ANOVA with repeated measures) เพื่อทดสอบปฏิสัมพันธ์ระหว่างโปรแกรมการฝึกและระยะเวลาในการฝึกที่มีต่อค่าเฉลี่ย $VO_2\text{Max}$ ค่าเวลาที่ดียที่สุด (RSSA best) ค่าเวลาเฉลี่ย (RSSA mean) และค่าดัชนีความเหนื่อยล้า (Fatigue Index) ตลอดจนการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย $VO_2\text{Max}$ ค่าเวลาที่ดียที่สุด (RSSA best) ค่าเวลาเฉลี่ย (RSSA mean) และค่าดัชนีความเหนื่อยล้า (Fatigue Index) ที่เกิดจากการได้รับโปรแกรมการฝึกที่ต่างกัน กรณีที่พบมีความแตกต่างทำการทดสอบรายคู่ด้วยสถิติ Least Significant Different (LSD)

ผลการทดลองและวิจารณ์

ตอนที่ 1 ผลการวิเคราะห์ความอดทนของระบบหายใจและระบบไหลเวียนโลหิตทั้งแบบใช้ออกซิเจน ประเมินจากค่า $VO_2\text{Max}$ และแบบไม่ใช้ออกซิเจน ประเมินจากค่าเวลาที่ดียที่สุด (RSSA best) ค่าเวลาเฉลี่ย (RSSA mean) และค่าดัชนีความเหนื่อยล้า (Fatigue Index)

ผลการทดสอบความอดทนแบบใช้ออกซิเจน ประเมินจากค่า $VO_2\text{Max}$ ของกลุ่มการฝึกแบบสลับช่วงสั้น ก่อนการฝึก มีค่าเฉลี่ย 33.090 (SD = 3.085) และหลังการฝึกสัปดาห์ที่ 8 มีค่าเฉลี่ย 44.430 (SD = 3.686) กลุ่มการฝึกแบบสลับช่วงกลาง ก่อนการฝึก มีค่าเฉลี่ย 33.090 (SD = 3.126) และหลังการฝึกสัปดาห์ที่ 8 มีค่าเฉลี่ย 44.840 (SD = 3.633) กลุ่มการฝึกปกติ ก่อนการฝึก มีค่าเฉลี่ย 32.890 (SD = 3.228) และหลังการฝึกสัปดาห์ที่ 8 มีค่าเฉลี่ย 41.310 (SD = 2.796)

ผลการทดสอบความอดทนแบบไม่ใช้ออกซิเจน ประเมินจากค่าเวลาที่ดียที่สุด (RSSA best) ของกลุ่มการฝึกแบบสลับช่วงสั้น ก่อนการฝึก มีค่าเฉลี่ย 7.960 (SD = .843) และหลังการฝึกสัปดาห์ที่ 8 มีค่าเฉลี่ย 7.839 (SD = .767) กลุ่มการฝึกแบบสลับช่วงกลาง ก่อนการฝึก มีค่าเฉลี่ย 8.590 (SD = .836) และหลังการฝึกสัปดาห์

ที่ 8 มีค่าเฉลี่ย 8.434 (SD = .841) กลุ่มการฝึกปกติ ก่อนการฝึก มีค่าเฉลี่ย 9.313 (SD=.904) และหลังการฝึก สัปดาห์ที่ 8 มีค่าเฉลี่ย 9.297 (SD = .892)

ผลการทดสอบความอดทนแบบไม่ใช้ออกซิเจน ประเมินจากค่าเวลาเฉลี่ย (RSSA mean) ของกลุ่มการฝึก แบบสลับช่วงสั้น ก่อนการฝึก มีค่าเฉลี่ย 8.226 (SD = .758) และหลังการฝึกสัปดาห์ที่ 8 มีค่าเฉลี่ย 7.899 (SD = .742) กลุ่มการฝึกแบบสลับช่วงกลาง ก่อนการฝึก มีค่าเฉลี่ย 8.899 (SD = .782) และหลังการฝึกสัปดาห์ที่ 8 มีค่าเฉลี่ย 8.546 (SD = .826) กลุ่มการฝึกปกติ ก่อนการฝึก มีค่าเฉลี่ย 9.512 (SD = .872) และหลังการฝึก สัปดาห์ที่ 8 มีค่าเฉลี่ย 9.428 (SD=.869)

ผลการทดสอบความอดทนแบบไม่ใช้ออกซิเจน ประเมินจากค่าดัชนีความเหนื่อยล้า (Fatigue Index) ของกลุ่มการฝึกแบบสลับช่วงสั้น ก่อนการฝึก มีค่าเฉลี่ย 3.42 (SD = 1.26) หลังการฝึกสัปดาห์ที่ 8 มีค่าเฉลี่ย 0.80 (SD = 0.55) กลุ่มการฝึกแบบสลับช่วงกลาง ก่อนการฝึก มีค่าเฉลี่ย 3.68 (SD = 1.48) หลังการฝึกสัปดาห์ที่ 8 มีค่าเฉลี่ย 1.35 (SD = 0.81) กลุ่มการฝึกปกติ ก่อนการฝึก มีค่าเฉลี่ย 2.18 (SD = 1.27) หลังการฝึกสัปดาห์ที่ 8 มีค่าเฉลี่ย 1.44 (SD = 0.49)

ตอนที่ 2 ผลการวิเคราะห์ความอดทนทั้งแบบใช้ออกซิเจน ประเมินจากค่า VO_2 Max และแบบไม่ใช้ออกซิเจน ประเมินจากค่าเวลาที่ดีที่สุด (RSSA best) ค่าเวลาเฉลี่ย (RSSA mean) และค่าดัชนีความเหนื่อยล้า (Fatigue Index) ของกลุ่มตัวอย่าง 3 กลุ่ม

ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยความอดทนแบบใช้ออกซิเจน ประเมินจากค่า VO_2 Max ก่อนการฝึกหลังการฝึกสัปดาห์ที่ 4, 6 และ 8 ของกลุ่มตัวอย่าง 3 กลุ่ม

แหล่งความแปรปรวน	F	Sig
การฝึกแบบสลับช่วงสั้น	361.148*	<.001
การฝึกแบบสลับช่วงกลาง	611.853*	<.001
การฝึกแบบปกติ	810.357*	<.001

*มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05

จากตารางที่ 1 กลุ่มการฝึกแบบสลับช่วงสั้น กลุ่มการฝึกแบบสลับช่วงกลาง และ กลุ่มการฝึกปกติ พบว่า ระยะเวลาในการฝึก ส่งผลต่อความอดทนแบบใช้ออกซิเจน ประเมินจากค่า VO_2 Max อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับ .05 ในทุกกลุ่ม

สำหรับผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยความอดทนแบบใช้ออกซิเจน จำแนกตามระยะเวลา การฝึก เป็นรายคู่ด้วยวิธี LSD พบว่า ค่าเฉลี่ยของความอดทนแบบใช้ออกซิเจนหลังการฝึก 8 สัปดาห์ สูงกว่าก่อนการฝึก หลังการฝึก 4 สัปดาห์ และหลังการฝึก 6 สัปดาห์ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 หลังการฝึก 6 สัปดาห์ สูงกว่า ก่อนการฝึก และหลังการฝึก 4 สัปดาห์ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 และหลังการฝึก 4 สัปดาห์ สูงกว่า ก่อนการฝึก อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยความอดทนแบบไม่ใช้ออกซิเจน ประเมินจากค่าเวลาที่ดียที่สุด (RSSA best) ก่อนการฝึก หลังการฝึกสัปดาห์ที่ 4, 6 และ 8 ของกลุ่มตัวอย่าง 3 กลุ่ม

แหล่งความแปรปรวน	F	Sig
การฝึกแบบสลับช่วงสั้น	9.391*	<.001
การฝึกแบบสลับช่วงกลาง	23.586*	<.001
การฝึกแบบปกติ	5.821*	<.001

*มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05

จากตารางที่ 2 ในกลุ่มการฝึกแบบสลับช่วงสั้น กลุ่มการฝึกแบบสลับช่วงกลาง และกลุ่มการฝึกปกติ มีระยะเวลาในการฝึกที่ส่งผลความอดทนแบบไม่ใช้ออกซิเจน ประเมินจากค่าเวลาที่ดียที่สุด (RSSA best) ก่อนการฝึก อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ.05

สำหรับผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยความอดทนแบบไม่ใช้ออกซิเจน ประเมินจากค่าเวลาที่ดียที่สุด (RSSA best) ก่อนการฝึกของกลุ่มทดลองที่ 1 เป็นรายคู่ด้วยวิธี LSD พบว่า ค่าเฉลี่ยของความอดทนแบบไม่ใช้ออกซิเจน ประเมินจากค่าเวลาที่ดียที่สุด (RSSA best) หลังการฝึก 8 สัปดาห์ สูงกว่าก่อนการฝึก หลังการฝึก 4 สัปดาห์ และหลังการฝึก 6 สัปดาห์ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 หลังการฝึก 6 สัปดาห์ สูงกว่าก่อนการฝึก และหลังการฝึก 4 สัปดาห์ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 และหลังการฝึก 4 สัปดาห์ สูงกว่าก่อนการฝึก อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยความอดทนแบบไม่ใช้ออกซิเจน ประเมินจากค่าเวลาเฉลี่ย (RSSA mean) ก่อนการฝึก หลังการฝึกสัปดาห์ที่ 4, 6 และ 8 ของกลุ่มตัวอย่าง 3 กลุ่ม

แหล่งความแปรปรวน	F	Sig
การฝึกแบบสลับช่วงสั้น	38.393*	<.001
การฝึกแบบสลับช่วงกลาง	39.798*	<.001
การฝึกแบบปกติ	11.375*	<.001

*มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05

จากตารางที่ 3 กลุ่มการฝึกแบบสลับช่วงสั้น กลุ่มการฝึกแบบสลับช่วงกลาง และกลุ่มการฝึกปกติ พบว่า ระยะเวลาในการฝึกส่งผลต่อความอดทนแบบไม่ใช้ออกซิเจน ประเมินจากค่าเวลาเฉลี่ย (RSSA mean) ก่อนการฝึก อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 ในทุกกลุ่ม

สำหรับผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยความอดทนแบบไม่ใช้ออกซิเจน ประเมินจากค่าเวลาเฉลี่ย (RSSA mean) ก่อนการฝึก หลังการฝึกสัปดาห์ที่ 4, 6 และ 8 ของกลุ่มทดลองที่ 1 เป็นรายคู่ด้วยวิธี LSD พบว่า ค่าเฉลี่ยของความอดทนแบบไม่ใช้ออกซิเจน ประเมินจากค่าเวลาเฉลี่ย (RSSA mean) หลังการฝึก 8 สัปดาห์ สูงกว่า ก่อนการฝึก หลังการฝึก 4 สัปดาห์ และหลังการฝึก 6 สัปดาห์ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 หลังการฝึก 6 สัปดาห์ สูงกว่าก่อนการฝึก และหลังการฝึก 4 สัปดาห์ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 และหลังการฝึก 4 สัปดาห์ สูงกว่าก่อนการฝึก อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียวแบบวัดซ้ำเพื่อทดสอบความแตกต่างความอดทนแบบไม่ใช้ออกซิเจน ซึ่งประเมินค่าดัชนีความเหนื่อยล้า (Fatigue Index) ก่อนการฝึก หลังการฝึกสัปดาห์ที่ 4, 6 และ 8 ของกลุ่มตัวอย่าง 3 กลุ่ม

แหล่งความแปรปรวน	F	Sig
การฝึกแบบสลับช่วงสั้น	19.937*	<.001
การฝึกแบบสลับช่วงกลาง	10.312	<.001
การฝึกแบบปกติ	6.122	.021

*มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05

จากตารางที่ 4 พบว่า กลุ่มการฝึกแบบสลับช่วงสั้น กลุ่มการฝึกแบบสลับช่วงกลาง และกลุ่มการฝึกปกติ ระยะเวลาในการฝึกส่งผลต่อความอดทนแบบใช้ออกซิเจน ประเมินจากค่าดัชนีความเหนื่อยล้า (Fatigue Index) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05

สำหรับผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยความอดทนแบบไม่ใช้ออกซิเจน ประเมินจากค่าดัชนีความเหนื่อยล้า (Fatigue Index) ก่อนการฝึก หลังการฝึกสัปดาห์ที่ 4, 6 และ 8 ของกลุ่มทดลองที่ 1 เป็นรายคู่ด้วยวิธี LSD พบว่า ทุกกลุ่มตัวอย่างค่าเฉลี่ยของความอดทนแบบไม่ใช้ออกซิเจน ประเมินจากค่าดัชนีความเหนื่อยล้า (Fatigue Index) หลังการฝึก 8 สัปดาห์ สูงกว่าก่อนการฝึก หลังการฝึก 4 สัปดาห์ และหลังการฝึก 6 สัปดาห์ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 ,หลังการฝึก 6 สัปดาห์ สูงกว่าก่อนการฝึก และหลังการฝึก 4 สัปดาห์ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 และหลังการฝึก 4 สัปดาห์ สูงกว่าก่อนการฝึก อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05

ตอนที่ 3 ผลการวิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์ระหว่างโปรแกรมการ ฝึกและระยะเวลาในการฝึกของความอดทนของระบบหายใจและระบบไหลเวียนโลหิต ทั้งแบบใช้ออกซิเจน ประเมินจากค่า VO_2 Max และแบบไม่ใช้ออกซิเจน ประเมินจากค่าเวลาที่ต่ำที่สุด (RSSA best) ,ค่าเวลาเฉลี่ย (RSSA mean) และค่าดัชนีความเหนื่อยล้า (Fatigue Index)

ตารางที่ 5 แสดงผลการวิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์ระหว่างโปรแกรมการฝึกและระยะเวลาในการฝึกของความสามารถของระบบหายใจและระบบไหลเวียนโลหิตทั้งแบบใช้ออกซิเจน ประเมินจากค่า VO_2 Max ของกลุ่มตัวอย่าง 3 กลุ่ม

แหล่งความแปรปรวน	F	Sig
ระยะเวลาในการฝึก	1484.905*	<.001
โปรแกรมการฝึก	.916	.412
ระยะเวลาในการฝึก* โปรแกรมการฝึกความคลาดเคลื่อน	14.144*	<.001

*มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05

จากตารางที่ 5 พบว่า ระยะเวลาในการฝึก ส่งผลต่อความสามารถของระบบหายใจและระบบไหลเวียนโลหิตแบบใช้ออกซิเจน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 และพบว่า ปฏิสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการฝึก และโปรแกรมการฝึกร่วมกัน ส่งผลต่อความสามารถของระบบหายใจและระบบไหลเวียนโลหิตแบบใช้ออกซิเจน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05

สำหรับผลการวิเคราะห์ความแตกต่างรายคู่ค่าเฉลี่ย VO_2 Max ด้วยวิธี LSD ที่เกิดขึ้นจากโปรแกรมการฝึกแบบต่าง ๆ ณ แต่ละช่วงระยะเวลาการฝึกที่แตกต่างกัน พบว่า ช่วงระยะเวลาลงการฝึก 8 สัปดาห์ กลุ่มตัวอย่างที่ได้รับการฝึกแบบสลับช่วงสั้นและแบบสลับช่วงกลาง มีค่าเฉลี่ย VO_2 Max ต่ำกว่ากลุ่มตัวอย่างที่ได้รับการฝึกแบบปกติ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 ในขณะที่ก่อนการฝึก หลังการฝึก 4 สัปดาห์ และหลังการฝึก 6 สัปดาห์ ไม่พบความแตกต่าง

ตารางที่ 6 แสดงผลการวิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์ระหว่างโปรแกรมการฝึก และระยะเวลาในการฝึกของความสามารถแบบไม่ใช้ออกซิเจน ประเมินจากค่าเวลาที่ต่ำที่สุด (RSSA best) ของกลุ่มตัวอย่าง 3 กลุ่ม

แหล่งความแปรปรวน	F	Sig
ระยะเวลาในการฝึก	30.843*	<.001
โปรแกรมการฝึก	7.195*	.003
ระยะเวลาในการฝึก* โปรแกรมการฝึกความคลาดเคลื่อน	5.875*	.001

*มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05

จากตารางที่ 6 พบว่า ระยะเวลาในการฝึกส่งผลต่อความอดทนของระบบหายใจและระบบไหลเวียนโลหิตแบบไม่ใช้ออกซิเจน โดยประเมินจากค่าเวลาที่ตีที่สุด (RSSA best) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 และพบว่า ปฏิสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการฝึกและโปรแกรมการฝึกร่วมกันส่งผลต่อความอดทนของระบบหายใจและระบบไหลเวียนโลหิตแบบไม่ใช้ออกซิเจน ประเมินจากค่าเวลาที่ตีที่สุด (RSSA best) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 นอกจากนี้ยังพบว่า โปรแกรมการฝึก ที่แตกต่างกัน ส่งผลต่อความอดทนของระบบหายใจและระบบไหลเวียนโลหิตแบบไม่ใช้ออกซิเจน ประเมินจากค่าเวลาที่ตีที่สุด (RSSA best) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05

สำหรับผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยความอดทนแบบไม่ใช้ออกซิเจน ประเมินจากค่าเวลาที่ตีที่สุด (RSSA best) ก่อนการฝึก หลังการฝึกสัปดาห์ที่ 4, 6 และ 8 ของกลุ่มทดลองที่ 1 เป็นรายคู่ด้วยวิธี LSD พบว่า การฝึกแบบสลับช่วงสั้น และการฝึกแบบสลับช่วงกลาง ส่งผลต่อค่าเฉลี่ยความอดทนแบบไม่ใช้ออกซิเจน ประเมินจากค่าเวลาที่ตีที่สุด (RSSA best) ดีกว่าการฝึกแบบปกติ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05

ส่วนผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยของค่าเวลาที่ตีที่สุด (RSSA best) ที่เกิดขึ้นจากการได้รับโปรแกรมการฝึกแบบต่าง ๆ ณ แต่ละช่วงระยะเวลาการฝึกที่แตกต่างกัน เป็นรายคู่ด้วยวิธี LSD พบว่า กลุ่มที่รับการฝึกแบบสลับช่วงสั้น มีค่าเฉลี่ยของค่าเวลาที่ตีที่สุด (RSSA best) ดีกว่ากลุ่มฝึกแบบปกติ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 และกลุ่มรับการฝึกแบบสลับช่วงสั้นและกลุ่มรับการฝึกแบบสลับช่วงกลาง มีค่าเฉลี่ยของค่าเวลาที่ตีที่สุด (RSSA best) ดีกว่ากลุ่มฝึกแบบปกติ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05

ตารางที่ 7 แสดงผลการวิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์ระหว่างโปรแกรมการ ฝึกและระยะเวลาในการฝึกของความอดทนแบบไม่ใช้ออกซิเจน ประเมินจากค่าเวลาเฉลี่ย (RSSA mean) ของกลุ่มตัวอย่าง 3 กลุ่ม

แหล่งความแปรปรวน	F	Sig
ระยะเวลาในการฝึก	88.629*	<.001
โปรแกรมการฝึก	7.484*	.003
ระยะเวลาในการฝึก* โปรแกรมการฝึกความคลาดเคลื่อน	10.104*	<.001

*มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05

จากตารางที่ 7 พบว่า ระยะเวลาในการฝึกส่งผลต่อความอดทนของระบบหายใจและระบบไหลเวียนโลหิตแบบไม่ใช้ออกซิเจน โดยประเมินจากค่าเวลาเฉลี่ย (RSSA mean) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 และพบว่า ปฏิสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการฝึกและโปรแกรมการฝึกร่วมกัน ส่งผลต่อความอดทนของระบบหายใจและระบบไหลเวียนโลหิตแบบไม่ใช้ออกซิเจน ประเมินจากค่าเวลาเฉลี่ย (RSSA mean) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 และพบว่า โปรแกรมการฝึกที่แตกต่างกัน ส่งผลต่อความอดทนของระบบหายใจและระบบไหลเวียนโลหิตแบบไม่ใช้ออกซิเจน ประเมินจากค่าเวลาเฉลี่ย (RSSA mean) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05

สำหรับผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยความอดทนแบบไม่ใช้ออกซิเจน ประเมินจากค่าเวลาเฉลี่ย (RSSA mean) ก่อนการฝึก หลังการฝึกสัปดาห์ที่ 4, 6 และ 8 ของกลุ่มทดลองที่ 1 เป็นรายคู่ด้วยวิธี LSD พบว่า โปรแกรมการฝึกแบบสลับช่วงสั้น และการฝึกแบบสลับช่วงกลาง ส่งผลให้มีค่าเฉลี่ยความอดทนแบบไม่ใช้ออกซิเจน ประเมินจากค่าเวลาเฉลี่ย (RSSA mean) ตีกว่าการฝึกแบบปกติ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05

ส่วนผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยความอดทนแบบไม่ใช้ออกซิเจน ประเมินจากค่าเวลาเฉลี่ย (RSSA mean) ที่เกิดขึ้นจากการได้รับโปรแกรมการฝึกแบบต่าง ๆ เป็นรายคู่ด้วยวิธี LSD พบว่า ช่วงระยะเวลาการฝึก ตั้งแต่เริ่มต้น กลุ่มตัวอย่างที่ได้รับการฝึกแบบสลับช่วงสั้น มีค่าเฉลี่ยคะแนนการทดสอบความอดทนแบบไม่ใช้ออกซิเจน ประเมินจากค่าเวลาเฉลี่ย (RSSA mean) ตีกว่ากลุ่มที่ได้รับการฝึกแบบปกติ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 ขณะที่กลุ่มตัวอย่างที่ได้รับการฝึกแบบสลับช่วงสั้น มีค่าเฉลี่ยความอดทนแบบไม่ใช้ออกซิเจน ประเมินจากค่าเวลาเฉลี่ย (RSSA mean) ตีกว่ากลุ่มที่ได้รับการฝึกแบบปกติ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 และพบว่า กลุ่มตัวอย่างที่ได้รับการฝึกแบบสลับช่วงสั้น และกลุ่มตัวอย่างที่ได้รับการฝึกแบบสลับช่วงกลาง มีค่าเฉลี่ยความอดทนแบบไม่ใช้ออกซิเจน ประเมินจากค่าเวลาเฉลี่ย (RSSA mean) ตีกว่ากลุ่มที่ได้รับการฝึกแบบปกติ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05

ตารางที่ 8 แสดงผลการวิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์ระหว่างโปรแกรมการฝึก และระยะเวลาในการฝึกของความอดทนแบบไม่ใช้ออกซิเจน ประเมินจากค่าดัชนีความเหนื่อยล้า (Fatigue Index) ของกลุ่มตัวอย่าง 3 กลุ่ม

แหล่งความแปรปรวน	F	Sig
ระยะเวลาในการฝึก	31.373*	<.001
โปรแกรมการฝึก	2.859	.075
ระยะเวลาในการฝึก* โปรแกรมการฝึกความคลาดเคลื่อน	4.103*	.001

*มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05

จากตาราง 8 พบว่า ระยะเวลาในการฝึกส่งผลต่อความอดทนของระบบหายใจ และระบบไหลเวียนโลหิตแบบไม่ใช้ออกซิเจน โดยประเมินจากค่าดัชนีความเหนื่อยล้า (Fatigue Index) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 และพบว่า ปฏิสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการฝึก และโปรแกรมการฝึกร่วมกัน ส่งผลต่อความอดทนของระบบหายใจ และระบบไหลเวียนโลหิตแบบไม่ใช้ออกซิเจน ประเมินจากค่าดัชนีความเหนื่อยล้า (Fatigue Index) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05

สำหรับผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยค่าดัชนีความเหนื่อยล้า (Fatigue Index) ที่เกิดขึ้นจากการได้รับโปรแกรมการฝึกแบบต่าง ๆ ณ แต่ละช่วงระยะเวลาการฝึกที่ต่างกัน เป็นรายคู่ด้วยวิธี LSD พบว่า ช่วงระยะเวลาการฝึกตั้งแต่เริ่มต้น กลุ่มตัวอย่างที่ได้รับการฝึกแบบสลับช่วงสั้น และแบบสลับช่วงกลาง มีค่าเฉลี่ยค่าดัชนีความเหนื่อยล้า (Fatigue Index) สูงกว่ากลุ่มที่ได้รับการฝึกแบบปกติ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 และหลังได้รับการฝึกไปแล้ว 4 สัปดาห์ กลุ่มตัวอย่างที่ได้รับการฝึกแบบสลับช่วงสั้นและแบบสลับช่วงกลาง ก็ยังมีค่าเฉลี่ยค่าดัชนีความเหนื่อยล้า (Fatigue Index) ต่ำกว่ากลุ่มที่ได้รับการฝึกแบบปกติ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 แต่เมื่อฝึกไปแล้ว 6 สัปดาห์ และพบว่า กลุ่มตัวอย่างที่ได้รับการฝึกแบบสลับช่วงสั้น มีค่าเฉลี่ยค่าดัชนีความเหนื่อยล้า

(Fatigue Index) ต่ำกว่ากลุ่มที่ได้รับการฝึกแบบปกติ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 ในขณะที่คู่อื่น ๆ ไม่พบความแตกต่าง

สรุป

1. การฝึกแบบหนักสลับเบาที่มีต่อความอดทนของระบบหายใจและไหลเวียนโลหิตของนักกีฬาแบดมินตันโรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัยรามคำแหง (ฝ่ายประถม) หลังการฝึกดีกว่าก่อนดีกว่าก่อนการฝึก ซึ่งเป็นไปตามสมมติฐานที่ตั้งไว้ ทั้งนี้เป็นเพราะว่า โปรแกรมหนักสลับเบาเป็นรูปแบบการฝึกที่สามารถพัฒนาความอดทนของระบบหายใจและระบบไหลเวียนโลหิตของนักกีฬาได้อย่างมีประสิทธิภาพ สอดคล้องผลการวิจัยของ (Mehdi, Alireze & Mohammad, 2012) และ (Sonchan & Muongmee, 2013) พบว่า การฝึกหนักสลับเบาสามารถพัฒนา Vo_2max ให้เพิ่มสูงขึ้นได้ สามารถพัฒนาเพดานของระบบพลังงานแอโรบิก (Anaerobic threshold) ให้เพิ่มสูงขึ้นได้อีกด้วย

2. กลุ่มตัวอย่างที่ได้รับโปรแกรมการฝึกหนักสลับเบาแต่ละช่วงเวลาของการฝึก ที่แตกต่างกัน มีความอดทนของระบบหายใจและไหลเวียนโลหิต แตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ .05 โดยการฝึกหนักสลับเบาแบบสลับช่วงสั้น และการฝึกหนักสลับเบาแบบช่วงกลาง ส่งผลต่อความอดทนแบบไม่ใช้ออกซิเจน ประเมินจากค่าเวลาที่ดียที่สุด (RSSA best) และค่าเวลาเฉลี่ย (RSSA mean) ในหลังการฝึกสัปดาห์ที่ 4 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ .05 อาจเป็นเพราะ โปรแกรมที่ใช้ในการฝึกสามารถพัฒนาความอดทนได้ (Speed Endurance) ในการปฏิบัติในแต่ละเซตที่มีความหนักสูงจำเป็นต้องมีการเคลื่อนที่ของร่างกายรวดเร็วเพื่อให้ความหนักระดับสูง และในช่วงเบาก็จะต้องมีการเคลื่อนที่ของร่างกายในความหนัก เบา หรือปานกลางโดยทำการฝึกหลาย ๆ เซตจะช่วยให้ นักกีฬาพัฒนาพัฒนาความเร็วอดทนได้ ซึ่งสอดคล้องกับ (Buthmuang, 2019) พบว่า การฝึกหนักสลับเบา (Interval Training) สามารถพัฒนาความเร็วอดทน (Speed Endurance) ให้ นักกีฬาได้ ขึ้นอยู่กับการกำหนดระดับความหนักในการฝึก

3. ปฏิสัมพันธ์ระหว่างโปรแกรมการฝึกและระยะเวลาในการฝึกของความอดทนของระบบหายใจและระบบไหลเวียนโลหิต ส่งผลต่อความอดทนทั้งแบบใช้ออกซิเจน ประเมินจากค่า Vo_2max และแบบไม่ใช้ออกซิเจน ประเมินจากค่าเวลาที่ดียที่สุด (RSSA best) ค่าเวลาเฉลี่ย (RSSA mean) และค่าดัชนีความเหนื่อยล้า (Fatigue Index) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ .05 โดยปฏิสัมพันธ์ระหว่างโปรแกรมการฝึกและระยะเวลาในการฝึกของความอดทนของระบบหายใจและระบบไหลเวียนโลหิต การฝึกหนักสลับเบาแบบสลับช่วงสั้น และการฝึกหนักสลับเบาแบบช่วงกลาง ส่งผลต่อความอดทนแบบไม่ใช้ออกซิเจน ประเมินจากค่าเวลาที่ดียที่สุด (RSSA best) และค่าเวลาเฉลี่ย (RSSA mean) ในหลังการฝึกได้เร็วที่สุดหลังการฝึก 4 สัปดาห์ ส่งผลดีขึ้น อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ .05 ในขณะที่กลุ่มตัวอย่างที่ได้รับการฝึกแบบสลับช่วงสั้น และแบบสลับช่วงกลาง มีค่าเฉลี่ยค่าดัชนีความเหนื่อยล้า (Fatigue Index) ต่ำกว่ากลุ่มที่ได้รับการฝึกแบบปกติ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ .05 เมื่อฝึกไปแล้ว 6 สัปดาห์ และเมื่อรับการฝึกไปแล้วในสัปดาห์ที่ 8 กลุ่มตัวอย่างที่ได้การฝึกแบบสลับช่วงสั้นและแบบสลับช่วงกลาง มีค่าเฉลี่ยของ Vo_2max ดีกว่ากลุ่มตัวอย่างที่ได้รับการฝึกแบบปกติ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ .05 เป็นเพราะ ค่าดัชนีความเหนื่อยล้า (Fatigue Index) และความอดทนแบบใช้ออกซิเจนจากค่า Vo_2max ของกลุ่มตัวอย่างที่ได้รับการฝึกแบบสลับช่วงสั้น มีค่าดัชนีความล้าลดลงหลังจากการฝึกสัปดาห์ที่ 6 และลดลงเรื่อย ๆ แตกต่างจากกลุ่มการฝึกปกติ ซึ่งสอดคล้องกับของ (Boonthum, Thanaphonganan & Tanommek, 2018) พบว่า ค่าดัชนีความล้ายิ่งน้อยสมรรถภาพทางแอโรบิกยิ่งดีขึ้น และส่งผลต่อสมรรถภาพแอโรบิกในสัปดาห์ที่ 8 กลุ่มตัวอย่างที่ได้การฝึกแบบสลับช่วงสั้นและแบบสลับช่วงกลางมีค่าเฉลี่ยของ Vo_2max ดีกว่ากลุ่มตัวอย่างที่ได้รับการฝึกแบบปกติ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ .05

เอกสารอ้างอิง

- Buthmuang M. (2019). **Principles of Strengthening Physical Fitness for Badminton Athletes**. Bangkok, Thailand: Borisuth Printing. (In Thai)
- Mehdi, A., Alireze, R., & Mohammad, A. A. (2012). Comparison of physiological characteristics and physical fitness of junior young students in freestyle and Greco-Roman wrestling. **Scholars Research library Annals of Biological Research**, 3(7), 3229-3233.
- Phomsoupha, M. & Laffaye, G. (2014). The Science of Badminton: Game Characteristics, Anthropometry, Physiology, Visual Fitness and Biomechanics. **Sports Medicine**, 45(4), 473-95.
- Boonthum S., Thanaphonganan N., & Tanommek A. (2018). The Effects of Chocolate Milk on Anaerobic Performance and Muscle Strength of the Legs in Football Players. **Academic service journal**, 29(2), 161-171.
- Sonchan W., & Muongmee P. (2013). Effects of Variations in Intensity and Duration of Interval Training Programs on Maximum Oxygen Uptake, Hemoglobin, Anaerobic Performance and Anaerobic Threshold. **The Public Health Journal of Burapha University**, 8(1), 68-79.
- Kachayut S. (2019). **The Effects of Circuit Training and Interval Training Cardiovascular Endurance of Futsal Athletes Wat Rajabopit School**. (Doctoral dissertation) Srinakharinwirot University. Bangkok, Thailand. (In Thai)

=====

SCREENING ACTIVE NATURAL LIGANDS OF TYROSINASE FROM *Aglaonema simplex* BL. BY HPLC

Sutthiduean Chunhakant* and Thongchai Khammee

Department of Chemistry, Faculty of Science and Technology, Phranakorn Rajabhat University, Thailand

*E-mail: chunhakants@gmail.com

Received: 2021-06-14

Revised: 2021-07-18

Accepted: 2021-07-19

ABSTRACT

Ethanol extract of *Aglaonema simplex* rhizomes exhibited higher monophenolase inhibitory activity than arbutin, with IC_{50} values of 53.65 ± 0.80 and 138.15 ± 0.96 $\mu\text{g/mL}$ respectively, while diphenolase inhibitory activity values were similar to arbutin at 6.35 ± 0.23 and 7.11 ± 0.16 $\mu\text{g/mL}$ respectively. Arbutin was used as a binding ligand for screening tyrosinase inhibitors using high performance liquid chromatography with a diode-array detector (HPLC-DAD). The analytical method was validated. The calibration curve of arbutin standard generated the regression equation, $y = 25.356x - 167.65$, $r^2 = 0.9991$. The accuracy was presented in term the percentage recovery and was showed 99.70 to 102.45 %. The LOD and LOQ values were 37.74 and 114.37 $\mu\text{g/mL}$, respectively. Intra-day and inter-day precisions were presented in term the percentage of relative standard deviations and were in the range 0.07–0.13% and 0.002–0.01%, respectively. The optimized ligand screening at 37 °C and 40 min. Five unknown tyrosinase inhibitor binding ligands were identified in the ethanol extract of *A. simplex* rhizomes using HPLC-DAD with retention times of 13.95, 19.64, 21.30, 38.98 and 43.90 min, respectively. The result suggested that the extract of *A. simplex* rhizomes could be contained the marker compounds for the development of the extract in cosmeceuticals.

Keywords: *Aglaonema simplex*, arbutin, ligand, tyrosinase inhibitor, HPLC-DAD

Introduction

Tyrosinase (EC 1.14.18.1), a polyphenol oxidase, is a copper-containing enzyme found in animals, bacteria, fungi and plants (Sánchez-Ferrer et al., 1995). Tyrosinase catalyses both monophenolase activity (hydroxylation of L-tyrosine to L-DOPA) and diphenolase activity (oxidation of L-DOPA to DOPAquinone) through melanin reaction pathways (Fais et al., 2009). Overproduction

of melanin pigment may cause serious problems that manifest as age spots, freckles, melasma and senile lentigines leading to cell death.

Tyrosinase inhibitors such as arbutin, azelaic acid and kojic acid are used to ameliorate skin hyperpigmentation in cosmetic and pharmaceutical products. However, side effects of tyrosinase inhibitors can result in allergic reactions, dermatitis and erythema (Chen et al., 2016). Thus, the search for novel tyrosinase inhibitors from natural sources has recently increased to screen bioactive components (Chen et al., 2016; Chen et al., 2013).

Ultrafiltration method has been used in screening bioactive compounds from plant extracts. The ultrafiltration membrane is used to separate ligand-bound complexes from the unbound compounds. The following analysis step is commonly determined by analytical instruments such as high performance liquid chromatography or mass spectrometry. The advantages of ultrafiltration are low sample consumption, high recovery yields and reduction labor-intensive task (Wang et al., 2018; Zhang et al., 2017).

Aglaonema simplex BL., a member of the Araceae family, is native to Southeast Asia and widely cultivated in tropical rain forests (Napiroon & Vajrodaya, 2017). It is traditionally used as a Thai herb for several ethnopharmacological properties, called Wan Khan Mak in Thailand. The major constituents of the genus *Aglaonema* are polyhydroxy alkaloids and *A. simplex* exhibits glycosidase inhibitory activity (Watson et al., 2001).

Previous reports indicated that alkaloids, glycosides, phenolics, steroids and terpenoids from *A. simplex* stems and roots exhibited anti-cardiovascular effects (Ismail et al., 2017). Alkaloids, coumarins, organic compounds, phenolic compounds and terpenoids were found in lipophilic extracts of *A. simplex* rhizomes (Napiroon & Vajrodaya, 2017), while butyl stearate and β -sitosterol were isolated from *A. simplex* rhizomes. β -Sitosterol exhibited mild hyaluronidase inhibitory activity, while molecular docking of β -sitosterol showed the highest hyaluronidase inhibition (Khammee et al., 2020).

The ligand of protein is one of analytical chemistry for the qualitative and quantitative measurements in method development (Satheshkumar et al., 2021). Previous reports indicated that ligand of tyrosinase inhibitors as unbound low-mass molecules from mulberry leaves extract were analyzed using ultrafiltration and separated by high performance liquid chromatography coupled with diode array detector and mass spectrometry (HPLC-DAD-MS) (Yang et al., 2012). Ligand of biotin derivatives were immobilized on magnetic particles and analyzed by HPLC-MS via selective ion monitoring (HPLC-MS-SIM). This method was validated and showed the highest sensitivity (Yang et al., 2011). Ligand of glutathionylated derivatives in plant were immobilized using glutathione transferase and characterized by HPLC-MS (Dixon & Edwards, 2018).

Many researchers have been reported that tyrosinase inhibitors were isolated from the various plants. (+)-Dihydrokaempferol, ellagenic acid, kaempferol, myricetin, quercetin, rhamnetin-3-*O*- β -D-glucopyranoside, resveratrol exhibited antityrosinase activity (Chunhakant & Chaicharoenpong, 2019; Solimine et al., 2016; Chen et al., 2015; Sarkhail et al., 2013; Jeong & Shim, 2004). Moreover, the plant extracts have been reported on antityrosinase activity. Methanol extract of *Podocarpus elongates* stem, ethyl acetated fraction of *Cynometra cauliflora* leaves, essential oil extract from *Citrus grandis*, extract of *Rubia cordifolia* exhibited antityrosinase activity (Aumeeruddy-Elalfi et al., 2016; Biswas et al., 2015; Ado et al., 2014; Abdillahi et al., 2011). A preliminary study demonstrated that ethanol crude extract of *A. simplex* rhizomes showed strong antityrosinase activity (Rujitanapanich et al., 2018). However, scant research has been conducted concerning the tyrosinase inhibitors of *A. simplex*.

Here, the aim of this study was to evaluate an HPLC-DAD method for development of interaction between tyrosinase and ligands from extract of *A. simplex* rhizomes. In addition, the crude extract of *A. simplex* rhizomes was investigated for antityrosinase activity.

Methods

1. Chemicals

Analytical grade chemicals as arbutin, disodium hydrogen phosphate, L-DOPA, L-tyrosine, mushroom tyrosinase and sodium dihydrogen phosphate were purchased from Sigma-Aldrich (St. Louis, MO, USA). Absolute ethanol, acetonitrile (ACN), methanol (MeOH) and water were purchased from Merck (Darmstadt, Germany). ACN, MeOH and water were of HPLC grade.

2. Instruments

UV-VIS measurements were recorded using a PerkinElmer Spectrophotometer. HPLC analysis was conducted using an Agilent Series 1100 liquid chromatography system with a quaternary pump, a vacuum degasser and a diodearray detector.

3. Plant materials

Fresh rhizomes of *A. simplex* were collected from Kanchanaburi Province, Thailand during February 2019.

4. Plant extraction

Fresh rhizomes of *A. simplex* were ground to powder and then dried in an oven at 60 °C. For extraction, the dried sample (50 g) was macerated with ethanol (0.5 L) for 24 h at room temperature for three times. The solvent extract was then filtered and evaporated under vacuum-reduced pressure to obtain ethanol crude extract of *A. simplex* (8.33 g).

5. Chromatographic conditions

HPLC analysis was performed on an octadecylsilyl (ODS) ThermoHypersil Keystones column of 250×4.6 mm packed with 5 µm particles (YMC Co., Kyoto, Japan) and equipped with a guard column of 20×3.0 mm with 3.5 µm particles (Phenomenex Inc., Torrance, CA, USA). The column temperature was operated at 25 °C. The injection volume was 10 µL and the flow rate was 1.0 mL/min. The DAD detection wavelength was measured at 280 nm.

The gradient-elution system was determined using a protocol modified from Zhang et al. (2017). The mobile phase consisted of 0.1% v/v formic acid in water (A) and 2:3 v/v acetonitrile : methanol (B) with the following gradient: 100% A at 0–5 min, 60% A at 6–20 min, 40% A at 21–40 min and 100% B at 41–60 min. Sample solutions were filtered before analysis through a 0.45 µm polytetrafluoroethylene (PTFE) membrane filter before analysis.

6. HPLC method validation

Ligand screening of ethanol crude extract of *A. simplex* was identified after validation of HPLC analysis. The method was validated to evaluate accuracy of the method, linearity, limits of detection (LOD), limits of quantification (LOQ), intra-day and inter-day precisions.

The percentage recovery was calculated to evaluate the accuracy of the method. Arbutin was prepared at concentrations of 15, 20 and 25 mg/mL in sodium phosphate buffer. Then, 1 mL of ethanol crude extract (20 mg/mL) was added to 1 mL of arbutin solution. All the data were calculated by the formula:

Where: A represents the sample contents after adding arbutin solution, B represents the sample contents before adding arbutin solution and C represents arbutin solution.

For linearity, arbutin solution for calibration curves were prepared at different concentrations. Arbutin was prepared at concentrations of 10, 15, 20, 25, 30 and 35 mg/mL in sodium phosphate buffer. Seven repetitions were determined in this method. The calibration curves were plotted using peak area versus concentrations. The calibration curve was plotted with peak area versus concentration using the method of least squares regression analysis. The values of the slope and y-intercept of the plot were computed.

LOD and LOQ were detected as the lowest concentrations of analytes in the sample. The LOD and LOQ were evaluated standard curve of arbutin solution. Each concentration were injected in triplicate. These limits were calculated by the formula:

$$\text{Recovery (\%)} = \left[\frac{(A - B)}{C} \right] \times 100 \quad (1)$$

Where: A_s represents the average slope and SD represents the standard deviation of response.

$$LOD = \frac{3.3}{A_s} \times SD \quad (2)$$

$$LOQ = \frac{10}{A_s} \times SD \quad (3)$$

Intra-day precision was evaluated using three different concentrations of arbutin under the selected optimal condition. Arbutin was prepared at concentrations of 15, 20 and 25 mg/mL in sodium phosphate buffer. For inter-day precision was conducted by measuring the above concentration on five consecutive days. The percentage relative standard deviation (% RSD) was calculated to evaluate the intra-day and inter-day precisions. All the data were calculated by the formula:

$$\text{Relative standard deviation (\% RSD)} = \frac{SD}{\bar{X}} \times 100 \quad (4)$$

Where: SD represents the standard deviation and $\bar{X}$ represents the mean concentration of arbutin solution.

7. HPLC method for ligand screening

HPLC method was determined following the modified method of Zhang et al. (2017). Ligand screening of ethanol crude extract of *A. simplex* was evaluated to optimize ligand screening conditions, specific ligand screening conditions and ligand screening of ethanol crude extract of *A. simplex*. Arbutin was used as a target model compound to optimize ligand screening conditions.

Briefly, an arbutin solution and a tyrosinase solution were prepared at a concentration of 1 mg/mL in sodium phosphate buffer. The activity assay used 300 μ L of the solution mixture containing 100 μ L of arbutin solution, 100 μ L of sodium phosphate buffer and 100 μ L of tyrosinase solution. Solution mixtures were incubated at 37 °C for 40 min.

The binding mixture was then filtrated through an ultramembrane filter (Amicon® Ultra-15) and centrifuged at 10,000 rpm for 10 min. Screening conditions were optimized at different temperatures (25, 37 and 45 °C) and for different incubation times (10, 20, 40 and 60 min). All HPLC experiments were conducted in triplicate. Binding ligand affinities of the constituents to tyrosinase were calculated using the equation,

Where: A represents the chromatogram of HPLC for the control group and B represents the chromatogram of HPLC for the experimental group.

For specificity of ligand screening conditions, the denatured tyrosinase solution (1 mg/mL) was boiled for 10 min at 100 °C. An aliquot of 100 μ L of the denatured tyrosinase solution

was added to 100 μ L of arbutin solution (1 mg/mL). For the tyrosinase group, 100 μ L of the tyrosinase solution was added to 100 μ L of arbutin solution. The solution mixture was filtered and injected into the HPLC analyzer. Inactive compounds were evaluated by comparison with the tyrosinase group and the denatured tyrosinase group.

Ligand screening of *A. simplex* extract, binding screening of the *A. simplex* extract was measured using the modified method of Zhang et al. (2017). The solution mixture contained 100 μ L of the crude extract of *A. simplex* rhizomes (1 mg/mL), 100 μ L of sodium phosphate buffer and 100 μ L of tyrosinase solution as the experimental group.

The control group of 100 μ L of crude extract of *A. simplex* (1 mg/mL) was added into 200 μ L of sodium phosphate buffer, and the reaction mixtures were incubated at 37 °C for 40 min. The binding mixture was then filtrated through an ultramembrane filter (10 kDa cutoff) and centrifuged for 10 min at 10,000 rpm. All experiments were conducted in triplicate.

8. *In vitro* antityrosinase activity

Antityrosinase activity was determined following the modified method of Biswas et al. (2015). L-tyrosine was used as a substrate for monophenolase inhibitory activity, while L-DOPA was used as a substrate for diphenolase inhibitory activity. Arbutin was used as a positive control. Ethanol crude extracts of *A. simplex* (1 mg/mL) and arbutin were dissolved in sodium phosphate buffer.

In separate reaction mixtures, 50 μ L of the ethanol crude extract, 50 μ L of 0.1 M substrate solution and 100 μ L of 0.1 M sodium phosphate buffer (pH 6.8). The reaction mixture was mixed and incubated at 37 °C for 5 min. Then, 50 μ L of tyrosinase solution (200 U/mL) was added and the reaction mixture was immediately recorded at 490 nm ($t = 0$ min). The reaction mixture was incubated for 40 min at 37 °C in an incubator and the absorbance was measured at 490 nm ($t = 40$ min).

All the experiments were determined in triplicate. Percentage antityrosinase activity was calculated using the equation,

$$\text{Antityrosinase activity (\%)} = \left[\frac{(A - B) - (C - D)}{(A - B)} \right] \times 100 \quad (6)$$

Where: A represents the absorbance of the control, B represents the absorbance of the blank control, C represents the absorbance of the sample and the positive control and D represents the absorbance of the blank of the sample and the positive control.

9. Statistical analysis

Results were expressed as mean $\pm$ standard deviation. Statistical data analysis of variance was performed using SPSS version 24, with differences considered significant at $p < 0.05$.

Results and Discussions

1. HPLC method validation

The chromatographic method of arbutin was validated to evaluate accuracy of the method, linearity, LOD, LOQ, intra-day and inter-day precisions. The accuracy of arbutin in the spiked sample was calculated and reported in terms of percentage recovery (Table 1). The percentage recovery of arbutin ranged from 99.70 to 102.45 %. According to the International Council on Harmonization (ICH) guidelines, the acceptable range of percentage recovery were limited of 90 to 110 % (ICH guideline, 2005). Thus, the validated method presented a good accuracy.

Table 1 Accuracy results of ethanol extract of *A. simplex*

Concentration (mg/mL)	Recovery (%)	RSD (%)
15	99.70 ± 0.12	0.29
20	100.55 ± 0.08	0.17
25	102.45 ± 0.07	0.11

The linearity of the calibration curves between peak area and concentration was shown as Figure 1. The equation of arbutin was $y = 25.356x - 167.65$ with regression coefficient of $r^2 = 0.9991$ were obtained by the calibration curves (Table 2). The LOD and LOQ values were 37.74 and 114.37 µg/mL, respectively. The percentage of relative standard deviations were reported to evaluate intra-day and inter-day precisions. The results showed that %RSD of intra-day was in the range of 0.07–0.13% and %RSD of inter-day was in the range of 0.002–0.01%.

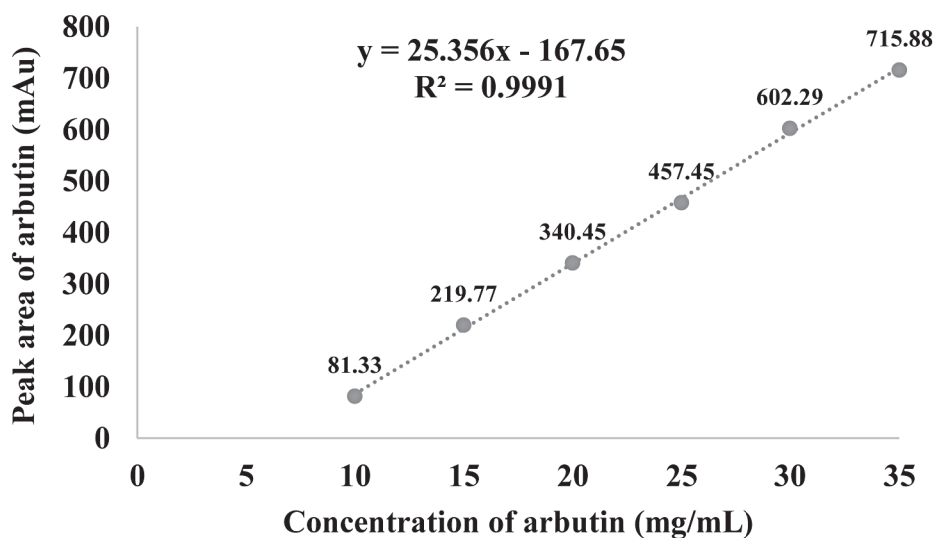


Figure 1 The calibration curves between peak area and concentration of arbutin.

Table 2 Linearity results for concentration of arbutin

Repetitions of peak area	Concentration (mg/mL)					
	10	15	20	25	30	35
1	81.15	219.98	340.51	457.86	602.53	715.85
2	81.66	219.99	340.11	457.46	602.55	715.82
3	81.51	219.6	340.81	457.19	602.11	716.52
4	81.13	219.63	340.71	457.13	602.1	715.91
5	81.38	219.31	340.12	457.57	602.18	715.91
6	81.41	219.92	340.17	457.91	602.12	715.55
7	81.06	219.95	340.69	457.02	602.46	715.62
Mean	81.33	219.77	340.45	457.45	602.29	715.88
SD	0.23	0.29	0.33	0.30	0.23	0.29
LOD (µg/mL)	37.74					
LOQ (µg/mL)	114.37					
%RSD of intra-day	0.13	0.10	0.07			

2. HPLC method for ligand screening

Arbutin was collected to optimize ligand screening conditions. Results indicated that optimal incubation temperature and incubation time for the binding ligand were 37 °C and 40 min. However, binding ligand activity decreased as time increased, as shown in Figure 2. The specificity of ligand screening with tyrosinase was investigated. Chromatographic peak area of the binding ligand with the tyrosinase group decreased when compared with the chromatographic peak area of the denatured tyrosinase group and arbutin, as shown in Figure 3.

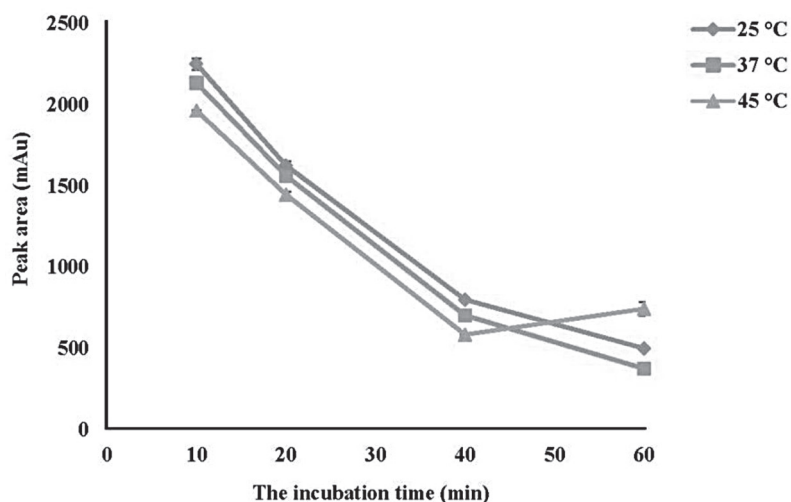


Figure 2 Effect of incubation time on ligand screening.

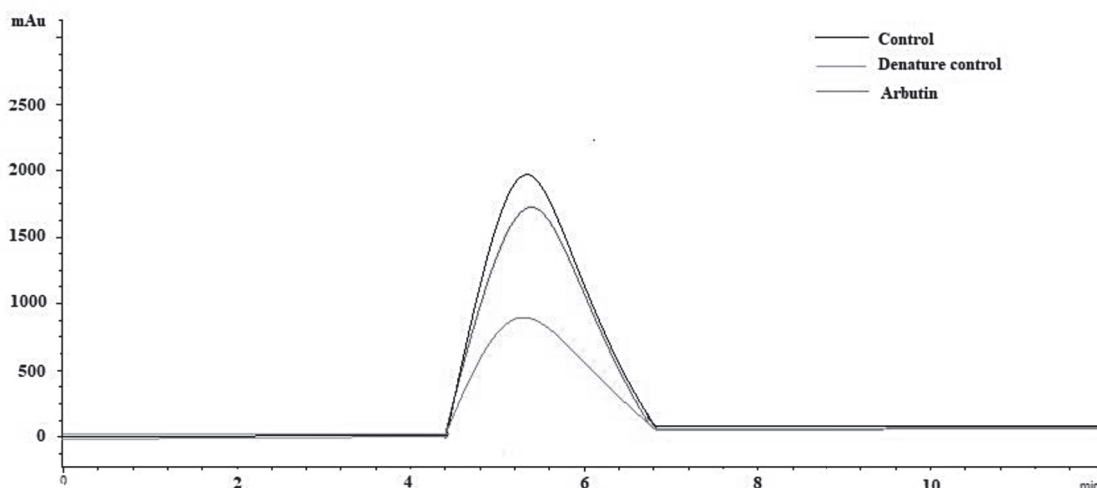


Figure 3 HPLC chromatograms for specificity of ligand screening conditions (black: control) arbutin after incubation without tyrosinase (green: arbutin) arbutin after incubation with tyrosinase (red: denatured control) denatured tyrosinase.

Duration of incubation time and incubation temperature were important for enzyme binding. Binding between arbutin and tyrosinase was achieved. The peak area of ligand binding decreased as time increased, concurring with data from the literature (Zhang et al., 2017). Moreover, the specificity of arbutin and tyrosinase binding was significant. Ligand binding depended on eluting time and organic solvent for eluting ligands (Ryu et al., 2014).

Chromatograms of the ethanol extract of *A. simplex* rhizomes for screening of tyrosinase binding are shown in Figure 4. Each peak area of unknown compounds in the chromatograms was compared. Five unknown compounds were identified as the ligand binding with tyrosinase, showing retention times of 13.95, 19.64, 21.30, 38.98 and 43.90 min.

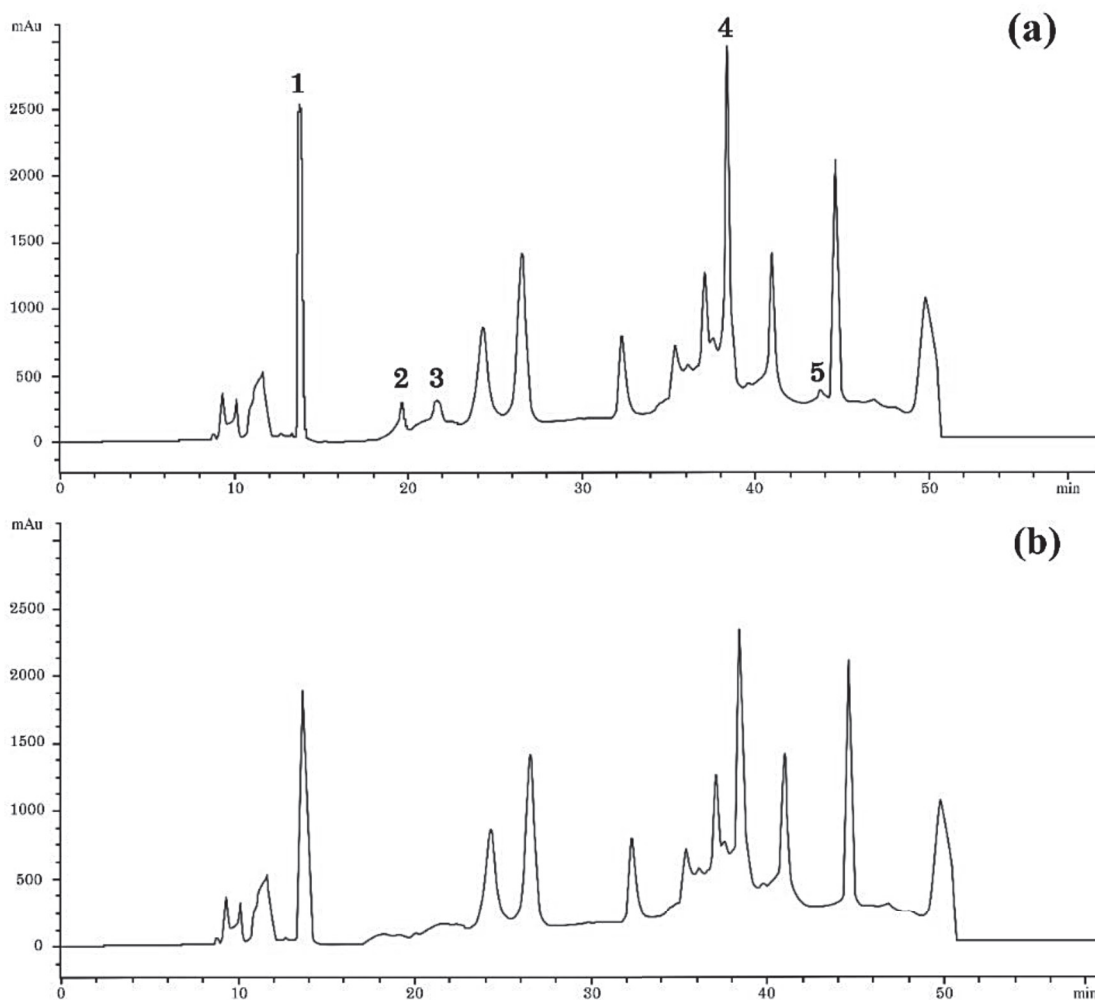


Figure 4 HPLC chromatograms of ethanol extract of *A. simplex* rhizomes (a) before and (b) after binding ligand screening with tyrosinase.

3. *In vitro* antityrosinase activity

Ethanol extract of *A. simplex* rhizomes were investigated for monophenolase and diphenolase inhibitory activities. Antityrosinase activities of *A. simplex* rhizomes are expressed as IC_{50} values (Table 3). Results indicated that the ethanol extract showed stronger monophenolase inhibitory activity than arbutin with IC_{50} values of 53.65 ± 0.80 and 138.15 ± 0.96 $\mu\text{g/mL}$ respectively. Diphenolase inhibitory activities of the ethanol extract and arbutin were similar with IC_{50} values of 6.35 ± 0.23 and 7.11 ± 0.16 $\mu\text{g/mL}$ respectively.

Table 3 Antityrosinase activity of ethanol extract of *A. simplex*

Material	IC ₅₀ (µg/mL)	
	Monophenolase inhibitory activity	Diphenolase inhibitory activity
<i>A. simplex</i> rhizomes	53.65 ± 0.80 ^a	6.35 ± 0.23 ^a
Arbutin	138.15 ± 0.96 ^b	7.11 ± 0.16 ^a

Findings revealed that the ethanol crude extract of *A. simplex* rhizomes significantly exhibited diphenolase inhibitory activity. Previous studies reported that phytochemicals of *A. simplex* fruits, leaves, roots and stems consisted of several types of alkaloids, coumarins, flavonoids, glycosides, organic compounds, phenolic compounds, steroids and terpenoids (Ismail et al., 2017; Nipiroon & Vajrodaya, 2017; Kiatsongchai 2015). Recently, β -sitosterol was isolated from *A. simplex* rhizomes and showed moderate hyaluronidase inhibitory activity (Khammee et al., 2020). Generally, β -sitosterol was one of many phytosterol from plants and was a cholesterol-like structure. β -sitosterol has been reported to exhibit lipid lowering effect, anti-inflammatory, and anti-diabetic activities (Babu & Jayaraman, 2020). However, there was no report directly determining antityrosinase activity of β -sitosterol. Several researches reported that phytochemicals have been used as tyrosinase inhibitors such as flavonoids, phenolic compounds, triterpenoids and alkaloids.

Because the inhibition mechanism based on the structure of both the substrate and inhibitor (Chen et al., 2015). The ethanol crude extract of *A. simplex* rhizomes exhibited stronger diphenolase inhibitory activity (6.35 ± 0.23 µg/mL) than monophenolase inhibitory activity (53.65 ± 0.80 µg/mL). There is a possibility that the extract inhibited the oxidation of L-DOPA.

The conventional method was isolated chemical components from plant extracts and tested their biological activities. This the conventional method was a time-consuming and labor-intensive task. Bioanalytical screening methods have been developed as alternative method for bioactive compounds. Taking advantages of bioanalytical screening method were subjected to various bioassays, simple reproducible, rapid and targeted isolation of new chemical compounds with potential activities (Wang et al., 2018; Zhuo et al., 2016). Thus, the advantages of UF-HPLC-DAD in this research were low sample consumption, high recovery yields and reduction labor-intensive task.

Results from antityrosinase activity suggested that the crude extract of *A. simplex* rhizomes consisted of several chemical constituents. However, there are a few researches that investigated the isolation of phytochemicals from *Aglaonema sp* and exhibited biological activities. It has been reported

that 2,5-dihydroxymethyl-3,4-dihydroxypyrrolidine and α -homonojirimycin have been isolated from *A. modestum* and inhibited nitric oxide synthase. α -Homonojirimycin and homonojirimycin isomers have also been isolated *A. treubii* and exhibited glycosidase inhibitory activity (Kiatsongchai, 2015). Usually, the polyphenol derivatives of flavonoids could be involved in the antityrosinase activity. The structure of chemical constituents depended on the types of chemical constituents and number of available hydroxyl groups that attacked active enzyme sites (Abdillahi et al., 2011). Therefore, *A. simplex* rhizomes could be contained the marker compounds for tyrosinase inhibitory activity.

Conclusions

In this study, the validated HPLC method was developed in term of the accuracy, linearity, LOD, LOQ, intra-day and inter-day. A UF-HPLC-DAD was applied for screening tyrosinase binding in crude extract of *A. simplex* rhizomes. This method suggested that tyrosinase could be binds unknown compounds without isolation and purification from crude extract. The advantages of bioanalytical screening method were subjected to various bioassays, less cost of solvent, rapid, and targeted isolation of marker compounds. Moreover, the ethanol crude extract of *A. simplex* rhizomes demonstrated stronger monophenolase inhibitory activity than that of arbutin. While, diphenolase inhibitory activity of the ethanol extract of *A. simplex* rhizomes was similar to that of arbutin. The results suggested that the extract of *A. simplex* rhizomes could be contained the marker compounds for the development of the extract in cosmeceuticals.

Acknowledgement

This research was financially supported by the Faculty of Science and Technology, Phranakhon Rajabhat University, Thailand.

References

- Abdillahi, H.S., Finnie, J.F., & Van Staden, J. (2011). Anti-inflammatory, antioxidant, anti-tyrosinase and phenolic contents of four Podocarpus species used in traditional medicine in South Africa. *Journal of Ethnopharmacology*, **136**(3): 496–503.
- Ado, M.A., Abas, F., Ismail, I.S., Ghazali, H.M., & Shaari, K. (2014). Chemical profile and antiacetylcholinesterase, antityrosinase, antioxidant and α -glucosidase inhibitory activity of *Cynometra cauliflora* L. leaves. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, **95**(3): 635–642.
- Aumeeruddy-Elalfi, Z., Gurib-Fakim, A., & Mahomoodally, M.F. (2016). Kinetic studies of tyrosinase inhibitory activity of 19 essential oils extracted from endemic and exotic medicinal plants. *South African Journal of Botany*, **103**: 89–94.

- BaBu, S., & Jayaraman, S. (2020). An update on β -sitosterol: a potential herbal nutraceutical for diabetic management. **Biomedicine and Pharmacotherapy**, **131**: 110702–110710.
- Biswas, R., Mukherjee, P.K., Dalai, M.K., Mandal, P.K., & Nag, M. (2015). Tyrosinase inhibitory potential of purpurin in *Rubia cordifolia*—A bioactivity guided approach. **Industrial Crops and Products**, **74**: 319–326.
- Chen, J., Yu, X., & Huang, Y. (2016). Inhibitory mechanisms of glabridin on tyrosinase. **Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy**, **168**: 111–117.
- Chen, X.X., Zhang, J., Chai, W.M., Feng, H.L., Xiang, Z.H., Shen, D.Y., & Chen, Q.X. (2013). Reversible and competitive inhibitory kinetics of amoxicillin on mushroom tyrosinase. **International Journal of Biological Macromolecules**, **62**: 726–733.
- Chen, C.Y., Lin, L.C., Yang, W.F., Bordon, J., & Wang, H.M.D. (2015). An updated organic classification of tyrosinase inhibitors on melanin biosynthesis. **Current Organic Chemistry**, **19**(1): 4–18.
- Chunhakant, S., & Chaicharoenpong, C. (2019). Antityrosinase, antioxidant, and cytotoxic activities of phytochemical constituents from *Manilkara zapota* L. bark. **Molecules**, **24**(15): 98–116.
- Dixon, D.P., & Edwards, R. (2018). Protein-ligand fishing in planta for biologically active natural products using glutathione transferases. **Frontiers in Plant Science**, **9**: 1659–1668.
- Fais, A., Corda, M., Era, B., Fadda, M.B., Matos, J.M., Quezada, E., Santana, L., Picciau, C. Podda, G., & Delogu, G. (2009). Tyrosinase inhibitor activity of coumarin-resveratrol hybrids. **Molecules**, **14**(7): 2514–2520.
- ICH. (2005). **Validation of analytical procedures: text and methodology Q2(R1)**. ICH harmonized tripartite guideline. International conference on Harmonization of technical requirements for registration of pharmaceuticals for human use, Chicaga, USA.
- Ismail, Z, Ahmad, A., & Muhammad, T.S.T. (2017). Phytochemical screening of *in vitro* *Aglaonema simplex* plantlet extracts as inducers of Sr-B1 ligand expression. **Journal of Sustainability Science and Management**, **12**(2): 34–44.
- Jeong, C.H., & Shim, K.H. (2004). Tyrosinase inhibitor isolated from the leaves of *Zanthoxylum piperitum*. **Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry**, **68**(9): 1984–1987.
- Khammee, T., Rujitanapanich, S., Chunhakant, S., Jaratrungtawee, A., & Kuno, M. (2020). *In vitro* and *in silico* evaluations of chemical constituents from the rhizomes of *Aglaonema simplex* (Blume) Blume as hyaluronidase inhibitor. **Thai Journal of Science and Technology**, **9**(3): 269–277.

- Kiatsonchai, R. (2015). **Biological properties and toxicity of Wan Khan Mak (*Aglaonema simplex* BL.) fruit extract.** (Doctoral dissertation) Suranaree University of Technology. Nakhon Ratchasima, Thailand.
- Napiroon, T., Sookchaloem, D., & Vajrodaya, S. (2017). Thin layer chromatography screening and profiling of *Terrestrial aroids* (Araceae) lipophilic extracts from Saiyok forest, Thailand. **Journal Tropical Forest Science**, 1(1):1–10.
- Rujitanapanich, S., Chunhakant, S., & Khammee, T. (2018). **A preliminary study demonstrated that ethanol crude extract of *Aglaonema simplex* rhizomes showed strong antityrosinase activity.** (Research reports). Bangkhan, Thailand: Department of Chemistry, Phranakhon Rajabhat University.
- Ryu, H.W., Oh, S.R., Curtis-Long, M.J., Lee, J.H., Song, H.H., & Park, K.H. (2014). Rapid identification of cholinesterase inhibitors from the seedcases of mangosteen using an enzyme affinity assay. **Journal of Agriculral and Food Chemistry**, 62(6): 1338–1343.
- Sánchez-Ferrer, A., Rodríguez-López, J.N., García-Cánovas, F. & García-Carmona, F. (1995). Tyrosinase: A comprehensive review of its mechanism. **Biochimica et Biophysica Acta**, 1247(1): 1–11.
- Sarkhail, P., Sarkheil, P., Khalighi-Sigaroodi, F., Shafiee, A., & Ostad, N. (2013). Tyrosinase inhibitor and radical scavenger fractions and isolated compounds from aerial parts of *Peucedanum knappii* Bornm. **Natural Product Research**, 27(10): 896–899.
- Satheshkumar, S., Muruganantham, V., Kanaga, S.S., & Chithra, A. (2021). Bioanalysis method development and validation of small molecules in pharmaceutical industry: A bioanalyst review point. **Asian Journal of Pharmaceutical and Clinical Research**, 14(3): 49–55.
- Solimine, J., Garo, E., Wedler, J., Rusanov, K., Fertig, O., Hamburger, M., Atanassov, I., & Butterweck, V. (2016). Tyrosinase inhibitory constituents from a polyphenol enriched fraction of rose oil distillation wastewater. **Fitoterapia**, 108: 13–19.
- Wang, Z., Li, X., Chen, M., Liu, F., Han, C., Kong, L., & Luo, J. (2018). A strategy for screening of α -glucosidase inhibitors from *Morus alba* root bark based on the ligand fishing combined with high-performance liquid chromatography mass spectrometer and molecular docking. **Talanta**, 180: 337–345.
- Watson, A.A., Fleet, G.W.J., Asano, N., Molyneux, R.J., & Nash, R.J. (2001). Polyhydroxylated alkaloids- natural occurrence and therapeutic applications. **Phytochemistry**, 56(3): 265–295.
- Yang, X., Xie, Y., Pu, J., Zhao, H., Liao, J., Yuan, Y., Zhu, S., Long, G., Zhang, C., Yuan, H., Che, Y., & Liao, F. (2011). Estimation of affinities of ligands in mixtures viamagnetic recovery of target-ligand complexes and chromatographic analyses: chemometricsand an experimental model. **BMC Biotechnology**, 11: 44–63.

- Yang, Z., Zhang, Y., Sun, L., Wang, Y., Gao, X., & Cheng, Y. (2012). An ultrafiltration high-performance liquid chromatography coupled with diodearray detector and mass spectrometry approach for screening and characterizing tyrosinase inhibitors from mulberry leaves. **Analytica Chimica Acta**, 719: 87–95.
- Zhang, G., Guo, X.H., Wang, S.S., Li, Y.Q., Li, G.Z., & Zhao, W.J. (2017). Screening and identification of natural ligands of tyrosinase from *Pueraria lobata* Ohwi by a combination of ultrafiltration and LC-MS. **Analytical Methods**, 9: 4858–4862.
- Zhuo, R., Liu, H., Liu, N., & Wang, Y. (2016). Ligand fishing: A remarkable strategy for discovering bioactive compounds from complex mixture of natural products. **Molecules**, 21:1516–1532.
- =====

การเปรียบเทียบผลการฝึกแบบควบคู่ที่มีต่อสมรรถภาพทางกลไก
ของนักกีฬาฟุตซอลหญิงระดับมัธยมศึกษา

COMPARISON OF THE COMBINED TRAINING EFFECTS
ON SKILL RELATED PHYSICAL FITNESS
OF SECONDARY SCHOOL'S FEMALE FUTSAL PLAYERS

ณัฐพล วรพักตร์^{1*} ลักขมี ฉิมวงศ์² และ อนันต์ มาลารัตน์²

¹สาขาวิชาสุขศึกษาและพลศึกษา คณะพลศึกษา มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

Nattapon Worapuk^{1*}, Luxsamee Chimwong² and Anan Malarat²

¹Health Education & Physical Education, Faculty of Physical Education, Srinakharinwirot University

*E-mail: Nattapon.worapuk@g.swu.ac.th

Received: 2021-06-30

Revised: 2021-07-19

Accepted: 2021-07-20

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้เป็นวิจัยแบบกึ่งทดลองมีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาและเปรียบเทียบผลการฝึกแบบควบคู่ที่มีต่อสมรรถภาพทางกลไกของนักกีฬาฟุตซอลหญิงระดับมัธยมศึกษา กลุ่มเป้าหมายเป็นนักกีฬาฟุตซอลหญิง จำนวน 30 คน แบ่งกลุ่มออกเป็น 3 กลุ่ม ๆ ละ 10 คน เครื่องมือที่ใช้คือ 1) โปรแกรมการฝึก 3 แบบ ได้แก่ PAS ASP SPA 2) แบบทดสอบความคล่องแคล่วว่องไว 3) แบบทดสอบพลังกล้ามเนื้อ 4) แบบทดสอบความเร็ว สถิติที่ใช้ได้แก่ ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน วิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวชนิดวัดซ้ำ วิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางชนิดวัดซ้ำ เก็บรวบรวมข้อมูลดำเนินการฝึกทั้ง 3 กลุ่ม ทุกวันจันทร์ วันพุธ และวันศุกร์ รวม 6 สัปดาห์ พบว่า 1) นักกีฬาฟุตซอลที่ได้รับการฝึกทั้ง 3 แบบ มีความคล่องแคล่วว่องไว พลังและความเร็ว หลังการฝึกดีกว่า ก่อนการฝึกโดยหาค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) 2) นักกีฬาฟุตซอลหญิงที่ได้รับการฝึกที่แตกต่างกัน มีความเร็ว พลังและความคล่องแคล่วว่องไวไม่แตกต่างกัน และในหลังการฝึกสัปดาห์ที่ 4 และสัปดาห์ที่ 6 ดีกว่า ก่อนการฝึกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 และ 3) ปฏิสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบการฝึกที่แตกต่างกันและระยะเวลา ในการฝึกที่แตกต่างกัน ร่วมกันส่งผลต่อสมรรถภาพทางกลไกของนักกีฬาฟุตซอลหญิง หลังการฝึกสัปดาห์ที่ 4 และสัปดาห์ที่ 6 แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ .05

คำสำคัญ: การฝึกแบบควบคู่, สมรรถภาพทางกลไก, นักฟุตซอลหญิง

ABSTRACT

The objective of this research is to study and compare the combined training effects on skill-related physical fitness of secondary school's female futsal players. The participants of the research are 30 female futsal players divided into 3 groups with 10 people per each. The instruments applied consist of 1.) 3 training programs including PAS, ASP and SPA 2.) Agility test 3.) Muscle Power test and 4.) Speed test. The data are analyzed by mean, standard deviation, One-way ANOVA, and Two-way repeated ANOVA. By collecting the data from the 3 groups every Monday, Wednesday and Friday for the total of 6 weeks, it is found that 1.) The female futsal players have the better performances in terms of agility, strength and speed after being trained in 3 training programs comparing to the pre-training performances, following the result analyzed by mean and SD 2.) The female futsal players being trained in different training program do not have different performances in terms of speed, strength and agility, and after the 4th and 6th week of training, the performances are significantly higher at the level of 0.5, and 3.) The correlation between the different type of training and different period of training altogether affect on the skilled-related physical fitness of female futsal players after the 4th and 6th week higher at the level of 0.5.

Keywords: Combined Training, Skill-Related Physical Fitness, Female Futsal Players

บทนำ

กีฬาฟุตซอลเป็นชนิดกีฬาอีกประเภทหนึ่งที่มีความนิยมเป็นอย่างมากในหลายประเทศทั่วโลก ปัจจุบันได้มีการจัดการแข่งขันในระดับชิงแชมป์โลกภายใต้การรับรองการแข่งขันโดยสหพันธ์ฟุตบอลนานาชาติหรือฟีฟ่า (Football Association Singapore, 1997) ในประเทศไทยก็ได้รับความนิยมอย่างมาก ตั้งแต่ระดับเยาวชนจนถึงประชาชนทั่วไป กีฬาฟุตซอลได้สร้างชื่อเสียงให้กับประเทศไทยในระดับโลกมาแล้ว และได้มีโอกาสจัดการแข่งขันมาแล้วหลายรายการ ยกตัวอย่างรายการที่ใหญ่ที่สุดอย่าง FIFA Futsal World Cup 2012 ที่ประเทศไทยได้รับเกียรติเป็นเจ้าภาพจัดการแข่งขัน กีฬาฟุตซอลเป็นอาชีพที่สามารถทำชื่อเสียงและรายได้ให้แก่ตนเอง ครอบครัว และประเทศชาติด้วย เห็นได้จากรายการแข่งขันกีฬาฟุตซอลได้รับความนิยมในกลุ่มวัยรุ่นช่วงอายุ 12 – 18 ปี เป็นระดับชั้นมัธยมศึกษาทั้งตอนต้นและตอนปลาย (Limhan & Rattanakul, 2019) ทั้งประเภทชายและประเภทหญิง เช่น รายการแข่งขัน กรมพลศึกษา ฟุตซอลนักเรียนสำนักงานเขตพื้นที่การศึกษา เจแปนซูเนียร์ฟุตซอล กีฬายาวชนแห่งชาติ และกีฬานักเรียน เป็นต้น เนื่องจากเป็นกีฬาที่ใช้ระยะเวลาในการแข่งขันไม่นาน เป็นการแข่งขันที่ต้องใช้ความเร็ว ความคล่องตัวของผู้เล่นจึงส่งผลทำให้ผู้ชมรู้สึกสนุก ตื่นเต้น โดยเฉพาะนักกีฬาประเภททีมหญิงจะประสบความสำเร็จได้นั้น ต้องมีทักษะ รูปร่าง ความถนัด เทคนิค และสมรรถภาพทางกายที่เป็นปัจจัยสำคัญของกีฬาฟุตซอล (Department of Physical Education, Ministry Of Tourism and Sports, 2015)

สมรรถภาพทางกลไก คือความสามารถของร่างกายที่จะช่วยให้บุคคลสามารถประกอบกิจกรรมทางกาย โดยเฉพาะการเล่นกีฬาได้ดี โดยมีองค์ประกอบดังนี้ 1. ความแข็งแรงของกล้ามเนื้อ (Muscular Strength) 2. ความคล่องแคล่วว่องไว (Agility) 3. พลังกล้ามเนื้อ (Muscle Power) 4. ความทนทานของกล้ามเนื้อ (Muscular Endurance) 5. ความอดทนของระบบไหลเวียนโลหิต (Circulatory Endurance) 6. ความอ่อนตัว (Flexibility)

7. ความเร็ว (Speed) (Supawimol, 2007) ซึ่งจากการศึกษาและการวิเคราะห์ สมรรถภาพทางกลไกที่เกี่ยวข้อง และเป็นส่วนประกอบสำคัญกับกีฬาฟุตบอล ประกอบไปด้วย 1. ความคล่องแคล่วว่องไว (Agility) 2. พลังกล้ามเนื้อ (Muscle Power) 3. ความเร็ว (Speed) 4. ความว่องไว (Quickness) 5. ปฏิกริยาตอบสนอง (Reaction Time) และ 6. การประสานสัมพันธ์ (Coordination) โดยมีความแข็งแรง (Muscle Stenght) เป็นองค์ประกอบหลัก ที่ช่วยพัฒนาทักษะต่างๆ ในด้านสมรรถภาพทางกลไกของกีฬาฟุตบอลได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งน้อยคนในวงการกีฬาฟุตบอลจะเห็นถึงความสำคัญของสมรรถภาพในนักกีฬาฟุตบอลผู้หญิงในช่วงอายุน้อย ๆ ที่เป็นช่วงเยาวชนที่กำลังเติบโตเพื่อจะก้าวไปเล่นในระดับสโมสรหรือทีมชาติในอนาคตต่อไปอีกทั้งเรื่องทักษะพื้นฐานในการเล่นกีฬาฟุตบอลประกอบไปด้วยการเคลื่อนที่ตามระบบการหลบหลีกคู่ต่อสู้ การเคลื่อนที่ด้วยการขยับบล็อก การวิ่งออกตัว การยิงประตู การส่งลูกและการวิ่งเพื่อไปรับบอล ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่ต้องพัฒนานักกีฬาอย่างต่อเนื่อง จากการศึกษางานวิจัยที่ได้ศึกษาที่เกี่ยวกับการฝึกนักกีฬาฟุตบอลทั้งชายและหญิงจะมีการฝึกเหมือนกัน โดยจะเน้นการฝึก เช่น ความคล่องแคล่วว่องไว ความว่องไว พลังและความเร็ว (Ates, 2018) จากการศึกษาและการวิเคราะห์ จึงเลือกการฝึกความคล่องแคล่วว่องไว พลังและความเร็ว นำมาเป็นแบบฝึกในการพัฒนาสมรรถภาพทางกลไก เนื่องจากพบว่า ในการฝึกซ้อมหรือการแข่งขันในกีฬาฟุตบอลนั้น จะมีรูปแบบในการเคลื่อนที่ไปด้านหน้า ด้านข้าง กระโดด การวิ่งออกตัว การยิงประตูและการวิ่งระยะสั้นเป็นองค์ประกอบสำคัญในการฝึกซ้อมและแข่งขันในกีฬาฟุตบอล

จากหลักการและเหตุผลดังกล่าวมาผู้วิจัยมีความสนใจที่จะศึกษาและเปรียบเทียบของการฝึกโปรแกรมแบบควบคู่ของนักกีฬาฟุตบอลหญิง โดยมีโปรแกรมฝึก 3 แบบ ได้แก่ ความคล่องแคล่วว่องไว พลังกล้ามเนื้อและความเร็ว โดยแบ่งนักกีฬาออกเป็น 3 กลุ่ม ทุกกลุ่มจะได้รับการฝึกทั้ง 3 แบบแต่ช่วงเวลาแตกต่างกัน เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบผลงานของการพัฒนาด้านสมรรถภาพทางกลไกที่ส่งเสริมนักกีฬาฟุตบอลหญิงได้เร็วขึ้นเพื่อเป็นการส่งเสริมสมรรถภาพทางกลไกของนักกีฬาฟุตบอลหญิงให้มีความสมบูรณ์และมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

วิธีการ

กลุ่มเป้าหมายที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้เป็นนักกีฬาฟุตบอลหญิงตัวแทนของโรงเรียนสายน้ำผึ้ง จำนวน 30 คน แบ่งกลุ่มออกเป็น 3 กลุ่ม ๆ ละ 10 คน ประกอบด้วย 1) กลุ่ม PAS (พลัง ความคล่องแคล่วว่องไว ความเร็ว) 2) กลุ่ม ASP (ความคล่องแคล่วว่องไว ความเร็ว พลัง) และ 3) กลุ่ม SPA (ความเร็ว พลัง ความคล่องแคล่วว่องไว) โดยแต่ละกลุ่มต้องเรียงลำดับคะแนนการทดสอบความคล่องแคล่วว่องไวด้วยแบบทดสอบ Agility T-test จากนั้นไปหาหมาก แล้วจัดกลุ่มด้วยวิธีการจับคู่ (Matching) วิจัยเป็นแบบหลายกลุ่มอนุกรมเวลา (Multi-groups Time Series Design) โดยมีระยะเวลาในการทดลอง 6 สัปดาห์ ดำเนินการวัดผลค่าของตัวแปรตามก่อนการทดลอง หลังการฝึกสัปดาห์ที่ 4 และ 6 สัปดาห์

เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

1. โปรแกรมการฝึกความคล่องแคล่วว่องไว พลังและความเร็ว ประกอบด้วย 3 แบบ คือ PAS ASP และ SPA ในการฝึกโปรแกรม ทุกกลุ่มจะได้รับการฝึกพร้อมกัน แต่ลำดับการฝึกไม่เหมือนกัน ลำดับการฝึกเป็นดังต่อไปนี้ คือ

1.1 กลุ่ม PAS จะฝึก พลัง ความคล่องแคล่วว่องไวและความเร็ว

1.2 กลุ่ม ASP จะฝึก ความคล่องแคล่วว่องไว ความเร็วและพลัง

1.3 กลุ่ม SPA จะฝึก ความเร็ว พลังและความคล่องแคล่วว่องไว

1.4 มีระยะเวลาการฝึก 6 สัปดาห์ สัปดาห์ละ 3 วัน ใช้เวลาในการฝึกวันละ 60 นาที โดยฝึกซ้อมในวันจันทร์ วันพุธ วันศุกร์ ช่วงเวลา 16.00 – 17.00 น.

2. แบบทดสอบความคล่องแคล่วว่องไว พลังและความเร็ว (Department of Physical Education, 2017)

2.1 ความคล่องแคล่วว่องไว คือ Agility T-test

2.2 พลังกล้ามเนื้อ คือ Standing Board Jump

2.3 ความเร็ว คือ แบบทดสอบความเร็วในการวิ่ง ระยะ 5 เมตร ระยะ 10 เมตร ระยะ 20 เมตร

การหาคุณภาพของเครื่องมือ

1. ศึกษาค้นคว้าจากเอกสาร คู่มือเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการฝึกแบบควบคุมที่มีต่อสมรรถภาพทางกลไกโดยใช้หลักการฝึกแบบควบคุม และมีขั้นตอนในการฝึก (Lee et al., 2014)
2. ขั้นตอนการอบอุ่นร่างกาย คือ การยืดเหยียดกล้ามเนื้อแบบเคลื่อนที่ (Dynamic Stretching)
3. ขั้นตอนการออกกำลังกาย คือ การฝึกแบบควบคุมที่มีต่อสมรรถภาพทางกลไก
4. ขั้นตอนการคลายอุ่น คือ การยืดเหยียดกล้ามเนื้อแบบอยู่กับที่ (Static Stretching)
5. ปรึกษาอาจารย์ที่ปรึกษา เพื่อตรวจสอบโปรแกรมแบบควบคุมสมรรถภาพทางกลไก
6. นำโปรแกรมการฝึกแบบควบคุมที่มีต่อสมรรถภาพทางกลไกส่งผู้ทรงคุณวุฒิจำนวน 5 ท่านตรวจสอบความเที่ยงตรงเชิงเนื้อหาและตรวจสอบความสอดคล้องของเครื่องมือในการวิจัยที่มีต่อความคล่องแคล่วว่องไว พลังและความเร็ว กับวัตถุประสงค์ของการฝึก โดยหาค่าดัชนีความสอดคล้องระหว่างผู้ทรงคุณวุฒิตรวจเครื่องมือการวิจัยหรือค่า (Index of Item Objective Congruence: IOC) และกำหนดค่าดัชนีความสอดคล้องไม่ต่ำกว่า 0.50 ค่าดัชนีความสอดคล้องของโปรแกรมการฝึกเฉลี่ยอยู่ที่ 0.80 - 1.00

การวิเคราะห์ข้อมูล

1. หาค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ของผลการฝึกแบบควบคุมความคล่องแคล่ว พลังกล้ามเนื้อ ความเร็ว
2. เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของความคล่องแคล่วว่องไว พลังกล้ามเนื้อและความเร็วของกลุ่มทดลองที่ได้รับการฝึกแบบควบคุมในแต่ละรูปแบบ ก่อนได้ฝึกและหลังการฝึกสัปดาห์ที่ 4 และสัปดาห์ที่ 6 โดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวชนิดวัดซ้ำ (One-way Repeated ANOVA) โดยวิธีของ Least – Significant Different (LSD) ในการวิเคราะห์การเปรียบเทียบรายคู่ เพื่อทดสอบสมมติฐานข้อที่ 1
3. เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของความคล่องแคล่วว่องไว พลังกล้ามเนื้อ และความเร็วของกลุ่มทดลองที่ได้รับการฝึกแบบควบคุมในแต่ละรูปแบบและในแต่ละช่วงระยะเวลาของการฝึก เพื่อศึกษาค่าปฏิสัมพันธ์ของรูปแบบการฝึกและระยะเวลาการฝึกโดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางชนิดวัดซ้ำ (Two-way Repeated ANOVA) โดยวิธีของ Least – Significant Different (LSD) ในการวิเคราะห์การเปรียบเทียบรายคู่ เพื่อทดสอบสมมติฐานข้อที่ 3

ผลการทดลองและวิจารณ์

ตอนที่ 1 วิเคราะห์ค่าเฉลี่ย และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ของผลการฝึกแบบควบคุมความเร็ว พลังและความคล่องแคล่วว่องไว ก่อนการฝึก หลังการฝึกสัปดาห์ที่ 4 และ 6 ของกลุ่มทดลอง 3 กลุ่มและเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยคะแนนการทดสอบความคล่องแคล่วว่องไว พลังและความเร็ว ของ 3 กลุ่ม ก่อนการฝึก โดยพบว่า

ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของคะแนนการทดสอบความเร็ว ของกลุ่ม PAS ก่อนการฝึก เท่ากับ 3.93 (SD = 0.43) หลังการฝึกสัปดาห์ที่ 6 เท่ากับ 3.81 (SD = 0.38) กลุ่ม ASP ก่อนการฝึก เท่ากับ 3.99 (SD = 0.39) หลังการฝึก สัปดาห์ที่ 6 เท่ากับ 3.71 (SD = 0.28) กลุ่ม SPA ก่อนการฝึกเท่ากับ 4.02 (SD = 0.38) หลังการฝึก สัปดาห์ที่ 6 เท่ากับ 3.07 (SD = 0.32)

ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของคะแนนการทดสอบพลัง ของกลุ่ม PAS ก่อนการฝึก เท่ากับ 172.70 (SD = 18.44) หลังการฝึกสัปดาห์ที่ 6 เท่ากับ 177.70 (SD = 18.70) กลุ่ม ASP ก่อนการฝึก เท่ากับ 171.40 (SD = 16.48) หลังการฝึก สัปดาห์ที่ 6 เท่ากับ 175.30 (SD = 16.59) กลุ่ม SPA ก่อนการฝึกเท่ากับ 171.90 (SD = 16.27) หลังการฝึก สัปดาห์ที่ 6 เท่ากับ 177.10 (SD = 16.29)

ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของคะแนนการทดสอบความคล่องแคล่วว่องไว ของกลุ่ม PAS ก่อนการฝึก เท่ากับ 13.08 (SD = 0.80) หลังการฝึกสัปดาห์ที่ 6 เท่ากับ 12.59 (SD = 0.83) กลุ่ม ASP ก่อนการฝึก เท่ากับ 13.08 (SD = 0.77) หลังการฝึก สัปดาห์ที่ 6 เท่ากับ 12.87 (SD = 0.74) กลุ่ม SPA ก่อนการฝึกเท่ากับ 13.09 (SD = 0.82) หลังการฝึก สัปดาห์ที่ 6 เท่ากับ 12.09 (SD = 0.76)

ตอนที่ 2 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวชนิดวัดซ้ำ (One-way Repeated Measure Analysis of Variance) ของคะแนนการทดสอบความคล่องแคล่วว่องไว พลังและความเร็ว ระหว่างก่อนการฝึก หลังการฝึกสัปดาห์ที่ 4 และหลังการฝึกสัปดาห์ที่ 6 ของกลุ่ม PAS กลุ่ม ASP และกลุ่ม SPA และวิเคราะห์การเปรียบเทียบรายคู่ โดยวิธี LSD ที่ระดับความมีนัยสำคัญทางสถิติ .05

ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์ความแตกต่างเป็นรายคู่ของระยะเวลาในการฝึกที่มีต่อความเร็ว ของกลุ่ม PAS กลุ่ม ASP และ กลุ่ม SPA โดยวิธี LSD

ระยะเวลา	ค่าเฉลี่ย	ก่อนฝึก	หลังฝึก 4 สัปดาห์	หลังฝึก 6 สัปดาห์
กลุ่ม PAS				
ก่อนฝึก	3.93	-	.02*	.12*
หลังฝึก 4 สัปดาห์	3.91		-	.10*
หลังฝึก 6 สัปดาห์	3.81			-
กลุ่ม ASP				
ก่อนฝึก	3.99	-	.24*	.28*
หลังฝึก 4 สัปดาห์	3.75		-	.04*
หลังฝึก 6 สัปดาห์	3.71			
กลุ่ม SPA				
ก่อนฝึก	4.02	-	.59*	.95*
หลังฝึก 4 สัปดาห์	3.43		-	.36*
หลังฝึก 6 สัปดาห์	3.07			-

*มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05

จากตารางที่ 1 เมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างเป็นรายคู่คะแนนการทดสอบความเร็ว โดย LSD พบว่า กลุ่ม PAS กลุ่ม ASP และ กลุ่ม SPA ก่อนการฝึกแตกต่างกับหลังการฝึกสัปดาห์ที่ 4 และ หลังการฝึกสัปดาห์ที่ 6 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ความแตกต่างเป็นรายคู่ของระยะเวลาในการฝึกที่มีต่อพลัง ของกลุ่ม PAS กลุ่ม ASP และกลุ่ม SPA โดยวิธี LSD

ระยะเวลา	ค่าเฉลี่ย	ก่อนฝึก	หลังฝึก 4 สัปดาห์	หลังฝึก 6 สัปดาห์
กลุ่ม PAS				
ก่อนฝึก	172.70	-	-3.50*	-5.00*
หลังฝึก 4 สัปดาห์	176.20		-	-1.50*
หลังฝึก 6 สัปดาห์	177.70			-
กลุ่ม ASP				
ก่อนฝึก	171.40	-	-2.70*	-3.90*
หลังฝึก 4 สัปดาห์	174.10		-	-1.20*
หลังฝึก 6 สัปดาห์	175.30			-
กลุ่ม SPA				
ก่อนฝึก	171.90	-	-4.70*	-5.20*
หลังฝึก 4 สัปดาห์	176.60		-	-1.70*
หลังฝึก 6 สัปดาห์	177.10			-

*มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05

จากตารางที่ 2 เมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างเป็นรายคู่คะแนนการทดสอบพลัง โดย LSD พบว่ากลุ่ม PAS กลุ่ม ASP และกลุ่ม SPA ก่อนการฝึกแตกต่างกับหลังการฝึกสัปดาห์ที่ 4 และหลังการฝึกสัปดาห์ที่ 6 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ความแตกต่างเป็นรายคู่ของระยะเวลาในการฝึกที่มีต่อความคล่องแคล่วว่องไว ของกลุ่มPAS กลุ่ม ASP และกลุ่ม SPA โดยวิธี LSD

ระยะเวลา	ค่าเฉลี่ย	ก่อนฝึก	หลังฝึก 4 สัปดาห์	หลังฝึก 6 สัปดาห์
กลุ่ม PAS				
ก่อนฝึก	13.08	-	.23*	.49*
หลังฝึก 4 สัปดาห์	12.84		-	.25*
หลังฝึก 6 สัปดาห์	12.59			-
กลุ่ม ASP				
ก่อนฝึก	13.08	-	.15*	.21*
หลังฝึก 4 สัปดาห์	12.93		-	.06*
หลังฝึก 6 สัปดาห์	12.87			-
กลุ่ม SPA				
ก่อนฝึก	13.09	-	.71*	1.00*
หลังฝึก 4 สัปดาห์	12.38		-	.29*
หลังฝึก 6 สัปดาห์	12.09			-

*มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05

จากตารางที่ 3 เมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างเป็นรายคู่คะแนนการทดสอบความคล่องแคล่วว่องไว โดย LSD พบว่ากลุ่ม PAS กลุ่ม ASP และกลุ่ม SPA ก่อนการฝึกแตกต่างกับหลังการฝึกสัปดาห์ที่ 4 และหลังการฝึกสัปดาห์ที่ 6 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05

ตอนที่ 3 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางชนิดวัดซ้ำ (Two-way Repeated ANOVA) ของคะแนนการทดสอบความเร็ว พลังและความคล่องแคล่วว่องไว ระหว่าง 3 กลุ่ม ในการฝึกแบบควบคู่ในแต่ละรูปแบบและในแต่ละช่วงระยะเวลาของการฝึก และเมื่อพบความแตกต่างทดสอบความแตกต่างเป็นรายคู่ โดยวิธี LSD

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางชนิดวัดซ้ำของความเร็ว ระหว่างกลุ่ม PAS กลุ่ม ASP และกลุ่ม SPA

แหล่งความแปรปรวน	SS	df	MS	F	Sig.
ระยะเวลาในการฝึก	3.11	2	1.56	261.36*	<.01
โปรแกรมการฝึก	2.43	2.00	1.21	3.31*	.05
ระยะเวลาในการฝึก*	2.07	4.00	.52	86.79*	<.01
โปรแกรมการฝึก					
ความคลาดเคลื่อน	.32	54.00	.01		

*มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05

จากตารางที่ 4 พบว่าระยะเวลาในการฝึกส่งผลต่อความเร็วอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 และพบว่าปฏิสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการฝึกและโปรแกรมการฝึกร่วมกันส่งผลต่อความเร็วอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 นอกจากนี้ยังพบว่าโปรแกรมการฝึกที่แตกต่างกันส่งผลต่อความเร็วอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 จึงดำเนินการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของความเร็วเป็นรายคู่ของแต่ละโปรแกรม ด้วยวิธีการเปรียบเทียบรายคู่ (Multiple Comparison Test) ตามวิธีของ LSD

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางชนิดวัดซ้ำของพลัง ระหว่างกลุ่ม PAS กลุ่ม ASP และกลุ่ม SPA

แหล่งความแปรปรวน	SS	df	MS	F	Sig.
ระยะเวลาในการฝึก	413.62	2.00	206.81	363.38*	<.01
โปรแกรมการฝึก	77.42	2.00	38.71	.04	.96
ระยะเวลาในการฝึก*	17.64	4.00	4.41	7.75*	<.01
โปรแกรมการฝึก					
ความคลาดเคลื่อน	30.73	54.00	.57		

*มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05

จากตารางที่ 5 พบว่าระยะเวลาในการฝึกส่งผลต่อพลัง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 และพบว่าปฏิสัมพันธ์ระหว่างระยะในการฝึกและโปรแกรมการฝึกร่วมกันส่งผลต่อพลังอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 เช่นเดียวกัน แต่โปรแกรมการฝึกที่แตกต่างกันไม่ส่งผลต่อพลัง

ตารางที่ 6 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางชนิดวัดซ้ำของความคล่องแคล่วว่องไว ระหว่างกลุ่ม PAS กลุ่ม ASP และกลุ่ม SPA

แหล่งความแปรปรวน	SS	df	MS	F	Sig.
ระยะเวลาในการฝึก	4.89	2.00	2.45	238.65*	<.01
โปรแกรมการฝึก	3.12	2.00	1.56	.82	.45
ระยะเวลาในการฝึก*	1.76	4.00	.44	43.02*	<.01
โปรแกรมการฝึก					
ความคลาดเคลื่อน	.55	54.00	.01		

*มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05

จากตารางที่ 6 พบว่าระยะเวลาในการฝึกส่งผลต่อความคล่องแคล่วว่องไวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 และพบว่าปฏิสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการฝึกและโปรแกรมการฝึกร่วมกันส่งผลต่อความคล่องแคล่วว่องไว อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 เช่นเดียวกัน แต่โปรแกรมการฝึกที่แตกต่างกันไม่ส่งผลต่อความคล่องแคล่วว่องไว

สรุป

1. ผลการฝึกโปรแกรมแบบควบคุมด้วยรูปแบบการฝึกที่แตกต่างกันมีผลต่อสมรรถภาพทางกลไกของนักกีฬาฟุตบอลหญิง พบว่า กลุ่มตัวอย่างมีค่าเฉลี่ยของความคล่องแคล่วว่องไว พลังและความเร็ว ตีวก่อนการฝึก โดยหลังการฝึก สัปดาห์ที่ 4 และ สัปดาห์ที่ 6 ตีวก่อนการฝึกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 สอดคล้องกับ (Chanampong, et al., 2019) กล่าวว่าสมรรถภาพทางกลไกเป็นสิ่งสำคัญของการดำรงชีวิตและสังคมเป็นพื้นฐานเบื้องต้น เพราะสมรรถภาพทางกลไกนั้นมีความสำคัญต่อการเรียนรู้ของนักศึกษาสาขาวิชาพลศึกษา มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์ เพื่อต้องการที่จะพัฒนาร่างกายให้มีประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งจะนำไปสู่การเตรียมความพร้อมในการเรียนการสอน การฝึกซ้อมกีฬา และแก้ไขจุดบกพร่องที่เกิดขึ้นเพื่อให้เกิดความเป็นเลิศทางด้านกีฬา รวมถึงการดูแลเอาใจใส่นักศึกษาสาขาวิชาพลศึกษาอย่างถูกต้องจึงจะเกิดการพัฒนาด้านร่างกาย จิตใจ อารมณ์ สังคม และสติปัญญา ตลอดจนเป็นแนวทางในการพัฒนานักศึกษา สาขาวิชาพลศึกษาให้ดียิ่งขึ้นต่อไปในอนาคต จะทำให้นักศึกษาสาขาวิชาพลศึกษาสามารถประกอบ กิจกรรมต่าง ๆ ในการดำรงชีวิตประจำวันได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งช่วยให้พัฒนาในด้านสมรรถภาพทางกลไกดียิ่งขึ้น

2. ผลการเปรียบเทียบโดยใช้หลักการฝึกโปรแกรมแบบควบคุมด้วยรูปแบบการฝึกที่แตกต่างกันมีผลต่อสมรรถภาพทางกลไกของนักกีฬาฟุตบอลหญิง กลุ่มตัวอย่างที่ได้รับโปรแกรมการฝึกที่แตกต่างกัน มีความเร็ว พลังและความคล่องแคล่วว่องไวไม่แตกต่างกัน พบว่ากลุ่มที่ฝึกแบบ PAS แบบ ASP และแบบ SPA ส่งผลค่าเฉลี่ยในหลังการฝึก สัปดาห์ที่ 4 และสัปดาห์ที่ 6 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 ทั้งนี้ไม่ว่าจะใช้โปรแกรมการฝึกรูปแบบไหนก็สามารถเพิ่มสมรรถภาพทางกลไก ความเร็ว พลังและความคล่องแคล่วว่องไวได้ สอดคล้องกับ (Hattha et al., 2014)

กล่าวว่าความคล่องแคล่วว่องไว พลังกล้ามเนื้อและความเร็ว เป็นองค์ประกอบพื้นฐานสำคัญของสมรรถภาพทางกลไก ซึ่งสามารถพัฒนาได้โดยใช้แบบฝึกดังนี้ ความคล่องแคล่วว่องไวสามารถฝึกได้โดยตารางเก้าช่อง พลังกล้ามเนื้อใช้พลัยโอเมตริก ความเร็วใช้การฝึกวิ่งระยะสั้น การฝึกตารางเก้าช่องจะทำให้เกิดความคล่องแคล่วว่องไว พลายโอเมตริกจะฝึกเพื่อให้เกิดการเคลื่อนไหวแบบพลังระเบิด การฝึกวิ่งระยะสั้นจะทำให้เกิดความเร็วดังระยะที่เราฝึกตามโปรแกรมการจะเพิ่มความคล่องแคล่วว่องไว พลังกล้ามเนื้อและความเร็วได้ดีที่สุดในช่วงการฝึกต้องทำโดยใช้แรงสูงสุดและความเร็วในการเคลื่อนไหวในการฝึกให้มากขึ้นด้วย แต่โปรแกรมการฝึกและความหนักในการฝึกต้องคำนึงถึงโอกาสของการบาดเจ็บจากแรงกระแทกที่หนักด้วย เนื่องจากนักกีฬาฟุตบอลหญิงอายุระหว่าง 13-15 ปี ร่างกายยังต้องการค่อย ๆ เพิ่มความแข็งแรงของกล้ามเนื้อในการพัฒนาความสามารถของร่างกายในอีกหลายๆ ด้านไปพร้อม ๆ กัน

3. ปฏิสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบการฝึกในโปรแกรมการฝึกที่แตกต่างกันและมีระยะเวลาในการฝึกที่แตกต่างร่วมกันส่งผลต่อสมรรถภาพทางกลไกของนักกีฬาฟุตบอลหญิง พบว่า ปฏิสัมพันธ์ระหว่างโปรแกรมการฝึกแบบ PAS แบบ ASP และแบบ SPA หลังการฝึกสัปดาห์ที่ 4 และ สัปดาห์ที่ 6 ทั้ง 3 กลุ่ม แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ .05

3.1 ในช่วงระยะเวลาการฝึกส่งผลต่อความเร็วและปฏิสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการฝึกโปรแกรมหลังการฝึก 4 สัปดาห์ และ 6 สัปดาห์ กลุ่มตัวอย่างทั้ง 3 กลุ่มมีค่าเฉลี่ยความเร็วแตกต่างกัน กลุ่มตัวอย่างที่ได้รับการฝึกแบบ SPA และแบบ ASP มีค่าเฉลี่ยของความเร็วดีกว่ากลุ่มตัวอย่างที่ได้รับการฝึกแบบ PAS อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 และกลุ่ม SPA มีค่าเฉลี่ยความเร็วดีกว่ากลุ่ม PAS และแบบ ASP อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 สอดคล้องกับ (Louw, 2019) ผลการวิจัยพบว่าทั้งการวิ่งระยะสั้นและพลัยโอเมตริกระบบการฝึกมีประสิทธิภาพในการช่วยให้ความคล่องแคล่วว่องไวและพลังขาและการวิ่งที่ระยะ 10, 20, 40 และ 100 เมตร เป็นการฝึกที่มีประสิทธิภาพในเวลาวิ่งระยะ 40 เมตร ไม่ว่าจะวิ่งระยะสั้นหรือการฝึกพลัยโอเมตริก ส่งผลให้มีการพัฒนาที่สำคัญในช่วง 80 เมตร การเปรียบเทียบของวิธีการฝึกโปรแกรมทั้งสองโปรแกรม ส่วนความคล่องแคล่วว่องไวของกลุ่มการฝึกพลัยโอเมตริกมีประโยชน์ของการฝึกความอดทนด้านความเร็ว กำลัง และการวิ่งของทั้งสองการฝึกวิธีการก็ไม่ต่างกัน และสอดคล้องกับ (Namponkrang, 2020) ผลของการฝึกโปรแกรม เอส คิว ที่มีผลต่อความเร็วในการวิ่ง 50 เมตร ก่อนการฝึกและหลังการฝึกสัปดาห์ที่ 8 ของกลุ่มทดลอง แตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวชนิดวัดซ้ำของความเร็วในการวิ่ง 50 เมตร ก่อนการฝึก หลังการฝึกสัปดาห์ที่ 4 และหลังการฝึกสัปดาห์ที่ 8 แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 ผลการเปรียบเทียบรายคู่ของระยะเวลาในการฝึกที่มีต่อความเร็วในการวิ่ง 50 เมตร ของนิสิต หลังการฝึกสัปดาห์ที่ 4 และหลังการฝึกสัปดาห์ที่ 8 แตกต่างจากก่อนการฝึกและหลังการฝึกสัปดาห์ที่ 8 แตกต่างจากหลังการฝึกสัปดาห์ที่ 4 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05

3.2 ในช่วงระยะเวลาการฝึกส่งผลต่อพลังและปฏิสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการฝึกโปรแกรมหลังการฝึก 4 สัปดาห์ และ 6 สัปดาห์ กลุ่มตัวอย่างทั้ง 3 กลุ่มมีค่าเฉลี่ยพลังไม่แตกต่างกัน กลุ่มตัวอย่างที่ได้รับการฝึกแบบ PAS แบบ ASP และแบบ SPA ทั้ง 3 กลุ่ม มีค่าเฉลี่ยของพลังเพิ่มมากขึ้นกว่าการฝึกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 สอดคล้องกับ (Kamutsri, 2017) กล่าวว่าความเร็วนั้นจะส่งผลต่อพลังกล้ามเนื้อเป็นความแข็งแรงชนิดที่ต้องการให้กล้ามเนื้อออกแรงเคลื่อนไหวกระทำกับแรงต้านอย่างรวดเร็ว เป็นการทำงานผสมผสานในการยืดและหดตัวของกล้ามเนื้อให้ได้แรงมากที่สุดในช่วงเวลาสั้น ๆ เป็นความแข็งแรงที่สัมพันธ์กับทักษะและกลไกการเคลื่อนไหวในการเล่นกีฬาโดยตรง ความแข็งแรง (Strength) บวกกับ ความเร็ว (Speed) จะส่งผล กำลังกล้ามเนื้อ (Power) ให้ดีขึ้น ความแข็งแรงกล้ามเนื้อไม่สามารถแยกออกจากกำลังกล้ามเนื้อได้โดยมีความสัมพันธ์กันตามสูตร การฝึกเพื่อพัฒนากำลังกล้ามเนื้อที่ได้รับการยอมรับและได้ผลดี คือ ใช้ Weight Training และ Plyometric และสอดคล้องกับ

(Thupbut, 2019) ผลการฝึกพบว่า ก่อนการฝึกและหลังการฝึกสัปดาห์ที่ 4 และสัปดาห์ที่ 6 วิเคราะห์ข้อมูลด้วยสถิติพื้นฐานการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบชนิดวัดซ้ำ การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางชนิดวัดซ้ำ และการทดสอบค่าที ผลการวิจัยพบว่ากลุ่มตัวอย่างทั้ง 2 กลุ่มมีพลังกล้ามเนื้อและความคล่องแคล่วว่องไวดีขึ้นตามระยะของการฝึก อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างโปรแกรมการฝึกที่แตกต่างกันเมื่อผ่านการฝึกไปแล้วอย่างน้อย 6 สัปดาห์ พบว่ากลุ่มการฝึกแบบควบคุมดีกว่าแบบผสมผสาน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05

3.3 ในช่วงระยะเวลาการฝึกส่งผลต่อความคล่องแคล่วว่องไวและปฏิสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการฝึกโปรแกรม หลังการฝึก 4 สัปดาห์ และ 6 สัปดาห์ กลุ่มตัวอย่างทั้ง 3 กลุ่มมีค่าเฉลี่ยความคล่องแคล่วว่องไวแตกต่างกัน กลุ่มตัวอย่างที่ได้รับการฝึกแบบ SPA มีค่าเฉลี่ยของความคล่องแคล่วว่องไวดีกว่ากลุ่มตัวอย่างที่ได้รับการฝึกแบบ PAS และกลุ่ม ASP อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 สอดคล้องกับ (Fajrin et al., 2018) ในการศึกษาที่ใช้รูปแบบการออกกำลังกายแบบพลัยโอเมตริกเป็นแบบฝึกโปรแกรมความเข้มข้นสูงและการวิ่งจ็อกกิ้งเป็นการออกกำลังกายที่เข้มข้นเล็กน้อยหรือปานกลาง ผลมีการเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของลักษณะทางของระบบประสาทและกล้ามเนื้อที่ส่งผลต่อการเพิ่มความแข็งแรงและประสิทธิภาพของกล้ามเนื้อ จากจากการวิเคราะห์ข้อมูลแบบฝึกหัดการฝึกแบบเข้มข้นสูงส่งผลอย่างมากต่อการเพิ่มพลังของความเร็วและความคล่องแคล่วว่องไว และสอดคล้องกับ (Tachaila, 2018) ผลการวิจัยพบว่า 1. หลังการฝึกด้วยโปรแกรมการฝึกพลัยโอเมตริก โปรแกรมการฝึก เอส เอ คิว และโปรแกรมการฝึกพลัยโอเมตริก ควบคุมการฝึก เอส เอ คิว พบว่ากลุ่มตัวอย่างที่มีความเร็วและมีต่อความคล่องแคล่วว่องไว เพิ่มขึ้นมากกว่าการฝึกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 2. หลักการฝึกด้วยโปรแกรมการฝึกพลัยโอเมตริก โปรแกรมการฝึก เอส เอ คิว และโปรแกรมการฝึกพลัยโอเมตริก ควบคุมการฝึก เอส เอ คิว ในระยะเวลา 2, 4, 6 และ 8 สัปดาห์ พบว่าทุกโปรแกรมมีความเร็วและมีต่อความคล่องแคล่วว่องไวของกลุ่มตัวอย่างไม่แตกต่างกัน และปฏิสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการฝึกและโปรแกรมการฝึกไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ .05

สรุปได้ว่าการฝึกแบบควบคุมทั้งกลุ่ม PAS กลุ่ม ASP และกลุ่ม SPA จะช่วยเสริมสร้างสมรรถภาพทางกลไกด้านความคล่องแคล่วว่องไว พลังและความเร็วของนักกีฬาฟุตบอลหญิงระดับมัธยมศึกษาได้ดีเมื่อใช้ระยะเวลาฝึกที่เพียงพอ แต่กลุ่มที่ทำได้แตกต่างและดีจาก 3 กลุ่มนี้คือกลุ่ม SPA ที่มีค่าความเร็ว พลังและความคล่องแคล่วว่องไวได้ดีที่สุดโดยช่วงระยะเวลาการฝึกหลัง 6 สัปดาห์

เอกสารอ้างอิง

- Ates B. (2018). **Age-Related Effects of Speed and power on agility performance of young soccer players.** (Degree of Master). Usak Turkey University. Usak Merkez, Turkey.
- Chanampong T, Thongbai C, Choktaweekha T, Wiriyaakit S., & Prapakittiratana W. (2019). The creation of a mechanical performance test for students In the field of physical education at Nakhon Sawan Rajabhat University. **Academic Journal Faculty Of Humanities And Social Sciences, Nakhon Sawan Rajabhat University.** 6(2), 28-38. (In thai)
- Department of Physical Education, Ministry Of Tourism and Sports. (2015). **Characteristics of body proportions body composition and mechanical performance of thai youth futsal athletes.** Weerawan Printing And Packaging Factory. (In thai)

- Fajrin F., Kusnanik N., & Jono W. (2018). Effects of high intensity interval training on increasing explosive power, speed, and agility. *Journal of Physics*, 10(1), 42-65
- Football Association Singapore. (1997). **Fifa Afc Fas-Futsal Event**. Retrieved Form <https://anyflip.com/myysa/nxia/basic> [2020, 15 Nov.]
- Hattha. H., Piromkam, B., & Bhatharobhas V. (2014). Effect of plyometric training on agility of futsal players. *Journal of sports science and technology*. 14(2), 53-63. (In thai)
- Kamutsri T. (2017). **Physical fitness enhancement**. Bangkok media press 2017. (In thai)
- Lee E.B, Vance A.S., & Juan Carlos.S. (2014). **Training for speed, agility and quickness (ACSM)**. human kinetics. Printed in The United States of America.
- Limhan J. & Rattananrotchanakul R. (2019). Strategies in futsal expertise. Motivation in the trick. *Journal of health education and education*. (In thai)
- Louw W. (2019). **A comparative study of the effects of sprint and plyometric training on the speed, Agility and power output in intermediate rugby players**. Master of arts in sport, recreation and exercise science. University of The Western Cape. Western Cape, South Africa.
- Namponkrang M. (2020). **Effect of S Q training on the speed of the students in Burapha University**. (Degree of Master). Srinakharinwirot University. Bangkok, Thailand (In thai)
- Supawimol P. (2007). **Mechanism Performance of students in the second grade in schools under Muang Ang Thong municipality**. (Degree of Master). Srinakharinwirot University. Bangkok, Thailand. (In thai)
- Tachaila M. (2018). **Effects of plyometric coupled with ASAQ training program on the speed and agility of soccer players**. (Degree of Master). Srinakharinwirot University. Bangkok, Thailand. (In thai)
- Thupbut P. (2019). **Effects of complex training and combination training upon leg muscle power and the agility of female volleyball players**. (Degree of Master). Srinakharinwirot University. Bangkok, Thailand . (In thai)

.....

EFFECT OF LIGHT AND DARK CONDITIONS ON QUALITY CHANGES OF MUNG BEAN SPROUT DURING STORAGE

Sompoch Noichinda¹, Kitti Bodhipadma^{1*}, Suriya Rutatip¹ and Thayanin Rattanaphisit¹

¹Division of Agro-Industrial Technology, Faculty of Applied Science, King Mongkut's University of Technology
North Bangkok, Bang-sue, Bangkok 10800, Thailand

*E-mail: kitti.b@sci.kmutnb.ac.th

Received: 2021-07-19

Revised: 2021-09-10

Accepted: 2021-09-17

ABSTRACT

Mung bean sprouts are an ingredient in many Thai dishes. However, this kind of component is easily perishable. Thus, the present research aimed to find the optimum condition for storing mung bean sprouts under light and dark circumstances. Mung bean seeds were soaked overnight, placed on a plastic tray that liner with three layers of tissue paper, and kept in the dark for 24 hours. Then, 50 grams of sprout was packed in a polyethylene plastic Ziploc bag, placed in a corrugated paper box in the absence or presence of light, and kept at 4°C; 90±2%RH and 25°C; 65±5%RH. It was revealed that the hypocotyl lightness (L^* value) of the sprout that stored in the absence of light at 4°C had a bit changed. Though the low-temperature condition induced browning, keeping in the dark condition delayed the browning process and fibrousness in sprout hypocotyl. Nevertheless, light maintained more crispness at 4°C better than 25°C. Therefore, to extend mung bean sprout quality, it should be packed in opaque packaging and stored at 4°C.

Keywords: mung bean, packaging, seed, shelf-life, storage

Introduction

A leguminous seed contains a high amount of protein and dietary fiber. Mung bean sprouts are enriched with antioxidants widely consumed worldwide (López-Amoróse et al., 2006). Seed germination to sprout is one of the most effective methods to improve the quality of legumes. There was a significant increase in crude protein concentration, total dietary fiber content, and GABA (γ -aminobutyric acid) amounts in mung bean during seed germination (Tiansawang et al., 2016). The

germination process is influenced by external factors, particularly water soaking and germinating time in the absence of a light condition.

During storage period, most freshly plant parts continue their living processes: anabolism and catabolism. The rate of metabolism was dependent on the environmental stress factors such as high temperature and water stress. This reactive stress was related to the redox-reaction that emitted more reactive oxygen species (ROS), particularly superoxide anion ($O_2^{\bullet-}$). Plant discriminated the harmful $O_2^{\bullet-}$ to hydrogen peroxide (H_2O_2), a non-reactive ROS form by superoxide dismutase (SOD). H_2O_2 will be transformed into the harmful substances (hydroxyl radical; $OH^{\bullet}$) to caused membrane lipid peroxidation via Fenton reaction in the presence of Fe^{2+} (Noichinda et al., 2018; Chuenchom et al., 2021).

After harvest, the sprout is packed in a transparent plastic bag and places on the supermarket shelf display. However, bean sprout is highly perishable and inherently short shelf-life. Modified atmosphere packaging combined with cold storage was beneficial for extending the shelf-life of fresh sprouts (Varoquaux et al., 1996). Sprout generally remains stable at 5°C and reaches the lower limit of marketability after 3-4 days. This rapid loss of quality is due to wilting, softening, and browning of hypocotyls (Tajiri, 1979; Tonprasong et al., 2002). Under this condition, light and low temperature are necessary to prolong sprout quality and shelf life. Light exposure showed a prominent effect on the growth and quality of bean sprouts (Tajiri, 1985). Accordingly, the objective of this research was to evaluate the mung bean sprout quality changing in the presence and absence of light to achieve the best condition for extended shelf-life.

Methods

The uniform mung bean (*Vigna radiate* roxb) seeds were soaked in clean tap water until seed coat swelling (12 hours) at room temperature ($30\pm3^\circ\text{C}$). The floating seeds were discarded while the sink ones were placed on a plastic tray (28x40x5 cm) that liner with 3 layers (0.066x3 mm thick) of tissue paper. Seeds were laid on tissue paper at the distance of 1.5 cm between each other, then covered with one layer of tissue paper. Clean tap water (80 ml) was poured on the covered tissue paper. This plastic tray was placed in an opaque plastic box (36x48x23 cm) and covered the plastic box with a bathroom towel (35x70 cm) for 24 hours at room temperature ($30\pm3^\circ\text{C}$). Fifty grams of one-day germinating mung bean sprout was packed in a polyethylene plastic Ziploc bag (Big C®, 25x37.5 cm; 0.253 mm thickness). The packaged bean sprout was placed in a corrugated paper box (32x48x28 cm) that liner with aluminum foil. The box was illuminated at $30 \mu\text{mole m}^{-2} \text{s}^{-1}$ by a white fluorescent light bulb (Sylvania®, 7 watts). After that, these corrugated paper boxes (with or without a light bulb) were divided into 2 groups: group one was kept at 4°C; $90\pm2\%\text{RH}$ and group two was

kept at 25°C; 65±5%RH. During storage, sprouts were randomly sampled to determine physical and chemical properties as described below:

L* a* b*

L* a* b* values of sprout hypocotyl color were measured by HunterLab (ColorFlex® EZ).

Sprout crispness

The crispness of sprout hypocotyl was measured using a texture analyzer (TA-XT 21, Stable Microsystems, UK) with a 2 mm spherical plunger, 2 mm distance depth, and 1.0 mm•s⁻¹ test speed, and the maximum force was recorded in the Newton unit.

Phenolic content

The phenolics extraction and determination were followed by Singleton & Rossi (1965) method. The 5 g of sprout hypocotyl mixed with 5 ml of 80% ethanol was homogenated by homogenizer and centrifuged at 1200 rpm for 20 min. The supernatant (1 ml) was mixed in 5 ml of Folin-Ciocalteus using a vortex mixer. Subsequently, 4 ml of 7.5% sodium carbonate was added into a mixture solution and placed in a water bath (30°C) for 1 h. The absorbance of the extracted solution was measured by spectrophotometer (Model SP-830) at 760 nm, and phenolic content was calculated from the absorbance of gallic acid standard.

Browning intensity

Browning intensity was measured according to Baloch et al. (1973) method. The 1 g of sprout hypocotyl was ground in 50 ml of 1.5% acetic acid and filtered with Whatman filter paper No. 1. Then, the filtered solution (250 ml) was acidified with 1.5% acetic acid, then measured by spectrophotometer at 420 nm.

Peroxidase (POD) activity

POD extraction was done by the following method. The 3 g of hypocotyl was ground in 20 mg polyvinylpyrrolidone, 6 ml of 0.2 M potassium phosphate buffer pH 7, and centrifuged at 5000g for 10 min. The supernatant was used as a crude enzyme for activity assay (Morita et al., 1988) which 1 ml of crude POD was mixed in 1.5 ml of 0.2 M potassium phosphate buffer pH 7 and 0.43 mM H₂O₂, 2.5 mM 4-aminoantipyrine, and 17 mM phenol. The absorbance of the reaction mixture was measured at 510 nm by a spectrophotometer.

Fiber content

Fiber content was determined by the following method. Hypocotyl (1 g) was dried in an oven at 130°C for 1 h, then boiled in 0.128% H₂SO₄ for 30 min and filtered with a glass wool filter. The filtered residue was washed twice with clean tap water, boiled in 0.23% KOH for 30 min and washed again with clean tap water. After that, the residue was dried in an oven at 130°C for 2 h, and calculated the % dried weight of dried residue as a crude fiber.

Polyphenoloxidase (PPO) activity

PPO extraction and assay were performed along with Coseteng and Lee (1987) method. The 5 g hypocotyl was ground in 20 ml of 0.2 M potassium phosphate buffer pH7 and 0.005 M L-cysteine hydrochloride, then centrifuged at 12000 rpm for 40 min. The supernatant was used as a crude PPO for activity assay. A crude enzyme (0.2 ml) was added into 2.8 ml of 0.01 M sodium acetate buffer (pH 5) and 1 ml of 0.5 M pyrocatechol. Next, the absorbance of the reaction mixture was measured at 420 nm by a spectrophotometer.

Protein content

Protein determination using 0.125% Coomassie Brilliant Blue was carried out according to Bradford (1976) method.

Statistical analysis

Means (from 4 replications each) of sprout hypocotyl crispness, phenolic content, browning intensity, POD activity, fiber content, and PPO activity were compared using Duncan's new multiple range test (DMRT) at $P < .05$.

Results and Discussions

L* a* b* value

The lightness (L^*) of mung bean sprout hypocotyl stored at 25°C decreased nearly twice times faster than at 4°C under light exposure while there was not much changed when stored in the dark condition (Table 1). Moreover, light also stimulated green color developing in sprout hypocotyl as indicated by minus value of a^* but this alteration was reduced when storage at 4°C (Table 1). However, under light condition, hypocotyl of all treatments showed slightly yellowing as indicated by zone '+' value of b^* . The germinating bean sprout is a complete plantlet consisted of epicotyl, cotyledons, hypocotyl, and radicle. For survival, the leaf and stem of mung bean sprout noticeably developed photosynthetic pigment (chlorophyll) to synthesize carbohydrates from carbon dioxide and water under light conditions by a photosynthetic process as indicated by the minus value of a^* . This finding was similar to DeEll et al. (2000) since they found better freshness and whiter hypocotyl in stored mung bean sprouts at the lower temperature.

Table 1 The hypocotyl color (L* a* b*) value of mung bean sprout storage at 4 and 25°C under light and dark conditions

Temperature (°C)	Storage (Days)	Light			Dark		
		L*	a*	b*	L*	a*	b*
4	0	60	-1	8	60	-1	8
	1	58	-1	9	55	1	9
	2	57	2.5	28	50	1	25
	3	55	3.8	30	48	2	35
25	0	60	-1	8	60	-1	8
	1	50	-4	15	53	-1	9
	2	40	-4.2	16	50	0	25
	3	29	-4.5	17	48	-2	30

Hypocotyl crispness

Bean sprout crispness was usually considered at the hypocotyl part. In this experiment, hypocotyl crispness of mung bean sprout rapidly declined during storage under both light and without light exposure at 25°C on the first day (Figure 1a). However, it seemed that the hypocotyl crispness slightly changed during storage under light exposure at 4°C. The higher temperature appears to affect the crispness of mung bean sprout hypocotyl as it observably dropped off during storage at 25°C more than 4°C (Figure 1a). Nevertheless, under light exposure, the sprout hypocotyl lost its crispness to some extent due to fiber content, and its synthesizing enzyme (POD) activity was still high in stored sprouts under light conditions (Figure 1b and 1c), which might influence the hardness property of hypocotyl texture. So, storage at 25°C might have had a water loss more significant than 4°C, resulting in reduced cell growth and reduced crispness.

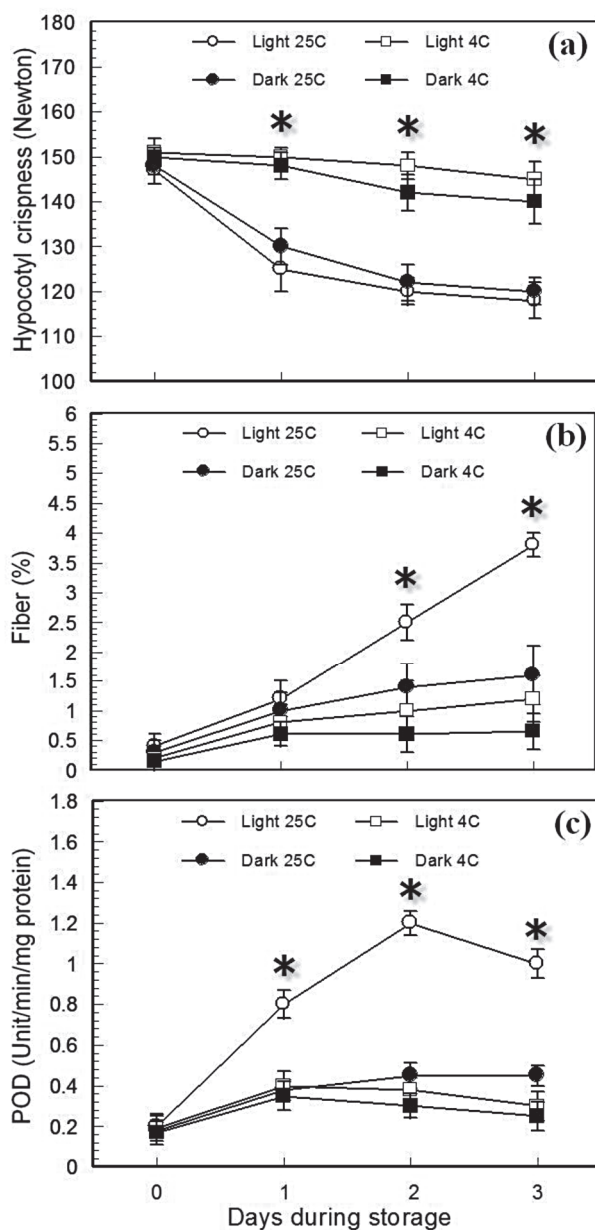


Figure 1 Mung bean sprout hypocotyl crispness and its relative enzyme.

Data from each storage day with an asterisk indicated a statistically significant difference at $P < 0.05$.

Fiber content

Fiber content rapidly increased in mung bean sprout hypocotyl during storage under light condition at 25°C (Figure 1b) while its accumulation rate was delayed at 4°C or in the dark. Fiber is polymerized of phenol intermediate substances and H_2O_2 by peroxidase (POD) localizing in the

secondary wall. This type of sclerenchymatous tissue sets up the texture toughness in hypocotyls of a mung bean sprout. When light exposure was available during storage, the photosynthesis in mung bean sprout occurred to generate glucose that was utilized in cellular respiration and forming cellulose or fiber. As the rate of POD activity in bean sprouts under light exposure was higher than in the dark condition (Figure 1c), fiber content rose in sprout hypocotyl during storage under light exposure at 25°C (Figure 1b). This incident could occur because POD used H_2O_2 and phenol intermediates to connect monolignol-cell walls that strengthened the structure in many plants (Huang et al., 2013). Nevertheless, at 4°C, POD activity in mung bean sprout hypocotyl went up slightly, which indicated that low-temperature storage conditions might slow the metabolic processes of this enzyme.

POD activity

POD activity in mung bean sprout hypocotyl slightly increased during storage under light and dark condition at 4°C (Figure 1c). However, its activity rapidly increased during storage under light condition at 25°C. Light can inhibit the elongation of plant seedlings. Under light exposure, hypocotyl was relatively short, thick, and elongated slowly. Auxin plays a vital role in promoting hypocotyl elongation, and light causes growth inhibition by reducing auxin availability in seedling tissue (Iino, 1982; Jones et al., 1991). POD activity had an inverse relationship with sprout hypocotyl growth (Zheng & Van Huystee, 1992). POD plays a crucial function in plant physiological responses, including auxin catabolism (Savitsky et al., 1999), and lignification (Mäder & Füssl, 1982). Auxin was degraded in vitro by cationic POD in the presence of oxygen, whereas anionic POD was considered essential in the formation of lignin (Gazaryan et al., 1996). Besides, POD catalyzed the coupling reactions of monolignols using O_2 instead of H_2O_2 as electron acceptor (Sterjiades et al., 1993), and participated in lignin biosynthesis. The inhibition of mung bean sprout hypocotyl growth caused by light might be due to the degradation of endogenous auxin by cationic POD. The higher lignin level was correlated with the increased anionic POD activity in a light-treated sprout (Chen et al., 2002).

Browning intensity

For the Browning intensity of mung bean sprout hypocotyl, this symptom was lowest at 4°C under light conditions throughout the storage time (Figure 2a). It seemed that light condition delayed browning mechanism in sprout hypocotyl while dark with low-temperature condition stimulated browning intensity in sprout hypocotyl. Typically browning symptoms occurred in the plant after getting the mechanical injury in the presence of oxygen. At low-temperature injury, this circumstance could accelerate cell membrane damage and losing their permeability function by the induction of reactive oxygen species (ROS). Leakage of the cell membrane and tonoplast caused a browning reaction with the oxidation of o-diphenols to o-quinone by polyphenol oxidase (PPO). However, it is complicated to identify the browning symptom by the human eye at the early time of storage. A spectrophotometer must measure it.

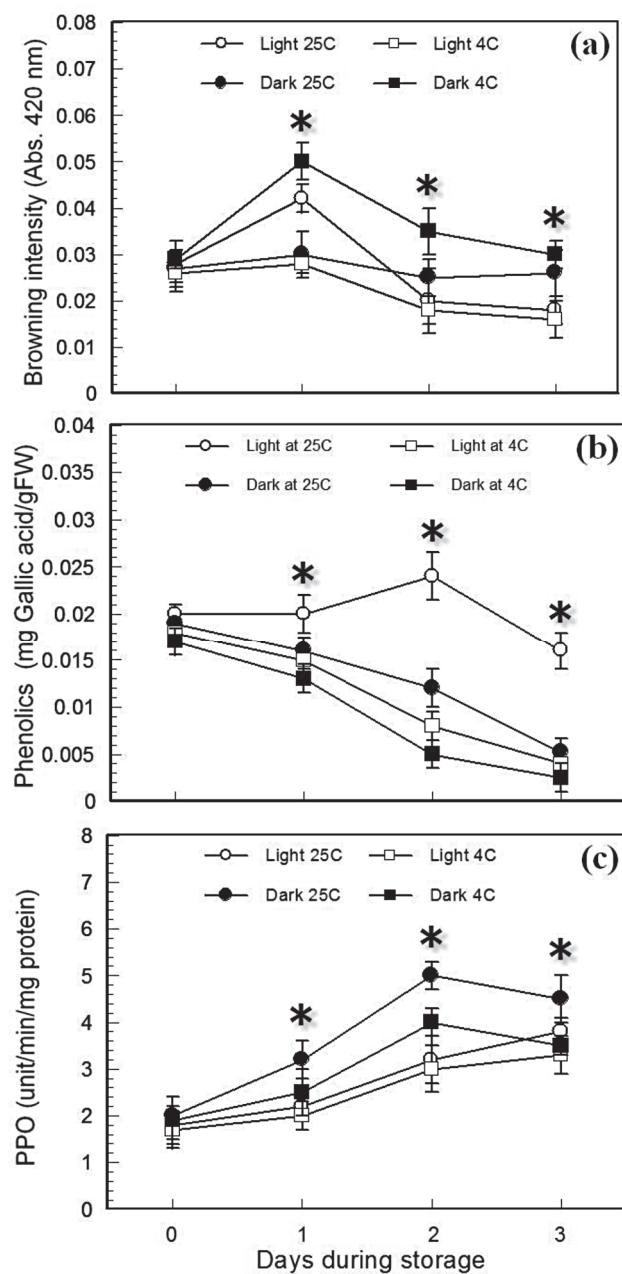


Figure 2 Mung bean sprout hypocotyl browning and its relative enzyme.

Data from each storage day with an asterisk indicated a statistically significant difference at $P < 0.05$.

Phenolic content

In both storage conditions, phenolic content of mung bean sprout hypocotyl decreased continuously, but at 25°C under light exposure, phenolic content was higher than the other all over the experiment (Figure 2b). Nevertheless, under low temperature (4°C), together with the light condition, phenolic content was lower than the other during the experimental period. The phenolic compounds were utilized as a substrate for browning reaction by PPO in the presenting of oxygen. Under light and dark storage conditions, phenolic content in mung bean sprout hypocotyl is constantly reduced (Figure 2b). However, under light exposure at 25°C, this compound was still superior to other treatments. This result indicated that light exposure at 25°C possibly delayed the browning process in mung bean sprout hypocotyl via maintaining the phenolic compounds, which agree to Bakhshi & Arakawa (2006) found that light irradiation and temperature had a strong influence on the phenolics accumulation.

PPO activity

PPO activity in mung bean sprout hypocotyl increased in all treatments. However, under light exposure, this activity was retarded during the storage (Figure 2c). PPO, a copper-containing enzyme, plays an essential role in the browning reaction in several plants (Nagai & Suzuki, 2003). In this research, it appeared that PPO activity in mung bean sprout hypocotyl was induced by dark storage conditions, while its activity was retarded by light exposure during storage (Figure 2c). This outcome was related to the number of phenolic compounds, a substrate of PPO in the browning process, in a different direction. Under the dark condition, PPO had a high activity to reduce the phenolic compounds (Figure 2b and 2c) and induce the browning process in mung bean sprout hypocotyl (Figure 2a). Moreover, it was feasible that low temperature could induce stress, and mung bean sprouts subsequently released remarkable amounts of free radicals (ROS). Then, the sprouts need to produce antioxidants (via phenylpropanoid pathway) that can be used as precursors for many enzymes, both PPO for browning and POD for the occurrence of fibers.

Conclusions

This research focused on lighting during shelf-life, where lighting devices are already installed but not appropriate, and this beneficial effect of increased light could be applied as a postharvest management approach. Mung bean sprouts should be stored in an opaque packaging and placed on a shelf display at 4°C to maintain lightness (L^* value). Although low-temperature storage conditions induced browning, low-temperature along with dark storage conditions delayed the browning process and fibrousness in mung bean sprout hypocotyls. However, light conditions maintained more hypocotyl crispness during storage at 4°C. Thus, the longer the mung bean sprouts are exposed to light while they are available for sale, they will maintain their quality longer.

Acknowledgement

The authors would like to thank the Faculty of Applied Science, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, for the research funding for the fiscal year 2011.

References

- Bakhshi, D., & Arakawa, O. (2006). Induction of phenolic compounds biosynthesis with light irradiation in the flesh of red and yellow apples. **Journal of Applied Horticulture**, 8(2), 101-104.
- Baloch, A.K., Buckle, K.A., & Edwards, R.A. (1973). Measurement of non-enzymic browning of dehydrated carrot. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, 24, 389-398.
- Bradford, M.M. (1976). A rapid and sensitive method for the contiquication of microgram quantities of protein utilizing the protein-dry binding. **Analytical Biochemistry**, 72, 248-254.
- Chen, Y., Shin, J., & Liu, Z. (2002). Effect of light on peroxidase and lignin synthesis in mungbean hypocotyls. **Plant Physiology and Biochemistry**, 40, 33-39.
- Chuenchom, P., Noichinda, S., Bodhipadma, K., Wongs-Aree, C., & Leung, D.W.M. (2021) Different chilling-induced symptoms and the underlying oxidative stress and antioxidative defense in the exocarp and mesocarp of immature sponge gourd (*Luffa cylindrica*) fruit. **Applied Science and Engineering Progress**, 14(3), 348-359.
- DeEll, J.R., Vigneault, C., Favre, F., Rennie, T.J., & Khanizadeh, S. (2000). Vacuum cooling and storage temperature influence the quality of stored mung bean sprouts. **HortScience**, 35, 891-893.
- Coseteng, M.Y., & Lee, C.Y. (1987). Changes in apple polyphenoloxidase and polyphenol concentrations in relation to degree of browning. **Journal of Food Science**, 52, 985-989.
- Gazaryan, I.G., Lagrimini, L.M., Ashby, G.A., & Thorneley, R.N.F. (1996). Mechanism of indole-3-acetic acid oxidation by plant peroxidase: Anaerobic stopped-flow spectrophotometric studies on horseradish and tobacco peroxides. **Biochemical Journal**, 313, 841-847.
- Huang, W., Liu, H., Zhang, H., Chen, Z., & Guo, Y. (2013). Ethylene-induced changes in lignification and cell wall degrading enzymes in the roots of mungbean (*Vigna radiate*) sprouts. **Plant Physiology and Biochemistry**, 73, 412-419.
- Lino, M. (1982). Inhibitory action of red light on the growth of maize mesocotyl: Evaluation of the auxin hypothesis. **Planta**, 156, 388-395.
- Jones, A.M., Cochran, D.S.M., Lamerson, P., Evans, M.L., & Cohen, D.J. (1991). Red light-regulated growth. I. Changes in the abundance of indole-acetic acid and a 22 kilodalton auxin binding protein in the maize mesocotyl. **Plant Physiology**, 97, 352-358.
- López-Amoróse, M.L., Hernández, T., & Estrella, I. (2006). Effect of germination on legume phenolic compounds and their antioxidant activity. **Journal of Food Composition and Analysis**, 19, 277-283.

- Mäder, M., & Füssl, R. (1982). Role of peroxidase in lignification of tobacco cells. **Plant Physiology**, **70**, 1132-1134.
- Morita, Y., Yamashita, H., Mikami, B., Iwamoto, H., Aibara, S., Terada, M., & Minami, J. (1988). Purification, crystallization, and characterization of peroxidase from *Coprinus cinereus*. **Journal of Biochemistry**, **103**, 693-699.
- Nagai, T., & Suzuki, N. (2003). Polyphenol oxidase from bean sprouts (*Glycine max* L.). **Journal of Food Science**, **68**, 16-20.
- Noichinda, S., Bodhipadma, K., & Wongs-Aree, C. (2018). **Antioxidant potential and their changes during postharvest handling of tropical fruits**. In S. Pareek (Ed.), *Novel Postharvest Treatments of Fresh Produce* (633-662). Boca Raton: CRC Press.
- Savitsky, P.K., Gazayan, I.G., Tishkov, V.I., Lagrimini, L.M., Ruzgas, T., & Gorton, L. 1999. Oxidation of indole-3-acetic acid by dioxygen catalysed by plant peroxidase: Specific for the enzyme structure. **Biochemical Journal**, **340**, 579-583.
- Singleton, V.L., & Rossi, J.R. Jr. (1965). Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. **American Journal of Enology and Viticulture**, **16**, 144-158.
- Sterjiades, R., Dean, J.F.D., Gamble, G., Himmelsbach, D.S., & Eriksson, K.E.L. (1993). Extracellular laccase and peroxidase from sycamore maple (*Acer pseudoplatanus*) cell suspension cultures. **Planta**, **190**, 75-87.
- Tajiri, T. (1979). Effect of storage temperature and its fluctuation on keeping quality of mungbean sprouts. **Nippon Shokuhin Kogyo Gakkaishi**, **26**, 18-24.
- Tajiri, T. (1985). Improvement of bean sprouts cultivation by combined treatment with artificial sunlight lamp, ethylene and carbon dioxide. **Nippon Shokuhin Kogyo Gakkaishi**, **32**, 317-325.
- Tiansawang, K., Luangpituksa, P., Varayanond, W., & Hansawasdi, C. (2016). GABA (γ -aminobutyric acid) production, antioxidant activity in some germinated dietary seeds and the effect of cooking on their GABA content. **Food Science and Technology**, **36**(2), 313-321.
- Tonprasong, C., Suthirawut, S., & Thanapase, V. (2002). Shelf-life extension of mungbean sprouts by modified atmosphere packaging. **Agricultural Science Journal**, **33**(6) (Suppl.), 200-203. (In Thai)
- Varoquaux, P., Albernac, G., The, C.N., & Varoquaux, F. (1996). Modified atmosphere packaging of fresh beansprouts. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, **70**, 224-230.
- Zheng, X., & Van Huystee, R.B. (1992). Peroxidase-regulated elongation of segments from peanut hypocotyls. **Plant Science**, **81**, 47-56.
-

APPLICATION OF SILICON CARBIDE CRUCIBLE FOR GEMSTONE HEAT TREATMENT IN MICROWAVE OVEN

Teerat Watcharatpong¹, Panot Krongsut¹ and Bhuwadol Wanthanachaisaeng^{2*}

¹Department of General Science, Faculty of Science, Srinakharinwirot University, Bangkok, 10110, Thailand

²College of Creative Industry, Srinakharinwirot University, Bangkok, 10110, Thailand

*Corresponding author E-mail: bhuwadol@g.swu.ac.th

Received: 2021-03-22

Revised: 2021-05-11

Accepted: 2021-06-08

ABSTRACT

This research was developed to reduce cost of gemstone heat treatment, defined as a common process to improve a quality of gemstones, for local gem burners by using an interaction of a dielectric material in a microwave oven which can be applied as alternative method to use instead of an electric and a gases furnace. The objectives of the study were (1) to examine the trend of the relationship between times, temperature, and power (2) to find out the best composition between SiC and heat-transfer mediums. After the result was formulated, a research prototype was created by remodeling the crucibles with SiC and the heat-transfer mediums, then heated the system using the microwave oven. Based on the findings of this investigation it was concluded that temperatures can hit the peak at 840°C for oxidation and 1000°C for reduction which is proved by the colour enhancement of zircon. The final model based on this study can be practically used for burn reddish brown zircon (collected from Ratanakiri, Cambodia) to becomes sky blue (reduction) and colorless (oxidation).

Keywords: Gemstones, Heat treatment, Microwave, Silicon Carbide, Dielectric, Zircon

Introduction

Heat treatment is the most common and acceptable process for improving a quality of gemstones in an international gemstone industry. This process is used in order to enhance the color, increase the clarity, and step up the value of gemstones into the higher level. The fundamental principle of the gemstones heat treatment process is to heat gemstones in a specific temperature to create the partial recrystallization of gemstone structure (Wanthanachaisaeng, 2014) or to induce

oxidation ion of an element inside a gemstone; the changing of oxidation number in some elements affects the color of gemstones (Emmett et al., 2003; Fritsch & Rossman, 1987). Nowadays, the heat treatment process has developed; in terms of higher maximum temperature of the machine, and more accurate temperature and atmosphere controlling, to get the highest quality of gemstones enhancement. The development of the process was started from a stove, diesel oil, LPG gas burner, and then the most popular way at this moment, electrical stove which is able to control heating duration and temperature most easily and stably. Moreover, the electrical stove can switch an atmosphere inside the stove between oxidation and reduction which significantly affect the color of gemstones.

The interaction between silicon carbide (SiC) and microwave frequency for producing heat has been interested by many experts (O'Dwyer, 1973; Trew, 1998; Raju, 2003). In 2016, Swain contributed this interaction into a gem and jewelry industry for enhancing the quality of natural ruby (Swain *et al.*, 2016). This publication inspired the researchers to simplify the heat treatment machine from the electrical stove to a household microwave oven by using silicon carbide and crucible as a heat generator.

Methods

Since the size of dielectric materials affects the efficiency of heat-generating interaction (El-Razek *et al.*, 2014), two types of silicon carbide; including grain-size SiC and fine-powder SiC, was experimented. The powder-type SiC was mixed alumina with binder glue and alumina powder to set as a paste (1 SiC: 1.5 binder glue: 1 alumina powder) and painted around on the top edge of crucibles with 1 cm-wide (Fig. 1). The crucible was heated in a conventional furnace to 150 °C for 120 minutes to evaporate the binder and set the paste as a solid layer. Then, the thickness of the SiC powder-glue layer was measured by using a Vernier caliper. All the samples were superimposed by a bigger crucible, and heated the system in a 2.4 GHz household microwave oven (Electrolux-EMM2016W) which was covered the glass plate by ceramic fiber to protect the parts of microwave from thermal radiation. The microwave oven was used in variety of time and electric power, including 5, 10, 15, 20, 25, 30 and 35 minutes, and 100, 400, 600, 800 Watts and defrost mode. After the samples were heated, their cap was opened and a temperature inside the system was measured by using infrared thermometer (GM1650 BENETECH).

The grain-type crucible was prepared by fulfilling gap between two crucibles with grain SiC (740 micron) (Fig.2) by fixing a total quantity of SiC on 16 g. However, the grain-type silicon carbide still needed to find out more information in details, such as the most effective size, then compared the result with this experiment.

The efficiency, in terms of heat generating, of grain-type SiC was developed by mixing heat

transfer mediums, including quartz sand, and carbon powder for oxidation and reduction atmosphere respectively, and grain-type SiC totaling 16 g. This study adjusted the ratios between the mediums and SiC (1:3, 1:5, 1:7 for quartz sand and 1:1, 1:3, 1:5, 1:7, 0:1 for carbon powder). After finding the satisfied proportion for both types of heat-transfer mediums, the temperature result was measured in the same way as previously mentioned in powder-type SiC crucible. The proportion was adapted to create a prototype model and practically tested by doing heat treatment with reddish brown zircon collected from Ratanakiri, Cambodia which theoretically turns from red to colorless when it is heated at 400 °C in oxidation condition, and turns to blue when it is heated at 1000°C in reduction condition (Zeug et al., 2018).

Finally, the unheated and heated zircons were analyzed by Diamond View™, UV-Vis-NIR spectrometer (PerkinElmer model Lambda 950) and FTIR spectrometer (Thermo-Nicolet 6700). Diamond View™ that were developed by the De Beers Diamond Trading Co. (DTC) (Breeding & Shigley, 2009). It is equipped with a UV source at about 220 nm (Devouard & Notari, 2009). Ultraviolet-Visible-Near infrared absorption spectra were obtained in transmittance mode taken from 250 – 1200 nm with sampling interval of 3 nm and scan speed of 441 nm per minute. The transmission band of near infrared to mid infrared spectra (400 – 7500 cm^{-1}) were collected with a resolution of 4 cm^{-1} and 18 scans. These results were illustrated to confirm the practice of this protocol by indicating the differences of color and infrared absorbance between unheated gemstone and heated gemstone.

Results and Discussions

1. powder-type SiC

The amount and mixing composition of SiC, quartz sand and graphite were investigated to evaluate the result temperature of the crucible in the microwave oven. Fig.3 illustrates the different thicknesses of the SiC on the crucible (Fig. 1) which is created by varying the quantity of SiC in the mixture paste before heated the sample in a furnace. There is a clear data that the volume 1.00 g will create the thickest layer. However, the data from Fig.4 can be clearly noticed that the result temperatures between 0.66 g and 1.00 g are much closed to each other. The result meant that the most efficient ratio, in the aspect of economy, is 0.66 g and the temperature can rise up to 600°C.

2. grain-type silicon carbide

The grain-type SiC was also applied in this experiment (Fig 2) to compare the heating temperature to the powder-type SiC. The result of induced temperature as in Fig.5 illustrates the comparison between grain-type and powder-type SiC in the same total weight (0.66 g) and it is cleared by the graph that powder-type SiC have more efficient to work as heat generator. However, it was due to the fact that grain type is importantly cheaper, the grain-type SiC is more effective in terms of industrious using. Thus, the latter was considered to be experimented in a larger quantity. Fig.6

shows the comparison between a larger number of grain-type SiC (16 g) and 0.66 SiC powder and it can be easily seen that 16 g of grain-type SiC can reach to the higher temperature which is 700 °C.

3. heat-transfer mediums

Although 16 g of grain-type SiC crucible can rise the temperature higher than powder-type SiC crucible, the result (700 °C) is still unsatisfied since it is not be able to enhance the color of precious gemstones as zircon which requires 1000 °C. In order to increase heat generating efficiency, the researchers mixed heat transfer mediums with the SiC grains. Putting in the mediums significantly affect the result since not only temperatures are increased but the heat transfer mediums can be used as an environment controlling agent which is quartz sand for oxidation and carbon powder for reduction.

3.1 Oxidation environment

The result temperatures from the ratios of SiC and quartz sand are compared in the Fig. 7. It is readily apparent that 1 sand : 5 SiC is the best condition compared to the others. The ratio 1:5 are chosen and measured result temperatures in each different time and power. The Fig. 8 demonstrates the result temperatures of the ratio 1:5 which can be concluded that the highest temperature from this model is 800 °C

3.2 Reduction environment

Since the carbon powder also has a dielectric property as SiC (Liu et al., 2010), the ratios between carbon powder and SiC are separated in more details, which is 1:0 1:1 1:3 1:5 1:7, and the results are illustrated by Fig 9 and referred from Fig 9, 1:3 is chosen to do the measurement in the same way as an oxidation experiment. Fig.10 demonstrate the fact that the highest temperature of this model can reach to 1000 °C.

4. Gemstone heat treatment

The model is made from crucible with the heat generator which is considered as the best condition, 1:5 for sand and 1:3 for carbon, then test it by heating reddish brown zircon collected from Ratanakiri, Cambodia. Fig.11 and Fig.12 demonstrate clear results of color changing after heat treatment. In oxidation environment, after heat for 30 minutes with power 800 watt and average temperature 800 °C, the zircon will turn to colorless crystal. On the other hand, to turn the reddish brown zircon to blue color, temperature need to be rise higher and maintain longer time in reduction environment so the zircon is heated 60 minutes in average temperature 1000 °C before turn to blue zircon.

5. Diamond View™

Diamond View™ was applied in this experiment to observe the luminescence of samples by the high energy ultraviolet source at about 220 nm. The luminescence of color zoning has been

detected in the zircon samples. The figure 12 and 13 indicated that the temperature generated by the SiC model does not high enough to induce structural transformation of zircon, as it can be seen from the existing of visible zoning luminescence in the samples. Referring to the Smith and Balmer, 2009 and Zeug et al, 2018, the most effective temperature to enhance blue colour of Ratanakiri zircon is 900-1000 °C and this enhancement would lead to the disappearance of growth zoning (Zeug et al., 2018; Smith & Balmer, 2009). However, the specify temperature still questioned, as some publications claimed that maximum blue color would appear after 900 °C then fader (Thongcham et al., 2010), some offered that it would reach after 1100 °C (Laithummanoon & Wongkokua, 2013), Thus, it was readily apparent that, in this study, the zircons did not reach the structural transformation temperature, so it might need longer duration (more than an hour) or increase the power of microwave oven.

6. UV-VIS-NIR spectrophotometer

The absorption spectrum of unheated, oxidative heat-treated, reductive heat-treated zircons (Ratanakiri, Cambodia) were reported in Figure 13. It was readily apparent that the unheated gemstone shows higher absorbance in overall region. The unheated zircon spectrum exhibited as a dramatic downward absorption pattern from 300 nm to 600 nm with small couple of peaks in the middle, including at wavelength 480 nm and 520 nm. The high absorbance in the violet to yellow range (400-600 nm) and the releasing of wavelength in red region (600-700 nm) originate the brownish red colour in Ratanakiri zircon. The result of zircons which heated to 700 °C with the oxidative SiC crucible model demonstrated in the Figure 14 and 15. The data showed the more rapidly decrease of absorbance curve from 300 nm to 400 nm compared to the pattern of untreated zircon. The drop of overall absorbance curve after heat significantly affect the gemstone to be colorless. Figure 15 highlighted more on the details of the data. The small peaks of 480 and 525 nm in the heated zircons data lead to slightly more color absorption, compare to the 600 nm region. Thus, after the oxidative heat treatment process, no region in the range of visible light (400-700 nm wavelength) was significantly absorbed, especially the low absorption in yellow region. Consequently, the processed zircons appeared as a colorless gemstone with a very weak yellow tint. Turning to consider the reductive heat treatment data, the comparison of unheated and reductive heated at 900°C was provided in Figure 16. It is noticeable that the absorbance region (about 480 nm) in untreated data generally reduced from the pre-treatment, therefore the color of zircon became lighter. Moreover, there was the appearance of an absorbance peak at 653 nm in Figure 17 and 18. These changes effectuated the color of zircons from reddish brown colour (releasing 600-700 nm wavelength) to slightly blue colour (releasing in most of the light spectrum but release slightly less in red region (500-700 nm)).

7. FTIR

The results of FTIR analyzing from pre-heated and heated in both environment; oxidation and reduction, provided in this study to confirm that the SiC model was practical to use as an implement for gemstone heat treatment. The unique indication of heated Ratanakiri zircon is a disappearance of 4072 and 4262 cm^{-1} FTIR peaks (Siriaucharanon, 2016). The data on figure 19 and 20 showed the vanishing of the couple peak after heat treating via the SiC model in the both environments. This confirmed that this protocol can be practically used as an alternative process for heat treating process.



Figure 1 Model of crucibles for powder-type silicon carbide experiment.



Figure 2 Model of crucibles for the grain-type silicon carbide experiment.

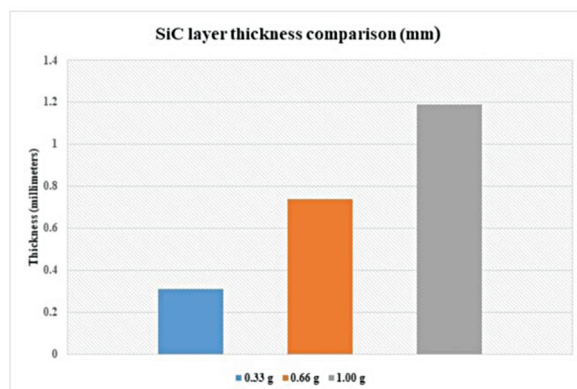


Figure 3 The comparison of the thickness of SiC powder layer.

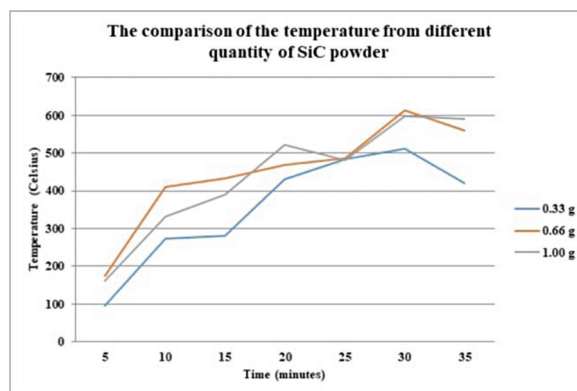


Figure 4 The comparison of the temperature from different quantity of SiC powder.

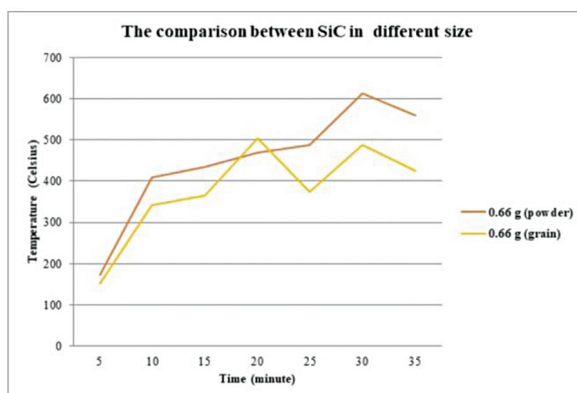


Figure 5 The comparison of the temperature from grain-type and powder-type silicon carbide in the same quantity.

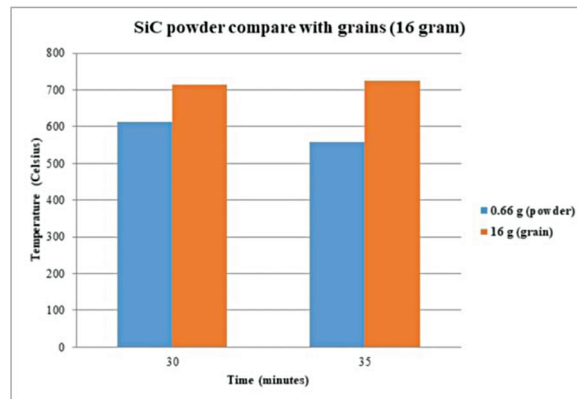


Figure 6 The comparison of the temperature from 16 g of grain-type silicon carbide and 0.66 silicon carbide powder.

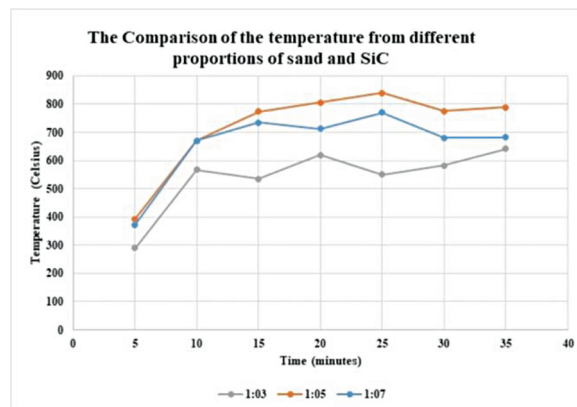


Figure 7 The comparison of the temperature from different proportions of sand and SiC.

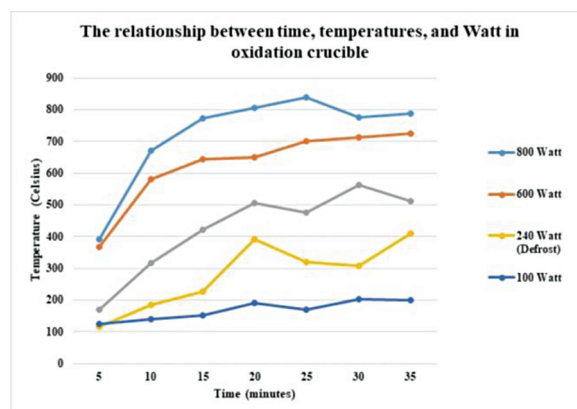


Figure 8 The relationship between time, temperature, and Watt in SiC crucible under oxidizing atmosphere.

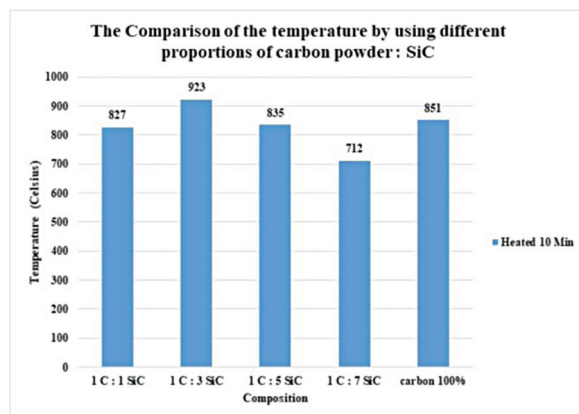


Figure 9 The Comparison of the temperature by using different proportions of carbon powder: Silicon Carbide.

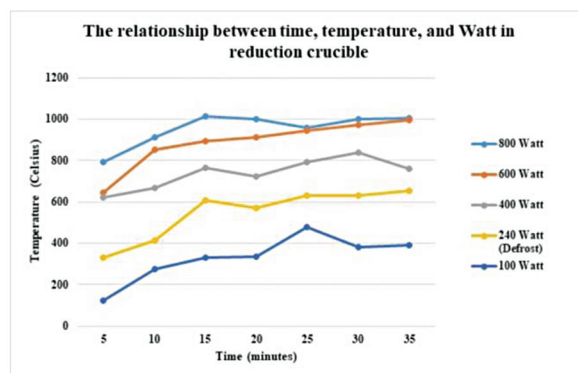


Figure 10 The relationship between time, temperature, and Watt in crucible under reducing atmosphere.

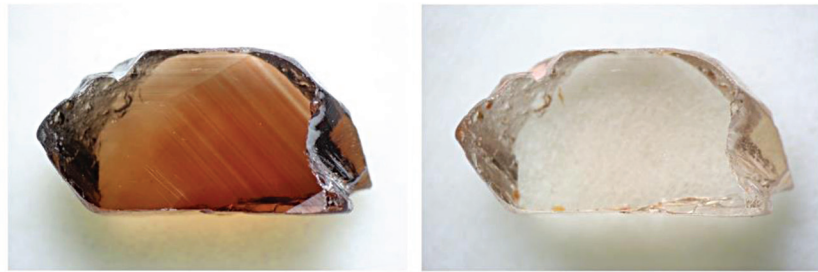


Figure 11 The color changing of reddish brown zircon from Ratanakiri, Cambodia between before (left) and after (right) heat treated by the SiC crucible model with oxidation environment for 60 minutes with power 800 watts, average temperature 700°C.



Figure 12 The color changing of reddish brown zircon from Ratanakiri, Cambodia between before (left) and after (right) heat treated in the SiC crucible model with reduction environment for 60 minutes with power 800 watts, average temperature 900 °C.

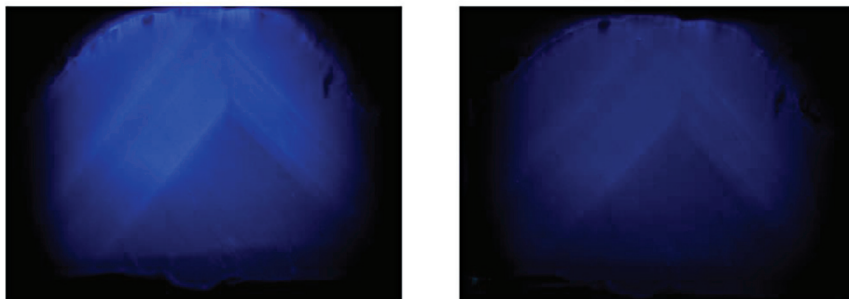


Figure 13 The existing of growth zoning luminescence of the zircon under UV between before (left) and after (right) heat treated by the SiC crucible model.

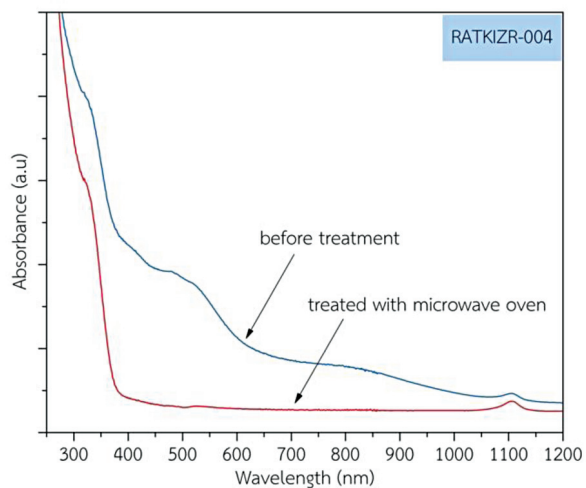


Figure 14 The difference between UV-Vis-NIR absorbance between before and after oxidizing atmosphere heat treatment (700 °C) in the microwave oven.

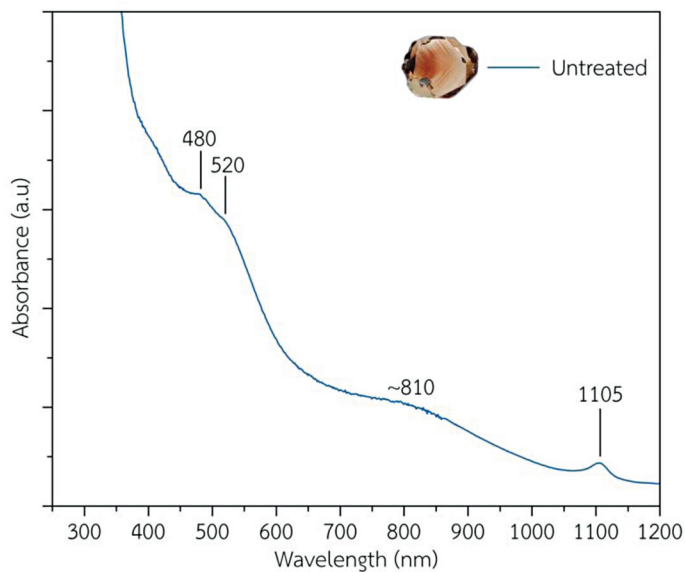


Figure 15 The UV-VIS-NIR absorbance of the unheated reddish brown zircon.

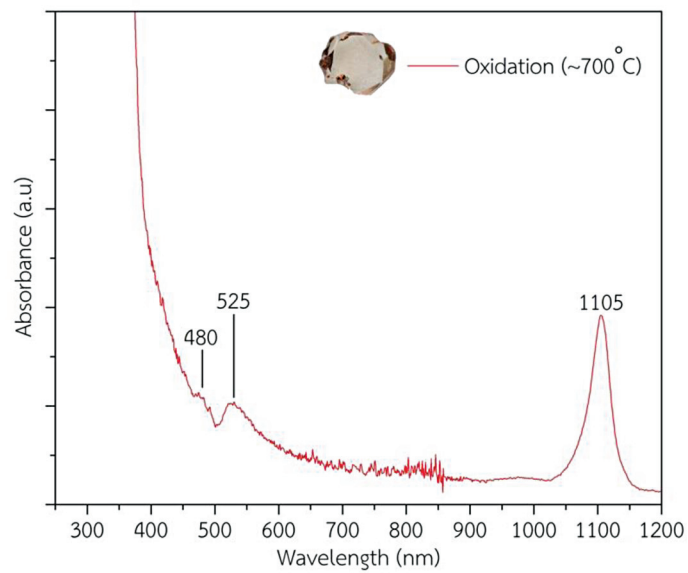


Figure 16 The UV-VIS-NIR absorbance of the heated reddish brown zircon at 700 °C in oxidizing atmosphere for 1 hour.

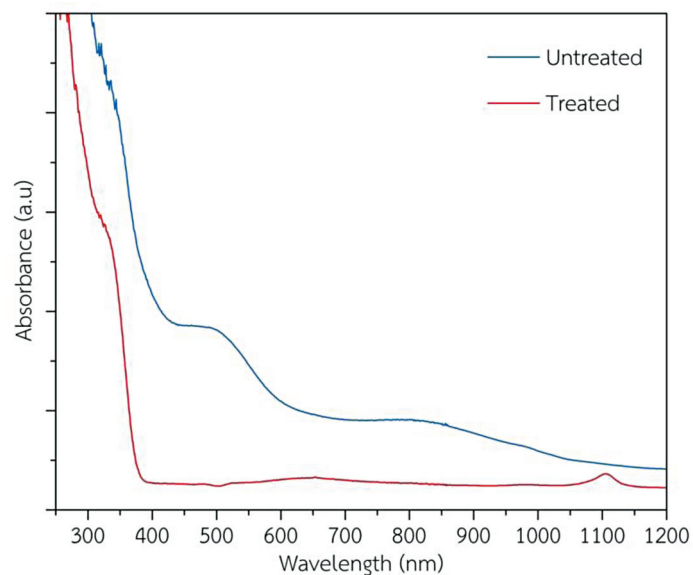


Figure 17 The difference between UV-Vis-NIR absorbance between before and after heat treatment (900 °C) under reducing atmosphere in the microwave oven.

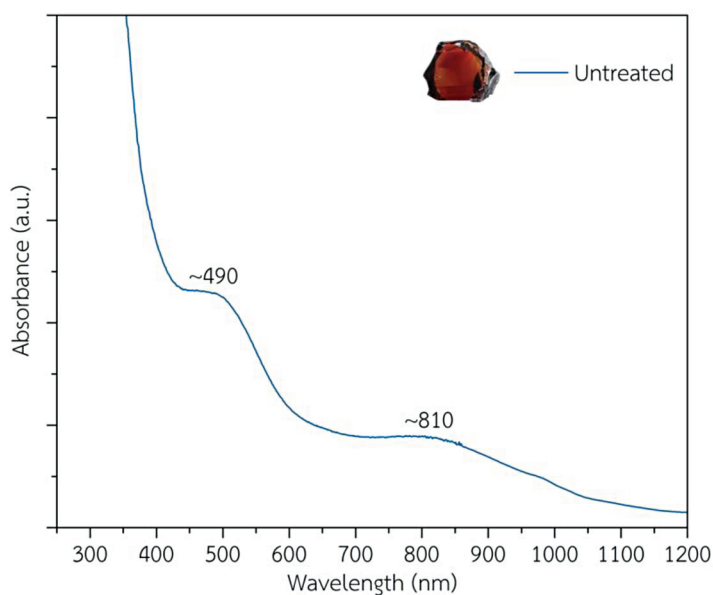


Figure 18 The UV-VIS-NIR absorbance of the unheated reddish brown zircon.

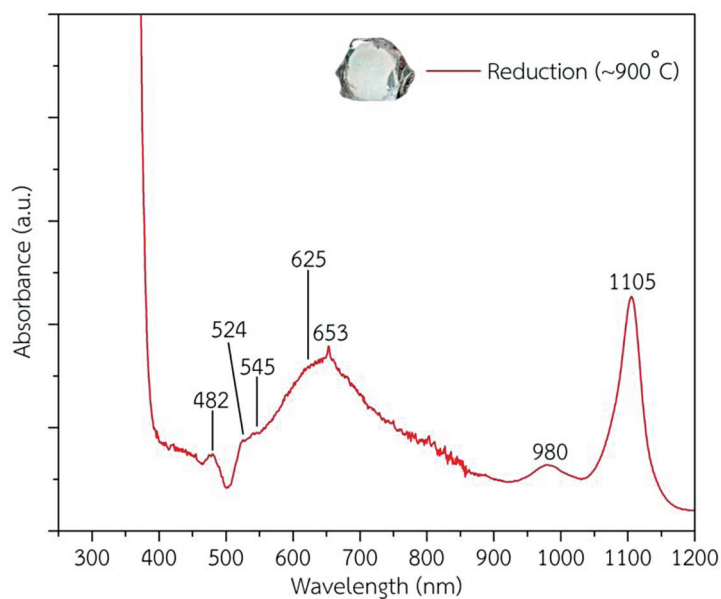


Figure 19 The UV-VIS-NIR absorbance of the heated reddish brown zircon at 900 °C under reducing atmosphere for 1 hour.

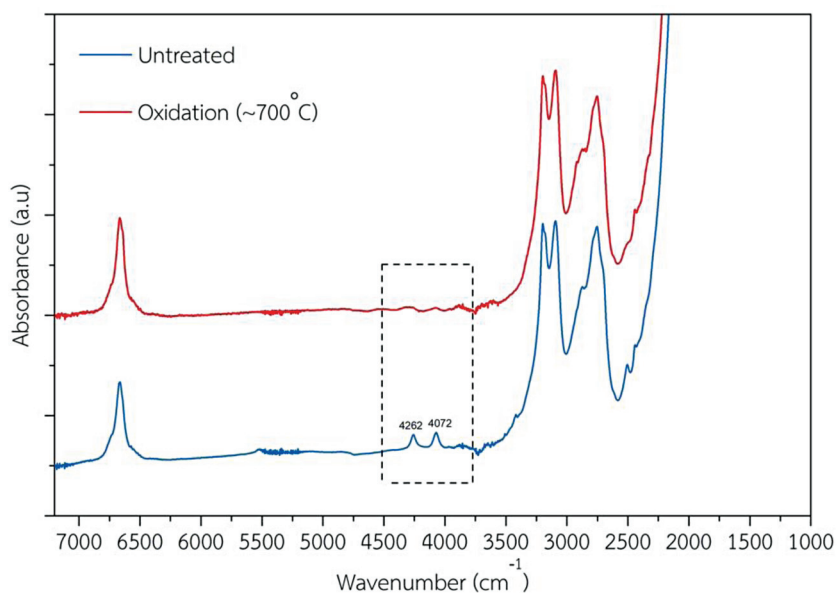


Figure 20 The comparison of FTIR result between unheated and heated zircon under oxidizing atmosphere.

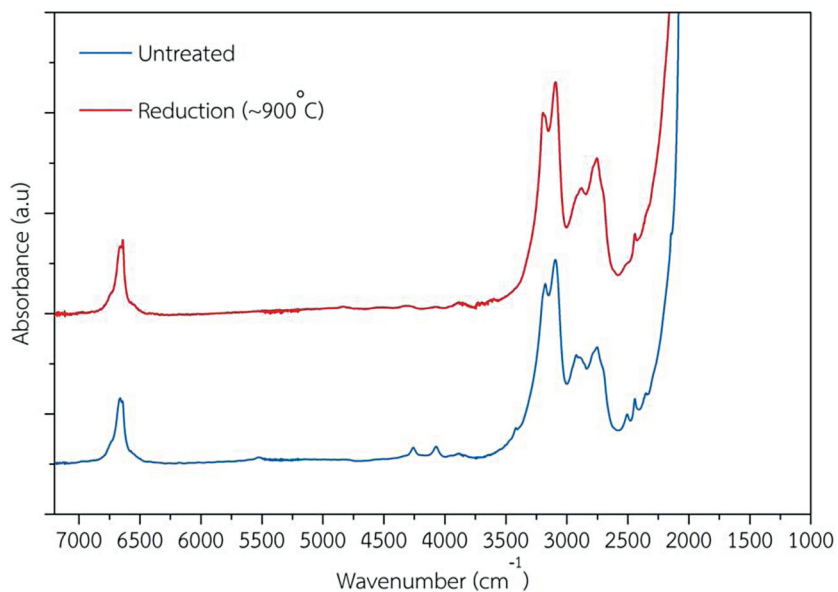


Figure 21 The comparison of FTIR result between unheated and heated zircon under reducing atmosphere.

Conclusions

The results obtained from this study can be practically used for heat treating gemstones both oxidizing and reducing atmosphere such as reddish brown zircon from Ratanakiri, Cambodia or used for other process that require not too high temperature as sintering silver clay. Moreover, this result indicated a possibility to use home microwave oven to treat the gemstone instead of electric furnace.

Acknowledgement

This research was partially supported by Faculty of Science, Srinakharinwirot University. We thank our colleagues from a gems and jewelry major who worked together along the way of this research. We appreciate Assistance Prof. Dr. Krit Won-in for providing SiC powder that greatly assisted the research. We would also like to thank 3 “anonymous” reviewers for their so-called insights.

References

- Breeding, C.M., & Shigley, J.E. (2009). The “Type” classification system of diamonds and its importance in gemology. **Gems and Gemology**, 45(2), 96-111.
- Devouard, B., & Notari, F. (2009). Gemstones: From the naked eye to laboratory techniques. **Elements**, 5, 163-168.
- El-razek, A.A., Saed, E.M., & Gergs, M.K. (2014). Effect of grain size on the dielectric properties of Lanthanum doped PbTiO₃ perovskite ceramics. **IOSR Journal of Applied Physics**, 6(5), 20-29.
- Emmett, J.L., Scarratt, K., McClure, S.F., Moses, T., Douthit, T.R., Hughes, R., Novak, S., Shigley, J.E., Wang, W., Bordelon, O., & Kane, R.E. (2003). Beryllium diffusion of ruby and sapphire. **Gems and Gemology**, 39(2), 84-135.
- Fritsch, E. & Rossman, G. (1987). An update on color in gems. Part 1: Introduction and colors caused by dispersed metal ions. **Gems and Gemology**, 23(3), 126-139.
- Laithummanoon T., & Wongkokua, W. (2013). Effect of heat treatment on color of natural zircon. **Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok**, 23(2), 261–269.
- Liu, X., Zhang, Z., & Wu, Y. (2010). Absorption Properties of Carbon Black/Silicon Carbide Microwave Absorbers. **Composites Part B-engineering**, 42, 326-329.
- O'Dwyer, J.J. (1973). **The theory of electrical conduction and breakdown in solid dielectrics** (2nd ed). Oxford: Clarendon Press.
- Raju, G.G. (2003). **Dielectrics in Electric Fields**. Marcel Dekker Inc. New York. 592p.
- Siriaucharanon, W., Lomthong, P., Seneekatima, K., & Wanthanachaisaeng, B. (2016). **Heat treatment of zircon from Tanzania and Cambodia**. Proceedings of the 5th GIT International Gem and Jewelry Conference (267-270). Pattaya, Thailand: Gemological Institute of Thailand.

- Smith, M.H., & Balmer, W.A. (2009). Gem News International: Zircon mining in Cambodia. **Gems and Gemology**, 45(2), 152-153.
- Swain, S., Pradhna, S.K., Jeevitha, M., Acharya, P., Debata, M., Dash, T., Nayak, B.B., & Mishra, B.K. (2016). Microwave heat treatment of natural ruby and its characterization. **Applied Physics A: Materials Science and Processing**, 122, 1-7.
- Thongcham, K., Sahavat, S., & Wongkokua, W. (2010). **Effects of annealing to colour of zircon**. Proceedings of the 5th International Workshop on Provenance and Properties of Gems and Geo-Materials (111–113). 2010; Hanoi, Vietnam.
- Trew, R.J. (1998) **SiC for microwave power applications: present status and future trends**. Proceedings of the Gallium Arsenide Applications Symposium (181-186). Amsterdam, The Netherlands.
- Wanthanachaisaeng, B. (2014). Zircon and Its Heat Treatment, **Burapha Science Journal**, 19, 160-168.
- Zeug, M., Nasdala, L., Wanthanachaisaeng, B., Balmer, W.A., Corfu, F., & Wildner, M. (2018). Blue zircon from Ratanakiri, Cambodia. **The Journal of Gemmology**, 36(2), 102-122.
- =====

TOTAL PHENOLIC CONTENT, ANTIOXIDANT, AND ACETYLCHOLINESTERASE INHIBITORY ACTIVITIES OF *Vitex trifolia* L. EXTRACTS

Pemika Khamweera¹ and Suekanya Jarupinthusophon^{2*}

¹Department of Biology, Phranakhon Rajabhat University, Bangkok 10220, Thailand

²Department of Chemistry, Phranakhon Rajabhat University, Bangkok 10220, Thailand

*E-mail: suekanya@pnru.ac.th

Received: 2021-07-06

Revised: 2021-07-12

Accepted: 2021-07-13

ABSTRACT

Vitex trifolia (family Lamiaceae) known in Thai as Kontee-sor, is a tropical shrub widespread in many areas, especially in northern Thailand such as Chiang Mai. The plant is used commonly in traditional Thai medicine for the treatment of fever, headache, dizziness, cough, high blood pressure, and pain. Total phenolic content, antioxidant, and acetylcholinesterase inhibitory activities of extracts from various parts (flowers, twigs, leaves, and fruits) of *V. trifolia* extracted by some solvents (hexane, dichloromethane, ethyl acetate, and methanol) were determined. Among the extracts used, ethyl acetate extract obtained from the leaves showed the highest phenolic content of 297.26 ± 0.79 mg GAE/g dry extract weight and antioxidant activity against DPPH with IC_{50} 11.16 ± 0.21 μ g/mL and 86.12 $\pm$ 0.37% DPPH inhibition at 0.1 mg/mL. The properties of extracting solvents affected the measured total phenolic content and antioxidant activity. Their coefficient of determination ($R^2 = 0.9155$) between total phenolic content and $1/IC_{50}$ suggested that the phenolic compound contributed to the antioxidant activity. Methanol extract of fruits was screened for acetylcholinesterase inhibitory activity by Ellman's microplate colorimetric method and showed IC_{50} values of 30.79 ± 0.11 μ g/mL and 59.28 $\pm$ 1.48% AChE inhibition at 0.1 mg/mL. Considering this potent AChE inhibition, the extracts could be investigated as new AChE inhibitors with low toxicity as natural drugs.

Keywords: *Vitex trifolia*, Lamiaceae, total phenolic contents, antioxidant activity, acetylcholinesterase inhibitory activity

Introduction

Vitex trifolia L. (Figure 1), belonging to the family Lamiaceae and commonly known as Simpleleaf Chastetree, is a tropical shrub widespread in Southeast Asia, Micronesia, Australia and East Africa (de Kok, 2007). Traditionally, the whole *V. trifolia* is used commonly in Thai medicine for an extensive range of treatments including fever, headache, dizziness, cough, high blood pressure, and pain (Horata et al., 2017; McClatchey, 1996). Previous studies of *V. trifolia* crude extracts have shown interesting biological activities such as cytotoxicity (Gu, & Jiang, 2007; Zheng et al., 2013), insecticidal activity (Kannathasan et al., 2007), and antimicrobial activity (Hossain et al., 2001). The extracts of both aqueous and ethanol solvents have been reported to have hepatoprotective (Manjunatha & Vidya, 2008) activity and methanol extracts have also revealed inhibition of mosquito-borne disease (Kannathasan et al., 2011). The investigation of *V. trifolia* in phytochemical studies have reported flavonoids (Hong-yan et al., 2008; Li et al., 2005; Wang, 2005), terpenoids (Ono et al., 2000; Tiwari et al., 2012), and alkaloids (Döpke, 1962; Luo et al., 2017; Van Luu, 2003) with biological activities as mentioned above.



Figure 1 Flowers, twigs, leaves, and fruits of *V. trifolia*

Free radicals, produced during oxidation process, have been shown to be related to a range of disorders in humans, including central nervous system injury, stroke, traumatic brain injury, spinal cord injury, heart diseases, and cancer (Kumpulainen & Salonen, 1999; Shah et al., 2015). Numerous antioxidant compounds, hydroperoxidase enzymes in human body, synthetic antioxidants such as butylated hydroxytoluene (BHT), butylated hydroxyanisole (BHA), *tert*-butylhydroquinone (TBHQ), propyl gallate, phenolic acid, flavonoids, carotenoids, and vitamins E and C are used as free radical scavengers (Barlow, 1990; Kil et al., 2009). Among the antioxidant compounds, natural phenolic compounds have potential due to the presence of conjugated ring structures and hydroxyl groups for scavenging the free radicals that affect the oxidation process (Shahidi et al., 1992).

In recent research, acetylcholinesterase (AChE) inhibitors were used for treating the neurodegenerative disease as the major therapeutic target based on the cholinergic hypothesis (Davies & Maloney, 1976; Mangialasche et al., 2010). Alzheimer's disease (AD) is a progressive neurological disorder frequently connected with memory impairment, behavioral turbulence, cognitive dysfunction and imperfection in routine life activities (Aisen & Davis, 1997; Bachman et al., 1992). Natural AChE inhibitors have become the important alternatives in treatment of AD and other neurological diseases (Knapp et al., 1994; Nawaz & Choudhary, 2004).

In this study, *V. trifolia* extracts were evaluated for total phenolic content (TPC), antioxidant activity, and their correlation. Moreover, the potent AChE inhibitory activity was also investigated for further isolation and elucidation.

Methods

Plant material and chemicals:

Flowers, twigs, leaves, and fruits of *V. trifolia* were collected from Chiang Mai, Thailand and further identified by Dr.Theerapat Luangsuphabool (Genebank Research and Development Group, Biotechnology Research and Development Office, Department of Agriculture, Ministry of Agriculture and Cooperatives). Commercial and analytical grade solvents including hexane, dichloromethane, ethyl acetate, and methanol were purchased from RCI Labscan. Folin-Ciocalteu reagent, sodium carbonate (Na_2CO_3), gallic acid, 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH), butylated hydroxytoluene (BHT), AChE from electric eel (Type V-S lyophilized powder) 480 U/mg solid, 530 U/mg protein, hydrochloric acid (HCl), sodium hydroxide (NaOH), tris(hydroxymethyl) methylamine, bovine serum albumin (BSA), 5,5'-dithio-bis(2-nitrobenzoic acid) (DTNB), sodium chloride (NaCl), magnesium chloride (MgCl_2), acetylthiocholine iodide (ATCI), and physostigmine were obtained from TCI, and Sigma-Aldrich.

Preparation of extracts:

Plant materials (10 kg; flowers, twigs, leaves, and fruits) were divided into small pieces and dried at 60 °C for 24 h. The powder of dried plant materials was prepared using an electric grinder and powder samples were used for preparation of the extracts (Figure 2). The methanol extracts of each plant material were obtained by maceration of powder samples (250 g) with methanol (1,000 mL), prepared at room temperature for 24 h, repeated for three times, and evaporated by rotary evaporator. The methanol extracts of each plant material (flowers, twigs, leaves, and fruits), 26.95 g, 28.02 g, 54.62 g, and 31.09 g respectively obtained, were sequentially partitioned with hexane, dichloromethane, ethyl acetate, and methanol to obtain hexane, dichloromethane, ethyl acetate, and methanol extracts, respectively. Each extract was performed in triplicate with equal volumes (500 mL) of solvent. The obtained crude extracts of flowers for the hexane, dichloromethane, ethyl acetate, and methanol extracts were 1.73 g, 1.05 g, 1.52 g, and 9.17 g, respectively. The obtained crude extracts of twigs for the same extracts were 2.44 g, 2.17 g, 2.36 g, and 7.03 g, respectively. The obtained crude extracts of leaves for the same extracts were 2.38 g, 1.21 g, 3.54 g, and 10.17 g, respectively. In addition, the obtained crude extracts of fruits for the same extracts were 2.02 g, 3.47 g, 2.39 g, and 7.65 g, respectively.

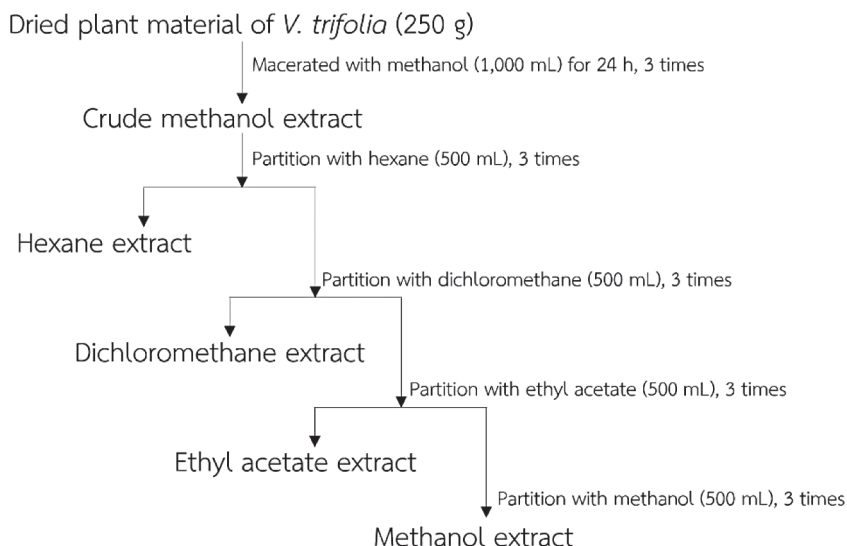


Figure 2 Extraction scheme of *V. trifolia*

Determination of Phenolic Contents:

TPC in the extracts were quantified using modified Folin- Ciocalteu method (Atoui et al., 2005). 20 μL each of the 10 mg/mL extracts in methanol and the serial gallic standard solutions in methanol were loaded on 96-well plates. Then 100 μL of Folin-Ciocalteu reagent was added to each well, mixed well and waited for 5 min. Next, 80 μL of 7.5% Na_2CO_3 solution was added and mixed well. After covering and keeping it in the dark for 2 h, absorbance at 750 nm was measured using microplate reader (VICTOR Nivo Multimode). The total phenolic content was determined using the standard curve obtained for gallic acid. The estimation of the phenolic compounds in each of the extract was performed in triplicate and the results were expressed as mg of gallic acid equivalents (GAE) per g of dry extract weight.

Determination of Antioxidant Activity by Scavenging:

The antioxidant activity of the extracts was determined using modified DPPH free radical scavenging assay in 96-well plates (Tepe et al., 2005). Stock solutions of the extracts were prepared as 1 mg/mL in methanol. Each well was filled with 200 μL extract in methanol starting from 1000 $\mu\text{g/mL}$ down to the lowest 10 $\mu\text{g/mL}$. Then, 5 μL of the DPPH solution (2.5 mg/mL in methanol) was added to each well. BHT was used as positive control (Yehye et al., 2015). After keeping the plates in the darkness for 30 min, the absorbance was read using microplate reader (VICTOR Nivo Multimode) at 517 nm. The assay was repeated in triplicate and percentage inhibition was calculated using the following formula (Aryal et al., 2019):

$$\% \text{ DPPH radical scavenging} = [(A_0 - A_1)/A_0] \times 100,$$

Where A_0 = absorbance of the control and A_1 = absorbance of the extracts.

A graph of percentage of DPPH radical scavenging was plotted against concentration of the extracts and concentration for 50% inhibition (IC_{50}) was obtained from the graph. The DPPH radical scavenging activity by extracts was examined and compared with BHT as positive control.

Determination of Acetylcholinesterase Inhibitory Activity:

Tris-HCl (50 mM, pH 8) was used as a buffer. The lyophilized AChE enzyme was prepared in the buffer to obtain 1130 U/mL stock solution. The enzyme stock solution was kept at -80°C until used. The further enzyme dilution was dissolved in 0.1% BSA in buffer. DTNB was dissolved in the buffer containing 0.1 M NaCl and 0.02 M MgCl_2 . ATCI was dissolved in deionized water. AChE activity was measured using a modified microplate assay based on Ellman's colorimetric method (Ingkaninan et al., 2003). The AChE inhibition of extracts was carried out in 96-well plates. 25 μL of 15 mM ATCI, 125 μL of 3 mM DTNB, 50 μL of 50 mM Tris-HCl (pH 8), and 25 μL of the extract dissolved in buffer containing not more than 10% methanol were added to the wells. Thereafter, 25 μL of AChE solution (0.28 U/mL) was added and the absorbance was measured using microplate

reader (VICTOR Nivo Multimode) at a wavelength of 405 nm and monitored every 15 s for 5 min. Physostigmine was used as positive control (Mathew & Subramanian, 2014). All the reactions were performed in triplicate and inhibitory activity was calculated as follows (Majdoub et al., 2021):

$$\% \text{ AChE inhibition} = [(A_0 - A_1)/A_0] \times 100,$$

Where A_0 = absorbance of the control and A_1 = absorbance of the extracts.

A graph of percentage of AChE inhibition was plotted against concentration of the extracts and concentration for 50% inhibition (IC_{50}) was obtained from the graph. The inhibition of AChE activity by extracts was examined and compared with physostigmine as positive control.

Results and Discussion

The extraction procedures (Figure 2) used commonly used solvents with increasing polarity order (hexane, dichloromethane, ethyl acetate, and methanol) and phenolic compounds are more soluble in polar organic solvents. Phenolic compounds are important phytochemical constituents which have antioxidant activity through redox properties and the hydroxyl groups in their structures (Ayaz et al., 2014). TPC (mg GAE/g dry extract weight) of different *V. trifolia* extracts (Table 1) had high phenolic contents in ethyl acetate extracts of leaves and twigs (297.26 ± 0.79 and 227.89 ± 0.47 mg GAE/g dry extract weight, respectively).

For DPPH assay (Table 1), the results showed high antioxidant activity with IC_{50} values in ethyl acetate extracts of leaves and twigs at 11.16 ± 0.21 and 12.47 ± 0.62 $\mu\text{g/mL}$, respectively corresponding to percentage of DPPH inhibition at 0.1 mg/mL extract concentration of $86.14 \pm 0.87\%$ and $81.14 \pm 0.87\%$, respectively. BHT was used as the positive control for antioxidant which showed IC_{50} value of 6.25 ± 0.12 $\mu\text{g/mL}$. Moreover, the results expressed the positive correlation between TPC and antioxidant activity as shown in Figures 3 and 4. The relationship of TPC and $1/IC_{50}$ values from DPPH assay was determined with coefficient of determination (R^2) value 0.9155 and this significant correlation suggested that the phenolic compound contributed to the antioxidant activity (Shah et al., 2013). However, phenolic compounds can exhibit different antioxidant activities depending on their structures as well as synergistic or antagonistic effect of other chemical compounds combination and interactions between compounds present in the extract (Freeman et al., 2010).

Table 1 TPC, % DPPH inhibition, and DPPH IC₅₀ values of *V. trifolia* extracts

Parts of plant	Extracts	TPC (mg GAE/g dry extract)	% DPPH inhibition at 0.1 mg/mL	IC ₅₀ for DPPH scavenging assay (µg/mL)
chloro	hexane	9.55 ± 0.52	6.06 ± 0.34	870.51 ± 0.27
	dichloromethane	14.30 ± 0.91	34.18 ± 0.38	232.41 ± 0.33
	ethyl acetate	30.32 ± 0.72	35.27 ± 0.97	115.02 ± 0.91
	methanol	27.19 ± 0.28	25.09 ± 0.86	293.78 ± 0.78
twigs	hexane	13.02 ± 0.58	10.05 ± 0.81	198.36 ± 0.70
	dichloromethane	59.98 ± 0.22	48.19 ± 0.26	112.16 ± 0.19
	ethyl acetate	227.89 ± 0.47	81.14 ± 0.87	12.47 ± 0.62
	methanol	112.87 ± 0.56	62.03 ± 0.92	54.49 ± 0.79
leaves	hexane	36.12 ± 0.08	55.86 ± 0.65	71.38 ± 0.42
	dichloromethane	160.08 ± 0.74	61.46 ± 0.29	39.01 ± 0.18
	ethyl acetate	297.26 ± 0.79	86.12 ± 0.37	11.16 ± 0.21
	methanol	172.03 ± 0.83	75.38 ± 0.97	15.97 ± 0.85
fruits	hexane	6.96 ± 0.57	1.46 ± 1.12	>1,000
	dichloromethane	35.21 ± 0.18	11.75 ± 0.30	253.21 ± 0.16
	ethyl acetate	24.20 ± 0.75	3.55 ± 0.95	411.25 ± 0.87
	methanol	16.97 ± 0.26	9.75 ± 0.79	610.42 ± 0.54

Note: Values are expressed as mean ± SD (n=3). IC₅₀ for DPPH scavenging assay of BHT (positive controls) was 6.25 ± 0.12 µg/mL.

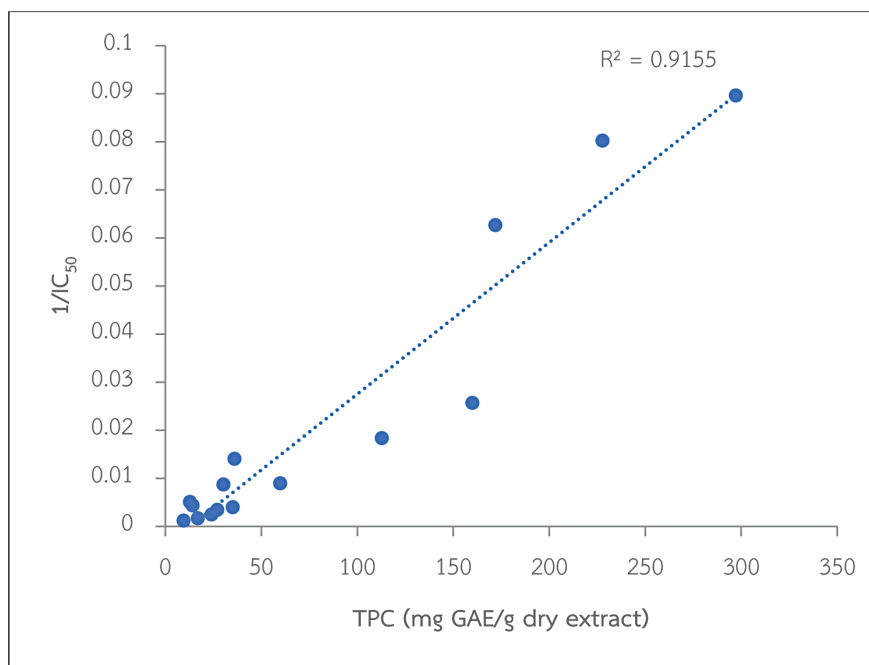


Figure 3 Correlation between TPC and DPPH IC_{50} values of *V. trifolia* extracts

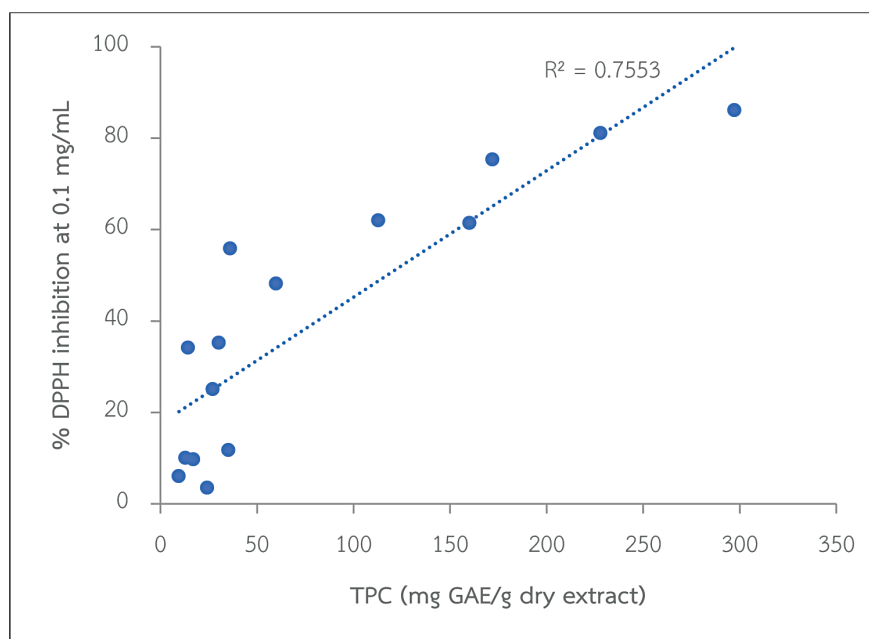


Figure 4 Correlation between TPC and % DPPH inhibition at 0.1 mg/mL of *V. trifolia* extracts

Table 2 % Inhibition and IC₅₀ values of *V. trifolia* extracts for AChE inhibition assays

Parts of plant	Extracts	% AChE inhibition at 0.1 mg/mL	IC ₅₀ for AChE inhibition assay (µg/mL)
leaves	dichloromethane	21.01 ± 7.87	870.48 ± 9.79
	ethyl acetate	36.75 ± 3.03	230.21 ± 2.84
	methanol	42.94 ± 6.29	245.83 ± 5.93
fruits	dichloromethane	13.92 ± 2.94	527.02 ± 1.95
	ethyl acetate	50.40 ± 0.97	77.63 ± 0.97
	methanol	59.28 ± 1.48	30.79 ± 0.11

Note: Values are expressed as mean ± SD (n=3). IC₅₀ physostigmine control for AChE inhibition assay was 0.11 ± 0.04 µg/mL.

The AChE inhibitory activity of *V. trifolia* extracts are shown in Table 2 representing the percentage of AChE inhibition at 0.1 mg/mL and IC₅₀ for AChE inhibition assay (µg/mL) from dichloromethane, ethyl acetate, and methanol extracts of leaves and fruits. Other extracts are not shown in table 2 due to the IC₅₀ values >1,000 µg/mL. Physostigmine was used as the positive control for AChE inhibitor which showed IC₅₀ value of 0.11 ± 0.04 µg/mL. The only methanol extract of fruits showed the potent AChE inhibitory activity with IC₅₀ value 30.79 ± 0.11 µg/mL corresponding to percentage of AChE inhibition at 0.1 mg/mL expressed to be 59.28 ± 1.48%. From approved drugs for AD, galantamine and rivastigmine are cholinesterase inhibitors derived from plant alkaloids (Nordberg & Svensson, 1998) and some alkaloids from dried fruits and leaves of *V. trifolia* were reported (Döpke, 1962; Luo et al., 2017; Van Luu, 2003). These results suggested that the extracts have the potential as AChE inhibitor. Further isolations for new AChE inhibitors with low toxicity from these extracts are necessary for the investigations of natural drugs.

Conclusions

TPC, free radical scavenging activity, and AChE inhibitory activity of *V. trifolia* extracts varied according to plant parts and solvent polarity used. The ethyl acetate extract of leaves had the most phenolic content (297.26 ± 0.79 mg GAE/g dry extract weight) as well as the best antioxidant properties (IC₅₀ 11.16 ± 0.21 µg/mL and 86.12 ± 0.37% DPPH inhibition at 0.1 mg/mL). There was a significant linear correlation between total phenolic content and 1/IC₅₀ values from DPPH assay due to the phenolic compounds were a major component of antioxidants in *V. trifolia*. Additionally, the

methanol extract of fruits also showed inhibitory activity against AChE enzymes (IC_{50} 30.79 ± 0.11 $\mu\text{g/mL}$ and $59.28 \pm 1.48\%$ AChE inhibition at 0.1 mg/mL).

Acknowledgement

The authors would like to acknowledge Dr.Theerapat Luangsuphabool of the Genebank Research and Development Group, Biotechnology Research and Development Office, Department of Agriculture, Ministry of Agriculture and Cooperatives for performing taxonomic identification.

References

- Aisen, P. S., & Davis, K. L. (1997). The search for disease-modifying treatment for Alzheimer's disease. **Neurology**, **48**(5 Suppl 6), 35S-41S.
- Aryal, S., Baniya, M. K., Danekhu, K., Kunwar, P., Gurung, R., & Koirala, N. (2019). Total phenolic content, flavonoid content and antioxidant potential of wild vegetables from Western Nepal. **Plants**, **8**(4), 96.
- Atoui, A. K., Mansouri, A., Boskou, G., & Kefalas, P. (2005). Tea and herbal infusions: their antioxidant activity and phenolic profile. **Food Chemistry**, **89**(1), 27-36.
- Ayaz, M., Junaid, M., Ahmed, J., Ullah, F., Sadiq, A., Ahmad, S., & Imran, M. (2014). Phenolic contents, antioxidant and anticholinesterase potentials of crude extract, subsequent fractions and crude saponins from *Polygonum hydropiper* L. **BMC Complementary and Alternative Medicine**, **14**(1), 1-9.
- Bachman, D., Wolf, P. A., Linn, R., Knoefel, J., CobbS, J., Belanger, A., & White, L. (1992). Prevalence of dementia and probable senile dementia of the Alzheimer type in the Framingham study. **Neurology**, **42**(1), 115-115.
- Barlow, S. M. (1990). Toxicological Aspects of Antioxidants Used as Food Additives. In **Food Antioxidants**. Dordrecht, Netherlands: Springer.
- Davies, P., & Maloney, A. (1976). Selective loss of central cholinergic neurons in Alzheimer's disease. **Lancet**, **308**(8000), 1403.
- de Kok, R. P. (2007). The genus *Vitex* L.(Lamiaceae) in new guinea and the south pacific islands. **Kew Bulletin**, 587-603.
- Döpke, W. (1962). Vitricin, ein neues Alkaloid aus *Vitex trifolia* Linn. **Naturwissenschaften**, **49**(16), 375-375.
- Freeman, B. L., Eggett, D. L., & Parker, T. L. (2010). Synergistic and antagonistic interactions of phenolic compounds found in navel oranges. **Journal of Food Science**, **75**(6), C570-C576.
- Gu, Q., Zhang, X., & Jiang, Z. (2007). Chemical constituents from fruits of *Vitex trifolia*. **Chinese Traditional and Herbal Drugs**, **38**(5), 656.

- Hong-yan, C., Wei-xian, C., Yu, F., Kun, G., Li-jun, Y., & Yi-ping, Z. (2008). Studies on flavonoid constituents of *Vitex trifolia* L. var. *simplicifolia* Cham. **Natural Product Research and Development**, 20(4), 582-584.
- Horata, N., Suttirat, S., Panpanich, T., Siriphon, A., Navaprayoonvach, B., Suwanwisolkij, N., & Janwithayanuchit, I. (2017). In vitro antimalarial activity and cytotoxicity of 20 ethanolic crude extracts from thai herbs against *Plasmodium falciparum* TM267. **Songklanagarind Medical Journal**, 35(2), 109-120.
- Hossain, M., Paul, N., Sohrab, M., Rahman, E., & Rashid, M. (2001). Antibacterial activity of *Vitex trifolia*. **Fitoterapia**, 72(6), 695-697.
- Ingkaninan, K., Temkitthawon, P., Chuenchom, K., Yuyaem, T., & Thongnoi, W. (2003). Screening for acetylcholinesterase inhibitory activity in plants used in Thai traditional rejuvenating and neurotonic remedies. **Journal of Ethnopharmacology**, 89(2-3), 261-264.
- Kannathasan, K., Senthilkumar, A., Chandrasekaran, M., & Venkatesalu, V. (2007). Differential larvicidal efficacy of four species of *Vitex* against *Culex quinquefasciatus* larvae. **Parasitology Research**, 101(6), 1721-1723.
- Kannathasan, K., Senthilkumar, A., & Venkatesalu, V. (2011). Mosquito larvicidal activity of methyl-p-hydroxybenzoate isolated from the leaves of *Vitex trifolia* Linn. **Acta Ropica**, 120(1-2), 115-118.
- Kil, H. Y., Seong, E. S., Ghimire, B. K., Chung, I.-M., Kwon, S. S., Goh, E. J., & Lee, D. (2009). Antioxidant and antimicrobial activities of crude sorghum extract. **Food Chemistry**, 115(4), 1234-1239.
- Knapp, M. J., Knopman, D. S., Solomon, P. R., Pendlebury, W. W., Davis, C. S., Gracon, S. I., & Barnett, M. (1994). A 30-week randomized controlled trial of high-dose tacrine in patients with Alzheimer's disease. **Jama**, 271(13), 985-991.
- Kumpulainen, J. T., & Salonen, J. T. (1999). **Natural Antioxidants and Anticarcinogens in Nutrition, Health and Disease**. Cambridge, England: Elsevier.
- Li, W.-X., Cui, C.-B., Cai, B., Wang, H.-Y., & Yao, X.-S. (2005). Flavonoids from *Vitex trifolia* L. inhibit cell cycle progression at G2/M phase and induce apoptosis in mammalian cancer cells. **Journal of Asian Natural Products Research**, 7(4), 615-626.
- Luo, P., Xia, W., Morris-Natschke, S. L., Lee, K.-H., Zhao, Y., Gu, Q., & Xu, J. (2017). Vitepyrroloids A-D, 2-cyanopyrrole-containing labdane diterpenoid alkaloids from the leaves of *Vitex trifolia*. **Journal of Natural Products**, 80(5), 1679-1683.
- Majdoub, N., el Guendouz, S., Carlier, J., Costa, C., Guerrero, C. A. C., Duarte, J., & Migue, M. G. (2021). Leaf mineral element content and soil characteristics on in vitro antioxidant and enzymatic inhibitory activities of aqueous fennel extracts. **Emirates Journal of Food and Agriculture**, 33(1), 73-86.

- Mangialasche, F., Solomon, A., Winblad, B., Mecocci, P., & Kivipelto, M. (2010). Alzheimer's disease: clinical trials and drug development. **Lancet Neurology**, 9(7), 702-716.
- Manjunatha, B., & Vidya, S. (2008). Hepatoprotective activity of *Vitex trifolia* against carbon tetrachloride-induced hepatic damage. **Indian Journal of Pharmaceutical Sciences**, 70(2), 241.
- Mathew, M., & Subramanian, S. (2014). In vitro screening for anti-cholinesterase and antioxidant activity of methanolic extracts of ayurvedic medicinal plants used for cognitive disorders. **PloS One**, 9(1), e86804.
- McClatchey, W. (1996). The ethnopharmacopoeia of Rotuma. **Journal of Ethnopharmacology**, 50(3), 147-156.
- Nawaz, S. A., & Choudhary, M. I. (2004). New cholinesterase inhibiting bisbenzylisoquinoline alkaloids from *Cocculus pendulus*. **Chemical and Pharmaceutical Bulletin**, 52(7), 802-806.
- Nordberg, A., & Svensson, A.-L. (1998). Cholinesterase inhibitors in the treatment of Alzheimer's disease. **Drug Safety**, 19(6), 465-480.
- Ono, M., Sawamura, H., Ito, Y., Mizuki, K., & Nohara, T. (2000). Diterpenoids from the fruits of *Vitex trifolia*. **Phytochemistry**, 55(8), 873-877.
- Shah, S., Dhanani, T., & Kumar, S. (2013). Comparative evaluation of antioxidant potential of extracts of *Vitex negundo*, *Vitex trifolia*, *Terminalia bellerica*, *Terminalia chebula*, *Embelica officinalis* and *Asparagus racemosus*. **Innovations in Pharmaceuticals and Pharmacotherapy**, 1, 44-53.
- Shah, S. M., Ayaz, M., Khan, A.-u., Ullah, F., Farhan, Shah, A.-u.-H. A., & Hussain, S. (2015). 1,1-Diphenyl, 2-picrylhydrazyl free radical scavenging, bactericidal, fungicidal and leishmanicidal properties of *Teucrium stocksianum*. **Toxicology and Industrial Health**, 31(11), 1037-1043.
- Shahidi, F., Janitha, P., & Wanasundara, P. (1992). Phenolic antioxidants. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, 32(1), 67-103.
- Tepe, B., Daferera, D., Sokmen, A., Sokmen, M., & Polissiou, M. (2005). Antimicrobial and antioxidant activities of the essential oil and various extracts of *Salvia tomentosa* Miller (Lamiaceae). **Food Chemistry**, 90(3), 333-340.
- Tiwari, N., Luqman, S., Masood, N., & Gupta, M. M. (2012). Validated high performance thin layer chromatographic method for simultaneous quantification of major iridoids in *Vitex trifolia* and their antioxidant studies. **Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis**, 61, 207-214.
- Van Luu, H. (2003). Chemical composition of *Vitex trifolia* L. **Pharmaceutical Journal**, 327(7), 13-14.
- Wang, H., Cai, B., Cui, C., Zhang, D., & Yang, B. (2005). Vitexicarpin, a flavonoid from *Vitex trifolia* L., induces apoptosis in K562 cells via mitochondria-controlled apoptotic pathway. **Acta Pharmaceutica Sinica**, 40(1), 27-31.

- Yehye, W. A., Rahman, N. A., Ariffin, A., Abd Hamid, S. B., Alhadi, A. A., Kadir, F. A., & Yaeghoobi, M. (2015). Understanding the chemistry behind the antioxidant activities of butylated hydroxytoluene (BHT): A review. **European Journal of Medicinal Chemistry**, **101**, 295-312.
- Zheng, C.-J., Zhu, J.-Y., Yu, W., Ma, X.-Q., Rahman, K., & Qin, L.-P. (2013). Labdane-type diterpenoids from the fruits of *Vitex trifolia*. **Journal of Natural Products**, **76**(2), 287-291.
- =====

วิธีการง่ายในการหาสมการและประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยว

A SIMPLE WAY TO FIND THE EQUATION AND THE EFFICIENCY OF A MONOCRYSTALLINE SILICON SOLAR CELL

ชโนภาส ชนลักษณ์ดาว* และ รัศมี แสงศิริมงคลยิ่ง

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร กรุงเทพมหานคร 10220

Chanopat Chonlakdao* and Ratsamee Sangsirimongkolying

Faculty of Science and Technology, Phranakhon Rajabhat University, Bangkok, 10220

*E-mail: chanopatp@gmail.com

Received: 2021-03-29

Revised: 2021-05-12

Accepted: 2021-06-08

บทคัดย่อ

บทความวิชาการฉบับนี้อธิบายถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับช่องว่างพลังงาน รอยต่อพีเอ็น อิเล็กตรอน-โฮล และกลไกการดูดกลืนแสงเพื่อสร้างพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ความรู้พื้นฐานทฤษฎีควอนตัม การเคลื่อนที่ของประจุด้วยฟังก์ชันการกระจายแฟร์มี-ดิแรกในกลศาสตร์เชิงสถิติ และการไหลของโฮลทำให้ได้สมการไดโอดที่ใช้สำหรับการหาสมการเซลล์แสงอาทิตย์และกระแสไฟฟ้าสุทธิ สำหรับวิธีการง่ายที่ใช้ในการหาประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์สามารถพิจารณาได้จากร้อยละสัดส่วนของแรงดันไฟฟ้าที่ได้กับพลังงานของโฟตอนที่คำนวณจากการดูดกลืนแสงอาทิตย์ที่สูงสุดในช่วงแสงที่ตามองเห็น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าประมาณ 20%

คำสำคัญ: เซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยว ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ ทฤษฎีควอนตัม ทฤษฎีรอยต่อพีเอ็น สมการเซลล์แสงอาทิตย์

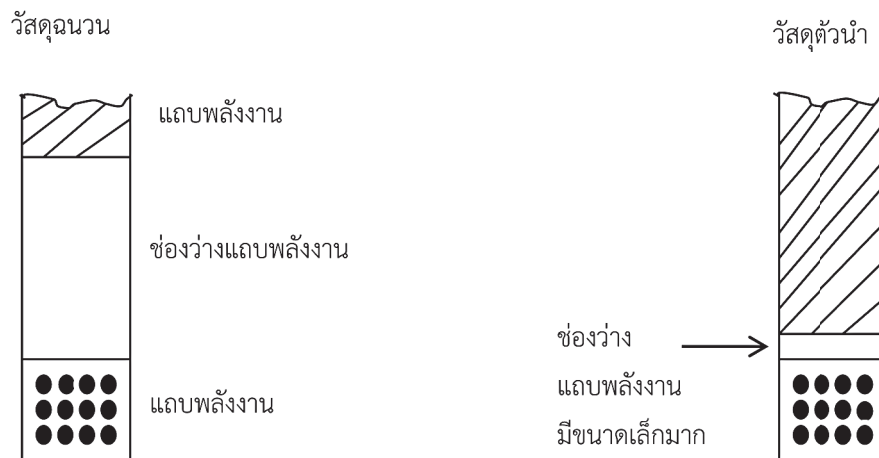
ABSTRACT

This academic article describes the theories related to energy gap, p-n junction, electron-hole and absorption mechanisms to generate solar cell electricity. Basic knowledge of quantum theory, charge movement with the Fermi-Dirac distribution function in statistical mechanics and hole flow result in the diode equation used for finding solar cell equation and net current. The simple method used to determine the efficiency of the solar cells can be determined by the percentage of voltage obtained on the energy of the photon calculated from the maximum solar absorption value in the visible light range, which suggests that the efficiency of the solar cell is about 20%.

Keywords: monocrystalline silicon solar cell, a solar cell efficiency, quantum theory, pn junction theory, solar cell equation

บทนำ

ก๊าซเรือนกระจก (greenhouse gas) ของโลกที่รุนแรงขึ้นนั้นมีสาเหตุหลักคือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) คิดเป็น 82 เปอร์เซ็นต์ (Foer, 2019) ของก๊าซเรือนกระจกที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์โดยส่วนใหญ่มาจากอุตสาหกรรม การคมนาคม และการใช้ไฟฟ้า การหยุดก๊าซเรือนกระจกจะต้องลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยออกมา โดยลดการใช้พลังงานไฟฟ้าจากแหล่งเชื้อเพลิงปิโตรเลียม (petroleum) หรือชีวมวล (biomass) และเพิ่มการใช้พลังงานทดแทน (renewable) จากแหล่งเชื้อเพลิงที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เช่น พลังงานลม (wind energy) และพลังงานน้ำ (water power) เป็นต้น เซลล์แสงอาทิตย์ (solar cell) เป็นอุปกรณ์แหล่งกำเนิดไฟฟ้าที่ได้รับความนิยมสูง เนื่องจากกลไกการผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยแสงอาทิตย์ไม่ก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เซลล์แสงอาทิตย์เปรียบเสมือนแหล่งกำเนิดไฟฟ้าคงที่ต่อขานานกับรอยต่อพีเอ็น (pn junction) ผลิตจากอุปกรณ์กึ่งตัวนำไฟฟ้า (semiconductor devices) เพื่อใช้เปลี่ยนรูปพลังงานแสงอาทิตย์ไปเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรง จากวิกฤตการณ์ทางด้านภาวะโลกร้อน พลังงานของโลก และภาวะฝุ่นละออง PM 2.5 เซลล์แสงอาทิตย์จึงได้เข้ามามีบทบาทร่วมกับวิธีการอื่น ๆ ซึ่งจะเป็นแหล่งผลิตพลังงานสำหรับใช้งานในอนาคตพร้อมกับการตรวจสอบและการประยุกต์ใช้สารกึ่งตัวนำ ในยุคแรกของการค้นพบรอยต่อพีเอ็นได้มีการเสนอผลการทดลองเพื่อยืนยันทฤษฎีดังกล่าวอย่างรวดเร็ว จนทำให้ประสบความสำเร็จและเกิดเทคโนโลยีใหม่ขึ้น นำไปสู่ทรานซิสเตอร์ (transistor) ตัวแรกของโลกที่สามารถขยายไฟฟ้าได้ดี ซึ่งในอดีตเคยใช้หลอดสุญญากาศ (vacuum) ขนาดใหญ่และกินพลังงานไฟฟ้ามาก ปัจจุบันพลังงานไฟฟ้าสามารถสร้างขึ้นได้โดยตรงจากแสงอาทิตย์ด้วยทฤษฎีการดูดกลืนพลังงานแสงโดยสารกึ่งตัวนำสามารถขับอิเล็กตรอน (electron) ออกไปสู่อากาศหรือในสุญญากาศ ซึ่งเป็นผลมาจากปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (photoelectric effect) ทำให้สารกึ่งตัวนำเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า (electromotive force, emf) ขนาดประมาณ 0.5 โวลต์ ซึ่งค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดนี้ได้จากการทดสอบด้วยวัสดุประเภทซิลิคอน (silicon, Si) ที่เป็นแบบรอยต่อพีเอ็นของรัสเซลล์ โอล์ (Russell Ohl) ในราวต้นปี ค.ศ. 1940 (Kruangam, 1992) แรงเคลื่อนไฟฟ้าของวงจรคือความต่างของแรงดันไฟฟ้า เป็นผลให้เกิดงานในการนำพาประจุเคลื่อนที่ครบหนึ่งรอบของวงจรไฟฟ้าเปรียบเสมือนแรงเคลื่อนไฟฟ้าเป็นผลทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้า สำหรับวิธีการง่ายในการอธิบายทฤษฎีแถบพลังงานของแข็ง (band theory of solids) คืออวกาศภาพโครงสร้างแถบ (band structures) ดังแสดงในภาพที่ 1 กำหนดให้แถบพลังงานด้านล่างหรือแถบเวเลนซ์ (valence band) ถูกจับจองด้วยอิเล็กตรอน (จุดสีดำเปรียบเหมือนอิเล็กตรอน) ขณะที่เส้นยาวขีดเฉียงหลาย ๆ เส้นในแถบพลังงานด้านบนหรือแถบการนำไฟฟ้า (conduction band) หมายถึงแถบพลังงานที่ยังไม่ถูกจับจองด้วยอิเล็กตรอน พื้นที่ว่างระหว่างทั้งสองแถบพลังงานเรียกว่าช่องว่างแถบพลังงาน (energy gap) ระดับพลังงานกระตุ้นที่จำเป็นในการทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากพันธะคู่ขึ้นไปอยู่ในสถานะกระตุ้น (excited state) ในระดับชั้นพลังงานสูง ทำให้คู่อิเล็กตรอนหลุดออกจากพันธะโควาเลนต์ (covalent bond) และเปลี่ยนเป็นคู่อิเล็กตรอน-โฮล (electron-hole pair) ซึ่งกลไกดังกล่าวทำให้เกิดการนำไฟฟ้า



ภาพที่ 1 โครงสร้างแถบพลังงาน (energy band structures) ของวัสดุฉนวนและวัสดุตัวนำ
(ดัดแปลงจาก Panyakeow, 2014)

โครงสร้างแถบพลังงานของฉนวน (insulator) สถานะพลังงานของประจุในฉนวนที่อุณหภูมิห้องหรือแม้แต่อุณหภูมิห้องอิเล็กตรอนทั้งหมดอยู่ในแถบพลังงานที่ต่ำกว่าซึ่งเรียกว่าแถบเวเลนซ์ ทุกสถานะแถบพลังงานนี้ อิเล็กตรอนมีความหนาแน่นสูง ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ ดังนั้นจึงไม่มีการนำไฟฟ้าในฉนวน ถัดขึ้นไปจากแถบเวเลนซ์คือแถบต้านบนที่มีพลังงานสูงกว่า (แถบการนำไฟฟ้า) ซึ่งไม่มีโหลด (load) ที่เป็นอุปกรณ์ แถบการนำไฟฟ้าถูกคั่นด้วยช่องว่างแถบพลังงาน หากฉนวนมีขนาดช่องว่างแถบพลังงานกว้างมากหลายอิเล็กตรอนโวลต์ (eV) ตัวอย่างเช่น เพชร (diamond) มีขนาดช่องว่างแถบพลังงานประมาณ 5 eV ที่อุณหภูมิห้องหรือแม้แต่อุณหภูมิห้อง อิเล็กตรอนเกือบทั้งหมดคงไม่สามารถหาพลังงานกระตุ้น (excited energy) ได้มากพอจากการชนกันของอะตอม (atomic collisions)) จนสามารถกระโดดข้ามไปยังแถบการนำไฟฟ้าได้ ดังนั้นจึงไม่มีอิเล็กตรอนในแถบต้านบนสำหรับ นำไฟฟ้า ทำให้เพชรไม่สามารถนำไฟฟ้า กรณีสารกึ่งตัวนำที่พบใช้มากที่สุดเช่น ซิลิคอนและเจอร์มาเนียม (germanium, Ge) พบว่ามีโครงสร้างแถบพลังงานใกล้เคียงกับฉนวน แต่ขนาดช่องว่างแถบพลังงานน้อยกว่าฉนวน (Si ประมาณ 1.1 eV และ Ge ประมาณ 0.8 eV) (Kruangam, 1992) ดังนั้นความร้อนที่อุณหภูมิห้องจึงมีพลังงานมากพอที่จะทำให้อะตอมเกิดการชนกันและกระตุ้นให้อิเล็กตรอนบางส่วนเคลื่อนที่ไปยังแถบการนำไฟฟ้าต้านบน ทำให้ซิลิคอนและเจอร์มาเนียมสามารถนำไฟฟ้าได้ การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนส่วนหนึ่งไปแถบต้านบนก็จะทำให้มีสถานะว่างในแถบต้านล่างที่สามารถทำให้เกิดการนำไฟฟ้าได้ด้วย ดังนั้นสารกึ่งตัวนำจะนำไฟฟ้าได้ง่ายพอสมควรและสามารถนำไฟฟ้าได้ดีขึ้นที่อุณหภูมิสูง

สารกึ่งตัวนำได้รับการศึกษาอย่างต่อเนื่องจนถึงขั้นสามารถนำมาผลิตเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ในเชิงพาณิชย์ก็เนื่องจากช่องว่างแถบพลังงานค่อนข้างแคบโดยทั่วไปมีค่าประมาณ 1 eV (Kittle, 2005; Knapp, 1996; Kruangam, 1992) ทำให้ซิลิคอนหรือเจอร์มาเนียมไม่ใช่วัสดุที่สมบูรณ์แบบ การถูกกระตุ้นด้วยความร้อนที่อุณหภูมิห้องจะช่วยให้อิเล็กตรอนของอะตอมบางส่วนข้ามช่องว่างแถบพลังงานขึ้นไปอยู่ในแถบการนำไฟฟ้า และสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระที่แถบการนำไฟฟ้า ยิ่งไปกว่านั้นตำแหน่งที่ปล่อยอิเล็กตรอนออกไปจะเกิดการขาดอิเล็กตรอนหรือเกิดช่องว่างที่มีประจุเป็นบวกขึ้นในแถบเวเลนซ์ ซึ่งเรียกว่าโฮล (hole) เนื่องจากอิเล็กตรอนหลุดออกจากโครงสร้างอะตอมเปรียบเหมือนประจุที่ขาดหายไปบนแลตทิซผลึก (crystal lattice) ทั้งอิเล็กตรอนและโฮลจะมีผลในการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ เปรียบเหมือน

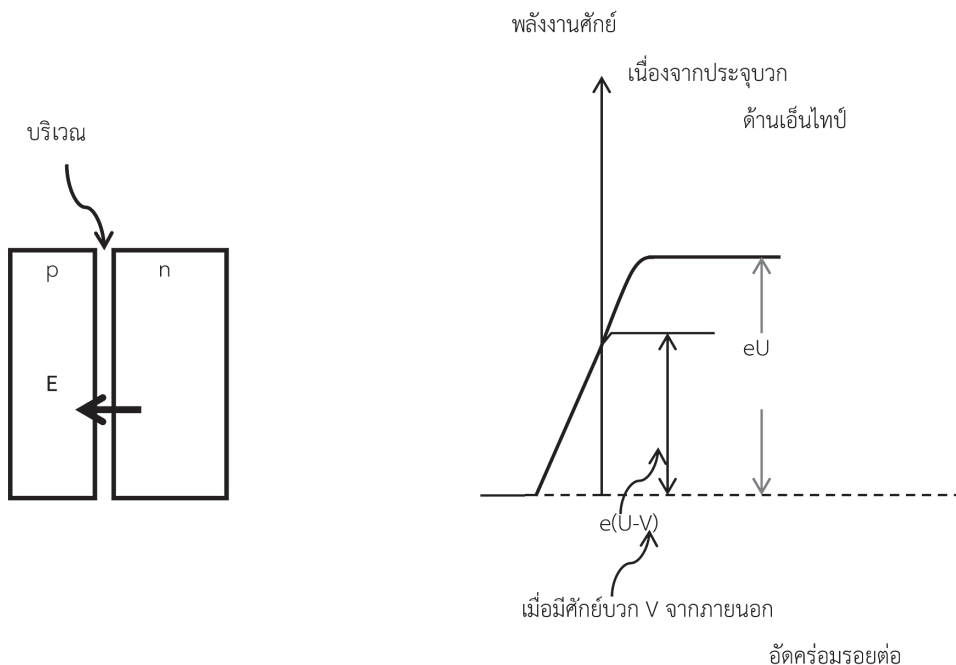
โวลต์ (ประจุบวก) เคลื่อนที่ภายใต้การกระทำของสนามไฟฟ้าในทิศทางตรงกันข้ามกับการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน (ประจุลบ) เนื่องจากการย้ายประจุลบไปทางซ้ายก็เหมือนกับการใส่ประจุบวกเพิ่มไปทางขวา ซึ่งสามารถจินตนาการได้ว่าการไหลของกระแสไฟฟ้าเกิดจากการเคลื่อนที่ของโวลต์ที่มีประจุบวกไปทางด้านขวา กลไกการนำไฟฟ้าแบบนี้เรียกว่าการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (intrinsic semiconductor)

มีสารกึ่งตัวนำบางชนิดที่เมื่อถูกแสงแล้วจะทำให้ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าลดลงทำให้กระแสไหลได้ง่ายขึ้น (Kruangam, 1992) เรียกปรากฏการณ์นี้ว่าสภาพนำไฟฟ้าพลังงานแสง (photoconductivity) เมื่อแสงตกกระทบสารกึ่งตัวนำ อิเล็กตรอนในพันธะโควาเลนต์ของอะตอมจะถูกขับออกมาและเหลือโฮล อิเล็กตรอนที่มีประจุลบจะวิ่งไปหาขั้วบวก ในขณะที่โฮลจะเคลื่อนไปหาขั้วลบทำให้เกิดการไหลของกระแสขึ้น และการที่กระแสไหลได้ง่ายเช่นนี้จึงทำให้ค่าความต้านทานของสารกึ่งตัวนำลดลง ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ทำหน้าที่แปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า สิ่งที่สำคัญที่สุดสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์คือประสิทธิภาพ (efficiency) มิใช่ขนาดของเซลล์แสงอาทิตย์ (Kruangam, 1992) นับวันประสิทธิภาพจะสูงขึ้นเรื่อย ๆ เป็นผลมาจากการเข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันในสภาพที่เซลล์จ่ายพลังงานไฟฟ้าได้ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวทำให้เกิดสมการของเซลล์แสงอาทิตย์ (Panyakeow, 2014) จุดประสงค์ของบทความนี้จะกล่าวถึงวิธีการง่ายในการหาประสิทธิภาพและสมการของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยว (monocrystalline silicon solar cell) โดยจะวิเคราะห์ทฤษฎีสำคัญในช่วงการเริ่มต้นการค้นพบเซลล์แสงอาทิตย์

ทฤษฎี

หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยว อาศัยการดูดกลืนพลังงานโฟตอน (photon) ของแสงอาทิตย์โดยสารกึ่งตัวนำ กระบวนการดูดกลืนพลังงานโฟตอนของแสงแบบหนึ่งที่เกิดขึ้นก็คือ การกระตุ้นอิเล็กตรอนจากแถบเวเลนซ์ไปยังแถบการนำไฟฟ้า พร้อมกับมีโฮลเหลือทิ้งไว้ในแถบเวเลนซ์ โดยอนุภาคคู่อิเล็กตรอนและโฮล ที่เกิดขึ้นนี้จะทำหน้าที่เป็นพาหะประจุไฟฟ้า (charged carrier) สำหรับนำกระแสไฟฟ้าต่อไป ถึงขั้นตอนนี้เราอาจถือได้ว่าการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าแล้ว ขั้นตอนที่ต่อไปก็คือ การแยกอิเล็กตรอนและโฮลออกจากกันก่อนที่อนุภาคทั้งคู่จะรวมกัน (recombination) เข้าสู่ภาวะสมดุล การแยกอนุภาคทั้งคู่สามารถทำได้โดยการสร้างรอยต่อพีเอ็น สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ที่ทำการโด๊ป (doping) ด้วยอะตอมของธาตุที่มีเวเลนซ์อิเล็กตรอน 3 ตัว เช่น โบรอน (boron) และเรียกโบรอนว่าเป็นสารเจือปน (impurity) หรืออะตอมตัวรับอิเล็กตรอน (acceptor atom) ซึ่งแต่ละอะตอมโบรอนขาดอิเล็กตรอน 1 ตัวที่จะทำให้เกิดพันธะกับซิลิคอน ลักษณะแบบนี้เรียกว่าขาดอิเล็กตรอนหนึ่งตัวเปรียบเหมือนมีช่องว่างเกิดขึ้นในพันธะ ทำให้เกิดโฮลส่วนเกิน (extra holes) ในแถบเวเลนซ์ เนื่องจากมีโฮลส่วนเกินจึงเรียกสารกึ่งตัวนำแบบพีไทป์ (p-type) ในขณะที่สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ที่ทำการโด๊ปด้วยอะตอมของธาตุที่มีเวเลนซ์อิเล็กตรอน 5 ตัว เช่น อาร์เซนิก (arsenic) และเรียกอาร์เซนิกว่าสารเจือปนหรืออะตอมตัวให้อิเล็กตรอน (donor atom) สิ่งที่เกิดขึ้นคืออิเล็กตรอน 4 ตัวจะถูกใช้ในพันธะโควาเลนต์ของแลตทิซผลึก ในขณะที่อีกหนึ่งอิเล็กตรอนที่เหลือจะเป็นอิสระ กล่าวคือสารเจือปนให้อิเล็กตรอนมากกว่าที่แถบเวเลนซ์จะสามารถรับได้ และอิเล็กตรอนหนึ่งตัวที่เหลือก็ต้องขึ้นไปแถบการนำกลายเป็นอิเล็กตรอนนำไฟฟ้าซึ่งเป็นไปตามหลักการกีดกันของเพาลี (Pauli exclusion principle) และเรียกสารนี้ว่า สารกึ่งตัวนำแบบเอ็นไทป์ (n-type) เพราะมีอิเล็กตรอนการนำส่วนเกิน (extra conduction electrons)

ในการใช้งานทางเทคโนโลยีเพื่อสร้างรอยต่อพีเอ็น สารกึ่งตัวนำทั้งสองแบบจะถูกนำให้ติดกันเป็นผลึก ยกตัวอย่างเช่น ด้านซ้ายของผลึก (p-type) พิจารณาแต่ละอะตอมตัวรับจะต้องการรับหนึ่งอิเล็กตรอนจากพันธะข้างเคียงในแลตทิซผลึก สิ่งที่เกิดขึ้นคืออะตอมตัวรับจะกลายเป็นไอออนลบ (negative ion) ซึ่งดูเหมือนอยู่กับที่ และได้โฮล (พาหะข้างมาก) ซึ่งดูเหมือนเคลื่อนที่ไปทั่ว ในขณะที่ด้านขวาของผลึก (n-type) พิจารณาแต่ละอะตอมตัวให้จะกลายเป็นไอออนบวก (positive ion) เปรียบเหมือนอยู่กับที่และได้อิเล็กตรอน (พาหะข้างมาก) เคลื่อนที่ไปทั่ว แต่การจัดเรียงไม่สามารถดูเป็นเช่นนั้นได้นาน เพราะมีโฮลบางตัวจะข้ามรอยต่อเข้าไปที่ด้านขวาของผลึก ซึ่งโฮลจะพบกับอิเล็กตรอนส่วนเกินเพื่อรวมตัวกัน ในทำนองเดียวกันมีบางอิเล็กตรอนจะข้ามรอยต่อเข้าไปที่ทางด้านซ้ายของผลึกซึ่งจะถูกจับโดยโฮล จึงเหลือแต่ไอออนบวกและไอออนลบ (เปรียบเหมือนอยู่กับที่) ขึ้นใกล้กับรอยต่อพีเอ็น วิธีการข้ามรอยต่อนี้เป็นการแพร่กระจาย (diffusion) ของโฮลและอิเล็กตรอนในทิศทางตรงกันข้าม สรุปผลที่เกิดขึ้นจากการสร้างรอยต่อพีเอ็น เมื่อกระบวนการแพร่ของประจุที่เคลื่อนที่ได้ถึงจุดสมดุล การรวมตัวกันของโฮลและอิเล็กตรอนจะทำให้เกิดบริเวณแคบ ๆ ที่รอยต่อของด้านซ้ายและด้านขวาของผลึก ซึ่งเรียกว่าเขตปลอดพาหะ (depletion layer) เพราะผลของการรวมตัวกัน ทำให้เขตปลอดพาหะไม่มีทั้งโฮลและอิเล็กตรอน แต่จะทั้งไอออนบวกและไอออนลบบางส่วนไว้ที่บริเวณรอยต่อ ในขณะที่เกิดเขตปลอดพาหะนี้ ก็เกิดความต่างศักย์ระหว่างรอยต่อเนื่องจากไอออนบวกบางส่วนทางด้านขวาและไอออนลบบางส่วนทางด้านซ้าย ตามปกติความต่างศักย์ระหว่างรอยต่อจะเรียกว่าสนามไฟฟ้าภายในหรือสนามสัมผัส (contact field, E) สนามสัมผัสนี้จะมีค่ามากพอที่จะทำให้โฮลและอิเล็กตรอนพาหะข้างมากไม่สามารถเคลื่อนข้ามรอยต่อพีเอ็น เปรียบเหมือนมีเนินเขา (hill) เป็นอุปสรรคขวางกั้นโฮลและอิเล็กตรอนไว้ ดังแสดงในภาพที่ 2



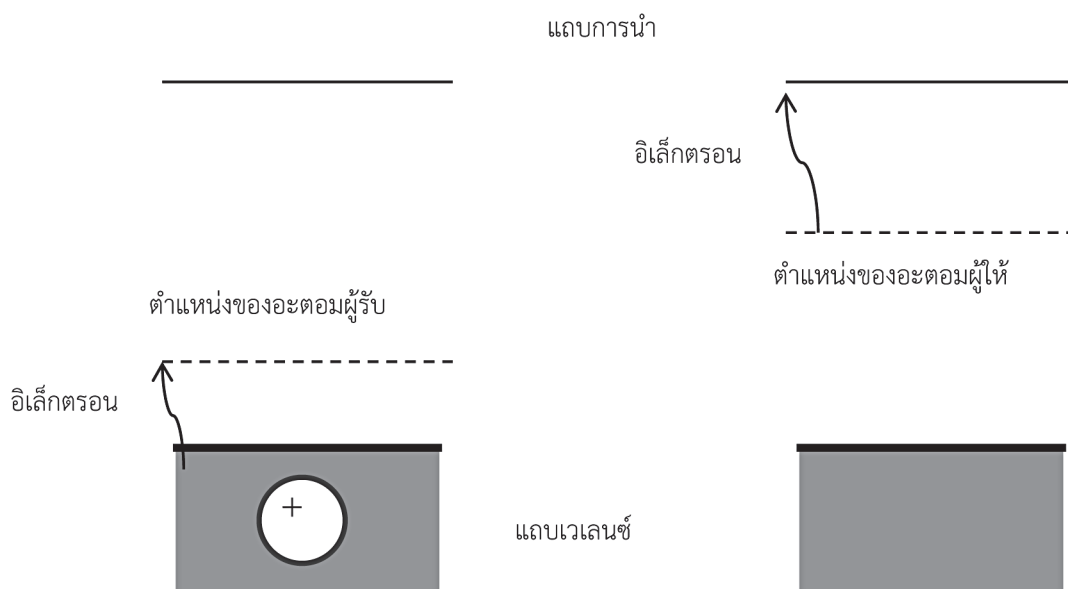
ภาพที่ 2 ระดับพลังงานของโฮลที่บริเวณรอยต่อด้านเอ็นในเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยว
(ดัดแปลงจาก Kittle, 2005)

ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยวจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับส่วนประกอบสองประการด้วยกัน ประการแรกได้แก่ คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของสารกึ่งตัวนำที่นำมาประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งจะต้องสามารถดูดกลืนแสงอาทิตย์ได้ดีเป็นประการแรก กล่าวคือจะต้องมีลักษณะโครงสร้างและช่องว่างแถบพลังงานที่เหมาะสม โดยพบว่าสารกึ่งตัวนำที่เหมาะสมสำหรับการประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์จะต้องมีช่องว่างแถบพลังงานระหว่าง 1 ถึง 2 eV (Kittle, 2005; Kruangam, 1992) นอกจากนี้พาหะประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะต้องอยู่ได้นานพอและเคลื่อนที่ได้ดี ส่วนประกอบประการที่สองคือ ลักษณะการออกแบบอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำจะต้องสามารถแยกพาหะประจุไฟฟ้าทั้งคู่ออกจากกันได้ดี ความต้านทานภายในต่ำ และสามารถส่งพลังงานไฟฟ้าให้แก่อุปกรณ์ที่มีความต้านทานของวงจรภายนอกได้ทันที

สำหรับวิธีการง่ายในการหาประสิทธิภาพและสมการเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยว ผู้เขียนเริ่มต้นด้วยการศึกษาการเคลื่อนที่ประจุเมื่อยังไม่ป้อนแรงดันไฟฟ้าจากภายนอกให้ที่ต่อรอยต่อพีเอ็น ซึ่งพบว่าความหนาแน่นของจำนวนประจุหาได้จากการประยุกต์ใช้ฟังก์ชันการกระจายเฟอร์มี-ดิแรก (Fermi-Dirac distribution function) ในกลศาสตร์เชิงสถิติ (statistical mechanics) ของสารกึ่งตัวนำมีค่าเป็นสัดส่วนกับแฟกเตอร์ (factor) ดังสมการ (1) (Kittle, 2005)

$$\exp\left(-\frac{eG}{kT}\right) \quad (1)$$

โดยที่ G คือขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน T เป็นอุณหภูมิองศาสัมบูรณ์ k คือค่าคงที่ของโบลต์ซมันน์ (Boltzmann's constant) และ e คือประจุไฟฟ้า (electric charge) จากสมการ (1) บอกว่าความหนาแน่นของจำนวนประจุขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ (T) ขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน (G) เท่านั้น และไม่ขึ้นกับระดับพลังงานของสารเจือปน (energy levels of dopants) ดังนั้นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำจึงมีขีดจำกัด ยกตัวอย่างเช่น อุปกรณ์ซิลิคอนมีขีดจำกัดของอุณหภูมิการทำงานสูงกว่าอุปกรณ์เจอร์เมเนียมเนื่องจากซิลิคอนมีค่าช่องว่างแถบพลังงานมากกว่าเจอร์เมเนียมสำหรับการทำงานในฐานะเซลล์แสงอาทิตย์ ถ้าต้องเพิ่มความหนาแน่นพาหะ (carrier density) ของสารเจือปนจำนวนเล็กน้อยในอันดับขนาด 10^{-3} เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (weight percent ,wt%) ซึ่งถูกนำไปในซิลิคอนด้วยวิธีการแพร่ซึมที่อุณหภูมิประมาณ 1000 องศาเซลเซียส สารเจือปนที่ให้อิเล็กตรอนได้ง่าย ทำให้การนำไฟฟ้าเป็นแบบเอ็นไทป์ (n-type) โดยที่ n มาจากคำว่า negative ในกรณีที่ใช้สารเจือปนประเภทขอบริบิอิเล็กตรอนจะให้การนำไฟฟ้าเป็นแบบพีไทป์ (p-type) โดยที่ p มาจากคำว่า positive ตัวอย่างเช่น ซิลิคอนเกิดพันธะได้ 4 พันธะ เมื่อถูกเติมด้วยฟอสฟอรัส (phosphorus) ทำให้เกิดสารกึ่งตัวนำแบบเอ็น แต่ถ้าวถูกเติมด้วยโบรอน (boron) หรือสารหนู (arsenic) ทำให้เกิดสารกึ่งตัวนำแบบพี ระดับพลังงานของสารเจือปนเหล่านี้แสดงไว้ในภาพที่



ภาพที่ 3 ระดับพลังงานของสารกึ่งตัวนำ ก. สารเจือปนแบบพี ข. สารเจือปนแบบเอ็น
(ดัดแปลงจาก kruangam, 1992)

เมื่อพิจารณาถึงตำแหน่งของระดับพลังงานเหล่านี้ สารกึ่งตัวนำแบบเอ็นจะส่งประจุฟรีในแถบการนำไฟฟ้า ในขณะที่สารกึ่งตัวนำแบบพีจะรับประจุจากแถบเวเลนซ์ เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าจากภายนอกให้กับรอยต่อพีเอ็น โดยให้ขั้วไฟฟ้าบวกจากแบตเตอรี่ (battery) มาต่อที่สารกึ่งตัวนำแบบพี และให้ขั้วไฟฟ้าลบจากแบตเตอรี่มาต่อที่สารกึ่งตัวนำแบบเอ็น สิ่งที่เกิดขึ้นคือโฮลและอิเล็กตรอนจะได้รับความเร็วเฉลี่ยจากสนามไฟฟ้าภายในเพียงเล็กน้อย (สนามไฟฟ้าภายนอกได้หักล้างกับสนามไฟฟ้าภายใน) เมื่อเทียบกับความเร็วของการเคลื่อนที่แบบสุ่ม อิเล็กตรอนซึ่งเป็นพาหะข้างมาก (majority carrier) ที่อยู่ในสารกึ่งตัวนำแบบเอ็น จะถูกแรงดันบวกที่ให้แก่สารกึ่งตัวนำแบบพีดูดเข้าไป ในขณะเดียวกัน โฮลซึ่งเป็นพาหะข้างมากที่อยู่ในสารกึ่งตัวนำแบบพี จะถูกแรงดันลบทางฝั่งสารกึ่งตัวนำแบบเอ็นดูดเข้าไปเช่นกัน เนื่องจากโฮลมีประจุบวกและอิเล็กตรอนมีประจุลบ แต่ประจุทั้งสองเคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงกันข้ามแต่ให้กระแสไฟฟ้าไปในทิศทางเดียวกัน มีผลทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าสุทธิ (I_0) ไหลผ่านรอยต่อพีเอ็นไปข้างหน้า (forward-bias current) และผ่านโหลด ดังจะแสดงไว้ในสมการ (4) เนื่องจากแนวคิดสนามไฟฟ้าภายในบริเวณรอยต่อพีเอ็นเปรียบเหมือนเนินเขา โดยด้านสารกึ่งตัวนำแบบเอ็นเปรียบเหมือนเนินเขาค้นยกและด้านสารกึ่งตัวนำแบบพีเปรียบเหมือนเนินเขาค้นยกลบ ดังแสดงในภาพที่ 2

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิคอนได้จากการนำสารซิลิคอนมาหลอมละลายในเตาอุณหภูมิสูงประมาณ 1500 องศาเซลเซียส พร้อมกับใส่สารเจือปนฟอสฟอรัส (กระบวนการแพร่ซึมสารเจือปน) เพื่อทำให้เกิดผลึกแบบเอ็นไทป์ แล้วทำให้เกิดการเย็นตัวจับตัวกันเป็นผลึกด้วยตัวล่อเมล็ดผลึก (crystal seed) ที่นำมาแตะที่ผิวของซิลิคอนเหลว ซึ่งจะตกผลึกมีขนาดหน้าตัดใหญ่แล้วค่อย ๆ ดึงแท่งผลึกขึ้นช้า ๆ จากเตาหลอม ตามอัตราการจับตัวของผลึกจะได้ผลึกยาวเป็นรูปทรงกระบอก จากนั้นนำแท่งผลึกมาหั่นเป็นแผ่นบาง ๆ ด้วยลวดตัดเพชร ซึ่งจะได้แผ่นผลึกแบบเอ็นไทป์แล้วนำมาเตรียมผิวโดยการขัดให้เรียบเพื่อลดจุดบกพร่องเนื่องจากการตัดก่อนนำไปโด๊ป (doping) โดยให้ความร้อนที่ด้านหนึ่งของแผ่นผลึกเพื่อให้จุดกลืนสารเจือปนโบรอนที่ผิวหน้าทำให้เกิดสารแบบ พีไอป์เพื่อที่จะให้เกิดเป็นรอยต่อพีเอ็น จากนั้นนำไปทำขั้วไฟฟ้าส่วนด้านบนพีไอป์ที่รับแสงอาทิตย์ใช้ขั้วไฟฟ้าแบบใสเป็นขั้วบวก [โดยทั่วไปเป็นขั้วไฟฟ้า ITO (indium tin oxide)] (Georgieva & Ristov, 2002) ส่วนด้านล่างผลึกแบบเอ็นไทป์เป็นขั้วไฟฟ้าแบบโลหะเป็นขั้วลบ เสร็จจากขั้นตอนการทำขั้วไฟฟ้าพบว่าสารกึ่งตัวนำแบบเอ็นไทป์มีการใช้หน้าสัมผัสกับด้านซิลิคอนพีไอป์ยิ่งไปกว่านั้นแผ่นซิลิคอนพีไอป์จะบางมากในระดับไมครอน เพื่อไม่ให้แสงสะท้อนกลับผิวรอยต่อพีเอ็นจะคลุมด้วยชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) โดยแสงอาทิตย์ส่องผ่านชั้น SiO_2 และชั้นซิลิคอนพีไอป์เข้าไปที่รอยต่อพีเอ็นตามลำดับ

ต่อไปจะพิจารณาการเคลื่อนที่ของโฮลผ่านรอยต่อพีเอ็น (ในกรณีที่ไม่มีแสงอาทิตย์ส่องและไม่มีสนามไฟฟ้าภายนอกอัตราคร่อมรอยต่อ) จากทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้าของแมกซ์เวลล์ (Maxwell's electromagnetic theory) อินทิกรัล (integral) ของสนามไฟฟ้าด้วยเครื่องหมายลบภายในบริเวณรอยต่อพีเอ็น จะให้ค่าความต่างศักย์ระหว่างบริเวณสารแบบเอ็นไทป์และสารแบบพีไอป์ (potential difference) เป็น U (Dejanakarin, 2011) โฮลจะแพร่จากสารกึ่งตัวนำแบบพีไปยังด้านขวาของรอยต่อพีเอ็นโดยวิธีเปรียบเทียบเหมือนกับการเดินขึ้นเนินเขา (ศักย์บวกที่อยู่ฝั่งสารกึ่งตัวนำแบบเอ็นเนื่องจากไอออนบวก) ในทำนองเดียวกันโฮลในด้านสารกึ่งตัวนำแบบเอ็นซึ่งจะแพร่ไปยังด้านซ้ายของรอยต่อพีเอ็นโดยวิธีเปรียบเทียบเหมือนกับการไหลลงจากยอดเนินเขาของศักย์บวกที่อยู่ฝั่งสารกึ่งตัวนำแบบเอ็น ที่สภาวะสมดุลความร้อน กระแสไฟฟ้าของโฮล จากสารกึ่งตัวนำพีไปยังสารกึ่งตัวนำเอ็นจะมีค่าเท่ากับกระแสไฟฟ้าของโฮลจากสารกึ่งตัวนำเอ็นไปยังสารกึ่งตัวนำพีแน่นอนเพื่อที่จะเดินข้ามเนินเขาไปได้จะต้องมีพลังงานที่เพียงพอ จำนวนโฮลที่สามารถเดินขึ้นไปถึงยอดเนินเขา โดยสามารถหาได้จากวิธีการทางกลศาสตร์เชิงสถิติ (statistical mechanics) อุปสรรคจากศักย์ต่อต้าน (เนินเขา) ในการข้ามรอยต่อจะช่วยลดค่าความน่าจะเป็นของการส่งผ่านโฮลในวงจรโดยอาศัยปัจจัย $\exp(-eU/kT)$ โดยที่ U คือ ค่าความต่างศักย์เนื่องจากสนามภายในบริเวณรอยต่อพีเอ็นในสภาวะสมดุลความร้อน เนื่องจากกระแสของโฮล (พาหะประจุข้างน้อยของสารกึ่งตัวนำแบบเอ็น) เคลื่อนที่จากด้านเอ็นไปด้านพี และกระแสของโฮล (พาหะประจุข้างมากของสารกึ่งตัวนำแบบพี) เคลื่อนที่จากด้านพีไปด้านเอ็นมีค่าเท่ากัน ดังนั้นกระแสผลลัพธ์ $I=0$ เนื่องจากกระแสทั้งสองมีทิศทางตรงกันข้ามแต่ขนาดเท่ากัน เพื่อวิธีการง่ายในบทความนี้ จึงสนใจเฉพาะพฤติกรรมของโฮล (พาหะข้างน้อยในสารกึ่งตัวนำแบบเอ็นไทป์) ที่เคลื่อนที่ในด้านสารกึ่งตัวนำเอ็นจนกระทั่งมีโอกาสมาถึงยอดเนินเขาและพร้อมที่จะไหลลงมาจากเนินเขากลายเป็นกระแส I_0 สาเหตุหลักที่ผู้เขียนไม่สนใจพฤติกรรมของโฮลที่เป็นพาหะข้างมากด้านสารกึ่งตัวนำพีเพราะถ้าเนินเขา (พลังงานศักย์) ของด้านเอ็นมีค่าสูงมาก ๆ จนโฮลฝั่งด้านพีขึ้นเนินเขาไม่ได้ ก็จะไม่มีการไหลลงที่ใด ในขณะโฮลฝั่งด้านเอ็นไม่ว่าเนินเขา (พลังงานศักย์) ของด้านเอ็นจะมีค่าสูงเท่าใดก็ตาม โฮลฝั่งด้านเอ็นก็มีโอกาสที่จะแพร่มาอยู่เนินเขาได้และพร้อมที่จะไหลลงมาจากเนินเขากลายเป็นกระแสไฟฟ้าทันทีที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ ด้วยเหตุและผลจากวิธีคิดนี้ ดังสมการ (2)

$$I_0 \sim NP \text{ (ด้านเอ็น)} = NP \text{ (ด้านพี)} \exp(-eU/kT) \quad (2)$$

โดยที่ I_0 คือกระแสของโฮล (พาหะประจุข้างน้อย) จากด้านเอ็นไปด้านพี (ยังไม่ใส่ค่าความต่างศักย์ V จากภายนอกและยังไม่มีแสงส่อง), N_p (ด้านพี) คือความหนาแน่นสถานะของโฮล (พาหะประจุข้างมาก) ในด้านพี และ N_p (ด้านเอ็น) คือความหนาแน่นสถานะของโฮล (พาหะประจุข้างน้อย) ในด้านเอ็น

ถัดไปพิจารณากรณีใส่ค่าความต่างศักย์ V จากภายนอกอัตราคร่อมบนรอยต่อพีเอ็นเพื่อช่วยลดค่าความต่างศักย์จาก U เป็น $U-V$ ถ้าแทนค่า $U-V$ ลงในสมการ (2) จะได้กระแสของโฮล (พาหะประจุข้างน้อย) ไหลจากด้านเอ็นไปด้านพี มีค่าดังสมการ (3)

$$I' = N_p (\text{ด้านพี}) \exp [-e(U-V) / kT] \quad (3)$$

นำสมการ (3) ลบออกจากสมการ (2) จะได้การไหลของกระแสสุทธิ I_0 (forward-bias current) ผ่านรอยต่อพีเอ็นมีค่าดังสมการ (4)

$$I_0 = I' - I_0 = I_0 [\exp (eV / kT) - 1] \quad (4)$$

สมการ (4) เรียกว่า สมการไดโอด (diode equation) เป็นวิธีการง่ายและเกิดขึ้นมาจากความเข้าใจในวิธีคิดที่ว่า การทำลายความเท่ากันของกระแสจากด้านพีไปด้านเอ็นและจากด้านเอ็นไปด้านพีทำได้โดยใส่แรงดันไฟฟ้าภายนอก (V) คร่อมไปที่รอยต่อพีเอ็นและยังเป็นประโยชน์ในการหาสมการเซลล์แสงอาทิตย์ (solar cell equation)

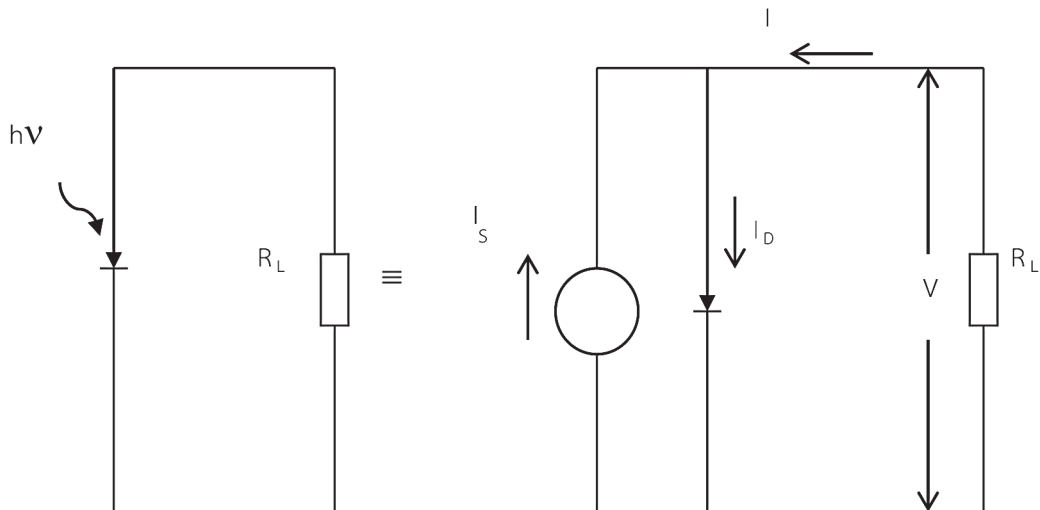
จากสมการ (4) เมื่อ $V > 0$ แล้วการไหลของกระแสสุทธิ (I_0) จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องมาจากการจ่ายแรงดันไปข้างหน้าและเรียกกระแสที่เพิ่มขึ้นตามค่า $V > 0$ ว่ากระแสไปข้างหน้า (forward-bias current) แต่ในกรณีที่ค่าของ $V < 0$ กระแสจะถูกจำกัดไว้ที่ I_0 ซึ่งมีขนาดต่ำกว่ากระแสไปข้างหน้า จากสมการ (2) แสดงให้เห็นว่า I_0 นั้นแปรผันตามอุณหภูมิเป็น $\exp (-eU / kT)$ ในบริเวณรอยต่อกระแสทั้งหมดจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

นอกจากนั้น ยังมีวิธีการง่ายอีกวิธีหนึ่งที่สำคัญมากในการทำลายความเท่ากันของกระแสจากด้านพีไปด้านเอ็นและจากด้านเอ็นไปด้านพีก็คือการส่องแสงอาทิตย์ไปที่ด้านหนึ่งของรอยต่อพีเอ็น (ในบทความนี้พิจารณาเฉพาะกรณีด้านพีรับแสง) ถัดไปพิจารณากรณีพลังงานของโฟตอน (photon) ที่มากกว่าความกว้างของช่องว่างแถบพลังงาน เมื่อเซลล์ดูดกลืนแสงอาทิตย์จะทำให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนให้หลุดออกจากพันธะในสารกึ่งตัวนำ ซึ่งจะเป็นการไปเพิ่มเติมคู่ของอิเล็กตรอนและโฮลที่เกิดจากการกระตุ้นโดยความร้อนที่อุณหภูมิห้องพิจารณาอิเล็กตรอนที่เพิ่มเติมเข้ามาทางด้านเอ็นของรอยต่อและโฮลที่เพิ่มเติมเข้ามาทางด้านพีของรอยต่อนั้นพบว่าคู่ของอิเล็กตรอนและโฮลที่เพิ่มเติมเข้ามานั้นสังเกตเห็นได้ยากเนื่องจากจำนวนของพวกมันเป็นเพียงเศษเสี้ยวเล็ก ๆ ของจำนวนพาหะประจุไฟฟ้าข้างมากที่มีอยู่ก่อนแล้ว แต่อย่างไรก็ตามโฮลที่เพิ่มเติมเข้ามาทางด้านเอ็นและอิเล็กตรอนที่เพิ่มเติมเข้ามาทางด้านพีสามารถทำให้จำนวนประจุพาหะข้างน้อยเพิ่มขึ้นได้อย่างมากมายอย่างมีนัยสำคัญและแพร่กระจายไปยังรอยต่อแล้ว ไหลลงจากเนินเขาฝั่งด้านเอ็นด้วยความเร็วเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้นทำให้กระแสโฮลจากด้านเอ็นไปด้านพีมีค่าเพิ่มมากขึ้นทันที เรียกกระบวนการนี้ว่ากระแสไฟฟ้าไหลในวงจรและนำพลังงานไฟฟ้าไปใช้เปรียบเหมือนกับแบตเตอรี่ สรุปได้ว่ากระแสโฮลจากด้านเอ็นเคลื่อนที่ไปทางด้านพีและบริเวณที่กระแสโฮลกำลังเคลื่อนที่ออกไปจากด้านพีที่ต่อกับสายไฟ เราให้บริเวณนั้นเป็นขั้วไฟฟ้าบวก ด้วยเหตุนี้จึงสามารถวัดค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงระหว่างขั้วทั้งสองได้ ดังนั้นเมื่อต่อเซลล์แสงอาทิตย์เข้ากับเครื่องใช้ไฟฟ้าเช่น หลอดไฟ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงก็จะมีกระแสไฟฟ้าสุทธิ (I) ไหลในวงจรต่าง ๆ ได้ ดังจะแสดงไว้ในสมการ (8)

เมื่อพิจารณาถึงความเป็นไปได้ในการหาสมการเซลล์แสงอาทิตย์และกระแสไฟฟ้าสุทธิ (I) พบว่ากระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจะขึ้นอยู่กับค่าความสว่าง (Luminance, L) ค่าความสว่างมีหน่วย SI เป็น “วัตต์ต่อตารางเมตร W/m^2 ” จากนั้นความเข้มและความสว่างของแสงเขียนได้ดังสมการ (5)

$$ICC = \propto(T) LS \quad (5)$$

โดยที่ S คือพื้นที่ผิวที่สัมผัสกับแสง I_{cc} คือปริมาณแสงที่ตกตั้งฉากบนพื้นที่สัมผัสกับแสง และ $\propto(T)$ เป็นค่าสัมประสิทธิ์ขึ้นอยู่กับรอยต่อ (ชนิดวัสดุ) และพลังงานของโฟตอน (Kruangam, 1992, Schneider et al., 2020) ถ้าปริมาณแสงที่ตกตั้งฉากบนพื้นที่สัมผัสแสง (I_{cc}) มีค่ามากขึ้นแล้วจำนวนพาหะประจุไฟฟ้าที่ถูกสร้างขึ้นจากการกระตุ้นโดยแสงอาทิตย์ (I_s) จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยกำหนดเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยวแทนได้ด้วยแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสคงที่ (I_s) ซึ่งเป็นกระแสที่เกิดจากแสง โดยต่อขนานอยู่กับรอยต่อพีเอ็น (ไดโอด) ดังแสดงในภาพที่ 4



ภาพที่ 4 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ (ดัดแปลงจาก Kruangam, 1992)

วิธีการคำนวณความเป็นไปได้ในการเกิดสมการเซลล์แสงอาทิตย์โดยพิจารณาเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยว เมื่อมีแสงส่องเข้าไปที่เซลล์แสงอาทิตย์ทำให้อิเล็กตรอนและโฮลอิสระจะเกิดขึ้นในบริเวณเขตปลอดพาหะซึ่งจะสร้างแรงดันไฟฟ้าคร่อมรอยต่อพีเอ็นเพื่อทำให้เกิดกระแสสูงสุด I ที่เซลล์แสงอาทิตย์สามารถส่งออกให้อุปกรณ์ความต้านทาน R_L (โหลด) ในวงจรได้ทันที ดังนั้น การดัดแปลงสมการ (4) เกิดขึ้นมาจากแนวคิดของผู้เขียนสองประการดังนี้ แนวคิดดัดแปลงประการแรก (ภาพที่ 4) คือ นำสมการ (4) ลบด้วยแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสคงที่ (I_s) โดยที่ I_s แปรผันตามค่าของ I_{cc} ผลที่ได้ดังสมการ (6)

$$I = I_0 [\exp(eV / kT) - 1] - I_s \quad (6)$$

สมการ (6) เป็นพื้นฐานสำคัญของสมการเซลล์แสงอาทิตย์โดยบ่งชี้ว่าขณะที่แรงดันไฟฟ้ามีค่าเป็นบวกเสมอพบว่ากระแสจะเป็นลบเสมอ ปรากฏการณ์นี้สามารถอธิบายได้ง่ายเพราะว่าไดโอดเป็นอุปกรณ์ชนิดไม่ใช่แหล่งกำเนิดพลังงาน ดังนั้นสมการ (6) จะทำนายได้ว่าเซลล์แสงอาทิตย์ไม่สามารถทำให้เครื่องใช้ไฟฟ้าทำงานได้ ด้วยเหตุนี้จึงเกิด

แนวคิดดัดแปลงประการสอง วิธีการง่ายคือทิศทางของกระแสควรกลับทิศกันจากแนวคิดดัดแปลงประการแรก สิ่งที่เกิดขึ้นคือได้รูปแบบสมการเซลล์แสงอาทิตย์ดังสมการ (7)

$$I = I_s - I_0 [\exp (eV / kT) - 1] \quad (7)$$

สมการ (7) พบว่าถ้าแรงดันไฟฟ้าเป็นบวกเสมอแล้วกระแสไฟฟ้าจะมีค่าเป็นบวกเสมอ ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ชนิดแหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้า ดังนั้นกระแสไฟฟ้าสุทธิ (I) ที่เซลล์แสงอาทิตย์สามารถส่งออกได้ทันทีภายใต้การส่องสว่าง (L) จะเป็นฟังก์ชันของแรงดันไฟฟ้า V ดังสมการ (8)

$$I = I_s - I_0 = I_s - I_0 [\exp (eV / kT) - 1] \quad (8)$$

และเรียกสมการ (8) ว่า สมการเซลล์แสงอาทิตย์ (solar cell equation) โดยที่ I_s แปรผันตามสมการ (5) และที่สำคัญสมการ (5) ขึ้นอยู่กับชนิดวัสดุและพลังงานโฟตอน สาเหตุที่ผู้เขียนเรียกสมการ (8) ว่าสมการเซลล์แสงอาทิตย์เพราะสมการ (8) สามารถทำนายได้ว่าเมื่อมีแรงดันไฟฟ้า (ค่าบวก) ระหว่างขั้วทั้งสองของเซลล์แสงอาทิตย์แล้วจะเกิดกระแสไฟฟ้า (ค่าบวก) ทันทีเมื่อเราต่อเซลล์แสงอาทิตย์เข้ากับเครื่องใช้ไฟฟ้า เป็นผลทำให้เครื่องใช้ไฟฟ้าทำงานได้ด้วยเหตุผลดังกล่าวแสดงว่าสมการ (8) สามารถทำนายการทำงานในอนาคตของเซลล์แสงอาทิตย์ได้

สิ่งที่ต้องพิจารณาถัดไปคือประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ ให้สังเกตว่าถ้าพลังงานของโฟตอน (E (โฟตอน) $= h\nu$) ที่มีค่าน้อยกว่าพลังงานของช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ (G) แล้วจะไม่สามารถสร้างคู่อิเล็กตรอน-โฮล แต่ถ้าพลังงานของโฟตอนมีค่ามากกว่าพลังงานของช่องว่างแถบพลังงานแล้วจะผลิตคู่อิเล็กตรอนและโฮลที่มีพลังงานเท่ากันได้ ดังนั้นประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์จึงขึ้นอยู่กับช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่ตรงกันกับสเปกตรัมพลังงานแสงอาทิตย์ (Panyakeow, 2014; Schneider et al., 2020) สำหรับการคำนวณประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยวสามารถพิจารณาจากการดูดกลืนพลังงานจากสเปกตรัมของแสงอาทิตย์ (solar spectrum) ได้สูงสุดที่ความยาวคลื่น $\lambda_{\max} = 0.5 \mu\text{m}$ (Panyakeow, 2014) ซึ่งเป็นค่าความยาวคลื่นของแสงสีเขียวในช่วงแสงที่ตามองเห็น คำนวณหาค่าพลังงานโฟตอนของแสงสีเขียวได้ $E = h\nu = hc / \lambda_{\max} = 2.5 \text{ eV}$ โดยที่ h คือค่าคงตัวของพลังค์ (Planck's constant) มีค่า $4.136 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$ ν คือความถี่ (frequency) c คืออัตราเร็วของแสง (speed of light) มีค่า $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ และ $\lambda_{\max}$ คือความยาวคลื่น (wavelength) มีค่า $0.5 \mu\text{m}$ เซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยวเมื่อเปิดวงจร (open circuit) ให้ค่าแรงดันไฟฟ้า (วงจรเปิด) ประมาณ $\sim 0.5 \text{ V}$ (Kittle, 2005) กำหนดให้ประสิทธิภาพเชิงแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ (ES) คือ แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด (พลังงาน) ที่พร้อมจัดให้กับโหลดต่อหนึ่งหน่วยของพลังงาน (โฟตอน, $h\nu$) ที่ให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ ได้ผลการคำนวณค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยวมีค่าเท่ากับ $(0.5 / 2.5) \times 100\% = 20\%$ ซึ่งพบว่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าต่ำกว่า 100% เสมอ ประการแรก เพราะว่าโฟตอนใด ๆ ที่ถูกดูดกลืนในสารกึ่งตัวนำอาจจะไม่ให้คู่อิเล็กตรอน-โฮล อีกเหตุผลหนึ่งอิเล็กตรอนและโฮลที่เกิดขึ้นบางตัวจะรวมตัวกันใหม่ก่อนถึงบริเวณรอยต่อและพลังงานที่เกิดจากอิเล็กตรอนและโฮลบางตัวรวมตัวกัน (recombination) จะถูกเปลี่ยนไปเป็นความร้อนในสารกึ่งตัวนำ ดังนั้นไม่ว่าในกรณีใดก็ตามของเซลล์แสงอาทิตย์จึงมีขีดจำกัดไม่เกิน 20% แต่ปัญหามีอยู่ว่านักทฤษฎีและนักทดลองจะสามารถตระหนักถึงตัวแปรที่นำไปสู่การพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยวให้มีประสิทธิภาพสูงกว่าเดิมได้อย่างไร

สรุปและวิจารณ์

ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์มีวิธีคิดมาจากพลังงานเป็นรูปหนึ่งของการเคลื่อนที่ ทำให้ทราบค่าพลังงาน (แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด, หน่วยเป็นโวลต์) ที่ส่งออกของเซลล์แสงอาทิตย์และค่าหนึ่งหน่วยของพลังงาน (โฟตอน, $h\nu$) ที่ถูกดูดกลืนได้สูงที่สุด (แอสซีเชียว) โดยเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยว เมื่อนำทั้งสองค่ามาหาอัตราส่วนกันพบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยวมีประสิทธิภาพเท่ากับ 20%

ประสิทธิภาพที่น้อยกว่า 100% อย่างชัดเจนในระบบนี้ จึงต้องมีการตรวจสอบหาเหตุผลที่นอกเหนือจากการสะท้อนของแสงจากพื้นผิวและการมีโฟตอนจากแสงอาทิตย์บางส่วนเท่านั้นที่ถูกดูดกลืนแล้วเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้า สมการเซลล์แสงอาทิตย์จะให้ข้อมูลสำหรับประสิทธิภาพในระบบนี้ สมการเซลล์แสงอาทิตย์มีวิธีคิดมาจากกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจะขึ้นอยู่กับความสว่าง ด้วยเหตุนี้ จำนวนพาหะประจุนำไฟฟ้าที่ถูกสร้างขึ้นจากการกระตุ้นโดยแสงอาทิตย์ (I_s) จะขึ้นอยู่กับปริมาณแสงที่ตกตั้งฉากบนพื้นที่สัมผัสแสง (I_{cc}) ในขณะที่จำนวนพาหะประจุ นำไฟฟ้าที่ถูกสร้างขึ้นโดยแสง (I_s) จะขึ้นอยู่กับช่องว่างแถบพลังงานของวัสดุที่ใช้ทำเซลล์แสงอาทิตย์และค่าพลังงานของโฟตอนที่ถูกดูดกลืนได้สูงที่สุดโดยเซลล์แสงอาทิตย์ การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยวขึ้นอยู่กับการจับโฮลที่กำลังเคลื่อนที่จากด้านเอ็นบริเวณรอยต่อ ด้วยเหตุนี้โฮลที่มีประโยชน์เพียงชนิดเดียวก็คือโฮลที่มีอิสระมากพอที่จะผ่านรอยต่อออกไปก่อนที่จะถูกจับโดยอิเล็กตรอน กล่าวอีกนัยหนึ่ง แสงจำเป็นมากในการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยแสงที่ให้พลังงานแก่เซลล์แสงอาทิตย์จะสูญเสียไปหากแสงถูกดูดกลืนจากจุดใดจุดหนึ่งที่ไกลออกไปจากบริเวณรอยต่อ เพราะโฮลที่เกิดขึ้นจากแสงจะถูกจับได้ง่ายจึงไม่สามารถผ่านรอยต่อออกไปได้ ดังนั้นในการเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ผู้พัฒนาจึงต้องออกแบบให้พื้นที่ด้านพีให้มีขนาดใหญ่เพื่อให้อรับแสงได้มากที่สุดและมีความหนาประมาณ 10^{-4} นิ้ว (ครอบคลุมบริเวณสเปกตรัมแสงอาทิตย์) เพื่อรับแสงได้อย่างมีประสิทธิภาพ สิ่งที่เกิดจากสมการเซลล์แสงอาทิตย์คือ รู้ว่ากระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจะแปรผันตามค่าความสว่าง ดังนั้นเหตุผลประการแรกที่จะเพิ่มประสิทธิภาพคือการใช้เลนส์เชิงแสงขนาดใหญ่เพื่อบังคับให้แสงอาทิตย์เข้าสู่เซลล์แสงอาทิตย์เป็นการเพิ่มความเข้มของแสงได้เป็นหลายร้อยเท่า ประโยชน์หลักของการใช้เทคนิคความเข้มแสงคือการลดต้นทุนโดยรวมของระบบเนื่องจากเลนส์เชิงแสงมีราคาไม่แพงกว่าการเพิ่มพื้นที่เซลล์แสงอาทิตย์ในพื้นที่เทียบเท่ากัน แต่อย่าลืมว่าสมการเซลล์แสงอาทิตย์ยังขึ้นอยู่กับชนิดวัสดุของรอยต่อและพลังงานของโฟตอนว่าตรงกันอย่างไร ประเด็นการปรับปรุงวัสดุของรอยต่อให้มีเสถียรภาพของการทำงานในภาวะที่มีพาหะนำไฟฟ้าจำนวนมาก ๆ ภาวะที่มีความเข้มของแสงสูง ๆ และภาวะที่มีอุณหภูมิสูง ๆ ก็เพื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดและเพิ่มกระแสไฟฟ้าให้มากขึ้นนั่นเอง ในช่วงระยะเวลา 10 ปีที่ผ่านมาจนถึงปัจจุบันนักวิจัยกำลังพัฒนาเกี่ยวกับสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างแถบพลังงานขนาด 0.5 ถึง 0.7 eV (อินเดียม, In หรือ แกลเลียมฟอสไฟด์, GaP) สำหรับการพัฒนาเครื่องกำเนิดพลังงานไฟฟ้าจากแสง (Schneider et al., 2020; Willich et al., 2020) ดังนั้นหัวข้อการวิจัยวัสดุของรอยต่อในเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยวจึงยังคงเป็นปัญหาเปิดแก่นักวิจัยในปัจจุบัน

เอกสารอ้างอิง

- Dejanakarin, M. (2011). **Fundamentals of Electric Waves**. Bangkok: CHULA Printing. (in Thai)
- Foer, S. J. (2019). **We Are the Weather: Saving the Planet Begins at Breakfast**. The Marsh Agency, UK. and Aragon Inc, USA.

- Georgieva, V. & Ristov, M. (2002). Electrodeposited Cuprous Oxide on Indium Tin Oxide for Solar Applications. **Solar Energy Materials and Solar Cells**. 73(1), 67-73.
- Kittle, C. (2005). **Introduction to Solid State Physics**. John Wiley & Sons Inc, USA.
- Knapp, B. (1996). **Sodium and Potassium, Calcium and Magnesium, Aluminium, Lead and Tin, Silicon - Element series**. Atlantic Europe Publishing Company Limited, UK.
- Kruangam, D. (1992). **Solid State physics**. Bangkok: SE-ED Printing. (in Thai)
- Panyakeow, S. (2014). **It's Tiny, but It's Cool: Nanoelectronics and Nanophotonics**. Bangkok: CHULA Printing. (in Thai)
- Schneider, A., Efrati, A., Alon, S., Sohmer, M., & Etgar, L. (2020). Green Energy of Recoverable Triple-Oxide Mesostructured Perovskite Photovoltaics. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, 117(49), 31010-31017.
- Willich, M. M., Wegener, L., Vornweg, J., Hohgardt, M., Nowak, J., Wolter, M., Jacob, R. C., & Walla, J. P. (2020). A New Ultrafast Energy Funneling Material Harvests Three Times More Diffusive Solar For GaInP Photovoltaic. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, 117(52), 32929-32938.
- =====



ภาคผนวก

รายละเอียดการเตรียมบทความ

วารสารวิจัยราชภัฏพระนคร สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

Preparation Process of PNRU Research Journal Science and Technology

วารสารวิจัยราชภัฏพระนคร สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี เป็นวารสารราย 6 เดือน เผยแพร่ปีละ 2 ฉบับ ฉบับที่ 1 มกราคม - มิถุนายน และ ฉบับที่ 2 กรกฎาคม - ธันวาคม จัดทำขึ้นเพื่อเผยแพร่ผลงานในลักษณะบทความวิจัย (Research Article) บทความวิชาการ (Academic Article) และบทความปริทัศน์ (Review Article) ในสาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแก่นักวิจัย นักวิชาการ และบุคคลทั่วไปที่สนใจ

► ขอบเขตของผลงานที่ตีพิมพ์

วารสารวิจัยราชภัฏพระนคร สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ตีพิมพ์บทความด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ได้แก่ สาขาคณิตศาสตร์ สถิติ ฟิสิกส์ เคมี ชีววิทยา ชีวเคมี จุลชีววิทยา เทคโนโลยีชีวภาพ เกษตรศาสตร์ วิทยาศาสตร์การอาหาร คหกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ทางทะเล วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม วิทยาศาสตร์สุขภาพ การพยาบาล การสาธารณสุข คอมพิวเตอร์ วัสดุศาสตร์ วิศวกรรมศาสตร์และอุตสาหกรรม สถาปัตยกรรม หรือวิทยาศาสตร์ประยุกต์

► การพิจารณาบทความ

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารนี้จะได้รับการประเมินจากผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาที่เกี่ยวข้อง (Peer Review) อย่างน้อย 2 ท่าน โดยผู้แต่งและผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความจะไม่ทราบชื่อซึ่งกันและกัน (Double-blind Peer Review)

► ประเภทของบทความที่รับตีพิมพ์

1. บทความวิจัย (Research Article)

เป็นการนำเสนอผลงานวิจัยอย่างเป็นระบบ กล่าวถึงความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ การดำเนินการวิจัย

2. บทความวิชาการ (Academic Article)

งานเขียน ซึ่งเป็นเรื่องที่น่าสนใจ เป็นความรู้ใหม่ กล่าวถึงความเป็นมาของปัญหา วัตถุประสงค์ แนวทางการแก้ไขปัญหา มีการใช้แนวคิดทฤษฎี ผลงานวิจัยจากแหล่งข้อมูล เช่น หนังสือ วารสารวิชาการ อินเทอร์เน็ตประกอบการวิเคราะห์วิจารณ์ เสนอแนวทางแก้ไข

3. บทความปริทัศน์ (Review Article)

งานวิชาการที่ประเมินสถานะล่าสุดทางวิชาการ (State of the art) เฉพาะทางที่มีการศึกษาค้นคว้า มีการวิเคราะห์และสังเคราะห์องค์ความรู้ทั้งทางกว้าง และทางลึกอย่างทันสมัย โดยให้ข้อพิพากษ์ที่ชี้ให้เห็นแนวโน้ม ที่ควรศึกษาและพัฒนาต่อไป

➤ หลักเกณฑ์ในการส่งบทความ

1. บทความที่ผู้แต่งส่งมาเพื่อตีพิมพ์จะต้องเป็นบทความที่ยังไม่เคยตีพิมพ์เผยแพร่หรืออยู่ระหว่างการเสนอขอตีพิมพ์จากวารสารอื่น ๆ
2. เนื้อหาในบทความต้องไม่คัดลอก ลอกเลียน หรือไม่ตัดทอนจากบทความอื่นโดยเด็ดขาด (การละเมิดลิขสิทธิ์ถือเป็นความรับผิดชอบของผู้แต่งเท่านั้น)
3. ผู้แต่งต้องเขียนบทความตามรูปแบบที่กำหนดไว้ในระเบียบการส่งบทความของ วารสารวิจัยราชภัฏพระนคร สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
4. การพิจารณาบทความเพื่อตีพิมพ์ในวารสารวิจัยราชภัฏพระนคร สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จะพิจารณาเฉพาะบทความที่ได้รับการประเมินให้ตีพิมพ์เผยแพร่จากผู้ทรงคุณวุฒิเท่านั้น
5. กรณีขอเสนอแนะจากผู้ทรงคุณวุฒิ ผู้แต่งต้องปรับแก้ไขตามข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิ และชี้แจงการแก้ไขต้นฉบับดังกล่าว มายังกองบรรณาธิการ

➤ คำแนะนำการเตรียมต้นฉบับ

รับการตีพิมพ์บทความทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ จัดพิมพ์ด้วยโปรแกรม Microsoft Word 2003 ขึ้นไป โดยใช้ตัวหนังสือแบบ TH SarabunPSK ขนาด 14 pt. ทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ กำหนดตั้งค่าหน้ากระดาษ บน 1.5 นิ้ว ซ้าย 1.5 นิ้ว ล่าง 1.0 นิ้ว ขวา 1.0 นิ้ว โดยความยาวของบทความควรเป็นดังนี้

- | | |
|--|--------------------------|
| 1. บทความวิจัย (Research article) | ประมาณ 12 หน้า ต่อบทความ |
| 2. บทความทางวิชาการ (Academic article) | ประมาณ 8 หน้า ต่อบทความ |
| 3. บทความปริทัศน์ (Review article) | ประมาณ 8 หน้า ต่อบทความ |

โดยมีส่วนประกอบดังนี้

บทความวิจัย (Research Article)	บทความวิชาการ (Academic Article)	บทความปริทัศน์ (Review Article)
1. บทนำ (Introduction)	1. บทนำ (Introduction)	1. บทนำ (Introduction)
2. วิธีการ (Methods)	2. เนื้อหา (Context)	2. เนื้อหา (Context)
3. ผลการทดลองและวิจารณ์ (Results and Discussions)	3. สรุป (Conclusions)	3. สรุป (Conclusions)
4. สรุป (Conclusions)	4. เอกสารอ้างอิง (References)	4. เอกสารอ้างอิง (References)
5. เอกสารอ้างอิง (References)		

ชื่อเรื่อง	ควรมีความกระชับและชัดเจน ไม่ยาวจนเกินไป บทความภาษาไทยต้องมีชื่อเรื่องทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ โดยใช้ตัวพิมพ์ใหญ่ทั้งหมด
ชื่อผู้แต่ง	ระบุชื่อเต็มและนามสกุลเต็มของผู้แต่งทุกคนทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษโดยไม่ใส่ยศหรือตำแหน่งสำหรับผู้แต่งหลักต้องใส่ E-mail address ที่ติดต่อได้และลงเครื่องหมายดอกจันกำกับ
บทคัดย่อ	บทคัดย่อภาษาไทยและภาษาอังกฤษควรมีความยาวระหว่าง 200 ถึง 250 คำ
คำสำคัญ	ให้มีคำสำคัญ 3-5 คำ ทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ
รูปภาพ	แยกบันทึกเป็นไฟล์ภาพที่มีนามสกุล TIFF, หรือ JPEG ถ้าเป็นภาพถ่ายกรุณาส่งภาพต้นฉบับเพื่อคุณภาพในการพิมพ์ หมายเลขรูปภาพและกราฟให้เป็นเลขอารบิก คำบรรยายและรายละเอียดต่าง ๆ อยู่ด้านล่างของรูปภาพ ปรับรูปแบบให้เหมาะสมกับการตีพิมพ์แบบขาว-ดำ หรือ Greyscale
เนื้อหา	ใช้ตัวหนังสือแบบ TH SarabunPSK ขนาด 14 พอยท์ จัดเนื้อหาตามรูปแบบบทความวิจัย (Research Article) บทความวิชาการ (Academic Article) หรือบทความปริทัศน์ (Review Article) หน่วยที่ใช้ให้เป็นไปตามรูปแบบสากล ศัพท์ภาษาอังกฤษในวงเล็บให้ใช้ตัวพิมพ์เล็กทั้งหมดยกเว้นชื่อเฉพาะ หากมีสมการให้ใช้ Equation Editor โดยจัดให้อยู่ในตำแหน่งกลางหน้ากระดาษ พร้อมระบุหมายเลขสมการ
ตาราง	หมายเลขตารางให้เป็นเลขอารบิก คำบรรยายและรายละเอียดต่าง ๆ อยู่ด้านบนของตาราง
เอกสารอ้างอิง	เป็นรายชื่อเอกสารที่ใช้อ้างถึงในบทความ โดยให้แปลเป็นภาษาอังกฤษทุกรายการ และจัดรูปแบบอ้างอิงตามระบบ APA 6 th edition

รูปแบบการอ้างอิง

1. การอ้างอิงในเนื้อหา (In-text citation)

กรณีอ้างอิงชื่อผู้แต่งก่อนข้อความ	ชื่อผู้แต่ง (ปีที่พิมพ์).....
ตัวอย่าง	Kelly (2004) แสดงให้เห็นว่า..... Saikaew & Kaewsarn (2009) ได้ศึกษาเกี่ยวกับ..... Lui et al. (2000) พบว่า..... Saikaew & Kaewsarn (2009) และ Lui et al. (2000) พบว่า.....
กรณีอ้างอิงชื่อผู้แต่งท้ายข้อความ	 (ชื่อผู้แต่ง, ปีที่พิมพ์)
ตัวอย่าง	 (Kelly, 2004) (Saikaew & Kaewsarn, 2009) (Lui et al., 2000) (Saikaew & Kaewsarn, 2009; Lui et al., 2000)

2. การอ้างอิงในส่วนท้ายบทความ (References)

2.1 อ้างอิงจากหนังสือ (Books)

รูปแบบ	ชื่อผู้เขียน. (ปีที่พิมพ์). ชื่อหนังสือ . (ครั้งที่พิมพ์). สถานที่พิมพ์: สำนักพิมพ์.
ตัวอย่าง	Crawley, R. B., Dockery, L. M., Branson, T. S., Carmichael, L. E., Carson, J. C., Findlay, A. F., & Smith, D. M. (2015). Manor houses of the early 1900s . London, England: Taylor & Francis.

รูปแบบ	ชื่อผู้แต่ง. (ปีพิมพ์). ชื่อบทความ. ชื่อวารสาร, ปีที่(ฉบับที่), หน้าแรก-หน้าสุดท้าย.
ตัวอย่าง	Yingsanga, P., & Mathurasa, L. (2009). Yellowing development of Chinese Kale (Brassica oleracea var. alboglabra). Phranakhon Rajabhat Research Journal: Science and Technology , 14(1), 76-90. (In Thai)
	Morrisa, G.A., Fosterb, T.J., & Hardinga, S.E. (2000). The effect of the degree of esterification on the hydrodynamic properties of citrus pectin. Food Hydrocolloids , 14(3), 227-235.

รูปแบบ	ชื่อผู้แต่ง. (ปีพิมพ์). ชื่อวิทยานิพนธ์ . (ระดับวิทยานิพนธ์). มหาวิทยาลัย, เมืองที่ตั้งมหาวิทยาลัย.
ตัวอย่าง	Caprette, C.L. (2005). Conquering the cold shudder: The origin and evolution of snake eyes . (Doctoral dissertation). Ohio State University, Columbus, OH.

รูปแบบ	ชื่อผู้แต่ง. (ปีพิมพ์). ชื่อเรื่อง (ประเภทของเอกสาร). สถานที่พิมพ์: สำนักพิมพ์.
ตัวอย่าง	Tayama, T. (2006). Velocity influence on detection and prediction of changes in color and motion direction (Report No. 38). Sapporo, Japan: Psychology Department, Hokkaido University.

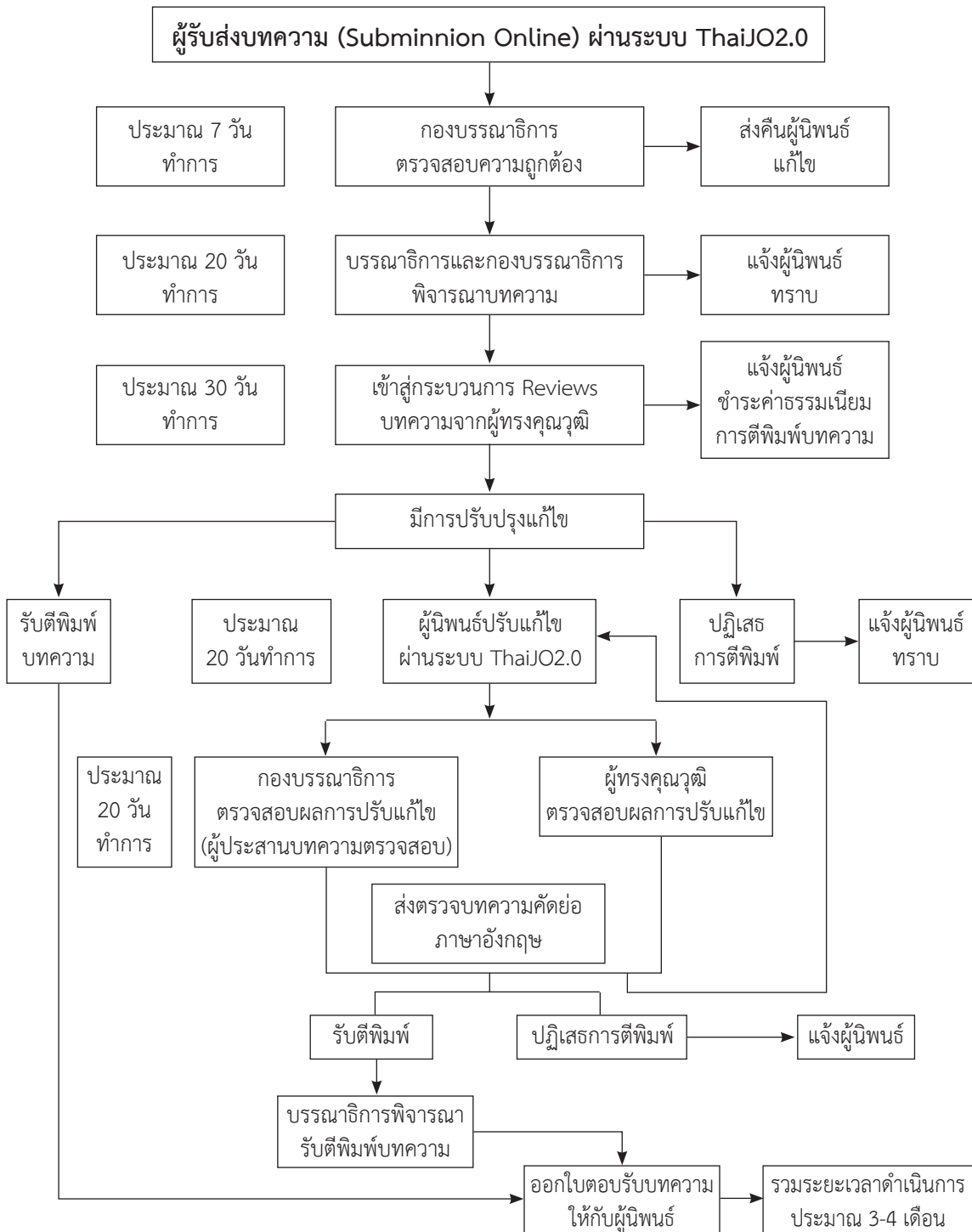
รูปแบบ	ชื่อผู้แต่งในบท. (ปีพิมพ์). ชื่อเรื่อง . ใน ชื่อบรรณาธิการ, (บรรณาธิการ), ชื่อการประชุม (หน้าแรก-หน้าสุดท้าย). สถานที่พิมพ์: สำนักพิมพ์.
ตัวอย่าง	Deci, E.L., & Ryan, R.M. (1991). A motivational approach to self: Integration in personality . In R. Dienstbier (Ed.), Nebraska Symposium on motivation: Vol. 38 Perspectives on motivation (237-288). Lincoln, NM: University of Nebraska Press.

รูปแบบ ชื่อผู้แต่ง. (ปีพิมพ์). **ชื่อเรื่อง**. Retrieved from <http://.....> [ไ้วันที่สืบค้น].

ตัวอย่าง Centers for Disease Control and Prevention. (2003). **Take charge of your diabetes**. Retrieved from <http://www.cdc.gov/diabetes /pubs/paf/ted.pdf> [2015, 25 Oct.]

รูปแบบ	ชื่อผู้ให้สัมภาษณ์. (ปีที่ให้สัมภาษณ์, วัน เดือน). สัมภาษณ์. ตำแหน่งผู้ให้สัมภาษณ์. หน่วยงาน.
ตัวอย่าง	Phae-ngam, W. (2016, 10 Jan.). How to write a good research article. Assistant Professor. Faculty of Science and Technology. Phranakhon Rajabhat University.

ขั้นตอนการพิจารณาบทความ วารสารวิจัยราชภัฏพระนคร สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี



หมายเหตุ: ทางวารสารขอสงวนสิทธิ์ที่จะเรียงเรียงและอาจปรับปรุงการนำเสนอบทความตามความเหมาะสม

รูปแบบบทความเพื่อส่งตีพิมพ์ในวารสารวิจัยราชภัฏพระนคร สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (ภาษาไทย)

ชื่อเรื่องภาษาไทย (TH SarabunPSK ขนาด 16pt. ตัวหนา)

ENGLISH TITLE (TH SarabunPSK 16pt. bold)

ชื่อ-สกุล ผู้แต่งบทความ^{1*} ชื่อ-สกุล ผู้แต่งบทความ² (TH SarabunPSK ขนาด 14pt. ตัวปกติ)

¹ชื่อหน่วยงานที่สังกัด (TH SarabunPSK ขนาด 12pt. ตัวปกติ)

²ชื่อหน่วยงานที่สังกัด (TH SarabunPSK ขนาด 12pt. ตัวปกติ)

Author ^{1*}, Author ² (TH SarabunPSK 14pt. normal)

¹Affiliation (TH SarabunPSK 12pt. normal)

²Affiliation (TH SarabunPSK 12pt. normal)

*E-mail: address@mailservice.com (TH SarabunPSK 12pt. normal)

Received: xx-xx-xx

Accepted: xx-xx-xx

Published: xx-xx-xx

บทคัดย่อ (TH SarabunPSK ขนาด 14pt. ตัวหนา)

เนื้อหาบทคัดย่อในกรณีเป็นบทความภาษาไทยต้องมีบทคัดย่อเป็นภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ยกเว้น
บทวิจารณ์หนังสือ บทคัดย่อควรมีย่อหน้าเดียว ไม่ควรเกิน 250 คำ บทคัดย่อควรกล่าวถึงวัตถุประสงค์หลักของบทความ
ผลลัพธ์หรือ สรุปผลที่ได้จากการทำวิจัย คำสำคัญที่เป็นภาษาไทยต้องมีเครื่องหมายจุลภาค (,) ระหว่างคำ

(TH SarabunPSK ขนาด 14pt. ตัวปกติ).....

คำสำคัญ: คำสำคัญ1 คำสำคัญ2 คำสำคัญ3 คำสำคัญ4 คำสำคัญ5 (TH SarabunPSK ขนาด 14pt. ตัวปกติ)

ABSTRACT (TH SarabunPSK 14pt. bold)

For a Thai article, an abstract in English must accompany the Thai version. The abstract should contain a single paragraph and its length should not exceed 250 words. It should be prepared in concise statement of objectives and summary of important results.

Keywords: keyword1, keyword2, keyword3, keyword4, keyword5 (TH SarabunPSK 14pt. normal)

บทนำ (TH SarabunPSK ขนาด 14pt. ตัวหนา)

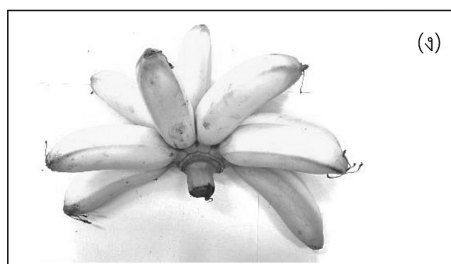
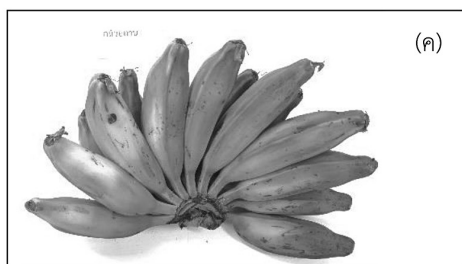
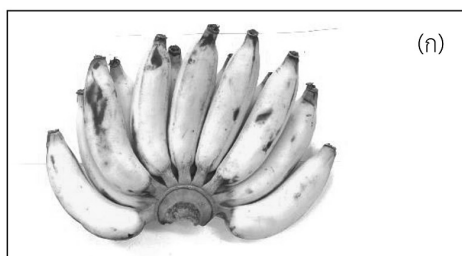
เนื้อหา (TH SarabunPSK ขนาด 14pt. ตัวปกติ).....

วิธีการ (TH SarabunPSK ขนาด 14pt. ตัวหนา)

เนื้อหา (TH SarabunPSK ขนาด 14pt. ตัวปกติ).....

ผลการทดลองและวิจารณ์ (TH SarabunPSK ขนาด 14pt. ตัวหนา)

เนื้อหา (TH SarabunPSK ขนาด 14pt. ตัวปกติ).....



ภาพที่ 1 ชื่อภาพ....(ก)..... (ข)..... (ค)..... (ง).....

ตารางที่ 1 ชื่อตาราง

เวลาที่ใช้ (นาท)	ความดัน (mbar)				ความดันเฉลี่ย (mbar)
	วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 3	วันที่ 4	
90	0.000061	0.000053	0.000037	0.000048	0.000050
95	0.000055	0.000053	0.000038	0.000044	0.000048
100	0.000055	0.000052	0.000037	0.000048	0.000048

หมายเหตุ : (TH SarabunPSK ขนาด 12pt. ตัวปกติ)

สรุป (TH SarabunPSK ขนาด 14pt. ตัวหนา)

เนื้อหา (TH SarabunPSK ขนาด 14pt. ตัวปกติ).....

.....

กิตติกรรมประกาศ (TH SarabunPSK ขนาด 14pt. ตัวหนา) (อาจมีหรือไม่มีก็ได้)

เนื้อหา (TH SarabunPSK ขนาด 14pt. ตัวปกติ).....

.....

เอกสารอ้างอิง (TH SarabunPSK ขนาด 14pt. ตัวหนา)

เนื้อหา (TH SarabunPSK ขนาด 14pt.).....

.....

.....

รูปแบบบทความเพื่อส่งตีพิมพ์ในวารสารวิจัยราชภัฏพระนคร สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (ภาษาอังกฤษ)

ENGLISH TITLE (TH SarabunPSK 16pt. bold)

Author 1*, Author 2 (TH SarabunPSK 14pt. normal)

¹Affiliation (TH SarabunPSK 12pt. normal)

²Affiliation (TH SarabunPSK 12pt. normal)

*E-mail: address@mailservice.com (TH SarabunPSK 12pt. normal)

Received: xx-xx-xx

Accepted: xx-xx-xx

Published: xx-xx-xx

ABSTRACT (TH SarabunPSK 14pt. bold)

The abstract should contain a single paragraph and its length should not exceed 250 words. It should be prepared in concise statement of objectives and summary of important results.

Keywords: keyword1, keyword2, keyword3, keyword4, keyword5 (TH SarabunPSK 14pt. normal)

Introduction (TH SarabunPSK 14pt. bold)

(TH SarabunPSK 14pt. normal).....

Methods (TH SarabunPSK 14pt. bold)

(TH SarabunPSK 14pt. normal).....

Results and Discussions (TH SarabunPSK 14pt. bold)

(TH SarabunPSK 14pt. normal).....

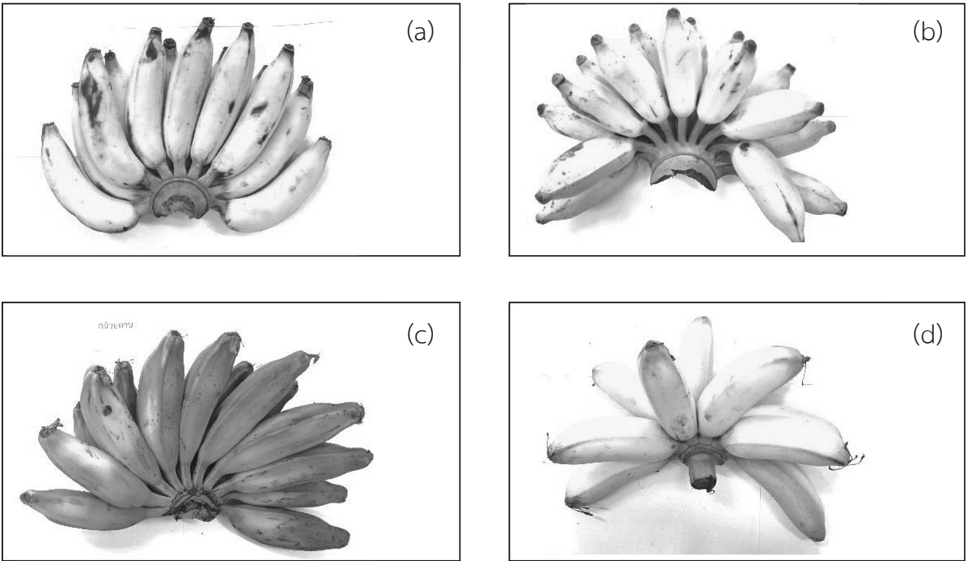


Figure 1(a)..... (b)..... (c)..... (d).....

Table 1 table name

Time (minuts)	Pressure (mbar)				Avg. Pressure (mbar)
	Day 1	Day 2	Day 3	Day 4	
90	0.000061	0.000053	0.000037	0.000048	0.000050
95	0.000055	0.000053	0.000038	0.000044	0.000048
100	0.000055	0.000052	0.000037	0.000048	0.000048

Note: (TH SarabunPSK 12pt. normal)

Conclusions (TH SarabunPSK 14pt. bold)

(TH SarabunPSK 14pt. normal).....
.....

Acknowledgement (TH SarabunPSK 14pt. bold) (optional)

(TH SarabunPSK 14pt. normal).....
.....

References (TH SarabunPSK 14pt. bold)

(TH SarabunPSK 14pt.).....
.....

จริยธรรมในการตีพิมพ์ Publication Ethics

วารสารวิจัยราชภัฏพระนคร สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมีมาตรฐานทางจริยธรรมในการตีพิมพ์บทความ
ดังนี้

➤ จริยธรรมของบรรณาธิการ

1. บรรณาธิการมีหน้าที่ พิจารณาความสอดคล้องของเนื้อหาบทความกับวัตถุประสงค์และขอบเขตของวารสาร
2. บรรณาธิการมีหน้าที่ตรวจสอบคุณภาพและพิจารณาความถูกต้องของบทความร่วมกับกองบรรณาธิการ และผู้ทรงคุณวุฒิก่อนการตีพิมพ์
3. บรรณาธิการต้องไม่มีส่วนได้ส่วนเสียกับผู้แต่ง ผู้ประเมินบทความ และบุคคลอื่นๆ ที่มีส่วนเกี่ยวข้อง
4. บรรณาธิการต้องปฏิบัติตามกระบวนการและขั้นตอนต่าง ๆ ของวารสารอย่างเคร่งครัด
5. บรรณาธิการต้องรักษาความลับของผู้แต่ง
6. บรรณาธิการมีหน้าที่รักษามาตรฐานของวารสาร รวมถึงพัฒนาวารสารให้มีคุณภาพอยู่เสมอ

➤ จริยธรรมของผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ

1. ผู้ทรงคุณวุฒิต้องตระหนักถึงความเชี่ยวชาญตามศาสตร์ของตนเองในการรับประเมินบทความ
2. ผู้ทรงคุณวุฒิต้องไม่มีส่วนได้ส่วนเสียกับผู้แต่ง
3. ผู้ทรงคุณวุฒิต้องตรวจสอบความซ้ำซ้อนของบทความกับงานตีพิมพ์อื่นๆ
4. ผู้ทรงคุณวุฒิต้องประเมินและให้ข้อเสนอแนะตามหลักเกณฑ์ทางวิชาการโดยปราศจากอคติ
5. ผู้ทรงคุณวุฒิควรตรงต่อเวลาในการส่งผลการประเมินบทความ
6. ผู้ทรงคุณวุฒิควรรักษาความลับของผู้แต่งบทความ

➤ จริยธรรมของผู้แต่งบทความ

1. บทความที่ส่งจะต้องเป็นบทความที่ไม่เคยมีการตีพิมพ์หรือเผยแพร่ที่ไหนมาก่อน และต้องไม่คัดลอกผลงาน
ผู้อื่นโดยขาดการอ้างอิง
2. หากบทความมีการทดลองเกี่ยวกับมนุษย์หรือสัตว์ ผู้แต่งต้องปฏิบัติตามหลักจริยธรรมในการวิจัยและข้อ
กฎหมายที่เกี่ยวข้อง
3. ผู้แต่งควรระบุแหล่งทุนที่สนับสนุนการวิจัย
4. ผู้แต่งควรเคารพความคิดเห็นทางวิชาการของผู้อื่น และแก้ไขตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิ
5. ผู้แต่งจะต้องไม่นำส่วนใดส่วนหนึ่งของเนื้อหาในบทความไปตีพิมพ์เผยแพร่ยังแหล่งอื่นๆ
6. ชื่อผู้แต่งที่ปรากฏในบทความต้องเป็นผู้ที่มีส่วนในผลงานวิชาการนี้จริง